TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

KOGU HOONE NIISKUS- JA SOOJUSLEVI MODELLEERIMINE AKADEEMIA 5A PÖÖNINGU NIISKUSTURVALISUSE HINDAMISEKS

MODELLING OF MOISTURE AND HEAT DISTRIBUTION OF THE ENTIRE BUILDING TO EVALUATE MOISTURE SAFETY OF AKADEEMIA 5A ATTIC

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Georg-Mihkel Kodi

Üliõpilaskood: 165196EAEI

Juhendajad: Targo Kalamees, professor
Kristo Kalbe, ekspert

Tallinn 2021

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.

"26" juuli 2021

Autor: Georg-Mihkel Kodi
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"26" juuli 2021

Juhendajad: Targo Kalamees
/ allkiri /

Kristo Kalbe
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20… .

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

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Mina, Georg-Mihkel Kodi (sünnikuupäev: 23.04.1997):

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kogu hoone niiskus- ja soojuslevi modelleerimine Akadeemia 5a pööningu niiskusturvalisuse hindamiseks",

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on Targo Kalamees ja Kristo Kalbe

(*juhendajate nimed*)

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

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

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

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

---

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

_____ (*allkiri*)

_____ (*kuupäev*)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Georg-Mihkel Kodi 165196EAEI (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peaeriala: EAEI02/15 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitustehnika

Juhendaja(d): Professor, Targo Kalamees, 620 2403

Ekspert, Kristo Kalbe, 620 2405

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Kogu hoone niiskus- ja soojuslevi modelleerimine Akadeemia 5a pööningu niiskusturvalisuse hindamiseks*

(inglise keeles) *Modelling of moisture and heat distribution of entire building to evaluate moisture safety of Akadeemia 5a attic*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Juhtumianalüüsi abil tuvastada puidul hallituse tekke põhjused Akadeemia tee 5a pööningul;
2. Hinnata erinevaid niiskusturvalisuse tagamise meetmeid (sademete ärahoidmine, ventileerimine, kuivatamine) puitkonstruktsioonide ehitusel niiskusriskide minimeerimiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Uuritava objekti, ajaloo ja teemaga tutvumine	05.01.2021
2.	Arvutusmudelite koostamine ja kalibreerimine	14.01.2021
3.	Niiskuskahjustuse vältimise strateegiate väljatöötamine	17.05.2021
6.	Tulemuste analüüs ja järeldused	10.07.2021
7.	Magistritöö kirjutamine, graafikute ja jooniste töötlemine	15.07.2021

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** “.....”.....20…..a

Üliõpilane: …….. ……..…..... “.....”.....20…..a

/allkiri/

Juhendaja: …….. ……..…..... “.....”.....20…..a

/allkiri/

Juhendaja: …….. ……..…..... “.....”.....20…..a

/allkiri/

Programmijuht: ……..……..…..... “.....”.....20…..a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA 7

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU 8

1. SISSEJUHATUS 9

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE 11

2.1 HÜGROTERMILISE MUDELI VAJADUS JA VÕIMALUSED 11

2.2 SOOJUS-, ÕHU- JA NIISKUSLEVI (HAM) 12

2.2.1 Soojuslevi materjalides 13

2.2.2 Niiskuslevi õhus ning materjalides 13

2.3 EHITUSNIISKUS PUITKONSTRUKTSIOONIDES 19

2.3.1 Ehitusniiskus 19

2.3.2 Niiskus puidus 19

2.4 KÕRGE NIISKUSSISALDUSEGA PUITKONSTRUKTSIOONIDE VÕIMALIKUD TAGAJÄRJED 20

3. MEETODID 21

3.1 UURITAVA OBJEKTI ÜLEVAADE 21

3.2 HALLITUSE TEKKE HINDAMISE MATEMAATILINE MUDEL 28

3.3 MÕÕTMISED 31

3.3.1 Pööningu sisekliima 31

3.3.2 Hallitusproovide võtmine 32

3.4 ARVUTUSED 33

3.4.1 IDA ICE ja HAMWall 33

3.4.2 Arvutusmudeli koostamine ja kalibreerimine 35

3.5 EHITUSPERIOODIJÄRGSE OLUKORRA SIMULEERIMINE JA ALTERNATIIVSED SIMULATSIOONID 38

4. TULEMUSED JA NENDE HINDAMINE 40

4.1 MÕÕTMISED 40

4.1.1 Materjaliproovid 2021 kevadel 40

4.1.2 Sisekliima pööningul ja 5. korruse korterites 41

4.2 ARVUTUSMUDELI KALIBREERIMINE 42

4.3 SIMULEERITUD SOOJUS- JA NIISKUSLIK OLUKORD PÖÖNINGUL 44

4.3.1 Olukord pööningul pärast katuslae lisasoojustuspaneelide paigaldamist 44

4.3.2 Ehitamine toimub ilma sademete sattumiseta pööningule – paigaldus vaid vihmavabadel päevadel, ajutine vihmakaitse või vee kohene likvideerimine 47

4.3.3 Lokaalne veekahjustus 50

4.3.4 Pööningu ventileerimine (ja kütmine) pärast veekahjustust 53

4.4 TULEMUSTE HINDAMINE 66

5. JÄRELDUSED 68

KOKKUVÕTE..... 69

SUMMARY 70

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 71

EESSÕNA

Käesolev magistritöö keskendub kogu hoone soojus-, õhu- ja niiskuslevi modelleerimisele niiskusturvalisuse hindamise eesmärgil Akadeemia tee 5a pööningu näitel. Uurimisaluseks teemaks on tarindite niiskustehniline toimivus, arvestades hoonesse talletunud ehitusniiskusega. Uurimistöö teema käsitlemisega oldi alustatud liginullenergiahoonete uurimisrühma poolt osana uurimisprogrammist ning autorile oli see suureks abiks antud uurimuse lõpule viimisega.

Magistritöö jaoks vajalikud andmed on kogutud Tallinna Tehnikaülikooli kampuses asuva Akadeemia tee 5a ühiselamu pööningult. Varem mõõdetud andmed on kogutud ehituse ja arhitektuuri instituudi liginullenergiahoonete uurimisrühma poolt 2017. aasta augustist kuni 2018. aasta detsembrini. Akadeemia tee 5a ühiselamu ehitusprojekti ning mõõtmiste andmete põhjal kalibreerisin arvutusmudeli, mida kasutasin niiskusturvalisuse strateegiate väljatöötamisel.

Uurimistöö valmimisele aitas erilise jõu ja nõuga kaasa juhendaja professor Targo Kalamees ning oma tänuväärse panuse andis kaasjuhendaja ekspert Kristo Kalbe.

Võtmesõnad: HAM mudel, ehitusaegne niiskuskaitse, ehitusniiskuse väljakuivamine, niiskuskahjustused, niiskusturvalisus.

Lühendite ja tähiste loetelu

Lühendid

HAM	soojus, õhk ja niiskus (ingl. *Heat, Air and Moisture*)
ICE	sisekliima ja energia (ingl. *Indoor Climate and Energy*)
IEA	Rahvusvaheline Energiaagentuur (ingl. *International Energy Agency*)
OSB	suunatud laastuga plaat (ingl. *Oriented Strand Board*)
RH	suhteline niiskus (ingl. *Relative Humidity*)
1D	ühemõõtmeline
2D	kahemõõtmeline
3D	kolmemõõtmeline

Tähised

A	pindala	m^2
c	soojusmahtuvus	J/K
c_a	õhu erisoojus	J/(kg·K)
c_p	erisoojusmahtuvus	J/(kg·K)
D	vee(auru) difusioonitegur	m^2/s
d	paksus	m
g	niiskusvoog	$kg/(m^2 \cdot s)$
h_{vap}	vee aurustumissoojus	J/kg
K	veejuhtivus	kg/(Pa·m·s)
l	pikkus	m
M	hallituse indeks	-
M_a	õhumassivoog	$kg/(s \cdot m^2)$
m	mass	kg
P	gaasi rõhk	Pa
P_c	veerõhk pooris	Pa
p_v	veeauru osarõhk	Pa
q	soojusvoog	W/m^2
R	soojustakistus	m^2K/W
R_s	erigaasikonstant	$287\ Pa \cdot m^3/(kg \cdot K)$
SQ	pinna kvaliteet	-
Z	veeaurutakistus	s/m
$T\ (\Theta)$	temperatuur	K (°C)
t	aeg	s (või muu ajaühik)
u	kaaluline niiskussisaldus	kg/kg
V	ruumala	m^3
W	puidu liik	-
w	niiskussisaldus massi mahu järgi	kg/m^3
x	muutuv pikkus	-
δ_v	veeauruerijuhtivus	m^2/s
ε	poorsus	-
λ	soojuserijuhtivus	W/(m·K)
μ	difusioonitakistustegur	-
ν	veeauru sisaldus õhus	kg/m^3
ρ	tihedus	kg/m^3
ρ_a	õhu tihedus	kg/m^3
φ, RH	suhteline niiskus	%

1. SISSEJUHATUS

Tänapäeval õnnestub dünaamilise arvutustarkvaraga (IDA ICE, Transys vms) üpriski edukalt modelleerida hoone sisekliimat ja energiatõhusust (Arumägi ja Kalamees, 2014, 2016; Kuusk, Kalamees ja Maivel, 2014) ning samuti piirdetarindite soojus- ja niiskuslevi (Delphin, WUFI, 1D-HAM vms) (Arumägi ja Kalamees, 2012; Langmans, Klein ja Roels, 2013; Pihelo, Lelumees ja Kalamees, 2016; Kukk, Kers ja Kalamees, 2020).

Hoone sisekliima ning energiatõhusus modelleeritakse hoone vastavalt projekteeritud tehnosüsteemidele, sisekliima seadearvudele, vabasoojustele, väliskliimale ning piirdetarindite omadustele. Õhus leviva niiskuse modelleerimine on huviobjektiks harva (Woloszyn ja Rode, 2008; Napp ja Kalamees, 2015) ning kui seda arvutatakse, siis tavaliselt ilma vastastikuses koostoimes piirdetarindite niiskusleviga. Piirdetarindite soojus- ning niiskuslevi modelleerimisel määratakse ääretingimustele sise- ja väliskliima (Kalamees ja Vinha, 2004; Ilomets, Kalamees ja Vinha, 2018) ning tavaliselt need ei sõltu soojus- ja niiskuslevist läbi piirdetarindi.

Üksikud arvutused võtavad arvesse kogu niiskuse tasakaalu hoone siseruumide, piirdetarindite ja välisosa vahel (Moon, Ryu ja Kim, 2014; Zhang *et al.*, 2017). See on kahetsusväärne, kuna näiteks ainuüksi õhurõhkude erinevus võib tekitada läbi piirdetarindi õhuvoolu, mis muudab oluliselt nii piirdetarindi niiskusrežiimi (Kalamees ja Kurnitski, 2010), kuid ka ruumi või hoone soojus-, õhu- ning niiskusrežiimi. Materjali niiskuse sidumise võime (puhverdamine) summutab omakorda siseruumides veeaurusisalduse kõikumise võrreldes välitingimustega. Õhuvool, vihma tungimine ja niiskuse kondenseerumine piirdetarindisse ei mõjuta mitte ainult energiatarbimist, vaid võib ka kahjulikult mõjutada piirdetarindi vastupidavust. Samaaegselt võib siseõhu suhteline niiskus mõjutada siseõhu tajutavat kvaliteeti (Wolkoff, 2018) ning saada hallituse kasvu (Hukka ja Viitanen, 1999) või tolmulestade laialdase elutegevuse põhjustajaks (Arlian *et al.*, 2001).

Ehitamise niiskusturvalisuse hindamiseks ja meetodite väljatöötamiseks on vaja teada materjalide niiskussisaldust kogu ehitusprotsessi jooksul (Kalbe, Kukk ja Kalamees, 2020) – piirdetarindite ja konstruktsioonide vaheline kliima ehituse käigus kontrollimatust väliskliimast hoone valmides kontrollitud sisekliimaks. Selle modelleerimine tarkvaras on väljakutse, kus on tarvis kasutada hoone soojus- ning niiskuslevi modelleerimist.

Uurimistöö eesmärgid on:

- Juhtumianalüüsi abil tuvastada puidul hallituse tekke põhjused Akadeemia tee 5a pööningul;
- Hinnata erinevaid niiskusturvalisuse tagamise meetmeid (sademete ärahoidmine, ventileerimine, kuivatamine) puitkonstruktsioonide ehitusel niiskusriskide minimeerimiseks.

Töö hüpoteesid:

- Akadeemia tee 5a pööningu katuslae alumise pinna hallituse põhjuseks on pööningule sadanud vihm, mis akumuleeris pööningu põrandal olnud mineraalvilla ja pööningule välja kuivades põhjustas katuslae alapinnale (OSB plaadile) kõrge niiskustaseme ja põhjustas seal hallituse kasvu;
- Lisasoojustuselementidega renoveerides saab pööningu niiskusriske minimeerida järgmiste variantide abil:
    - vähendada vee akumuleerumist materjalidesse, näiteks paigaldada mineraalvillaplaadid pööningu põrandale peale katuslaepaneelide paigaldust;
    - katta katuslagi hoolikamalt ajutise sadeveekattega, vältimaks sademete sattumist pööningule;
    - alustada liigniiskuse väljakuivatamisega kohe peale ehituse lõppu.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1 Hügrotermilise mudeli vajadus ja võimalused

Ehitiste modelleerimisel sisekliima ja energiatõhususe programmidega keskendutakse enamasti kütte, jahutuse (sisekeskkonna soojusliku mugavuse) ja ventilatsiooni (siseõhu kvaliteedi) peale. Võrreldes seni kasutatud mudelitele, kus peamiseks eesmärgiks oli kontrollida hoone soojuslikku toimivust ja sisekliimat on nüüdsetel mudelitel lisaks võimalik määrata ääretingimused hoone piiretele ning piirete võimekus puhverdada sisekeskkonna niiskust. Mudel arvestab niiskuse absorbeerumise ja aurustumise efektiga ning niiskuse mõjuga ehitusmaterjalide soojusjuhtivusele (Rode ja Grau, 2003; Tariku, Kumaran ja Fazio, 2011). Tarkvarade keskkonnas on võimalik mudeli baaskomponente (tarindid, seadmed jne.) ühendada süsteemiks, näiteks hoone mudeliks. Mudeli loomisel on oluline, et tarkvaral oleks võimekus arvutada etteantud süsteemiga seotud võrrandeid. Tarkvaradel on kasutamise hõlbustamiseks kasutajaliides, kasutajatugi, kliimaandmed ja sisestatavate moodulite andmebaas.

Tabel 1. Nimekiri hügrotermilise simulatsiooni programmidest (Delgado *et al.*, 2013).

Programmi nimi	**Mudeli tüüp (tarind)**	**Arendaja**
IDA-ICE	1D soojuse ja niiskuse mudel	EQUA Simulation AB, Rootsi
DELPHIN 5	1/2D soojuse, õhu, niiskuse, saasteainete ja soolade mudel	Dresdeni Tehnikaülikool, Saksamaa
WUFI-2D	2D soojuse ja niiskuse mudel	Fraunhofer IPB (Institute for Building Physics), Saksamaa
WUFI-Pro	1D soojuse ja niiskuse mudel	
WUFI-Plus	1D soojuse ja niiskuse mudel	
HAM-Tools	1D soojuse, õhu ja niiskuse mudel	Taani Tehnikaülikool ja Chalmersi Tehnikaülikool
TRNSYS ITT	1D soojuse ja niiskuse mudel	Dresdeni Tehnikaülikool, Saksamaa
MATCH	1D soojuse, õhu ja niiskuse mudel	TUD-Thermal Insulation Laboratory, Taani
BSim2000	1D soojuse ja niiskuse mudel	Danish Building Research Institute, Taani
MOIST	1D soojuse ja niiskuse mudel	National Institute for Standards and Testing, Ameerika Ühendriigid
FSEC	3D soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete mudel	Florida Solar Energy Center, Ameerika Ühendriigid

Ehitiste puhul on teada, et liigse niiskuse olemasolu põhjustab kahjustusi materjalidele ning nõudlus arvutusmeetodite vastu kasvab, et hinnata ehitiste niiskusturvalisust. Probleem niiskuskahjustustega ehitistes on pakkunud huvi spetsialistidele juba viimase sajandi algupäevist saadik, ent viimase paari kümnendi jooksul on niiskuse liikumine hoonetes pakkunud kõneainet aina rohkem ning teemat on hakatud süstemaatiliselt uurima tänu tarkvara arendustele. Ehitusfüüsika arvutustarkvara mudelites on võimalik laialdaselt kasutada niiskus- ja soojuslevi protsesside modelleerimist nii 1D, 2D kui 3D arvutuste puhul (Delgado *et al.*, 2010). Mudelites on võimalik võtta arvesse hoone keha tervikuna või vaadelda teatud tsoone eraldi. Enamasti on efektiivsem kasutada 1D mudeleid, kuna programmid üldiselt ei toeta paindlikku arvutusvõrgustiku moodustamist ning seega soojus- ja niiskuslevi jaoks on 1D lähenemine ka edukas reaalsete tarindite jaoks, seda eeldusel, et õhu-, soojus- ja niiskusvood on kirjeldatud piisava täpsusega 1D mudeli jaoks (Kurnitski ja Vuolle, 2000).

Rahvusvaheline Energiaagentuur IEA (ingl. *International Energy Agency*) arendas uurimisprojektis *Annex 41* nimega „Kogu hoone reageerimine soojuse, õhu ja niiskuse levile" kogu hoone HAM (soojus, õhk ja niiskus, ingl. *Heat, Air and Moisture*) modelleerimist. Varasem projekt *Annex* 14 osutas, et niiskuskahjustused hoonetes on otseses seoses soojuse, õhu ja niiskuse tasakaaluga kogu hoones (Woloszyn ja Rode, 2008). *Annex* 24 määras ära meetodi, kus hoone sisekliima pidi olema kehtestatud ääretingimusena, kuid mõõtetulemused tõid esile efekti, kus kogu hoone õhu tasakaal ja niiskuse puhverdamine omasid suurt mõju sisekliima hetkelistele niiskustingimustele. *Annex* 41 jagati neljaks suuremaks ülesandeks kogu hoone HAM mudeldamise tarbeks. Esiteks modelleerimise põhimõtted, teiseks eksperimentaalsed uuringud, kolmandaks ääretingimused ja viimaseks rakendused (Rode, Hens ja Janssen, 2008). Käesolevas uurimustöös käsitletakse kõiki neid ülesandeid uurimuse läbiviimiseks ning taolist kõikehõlmavat tööd pole autori teada veel varem tehtud. Küll on tehtud uurimistöid mis osaliselt katavad uurimisprojekti *Annex* 41 punkte (Woloszyn ja Rode, 2007).

2.2 Soojus-, õhu- ja niiskuslevi (HAM)

Termin „massi ülekanne" viitab õhu, veeauru, vedela vee, muude gaaside ja vedelike ning lahustunud tahkiste liikumist materjalide sees ning vahel, ehituskonstruktsioonides ning kogu hoones. Kõikidest massi levimise potentsiaalidest on hoonete seisukohast kõige olulisemad õhu ning niiskuse levimine. Õhk kannab endas edasi soojust ning veeauru ja õhu liikumisel on positiivsed kui ka negatiivsed mõjud, sest kuiva õhu levimisel läbi tarindi tõstab kuivamise potentsiaali ja eemaldab sealt veeauru, mis potentsiaalselt võiks kondenseeruda. Teisalt õhu ringlemine kiulises isolatsioonimaterjalis ja ümber hooletult paigaldatud tihendite võib põhjustada oluliselt

suurenenud soojuskaod. Niiskus põhjustab kliimakoormustest enim kahju ehitusmaterjalidele ning see on põhjus, miks ehitajatele ja projekteerijatele on niiskusturvalisus üks mitmetest väljakutsetest (Hens, 2012). Kombineeritud soojuse, õhu ning niiskuse modelleerimine põhineb energia- ning massimuutuste paradigmadel, kus omakorda on kombinatsioonis difusiiv- ning konvektsioonivoo võrrandid ja olekuvõrrandid (Delgado *et al.*, 2013).

2.2.1 Soojuslevi materjalides

Ehitusmaterjalide soojuserijuhtivus (nt puit, betoon ja telliskivi) sõltub kompleksetest pooride karakteristikutest. Majade soojustamise puhul kasutatakse soojusisolatsioonmaterjale, millede soojuserijuhtivus on väga madal ning sellega tagatakse hoone madal kütmisvajadus. Materjali soojuserijuhtivus λ [W/(m·K)] on sõltuv materjali temperatuurist, niiskussisaldusest ja tihedusest.

