

TTÜ Tartu kolledž

**JÄIGA PLASTVAHUST SOOJUSTUSEGA
PUITSÕRESTIKTARINDITE SOOJUS- JA
NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS
HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF TIMBER-FRAME
WALL WITH RIGID FOAM INSULATION
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Roland Rokka

Üliõpilaskood: 153839EAEI

Üliõpilane: Tauri Udras

Üliõpilaskood: 153880EAEI

Juhendaja: Kristo Kalbe, ekspert

Kaasjuhendaja: Prof. Targo Kalamees

Tartu 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Oleme koostanud lõputöö iseseisvalt. Tööde jaotus on esitatud eessõna järel.

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.

"....." 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2020

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2020 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

TTÜ Inseneriteaduskond

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Roland Rokka, 153839EAEI (nimi, üliõpilaskood)

Üliõpilane: Tauri Udras, 153880EAEI (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: EAEI02/12 Tartu, Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

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

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Jäiga plastvahust soojustusega puitsõrestiktartarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus

(inglise keeles) Hygrothermal performance of timber-frame wall with rigid foam insulation

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Jäiga plastvahuga soojustatud tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamine ehitusaegse märgumise korral
2. Jäiga plastvahuga soojustatud tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamine erinevate niiskuskoormuste põhjal
3. Täpsete arvutusmudelite koostamine tarindite pikaajaliseks hallitusindeksi leidmiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Testseinte ehitus ja montaaž	16.12.19
2.	Mõõtmisandemte analüüs ja modelleerimine	15.05.20
3.	Lõputöö vormistamine	29.05.20

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "29" mai 2020.a

Üliõpilane: Roland Rokka "29" mai 2020.a
/allkiri/

Üliõpilane: Tauri Udras "29" mai 2020.a
/allkiri/

Juhendaja: Kristo Kalbe "29" mai 2020.a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Targo Kalamees "29" mai 2020.a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
1. SISSEJUHATUS.....	9
1.1 Ülevaade eelnevatest uuringutest	12
1.1.1 Puitkarkassi märgumine	12
1.1.2 Tingimused ehitamisest püstitamiseni	13
1.1.3 Plastvahust soojustus.....	14
2. MEETOD	16
2.1 Uuritavad tarinditüübid	16
2.1.1 Testsein VS-1.....	17
2.1.2 Testsein VS-2.....	18
2.1.3 Testsein VS-3.....	19
2.1.4 Testsein VS-4.....	20
2.1.5 Testsein VS-5.....	20
2.1.6 Testsein VS-6.....	21
2.2 Niiskusklassid	22
2.3 Liginullenergia testhoone.....	23
2.4 Mõõtmine	25
2.4.1 Puidu niiskussisalduse mõõteseade	25
2.4.2 Suhtelise õhuniiskuse- ja temperatuuriandurid	27
2.4.3 Andurite asetus testseintes	29
2.5 Testseinte ehitus ja montaaž	31
2.6 Soojus ja niiskuslevi modelleerimine.....	34
2.6.1 Soojuslevi arvutustarkvara	34
2.6.2 Soojus- ja niiskuslevi arvutustarkvara	34
2.6.3 Mudeli kalibreerimise metoodika	36
2.6.4 Testseinte VS-1 ja VS-2 kalibreerimine.....	36
2.6.5 Testseina VS-3 kalibreerimine	37
2.6.6 Testseina VS-4 kalibreerimine	38

2.6.7 Testseinte VS-5 ja VS-6 kalibreerimine.....	38
2.6.8 Materjalide omadused	39
2.6.9 Pikaajaline simulatsioon.....	42
2.7 Toimivuskriteeriumid	43
2.7.1 Puidu niiskussisaldus.....	43
2.7.2 Suhteline õhuniiskus	44
2.7.3 Hallituse indeks	44
3. TULEMUSED JA ARUTELU	46
3.1 Tulemused mõõtmistest	46
3.1.1 Puidu niiskus.....	46
3.1.2 Suhteline õhuniiskus ja temperatuur	49
3.2 Tulemused mudelite kalibreerimisest	60
3.2.1 VS-1.1	60
3.2.2 VS-1.2	62
3.2.3 VS-2.1	63
3.2.4 VS-2.2	65
3.2.5 VS-3.1	66
3.2.6 VS-3.2	68
3.2.7 VS-4.1	69
3.2.8 VS-4.2	70
3.2.9 VS-5.1	72
3.2.10 VS-5.2.....	74
3.2.11 VS-6.1.....	75
3.2.12 VS-6.2.....	77
3.2.13 Järeldused kalibreerimisest	78
3.3 Tulemused pikaajalisest modelleerimisest.....	80
3.3.1 VS-1	80
3.3.2 VS-2	82
3.3.3 VS-3	85
3.3.4 VS-4	88

3.3.5 VS-5	91
3.3.6 VS-6	94
3.4 Hallituse tulemuste hindamine	97
4. JÄRELDUSED	98
5. KOKKUVÕTE.....	101
6. SUMMARY	102
7. KASUTATUD KIRJANDUS.....	103
LISAD	107
Lisa 1 Tarinditüüpide ETA kalkulatsioon	108
Lisa 2 Puidu elektrilise takistuse kõverad	114
GRAAFILINE OSA.....	115

EESSÕNA

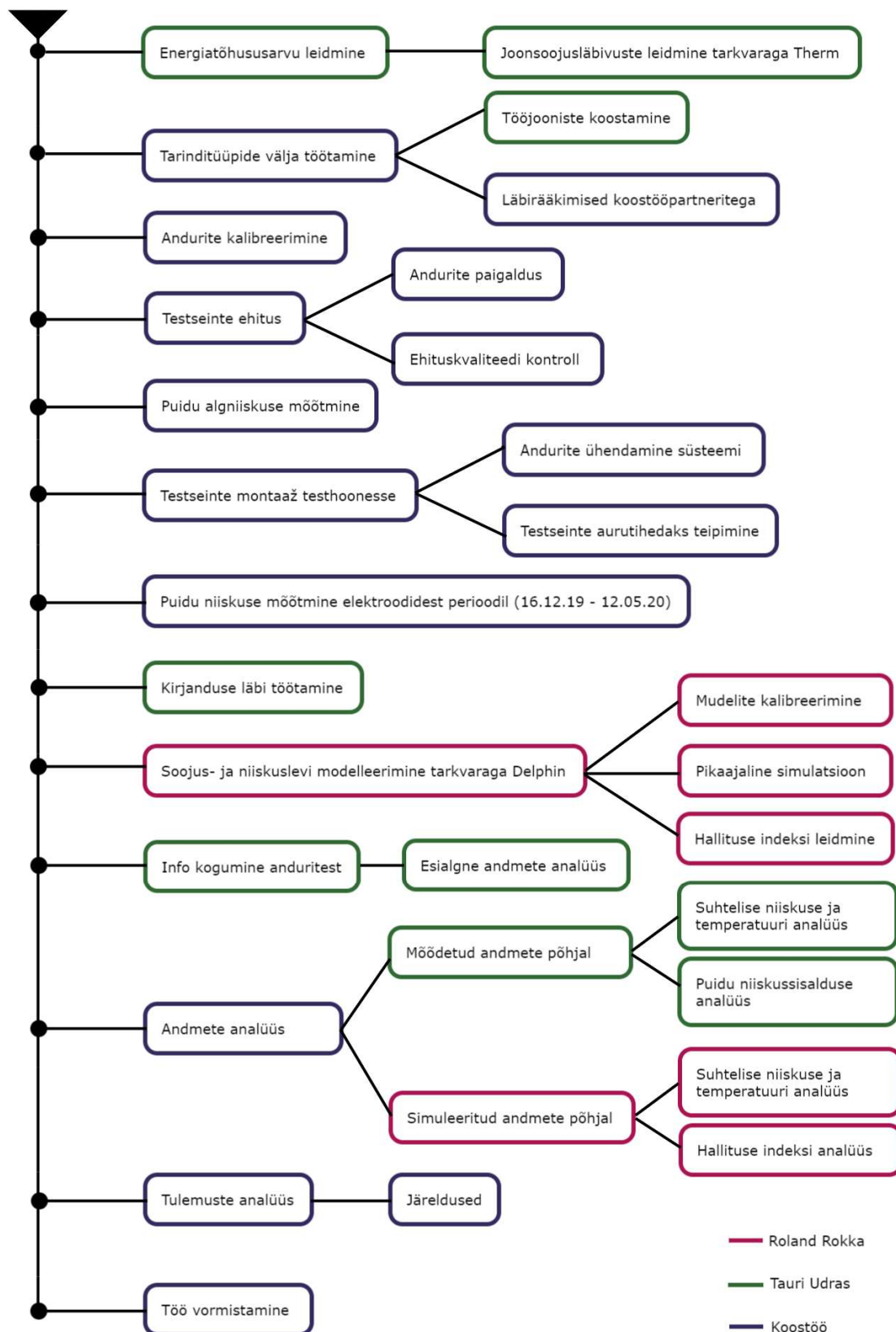
Käesoleva magistritöö teema algatus pärineb puitmajatootjalt EstNor OÜ. Töö eesmärgiks on välja selgitada jäiga plastvahust soojustusega puittarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus kuiva ning märgunud konstruktsiooni korral erinevate niiskustehniliste juures. Katsekehad ehitati EstNor OÜ majatehase, polüuretaanvahu paigaldaja Pures Paigalduse OÜ, polüisotsüanuraat soojustusplaatide tootja Kingspan Insulation OÜ, õhu- ja aurutõkke materjalide tootja SIGA finantseerimisel. Montaažitööd tegi EstNor OÜ.

Magistritöö käigus tehti katse, mis viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoones. Soojus- ja niiskuslevi modelleerimiseks on kasutatud 2D-soojuslevi modelleerimistarkvara Therm ja dünaamilist õhu-, soojus- ja niiskuslevi arvestavat simulatsioonitarkvara Delphin. Töös on kirjeldatud andurite kalibreerimist ja paigaldamist, katseinte ehitamist ja monteerimist, andmete kogumist anduritest, soojuslevi uurimist, testseinte kalibreerimismudelite koostamist, pikaajalise simulatsiooni loomist, mõõtmistest ja modelleerimisest saadud andmete analüüsi ja hallituse riskide hindamist.

Käesolev lõputöö keskendub jäiga plastvahust soojustusega madal- ja liginullenergiahoonete puitsõrestikust välispiirdetarindite soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele. Uurimuse eesmärk on analüüsida polüuretaan (edaspidi PUR) ja polüisotsüanuraat (edaspidi PIR) soojustuse soojustehnilist toimivust puitsõrestik tarindis. Lisaks analüüsitakse, kas samad tarinditüübid on niiskustehniliselt toimivad ka peale ehituse või ekspluatatsiooni käigus märgumist. Tarindite toimivuse hindamiseks määratakse hallituse indeks. Erinevate puittarindite uurimisel keskendutakse majatehastes valmivatele konstruktsioonidele, mis on soojustatud vahtisolatsiooni materjalidega.

Magistritöö autorid tänavad abi ja nõuannete eest juhendajat Kristo Kalbet, professor Targo Kalameest ja testhoone laboriinseneri Peeter Linnast. Lisaks tänavad autorid meeldiva koostöö eest puitmajatehast ning ehitusmaterjalide tarnijaid.

Võtmesõnad: PUR, PIR, hallitus, alg- ja ehitusniiskuse väljakuivamine, niiskuslevi modelleerimine, magistritöö.



Joonis. Magistrantide tööjaotusskeem

1. SISSEJUHATUS

Puitu ning puidust materjale on ühiskonnad üle maailma kasutanud tuhandeid aastaid. Võrreldes raudbetooniga on puidust majade ning hoonete ehitamine keskkonnasäästlikum ning ehitusprotsess on väiksema energiakuluga. Inimeste keskkonnateadlikkuse tõusuga ning kliima muutustest tulenevate probleemide esile kerkimisega on taas üha rohkem hakatud ehituses kasutama puitkonstruktsioone [1], [2]. Kuna aga puidu mehaanilised omadused muutuvad tulenevalt materjali ümbritsevast keskkonnast, nagu näiteks ümbritsev õhuniiskus ja temperatuur, eeldab puidu kasutamine häid teadmisi puidust [1]–[3]. Et tagada puitkonstruktsioonide pikk eluiga, konstruktsiooni ohutus ning inimestele sobiv keskkond puithoonetes, on tähtis teada, kuidas puit käitub erinevates keskkonnatingimustes [4].

Tagamaks tõhusat, kaalutletud, mõistlikku ning jätkusuutlikku energia kasutamist on Euroopa Liidus ehitiste ja hoonete energiatõhususe direktiividega kokku lepitud, et kõik uued hooned, mis rajatakse peale 31.12.2019 peavad olema vastavuses liginullenergiahoonete (ingl.k. *nearly zero energy buildings* ehk *nZEB*) nõuetega [5]. Lähtudes eelpooltoodud direktiividest ning Eesti Vabariigis kehtivast Ehitusseadustikust, on Eesti Vabariigi Valitsus kehtestanud määruse nr. 63 „Hoonete energiatõhususe miinimumnõuded“ [6], [7]. Kehtivas määruses on sätestatud energiatõhususe miinimumnõuded energiatõhususarvuna (ETA).

Hoonete energiatõhususe miinimumnõuete määruse lisas 2 (vt Tabel 1.1) on toodud 1. jaanuarist 2019 jõustunud määrusega kehtivad ETA piirväärtused liginullenergia-, madalenergia- ja oluliselt rekonstrueeritavate hoonetele.

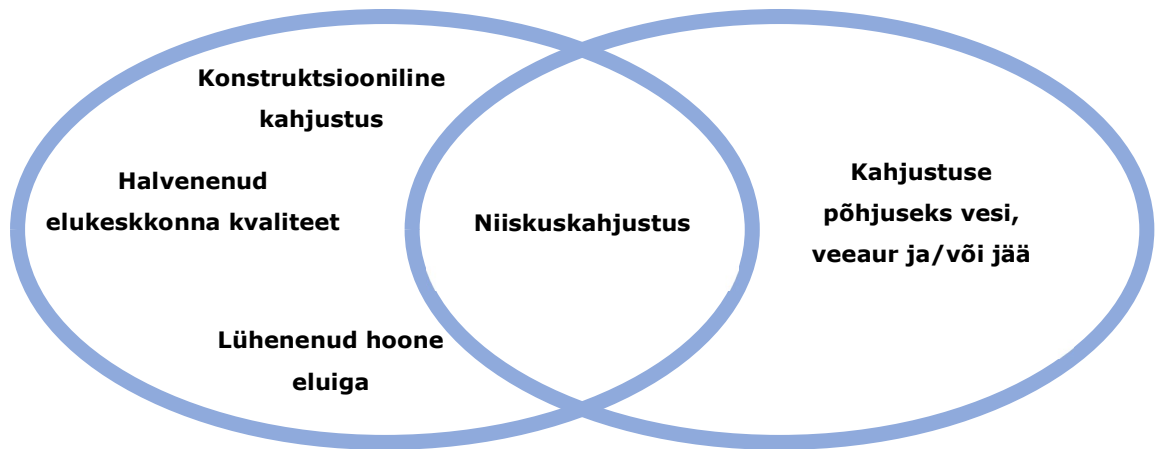
Tabel 1.1 Hoonete energiatõhususarvude piirväärtused [6]

Hoone tüüp	Energiatõhususarvu piirväärtused kWh/(m ² a)		
	Liginullenergiahooned	Madalenergiahooned	Oluliselt rekonstrueeritavad hooned
Väikeelamu köetava pinnaga < 120 m ²	145	165	185
Väikeelamu köetava pinnaga 120–220 m ² ja ridaelamu	120	140	160
Väikeelamu köetava pinnaga > 220 m ²	100	120	140
Korterelamu	105	125	150
Kasarmu	170	200	250
Kontorahoone	100	130	160
Majutushoone	145	170	220
Ärihoone	130	150	210
Avalik hoone	135	160	220
Kaubandushoone ja terminal	160	190	230
Haridushoone	100	120	160
Koolieelse lasteasutuse hoone	100	120	165
Ravihoone	100	130	170
Laohoone	65	80	100
Tööstushoone	110	140	170
Suure energiatarbega hoone	820	850	950

Kehtiva määruse nõuete täitmiseks tuleb projekteerida soojapidavaid välispiirdeid, mis aga suurendab konstruktsiooni paksust. Välispiire konstruktsiooni soojuslähivuse vähendamine $U=0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ pealt $U=0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ peale samade soojustusmaterjalide kasutamisel, suureneb konstruktsiooni paksus 200 mm. Varasem uuring on näidanud, et kui vähendada välispiirde soojuslähivust, muutub tarind niiskuskahjustustele tundlikumaks, sest pikeneb väljakuivamise aeg ning väheneb tarindit läbiv soojusvoog [8]. Väikese soojuslähivusega välispiirete projekteerimisel tuleks lähtuda põhimõttest, et energia säästmiseks tehtavad täiendused ja muudatused ei põhjustaks niiskuskahjustusest tulenevaid probleeme [9].

Niiskuskahjustuse definitsioon ütleb, et see on kahjustus, mis on põhjustatud otseselt veest, olgu selleks siis vesi gaasina, vedelikuna või tahkes olekus [10]. Kahjustuse saab liigitada niiskuskahjustuseks, kui see vastab kahele tingimusele:

- 1) kahjustus mõjutab konstruktsiooni toimimist, elukeskkonna kvaliteeti ning lühendab hoone eluiga
- 2) on otseselt põhjustatud veest (gaas/vedelik/tahke)[10].



Joonis 1.1 Tegurid, mis defineerivad niiskuskahjustuse [10]

Allergeenide pideval sattumisel hingamisteedesse võib tekkida inimesel immuunkompleks, mis väljendub näiteks gripilaadsete sümptomite või kopsupõletikuna. Seda tuntakse ka kui haige maja sündroomina (ingl. k. *sick building syndrome*) [11], [12].

Niiskuskahjustused saavad alguse enamasti halvast ja/või puudulikkust ehitus- ja projekteerimiskvaliteedist. Niiskuskahjustus hoones võib tekkida ka elanike valest käitumisest näiteks ebapiisavast ventilatsioonist või liigse niiskuse tekitamisest [13]. Lihtsaim viis hallituse tekke minimaliseerimiseks on niiskuse leviku takistamine [14], [15]. Projekteerimise käigus läbi mõeldud lahendused takistavad olulisel määral hallituse teket ja levikut. Puitsõrestik majade ehitamine väliskeskkonnale avatud tingimustes, on suurim risk niiskuskahjustuste tekkeks [16]. Vihmast märgunud puitelemendid tuleb enne n-ö kinni ehitamist (teiste ehitusmaterjalidega katmist) ära kuivatada [16]. Platsil ehitatavaid puitkarkass hooneid on kõige lihtsam kaitsta sademete eest ehitustelkidega [16]–[18]. Ehitustelkide püstitamine on aga ehitusettevõtete jaoks suur kuluallikas.

Eeltoodetud elementidest või moodulitest majade ja hoonete püstitamine lühendab ehitusaega sademetele avatud keskkonnas [16]–[18]. Tehasemajade ehitamine on kvaliteetsem ning hilisemaid ehitusvigadest tulenevaid probleeme esineb harvem kui

platsil ehitatud puithoonete puhul [19]. Võrreldes traditsioonilise platsil ehitusega esineb tehastes toodetud majadel ehitusvigu 59% vähem. Tehastes tootmine vähendab hoone ehitamisele tehtavaid kulutusi [20].

Majatehaste soov on kasutada väiksemate soojuserijuhtivusega soojustusmaterjale. Selliste materjalidega on võimalik väiksema tarindi paksuse juures saavutada energiatõhususe miinimumnõuete väärtused. Õhemate tarindite ehitamisel on ka puidu kulu väiksem. Näiteks 1 m² puitkarkassi ehitamisel 45x195 mm asemel 45x145 mm puidust on puidu kokkuhoid ligikaudu 25%. Õhem ning seejuures kergem element või moodul võimaldab transportida ühe korraga rohkem ja/või suuremaid koguseid. Lisaks materjali kokkuhoiule ehitamisel ning transportimisel, väheneb industrialiseeritud tootmisega ka jääkmaterjalide hulk [20]. Pritsitavate polüuretaan vahtudega on võimalik lihtsustada tarindi ehitust. Varasemad uuringud on näidanud, et teatud tingimustel on võimalik veeauru difusiooni takistava PUR vahu puhul loobuda sisepinnale paigaldatavast aurutõkke membraanist või kilest [21].

Töö eesmärgiks on välja selgitada, millistel tingimustel on tagatud pritsitud plastvahuga soojustatud puitsõrestiktarindi soojus- ja niiskustehniline toimivus. Selleks on muudetud samade konstruktsioonikihtidega tarindite puitkarkassi ehitusaegset niiskust ning tarindi ekspluatatsiooniaegset niiskuskooormust. Eestis kehtivas standardis EVS-EN ISO 13788:2012 [22] on välja toodud hoonete niiskusklassid ja nendele vastavad niiskuslisad.

1.1 Ülevaade eelnevatest uuringutest

1.1.1 Puitkarkassi märgumine

Rootsi riiklikus katsetus- ja uurimisinstituudis katsetati [23], kuidas käituvad erinevad sidepuu lahendused lühiajalisele vee kontaktile vahetult enne teiste ehitusmaterjalidega katmist. Selleks testiti viit erinevat puitsõrestikseina alumise osa lahendust. Katseelemendid ehitati valmis 8 tunni jooksul peale märjutamist. Katseelemente märjutati kahel erineval viisil:

- 1) veevannis, 1-2 mm sügavusel;
- 2) veega pritsimine, umbes ühe minuti jooksul.

Kõikidelt seintelt tuvastati hallituse kasv. Peamiselt esines hallituse kasvu suunal, kus välja kuivamine oli takistatud näiteks vastu niiskustõket, vastu arutõket, vastu metalli või vastu niisket materjali. Seinakonstruktsiooni kuivamine suhtelise õhuniiskuseni 80-85% võttis aega 3-6 nädalat olenevalt konstruktsiooni tüübist ja ehitusest. Uuringu tulemused näitasid, et lühiajaline vihm ehituse käigus, millest tekkinud niiskus kuivab sama päeva jooksul, ei põhjusta hallituse tekke ohtu puitpindadel. Autorid nentisid ka, et hallituse olemasolu ei saa ainult silmaga määrata, vaid tuleb teha mikrobioloogiline analüüs [23]. Antud uuringus vaadeldi mineraalvillaga soojustatud märgunud elemente. Käesolevas töös uuritakse aga PUR ja PIR soojustusega elemente.

1.1.2 Tingimused ehitamisest püstitamiseni

Olsson, Mjörnell ja Johansson [9] uurisid kolme erineva puitmajatehase toodangut puitkarkassi ladustamisest tehase territooriumil kuni majade püsti panemiseni. Uuringu käigus seirati 24 erinevat eramaja ning 2 kortermaja. Uuringu läbiviimiseks tehtud tegevused:

- 1) mõõdeti suhtelist õhuniiskust ja õhu temperatuuri majatehastes puidu ladustamisaladel;
- 2) igas tehases vaadeldi vähemalt kolme erinevat puidu virna visuaalselt, et hinnata hallituse või määrdumise olemasolu ning võeti mikrobioloogilised proovid;
- 3) tehti suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmised elementide tootmisalas, transportimise ajal ning enne montaaži ehitusplatsil;
- 4) peale elementide montaaži paigaldati aknaposti külge andmeloger, mis kuvas hoone sisekliimat ehitustööde ajal;
- 5) külastati 16 ehitusplatsi ning kontrolliti erinevaid pindu, et tuvastada hallituse ja määrdumise olemasolu ning võeti mikrobioloogilised proovid.

Autorid tuvastasid, et kolmest majatehasest üks, pakkis oma toodangu PE-kilesse, kuid pakkimine ei olnud tehtud piisava hoolikusega ning niiskus pääses ikkagi kile alla. Enamus uuritud hoonete sidepuud olid ehituse ajal märgunud ning olid märjad veel paari nädala jooksul peale hoone püstitamist. Transpordi ja püstitamise ajal oli enamus elementide vahetus läheduses suhteline õhuniiskus alla 80% ning temperatuurid jäid vahemikku 0-13 °C. Valitsenud kliimatingimused ei kiirendanud hallituse teket. Elementidel, mis puutusid kokku vihmaga, oli hallituse kasv märgatav. Tehastest ja ehitusplatsidelt võetud mikrobioloogilised proovid näitasid, et kolmandikul proovidest esines hallituse kasvu, olenemata, kas proov oli niiske või kuiv. Ehitusprotsesside vaatlusel selgus, et hoone kandvad konstruktsioonid püstitatakse olenemata ilmast, välja arvatud tugeva tuule korral. Autorid tõdesid, et üheski hoones ei järgitud Roots

kehtivad nõudeid. Kõige kriitilisema kohana tõid autorid välja puitkarkasshoone sidepuu, mis on kõige enam niiskusega kokkupuutuv hoone osa [9].

1.1.3 Plastvahust soojustus

Kanadas läbi viidud uuringu käigus vaadeldi välispiirde niiskustehnilist toimivust, kui tarind on soojustatud pritsitava polüuretaanvahuga. Autorid tahtsid leida vastust küsimustele:

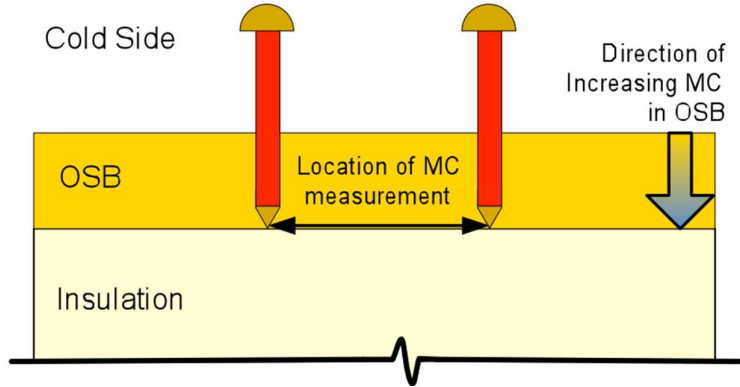
- 1) kas veeauru difusiooni takistavat PUR vahtu võib kasutada ilma aurutõkkekihita;
- 2) kas veeauru difusioonile avatud PUR vaht vajab aurutõkkekihti ainult ekstreemsetes ilmastikuoludes.

Projekti eesmärgiks oli pakkuda teaduslikult tõestatud lahendusi. Selleks ehitati katseelemendid, mis paigaldati Waterloo Ülikooli testhoonesse. Lisaks katsetele modelleeriti tarindeid WUFI Pro 3.3 arvutitarkvaraga. Testhoonesse püstitatud seinte kihtide kirjeldus on toodud tabelis (Tabel 1.2). Uuringu tulemusena said autorid kinnitust, et pritsitud PUR vahtu (veeauru takistav) võib kasutada ilma lisa aurutõkke kihita. 10000 HDD¹ väliskliima ja sisekliima suhtelise õhuniiskuse 50% juures oli PUR vahu (veeauru takistav) veeauru takistus sama hea või parem kui mineraalvilla ja PE-kile korral. PUR vahu (veeauru läbilaskev) veeauru takistus ei osutunud piisavaks. OSB sisepinna niiskussisaldus ületas pikaajaliselt 20% piiri. Samades kliimatingimustes PUR vahu (veeauru takistav) korral ei ületanud OSB sisepinna niiskussisaldus 20% piiri. Puidu niiskussisaldus 20% võib olla hallituse tekkeks vajaliku niiskussisalduse alahindamine [24]. Joonisel (Joonis 1.2) on näidatud OSB niiskussisalduse mõõtmise asukoht. Autorid tõid välja, et puitkarkassile ei ole vaja lisa aurutõkkekihti, sest puidu veeauru takistus on piisavalt suur. Autorid soovitasid edaspidistes töödes tihendada puit-puit liited. Katseseintes olnud puitkarkass jäi kuivaks nii talvel kui ka suvel [21]. Arvestades eeltoodetud elementide transportimisel ning montaažil tekkivaid deformatsioone, tuleks vaht-puit liitekohad tihendada.

¹ Köppeni kliimaklassifikatsiooni alusel on tegemist väliskliimaga Dfc, kus D tähistab külma kliimat, f tähistab kuiva perioodi puudumist ning c, et aastas on vähem kui neljal kuul keskmine temperatuur üle 10 °C. Sarnased kliimatingimused valitsevad Kesk- ja Põhja-Soomes [62]

Tabel 1.2 Waterloo Ülikooli katse testseinte ehitamiseks kasutatud materjalid [21]

Testsein N6/S6	Testsein N7/S7	Testsein N8/S8	Testsein N9/S9
Telliskivi	Telliskivi	Telliskivi	Telliskivi
Õhkvahe 38 mm	Õhkvahe 38 mm	Õhkvahe 38 mm	Õhkvahe 38 mm
Tuuletõkkekangas (Tyvek)	Tuuletõkkekangas (Tyvek)	Tuuletõkkekangas (Tyvek)	Pritsitud PUR (veeauru takistav) (tihedus 32 kg/m ³)
OSB 12 mm	OSB 12 mm	OSB 12 mm	Klaasplastiga kaetud tuuletõkkekips 12.5 mm
Puitkarkass 38x140 mm	Puitkarkass 38x140 mm	Puitkarkass 38x140 mm	Metallkarkass 38x89 mm
Pritsitud PUR (veeauru läbilaskev) 140 mm (tihedus 8 kg/m ³)	Pritsitud PUR (veeauru takistav) 115-140 mm (tihedus 32 kg/m ³)	Pritsitud PUR (veeauru takistav) 115-140 mm (tihedus 32 kg/m ³)	Mineraalvil 100 mm
Kipsplaat 12.5 mm	Kipsplaat 12.5 mm	Kipsplaat 12.5 mm	Kipsplaat 12.5 mm
Krunt (1 kiht) ja lateks värv (2 kihti)	Krunt (1 kiht) ja lateks värv (2 kihti)	Krunt (1 kiht) ja lateks värv (2 kihti)	Krunt (1 kiht) ja lateks värv (2 kihti)

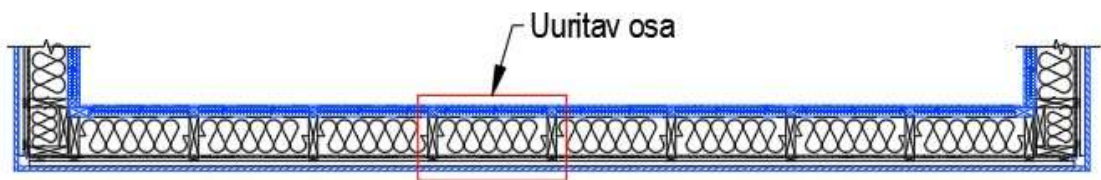


Joonis 1.2 Waterloo Ülikooli katses puidu niiskussisalduse mõõtmise elektroodide paigutamise skeem [21]

2. MEETOD

2.1 Uuritavad tarinditüübid

Katsekehade projekteerimisel lähtuti majatehastes enim levinud välispiirete konstruktsioonidest. Katsekehad konstrueeriti eesmärgiga jäljendada kahe karkassiposti vahelist ala (vt Joonis 2.1). Katsekehade projekteerimisel jälgiti Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testmajas olemasolevat konstruktsiooni. Olemasolevast raamistikust sõltuvalt valiti katseelementide mõõtudeks 880x880mm. Katseelementide raamid ehitati 15 mm paksusest kasevineerist. Uuritav kahe karkassiposti vahe paigutati vineerist kasti keskele. Et vähendada niiskuse levimist läbi katseelemendi külgede, kaeti vineerkasti küljed bituumen põhjaga alumiiniumlaminaadiga (vt Joonis 2.2), mille ekvivalentne difusioonitakistus S_d on suurem kui 1500 m.



Joonis 2.1 Katsekehade konstrueerimiseks valitud asukoht välispiirdes



Joonis 2.2 Vasakul bituumpõhjaga alumiiniumlaminaat, paremal alumiiniumlaminaadiga kaetud vineerist testseina raam

Katseelementide koostamisel lähtuti majatehastele huvipakkuvatest välispiirde konstruktsioonidest. Lähtuvalt majatehaste soovist vähendada tarinditele kuluvat puidu hulka, vähendati viiel testelemendil karkassipuidu laiust. Karkassiposti vahelise soojustusena kasutati pritsitavat vahtisolsiooni. Antud meede aitaks majatehastel

vähendada ehitamisele kuluvat aega ning annaks võimaluse soojusisolatsiooni paigaldamist automatiseerida. Kolmele testseina tüübile lisati välimine soojustus PIR soojustusplaadi näol, eesmärgiga imiteerida tootjapoolset paigaldusjuhendit energiatõhusatele hoonetele [25]. Lisaks eelpool toodud kriteeriumitele, pidid autorid arvestama ka hoone energiatõhususe määrusega ehk kas valitud tarinditüüpidega on võimalik püstitada madalenergia väikeelamu. Selleks teostati valitud konstruktsioonidele tüüpprojektist lähtuvalt energiatõhususe kalkulatsioonid. Tüüpprojektina on käsitletud antud töös kahepere elamut. Hoone suletud netopind standardse piirdekonstruktsiooniga on 187 m². Kortereid eraldab EI30 tuletõkkesein. Energiatõhususarvu leidmiseks kasutati Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi väikeelamu energiatõhususarvu kalkulaatorit [26]. Selleks koostati eri tarinditüüpide ja sõlmede soojusläbivuste leidmiseks kokku ligikaudu 100 2D soojuslevi mudelit arvutiprogrammiga Therm 7.7. Iga tarinditüübi kohta saadud tulemused on toodud tabelis (Tabel 2.1). ETA kalkulaatori tulemused on põhjalikumalt toodud lisas (Lisa 1). Saadud tulemustest lähtudes sobivad kõik pakutud tarinditüübid soojusläbivuse mõttes tüüpilise madalenergia väikemaja ehitamiseks, aga vaja on välja selgitada, milline on väljapakutud tarindite niiskustehniline toimivus, sh arvestada olukorraga, kus tarind on ehituse jooksul märgunud.

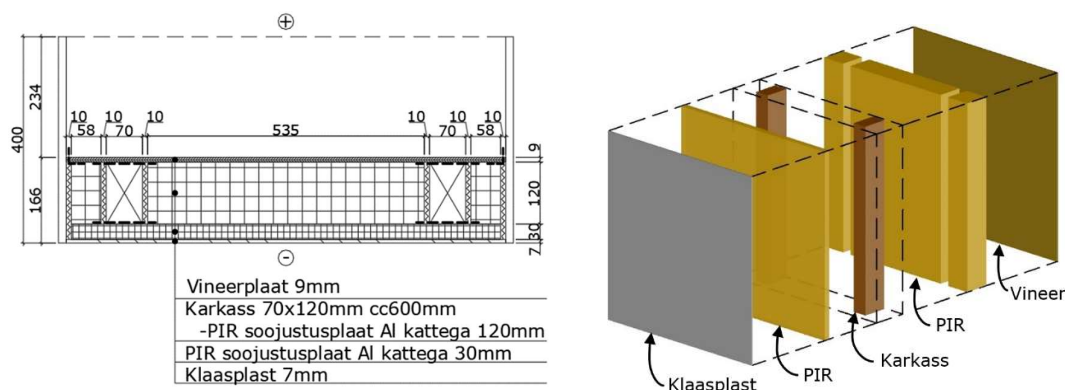
Tabel 2.1 Testseinte konstruktsiooni põhjal arvutatud ETA

Tarindi tüüp	ETA kWh/(m ² a)
VS-1	135
VS-2	138
VS-3	130
VS-4	136
VS-5	129
VS-6	128

2.1.1 Testsein VS-1

Erinevalt enamlevinud majatehase välispiirde karkassist 195x45 mm kasutati VS-1 tüüpi testseinte (vt Joonis 2.3) karkassina 120x70 mm tugevsorteeritud konstruktsioonipuitu tihedusega ~550 kg/m³ [27]. Karkassiposti vahe soojustati 120 mm paksuse alumiiniumlaminaadiga kaetud PIR soojustusplaadiga ($\lambda = 0,022$ W/mK [28]). Tootja poolsetele juhistele [29] vastavalt täideti puidu ja PIR plaadi vahe ühekomponentse polüuretaanvahuga ($\lambda = 0,0345$ W/mK ja $\mu = 20$ [30]) ning seestpoolt kaeti aurutõkketeibiga ($S_d = 8$ m [31]). Selleks, et vähendada kondenseerumise ohtu

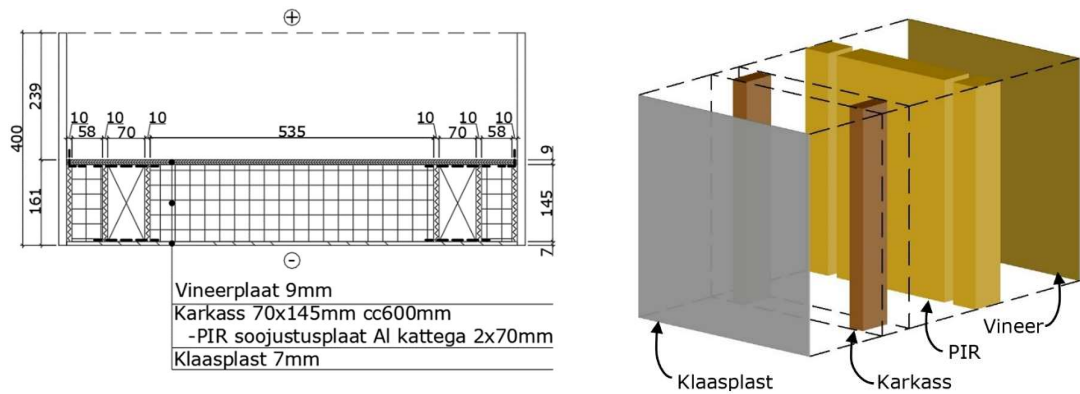
puidu välispinnal, lisati karkassi välispinnale 30 mm lisasoojustust. Lisasoojustusena kasutati samuti alumiiniumlaminaadiga PIR soojustusplaati ($\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$ [28]). Uudse lahendusena kasutati VS-1 tüüpi testseintel välisviimistlusena 7mm paksust klaasplastist viimistlusplaati. Testseinte sisemine külg viimistleti pinnatöötluseta 9mm paksuse vineerplaadiga (tihedus 700 kg/m^3 [32]).



Joonis 2.3 VS-1 horisontaallõige vasakul ja 3D illustratsioon paremal

2.1.2 Testsein VS-2

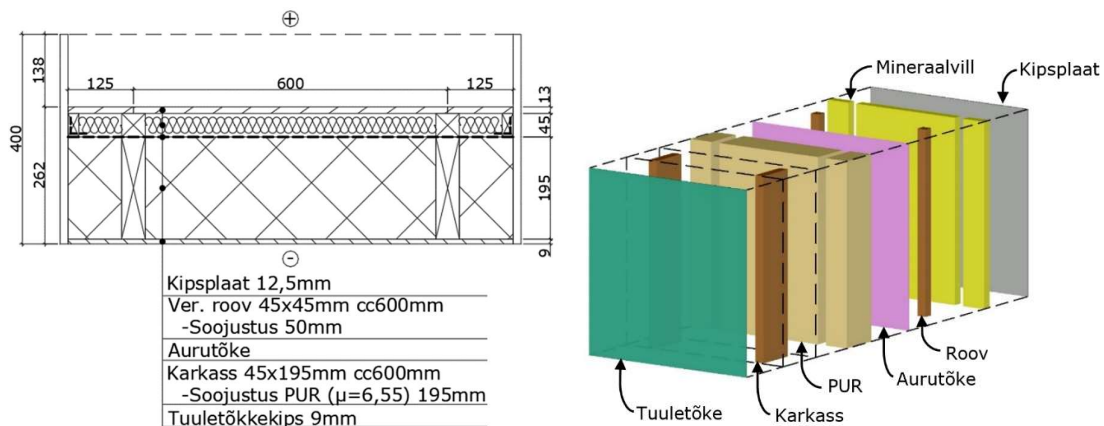
VS-2 tüüpi testseintes (vt Joonis 2.4) kasutati karkassina $145 \times 70 \text{ mm}$ tugevsorteeritud konstruktsioonipuitu tihedusega $\sim 550 \text{ kg/m}^3$ [27]. Karkassiposti vahe soojustati 140 mm ($2 \times 70 \text{ mm}$) alumiiniumlaminaadiga PIR soojustusplaadiga ($\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$ [28]). Tootja poolsetele juhiste [29] vastavalt täideti puidu ja PIR plaadi vahe ühekomponentse polüüretaanvahuga ($\lambda = 0,0345 \text{ W/mK}$ ja $\mu = 20$ [30]) ning seestpoolt kaeti aurutõkketeibiga ($S_d = 8 \text{ m}$ [31]). Uudse lahendusena kasutati VS-2 tüüpi testseintel välisviimistlusena 7 mm paksust klaasplastist viimistlusplaati. Testseinte sisemine külg viimistleti pinnatöötluseta 9 mm paksuse vineerplaadiga (tihedus 700 kg/m^3 [32]).



Joonis 2.4 VS-2 horisontaallõige vasakul ja 3D illustratsioon paremal

2.1.3 Testsein VS-3

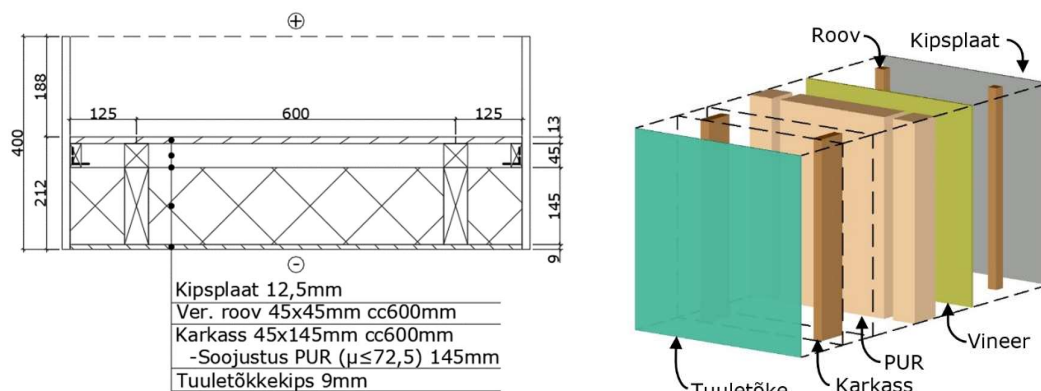
VS-3 tüüpi katseelementide (vt Joonis 2.5) puhul kasutati karkassina enamlevinud majatehastes kasutatavat 195x45 mm tugevsorteeritud konstruktsioonipuitu tihedusega $\sim 550 \text{ kg/m}^3$ [27]. Erinevalt tavapärasest mineraalvilla soojustusest soojustati VS-3 tüüpi katseelemendid polüuretaanvahuga. Soojustusmaterjalina kasutati pritsitavat veeauru difusioonile avatud PUR vahtu (keskmine tihedus $10,5 \text{ kg/m}^3$ ja $\mu = 6,55$ [33]). Tarindi siseküljele paigaldati 45 mm puitroov ning roovi vahele 50 mm mineraalvilla (tihedus 32 kg/m^3). Karkassi ja roovi vahele paigaldati aurutõkkekembraan ($S_d = 5 \text{ m}$ [31]), mille ääred teibiti aurutõkketeibiga ($S_d = 8 \text{ m}$ [31]) vineerkasti külge. Testseinte sisemine külg viimistleti 12,5 mm kipsplaadiga ($\mu = 10$ ja $S_d = 0,125 \text{ m}$ [34]). Välimisel küljel kasutati tuuletõkkematerjalina 9 mm tuuletõkkekipsi ($\mu = 10$ ja $S_d = 0,09 \text{ m}$ [35]), mille liitekohad vineerkastiga kaeti tuuletõkketeibiga. Testseina välimiseks viimistluseks kasutati puitvälisvoodrilaud.



