

TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

SEESPOOLT TSELLUVILLAGA SOOJUSTATUD PALKSEINTE NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS

HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF LOG WALLS WITH INTERNAL CELLULOSE FIBRE WOOL INSULATION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Grete Grünberg

Üliõpilaskood: 153847EAEI

Juhendajad: Aime Ruus, dotsent
Kristo Kalbe, ekspert

Tartu, 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201.... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Grete Grünberg (sünnikuupäev: 24.07.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Seestpoolt tselluvillaga soojustatud palkseina niiskustehniline toimivus“, mille juhendajad on Aime Ruus ja Kristo Kalbe,

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

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

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

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

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Grete Grünberg, 153847EAEI

Õppekava, peeriala: Ehitiste projekteerimise ja ehitusjuhtimise eriala projekteerimise ja arhitektuuri peeriala

Juhendaja(d): Aime Ruus (dotsent, 6204805), Kristo Kalbe (ekspert)

Konsultant: -

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Seespoolt tselluvillaga soojustatud palkseinte niiskustehniline toimivus

(inglise keeles) *Hygrothermal performance of log walls with internal cellulose fibre wool insulation*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Teostada õhutemperatuuri ja niiskuse mõõtmine välispiirde eri kihtides ning sisekliima uuring (õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus) uuritava hoone vastavates ruumides
2. Hinnata konstruktsiooni õhupidavust, õhulekkekohti ning külmasildade olemasolu
3. Tarindite niiskustehnilise toimivuse hindamine rakendades dünaamilist niiskuslevi simulatsioonarvutust

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade (seadusandlus, määrustik, standardid), mõõtmiste metoodika, jooniste koostamine	19.04.2020
2.	Sisekliima uuring koos piirete niiskustehniliste parameetritega	31.03.2020
3.	Niiskustehniliste mudelite koostamine	30.04.2020
4.	Töö vormistamine	20.05.2020

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 29.05.2020

Üliõpilane: Grete Grünberg ".....".....201....a
/allkiri/

Juhendaja: Aime Ruus ".....".....201....a
/allkiri/

Kristo Kalbe ".....".....201....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....201....a
/allkiri/

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
1.1 Nõuded sisekliimale, seespoolne soojustamine ja varasemad uuringud, hoone õhupidavus, külmasillad	9
1.1.1 Nõuded sisekliimale.....	9
1.1.2 Seespoolne soojustamine ja varasemad uuringud	11
1.1.3 Hoone õhupidavus	12
1.1.4 Külmasillad	13
1.2 Piirete niiskustehniline toimivus, niiskusturvalisus, difusiooniarvutus, materjalide kriitiline niiskus.....	15
1.2.1 Piirete niiskustehniline toimivus	15
1.2.2 Niiskusturvalisus	17
1.2.3 Niiskuslisa.....	19
1.2.4 Difusiooniarvutus	20
1.2.5 Materjalide kriitiline niiskus	24
1.3 Soojus- ja niiskuslevi modelleerimine	26
1.3.1. Toimivuskriteeriumid	27
2 TÖÖ EESMÄRK JA LAHENDATAVAD ÜLESANDED	30
3 MATERJAL JA METOODIKA	31
3.1 Uuritava hoone ja tarindite tutvustus	31
3.2 Hoone õhupidavuse ja külmasildade uuring.....	34
3.2.1 Termograafia.....	34
3.2.2 Õhuleketest	35
3.3 Tarindisisene temperatuuri ja õhuniiskuse seire.....	38
3.4 Simulatsioonitarkvara <i>Delphin</i> 5.9 tööpõhimõte	44
4 TULEMUSED	47
4.1 Sisekliima ja piirde niiskusrežiim. Niiskuslisa	47
4.1.1 Siseõhu temperatuur ja suhteline niiskus	47
4.1.2 Piirde niiskusrežiim	50
4.1.3 Niiskuslisa.....	53
4.2 Hoone õhupidavus, õhulekked ja külmasillad.....	54
4.2.1 Hoone õhupidavus ja õhulekked.....	54
4.2.2 Külmasillad	55
4.3 Niiskustehnilised mudelid.....	59
4.3.1 Mudelite kalibreerimine.....	59
4.3.2 Hallitustekke kontroll niiskustehniliste mudelitega	64

4.3.3 Kondenseerumise kontroll niiskustehniliste mudelitega	73
5 JÄRELDUSED	75
5.1 Tarindi toimivuse hindamine mõõtetulemuste põhjal	75
5.2 Tarindi toimivuse hindamine õhulekkestesti ja termograafia põhjal	76
5.3 Tarindi toimivuse hindamine niiskustehniliste mudelite põhjal	76
KOKKUVÕTE	79
SUMMARY	81
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	83
LISAD	87
Lisa 1 Hoone rekonstrueerimisprojekt	88
Lisa 2 Rekonstrueerimisaegsed fotod	94

SISSEJUHATUS

Külmas kliimas on turvalisem soojustada hooneid väljastpoolt [1]. Välispoolse soojustuse korral püsib hoone kandekonstruktsioon soojas ja kuivas keskkonnas ning soojustusmaterjaliga on kaetud ka vahelae ja välisseina ühenduskohad ehk külmasildade tekkeks soodsad kohad [2]. Lisaks kehtib välispiirete projekteerimisel rusikareegel, mille kohaselt peavad materjalide aurutakistused seest väljapoole vähenema, et tarindisse pääsenud niiskus saaks sellest vabalt välja liikuda. Seda reeglit on välispidise soojustamise korral lihtne järgida. Kui aga hoonel on korralik rekonstrueeritud fassaad, mida ei taheta soojustamistöde käigus rikkuda, soovitakse materiaalsetel põhjustel hoone fassaaditööd teostada soojustamisest hiljem või soovitakse näiteks palkmaja puhul palkpinda hoone välisküljel eksponeerida, siis jääbki võimalikuks, kuid riskantseks alternatiiviks hoone seespidine soojustamine.

Hoonete niiskus- ja soojustehniline toimivus on kasutajate mugavuse ja hoone eluea seisukohalt oluline näitaja. Üha karmimad nõuded hoonete energiatõhususele ja sisekliimale eeldavad juba projekteerimisfaasis välispiirete toimivusele olulise tähelepanu pööramist. Kuigi rekonstrueeritavatele hoonetele kehtestatud nõuded on leebemad, kui uutele ehitistele kehtestatud nõuded, on siiski ka rekonstrueeritavate hoonete puhul oluline saavutada toimiv lõpptulemus mugava sisekliima tagamiseks ja hallituse tekke vältimiseks ehk vältida ohtu elanike ja kasutajate tervisele.

Piirdetarindite peamine eesmärk on muuta hoonete kasutajad võimalikult sõltumatuks väliskeskkonnas toimuvast. Et hoone oleks energiatõhus ja soojus ei liiguks läbi välispiirde välja, peab välispiire olema soojapidav, õhuleketeta ja külmasildadeta ehk soojus- ja niiskustehniliselt toimiv. Sellised toimivad välispiirded aitavad kaasa vajaliku energiatõhususe taseme saavutamisele ning hoone mugava sisekliima tagamisele.

Magistritöö eesmärk on hinnata ühe konkreetse seespoolse soojustusega lahendatud palkseina niiskustehnilist toimivust. Uuritavad välisseinad on soojustatud tselluvillaga. Tarindis kasutatud materjalid üksi ei määra välispiirde niiskus- ja soojustehnilist toimivust. Arvestada tuleb ka välispiirete paiknemist ilmakaarte suhtes, nende õhupidavust, ehituskvaliteeti, piiretes olevate avatäidete suuruseid ja omadusi ning hoone kasutusest tingitud eripärasid (hoone kasutusotstarbest tulenevad sisekliimategurid, kasutatavate kütte- ja ventilatsioonisüsteemide tõhusus ja kasutamise tihedus jne).

Välisseinte niiskustehnilise toimivuse hindamiseks valiti hoone termografeerimise ja õhulekketesti abil välja 4 kriitilist mõõtepunkti. Mõõtepunkti asukohta valikul arvestati ka selle paiknemist ilmakaarte suhtes ning ruumi kasutusotstarvet. Igasse mõõtepunkti paigaldati 5 temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurit *Hobo UX 100-023A* ehk kokku 20 andurit. Saadud mõõtetulemuste abil kalibreeriti simulatsioonitarkvaras *DELPHIN 5.8* koostatud õhu, soojuse ja niiskuse levikut arvestavad mudelid. Välispiirde niiskustehnilise toimivuse hindamiseks teostati kalibreeritud mudelitega 5 aasta simulatsiooniarvutused Eesti niiskustehnilise testaasta [3] kliimaandmete alusel.

Hallituse tekke hindamiseks kasutati simulatsioonis 1989-1990. aastal Väike-Maarjas mõõdetud kriitilisi kliimaandmeid. Simulatsioonitulemuste hindamiseks arvutati vastavalt Soome teadlaste välja töötatud meetodile [4, 5, 6, 7] hallitusindeksid. Kondenseerumise tekke hindamiseks kasutati 1995-1996. aastal samuti Väike-Maarjas mõõdetud kriitilisi kliimaandmeid. Kondenseerumist hinnati lisaks simulatsioonidele ka difusiooni- arvutustega.

Simulatsioonide tulemusena oli võimalik hinnata, kas uuritud välispiirded on niiskustehniliselt toimivad ja seega ka tehniliselt aktsepteeritavad. Simulatsioonides kasutatud kliimaandmed on Eestis mõõdetud kriitiliseimad kliimakoormused hallituse või kondenseerumise tekkeks, seega kui piire on selliste kliimaandmetega simuleerides töökindel, toimib see tõenäoliselt ka tavatingimustes. Seda loomulikult juhul, kui ehitustööd on teostatud kvaliteetselt ning hoonet kasutatakse vastavalt ette nähtud otstarbele.

Lisaks hinnati termograafia käigus tuvastatud külmasildade kriitilisust temperatuurindeksite abil ning tarindite niiskustehnilise toimivuse uurimiseks vajalikul määral ka hoone sisekliimat ruumide suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri põhjal.

Magistritöö esimeses osas antakse teoreetiline ülevaade magistritööd puudutavatest olulistest teemadest, teises osas kirjeldatakse töö eesmärki, kolmandas osas selgitatakse töös kasutatud meetodeid ja katsete läbiviimisi, neljas osa sisaldab katse- ja arvutustulemusi ning viiendas peatükis analüüsitakse uuritud ja tehakse vastavad järeldused. Lisades on esitatud hoone rekonstrueerimisprojekti joonised (korruste põhiplaanid, lõige, vaated) ja fotod uuritavast piirdest.

Võtmesõnad: difusiooni- arvutus, hallitusrisi hindamine, niiskuslevi, niiskustehniline toimivus, niiskusturvalisus, soojus- ja niiskustehniline simulatsioon, seespoolne soojustamine, magistritöö.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Nõuded sisekliimale, seespoolne soojustamine ja varasemad uuringud, hoone õhupidavus, külmasillad

1.1.1 Nõuded sisekliimale

Inimesed veedavad keskmiselt 80% ajast siseruumides [8]. Ruumides viibivate inimeste enesetunnet, tervist ja töövõimet mõjutavad oluliselt sisekliima ja sellega kaasnevad probleemid. Sisekliima avaldab ruumis viibivatele esmalt mõju naha, limaskestade ja hingamisteede kaudu, sest need on piiriks inimese ja keskkonna vahel. Kuna iga inimese jaoks on mugavuse tase erinev, tähendab see, et ühesugused tingimused ei pruugi erinevatel inimestel tekitada ühesuguseid reaktsioone. Sisekliima parameetriteks ehk hinnatavateks näitajateks on näiteks õhu temperatuur, suhteline niiskus, liikumiskiirus ja puhtus; müra ja valgustatus. [9, 10]

Lisaks sellele, et sisekliima mõjutab seal viibivate inimeste enesetunnet, tervist ja töövõimet, mõjutab see ka hoonete energiakasutust, sest mugava sisekliima tagamiseks kasutatakse kütet, jahutust, ventilatsiooni ja valgustust. Kui hoone elanikud või kasutajad tunnevad ebamugavust, võivad nad kasutusele võtta erinevaid abinõusid mugavuse suurendamiseks (näiteks elektrilised soojapuhurid), millel võib olla omakorda suur mõju energiakasutusele. [10]

Ruumiõhu sisekliimat mõjutavad keemilised, füüsikalised ja bioloogilised riskitegurid. Keemilisteks riskiteguriteks on näiteks lenduvad orgaanilised ühendid, tolm, tubakasuits ja süsihappegaas (CO₂). Bioloogilisteks riskiteguriteks võivad olla näiteks mikroobid ja viirused, hallitusseened ning taimed ja loomad. Füüsikalisteks riskiteguriteks võivad olla õhu temperatuur, suhteline niiskus ja liikumiskiirus; müra ja valgustatus. Enamike loetletud riskitegurite sisaldust ruumis saab vähendada tõhusa ventilatsiooni, saasteallika kõrvaldamise või modifitseerimise (nt kindel suitsetamisruum või -koht) ja õhupuhastuse abil (nt filtrite kasutamine ventilatsioonisüsteemides). [8] Käesolevas magistritöös on uuritud ruumide suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri, sest need tegurid on tarindite niiskustehnilise toimivuse hindamiseks kõige olulisemad. Seetõttu kirjeldatakse tabelis 1.1 lähemalt just neid tegureid puudutavaid riske ja võimalikke tagajärgi.

Tabel 1.1. Sisekliima riskitegurid ja nende võimalikud tagajärjed [8]

Riskitegur	Võimalik tagajärg
Ebasoodne temperatuur	Pikeneb südame- ja veresoonkonna ning ainevahetushaiguste kulg, väheneb töövõime, kiireneb väsimuse teke töötamisel ja aeglustub taastumine puhkamisel
Mugavustasemest madalam suhteline niiskus (alla 40%)	Naha- ja limaskestade kuivustunne, nina kinnisus, nõrgeneb limaskesta vastupanuvõime mikroobidele
Mugavustasemest kõrgem suhteline niiskus (üle 70%)	Bakterite ja hallitusseente kasv, suureneb teatud materjalidest (nt puitlaastplaadid) eralduvate saasteainete hulk [9]

Eestis on eluruumidele kehtestatud nõuded [11], mille kohaselt peab siseõhu suhteline niiskus olema sellises vahemikus, et see ei kahjustaks inimeste tervist, väldiks veeauru kondenseerumist ja ei tekitaks niiskuskahjustusi. Optimaalseks suhteliseks niiskuseks on määratud 40 – 60%. Ka siseõhu temperatuuri puhul on nõutud optimaalset taset, mis looks inimesele soojatunde ja aitaks kaasa tervisliku sisekliima tekkimisele ning püsimisele. Kaugküttevõrgust või hoone katlamajast köetavas eluruumis ei tohi temperatuur langeda pikemaajalisel ruumis viibimisel alla 18 °C.

Loetletud nõuete täitmisel ja hoone sisekliima hindamisel on abiks standard EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019 „Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast“ [12]. Standard annab sisekeskkonna kvaliteedi hindamiseks vajalike arvutuste tegemiseks lähteandmed vastavalt kategooriatele, mis on seotud asukate võimalike ootustega. Kategooriaid on 4:

- I – asukate ootused on kõrged,
- II – ootused on keskmised,
- III – ootused on tagasihoidlikud,
- IV – ootused on madalad.

Normaaltase on „keskmine“, kõrgem tase võidakse kohandada hoonetele, kus viibivad erivajadustega asukad (lapsed, vanurid, puudega inimesed jne) ehk näiteks haiglatele, koolidele ja raviasutustele. Madalam tase tähendab vähenenud mugavust, kuid ei põhjusta veel riske tervisele. Standard annab soovituslikud ruumide sisetemperatuuride arvutuslikud väärtused (tabel 1.2) nii kütte- kui ka jahutusperioodi kohta. Kütteperioodiks loetakse ajavahemikku, mil välistemperatuur on madalam kui 12 °C ning jahutusperioodiks aega, mil välistemperatuur on kõrgem kui 17 °C. [12]

Tabel 1.2. Soovituslikud sise-operatiivtemperatuuri arvutuslikud väärtused mehaaniliste jahutussüsteemidega eluhoonetele talvel ja suvel [12]

Hoone/ruumi tüüp	Kategooria	Operatiivtemperatuur (°C)	
		Minimaalne kütmisel (talveperiood)	Maksimaalne jahutamisel (suveperiood)
Eluhooned, eluruumid (magamistoad, elutoad jne) Istuv tegevus ~1,2 m	I	21	25,5
	II	20	26
	III	18	27
	IV	-	-
Eluhooned, teised ruumid (köögid, hoidlad jne) Seisev-kõndiv tegevus ~1,5 m	I	18	-
	II	17	-
	III	14	-
	IV	-	-

2016. aastal on Tallinna Tehnikaülikoolis koostatud juhend olemasolevate hoonete sisekliima hindamiseks [10], mis annab väärtused ruumitemperatuurile ja suhtelisele õhuniiskusele vastavalt sisekliimaklassile (tabel 1.3). Tabelis toodud kütteperioodi suhtelise niiskuse väärtus võib külmade talveilmade puhul lühiajaliselt olla madalam kui 20%.

Tabel 1.3. Eluruumide sisekliima klassifitseerimisel kasutatavate ja olemasoleva hoone puhul mõistlikult mõõdetavate parameetrite väärtused viibimistsoonis kolmele sisekliimaklassile [10]

Parameeter	Sisekliima klass		
	I	II	III
Ruumitemperatuur kütteperioodil, °C	21–25	20–25	19–25
Suhteline õhuniiskus kütteperioodil, %	>20	-	-

1.1.2 Seespoolne soojustamine ja varasemad uuringud

Seespoolne soojustamine vajab niiskustehniliseks toimivuse saavutamiseks alati põhjalikku analüüsi. Seespoolse soojustusega palkseinte niiskustehnilist toimivust on uurinud T. Kalamees, E. Arumägi ja Ü. Alev, kelle uuringu [1] põhjal selgus, et kõige suuremat mõju hallituse kasvule avaldas aurutõkkematerjali aurutakistuse muutus. Seega on sobiva aurutõkkematerjali valik seespoolse soojustuse korral üheks olulisemaks tingimuseks. Aurutõkke valikul tuleb lähtuda konkreetse hoone kasutusotstarbest ja sellele vastavast niiskuskooormusest. Kõik aurutõket katkestavad tegevused (läbiviigid jms) on lubamatud ning selle paigaldus peab olema kvaliteetne.

Õige aurutõkkematerjali valik koos madala niiskuskooormusega on kaks põhilist eeldust, mille abil on seespoolse soojustusega palkseinas võimalik hallituse kasvu vältida. [1]

Olulised on ka eeltingimused, mis peavad enne soojustustöödega alustamist olema täidetud. Näiteks peab soojustatav palksein olema kuiv ja ilma mikrobioloogiliste kahjustusteta. Kõige lihtsam variant piisavalt kuiva palgi (algniiskus alla 14%) saavutamiseks on hoonet kütta ja see kasutusele võtta 1 – 2 aastat enne soojustustööde algust. [1, 13]

Seespoolne soojustamine ei ole riskantne ainult palkseinte puhul, vaid vajab uurimist ka teiste konstruktsioonitüüpide korral. Ajalooliste tellisente erinevaid seespoolseid lisasojustuslahendusi on võrrelnud P. Klõšeiko, kelle uuringus [14] hinnati tarindi niiskustehnilist toimivust erinevaid kapillaaraktiivseid soojustusmaterjale kasutades (kaltsiumsilikaat, autoklaavitud poorbetoon, vahtpolüisotsüanuraat ehk PIR ja vahtpolüuretaan). Tulemused kinnitasid samuti niiskuskooormuse õigesti määramise olulisust tarindi niiskustehnilise toimivuse seisukohalt. Eriti hästi väljendus see autoklaavitud poorbetooni tulemustes – madalaima niiskuslisa korral ($\Delta v = 2 \text{ g/m}^3$) probleeme ei esinenud, niiskuslisaga $\Delta v = 4 \text{ g/m}^3$ jäid suhtelise niiskuse tulemused kriitilisele piirile ning kõrgeima niiskuskooormusega elamute korral ($\Delta v = 6 \text{ g/m}^3$) tekkis tõenäoline kondenseerumisoht nii kondenseerumise kui hallituse tekkeks kriitilist testaastat kasutades.

1.1.3 Hoone õhupidavus

Niiskustehnilise toimivuse seisukohalt on üheks suurimaks probleemiks olukord, kui soe ja niiske siseõhk pääseb välispiirdesse, seal jahtub ja tekib oht kondenseerumiseks. Õhulekete kaudu pääsevad temperatuuri- ja õhurõhkude erinevustest põhjustatud kontrollimatud õhuvood kergelt läbi välispiirde liikuma. Õhulekked aga alandavad temperatuuri nii tarindi sees kui ka selle sisepinnal [15]. Temperatuuride langus omakorda suurendab suhtelist niiskust ja seeläbi ka kondenseerumisohtu. Seega lisaks suurtele soojakadudele võib koos õhuvoogudega kaasa liikuv niiskus tekitada tarindis ka suuri niiskustehnilisi probleeme.

Eestis on ruumi siseõhk enamjaolt soojem kui välisõhk ja ruumis tekitatud soe õhk hakkab läbi välispiirete hoonest välja liikuma. Seega suurendavad õhulekked hoone soojakadusid, mistõttu peavad välispiirded olema õhutihedad ka energiakulu

seisukohalt. Suurim osa hoonete soojakadudest on tekitatud just õhuleketest ja soojuslevist läbi akende. [9, 16]

Õhutiheduse saavutamiseks tuleb kasutada tarindis vähese õhuläbilaskvusega materjale. Õhuläbilaskvuse kõrval on oluline ka kasutatava materjali õige paigaldusviis ja liitekohtade tihendamine. Näiteks eriti tihe ehituspaber on õigel paigaldusel õhutihe, väheläbilaskva ehituspaberi õhuläbilaskvus on $0,3 - 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sPa}$, kvaliteetse tellisvoodri õhuläbilaskvus $18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sPa}$. [17]

Hoonete õhupidavust hinnatakse õhulekkearvu q_{E50} ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) abil. Õhulekkearv näitab õhuvooluhulka (m^3/h), mis läbib 1 m^2 suuruse pindalaga piiret, kui kahe pool piiret on õhurõhkude erinevus 50 Pa. Õhulekkearv saadakse jagades õhulekke vooluhulga q_{50} hoone piirdetarindite pindalaga A_E (valem 1.1). Lisaks kasutatakse õhupidavuse iseloomustamiseks ka väärtust n_{50} (h^{-1}), mis näitab õhuvahetuskordsust, kui õhurõhkude erinevus mõlemal pool piiret on 50 Pa (valem 1.2). [18]

$$q_{E50} = \frac{q_{50}}{A_E}, \quad (1.1)$$

kus q_{50} – õhulekke vooluhulk rõhuvahel 50 Pa, m^3/h ,
 A_E – hoone piirdetarindite pindala, m^2 .

$$n_{50} = \frac{q_{50}}{V}, \quad (1.2)$$

kus q_{50} – õhulekke vooluhulk rõhuvahel 50 Pa, m^3/h ,
 V – hoone siseruumala, m^3 .

Välispiirete õhulekkeid ei saa võrdsustada loomuliku ventilatsiooniga, sest piirde ebatihedustest tingitud õhu liikumine ei ole kontrollitav, juhitud ega vajadusel filtreeritav. Seega tuleb õhupidavate piirete korral hoones tagada toimiv ja efektiivne ventilatsioonisüsteem, sest energiasääst ei tohi tulla halvenenud sisekliima arvelt. [19]

1.1.4 Külmasillad

Külmasillaks nimetatakse välispiirde osa, mille soojuslähivus on muust tarindist märgatavalt suurem. Selliseks osaks võivad olla näiteks sõrestikupostid soojustuse vahel. Eristatakse joon- ja punkt külmasildu. [17] Joonkülmasillad esinevad näiteks

põranda ja välisseina liitekohtades ning välisseinte liitenurkades, punktkülmasillad näiteks kahe välisseina ja katuslae liitepunktis.

Külmasillad suurendavad hallitustekke riski ja hoone soojakadusid. Soojuskadu tarindi liitekohta (nt välissein-välissein, välissein-vahelagi) ja läbiviigu (nt konsoolne rõdu) kaudu võetaksegi energiatõhususarvutustes arvesse joon- ja punktsoojuslähivuse abil ning arvutatakse vastavalt standardis EVS-EN ISO 10211:2017 „Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailed arvutused“ [20] juhiste valemitega 1.3 ja 1.4.

$$\Sigma\Psi = \sum \Psi_j l_j + \sum \chi_p n_p, \quad (1.3)$$

kus $\Sigma\Psi$ – välispiirde summaarne soojuslähivus, W/K,
 Ψ_j – tarindi liitekohta joonsoojuslähivus, W/(m·K),
 l_j – liitekohta pikkus, m,
 χ_p – soojustuse katkestuse või soojustusest läbiviigu punktsoojuslähivus, W/K,
 n_p – samasuguste punktsoojuslähivuste arv välispiirde osas.

$$\Psi_j = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j, \quad (1.4)$$

kus Ψ_j – kaht keskkonda eraldava joonkülmasilla joonsoojuslähivus, W/(m·K),
 L_{2D} – soojuserikadu, mis on määratud kaht vaadeldavat keskkonda eraldava komponendi 2D arvutuse põhjal, W/(m·K),
 U_j – kaht vaadeldavat keskkonda eraldava 1D komponendi soojuslähivus, W/(m²·K),
 l_j – pikkus, mille ulatuses kohaldatakse väärtust U_j , m,
 N_j – 1D komponentide arv, tk.

Külmasildade kriitilisust aitab hinnata sisepinna temperatuurindeks f_{Rsi} (valem 1.5) ehk sisepinna temperatuuri ja välisõhutemperatuuride vahe jagatud pinna operatiivse temperatuuri ja välisõhutemperatuuri vahega. Operatiivse temperatuurina võib lihtsustatult kasutada siseõhutemperatuuri ja analüüsitava pinda ümbritsevate pindade kiirgustemperatuuride aritmeetilist keskmist. [21]

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}, \quad (1.5)$$

kus f_{Rsi} – temperatuurindeks,
 θ_{si} – sisepinna temperatuur, °C,
 θ_e – välisõhu temperatuur, °C,

θ – pinna operatiivne temperatuur, °C.

Standard EVS-EN ISO 13788:2012 „Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus“ [21] määrab temperatuuriindeksite piirsuurused soojusliku kvaliteedi ja külmasilla kriitilisuse hindamiseks (tabel 1.4). Suurema niiskuskooormusega ruumidel, mille niiskusklass on 4 või 5, ei tohi temperatuuriindeks olla alla 0,8. Aknaraamide temperatuuriindeksite piirsuurused on määratud eraldi ja toodud tabelis 1.5.

Tabel 1.4. Temperatuuriindeksite piirsuurused Eestis hoonete projekteerimisel ja soojusliku kvaliteedi hindamisel [21]

Niiskusklass	Temperatuuriindeksi piirsuurus $f_{Rsi,min}$	
	Uued ja rekonstrueeritud hooned	Enne 2000. aastat ehitatud või rekonstrueeritud hooned olemasoleva olukorra hindamiseks
3	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$
≤ 2	$\geq 0,8$	$\geq 0,65$

Tabel 1.5. Temperatuuriindeksite piirsuurused Eestis hoonete projekteerimisel aknaraamidele veeauru kondenseerumise vältimiseks [21]

Niiskusklass	Temperatuuriindeksi piirsuurus $f_{Rsi,min}$
3	$\geq 0,7$
≤ 2	$\geq 0,55$

1.2 Piirete niiskustehniline toimivus, niiskusturvalisus, difusiooniarvutus, materjalide kriitiline niiskus

1.2.1 Piirete niiskustehniline toimivus

Peamisteks niiskuslevi viisideks piiretes on vee valgumine raskusjõu mõjul, vee kapillaarne liikumine, veeauru konvektsioon ja veeauru difusioon. [22] Vee liikumise viisid, nende põhjused ja võimalikud lahendused on toodud tabelis 1.6. Lisaks tabelis 1.6 toodud vee liikumisviisidele võib tarindites toimuda ka vaba vee liikumine, näiteks vihmavee sattumine pragude kaudu konstruktsioonikihtidesse.

Tabel 1.6. Vee liikumisviisid hoone välispiirdes [22]

Vee liikumise viis	Põhjus	Võimalik lahendus
Kapillaarne liikumine	Vesi liigub materjalides seal tekkiva pindpinevuse mõjul ning selle liikumise kiirus, ulatus ja hulk sõltub materjalide poorsusest	Hüdroisolatsioon või vee eemalejuhtimine drenaaztorustiku abil
Veeauru konvektsioon	Õhurõhkude erinevus kahel pool materjali – niiskus liigub koos õhuvoogudega	Õhutõkke kasutamine aurutõkke, soojustuskihi või tuuletõkke õhupidavuse näol
Veeauru difusioon	Veeaurusisalduse erinevus kahel pool materjali – niiskus liigub kõrgemast veeaurusisaldusest madalama poole	Aurutõkke kasutamine

Kapillaartõus põhjustab pinnases sisalduva vee tõttu eelkõige probleeme soklites ja vundamentides. Antud töös on uuritavaks välispiirdeks välissein ja eelkõige uuritakse selle niiskuslikku toimivust, seega on antud töö raames kriitiliseimad niiskuse liikumisviisid difusioon ja konvektsioon.

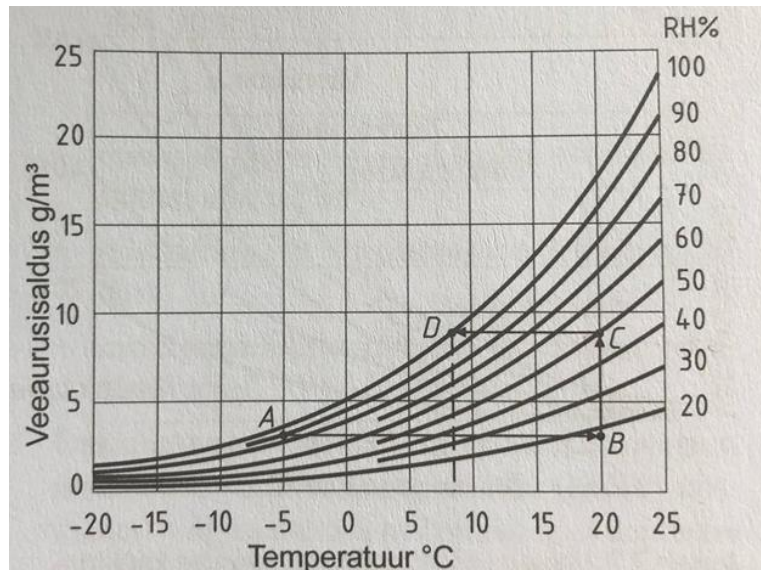
Läbi tarindi liikuv niiskus pole veel probleem, sest ka ehitusmaterjalid ise sisaldavad niiskust. Niiskus tarindi sees hakkab tekitama probleeme siis, kui see sealt välja ei pääse ning tekivad soodsad tingimused kondenseerumiseks ja hallitussente arenguks. Tarindisse pääsenud niiskuse võimalikult tõhusaks väljapääsuks kehtibki eelpool mainitud rusikareegel, mille kohaselt materjalide aurutakistused seest väljapoole peaksid vähenema.

Õhuniiskus on õhus oleva veeauru sisaldus. Veeaurusisaldus kirjeldab ühes kuupmeetrise õhus sisalduva veeauru hulka (g/m^3). Suhteline ehk relatiivne niiskus kirjeldab õhu veeaurusisalduse ja küllastunud õhu veeaurusisalduse suhet protsentides (valem 1.6). [22]

$$\varphi = RH = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100, \quad (1.6)$$

kus v – veeaurusisaldus õhus, Pa,

v_{sat} – küllastunud õhu veeaurusisaldus samal temperatuuril, Pa.



Joonis 1.1. Veeauru hulk õhus sõltuvalt temperatuurist. 20 °C temperatuuri ja 50% suhtelise õhuniiskuse korral on õhu absoluutne niiskus ca 9 g/m³, küllastusniiskus ca 18 g/m³ ning kastepunkt (D) ca 8 °C [17]

Igale temperatuurile vastab maksimaalne võimalik veeaurusisaldus ehk veeauru küllastussisaldus, mil suhteline õhuniiskus $RH = 100\%$ (joonis 1.1). Kuna välispiirete sise- ja välisküljel on erinevad temperatuuri- ja niiskustingimused, siis erinevad ka veeaurusisaldused. Seetõttu hakkavad veeauru osakesed kõrgema veeaurusisaldusega poolelt liikuma madalama veeaurusisaldusega poolele, et saavutada tasakaal. Kui kindlale temperatuurile vastav maksimaalne veeaurusisaldus ületatakse, algab veeauru kondenseerumine. Sellist temperatuuri, kus kondenseerumine algab ja tekib küllastumine, nimetatakse kastepunktiks. [17, 23]

1.2.2 Niiskusturvalisus

Rohkem kui 80% ehitiste kahjustustest on põhjustanud niiskus. Niiskusega seotud probleemid ei teki ainult vanadel, vaid ka uutel hoonetel. Tekkepõhjusteks võivad olla vähene hooldus, uute vähetuntud materjalide kasutamine, vale ehitustehnika või puudulik ventilatsioon. Seega põhjustab liigne niiskus lisaks tervisekahjustustele ja kaasnevatele ebamugavustele ka materiaalselt kahju. [12]

Üheks riskikohaks on vanemate niiskustehniliselt toimivate hoonete ebaõnnestunud renoveerimine. Sealhulgas on üheks sagedamini ettetulevaks probleemseks küsimuseks just seespoolne soojustamine. Soojustamisega saavutatakse küll välispiirde soojapidavus, kuid varem soojusvoogude abil kergemini kuivanud tarind püsib nüüd kauem niiskena ning tekib oht kondenseerumiseks. Sel viisil varem niiskustehniliselt

toiminud välispiire töötab küll soojustehniliselt, kuid niiskusturvalisus enam tagatud ei ole.

Hoone välispiirde niiskuskoormuse allikateks võivad olla vihm, ehitusaegne niiskus, maapinna niiskus, pinnasevesi, õhuniiskus ja selle muutumine, tarbevesi, veeleked ning pindadele kondenseerunud veeaur. [9]

Eesti tingimustes aitab projekteerimisel piirde niiskustehnilist turvalisust saavutada kehtiv standard EVS-EN ISO 13788:2012 [21]. Standard käsitleb kriitilist pinnaniiskust, veeauru difusioonist põhjustatud kondenseerumist piirdetarindi sees ning hinnangut aja kohta, mis kulub märgunud piirdetarindi väljakuivamiseks suure aurutakistusega kihtide vahel. Standardis on toodud lihtsustatud arvutusmeetodid, mille kohaselt eeldatakse, et niiskuslevi toimub ainult veeauru difusiooni teel. Standard ei arvesta teisi niiskusega seotud aspekte, näiteks:

- õhu liikumine piirdetarindis läbi õhkvahede,
- materjalide hügroskoopsus ja materjalide niiskussisaldusest põhjustatud omaduste varieeruvus,
- kapillaarimavust ja vee liikumine materjalis.

Kui sellised niiskusallikad, nagu konvektsioon või vihmavee sissetungimine välispiirdesse on ebaolulised, siis annavad standardijärgsed arvutused turvalise lahendi. Lisaks on tulemused usaldusväärsemad õhulekketa piirdetarindite korral, mis ei sisalda suure veeimavusega materjale. [21]

Tarindi toimivuse tõestamiseks ja niiskusturvalisuse tagamiseks võib lisaks standardis toodud arvutustele kasutada ka täpsemaid meetodeid, üheks võimalikuks meetodiks on projekteeritavast või uuritavast tarindist koostada soojuse, õhu ja niiskuse levi arvestav dünaamiline simulatsioon. [21]

Vastavalt standardile EVS 932:2017 „Ehitusprojekt“ [24] algab niiskustehniliselt toimiva piirde saavutamine projekteerimistöde etapis, jätkub ehitustööde käigus ning sellele tuleb tähelepanu pöörata ka hoone kasutusaja jooksul. Projekteerimistöde faasis tuleb vajalikes kohtades ette näha hüdroisolatsioon või aurutõkked ning tuleb vältida veeauru kondenseerumisvõimalust piirdesse standardite abil tehtud arvutuste või simulatsioonide abil. Ehitustööde käigus tehtav töö tuleb teha kvaliteetselt, vajalikes kohtades liited teipida, vältida välispiirdesse õhulekkekohtade tekkimist, materjalide märgumist ehitusplatsil jne. Pragude teket fassaadis ja seega üht vee ligipääsu konstruktsioonile aitab takistada hoone korrapärane ülevaatus ja hooldus. Kasutuse

käigus tuleb ehitatud piire hoida toimivas seisundis, näiteks vältides aurutõkke vigastamist ja seeläbi selle töövõime vähendamist.