2.2.2 Niiskuslevi õhus ning materjalides

Veeauru liikumist mõjutavad veeauru osarõhkude erinevus õhus ja materjali poorides (difusioon) ning õhurõhkude erinevus (õhu liikumine). Vedela vee liikumist mõjutavateks jõududeks on kapillaarne imavus (kapillaarsus, sõltub poori läbimõõdust), gravitatsioon ja välisrõhk. Näitlikustamiseks tuuakse niiskuse liikumise kombinatsioonide tabel, mis sõltub materjali iseloomust (Hens, 2012).

Tabel 2. Materjali omadused ja niiskuse liikumise võimalused (Hens, 2012).

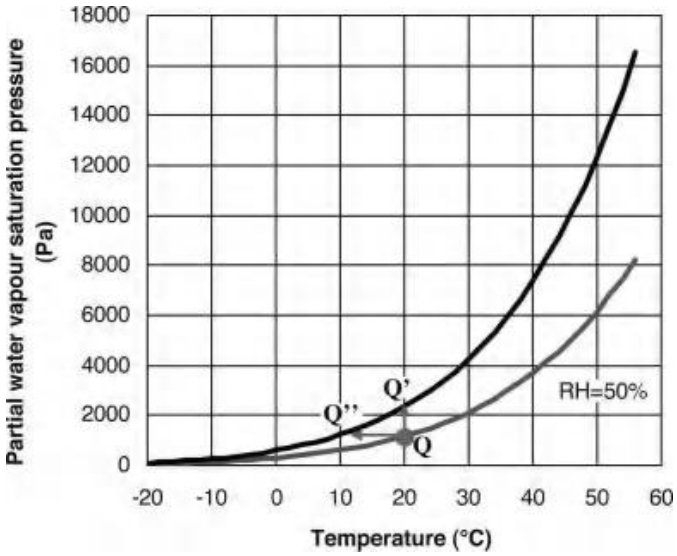
Materjal	**Veeaur**		**Vesi**		
	Difusioon	**Õhuvool**	**Kapillaarne**	**Gravitatsioon**	**Rõhk**
Mittekapillaarne, mittehügroskoopne	X	X		X	X
Mittekapillaarne, hügroskoopne	X	X		X	(X)
Kapillaarne, mittehügroskoopne	X		X	(X)	
Kapillaarne, hügroskoopne	X		X		

Õhk on gaaside segu ning reeglina sisaldab õhk ka veeauru. Veeaur on vee gaasiline vorm. Lihtsustamise mõttes arvestatakse niisket õhku kahe ideaalgaasi seguna: kuiv õhk ja veeaur. Ideaalgaasi valem avaldub kujul:

$$P \cdot V = m \cdot R_s \cdot T,$$

Valem 1.

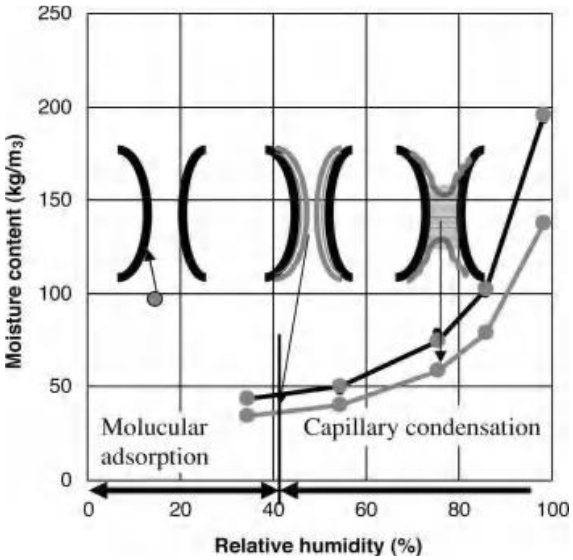
kus P [Pa] tähistab gaasi rõhku, V [m^3] gaasi ruumala, m [kg] gaasi massi, R_s [R_s=287 Pa·m^3/(kg·K)] universaalset gaasikonstanti ning T [K] gaasi temperatuuri (Hens, 2012). Kõige olulisemad omadused, mis iseloomustavad veeauru õhus on veeauru osarõhk p_v (ühikuks Pa), veeauru sisaldus õhus ν (ühikuks kg/m^3) ja kaaluline niiskussisaldus u (ühikuks kg/kg). Suhteline niiskus on termin mis iseloomustab veeauru osarõhu suhet küllastusrõhku. Igal õhutemperatuuril on veeauru osarõhul maksimaalne võimalik rõhk, mida nimetatakse veeauru küllastusrõhuks. Kui veeaur õhus on küllastusrõhu all, siis veeaur kondenseerub vedelaks veeks materjali pinnale. Veeauru funktsiooni kõver jälgib suuremal või vähemal määral eksponentfunktsiooni kõverat (Hens, 2012).



Joonis 1. Veeauru küllastusrõhu p_{sat} funktsioon ja 50% suhtelise niiskuse funktsioon sõltuvana temperatuurist. Punkt Q iseloomustab õhku - temperatuuril 20°C ning suhtelise niiskusega 50% - millel samal temperatuuril küllastusrõhuni võimalik omandada ligi 1 kPa veeauru osarõhku või osarõhku lisandumata jõuda küllastusrõhuni, kui õhu temperatuur langeb ligi 9 °C võrra (Hens, 2012).

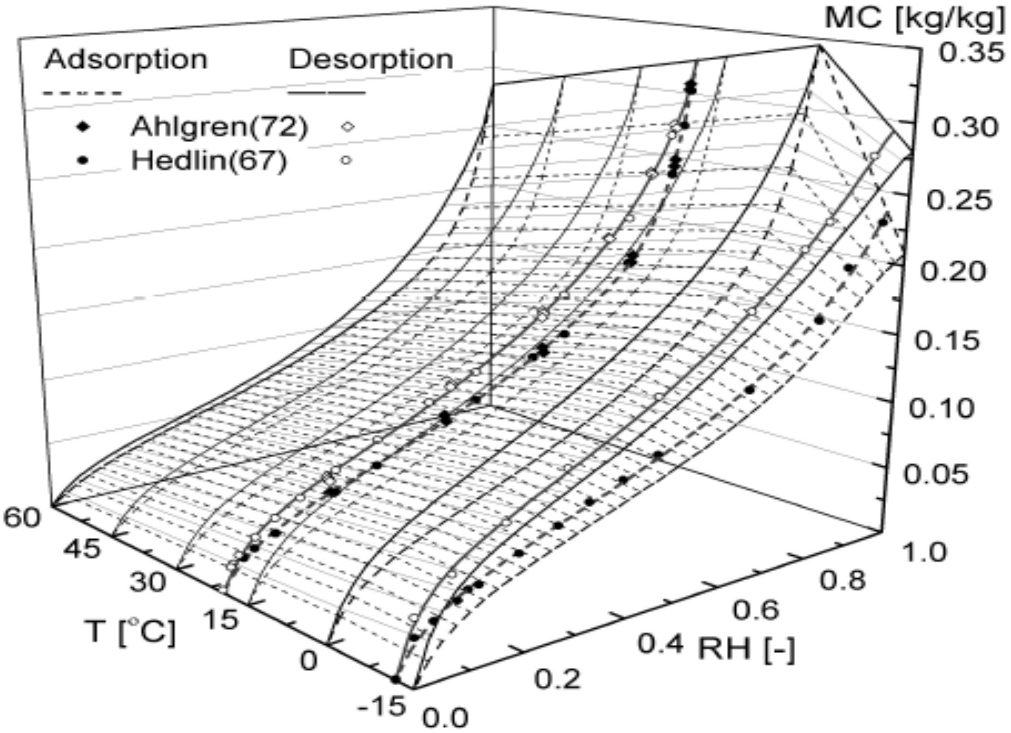
Ehitusmaterjalides on veeaur võimeline liikuma tänu materjali avatud pooridele. Materjalide veeauru läbivuse omadust nimetatakse veeauruerijuhtivuseks δ_v [m^2/s] ning see väljendab meetri paksuse materjalikihi veeaurujuhtivuse kiirust läbi ruutmeetrise pinna sekundis, kui kahel pool kihti on kindel veeauru kontsentratsioonide erinevus

(gradient). Materjali veeauru läbilaskvus võib muutuda oluliselt, kui temperatuur või niiskussisaldus materjalis muutub (Mukhopadhyaya ja Kumaran, 2007). Kuiva materjali avatud poorid saavad muutuda niiskemaks pooride täitumisel niiske õhuga. Veeaur saab küllastusrõhu saabudes kondenseeruda pooride pinnale (nt adsorbeerumine) vedelaks veeks. Sellist protsessi nimetatakse sorptsiooniks, kui aine neeldub materjali sisse (Hens, 2012). Sorptsiooni pöördprotsessiks on desorptsioon, mille käigus niiskus eemaldub materjali seest. Sorptsiooni isoterm kirjeldab materjali hügroskoopset piirkonda ning on graafikul kõver, kus on materjali niiskussisaldus kõrvutatud suhtelise niiskusega kindlal temperatuuril (Delgado *et al.*, 2013). Sorptsiooni kõver on tüüpiliselt S-kujuga. Sorptsiooni ja desorptsiooni kõverate võrdlusest nähtub üks keha omadus – hüsterees – mis peitub kahe kõvera vahena. Hüsterees tähendab oleku muutuse hilinemist ehk keha niiskumisel on keha niiskussisaldus sama suhtelise niiskuse juures madalam kui kuivamisel. Täpsemalt vedela vee ja veeauru sisaldus poorides erineb sorptsiooni ja desorptsiooni ajal sama suhtelise niiskuse juures. Iga punkt kahe kõvera (sorptsioon ja desorptsioon) peal ja vahel kirjeldab võimalikku tasakaalu niiskussisaldust kindla suhtelise niiskuse juures. Väärtus sõltub materjali eelnenud niiskusolukordadest. Maksimaalseks hügroskoopseks niiskussisalduseks nimetatakse tasakaalu 98% suhtelise niiskuse juures. Igal materjalil on oma sorptsiooni isoterm. Sõltuvalt sellest, kas tegemist on hügroskoopse või mittehügroskoopse materjaliga, võib sorptsiooni isoterm olla täiesti erinev. Hügroskoopsetel materjalidel, näiteks puidul ja betoonil, toimub märgatav muutus niiskussisalduses isegi madalatel suhteliste niiskuste juures. Mitte-hügroskoopsetel materjalidel, näiteks telliskividel ja polüstüreenil, ei toimu suurt muudatust niiskussisalduses suhtelise niiskuse muutumisel, välja arvatud väga kõrgete suhteliste niiskuste juures (Hens, 2012).

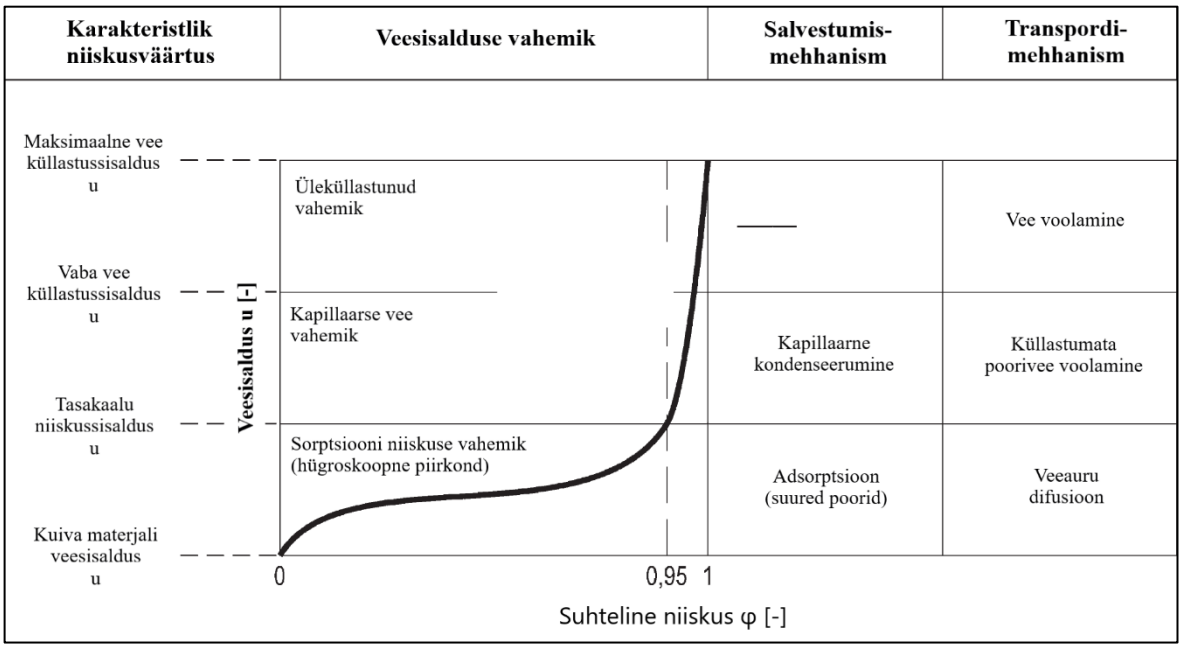


Joonis 2. Adsorptsiooni ja desorptsiooni isoterm. Kaks mehhanismi, mille käigus materjal seob endaga vee molekule, on molekulide adsorptsioon poori seintele madalal suhtelisel niiskusel ning kapillaarne kondenseerumine,

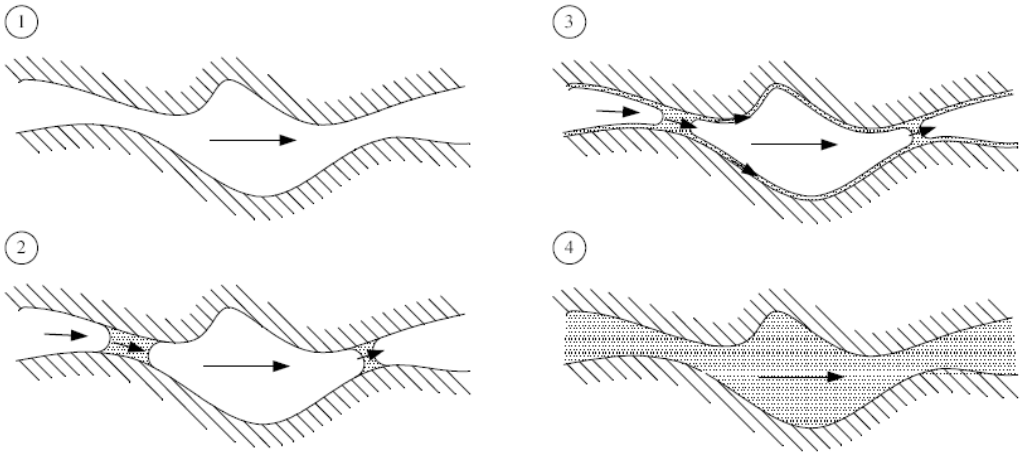
mil kõrgel suhtelisel niiskusel tekib adsorbeerunud veemolekulide kihtide vahele veemenisk materjali pooris (Hens, 2012).



Joonis 3. Adsorptsiooni ja desorptsiooni kõverate sõltuvana temperatuurist ja hüstereesist (Woloszyn ja Rode, 2007).



Joonis 4. Kapillaarse ja hügroskoopse ehitusmaterjali veesisalduse tinglikud piirid ja tekke põhjused, abtsissil suhteline niiskus ning ordinaadil materjali gravimeetriline veesisaldus. Tähis u_{95} viitab tasakaalu niiskussisaldusele, u_f vaba vee küllastussisaldusele ja u_{max} maksimaalsele vee küllastussisaldusele (Häupl *et al.*, 2017).



Joonis 5. Erinevad niiskuse levimise protsessid materjali pooris, sõltuvalt niiskussisaldusest. Esimene staadium viitab madalale niiskustasemele, kus veeaur levib difusiooni teel. Teises faasis on kirjeldatud kõrgema niiskustaseme juures veeauru difusiooni ja vähese vedela vee liikumist. Kolmas staadium näitlikustab veeauru difusiooni, vee pinddifusiooni ja vee liikumist kõrgema niiskustaseme puhul ning skeemil 4 on poor täitunud veega, mis tähendab, et tegu on kapillaarse vee liikumisega (Peuhkuri, 2003).

Veeauru liikumist õhus põhineb Fick'i difusiooni seadusel, mis avaldub järgneval kujul:

$$g_a = -D_a \frac{\partial \nu}{\partial x},$$

Valem 2.

kus g_a [kg/(m^2·s)] on auruvoo suurus õhus, D_a (m^2/s) veeauru difusioonitegur seisvas õhus ning ν (kg/m^3) on õhu niiskussisaldus. Valemit edasi arendades leitakse veeauru niiskusvoo suurus poorses materjalis, mis avaldub järgnevalt:

$$g_\nu = -\frac{D_a}{\mu} \frac{\partial \nu}{\partial x},$$

Valem 3.

kus veeauru niiskusvoog materjalis on g_ν [kg/(m^2·s)] ja μ on materjali difusioonitakistustegur. Viimase saab avaldada kujul:

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_\nu}.$$

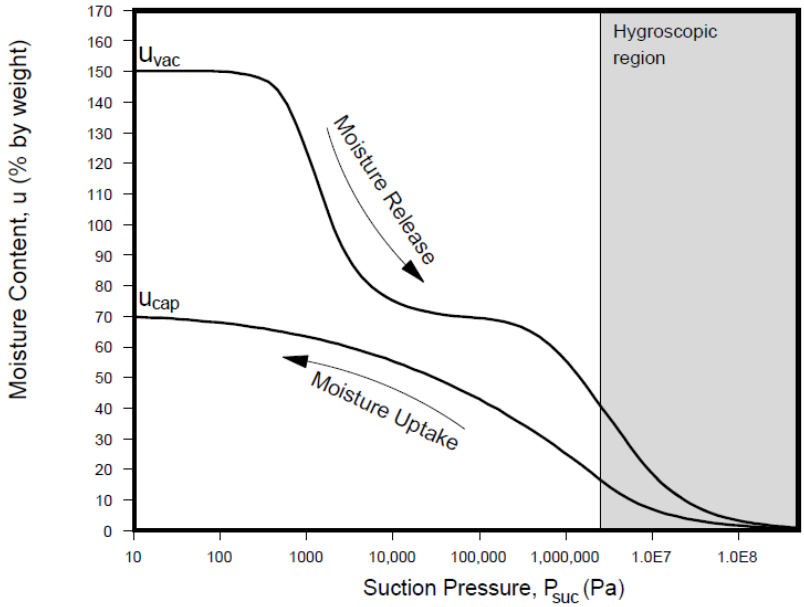
Valem 4.

Temperatuuri erinevusest tingitud veeauru liikumist kirjeldatakse järgnevalt:

$$g_{T,\nu} = -D_{T,\nu} \frac{\partial T}{\partial x},$$

Valem 5.

kus $g_{T,v}$ [kg/(m^2·s)] on mitteisotermilise veeauru niiskusvoog, $D_{T,v}$ [kg/(K·m·s)] mitteisotermilise veeauru difusioonitegur ning T (K) on temperatuur.



Joonis 6. Materjali veeimavuse kõverad (vee sidumine ja vee eraldumine) koos hügroskoopse piirkonnaga (Woloszyn ja Rode, 2007).

Vedela vee liikumist saab kirjeldada Darcy seadusega:

$$g_l = -K\frac{\partial P_c}{\partial x} = -D_{w,l}\frac{\partial w}{\partial x},$$

Valem 6.

kus g_l [kg/(m^2·s)] on vedela vee niiskusvoog, K [kg/(Pa·m·s)] veejuhtivus, P_c (Pa) veerõhk pooris, $D_{w,l}$ (m^2/s) vedela vee difusioonitegur ja w (kg/m^3) materjali niiskussisaldus massi mahu järgi. Kuna tegurit K on praktikas väga raske katseliselt määrata, siis kasutatakse valemi teist poolt, kus vee liikumise potentsiaaliks kasutatakse materjali veesisalduse erinevust eri punktide vahel.

Vedela vee liikumine on võimalik ka pinddifusiooni kaudu mis avaldub kujul:

$$g_{s,l} = -D_{s,l}\frac{\partial w}{\partial x},$$

Valem 7.

kus $g_{s,l}$ [kg/(m^2·s)] on vee pinddifusiooni niiskusvoog, $D_{s,l}$ (m^2/s) vedela vee pinddifusioonitegur. Arvutust saab läbi viia materjali niiskussisalduse asemel suhtelise niiskuse alusel.