Joonis 2.5 VS-3 horisontaallõige vasakul ja 3D illustratsioon paremal

2.1.4 Testsein VS-4

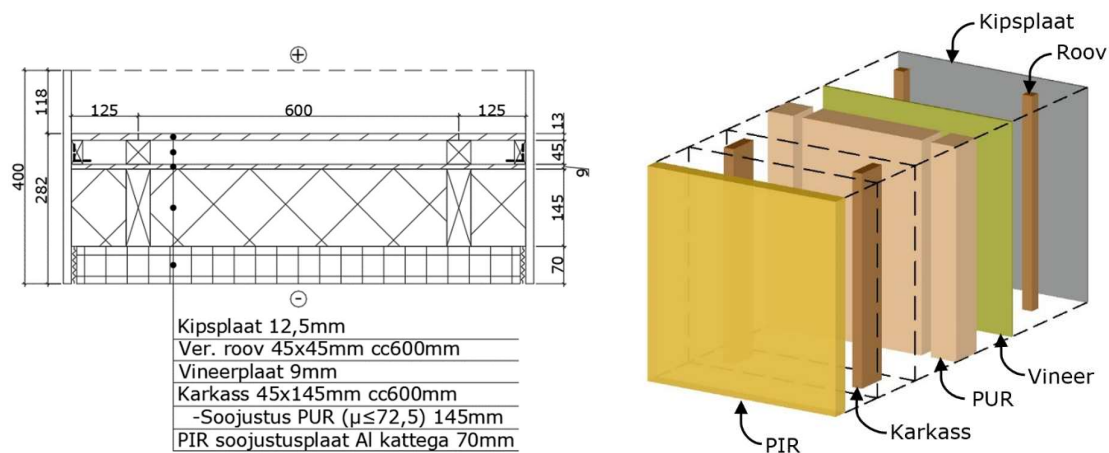
VS-4 tüüpi testseinte (vt Joonis 2.6) puhul kasutati karkassi materjalina 145x45 mm tugevsorteeritud konstruktsioonipuitu tihedusega $\sim 550 \text{ kg/m}^3$ [27]. Karkassipostide vahe soojustati pritsitava veeauru difusiooni takistava PUR vahuga (tihedus 37 kg/m^3 ja $\mu \leq 72,5$ [36]). Vahu paigaldamiseks kinnitati karkassi siseküljele vineerplaat paksusega 9mm ($\mu = 165$ ja $S_d = 1,485 \text{ m}$ [27]). Tarindi siseküljele paigaldati 45 mm puitroov. Testseinte sisemine külg viimistleti 12,5 mm kipsplaadiga ($\mu = 10$ ja $S_d = 0,125 \text{ m}$ [34]). Välimisel küljel kasutati tuuletõkkematerjalina 9 mm tuuletõkkekipsi ($\mu = 10$ ja $S_d = 0,09 \text{ m}$ [35]), mille liitekohad vineerkastiga kaeti tuuletõkketeibiga. Testseina välimiseks viimistluseks kasutati puitvälisvoodrilauda.



Joonis 2.6 VS-4 horisontaallõige vasakul ja 3D illustratsioon paremal

2.1.5 Testsein VS-5

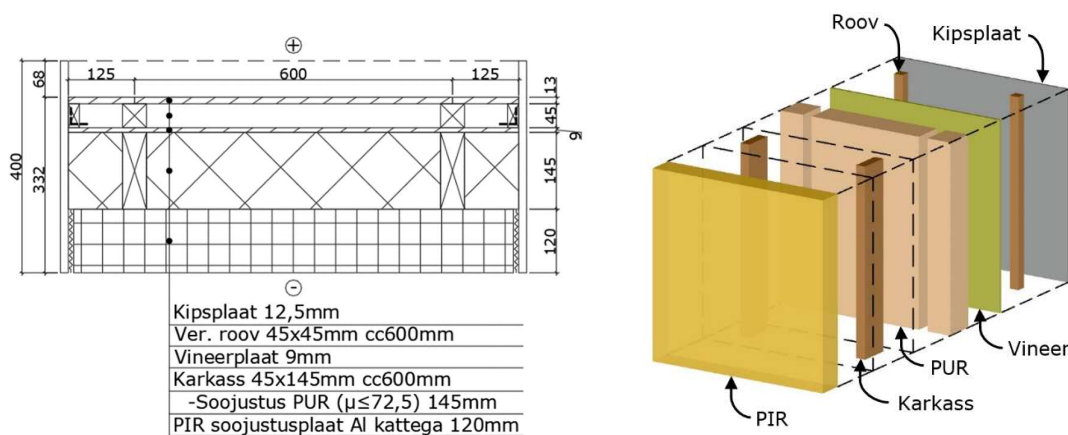
VS-5 tüüpi testseintes (vt Joonis 2.7) kasutati karkassi materjalina 145x45 mm tugevsorteeritud konstruktsioonipuitu tihedusega $\sim 550 \text{ kg/m}^3$ [27]. Karkassipostide vahe soojustati pritsitava veeauru difusiooni takistava PUR vahuga (tihedus 37 kg/m^3 ja $\mu \leq 72,5$ [36]). Vahu paigaldamiseks kinnitati karkassi siseküljele vineerplaat paksusega 9mm ($\mu = 165$ ja $S_d = 1,485 \text{ m}$ [27]). Tarindi siseküljele paigaldati 45 mm puitroov. Testseinte sisemine külg viimistleti 12,5 mm kipsplaadiga ($\mu = 10$ [34]). Selleks, et vähendada testseina soojusläbivust, lisati karkassi välispinnale 70 mm lisasoojustust. Lisasoojustusena kasutati alumiiniumlaminaadiga PIR soojustusplaati ($\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$ [28]). Testseina välimiseks viimistluseks kasutati puitvälisvoodrilauda.



Joonis 2.7 VS-5 horisontaallõige vasakul ja 3D illustratsioon paremal

2.1.6 Testsein VS-6

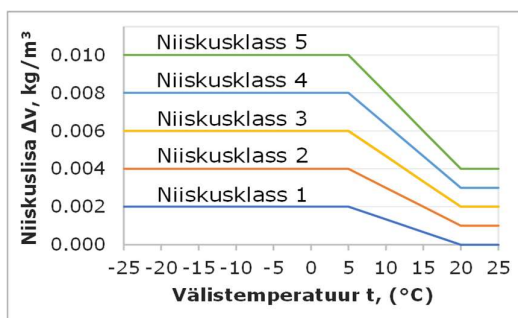
VS-6 tüüpi testseintes (vt Joonis 2.8) kasutati karkassi materjalina 145x45 mm tugevsorteeritud konstruktsioonipuitu tihedusega $\sim 550 \text{ kg/m}^3$ [27]. Karkassipostide vahe soojustati pritsitava veeauru difusiooni takistava PUR vahuga (tihedus 37 kg/m^3 ja $\mu \leq 72,5$ [36]). Vahu paigaldamiseks kinnitati karkassi siseküljele vineerplaat paksusega 9mm ($\mu = 165$ ja $S_d = 1,485 \text{ m}$ [27]). Tarindi siseküljele paigaldati 45 mm puitroov. Testseinte sisemine külg viimistleti 12,5 mm kipsplaadiga ($\mu = 10$ [34]). Selleks, et vähendada testseina soojusläbivust, lisati karkassi välispinnale 120 mm lisasoojustust. Lisasoojustusena kasutati alumiiniumlaminaadiga PIR soojustusplaati ($\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$ [28]). Testseina välimiseks viimistluseks kasutati puitvälisvoodrilauda.



Joonis 2.8 VS-6 horisontaallõige vasakul ja 3D illustratsioon paremal

2.2 Niiskusklassid

Käesolevas töös on läbivalt kasutatud Eestis kehtiva standardi EVS-EN ISO 13788:2012 [22] niiskusklasside 1 ja 3 niiskuslisa väärtusi. Niiskusklassi 3 kuuluvad teadmata niiskustootlusega elamud ja eluruumid asustustihedusega kuni 30 m² inimese kohta. Niiskusklassi 3 niiskuslisa väärtus on 6 g/m³. Niiskusklassi 1 kuuluvad väga väikese niiskustootlusega uued mitteelamud. Niiskusklassi 1 niiskuslisa väärtus on 2 g/m³ (vt Joonis 2.9) [37].



Niiskusklass 5: Spordihallid, köögid, sööklad

Niiskusklass 4: Eriotstarbelised hooned, nt pesumajad, pruulikojad, basseinid

Niiskusklass 3: Teadmata niiskustootlusega elamud. Eluruumid asustustihedusega kuni 30 m² inimese kohta

Niiskusklass 2: Eluruumid asustustihedusega üle 30 m² inimese kohta

Niiskusklass 1: Väga väikese niiskustootlusega uued mitteelamud: töö- ja õpperuumid, jms

Joonis 2.9 Arvutusliku niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist Eesti hoonetel [37]

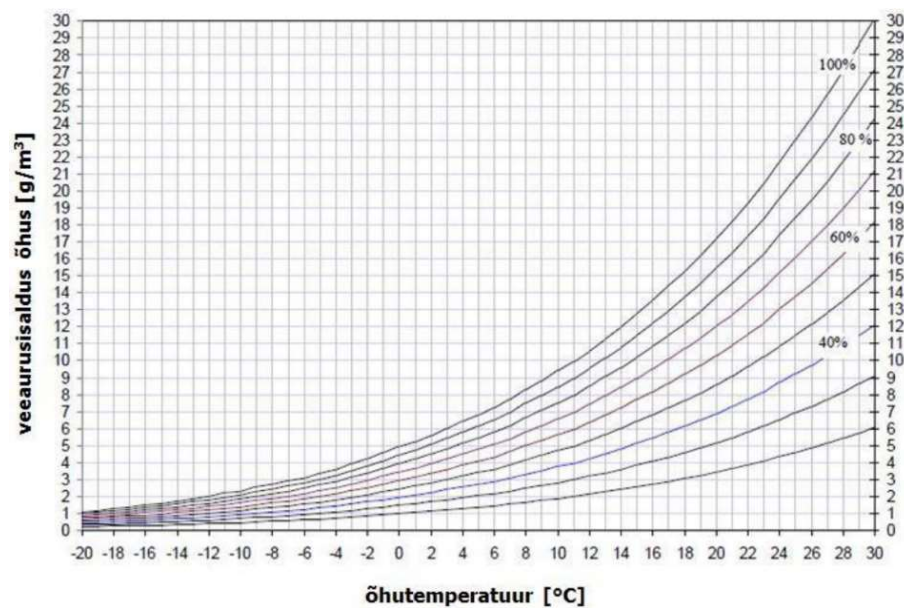
Niiskuslevi poorsetes ehitusmaterjalides saab toimuda nii vedelas kui gaasilises olekus. See võib toimuda läbi veeauru difusiooni õhu veeaurusisalduse erinevuse tõttu kahel pool piirdetarindit, veeauru konvektsiooni teel õhurõhkude erinevuse tõttu kahel pool tarindit, pinddifusiooni teel niiskussisalduse erinevuse tõttu, poori pinna märgumise teel ja vaba vee valgumise teel läbi pragude ja pilude raskusjõu mõjul.

Kelvini võrrandi järgi (vt Valem (2.1)) kondenseerub veeaur pooriveeks, kui suhteline niiskus on kõrgem tasakaaluväärtusest ja aurustub, kui suhteline niiskus on madalam tasakaaluväärtusest. See kirjeldab veeauru rõhu muutumist vedeliku ja veeauru liikumisel materjali kapillaarides.

Tarindi niiskustehnilist toimivust saab hinnata ka suhtelise niiskuse järgi. Veeauru küllastustemperatuuril ja küllastusrõhul saab õhk sisaldada maksimaalse teatud koguse veeauru (vt Joonis 2.10). Veeauru kondenseerumine tekib küllastustasemeni jõudmisel. Seega määrab materjalide niiskustehnilise käitumise suuresti ka temperatuur.

$$P_l = p_{sat} + \frac{R \cdot T \cdot \rho_w}{M_w} \cdot \ln\left(\frac{p}{p_{sat}}\right) \quad (2.1)$$

kus	P_l	poorivee rõhk, Pa,
	p_{sat}	veeauru küllastusrõhk, Pa,
	p	veeauru osarõhk, Pa,
	R	universaalne gaasikontant, 8314,3 J/(kmol·K),
	T	temperatuur, K,
	ρ_w	vee tihedus, 1000 kg/m ³ ,
	M_w	vee molaarmass, 18,02 kg/kmol.

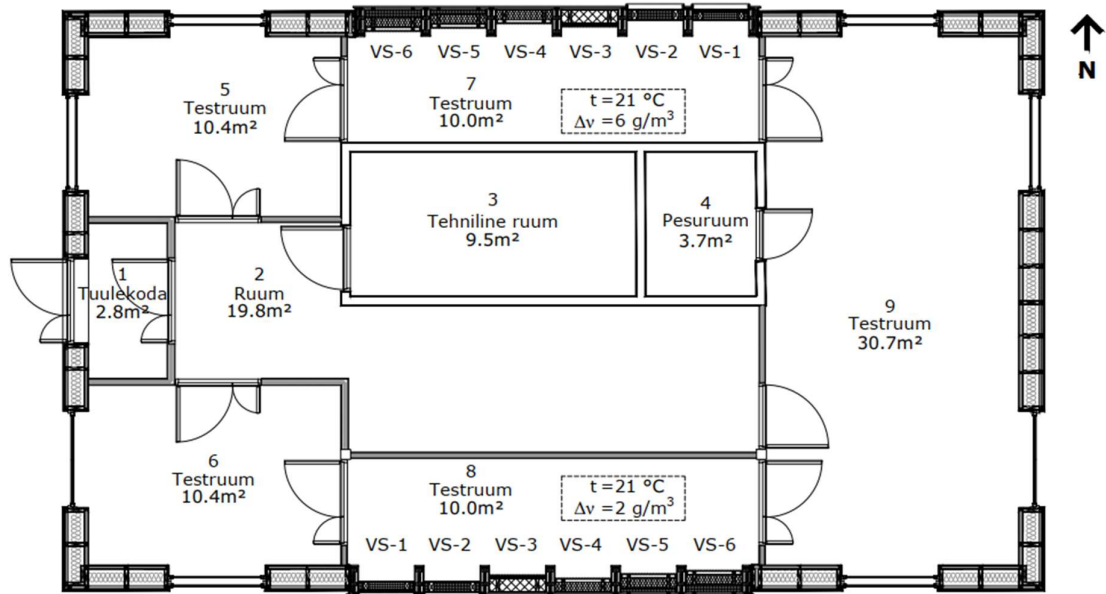


Joonis 2.10 Õhu maksimaalse veeaurusalduse sõltuvus temperatuurist

2.3 Liginullenergia testhoone

Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoone (vt Joonis 2.11 ja Joonis 2.12) asub Tallinnas aadressil Mäepealse 3, umbes 600 m kaugusel Tallinna Tehnikaülikooli peahoonest. Testhoone on ehitatud erinevate energiatõusust parandavate tehnoloogiate katsetamiseks. Testmajas on võimalik katsetada erinevaid välispiirete, avatäidete, tehnosüsteemide ning lokaalsete taastuenergiatega lahendusi. Testmajas on põhja- ja lõunasuunal välispiirete katsetamiseks eemaldatavad seinaosad. Mõlemas ruumis on

olemas tehniline võimekus erinevate niiskusežiimide tekitamiseks. Erinevate küttesüsteemide katsetamiseks on hoones olemas erinevad soojusallikad – spiraal- ja horisontaalkollektoriga maasoojuspump, õhk-vesi soojuspump ja õhk-õhk soojuspump. Lokaalsete taastuvenergia lahendustena on kasutusel päikesepaneelid elektri tootmiseks ning päikesekollektorid vee soojendamiseks või soojuspumpade kollektorite laadimiseks. Ventilatsioonisüsteem on soojustagastiga ning on varustatud maakollektori eelsoojendus- ja jahutussoojusvahetiga. Igas ruumis on võimalik kasutada nii põrandakütte kui ka radiaatorkütte võimalust [38].



Joonis 2.11 Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoone põrandaplaan



Joonis 2.12 Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoone

2.4 Mõõtmine

Testhoones mõõdeti testseinte puitkarkassi niiskussisaldust ning erinevate konstruktsiooni kihtide vahel suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri. Alapeatükkides 2.4.2 ja 2.4.1 on lähemalt tutvustatud testseintesse paigaldatud andureid, andurite kalibreerimisprotsessi ja kasutatud mõõtevahendeid. Andurite asetus testseintes on kirjeldatud alapeatükis 2.4.3. Testseinte ehitus- ja montaažiprotsesse on tutvustatud alapeatükis 2.5

2.4.1 Puidu niiskussisalduse mõõteseade

Puidu niiskussisaldust mõõdeti katse jooksul kahe erineva seadmega Gann Hydromette CH17 (vt Joonis 2.13) ja Logica Holzmeister LG9 NG (vt Joonis 2.13). Mõlemad seadmed annavad puidu niiskussisalduse väärtuse mõõdetud puidu elektrilise takistuse kaudu [39], [40]. Mõlema seadme puidu niiskussisalduse mõõtetäpsus on $\pm 2,5\%$ [41]. Ajaperioodil 16.12.2019 kuni 12.05.2020 tehti kokku 11 mõõtmist. Esimesed 10 mõõtmist tehti keskmiselt iga 11 päeva tagant. Seoses Eesti Vabariigis kehtestatud eriolukorra tõttu jäi eelviimase ja viimase mõõtmise vahele 42 päeva.



Joonis 2.13 Vasakul Gann Hydromette CH17, paremal Logica Holzmeister LG9 NG puidu niiskussisalduse mõõtmise seade, vasakul pildil on kujutatud ka elektroodide paigaldamiseks kasutatud ramm-vasar

Niiskussisalduse mõõtmiseks kasutati tefloniga kaetud elektroode (vt Joonis 2.14) pikkusega 60 mm. Tefloniga kaetud elektroodid võimaldavad mõõta takistust ainult elektroodid otsast. Elektroodide kinnitamiseks puitu kasutati ramm-haamrit, mis võimaldas paigaldada kõik elektroodid ühesuguse tsentrite vahega. Kuna elektroodid paiknevad valmis ehitatud testseinas soojustuse sees, tuli elektroodide külge ühendada

n-ö pikendusjuhtmed. Et välistada pikendusjuhtmetest tulenev mõõteviga, korraldati katse. Katse läbiviimiseks kasutati Logica Holzmeister LG9 NG seadet, ühte paari kiulist vaskkaablit ristlõikega 1,5 mm² ja ühte paari ühesoonelist vaskkaablit ristlõikega 1,5 mm². Juhtmete ristlõike suurus valiti eesmärgiga vähendada juhtmest tingitud elektrilist takistust. Mõlemad kaablid olid 2 m pikad. Tulemusi võrreldi seadme originaalkaabliga. Katse tulemustest selgus, et ühesoonelise vaskkaabliga mõõdetud tulemused ei erinevad originaalkaabliga mõõdetud tulemustest. Kiulise vaskkaabli puhul oli tulemuste erinevus väga suur. Seega osutus valituks ühesooneline vaskkaabel. Vaskkaabel kinnitati elektroodide külge jaotusklemmidega (vt Joonis 2.14) ning juhtme teise otsa kinnitati banaan-pistik (vt Joonis 2.14). Forsén ja Tarvainen [41] jõudsid järeldusele, et puidu temperatuuril on märgatav mõju puidu niiskussisalduse mõõtmisel elektrilise takistuse tüüpi seadmete puhul. Puidu niiskussisaldus muutub 0,1–0,15% kui temperatuur muutub 1 °C võrra. Puidu niiskussisalduse mõõtmise ajal sisestati seadmetesse temperatuuriks 20 °C. Temperatuuriparandi arvutamiseks võeti puidu temperatuuriks elektroodi paari kõrval oleva RH+T anduri temperatuuri näit. Näidu puudumisel kasutati samas testruumis paikneva teise samat tüüpi testseina anduri näitu. Temperatuuriparandi arvutamiseks on kasutatud Forsén ja Tarvainen [41] töös toodud valemit (2.2).

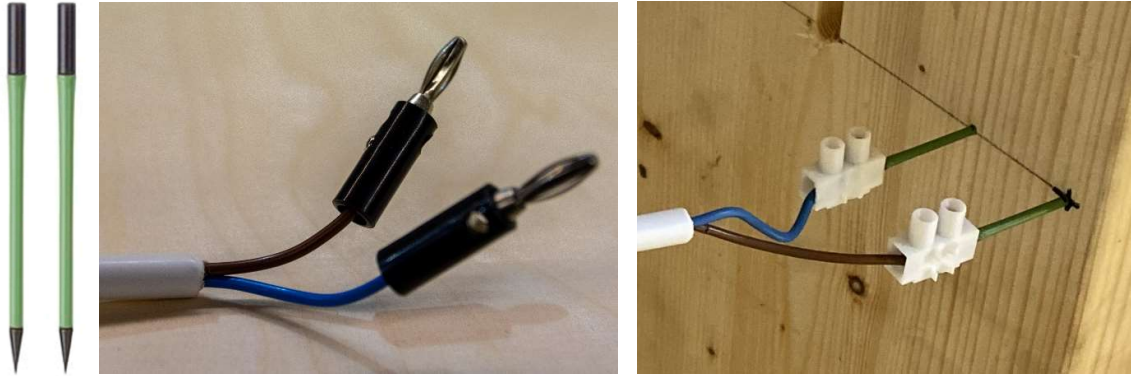
$$u_{corr} = - \frac{0.00147T \ln(10) + \ln(\exp(au_{meas} \ln(10) + b \ln(10)) + 1) - 1.075 \ln(10)}{\ln(10) (0.00158T + 0.0262)} \quad (2.2)$$

kus u_{corr} temperatuuriparandiga parandatud puidu niiskussisaldus, %,

u_{meas} mõõdetud puidu niiskussisaldus, %,

T puidu temperatuur, °C,

a, b puidu liigist ja kasvamis kohast olenev konstant, antud töös on kasutatud puidu liik *Scots Pine* ning kasvukohaks *Nordic* ehk põhjamaad, konstantide väärtused on toodud Lisa 2 Tabelis L2.1



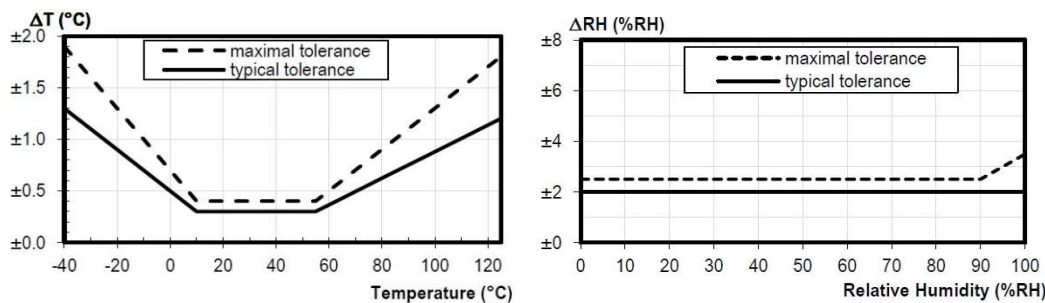
Joonis 2.14 Vasakult paremale: tefloniga kaetud elektroodid, banaani pistikud, jaotusklemmid elektroodide ja juhtmete ühendamiseks

2.4.2 Suhtelise õhuniiskuse- ja temperatuuriandurid

Suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmiseks paigaldati katseseintesse A-1 HumiSense andurid (vt Joonis 2.15). Andurite mõõtetäpsus suhtelise õhuniiskuse mõõtmisel on $\pm 2,0\%$ ning temperatuuri mõõtmisel $\pm 0,5^\circ\text{C}$ mõõtevahemikus 0°C kuni $+70^\circ\text{C}$. Mõõtetäpsus madalamatel ja kõrgematel temperatuuridel on toodud joonisel (Joonis 2.16) [42]. Andurid ühendati OmniSense S-2 juhtmevabade sensoritega (vt Joonis 2.15). Sensor edastab anduritelt saadud info täpsusega $\pm 0,3^\circ\text{C}$ temperatuuri puhul ja $\pm 2,0\%$ suhtelise õhuniiskuse puhul [43]. OmniSense sensorid edastavad anduritelt tuleneva info 3 korda minutis testhoones olevasse kontrollerrisse, mis omakorda laeb info üles UniSCADA serverisse. Mõõtmiste analüüsimisel kasutati tunniajalist mõõtmiste intervalli.



Joonis 2.15 Vasakul A-1 HumiSense andur ja paremal OmniSense S-2 sensor

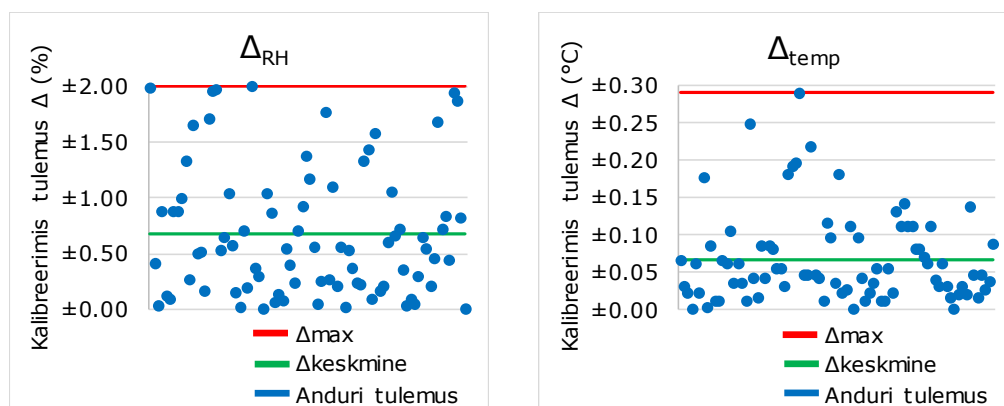


Joonis 2.16 HumiSense anduri mõõtetäpsused. Suhtelise õhuniiskuse mõõtetäpsus on antud temperatuuril +25 °C [42]

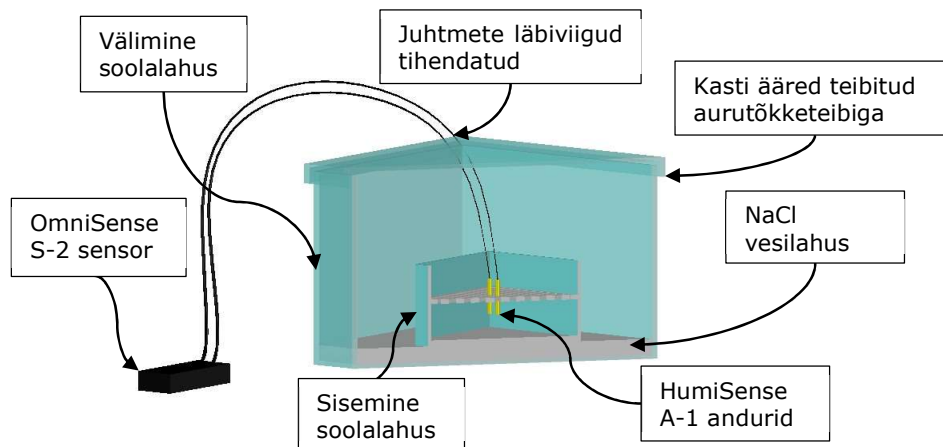
Andurite kalibreerimiseks asetati A-1 HumiSense andurid hermeetiliselt suletud keskkonda NaCl lahuse kohale (vt Joonis 2.18). Lahuse tegemiseks kasutati destilleeritud vett. Suurema anuma põhja pandi soolalahus, et vähendada õhuleketest tulenevat suhtelise õhuniiskuse muutumist. Andurite läbiviigud tihendati mittekivineva kummimastiksiga ning kaeti aurutõkketeibiga. Naatriumkloriidi vesilahus tagab kindla suhtelise õhuniiskuse $75,47 \pm 0,14\%$ kui ümbritseva keskkonna temperatuur on 20 °C [44]. Kokku kalibreeriti 82 andurit, mille hälbed jäid mõõtmistäpsuses piiridesse (Tabel 2.2). Kalibreerimistulemuste graafikud on toodud joonisel (Joonis 2.17).

Tabel 2.2 HumiSense A-1 anduri kalibreerimistulemused

	RH (%)	Temperatuur (°C)
Mõõtmistäpsus	2.00	0.30
$\Delta_{\max}$	2.00	0.29
Δ_{keskmine}	0.68	0.06



Joonis 2.17 HumiSense A-1 andurite kalibreerimistulemused. Vasakul suhtelise õhuniiskuse tulemused ning paremal temperatuuri tulemused



Joonis 2.18 HumiSense andurite kalibreerimisskeem

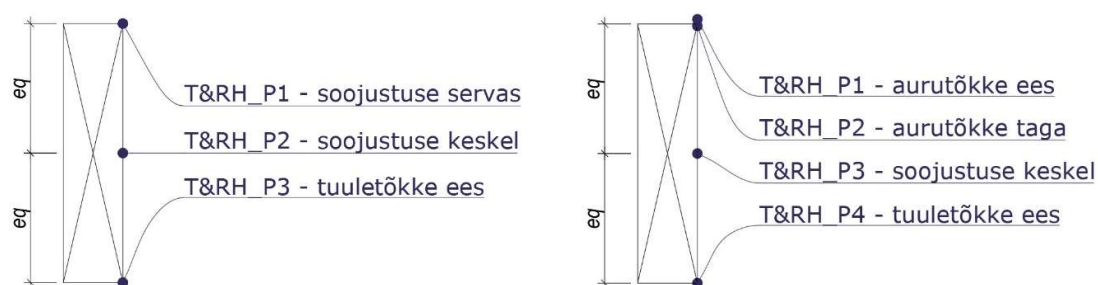
2.4.3 Andurite asetus testseintes

Ühte testseina paigaldati 3-4 HumiSense suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri (RH+T) andurit (vt Joonis 2.19) ning 2 paari puidu niiskussisalduse elektroode (vt Joonis 2.20).

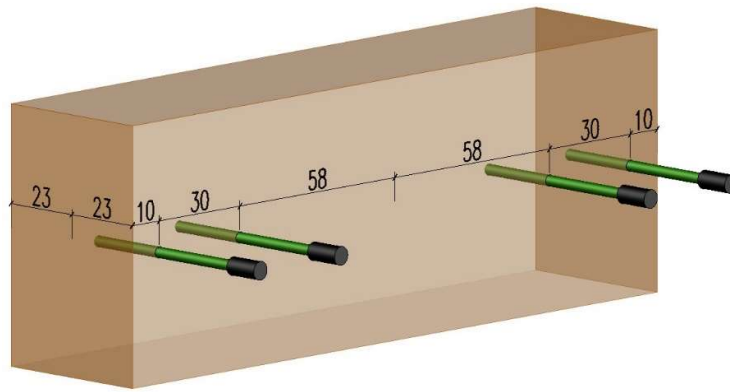
RH+T andurite asukoha valikul lähtuti kolmest punktist:

- 1) aurutõkke ees või taga, et veenduda aurutõkke toimivuses;
- 2) soojustuse keskel niiskuse liikumise jälgimiseks;
- 3) kõige kriitilisem punkt ehk tuuletõkke ja soojustuse vahel [45].

Selleks, et karkassi posti keskele paigaldatud andur oleks puidu pinnale võimalikult lähedal, freesiti puitu soon, mille sügavus oli pool anduri paksusest.

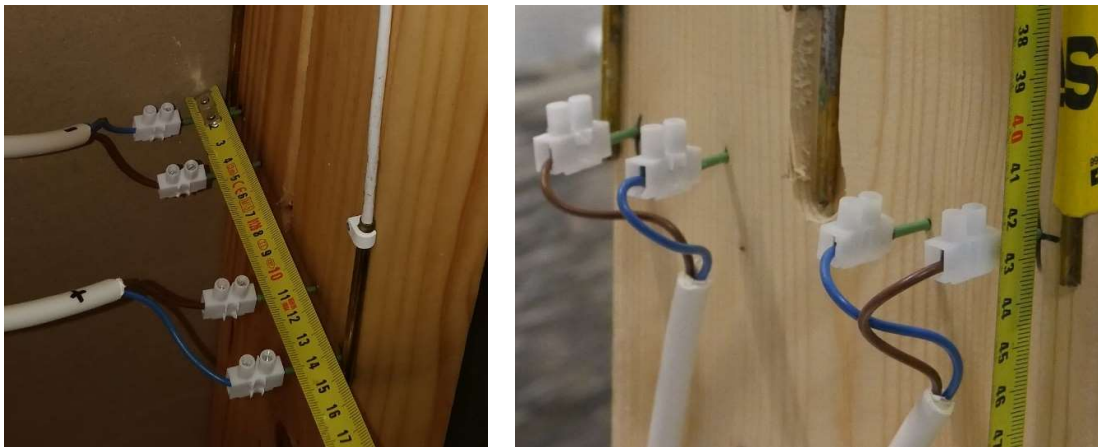


Joonis 2.19 Vasakul on kujutatud VS-1, VS-2, VS-4, VS-5 ja VS-6 RH+T andurite paigutus testseinas. Paremal on kujutatud RH+T andurite paigutus VS-3 testseinas. eq = võrdne (ingl. k. equal)



Joonis 2.20 Puidu niiskussisalduse mõõtmise elektrootide paigutus 45x145 mm karkassi puhul

Puidu niiskussisalduse mõõtmiseks paigaldati iga testseina ühele karkassipostile 2 paari elektroode (vt Joonis 2.20). Elektrootid paigaldati karkassi sisemisele küljele puidu kiududega risti ning servast 10 mm kaugusele. Karkassipostidele paksusega 45 mm rammiti elektrootid sügavusele ~23 mm ning paksusega 70 mm rammiti elektrootid sügavusele ~35 mm. Forsén ja Tarvainen [41] jõudsid oma töös järeldusele, et elektrootide vahe ning suund puidukiudude suhtes ei mõjuta mõõtmistulemust. Nii RH+T kui ka puidu niiskuse elektrootid paigaldati samale karkassipostile ning ühele kõrgusele (vt Joonis 2.21). Andurite paigutus igas testseinas on toodud graafilises osas testseinte tööjoonistel.



Joonis 2.21 Andurite asetus testseintes. Vasakul näidatud laiuse ja paremal kõrguse suhtes

2.5 Testseinte ehitus ja montaaž

Kavandatud testseinte tootmine toimus majatehase territooriumil. Testseinte ehitus algas vineerkastide ehitamise ning alumiinulaminaadiga katmisega. Valmis ehitatud kastidesse paigaldati järgmisena puitkarkass, mis kaeti ühelt poolt kas tuuletõkkekipsi, aurutõkkemembraani või vineeriga. Tuule- ning aurutõkkesse tehtud kinnitusvahendite augud kaeti vastavalt tuuletõkke- või aurutõkketeibiga. Sellele järgnes testseinte soojustamine PIR või PUR soojustusega, vastavalt tootjapoolsetele juhistele [29], [33], [36]. PIR soojustusplaatide paigaldamisel jäeti igast servast 10 mm montaaživahu jaoks (vt Joonis 2.22). PUR vaht ($\mu = 6,55$) paigaldati maksimaalselt 100 mm kihi paksusega olenevalt seinast 2-3 kihis. PUR vaht ($\mu \leq 72,5$) paigaldati maksimaalselt 25 mm kihi paksusega olenevalt seinast 5-6 kihis (vt Joonis 2.22). Kivinenud vaht kaeti järgmiste konstruktsiooni kihtidega. Valmis testseinad transporditi majatehasest Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoonesse. Olemasoleva puitsõrestiku vahed soojustati mineraalvillaga. Katseelemendid paigaldati olemasolevatesse avadesse nii, et igas küljes oleks 10 mm vahe, mis hiljem tihendati montaaživahuga (vt Joonis 2.22). Kokku valmistati 24 testelementi, millest pooled ehk 12 tk paigaldati lõunapoolsesse testruumi (testhoones testruum nr 8) ning ülejäänud 12 tk paigaldati põhjapoolsesse testruumi (testhoones testruum nr 7) (vt Joonis 2.23). Iga tarinditüübi kohta koostati katseelement nii kuivalt (puidu niiskussisaldus $\sim 16\%$) kui ka märjalt (puidu niiskussisaldus $\sim 30\%$). Märjalt koostatud katseelement imiteeris olukorda, kus tarind on ehituse käigus näiteks sademete tõttu märgunud. Tabelis (Tabel 2.3) on toodud katseelementide puidu algniiskused vahetult enne soojustamist.



Joonis 2.22 Testseinte ehitus ja montaaž. Vasakult paremale: PIR soojustusplaadi paigaldus montaaživahuga, pritsitava plastvahu paigaldus, montaaživahuga tihendatud testelemendi ja puitsõrestiku vahe testhoones



Joonis 2.23 Valmis testelemendid paigaldatud testhoonesse. Vasakul testruum niiskussisuga 2 g/m³ ja paremal testruum niiskussisuga 6 g/m³. Mõlemas testruumis on ülemised testseinad kuiva karkassiga ning alumised testseinad märja karkassiga

Tabel 2.3 Karkassiposti niiskussisaldus posti keskel vahetult enne testseinte soojustamist

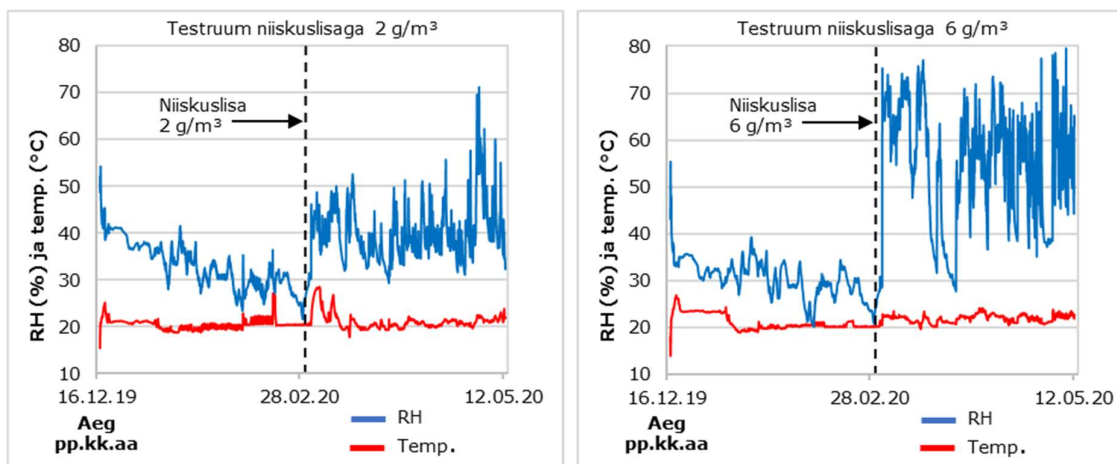
	Testsein	Välimine serv	Sisemine serv		Testsein	Välimine serv	Sisemine serv
Kuiva karkassiga testseinad	VS-1.1-N	14.5%	15.0%	Märja karkassiga testseinad	VS-1.2-N	29.6%	30.9%
	VS-1.1-S	14.7%	14.4%		VS-1.2-S	27.3%	27.5%
	VS-2.1-N	13.9%	14.0%		VS-2.2-N	23.2%	26.3%
	VS-2.1-S	14.3%	14.3%		VS-2.2-S	29.6%	31.8%
	VS-3.1-N	14.7%	13.8%		VS-3.2-N	28.7%	29.0%
	VS-3.1-S	14.3%	14.2%		VS-3.2-S	29.0%	30.5%
	VS-4.1-N	15.3%	15.2%		VS-4.2-N	29.7%	27.6%
	VS-4.1-S	16.2%	15.8%		VS-4.2-S	39.7%	40.4%
	VS-5.1-N	16.1%	16.0%		VS-5.2-N	36.8%	35.3%
	VS-5.1-S	15.6%	15.2%		VS-5.2-S	36.8%	35.3%
	VS-6.1-N	15.1%	14.7%		VS-6.2-N	29.4%	27.5%
	VS-6.1-S	15.4%	15.2%		VS-6.2-S	30.0%	29.0%

Puidu algniiskuse tõstmiseks paigutati kasutatavad puitprussid ligikaudu 10cm sügavuselt alumiste otstega 48 tunniks veevanni. Selline märjutamise viis imiteeris puitkarkass seina alumise osa märgumist objektile (vt Joonis 2.24). Puidu niiskust sellise meetodiga aga üle 25% ei olnud võimalik saavutada ja puitkarkass märgus ebaühtlaselt. Selleks, et niiskus puidus tõuseks 30%-ni, pandi puitprussid üleni veevanni (vt Joonis 2.24).



Joonis 2.24 Puitkarkassi märjutamine. Vasakul imiteeritakse seina alumise osa märgumist, paremal üleni veevanni paigaldatud karkassipostid

Testhoone (vt Joonis 2.11) ruumides, kuhu uuritavad elemendid paigaldati hoiti küttesüsteemide ning õhuniisutitega ühtlast sisekliimat. Testruumides hoiti algselt temperatuuri elektriradiaatoritega. Märtsi algusest tagati testruumides põrandaküttega siseõhu temperatuur 21 °C. Alates märtsi algusest lülitati sisse ka õhuniisutajad, mis tagavad testruumides kindla niiskuselisa. Põhjapoolses testruumis tekitati niiskuselisa ~6 g/m³. Lõunapoolses testruumis hoiti niiskuselisa tasemel ~2 g/m³. Testruumidesse tekitatud kliimatingimused on kujutatud joonisel (Joonis 2.25).



Joonis 2.25 Testruumidesse tekitatud kliimatingimused. Vasakul on väikese niiskuselisaga testruumi kliima ja paremal suure niiskuselisaga testruumi kliima

2.6 Soojus ja niiskuslevi modelleerimine

2.6.1 Soojuslevi arvutustarkvara

Soojuslevi modelleerimiseks on kasutatud 2D soojuslevi arvutitarkvara Therm 7.7. Tarkvarapakett on välja töödatud Lawrence Berkley National Laboratory poolt. Therm programm analüüsib lõplike elementide meetodil kahemõõtmelisi konduktiivseid ning kiirguslikke soojusvoogusid [46]. Tänu sellele on võimalik analüüsida ka keerulise geomeetriaga konstruktsioone. Välispiirete soojuskadude arvutusel määrati välispiirete pindala sisemõõtmega [47]. Hoone joonkülmasilade leidmiseks jagati hoone geomeetria mudel mitmeks osaks, kasutades selleks adiabaatilisi katkestuspindu. Arvutusulatuste pikkuste määramisel lähtuti EVS-EN ISO 10211, 2017 standardis toodud tingimustest [48]. Konstruktsioonisõlmede joonsoojuslähivused leiti valemiga (2.1) [48].

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \times l_j \quad (2.1)$$

kus Ψ	tarindite liitekohta joonsoojuslähivus, W/(mK),
L_{2D}	tarindi arvutusulatuse soojuserikadu, mis on leitud 2D arvutuste tulemusel, W/(mK),
U_j	liitekohta moodustavate tarindite 1D soojuslähivus, W/(m ² K),
l_j	liitekohta moodustavate tarindite arvutusulatuse pikkus, m,
N_j	liitekohta moodustavate tarindite arv.

2.6.2 Soojus- ja niiskuslevi arvutustarkvara

Testseinte arvutusmodelite pikaajaliseks modelleerimiseks ja kalibreerimiseks kasutati dünaamilist õhu, soojuse ja niiskuse liikumist arvestavat simulatsioonitarkvara Delphin 5. Kuvatõmmis tarkvara kasutajaliidesest on välja toodud joonisel (Joonis 2.26). Tarkvara on välja töötatud Syracuse'i Ülikooli ja Dresdeni Tehnikaülikooli teadlaste Andreas Nicolai, John Grunewaldi ja Heiko Fechneri eestvedamisel aastatel 2004-2006. Delphin on matemaatilistel arvutustel põhinev tarkvara, millega saab simuleerida soojuse, niiskuse ja aineosakeste liikumist poorsetes materjalides [27].