1.2.3 Niiskuslisa

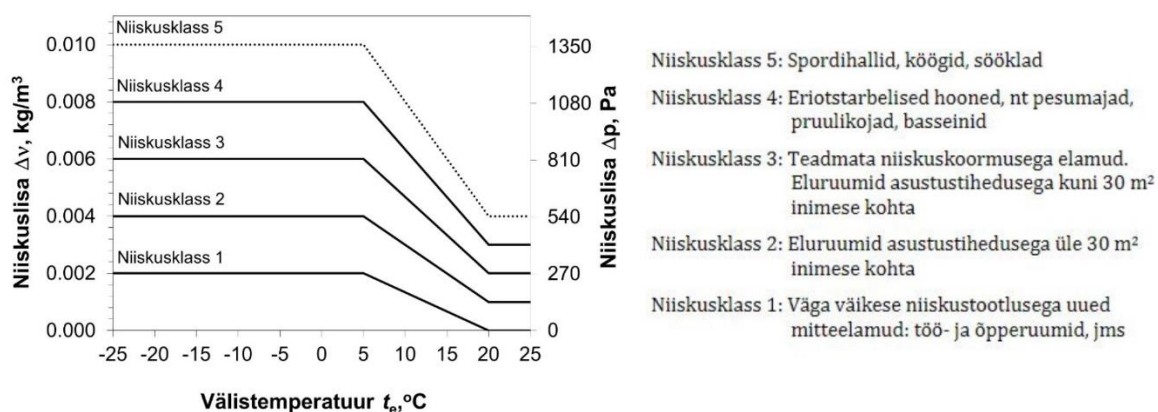
Ruumide siseõhu suhteline niiskus sõltub niiskustootlusest (lillede kastmine, pesemine, pesu kuivatamine toas, inimeste elutegevus jne), ventilatsiooni tõhususest, välisõhu absoluutsest niiskusest ja temperatuurist. Kuna suhteline õhuniiskus on sõltuv temperatuurist, ei ole selle põhjal võimalik määrata ruumide niiskuskooormust. Suure niiskustootluse ja halva ventilatsiooni korral on ruumides suur niiskuskooormus ehk suur niiskuslisa, mis suurendab veeauru difusiooni läbi välispiirde. [21, 22, 26]

Siseõhu niiskuslisa Δv ehk siseõhu ja välisõhu veeaurusalduste erinevus arvutatakse vastavalt standardile EVS-EN ISO 13788:2012 „Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus“ [21] valemiga 1.7.

$$\Delta v = v_i - v_e = \frac{G}{n \cdot V}, \quad (1.7)$$

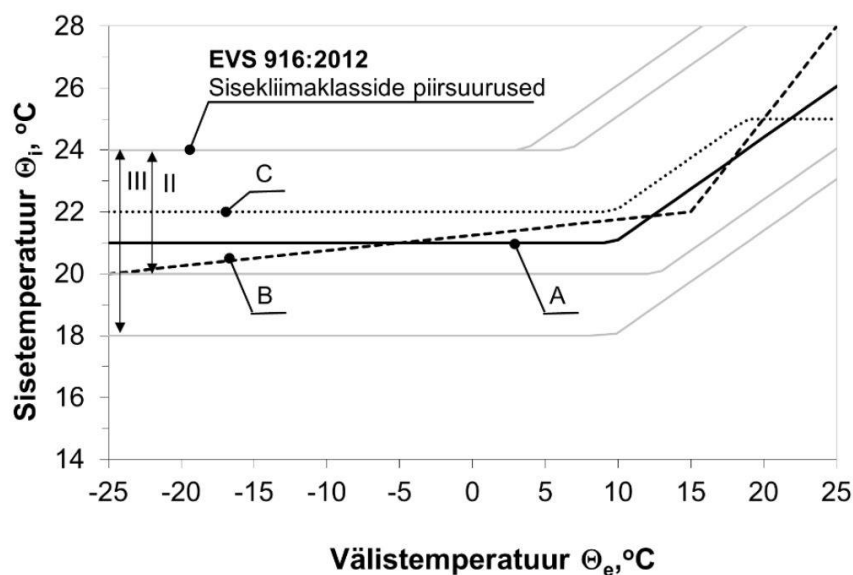
kus Δv – siseõhu niiskuslisa, kg/m^3 ,
 v_i – siseõhu veeaurusaldus, kg/m^3 ,
 v_e – välisõhu veeaurusaldus, kg/m^3 ,
 G – niiskustoodang, g/h ,
 n – ruumi õhuvahetuskordsus, h^{-1} ,
 V – hoone sisemaht, m^3 .

Vastavalt saadud niiskuslisa väärtustele on võimalik määrata uuritava hoone niiskusklass (joonis 1.2) ja seeläbi ka niiskustehnilisteks arvutusteks vajalikud sisekliima andmed (suhteline õhuniiskus ja siseõhu temperatuur). [21]



Joonis 1.2. Arvutusliku niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist Eesti hoonetel [21]

Kui niiskustehnilisteks arvutusteks kasutatavate suhtelise õhuniiskuse väärtused määratakse vastavalt hoone niiskuskoormusele, siis siseõhu temperatuuri valikuks annab standard ette kolm tüüpolukorda (joonis 1.3, tabel 1.7). [21]



Joonis 1.3. Sisetemperatuuri sõltuvus välistemperatuurist Eesti hoonetel [21]

Tabel 1.7. Tüüpolukorrad niiskustehnilisteks arvutusteks kasutatava sisetemperatuuri määramiseks

	Kirjeldus	Algtemperatuur θ_i (°C)
Tüüpolukord A	Välistemperatuuri abil juhitud keskküttesüsteem vanemates (nt enne 2000. a ehitatud elamutes)	21
Tüüpolukord B	Lokaalne küte	20
Tüüpolukord C	Välistemperatuuri abil juhitud elamute keskküttesüsteem uuemates (nt 2000. a või hiljem ehitatud) elamutes + jahutus	22

1.2.4 Difusiooniartvutus

Veeauru kondenseerumine on piirdetarindi soojusliku ja niiskusliku toimivuse jaoks alati negatiivse mõjuga ja seega ei ole selle teke tarindis soovitav. Kõik välispiirded tuleb projekteerida selliselt, et ei tekiks veeauru kondenseerumist, hallituse kasvu ega ka üldiselt kriitilise suhtelise niiskuse ületust. Difusiooniartvutuse eesmärk on hinnata veeauru difusioonist tekkivat kondenseerumiseriski. Seda hinnatakse standardi EVS-EN ISO 13788:2012 „Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus“ põhjal [21], kusjuures käsitletud meetod ei arvesta materjali niiskussisaldusest põhjustatud materjaliomaduste muutusi, kapillaarimavust ja vee liikumist materjalis, õhu liikumist piirdetarindis läbi pilude või õhkvahede ning materjalide hügroskoopsust.

Niiskuslevi veeauru difusiooni teel arvutatakse valemiga 1.8.

$$g = \frac{\delta_0 \Delta p}{\mu d} = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d}, \quad (1.8)$$

kus g – veeauru difusioonivoog, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,
 δ_0 – õhu veeauruerijuhtivus, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,
 μ – veeauru difusioonitakistustegur,
 Δp – siseõhu niiskuslisa ehk siseõhu ja välisõhu veeaurusisalduste erinevus, Pa,
 d – materjalikihi paksus, m,
 s_d – suhteline difusioonitakistus ehk veeauru difusioonitakistusega ekvivalentne õhukihi paksus, m.

Arvutusteks jaotatakse piirdetarind mitmeks homogeenseks kihiks ja määratletakse iga kihi materjali omadused. Mitmekihilise tarindi igat kihti tuleb käsitleda eraldiseisva kihina arvestades nende soojusjuhtivust ja veeauru difusiooni. Piirdetarindi iga kihi kohta arvutatakse soojustakistus R (1.9) ja veeaurudifusiooniga ekvivalentne õhukihipaksus s_d (1.10). Kasutada võib nii tootjate poolseid kui standardites toodud väärtusi. [21]

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (1.9)$$

kus R – soojustakistus R , $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$,
 d – materjalikihi paksus, m,
 λ – materjali soojuserijuhtivus, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

$$s_d = \mu \cdot d, \quad (1.10)$$

kus s_d – suhteline difusioonitakistus ehk veeauru difusioonitakistusega ekvivalentne õhukihi paksus, m,
 d – materjalikihi paksus, m.

Difusiooni arvutustes kasutatavad sisepinna soojustakistused on toodud tabelis 1.8. Kui tarind sisaldab tuulutusvahet, siis kõiki neid materjalikihte, mis jäävad tühimiku ja välispinna vahele, ei arvestata ning nii välispinna kui ka tuulutusvahe soojustakistusena kasutatakse $R_{se}=0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, sest kontrollida tuleb kriitiliseimat olukorda. [21]

Tabel 1.8. Sisepinna soojustakistus R_{si} tarindisisesel kondenseerumise hindamisel [21]

Soojusvoo suund	Üles	Horisontaalne	Alla
Soojustakistus R_{si} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)	0,10	0,13	0,17

Arvutused teostatakse kuude kaupa. Alustades ükskõik mis kuust (proovikuu), arvutatakse temperatuur materjalidevahelisel piirpinnal (valem 1.11) ja veeauru küllastusrõhk ehk maksimaalne õhus sisalduva veeauru rõhk antud temperatuuril, mil suhteline niiskus on 100% (valem 1.12). [21]

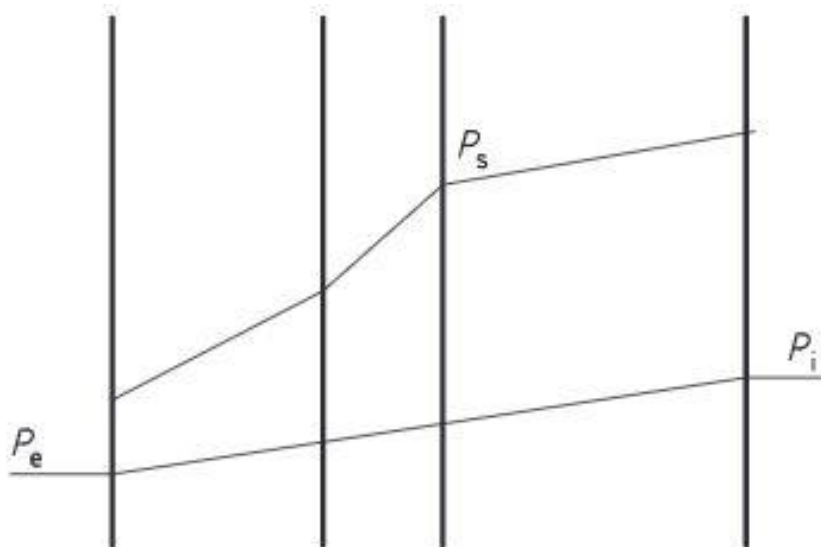
$$\theta'_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T}(\theta_i - \theta_e), \quad (1.11)$$

kus θ'_n – temperatuur materjalide vahelisel piirpinnal, °C,
 θ_e – välistemperatuur, °C,
 θ_i – sisetemperatuur, °C,
 R'_n – summaarne soojustakistus piirpinnal n , m²·K/W,
 R'_T – kogusoojustakistus piirpinnal, m²·K/W.

$$p_{sat} = 610,5e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}}, \text{ kui } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.12)$$

$$p_{sat} = 610,5e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}}, \text{ kui } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kondenseerumisrisiki hindamiseks joonestatakse elemendi ristlõige nii, et iga kihi paksus vastaks selle kihi veeaurudifusiooniga võrdsele õhukihipaksusele s_d . Joonisele märgitakse auru küllastusrõhu punktid, mis igal materjalidevahelisel piirpinnal ühendatakse sirgjoonega. Kui lähtekuust alates kondensaadi akumulierimist ei esine, joonestatakse auruõhud sise- ja välisrõhku (p_i ja p_e , valem 1.13) ühendava sirgjoonena. Kui see joon ei ületa ühelgi piirpinnal küllastusrõhku, siis kondenseerumist ei esine (joonis 1.4). [21]



Joonis 1.4. Veeaurudifusioon mitmekihilises tarindis, kui elemendisest kondenseerumist ei esine [21]

$$p = \varphi \cdot p_{sat}, \quad (1.13)$$

kus p – veeauru aururõhk, Pa,
 φ – suhteline niiskus, %,
 p_{sat} – veeauru küllastusrõhk, Pa.

Välise suhtelise niiskuse ja temperatuuri väärtustena kasutatakse standardi lisas toodud andmeid ning valitakse hoonele kliimaatiliselt lähim linn Tallinna, Kuressaare, Pärnu, Väike-Maarja, Tartu ja Võru seast. Siseõhu suhtelise niiskuse ja temperatuuri võib leida arvutuslikul teel, kuid võib lähtuda ka asjakohastest mõõtetulemustest. [21]

Kui kondenseerumine toimub ehk veeaururõhk mõnel piirpinnal on auru küllastusrõhust suurem, tuleb arvutada kondenseerumiskogus, mis võrdub piirpinnale kondenseerunud niiskuse ja sealt edasikandunud niiskuse hulkade vahega (valem 1.14). Sama võrrandi abil arvutatakse ka aurustumiskogust, kuid kokkuleppeliselt on positiivse avaldise korral tegemist kondenseerumisega ja negatiivse korral aurustumisega. [21]

$$g_c = g_{ev} = \delta_0 + \frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}}, \quad (1.14)$$

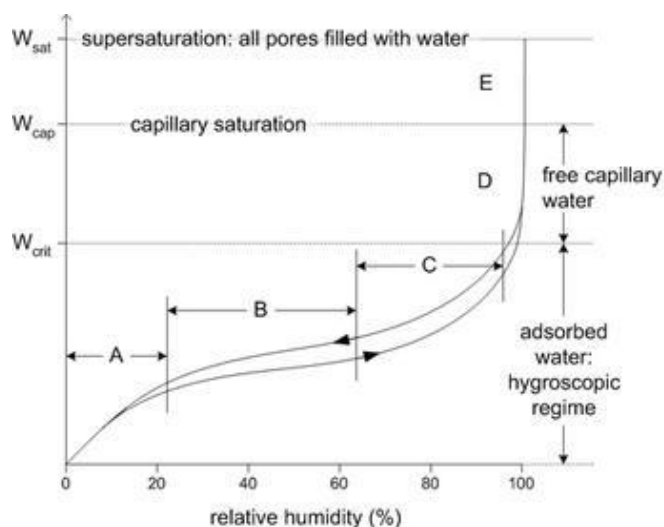
kus g_c või g_{ev} – kondenseerumis- või aurustumiskogus, kg/m²,
 δ_0 – õhu veeaurueri juhtivus, kg/(m·s·Pa),
 p_i – siseõhu veeauruosarõhk, Pa,
 p_c – veeauruosarõhk piirpinnal, millel toimub kondenseerumine, Pa,
 p_e – välisõhu veeauruosarõhk, Pa,
 $s'_{d,c}$ – veeaurudifusiooniga ekvivalentne õhukihipaksus välisõhu ja piirpinna vahel, millel toimub kondenseerumine, m.

Kuupõhiste kondenseerumis- ja aurustumiskoguste arvutamise abil on võimalik arvutada aasta jooksul akumulieruva kondensaadi kogus ning teha kindlaks, kas kondensaat aurustub tarindi piirpinnalt välja või ei. Kui mõnel piirpinnal tekib kondensaat, kuid ei teki üle aasta kestvat akumulatsiooni, sest kondensaat aurustub, siis tuleb esitada piirpinnal tekkiva kondensaadi maksimaalne kogus ja kuu, millal maksimum esines. Seejärel tuleb tootestandardite ja nõuete järgi hinnata, kas arvutatud maksimaalne niiskusesisaldus põhjustab ehitusmaterjalide kahjustumist ja nende toimivuse halvenemist. Kui kondensaat ei aurustu, siis on konstruktsiooni hindamise tulemus negatiivne ja järelikult on tegemist niiskustehniliselt mittetoimiva lahendusega. [21]

1.2.5 Materjalide kriitiline niiskus

Kriitiline niiskus on niiskustase, mida ületades algab niiskuskahjustuste teke. Niiskuskahjustuse tagajärg võib olla näiteks materjalide lagunemine, selle omaduste halvenemine, mikroobide kasv ja/või hallituse teke. Selle taseme ületades algavad korrosiooni-, hallitus- ja mädanemisprotsessid. Hallituse kasv sõltub ka temperatuurist, kuna temperatuuri alanedes on kriitiline suhteline õhuniiskus kõrgem. [26]

Enamik ehitusmaterjalidest on poorsed ning seetõttu otseselt mõjutatud ümbritsevast suhtelisest õhuniiskusest. Poorsete materjalides sisalduva veeauru hulga sõltuvust ümbritsevast suhtelisest õhuniiskusest nimetatakse sorptsiooniks. Vastavalt sellele, kas materjal seob niiskust või vabaneb sellest, nimetatakse nähtust adsorptsiooniks (materjali omadus imada veeauru ehk materjali hügrooskoopsus) või desorptsiooniks (võime niiskusest vabaneda ehk kuivada). Lisaks on poorsetel materjalidel võime imada vett kapillaarjõudude toimele, mida nimetatakse absorptsiooniks. [26]



- A: Single-layer of adsorbed molecules
- B: Multiple layers of adsorbed molecules
- C: Interconnected layers (internal capillary condensation)
- D: Free water in Pores, capillary suction
- E: Supersaturated Regime

Joonis 1.5. Poorsete materjalide niiskuslevi režiimid [27]

Poorsete materjalide niiskuslevi režiimid on kujutatud joonisel 1.5, millelt on näha, et hügrooskoopse ala (joonisel 1.4 tähistatud tähtedega A, B, C) ülempiir on ~98% suhtelise niiskuse juures. Hügrooskoopse režiimi kinnitub veeaur esmalt materjali pooride seintele ning suhtelise niiskuse tõustes lisandub sinna aina uusi veemolekulide kihte. Kuni viie molekuli paksust veekihti pinnal loetakse adsorbeerunud veeks ehk veeks, mis on tahke ja vedela seisundi vahepeal, kusjuures esimesed kihid (joonisel 1.5 tähistatud A ja B)

on pinnaga tugevamalt seotud. Kui suhteline niiskus ületab ~98% piiri, ei suuda materjalide poorides olev vesi enam lisanduvat niiskust endaga siduda ning algab vee kondenseerumine rakkude vaheõõnsustesse, mistõttu võib kondenseerumisarvutustes kriitiliseks olukorraks lugeda $RH \geq 98\%$. [26, 27]

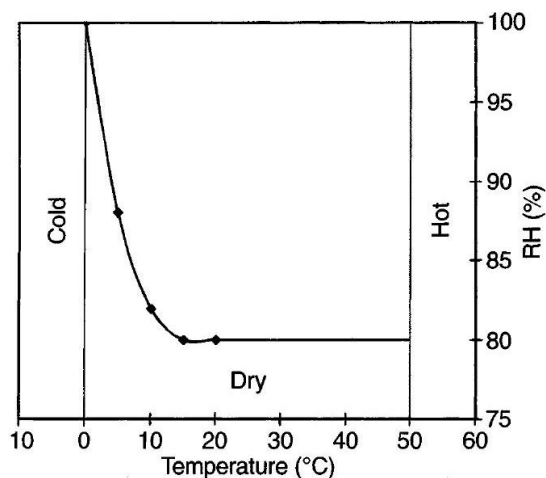
Standardi EVS-EN ISO 13788:2012 „Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus“ [21] kohaselt kasutatakse niiskustehniliselt toimiva piirde projekteerimiseks ja arvutamiseks kriitilist suhtelist õhuniiskust 75% ja sellele vastavat materjali niiskussisaldust massi- või mahuprotsentides (valem 1.15). Sellist piirväärtust kasutatakse juhul, kui puuduvad tootjate andmed. Kuna kriitiline niiskus sõltub materjalist, siis esmajärjekorras tuleks kasutada materjali kriitilise niiskuse määramisel just tootjate andmeid. [21]

$$W = \frac{m_{vesi}}{m_{kuiv}}, \quad (1.15)$$

kus W – materjali niiskussisaldus, %,
 m_{vesi} – materjalis sisalduva vee mass, g või kg,
 m_{kuiv} – kuiva materjali mass, g või kg.

Kriitiline suhteline õhuniiskus hallituse tekkeks puitmaterjalile arvutatakse valemiga 1.16 ja on graafiliselt kujutatud joonisel 1.6. Jooniselt selgub, et hallituse tekkeks soodsad temperatuurid jäävad vahemikku 0–50 °C ning temperatuuri alanedes alla 20 °C hallituse kasvuks vajalik suhteline õhuniiskus aina tõuseb, kuid peatub liiga külmas keskkonnas.

$$RH_{crit} = \begin{cases} 100\% & \text{kui } \theta < 0 \text{ °C} \\ -0,00267\theta^3 + 0,160\theta^2 - 3,13\theta + 100 & \text{kui } 0 \leq \theta \leq 20 \text{ °C} \\ 80\% & \text{kui } \theta > 20 \text{ °C} \end{cases} \quad (1.16)$$



Joonis 1.6. Kriitiline suhteline õhuniiskus hallituse tekkeks puitmaterjalile sõltuvalt temperatuurist [4]

1.3 Soojus- ja niiskuslevi modelleerimine

Soojus- ja niiskuslevi simulatsioonide põhjal on võimalik ennustada erinevate tarindite käitumist ja toimivust erinevates kliimatingimustes erineva perioodi jooksul. Kuna välistingimusi (nt päikesevalguse intensiivsus, sademete hulk, välistemperatuur, väline õhuniiskus jne) reaalsuses muuta ei saa, siis on simulatsioonide abil võimalik tekitada erineva kestusega kriitilisi olukordi, mille abil tarindite toimivust hinnata.

Esimesed simulatsioonitarkvarad soojus- ja niiskuslevi modelleerimiseks arendati juba 1990. aastatel [28]. 2010. aastal läbiviidud uuringu kohaselt oli selleks ajaks välja töötatud 57 erinevat programmi niiskustehniliste mudelite koostamiseks. 57 programmist avalikult kasutatavaid oli vaid 14, ülejäänud olid loodud konkreetse ettevõtte- või organisatsioonisiseseks kasutamiseks. [29] 14 avalikult kasutatava simulatsioonitarkvara kasutusvõimalused on toodud tabelis 1.9. Tabelist selgub, kas tarkvara võimaldab luua ühe-, kahe- või kolmedimensioonilisi mudeleid (1/2/3D) ning kas võimaldatud on soojuse, õhu, niiskuse ja/või saasteainete liikumise simuleerimine:

- lühend *HM* tähendab, et on võimalik simuleerida soojuse (*Heat*) ja niiskuse (*Moisture*) üheaegset transporti,
- lühend *HAM* tähendab, et tarkvaraga on võimalik simuleerida soojuse (*Heat*), õhu (*Air*) ja niiskuse (*Moisture*) üheaegset transporti,
- lühend *HAMPS* tähendab, et tarkvaraga on võimalik simuleerida soojuse (*Heat*), õhu (*Air*), niiskuse (*Moisture*) ja saasteainete (*Pollutant*) üheaegset transporti.

Tabel 1.9. Erinevate simulatsioonitarkvarade põhilised kasutusvõimalused [29]

Tarkvara	Mudeli ja simulatsiooni tüüp
1D-HAM	1D <i>HM</i>
BSim2000	1D <i>HM</i>
DELPHIN 5	1/2D <i>HAMPS</i>
EMPTIED	1D <i>HAM</i>
GLASTA	1D <i>HM</i>
hygIRC-1D	1D <i>HAM</i>
HAMLab	1/2/3D <i>HAM</i>
HAM-Tools	1D <i>HAM</i>
IDA-ICE	1D <i>HAM</i>
MATCH	1D <i>HAM</i>
MOIST	1D <i>HM</i>
MOIST-EXP.	1/2D <i>HAM</i>
UMIDUS	1D <i>HM</i>
WUFI	1/2D <i>HM</i>

Kuna igal programmil on oma tugevused ja nõrkused, tuleb enne tarkvara valikut kindlaks teha, millisele probleemile simulatsiooni abil lahendust või kinnitust otsitakse. Näiteks *EMPTIED* tarkvara ei võimalda arvesse võtta tuule, päikese ja vihma mõju ning *GLASTA* tarkvara võimaldab simuleerida vaid kondenseerumist ja kuivamist [29].

Antud töös on soojus- ja niiskuslevi simuleerimiseks kasutatud tarkvara *Delphin 5.9*, mille tööpõhimõtteid ja täpsemaid omadusi on kirjeldatud peatükis 3.4.

1.3.1. Toimivuskriteeriumid

Kriitilise suhtelise niiskuse (vt peatükk 1.2.5) ületades saab hallituse tekke riski hinnata hallitusindeksi abil, mis kirjeldab hallituse kasvu intensiivsust materjali pinnal (tabel 1.10) [5]. Hallitusrisi hindamise meetodika on 1999. aastal välja töötatud Soome teadlaste A. Hukka ja H.A. Viitaneni poolt [4] ning seda on aastatega aina edasi arendatud [5, 6, 7]. Meetodi esimese versiooni abil hinnati hallituse kasvu puitmaterjalil, kuid nüüdseks on meetodit arendatud nii, et selle abil on võimalik hinnata ka teiste materjalide hallitusrisi.

Tabel 1.10. Hallitusindeksite tasemed ja indeksile vastava hallituse kirjeldus [5]

Indeks	Kirjeldus
0	Hallitus puudub
1	Väheses koguses hallitust pinnal (nähtav mikroskoobiga)
2	<10% pinnast kaetud hallitusega (nähtav mikroskoobiga)
3	10 – 30% pinnast kaetud hallitusega (nähtav)
4	30 – 70% pinnast kaetud hallitusega (nähtav)
5	>70% pinnast kaetud hallitusega (nähtav)
6	Ligi 100% pinnast kaetud hallitusega, väga tihe ja aktiivne hallituse kasv

Vastavalt meetodile kirjeldatakse hallituse kasvu intensiivsust vastavalt suhtelisele niiskusele ja temperatuurile valemiga 1.17. [6]

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln \theta - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} k_1 k_2, \quad (1.17)$$

kus θ – temperatuur, °C,

W – puidu liik (0 = mänd, 1 = kuusk),

SQ – pinnakvaliteet (puidu puhul 0 = saetud pind, 1 = ahjukuiv kvaliteet, muude materjalide korral $SQ = 0$),

k_1, k_2 – hallituse kasvu intensiivsust kirjeldavad parameetrid.

Erinevate materjalide hallituse kasvu intensiivsust kirjeldavate parameetrite k_1 ja k_2 arvutamiseks võetakse referentsmaterjaliks männipuit ning tegurid arvutatakse valemitega 1.18 ja 1.19. [6]

$$k_1 = \begin{cases} \frac{t_{M=1,pine}}{t_{M=1}} & \text{kui } M < 1 \\ 2 \cdot \frac{(t_{M=3,pine} - t_{M=1,pine})}{(t_{M=3}/t_{M=1})} & \text{kui } M \geq 1 \end{cases} \quad (1.18)$$

kus $t_{M=1}$ – aeg nädalates, mis kulub hallitusindeksi jõudmiseks tasemeni 1,
 $t_{M=3}$ – aeg nädalates, mis kulub hallitusindeksi jõudmiseks tasemeni 3.

$$k_2 = \max[1 - \exp[2,3 \cdot (M - M_{max})], 0], \quad (1.19)$$

kus M – hallitusindeks,
 M_{max} – maksimaalne hallituskasvu indeks (valem 1.22).

Aega, mis kulub hallitusindeksite jõudmiseks tasemeni 1 ja 3 arvutatakse valemitega 1.20 ja 1.21. [6]

$$t_{M=1} = \exp(-0,68 \ln \theta - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02) \quad (1.20)$$

$$t_{M=3} = \exp(-0,74 \ln \theta - 12,72 \ln RH + 0,06W + 61,50) \quad (1.21)$$

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2, \quad (1.22)$$

kus A, B, C – koefitsiendid vastavalt materjali klassile (tabel 1.12),
 RH_{crit} – kriitiline suhteline niiskus, %,

 RH – suhteline niiskus, %.

Meetodi kohaselt on materjalid klassidesse jagatud vastavalt nende tundlikkusele (tabel 1.11) ning arvutuste lihtsustamiseks on võimalik kasutada tabelis 1.12 toodud väärtusi.

Tabel 1.11. Materjalide klassifitseerimine vastavalt nende tundlikkusele [6]

Tundlikkuse klass	Materjalid
Väga tundlik	Töötlemata puit
Tundlik	Hööveldatud puit, paberkaetud materjalid, puidupõhised tooted (nt puitkiudplaat)
Keskmiselt vastupidav	Tsemendi- ja plastikupõhised materjalid, mineraalkiud
Vastupidav	Klaas- ja metallmaterjalid, tõhusate kaitsevahenditega töödeldud materjalid

Tabel 1.12. Arvutusteks kasutatavad väärtused vastavalt materjali tundlikkusele [6]

Tundlikkuse klass	k_1		$k_2 (M_{max})$		RH_{min}	
	$M < 1$	$M \geq 1$	A	B	C	%
Väga tundlik	1	2	1	7	2	80
Tundlik	0,578	0,386	0,3	6	1	80
Keskmiselt vastupidav	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Vastupidav	0,033	0,014	0	3	1	85

Hallituse kasv väheneb või peatub, kui tingimused selle kasvuks muutuvad ebasoodsaks (joonis 1.2). Esimesed märgid hallituse hulga vähenemisest ilmnevad juba 6 tunni pikkuse kuiva perioodi järel. Hallitusindeksi arvutustel arvestatakse hallituse taandumist ajavahemiku kaudu, mis on möödunud kuiva perioodi algusest ($t-t_1$, valem 1.23). [7]

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0,032 & \text{kui } t - t_1 \leq 6 \text{ h} \\ 0 & \text{kui } 6 \text{ h} \leq t - t_1 \leq 24 \text{ h} \\ -0,016 & \text{kui } t - t_1 > 24 \text{ h} \end{cases} \quad (1.23)$$

Toimivuskriteeriumi väärtus ehk lubatud hallitusindeks sõltub sellest, kas uuritav pind on otseses kokkupuutes siseõhuga või mitte. Lubatud hallitusindeksi määramiseks on välja töötatud nõ valgusfoori meetod [30], mida on kirjeldatud tabelis 1.13. Roheline näitab, et risk puudub või on väga minimaalne (lubatud), punane viitab suurele hallitusriskile (lubamatu) ning oranž viitab võimalikule ohule ja vajab täpsemat hinnangut sõltuvalt konkreetsest olukorrast.

Tabel 1.13. Lubatud hallitusindeksite väärtused vastavalt uuritava punkti asukohale [30]

Tarindite sisepind (otsene kokkupuude siseõhuga)	Pinnad, millel puudub otsene kontakt siseõhuga	Kontakt inimeste või kasutajatega välistatud
Periood liiga lühike (< 1 aasta) Hinnangu andmine pole võimalik või on tähtsusetu		
$MI < 1$	$MI < 2$	$MI < 3$
$1 \leq MI < 2$	$2 \leq MI < 3$	$MI \geq 3$
$MI \geq 2$	$MI \geq 3$	

2 TÖÖ EESMÄRK JA LAHENDATAVAD ÜLESANDED

Magistritöö eesmärk on hinnata seespoolse soojustusega palkseina niiskustehnilist toimivust ühe konkreetse lahenduse korral, kui soojustusmaterjalina on kasutatud märgpuiste tselluvilla.

Töö eesmärkide saavutamiseks läbi viidud tegevused:

1. Õhuleketest
2. Termopildistamine
3. Tarindiseste temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurite paigaldus
4. Mõõtmisandmete analüüs
5. Pikaajaliste simulatsioonide koostamine ja tulemuste analüüs

Niiskustehnilise toimivuse hindamiseks teostati esmalt õhuleketest ja termopildistamine, et välja selgitada kriitilised kohad külmasildade ja õhulekete asukohtade näol. Tuvastatud kriitilistesse punktidesse paigaldati suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri mõõtvad andurid, mille mõõteperiood kestis talve- ja kevadperioodil kokku 16 nädalat (13.12.2019 – 03.04.2020). Mõõdetud tulemuste põhjal kalibreeriti simulatsioonitarkvaras *Delphin* 5.9 koostatud mudelid, et hinnata välispiirde niiskustehnilist toimivust kõige kriitilisematel kliimatingimustel hallituse ja kondenseerumise tekkeks.

3 MATERJAL JA METOODIKA

3.1 Uuritava hoone ja tarindite tutvustus

Uuritav hoone asub Tartus Tammelinna linnaosas aadressil Kure 3 (79504:025:0012) ning on ehitatud 1980. aastatel. Tegemist on üksikelamuga, millel on kaks selgelt eralduvat mahtu. Esimene maht ehk hoone põhiosa moodustub täiskeldrist, kahest maapealsest korrusest ja pööningust. Teine maht ehk lisamaht on põhiosast madalam, kuid samuti kahe maapealse korruse ja pööninguga hoone osa, millel puudub kelder.



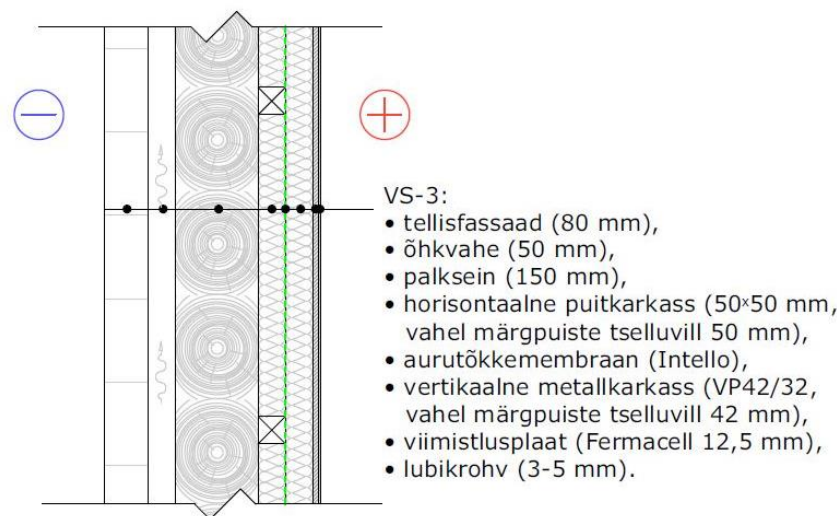
Joonis 3.1. Uuritav hoone

Hoone keldrikorrusel asuvad tehnoruum, abiruumid ja saunakompleks. Hoone põhimahu esimesel korrusel asuvad köök, elutuba, söögituba, esik, trepihall ja koridor, WC ning lisamahu garaaž, panipaik ja esik. Põhiosa teisel korrusel asuvad koridor, kaks magamistuba ja kaminatuba ning duširuum koos tualetiga. Lisamahu teisel korrusel asub magamistuba. Hoone maht on 920 m³, millest maapealse osa maht on 760 m³ ja suletud netopind on 236,6 m², millest köetav pind on 235,1 m².

Välisseinte põhiline kandevkonstruktsioon on 150 mm paksune palk, mille kihid väljast sissepoole on: tellisfassaad, õhkvahe, palksein, horisontaalne puitkarkass (vahel märgpuiste tselluvill), aurutõke, vertikaalne metallkarkass (vahel märgpuiste tselluvill), viimistlusplaat ning seejärel siseviimistlus. Kandva konstruktsiooni poolest erineb vaid garaaži kohal asuva magamistoa välissein, seal on kasutatud puitkarkassil lahendust. Põrand pinnasel on 80 mm paksune raudbetoonplaat, keldri ja esimese korruse vahelagi on teraskanduritel monoliitbetoonlagi ning esimese ja teise korruse vahelagi on puitkanduritel termoliidiga soojustatud lagi. Pööningu vahelagi on puitkonstruktsioonis puistevillaga soojustatud lagi. Täpsemalt on kõiki konstruktsioonitüpe kirjeldatud rekonstrueerimisprojekti joonistel (Lisa 1).

Hoone kütmiseks kasutatakse nii ahi-, põranda- kui ka radiaator-vesikeskkütet. Vesipõrandaküte on kasutusel I ja II korruste WC-des ning keldrikorruse saunaruumides. Lisaks on hoone varustatud soojustagastusega ventilatsiooniseadmega.

Antud magistritöö jaoks on olulisim tarind välissein, mille tähis Weidenberg OÜ koostatud rekonstrueerimisprojekti (Lisa 1) on VS-3, sest kõik hoonesse paigaldatud temperatuuri- ja suhtelise niiskuse mõõdikud paigaldati just seda tüüpi välisseina. Uuritava välispiirde lõige koos materjalide ja nende paksustega on toodud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Uuritava välispiirde vertikaallõige

Uuritava välispiirde soojusläbivuse arvutused on tehtud vastavalt standardis EVS 908-1:2016 „Hoone piirdetarindi soojusläbivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire“ [31] toodud valemitele (valemid 3.1, 3.2, 3.3) ja piirde pindade soojustakistustele (tabel 3.1). Hoone välispiirde soojusläbivus U väljendab soojusvoolu (vattides), mis läbib 1 m² pinnaga tarindit, kui temperatuuride vahe eri keskkondade vahel on 1 K [31]. Mida väiksem see on, seda soojapidavam on piire.

$$U = \frac{1}{R_{tot}}, \quad (3.1)$$

kus U – piirde soojusläbivus, W/(m²·K),
 R_{tot} – piirde kogusoojustakistus, (m²·K)/W.

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (3.2)$$

kus R_{si} – piirde sisepinna soojustakistus, (m²·K)/W,
 R_1, R_2, R_n – iga materjalikihi arvutuslik soojustakistus, (m²·K)/W,
 R_{se} – piirde välispinna soojustakistus, (m²·K)/W.

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (3.3)$$

kus d – materjalikihi paksus, m,

λ – materjali arvutuslik soojuserijuhtivus, W/(m·K).

Tabel 3.1. Piirde pindade soojustakistused piirdetarindi soojusläbivuse arvutamisel [31]

Soojusvoo suund			
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)
R_{si} (m ² ·K)/W	0,10	0,13	0,17
R_{se} (m ² ·K)/W	0,04	0,04	0,04

Uuritaval välispiirdel on hästi ventileeritud fassaaditagune õhkvahe, mistõttu ei arvestatud soojusläbivuse arvutamisel õhkvahet ja õhkvahe ning väliskeskkonna vahel oleva tellisfassaadi soojustakistust. Kuna õhkvahe siiski suurendab vähesel määral piirdetarindi soojustakistust, võrdsustati välispinna soojustakistus R_{se} sisepinna takistusega R_{si} . Arvutustes kasutatud soojuserijuhtivuse λ väärtused on toodud tabelis 3.2. Kasutatud soojuserijuhtivuste väärtused on pärit standardis EVS-EN ISO 10456:2008 „Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid“ [32] ja tootjate kodulehtedelt.

Tabel 3.2. Piirde soojusläbivuse U arvutamiseks kasutatud soojuserijuhtivuse λ väärtused

Materjal	Kihi paksus d (m)	Soojuserijuhtivus λ W/(m·K)
Palksein	0,15	0,13
Tselluvill	0,05	0,04
Aurutõkmemembraan (<i>Intello</i>)	0,00025	0,17 [33]
Tselluvill	0,042	0,04
Viimistlusplaat (<i>Fermacell</i>)	0,0125	0,32 [34]
Lubikrohv	0,004	0,80

Uuritava välisseina soojusläbivus on $U = 0,27$ W/(m²·K). Võrdlusena võib tuua, et uute liginullenergia väikeelamute püstitamisel on välisseinte soovituslik soojusläbivuse väärtus 0,12 – 0,15 W/(m²·K) [18].