Veel on võimalik anda kogu niiskusvoo suurus veeaururõhu ja poorirõhu komponentide summana:

$$g = g_p + g_c = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} - K \cdot P_c \frac{\partial \ln P_c}{\partial x},$$

Valem 8.

kus g_p [kg/(m^2·s)] on veeauru osarõhust tingitud niiskusvoog, g_c [kg/(m^2·s)] on poorirõhust tingitud niiskusvoog, p_v (Pa) on veeauru osarõhk (Peuhkuri, 2003).

2.3 Ehitusniiskus puitkonstruktsioonides

2.3.1 Ehitusniiskus

Ehitusniiskuse all peetakse silmas ehitusmaterjali koostises olevat vett (nt betoon) või ehitusprotsessi käigus materjali sattuvat niiskust, mis on põhjustatud sademetest, veeleketest, vee kapillaartõusust poorsetes materjalides või on ehitamisel kasutatud liigniiskeid materjale (nt ladustamisel liigset niiskust omandanud puit) (Othman *et al.*, 2015). Puitkonstruktsioonidesse salvestunud liigne ehitusniiskus võib põhjustada kandekonstruktsiooni ajalise kestvuse vähenemist ning põhjustada hoones viibivatele inimestele tervisekahjustusi. Ilma mingisuguse ilmastikukaitseta on võimatu vältida ehitusniiskuse sattumist puitkonstruktsioonidesse (Olsson, 2020). Sageli pole konstruktsioonidele võimalik rakendada täielikku ilmastikukindlust sademete eest ja see tingib kuluefektiivsemate lahenduste väljatöötamise, et sademetega kokkupuutuvatel puitkonstruktsioonide niiskusturvalisust tagada (Mjörnell ja Olsson, 2019). Senini üks turvalisemaid meetmeid liigse ehitusniiskuse vältimiseks oleks kogu hoone ehitamine telgi all, kuid selline lahendus on vastumeelne ehitusturul, kuna sellise meetme rakendamine tõstaks oluliselt ehituskulusid (Kalbe, Kukk ja Kalamees, 2020). Kuna niiskuse poolt tekitatud probleemid on valdavad, siis hoonete eluiga on suuresti sõltuv ehitusniiskuse kogusest, mis satub tarinditesse ehituse käigus (Kalamees, 2007). Kõrge niiskustasemega ehitised põhjustavad ehitise patoloogiaid. See mõjutab siseõhu kvaliteeti ja elanike niiskuslikku mugavust (Ferroukhi *et al.*, 2016).

2.3.2 Niiskus puidus

Puit on hügroskoopne materjal ehk kuivana seob puit niiskust õhust ja märjana eraldab niiskust õhku. Niiskust on puidus alati ning niiskus mõjutab oluliselt puidu omadusi (Hens, 2012). Niiskussisalduse kasv puidus suurendab puidu massi, aga võib ka tekitada muidu mahukasvu, mistõttu puidu tiheduse muutus on paratamatu, kui niiskussisaldus puidus muutub. Puidu tihedust väljendatakse üldiselt niiskussisalduse 0% juures. Sageli avaldatakse ka puidu tihedus 12% niiskussisalduse juures, kuna sellise niiskussisaldusega puitu enamasti kasutatakse praktikas. Kui puidu niiskussisaldus on 30%, siis puidu maht enam ei kasva, ent puidu mass suureneb. Puit on hügroskoopne materjal ehk kuivana seob puit niiskust õhust ja märjana eraldab niiskust õhku. Eelmainitud 30% niiskussisaldus on ühtlasi rakuseinte küllastuspiir. Rakuseintes talletub

seotud ehk hügroskoopne niiskus. Vaba ehk makrokapillaarne niiskus paikneb rakuõõntes. Puitu, mis sisaldab ainult seotud niiskust, nimetatakse niiskeks puiduks, kuid kui puit sisaldab lisaks ka vaba niiskust, siis nimetatakse seda märjaks puiduks (Dinwoodie, 2004).

2.4 Kõrge niiskussisaldusega puitkonstruktsioonide võimalikud tagajärjed

Puitmaterjalide niiskussisalduse kasv põhjustab materjali mahukasvu, mis võib põhjustada tõsisemaid tagajärgi kui lihtsalt materjali pundumine. Puitmaterjal võib praguneda ning deformeeruda oluliselt, elastsusmoodul langeb ning roomedeformatsioonid suurenevad. Paisunud olekus on puitmaterjali keemiline ja mehaaniline vastupidavus halvenenud (Häupl *et al.*, 2017).

Bioloogilised materjalikahjustused, mida nimetatakse ka mädanemiseks, on enamasti põhjustatud bakterite, seente, mikroorganismide, putukate või nende vastsete poolt. Nimetatud organismid esinevad ainult siis, kui materjali niiskussisaldus on piisavalt kõrge ning on olemas toitained ja elupaika pakkuv keskkond (Vereecken ja Roels, 2012). Pidev niiskus ja sobiv temperatuur on suurepärane kasvuplatoo kahjuritele (Bornemann, Brischke ja Alfredsen, 2014). Organismide elutegevusega kaasnevad riskid ehitise stabiilsusele ning ka inimeste tervisele. Inimeste tervisele on eriti kahjulikud hallitusseened, mis kasvavad erinevatel niisketel pindadel, eriti hästi puitpindadel ning alandavad siseõhu kvaliteeti (Adan ja Samson, 2011). Hallitusseened toituvad puidust saadavatest toitainetest, mis tingib puidu lagunemise, ning eritavad oma elutegevuse tagajärjel õhku aineid, mis tekitavad halba lõhna ja põhjustavad sissehingamisel haigusi. Toatemperatuuril üle 75-80% suhtelise niiskuse juures on risk hallituse tekkele ehitusmaterjalide pindadel, sest enamus hallitusseeni kasvavad väga hästi temperatuuride vahemikus 5-35 °C, seega tavakasutusega hoonetes ei ole temperatuur enamasti takistuseks hallituse tekkele (Johansson, Bok ja Ekstrand-Tobin, 2013). Madalad ventilatsioonikambrid ning pööningud on kohad, kus temperatuur ja suhteline niiskus on enamasti väga sõltuvad väliskliimast ning seega sealsed sisetingimused soosivad hallituse kasvu (Johansson, Svensson ja Ekstrand-Tobin, 2013).

Joonis 7. Hallituse kasv OSB pinnal Akadeemia 5a pööningul (Kalamees *et al.*, 2017).

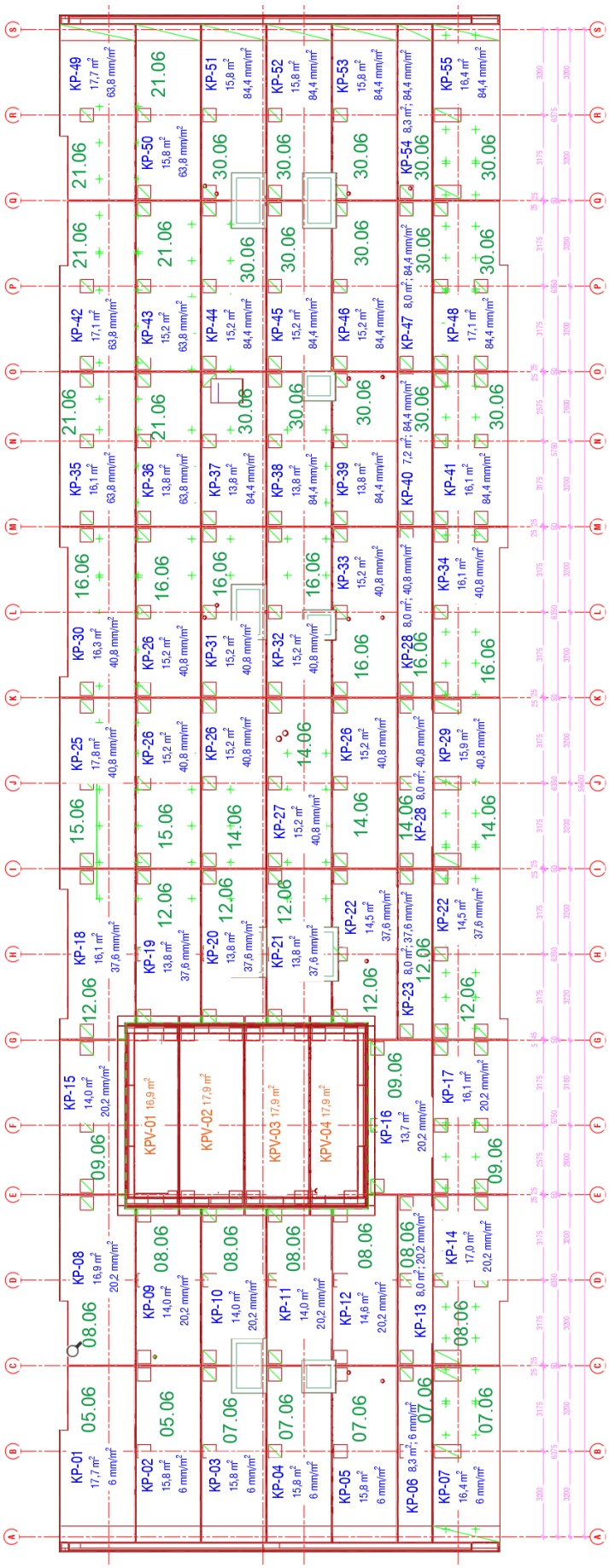
3. MEETODID

3.1 Uuritava objekti ülevaade

Soojus- ja niiskuslevi modelleerimise ning niiskuskahjustuste vältimise leidmise objektiks on 1964. aastal ehitatud Akadeemia tee 5a pereühiselamu Tallinna Tehnikaülikooli kampuses, mis renoveeriti 2017. aastal liginullenergia hooneks tehases toodetud lisasoojustuselementidega (vt Joonis 8). Ühtlasi on tegemist Eestis esimese liginullenergia tasemele renoveeritud ühiselamuga. Hoone oli enne renoveerimist raudbetoon suurpaneelhoone, millele renoveerimise käigus paigaldati välisseina välispinnale tehases toodetud lisasoojustatud moodulelemendid.

Joonis 8. Akadeemia tee 5a ühiselamu eestvaade (ülal) ja tagantvaade (all).

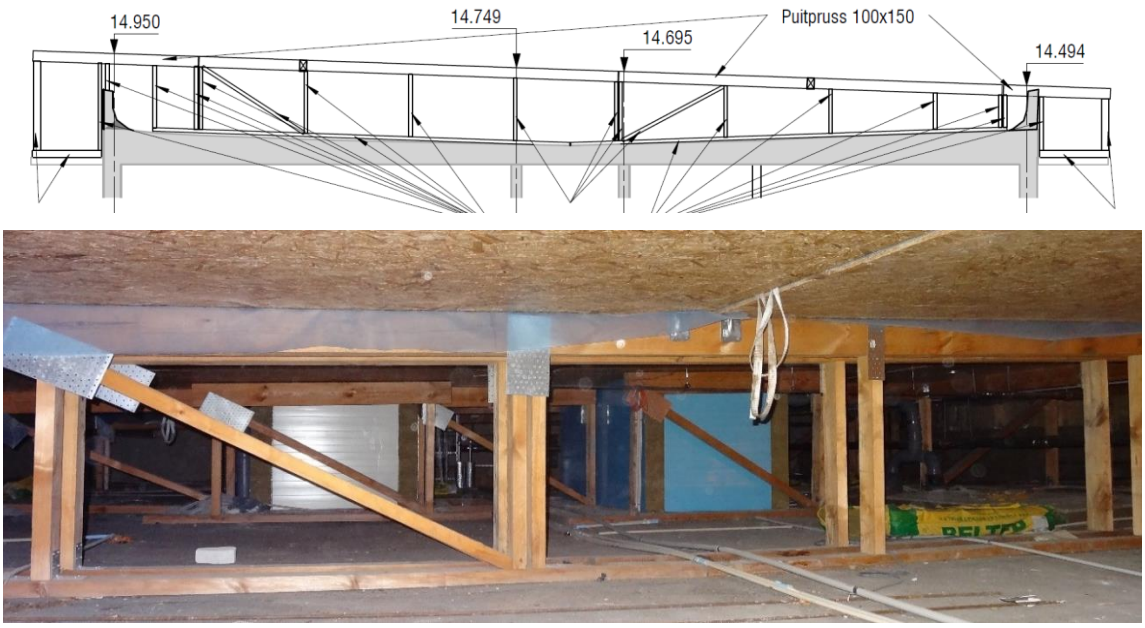
Käesolevas uurimistöös keskendutakse antud hoone puhul pööningule, sest pööningul olevatel puitpindadel hakkasid kasvama hallitusseened, mille kasv oli tingitud ehituse käigus pööningule akumuleerunud liigniiskuse tõttu (sademed enne montaaži lõppu vt Joonis 9). Pööningu toolvärkide ehitamise hetkel oli vana katuslagi kaetud veega (vt Joonis 10) ning vesi ei voolanud ära ettenähtud kanalisatsioonitorudesse, mistõttu toolvärkide alumiste vööde prussid olid suure niiskussisaldusega. Märjale põrandale paigaldati ka mineraalvillaplaadid ning osad plaadid olid üleni vettinud (vt Joonis 11).



Joonis 9. Katuslaepaneelide paigalduse plaan dateeritult ja koos pindala ja sademete hulgaga pindala kohta.

Joonis 10. Märjale pinnale paigaldatud mineraalvillaplaadid (vasakul) ja veega kaetud pööningupõrand, millele on püstitatud toolvärgid (paremal).

Joonis 11. Märjad mineraalvillaplaadid pööningu põrandal.



Joonis 12. Väljavõte toolvärgi joonisest (ülal) ja toolvärk peale katuslaepaneelide paigaldust

Mineraalvillaplaatide paigaldamine pööningu põrandale oli põhjendatud asjaoluga, et vähendada pööningu ruumi pindade süttivustundlikkust. Hoone katusekatteks olnud ruberoidkate täitis ajutise vihmakaitse eesmärki, mistõttu seda varem eemaldada ei saanud. Ehitusprojektis oli ette nähtud paigaldada rullkatte peale killustik, aga ehitaja muutis lahenduse mineraalvilla vastu. Killustiku paigaldus olnuks tülikam ja ka pööningul liikumine oleks olnud killustikukatte korral ebamugavam. Kuna pööningukorruse kõrgus on väga madal (ca 1m, vt Joonis 12), siis peale katuslae lisasoojustatud moodulpaneelide paigaldust oleks olnud keeruline mineraalvillaplaate paigaldada. Nii paigaldatigi villaplaadid pööningule enne katuslae lisasoojustuspaneele.

Katuslaepaneelide paigaldamisel kaeti osaliselt presendiga (koormakattega) toolvärkide vahelised piirkonnad, et vältida vihmavee sattumist pööningu põrandale, ent see ettevaatusabinõu ei töötanud ideaalselt, kuna katuse servad polnud ülekattega kaetud ning sealt valgus vesi pööningu põrandale.

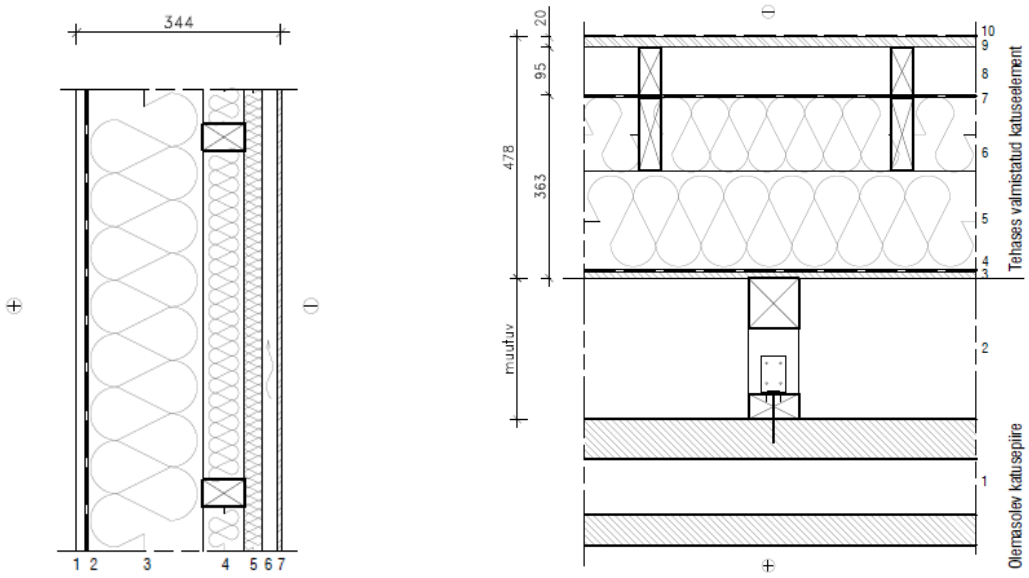
Joonis 13. Katuslaepaneelide paigaldus 2017. aasta juunis.

Joonis 14. Paigaldatud katusepaneelid ja nende vuugid.

Joonis 15. Pööningu katmine presendiga.

Niiskusega seotud probleemid avaldusid peale ehitustööde lõppu, kui 17. augustil 2017 käidi pööningul olukorraga tutvumas ning ülevaatusel selgus, et osadel puitpindadel kasvavad hallitusseened. Pööningu põrandal olevad mineraalvillaplaadid ja nende all olev SBS rullkatte pind olid märjad ja ehitusprahiga kaetud, toolvärkide alumised vööd liigniisked, katuslaepaneelide vahelised vuugid polnud piisavalt soojustatud ega õhutihedad ja läbiviigud läbi paneelide polnud soojustatud ega tihendatud. Pööning vajas hallitusega kaetud materjalide eemaldamist, allesjäävate pindade ülepritsimist hallituse tõrje vahendiga, garantiitöid ning koostati kava olukorra parendamiseks (Kalamees *et al.*, 2017).

Joonis 16. Vesi katuslaepaneeli kile pinnal, OSB-d pole paigaldatud (Targo Kalamees).



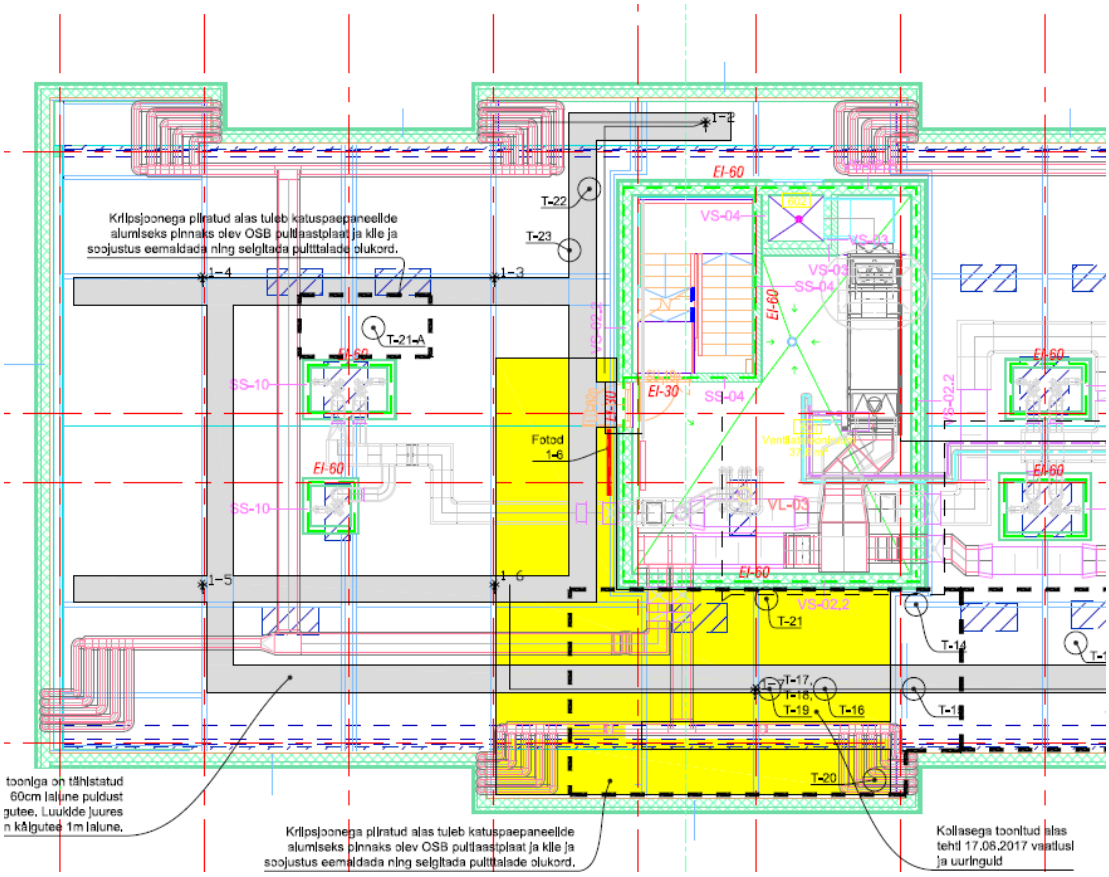
Joonis 17. Pööningu välissein (vasakul) ja katuslagi (paremal). (Sirkel & Mall, 2016).