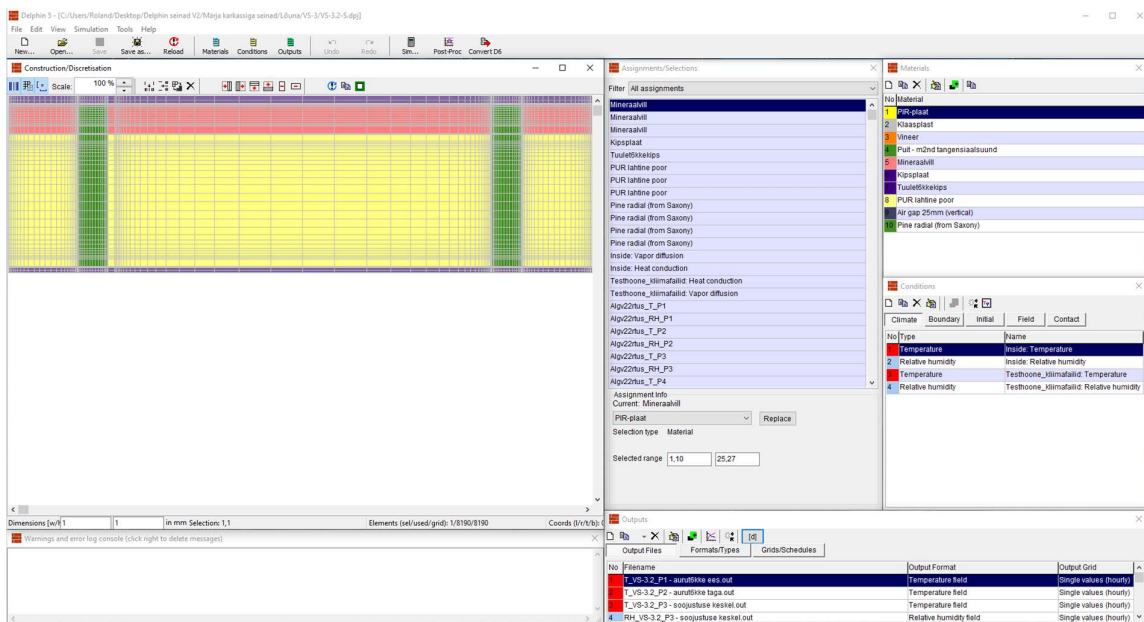
Tarkvara kasutatakse mitmete ehitusfüüsikaliste küsimuste lahendamisel:

- Külmasildade arvutused, sh niiskustehniliselt probleemsetele kohtadele hinnangu andmine;
- Soojustussüsteemide välja töötamine ja hindamine;
- Ventileeritud fassaadide ja katuste hindamine;
- Aastase kütteenergia kulu arvutamine arvestades niiskusest sõltuvat soojusjuhtivust;
- Niiskuse väljakuivamisega seotud probleemid;
- Hallitusega seotud riskide arvutamine [49].

Tarkvaraga alustamisel tuleb kasutajal valida ühe- või kahemõõtmelise mudeli vahel.

Simuleerimiseks on vajalik sisestada:

- Konstruktsiooni geomeetria;
- Materjalid koos sobivate füüsikaliste suurustega;
- Ääritingimused;
- Algtingimused kindlaks määratud konstruktsioonipunktides;
- Väljundid koos soovitatavate ühikutega;
- Simulatsiooni kestvus ja väljundite intervall;
- Muud arvutamise ja simulatsiooniga seotud sätted [27].



Joonis 2.26 Kuvatõmmis arvutustarkvarast Delphin 5.9.6

2.6.3 Mudeli kalibreerimise metoodika

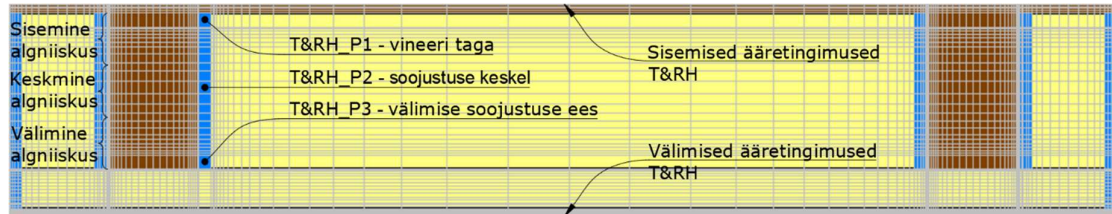
Modelleerimise käigus püüti leida katsetulemustele kõige täpsemini vastav mudel. Mudeli korrektsuse hindamisel kasutati parameetritena temperatuuri ja suhtelist niiskust. Mudeli koostamisel kasutati tarkvara Delphin 5 materjalide andmebaasi. Andmebaasist valiti omaduste poolest kõige paremini sobiv materjal ning muudeti vajadusel materjalide mõningaid füüsikalisi suurusid. Kasutatud materjalid ning nende tähtsamad muudetud väärtused on välja toodud tabelites (Tabel 2.4 ja Tabel 2.5). Töö käigus kasutatud materjalide füüsikalised suurused jäeti erinevate katseseinte puhul läbivalt samaks. Mudelitele lisati temperatuuri ja suhtelise niiskuse algväärtused mõõdetavatesse punktidesse. Karkassipuidule lisati algniiskused jaotusega kolmeks - sisemine, keskmine ja välimine algniiskus. Roovipuidule lisati ühtlane algniiskus. Kalibreerimisprotsessi käigus tuli korduvalt muuta algniiskusi ja materjali omadusi, et saada mõõdetud tulemustele võimalikult sarnased väärtused. Erisused kalibreerimisel tulenesid eelkõige katseseinte ehituslikust kvaliteedist ja puitmaterjali heterogeensusest. Kalibreerimisel ei ole arvestatud võimalike konstruktsioonipragudega ja (andurite) läbiviikudega, mis võisid mõjutada kalibreerimistulemusi.

Mudeli sisekliimatingimustena kasutati katseruumidesse paigutatud suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri andurite andmeid. Väliskliimatingimustena kasutati testhoone lõuna- ja põhjakülje katseseinte tuulutusvahesse paigaldatud andurite andmeid. Päikesekiirguse ja kaldvihma mõju ei arvestatud, sest väliskliima andmed pärinesid fassaadi tuulutusvahest. Kalibreerimise perioodiks valiti 19.01.2020-16.03.2020. Kalibreerimise perioodi kestvus oli 58 päeva. Kalibreerimisperioodi valikul lähtuti katseseinte andurite toimivusest kalibreerimisperioodi jooksul.

2.6.4 Testseinte VS-1 ja VS-2 kalibreerimine

VS-1 ja VS-2 tüüpi seinte modelleerimisel lisati eraldi materjalikihtina alumiiniumi kiht PIR soojustusplaadi sisemisele ja välimisele küljele. Karkassi ja PIR plaadi vahele lisati 10 mm montaaživahu kiht. Delphinis on võimalik määrata erinevate kihtide vahele lisatingimusi, et suurendada või vähendada näiteks niiskuse levikut, jättes seejuures lisamata uut materjalikihti. Seda on otstarbekas kasutada erinevate õhukeste membraanikihtide modelleerimisel, kuna neil kihtidel puudub mõju tarindi üldisele soojusläbivusele ning seeläbi väheneb ka lõplik ajakulu arvutusmudeli simuleerimisele. Karkassi ja montaaživahu sisemisele ja välimisele küljele lisati teibi imiteerimiseks veeauru liikumist takistavad materjalide vahelised tingimused. Sisemise külje

tingimusena määrati difusioonile vastava õhukihi paksuseks $sd = 40$ m ning välimisele küljele $sd = 1,9$ m. Väärtused vastasid katsetes kasutatud teibi tootja andmetele. Allolevatel joonistel (Joonis 2.27 ja Joonis 2.28) on välja toodud informatsioon sisend- ja väljundandmete paiknemisest VS-1 ja VS-2 mudelis.



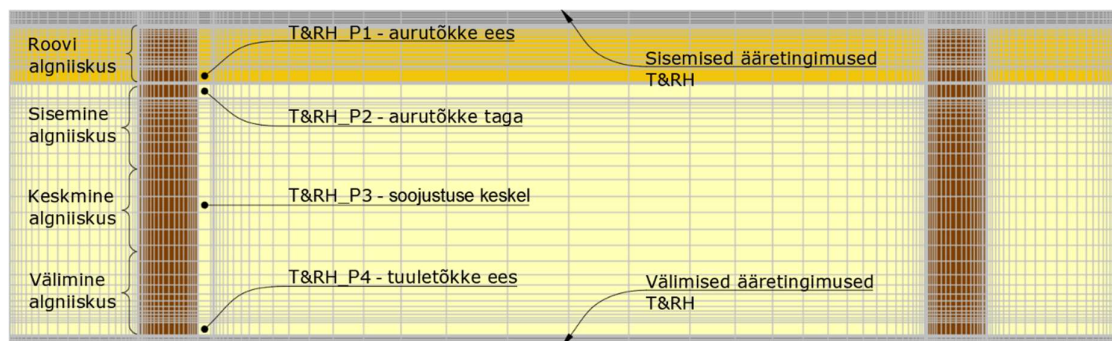
Joonis 2.27 VS-1 skeem sisend- ja väljundandmete kohta tarkvaras Delphin



Joonis 2.28 VS-2 skeem sisend- ja väljundandmete kohta tarkvaras Delphin

2.6.5 Testseina VS-3 kalibreerimine

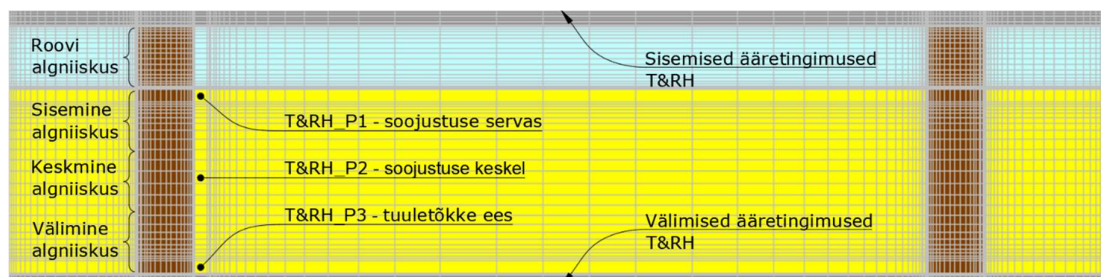
VS-3 tüüpi seinte modelleerimisel kasutati aurutõkke modelleerimiseks materjalide vahelist tingimust lisades difusioonile vastava õhukihi paksuse $sd = 5$ m. Väärtus vastas katses kasutatud aurutõkke tootja andmetele. Alloleval joonisel (Joonis 2.29) on välja toodud informatsioon sisend- ja väljundandmete paiknemisest VS-3 mudelis.



Joonis 2.29 VS-3 skeem sisend- ja väljundandmete kohta tarkvaras Delphin

2.6.6 Testseina VS-4 kalibreerimine

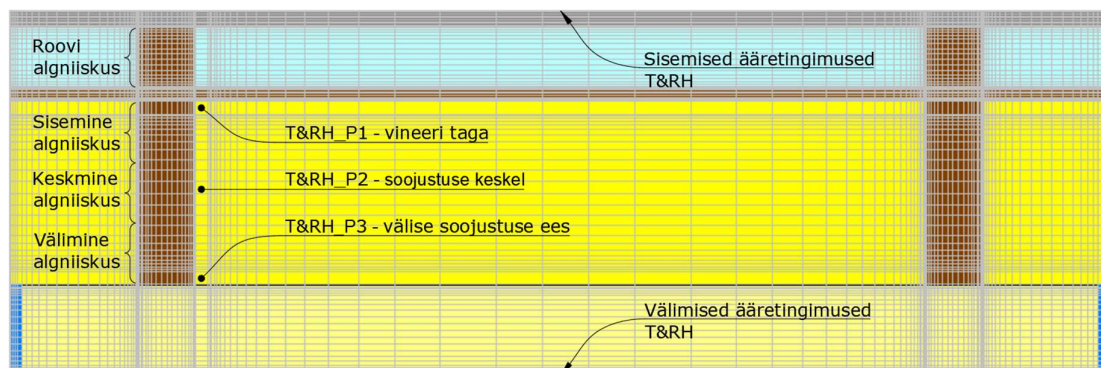
Alloleval joonisel (Joonis 2.30) on välja toodud informatsioon sisend- ja väljundandmete paiknemisest VS-4 mudelis.



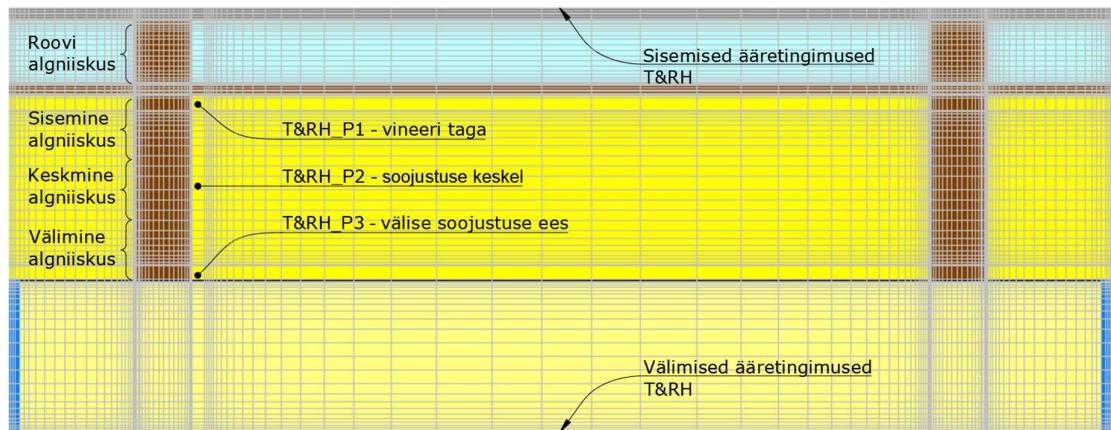
Joonis 2.30 VS-4 skeem sisend- ja väljundandmete kohta tarkvaras Delphin

2.6.7 Testseinte VS-5 ja VS-6 kalibreerimine

VS-5 ja VS-6 tüüpi seinte modelleerimisel lisati eraldi materjalikihtina alumiiniumi kiht PIR soojustusplaadi sisemisele ja välimisele küljele. PIR soojustusplaadi servadesse lisati 10 mm montaaživahu kiht. Arvutusmudeli simuleerimise aja vähendamiseks, saab Delphinis lisada täiendava õhukese materjalikihi asemel ääritingimustele näiteks niiskuslevi takistavaid lisatingimusi. Teibi imiteerimiseks montaaživahu välimisel pinnal lisati välisele ääritingimusele lisatingimus takistamaks veeauru difusiooni. Lisati tingimus veeauru difusioonile vastava õhukihipaksusega $sd = 4$ m. Väärtus tulenes katseelementide ehitamisel lisatud mitmest kihist teibist. Allolevatel joonistel (Joonis 2.31 ja Joonis 2.32) on välja toodud informatsioon sisend- ja väljundandmete paiknemisest VS-5 ja VS-6 mudelis.



Joonis 2.31 VS-5 skeem sisend- ja väljundandmete kohta tarkvaras Delphin



Joonis 2.32 VS-6 skeem sisend- ja väljundandmete kohta tarkvaras Delphin

2.6.8 Materjalide omadused

Modelleerimisel kasutati seintel materjale Delphini andmebaasist ning muudeti vastavalt katses kasutatud materjalidele nende füüsikalisi suuruseid. Alljärgnevates tabelites (Tabel 2.4 ja Tabel 2.5) on välja toodud kasutatud materjalid nende tähtsamate füüsikaliste suurustega. Töö kalibreerimiste tulemuste osas on välja toodud modelleerimiseks kasutatud materjalide algset ja muudetud väärtused (vt Tabel 3.1).

Tabel 2.4 Modelleerimisel kasutatud materjalid ja nende tähtsamad omadused 1. osa

Materjali omadus	Puit (mänd)	Vineer	Tuuletõkke-kipsplaat	Kipsplaat	Polüuretaan-plaat	Õhkvahe ² 50 mm
Kihi paksus d (mm)	120-195	9	9	12,5	30-120	45
Tihedus ρ (kg/m ³)	554	700	850	850	35	1,3
Soojuseri-juhtivus λ (W/mK)	0,12	0,13	0,25	0,21	0,022	0,278
Õhu veeauru difusiooni-takistustegur μ (-)	348 (risti-kiudu)	50	15	10	100	0,2
Soojus-mahtuvus C (J/kgK)	2672,8	1500	850	850	1500	1050
Avatud poorsus ϕ (m ³ /m ³)	0,654	0,9	0,65	0,65	0,949	1
Veesorptsioon (RH = 80%) ϕ (m ³ /m ³)	0,072	0,096	0,007	0,007	0,001	10 ⁻⁵
Veeimavuse koefitsient A_w (kg/(m ² ·s ^{0,5}))	0,0160	0,002	0,277	0,277	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷

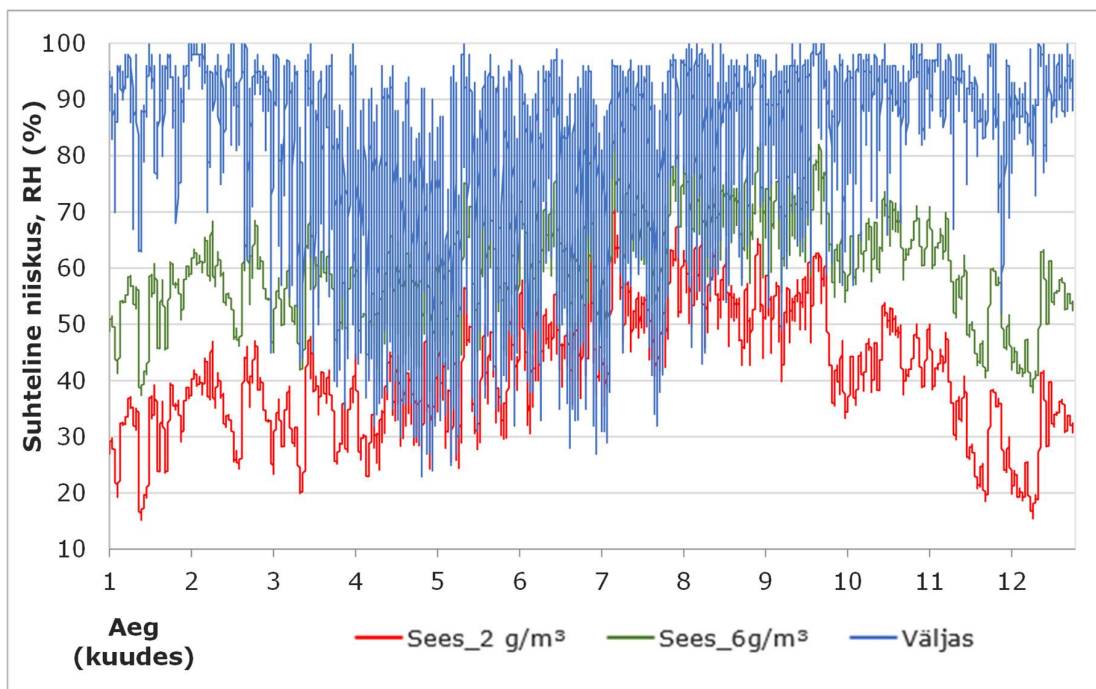
² Õhkvahe simuleerimisel on kasutatud Delphini andmebaasi 50 mm õhkvahe väärtusi

Tabel 2.5 Modelleerimisel kasutatud materjalid ja nende tähtsamad omadused 2. osa

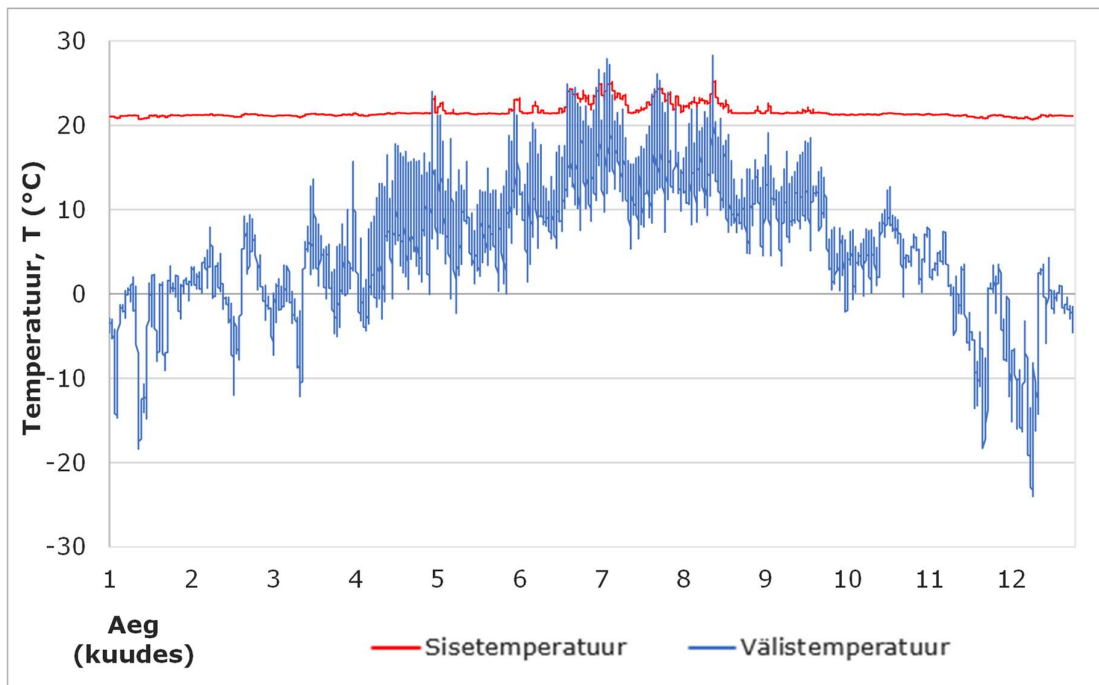
Materjali omadus	PUR ($\mu \leq 72,5$)	PUR ($\mu = 6,55$)	Montaaživaht	Klaasplast	Alumiinium
Kihi paksus d (mm)	145	195	10	7	0,3
Tihedus ρ (kg/m ³)	37	10,5	25	1250	2800
Soojuseri- juhtivus λ (W/mK)	0,022	0,039	0,035	0,025	235
Õhu veeauru difusiooni- takistustegur μ (-)	72,5	6,55	20	-	10000
Soojus- mahtuvus C (J/kgK)	1500	1500	1500	1500	897
Avatud poorsus ϕ (m ³ /m ³)	0,1	0,92	0,92	-	2×10^{-6}
Veesorptsioon (RH = 80%) ϕ (m ³ /m ³)	0,001	0,001	0,001	-	10^{-8}
Veeimavuse koefitsient A_w (kg/(m ² ·s ^{0,5}))	8×10^{-6}	10^{-4}	10^{-4}	-	0

2.6.9 Pikaajaline simulatsioon

Tarindite parema niiskustehnilise toimivuse mõistmiseks ajas, koostati kalibreeritud mudelite pikaajaline simulatsioon. Pikaajalise simulatsiooni perioodiks valiti 5 aastat. Testseinte pikaajalise simulatsiooni jaoks kasutati sise- ja väliskliima tingimustena hallituse testaasta (EstMRY_mould_89-90) 1989-1990 aastate temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andmeid [50]. Päikesekiirgust ja kaldvihma ei võetud pikaajalisel simuleerimisel arvesse, sest kalibreerimisel kasutati väliskliima andmeid, mis mõõdeti tuulutusvahesse paigaldatud anduritega. Pikaajalise simulatsiooni arvutusperioodiks valiti 5 aastat. Testhoone lõunapoolsesse ruumi paigaldatud seinte järgi kalibreeritud mudelitele (S- tähisega) lisati sisekliima niiskuslisa 2 g/m^3 ning põhjapoolse ruumi järgi kalibreeritud mudelitele lisati sisekliima niiskuslisa 6 g/m^3 . Väliskliimatingimused ning sisetemperatuur jäi kõigi mudelite puhul samaks. Allolevatel joonistel (Joonis 2.33 ja Joonis 2.34) on toodud hallituse testaasta suhteliste õhuniiskuste graafik ja hallituse testaasta temperatuuride graafik.



Joonis 2.33 Hallituse testaasta suhteliste õhuniiskuste graafik



Joonis 2.34 Hallituse testaasta sise- ja välistemperatuuride graafik

2.7 Toimivuskriteeriumid

2.7.1 Puidu niiskussisaldus

Sadlowska-Salega ja Was [51] leidsid, et reaalsetes tingimustes hakkab puit hallitama, kui puidu niiskussisaldus on vahemikus 22–24%. Esping, Salin ja Brander [52] toetasid Viitaneni [24] laboratoorsetest katsetest lähtuvalt, et puidu kriitiline niiskussisaldus hallituse tekkeks on 18% temperatuuri juures +15 °C. Hallituse tekkeks peavad soodsad tingimused esinema vähemalt 60 päeva järjest. Liisma, Kuus, Kukk et al. [53] lähtusid oma uuringus sellest, et puidu kriitiline niiskussisaldus on 17%. Olsson leidis oma töös, et kui puit on kuivatatud niiskussisalduseni 18%, siis on puidu kriitiline niiskussisaldus 15%. Niiskussisalduse 15% juures temperatuuril +15 °C tekkis puidule hallitus 30 päevaga [54]. Puidu niiskussisalduse kriitiliseks väärtuseks käesolevas töös valiti 18%, lähtudes eespool toodud tingimuste keskmisest väärtusest ning hallituse kasvuks soodsad tingimused peavad kestma vähemalt 60 päeva.

2.7.2 Suhteline õhuniiskus

Hallituse tekkeks soodsad tingimused sõltuvad suhtelisest õhuniiskusest, temperatuurist ning ehitusmaterjali pinnast. Puidu pinnal tekib hallitus, kui pikaajaliselt on suhteline õhuniiskus üle 80% ning temperatuur jääb vahemikku +5 kuni +50 °C. Kui temperatuur on vahemikus -5 kuni +5 °C, siis peab hallituse tekkeks vajalik suhteline õhuniiskus ületama pikaajaliselt 90% piiri [24]. Rootsi Rahvuslik Elamumajandus-, Ehitus- ja Planeerimisnõukogu Boverket (BBR) annab oma normatiivdokumendis [55] ehitusmaterjalide suhtelise niiskuse kriitiliseks tasemeks 75%. Suurema suhtelise õhuniiskuse korral ilmneb inimorganismile ohtlikke mikrobioloogilisi protsesse ja tekib hallitust. Lähtudes eespooltoodud tingimustest arvestati käesolevas töös kogu tarindi kriitiliseks suhtelise õhuniiskuse piiriks 75%, kui temperatuur on vahemikus +5 kuni +50 °C.

2.7.3 Hallituse indeks

Norra ülikoolis 2019. aastal läbi viidud uuringus leiti, et puidu pinna suhtelise niiskuse kasutamine hallituse hindamisel andis kõige täpsemaid tulemusi [56]. Käesolevas töös on hallituse riski hindamisel lähtutud puidu pinna suhtelisest niiskusest pikaajalisel simulatsioonil. Hallituse hindamisel ei ole arvesse võetud kaldvihma võimalust. Hallituse hindamisel tarindis lähtutakse kõigi simuleeritud seinte puhul puidu kõige suurema niiskusega piirkonnast, milleks on läbivalt kõige välimine mõõtepunkt tarindis. Kõikide seinte välimine mõõtepunkt asub karkassiposti välimises ääres. VS-1, VS-5 ja VS-6 puhul asub välimine mõõtepunkt karkassi vahelise soojustuse ja välise PIR soojustuse vahel, VS-3 ja VS4 puhul aga soojustuse ja tuuletõkkekihi vahel. Hallituse mudeli koostamisel on sisenditena lisatud suhteline niiskus ja temperatuur mõõtepunktis puidu pinnal. Allolevas tabelis (Tabel 2.6) on välja toodud hallitusmudeli hindamisel kasutatavaid hallitusindeksi väärtuseid koos hallituse kasvu kirjeldustega. Hallituse indeksi arvutamisel kasutati suhtelise niiskuse kriitilise piiri valemit (2.3). Käesolevas töös loetakse toimivaks tarindid vastavalt H. Viitaneni välja töötatud valgusfoori mudelile, kus hallituse indeks kuni 2 annab rohelist tule ja viitab tarindi toimivusele, kuni 3 annab kollast tule ning sellisel juhul tuleb kasutajal otsustada tarindi sobilikkuse üle ning hallituse indeks üle 3 annab punast tule ja annab märku sellest, et tarind ei ole niiskustehniliselt toimiv [13]. Allolevas tabelis (Tabel 2.7) on esitatud erinevate materjalide tundlikkuse klassid hallituse suhtes. Käesolevas töös on kasutatud männipuitu, mis kuulub hallitusele väga tundliku materjali klassi. Alloleval joonisel (Joonis 2.35) on toodud hallituse kasvuks soodsad keskkonnatingimused.

Tabel 2.6 Modelleerimisel kasutatavad hallituse indeksid [57]

Indeks	Hallituse kasvu kirjeldus
0	Hallitus puudub
1	Vähene pindmine hallitus (mikroskoopiline), lokaalse kasvu algstaadium
2	Mitmed lokaalsed pindmised hallituse kolooniad (mikroskoopiline)
3	Silmaga nähtav pindmine hallitus, < 10% kaetud, või < 50% kaetud mikroskoobiga vaadeldav hallitus
4	Silmaga nähtav pindmine hallitus, 10-50% kaetud, või > 50% kaetud mikroskoobiga vaadeldav hallitus
5	Laialdane pindmine hallituse kasv, > 50% kaetud silmaga nähtav hallitus
6	Laialdane ja tihe hallituse kasv, kaetud ligi 100%

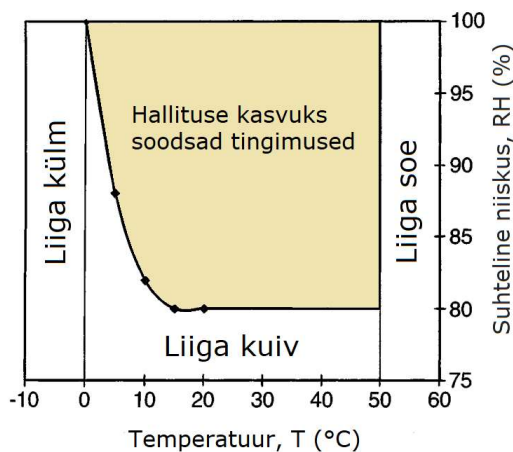
Tabel 2.7 Modelleerimisel kasutatavad materjalide tundlikkuse klassid [58]

Tundlikkuse klass	Materjal
Väga tundlik	Männi maltspuit
Tundlik	Liimpuit, paberkattega PUR, kuusepuit
Keskmiselt vastupidav	Betoon, poorbetoon, klaasvill, polüestervill
Vastupidav	Sileda pinnaga PUR

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,002267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100,0 & \text{when } T \leq 20 \\ 80\% & \text{when } T > 20 \end{cases} \quad (2.3)$$

kus RH_{crit} suhtelise õhuniiskuse kriitiline väärtus, %,

T temperatuur, K.



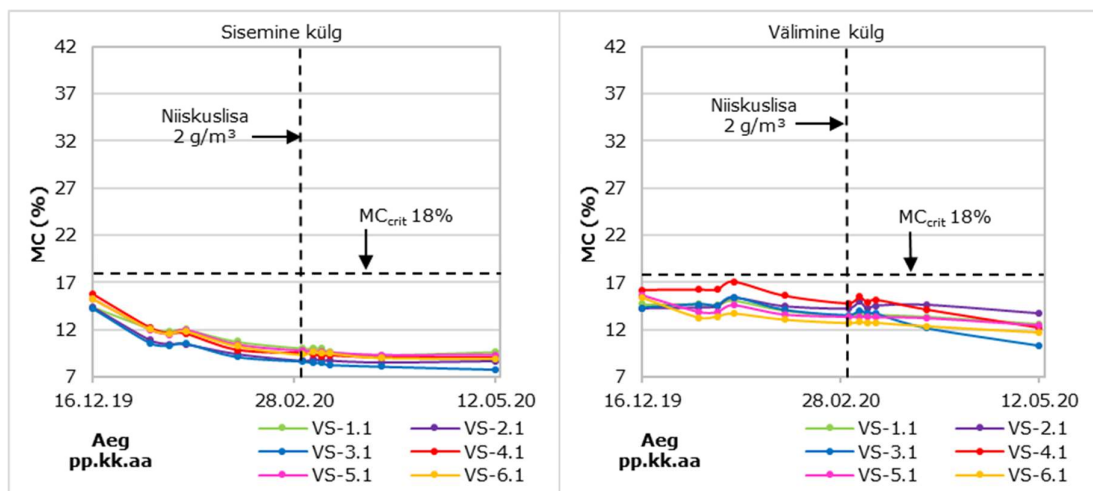
Joonis 2.35 Hallituse kasvuks soodsad tingimused [59]

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1 Tulemused mõõtmistest

3.1.1 Puidu niiskus

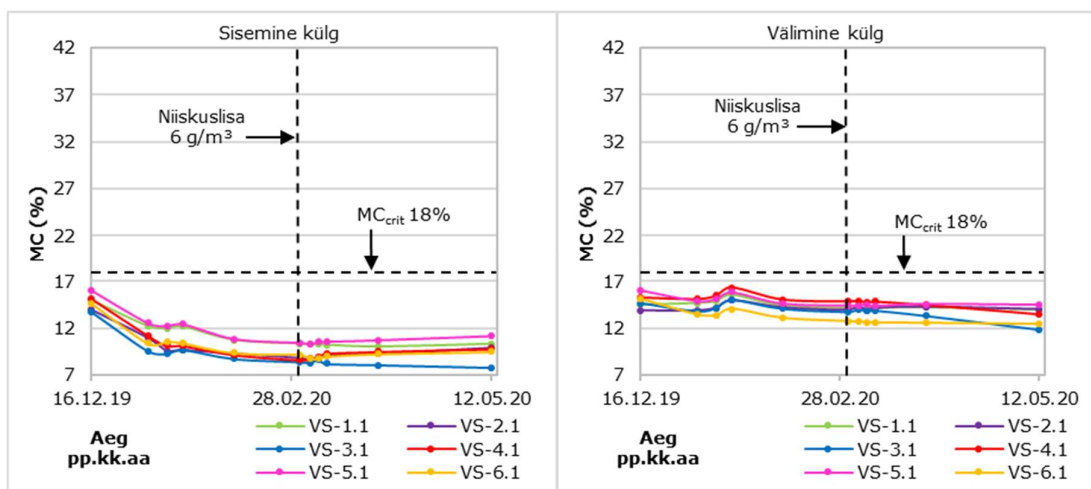
Testperioodil mõõdetud kuiva puitkarkassi niiskussisaldused väikese niiskustaseme testruumis on toodud joonisel (Joonis 3.1). Puitkarkasside niiskussisaldused ehitamise ajal nii sise- kui ka välikülgedel jäid vahemikku 14-16%. Testelementide ehitamisest kuni montaažitööde lõpetamiseni jaanuari alguses vähenes karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldus peaaegu 1/3 võrra. Välimiste servade niiskussisaldus jäi samal perioodil peaaegu samale tasemele. Jaanuari kuu jooksul kuivasid testseinad suunaga seest välja, seda iseloomustab karkassipostide välimiste külgede niiskussisalduse tõus. Märtsi algusest tekitatud niiskustaseme ei avaldanud mõju karkassipostide sisemiste külgede ega ka välimiste külgede niiskussisaldusele. 148 päeva jooksul langes karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldused alla 10%. Välimiste külgede niiskussisaldused jäid katse perioodi lõpus vahemikku 10-14%. Mõõtetulemustest võib järeldada, et karkassipostide tasakaaluniiskus jääb vahemikku 8-14%.



Joonis 3.1 Väikese algniiskusega karkassipostide mõõdetud niiskussisaldus testruumis niiskustaseme 2 g/m³. Vasakul karkassipostide sisemiste külgede väärtused ning paremal välimiste külgede väärtused

Testperioodil mõõdetud kuiva karkassipuidu niiskussisaldused suure niiskustaseme testruumis on toodud joonisel (Joonis 3.2). Puitkarkassi algniiskused nii sise- kui ka välikülgedel jäid vahemikku 13-16%. Testelementide ehitamisest kuni montaažitööde lõpetamiseni jaanuari alguses vähenes karkassipostide sisemiste külgede

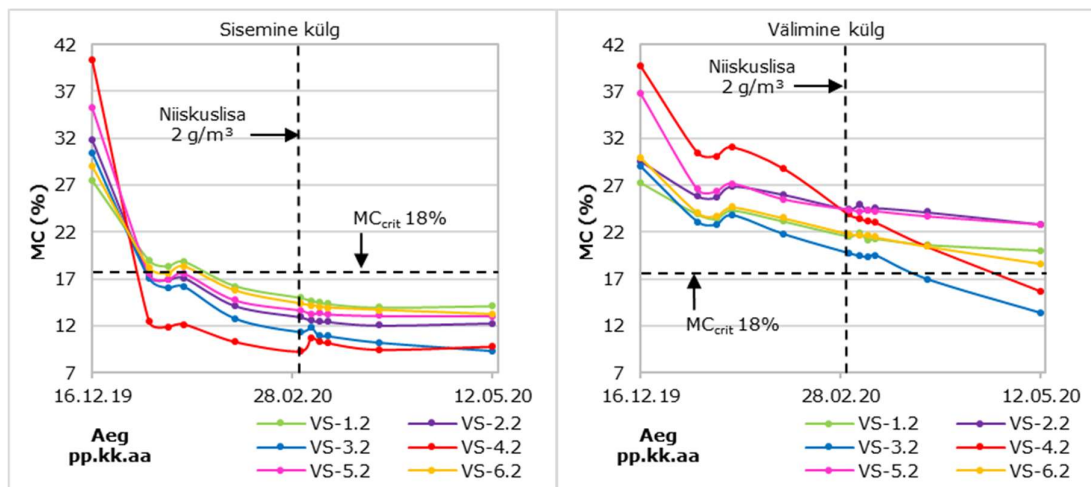
niiskussisaldus peaaegu 1/3 võrra. Välimiste servade niiskussisaldus langes keskmiselt ligikaudu 0,5% võrra. Jaanuari kuu jooksul kuivasid testseinad suunaga seest välja, seda iseloomustab karkassipostide välimiste külgede niiskussisalduse tõus. Märtsi algusest tekitatud niiskulisla 6 g/m³ tõttu hakkasid karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldused tõusma. Sellest võib järeldada, et puit hakkas ruumi suure niiskuskooormuse tõttu märguma. Välimiste külgede niiskussisaldustes samal perioodil marginaalset muutust ei toiminud. Testseinad VS-3.1 ja VS-4.1 hakkasid peale niiskulisla tekitamist teistest seintest kiiremini kuivama. Mõõtetulemustest võib järeldada, et karkassipostide tasakaaluniiskus jääb vahemikku 8-15%.



Joonis 3.2 Väikese algniiskusega karkassipostide mõõdetud niiskussisaldus suure niiskulisaga testruumis. Vasakul karkassiposti sisemise külje väärtused ning paremal välimise külje väärtused

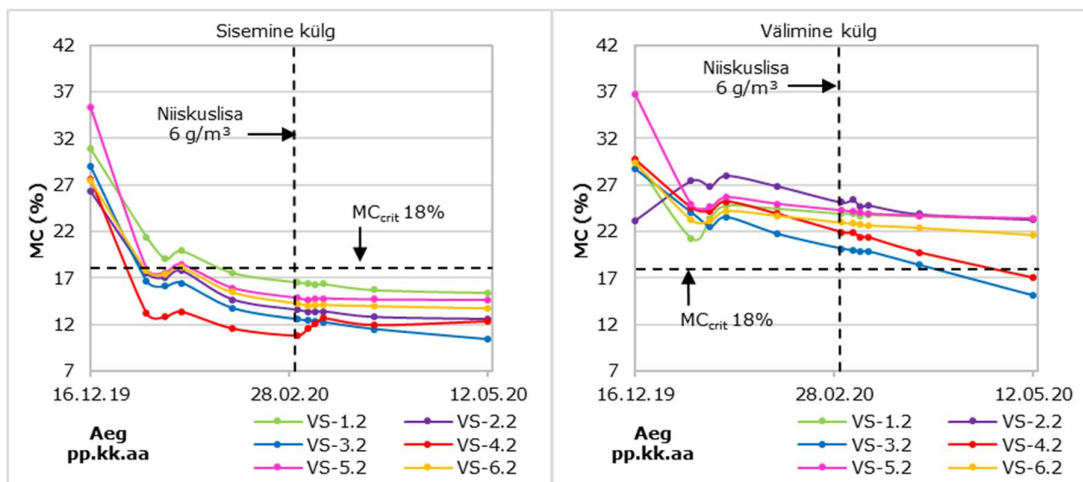
Testperioodil mõõdetud märja karkassipuidu niiskussisaldused väikese niiskulisaga testruumis on toodud joonisel (Joonis 3.3). Algniiskused nii sise- kui ka välikülgedel jäid vahemikku 27-41%. Testelementide ehitamisest kuni montaažitööde lõpetamiseni jaanuari alguses vähenes karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldus peaaegu 2 korda. Suurim muutus toimus testelemendis VS-4.2, kus niiskussisaldus vähenes 27,9%. Testseinte niiskussisaldus langes vähem kui 21 päeva jooksul alla 18% välja arvatud VS-1.2 puhul. VS-1.2 karkassiposti sisemise külje niiskussisaldus ületas 18% piiri 34 järjestikusel päeval. Välimiste servade niiskussisaldus langes keskmiselt ligikaudu 6,5% võrra. Jaanuari kuu jooksul kuivasid testseinad suunaga seest välja, seda iseloomustab karkassipostide välimiste külgede niiskussisalduse tõus. Märtsi algusest tekitatud niiskulisla 2 g/m³ ei avaldanud mõju karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldusele. Välimiste külgede niiskussisaldustes samal perioodil marginaalset muutust ei toiminud. Testseinad VS-3.2 ja VS-4.2 hakkasid peale niiskulisla 2 g/m³ tekitamist teistest seintest kiiremini kuivama. Kõikide testseinte karkassipostide niiskussisaldus välimisel küljel püsis üle 18% pikemalt kui 60 päeva.

Mõõtetulemustest on näha, et karkassipostide välimiste külgede niiskussisaldused on langeva trendiga.



Joonis 3.3 Suure algniiskusega karkassipostide mõõdetud niiskussisaldus väikese niiskuslisaga testruumis. Vasakul karkassiposti sisemise külje väärtused ning paremal välimise külje väärtused

Testperioodil mõõdetud märja karkassipuidu niiskussisaldused suure niiskuslisaga testruumis on toodud joonisel (Joonis 3.4). Algniiskused nii sise- kui ka välikülgedel jäid vahemikku 23-37%. Testelementide ehitamisest kuni montaažitööde lõpetamiseni jaanuari alguses vähenes karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldus keskmiselt 12% võrra. Testseinte niiskussisaldus langes vähem kui 21 päeva jooksul alla 18% välja arvatud VS-1.2 puhul. Välimiste servade niiskussisaldus enamikel testseintel langes keskmiselt 7,5% võrra. Testseinas VS-2.2 suurenes aga niiskussisaldus 4,3% võrra. Jaanuari kuu jooksul kuivasid testseinad suunaga seest välja, seda iseloomustab karkassipostide välimiste külgede niiskussisalduse tõus. VS-1.2 karkassiposti sisemise serva niiskussisaldus ületas 18% piiri 53 järjestikusel päeval. Märtsi algusest tekitatud niiskuslisa 6 g/m³ ei avaldanud mõju karkassipostide sisemiste külgede niiskussisaldusele, välja arvatud VS-4.2, mille niiskussisaldus tõusis 1,8% võrra. Välimiste külgede niiskussisaldustes samal perioodil marginaalset muutust ei toiminud. Testseinad VS-3.1 ja VS-4.1 hakkasid peale niiskuslisa tekitamist teistest seintest kiiremini kuivama. Kõikide testseinte karkassipostide niiskussisaldus välimisel küljel püsis üle 18% pikemalt kui 60 päeva. Mõõtetulemustest on näha, et karkassipostide välimiste külgede niiskussisaldused on langeva trendiga.



Joonis 3.4 Suure algniiskusega karkassipostide mõõdetud niiskussisaldus suure niiskuslisa testruumis. Vasakul karkassiposti sisemise külje väärtused ning paremal välimise külje väärtused

Puidu niiskussisalduse mõõtmised näitasid, et puitkarkassi sisemise ja välimise külje niiskused hakkavad ajapikku ühtlustuma.

sid

3.1.2 Suhteline õhuniiskus ja temperatuur

Kõigis testruumides oli mõõtmistel katkestus ajavahemikus 16.03-24.03.2020. Väikese niiskuslisa testruumis oli märtsi alguses niisutussüsteemi rikke tõttu õhutemperatuuri suur tõus.