3.2 Hoone õhupidavuse ja külmasildade uuring

Nii termograafia kui ka õhulekketest teostati 20.11.2019. Mõõtmised viidi läbi vastavalt standarditele EVS-EN 13187:2001 „*Thermal performance of buildings – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes*“ [35] ja EVS-EN ISO 9972:2015 “Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhulekke määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod” [36].

Mõõtmiste algushetkel oli kohapeal *Hobo* UX100-023A anduriga mõõdetud välistemperatuur $\theta_e = 5,6$ °C, suhteline õhuniiskus väljas $RH_e = 83,6\%$, sisetemperatuur $\theta_i = 23,0$ °C ja suhteline õhuniiskus sees $RH_i = 31,9\%$. Ilm oli pilvine, sademeteta ja tuulevaikne (Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi keskkonnafüüsika labori E-ilmajaama [37] andmetel oli ööpäeva keskmine tuulekiirus 1,8 m/s).

3.2.1 Termograafia

Infrapunatermograafia abil on võimalik määrata temperatuurierinevusi hoone välispiirde pinnal. Selleks kasutatakse infrapunakiirgust mõõtvaid seadmeid, mis mõõdavad erinevatelt pindadelt tulevaid infrapunakiirguseid ja loovad mõõdetud pinnast visuaalse tulemuse ehk termopildi. [35]

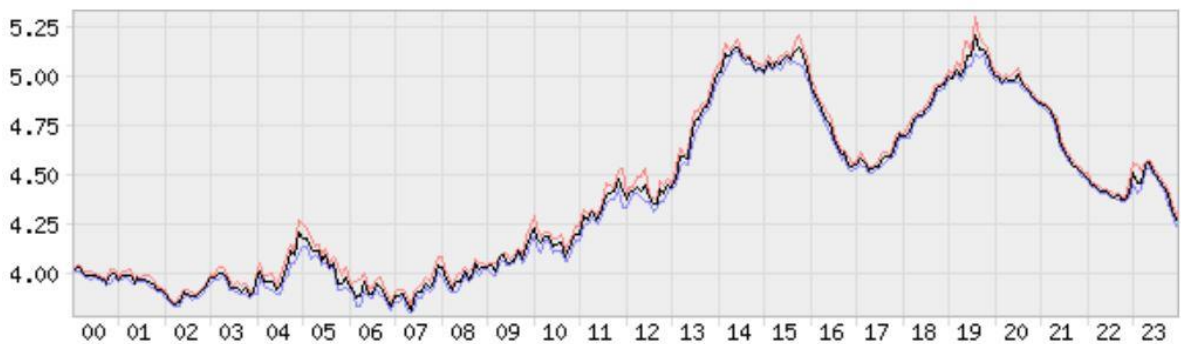
Vastavalt kehtivale standardile [35] järgiti termopildistamise läbiviimisel, et täidetud oleksid järgmised nõuded:

- Vähemalt 24 tundi enne uuringu alustamist ei tohi välistemperatuur varieeruvus olla suurem kui ± 10 °C võrreldes uuringu algusaegse temperatuuriga,
- vähemalt 12 tundi enne uuringu algust ja uuringu ajal ei või uuritavad pinnad olla otsese päikesevalguse käes,
- uuringu ajal ei tohi välisõhu temperatuur muutuda rohkem kui ± 5 °C ja siseõhu temperatuur rohkem kui ± 2 °C võrra.

Võrreldes mõõtmistele eelneva 24 tunniga ei olnud välistemperatuuri kõikumine suurem kui 10 °C (joonised 3.3 ja 3.4).



Joonis 3.3. Mõõdistusele eelnenud päeva (19.11.2019) 24 tunni temperatuurigraafik, mille vertikaalteljel on antud temperatuur (°C) ja horisontaalteljel kellaaeg täistundides [35]



Joonis 3.4. Mõõdistuse päeva (20.11.2019) 24 tunni temperatuurigraafik, mille vertikaalteljel on antud temperatuur (°C) ja horisontaalteljel kellaaeg täistundides [35]

Termografeerimiseks kasutati termokaamerat FLIR E6, mille täpsus mõõtmisel on ± 2 °C [38]. Pildistamine toimus -50 Pa alarõhu tingimustel.

3.2.2 Õhulekketest

Ventilaatoriga survestamise meetod võimaldab määrata olemasolevas hoones või hoone osas renoveerimistöode käigus õhulekke vähendamiseks rakendatud meetmete tulemuslikkust. Selleks kasutatakse seadet, mis võimaldab üle hoone piirdetarindite või selle osa tekitada üle- või alarõhku. Mõõteseade peab võimaldama mõõta õhuvoolu hulka täpsusega $\pm 7\%$ mõõteväärtusest. Hoonepiirete õhulekke mõõtmiseks on kaks võimalust: tekitada ala- või ülarõhk. [36]

Uuritava hoone õhulekke mõõtmise käigus kasutati alarõhumeetodit ehk õhurõhk hoone sees oli väiksem kui väljas. Kuna standardi EVS-EN ISO 9972:2015 "Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhulekke määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod" [36] kohaselt võivad mõõtmised toimuda alles pärast seda, kui katsetatava hoone või selle osa piirdetarindite ehitamine on lõpetatud, arvestati mõõtmisest välja hoone lisamahus asuv garaaž. Ühtlasi ei arvestatud ka keldrikorrust ega pööningut, vaid ainult

valmishetatud elamispinna hoone põhimahu esimesel ja teisel korrusel. Mõõteseade paigaldati uuritava tsooni ukseavale, kuid mitte hoone põhilisele kasutatavale välisuksele. Sel viisil kajastub tulemustes ka hoone peaukse õhutihedus.

Mõõtmiseks kasutati *Minneapolis BlowerDoor Standard 4.1* seadet koos *TEC DG-1000* manomeetriga (joonis 3.5). *BlowerDoor* seadme täpsus kasutades rõngaid A, B või C on $\pm 4\%$, rõngaste D ja E korral $\pm 5\%$ ning manomeetri täpsus on $\pm 0,9\%$. [39]



Joonis 3.5. Õhulekkestesti läbiviimine ventilaatoriga survestamise meetodil

Enne mõõtmise algust arvutati mõõdetava hooneosa siseruumala V , piirdetarindite pindala A_E ja mõõdetava hooneosa netopindala A_F ning sisestati need mõõtmiseks kasutatud arvutiprogrammi.

Kogu katsetatav hoone või hoone osa tuleb ette valmistada nii, et see toimiks survestamisel ühe ühtse tsoonina, kuid kõik katsetatavas hooneosas asuvad ruumide vahelised avad peavad olema avatud [36]. Mõõtmise ettevalmistamiseks kasutatavad võimalikud meetodid on kirjeldatud tabelis 3.3, uuritava hoone puhul kasutati meetodit 2. Tihendati nii loomuliku ventilatsiooni kui ka mehaanilise ventilatsiooni avad ja läbiviigud, trepi liitekohad, kontrolliti, et haisulukkudes oleks vesi jne (joonis 3.6).

Tabel 3.3. Avade seisund mõõtmise ajal [36]

	1. meetod	2. meetod	3. meetod
Hoone avade liigitus	Kasutuses olev hoone	Hoone piirdetarindid	Spetsiaalne eesmärk
Loomuliku ventilatsiooni avad, värskõhuklapid	Suletud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud spetsifikatsiooni järgi
Kogu hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhukonditsioneeride avad	Tihendatud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud spetsifikatsiooni järgi
Ainult perioodiliselt kasutatavad hoone mehaanilise ventilatsiooni või õhukonditsioneeride avad	Suletud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud spetsifikatsiooni järgi
Hoone piirdetarindi aknad, ukсед ja luugid	Suletud	Suletud	Suletud, tihendatud või avatud spetsifikatsiooni järgi
Avad, mis ei ole ette nähtud ventileerimiseks	Suletud	Tihendatud	Suletud, tihendatud või avatud spetsifikatsiooni järgi



Joonis 3.6. Valik kasutatud avade tihendamise meetmetest

Survestav ventilaator koosneb rõngastest, mis on vastavalt rõnga suurusele tähistatud tähega A, B, C, D või E (joonis 3.7). Sobiva alarõhu saamiseks tuleb rõngaid vastavalt vajadusele järjest eemaldada või lisada. Kui valitud rõngas ehk ventilaatori ava suurus on liiga väike, siis ei saavutata soovitud alarõhku. See tähendab, et hoone õhulekked on sellise ava kasutamiseks liiga suured ning mõõtmisi tuleb jätkata suurema avaga eemaldades selleks järgmise rõnga. Antud uuringu puhul kasutati rõngaid A ja B.

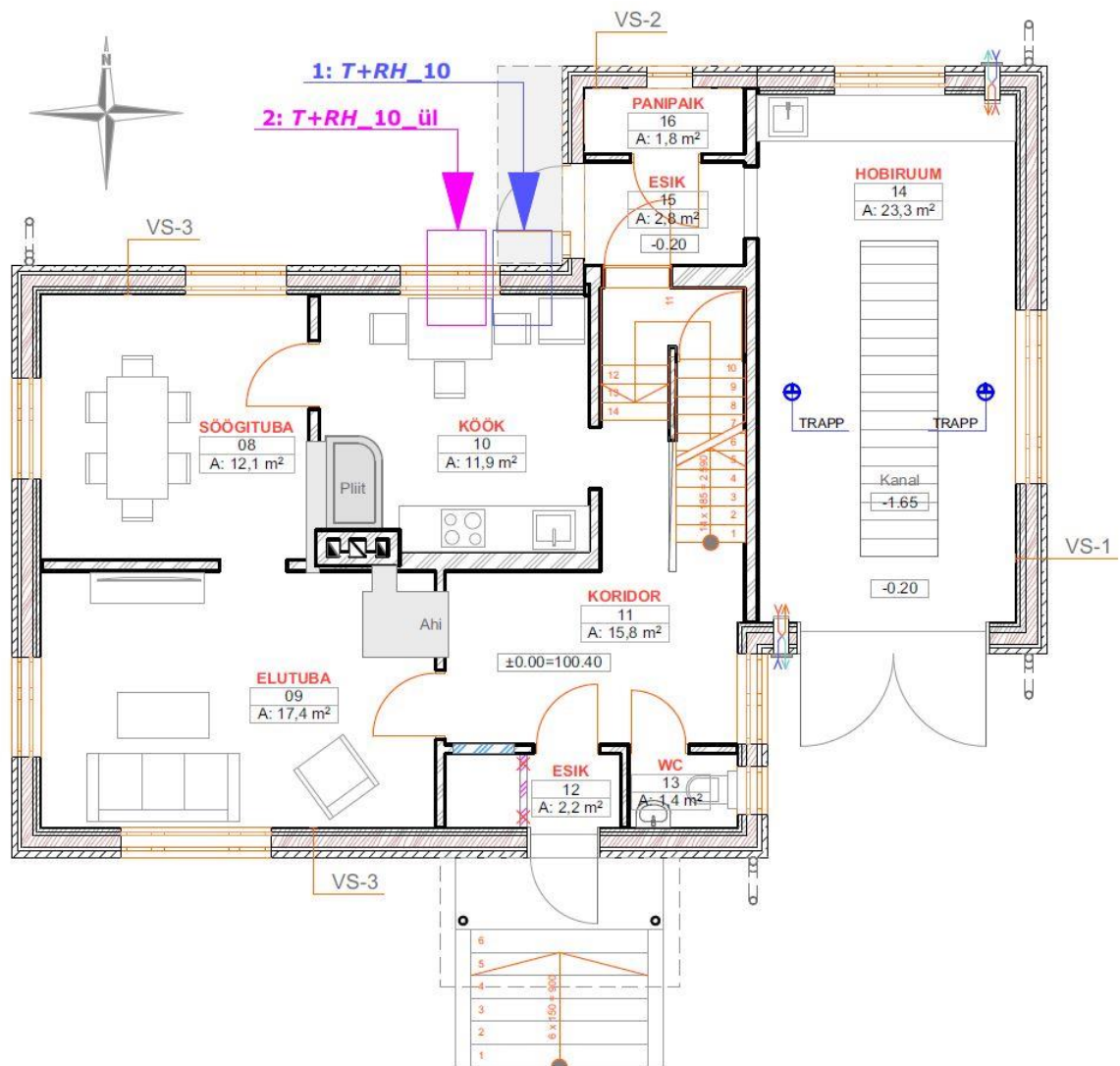


Joonis 3.7. *BlowerDoor* mõtteseadme ventilaator [39]

3.3 Tarindisisene temperatuuri ja õhuniiskuse seire

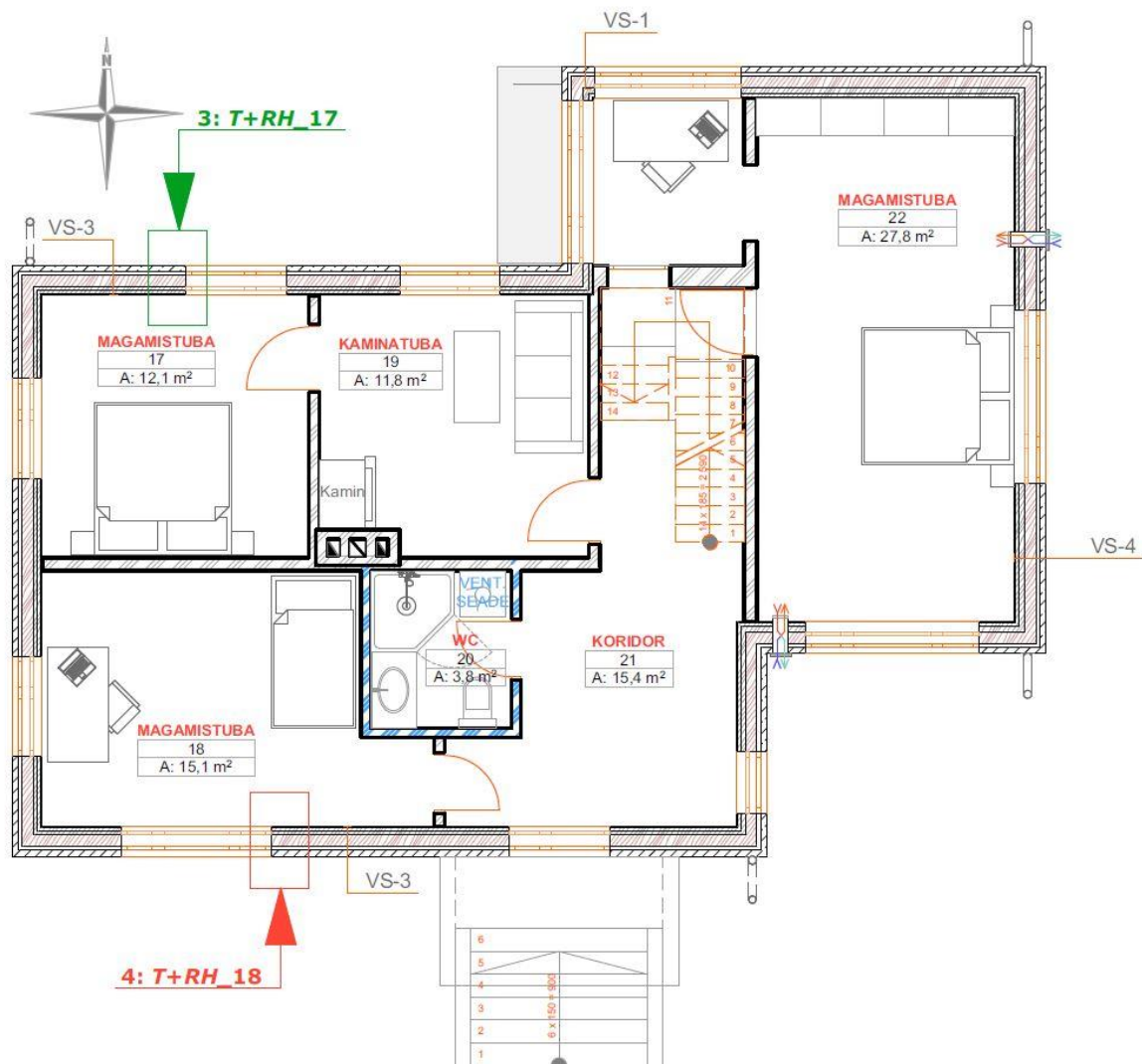
Suhtelise niiskuse ja temperatuuri mõõtmiseks valiti õhulekkestesti ja termopildistamise abil välja 4 kriitilist mõõtepunkti, kuhu paigaldati suhtelist niiskust ja temperatuuri mõõtvad andurid (joonis 3.7 ja 3.8). Mõõtepunktide valikul arvestati lisaks selgunud õhulekete ja külmasildade asukohtadele mõõtepunkti paiknemist ilmakaarte suhtes ning mõõtepunkti asukohta ruumis (näiteks välditi andurite paigaldamist liiga lähedale pliidile, soojust eraldavate elektriseadmete taha jne).

Üheks uuritavaks ruumiks valiti köök (joonis 3.8), sest selles ruumis on suurimad kõikumised nii temperatuuri kui ka õhuniiskuse osas (eelkõige toidu valmistamise ja ahju kütmise tõttu). Lisaks asub köök uuritava hoone põhjaküljel ja saab seega lõunaküljel asuvate ruumidega võrreldes vähem päikesesoojust.



Joonis 3.8. I korrusel asuvate mõõtepunktide asukohad põhiplaani. Alusjoonisena on kasutatud Weidenberg OÜ koostatud rekonstrueerimisprojekti (Lisa 1)

Teise korruse magamistubadesse paigaldatud andurite abil on võimalik analüüsida nii põhja- kui ka lõunaküljel asuvate tarindite toimivust. Seega paigaldati andurid teisel korrusel ühte magamistuppa, mis asub hoone põhjaküljel ja teise magamistuppa, mis asub hoone lõunaküljel (mõõtepunktid nr 3 ja 4, joonis 3.9). Põhjaküljel asuva magamistoa mõõtepunkt nr 3 asub lisaks ka suure riidekapi taga, kus seetõttu on takistatud õhu, soojuse ja niiskuse vaba liikumine, mis suurendab valitud mõõtepunkti kriitilisust.



Joonis 3.9. II korrusel asuvate mõõtepunktide asukohad põhiplaani. Alusjoonisena on kasutatud Weidenberg OÜ koostatud rekonstrueerimisprojekti (Lisa 1)

Igasse mõõtepunkti paigaldati 5 andurit: siseseiina pinnale, aurutõkke ette siseõhu poole, aurutõkke taha välisõhu poole, palgi sisepinnale ning õhkvahesse. Mõõtepunktides 2, 3 ja 4 paigaldati andurid paigaldati aknapale küljelt 60 cm sügavusele ja 1,2 m kõrgusele põrandapinnast. Mõõtepunktis nr 1 paigaldati andurid aknapalest ülasuunas 30 cm sügavusele vahelae ja välisseina liitepunkti, põrandapinnast 2,5 m kõrgusele. Kokku paigaldati 20 andurit (4 mõõtepunkti, igas mõõtepunktis 5 andurit).

Joonisel 3.10 on toodud fotod andurite paigaldamisest. Vasakpoolsel pildil on näha andurite sisestamine aknapale küljelt (avad veel tihendamata), keskmisel pildil juba tihendatud andurite sisestamisavad aknapalest ülasuunas ning parempoolsel pildil on näha andurite paigaldusviisi õhkvahesse. Õhkvahesse paigaldatud andur on igas mõõtepunktis kohakuti sisemiste anduritega ning paigaldatud väljastpoolt läbi tellisfassaadi puuritud ava.



Joonis 3.10 Andurite paigaldus

Andmete analüüsimiseks tähistati andurid ühtse süsteemiga. Tähistuse esimene osa viitab mõõdetavatele väärtustele ehk tähise osa $T+RH$ tähendab, et mõõtepunktis mõõdeti temperatuuri (T) ja suhtelist õhuniiskust (RH). Tähise teine osa viitab ruumile, kus mõõtepunkt asub. Ruumid on nummerdatud vastavalt rekonstrueerimisprojekti (Lisa 1) põhiplaanile – ruum nr 10 on esimesel korrusel asuv köök ning ruumid nr 17 ja 18 on teisel korrusel asuvad magamistoad. Tähise kolmas osa viitab tarindikihile, milles andur asub. Kui tähise viimane number on

- 1, siis asub mõõtev andur palgi sisepinnal,
- 2, siis asub mõõtev andur aurutõkke taga (välisõhu pool) soojustuse sees,
- 3, siis asub mõõtev andur aurutõkke ees (siseõhu pool) soojustuse sees,
- 4, siis asub mõõtev andur õhkvahes.

Siseseina pinnal asunud anduril tarindikihti tähistavat viimast numbrit ei ole, nende andurite puhul lõpeb tähis ruumi numbriga ($T+RH_{10}$, $T+RH_{10}_{ül}$, $T+RH_{17}$ ja $T+RH_{18}$). Näiteks anduri tähis $T+RH_{17}_1$ tähendab, et mõõtepunktis mõõdeti temperatuuri (T) ja suhtelist õhuniiskust (RH), mõõtepunkt asus ruumis nr 17 ning andur paigaldati palgi sisepinnale (1). Tähis $T+RH_{10}_4$ tähendab, et mõõtepunktis mõõdeti temperatuuri (T) ja suhtelist õhuniiskust (RH), see asus uuritava hoone ruumis nr 10 ning andur paigaldati õhkvaheesse (4). Andurite tähistust ja paigaldusasukohta kirjeldab kokkuvõtlikult tabel 3.4.

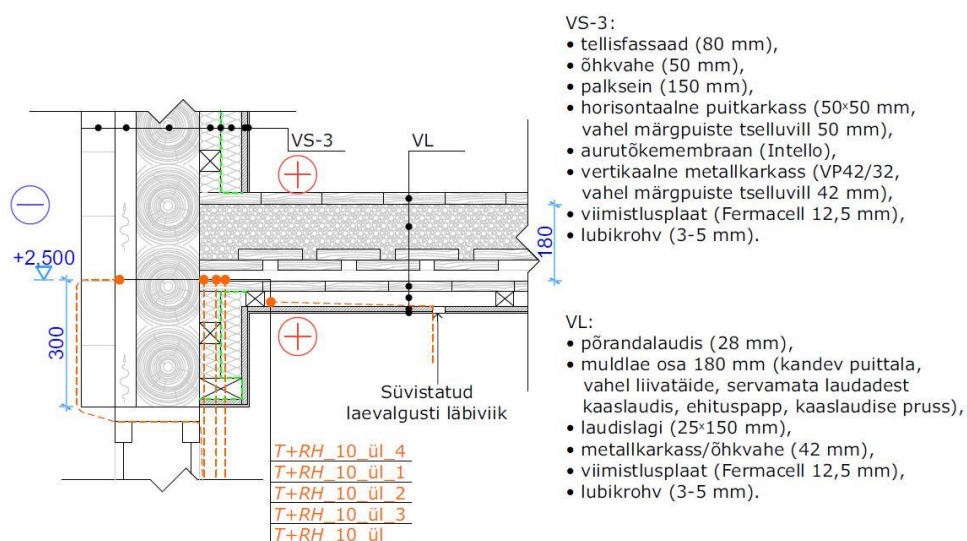
Tabel 3.4. Suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri mõõtva anduri tähis ja asukoha kirjeldus

Jrk nr	Anduri tähis	Tarindi kiht	Mõõtepunkti asukoht
1	$T+RH_{10}$	Siseseina pinnal	Mõõtepunkt nr 1 Köök hoone põhjaküljel (ruum nr 10), andurid paigaldatud aknapale küljelt 60 cm sügavusele ja põrandapinnast 1,2 m kõrgusele
2	$T+RH_{10}_1$	Palgi sisepinnal	
3	$T+RH_{10}_2$	Aurutõkke taga (välisõhu pool), soojustuse sees	
4	$T+RH_{10}_3$	Aurutõkke ees (siseõhu pool), soojustuse sees	
5	$T+RH_{10}_4$	Õhkvahes	

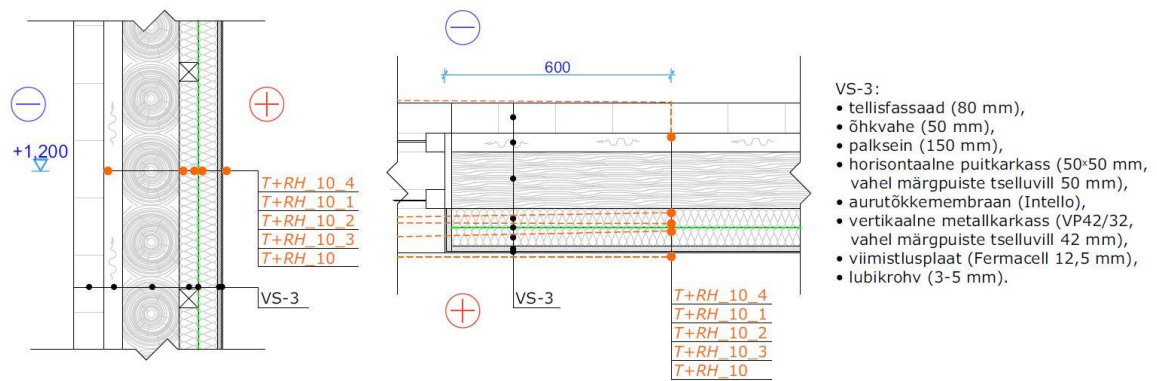
Tabel 3.4. järg

Jrk nr	Anduri tähis	Tarindi kiht	Mõõtepunkti asukoht
6	T+RH_10_ül	Vahelae metallkarkassi õhkvahe	Mõõtepunkt nr 2 Köök hoone põhjaküljel (ruum nr 10), andurid paigaldatud aknapalest üles 30 cm sügavusele ja põrandapinnast 2,5 m kõrgusele
7	T+RH_10_ül_1	Palgi sisepinnal	
8	T+RH_10_ül_2	Vahelae konstruktsioonis	
9	T+RH_10_ül_3	Vahelae konstruktsioonis	
10	T+RH_10_ül_4	Õhkvahe	
11	T+RH_17	Siseseina pinnal	Mõõtepunkt nr 3 Magamistuba hoone põhjaküljel (ruum nr 17), andurid paigaldatud aknapale küljelt 60 cm sügavusele ja põrandapinnast 1,2 m kõrgusele
12	T+RH_17_1	Palgi sisepinnal	
13	T+RH_17_2	Aurutõkke taga (välisõhu pool), soojustuse sees	
14	T+RH_17_3	Aurutõkke ees (siseõhu pool), soojustuse sees	
15	T+RH_17_4	Õhkvahe	
16	T+RH_18	Siseseina pinnal	Mõõtepunkt nr 4 Magamistuba hoone lõunaküljel (ruum nr 18), andurid paigaldatud aknapale küljelt 60 cm sügavusele ja põrandapinnast 1,2 m kõrgusele
17	T+RH_18_1	Palgi sisepinnal	
18	T+RH_18_2	Aurutõkke taga (välisõhu pool), soojustuse sees	
19	T+RH_18_3	Aurutõkke ees (siseõhu pool), soojustuse sees	
20	T+RH_18_4	Õhkvahe	

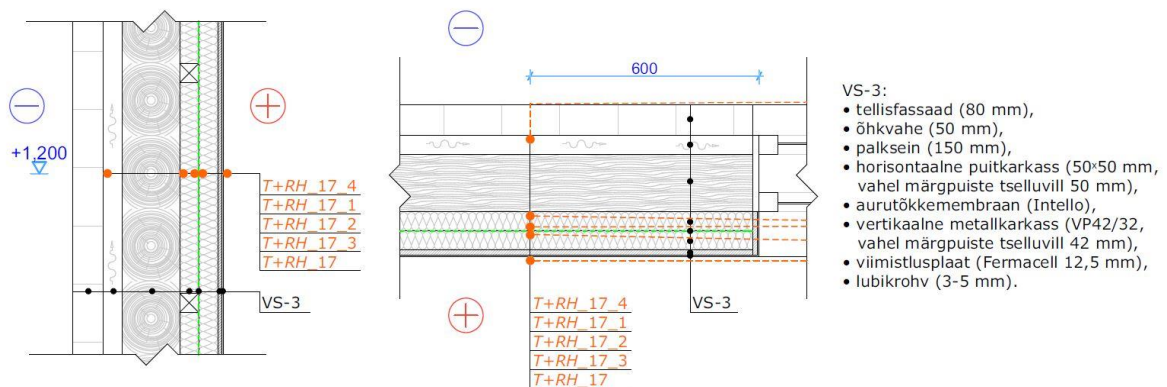
Andurite paigaldust mõõtepunktide kaupa on kujutatud joonistel 3.11 – 3.14. Mõõtepunktis nr 2 asuvad andurid vahelae konstruktsioonis (joonis 3.9), kuid on tähistatud siiski samal põhimõttel teiste mõõtepunktidega. Näiteks kuigi mõõtepunktis nr 2 asuv andur tähistusega T+RH_10_ül_3 ei ole aurutõkke ees, nagu tähise viimane number 3 sellele viitab, vaid vahelae konstruktsioonis, on see siiski nii siseseina- kui välisseina pinnalt mõõdetuna samal kaugusel nagu teiste mõõtepunktide aurutõkketagused andurid.



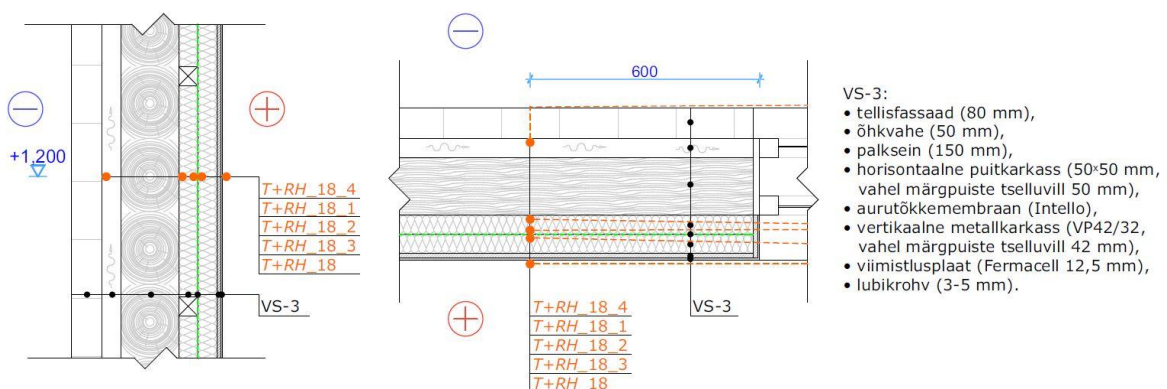
Joonis 3.11. Andurite paigaldusjoonis mõõtepunktis 1 (ruum nr 10, köök). Joonisel kujutatud vahelae muldlae osa paksus ei ole täpselt teada ja on seega hinnanguline



Joonis 3.12. Andurite paigaldusjoonis mõõtepunktis 2 (ruum nr 10, köök). Välispiirde vertikaallõige vasakul, horisontaallõige paremal





Joonis 3.13. Andurite paigaldusjoonis mõõtepunktis 3 (ruum nr 17, põhjapoolne magamistuba). Välispiirde vertikaallõige vasakul, horisontaallõige paremal



Joonis 3.14. Andurite paigaldusjoonis mõõtepunktis 4 (ruum nr 18, lõunapoolne magamistuba). Välispiirde vertikaallõige vasakul, horisontaallõige paremal

Suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmiseks kasutati *Hobo UX100-023A* andureid. Ruumide siseõhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks kasutati *Green Eye* mõõteseadmeid. Kasutatud mõõteseadmete tehnilised andmed on toodud tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Kasutatud mõõteseadmete tehniline spetsifikatsioon [41, 42]

Mõõtesead	
Hobo UX 100-023A	Green Eye CO₂ Meter and Datalogger
	
<p>Joonis 3.15. Mõõtesead <i>Hobo UX 100-023A</i> [40]</p>	<p>Joonis 3.16. <i>Green Eye</i> mõõtesead [41]</p>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>T</i> mõõtevahemik: -20 – 70 °C, • <i>T</i> mõõtetäpsus: ±0,21 °C (kui mõõdetav temperatuur on vahemikus 0 – 50 °C), • <i>RH</i> mõõtevahemik: 1 – 100%, • <i>RH</i> mõõtetäpsus: ±2,5% (kui mõõdetav õhuniiskus on vahemikus 10 – 90%). 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>T</i> mõõtevahemik: -10 – 60 °C • <i>T</i> mõõtetäpsus: ±0,6 °C • <i>RH</i> mõõtevahemik: 0,1 – 99,9% • <i>RH</i> mõõtetäpsus: ±3% (25 °C juures ja kui mõõdetav õhuniiskus on 10 – 90%).

Mõõteperiood kestis 16 nädalat (13.12.2019 – 03.04.2020) ning andurid seadistati mõõteinfot salvestama iga 15 minuti järel.

3.4 Simulatsioonitarkvara *Delphin 5.9* tööpõhimõte

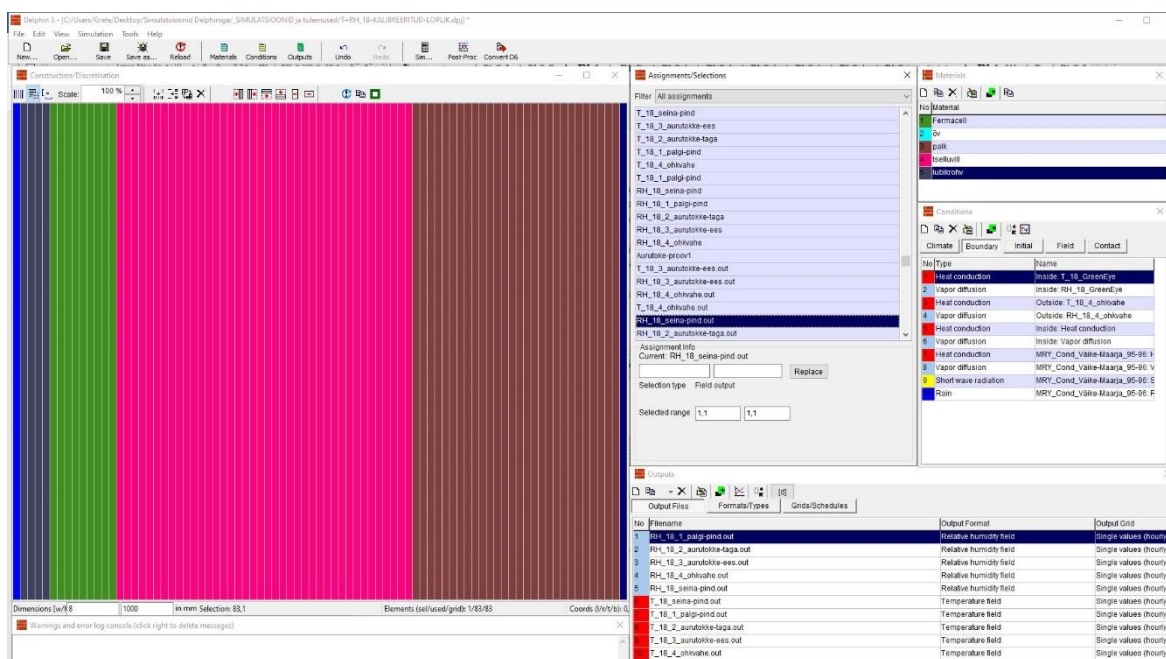
Välispiirde niiskustehnilise toimivuse hindamiseks on vaja uurida piirde vastupidavust kriitilistele kliimatingimustele. Kuna ilmastikuolusid muuta ei ole võimalik, tuleb vastavate programmide abiga koostada võimalikult tõene mudel uuritavast piirdest, mudel kalibreerida ja seejärel koostada simulatsioon, milles on kasutatud kõige kriitilisemaid ilmastikutingimusi näiteks hallituse või kondensaadi tekkeks. Magistritöös kasutati sellise simulatsiooni koostamiseks tarkvara *Delphin 5.9*.

Tarkvara *Delphin* ajalugu ulatub aastasse 1987. Esimesed 1987. aastal loodud katsetused võimaldasid uurida vaid 1D soojuslikku transporti, tänapäevaks on välja töötatud versioon, mille abil on võimalik luua nii 1D kui ka 2D kombineeritud simulatsioone soojuse, niiskuse, õhuvoogude, saasteainete ja soolade liikumisest ehitusmaterjalides ehk *CHAMPS*-simulatsioone (*Combined heat, air, moisture and pollutant simulation*). [42]

Programmi on võimalik kasutada näiteks:

- külmasildade arvutusteks, sealhulgas hinnangu andmiseks niiskustehniliselt probleemsetele piirkondadele,
- seespoolsete soojustussüsteemide projekteerimiseks ja nende toimivuse hindamiseks,
- ventileeritud fassaadisüsteemide ja katuste toimivuse hindamiseks,
- materjalide kuivamisega seotud probleemide lahendamiseks (nt ehitusniiskuse väljakuivamine),
- hallitusrisi arvutamiseks. [43]

Simulatsiooni kasutamine niiskustehnilise toimivuse hindamiseks eeldab, et uuritavast piirdest koostatakse võimalikult tõene mudel (joonis 3.17). Selleks tuleb programmi modelleerida uuritav tarind, määrata igale kihile materjal ja sellele vastavad omadused. Programmi on võimalik kalibreerida ääretingimusi kasutades. Antud töös kasutati kalibreerimiseks siseääretingimustena *Green Eye* seadmetega mõõdetud õhutemperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse väärtusi, välisääretingimustena õhkvahe mõõtnud *Hobo* andurite mõõtetulemusi. Kalibreerimiseks peavad arvutuslikud ehk simuleeritud tulemused ühtima (või jääma mõõtevea piiresse) anduritega mõõdetud tulemustega.