Antud hoone puhul uuritakse hallituse kasvu teket pööningu puitpindadel (hallituse kasv oli peamiselt katuslae OSB sisepinnal). Katuslae ja välisseina konstruktsioonide kihid on sarnased (vt Joonis 17 ja Tabel 3).

Tabel 3. Välisseina ja katuslae tarindite kihid.

Kihi nr	**Välissein**	**Kihi nr**	**Katuslagi**
-	-	1	Olemasolev katuslagi (õõnespaneel, soojustus ja SBS rullmaterjal)
-	-	2	Toolvärk sammuga 3200 mm
1	12 mm OSB plaat	3	12 mm OSB plaat
2	0,2 mm aurutõke	4	0,2 mm aurutõke
3	200 mm mineraalvilla, 195x45 mm puitroovitus sammuga 600 mm	5	200 mm mineraalvilla, 195x45 mm puitroovitus sammuga 600 mm
4	70 mm mineraalvilla, 70x45 mm puitroovitus sammuga 600 mm	6	150 mm mineraalvilla, 145x45 mm puitroovitus sammuga 600 mm
5	30 mm tuuletõkkeplaat	7	Aluskate-tuuletõke
6	25 mm õhkvahe, vertikaalne roovitus 25x100 mm sammuga 400 mm	8	95 mm õhkvahe, 95x45 mm puitroovitus sammuga 600 mm
7	Fassaadiplaat	9	20 mm niiskuskindlat vineeri
-	-	10	SBS rullkattematerjal kahes kihis

Peale ehitustööde lõppu, 2017. aasta 17. augustil, võeti ühiselamu pööningult esimesed hallitusproovid. Ventilatsioonikambri ümbruses oli hallitusseente kasv massiline (hallituse indeksiga 3-5, vt Joonis 19). Proovide uuring tuvastas, et hallitus oli peamiselt katuslaepaneelide aluse OSB plaadi pinnal. Kokku tuvastati OSB pindadel erinevaid hallitusseente liike, mis kuuluvad nelja eri perekonda: Penicillium, Aspergillus (kerahallik), Chaetomium ja Cladosporium. Katuslaepaneeli seest leiti sealse puidu pinnalt Phoma, Penicilliumi ja Aspergilluse perekonna seeneliike. Toolvärgi prusside peal kasvasid sinavusseened (Kalamees *et al.*, 2017).



Joonis 18. Kollasega märgitud ala pööningul, ventilatsioonikambri ümbruses, kust leiti enim hallituskahjustusi puidu pindadel (Kalamees *et al.*, 2017).

Esimesest hallitusproovide võtmisest neli päeva hiljem 21. augustil võeti uued materjaliproovid ja kleeplindiproovid. Materjaliproovid olid korras, ent kleeplindiproovidelt nähtus, et hallitust ja hallitanud saepuru on materjalipindadel ikka veel alles. 25. augustil 2017 käidi täiendavaid proove kogumas. Proovidelt avastati erinevaid hallitusseente perekondade esindajaid, millest mõned võivad põhjustada olulisi tervisekahjustusi inimestele. Hallituse levik oli pindadel massiline ja leiti ka veel enam sinavusseente asukohti (vt Joonis 19). Järgmine materjaliproovide võtmise kuupäev oli 18. september 2017, kus võrreldes eelnevate proovidega tuvastati vähem hallitust, kuid visuaalselt oli pööningu puitpindadel näha hallitust. Selleks ajaks olid ka

suuremad puhastustööd tehtud, aga probleemid katusepaneelide vuukide soojustamise ja õhutihedusega olid endiselt lahendamata ning mõningates kohtades oli katuse soojustus mittekorrektselt tagasi paigaldatud, kus puitkarkassi ja mineraalvilla vahel olid tühjad vahemikud, kust õhk vabalt läbi liikuda sai. 11. oktoobril 2017 käidi kontrollproove kogumas pööningult, kust ei leitud märkigi hallitusest, ent visuaalselt hallitavaid pindu oli siiski võimalik tuvastada (Kalamees *et al.*, 2017). Viimane kleeplindiproovide võtmine pööningult toimus 17. veebruaril 2021. aastal, mil võeti proovid vanadest asukohtadest, kust varasemalt hallitus oli tuvastatud.

Joonis 19. Hallituse kasv OSB plaadi pinnal (Kalamees *et al.*, 2017).

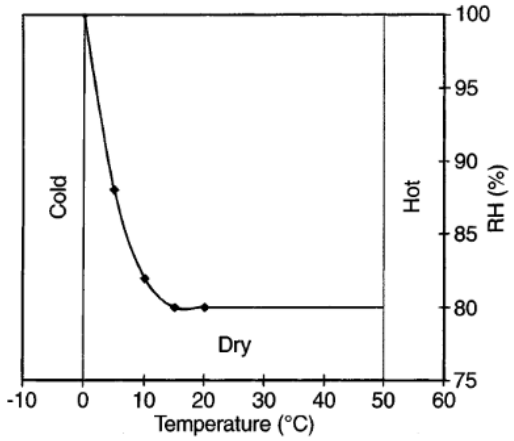
3.2 Hallituse tekke hindamise matemaatiline mudel

Baseerudes A. Hukka ja H. A. Viitaneni tööle, hinnatakse matemaatilise mudeli järgi hallituse kasvu puitmaterjalidel. Aluseks on kuuse ja männi maltspuidu osa hallitamise tulemused. Hallitusseentele sobiv temperatuuri vahemik on 0-50 °C ning kriitiline suhteline niiskus sõltuvana temperatuurist (vt Joonis 20.) avaldub kujul:

$$\varphi_{crit} = \begin{cases} -0{,}00267T^3 + 0{,}160T^2 - 3{,}13T + 100; & kui\ T \leq 20 \\ 80, & kui\ T > 20 \end{cases}$$

Valem 9.

kus *T* [°C] on temperatuur Celsiuse skaalal, lisamärkusena olgu öeldud, et selles peatükis ja hallitusega seotud arvutustes on temperatuurid antud Celsiuse skaalal (Hukka ja Viitanen, 1999).



Joonis 20. Sobivad tingimused hallituse kasvuks puitpindadel (Hukka ja Viitanen, 1999).

Hallituse hindamiseks on koostatud skaala hallituse indeksitele (*M*), kus igale arvule vastab tulemus:

M=0, hallituse kasvu ei ole;

M=1, mõningane hallituse kasv, mis on tuvastatav ainult mikroskoobiga;

M=2, mõõdukas hallituse kasv tuvastatud mikroskoobiga (katvus rohkem kui 10%);

M=3, mõningane hallituse kasv visuaalselt tuvastatav;

M=4, visuaalselt tuvastatav katvus ulatusega üle 10%;

M=5, visuaalselt tuvastatav katvus ulatusega üle 50%;

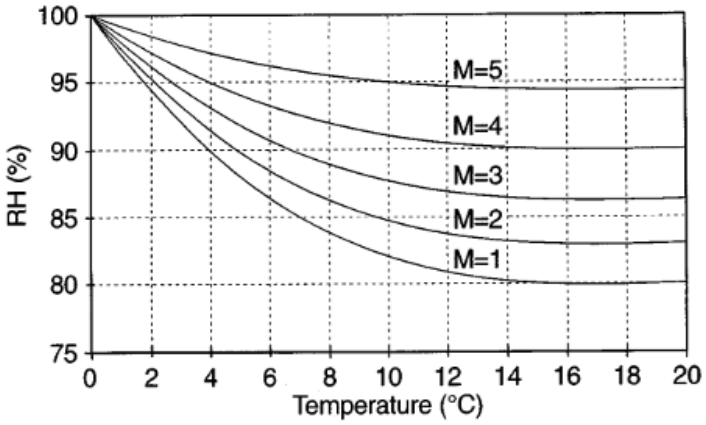
M=6, visuaalselt tuvastatav katvus ulatusega 100% (Hukka ja Viitanen, 1999).

Hallituse indeksite *M* väärtuste 1 ja 6 vahel eeldatakse paraboolset valemit kujul:

$$M_{max} = 1 + 7\frac{\varphi_{crit} - \varphi}{\varphi_{crit} - 100} - 2\left(\frac{\varphi_{crit} - \varphi}{\varphi_{crit} - 100}\right)^2,$$

Valem 10.

kus φ [%] vastab suhtelisele niiskusele otseses katses (vt Joonis 21.) (Hukka ja Viitanen, 1999).



Joonis 21. Temperatuurist sõltuv hallituse indeksi kõverad (Hukka ja Viitanen, 1999).

Valem, mis iseloomustab vajalikku aega t_m (nädalates) soodsates tingimustes (püsiv temperatuur ja suhteline niiskus) hallituse kasvamise alguseks puitpinnal, esineb kujul:

$$t_m = e^{-0{,}68 \ln T - 13{,}9 \ln \varphi + 0{,}14W - 0{,}33SQ + 66{,}02},$$

Valem 11.

kus W iseloomustab puiduliiki (0=mänd, 1=kuusk) ja SQ pinna kvaliteeti (0=uuesti saetud, 1=originaalis ahjukuivatud). Kui eeldada, et hallituse indeks M kasvab ajas lineaarselt ja aega mõõdetakse päevades, siis saaks valemi (Valem 11.) ümber kirjutada diferentsiaalkujul:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot e^{-0{,}68 \ln T - 13{,}9 \ln \varphi + 0{,}14W - 0{,}33SQ + 66{,}02}}, \quad M < 1$$

Valem 12.

Kui hallituse kasv jõuab algfaasi ($M=1$), siis valem (Valem 11.) enam ei kehti. Suurema kasvu jaoks on järgmine valem, mis iseloomustab esmase visuaalselt nähtava hallituse kasvu ($M=3$) (Hukka ja Viitanen, 1999):

$$t_v = e^{-0{,}74 \ln T - 12{,}72 \ln \varphi + 0{,}06W + 61{,}50}.$$

Valem 13.

Parandustegur hallituse kasvu hindamisel:

$$k_1 = \begin{cases} 1 & kui\ M < 1; \\ \dfrac{2}{\left(\dfrac{t_v}{t_m} - 1\right)} & kui\ M > 1, \end{cases}$$

Valem 14.

Teise parandusteguri k_2 valemiks on:

$$k_2 = 1 - e^{2{,}3(M - M_{max})}.$$

Valem 15.

Lõplik valem iseloomustamaks hallituse kasvu soodsates tingimustes:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot e^{-0{,}68 \ln T - 13{,}9 \ln \varphi + 0{,}14W - 0{,}33SQ + 66{,}02}} k_1 k_2$$

Valem 16.

Arvestatud on ka hallituse kasvu mittesobivates tingimustes, kus tingimused kõiguvad sobilike ja mittesobilike tingimuste vahel. Selleks kasutatakse viiteaega (t-t_1), mis defineerib kuivades tingimustes möödunud aja:

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0{,}032 & kui\ t - t_1 < 6h \\ 0 & kui\ 6h \le t - t_1 \le 24h \\ -0{,}016 & kui\ t - t_1 > 24h\ , \end{cases}$$

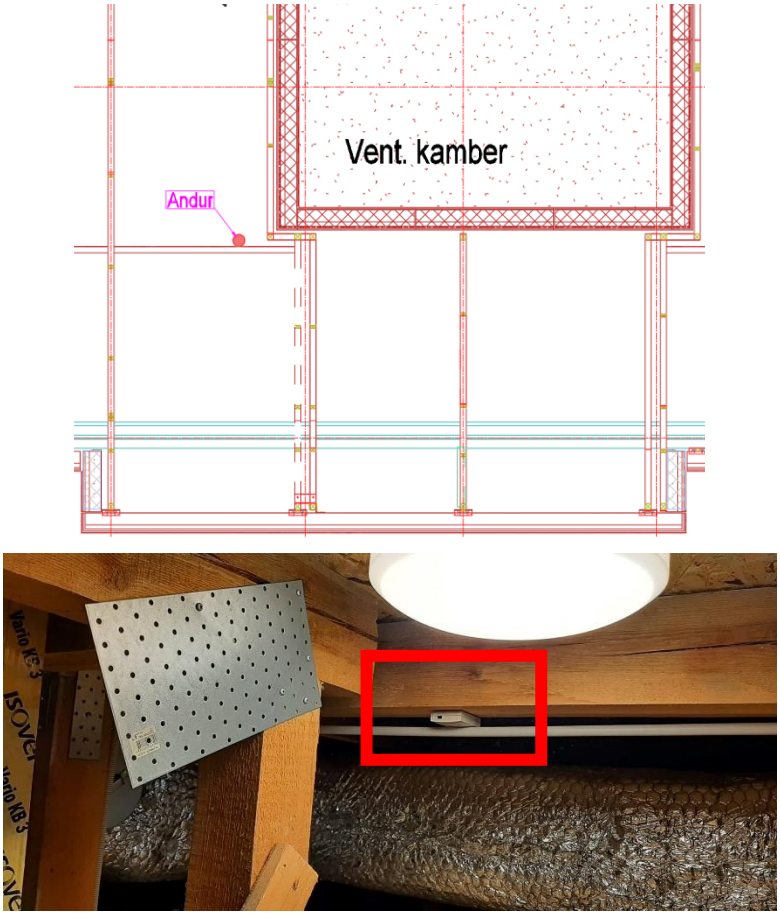
Valem 17.

tähelepanuväärne on asjaolu, et kuivade tingimuste kestmine 6-24 h vahel ei mõjuta hallituse indeksi muutu (Hukka ja Viitanen, 1999). Uurimuses on kasutatud Tampere Ülikoolis välja töötatud arvutusmudelit. Mudelis saab määrata vastavalt materjali tüübile parameetrid hallituse kasvukiiruse tundlikkusele (mõjutab tegurit k_1), materjali hallituse tundlikkuse klass (mõjutab M_{max} arvutust) ja hallituse taandumise klassi (määrab taandumise kiiruse sõltuvana kuivamisajast, vt Valem 17.). Mudelis on kirjeldatud erinevate materjalide käitumist ning antud töös uuritava OSB kirjeldus on seal samuti toodud (Viitanen, 2017). Arvutusprogrammist saadud OSB pinnatemperatuurid ja suhtelised niiskused on sisestatud välja töötatud hallituse tekke hindamise arvutusmudelisse ning saadud resultaadid esitatakse tulemuste osas.

3.3 Mõõtmised

3.3.1 Pööningu sisekliima

Pööningule paigaldati HOBO U12 andur (mõõteulatused: temperatuur -20 kuni 70°C, suhteline niiskus: 5-95%, mõõtetäpsus: temperatuur: ±0,35°C, suhteline niiskus: 2,5-10%) mõõtmaks sealset sisekliimat (vt Joonis 22). Ka 5. korrusele paigaldati kahte ruumi HOBO U12 andurid, et mõõta siseõhu temperatuuri ning anduritest logitud andmeid kasutatakse mudelite kalibreerimisel (vt Joonis 23).



Joonis 22. Anduri asukoht pööningul ventilatsiooni ruumi vahetus läheduses.

Joonis 23. 5. korruse korterite mõõdetud sisekliima andmed ja kütte seadepunktid.

3.3.2 Hallitusproovide võtmine

2021. aasta kevadel käisid töö autor ning juhendaja Kristo Kalbe pööningult materjalide kordusproove võtmas hallituse tuvastamiseks. Proovide võtmisel asetati läbipaistev kleeplint uuritava koha peale ning peale puidu pinnalt kleeplindi eemaldamist, kleebiti proov kile peale, et proov säiliks. Laboris kinnitati proovid alusklaasile ja värviti selektiivselt seenorganismide avastamiseks. Seenorganisme avastas ja tuvastas Tallinna Tehnikaülikooli vanemteadur ja emeriitprofessor Urve Kallavus valgusmikroskoobiga JENAVAL tehnikaülikooli laboris.

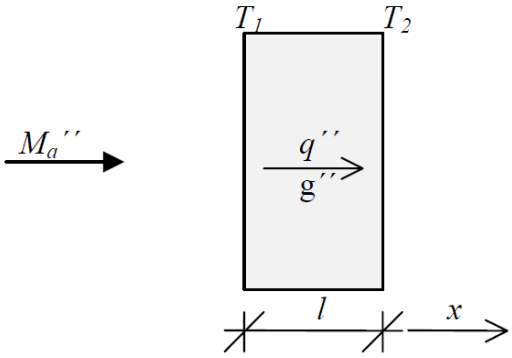
Joonis 24. Hallitusproovi asukoht pööningu katuslae OSB sisepinnalt.

3.4 Arvutused

3.4.1 IDA ICE ja HAMWall

Töös on kasutatud IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) on Rootsi ettevõtte EQUA Simulations AB poolt arendatud tarkvara ehitise energiatarbe, siseõhu kvaliteedi ja soojusliku mugavuse simuleerimiseks. Tarkvara pakub võimalust integreeritud õhuvooluvõrgu mudelite (arvestab tuule ja üleslükkejõu õhuvooludega läbi avade ja lekete), soojuslike mudelite, CO_2 ja niiskuse arvutamiseks (Björsell *et al.*, 1999). IDA ICE tarkvaras on lisaks 3D mudelile ka matemaatiline mudel, millega käesolevas uurimuses tegeletakse (Ab, 2002).

HAMWall on J. Kurnitski ja M. Vuolle arendatud pistikprogramm IDA ICE jaoks, millega on võimalik arvutada tarindis oleva soojuse, niiskuse ja õhu liikumist. Tegemist on ühe-dimensioonilise arvutusprogrammiga, kuhu on võimalik lisada tarindile vastavaid omadusi ja seada algparameetreid. Programmis on niiskuse liikumise potentsiaaliks seatud õhu niiskussisaldus ning niiskuse levikul arvestatakse vaid auru liikumisega.



Joonis 25. Soojus-, õhu- ja niiskusvoo suunad läbi kihi (Kurnitski ja Vuolle, 2000).

Arvestades skeemiga (vt Joonis 26), kus iga materjali kiht kirjeldab kahte takistust *R* ja ühte mahtuvust *C*, millest viimane asub kihi keskel. Niiskussisaldus *w* ja veeaurutakistus *Z* iseloomustavad niiskuslevi. Iga kihi materjaliomadused on defineeritud, seega on võimalik luua moodul, kus on ükskõik palju tahes materjalikihte, kui parajasti tarvis on. Enne tasakaaluvõrrandite lahendamist on tarvis defineerida kihi jaoks siseneva ja väljuva soojus- ja niiskusvoo võrrandid. Kihtide vahelise soojusvoo *q* [W/m^2] leidmise on järgmised valemid:

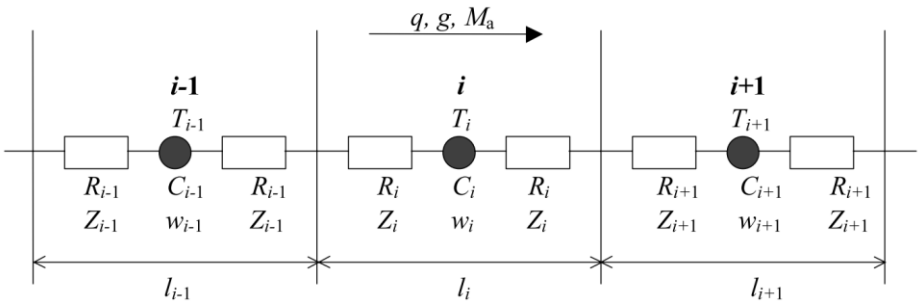
$$q_{i-1\to i} = \frac{A}{R_{i-1} + R_i}(T_{i-1} - T_i) + M_a H_{i-1} + g^D_{i-1\to i} h_{vap},$$

Valem 18.

$$q_{i\to i+} = \frac{A}{R_i + R_{i+1}}(T_i - T_{i+1}) + M_a H_i + g^D_{i\to i+1} h_{vap},$$

Valem 19.

kus A [m^2] on kihi pindala, $R_i=l_1/2\lambda$ [m^{2}K/W] poole kihi soojustakistus, l_i [m] kihi paksus, T_i [K] kihi temperatuur, M_a [kg/(s·m^2)], H [J/kg] niiske õhu entalpia, g^D [kg/s] difusiivne niiskusvoog ja h_{vap}=2,5·10^6 J/kg vee aurustumissoojus (Kurnitski ja Vuolle, 2000).