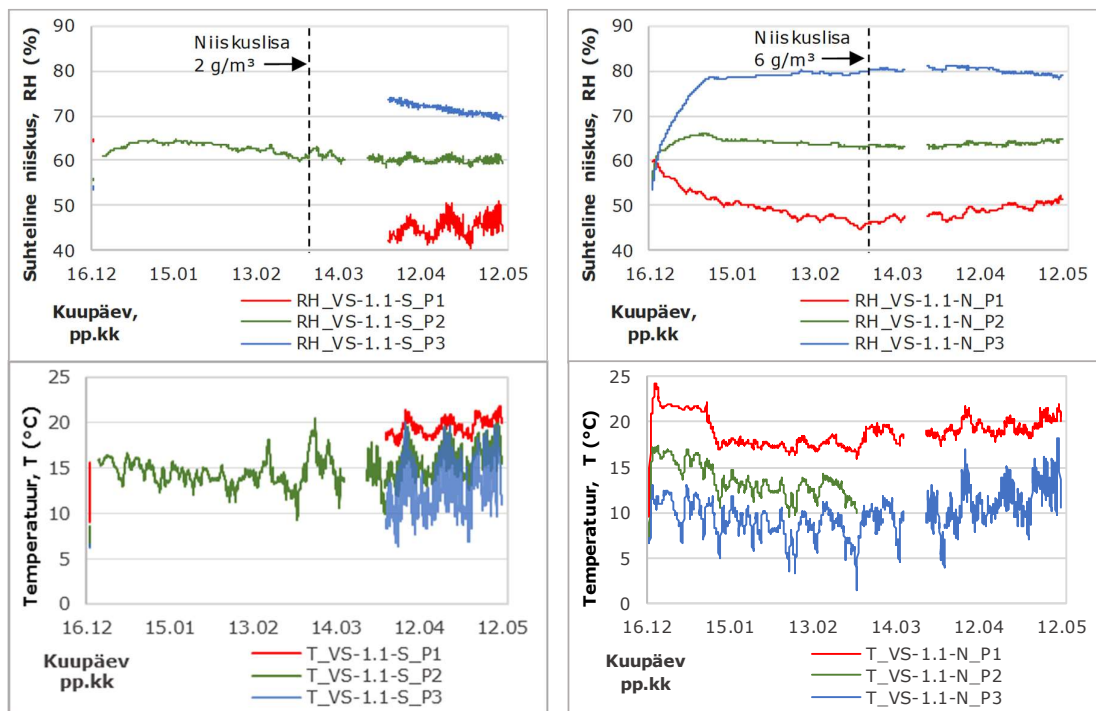
Kuiva karkassiga VS-1 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.5). Väikese niiskuslisa testruumis hakkasid andurid andmeid edastama alles 31.03.2020. Märtsi algusest lõunapoolsesse testruumi tekitatud niiskuslisa 2 g/m³ suurendas lühiajaliselt suhtelist õhuniiskust anduri P2 juures. Niiskuslisa 6 g/m³ tekitamine teises testruumis ei mõjutanud andurite P2 ja P3 näite, kuid P1 anduri näidud olid sellest ajast peale tõusva tendentsiga. Suure niiskuslisa testruumis paiknenud testelemendi anduri P3 näit püsis katse jooksul 80% läheduses. Sama anduri näidud väikese niiskuslisa testruumis olid andmete edastamise ajast alates vahemikus 70–75%. Vastavalt toimivuskriteeriumitele oli mõlemas testruumis anduri P3 läheduses hallituse jaoks sobilikud tingimused

Märja karkassiga VS-1 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.6). Märtsi algusest lõunapoolsesse testruumi tekitatud niiskuslisa 2 g/m³ ei mõjutanud andurite näite. Niiskuslisa 6 g/m³

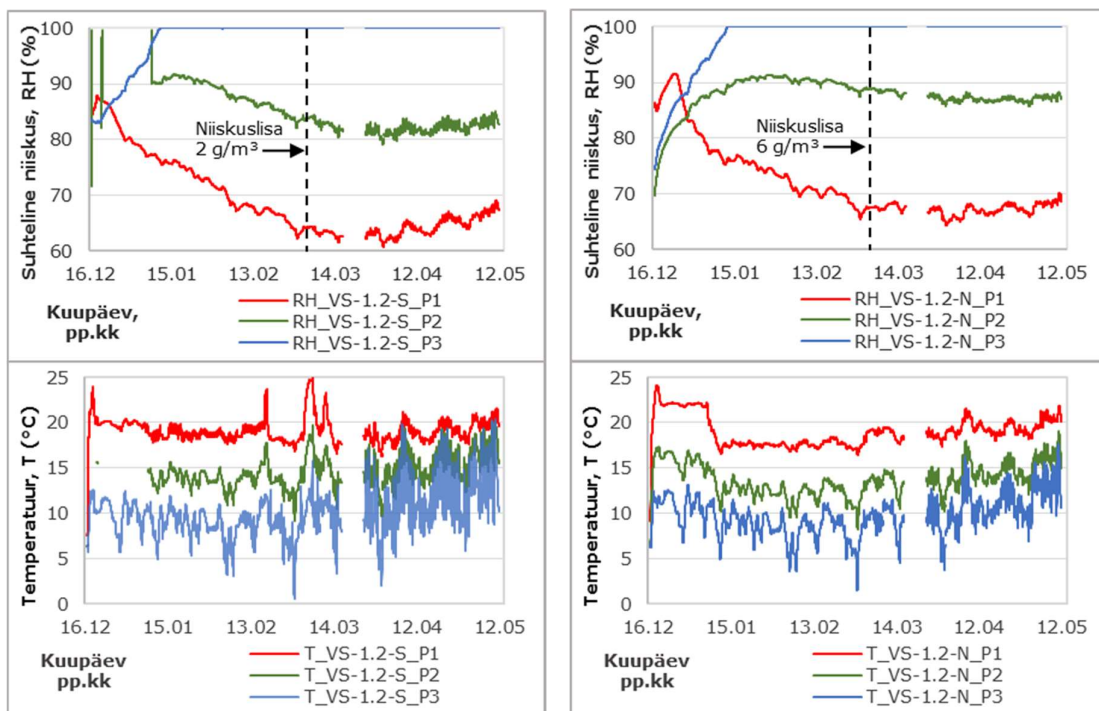
tekitamine teises testruumis ei mõjutanud samuti andurite näite. Mõlemas testruumis olid P3 anduri näidud püsivalt 100% juures, mis tähendas, et vähemalt anduri ümbruses toimus kondenseerumine. Mõlemas testruumis olid P2 andurite näidud langeva tendentsiga, kuid siiski vahemikus 80–90%. Suhteline õhuniiskus mõlemas testruumis punktis P1 vähenes kuni aprilli alguseni. Aprilli alguses hakkas mõlemas testruumis P1 anduri näita suurenema. Hallituse tekkeks sobilikud tingimused mõlemas testruumis olid terve katse vältel punktides P2 ja P3.

Kuiva karkassiga VS-2 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.7). Mõlemas testruumis olid anduri P3 suhtelise õhuniiskuse näidud testperioodi algusest märtsi keskpaigani tõusevas joones, tõustes peaaegu 90% piirini. Erinevalt suure niiskulisaga testruumist, kus anduri P3 näit jäi testperioodi lõpuni 85% kanti, hakkas väikese niiskulisaga testruumis anduri P3 näit märtsi keskpaigast langema, langedes testperioodi lõpuks alla 80%. Mõlemas testruumis oli anduri P2 näit kogu testperioodi vältel 60% ligidal. Anduri P1 näit mõlemas testruumis oli langev kuni märtsi alguseni ning hakkas siis tõusma. Kogu katse perioodil jäi P1 näit mõlemas testruumis vahemikku 35–55%. Hallituse tekkeks sobilikud tingimused olid mõlemas testruumis anduri P3 läheduses.

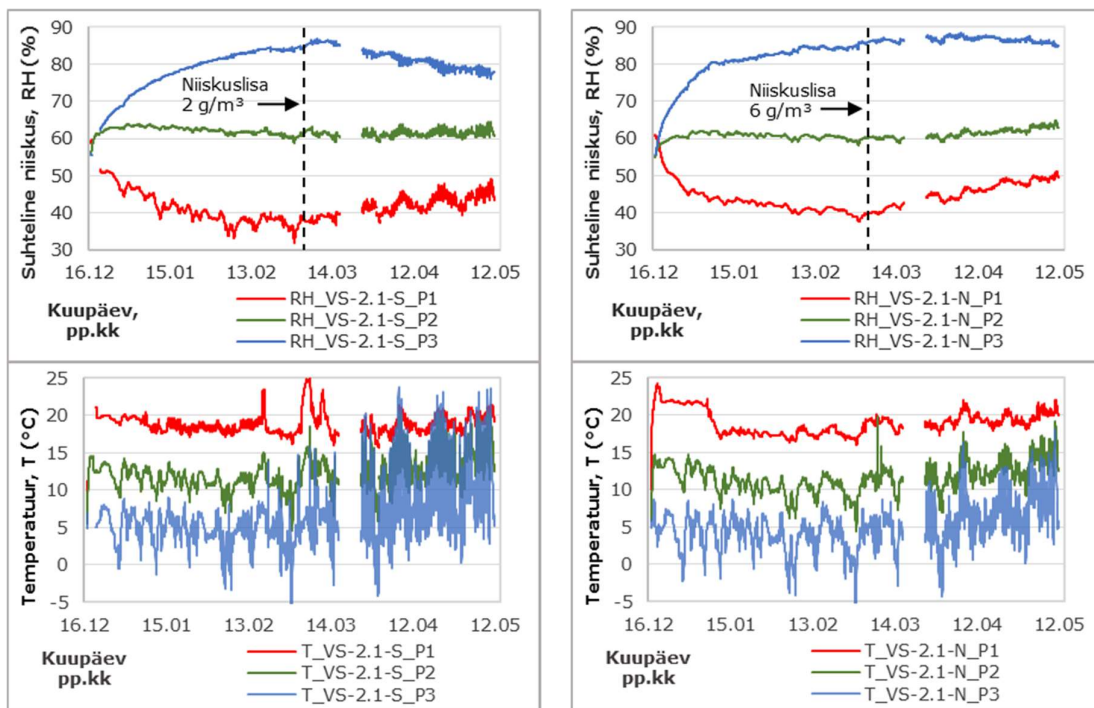
Märja karkassiga VS-2 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.8). Mõlema testruumi andmed olid lünklikud. Mõlemas testruumis anduri P3 näit oli 100% juures, mis viitab kondenseerumisele testseinas. Anduri P2 näit on katse jooksul mõlemas testseinas olnud vahemikus 80–90%. Mõlemas testruumis jäi anduri P1 näit vahemikku 50–65%. Niiskuselisa 6 g/m^3 tekitamine suurendas anduri P1 näitu ligikaudu 10%. Hallituse tekkeks olid sobivad tingimused mõlema testruumis P2 ja P3 andurite ümbruses, kuid vahepeal miinustesse langenud temperatuur võis aeglustada hallituse levikut.



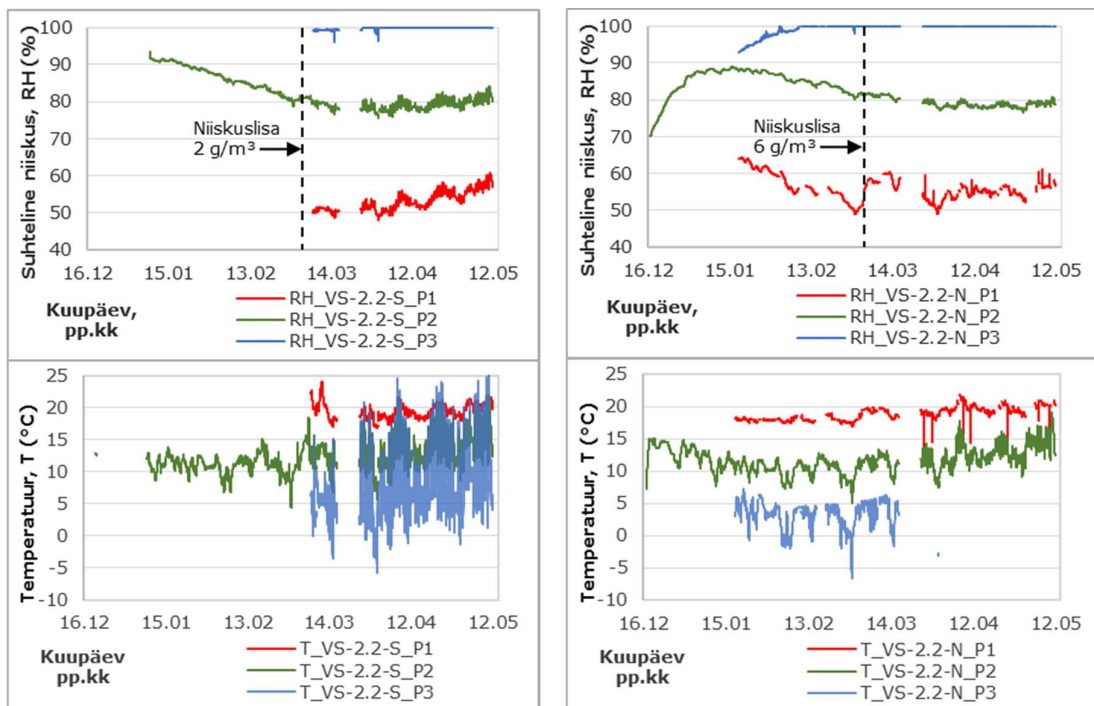
Joonis 3.5 Kuiva karkassiga VS-1 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.6 Märja karkassiga VS-1 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.7 Kuiva karkassiga VS-2 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.8 Märja karkassiga VS-2 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur

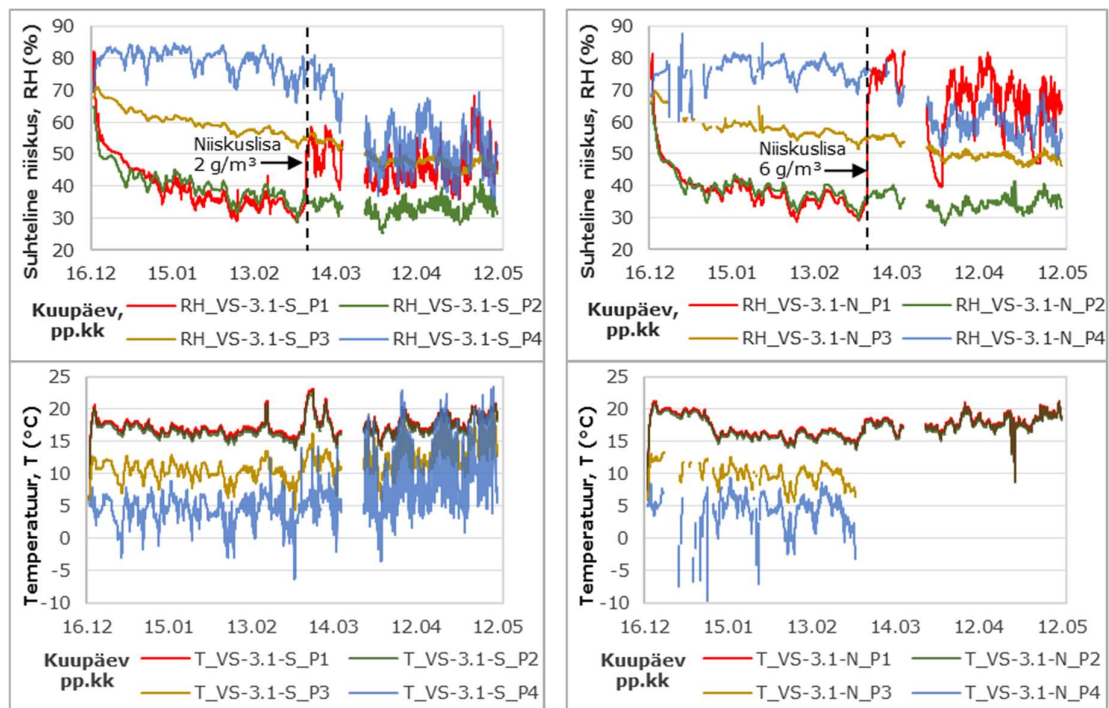
Kuiva karkassiga VS-3 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.9). Mõlemas testruumis olid P4 andurite näidud kuni märtsi keskpaigani vahemikus 70–85%. Välistemperatuuride tõusmisega vähenes andurite näit mõlemas testseinas alla 70%. Anduri P3 näit mõlemas testruumis oli terve katse jooksul langeva tendentsiga, langedes ~70%-lt 45%-ni. Mõlemas testruumis olid andurite P1 ja P2 näidud sarnased kuni niiskuselise tekitamiseni. Niiskuselise tekitamise hetkest oli näha, et aurutõkke kihist väljas pool olevate andurite P2 näit ei muutunud. Aurutõkke kihist sees pool olevate andurite P1 näidud suurenesid märgatavalt. Sellest võib järeldada, et aurutõkkekiht takistas niiskuse levikut konstruktsiooni. Mõlemas testruumis oli hallituse tekkeks sobilikud tingimused talve kuudel anduri P4 lähistel. Samal ajal valitsenud madalad õhutemperatuurid võisid hallituse kasvu pidurada. Suure niiskuselisaga testruumis olid tingimused anduri P1 juures peale niiskuselise 6 g/m³ tekitamist hallituse tekkeks piiripealsed, jäädes vahemikku 55–80%.

Märja karkassiga VS-3 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.10). Mõlemas testruumis olid P4 andurite näidud kuni märtsi keskpaigani vahemikus 75–95%. Välistemperatuuride tõusmisega vähenes andurite näit mõlemas testseinas alla 70%. Anduri P3 näit mõlemas testruumis oli terve katse jooksul langeva tendentsiga, langedes ~100%-lt 55%-ni. Mõlemas testseinas olid andurite P2 näidud langeva tendentsiga. Andurite P1 ja P2 näitude erinevuste vahe võis tekkida aurutõkke kihi tõttu, mis ei lasknud konstruktsioonil sissepoole kuivada. Aurutõkke kihist sees pool olevate andurite P1 näidud suurenesid märgatavalt peale niiskuselise tekitamist. Sellest võib järeldada, et aurutõkkekiht takistas niiskuse levikut konstruktsiooni. Mõlemas testruumis oli hallituse tekkeks sobilikud tingimused talve kuudel anduri P4 lähistel. Samal ajal valitsenud madalad õhutemperatuurid võisid hallituse kasvu pidurada. Suure niiskuselisaga testruumis olid tingimused anduri P1 juures peale niiskuselise 6 g/m³ tekitamist hallituse tekkeks piiripealsed, jäädes vahemikku 55–80%.

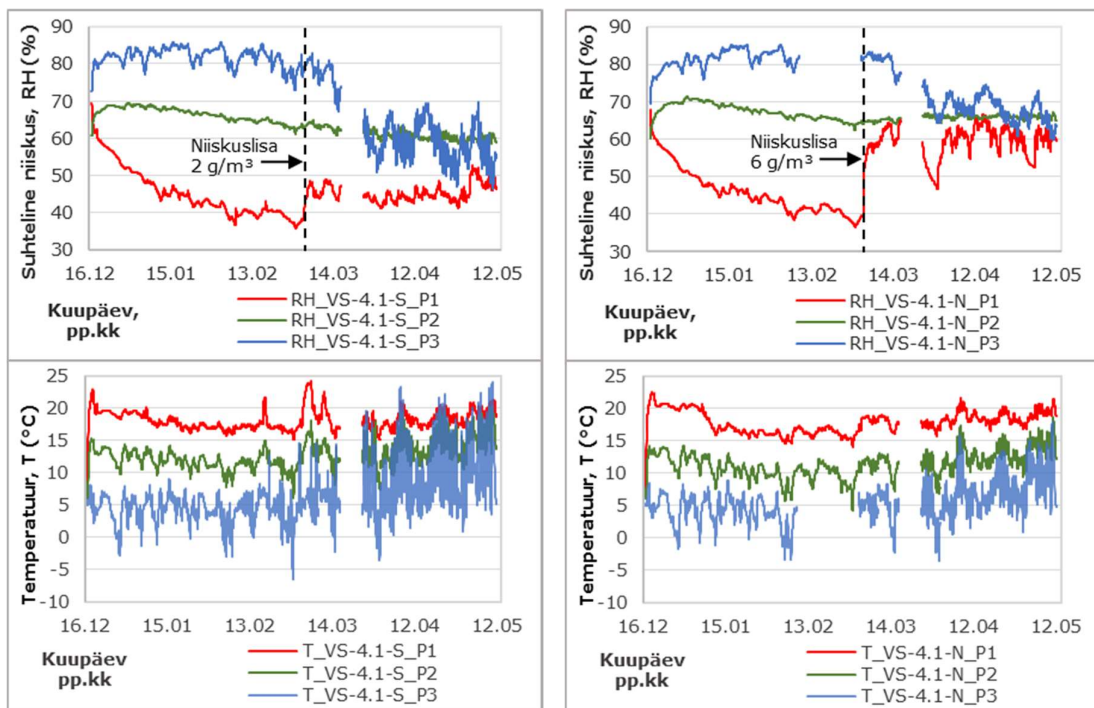
Kuiva karkassiga VS-4 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.11). P3 andurite näidud mõlemas testruumis olid katse algusest kuni märtsi keskpaigani keskmiselt 80% juures. Soojemate ilmadega langesid P3 andurite näidud vahemikku 45–75%. Mõlemas testruumis olid andurite P2 näidud testperioodi jooksul langeva tendentsiga jäädes vahemikku 60–70%. Andurite P1 näidud langesid mõlemas testruumis 70%-lt testperioodi alguses, alla 40% niiskuselise tekitamiseni märtsi alguses. Niiskuselise tekitamise hetkest tõusis suhteline õhuniiskus P1 anduri juures märgatavalt, väikese

niiskussisaga testruumis ~10% ja suure niiskussisaga testruumis ~15%. P2 anduri juures samal ajal muutust ei toimunud, mis tuleneb PUR vahu ($\mu \leq 72,5$) suurest veeaurutakistusest. Hallituse tekkeks sobilikud tingimused olid mõlema testruumi P3 anduri juures talve kuudel.

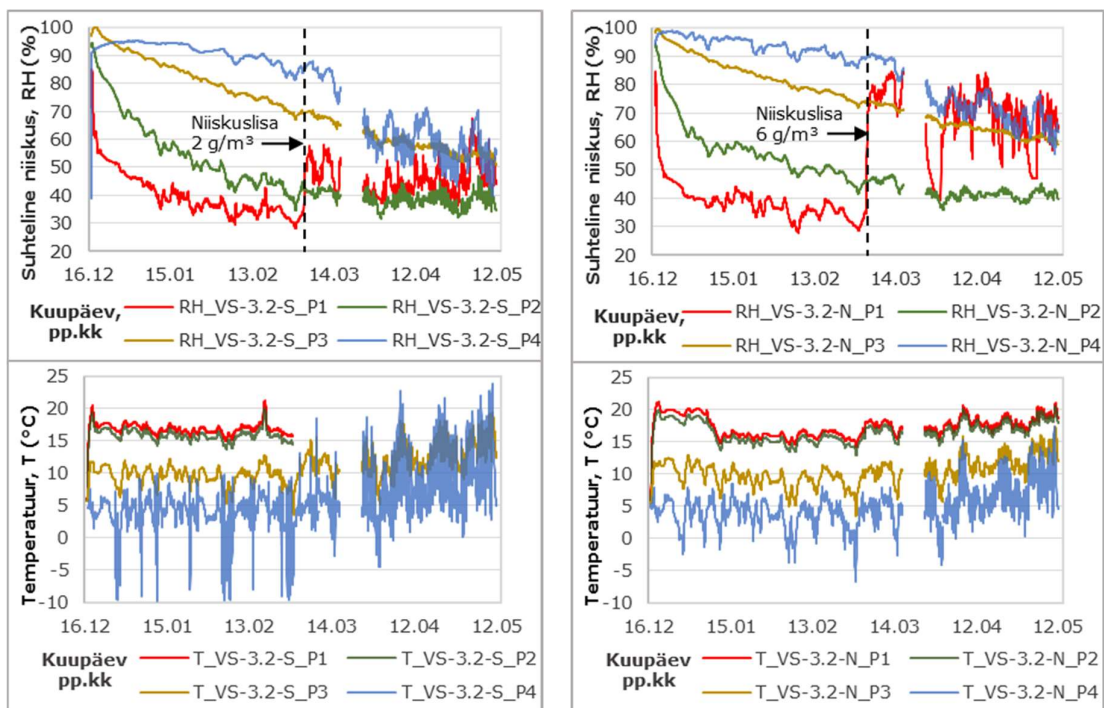
Märja karkassiga VS-4 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.12). P3 andurite näidud mõlemas testruumis olid katse algusest kuni märtsi keskpaigani üle 90% piiri. Soojemate ilmadega langesid P3 andurite näidud vahemikku 60–95%. Mõlemas testruumis olid andurite P2 näidud testperioodi jooksul langeva tendentsiga langedes 95%-lt ligikaudu 70%-le. Andurite P1 näidud langesid mõlemas testruumis testperioodi alguses kiiresti ~50% ning jäid vahemikku 25–40% niiskussisaga tekitamiseni märtsi alguses. Niiskussisaga tekitamise hetkest tõusis suhteline õhuniiskus P1 anduri juures märgatavalt, väikese niiskussisaga testruumis ~20% ja suure niiskussisaga testruumis ~40%. P2 anduri juures samal ajal muutust ei toimunud, mis tuleneb PUR vahu ($\mu \leq 72,5$) suurest veeaurutakistusest. Hallituse tekkeks sobilikud tingimused olid mõlema testruumi P2 ja P3 anduri juures talve kuudel.



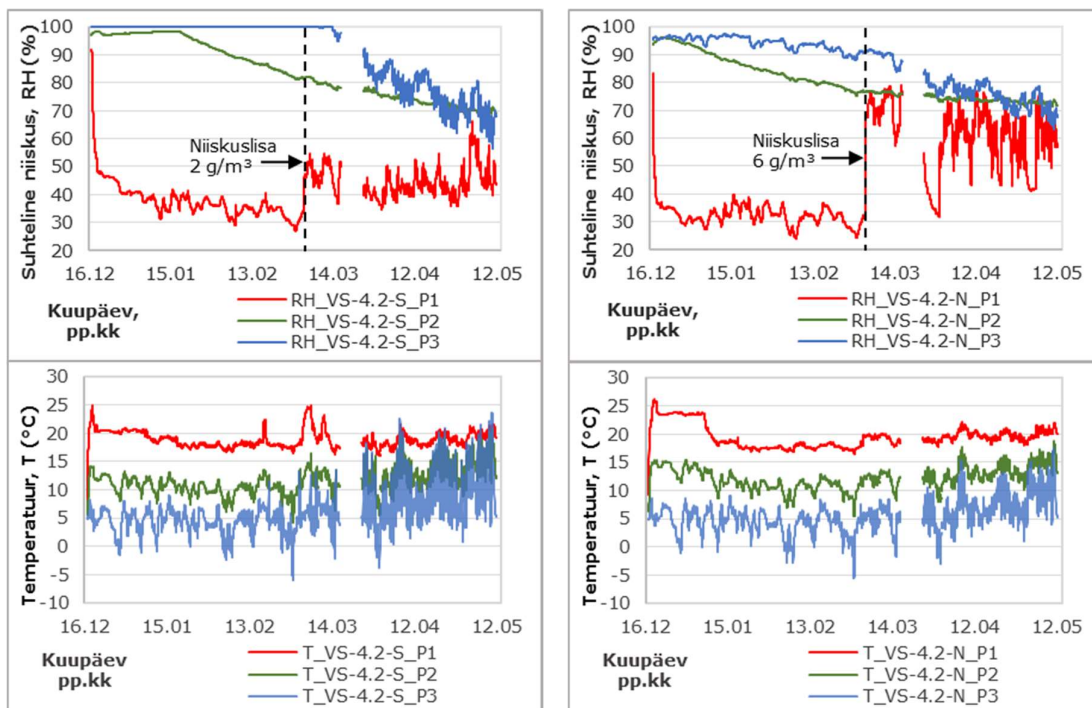
Joonis 3.9 Kuiva karkassiga VS-3 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.10 Märja karkassiga VS-3 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.11 Kuiva karkassiga VS-4 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.12 Märja karkassiga VS-4 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur

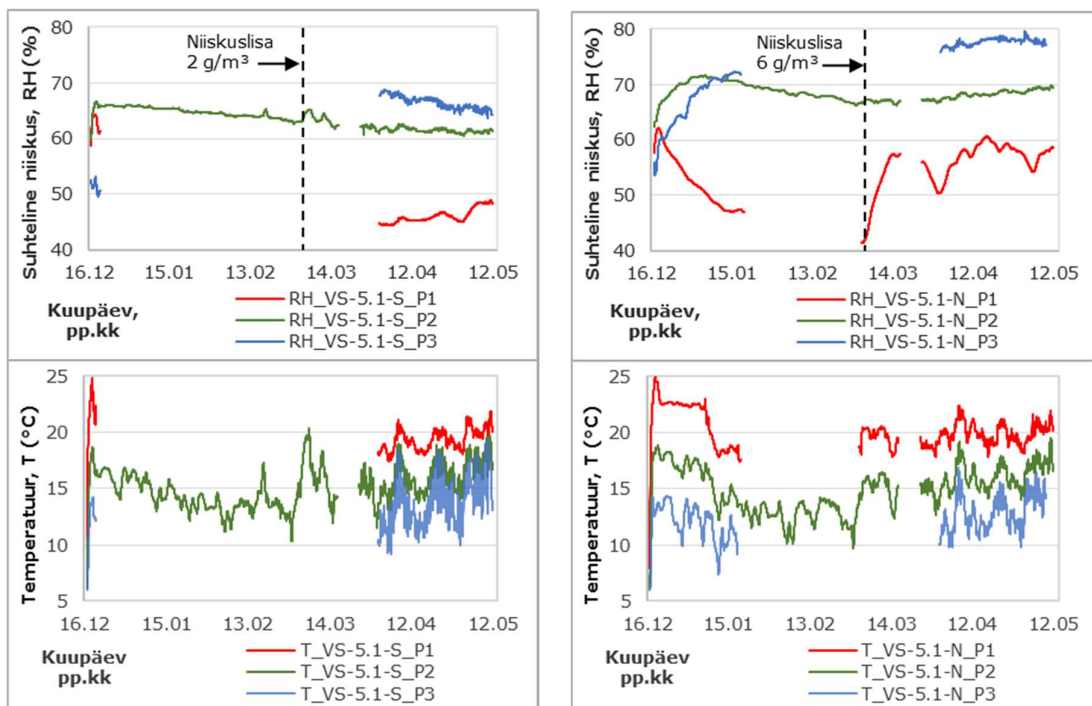
Kuiva karkassiga VS-5 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.13). Mõlemas testruumis olid andurite P3 näidud järeltule tegemiseks puudulikud. Suure niiskustaseme testruumis langes testperioodi alguses ning hakkas tõusma niiskustaseme tekitamise hetkest, jäädes testperioodil vahemikku 40–60%. Andurite P2 näidud jäid testperioodi jooksul vahemikku 60–75%, olles väikese niiskustaseme testruumis langev aga suure niiskustaseme testruumis alates niiskustaseme tekitamisest tõusev. Suhtelise õhuniiskuse tõus võib viidata PUR vahu ($\mu \leq 72,5$) ebapiisavale veeaurutakistusele. Andurite P2 ümbruses olevad tingimused ei olnud piisavalt niisked hallituse tekkeks.

Märja karkassiga VS-5 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.14). Mõlemas testruumis olid andurite P3 näidud katseperioodi jooksul 100% juures, mis viitab kondenseerumisele anduri ümbruses. Andurite P2 näidud jäid testperioodi jooksul vahemikku 85 – 100%, olles mõlemas testruumis langev. Mõlemas testruumis vähenesid andurite P1 näidud märtsi alguseni 30% võrra. Kevade perioodil olid mõlema testruumi P1 andurite näidud tõusva tendentsiga, jäädes vahemikku 55–75%. Andurite P2 ja P3 ümbruses olevad tingimused olid hallituse kasvuks sobilikud.

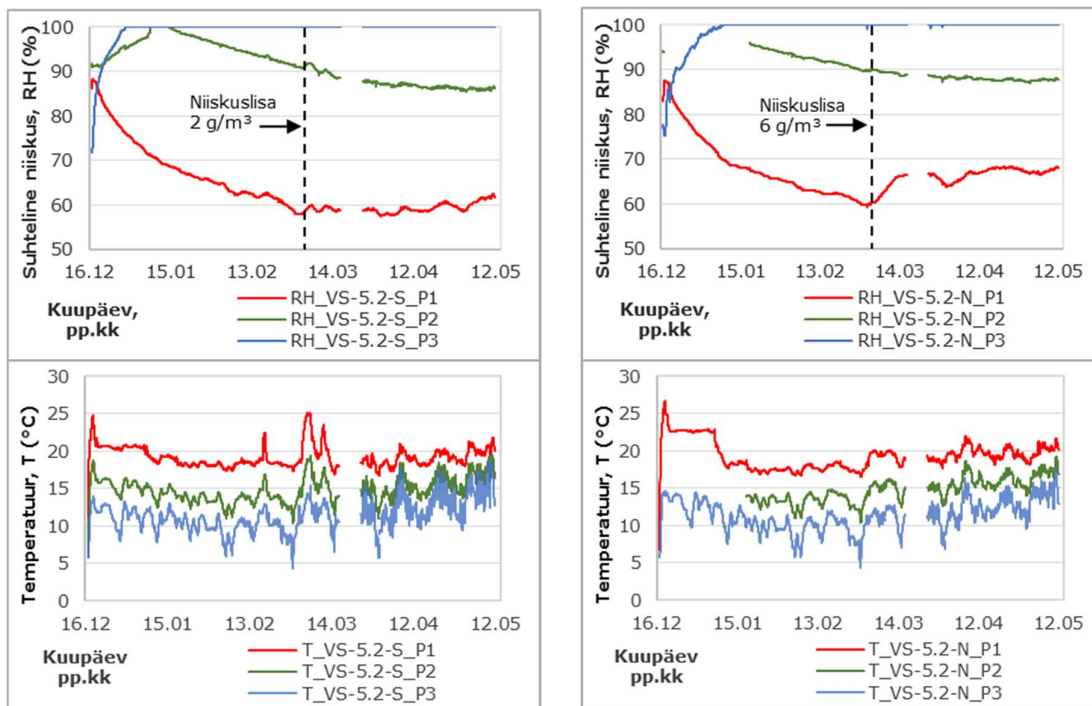
Kuiva karkassiga VS-6 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.15). P3 andurite näidud olid väikese niiskussisuga testruumis lünklikud, kuid jäid testperioodi jooksul alla 70%. Suure niiskussisuga testruumis ei edastanud P3 andur andmeid terve testperioodi vältel. Mõlemas testruumis jäid andurite P2 näidud vahemikku 55–65%. Niiskussisa 6 g/m³ tekitamisel hakkasid P2 anduri näidud suurenema, mis võib tuleneda PUR vahu ($\mu \leq 72,5$) ebapiisavast veeaurutakistusest. P1 andurid mõlemas testruumis olid märtsi alguseni langevad. Väikese niiskussisuga testruumi P1 anduri näit hakkas tõusma aprilli alguses, jäädes terve testperioodi jooksul vahemikku 45–65%. Suure niiskussisuga testruumi P1 anduri näit suurenes niiskussisa tekitamise hetkest ligikaudu 15% ning on sellest ajast peale olnud tõusva tendentsiga. Tarindis ei tekkinud hallituse kasvuks sobilikke tingimusi.

Märja karkassiga VS-6 testseinte suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmistulemused on toodud joonisel (Joonis 3.16). Väikese niiskussisuga testruumis langesid P3 anduri näidud ~100%-lt testperioodi alguses 85%-ni testperioodi lõpuks. Suure niiskussisuga testruumi P3 anduri näit jäi testperioodi juures 100% juurde, mis viitab kondenseerumisele anduri ümbruses. Mõlemas testruumis olid P2 andurite näidud langevad, jäädes vahemikku 80–95%. Anduri P1 näidud väikese niiskussisuga testruumis langesid 85%-lt testperioodi alguses 55%-ni märtsi alguseks. Samal perioodil langesid suure niiskussisuga testruumi P1 anduri näidud 90%-lt 60%-ni. Niiskussisa 2 g/m³ tekitamine suurendas suhtelist õhuniiskust lühiajaliselt, kuid ülejäänud testperioodi jooksul P1 anduri näidud ei ületanud 60% piiri. Suure niiskussisuga testruumis olid anduri P1 näidud alates niiskussisa tekitamisest tõusva tendentsiga, kuid jäädes alla 70%. Hallituse tekkeks sobilikud tingimused olid mõlemas testruumis terve testperioodi jooksul andurite P2 ja P3 läheduses.

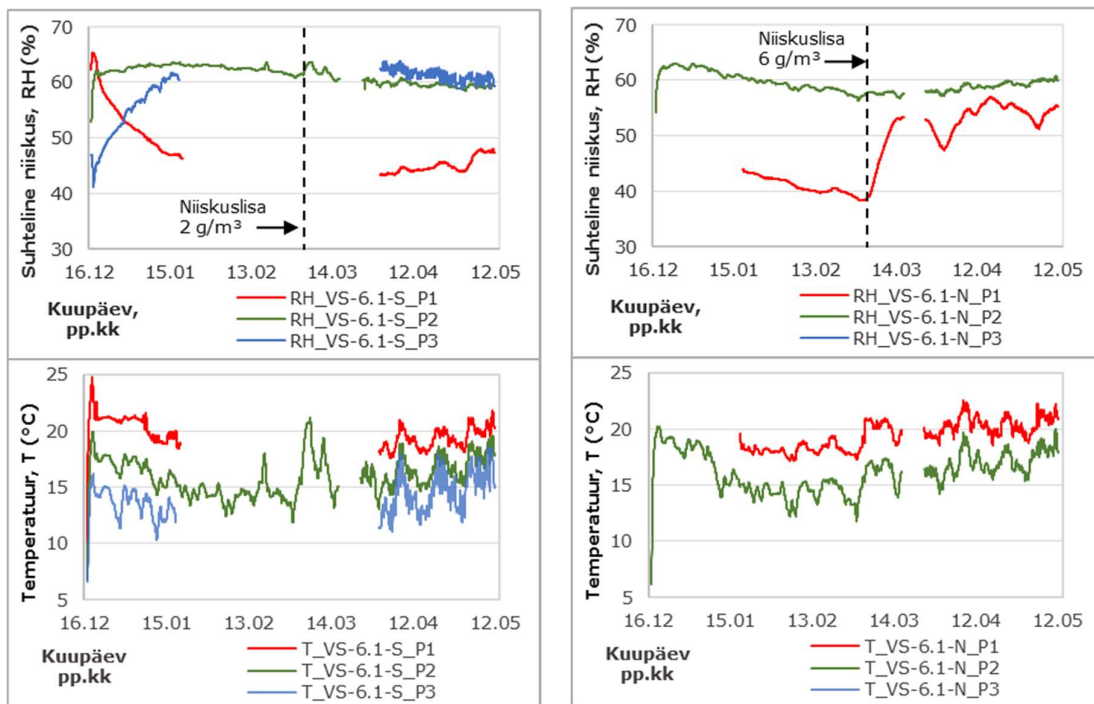
Hallituse indeksit mõõdetud andmete põhjal ei arvatud. Andmete lünklikkus annab ekslikke tulemusi, sest puuduvate andmete perioodil võib toimuda hallituse tõus või langus. Hallituse indeks on arvatud pikaajaliste simulatsioonide tulemuste põhjal alapeatükis 3.3.



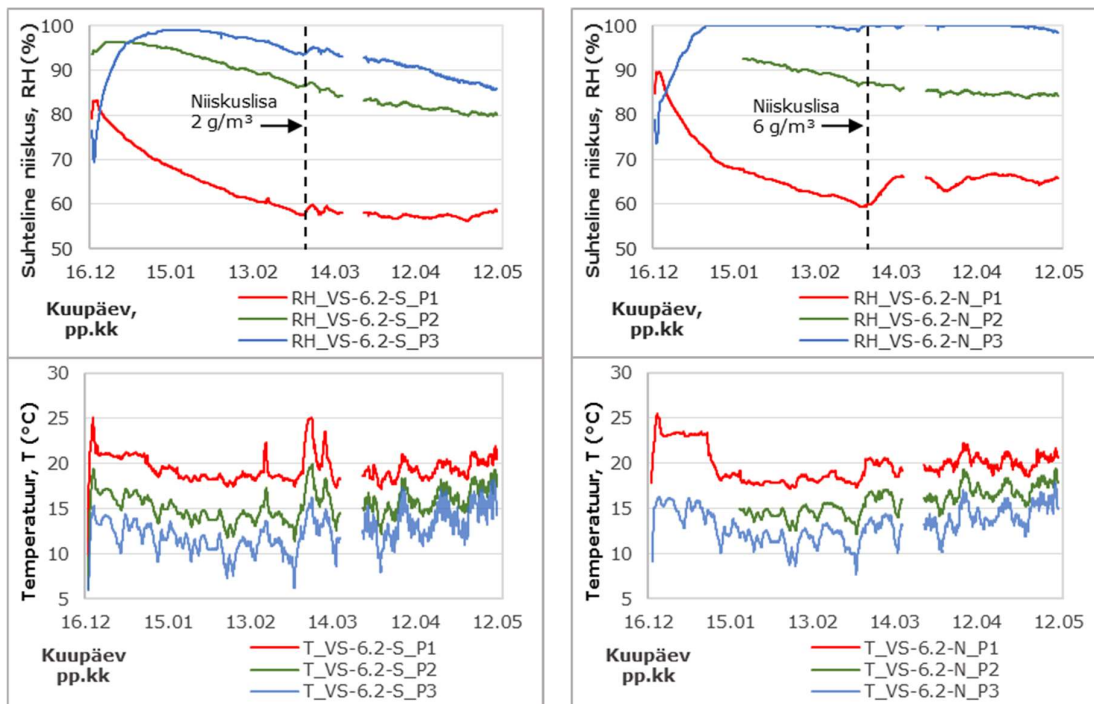
Joonis 3.13 Kuiva karkassiga VS-5 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.14 Märja karkassiga VS-5 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.15 Kuiva karkassiga VS-6 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur



Joonis 3.16 Märja karkassiga VS-6 testseinte mõõdetud RH ja temperatuur

3.2 Tulemused mudelite kalibreerimisest

Tabelis (Tabel 3.1) on välja toodud materjalide omaduste muutused kalibreerimisprotsessi käigus. Alljärgnevates peatükkides on esitatud kõikide seinatüüpide kalibreerimisgraafikud, tulemuste erinevused mõõdetud tulemustest ning lühianalüüs.

Tabel 3.1 Kalibreerimise käigus muudetud materjalide esialgsed [27] ja muudetud väärtused

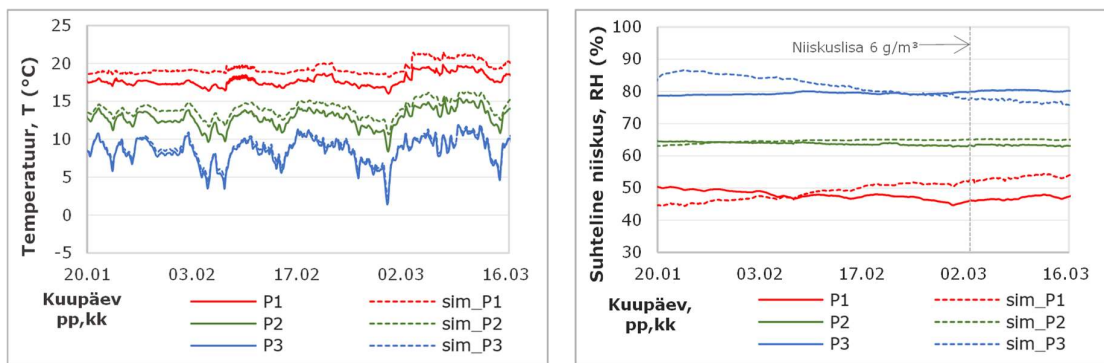
Materjal	Tihedus ρ (kg/m ³)	Soojuseri- juhtivus λ (W/mK)	Õhu veeauru difusiooni- takistustegur μ (-)	Avatud poorsus ϕ (m ³ /m ³)
Puit (mänd)	-	0,19 → 0,12	-	-
Vineer	595 → 700	-	165 → 50	-
Tuuletõkke-kips	-	0,20 → 0,25	10 → 15	-
Kipsplaat	-	0,20 → 0,21	-	-
Polüuretaan-plaat	-	0,028 → 0,022	-	-
PUR ($\mu \leq 72,5$)	35 → 37	0,027 → 0,022	225 → 72,5	0,91 → 0,1
PUR ($\mu = 6,55$)	45 → 10,5	0,029 → 0,039	104 → 6,55	-
Montaaživaht	45 → 25	0,029 → 0,035	104 → 20	-
Klaasplast	1200 → 1250	0,023 → 0,025	-	-

3.2.1 VS-1.1

VS-1.1 seinad ehitati kuiva karkassiga. VS-1.1-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskussisuga ruumis. VS-1.1-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskussisuga ruumis. Joonistel (Joonis 3.17 ja Joonis 3.18) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.2 ja Tabel 3.3).