Joonis 2.17 Kuvatõmmis simulatsioonitarkvaraga *Delphin* koostatud mudelist

Simulatsiooni alustamiseks jagatakse uuritav tarind väikesteks osadeks (*discretization*). Mida väiksemateks osadeks mudel jagada, seda täpsem tulemus on võimalik saada, kuid seda rohkem aega simulatsioon võtab.

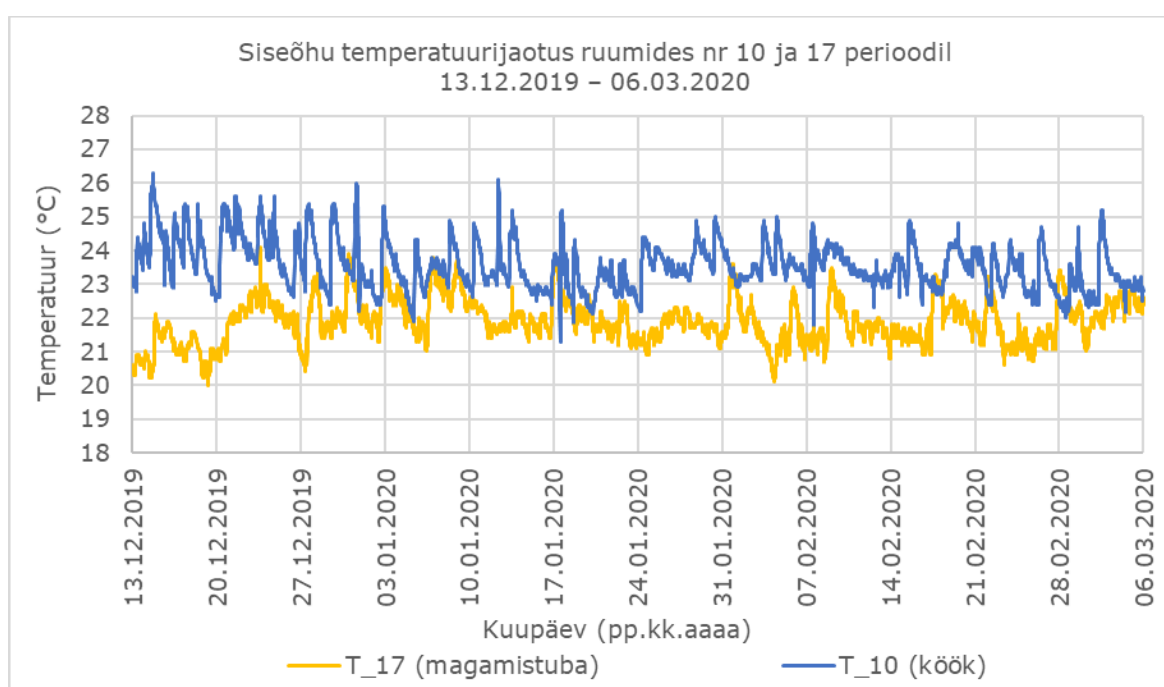
Olemasolevate või rekonstrueeritud hoonete simulatsiooni koostamise muudab keerukaks eelkõige erinevate materjaliomaduste määramine. Kui simuleeritakse testseina või uut tarindit, saab suurema osa materjalide omadustest (poorsus, soojusjuhtivus, niiskussisaldus jne) võtta otse näiteks tootjate kodulehtedelt. Rekonstrueeritud või vanade hoonete puhul aga on keeruline määrata näiteks puitmaterjalide omadusi, sest pole võimalik selle olukorda tarindis näha, mõõta selle niiskussisaldust või muid omadusi, mis omaduste määramist lihtsustaks. Seega võib ette tulla olukordi, mil täpsete mõõtetulemuste saamiseks tuleb teha sadu proovisimulatsioone.

4 TULEMUSED

4.1 Sisekliima ja piirde niiskusrežiim. Niiskuslisa

4.1.1 Siseõhu temperatuur ja suhteline niiskus

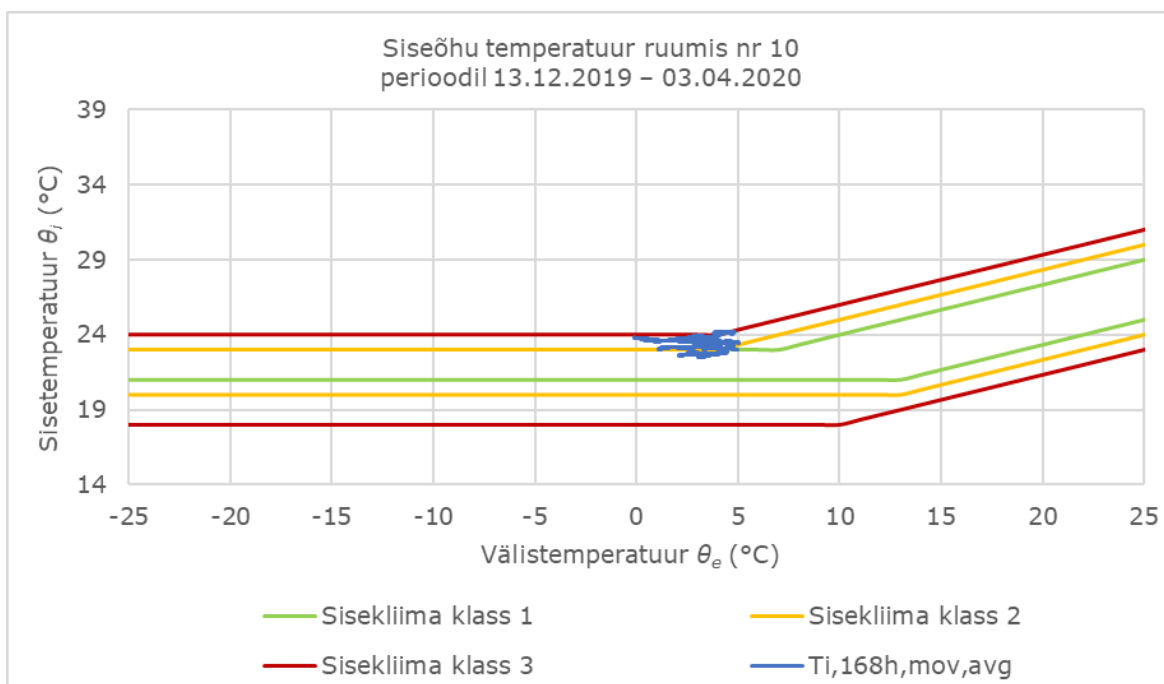
Hoone sisetemperatuuri ja ruumiõhu suhtelise õhuniiskuse taseme hindamiseks kasutati perioodil 13.12.2019 – 06.03.2020 *Green Eye* seadmete mõõtetulemusi. Mõõteseadmed salvestasid tulemusid 15-minutilise intervalliga.



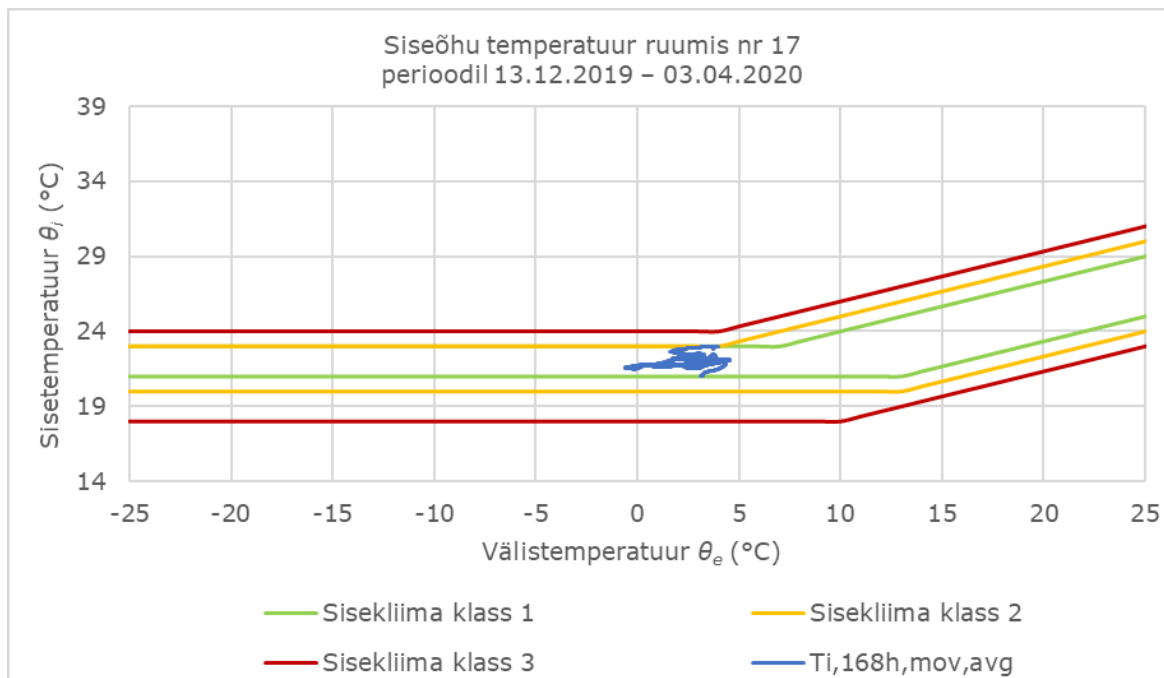
Joonis 4.1. Siseõhu temperatuurijaotus ruumides 10 (köök) ja nr 17 (põhjapoolne magamistuba) perioodil 13.12.2019 – 06.03.2020

Joonisel 4.1 on ühisele graafikule kantud mõlema uuritud ruumi temperatuurijaotus kogu mõõteperioodi jooksul. Mõõteperioodi keskmine temperatuur köögis oli 23,6 °C, magamistoas 21,9 °C. Sisekliima klassi hindamiseks kasutati mõõteperioodil 13.12.2019 – 06.03.2020 ehk 84 päeval kogutud andmeid. *Green Eye* seadmed salvestasid tulemusi iga 15 minuti järel, seega saadi kummastki ruumist 8064 salvestunud väärtust nii suhtelise õhuniiskuse kui ka temperatuuri kohta. Köögi siseõhu temperatuur ei olnud mõõteperioodi jooksul kordagi madalam kui 21 °C, 8064 salvestatud mõõtetulemusest kõrgemad kui 25 °C olid 338 ehk 4,2%. Maksimalne köögis mõõdetud temperatuur oli 26,3 °C. Magamistoa siseõhu temperatuur 25 °C piiri ei ületanud (maksimaalne mõõdetud temperatuur oli 24,1 °C) ning 8064

mõõdetulemusest madalamad kui 21 °C olid 575 ehk 7,1%, kusjuures madalaim mõõdetud temperatuur magamistoas oli 20 °C.



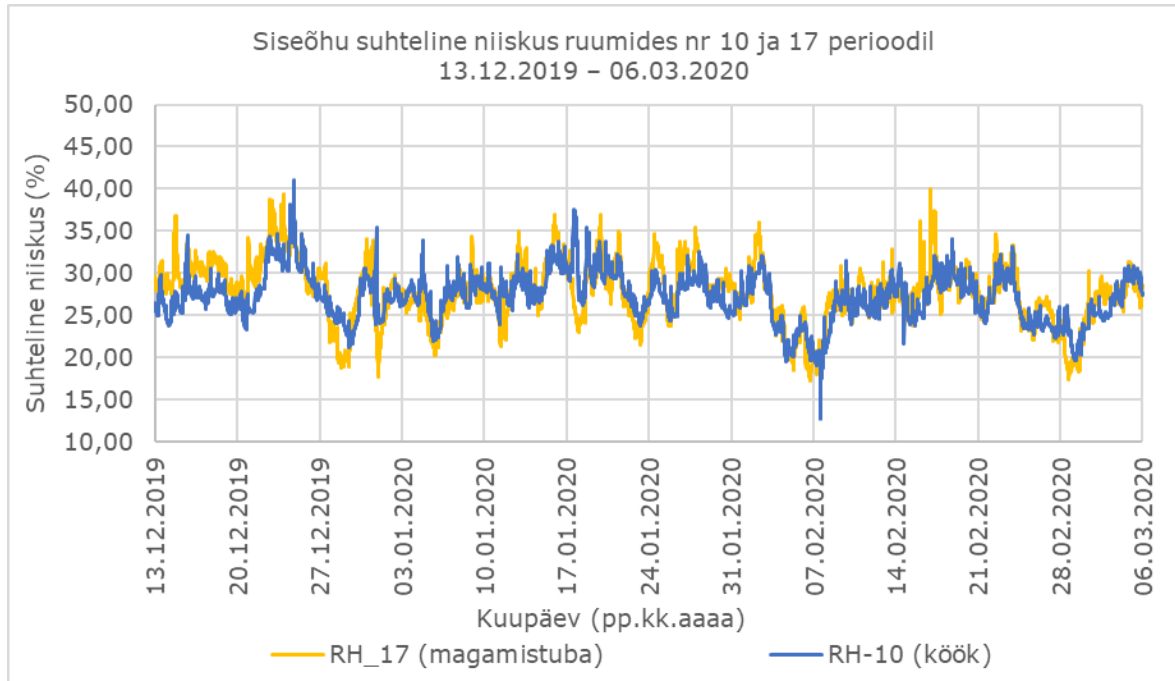
Joonis 4.2. 168 h jooksva keskmise siseõhu temperatuuri sõltuvus välistemperatuurist koos sisekliimaklassidega ruumis nr 10 (köök)



Joonis 4.3. 168 h jooksva keskmise siseõhu temperatuuri sõltuvus välistemperatuurist koos sisekliimaklassidega ruumis nr 17 (põhjapoolne magamistuba)

Joonistel 4.2 ja 4.3 on sisekliimaklasside graafikule kantud 168 h jooksva keskmise temperatuuri väärtused sõltuvalt välistemperatuurist. Magamistoa (ruum nr 17) tulemus jääb 1. sisekliimaklassi piirsesse, kuid köögi (ruum nr 10) puhul on

temperatuurid kõrgemad ja jäävad 3. sisekliimaklassi. Köögi kõrgem temperatuur on tõenäoliselt põhjustatud seal asuvast kasutuselolevast puuküttega pliidist ning temperatuur on kõrgem ka inimtegevuse tõttu (näiteks toidu valmistamine).



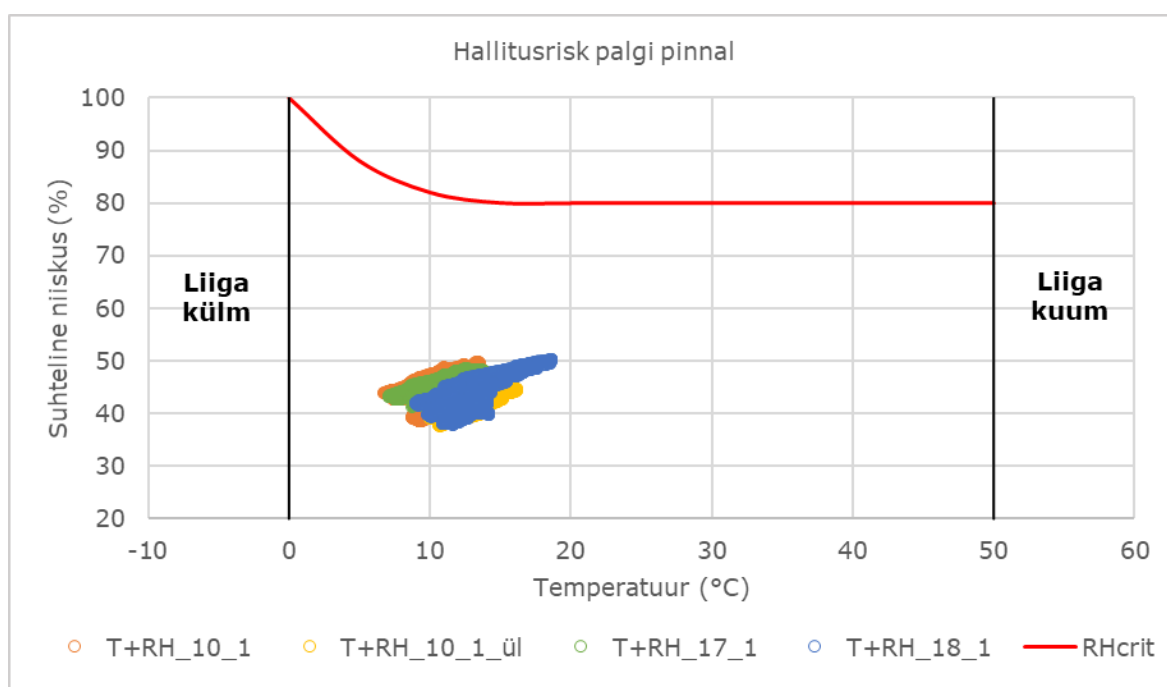
Joonis 4.4. Siseõhu suhteline niiskus ruumides nr 10 (köök) ja 17 (põhjapoolne magamistuba) perioodil 13.12.2019 – 06.03.2020

Joonisel 4.4. on toodud siseõhu suhteline niiskus köögis ja põhjapoolses magamistoas. Kogu mõõteperioodi keskmine suhteline niiskus köögis oli 27% ja magamistoas 28%. Köögis oli 8064 mõõdetud tulemusest vaid 80 ehk 0,99% suhtelise õhuniiskuse tulemust, mis olid madalamad kui 20%. Magamistoas oli suhteline õhuniiskus madalam kui 20% 296 juhul ehk 3,7% kõikidest mõõtetulemustest. Pikim järjestikune ajavahemik (28 h 45 min), mil suhteline niiskus oli madalam kui 20%, mõõdeti magamistoas 28. ja 29. veebruaril. Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi ilmajaama [37] andmetel oli 29. veebruaril tegemist veebruarikuu minimaalseima temperatuuriga ilmaga. Kuigi keskmine ööpäeva temperatuur oli $-2,7\text{ °C}$, ulatus temperatuur 29. veebruari varahommikul $-7,5\text{ °C}$ -ni ning 28. veebruari ööl vastu 29. veebruarit jäi õhutemperatuur $-5,5\text{ °C}$ ja $-7,5\text{ °C}$ vahele. Samal ööl jäi välisõhu suhteline õhuniiskus 85 – 95% vahele (maksimaalne 93%, minimaalne $\sim 86\%$).

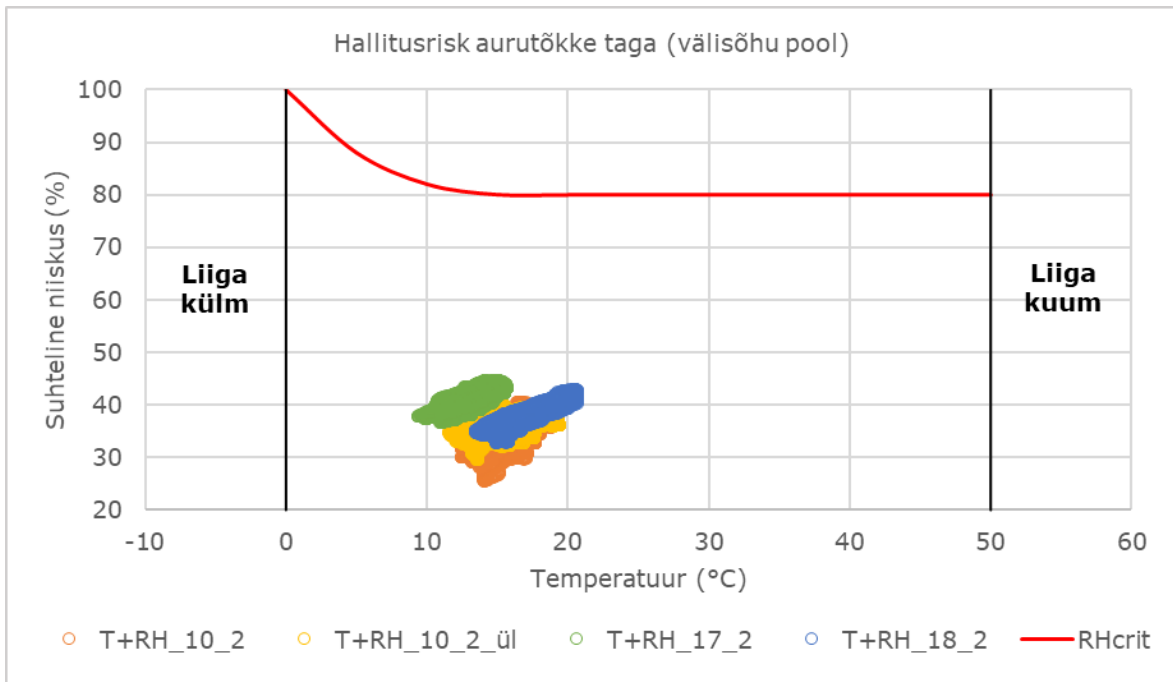
4.1.2 Päärde niiskusrežiim

Päärde niiskusrežiimi hindamiseks kasutati *Hobo UX 100-023A* anduritega perioodil 13.12.2019 – 03.04.2020 kogutud mõõtetulemusi, mille abil hinnati tarindisest hallitustekke riski.

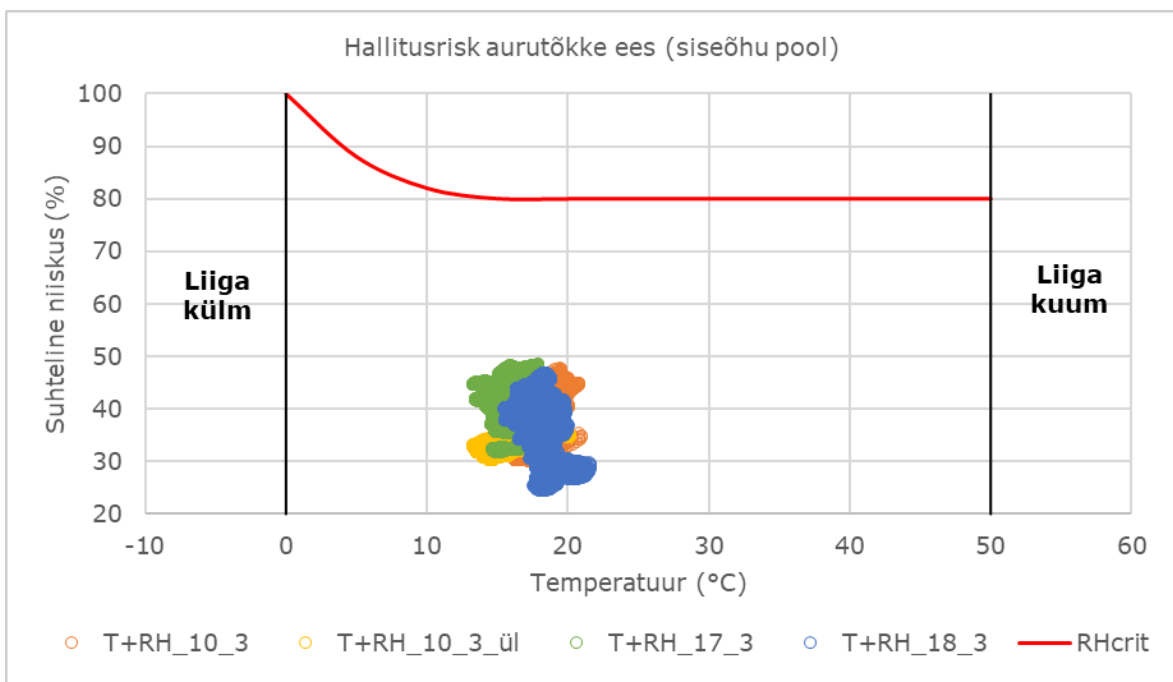
Joonistel 4.5, 4.6 ja 4.7 on toodud kõik tarindisisesed suhtelise niiskuse tulemused koos kriitilise suhtelise õhuniiskuse tasemega RH_{crit} . Selgus, et kogu mõõteperioodi jooksul ei ületanud suhteline õhuniiskus mitte üheski punktis kriitilist taset ning tagatud oli ka suur varu, seega mõõteandmete põhjal tarindisene hallitusrisk puudub. Maksimaalne tarindisene suhteline niiskus 50% mõõdeti palgi sisepinnalt ($T+RH_{18_1}$) lõunapoolsest magamistoast (ruum nr 18), kusjuures 50% suhteline õhuniiskus ületati antud ruumis vaid 0,19% kõikidest mõõtetulemustest ehk väga lühiajaliselt. Keskmine suhteline õhuniiskus selle ruumi palgi sisepinnal oli 44%.



Joonis 4.5. Kõikide mõõtepunktide suhteline niiskus palgi sisepinnal perioodil 13.12.2019 – 03.04.2020



Joonis 4.6. Kõikide mõõtepunktide suhteline niiskus aurutõkke taga (välisõhu pool) perioodil 13.12.2019 – 03.04.2020



Joonis 4.7. Kõikide mõõtepunktide suhteline niiskus aurutõkke ees (siseõhu pool) perioodil 13.12.2019 – 03.04.2020

Lisaks hinnati välispiirde niiskusrežiimi difusiooniarvutusega, mille abil on võimalik hinnata tarindisese veeauru kondenseerumise riski. Difusiooniarvutused tehti vastavalt peatükis 1.2.3 toodud valemitele. Kondenseerumisohtu kontrolliti aasta kõigil 12 kuul ning arvutusteks kasutati standardi EVS-EN ISO 13788:2012 [21] lisas toodud kuu keskmisi välistemperatuure ja suhtelise õhuniiskuse väärtusi. Kasutati optimaalset

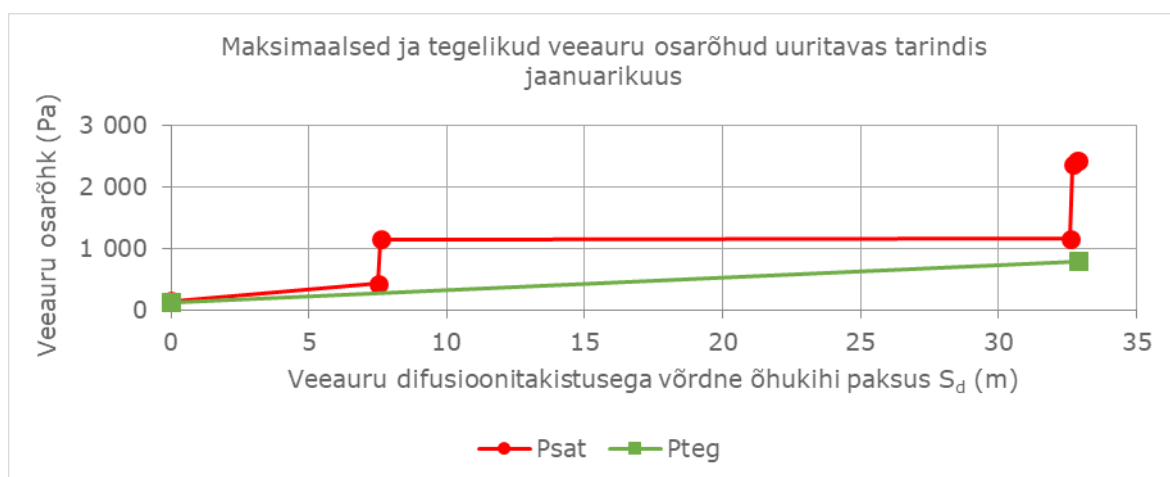
sisetemperatuuri $\theta_i=21$ °C ning suhtelise õhuniiskuse väärtustena *Green Eye* seadmega mõõdetud kõrgeimat kuu keskmist õhuniiskust, mis oli $RH_i=31,5\%$ (mõõteperioodi välistel soojematel kuudel kasutati väärtust $RH_i=50\%$). Materjalide omadused võeti standardist EVS-EN ISO 10456:2007 (palksein, tselluvill, lubikrohv) ja tootjate kodulehtedelt (kipskiud-viimistlusplaat *Fermacell*, aurutõkkemembraan *Intello*).

Kondenseerumisohtu ei esinenud ühelgi kuul. Tabelis 4.1 on esitatud jaanuarikuu arvutusnäide, milles on vastavalt standardile kasutatud välistemperatuuri $\theta_e = -16,9$ °C ja suhtelist õhuniiskust $RH_e = 85\%$.

Tabel 4.1. Arvutustabel kondenseerumisohtu hindamiseks

Tarindi kiht	d , m	λ , W/(m·K)	R , (m ² ·K)/W	% R , %	$\Delta\theta$, °C	θ_e , °C	θ_i , °C	μ	S_d , m	P_{teg} , Pa	P_{sat} , Pa	ΣS_d , m
						-16,90	21,00					
Välispind			0,04	1,12	0,42	-16,9	-16,48			117,87	139	0,00
Palksein	0,15	0,13	1,15	32,24	12,22	-4,26	50	7,50			428	7,50
Tselluvill	0,05	0,04	1,25	34,92	13,24	8,98	2	0,10			1148	7,60
Aurutõke	0,00025	0,17	0,00	0,04	0,02	8,99	-	25,00			1149	32,60
Tselluvill	0,042	0,04	1,05	29,33	11,12	20,11	2	0,08			2354	32,68
Viimistlusplaat	0,0125	0,32	0,04	1,09	0,41	20,52	13	0,16			2415	32,85
Lubikrohv	0,004	0,8	0,01	0,14	0,05	20,58	10	0,04			2423	32,89
Sisepind			0,04	1,12	0,42	21,00				688,80	2487	
		ΣR , (m ² ·K)/W	3,58	100,00								

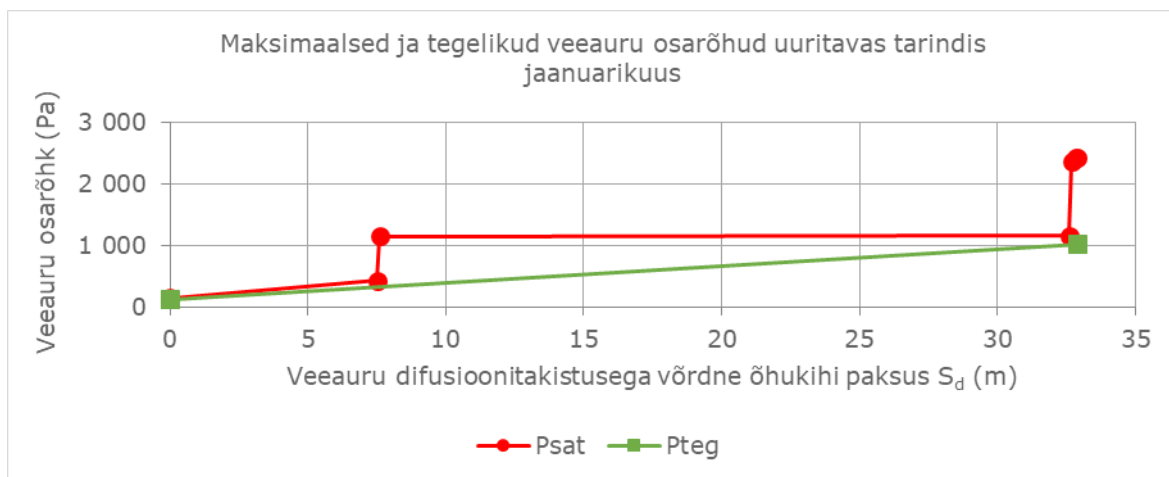
Joonisel 4.8 on graafiliselt kujutatud tabeli 4.1 abil saadud arvutustulemused. On näha, et tegelik veeauru osarõhk P_{teg} ei ületa veeauru küllastusrõhku P_{sat} ja seega selle arvutustulemuse põhjal kondenseerumisohtu ei esine.



Joonis 4.8. Maksimaalsed ja tegelikud veeauru osarõhud uuritavas tarindis jaanuarikuu (RH_i = 31,5%)

Lisaks kontrolliti kondenseerumise ohtu ka kogu mõõteperioodil maksimaalse siseõhust mõõdetud suhtelise õhuniiskusega, milleks oli $RH_i = 41\%$. Sellistel tingimustel tehtud

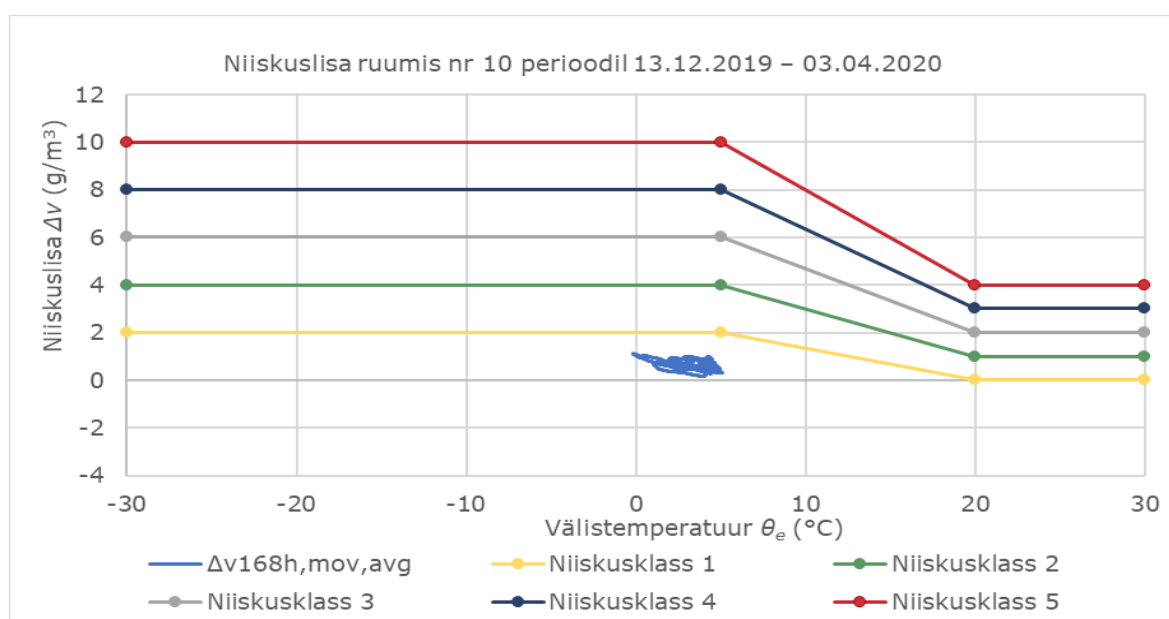
arvutused näitasid samuti, et kondenseerumisohtu ei esine (joonis 4.9), kuid tegelik veeauru osarõhk on kriitiliselt lähedal maksimaalse veeaururõhu ületamisele, mis tähendab, et suhtelise õhuniiskuse suurenemisel tekiks talvekuudel ka oht kondenseerumiseks.



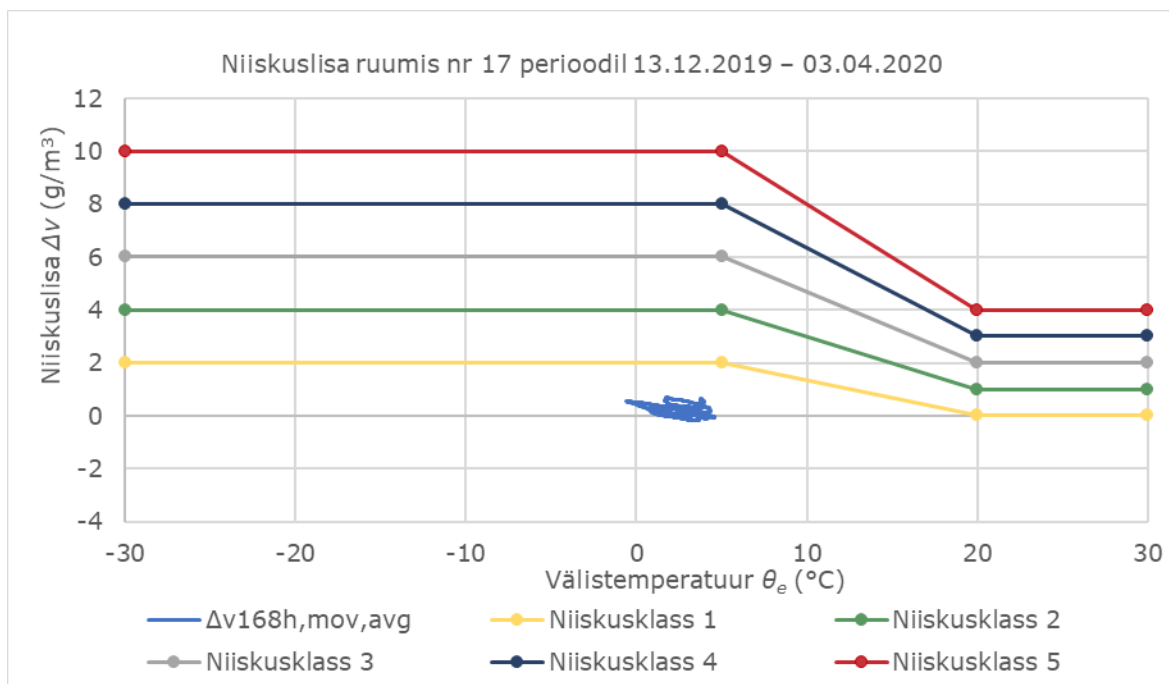
Joonis 4.9. Maksimaalsed ja tegelikud veeauru osarõhud uuritavas tarindis jaanuarikuus ($RH_i = 41\%$)

4.1.3 Niiskuslisa

Vastavalt peatükis 1.2.2 toodud valemitele teostati niiskuslisa arvutused, et teha kindlaks, milliseid sisekliima andmeid niiskustehniliste mudelite koostamisel on tarvis kasutada ja millisele niiskuskoormusele hoone vastu peab pidama. Joonistel 4.10 ja 4.11 on kujutatud uuritud ruumide 168 h jooksvat keskmist niiskuslisa ($\Delta V_{168h,mov,avg}$).



Joonis 4.10. 168 h keskmine niiskuslisa ruumis nr 10 (köök)



Joonis 4.13. 168 h keskmine niiskuslisa ruumis nr 17 (põhjapoolne magamistuba)

Graafikutelt selgub, et hoone niiskuskoormus on väga madal. 168 h ehk nädala keskmise niiskuslisa arvutamiseks arvutati esmalt niiskuslisa iga 15 minuti kohta (vastavalt mõõteseadme intervallile). Kuna mõõteperiood kestis 16 nädalat, siis arvutati kummaski ruumis 10752 väärtust. Kõrgis ületas 10752 arvutatud niiskuslisaast esimese niiskusklassi piiri 2 g/m^3 vaid 1,4% tulemustest, magamistoas vaid 0,3%. Maksimaalne arvutatud niiskuslisa oli $3,8 \text{ g/m}^3$.