Joonis 26. Arvutusskeem erinevate materjali kihtide jaoks (Kurnitski ja Vuolle, 2000).

Niiskusvoo g [kg/(s·m^2)] ja niiskustasakaalu valemid avalduvad järgnevalt:

$$g_{i-1\to i} = \frac{A}{Z_{i-1}+Z_i}(\nu_{i-1}-\nu_i) + \frac{M_a}{\rho_a}\nu_{i-1},$$

Valem 20.

$$g_{i\to i+} = \frac{A}{Z_i+Z_{i+1}}(\nu_i-\nu_{i+1}) + \frac{M_a}{\rho_a}\nu,$$

Valem 21.

$$Al_i\frac{\partial w_i}{\partial t} = \frac{A}{Z_{i-1}+Z_i}(\nu_{i-1}-\nu_i) - \frac{A}{Z_i+Z_{i+1}}(\nu_i-\nu_{i+1}) + \frac{M_a}{\rho_a}(\nu_{i-1}-\nu_i),$$

Valem 22.

kus $Z_i=l_i/2\delta_{vi}$ [s/m] on poole kihi veeaurutakistus, v_i [kg/m^3] veeauru sisaldus õhus, ρ_a [kg/m^3] õhu tihedus, w [kg/m^3] materjali niiskussisaldus. Voogude suunad reeglina kattuvad, kuid võib ka olla erinevusi (Kurnitski ja Vuolle, 2000).

Materjalide veearuerijuhtivus sõltub suhtelisest niiskusest, seega on HAMWallis võimalik defineerida materjali niiskusjuhtivuse δ_v muutumist valemiga:

$$\delta_v = \delta_0 + B\left(\frac{\varphi}{100}\right)^C,$$

Valem 23.

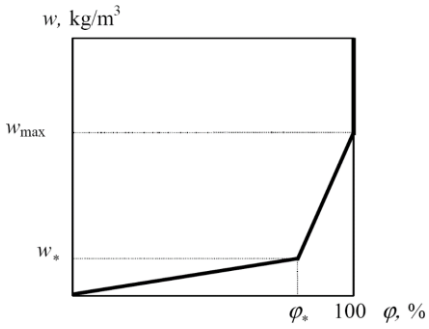
kus δ_o [(m^2/s), veearuerijuhtivus kuivas tingimustes], B [m^2/s] ja C [-] on konstandid ja φ tähistab õhu suhtelist niiskust (Kurnitski ja Vuolle, 2000).

Kasutades kahe sirge joone võrrandit on vaja defineerida programmis materjalile üks punkt sorptsiooni kõveral. Valem esineb kujul:

$$w = w_* + \frac{\varphi-\varphi_*}{100-\varphi_*}(w_{max}-w_*),\ \ \varphi_* < \varphi \le 100\%,$$

Valem 24.

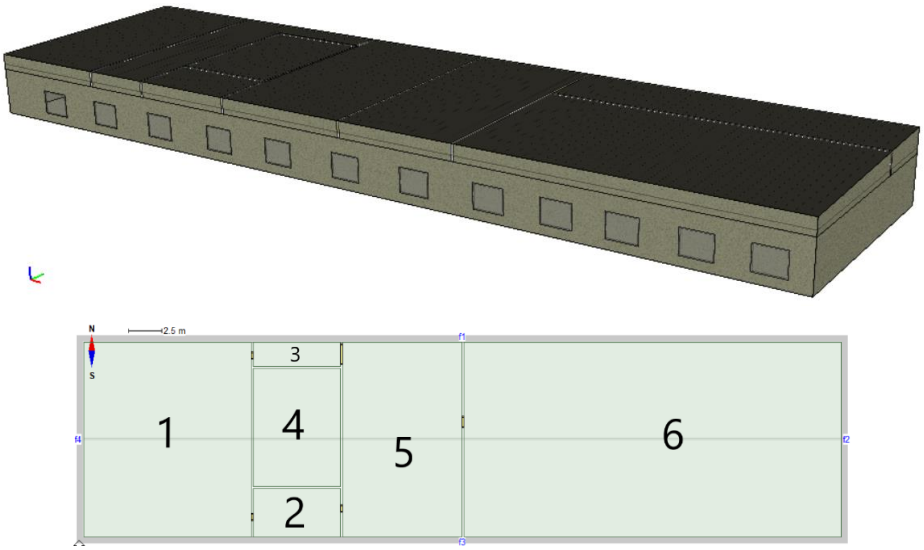
kus φ_* kasutaja poolt määratud suhteline niiskus ja w_* materjali niiskussisaldus (Kurnitski ja Vuolle, 2000).



Joonis 27. Lineaarne lihtsustus sorptsiooni isotermist (Kurnitski ja Vuolle, 2000).

3.4.2 Arvutusmudeli koostamine ja kalibreerimine

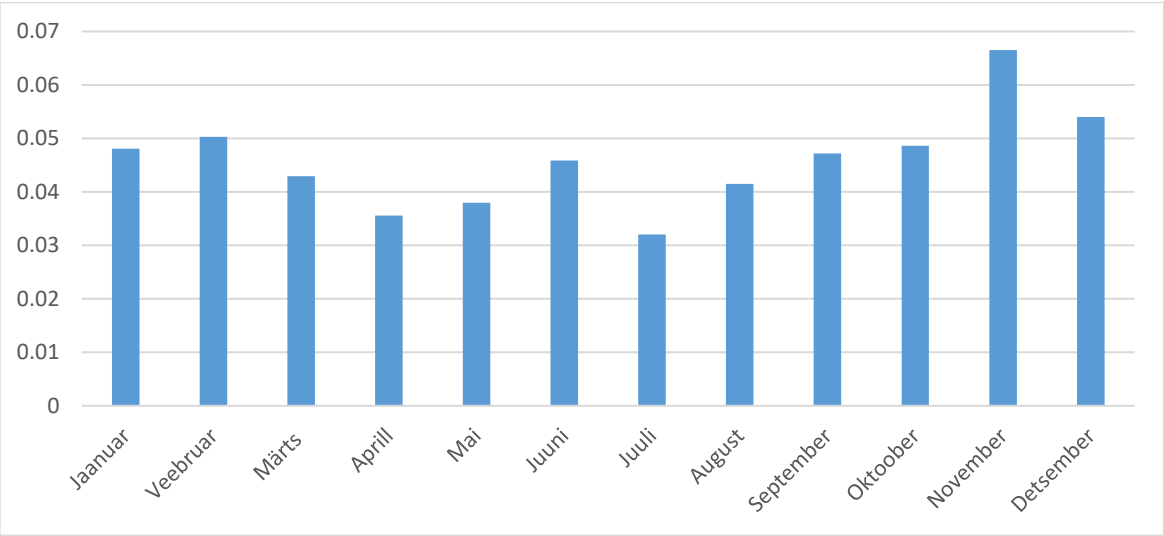
Mudeli koostamisel ja kalibreerimisel lähtutakse hoone projektist ja mõõdetud sisekliima andmetest perioodil 03.12.2017 kuni 02.12.2018. Mudel koostatakse energiasimulatsioonitarkvaras IDA ICE 4.8 ning sellele on lisatud laiendus HAMWall (tarindi niiskuslevi ja soojuslevi arvutamiseks, puuduseks on niiskuslevi arvutamisel arvestamine ainult difusiooniga ehk ei arvesta vee kapillaarse liikumisega) ja Ice Rinks and Pools (ruumidesse niiskustootluse loomiseks). Akadeemia tee 5a ühiselamu modelleerimisel tehti lihtsustusi: kaasati mudelisse ainult uuritav pööning ning viies korrus, hoone geomeetriat lihtsustati, 5. korruse plaanil liideti korterid üheks suureks ruumiks. Pööningu korruse mõõtmed mudelis 57x14,5m ning madalamas osas (lõuna pool) kõrgus 0,8m ning kõrgemas osas 1,3m.



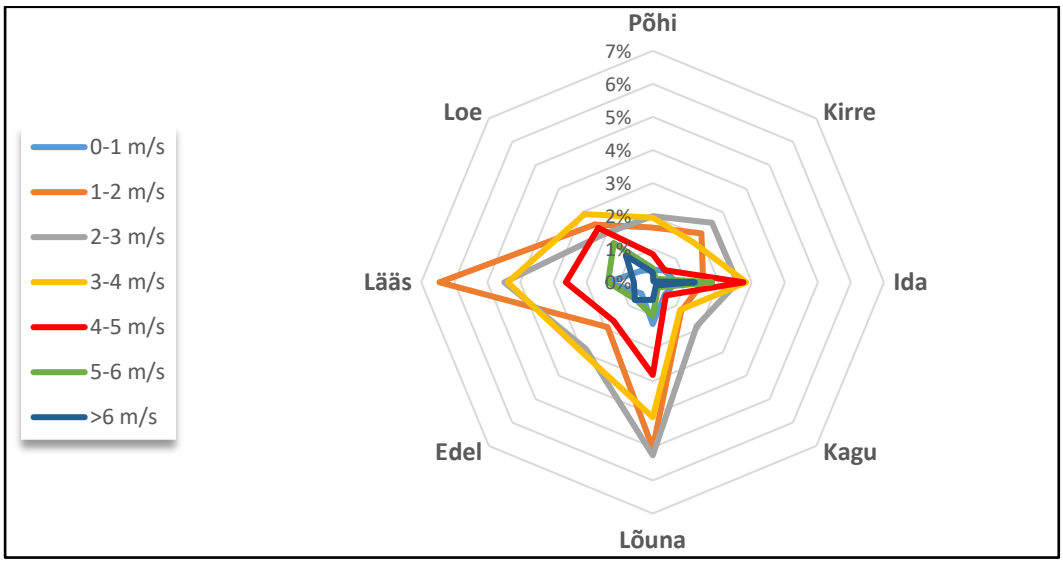
Joonis 28. Hoone aksonomeetria (ülal) ja pööningu plaan (all) IDA ICE programmis. Tsoonid: läänepoolne pööningu osa (1), lõunapoolne pööningu osa (2), põhjapoolne pööningu osa (3), ventilatsiooni kamber (4), pööningu keskosa (5), idapoolne pööningu osa (6).

Iga pööningu tsooni põrandale on mudeldatud bassein, mis katab 90...95% põranda pindalast. Basseinile kütet ega veevahetust ei määrata, basseini sügavuseks määratud 3 cm ning aktiivsusteguriks seatud 1,0 ehitusniiskuse väljakuivamise perioodil.

Mudeli kalibreerimisel on tarvis viia kooskõlla tulemused simulatsioonist ning eelmainitud ajaperioodi vahemikus mõõdetud sisekliima tulemused pööningul. Tulemuste vastavusse saamiseks on tarvis ka väliskliima andmeid (välisõhu temperatuur, suhteline niiskus, tuule suunad ja tuulekiirus, päikeselt tulev otse- ja hajuskiirgus) antud ajavahemikus. Pööning jaotatakse mudelis viieks eri osaks, kui ventilatsiooniruum välja arvata, kuna nii sai jagada pööningu eraldi sektsioonideks ja huvi pakkus enim ventilatsiooniruumist (tsoon nr 4, vt Joonis 28) lõunase jääv väike tsoon (tsoon nr 2), kust leiti kõige rohkem hallitust. Pööningu tsoonide vahele on mudeldatud avad, et õhk saaks neis ringelda ja avade suuruseid iseloomustab vaba ruum nende vahel (sektsioonide vahel toolvärgid ja ventilatsioonitorud). Viienda korruse ruumitemperatuurid mudeli jaoks valitakse ruumide kütte seadepunktiks 23,5 °C (vt Joonis 23), mis on ligikaudu keskmine temperatuur kütteperioodil.
Pööningule tehti 2017. aasta oktoobris õhulekke test ning pööningu õhulekkearvuks määrati $q_{50} \leq 2$ m^3/(h·m^2). Hoone on osaliselt avatud tuulele ning lähtuvalt sellest määrati IDA ICE programmis rõhutegurid seintele ning katusele. Sooritati arvutus õhuvahetusele ja soojuskadudele perioodil 03.12.2017-2.12.2018. Selgus, et aasta jooksul õhuvahetus aasta jooksul on ligi 320 000 m^3 õhku (keskmiselt 36,5 m^3/h, vt Joonis 42) ehk infiltratsiooni teel on pööningul õhuvahetusarv n_{50} = 0,046 (aastas umbes 400 õhuvahetust ja üle 1 õhuvahetuse päevas).

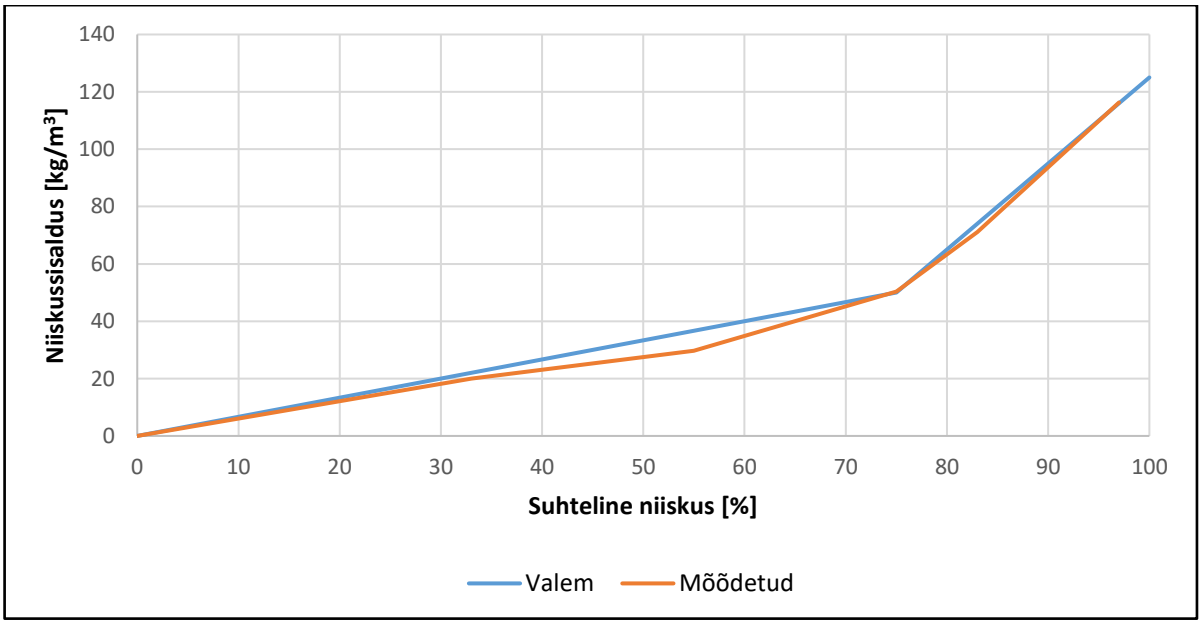


Joonis 29. Keskmine õhuvahetusarv kuude põhiselt.

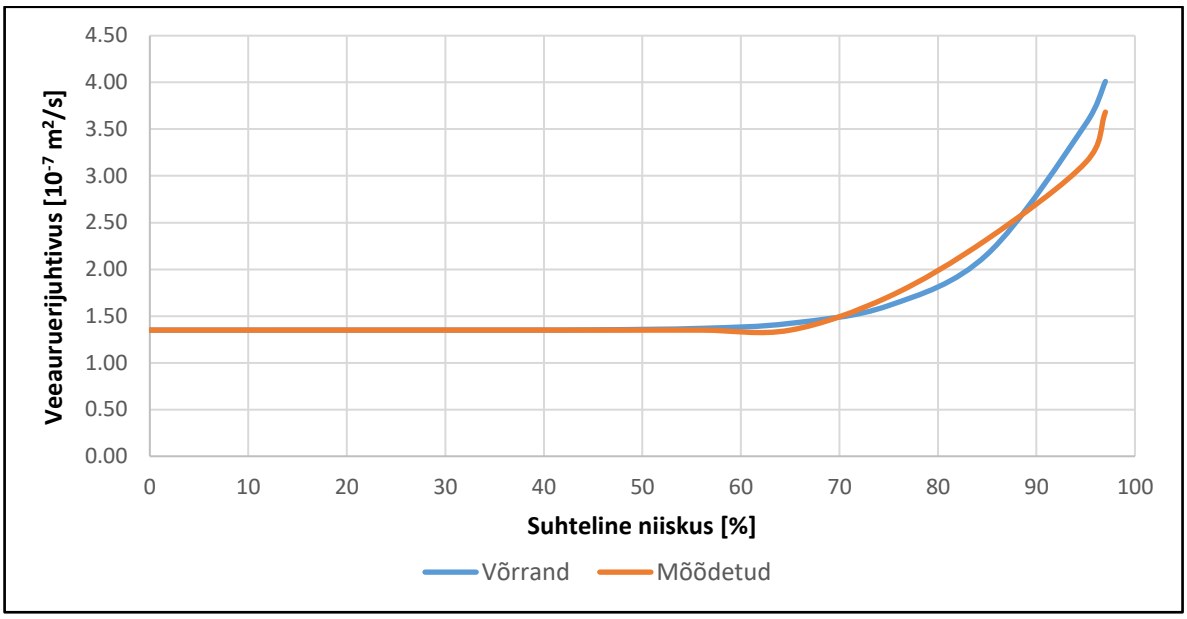


Joonis 30. Tuuleroos, mis iseloomustab simulatsiooni perioodi.

Kliima andmetele lisaks on tarvis teada ka OSB materjali andmeid, nimelt sorptsiooni kõverat ning veeauruerijuhtivus. Selleks kasutatakse lihtsustatuid meetmeid mainitud eespool (vt Valem 23. ja Valem 24.). Valitud väärtused antud valemite jaoks on järgnevad: δ_0=1,35·10^{-7} m^2/s, B=1,35·10^{-7} m^2/s, C=9, w_*=50 kg/m^3, φ_*=75% ja w_{max}=125 kg/m^3. Valemite täpsuse võrdluseks on need kõrvutatud OSB materjali mõõdetud tulemustega (Tariku *et al.*, 2002). Materjalide algniiskuseks valiti simulatsiooni 18% suhtelise niiskuse juures olev niiskussisaldus 12 kg/m^3.



Joonis 31. OSB sorptsiooni kõverate võrdlus.



Joonis 32. OSB veeauruerijuhtivuste võrdlus.

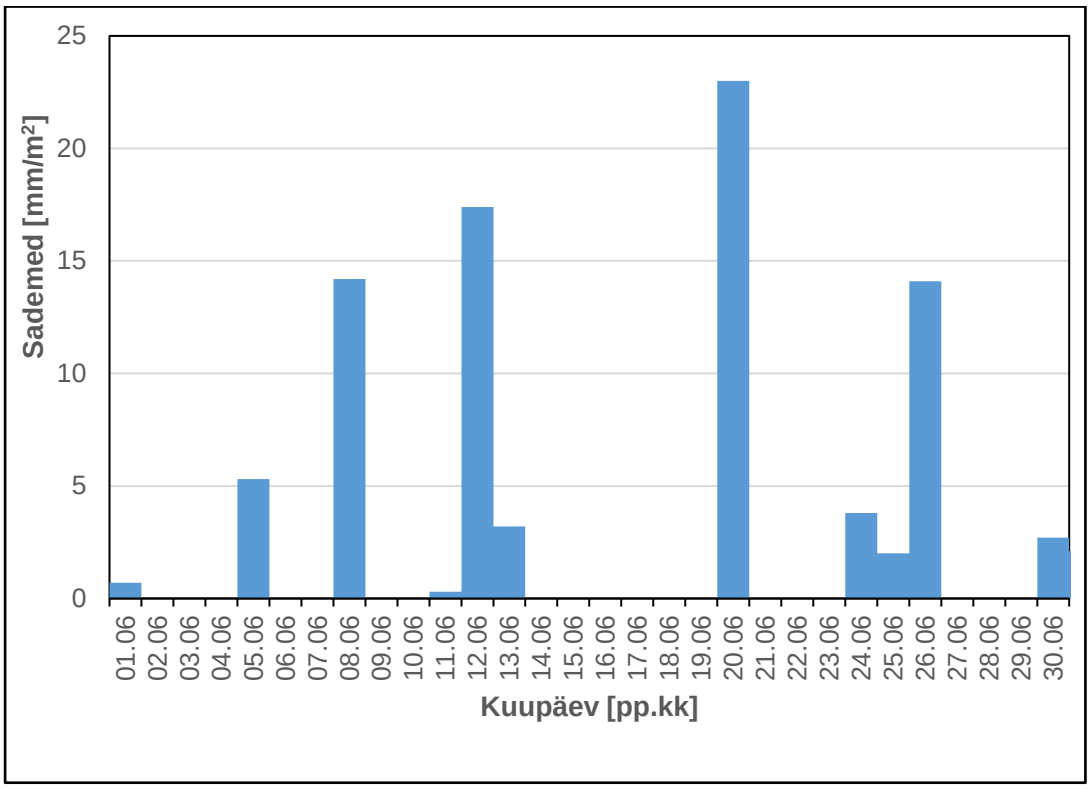
Mudeli kalibreerimisel oli suurimaks väljakutseks mudeldada ruumiõhu suhtelise niiskuse sõltuvust ehitusniiskusest, sest mõõtmised pärinevad perioodist, mil pööningul oli veel mõningane ehitusniiskus väljakuivamisel. Esialgsete tulemuste saamiseks, mudeldati hoone 3D mudelis, et oleks võimalik vältida vigu matemaatilises mudelis. Samm-sammult sai mudeli täpsustamisel simulatsiooni tulemused lähedaseks mõõdetud resultaatidega ning hiljem matemaatilisse mudelisse üleminekul vahetati IDA ICE tavakasutuses olevad tarindite programmid HAMWall pistikprogrammi vastu

.