Tabel 3.2 VS-1.1-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	1,59	4,07
P2	1,29	1,30
P3	0,40	3,48

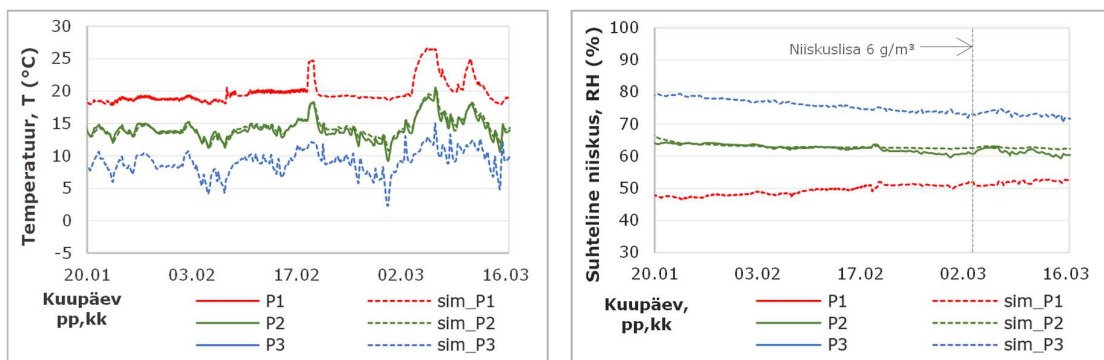


Joonis 3.17 VS-1.1-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Erinevused suhtelise niiskuse väärtustes mõõtepunktides P1 ja P3 tulenevad puidu heterogeensusest. Niiskus puidus ei levi ühtlaselt ning on ristikihti takistatud, kuid programmis ei saanud modelleerida puidu struktuuri, mistõttu eeldas mudel niiskuse ühtlustumist puidus kiiremini, kui see tegelikult toimus. Sama tüüpi seinte lõunapoolse toa seinte näitude erinevused olid väiksemad. See võib tuleneda sellest, et lõunapoolsetele seintele sai päike otse peale paista. Simulatsioonis ei ole arvesse võetud päikesekiirguse mõju. Modelleerimisel kasutati soojustusmaterjali tootja andmeid, kuid tarindi soojuslähivus võis reaalsuses olla väiksem. See võis olla tingitud alumiiniumikihi suurest soojuseri juhtivusest, mis suurendas kogu tarindi soojuslähivust.

Tabel 3.3 VS-1.1-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	-	-
P2	0,50	0,92
P3	-	-



Joonis 3.18 VS-1.1-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

VS-1.1-S katseandmed olid puudulikud andurite mitte toimimise tõttu. P1 ja P3 andurid võisid saada ehituse käigus kahjustatud ning näidud kalibreerimisperioodil puudusid.

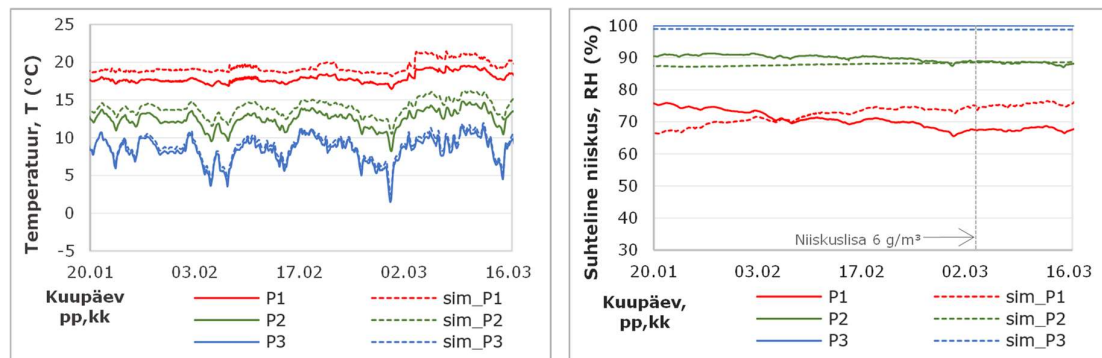
Teiste VS-1 tüüpi seinte andmete olemasolu ja dünaamika sarnasuse põhjal sai hinnata VS-1.1-S mudeli usaldusväärseks.

3.2.2 VS-1.2

VS-1.2 seinad ehitati märja karkassiga. VS-1.2-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskulisaga ruumis. VS-1.2-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskulisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.19 ja Joonis 3.20) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.4 ja Tabel 3.5).

Tabel 3.4 VS-1.2-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	1,46	5,07
P2	1,54	1,89
P3	0,49	1,13

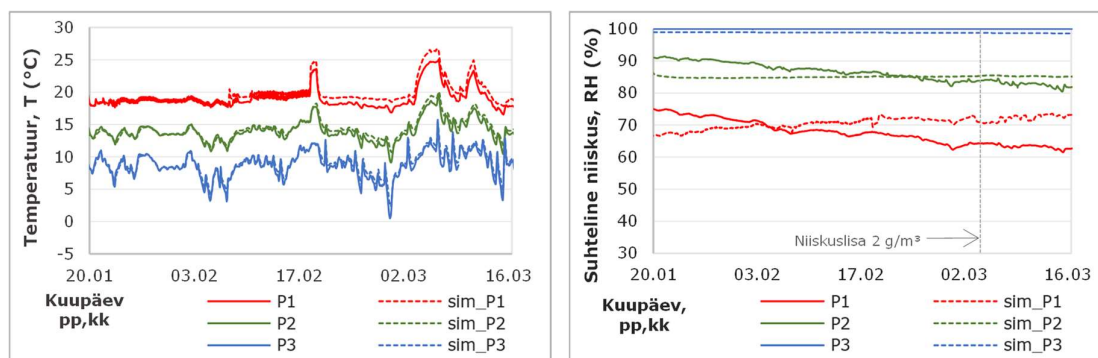


Joonis 3.19 VS-1.2-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Sarnaselt sama seinatüübi kuiva karkassiga seinalle, tulenes erinevus suhtelise niiskuse väärtustes mõõtepunktis P1 puidu heterogeensusest. Niiskus puidus ei levi ühtlaselt ning on ristikihti takistatud, kuid mudel eeldas niiskuse ühtlustumist puidus kiiremini, kui see tegelikult toimus. Simuleeritud temperatuur oli mõõtepunktides P1 ja P2 kõrgem mõõdetud tulemustest. Sama tüüpi seinte lõunapoolse toa seinte näitude erinevused olid väiksemad. See võis tuleneda sellest, et lõunapoolsetele seintele sai päike otse peale paista. Simulatsioonis ei arvestatud päikese kiirguse mõju. Modelleerimisel kasutati soojustusmaterjali tootja andmeid, kuid tarindi soojuslähivus võis reaalsuses olla väiksem.

Tabel 3.5 VS-1.2-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,75	5,46
P2	0,53	2,77
P3	0,50	1,20



Joonis 3.20 VS-1.2-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

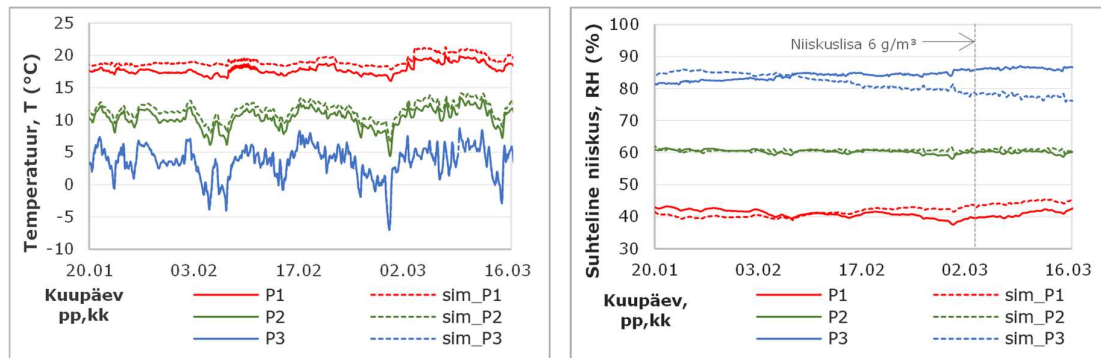
Suhtelise niiskuse erinevused tulenesid VS-1.2-S puhul samadest põhjustest nagu seinas VS-1.2-N puhul.

3.2.3 VS-2.1

VS-2.1 seinad ehitati kuiva karkassiga. VS-2.1-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisa ruumis. VS-2.1-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisa ruumis. Joonistel (Joonis 3.21 ja Joonis 3.22) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.6 ja Tabel 3.7).

Tabel 3.6 VS-2.1-N keskmised väärtuste erinevused

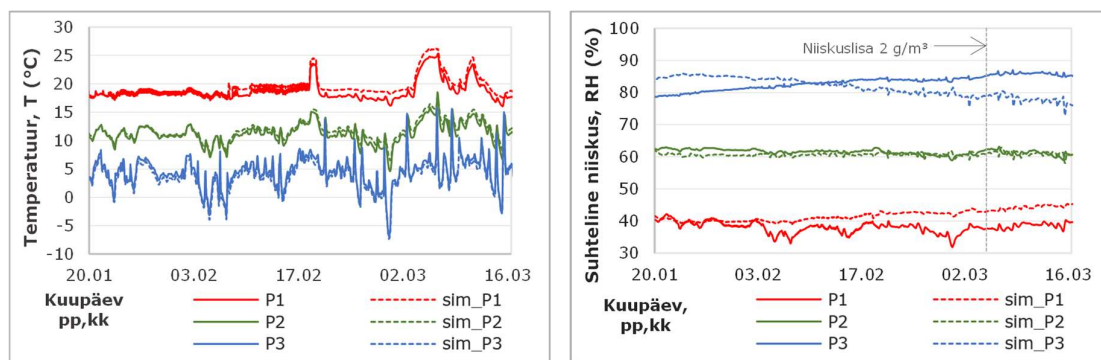
Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	1,26	2,22
P2	1,22	0,64
P3	0,20	4,36



Joonis 3.21 VS-2.1-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Tabel 3.7 VS-2.1-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,81	3,76
P2	0,60	1,08
P3	0,72	4,43



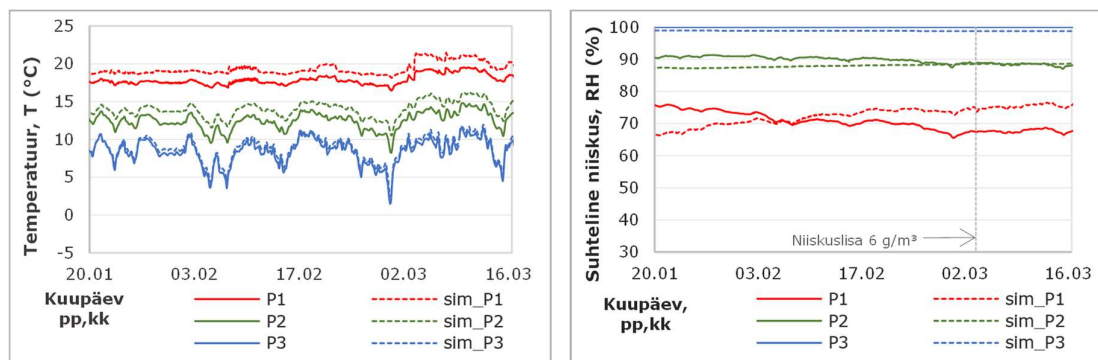
Joonis 3.22 VS-2.1-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

3.2.4 VS-2.2

VS-2.2 seinad ehitati märja karkassiga. VS-2.2-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisaga ruumis. VS-2.2-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.23 ja Joonis 3.24) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.8 ja Tabel 3.9).

Tabel 3.8 VS-2.2-N keskmised väärtuste erinevused

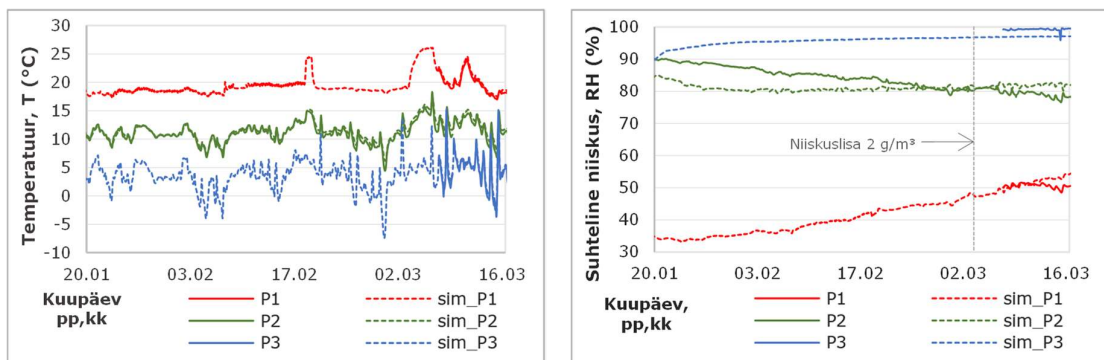
Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	1,66	7,07
P2	1,01	3,40
P3	0,29	3,37



Joonis 3.23 VS-2.2-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Tabel 3.9 VS-2.2-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,42	1,72
P2	0,47	3,93
P3	0,68	2,24



Joonis 3.24 VS-2.2-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

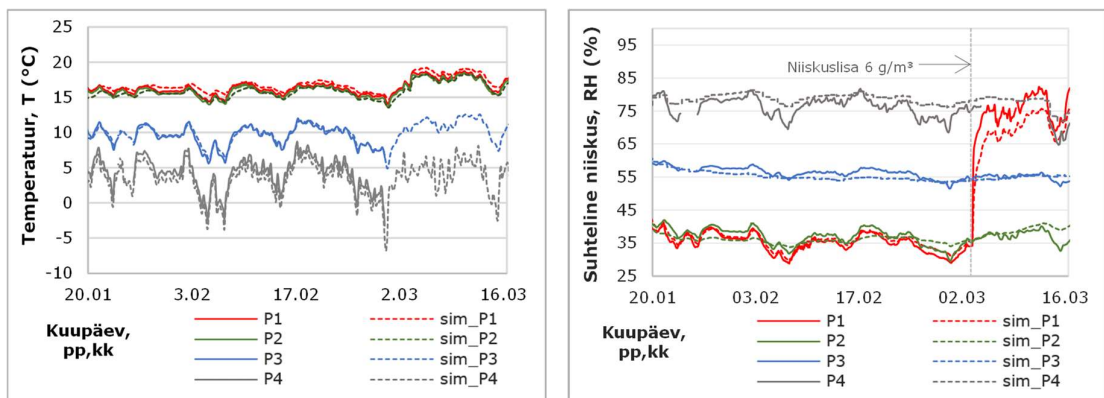
Sarnaselt VS-1 tüüpi seintele, tulenesid erinevused suhtelise niiskuse väärtustes VS-2 tüüpi seinte puhul mõõtepunktidest P1 ja P3 puidu heterogeensusest. Mõõdetud ja simuleeritud temperatuuride erinevus oli sarnane VS-1 tüüpi seintega. Lõunapoolsete seinte temperatuuride erinevus oli väiksem kui põhjapoolsetel seintel.

3.2.5 VS-3.1

VS-3.1 seinad ehitati kuiva karkassiga. VS-3.1-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisa ruumis. VS-3.1-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisa ruumis. Joonistel (Joonis 3.25 ja Joonis 3.26) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.10 ja Tabel 3.11).

Tabel 3.10 VS-3.1-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,46	2,21
P2	0,30	1,88
P3	0,34	1,22
P4	0,98	2,91

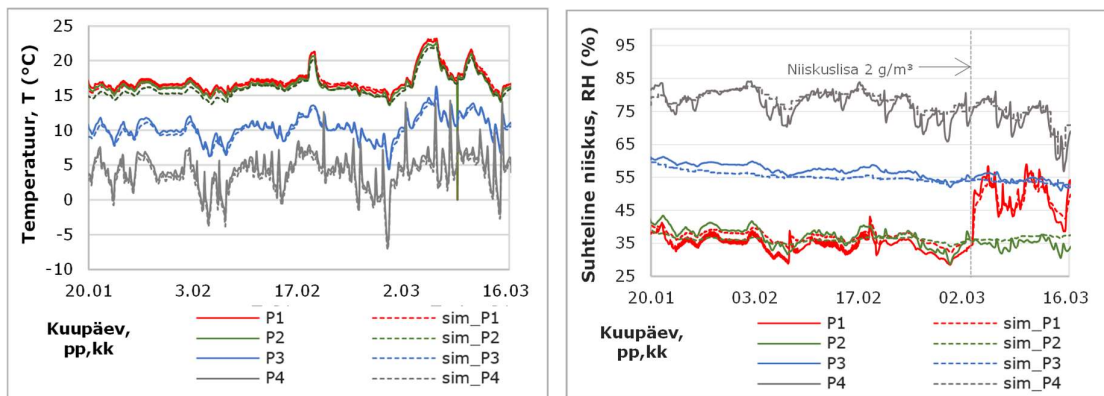


Joonis 3.25 VS-3.1-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Suhtelise niiskuse graafik kinnitas aurutõkke kihi toimivust. Mõõtepunktis P2, mis asus aurutõkke taga, ei tõusnud niiskuskooormuse suurendamisel suhteline niiskus oluliselt. P1 asus siseruumi pool, aurutõkke ees ning seal oli niiskuskooormuse suurendamisel tõus märkimisväärne. Suhtelise niiskuse graafikult oli ka näha, et niiskusliisa rakendamisel tõusis seinas mõõdetud väärtus kõrgemaks simuleeritud väärtusest. See võis olla tingitud kipsplaadi ja testseina ümbritseva vineerkasti ühenduskohtades olevatest õhupiludest (vt Joonis 3.32).

Tabel 3.11 VS-3.1-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,40	2,58
P2	0,57	2,16
P3	0,49	1,64
P4	0,68	2,20



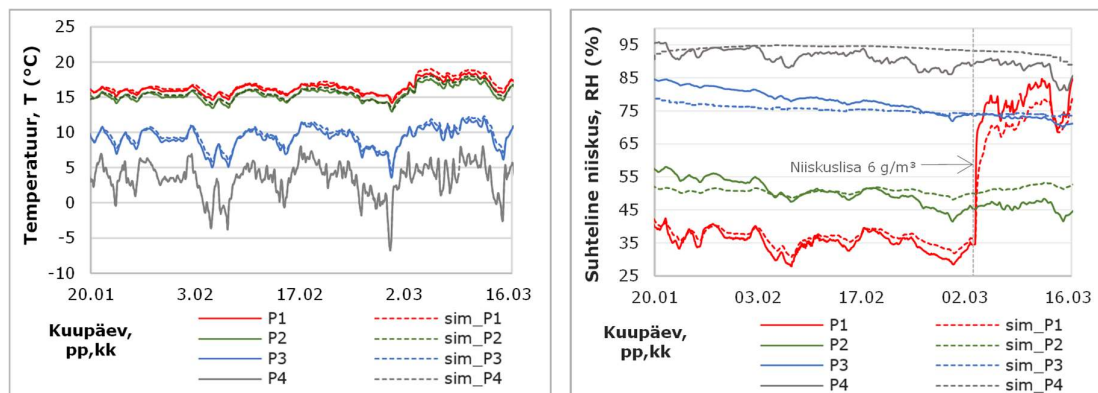
Joonis 3.26 VS-3.1-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

3.2.6 VS-3.2

VS-3.2 seinad ehitati märja karkassiga. VS-3.2-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisaga ruumis. VS-3.2-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.27 ja Joonis 3.28) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.12 ja Tabel 3.13).

Tabel 3.12 VS-3.2-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,34	2,76
P2	0,33	3,39
P3	0,46	2,78
P4	0,10	3,52

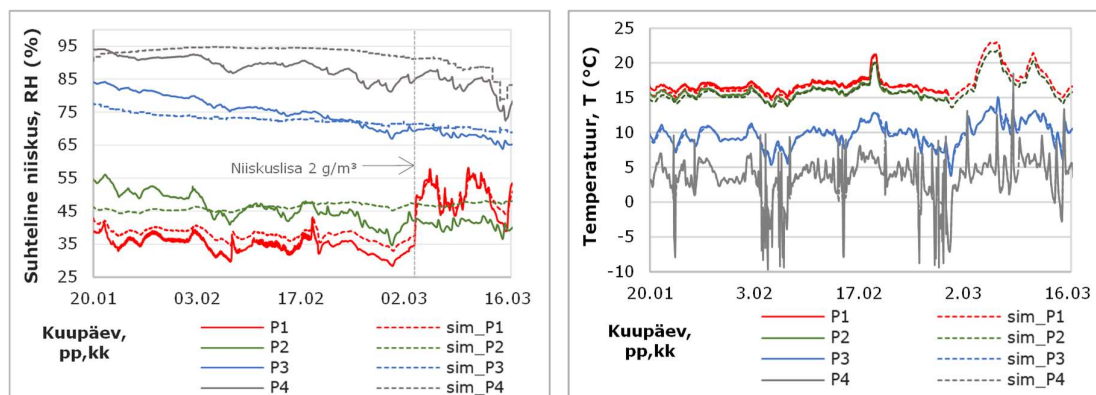


Joonis 3.27 VS-3.2-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Ka VS-3.2-N puhul kinnitas suhtelise niiskuse graafik aurutõkke kihi toimivust. Suhtelise niiskuse graafikult oli sarnaselt VS-3.1-N näha, et niiskuslisa rakendamisel seinas tõusis mõõdetud väärtus kõrgemaks simuleeritud väärtusest. See võis olla tingitud kipsplaadi ja testseina ümbritseva vineerkasti ühenduskohtades olevatest õhupiludest (vt Joonis 3.32).

Tabel 3.13 VS-3.2-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,39	2,99
P2	0,33	4,58
P3	0,30	3,41
P4	0,57	5,13



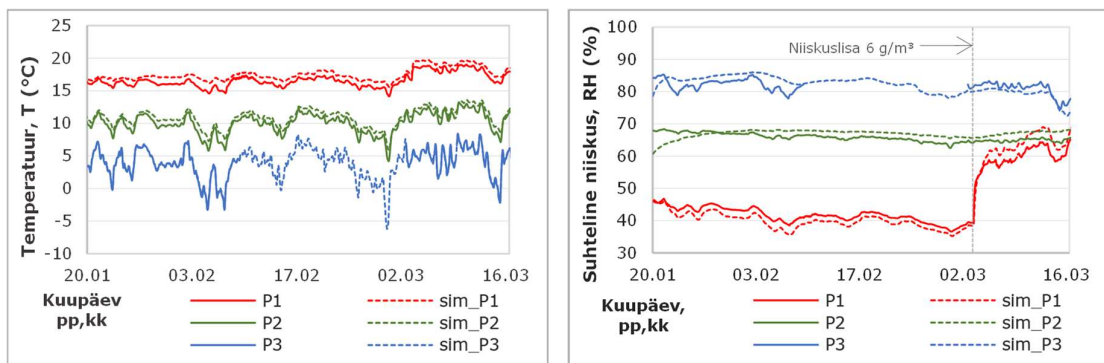
Joonis 3.28 VS-3.2-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

3.2.7 VS-4.1

VS-4.1 seinad ehitati kuiva karkassiga. VS-4.1-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisaga ruumis. VS-4.1-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.29 ja Joonis 3.30) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.14 ja Tabel 3.15).

Tabel 3.14 VS-4.1-N keskmised väärtuste erinevused

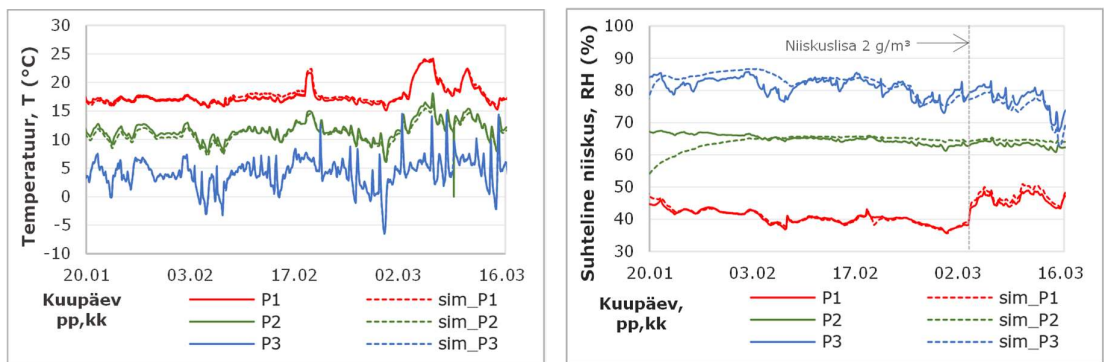
Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,87	2,21
P2	0,81	2,07
P3	0,12	2,39



Joonis 3.29 VS-4.1-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Tabel 3.15 VS-4.1-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,39	0,68
P2	0,57	2,25
P3	0,23	2,26



Joonis 3.30 VS-4.1-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Mõõdetud ja simuleeritud tulemuste kattuvus VS-4.1 seinte puhul oli hea ja tulemused usaldusväärsed. Niiskuskooormuse 6 g/m^3 lisamisel tõusis simuleeritud suhtelise niiskuse väärtus kõrgemaks mõõdetud väärtusest. See võis olla tingitud ebaühtlasest PUR vahu kihist anduri peal (vt Joonis 3.32).

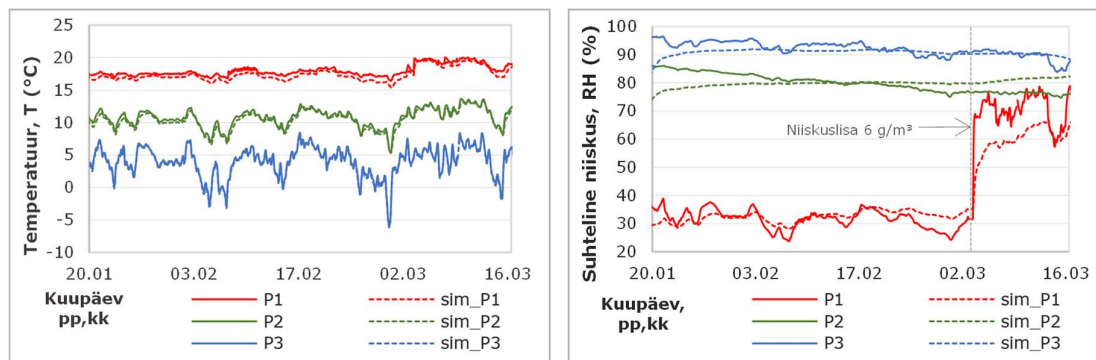
3.2.8 VS-4.2

VS-4.2 seinad ehitati märja karkassiga. VS-4.2-N sein asus põhjapoolses 6 g/m^3 niiskustaseme ruumis. VS-4.2-S sein asus lõunapoolses 2 g/m^3 niiskustaseme ruumis. Joonistel (Joonis 3.31 ja Joonis 3.33) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised

mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.16 ja Tabel 3.17).

Tabel 3.16 VS-4.2-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,61	4,50
P2	0,39	3,62
P3	0,20	2,24



Joonis 3.31 VS-4.2-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

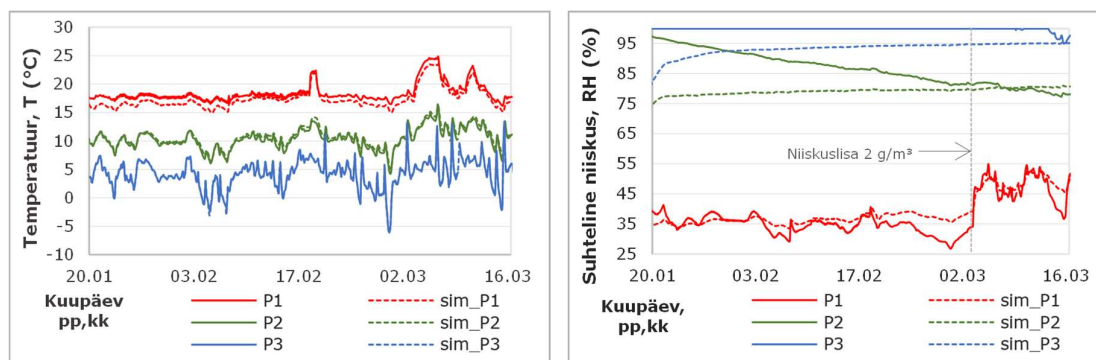
VS-4.2-N mõõtepunktis P3 mõõdetud kõrgem suhteline niiskus võis olla tingitud vahedest kipsplaadi ja vineerkasti ühenduskohtades ning PUR vahu kihi ebaühtlusest anduri peal, kohati võis anduri ots ka vahu seest välja jääda. (vt Joonis 3.32)



Joonis 3.32 Vasakpoolisel pildil näha vahed kipsplaadi servades ja parempoolisel ebaühtlane PUR vahu kiht sisemise roovi juures

Tabel 3.17 VS-4.2-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	1,07	2,78
P2	0,45	8,19
P3	0,13	6,72



Joonis 3.33 VS-4.2-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

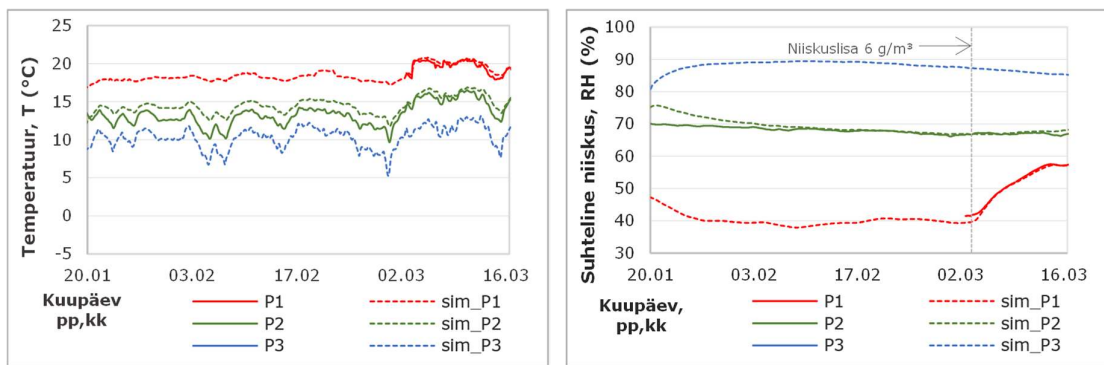
VS-4.2-S suhtelise niiskuse graafiku andur P3 näit oli püsivalt 100%. Sellest võis järeldada anduri otsest kokkupuudet veega. Märtsi keskpaigas anduri näit veidi langes. Suuremad erinevused suhtelise niiskuse graafikul mõõtepunktide P2 ja P3 tulenesid puidu heterogeensusest ja niiskuse ebaühtlasest jaotumisest.

3.2.9 VS-5.1

VS-5.1 seinad ehitati kuiva karkassiga. VS-5.1-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskussisuga ruumis. VS-5.1-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskussisuga ruumis. Joonistel (Joonis 3.34, Joonis 3.31 ja Joonis 3.35) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.18 ja Tabel 3.19).

Tabel 3.18 VS-5.1-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,33	0,54
P2	1,27	1,16
P3	-	-

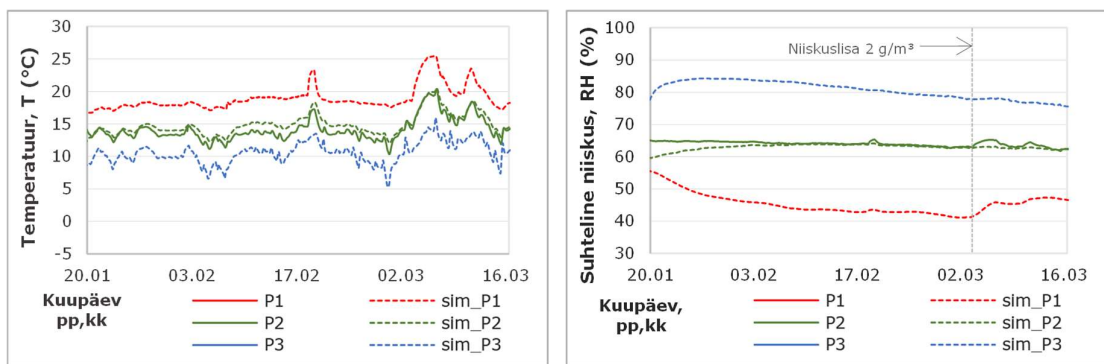


Joonis 3.34 VS-5.1-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

VS-5.1-N puhul oli andurite rikke tõttu anduri P3 andmed täielikult puudu ning anduri P1 andmed olid olemas alates märtsi algusest. Teiste sama tüüpi seinte graafikute andmetele tuginedes võis pidada antud seina tulemusi usaldusväärseks. P2 anduri mõõdetud ja simuleeritud tulemused langevad kokku.

Tabel 3.19 VS-5.1-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	-	-
P2	0,90	1,16
P3	-	-



Joonis 3.35 VS-5.1-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

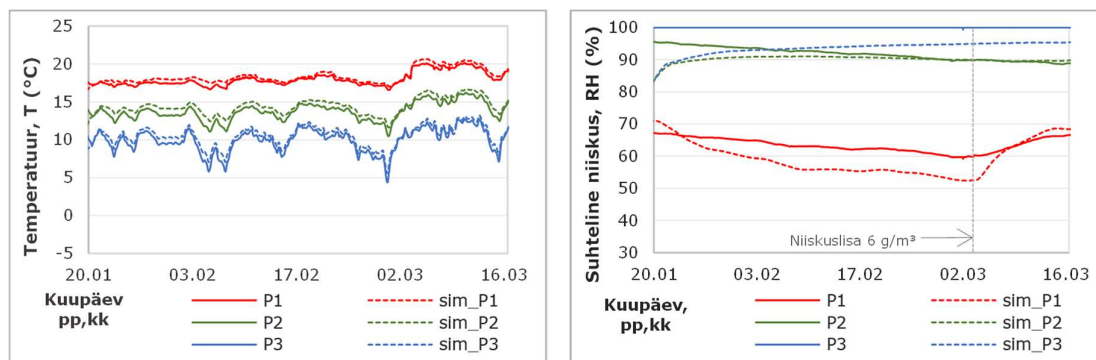
VS-5.1-S oli andurite rikke tõttu puudu informatsioon P1 ja P3 anduritest. Teiste sama tüüpi seinte graafikute andmetele tuginedes võis pidada antud seina tulemusi usaldusväärseks. P2 anduri mõõdetud ja simuleeritud tulemused langesid kokku.

3.2.10 VS-5.2

VS-5.2 seinad ehitati märja karkassiga. VS-5.2-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisaga ruumis. VS-5.2-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.36 ja Joonis 3.37) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.20 ja Tabel 3.21).

Tabel 3.20 VS-5.2-N keskmised väärtuste erinevused

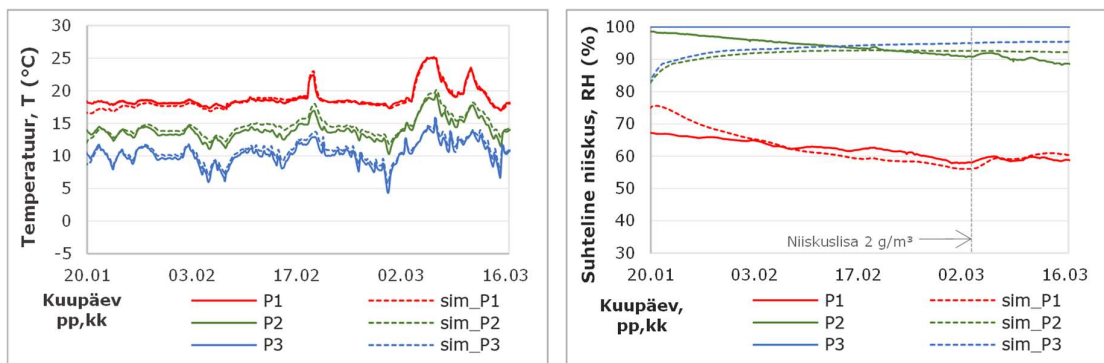
Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,45	4,76
P2	0,75	2,18
P3	0,63	6,68



Joonis 3.36 VS-5.2-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

Tabel 3.21 VS-5.2-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,43	2,38
P2	0,78	3,48
P3	0,63	6,62



Joonis 3.37 VS-5.2-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

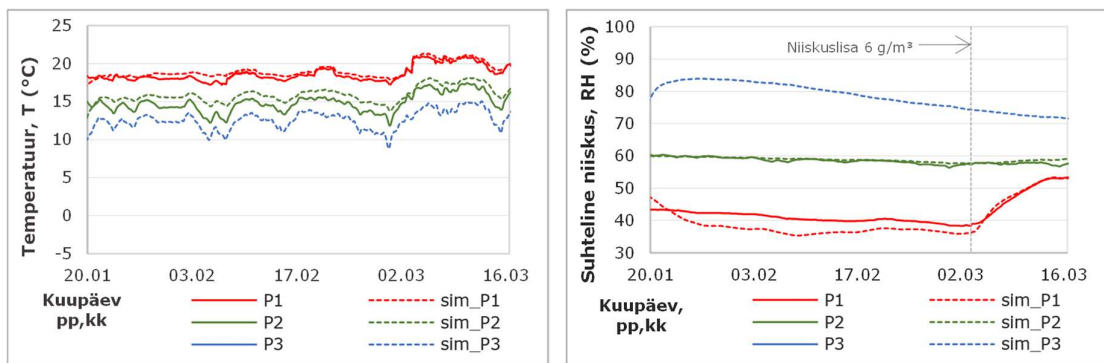
Nii VS-5.2-S kui ka VS-5.2-N puhul oli anduri P3 näit kalibreerimisperioodi jooksul ühtlaselt 100%. Sellest võis järeldada, et anduri läheduses toimus niiskuse kondenseerumine. Erinevused suhtelise niiskuse graafikutel tulenesid puidu niiskuse ebaühtlasest jaotumisest ja puidu heterogeensusest.

3.2.11 VS-6.1

VS-6.1 seinad ehitati kuiva karkassiga. VS-6.1-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisaga ruumis. VS-6.1-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.38 ja Joonis 3.39) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.22 ja Tabel 3.23).

Tabel 3.22 VS-6.1-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,51	2,74
P2	1,17	0,46
P3	-	-

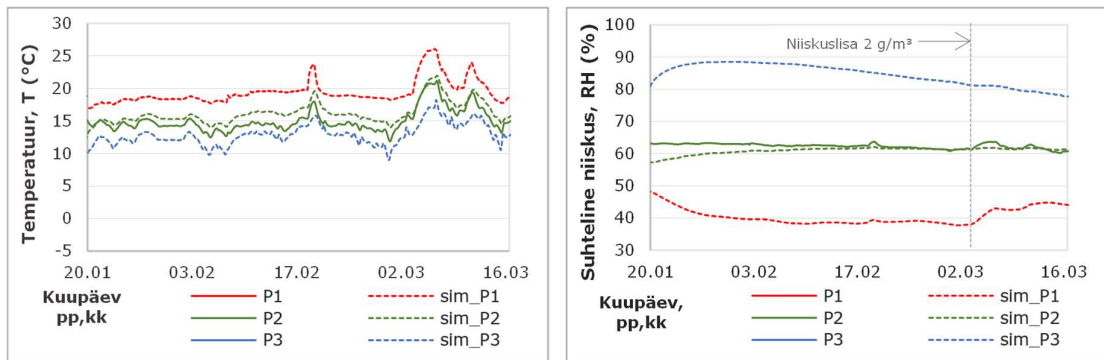


Joonis 3.38 VS-6.1-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

VS-6.1-N seinas olid anduri rikke tõttu puudu P3 andmed. Tuginedes teistele sama tüüpi seintele, võis antud seina mudelit pidada usaldusväärseks.

Tabel 3.23 VS-6.1-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	-	-
P2	1,31	1,58
P3	-	-



Joonis 3.39 VS-6.1-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

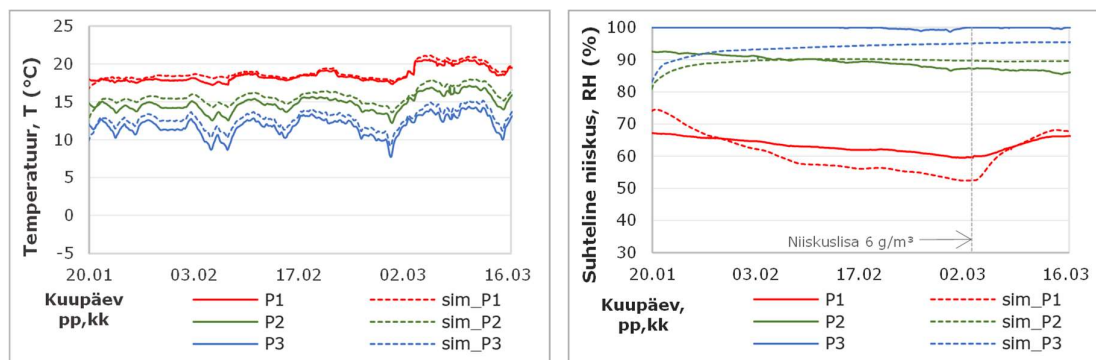
VS-6.1-S seinas olid andurite rikke tõttu puudu P1 ja P3 andmed. Tuginedes teistele sama tüüpi seinte andmetele, oli antud seina graafiku dünaamika sarnane ning mudelit võis pidada usaldusväärseks. P2 anduri mõõdetud ja simuleeritud näidud langesid kokku.

3.2.12 VS-6.2

VS-6.2 seinad ehitati märja karkassiga. VS-6.2-N sein asus põhjapoolses 6 g/m³ niiskuslisaga ruumis. VS-6.2-S sein asus lõunapoolses 2 g/m³ niiskuslisaga ruumis. Joonistel (Joonis 3.40 ja Joonis 3.41) on välja toodud testseinte katseliste tulemuste temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlused simulatsiooni tulemustega. Keskmised mõõdetud ja arvutuslike väärtuste erinevused on toodud allolevates tabelites (Tabel 3.24 ja Tabel 3.25).

Tabel 3.24 VS-6.2-N keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,44	4,07
P2	1,03	2,56
P3	0,99	6,43

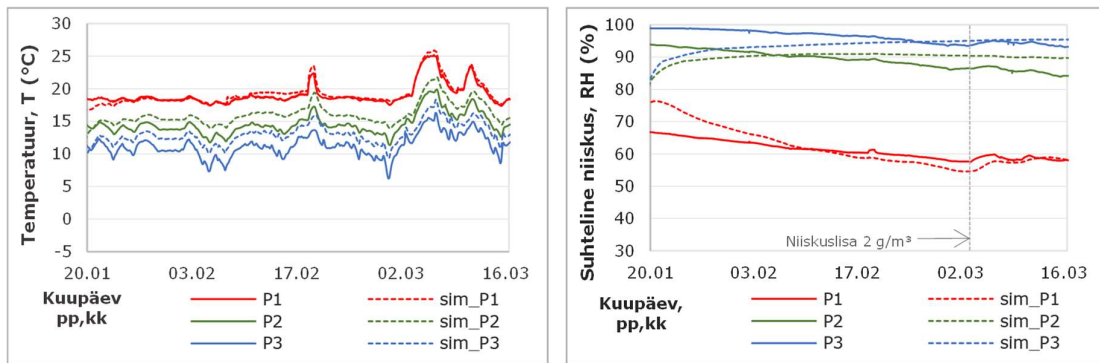


Joonis 3.40 VS-6.2-N temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

VS-6.2-N anduri P3 suhtelise niiskuse väärtus oli püsivalt ligikaudu 100% kogu kalibreerimisperioodi jooksul. Sellest võis järeldada, et anduri läheduses toimus niiskuse kondenseerumine. Suhtelise niiskuse erinevused tulenesid puidu ebaühtlasest niiskumisest ja puidu heterogeensusest.