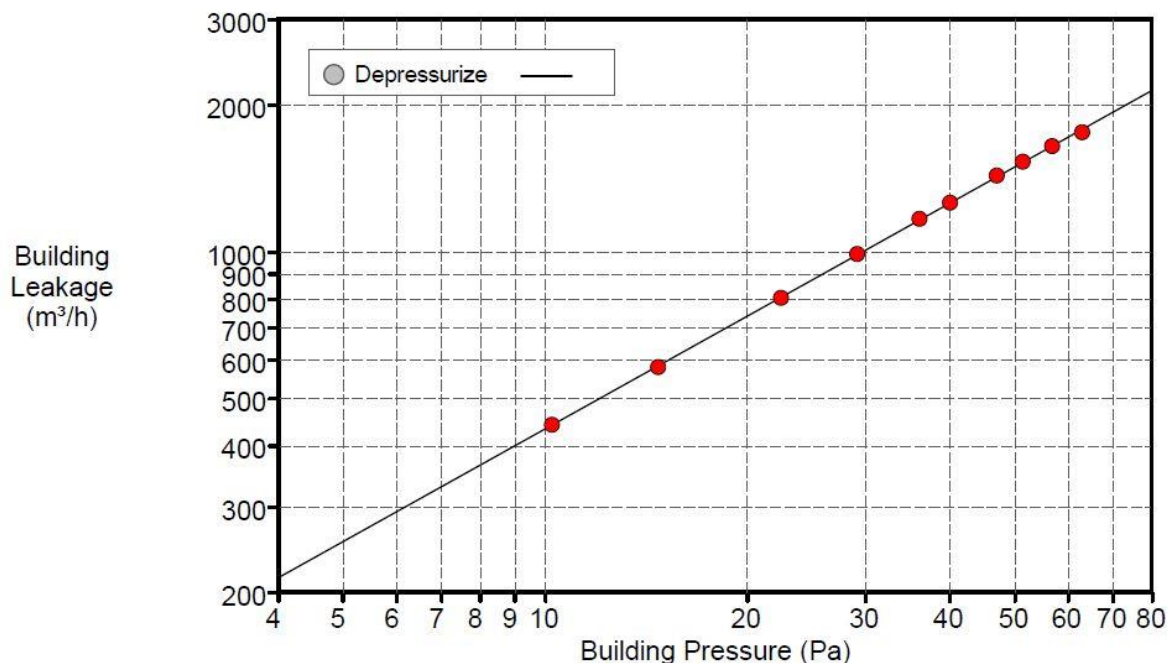
4.2 Hoone õhupidavus, õhulekked ja külmasillad

4.2.1 Hoone õhupidavus ja õhulekked

Ventilaatoriga survestamise meetodil tehtud õhulekketesti tulemused on esitatud tabelis 4.2 ja graafikuna joonisel 4.14, õhulekketesti raport tervikuna on esitatud Lisas 3. Arvutusteks kasutatud valemid on toodud peatükis 1.1.4 ning testi käiku kirjeldatud peatükis 3.2.2.

Tabel 4.2. Õhulekketesti tulemused

Õhulekke vooluhulk rõhuvahel 50 Pa q_{50} (m^3/h)	1497
Õhulekkearv q_{E50} ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$)	3,38
Õhuvahetuskordsus n_{50} (h^{-1})	3,65



Joonis 4.14. 50 Pa alarõhu tingimustel tehtud õhulektesti tulemused. Horisontaalteljel rõhk (Pa), vertikaalteljel rõhule vastav õhulekke vooluhulk (m³/h)

Õhulekkearv $q_{E50} = 3,38 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ viitab üsna suurtele õhuleketele. See tähendab, et välispiirde üht ruutmeetrit läbib tunnis $3,38 \text{ m}^3$ õhku ja sellise õhulekkearvuga hoonet õhutihedaks ei loeta. Rekonstrueeritud välispiiretega hoonetel võiks piiret läbiva õhu hulk olla vähem kui $3 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Suurimad õhulekked tuvastati välisseinte ja välisavade ning välisseinte ja vahelae liitekohtades, ning ventilatsioonivõrkude läbiviikudes.

4.2.2 Külmasillad

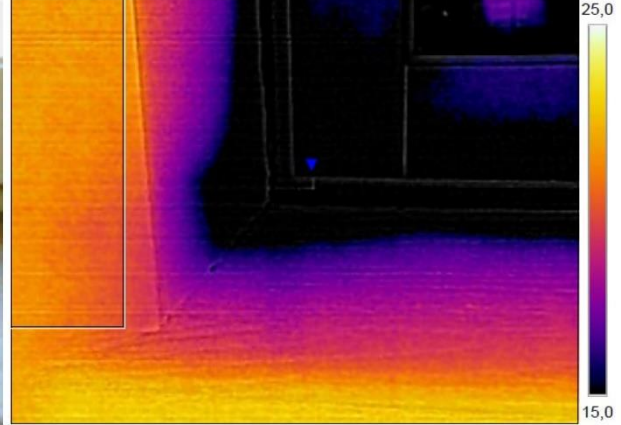
Suurimad temperatuurierinevused termografeerimisel -50 Pa alarõhu tingimustes ilmnisid välispiirete liitekohtades (välispiire ja vahelagi, välispiire ja välispiire), välispiirete ja avatäidete vahelistes liitekohtades, trepi liitekohtades ning ventilatsioonitorude läbiviikudes. Termograafia ja õhulektestiga koos tehti ka märkesuitsutest, mis tuvastas näiteks suured õhulekked süvistatud laevalgustite läbiviikudes. Ainult termografeerimisega sellist leket tuvastada ei oleks olnud võimalik, sest töötav valgusti kiirgab suurt soojust.

Tuvastatud külmasillade kriitilisust hinnati temperatuuriindeksite arvutustega (kirjeldatud peatükis 1.1.4). Järgnevatel joonistel on toodud 5 kriitiliseima ehk madalaima temperatuuriindeksiga punkti termopildid (joonised 4.15 – 4.19), neile arvutatud temperatuuriindeksid on toodud tabelis 4.3.

20.11.2019 16:06:31



20.11.2019 16:06:31

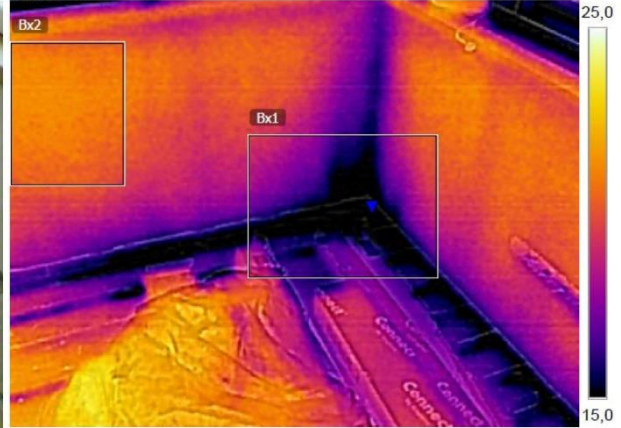


Joonis 4.15. Termopilt akna ja välisseina ühenduskohast. Minimaalne pinnatemperatuur mõõtepunktis (tähistatud sinise kolmnurgaga) $\theta_{si,min}=7,2$ °C

20.11.2019 16:06:50



20.11.2019 16:06:50

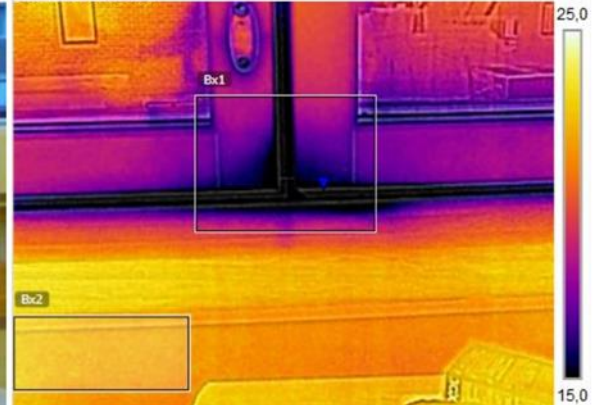


Joonis 4.16. Termopilt välisseinte ja vahelae ühenduskohast. Minimaalne pinnatemperatuur mõõtepunktis (tähistatud sinise kolmnurgaga) $\theta_{si,min}=11,6$ °C

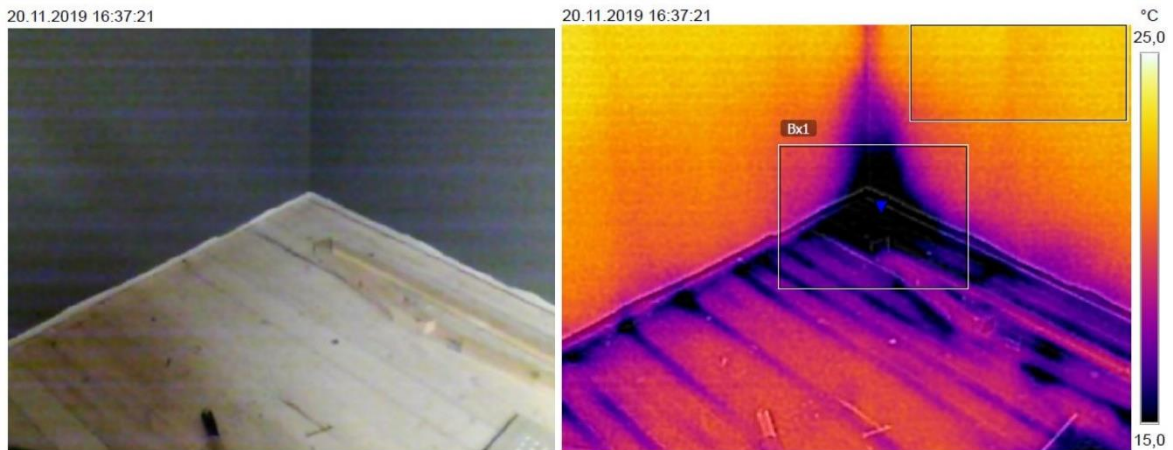
20.11.2019 16:34:31



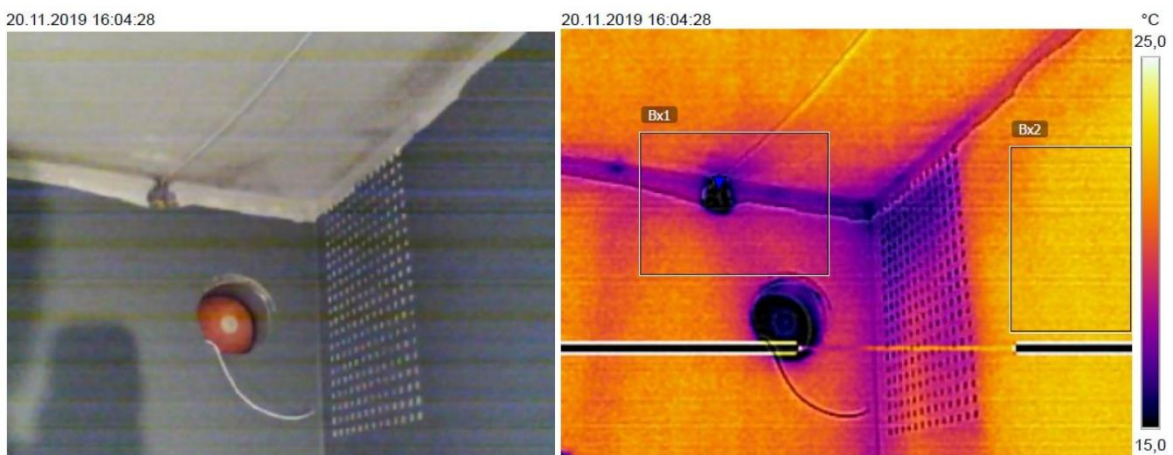
20.11.2019 16:34:31



Joonis 4.17. Termopilt akna ja välisseina ühenduskohast. Minimaalne pinnatemperatuur mõõtepunktis (tähistatud sinise kolmnurgaga) $\theta_{si,min}=8,9$ °C



Joonis 4.18. Termopilt välisseinte ja vahelae ühenduskohast. Minimaalne pinnatemperatuur mõõtepunktis (tähistatud sinise kolmnurgaga) $\theta_{si,min}=11,6$ °C



Joonis 4.19. Termopilt läbiviigust. Minimaalne pinnatemperatuur mõõtepunktis (tähistatud sinise kolmnurgaga) $\theta_{si,min}=11,8$ °C

Tabel 4.3. Kriitiliseimate külmasildade temperatuuriindeksid alarõhu tingimustes

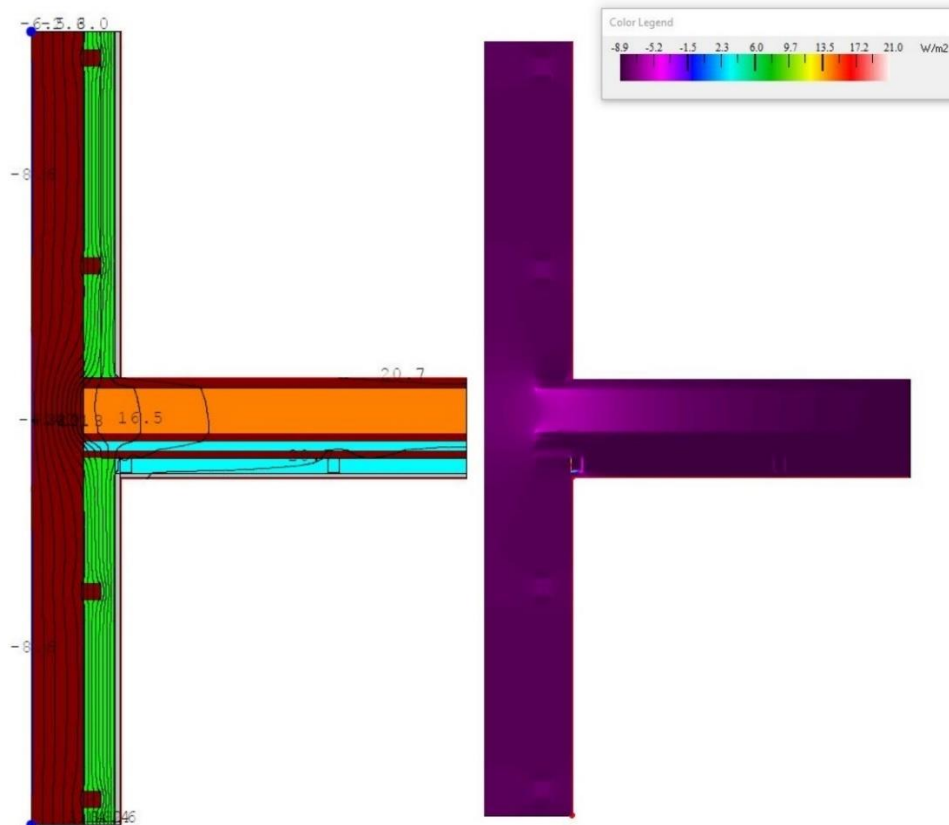
Jrk nr	$\theta_{si,min}$ (°C)	f_{Rsi}	Lubatud $f_{Rsi,min}$
1	7,2	0,098	$\geq 0,55$
2	11,6	0,366	$\geq 0,8$
3	8,9	0,20	$\geq 0,55$
4	11,6	0,366	$\geq 0,8$
5	11,8	0,378	$\geq 0,8$

Kriitilist punkti vahelae ja välisseina ühenduskohast hinnati ka soojuslevi modelleerimisprogrammi abil *LBNL Therm*. Sisetemperatuurina kasutati $\theta_i = 21$ °C, välistemperatuurina $\theta_e = -10$ °C. Kasutati juba peatükis 3.1 toodud materjalide soojusjuhtivuste väärtusi ja piirde pindade soojustakistusi (tabel 3.1 ja 3.2). Programmi abil leiti vahelae ja välisseina liitekohta joonsoojuslähivus $\psi = 0,09$ W/(m·K) ning madalaima sisepinna temperatuuri põhjal $\theta_{i,min} = 17,9$ °C temperatuuriindeks $f_{Rsi} = 0,90$.

Tabel 4.4. *LBNL Thermi* abil arvatud osamudelite soojuslähivused ja pikkused ning joonsoojuslähivuse arvutamiseks kasutatud väärtused

$U_{1d,sein}$, W/(m ² ·K)	0,2768
l_1 , m	2291,5
$U_{2D,mudel}$, W/(m ² ·K)	0,3156
l_2 , m	2291,5
L_{1D} , W/(m·K)	0,6343
L_{2D} , W/(m·K)	0,7232
ψ , W/(m·K)	0,0889

Saadud arvutuslikud tulemused on head, kuna arvatud temperatuuriindeks ületab lubatud minimaalset väärtust $f_{rsi,min} = 0,8$ ning liitekohta joonsoojuslähivus ψ on madal. Kehtiv hoonete energiatõhususe miinimumnõuete määrus enam joonsoojuslähivuste soovituslikke arvutusväärtusi ette ei anna, kuid veel 2018. aastal kehtinud miinimumnõuete kohaselt oli oluliselt rekonstrueeritud hoonete välisseina ja vahelae liitekohta soovituslik joonsoojuslähivus $\psi = 0,2$ W/(m·K) ning uute hoonete puhul $\psi = 0,1$ W/(m·K), seega on saadud arvutuslik tulemus $\psi = 0,09$ W/(m·K) väga hea.



Joonis 4.20. Vahelae ja välisseina liitekohta soojustehniline kontroll programmiga *LBNL Therm*

4.3 Niiskustehnilised mudelid

4.3.1 Mudelite kalibreerimine

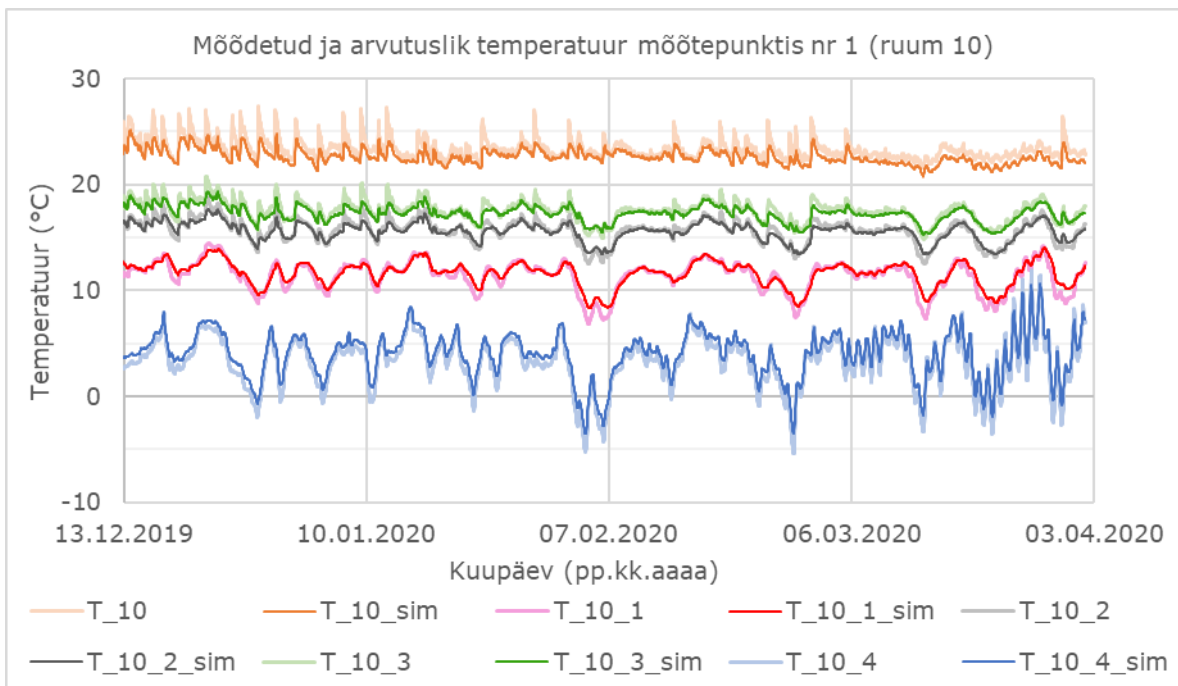
Niiskustehnilised mudelid koostati mõõtepunktides 1, 3 ja 4. Kriitiliste kliimaandmetega pikaajaliste simulatsioonide koostamiseks tuli esmalt arvutusmudelid kalibreerida nii mõõdetud temperatuuri kui ka suhtelise õhuniiskuse järgi. Selleks tuli programmi mudeldada uuritav tarind, määrata sellele materjalid ja igale materjalile vastavad omadused. Töös kasutati 1D horisontaalset mudelit, mis tähendab, et arvestati vaid horisontaalse soojus- ja niiskusleviga. Mudelis kasutatud materjalid ja neile määratud omadused on toodud tabelis 4.5.

Tabel 4.5. Niiskustehnilistes mudelites kasutatud materjalid ja nende põhiomadused

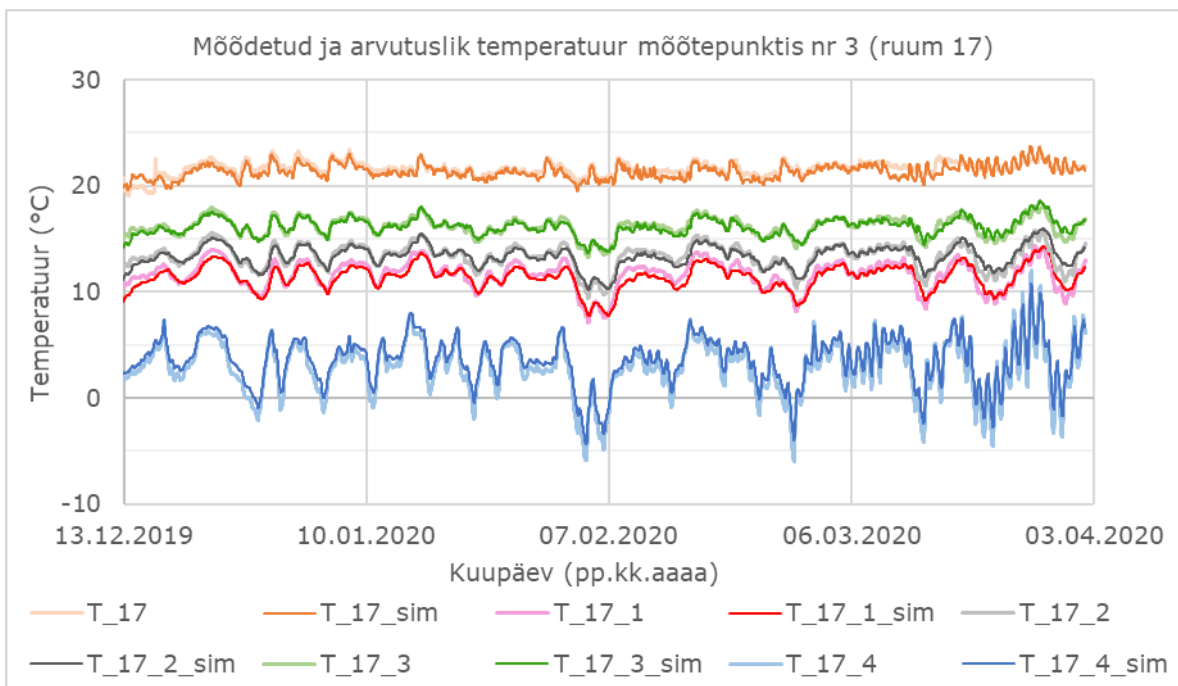
Materjal	Palksein	Tselluvill	Aurutõkke- membraan (<i>ProClima Intello</i>)	Viimistlus- plaat (<i>Fermacell</i>)	Lubi- krohv
Kihi paksus d (mm)	150	42/50	-	12,5	4
Tihedus ρ (kg/m ³)	520	55	-	1100	1520
Erisoojusmahtuvus C_e (J/kgK)	1950	1600	-	1100	850
Poorsus p (m ³ /m ³)	0,70	0,92	-	0,65	0,50
Soojuserijuhtivus λ (W/mK)	0,13	0,04	-	0,32	0,80
Kapillaarne niiskusimavus A_w (kg/(m ² s ^{1/2}))	0,007	0,056	-	0,277	0,009
Difusioonitakistustegur μ	120	2	-	13	10
Suhteline difusioonitakistus S_d (m)	-	-	≤25	-	-

Mudeli kalibreerimisel määrati palgi algniiskuseks 32 kg/m³. Aurutõkkemembraanina kasutati muutuva suhtelise difusioonitakistusega aurutõkkemembraani *ProClima Intello*, mis on sellele vastavate omadustega *Delphini* materjalidest kättesaadav.

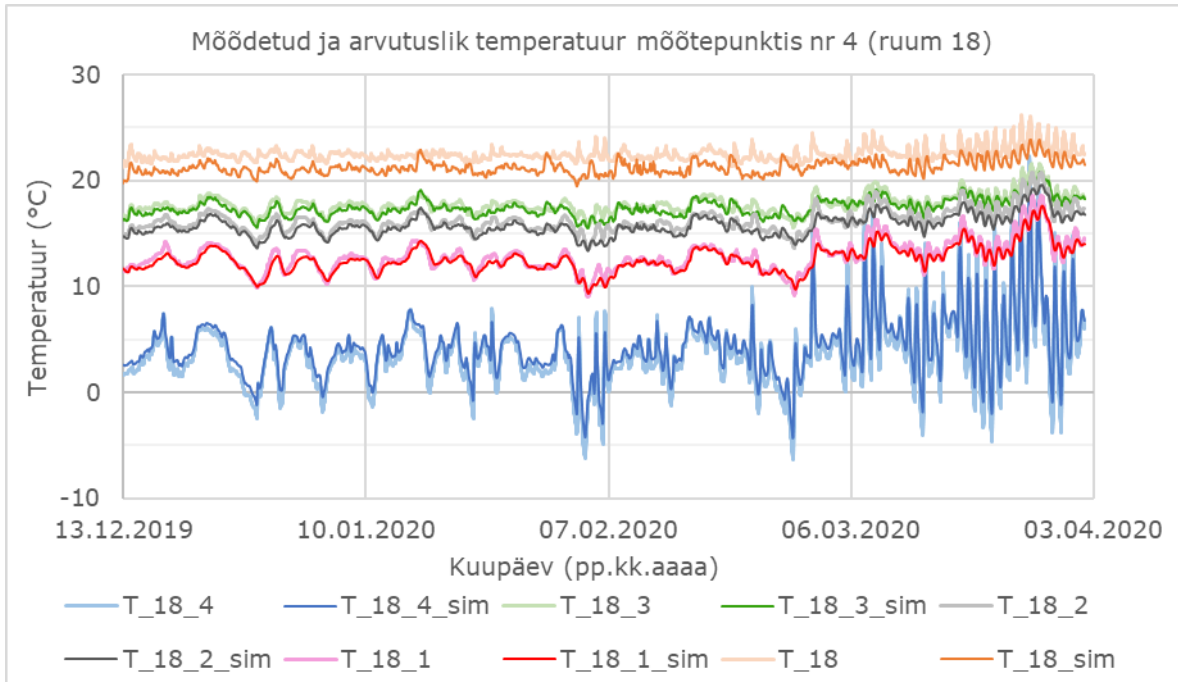
Seejärel lisati mudelisse sisemised ja välised ääritingimused. Sisemiste ääritingimustena kasutati *GreenEye* seadmetega vastava ruumi siseõhust mõõdetud suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri, väliste ääritingimustena õhkvahest *Hobo* anduritega mõõdetud tulemusi. Mõõtetulemuste abil koostati tunni keskmiste andmetega kliimafailid. Kalibreerimistulemused tunni keskmise temperatuuri järgi on toodud joonistel 4.21 – 4.23, tunni keskmise suhtelise niiskuse järgi joonistel 4.24 – 4.27.



Joonis 4.21. Mõõte- ja arvutustulemuste temperatuurierinevused mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)

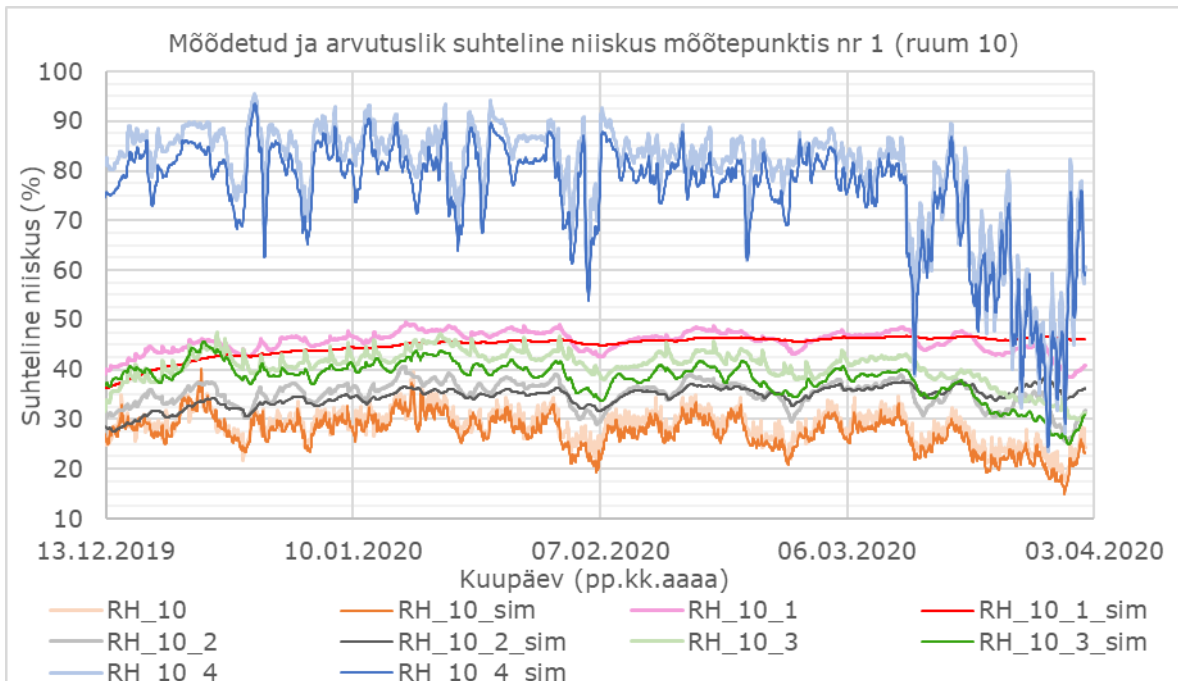


Joonis 4.22. Mõõte- ja arvutustulemuste temperatuurierinevused mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)

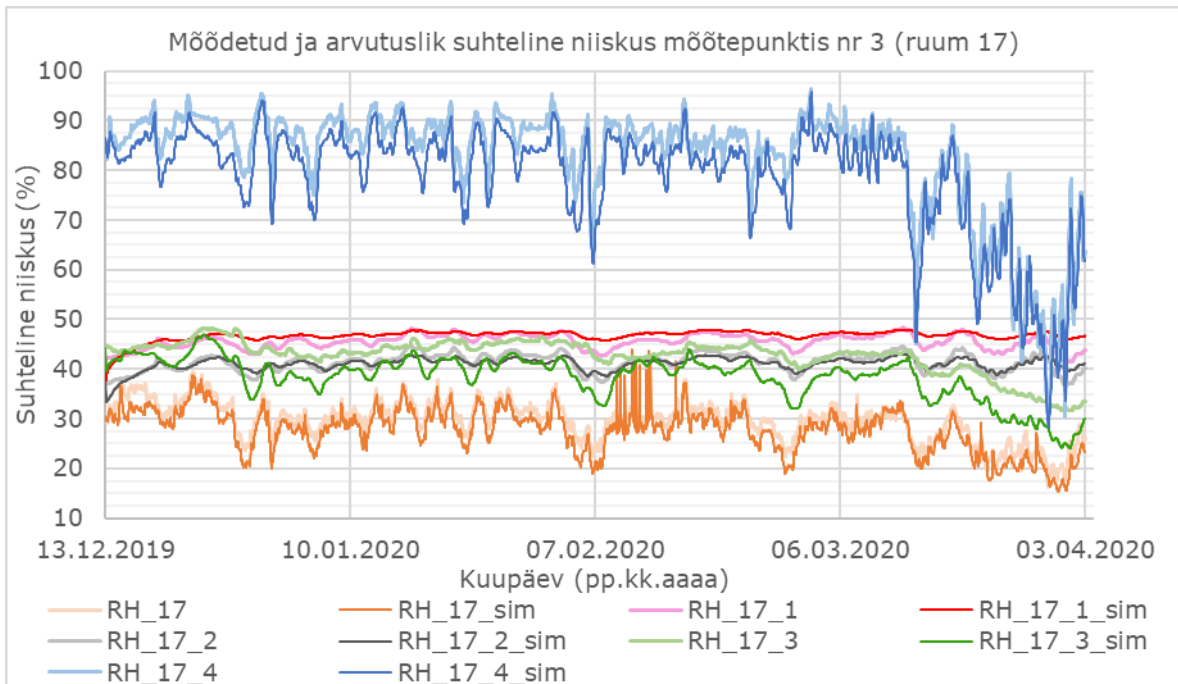


Joonis 4.23. Mõõte- ja arvutustulemuste temperatuurierinevused mõõtepunktis nr 4 (ruum 18 ehk lõunapoolne magamistuba)

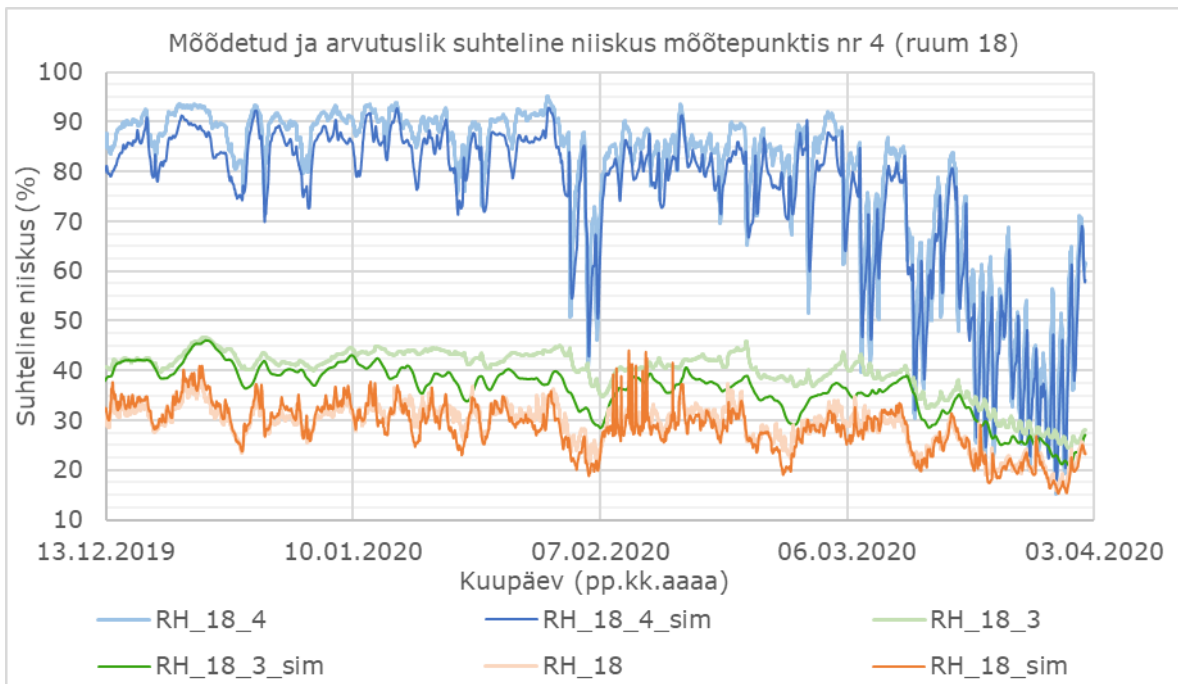
Tarindisiseses punktides on temperatuurierinevused väga väikesed, mis kinnitavad, et andurite paigaldus soovitud punktidesse (aurutõkke ette, aurutõkke taha, palgi sisepinnale) õnnestus ja väljundi asukoht mudelis ning materjalide soojuseriituvused on määratud piisava täpsusega.