3.5 Ehitusperioodijärgse olukorra simuleerimine ja alternatiivsed simulatsioonid

Ehitusperioodijärgse olukorra all mõistetakse hoone valmimise hetke, mil ehitustegevus on lõpusirgel ehk alustatakse pööningu katuse ehitamisega ning sellele järgnev periood. Teada on katusepaneelide paigaldamise hetked (2017. aasta 5. juuni kuni 30. juuni, vt Joonis 9) ning sademed sellel perioodil (vt Joonis 33), mida on tavapärase keskmise juunikuu sademetest rohkem (2017. aastal 86 mm, keskmine 69 mm). Siinjuures ei arvestata ventilatsiooniruumiga, mis on eraldatud pööningust ja mille katuslagi ehitati varem valmis. Simulatsiooni perioodiks võetakse ajavahemik 1. juuni 2017 kuni 3. detsember 2018. See tähendab, et arvesse võetakse katusele akumuleerunud niiskusega pööningu põrandale, kuhu oli paigaldatud mineraalvillaplaadid, mis said sademete tulemusel märjaks. Ühtlasi jääb simulatsiooniperioodi sisse ka mõõtetulemuste periood pööningul, mille järgi algne mudel sai kalibreeritud. Simulatsiooni eesmärk on hinnata pööningu niiskusturvalisust ehk hinnata puitpindadel hallituse kasvu.

Programmi kasutamine annab võimaluse luua mudeleid, mille simuleerimisel on võimalik hinnata erinevaid niiskusturvalisuse strateegiaid, kuidas ennetada hallituse teket. Antud töös vaadeldakse võimalusi nii suvel kui talvel ning milliseid abinõusid on selleks tarvilik kasutada. Simulatsioonide abil saadakse võrrelda erinevate abinõude efektiivsust ja energiasäästlikkust.



Joonis 33. 2017. aasta juuni sademed päevade lõikes mõõdetuna Harku ilmajaamas.

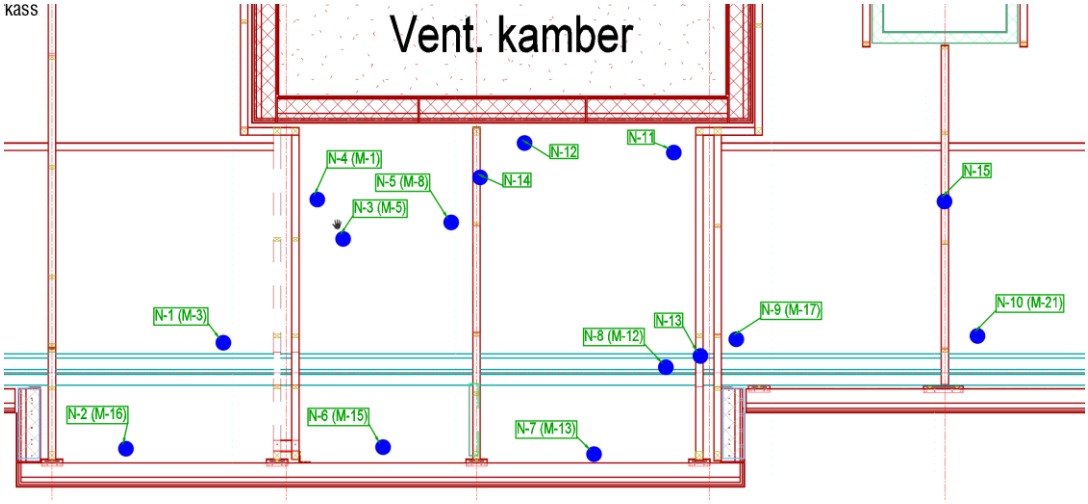
Tähelepanu tuleb juhtida asjaolule, et ventilatsiooniruumi katuslaeplaanid (positsiooninumbri algusega KPV, vt Joonis 9) olid paigaldatud enne teisi katuslaepaneele ning sealt maha valguv vihmavesi sattus lõuna poole jääva pööningu põrandale, ent millega hetkel ei arvesta, lihtsustamaks arvutusi. Andmetest selgub, et katuslaepaneelide paigaldamise ajal sattus pööningule pindalaga 820 m^2 keskmiselt 42,5 mm/m^2 sademeid. Lõppkokkuvõttes sadas pööningule ca 35 m^3 vett (kogus on teoreetiliselt maksimaalne võimalik), millest osa imbus vanale katuslaele paigaldatud mineraalvilla (paksusega 3 cm) sisse ja enamus valgus kanalisatsiooni kaudu pööningult ära. Mudeliga saadakse aimdust reaalsest vee kogusest, mis võis õhku auruda.

4. TULEMUSED JA NENDE HINDAMINE

4.1 Mõõtmised

4.1.1 Materjaliproovid 2021 kevadel

2021. aasta 17. veebruaril võeti pööningult hallitusele kordusproovid 2017. aasta 18. septembril võetud proovidele. Enamus proove võeti ventilatsiooniruumist lõunasse jäävast pööningu osast (ruum nr 2, vt Joonis 28), kus tuvastati enim hallitust 2017. aastal. Proovide numbrid on tähistatud plaanil eesliitega „*N*" ning vanad proovid, kus tuvastati hallitus 2017. aastal on esitatud sulgudes eesliitega „*M*" (vt Tabel 4). Proovide võtmise eesmärgiks oli jõuda kindlusele, et hallitusseened on pööningult kadunud.



Joonis 34. Hallitusproovide plaan pööningul.

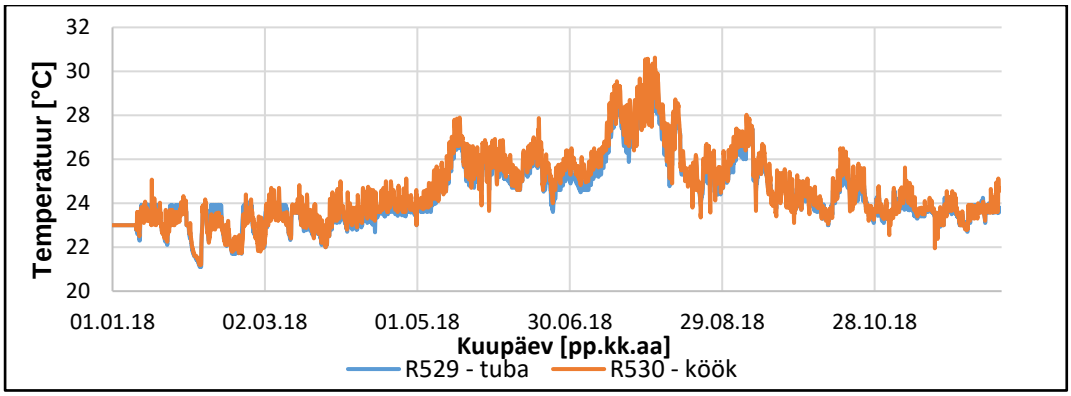
Tabel 4. Hallitusproovide 2017. ja 2021. aasta tulemused (Kalamees *et al.*, 2017; Kallavus, 2021).

Proovi nr	Tulemused 2017	Tulemused 2021
N-1 (M-3)	Hallitus	OK
N-2 (M-16)	OK	OK
N-3 (M-5)	OK	Puidutolmu osakesed on kaetud seeneniitidega
N-4 (M-1)	Hallitus	OK
N-5 (M-8)	OK	Üksikud vanad degradeerunud seeneniidid
N-6 (M-15)	hallitus	OK
N-7 (M-13)	Andmed puuduvad	OK
N-8 (M-12)	OK	OK
N-9 (M-17)	OK	OK
N-10 (M-21)	OK	OK, palju puidutolmu osakesi
N-11 (uus)	Andmed puuduvad	OK
N-12 (uus)	Andmed puuduvad	OK, üksikud eosed
N-13 (uus)	Andmed puuduvad	OK, palju mineraalseid osakesi (liiv)
N-14 (uus)	Andmed puuduvad	OK
N-15 (uus)	Andmed puuduvad	OK

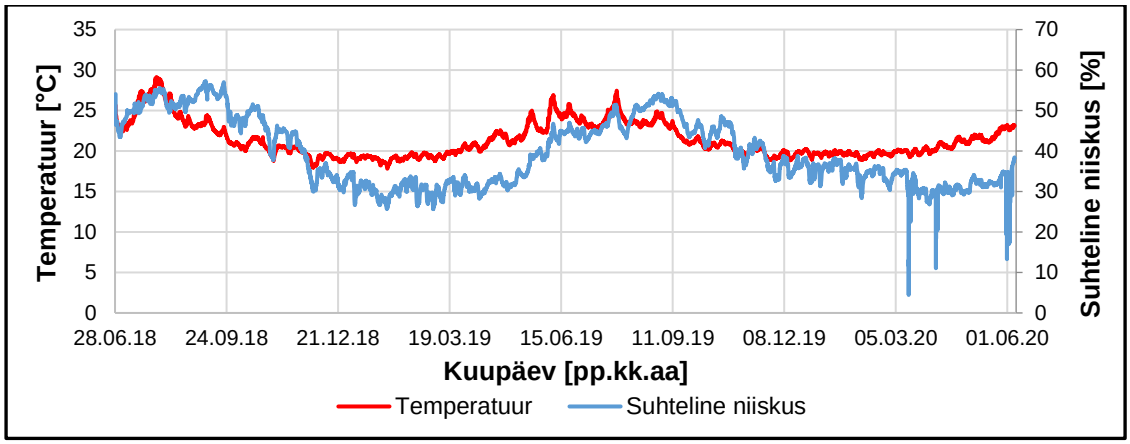
Visuaalsel vaatlusel hallitust ei tuvastatud, ent proovid sisaldasid klaaskiudude peeneid tükke ning aktiivset hallitus- ja/või seenkahjustusi ei avastatud, välja arvatud proov nr N-3 (Kallavus, 2021). Seega on probleem hallitusega endiselt väikses mahus olemas, kuigi punkti N-3 juures olevad N-4 ja N-5 ei sisalda hallituse seeneniite või siis sisaldab surnuid hallituse seeneniidistikke. Hallitusseente seeneniidistike leid punktis N-3 viitab sellele, et sealse OSB niiskussisaldus võimaldab hallituse kasvu ja et teatud väikestel aladel on minimaalne hallituse kasv võimalik. Klaaskiudude peened tükid ja seeneniidistike eosed proovidel viitavad sellele pööningu ja 5. korruse vahelagi peab olema õhutihe ning pööningu ventilatsiooniõhku ei tohi mitte mingil juhul segada teiste ruumidega, kuna see võib põhjustada hoones elavatele inimestele tervisekahjustusi (nt hingamisprobleemid jne.) (Wolkoff, 2018).

4.1.2 Sisekliima pööningul ja 5. korruse korterites

Kuigi mõõdetud andmetest (vt Joonis 36) selgub, et pööningul ei olnud hilisema perioodi jooksul hallituse kasvuks sobilikke tingimusi (suhteline niiskus üle 80%), siis põhjus miks leiti elusaid seeneniite peab olema mujal. Järelikult ei koristatud kõiki hallitusega kaetud materjale ära, ei kantud kõikidele allesjäänud materjalidele hallituse tõrjevahendit või leidus materjalis lokaalselt suure niiskussisaldusega alasid. Allpool järgnevatel graafikutel toodud mõõdetud sisekliimad.



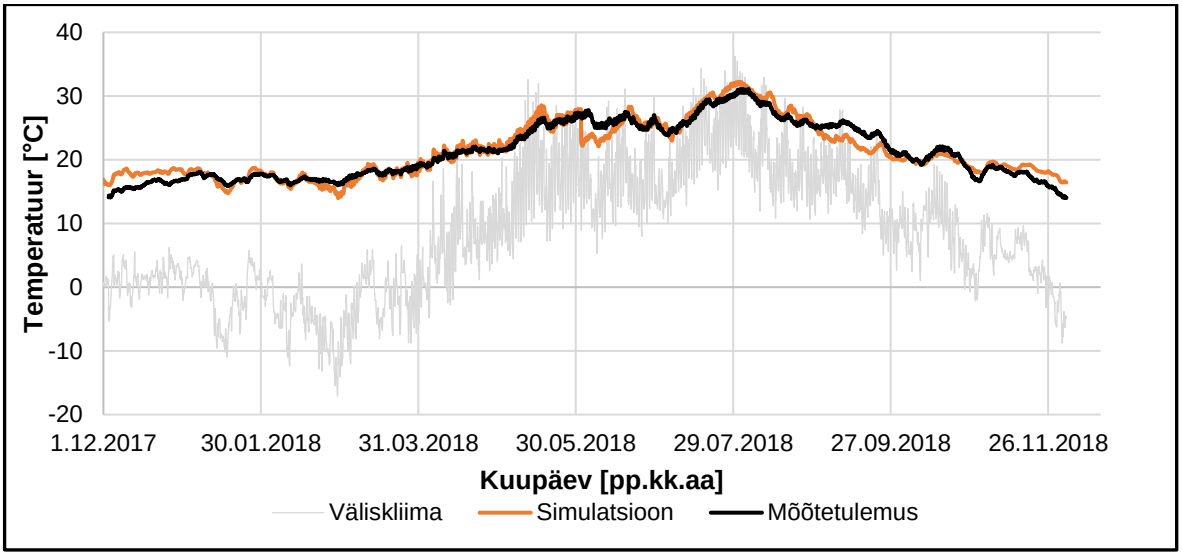
Joonis 35. 5. korruse ruumiõhu temperatuurid 2018. aasta lõikes.



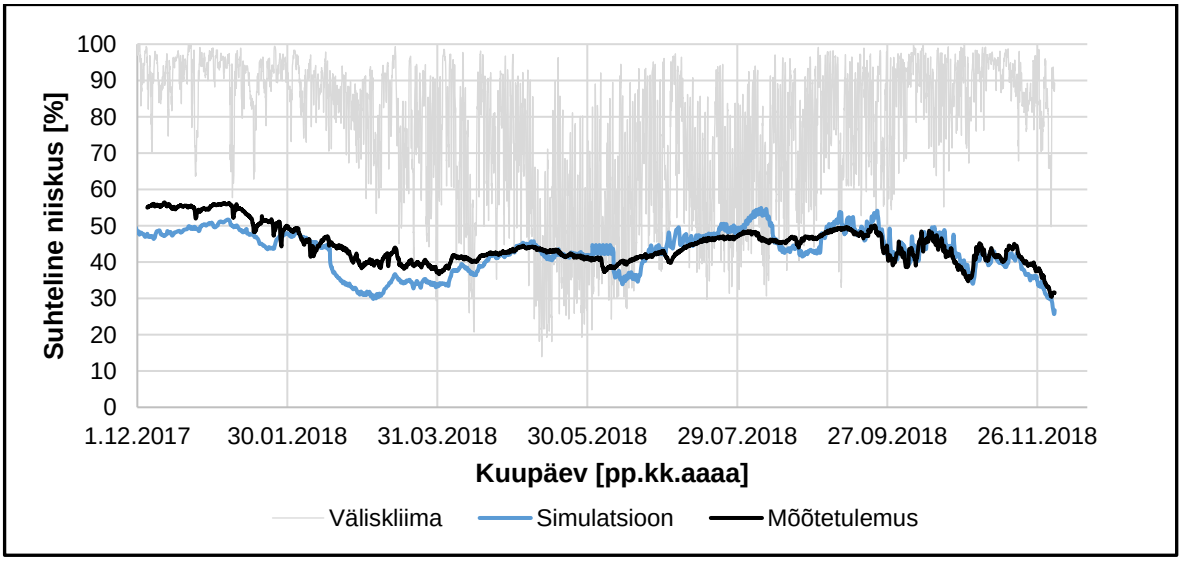
Joonis 36. Mõõdetud sisekliima pööningul vahemikus 28.06.2018-06.06.2020.

4.2 Arvutusmudeli kalibreerimine

Kalibreeritud matemaatilise mudeli tulemused on toodud alljärgnevatel graafikutel.



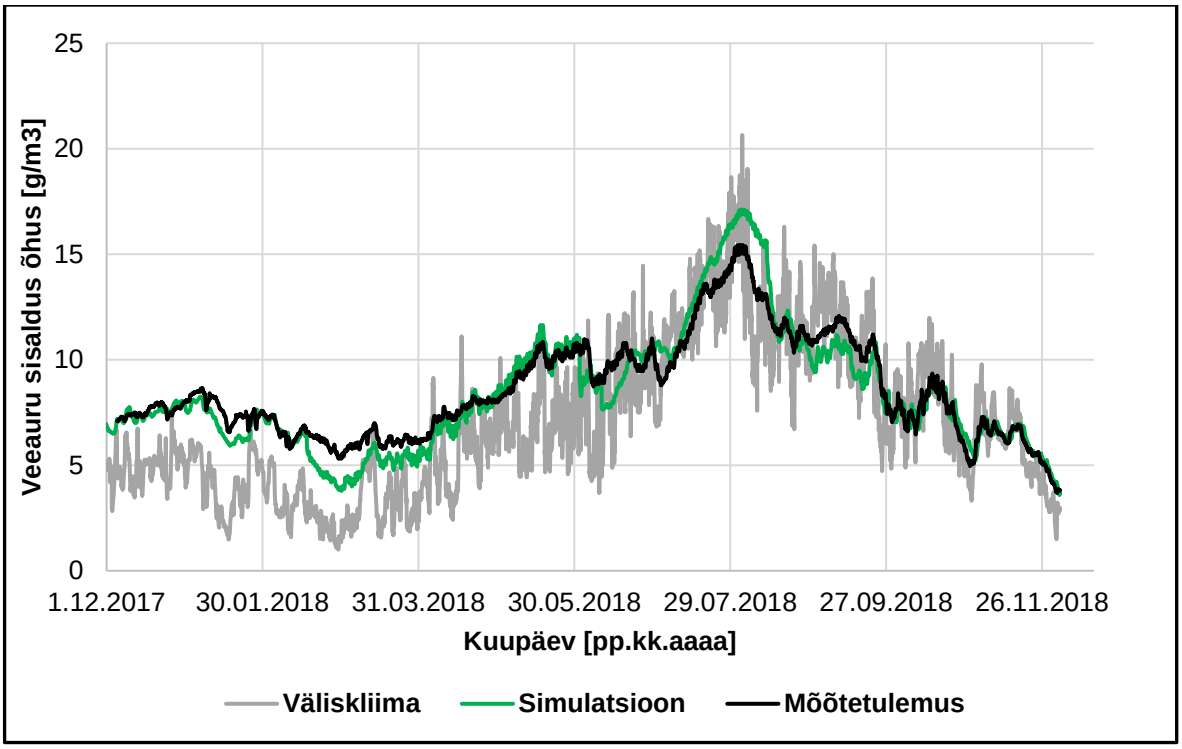
Joonis 37. Simulatsiooni ja mõõdetud temperatuuri võrdlus pööningul.