Tabel 3.25 VS-6.2-S keskmised väärtuste erinevused

Anduri positsioon	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)	Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)
P1	0,45	2,73
P2	1,64	3,30
P3	1,87	3,63



Joonis 3.41 VS-6.2-S temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusgraafikud

3.2.13 Järeldused kalibreerimisest

Mudelite võrdlusgraafikute suurimad erinevused suhtelise niiskuse osas tulenesid puidu niiskussisalduse ebaühtlasest jaotusest. Sama tüüpi tarindite erinevad simuleerimistulemused võisid olla tingitud ehituskvaliteedi kõikumisest. Montaaživahuga soojustusplaatide kinnitamisel lõigati üleulatuv vaht ära ja vahu poorid jäid avatuks õhuniiskusele [60]. See muutis simuleerimisprotsessi keerukaks ja aeganõudvaks ning tulemused ei vastanud simulatsiooniperioodi alguses hoolimata lisatud algväärtustest tihti mõõtepunktides mõõdetule. Kalibreerimisperioodi vältel aga täpsus paranes ning graafikute dünaamika hakkas ühtima. See muutis mudelid usaldusväärseteks ja lubas neid kasutada edasi pikaajalise modelleerimise jaoks. Mudelite detailsus modelleerimisel mängis rolli mudeli vastavusele mõõtmise andmetega.

Tabel 3.26 Mõõdetud ja simuleeritud tulemuste keskmiste erinevuste koondtabel

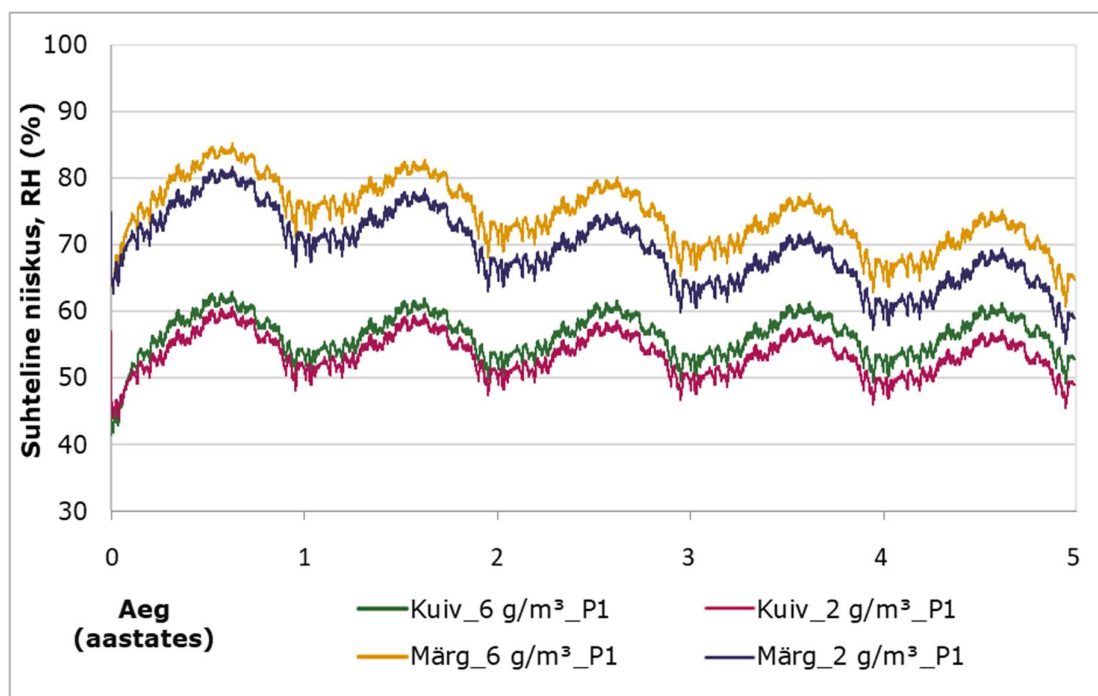
Testsein	Temperatuuri keskmine erinevus ΔT (°C)				Suhtelise niiskuse keskmine erinevus ΔRH (%)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
VS-1.1-N	1.59	1.29	0.4		4.07	1.3	3.48	
VS-1.1-S	-	0.5	-		-	0.92	-	
VS-1.2-N	1.46	1.54	0.49		5.07	1.89	1.13	
VS-1.2-S	0.75	0.53	0.5		5.64	2.77	1.2	
VS-2.1-N	1.26	1.22	0.2		2.22	0.64	4.36	
VS-2.1-S	0.81	0.6	0.72		3.76	1.08	4.43	
VS-2.2-N	1.66	1.01	0.29		7.07	3.04	3.37	
VS-2.2-S	0.42	0.47	0.68		1.72	3.93	2.24	
VS-3.1-N	0.46	0.3	0.34	0.98	2.21	1.88	1.22	2.91
VS-3.1-S	0.4	0.57	0.49	0.68	2.58	2.16	1.64	2.2
VS-3.2-N	0.34	0.33	0.46	0.1	2.76	3.39	2.78	3.52
VS-3.2-S	0.39	0.33	0.3	0.57	2.99	4.58	3.41	5.13
VS-4.1-N	0.87	0.81	0.12		2.21	2.07	2.39	
VS-4.1-S	0.39	0.57	0.23		0.68	2.25	2.26	
VS-4.2-N	0.61	0.39	0.2		4.5	3.62	2.24	
VS-4.2-S	1.07	0.45	0.13		2.78	8.19	6.72	
VS-5.1-N	0.33	1.27	-		0.54	1.16	-	
VS-5.1-S	-	0.9	-		-	1.16	-	
VS-5.2-N	0.45	0.75	0.63		4.76	2.18	6.68	
VS-5.2-S	0.43	0.78	0.63		2.38	3.48	6.62	
VS-6.1-N	0.51	1.17	-		2.74	0.46	-	
VS-6.1-S	-	1.31	-		-	1.58	-	
VS-6.2-N	0.44	1.03	0.99		4.07	2.56	6.43	
VS-6.2-S	0.45	1.64	1.87		2.73	3.3	3.63	

Edasistes uuringutes tuleks kalibreerimisperioodi pikendada, sest sarnasused dünaamikas ja simuleeritud väärtuste kokkulangemine mõõdetutega ei pruugi simulatsiooniperioodi algul kõigis mõõtepunktides esineda. Tuleks jälgida ka kalibreerimismudelite detailsust. Detailse arvutusmudeli simulatsioon on aeganõudvam, kuid tihti hädavajalik, et mõõdetud suuruste dünaamika ühtiks simuleeritud tulemustega. Käesolevas töös lisati puidu niiskus karkassipuidule 3 jaos, kuid seinte puhul, kus suhteline niiskus on väga kõrge, tekkisid puidu niiskuse ebaühtlasest jaotumisest siiski erinevused mõõdetud ja simuleeritud väärtuste vahel. Täheldati ka puidu osadeks jaotatud niiskuse kiiremat ühtlustumist simulatsioonis.

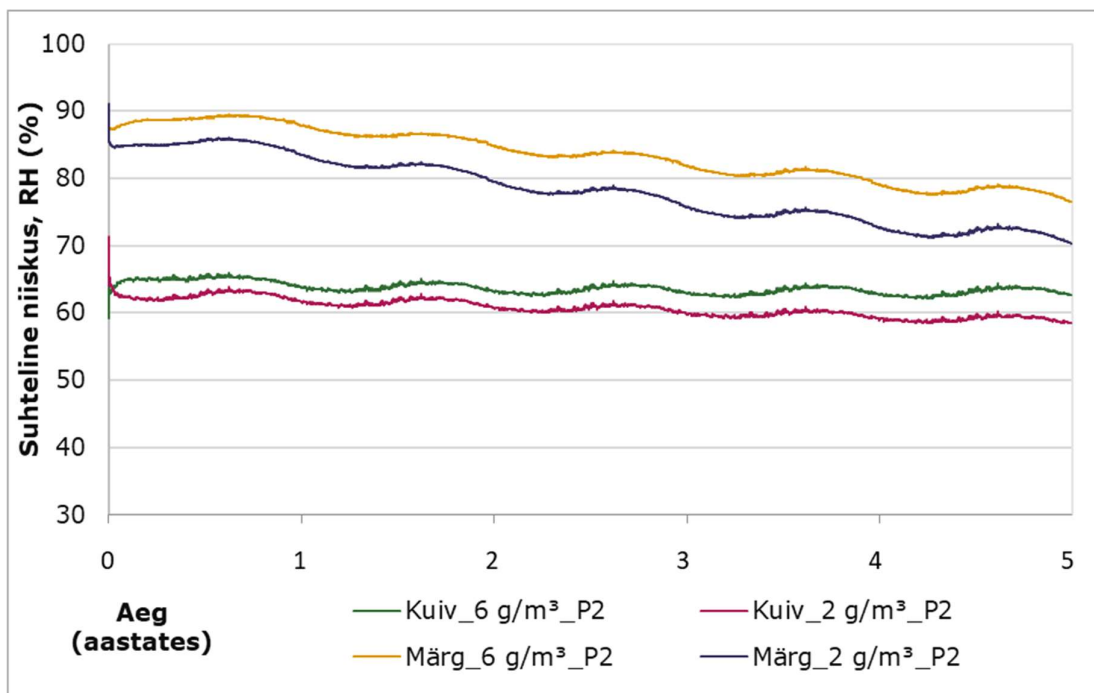
3.3 Tulemused pikaajalisest modelleerimisest

3.3.1 VS-1

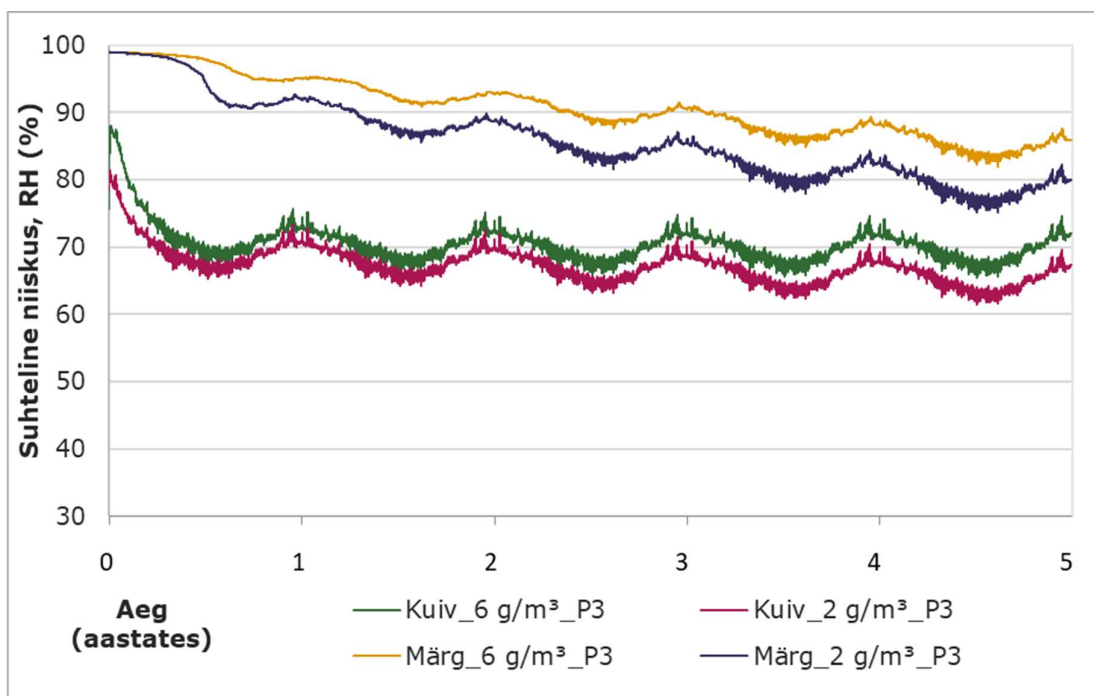
VS-1 tüüpi seinte soojustusmaterjaliks oli karkassipostide vahele paigaldatud PIR plaat (120 mm), millele lisati välimisele küljele 30 mm PIR plaat. Tarindite 5-aastase testperioodi suhtelise niiskuse graafikud mõõtepunktides P1, P2 ja P3 asuvad allolevatel joonistel (Joonis 3.42, Joonis 3.43 ja Joonis 3.44). Mõõtepunkt P1 asus karkassiposti sisemises servas, P2 asus karkassiposti keskel ja P3 karkassiposti välimises servas. Hallituse indeksi leidmisel valiti mõõtepunkt kõige suurema suhtelise niiskuse järgi puidu pinnal (vt Joonis 3.45). Pikaajalisest simulatsioonist oli näha, et kõige välimises mõõtepunktis P3 oli suhteline niiskus kõige kõrgem ning sisemises mõõtepunktis P1 kõige madalam.



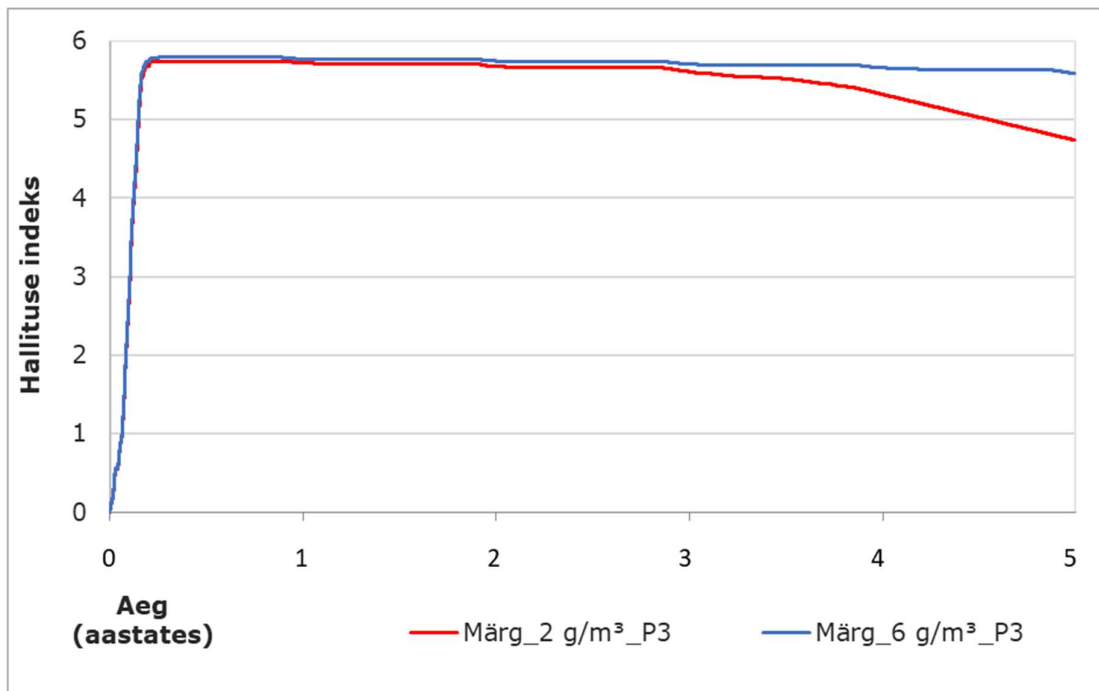
Joonis 3.42 VS-1 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P1



Joonis 3.43 VS-1 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P2



Joonis 3.44 VS-1 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

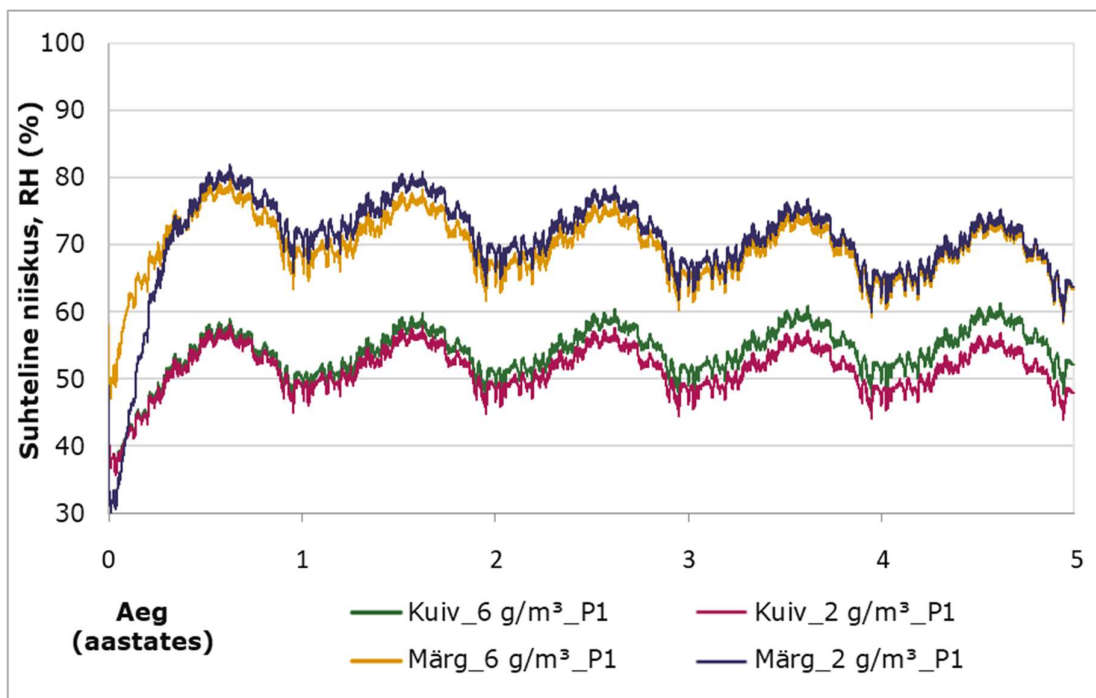


Joonis 3.45 VS-1 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise hallituse indeksi võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

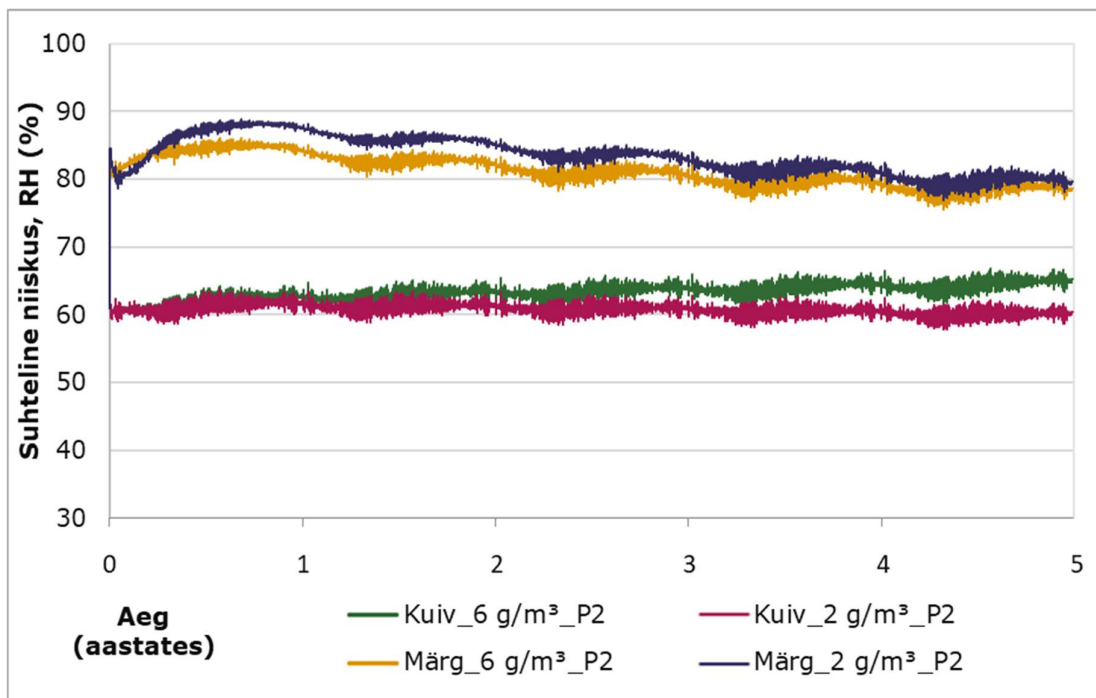
VS-1 tüüpi seinte puhul kuiva karkassiga seintes hallitust simulatsiooni põhjal ei esinenud. Märgade seinte puhul oli hallituse indeks väga kõrge ja hallituse risk seega suur. Ruumi niiskuskooormuse 2 g/m^3 korral algas märjas seinas peale 3 aastat hallituse indeksi aeglane langus. Suurema ruumi niiskuskooormuse puhul aga jäi hallituse indeks püsivalt üle 5,5. Maksimaalne hallitusindeksi väärtus märja karkassiga seinte puhul oli niiskuselisa 2 g/m^3 puhul 5,74 ja 6 g/m^3 puhul 5,79. Tarindi suur hallituse risk tulenes suurest veeaurupidavusest. Niiskuse välja kuivamist takistas suure veeauru difusioonitakistusega alumiiniumikiht polüuretaan soojustusplaatidel ning seina aurutihedaks teipimine.

3.3.2 VS-2

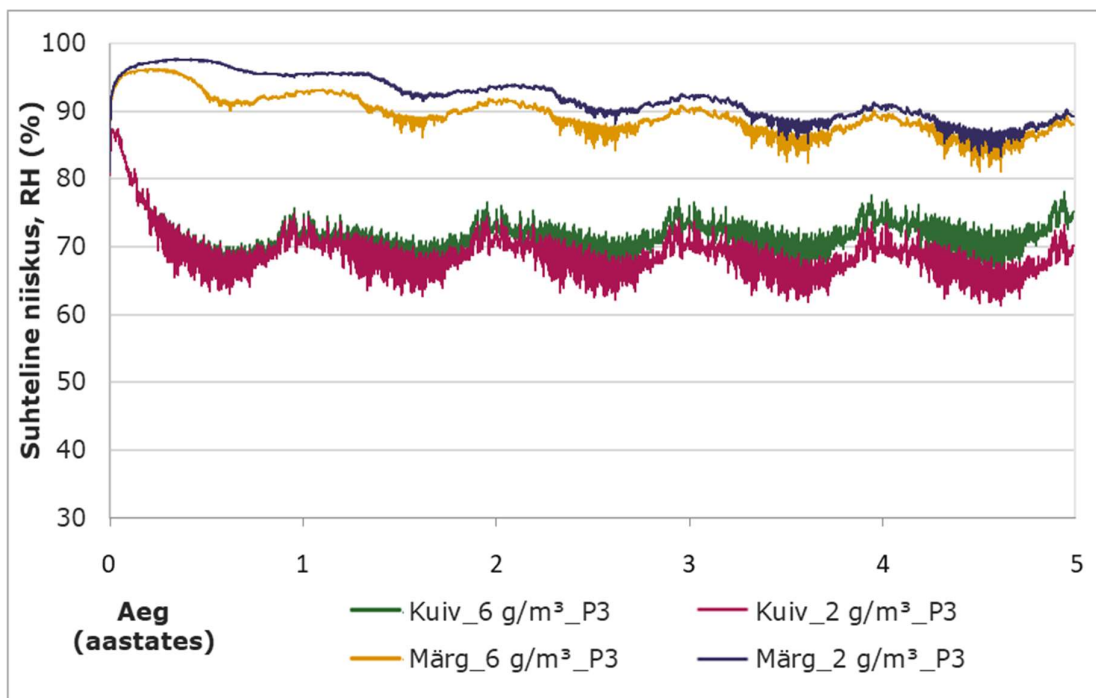
VS-2 tüüpi seinte soojustusmaterjaliks oli karkassipostide vahele kahes kihis paigaldatud PIR plaadid (70+70 mm). Tarindite 5-aastase testperioodi suhtelise niiskuse graafikud mõõtepunktides P1, P2 ja P3 asuvad allolevatel joonistel (Joonis 3.46, Joonis 3.47 ja Joonis 3.48). Hallituse indeksi leidmisel valiti mõõtepunkt kõige suurema suhtelise niiskuse järgi puidu pinnal (vt Joonis 3.49). Pikaajalisest simulatsioonist oli näha, et kõige välises mõõtepunktis P3 oli suhteline niiskus kõige kõrgem ning sisemises mõõtepunktis P1 kõige madalam.



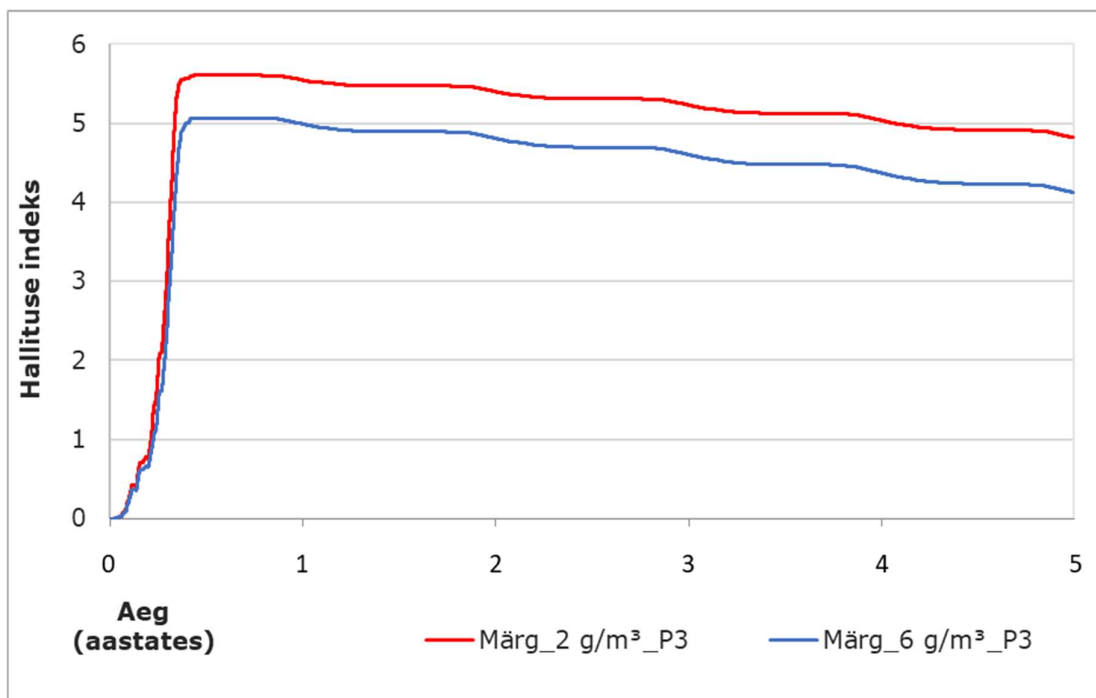
Joonis 3.46 VS-2 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P1



Joonis 3.47 VS-2 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P2



Joonis 3.48 VS-2 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P3



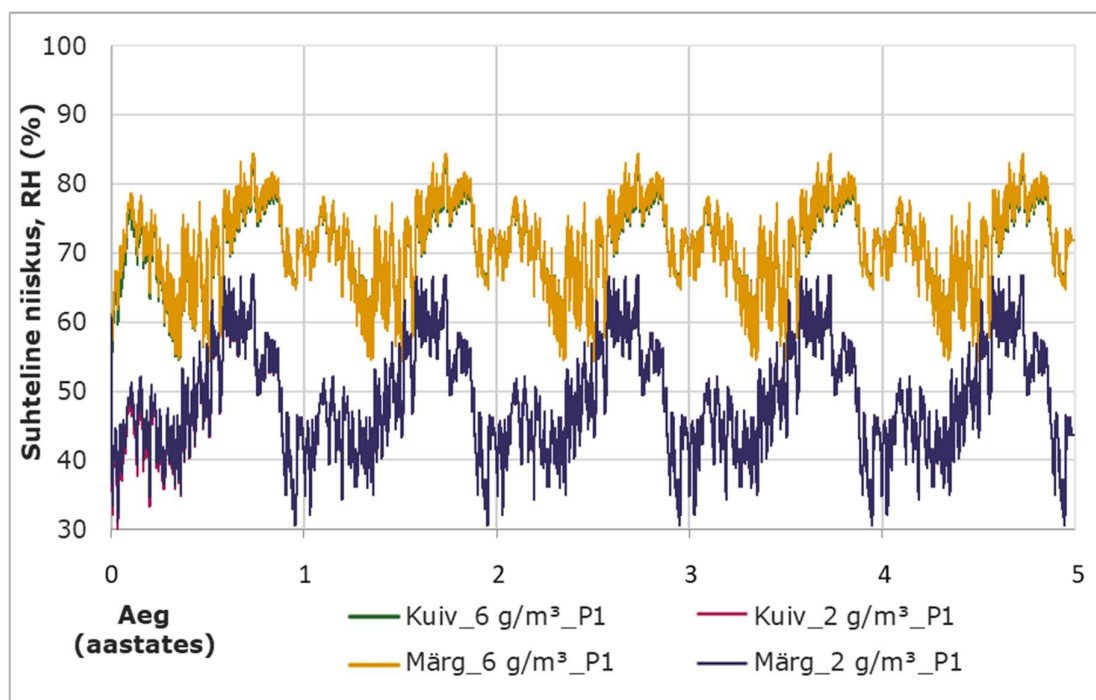
Joonis 3.49 VS-2 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise hallituse indeksi võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

VS-2 tüüpi seinte puhul kuiva karkassiga seintes hallitust simulatsiooni põhjal ei esinenud. Märgade seinte puhul oli hallituse indeks väga kõrge ja hallituse risk seega

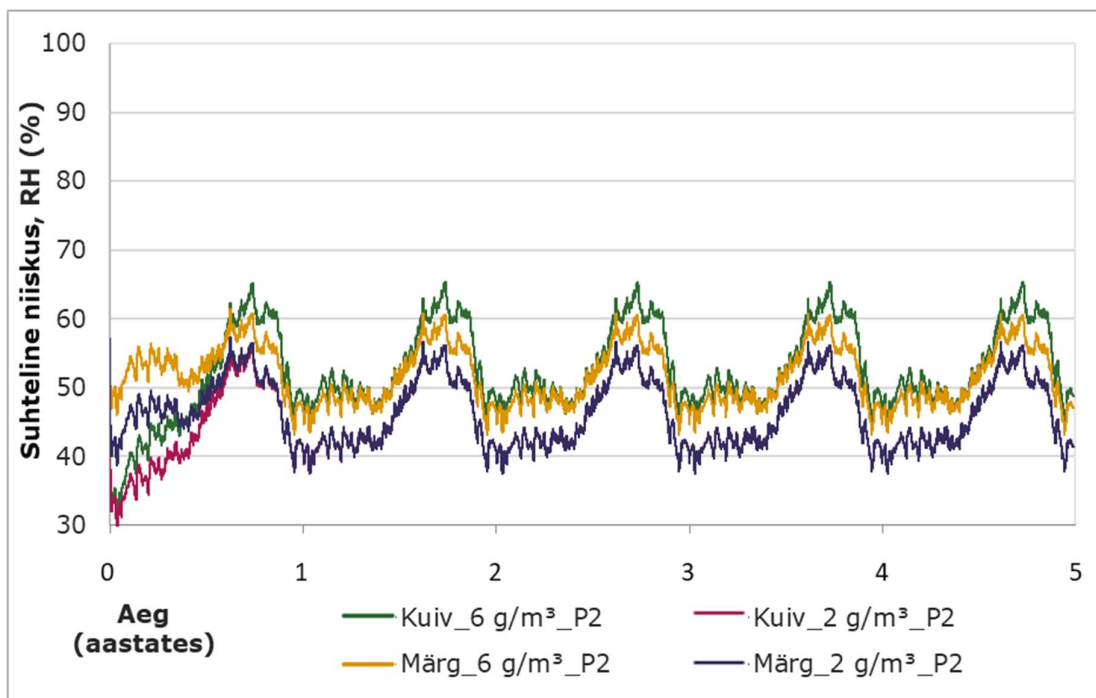
suur. Maksimaalne hallitusindeksi väärtus märja karkassiga seinte puhul oli niiskustõrjend 2 g/m³ puhul 5,61 ja 6 g/m³ puhul 5,06. Mõlemad graafikud on aeglase langustrendiga, kuid 5 aastase testperioodi jooksul jääb hallituse indeks mõlemal juhul üle 4. Hallituse indeksi väiksem väärtus suurema ruumi niiskuskooormusega seina puhul oli tingitud karkassipuidu väiksemast algniiskusest ja puidu ebaühtlasest niiskumisest karkassi niisutamisel (vt Joonis 2.24). Nagu ka VS-1 puhul tulenes ka VS-2 suur hallituse risk seina suurest veeaurupidavusest, mis oli tingitud polüuretaan soojustusplaatide veeauru difusioonikindlusest ja tarindi aurutihedaks teipimisest.

3.3.3 VS-3

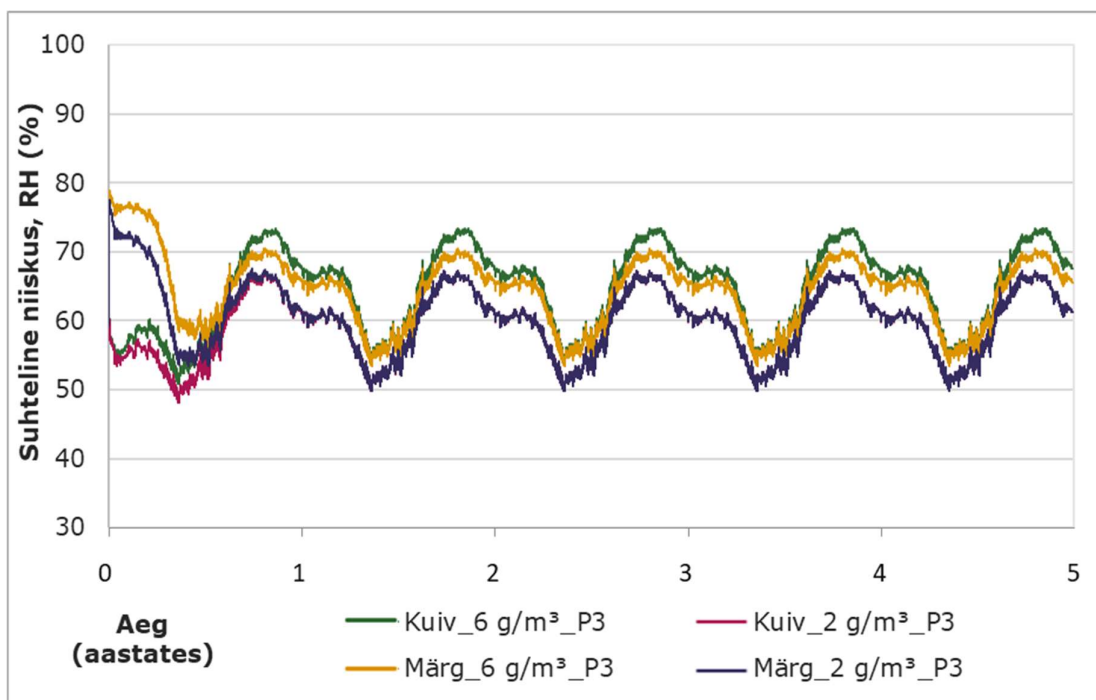
VS-3 tüüpi seinte soojustusmaterjaliks oli PUR vaht ($\mu = 6,55$). Tarindite 5-aastase testperioodi suhtelise niiskuse graafikud mõõtepunktides P1, P2, P3 ja P4 asuvad allolevatel joonistel (Joonis 3.50, Joonis 3.51, Joonis 3.52 ja Joonis 3.53). Hallituse indeksi leidmisel valiti mõõtepunkt kõige suurema suhtelise niiskuse järgi puidu pinnal (vt Joonis 3.54). Pikaajalisest simulatsioonist oli näha, et kõige välimises mõõtepunktis P4 oli suhteline niiskus kõige kõrgem ning mõõtepunktis P2 kõige madalam. Teistest testseintest eristas VS-3 aurutõkke kihi olemasolu mõõtepunktide P1 ja P2 vahel. Selle tõttu oli ka punktis P1 mõõdetud õhuniiskus suurem kui mõõtepunktis P2.



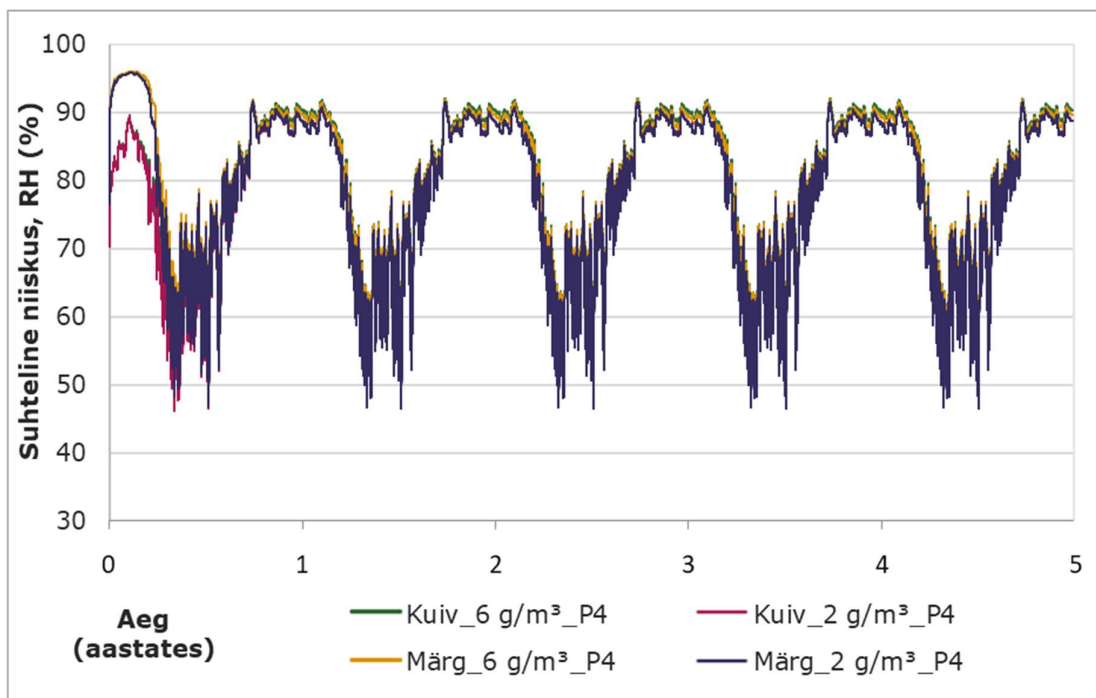
Joonis 3.50 VS-3 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P1



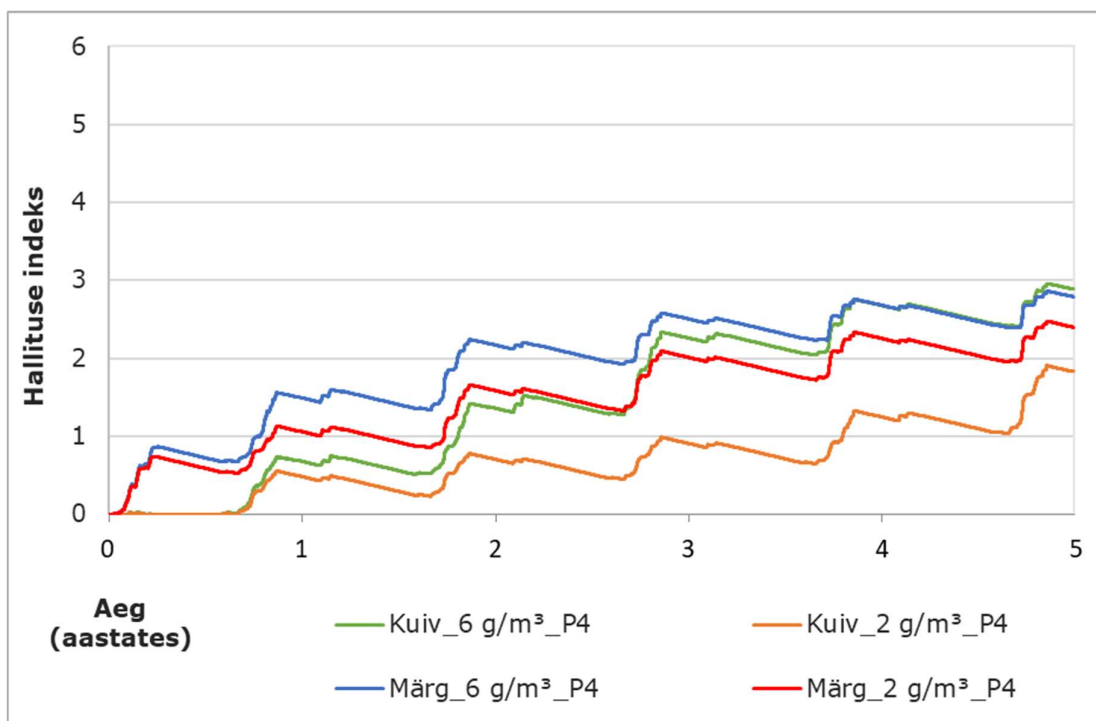
Joonis 3.51 VS-3 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P2



Joonis 3.52 VS-3 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P3



Joonis 3.53 VS-3 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P4

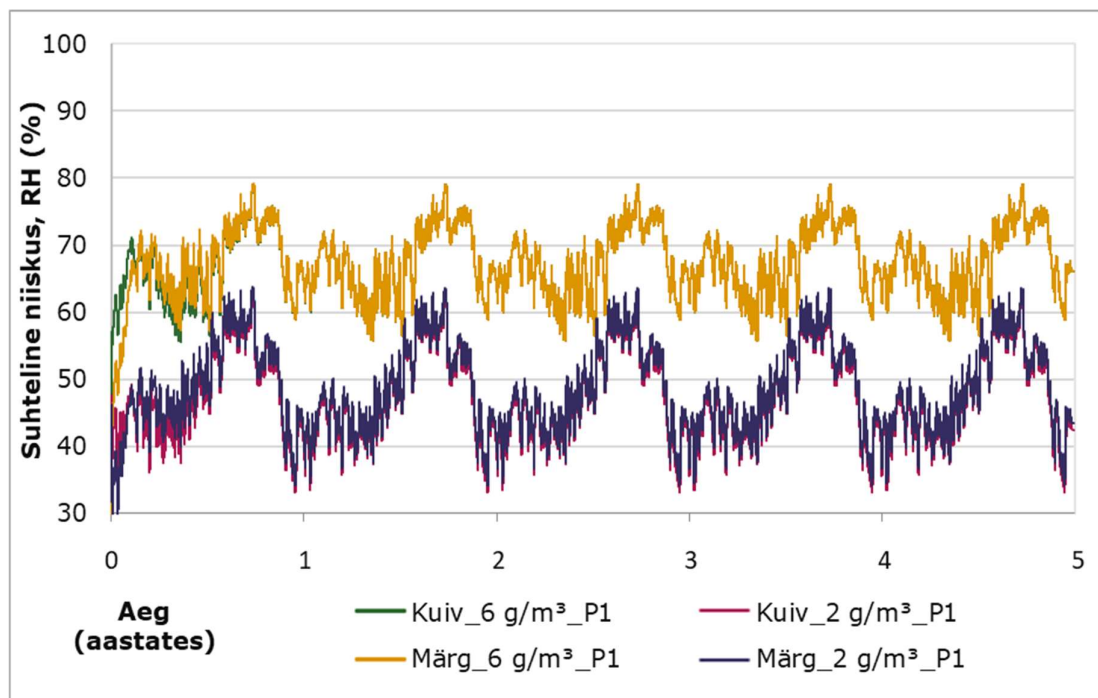


Joonis 3.54 VS-3 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise hallituse indeksi võrdlusgraafik mõõtepunktis P4

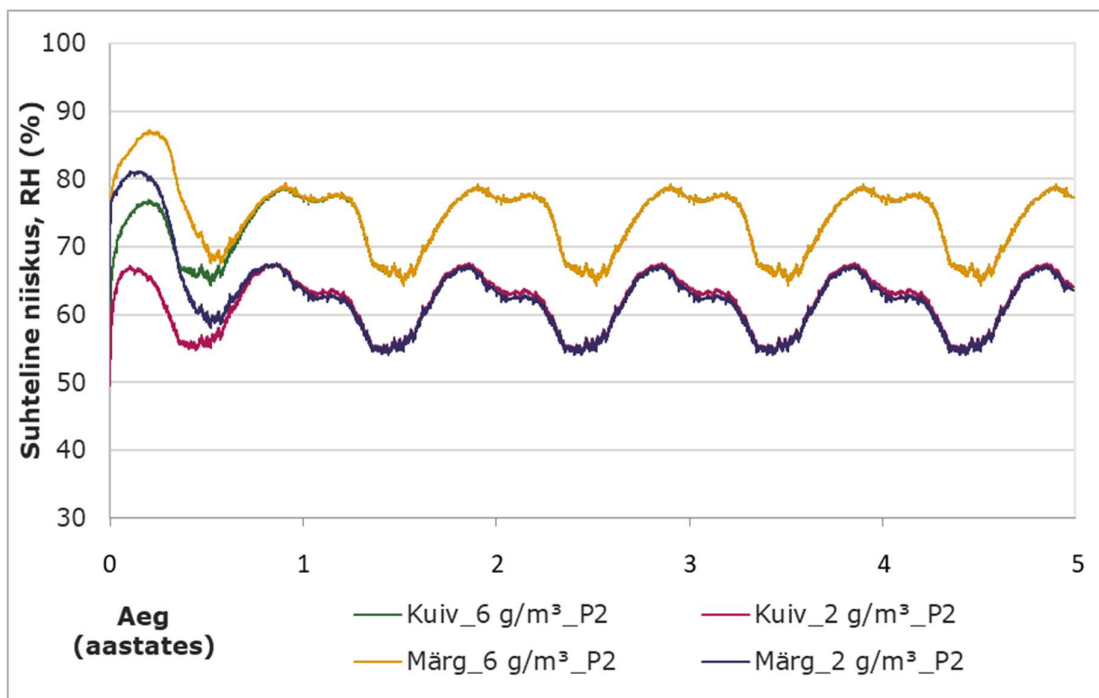
VS-3 tüüpi seintes oli simulatsiooni tulemuste põhjal hallituse risk kõigis seintes 5-aastase testperioodi jooksul. Kuiva karkassiga seina 2 g/m³ ruumi niiskuskooormuse puhul suurim hallituse indeks oli 1,90. Kuiva karkassiga 6 g/m³ ruumi niiskuskooormuse suurim hallituse indeks oli 2,86. Sama seinatüübi märja karkassiga suurimad hallituse indeksid olid 2 g/m³ ruumi niiskuskooormuse puhul 2,47 ja 6 g/m³ niiskuskooormuse puhul 2,96. Kõik hallituse indeksi graafikud olid tõusva trendiga, millest võis järeldada hallituse kasvu pidevat suurenemist ka peale 5 aastat. Hallituse tekke põhjuseks võis olla puitkarkassi küllaltki suur avatus välistele kliimatingimustele, olles kaetud vaid tuuletõkkekipsiga.