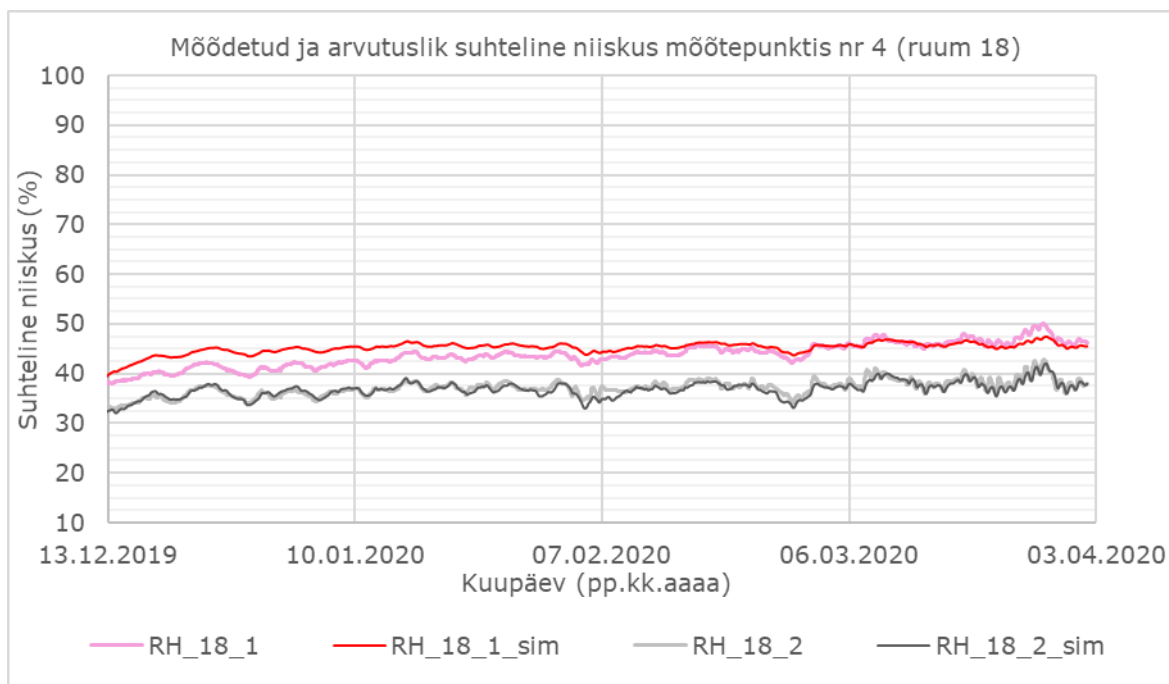
Joonis 4.24. Mõõte- ja arvutustulemuste suhtelise niiskuse erinevused mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)



Joonis 4.25. Mõõte- ja arvutustulemuste suhtelise niiskuse erinevused mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)



Joonis 4.26. Mõõte- ja arvutustulemuste suhtelise niiskuse erinevused mõõtepunktis nr 4 (ruum 18 ehk lõunapoolne magamistuba)



Joonis 4.27. Mõõte- ja arvutustulemuste suhtelise niiskuse erinevused mõõtepunktis nr 4 (ruum 18 ehk lõunapoolne magamistuba)

Suhtelise niiskuse puhul on mõõte- ja arvutustulemuste vaheline erinevus võrreldes temperatuuriga suurem. Siiski jälgivad arvutuslikud tulemused mõõtetulemustega sarnast trendi ning valdavalt jääb arvutusviga mõõteseadme vea piiresse (2,5 – 3,5% sõltuvalt suhtelisest õhuniiskusest). Suurimad erinevused mõõte- ja arvutustulemuste vahel on õhkvahe ja aurutõkke ees ning seda enamjaolt tagavara kahjuks (arvutustulemused on madalamad kui mõõtetulemused). Seega tuleb pikaajaliste simulatsioonide tulemuste analüüsil arvestada, et nii õhkvahe kui aurutõkke ees mõõdetud suhteline õhuniiskus võib tegelikkuses olla mõnevõrra kõrgem.

Statistiliselt on mõõte- ja arvutustulemuste erinevust võimalik hinnata standardhälbega ehk hajuvusega keskmise väärtuse ümber. Tabelis 4.6 on toodud kõikide mõõtepunktide suhtelise niiskuse ja temperatuuri tunni keskmiste mõõte- ja arvutustulemuste vaheliste erinevuste aritmeetiline keskmine väärtus ja arvutatud standardhälve. Suurim hajuvus on ruumi nr 18 õhkvahe suhtelise niiskuse mõõte- ja arvutustulemuste vahel (4,29%).

Tabel 4.6. Tunni keskmiste mõõtetulemuste põhjal arvatud mõõte- ja arvutustulemuste vaheliste erinevuste aritmeetilised keskmised ja standardhälbed

	Mõõte- ja arvutustulemuste erinevuste aritmeetiline keskmine			Mõõte- ja arvutustulemuste erinevuste standardhälve		
	RUUM=10	RUUM=17	RUUM=18	RUUM=10	RUUM=17	RUUM=18
T_RUUM	0,75	0,27	1,23	0,59	0,42	0,54
T_RUUM_1	-0,24	0,25	0,27	0,50	0,49	0,47
T_RUUM_2	0,09	0,02	0,45	0,41	0,46	0,43
T_RUUM_3	0,29	0,04	0,31	0,36	0,37	0,38
T_RUUM_4	-0,72	-0,68	-0,64	0,46	0,48	0,94
RH_RUUM	1,12	1,82	0,48	1,13	1,49	2,09
RH_RUUM_1	-0,47	-1,20	-1,45	2,35	0,98	1,57
RH_RUUM_2	-0,53	0,29	0,34	2,44	0,93	0,69
RH_RUUM_3	2,48	4,31	3,55	1,86	2,12	2,01
RH_RUUM_4	4,05	3,94	3,90	2,59	2,69	4,29

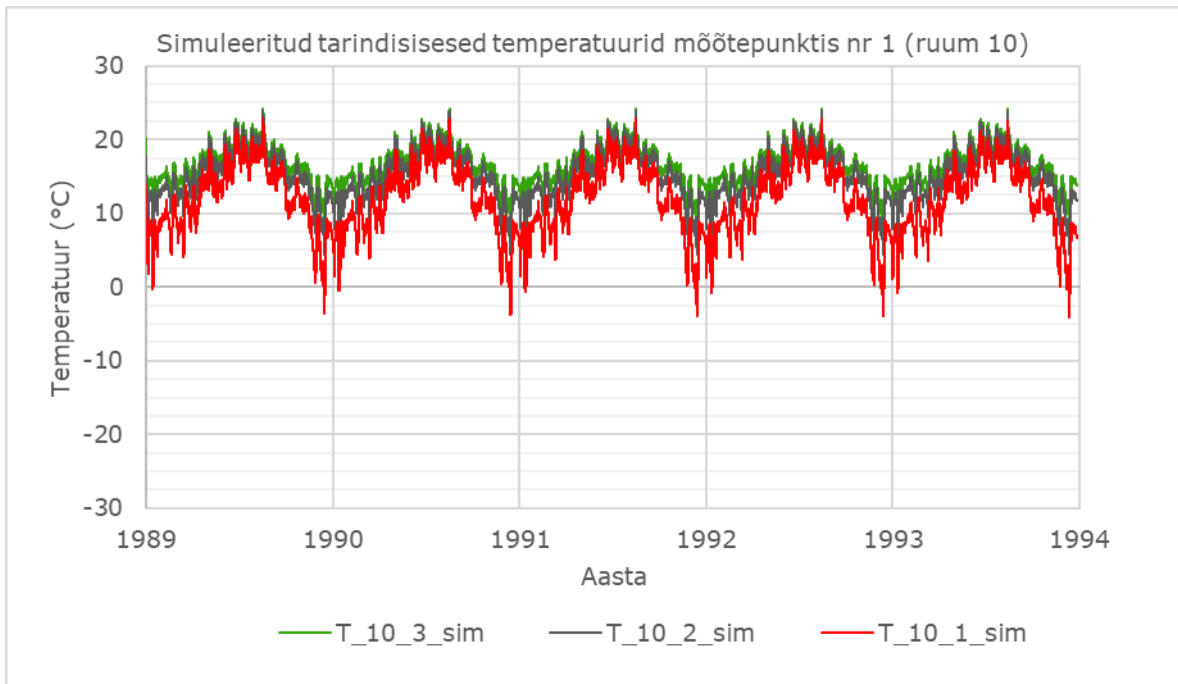
4.3.2 Hallitustekke kontroll niiskustehniliste mudelitega

Hallituse tekkimise kontrolliks kasutati väliste ääritingimustena Väike-Maarjas perioodil 1.08.1989–31.07.1990 mõõdetud kriitilisi kliimaandmeid. Sisemiste ääritingimustena kasutati kliimaandmeid algtemperatuuriga $\theta_i = +21 \text{ }^\circ\text{C}$ ning madalaimale niiskuskoormusele vastavaid suhtelise niiskuse väärtusi, kui:

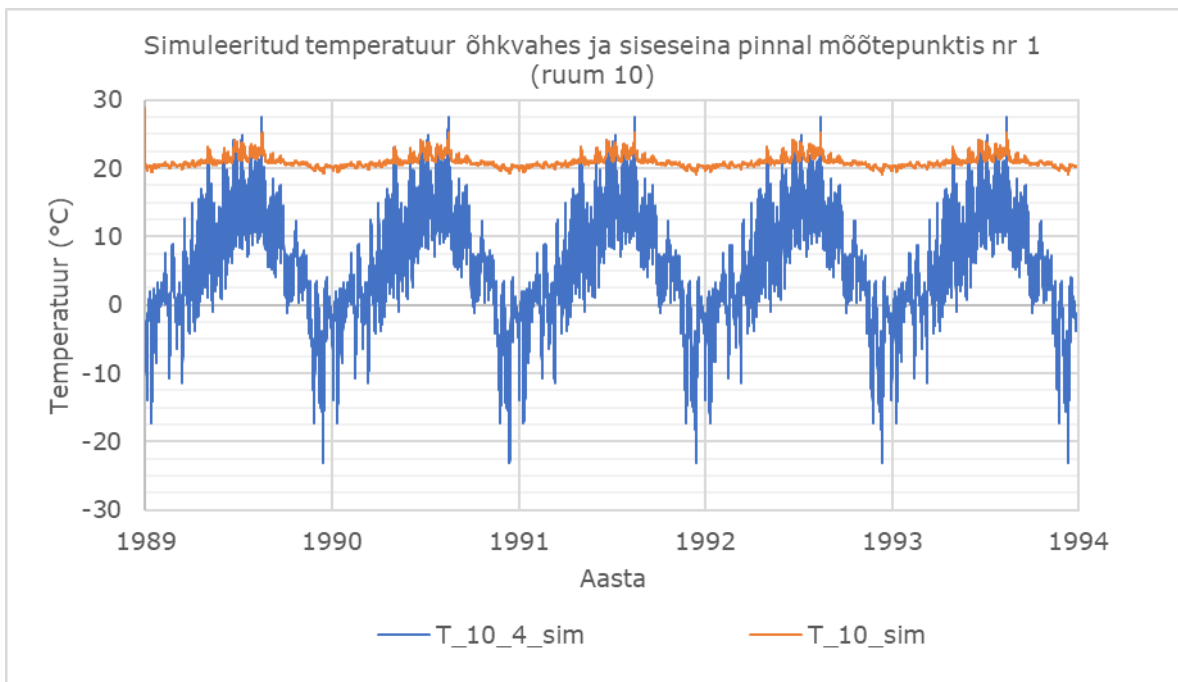
- niiskuslisa $\Delta v = 2 \text{ g/m}^3$ ($\theta_e \leq +5 \text{ }^\circ\text{C}$),
- niiskuslisa $\Delta v = 0 \text{ g/m}^3$ ($\theta_e \geq +20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Sisekliima andmete valikut on täpsemalt kirjeldatud peatükis 1.2.3. Kriitilised kliimaandmed sisaldavad andmeid ühe aasta kohta, kuid kuna simulatsiooni pikkuseks oli määratud 5 aastat, siis kasutas *Delphin* samu andmeid tsükliliselt ehk mudel simuleeriti oludes, kui 5 järjestikusel aastal oleks hallituse tekkeks samasugune kriitiliseim ilm. Simulatsioonides ei arvestatud kaldvihma, päikese ega tuule mõjuga, kuna mudeldatud tarindid on nende mõjude eest kaitstud tellisfassaadiga.

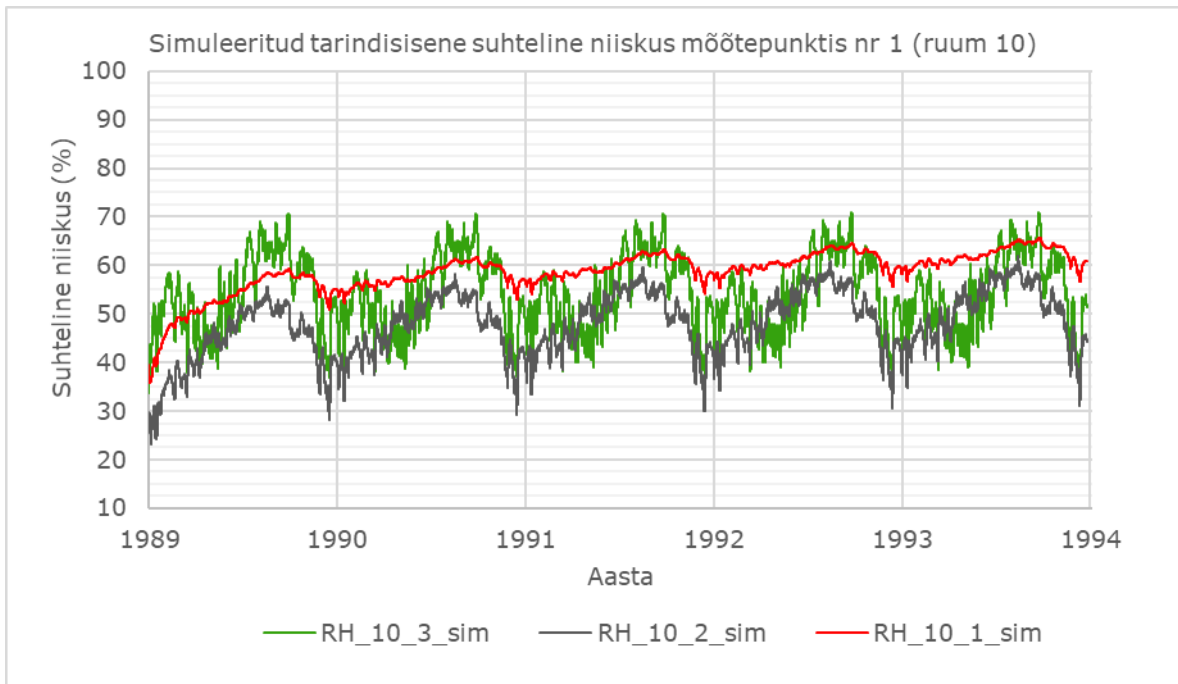
Mõõtepunkti nr 1 simulatsiooni tulemused on toodud joonisel 4.28 – 4.31.



Joonis 4.28. Simuleeritud tarindisisesed temperatuurid mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)

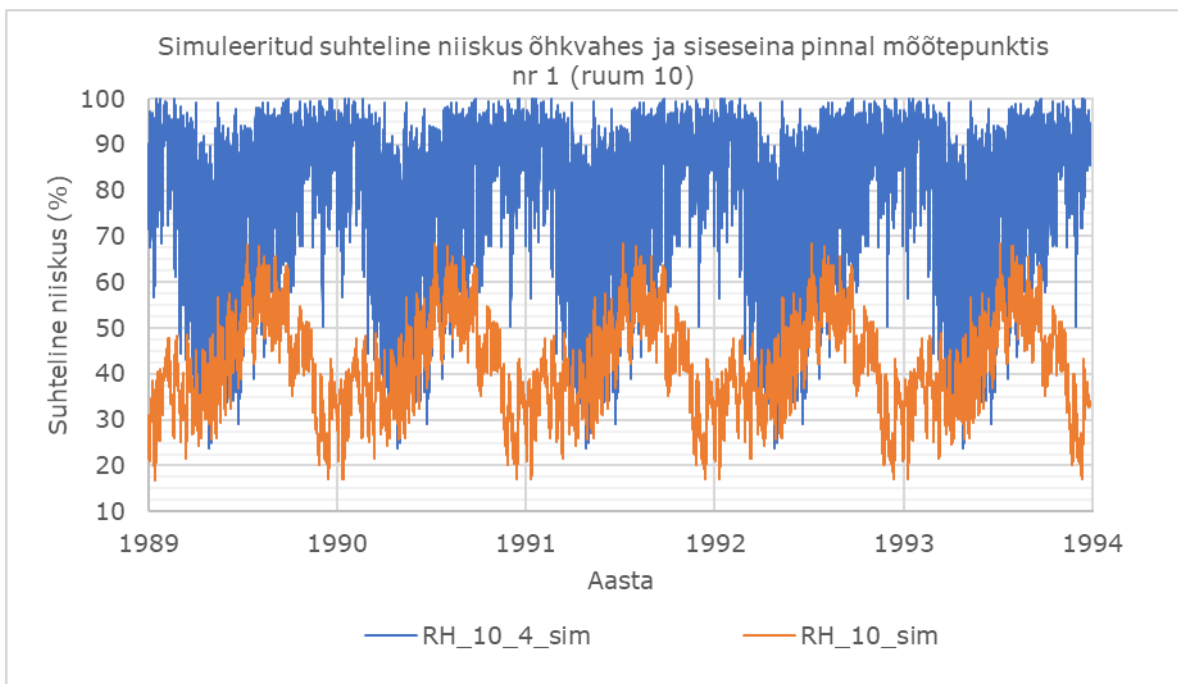


Joonis 4.29. Simuleeritud temperatuur õhkvahe ja siseseina pinnal mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)



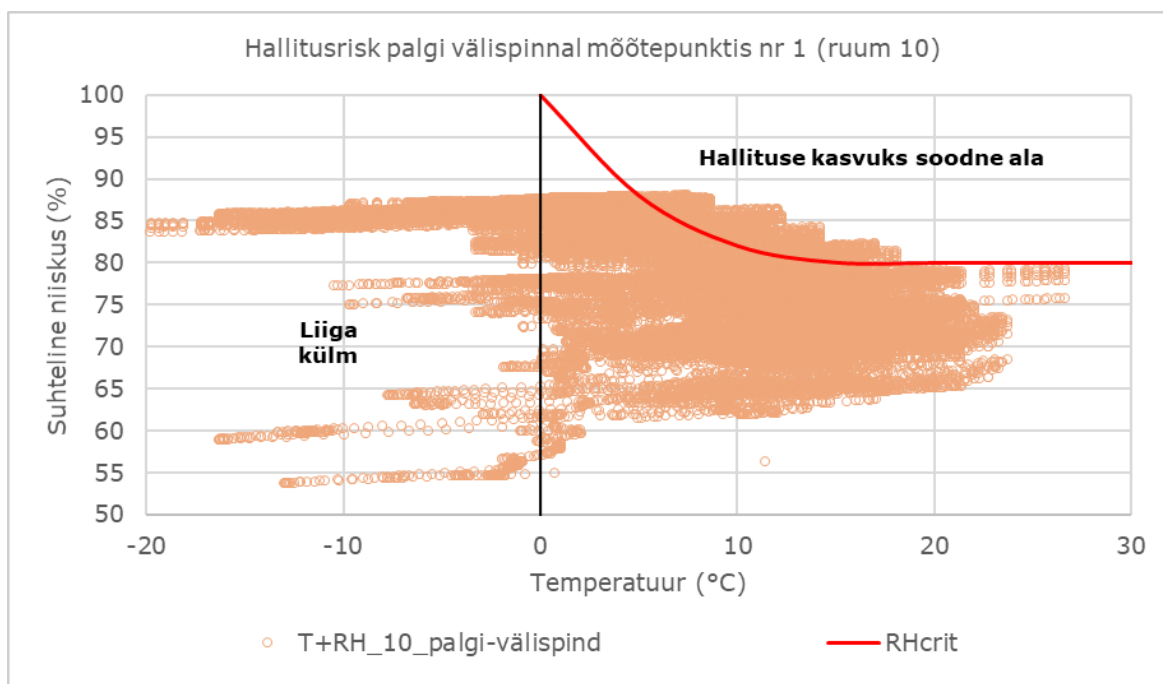
Joonis 4.30. Simuleeritud tarindisene suhteline õhuniiskus mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)

Võrreldes mõõtepunkti 1 tarindiseseid tulemusi, tõusis suhteline õhuniiskus kõige kõrgemale (71%) aurutõkke ees (joonis 4.3 tähistatud RH_10_3_sim). Arvestades ka potentsiaalse mõõtevea ja tagavara kahjuks kalibreeritud mudeliga, tõuseb suhteline niiskus kriitilisele piirile kohati väga lähedale.



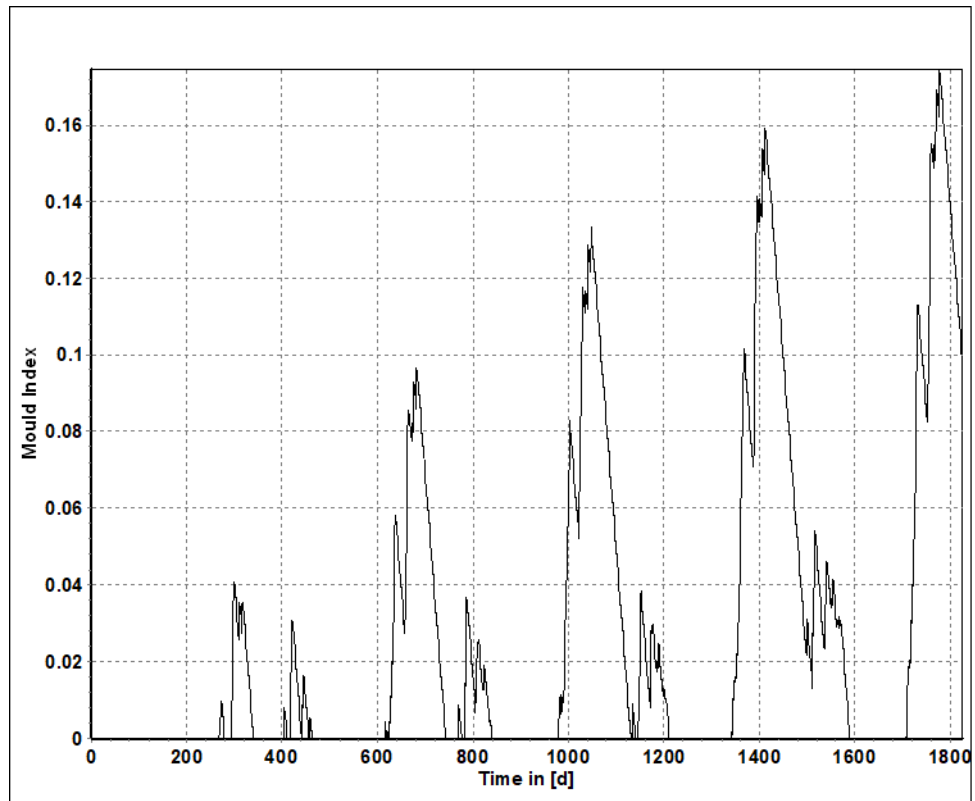
Joonis 4.31. Simuleeritud suhteline õhuniiskus õhkvahe ja siseseina pinnal mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)

Joonistelt 4.30 ja 4.31 selgub, et kriitiline suhteline niiskus $RH_{crit} = 80\%$ on ületatud vaid õhkvahes, mis on otseselt mõjutatud kasutatud kriitilistest kliimaandmetest, kuna välised ääritingimused määrati just õhkvahesse (mudelis ei arvestatud tellisfassaadiga). Palgi sisepinnal (joonisel 4.30 tähistatud $RH_{10_1_sim}$) hallitusoht puudub, kuid hallitusrisiki kontrollimiseks palgi välispinnale lisati mudelis uus väljund palgi välispinnast 3 mm sügavusele.



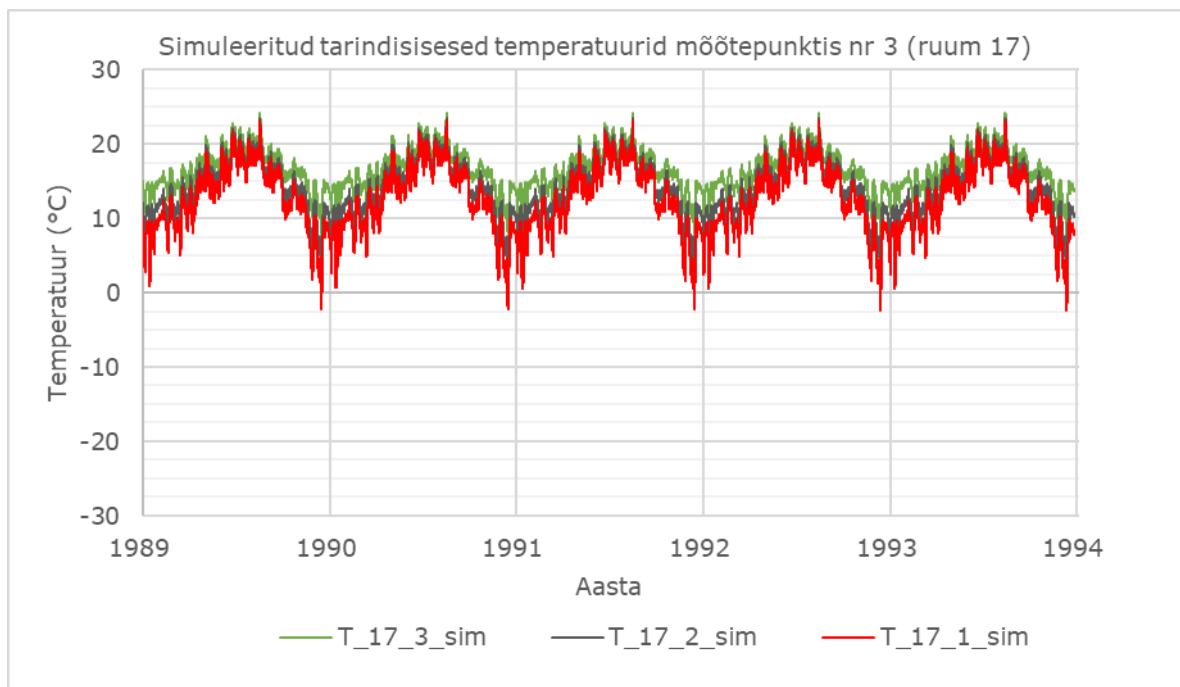
Joonis 4.32. Suhteline niiskus palgi välispinnast 3 mm sügavusel mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)

Joonisel 4.32 on toodud suhtelise niiskuse väärtused vastavalt temperatuurile palgi välispinnast 3 mm sügavusel. Joonisele on kantud ka kriitilise suhtelise niiskuse piir RH_{crit} . Kuigi valdavalt on temperatuur piisavalt madal, et hallituse kasvuks soodne olukord tekkida saaks, on siiski näha, et osa tulemustest jääb ka hallituse tekkeks soodsasse alasse. Graafik näitab küll, et kriitilise suhtelise niiskuse piir on ületatud, kuid selle abil ei ole võimalik hinnata, kui pikalt hallituse tekkeks soodne olukord püsis, seega tuleb vastavas punktis arvutada hallitusindeks, et hinnata hallituse tekke kriitilisust. 5 aasta lõpuks ületab hallitusindeks 0,16 piiri (joonis 4.33). Kuna väärtus on madalam kui 1, puudub risk hallituseks.

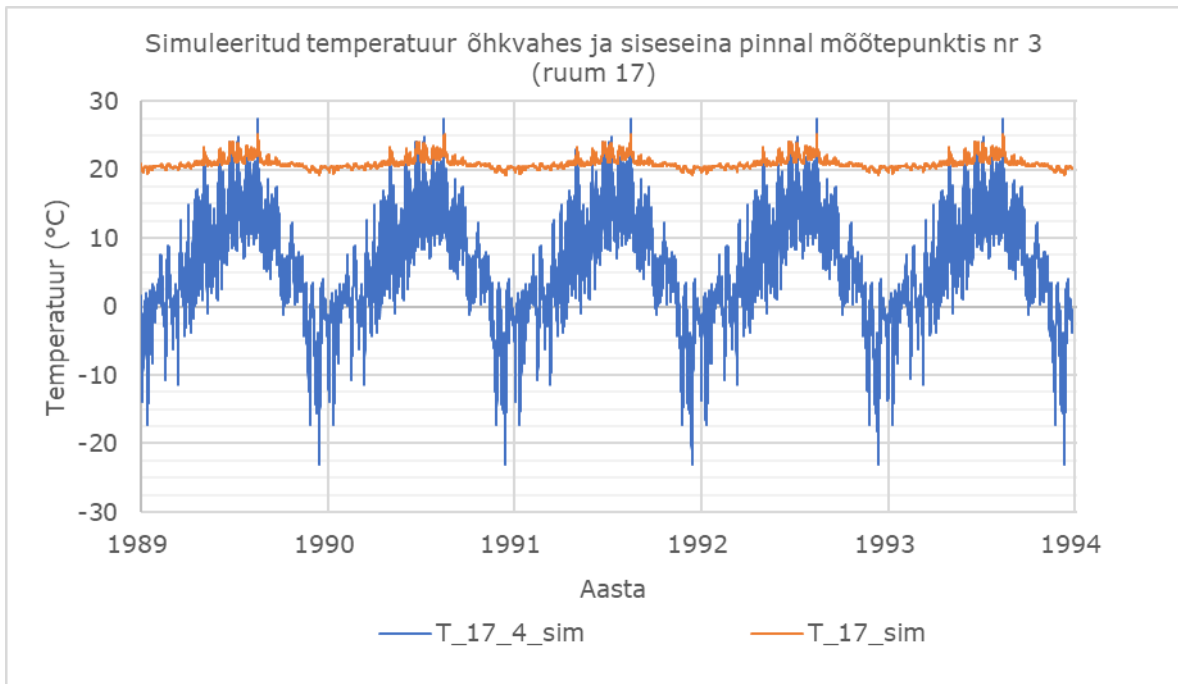


Joonis 4.33. Hallitusindeks palgi välispinnast 3 mm sügavusel mõõtepunktis nr 1 (ruum 10 ehk köök)

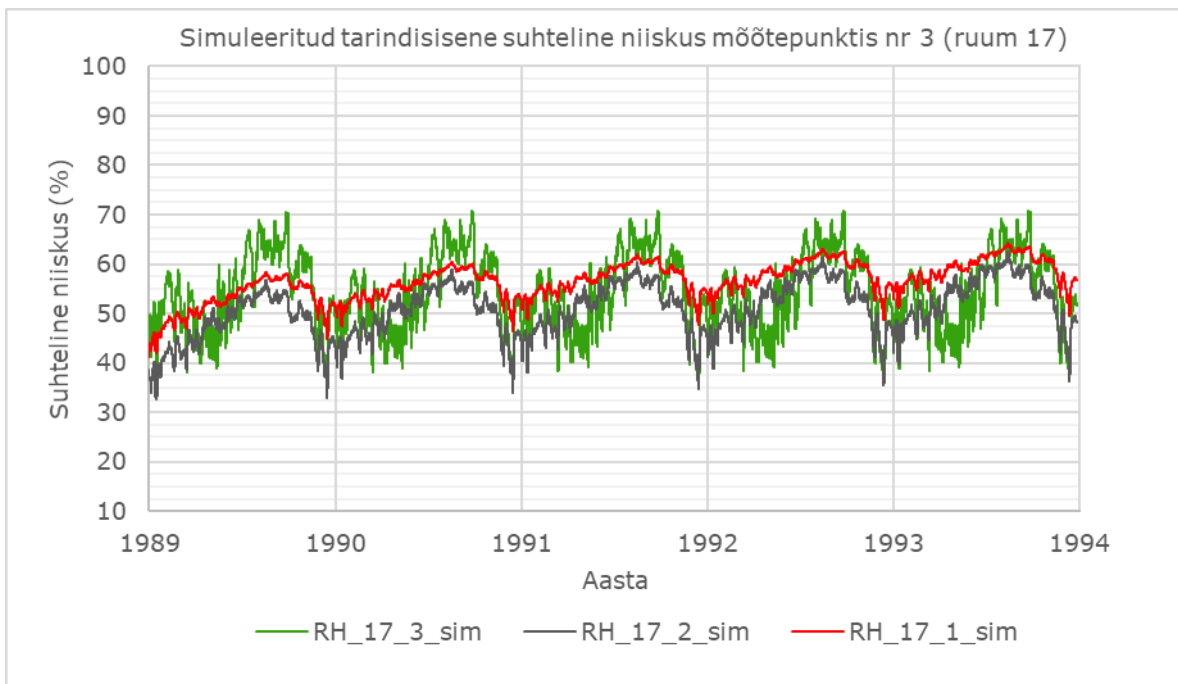
Mõõtepunkti nr 3 simulatsiooni tulemused on toodud joonistel 4.34 – 4.37.



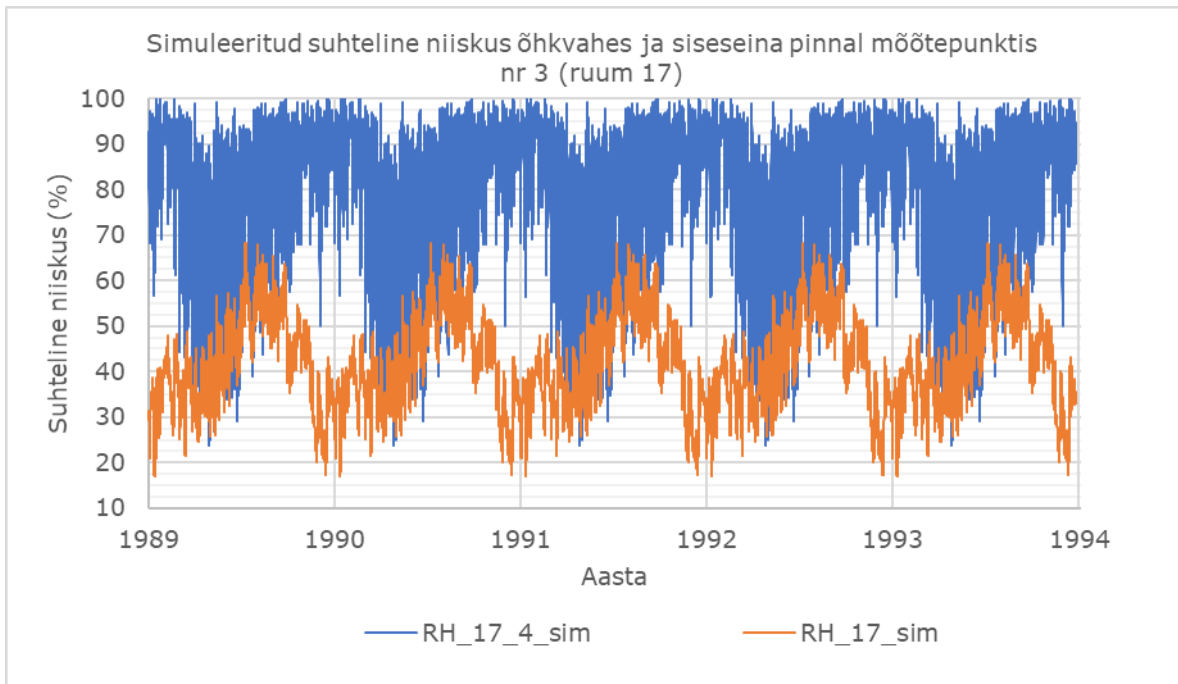
Joonis 4.34. Simuleeritud tarindisisesed temperatuurid mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)



Joonis 4.35. Simuleeritud temperatuur õhkvahe ja siseseina pinnal mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)

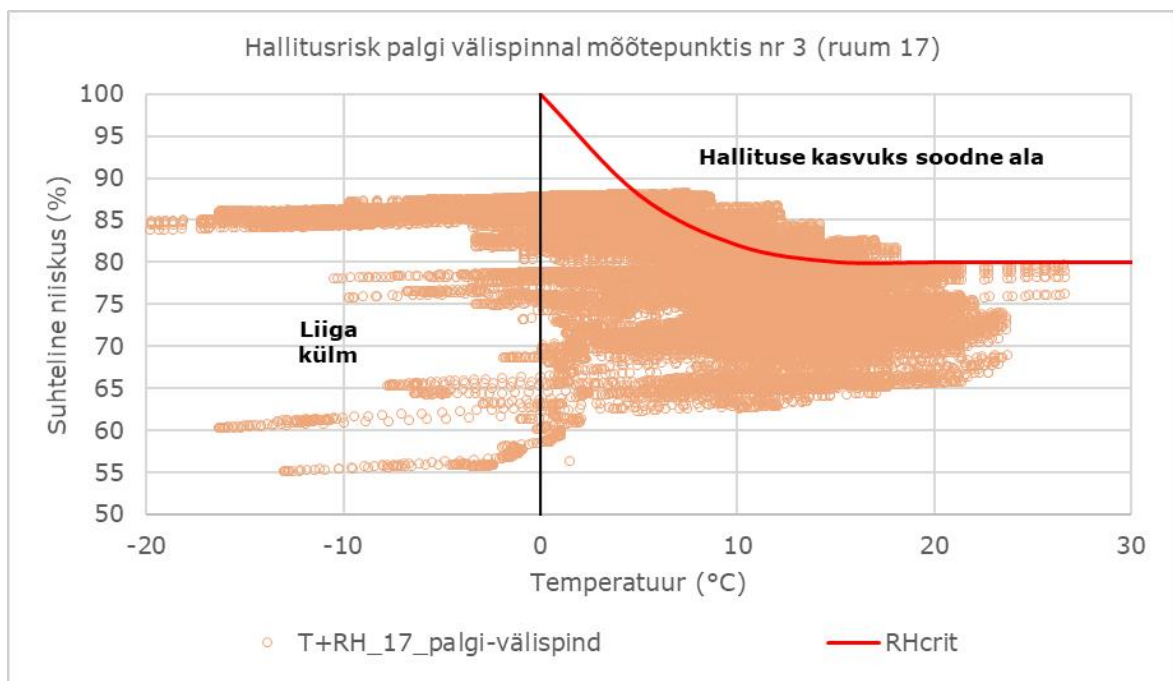


Joonis 4.36. Simuleeritud tarindisise suhteline niiskus mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)



Joonis 4.37. Simuleeritud suhteline õhuniiskus õhkvahes ja siseseina pinnal mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)

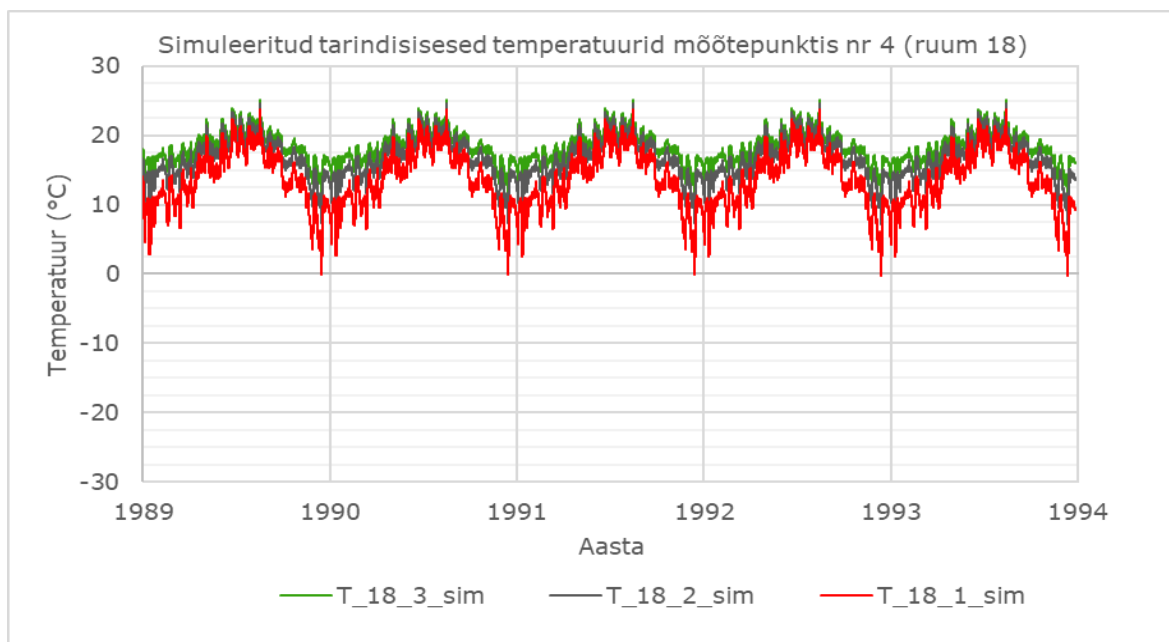
Tulemused mõõtepunktides 1 ja 3 on praktiliselt ühesugused. Sarnaselt mõõtepunktile 1 on ka mõõtepunktis 3 kriitiline suhteline niiskus ületatud vaid õhkvahes, ülejäänud tarindi punktides kriitilist suhtelist niiskust ei ületatud ning hallitusoht puudub. Seega lisati ka mõõtepunkti nr 3 mudelis uus väljund palgi välispinnast 3 mm sügavusele, et hinnata hallitustekke riski palgi välispinnal (joonis 4.38).