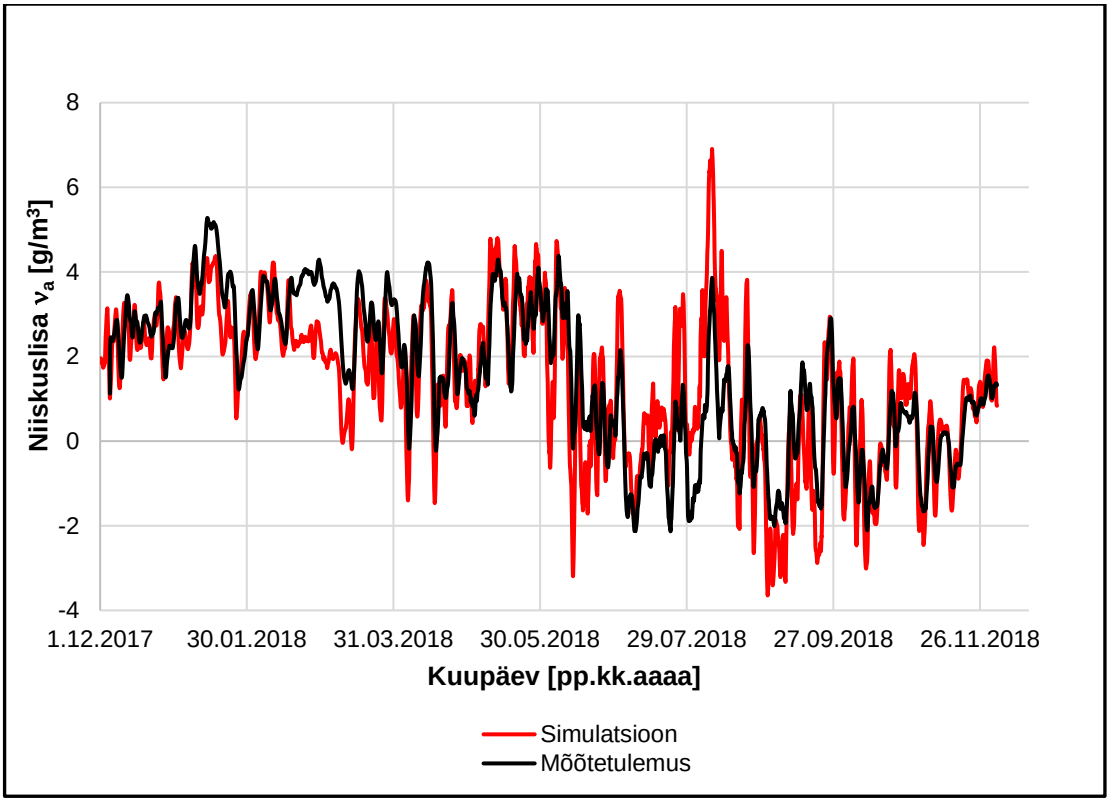
Joonis 38. Simulatsiooni ja mõõdetud suhtelise niiskuse võrdlus pööningul.

Tulemuse võrdlusel ilmneb mõningaid erinevusi, kuid need on marginaalsed. Temperatuuride maksimaalne erinevus on 4,9 °C ja keskmine erinevus 0,2 °C. Suhtelise niiskuse modelleerimise tulemuste suurim erinevus mõõdetuga on 10 %, kuid keskmine erinevus on 1,7%. Mõõteanduri HOBO U12 (mõõteulatused: temperatuur -20 kuni 70°C, suhteline niiskus: 5-95%, mõõtetäpsus: temperatuur: ±0,35°C, suhteline niiskus: 2,5-10%) täpsus väiksem, kui tulemuste keskmised erinevused. Graafikute visuaalsel võrdlusel on samuti näha mõningaid erinevusi, kuid üldjoontes on need üsna sarnased. Mudeli simulatsiooni resultaate võib pidada rahuldavaks ning konstateerida fakti, et mudel on kalibreeritud ning imiteerib hoone käitumist rahuldavalt. Tulemuste põhjal on

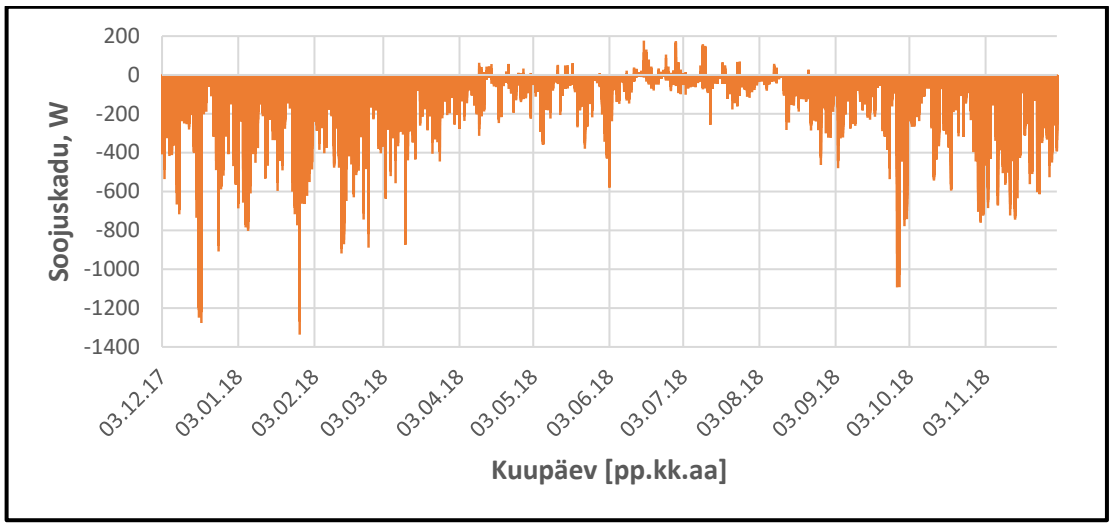
võimalik võrrelda õhu veeauru sisalduste põhjal ning ruumis oleva niiskuslisa põhjal. Koostati graafikud pööningu infiltratsiooni kohta (vt Joonis 41 ja Joonis 42).



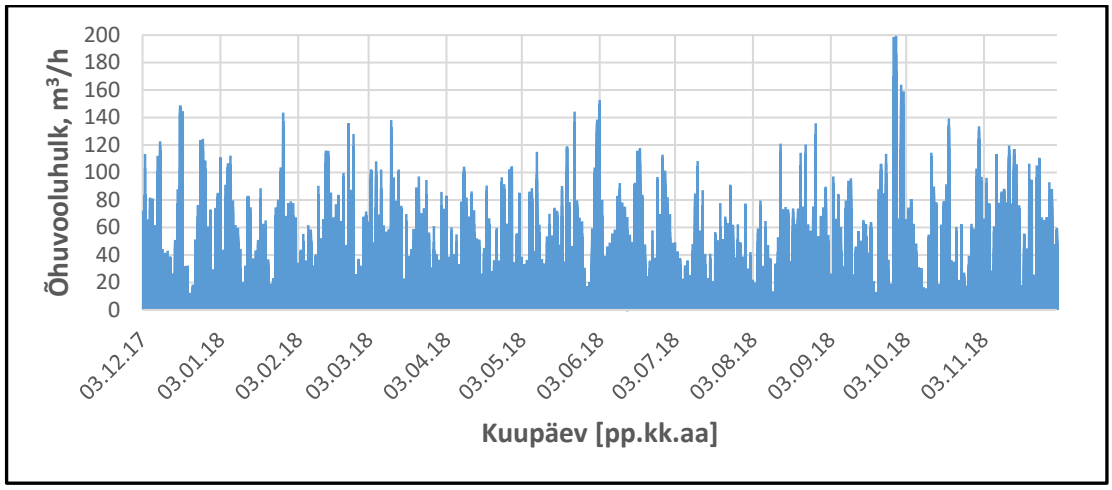
Joonis 39. Simulatsiooni ja mõõdetud veeauru sisaldus õhus võrdlus pööningul.



Joonis 40. Simulatsiooni ning mõõdetud niiskuslisa (72h jooksev keskmine) võrdlus.



Joonis 41. Soojusvoog infiltratsiooni teel pööningul aasta lõikes.

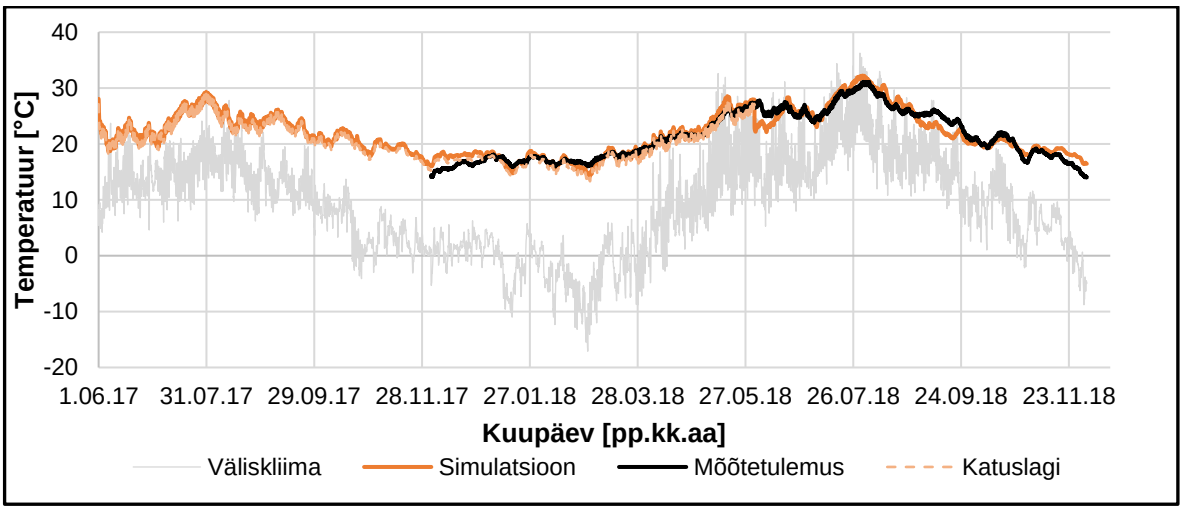


Joonis 42. Õhuvooluhulk läbi pööningu välistarindite aasta lõikes.

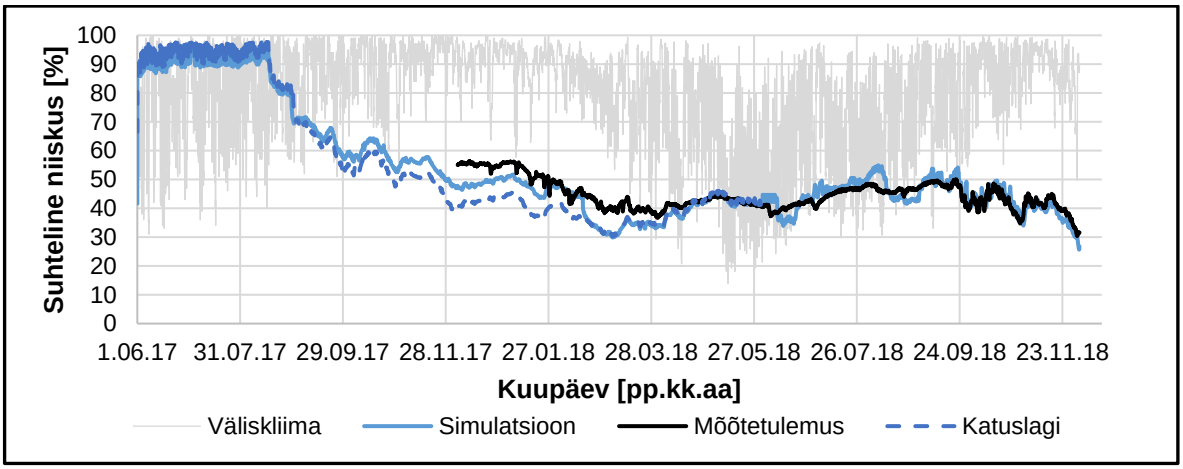
4.3 Simuleeritud soojus- ja niiskuslik olukord pööningul

4.3.1 Olukord pööningul pärast katuslae lisasoojustuspaneelide paigaldamist

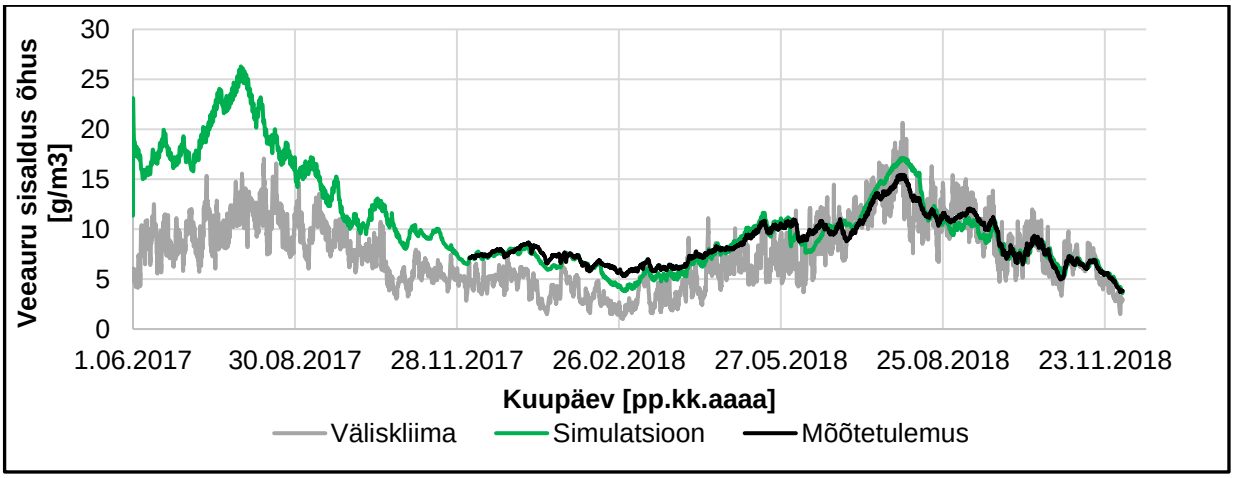
Selles alapeatükis on esitletud tulemused, mis nagu eelnevalt mainitud on simuleeritud perioodil 1. juuni 2017 kuni 3. detsember 2018. Mudelis olevad tarindid arvestavad niiskuse puhverdamisega ning ühiselamu pööningu põrandal on mineraalvillaplaatidesse akumuleerunud liigniiskus. Lisaks hinnatakse tarindite puidust sisepindadel hallituse kasvu. Tulemused pärinevad ventilatsioonikambrist lõunasse jäävast ruumist , kus oli kõige suuremad tuvastatud niiskuskahjustused (tsoon nr 2, vt Joonis 28).



Joonis 43. Ehitusjärgne simuleeritud pööningu ruumiõhu ja katuslae sisepinna temperatuurid ning mõõdetud väliskliima ja pööningu ruumiõhu temperatuurid

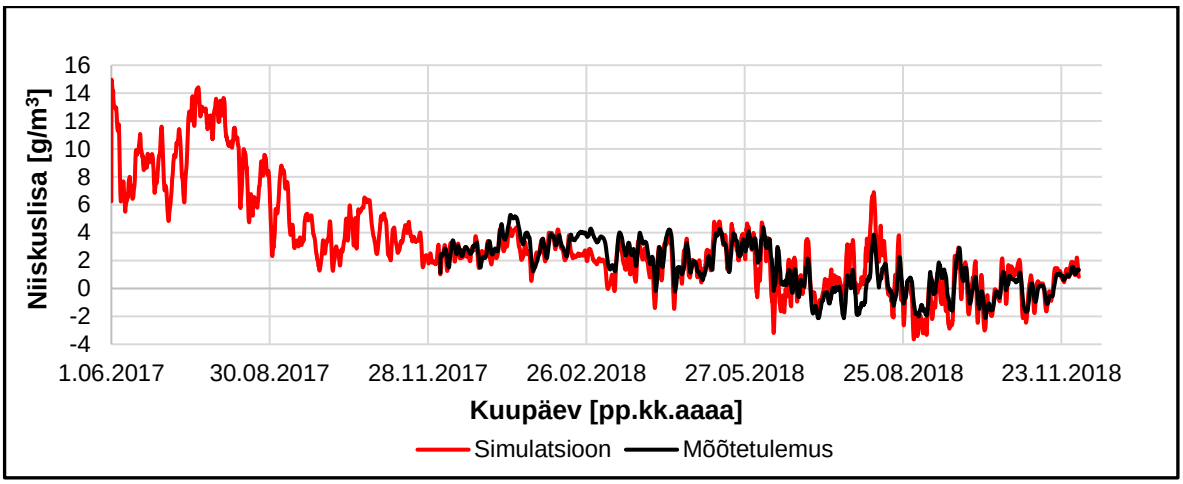


Joonis 44. Ehitusjärgne simuleeritud pööningu ruumiõhu ja katuslae sisepinna suhtelised niiskused ning mõõdetud väliskliima ja pööningu ruumiõhu suhtelised niiskused.



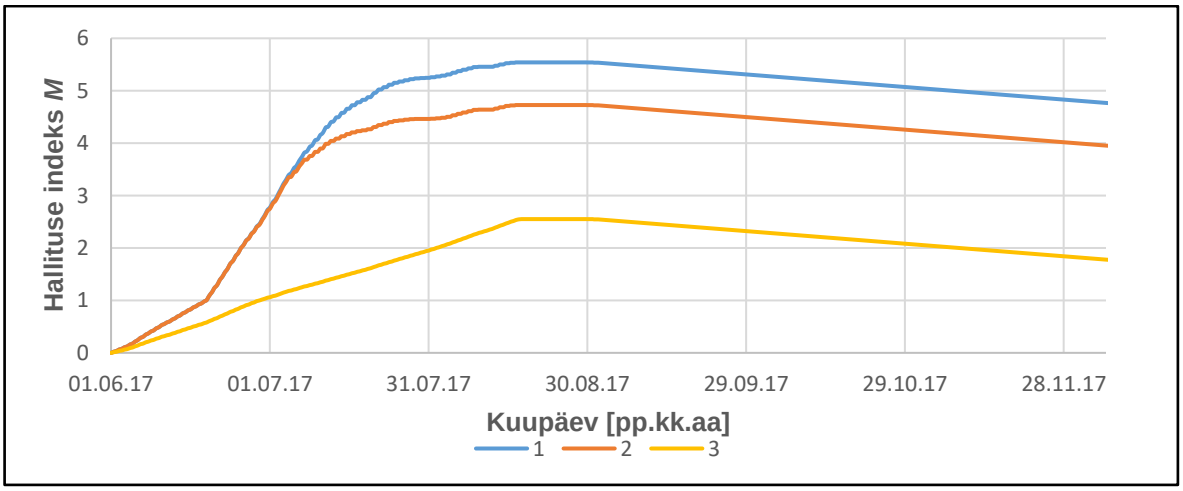
Joonis 45. Ehitusjärgne simuleeritud ning mõõdetud õhu veeauru sisaldus pööningul.

Pööningu niiskuslisa oli ehitusjärgsel perioodil juunist kuni augustini väga kõrge, maksimaalselt 15 g/m^3, mis viitab ujula niiskuslisale. Peale suurema ehitusniiskuse välja kuivamist sügise lõpul püsis niiskuslisa madal ja sõltus eelkõige välisõhu niiskussisalduse muutusest. Kuna pööning ei ole ventileeritud ning niiskuseraldusi pööningul ei ole, siis muutus veeaurusisaldus pööningu õhus vähe. Niiskuslisa tekkis peale ehitusniiskuse väljakuivamist välisõhu niiskussisalduse muutusest



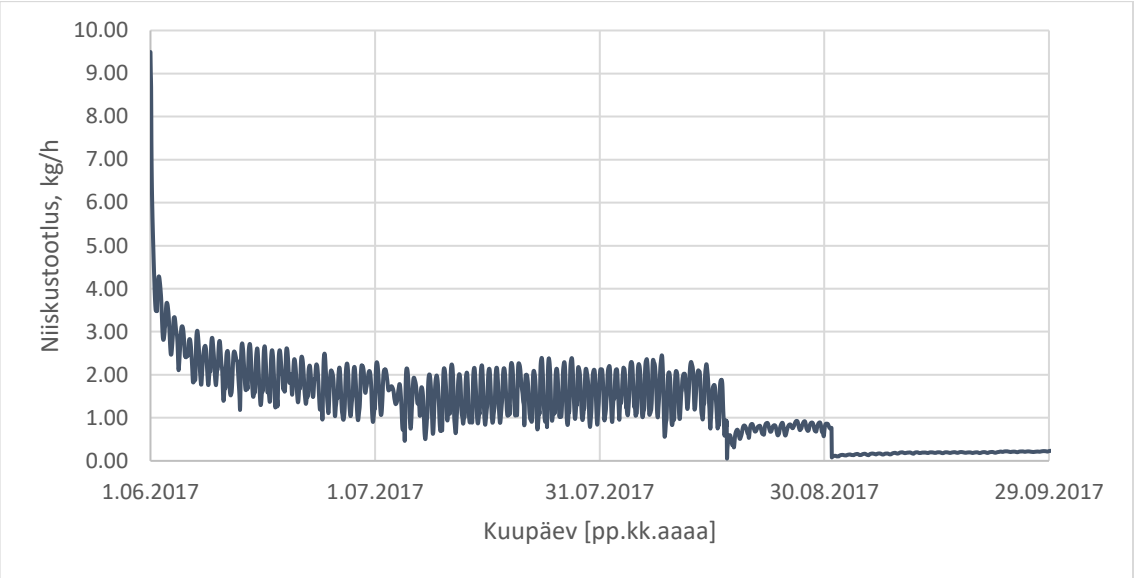
Joonis 46. Ehitusjärgne simuleeritud niiskuslisa pööningul

Järgneval graafikul on toodud katuslae OSB (tsoonis nr 2, vt Joonis 28) erinevad hallituse indeksid. Graafik 1 tähistab materjali mille kasvukiiruse tundlikkuse klass on 1 ning maksimaalse hallituse tundlikkuse klass samuti 1. Graafik nr 2 tähistab materjali, mille kasvukiiruse tundlikkuse klass on 1 ja maksimaalse hallituse tundlikkuse klass on 2. Graafik nr 3 tähistab OSB materjali mille kasvukiiruse tundlikkuse klass on 2 ning maksimaalse hallituse tundlikkuse klass on 2 (Viitanen, 2017). Maksimaalsed hallituse indeksid graafikutel vastavalt 5,5; 4,7 ja 2,6. Üldisele olukorrale on lähima täpsusega graafikud nr 1 ja 2, sest üldiselt oli hallitust igal pool näha kasvamas. Hallituse kasv katuslae sisepindadel oli lokaalselt suurte hallitusseente kahjustustega.