3.3.4 VS-4

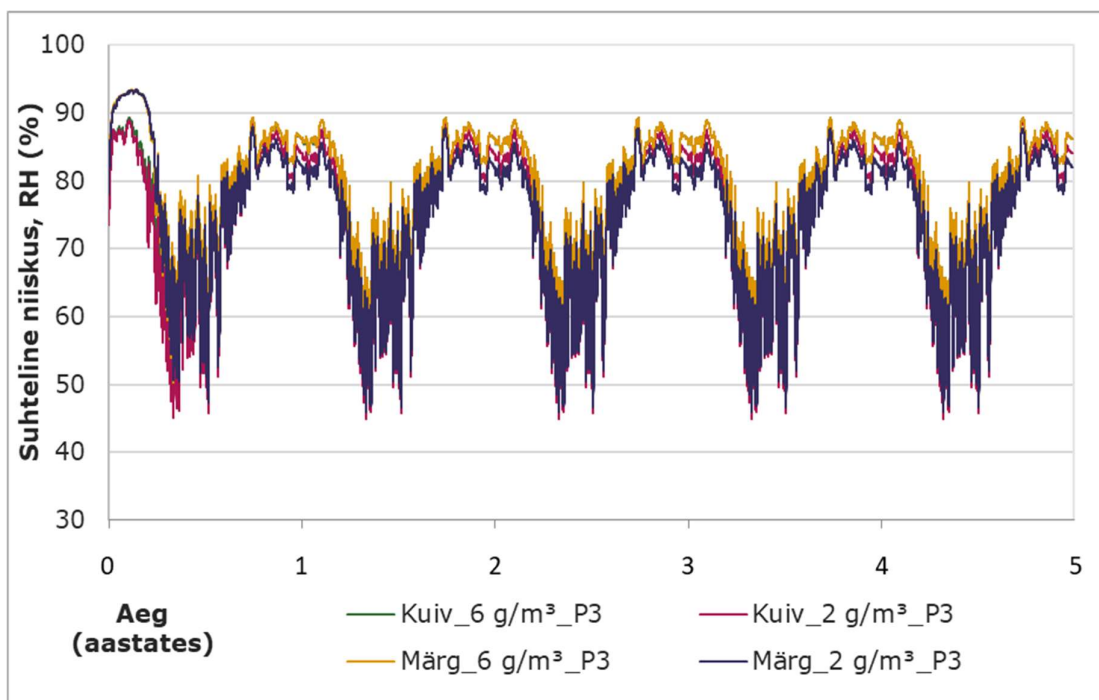
VS-4 tüüpi seinte soojustusmaterjaliks oli PUR vaht ($\mu \leq 72,5$). Tarindite 5-aastase testperioodi suhtelise niiskuse graafikud mõõtepunktides P1, P2 ja P3 asuvad allolevatel joonistel (Joonis 3.55, Joonis 3.56 ja Joonis 3.57). Hallituse indeksi leidmisel valiti mõõtepunkt kõige suurema suhtelise niiskuse järgi puidu pinnal (vt Joonis 3.58). Pikaajalisest simulatsioonist oli näha, et kõige välimises mõõtepunktis P3 oli suhteline niiskus kõige kõrgem ning mõõtepunktis P1 kõige madalam.



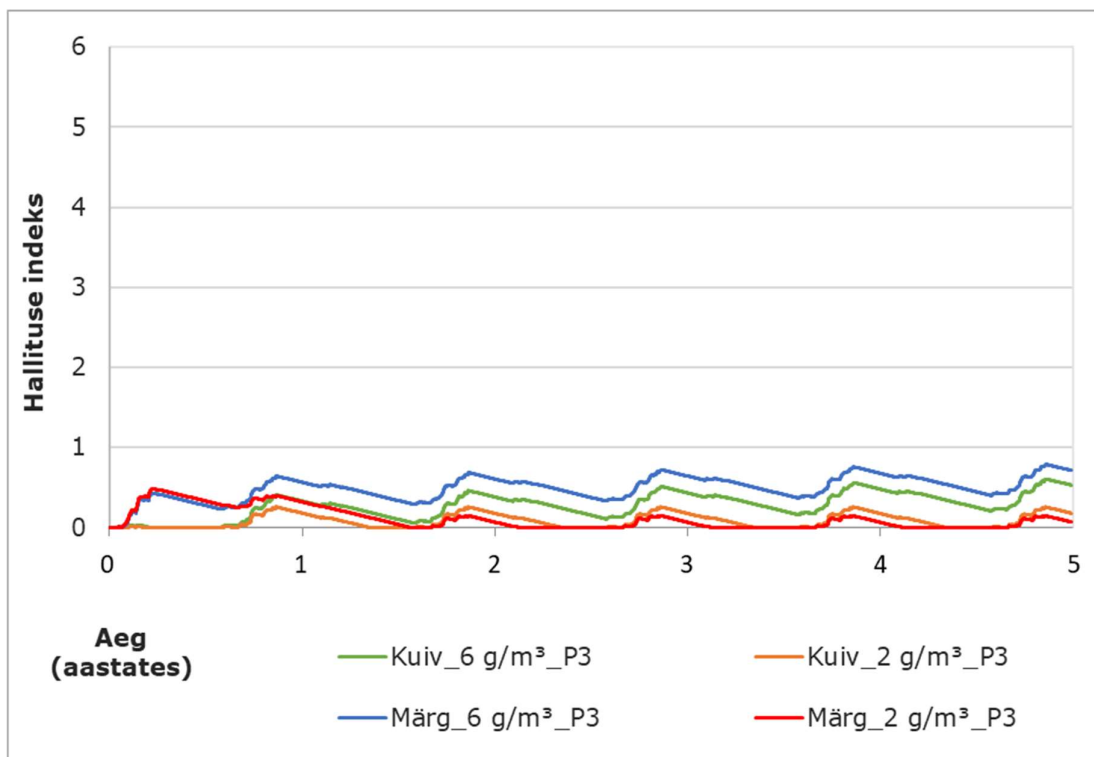
Joonis 3.55 VS-4 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P1



Joonis 3.56 VS-4 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P2



Joonis 3.57 VS-4 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

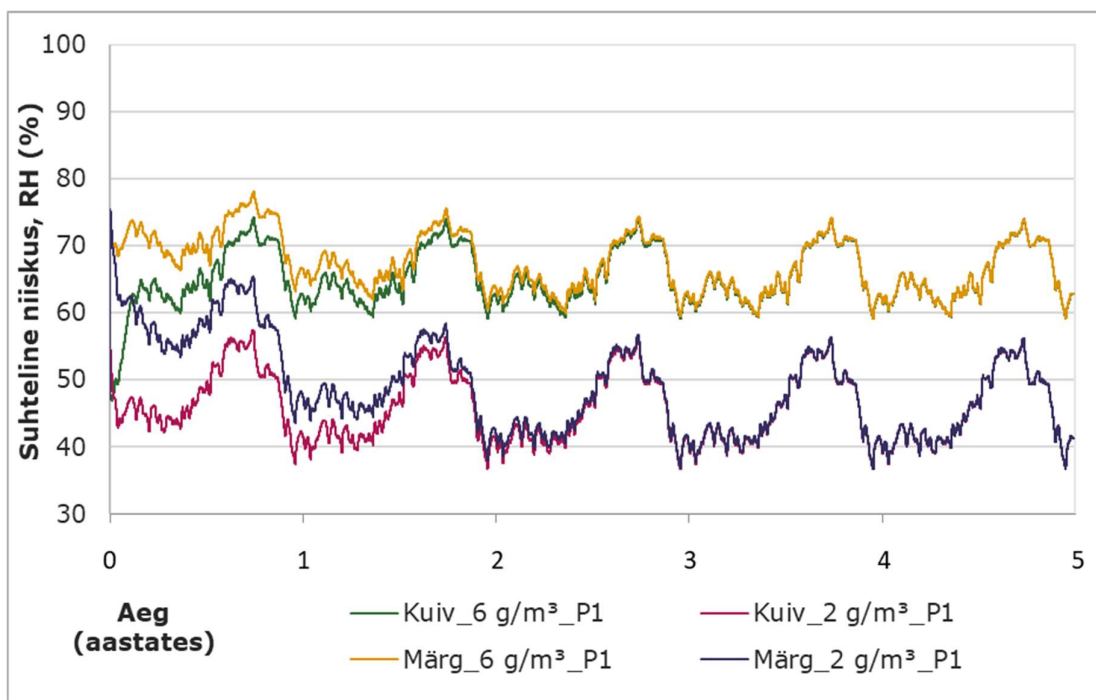


Joonis 3.58 VS-4 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise hallituse indeksi võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

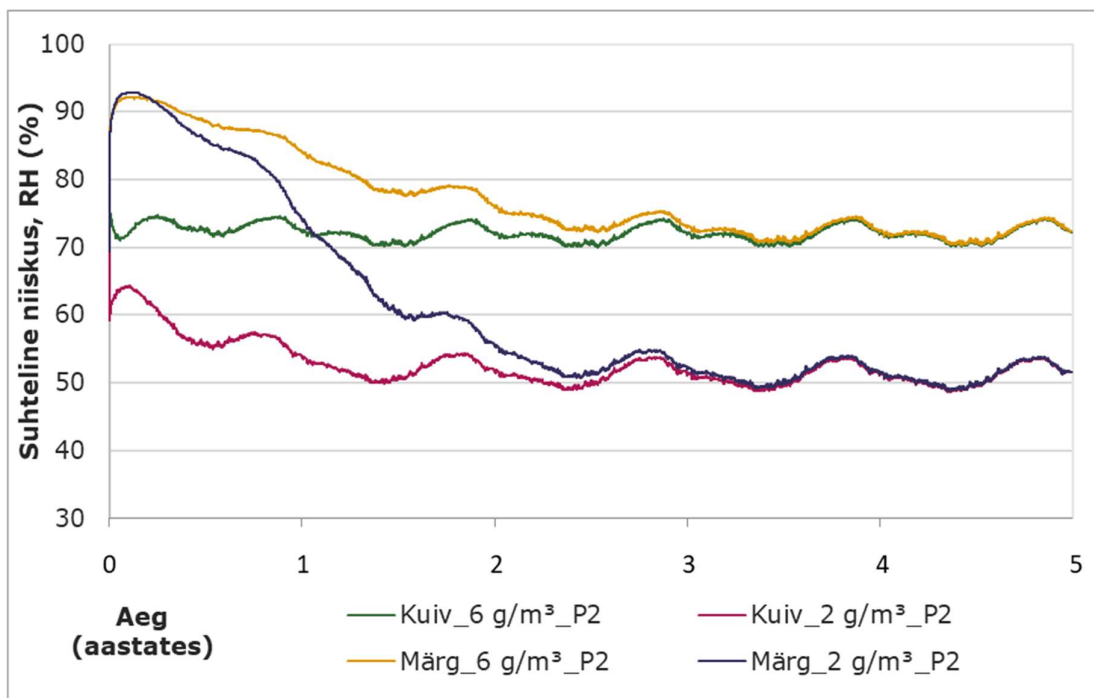
VS-4 tüüpi seinte puhul esines kõigis tarindites hallituse indeksi väikest tõusu, kuid testperioodi jooksul ei ületanud ühegi seina hallituse indeks väärtust 1. Kuiva karkassiga seina 2 g/m³ ruumi niiskuskooormuse puhul oli suurim hallituse indeks 0,26. Kuiva karkassiga 6 g/m³ ruumi niiskuskooormuse suurim hallituse indeks oli 0,61. Sama seinatüübi märja karkassiga suurimad hallituse indeksid olid 2 g/m³ ruumi niiskuskooormuse puhul 0,48 ja 6 g/m³ niiskuskooormuse puhul 0,79. Suurema niiskustaseme ruumis asuvate seinte hallituse indeksi graafikud olid aeglaselt tõusva trendiga, millest võis järeldada hallituse kasvu jätkuvat suurenemist. Suurema niiskustaseme ruumis asuvate seinte puhul olid graafikud tõusva trendiga tõenäoliselt aurutõkke puudumise tõttu karkassikihi ja sisemise roovikihi vahel. Võimalik, et ka PUR vahuga ($\mu \leq 72,5$) soojustamisel tuleks kasutada suurema niiskuskooormusega ruumides sisemist aurutõket, mis ei lase ruumi niiskusel pikema aja jooksul karkassipuitu tungida.

3.3.5 VS-5

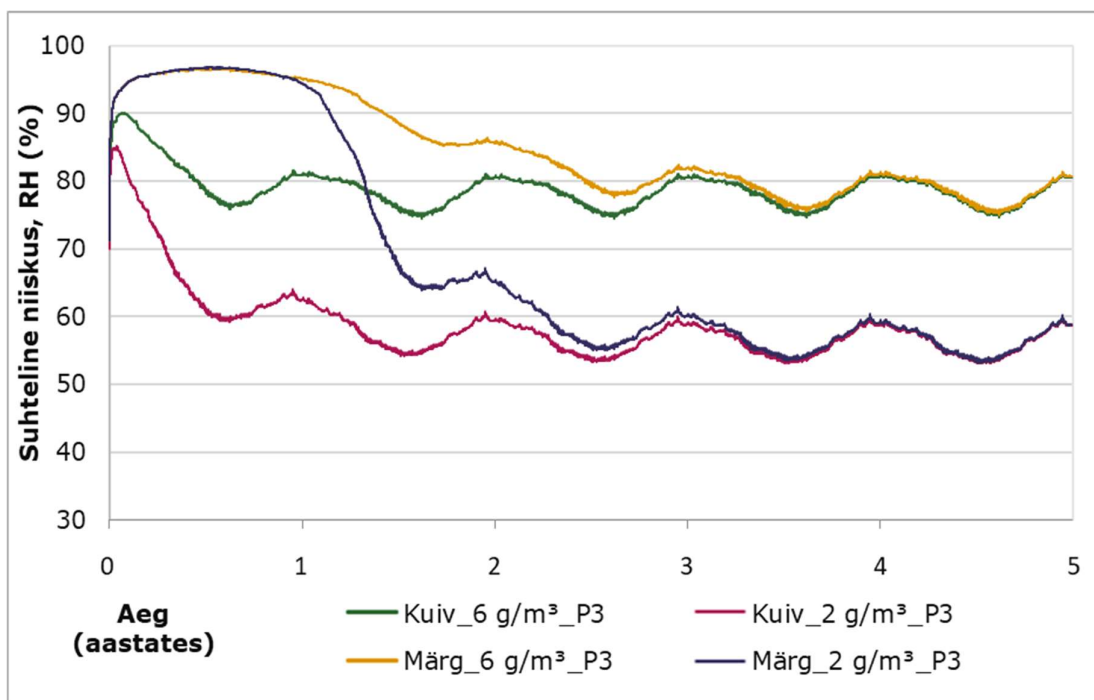
VS-5 tüüpi seinte soojustusmaterjaliks karkassiposti vahel oli PUR vaht ($\mu \leq 72,5$), millele lisati välimisele küljele PIR soojustusplaat (70 mm). Tarindite 5-aastase testperioodi suhtelise niiskuse graafikud mõõtepunktides P1, P2 ja P3 asuvad allolevatel joonistel (Joonis 3.59, Joonis 3.60 ja Joonis 3.61). Hallituse indeksi leidmisel valiti mõõtepunkt kõige suurema suhtelise niiskuse järgi puidu pinnal (vt Joonis 3.62). Pikaajalisest simulatsioonist oli näha, et kõige välimises mõõtepunktis P3 oli suhteline niiskus kõige kõrgem ning mõõtepunktis P1 kõige madalam.



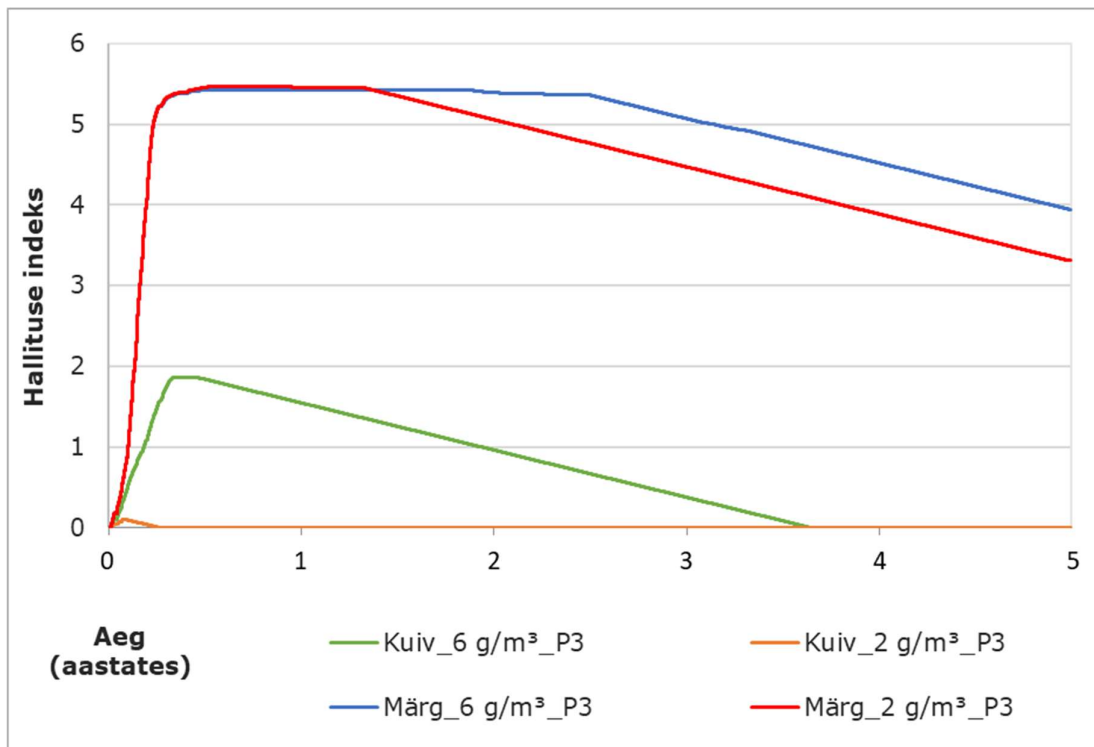
Joonis 3.59 VS-5 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P1



Joonis 3.60 VS-5 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P2



Joonis 3.61 VS-5 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

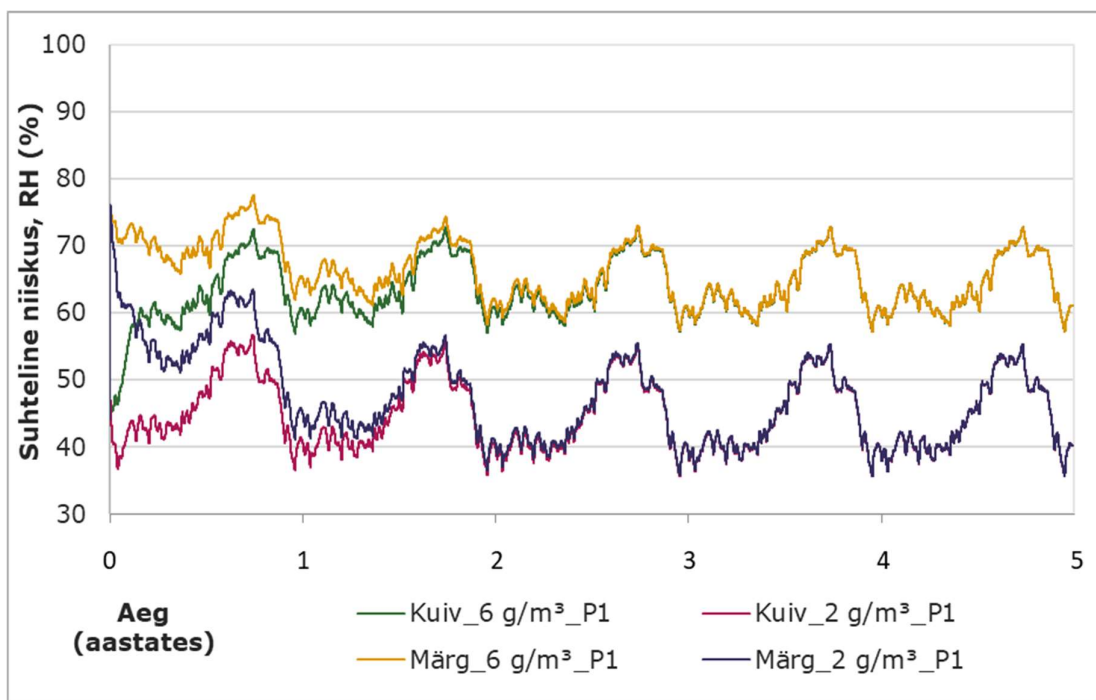


Joonis 3.62 VS-5 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise hallituse indeksi võrdlusgraafik mõõtepunktis P3

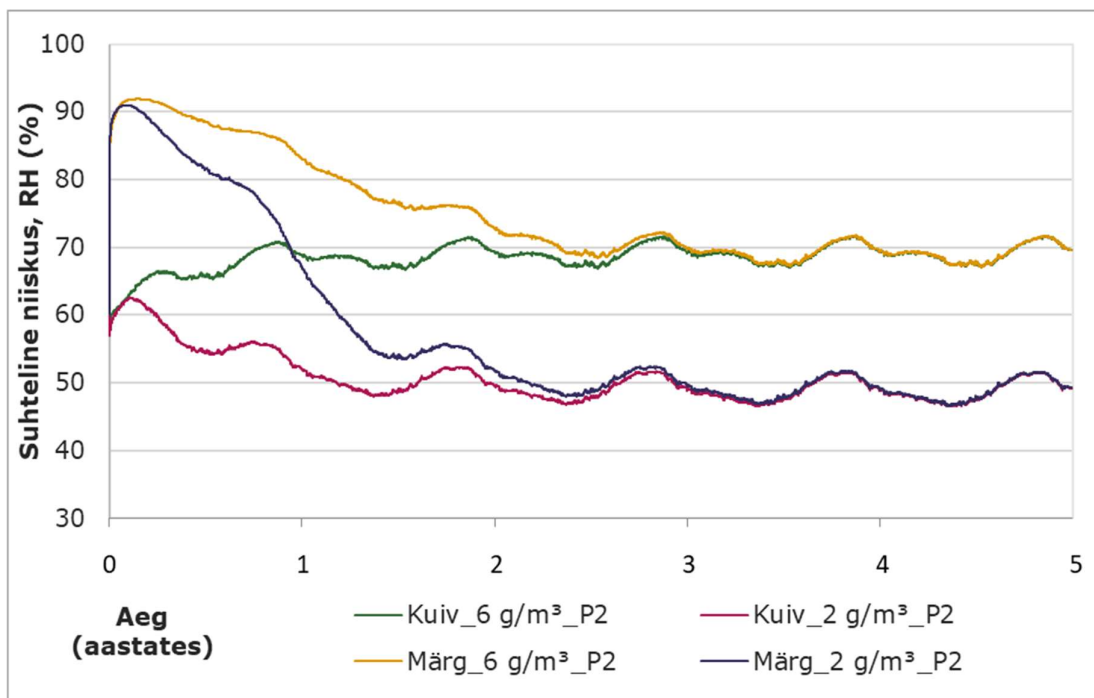
VS-5 tüüpi seinte puhul olid hallituse riskid kõrged eelkõige märja karkassiga seinte puhul. Kuiva karkassiga seina 2 g/m^3 ruumi niiskuskooormuse puhul suurim hallituse indeks oli 0,10. Kuiva karkassiga 6 g/m^3 ruumi niiskuskooormuse suurim hallituse indeks oli 1,86. Sama seinatüübi märja karkassiga suurimad hallituse indeksid olid 2 g/m^3 ruumi niiskuskooormuse puhul 5,47 ja 6 g/m^3 niiskuskooormuse puhul 5,43. Pärast 1,5 aasta möödumist oli märja karkassiga seina 2 g/m^3 niiskuskooormusega ruumis seina hallituse indeks langustrendis. 6 g/m^3 niiskuskooormusega ruumis hakkas hallituse indeks alanema pärast 2,5 aastat. Mõlema märja karkassiga seina puhul jäi siiski 5 aastase testperioodi jooksul hallituse indeks üle 3. Suurema niiskuskooormusega ruumi kuiva karkassiga seina hallituse indeks hakkas langema pärast 0,5 aastat ning jõudis nullini umbes 3,5 aasta möödudes. Suurema niiskuskooormuse (6 g/m^3) puhul ruumis oli niiskuse kuivamine raskendatud ning enne, kui tarind jõudis kuivada, võis alata juba hallituse kasv. Märja karkassiga seinte puhul oli aga hallituse risk läbivalt väga kõrge, sest välimine PIR soojustusplaadi suur veeauru difusioonitakistus ei lasknud karkassipuidu niiskusel välja poole kuivada.

3.3.6 VS-6

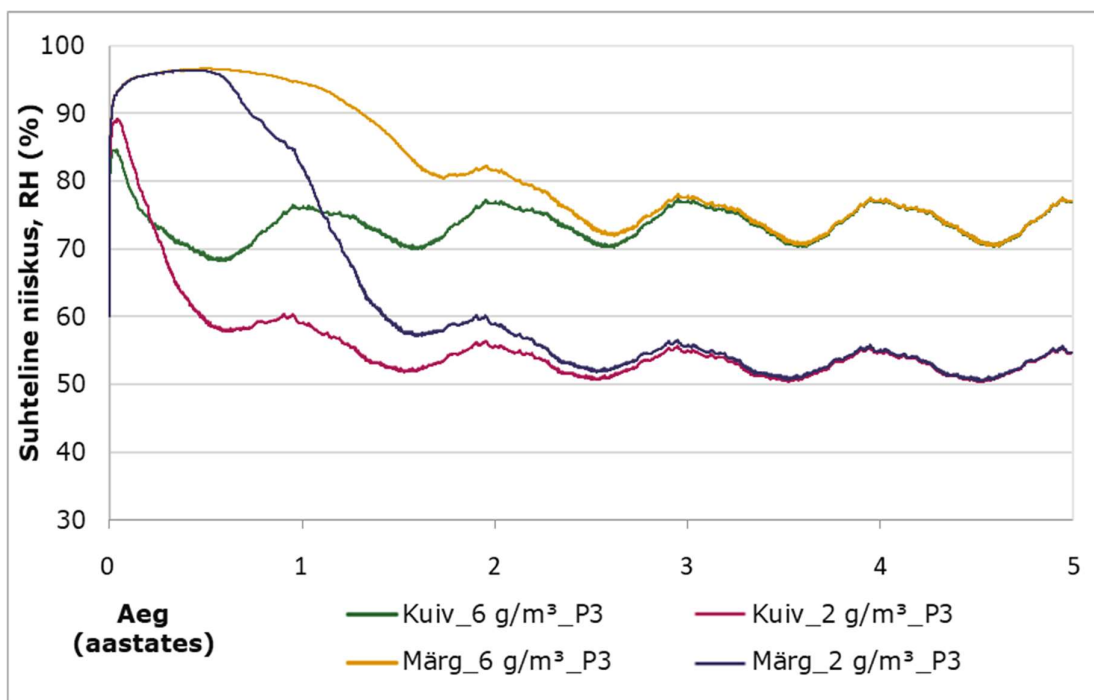
VS-6 tüüpi seinte soojustusmaterjaliks karkassiposti vahel oli PUR vaht ($\mu \leq 72,5$), millele lisati välimisele küljele PIR soojustusplaat (120 mm). Tarindite 5-aastase testperioodi suhtelise niiskuse graafikud mõõtepunktides P1, P2 ja P3 asuvad allolevatel joonistel (Joonis 3.63, Joonis 3.64 ja Joonis 3.65). Hallituse indeksi leidmisel valiti mõõtepunkt kõige suurema suhtelise niiskuse järgi puidu pinnal (vt Joonis 3.66). Pikaajalisest simulatsioonist oli näha, et kõige välimises mõõtepunktis P3 oli suhteline niiskus kõige kõrgem ning mõõtepunktis P1 kõige madalam.



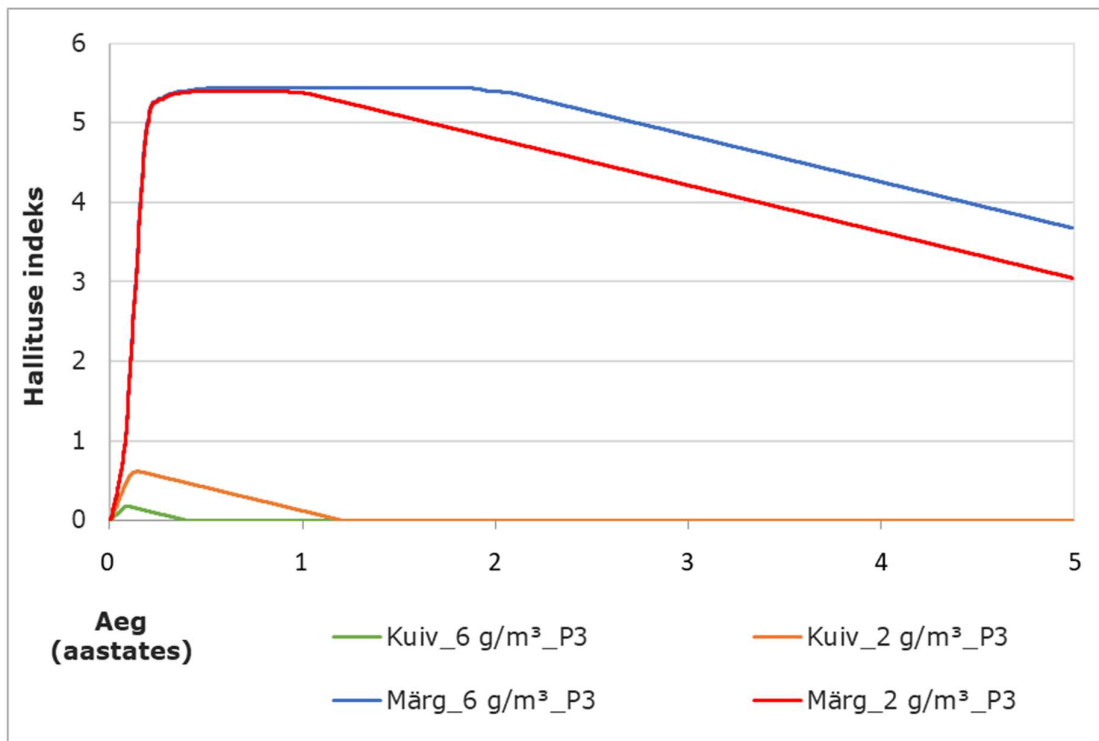
Joonis 3.63 VS-6 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P1



Joonis 3.64 VS-6 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P2



Joonis 3.65 VS-6 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise suhtelise niiskuse võrdlusgraafik mõõtepunktis P3



Joonis 3.66 VS-6 tüüpi seinte pikaajalise modelleerimise hallituse indeksi võrdlusgraafik mõõtepunkti P3

VS-6 tüüpi seinte puhul olid hallituse riskid kõrged sarnaselt VS-5 tüüpi seintele eelkõige märja karkassiga seinte puhul. Kuiva karkassiga seina 2 g/m³ ruumi niiskuskooormuse puhul suurim hallituse indeks oli 0,62. Kuiva karkassiga 6 g/m³ ruumi niiskuskooormuse suurim hallituse indeks oli 0,18. Sama seinatüübi märja karkassiga suurimad hallituse indeksid olid 2 g/m³ ruumi niiskuskooormuse puhul 5,39 ja 6 g/m³ niiskuskooormuse puhul 5,43. Pärast 1 aasta möödumist oli märja karkassiga seina 2 g/m³ niiskuskooormusega ruumis seina hallituse indeks muutunud ühtlaselt langevaks. 6 g/m³ niiskuskooormusega ruumis hakkas hallituse indeks alanema pärast 2 aastat. Mõlema märja karkassiga seina puhul jäi siiski 5 aastase testperioodi jooksul hallituse indeks üle 3. Suurem hallituse indeks kuiva karkassiga seinte puhul esines simulatsiooni põhjal väiksema niiskuskooormusega ruumis. See tulenes tõenäoliselt suuremast algniiskusest kuiva puidu karkassis kalibreerimise ajal. Märja karkassiga seinte puhul oli aga hallituse risk läbivalt väga kõrge, sest välimine PIR soojustusplaadi suur veeauru difusioonitakistus ei lasknud karkassipuidu niiskusel välja poole kuivada.

3.4 Hallituse tulemuste hindamine

Tabel 4.1 Hallituse hindamine testitud seinatüüpides

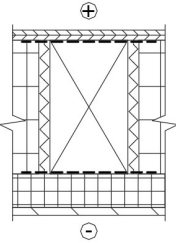
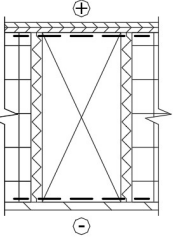
	Seina tähis	Niiskustlisa (g/m ³)	Sisemine aurutõke	Soojustuse materjal	Hallituse indeks	Hallituse risk
Kuiva karkassiga seinad	VS-1	2	-	PIR plaat	0	Madal
	VS-1	6	-	PIR plaat	0	Madal
	VS-2	2	-	PIR plaat	0	Madal
	VS-2	6	-	PIR plaat	0	Madal
	VS-3	2	X	PUR ($\mu = 6,55$)	1,9	Madal
	VS-3	6	X	PUR ($\mu = 6,55$)	3,0	Keskmine
	VS-4	2	-	PUR ($\mu \leq 72,5$)	0,3	Madal
	VS-4	6	-	PUR ($\mu \leq 72,5$)	0,6	Madal
	VS-5	2	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	0,1	Madal
	VS-5	6	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	1,9	Madal
	VS-6	2	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	0,6	Madal
	VS-6	6	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	0,2	Madal
Märja karkassiga seinad	VS-1	2	-	PIR plaat	5,7	Suur
	VS-1	6	-	PIR plaat	5,8	Suur
	VS-2	2	-	PIR plaat	5,6	Suur
	VS-2	6	-	PIR plaat	5,1	Suur
	VS-3	2	X	PUR ($\mu = 6,55$)	2,5	Keskmine
	VS-3	6	X	PUR ($\mu = 6,55$)	2,9	Keskmine
	VS-4	2	-	PUR ($\mu \leq 72,5$)	0,5	Madal
	VS-4	6	-	PUR ($\mu \leq 72,5$)	0,8	Madal
	VS-5	2	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	5,5	Suur
	VS-5	6	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	5,4	Suur
	VS-6	2	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	5,4	Suur
	VS-6	6	-	PUR ($\mu \leq 72,5$) + PIR plaat	5,4	Suur

Hallituse riski hindamisel lähtuti H. Viitaneni valgusfoori klassifikatsioonist välispindadele, kus hallituse indeks kuni 2 annab rohelse tule ehk kinnitab tarindi toimivust. Hallituse indeks kuni 3 annab kollase tule, mis tähendab, et tarindis on hallituse tekke oht. Punase tule annab hallituse indeks üle 3, mis tähendab, et tarind ei ole niiskustehniliselt toimiv [13].

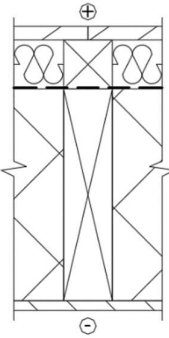
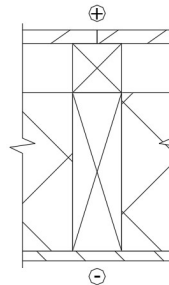
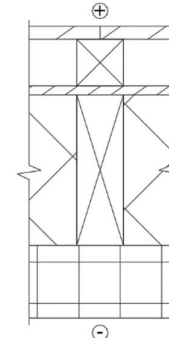
4. JÄRELDUSED

Kõikide seinatüüpide konstruktsioon sobib madalenergiahoonete ehitamiseks. Liginullenergiahoone klassi saavutamiseks tuleb lisada hoonele kohaliku taastuvenergia tootmise seadmed. Suurim suhteline niiskus esines kõigi seinatüüpide puhul välimises mõõtepunktis P3 või P4. Varasemas uuringus on leitud, et hallituse tekke riski vältimiseks tuleks suure soojuslähivusega ja veeauru difusiooni takistava tuuletõkkekipsi asemel kasutada heade soojustusomadustega ning veeauru difusioonile avatud tuuletõkkematerjali näiteks mineraalvillaplaati [61]. Alumiiniumkattega soojustusplaadi kasutamisel ei tohi puitkarkass ehituse või montaaži ajal märguda, sest niiskuse väljakuivamine on takistatud. Alltoodud tabelites (vt Tabel 4.1, Tabel 4.2 ja Tabel 4.3) on toodud järelused tarindite toimivuse kohta seinatüüpide kaupa.

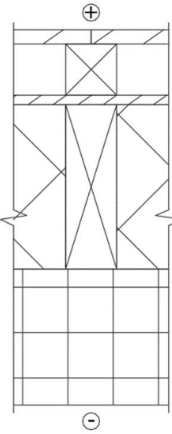
Tabel 4.1 Järelduste tabel osa 1

Tarindi kirjeldus	Järeldused
VS-1  Kihid seest välja: Vineerplaat 9mm Karkass 70x120mm cc600mm -PIR soojustusplaat Al kattega 120mm PIR soojustusplaat Al kattega 30mm Klaasplast 7mm	Puit peab olema ehituseks kuiv (algniiskus $\leq 18\%$). Konstruktsioon ei tohi ehituse ajal märguda. Kuiv konstruktsioon sobib nii suure (6 g/m^3) kui ka väikese (2 g/m^3) niiskuskoormusega hoonetele. Karkassipuidu pind, karkassi ja soojustusplaadi liide ning soojustusplaatide vuugid peavad olema teibitud. Märgunud karkassi puhul tekkis hallitus välimise lisasoojustuse ja karkassiposti vahele.
VS-2  Kihid seest välja: Vineerplaat 9mm Karkass 70x145mm cc600mm -PIR soojustusplaat Al kattega 2x70mm Klaasplast 7mm	Puit peab olema ehituseks kuiv (algniiskus $\leq 18\%$). Konstruktsioon ei tohi ehituse ajal märguda. Kuiv konstruktsioon sobib nii suure (6 g/m^3) kui ka väikese (2 g/m^3) niiskuskoormusega hoonetele. Karkassipuidu pind, karkassi ja soojustusplaadi liide ning soojustusplaatide vuugid peavad olema teibitud. Märgunud karkassi puhul tekkis hallitus klaasplasti ja karkassiposti vahele.

Tabel 4.2 Järelduste tabel osa 2

Tarindi kirjeldus	Järeldused
VS-3  Kihid seest välja: Kipsplaat 12,5mm Ver. roov 45x45mm cc600mm -Soojustus 50mm Aurutõke Karkass 45x195mm cc600mm -Soojustus PUR ($\mu=6,55$) 195mm Tuuletõkkekips 9mm	Kuiva puidu (algniiskus $\leq 18\%$) kasutamisel väikese (2 g/m^3) niiskuskooormusega hoones on tarindi niiskustehniline toimivus tagatud. Kuiva puidu kasutamisel suure (6 g/m^3) niiskuskooormusega hoones on hallituse tekke risk. Sama võib järeldada ka märja (algniiskus $> 18\%$) puidu kasutamisest nii suure kui ka väikese niiskuskooormusega hoonetes. Hallituse tekke riski koht on tuuletõkkekipsi ja karkassi välimise pinna vahel.
VS-4  Kihid seest välja: Kipsplaat 12,5mm Ver. roov 45x45mm cc600mm Karkass 45x145mm cc600mm -Soojustus PUR ($\mu \leq 72,5$) 145mm Tuuletõkkekips 9mm	Tarindi niiskustehniline toimivus on tagatud nii suure ($> 18\%$) kui ka väikese ($\leq 18\%$) algniiskusega puidu korral. Suurema (6 g/m^3) niiskuskooormusega hoone puhul on soovitatav kasutada muutuva difusioonitakistusega aurutõket, sest pikaajalise simulatsiooni hallituse indeksi oli tõusva tendentsiga. Hallituse võib tekkida tuuletõkkekipsi ja puitkarkassi välimise pinna vahele. Muutuva difusioonitakistusega aurutõke võimaldab suvekuudel konstruktsiooni kuivamist sisse poole. Väikese (2 g/m^3) niiskuskooormusega ruumides on hallituse risk madal.
VS-5  Kihid seest välja: Kipsplaat 12,5mm Ver. roov 45x45mm cc600mm Vineerplaat 9mm Karkass 45x145mm cc600mm -Soojustus PUR ($\mu \leq 72,5$) 145mm PIR soojustusplaat Al kattega 70mm	Puit peab olema ehituseks kuiv (algniiskus $\leq 18\%$). Konstruktsioon ei tohi ehituse ajal märguda. Kuiv konstruktsioon sobib nii suure (6 g/m^3) kui ka väikese (2 g/m^3) niiskuskooormusega hoonetele. Antud konstruktsiooni ehitamine välistingimustes võib kaasa tuua niiskustehnilisi probleeme. Hallituse tekke riski koht on välimise lisasoojustuse ja puitkarkassi vaheline osa.

Tabel 4.3 Järelduste tabel osa 3

Tarindi kirjeldus	Järeldused
VS-6  Kihid seest välja: Kipsplaat 12,5mm Ver. roov 45x45mm cc600mm Vineerplaat 9mm Karkass 45x145mm cc600mm -Soojustus PUR ($\mu \leq 72,5$) 145mm PIR soojustusplaat Al kattega 120mm	Puit peab olema ehituseks kuiv (algniiskus $\leq 18\%$). Konstruktsioon ei tohi ehituse ajal märguda. Kuiv konstruktsioon sobib nii suure (6 g/m^3) kui ka väikese (2 g/m^3) niiskuskooormusega hoonetele. Antud konstruktsiooni ehitamine välistingimustes võib kaasa tuua niiskustehnilisi probleeme. Hallitus tekke riski kohaks on vältimise lisasoojustuse ja puitkarkassi vaheline osa. Vältimise soojustuskihi paksuse suurendamine võrreldes VS-5 tüüpi seinaga ei anna suurt soojustehnilist võitu.

5. KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli hinnata jäiga plastvahust soojustusega (PUR ja PIR) puitsõrestik välispiirdetarindite soojus- ja niiskustehnilist toimivust lähtudes VTT hallitusindeksist. Tarindite valikul lähtuti liginullenergiahoone nõuetele vastavusest, et arvestada tarindite sobivust kaasaegses ehituses. ETA kalkulatsioonide põhjal oli kõikide seinatüüpide konstruktsioonidega võimalik püstitada madalenergiahooneid. Liginullenergiahoone klassi saavutamiseks tuleb lisada hoonele kohaliku taastuenergia tootmise seadmed.

Katse käigus paigaldati tehasetingimustes ehitatud testseintele vastavatesse kihtidesse eelnevalt kalibreeritud temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurid ning elektroodid puidu niiskussisalduse mõõtmiseks. Testseinad monteeriti Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoonesse kahte eraldi ruumi – 12 testelementi testruumi niiskussisaldusega 2 g/m^3 (niiskusklass 1) ja 12 testelementi testruumi niiskussisaldusega 6 g/m^3 (niiskusklass 3). Suurem niiskuskooormus imiteeris olukorda, mil konstruktsioon võib ekspluatatsiooni käigus niiskuda. Mõlemas ruumis oli 6 erinevat tüüpi seina, millest pooled olid kuiva (keskmine niiskuse sisaldus $\sim 15\%$) ja pooled märja karkassiga (keskmine niiskuse sisaldus $\sim 30\%$). Märja karkassiga testseintega tekitati kunstlikult olukord, mil karkassipuit on märgunud ehituse, montaaži või ladustamise ajal.

Kõikidest testitud tarinditest loodi arvutusmodelid kasutades simulatsioonitarkvara Delphin 5. Arvutusmodelite kalibreerimiseks kasutati kogutud andmeid testseinte anduritest ning sise- ja väliskliima anduritest. Kalibreeritud mudeleid kasutati tarindite pikaajalise niiskustehnilise toimivuse hindamiseks. Selleks kasutati hallituse testaasta kliimaandmeid. Pikaajalise simulatsiooni tulemustest lähtuvalt analüüsiti hallituse tekke riske kõige suurema suhtelise niiskusega mõõtepunktides.

Testitud seinte katsetulemused näitasid, et märgunud konstruktsiooni karkassipuidu sisemine külg kuivas vähem kui 60 päevaga kõikide tarindite puhul niiskussisalduseni $\sim 18\%$. Välimine külg kuivas samale tasemele 5 kuu jooksul vaid kahe testitud märja karkassiga seinatüübi puhul. Alumiiniumlaminaadiga polüuretaan soojustusplaatide kasutamisel märja karkassiga seintes tekkis suur hallituse risk kõikide tarindite puhul olenemata niiskuskooormusest. Veeauru difusiooni takistav PUR vaht ($\mu \leq 72,5$) ei olnud piisav niiskuslevi takistamiseks konstruktsiooni, sest puit hakkas suure pikaajalise niiskuskooormuse tõttu niiskuma. Selle ennetamiseks tuleks kasutada aurutõket. Veeauru difusioonile avatud PUR vahu ($\mu = 6,55$) kasutamisel on vajalik aurutõkke kasutamine, et takistada ruuminiiskuse ligipääs konstruktsioonile.

6. SUMMARY

This Master's thesis aimed to assess the hygrothermal performance of the timber-frame wall with rigid foam insulation based on the VTT mould index. The choice of construction types was based on the cross-compliance of the nearly-zero energy building regulations. Based on energy efficiency calculations, low-energy buildings can be built with all types of tested structures. To achieve a nearly-zero energy building class, local renewable energy production equipment must be added to the building.

During the test, sensors for temperature and relative humidity and electrodes for measuring the wood's moisture content were installed into the test walls built under factory conditions. The test walls were mounted in two separate rooms into the test building of the Tallinn University of Technology for nearly-zero energy buildings: 12 test elements in the test room with an excessive moisture content of 2 g/m³ (humidity class 1) and 12 test elements in the test room with an excessive moisture content of 6 g/m³ (humidity class 3). Moisture content of 6 g/m³ imitated a situation where the construction may wet during exploitation. In both rooms there were 6 different types of walls, half of which were dry (average moisture content of ~15%) and half were wet (average moisture content of ~30%). Wet test walls imitated a situation in which wood has gotten wet during construction, installation, or storage.

Calculation models were created from all the tested elements using the simulation software Delphin 5. The data collected from sensors within the walls, internal and external climate sensors were used to calibrate the calculation models. Calibrated models were used to assess long-term moisture performance using test year climate data. Based on the results of the long-term simulation, the risks of the formation of moulds in the points where relative humidity was highest were analysed.

Test results of the tested walls showed that the internal side of the damped wood dries to the point of ~18% in less than 60 days for all test subjects. The same effect on the external side was noticed after five months for only two wet wall types tested. The use of polyurethane insulation with aluminium laminate in wet walls resulted in a high risk of moulding for all test elements, regardless of the moisture load. PUR foam that is resistant to water vapour diffusion ($\mu \leq 72.5$) was not enough to prevent the moisture from penetrating the construction and timber started to gain moisture due to a high long-term moisture load. Additional layer of vapour barrier is recommended. When using PUR foam that is opened to water vapour diffusion ($\mu = 6,55$) an additional vapour barrier layer must be used.

7. KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] E. Ajuong, L. C. Pinion, and B. S. Mohammad, "Degradation of wood," *Elsevier Inc.*, 2010.
- [2] M. H. Ramage *et al.*, "The wood from the trees: The use of timber in construction," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017.
- [3] I. Teodorescu, D. Țăpuși, R. Erbașu, E. Bastidas-Arteaga, and Y. Aoues, "Influence of the Climatic Changes on Wood Structures Behaviour," *Energy Procedia*, 2017.
- [4] Forest Products Laboratory - USDA, "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material," *USDA - Gen. Tech. Rep.*, vol. General Te, p. 508, 2010.
- [5] Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu, "Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta," *Euroopa Liidu Teat.*, 2010.
- [6] Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainister, "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded," *RT*, 2019.
- [7] Riigikogu, *Ehitusseadustik, RT I, 21.12.2019, 5.* 2015.
- [8] S. O. Mundt-Petersen, L. E. Harderup, and J. Arfvidsson, "Important factors affecting the risk of mold growth in well-insulated wood frame walls in northern European climates," *Therm. Perform. Exter. Envel. Whole Build. - 12th Int. Conf.*, 2013.
- [9] L. Olsson, M. Sc, K. Mjörnell, D. Ph, and P. Johansson, "Moisture and mould in prefabricated timber frame constructions during production until enclosure of the house," 2011.
- [10] I. / D. 22185-1, "Diagnosing moisture damage in buildings and implementing countermeasures — Part 1: Principles , nomenclature and moisture transport mechanisms," 2020.
- [11] J. Bech-Andersen, "Hallitusseened," *Indoor Clim. Mould.*, 2004.
- [12] M. Pindus, "Siseõhu saasteainete piirnormid erinevates Euroopa maades," Tartu, 2015.
- [13] H. Viitanen, M. Krus, T. Ojanen, V. Eitner, and D. Zirkelbach, "Mold risk classification based on comparative evaluation of two established growth models," *Energy Procedia*, 2015.
- [14] Y. S. Chow *et al.*, "Wood Rot," *Encycl. Entomol.*, vol. 2, pp. 4293–4293, 2008.
- [15] L. Meyer and C. Brischke, "Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 103, pp. 23–29, 2015.
- [16] J. Wang, "Guide for On-site Moisture Management of Wood Construction," *FP Innov.*, 2016.

- [17] S. O. Mundt-Petersen, *Moisture safety in wood frame buildings*. 2015.
- [18] S. Mundt Petersen and L.-E. Harderup, "Moisture safety in wood frame constructions – What do we know today? – A literature overview," *SB13 Oulu - Sustain. Procure. urban Regen. Renov. North. Eur. North-West Russ.*, 2013.
- [19] H. Johnsson and J. H. Meiling, "Defects in offsite construction: Timber module prefabrication," *Constr. Manag. Econ.*, 2009.
- [20] L. Malmgren, *Industrialized construction - Explorations of current practice and opportunities*. 2014.
- [21] J. Straube, R. Smith, and G. Finch, "Spray Polyurethane Foam: The Need for Vapour Retarders in Above-Grade Residential Walls," *Univ. Waterloo, Canada*, 2009.
- [22] EVS-EN ISO 13788:2012, "Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisise kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid," *Eesti Standardikeskus*, 2012. .
- [23] L. Olsson and K. Mjörnell, "Laboratory investigation of sills and studs exposed to rain," 2012.
- [24] H. Viitanen, "Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions," *Mater. Struct.*, vol. 27, no. 8, pp. 483–493, 1994.
- [25] Kingspan Insulation OY, "Väikeelamute ja ridaelamute detailikogu." [Online]. Available: <https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/soojustus/detailikogu/vaikeelamute-ja-ridaelamute-detailikogu>. [Accessed: 13-May-2020].
- [26] MKM, "Hoonete energiatõhusus Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi." [Online]. Available: <https://mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus/hoonete-energiatohusus>. [Accessed: 23-May-2020].
- [27] Nicolai Andreas; Grunewald John, "Delphin 5," *Delphin 5 User manual*. 2006.
- [28] Kingspan Insulation OY, "Therma TW55 - Soojustus." [Online]. Available: <https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/soojustus/therma/therma-tw55-karkassi-soojustusplaat>. [Accessed: 13-May-2020].
- [29] Kingspan Insulation OÜ, "Projekteerimisjuhendid." [Online]. Available: <https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/soojustus/detailikogu/projekteerimisjuhendid>. [Accessed: 13-May-2020].
- [30] Soudal NV, "Soudal Flexifoam Gun," 2016. [Online]. Available: <https://www.soudal.ee/index.php/pu-foams/item/28-soudafoam-flexifoam>. [Accessed: 13-May-2020].
- [31] SIGA, "Downloads of data sheets, instructions and more." [Online]. Available: https://www.siga.swiss/global_en/downloads?downloadcenter%5Bcountry%5D

- =ee#downloadcenter-searchbar. [Accessed: 13-May-2020].
- [32] E.-J. Just, K. Õiger, and A. Just, *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2018.
- [33] Purinova Sp. z o.o., "Purios E." [Online]. Available: <https://purios.com/en/product-en/purios-e-en>. [Accessed: 13-May-2020].
- [34] Knauf SIA, "Knauf - White GKB/A." [Online]. Available: http://www.knauf.ee/et/tooted/white-gkb-a.html#showtab-tab_85744_4. [Accessed: 14-May-2020].
- [35] Knauf SIA, "Knauf - Green KTS/EH2." [Online]. Available: http://www.knauf.ee/et/tooted/green-kts-eh2.html#showtab-tab_86541_4. [Accessed: 14-May-2020].
- [36] Purinova Sp. z o.o., "Purios H." [Online]. Available: <https://purios.com/en/product-en/purios-h-1>. [Accessed: 13-May-2020].
- [37] E. Standardikeskus, "Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisise kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid," *EVS-EN ISO 137882012*, 2012.
- [38] "TalTechi liginullenergia testmaja." [Online]. Available: <https://www.ttu.ee/instituut/ehituse-ja-arhitektuuri-instituut/uurimisruhmad-4/liginullenergiahooned/zebe/>. [Accessed: 23-May-2020].
- [39] W. L. James, "Electric Moisture Meters for Wood.," *US For. Prod. Lab.*
- [40] P. Dietsch, S. Franke, B. Franke, A. Gamper, and S. Winter, "Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts," *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 5, no. 2, pp. 115–127, 2015.
- [41] H. Forsén and V. Tarvainen, "Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters," *VTT Publ.*, no. 420, pp. 2–79, 2000.
- [42] OmniSense LLC, "OmniSense Sensors: A-1 HumiSense™ Temperature and Humidity Probe." [Online]. Available: <https://www.omnisense.com/Store/a-1-humisense-temperature-and-humidity-probe>. [Accessed: 16-May-2020].
- [43] OmniSense LLC, "OmniSense Wireless Sensors: S-2 Wireless Sensor with 2 ports for T and %RH, WME socket and 64K Reading Datalogging Memory, $\pm 0.3^{\circ}\text{C}/\pm 2.0\%\text{RH}$." [Online]. Available: <https://www.omnisense.com/Store/s-2-wireless-sensor-with-2-ports-for-t-and-rh-wme-socket-and-64k-reading-datalogging-memory-03c20rh>. [Accessed: 16-May-2020].
- [44] L. Greenspan, "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions," *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 81A, 1977.
- [45] P. Pihelo, H. Kikkas, and T. Kalamees, "Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall," *Energy Procedia*, vol. 96, no. October, pp. 685–695, 2016.

- [46] LBNL, "THERM | Windows and Daylighting." [Online]. Available: <https://windows.lbl.gov/software/therm>. [Accessed: 28-May-2020].
- [47] Majandus- ja taristuminister, "Hoone Energiatõhususe Arvutamise Metoodika," RT, pp. 1–27, 2019.
- [48] EVS-EN ISO 10211 2017, "Külmasillad Hoones. Soojusvoolud ja Pinnatemperatuurid. Detailsed Arvutused," *Eesti Standardikeskus*. .
- [49] Nicolai Andreas; Grunewald John, "DELPHIN," 2020. .
- [50] T. Kalamees and J. Vinha, "Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations," *J. Build. Phys.*, 2004.
- [51] A. Sadłowska-Sałęga and K. Was, "buildings Risk of Moisture in Di ff usionally Open Roofs with Cross-Laminated Timber for Northern Costal Climates," *Buildings*, pp. 1–14, 2020.
- [52] B. Esping, J.-G. Salin, and P. Brander, *Moisture in wood for the construction industry*. Stockholm: SP Swedish National Testing and Reasearch Institute, 2005.
- [53] E. Liisma, B. L. Kuus, V. Kukk, and T. Kalamees, "A case study on the construction of a clt building without a preliminary roof," *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 53–62, 2019.
- [54] L. Olsson, "Moisture Conditions in Exterior Wooden Walls and Timber During Production and Use," 2014.
- [55] B. and P. National Board of Housing, "Boverket's mandatory provisions and general recommendations , BBR," vol. 1, no. 154, pp. 1–154, 2018.
- [56] S. K. Lie, T. K. Thiis, G. I. Vestøl, O. Høibø, and L. R. Gobakken, "Can existing mould growth models be used to predict mould growth on wooden claddings exposed to transient wetting?," *Build. Environ.*, vol. 152, no. November 2018, pp. 192–203, 2019.
- [57] H. Viitanen, T. Ojanen, and R. Peuhkuri, "Mould growth modelling to evaluate durability of materials," *Proc. 12DBMC - Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components*, pp. 1–8, 2011.
- [58] T. Ojanen, H. Viitanen, R. Peuhkuri, J. Vinha, and K. Salminen, "Mold Growth Modeling of Building Structures TO IMPROVE THE MODEL," 2010.
- [59] A. Hukka and H. A. Viitanen, "A mathematical model of mould growth on wooden material," *Wood Sci. Technol.*, vol. 33, no. 6, pp. 475–485, 1999.
- [60] H. Gustavson, "Polüuretaanvahuga täidetud vuukide õhuleke," 2018.
- [61] P. Pihelo, "Madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseina niiskustehniline toimivus," Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [62] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007.

LISAD

Lisa 1 Tarinditüüpide ETA kalkulatsioon

Andmed hoone kohta							Energiarvutuse teostaja				
Address		VS-1		Uue hoone püstamine			Nimi				
Kõetav pind		193.0	m²	Ehitise kasutamise otstarve			Pädevus				
Netopind		212.3	m²	Peamine soojusallikas ruumide kütteks			Allkiri				
					Maasoojuspump			allkirjastatud digitaalselt			
Piirdetarind		U_i W/(m²·K)	A_i m²	$H_{juhtivus}$ W/K	Joon-soojusläbivus	Ψ_k W/(m·K)	l_k m	$H_{joonl\ddot{a}bivus}$ W/K	Infiltratsioon	$H_{infiltratsioon}$	
Välissein		0.18	152.0	26.7	Välisseina välisnurk	0.070	18.0	1.3	q_{50} , m³/(h·m²)	4.0	
Katuslagi		0.10	189.2	19.3	Välisseina sisenurk	-0.010	6.1	-0.1	Kavandatud mõõtmine		
Põrand pinnasel		0.09	187.4	16.0	Välissein-katuslagi	0.050	64.7	3.2	Korruste arv	1	
Tuletõkkesein		0.16	10.3	1.7	Välissein-põrand	0.370	64.5	23.9	$A_{välispiire}$, m²	602.9	
				0.0	Välissein-vahelagi	0.090	6.0	0.5			
				0.0	Välissein-sisesein	0.010	4.0	0.0			
				0.0	Akna seinakinnitus	0.030	131.0	3.9			
Välisüks				0.0	Ukse seinakinnitus	0.440	5.0	2.2			
Aken põhja		0.73	8.0	7.9	Rõdu seinakinnitus	0.350	11.6	4.1			
Aken kirdesse				0.0							
Aken itta		0.95	10.9	9.3	Sisesein-katuslagi	0.350	4.0	1.4			
Aken kagusse				0.0							
Aken lõunasse		0.73	8.0	2.0	Sisesein-põrand			0.0			
Aken edelasse				0.0							
Aken läände		0.69	37.2	23.1				0.0	q_{inf} , m³/s	0.0191	
Aken loodesse				0.0							
Summa		$H_{juhtivus}$, W/K			106.1	$H_{joonl\ddot{a}bivus}$, W/K			40.5	$H_{\ddot{a}huleke}$, W/K	23.0
$H = H_{juhtivus} + H_{joonl\ddot{a}bivus} + H_{\ddot{a}huleke}$					W/K		169.5		Aknapiinna suhe kütavas pinda		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta H/A					W/(m²·K)		0.88		33%		
Tehnosüsteemid			Soojusallikad		Maasoojuspump		Õhk-vesi soojuspump	Kaugküte	Pelletikatel	Gaas-kondensatsioonikatel	
Projekteeritud õhk-vesi või maasoojuspumba nominaalvõimsus, kW			6.0	Energiabilanss	Netovajadus	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	
Arvutuslik välisõhu temp., °C			-21		kWh/(m²·a)						
Kütteviis			põrandküte	Ruumide küte	70.8	24.6	38.5	92.6	98.0	87.7	
Soojustagasti tüüp			rootorsoojustagasti	Vent. õhu soojendamine	5.0	1.6	2.3	5.5	5.8	5.2	
Soojustagastuse temperatuurisuhtarv, -			0.80	Tarbevee soojendamine	25.0	10.5	14.8	27.8	29.4	26.3	
Vent. lisa soojendamine			veekalorifeer	Ventilaatorid ja pumbad	7.4	7.4	7.4	9.4	9.4	9.4	
Ventilatsioonisüsteemi erivõimsus, kW/(m³/s)			2.0	Valgustus	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, kW			0.0	Seadmed	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
Kollektori aktiivpindala, m²			0.0	Toodetud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Kollektori või paneeli suunatus			lõuna	Taastuvelektri omatarve, %		0	0	0	0	0	
Kollektori või paneeli kaldenurk			15°	Tarbitud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Eksporditud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Summa		131.4	67.3	86.3	158.5	165.9	
				Kaalutatud energiasutus		134.7	172.6	178.5	151.9	184.5	
Paneeli paigaldusviis			mööduka tuulutusega	B-klassi ETA piirv	140	ETA (ilma PV)	135	173	179	152	
				A-klassi ETA piirv	120	ETA	135	173	179	152	

Joonis L1.1 VS-1 ETA kalkulatsioon (väikeelamukalkulaatori väljatrükk)

Andmed hoone kohta							Energiaarvutuse teostaja			
Aadress		VS-2			Uue hoone püstamine		Nimi			
Kõetav pind	193.5	m²	Ehitise kasutamise otstarve		11212 - Kahe korteriga elamu		Pädevus			
Netopind	212.3	m²	Peamine soojusallikas ruumide kütteks		Maasoojuspump		Allkiri	allkirjastatud digitaalselt		
Piirdetarind	U_i W/(m²·K)	A_i m²	$H_{juhtivus}$ W/K	Joon-soojusläbivus	Ψ_k W/(m·K)	l_k m	$H_{joonläbivus}$ W/K	Infiltratsioon	$H_{infiltratsioon}$	
Välissein	0.20	152.0	31.0	Välisseina välisnurk	0.120	18.0	2.2	q_{50} , m³/(h·m²)	4.0	
Katuslagi	0.10	189.2	19.3	Välisseina sisenurk	0.020	6.1	0.1	Kavandatud mõõtmine		
Põrand pinnasel	0.09	187.4	16.0	Välissein-katuslagi	0.080	64.7	5.2	Koruste arv	1	
Tuletõkkesein	0.16	10.3	1.7	Välissein-põrand	0.370	64.5	23.9	$A_{välispiire}$, m²	602.9	
Välisüks			0.0	Välissein-vahelagi	0.110	6.0	0.7			
			0.0	Välissein-sisesein	0.010	4.0	0.0			
			0.0	Akna seinakinnitus	0.070	131.0	9.2			
			0.0	Ukse seinakinnitus	0.440	5.0	2.2			
Aken põhja	0.73	8.0	7.9	Rõdu seinakinnitus	0.350	11.6	4.1			
Aken kirdesse			0.0	Sisesein-katuslagi	0.350	4.0	1.4			
Aken itta	0.95	10.9	9.3							
Aken kagusse			0.0	Sisesein-põrand			0.0			
Aken lõunasse	0.73	8.0	2.0					q_{inf} , m³/s	0.0191	
Aken edelasse			0.0				0.0			
Aken läände	0.69	37.2	23.1							
Aken loodesse			0.0							
Summa			$H_{juhtivus}$, W/K	110.3	$H_{joonläbivus}$, W/K			48.8	$H_{ühuleke}$, W/K	23.0
$H = H_{juhtivus} + H_{joonläbivus} + H_{ühuleke}$				W/K		182.2		Aknapiinna suhe kütavasse pinda		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta H/A				W/(m²·K)		0.94		33%		
Tehnosüsteemid		Soojusallikad		Maasoojuspump		Õhk-vee soojuspump	Kaugküte	Pelletikatel	Gaas-kondensatsioonikatel	
Projekteeritud õhk-vee või maasoojuspumba nominaalvõimsus, kW		6.0	Energiabilanss	Netovajadus	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	
Arvutuslik välisõhu temp., °C		-21		kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	
Kütteviis	põrandküte		Ruumide küte	75.0	26.0	40.8	98.0	103.8	92.9	
Soojustagasti tüüp	rootorsoojustagasti		Vent. õhu soojendamine	5.0	1.6	2.3	5.5	5.8	5.2	
Soojustagastuse temperatuurisuhtarv, -		0.80	Tarbevee soojendamine	25.0	10.5	14.8	27.8	29.4	26.3	
Vent. lisa soojendamine	veekalorifeer		Ventilaatorid ja pumbad	7.4	7.4	7.4	9.4	9.4	9.4	
Ventilatsioonisüsteemi erivõimsus, kW/(m³/s)		2.0	Valgustus	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, kW		0.0	Seadmed	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
Kollektori aktiivpindala, m²		0.0	Toodetud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Kollektori või paneeli suunatus	lõuna		Taastuvelektri omatarve, %		0	0	0	0	0	
Kollektori või paneeli kaldenurk	15°		Tarbitud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			Eksporditud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			Summa	135.6	68.8	88.6	164.0	171.7	157.1	
			Kaalutud energiasutus		137.6	177.1	183.5	155.7	189.7	
Paneeli paigaldusviis	mööduka tuulutusega		B-klassi ETA piirv	140	ETA (ilma PV)	138	177	183	156	
			A-klassi ETA piirv	120	ETA	138	177	183	156	

Joonis L1.2 VS-2 ETA kalkulatsioon (väikeelamukalkulaatori väljatrükk)

Andmed hoone kohta							Energiaarvutuse teostaja				
Aadress		VS-3			Uue hoone püstitamine			Nimi		allkirjastatud digitaalselt	
Kõetav pind		187.0	m²	Ehitise kasutamise otstarve		11212 - Kahe korteriga elamu		Pädevus			
Netopind		212.3	m²	Peamine soojusallikas ruumide kütteks		Maasoojuspump		Allkiri			
Piirdetarind		U_i W/(m²·K)	A_i m²	$H_{juhtivus}$ W/K	Joon-soojusläbivus	Ψ_k W/(m·K)	l_k m	$H_{joonläbivus}$ W/K	Infiltratsioon	$H_{infiltratsioon}$	
Välissein		0.17	152.0	26.5	Välisseina välisnurk	0.050	18.0	0.9	q_{50} , m³/(h·m²)	4.0	
Katuslagi		0.10	189.2	19.3	Välisseina sisenurk	-0.030	6.1	-0.2	Kavandatud mõõtmine		
Põrand pinnasel		0.09	187.4	16.0	Välissein-katuslagi	0.050	64.7	3.2	Koruste arv	1	
Tuletõkkesein		0.16	10.3	1.7	Välissein-põrand	0.350	64.5	22.6	$A_{välispiire}$, m²	602.9	
Välisüks				0.0	Välissein-vahelagi	0.060	6.0	0.4			
				0.0	Välissein-sisesein	0.010	4.0	0.0			
				0.0	Akna seinakinnitus	0.020	131.0	2.6			
				0.0	Ukse seinakinnitus	0.440	5.0	2.2			
				0.0	Rõdu seinakinnitus	0.290	11.6	3.4			
Aken	põhja	0.73	8.0	7.9	Sisesein-katuslagi	0.350	4.0	1.4	q_{inf} , m³/s	0.0191	
Aken	kirdesse			0.0							
Aken	itta	0.95	10.9	9.3							
Aken	kagusse			0.0							
Aken	lõunasse	0.73	8.0	2.0							
Aken	edelasse			0.0							
Aken	läände	0.69	37.2	23.1							
Aken	loodesse			0.0				0.0			
Summa				$H_{juhtivus}$, W/K	105.8	$H_{joonläbivus}$, W/K			36.5	$H_{ühuleke}$, W/K	23.0
$H = H_{juhtivus} + H_{joonläbivus} + H_{ühuleke}$					W/K	165.3			Aknapiinna suhe kütavasse pinda 34%		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta H/A					W/(m²·K)	0.88					
Tehnosüsteemid			Soojusallikad		Maasoojuspump		Õhk-vee soojuspump	Kaugküte	Pelletikatel	Gaas-kondensatsioonikatel	
Projekteeritud õhk-vee või maasoojuspumba nominaalvõimsus, kW			6.0	Energiabilanss	Netovajadus	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	
Arvutuslik välisõhu temp., °C			-21		kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	
Kütteviis			põrandküte	Ruumide küte	71.2	22.8	36.0	93.1	98.6	88.2	
Soojustagasti tüüp			rootorsoojustagasti	Vent. õhu soojendamine	5.0	1.5	2.2	5.5	5.8	5.2	
Soojustagastuse temperatuurisuhtarv, -			0.80	Tarbevee soojendamine	25.0	10.1	14.1	27.8	29.4	26.3	
Vent. lisa soojendamine			veekalorifeer	Ventilaatorid ja pumbad	7.4	7.4	7.4	9.4	9.4	9.4	
Ventilatsioonisüsteemi erivõimsus, kW/(m³/s)			2.0	Valgustus	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, kW			0.0	Seadmed	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
Kollektori aktiivpindala, m²			0.0	Toodetud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Kollektori või paneeli suunatus			lõuna	Taastuvelektri omatarve, %		0	0	0	0	0	
Kollektori või paneeli kaldenurk			15°	Tarbitud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Eksporditud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Summa	131.8	65.0	83.0	159.0	166.4	152.4	
				Kaalutud energiasutus		130.1	165.9	179.0	152.2	185.0	
Paneeli paigaldusviis			mööduka tuulutusega	B-klassi ETA piirv	140	ETA (ilma PV)	130	166	179	152	
				A-klassi ETA piirv	120	ETA	130	166	179	152	
										185	

Joonis L1.3 VS-3 ETA kalkulatsioon (väikeelamukalkulaatori väljatrükk)

Andmed hoone kohta						Energiaarvutuse teostaja														
Aadress		VS-4				Uue hoone püstitamine		Nimi												
Kõetav pind		190.2	m²	Ehitise kasutamise otstarve		11212 - Kahe korteriga elamu		Pädevus												
Netopind		212.3	m²	Peamine soojusallikas ruumide kütteks		Maasoojuspump		Allkiri		allkirjastatud digitaalselt										
Piirdetarind		U_i W/(m²·K)	A_i m²	$H_{juhtivus}$ W/K	Joon- soojusläbivus	Ψ_k W/(m·K)	l_k m	$H_{joonläbivus}$ W/K	Infiltratsioon	$H_{infiltratsioon}$										
Välissein		0.18	152.0	27.7	Välisseina välisnurk	0.060	18.0	1.1	q_{50} , m³/(h·m²)	4.0										
Katuslagi		0.10	189.2	19.3	Välisseina sisenurk	-0.020	6.1	-0.1	Kavandatud mõõtmine											
Põrand pinnasel		0.09	187.4	16.0	Välissein-katuslagi	0.050	64.7	3.2	Koruste arv	1										
Tuletõkkesein		0.16	10.3	1.7	Välissein-põrand	0.390	64.5	25.2	A välispiire, m²	602.9										
Välisüks				0.0	Välissein-vahelagi	0.080	6.0	0.5												
				0.0	Välissein-sisesein	0.010	4.0	0.0												
				0.0	Akna seinakinnitus	0.040	131.0	5.2												
				0.0	Ukse seinakinnitus	0.440	5.0	2.2												
Aken	põhja	0.73	8.0	7.9	Rõdu seinakinnitus	0.310	11.6	3.6												
Aken	kirdesse			0.0																
Aken	itta	0.95	10.9	9.3	Sisesein-katuslagi	0.350	4.0	1.4												
Aken	kagusse			0.0																
Aken	lõunasse	0.73	8.0	2.0	Sisesein-põrand			0.0												
Aken	edelasse			0.0																
Aken	läände	0.69	37.2	23.1				0.0	q_{inf} , m³/s	0.0191										
Aken	loodesse			0.0																
Summa				$H_{juhtivus}$, W/K		107.0	$H_{joonläbivus}$, W/K		42.3	$H_{ühuleke}$, W/K		23.0								
$H = H_{juhtivus} + H_{joonläbivus} + H_{ühuleke}$						W/K		172.3		Aknapiinna suhe kütavas pinda 34%										
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta H/A						W/(m²·K)		0.91												
Tehnosüsteemid			Soojusallikad			Maasoojuspump		Õhk-vee soojuspump	Kaugküte	Pelletikatel	Gaas-kondensatsioonikatel									
Projekteeritud õhk-vee või maasoojuspumba nominaalvõimsus, kW			Energiabilanss			Netovajadus			En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.			En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.			En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.			En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.		
Arvutuslik välisõhu temp., °C						kWh/(m²·a)			kWh/(m²·a)			kWh/(m²·a)			kWh/(m²·a)			kWh/(m²·a)		
Kütteviis			põrandküte			Ruumide küte			72.7	25.2	39.6	95.0	100.6	90.0						
Soojustagasti tüüp			rootorsoojustagasti			Vent. õhu soojendamine			5.0	1.6	2.3	5.5	5.8	5.2						
Soojustagastuse temperatuurisuhtarv, -			0.80			Tarbevee soojendamine			25.0	10.5	14.8	27.8	29.4	26.3						
Vent. lisa soojendamine			veekalorifeer			Ventilaatorid ja pumbad			7.4	7.4	7.4	9.4	9.4	9.4						
Ventilatsioonisüsteemi erivõimsus, kW/(m³/s)			2.0			Valgustus			5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3						
Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, kW			0.0			Seadmed			18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0						
Kollektori aktiivpindala, m²			0.0			Toodetud lokaalne taastuvelekter			0.0			0.0			0.0					
Kollektori või paneeli suunatus			lõuna						0			0			0					
Kollektori või paneeli kaldenurk			15°			Tarbitud lokaalne taastuvelekter			0.0			0.0			0.0					
									Eksporditud lokaalne taastuvelekter			0.0			0.0					
						Summa			133.3	68.0	87.3	160.9	168.5	154.2						
						Kaalutud energiasutus			136.0			174.6			180.7					
Paneeli paigaldusviis			mööduka tuulutusega			B-klassi ETA piirv			140	ETA (ilma PV)	136	175	181	154	187					
						A-klassi ETA piirv			120	ETA	136	175	181	154	187					

Joonis L1.4 VS-4 ETA kalkulatsioon (väikeelamukalkulaatori väljatrükk)

Andmed hoone kohta							Energiaarvutuse teostaja				
Aadress		VS-5		Uue hoone püstitamine			Nimi				
Kõetav pind		185.8	m²	Ehitise kasutamise otstarve			11212 - Kahe korteriga elamu	Pädevus			
Netopind		212.3	m²	Peamine soojusallikas ruumide kütteks			Maasoojuspump	Allkiri	allkirjastatud digitaalselt		
Piirdetarind		U_i W/(m²·K)	A_i m²	$H_{juhtivus}$ W/K	Joon-soojuslääbivus	Ψ_k W/(m·K)	l_k m	$H_{joonlääbivus}$ W/K	Infiltratsioon	$H_{infiltratsioon}$	
Välissein		0.11	152.0	16.9	Välisseina välisnurk	0.050	18.0	0.9	q_{50} , m³/(h·m²)	4.0	
Katuslagi		0.10	189.2	19.3	Välisseina sisenurk	-0.030	6.1	-0.2	Kavandatud mõõtmine		
Põrand pinnasel		0.09	187.4	16.0	Välissein-katuslagi	0.030	64.7	1.9	Koruste arv	1	
Tuletõkkesein		0.16	10.3	1.7	Välissein-põrand	0.330	64.5	21.3	$A_{välispiire}$, m²	602.9	
Välisüks				0.0	Välissein-vahelagi	0.070	6.0	0.4			
				0.0	Välissein-sisesein	0.010	4.0	0.0			
				0.0	Akna seinakinnitus	0.040	131.0	5.2			
				0.0	Ukse seinakinnitus	0.440	5.0	2.2			
Aken	põhja	0.73	8.0	7.9	Rõdu seinakinnitus	0.260	11.6	3.0	q_{inf} , m³/s	0.0191	
Aken	kirdesse			0.0							
Aken	itta	0.95	10.9	9.3	Sisesein-katuslagi	0.350	4.0	1.4			
Aken	kagusse			0.0							
Aken	lõunasse	0.73	8.0	2.0	Sisesein-põrand			0.0			
Aken	edelasse			0.0							
Aken	läände	0.69	37.2	23.1				0.0			
Aken	loodesse			0.0							
Summa				$H_{juhtivus}$, W/K	96.2	$H_{joonlääbivus}$, W/K			36.2	$H_{ühuleke}$, W/K	23.0
$H = H_{juhtivus} + H_{joonlääbivus} + H_{ühuleke}$					W/K	155.4			Aknapiinna suhe kütavas pinda		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta H/A					W/(m²·K)	0.84			34%		
Tehnosüsteemid			Soojusallikad			Maasoojuspump	Õhk-vee soojuspump	Kaugküte	Pelletikatel	Gaas-kondensatsioonikatel	
Projekteeritud õhk-vee või maasoojuspumba nominaalvõimsus, kW			Energiabilanss	Netovajadus		En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en.	
											Arvutuslik välisõhu temp., °C
Kütteviis	põrandküte	Ruumide küte	67.9	22.4	35.4	88.7	94.0	84.1			
Soojustagasti tüüp			rootorsoojustagasti	Vent. õhu soojendamine	5.0	1.5	2.3	5.5	5.8	5.2	
Soojustagastuse temperatuurisuhtarv, -			0.80	Tarbevee soojendamine	25.0	10.2	14.4	27.8	29.4	26.3	
Vent. lisa soojendamine			veekalorifeer	Ventilaatorid ja pumbad	7.4	7.4	7.4	9.4	9.4	9.4	
Ventilatsioonisüsteemi erivõimsus, kW/(m³/s)			2.0	Valgustus	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, kW			0.0	Seadmed	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
Kollektori aktiivpindala, m²			0.0	Toodetud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Taastuvelektri omatarve, %		0	0	0	0	0	
Kollektori või paneeli suunatus			lõuna	Tarbitud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Kollektori või paneeli kaldenurk			15°	Eksporditud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Summa		128.5	64.7	82.6	154.7	161.8	148.2
				Kaalutud energiasutus		129.5	165.3	175.1	149.3	180.9	
Paneeli paigaldusviis			mööduka tuulutusega	B-klassi ETA piirv	140	ETA (ilma PV)	129	165	175	149	181
				A-klassi ETA piirv	120	ETA	129	165	175	149	181

Joonis L1. 5VS-5 ETA kalkulatsioon (väikeelamukalkulaatori väljatrükk)

Andmed hoone kohta							Energiaarvutuse teostaja				
Aadress		VS-6		Uue hoone püstamine			Nimi				
Kõetav pind		182.6	m²	Ehitise kasutamise otstarve		11212 - Kahe korteriga elamu	Pädevus				
Netopind		212.3	m²	Peamine soojusallikas ruumide kütteks		Maasoojuspump	Allkiri	allkirjastatud digitaalselt			
Piirdetarind		U_i W/(m²·K)	A_i m²	$H_{juhtivus}$ W/K	Joon-soojusläbivus	Ψ_k W/(m·K)	l_k m	$H_{joonläbivus}$ W/K	Infiltratsioon	$H_{infiltratsioon}$	
Välissein		0.09	152.0	13.5	Välisseina välisnurk	0.040	18.0	0.7	q_{50} , m³/(h·m²)	4.0	
Katuslagi		0.10	189.2	19.3	Välisseina sisenurk	-0.040	6.1	-0.2	Kavandatud mõõtmine		
Põrand pinnasel		0.09	187.4	16.0	Välissein-katuslagi	0.030	64.7	1.9	Koruste arv	1	
Tuletõkkesein		0.16	10.3	1.7	Välissein-põrand	0.290	64.5	18.7	$A_{välispire}$, m²	602.9	
Välisüks				0.0	Välissein-vahelagi	0.060	6.0	0.4			
				0.0	Välissein-sisesein	0.010	4.0	0.0			
				0.0	Akna seinakinnitus	0.040	131.0	5.2			
				0.0	Ukse seinakinnitus	0.440	5.0	2.2			
Aken	põhja	0.73	8.0	7.9	Rõdu seinakinnitus	0.240	11.6	2.8	q_{inf} , m³/s	0.0191	
Aken	kirdesse			0.0							
Aken	itta	0.95	10.9	9.3	Sisesein-katuslagi	0.350	4.0	1.4			
Aken	kagusse			0.0							
Aken	lõunasse	0.73	8.0	2.0	Sisesein-põrand			0.0			
Aken	edelasse			0.0							
Aken	läände	0.69	37.2	23.1							
Aken	loodesse			0.0							
Summa				$H_{juhtivus}$, W/K	92.8	$H_{joonläbivus}$, W/K			33.1	$H_{ühuleke}$, W/K	23.0
$H = H_{juhtivus} + H_{joonläbivus} + H_{ühuleke}$					W/K	148.9			Aknapiinna suhe kütavas pinda		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta H/A					W/(m²·K)	0.82			35%		
Tehnosüsteemid			Soojusallikad		Maasoojuspump		Õhk-vee soojuspump	Kaugküte	Pelletikatel	Gaas-kondensatsioonikatel	
Projekteeritud õhk-vee või maasoojuspumba nominaalvõimsus, kW			6.0	Energiabilanss	Netovajadus	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	En.kasutus ja lokaalselt toodetud en. kWh/(m²·a)	
Arvutuslik välisõhu temp., °C			-21								
Kütteviis			põrandküte	Ruumide küte	66.3	21.9	34.6	86.7	91.8	82.1	
Soojustagasti tüüp			rootorsoojustagasti	Vent. õhu soojendamine	5.0	1.5	2.3	5.5	5.8	5.2	
Soojustagastuse temperatuurisuhtarv, -			0.80	Tarbevee soojendamine	25.0	10.2	14.4	27.8	29.4	26.3	
Vent. lisa soojendamine			veekalorifeer	Ventilaatorid ja pumbad	7.4	7.4	7.4	9.4	9.4	9.4	
Ventilatsioonisüsteemi erivõimsus, kW/(m³/s)			2.0	Valgustus	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, kW			0.0	Seadmed	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
Kollektori aktiivpindala, m²			0.0	Toodetud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Kollektori või paneeli suunatus			lõuna	Taastuvelektri omatarve, %		0	0	0	0	0	
Kollektori või paneeli kaldenurk			15°	Tarbitud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Eksporditud lokaalne taastuvelekter		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
				Summa	126.9	64.2	81.8	152.6	159.7	146.3	
				Kaalutud energiasutus		128.5	163.7	173.3	147.9	179.0	
Paneeli paigaldusviis			mööduka tuulutusega	B-klassi ETA piirv	140	ETA (ilma PV)	128	164	173	148	179
				A-klassi ETA piirv	120	ETA	128	164	173	148	179

Joonis L1.6 VS-6 ETA kalkulatsioon (väikeelamukalkulaatori väljatrükk)

Lisa 2 Puidu elektrilise takistuse kõverad

Species	Country	Pieces	Resistance curves			Resistance		
			a	b	r ²	10 MOhm	1 000 MOhm	10 000 MOhm
Pine	Finland	240	-0.038	1.052	0.958	19.8	11.8	9.3
	Sweden	240	-0.039	1.062	0.981	19.5	11.8	9.3
	Norway	116	-0.040	1.079	0.964	19.4	11.9	9.5
	Germany	270	-0.036	1.015	0.951	19.8	11.5	8.8
	France	90	-0.045	1.147	0.973	18.8	12.1	10.0
	by Trätec		-0.040	1.055		18.8	11.3	8.9
	Nordic	596	-0.039	1.061	0.967	19.5	11.8	9.3
Spruce	Finland	309	-0.038	1.080	0.980	20.5	12.6	10.0
	Sweden	240	-0.037	1.047	0.985	20.2	12.0	9.4
	Norway	90	-0.038	1.072	0.987	20.3	12.4	9.8
	Denmark	123	-0.035	1.004	0.891	20.1	11.5	8.7
	Germany	90	-0.036	1.043	0.974	20.6	12.2	9.6
	Austria	66	-0.039	1.100	0.977	20.5	12.8	10.3
	by Trätec		-0.039	1.063		19.5	11.8	9.3
Birch	Nordic	639	-0.038	1.067	0.981	20.2	12.2	9.7
	Central Europe	279	-0.034	1.014	0.892	21.0	12.1	9.3
	Finland	176	-0.039	1.035	0.961	18.8	11.1	8.6
	Sweden	120	-0.038	1.029	0.976	19.2	11.2	8.7
	Nordic	296	-0.039	1.032	0.968	18.7	11.0	8.5
	Denmark	60	-0.048	1.085	0.975	16.3	10.1	8.0
	Germany	150	-0.047	1.081	0.978	16.6	10.2	8.1
Oak	France	90	-0.046	1.069	0.979	16.7	10.2	8.0
	Central Europe	300	-0.047	1.079	0.975	16.6	10.1	8.1
	Denmark	60	-0.045	1.116	0.963	18.1	11.4	9.3
	Germany	57	-0.047	1.123	0.965	17.5	11.1	9.0
Beech	Central Europe	117	-0.046	1.119	0.962	17.8	11.2	9.1
	Sweden	120	-0.044	1.131	0.971	18.9	12.0	9.8
Alder	Sweden	120	-0.044	1.131	0.971	18.9	12.0	9.8
Larch	Denmark	63	-0.042	1.112	0.976	19.3	12.1	9.8

Joonis L2.1 Temperatuuriparandi arvutamiseks kasutatud suuruste a ja b väärtused. Käesolevas töös on kasutatud puidu liigina (in. k. *species*) kuuske (in. k. *Pine*) ning asukohaks on valitud põhjamaad (in. k. *Nordic*) [41]