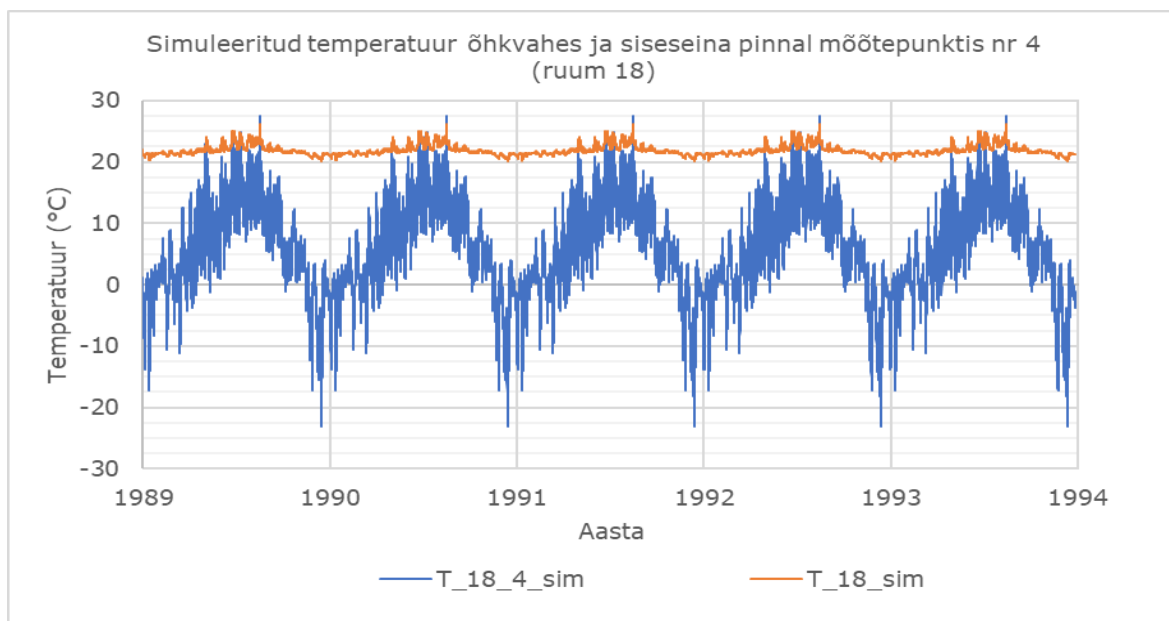
Joonis 4.38. Suhteline niiskus palgi välispinnast 3 mm sügavusel mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)

Ka mõõtepunktis nr 3 jäi osa tulemustest palgi välispinnal hallituse tekkeks soodsale alale ning seega hinnati hallitustekke riski hallitusindeksi abil. Hallitusindeksi väärtus jäi 5 aasta pikkuse simulatsiooni lõpuks taas kõvasti madalamaks kui 1, seega hallituse oht uuritud punktis puudub. Maksimaalne suhteline õhuniiskus aurutõkke ees jäi 70% lähedusse.

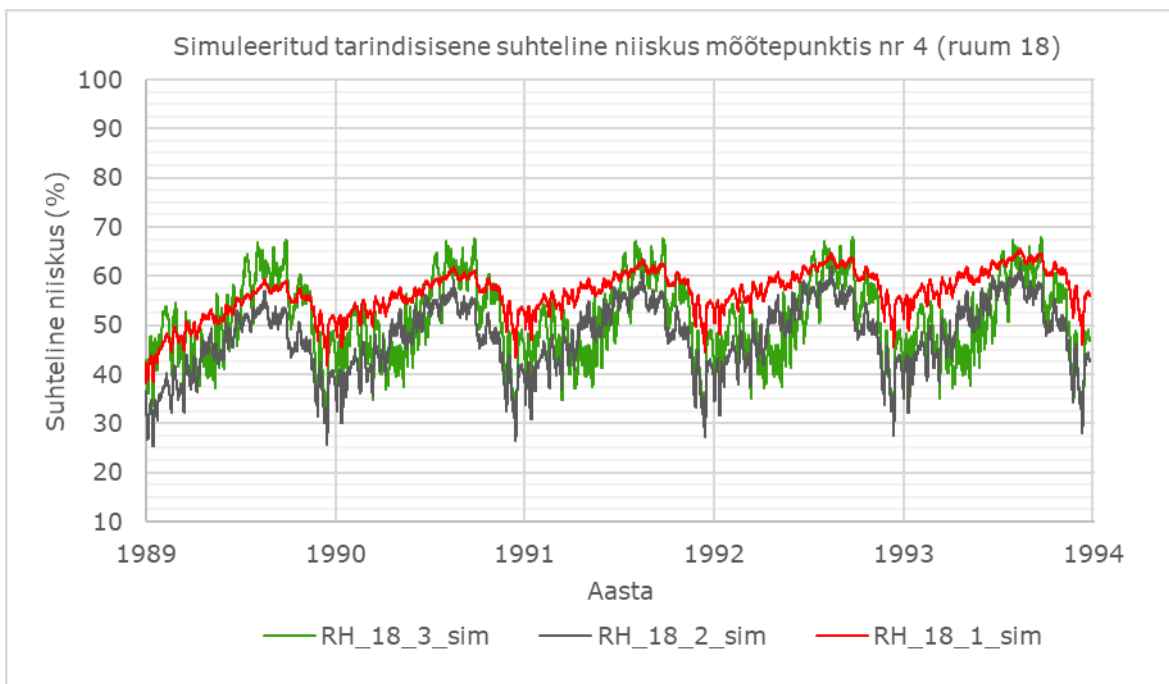
Mõõtepunkti nr 4 simulatsiooni tulemused on toodud joonistel 4.39 – 4.42.



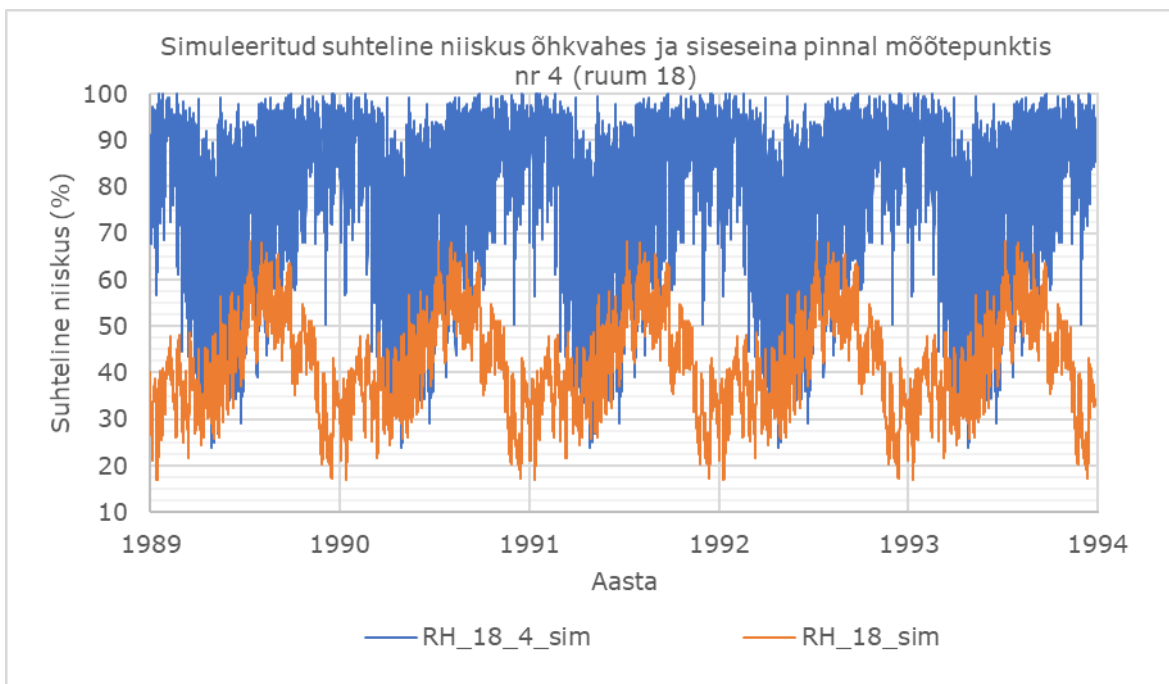
Joonis 4.39. Simuleeritud tarindisisesed temperatuurid mõõtepunktis nr 4 (ruum 18 ehk lõunapoolne magamistuba)



Joonis 4.40. Simuleeritud temperatuur õhkvahe ja siseseina pinnal mõõtepunktis nr 4 (ruum 18 ehk lõunapoolne magamistuba)



Joonis 4.41. Simuleeritud tarindisene suhteline niiskus mõõtepunktis nr 4 (ruum 18 ehk lõunapoolne magamistuba)



Joonis 4.42. Simuleeritud suhteline õhuniiskus õhkvahe ja siseseina pinnal mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)

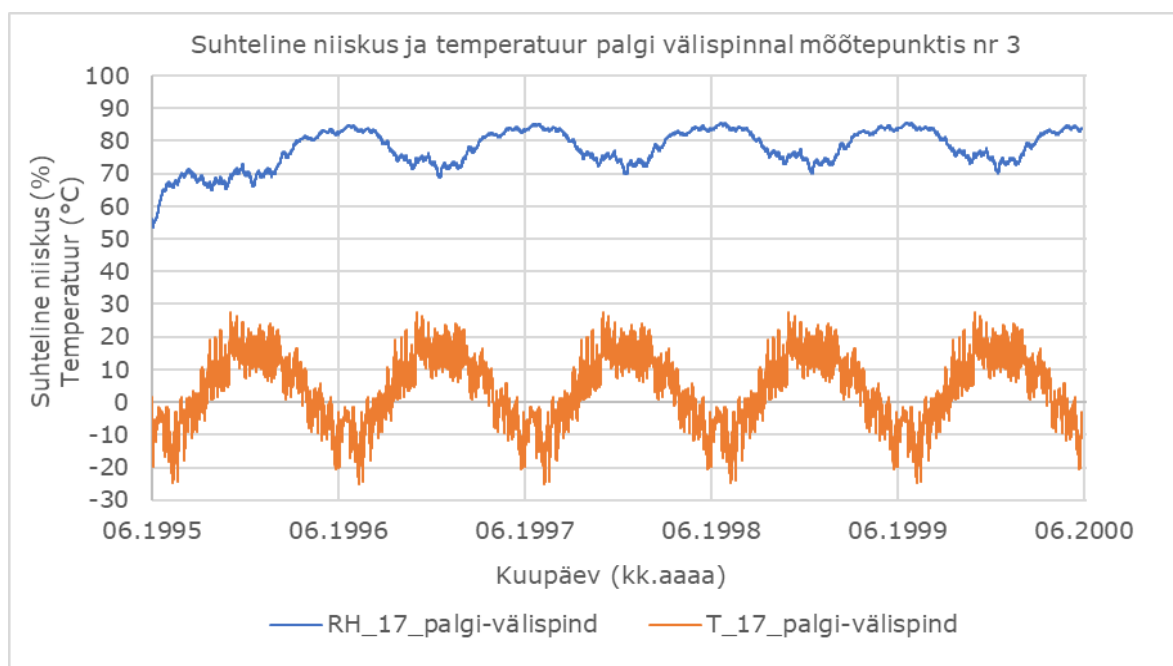
Kuna mõõtetulemused kõikides punktides olid sarnased ning pikaajalises simulatsioonis kasutati samu kriitilisi ääretingimusi, ei tekkinud suuri erinevusi ka mõõtepunktis nr 4. Kriitiline suhteline niiskuse ületati vaid õhkvahe ning tarindi sees oli kõrgeim suhtelise

õhuniiskuse väärtus (68%) aurutõkke ees. Hallitusindeks palgi pinnal jäi eelnevate mõõtepunktidega samasse suurusjärku (0,12) ehk alla 1, seega oht hallituseks puudus. Kohati kõrge suhteline õhuniiskus aurutõkke ees (köögis ja ühes magamistoas maksimaalne 71% + kalibreerimine tagavara kahjuks) ja palgi sisepinnal (maksimaalne 68%) viitavad sellele, et niiskuskooormuse suurenemisel on just need punktid hallituse tekkeks kriitiliseimad. Samas oli hoone tavapärasest kasutuses enne mõõtmisperioodi ja ka mõõtmisperioodi jooksul, mistõttu ei ole hetkel põhjust niiskuskooormuse suurenemist eeldada.

4.3.3 Kondenseerumise kontroll niiskustehniliste mudelitega

Kondenseerumise kontrolliks kasutati välise ääritingimustena Väike-Maarjas perioodil 1.06.1995 – 31.05.1996 mõõdetud kriitilisi kliimaandmeid. Sarnaselt hallitustekke kontrollile kasutati sisemiste ääritingimustena madalaima niiskuskooormusega suhtelise õhuniiskuse väärtusi. Ka kondenseerumisrisiki hindamiseks lisati igas mõõtepunktis lisaks siseseina pinnal, aurutõkke ees, aurutõkke taga, palgi sisepinnal ja õhkvahe olevatele väljunditele uus väljund palgi välispinnast 3 mm sügavusele.

Kondenseerumiskontrolli simulatsioonide tulemused olid taas kõikides mõõtepunktides omavahel väga sarnased, seega on joonisel 4.43 näitena toodud mõõtepunkti nr 3 tulemused palgi välispinnast 3 mm sügavusele lisatud väljundi korral.



Joonis 4.44. Temperatuur ja suhteline niiskus palgi välispinnast 3 mm sügavusel mõõtepunktis nr 3 (ruum 17 ehk põhjapoolne magamistuba)

See on uuritava tarindi puhul kondenseerumiseks ohtlikuim punkt, kuna temperatuur võrreldes teistega punktidega (aurutõkke ees, aurutõkke taga, palgi sisepinnal) on madalam, kuid suhteline õhuniiskus jällegi kõrgem. Graafikult on näha, et maksimaalne suhteline niiskus selles punktis on ligikaudu 85%. Arvestades ka võimalikku mõõteviga ja kalibreerimistulemuste erinevusi, jääb suhteline õhuniiskus tõenäoliselt kriitilisest piirist madalamaks (98%), kuid on sellele väga lähedal.

Kondenseerumist ei tuvastatud ühegi ruumi üheski tarindisiseses punktis.

5 JÄRELDUSED

5.1 Tarindi toimivuse hindamine mõõtetulemuste põhjal

Tarindisisesest punktides mõõdetud temperatuur ja suhteline õhuniiskus jäid kõikides mõõtepunktides nii hallituse kui kondenseerumise tekkeks piisavalt madalaks, nende tekkeks soodsat olukorda ei tekkinud kogu mõõteperioodi jooksul kordagi ning tagatud oli ka küllaldane varu. Maksimaalne tarindisise suhteline õhuniiskus 50% mõõdeti ruumis nr 18 (lõunapoolne magamistuba) asuva mõõtepunkti nr 4 palgi sisepinnalt märtsi lõpus, kuid 50% piir ületati mõõtepunktis kokku vaid väga üksikutel juhtudel.

Niiskustehnilise toimivuse hindamist mõõtetulemuste põhjal halvendas asjaolu, et talv oli püsivalt küllaltki soe – Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi ilmajaama andmetel [37] oli minimaalne välistemperatuur mõõteperioodi jooksul ehk ajavahemikul 13.12.2019 – 03.04.2020 vaid $-7,6$ °C (5.02.2020). Seda toetavad ka õhkvahedest mõõdetud minimaalsed temperatuurid, mis jäid vastavalt mõõtepunktile -5 ja $-6,5$ °C vahele.

Piirete niiskustehnilise toimivuse hindamiseks on oluline tegur hoone niiskukoormus. Arvutatud niiskuslisa oli mõlemas uuritud ruumis pea olematu. Kogu mõõteperioodi keskmine niiskuslisa köögis oli $0,6$ g/m³ ja magamistoas $0,2$ g/m³. Hoone niiskukoormus on otseses seoses inimeste tekitatud niiskustoodanguga ning kuna hoone on küllalt suur ja elanikke vähe (2 – 3), on ka püsiv madal niiskukoormus põhjendatud.

Enne niiskustehniliste mudelite koostamist kontrolliti kondenseerumisohtu difusiooniarvutuste abil. Suurim oht tarindites toimuvaks kondenseerumiseks on talviti ning kuna ka mõõteperiood toimus talvel, kasutati arvutustes siseõhu parameetritena nii mõõdetud kõrgeimat kuu keskmist siseõhu suhtelise niiskuse väärtust $RH_i = 31,5\%$ kui ka kogu mõõteperioodi jooksul mõõdetud maksimaalset suhtelist õhuniiskust $RH_i = 41\%$ (mõlemal juhul soojema perioodi korral $RH_i = 50\%$). Tegelik veeauru osarõhk P_{teg} veeauru küllastusrõhku P_{sat} ei ületanud ja seega nende arvutustulemuste põhjal kondenseerumist ei esine.

5.2 Tarindi toimivuse hindamine õhulekkestesti ja termograafia põhjal

Õhulekkestesti ja termograafia abil tuvastatud temperatuurierinevused **-50 Pa alarõhu tingimustel** olid suured. Suurimad temperatuurierinevused tuvastati välisseina ja vahelae ning välisseina ja avatäidete liitumiskohtades, lisaks ka ventilatsioonivade väljaviikudes. Madalaima temperatuuriindeksiga ($f_{R_{si}} = 0,098$) punkt asus akna ja välisseina ühenduskohas. Sellises punktis peaks temperatuuriindeksi väärtus olema suurem kui 0,55. Madalaim temperatuuriindeks vahelae ja välisseina ühenduskohas oli $f_{R_{si}} = 0,366$, kuid peaks olema suurem kui 0,8.

Vahelae ja välisseina soojustehnilist toimivust kontrolliti tarkvaraga *LBNL Therm*. Arvutuste tulemusena saadi välisseina ja vahelae liitekohta joonsoojuslähivuseks $\psi = 0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, mis on igati hea tulemus. Mudelis tuvastatud madalaima sisepinna temperatuuri järgi arvutati ka temperatuuriindeks $f_{R_{si}} = 0,9$. Selliselt projekteeritud lahendust võib lugeda soojuslikult toimivaks ning võib eeldada, et termograafia abil tuvastatud madalad temperatuuriindeksid vahelae ja välisseina liitekohtades on põhjustatud eelkõige tekitatud alarõhust, hoone vanusest tingitud eripäradest ja/või ehitusvigadest.

Ventilaatoriga survestamise meetodil tuvastati küllalt suured õhulekked, mis soodustavad konvektsiooni ja madaldavad temperatuuri tarindis, mis omakorda tõstavad riski hallituse või kondenseerumise tekkeks. Seeläbi suureneb ka vajadus põhjaliku niiskustehnilise toimivuse kontrolli järele ning niiskustehniliste mudelite koostamine on selleks hea lahendus.

5.3 Tarindi toimivuse hindamine niiskustehniliste mudelite põhjal

Kõigis kolmes simuleeritud mõõtepunktis ületati hallituse tekkeks vajalik kriitiline suhteline õhuniiskus vaid õhkvahe, mistõttu kontrolliti hallitusohtu palgi välispinnast 3 mm sügavusel. Kuigi hallitusindeks palgi välispinnal näitas 5 aasta jooksul kõikides mõõtepunktides kasvutrendi ning veelgi pikema simulatsiooni tulemusena tõenäoliselt ületaks lõpuks ka hallituse tekkeks kriitilise piiri ehk hallitusindeksi väärtus oleks suurem

kui 1, ei oleks veel ületatud lubatud piir, sest palgi välispind ei ole otseses kokkupuutes ei sise- ega väliskeskkonnaga (väljaspoolt kaetud tellisfassaadiga), mistõttu on punktis lubatav hallitusindeks kõrgem. Palgi sisepinnal hallituse kasvuks soodsaid tingimusi ei tekkinud ning selleks oli tagatud ka piisavalt suur varu. Hallituse tekke vältimist palgi välispinnal toetavad sealsed madalamad temperatuurid, kondenseerumise seisukohalt on need aga ohtlikud. Suhteline õhuniiskus tõusis ka aurutõkke ees tsükliliselt küllaltki kõrgele (maksimaalselt 71%, juurde tuleb arvestada ka mudeli kalibreerimine tagavara kahjuks) ning kuna temperatuur aurutõkke ees on võrreldes palgi välispinnaga tunduvalt kõrgem, võib niiskuskooormuse suurenedes tekkida ka hallitusoht.

Seespoolse soojustusega palkseinte puhul on hallituse tekkest olulisem kindlaks määrata võimalik kondensvee teke ja selle akumulatsioon, sest liigniiskus, mis palkseinast välja kuivada ei jõua, tekitab soodsad tingimused mädaniku kasvuks, mis omakorda halvendab juba puidu mehaanilisi omadusi. Kõrgeimad suhtelised õhuniiskused kondenseerumiseks kriitiliste kliimaandmetega tekkisid samuti palgi välispinnalt 3 mm sügavuselt ulatudes 88%-ni. Ka kondenseerumise puhul ei olnud kriitiline piir (98%) ületatud, kuid arvestades potentsiaalset anduri mõõteviga ja kalibreerimisel tekkinud vigasid, siis on tulemused palgi pinnal kriitilisele piirile küllaltki lähedal.

Maksimaalsed suhtelise õhuniiskuse tulemused tarindisiseses mõõtepunktides on koondatud tabelisse 5.1. Tabelis on toodud vastava väljundi maksimaalne mõõdetud suhteline õhuniiskus kasutades väliskliima tingimustena nii kondenseerumiseks (tähis K) kui hallituse tekkeks (tähis H) kriitilist testaastat, kui sisekliima niiskuskooormusena on kasutatud madalaimale niiskusklassile vastavat niiskuslisa ($\Delta v = 2 \text{ g/m}^3$).

Tabel 5.1. Maksimaalsed mõõdetud õhuniiskused vastavalt

Tähis	Väljundi asukoht	Kliimaandmed	RH_{max} (%)
RH_10_1	Palgi sisepind	H	68
		K	61
RH_10_1_palgi-välispind	Palgi välispinnast 3 mm sügavusel	H	88
		K	86
RH_10_2	Aurutõkke taga välisõhu pool	H	66
		K	59
RH_10_3	Aurutõkke ees siseõhu pool	H	71
		K	65

Tabel 5.1 järg

RH_17_1	Palgi sisepind	H	64
		K	62
RH_17_1_palgi-välispind	Palgi välispinnast 3 mm sügavusel	H	88
		K	88
RH_17_2	Aurutõkke taga välisõhu pool	H	62
		K	61
RH_17_3	Aurutõkke ees siseõhu pool	H	71
		K	71
RH_18_1	Palgi sisepind	H	66
		K	65
RH_18_1_palgi-välispind	Palgi välispinnast 3 mm sügavusel	H	88
		K	86
RH_18_2	Aurutõkke taga välisõhu pool	H	63
		K	63
RH_18_3	Aurutõkke ees siseõhu pool	H	68
		K	68

Eeltoodu põhjal järeldub, et madalaimal niiskuskooormusel ($\Delta v = 2 \text{ g/m}^3$) puudub uuritud punktides oht nii hallituseks kui kondenseerumiseks. Tuleb arvestada ka sellega, et soojus- ja niiskuslevi mudelid koostati vaid tarindite keskosas asuvatele 1D punktidele, mistõttu puudub ülevaade hoone 2D sõlmede toimivusest. Kuigi anduritega mõõtes ei tuvastatud suuri erisusi köögis seinakeskosa (mõõtepunkt nr 1) ja välisseina-vahelae liitekoha (mõõtepunkt nr 2) tulemuste vahel, viitas sõlme võimalikele probleemidele alarõhutesti ja märkesuitsu tulemus.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärk oli uurida seespoolse soojustusega palkseinte niiskustehnilist toimivust ühe konkreetse lahenduse näitel. Uuritava hoone näol oli tegemist 1980. aastatel ehitatud kahekorruselise elumajaga, mille välisseinad rekonstrueerimise käigus seespoolset soojustati. Uuritud välispiirde kihid väljastpoolt sisse on: tellisfassaad, õhkvahe, palksein, horisontaalne puitkarkass (vahel märgpuiste tselluvill), muutuva aurutakistusega aurutõkkekembraan, vertikaalne metallkarkass (vahel märgpuiste tselluvill) ning viimaseks lubikrohviga kaetud viimistlusplaat.

Niiskustehnilise toimivuse hindamiseks tehti esmalt hoones õhulekketest ning termograafia. Õhulekketest ja termograafia tulemusena oli võimalik valida välja kriitilised punktid, kuhu paigaldada suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri mõõtvad andurid. Valiti 4 mõõtepunkti, igasse punkti paigaldati 5 andurit: siseseina pinnale, aurutõkke ette, aurutõkke taha, palgi pinnale ning õhkvahesse. Lisaks mõõdeti nendes ruumides, kus valitud mõõtepunktid asusid, suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri *Green Eye* mõõteseadmetega. Kõik mõõteseadmed salvestasid tulemusi 15 minuti pikkuse intervalliga. Mõõteperiood simulatsioonimudelite kalibreerimiseks kestis 13.12.2019 – 03.04.2020.

Mõõtetulemuste põhjal oli võimalik arvutada hoone niiskukoormus. Hoone niiskukoormus oli väga madal – kogu mõõteperioodi jooksul ületati 2 g/m^3 niiskuslisa kõrgis vaid 1,4% kõikidest tulemustest ning magamistoas vaid 0,3% tulemustest. Seega kasutati simulatsioonide sisekliima andmetena madalaima niiskuslisa suhtelise õhuniiskuse väärtusi.

Seejärel kalibreeriti mõõtetulemuste põhjal simulatsioonitarkvaraga *Delphin 5.9* koostatud mudelid ning koostada 5 aasta pikkused simulatsioonid nii hallitus- kui kondenseerumisrisi hindamiseks. Väliste tingimustena kasutati vastavalt Eesti kliimale välja töötatud niiskustehnilisi testaastaid [3] ehk 1989 – 1990. ja 1995 – 1996. aastal Väike-Maarjas mõõdetud andmeid.

Hallitusrisi ei tuvastatud ühegi mõõtepunkti üheski uuritavas punktis. Kuigi kõikides mõõtepunktides ületas suhteline õhuniiskus palgi välispinnast 3 mm hallituse tekkeks kriitilist piiri, ei tõusnud hallitusindeks 5 aasta lõpuks üle 0,17 ehk hallitusindeks jäi madalamaks kui 1 ja seega hallitusoht punktides puudub. Tarindisene maksimaalne suhteline õhuniiskus tõusis 71%-ni aurutõkke ees, kus mudelid olid kõikides punktides kalibreeritud tagavara kahjuks. Tõenäoliselt oleks tegelikkuses kriitiliste välistingimuste

korral suhteline õhuniiskus selles punktis kõrgem ning niiskuskooormuse suurenedes võib tekkida ka oht hallituseks.

Kondenseerumise korral ei tuvastatud üheski määtepunktis selle tekkeks vajaliku kriitilise õhuniiskuse ületust. Maksimalne suhteline õhuniiskus oli 88% (palgi välispinnast 3 mm sügavusel). Lisades sellele ka võimalikud vead, jääb tulemus sarnaselt hallitusele kriitilisele piirile väga lähedale.

Ei saa välistada võimalust, et kuna mudel kalibreeriti ühtlase ja küllaltki sooja talve tingimustes määdetud andmete põhjal (määteperioodi jooksul oli minimaalne välisõhu temperatuur $-7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), siis ei tekkinud piisavalt võimalusi tarindis toimuvate eripärade ilmnemiseks. Seetõttu oleks igati soovitatav võimalusel määtmisi jätkata ja arvutusi tulevikus korrata. Lisaks võiks edasine uuring käsitleda ka vahelae 2D sõlmede niiskustehnilise toimivuse hinnangut.

Kokkuvõttes võib öelda, et madalaima niiskuskooormuse korral on uuritud punktides konkreetne lahendus toimiv.

SUMMARY

The aim of the thesis was to evaluate hygrothermal performance of log walls with internal cellulose fibre wool insulation on the example of one specific solution. The examined building was a two-storey residential building built in 1980s. During reconstruction its external walls were insulated internally. The layers (from outside to inside) of the examined walls are: brick, air gap, log wall, horizontal timber frame (with cellulose fibre wool insulation), „smart“ vapour retarder, vertical metal frame (with cellulose fibre wool insulation) and gypsum fibreboard with covered with lime plaster.

In order to evaluate the hygrothermal performance, a building leakage test and thermography were carried out first. As a result of these tests, it was possible to select critical points to install sensors which measure relative humidity and temperature. 4 measuring points were selected, each point was fitted with 5 sensors: on the internal surface of the wall, in front and behind of the vapor barrier, on the internal surface of the log in the air gap. In addition, relative humidity and temperature of the room air were measured with Green Eye device. All measuring devices recorded results at interval of 15 minutes. The measuring period for calibrations of simulation models lasted 13.12.2019 – 03.04.2020.

As a result from the measurements, it was possible to calculate the moisture load of the building, which was very low. During the entire measurement period, the internal moisture excess was higher than 2 g/m^3 in the kitchen by only 1,4% of all results and only 0,3% of the results in the bedroom. Therefore, as indoor climate data for simulations the values of relative humidity with the lowest moisture loads were used.

Based on the measurement results, it was possible to calibrate hygrothermal models with simulation software Delphin 5.9. After that, 5 year-long simulations for the evaluation of mould and condensation risk were accomplished. The external conditions for simulations were based on the moisture reference years. A chosen critical year for the risk of mould growth were measured in 1989 to 1990 in Väike-Maarja and a critical year in the risk of condensation were measured in 1995 to 1996 also in Väike-Maarja.

The risk of mould growth was not detected at any measuring points. Although at all measuring points, the critical relative humidity for mould growth (80%) over the external surface of the log were exceeded, the mould index did not exceed 0,17 at the end of 5-year simulation. Mould index remained below 1 and therefore the risk of mould growth is not present. The maximum relative humidity in front of the vapour barrier

increased to 71%. In all calibration models measured relative humidity in front of the vapour barrier were higher than calculated relative humidity, which means that in practice the relative humidity at this point is likely to be higher and the risk of mould growth may develop as the indoor moisture load increases.

In the case of condensation, the critical humidity needed was also not detected at any measurement. The maximum simulated relative humidity was 88% (3 mm from the external surface of the log). Also, by adding possible calculation and calibration errors, the result remains very close to the critical limit, but does not exceed it.

Since the model was calibrated on the basis of fairly mild and steady winter conditions (the minimum outdoor temperature during the measurement period was $-7,6$ °C), there is possibility that there were not enough opportunities for different peculiarities of the wall to appear. Therefore, it would be recommended to continue the measurement and repeat calculations in the future if possible.

In conclusion, with the lowest indoor moisture loads at the specific observed points the solution tested is functional.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Alev, Ü., Arumägi, E., Kalamees, T. (2018). Performance of interiorly insulated log wall: Experiences from Estonian cold climate conditions. *Conference Report: The 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings*, lk 99 – 107.
- [2] Alev, Ü. (2018) Maja soojustamise ehitusfüüsika. *Vana maja soojustamise õppepäev*. 15. märts 2018.
https://www.muinsuskaitseamet.ee/sites/default/files/news-related-files/ullar_alev_-_soojustamise_ehitusfuusika.pdf (14.04.2020)
- [3] Kalamees, T., Vinha, J. (2004). Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27(3), lk 199 – 220.
doi: 10.1177/1097196304038839
- [4] Hukka, A., Viitanen, H. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, 33(6), lk 475 – 485.
doi:10.1007/s002260050131
- [5] Ojanen, T., Viitanen, H. Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials. (2007). *Proceedings of the 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference, 2007*.
- [6] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K. (2010). Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, 2010*.
- [7] Viitanen, H., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Vinha, J., Lähdesmäki, K., Salminen, K. Mould Growth Modelling to Evaluate Durability of Materials. (2011). *International Conference on Durability of Building Materials and Components. Conference proceedings, 2011*, lk 409 – 416.
- [8] Albreht, L. Ruumiõhu sündroom.
<https://www.terviseamet.ee/sites/default/files/ruumiohk.pdf> (12.04.2020)
- [9] Seppänen, O., Seppänen, M. (1998). *Hoone sisekliima kujundamine*. Tallinn: Koolibri.
- [10] Tallinna Tehnikaülikool. (2016). Olemasolevate hoonete sisekliima hindamise juhend.
https://www.rkas.ee/sites/default/files/public-uploaded-files/juhendid/Olemasolevate_hoonete_sisekliima_hindamise_juhend_2016.pdf (20.04.2020)
- [11] Eluruumile esitatavad nõuded. (02.07.2015). *Riigi Teataja*.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/124082018002> (28.04.2020)

- [12] EVS-EN 16798-1:2019, Hoonete Energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6. (2019). *Eesti Standardikeskus*.
- [13] Alev, Ü. Kuidas vana palkelamut läbimõeldult soojustada? (2013). *Ehitaja, 2013* (7), lk 51 – 55.
- [14] Klöšeko, P., Arumägi, E., Kalamees, T. (2014). Hygrothermal performance of internally insulated brick wall in cold climate: A case study in a historical school building. *Journal of Building Physics, 2015* 38(5), lk 444 – 464.
doi:10.1177/1744259114532609
- [15] Kalamees, T. (2004). Niiskus puitkarkasspiiretes. *Puit ehituses*, lk 22 – 24.
- [16] Abel, E., Voll, H. (2010). *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. Tallinn: Presshouse OÜ.
- [17] Masso, T. (2014). Ehitusfüüsika. *Ehituskonstruktori käsiraamat*, lk 141-179. Tallinn: Ehitame.
- [18] Tallinna Tehnikaülikool. (2017). Liginullenergia eluhooned. Väikemajad.
https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Liginullenergia_eluhooned_Vaikemaja_juhend.pdf (30.04.2020)
- [19] Pukk, T., Jõgioja, M. (2013). Olemasolevate hoonete infiltratsioon ja selle mõju energiatõhususele. *EKVÜ jätkukoolitus praktiseerivale insenerile*. Tallinn, 3. september 2013.
https://www.ekvy.ee/attachments/article/17/EKV%C3%9C%20seminar%20olemasolevate%20hoonete%20INFILTRATSIOON_03.09.13_Pukk.pdf (02.05.2020)
- [20] EVS-EN ISO 10211:2017, Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailsed arvutused. (2017). *Eesti Standardikeskus*.
- [21] EVS-EN ISO 13788:2012, Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisisesse kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid. (2013). *Eesti Standardikeskus*.
- [22] Kalamees, T. *Ehitusfüüsika II osa*. Õppematerjal.
https://www.ttu.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika_II_Osa_T_Kalamees.pdf (04.05.2020).
- [23] Täheväli Stroh, L. (2005). *Maja ja niiskus*. Tallinn: AS Ajakirjade Kirjastus
- [24] EVS 932:2017, Ehitusprojekt. (2014). *Eesti Standardikeskus*
- [25] Kalamees, T., (2007). Hoone niiskuskoormust aitab arvutada niiskuslisa väärtus. *Ehitaja, 2007* 11, lk 62 – 65.
- [26] Ruus, A. *Vesi materjalides. Vee liikumine materjalides. Difusiooni arvutus*. Loengumaterjalid. Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledž.
- [27] Straube, J. (2006). Moisture and Materials. *Building Science Digest* 138.

<https://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-138-moisture-and-materials>
(06.05.2020)

[28] Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M., Woloszyn, M. (2018). Experimental validation of hygrothermal models for building materials and walls: an analysis of recent trends.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01678857/document> (16.05.2020)

[29] Delgado, J., Ramos, N., Barrera, E., Freitas, V.P. (2010) A critical review of hygrothermal models used in porous building materials. *Journal of Porous Media*, 2010 13(3), lk 221 – 224.

doi:10.1615/JPorMedia.v13.i3.30

[30] Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., Zirkelbach, D. (2015) Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. *Energy Procedia*, 2015 78, lk 1425 – 1430.

doi:10.1016/j.egypro.2015.11.165

[31] EVS 908-1:2016, Hoone piirdetarindi soojuslähivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire. (2016). *Eesti Standardikeskus*.

[32] EVS-EN ISO 10456:2008/AC:2009, Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid. (2010). *Eesti Standardikeskus*.

[33] *Pro Clima Intello kodulehekülg*.

<https://proclima.com/products/internal-sealing/intello> (20.03.2020).

[34] Fermacell kipskiudplaadid. (2019). *Eesti Ehitusteave*.

<http://www.ehitusteave.ee/pdf/02051429.pdf> (20.03.2020)

[35] EVS-EN 13187:2001, Thermal performance of buildings – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method. *Eesti Standardikeskus*.

[36] EVS-EN ISO 9972:2015, Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhulekke määramine. Ventilaatoriga survestamise meetod. *Eesti Standardikeskus*.

[37] Tartu Ülikooli keskkonnafüüsika instituudi ilmajaam internetis

<https://meteo.physic.ut.ee/> (13.03.2020)

[38] *Termokaamera Flir E6 koduleht*.

<https://www.flir.com/products/e6/> (13.03.2020)

[39] *BlowerDoor süsteemi tootja koduleht*.

<https://www.blowerdoor.com/measurement-systems/blowerdoor-standard>
(13.03.2020)

[40] *Hobo UX100-023A andurite tootja koduleht*.

<https://www.onsetcomp.com/datasheet/UX100-023A> (13.03.2020)

[41] *GreenEye mõõteseadme edasimüüja koduleht*.

<https://www.az-instrument.com.tw/en/product-616384/CO2-Recorder-7798-AZ.html>
(13.03.2020)

[42] Nicolai, A., Grunewald, J., Zhang, J.S. (2007). Recent improvements in HAM simulation tools: Delphin 5 / CHAMPS-BES. *Conference Proceedings of 12th Symposium of Building Physics, 2007*, lk 866 – 876.

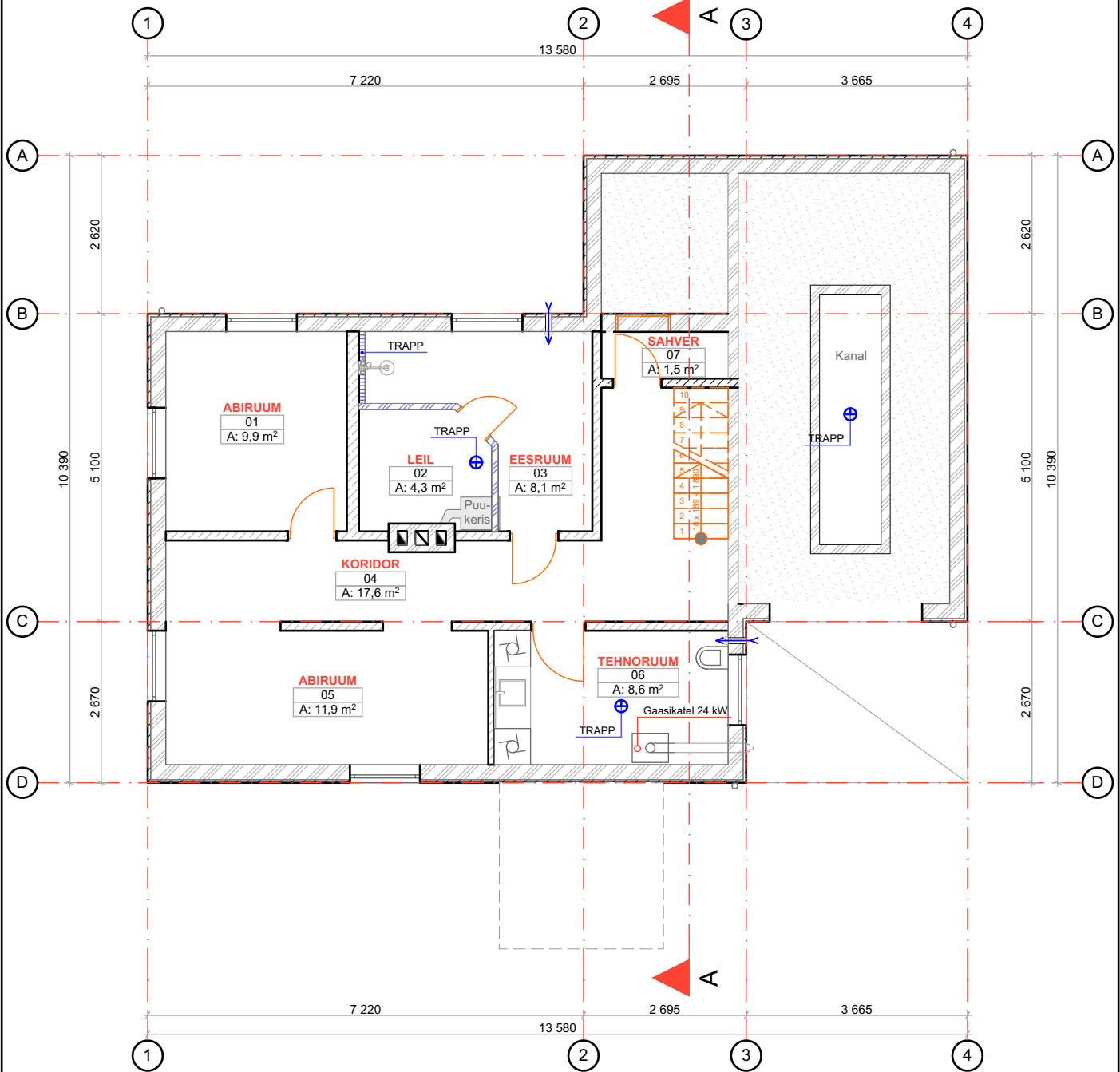
https://www.researchgate.net/publication/278673185_Recent_improvements_in_HAM_simulation_tools_Delphin_5_CHAMPS-BES (10.05.2020)

[43] *Simulatsioonitarkvara Delphin koduleht.*

<https://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php> (22.04.2020)

LISAD

5.1 Keldrikorruse plaan 1:100



Tingmärgid:

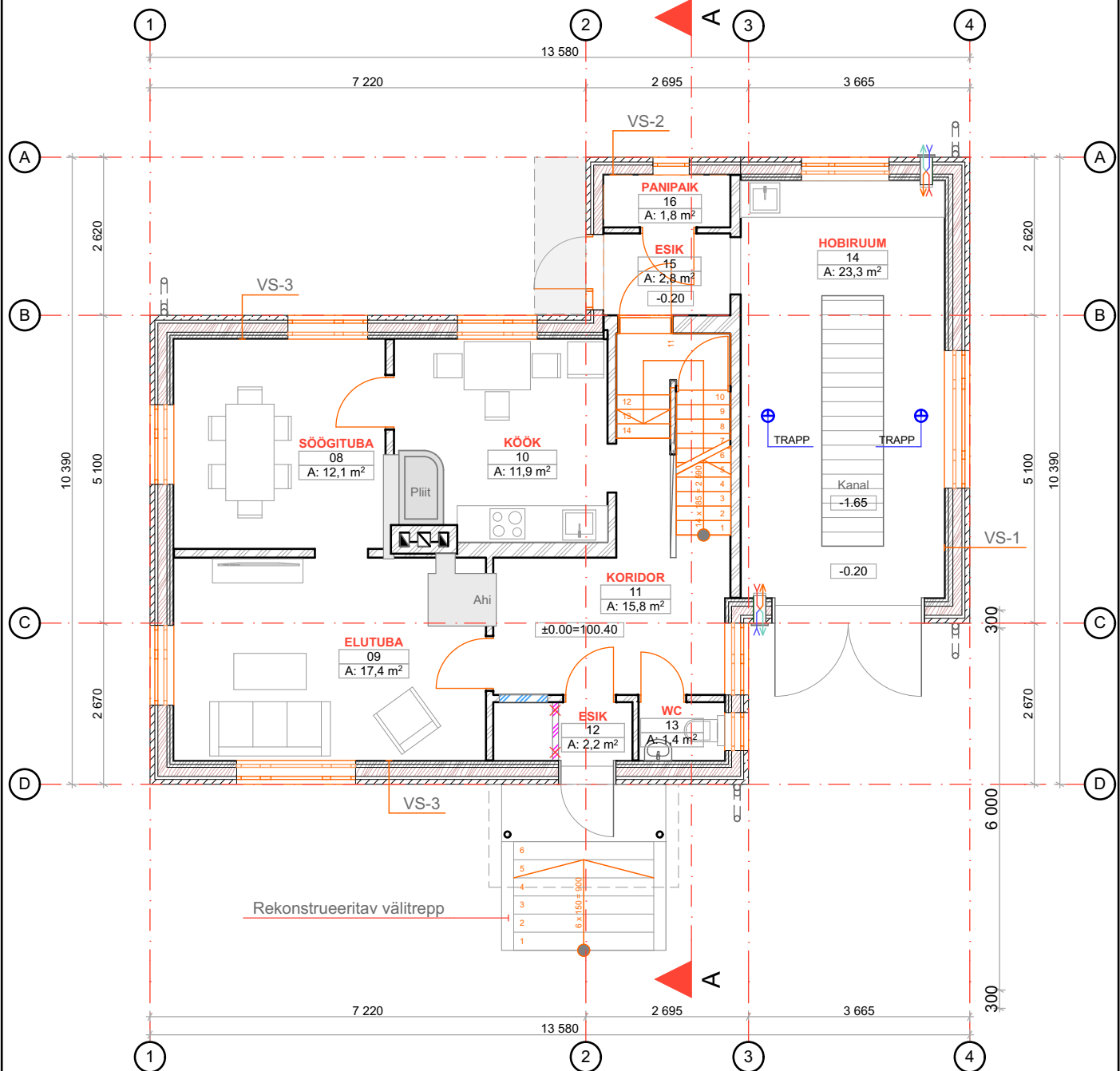
Rajatav vahesein

Värskedõuklapp

Märkused:

1. Olemasolevat keldri ruumiprogrammi ei muudeta, muutub osaliselt ruumide otstarve.
2. Olemasolev sokkel säilib.
3. Ühikuta mõõdud antud millimeetrites

MUUDATUSE KIRJELDUS		NIMI	ALLKIRI	KUUPÄEV
WEIDENBERG Weidenberg OÜ Registrinumber 11500125 e-post: info@weidenberg.ee tel: +372 508 2249 / +372 73 119 70 Raekoja plats 1 / Ülikooli 7, 51003 Tartu, Eesti MTR reg. nr. EEP001430 EPE000519 EEK000638 EEO001982 EHA000076 EHM000129		Tellija Rain Veidenberg	Asukoht Kure 3, Tartu linn, Tartumaa	
Projekt Senni Vels		Töö nimi Kure 3 üksikelamu rekonstrueerimise ehitusprojekt		
Joonis Senni Vels	Projektijuh Senni Vels	Joonise nimi Keldrikorrus		
	Vastutav spetsialist Ragnar Pabort	Tartu 04/10/2019	Töö nr 2019-39	Eriala AR
		Stadium EP	Skaala 1:100	Nr / formaat 5.1 / A4

**VS-1 U= 0,22 W/(m²K)**

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- hor. karkass, 75 x 50 mm, vahel tselluvill (märgpuiste)
- aurutõke, liited teibitult (Intello)
- vert. karkass, 50 x 50 mm, tselluvill (märgpuiste) ("kommunikatsioonide kiht")
- viimistlusplaat (Fermacell)
- lubitsementkrohv
- akrülaatvärv

VS-2, U=0,68 W/(m²K)

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- lubikrohv

VS-3, U= 0,28 W/(m²K)

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- hor. karkass, 50 x 50 mm, vahel tselluvill (märgpuiste)
- aurutõke, liited teibitult (Intello)
- vert. metallkarkass VP 42/32, vahel tselluvill 42 mm (märgpuiste) ("kommunikatsioonide kiht")
- viimistlusplaat (Fermacell)
- savi/lubikrohv

Tingmärgid:

- Lammutada vahesein
- Rajatav vahesein
- Soojustagastiga kohtventilatsioon

Märkused:

- Olemasolevaid kandekonstruktsioone ei muudeta.
- Olemasolev välitrepp rekonstrueeritakse.
- Ühikuta mõõdud antud millimeetrites

MUUDATUSE KIRJELDUS**WEIDENBERG**

Weidenberg OÜ
Registri number 11500125
e-post: info@weidenberg.ee
tel: +372 508 2249 / +372 73 119 70
Raekoja plats 1 / Ülikooli 7, 51003 Tartu, Eesti
MTR reg. nr. EEP001430 EPE000519 EEK000638 EEO001982 EHA000076 EHM000129

Tellija
Rain Veidenberg

Asukoht
Kure 3, Tartu linn, Tartumaa

Töö nimi
Kure 3 üksikelamu rekonstrueerimise ehitusprojekt

Projekt
Senni Vels
Joonis
Senni Vels

Projektijuh
Senni Vels
Vastutav spetsialist
Ragnar Pabort

Joonise nimi
Esimese korrus

Tartu
04/10/2019

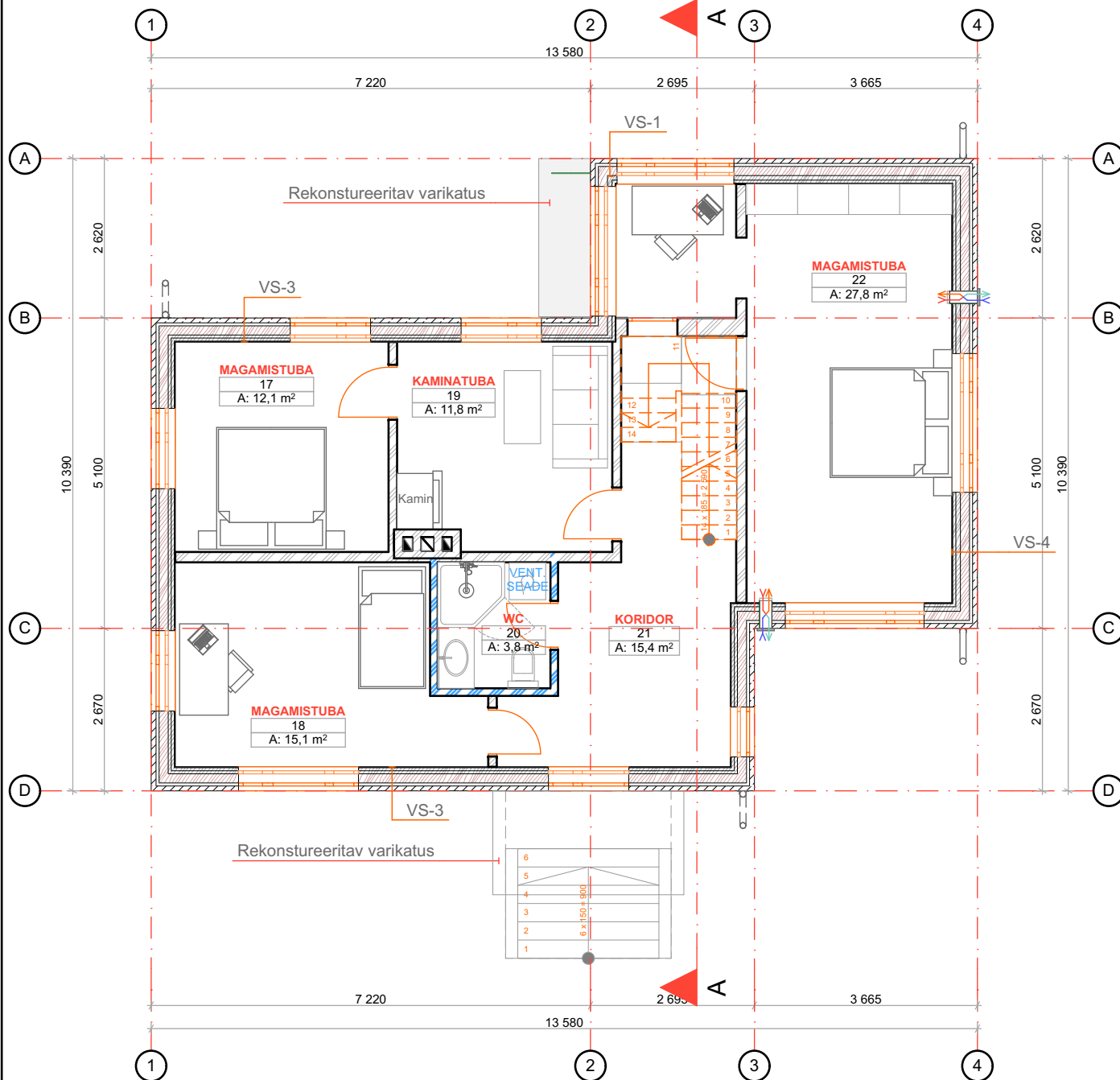
Töö nr
2019-39

Eriala
AR

Stadium
EP

Skaala
1:100

Nr / formaat
5.2 / A4

**VS-4 U= 0.20 W/(m²K)**

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- tihe laudis + papp
- karkassein 150 mm (täide asendada)
- karkassil tselluvill (märgpuiste)
- aurutõke, liited teibitult (Intello)
- vert. karkass, 75 x 50 mm, vahel tselluvill
- kipsplaat+akrülaatvärv

VS-2, U=0.68 W/(m²K)

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- lubikrohv

VS-3, U= 0.28 W/(m²K)

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- hor. karkass, 50 x 50 mm, vahel tselluvill (märgpuiste)
- aurutõke, liited teibitult (Intello)
- vert. metallkarkass VP 42/32, vahel tselluvill 42 mm (märgpuiste) ("kommunikatsioonide kiht")
- viimistlusplaat (Fermacell)
- savi/lubikrohv

Tingmärgid:

- Rajatav vahesein
- Soojustagastiga kohtventilatsioon

Märkused:

- Olemasolevaid kandekonstruktsioone ei muudeta.
- Olemasolevad ühekaldised varikatused rekonstrueeritakse lamekatusteks.
- Ühikuta mõõdud antud millimeetrites

MUUDATUSE KIRJELDUS**WEIDENBERG**

Weidenberg OÜ
 Registrinumbr 11500125
 e-post : info@weidenberg.ee
 tel: +372 508 2249 / +372 73 119 70
 Raekoja plats 1 / Ülikooli 7, 51003 Tartu, Eesti
 MTR reg. nr. EEP001430 EPE000519 EEK000638 EEO001982 EHA000076 EHM000129

Tellijä
Rain Veidenberg

Asukoht **Kure 3, Tartu linn, Tartumaa**

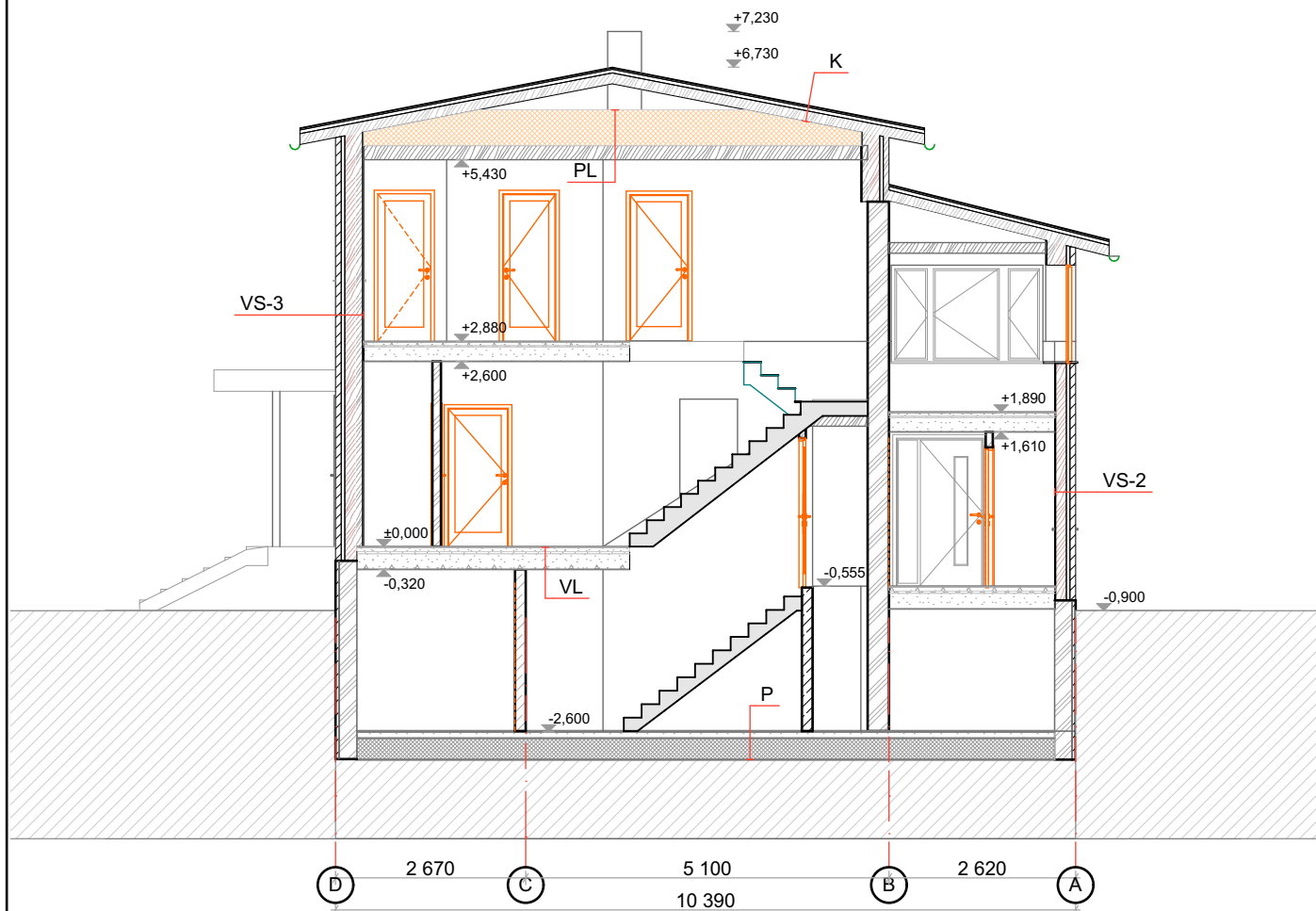
Töö nimi **Kure 3 üksikelamu rekonstrueerimise ehitusprojekt**

Projekt
Senni Vels
 Joonis
Senni Vels

Projektijuht
Senni Vels
 Vastutav spetsialist
Ragnar Pabort

Joonise nimi **Teise korruse plaan**

Tartu 04/10/2019	Töö nr 2019-39	Erialä AR	Stadium EP	Skaala 1:100	Nr / formaat 5.3 / A4
---------------------	-------------------	--------------	---------------	-----------------	--------------------------

**VS-2, $U=0,68 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$**

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- lubikrohv

K

- SBS kate 2x (klaas TL-2)
- OSB plaat 18 mm
- tihe laudis (ol olev)
- sarikad (ol olev)

VL

- põrandalaud 28 mm
- asendatavad põrandatalad 50x150 mm, vahel puistevill
- olemasolev betoonplaat

VS-3, $U=0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

- tellisfassaad
- õhkvahe, 50 mm
- palksein, 150 mm
- hor. karkass, 50 x 50 mm, vahel tselluvill (märgpuiste)
- aurutõke, liited teibitult (Intello)
- vert. metallkarkass VP 42/32, vahel tselluvill 42 mm (märgpuiste)
- ("kommunikatsioonide kiht")
- viimistlusplaat (Fermacell)
- savi/lubikrohv

P, $U=0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

- raudbetoonplaat põrandaküttetorustikuga, 80 mm
- ehituskile
- EPS 100, 250 mm (kahes kihis 150 mm +100 mm)
- ehituskile
- olemasolev liivtäide
- olemasolev pinnas

PL, $U=0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

- puistevill, 250-500 mm
- ehitusaegne soojustus/šlakk (ol olev)
- tihe laudis (ol olev)
- talad (ol olev)
- tihe laudis (ol olev)
- savi/lubikrohv

MUUDATUSE KIRJELDUS

NIMI

ALLKIRI

KUUPÄEV

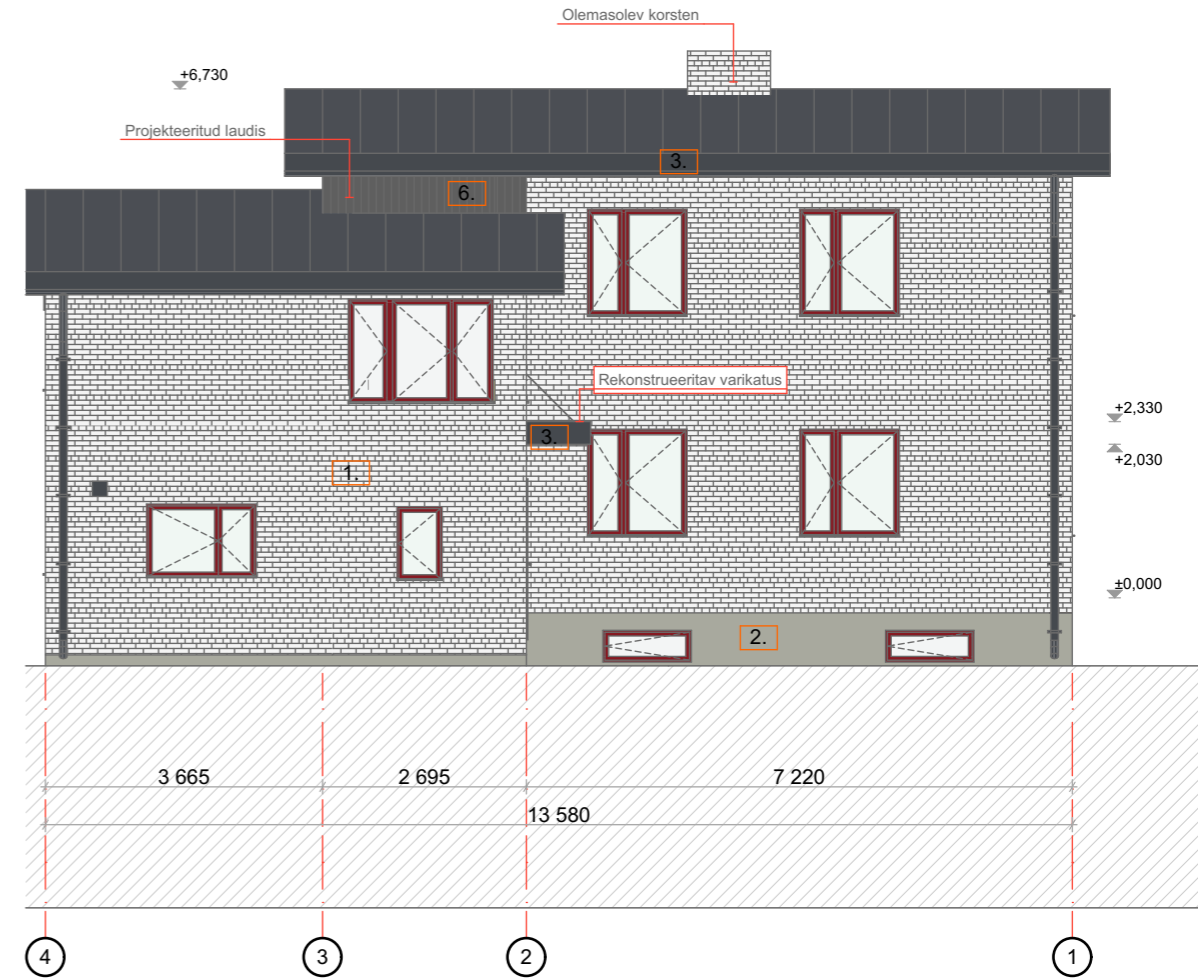
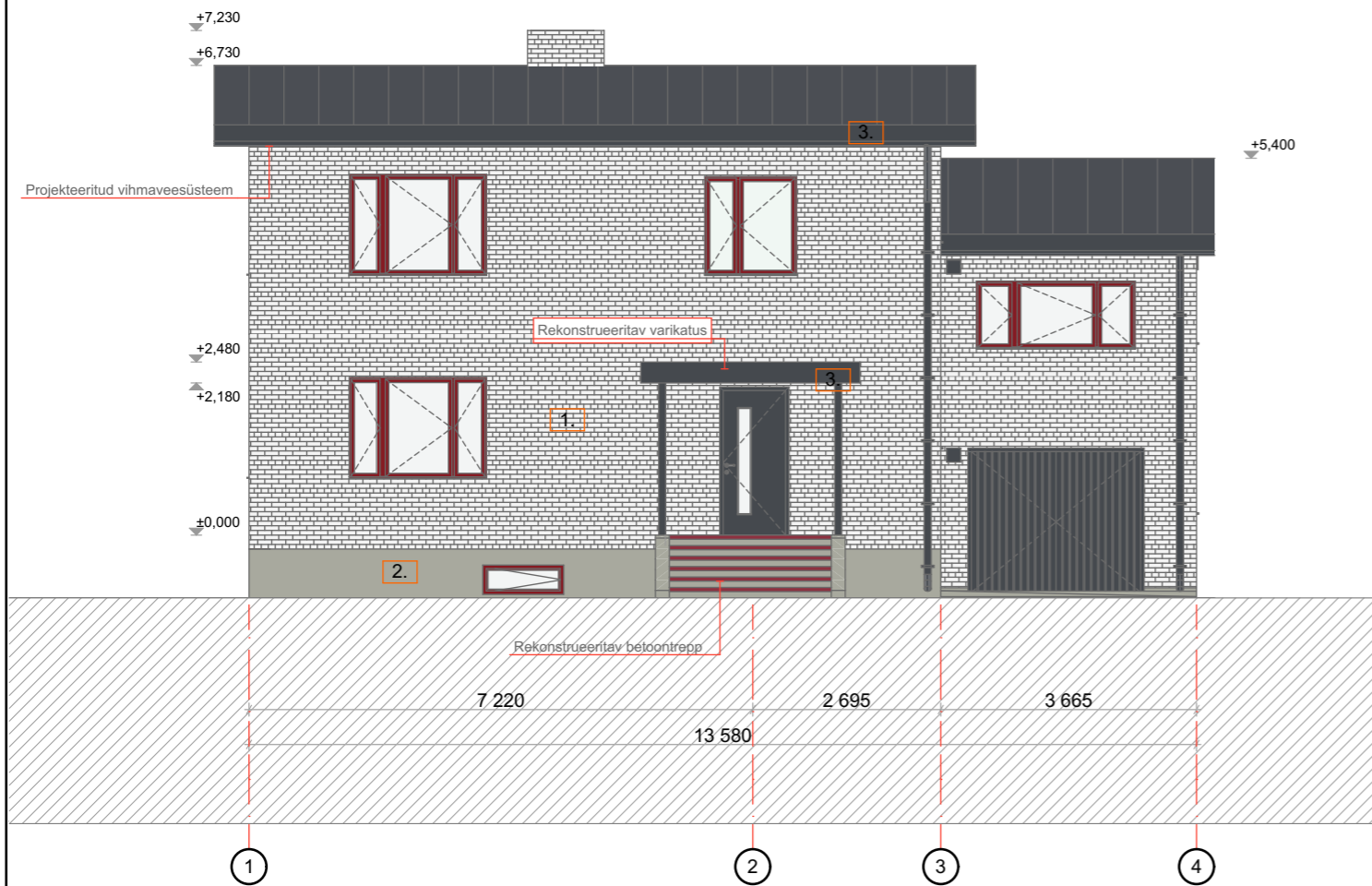
WEIDENBERG

Weidenberg OÜ
Registri number 11500125
e-post: info@weidenberg.ee
tel: +372 508 2249 / +372 73 119 70
Raekoja plats 1 / Ülikooli 7, 51003 Tartu, Eesti
MTR reg. nr. EEP001430 EPE000519 EEK000638 EEO001982 EHA000076 EHM000129

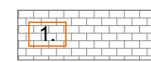

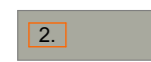



Tellija
Rain VeidenbergAsukoht
Kure 3, Tartu linn, TartumaaTöö nimi
Kure 3 üksikelamu rekonstrueerimise ehitusprojektProjekt
Senni Vels
Joonis
Senni VelsProjektijuh
Senni Vels
Vastutav spetsialist
Ragnar Pabort

Joonise nimi

Lõige A-ATartu
04/10/2019Töö nr
2019-39Eriala
ARStadium
EPSkaala
1:100Nr / formaat
5.4 / A4



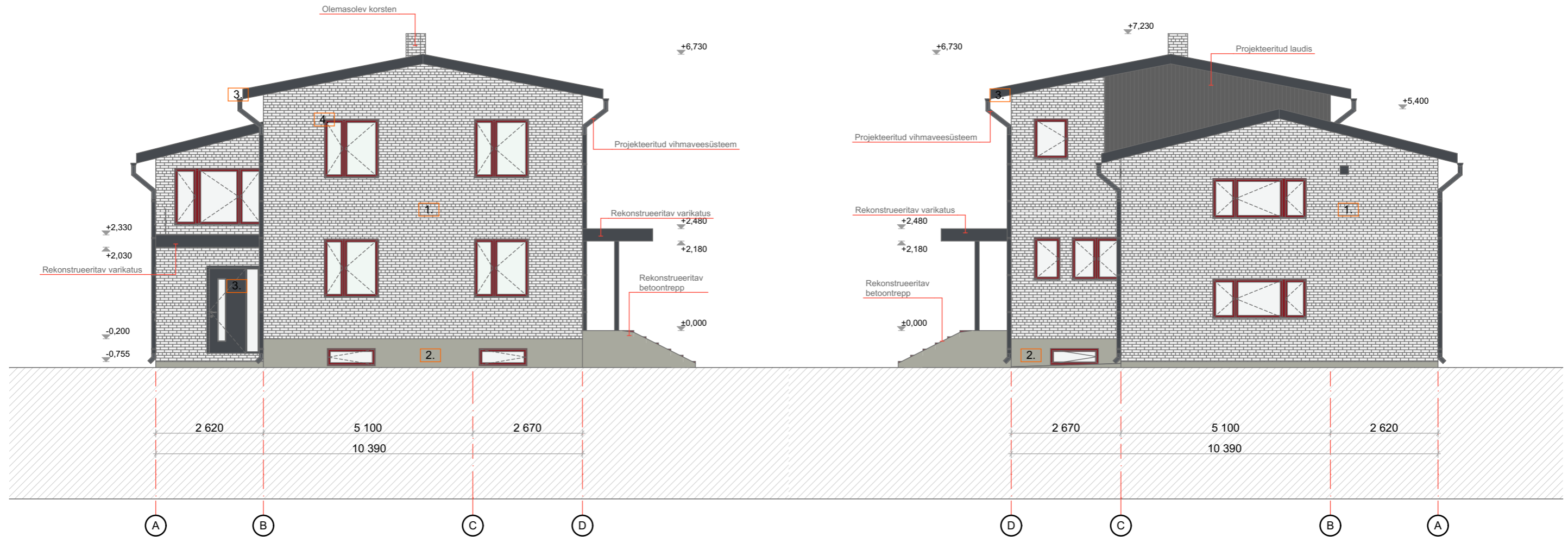
Värvikaart:

	Olemasolev tellisfassaad		Projekteeritud avatäited - RAL 3003, aknaplekid RR23
	Olemasolev betoonist sokkel		Projekteeritud SBS katusekate (tumehall)
	Uksed, varikatuses teraspostid, vihmaveesüsteem, räästalaudis - RR23		Projekteeritud laudis - RR23

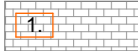





Märkused:

- Olemasolevate varikatuste kandekonstruktsioone ei muudeta, ühekaldelise katuse asemel rajatakse lamekatused.
- Kõik olemasolevad avatäited vahetatakse.
- Olemasolev betoonist välitrepp rekonstrueeritakse - korrastatakse pealispind ja tehakse kohtparandused.
- Ühikuta mõõdud antud millimeetrites.

MUUDATUSE KIRJELDUS		NIMI	ALLKIRI	KUUPÄEV
WEIDENBERG		Tellija Rain Veidenberg	Asukoht Kure 3, Tartu linn, Tartumaa	
Weidenberg OÜ Registrinumber 11500125 e-post: info@weidenberg.ee tel: +372 508 2249 / +372 73 119 70 Raekoja plats 1 / Ülikooli 7, 51003 Tartu, Eesti MTR reg. nr. EEP001430 EPE000519 EEK000638 EEO001982 EHA000076 EHM000129		Töö nimi Kure 3 ehitusprojekt		
Projekt Senni Vels	Projekti juht Senni Vels	Joonise nimi Vaade kagust ja loodest		
Joonis Senni Vels	Vastutav spetsialist Ragnar Pabort	Tartu 04/10/2019	Töö nr 2019-39	Eriala AR
		Staadium EP	Skaala 1:100	Nr / formaat 6.1 / A3



Värvikaart:

	Olemasolev tellisfassaad		Projekteeritud avatäited - RAL 3003, aknaplekid RR23
	Olemasolev betoonist sokkel		Projekteeritud SBS katusekate (tumehall)
	Uksed, varikatusse teraspostid, vihmaveesüsteem, räästalaudis - RR23		Projekteeritud laudis - RR23

Märkused:

- Olemasolevate varikatusse kandekonstruktsioone ei muudeta, ühekaldelise katuse asemel rajatakse lamekatused.
- Kõik olemasolevad avatäited vahetatakse.
- Olemasolev betoonist välitrepp rekonstrueeritakse - korrastatakse pealispind ja tehakse kohtparandused.
- Ühikuta mõõdud antud millimeetrites.

MUUDATUSE KIRJELDUS		NIMI	ALLKIRI	KUUPÄEV
WEIDENBERG		Tellijä Rain Veidenberg	Asukoht Kure 3, Tartu linn, Tartumaa	
Weidenberg OÜ Registri number 11500125 e-post: info@weidenberg.ee tel: +372 508 2249 / +372 73 119 70 Raekoja plats 1 / Ülikooli 7, 51003 Tartu, Eesti MTR reg. nr. EEP001430 EPE000519 EEK000638 EEO001982 EHA000076 EHM000129		Töö nimi Kure 3 ehitusprojekt		
Projekt Senni Vels Joonis Senni Vels	Projektijuht Senni Vels Vastutav spetsialist Ragnar Pabort	Joonise nimi Vaade edelast ja kirdest		
Tartu 04/10/2019	Töö nr 2019-39	Eriala AR	Stadium EP	Skaala 1:100 Nr / formaat 6.2 / A3

Lisa 2 Rekonstrueerimisaegsed fotod



Fotod: erakogu