Joonis 47. Hallituse indeksite kasv katuslae OSB pinnal erinevate materjali hallituse tundlikkustega (1, 2, 3).

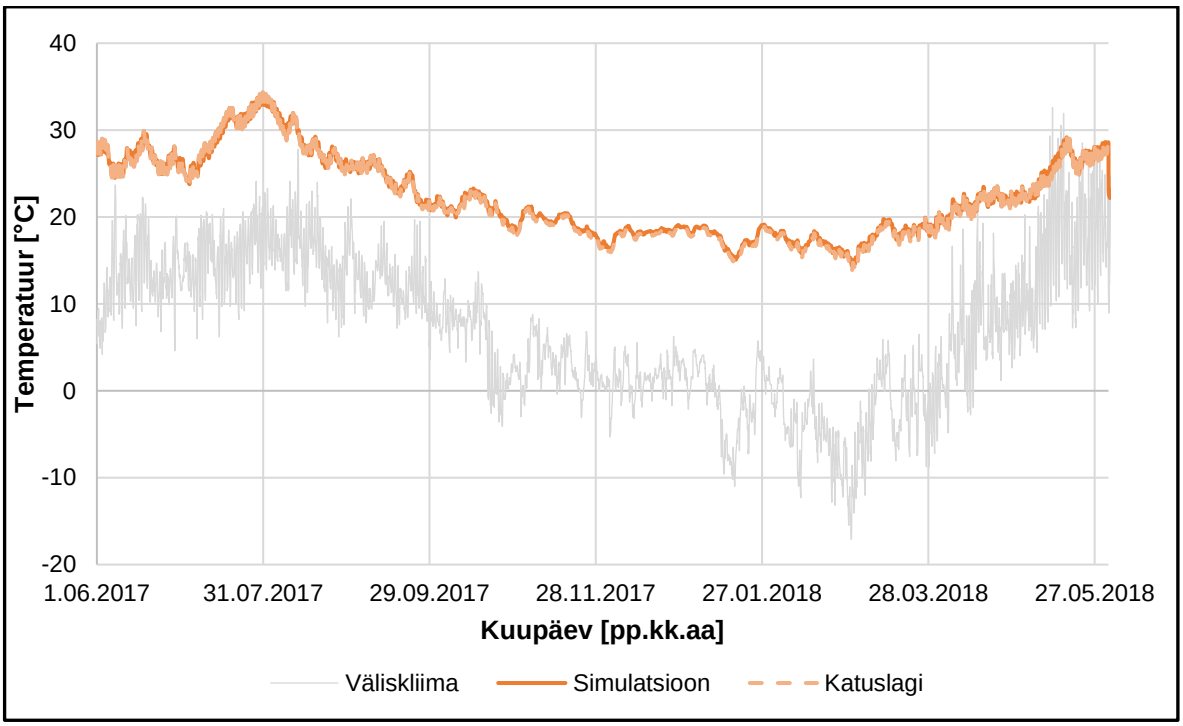
Simulatsioonist saadud info kohaselt aurus pööningult 6,5 tonni vett ehk ligi 9 mm/m^2 kohta ning keskmine aurumiskiirus oli 9,0 g/(h·m^2), mis on loomuliku ventilatsiooniga pööningu kohta hea tulemus, kuna temperatuur pööningul on kõrgem. Võrdluseks, Kurnitski poolt tehtud uurimuses toodi sarnase ruumi keskmiseks aurumiskiiruse väärtuseks 3,6 g/(h·m^2), mis on 2,5 korda väiksem (Kurnitski, 2001). Samas on pööningu õhulekkearv suhteliselt suur – q_{50} = 2 m^3/(h·m^2) – mis tähendab et pööningul on arvestatav loomulik õhuvahetus olemas ka ilma mehaanilise ventilatsioonita.



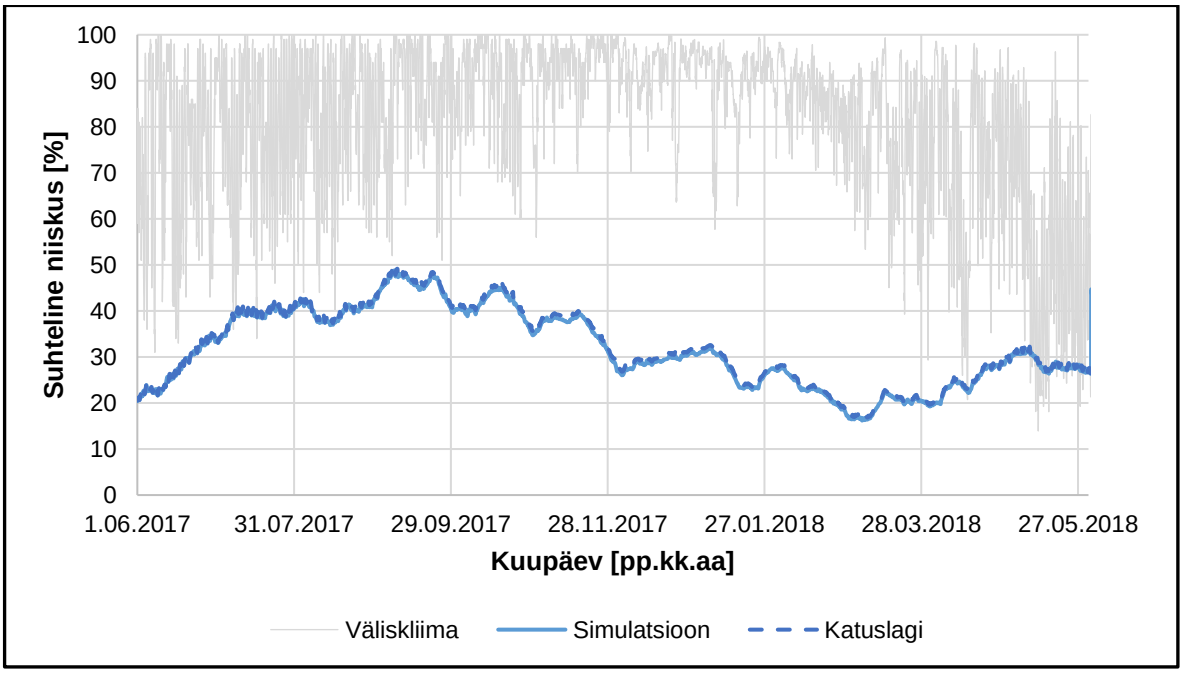
Joonis 48. Simulatsioonis kogu pööningu põrandalt eralduv niiskuskogus ruumiõhku tundide lõikes.

4.3.2 Ehitamine toimub ilma sademete sattumiseta pööningule – paigaldus vaid vihmavabadel päevadel, ajutine vihmakaitse või vee kohene likvideerimine.

Alapeatükk kajastab simulatsiooni tulemusi, kus on arvestatud olukorraga, et paigaldus toimub vaid vihmavabadel päevadel, on kasutatud ajutist vihmakaitset või pööningule sattunud vesi likvideeritakse kohe. Mineraalvillaplaadid paigaldatakse pööningule pärast katuslaepaneelide montaaži ehk sisuliselt on tegemist kuiva olukorraga. Ruumi temperatuuris on näha olulist tõusu, kuna energia ei kulu vee aurustamise peale. Samas on tulemustest võimalik lugeda välja märgatavalt väiksemaid niiskuslisasid pööningul peale võrreldes ehitusjärgse simulatsiooniga ka peale ehitusniiskuse väljakuivamist. Võib oletada, et mingi niiskus salvestub toolvärgis ja ka betoonil, mis tekitab erinevuse niiskuslisades.

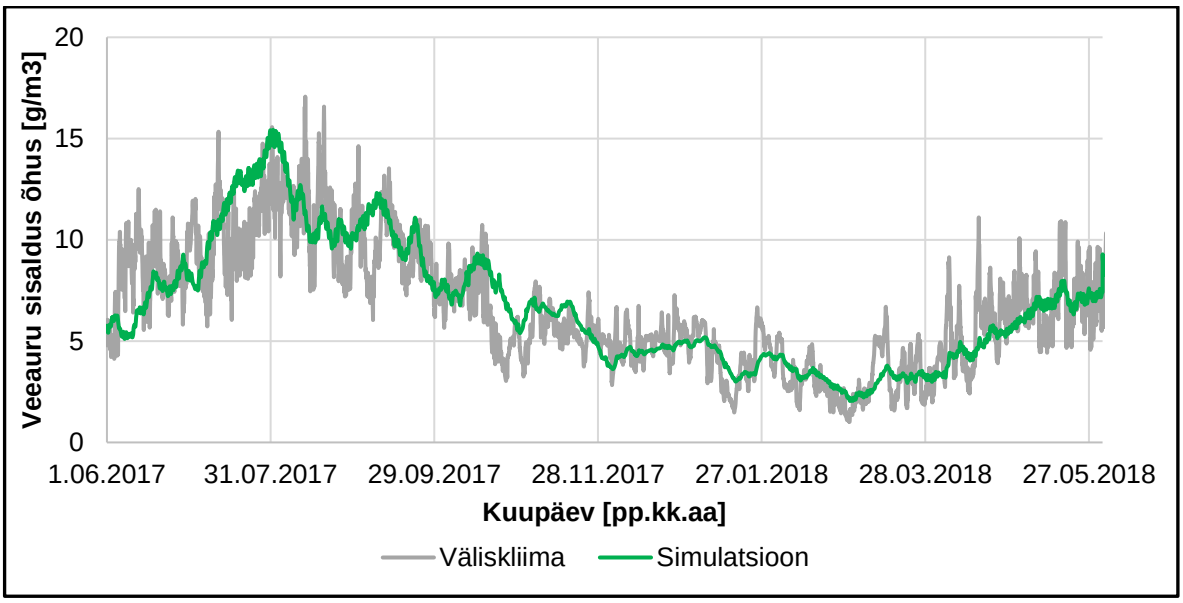


Joonis 49. Simulatsiooni pööningu ruumiõhu ja katuslae sisepinna temperatuurid. Esitatud on simulatisooniperioodi ajal mõõdetud välisõhu temperatuur.



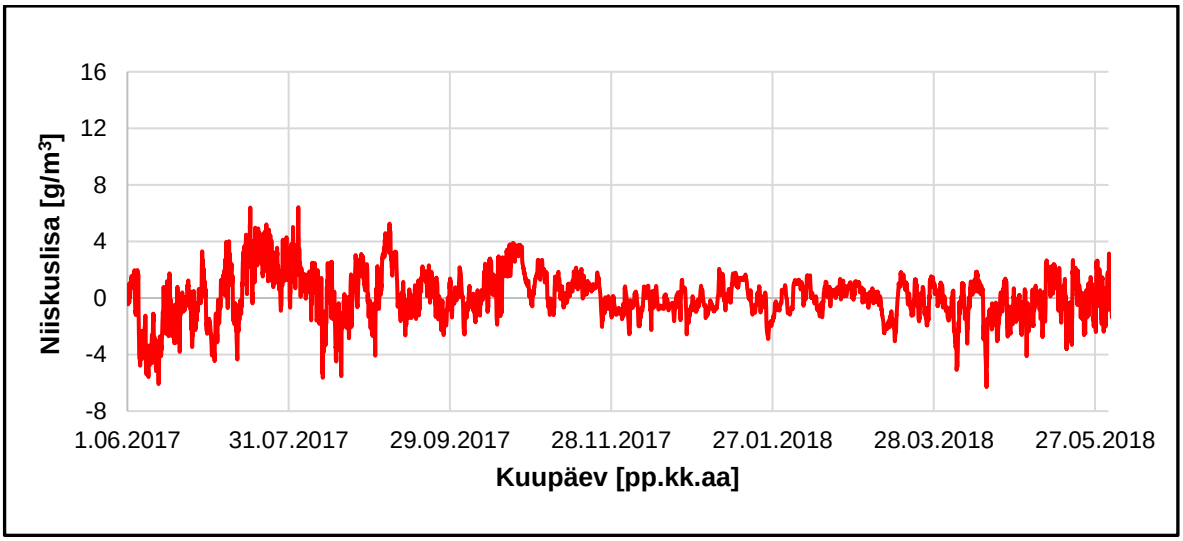
Joonis 50. Simulatsiooni pööningu ruumiõhu ning katuslae sisepinna suhtelised niiskused.

Järgmisel graafikul (vt Joonis 51) kajastub pööningu õhu veeauru sisalduse otsene korrelatsioon välisõhu veeauru sisaldusega, mis on loogiline, sest pööningul pole niiskustoodangut (välja auruvat vett), mis põhjustaks erinevuse kajastumist graafikul.



Joonis 51. Simuleeritud pööningu veeauru sisaldus ruumiõhus ning mõõdetud väliskliima andmetel arvutatud veeauru sisaldus välisõhus

Niiskuslisast selgub, et pööningut kuivana hoides püsib niiskuslisa 0 ümber kõikudes ning sõltub suuresti välisõhu niiskussisalduse lühiajalisest muutusest. Niiskuslisa on mõningatel perioodidel negatiivne (ligi -4 g/m^3), mis viitab väga kuivale õhule pööningul.

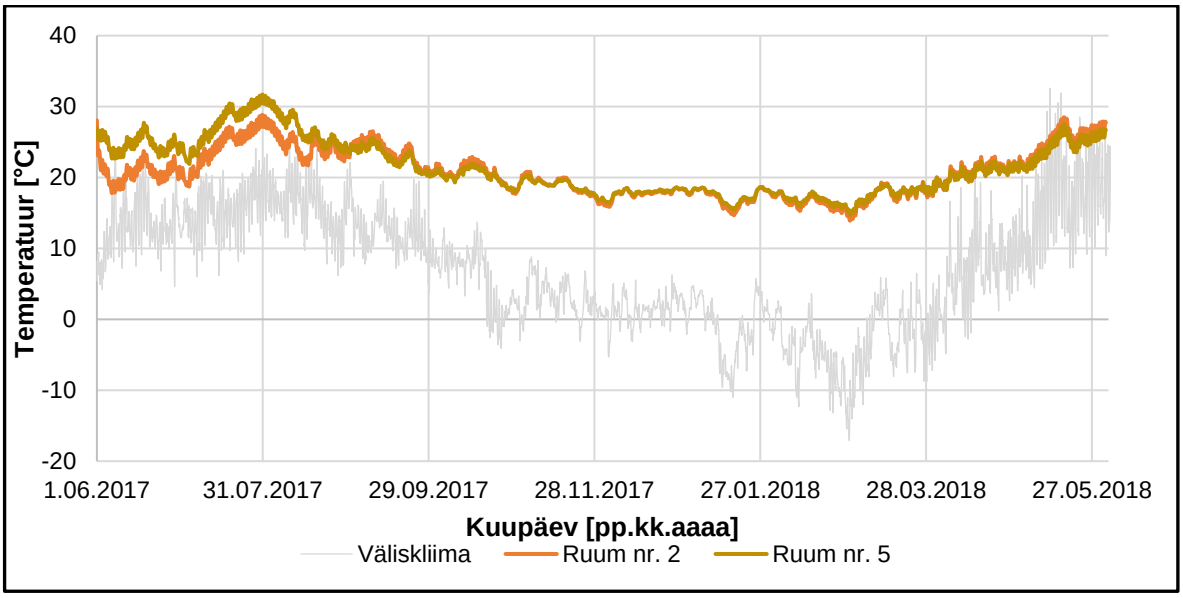


Joonis 52. Simuleeritud andmetel põhinev niiskuslisa pööningul.

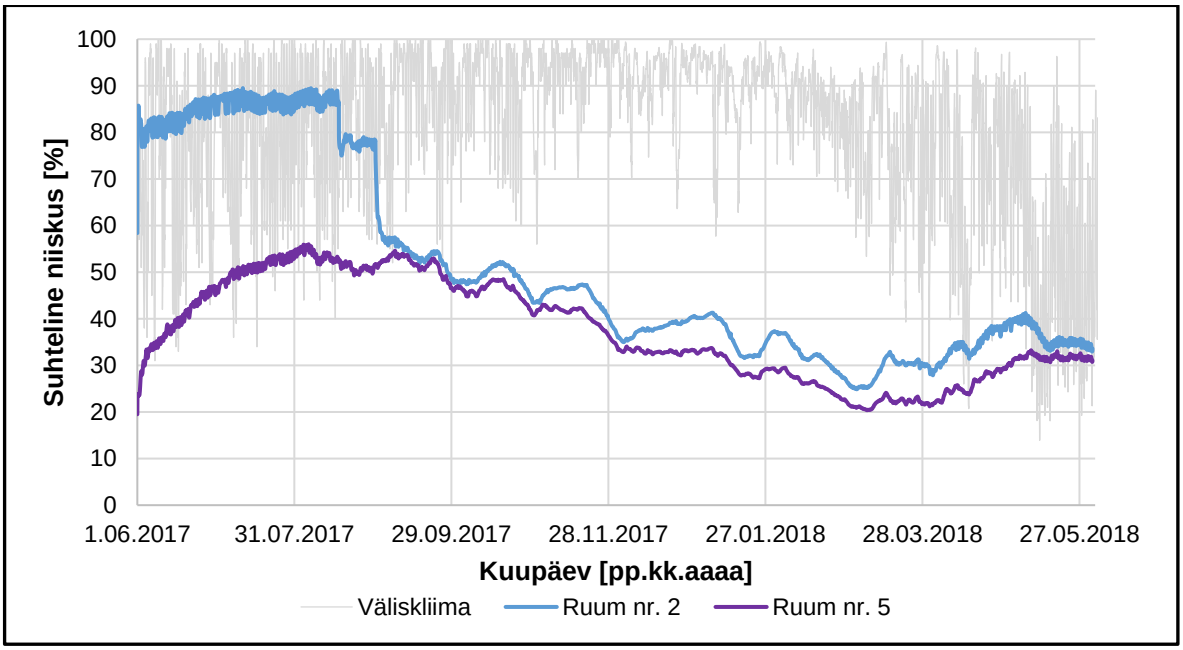
Simulatsiooni tulemused kinnitavad, et probleeme hallituse ja liigse ehitusniiskusega poleks olnud, kui ehituse ajal oleks mineraalvillaplaatide paigaldamine toimunud peale pööningu katuslae ehitust. Suhteline niiskus pööningul oleks selle simulatsiooni hinnangul tõusnud maksimaalselt 50% ehk pööningul olev õhk oleks kuiv olnud. Simulatsiooni tulemustes ei kajastu aga kooskõla esimese simulatsiooniga, kuna niiskuslisades on märgatav erinevus ka peale 2018. aasta algust. Pööningul simuleeritud andmetest saab järeldada, et hallituse kasvu

4.3.3 Lokaalne veekahjustus

Selle simulatsiooniga üritatakse mõista ühe märja tsooni mõju teistele tsoonidele. Selleks tekitatakse märja põranda näol niiskustootlus tsooni (bassein katab tervenisti põranda pindala), mis jääb ventilatsioonikambrist lõunasse (tsoon nr 2. vt Joonis 28). Teistes tsoonides on põrand kuiv ning hinnatakse nimetatud ruumist ida poole jäävas tsoonis (tsoon nr 5) olevatele tarinditele tekkivat mõju. Temperatuuride võrdluse graafikult on märgata erinevust ehitusniiskuse väljakuivamise perioodil, kuna tsoonis nr 2 kulub energiat vee aurustumise peale ning seega on temperatuur madalam.

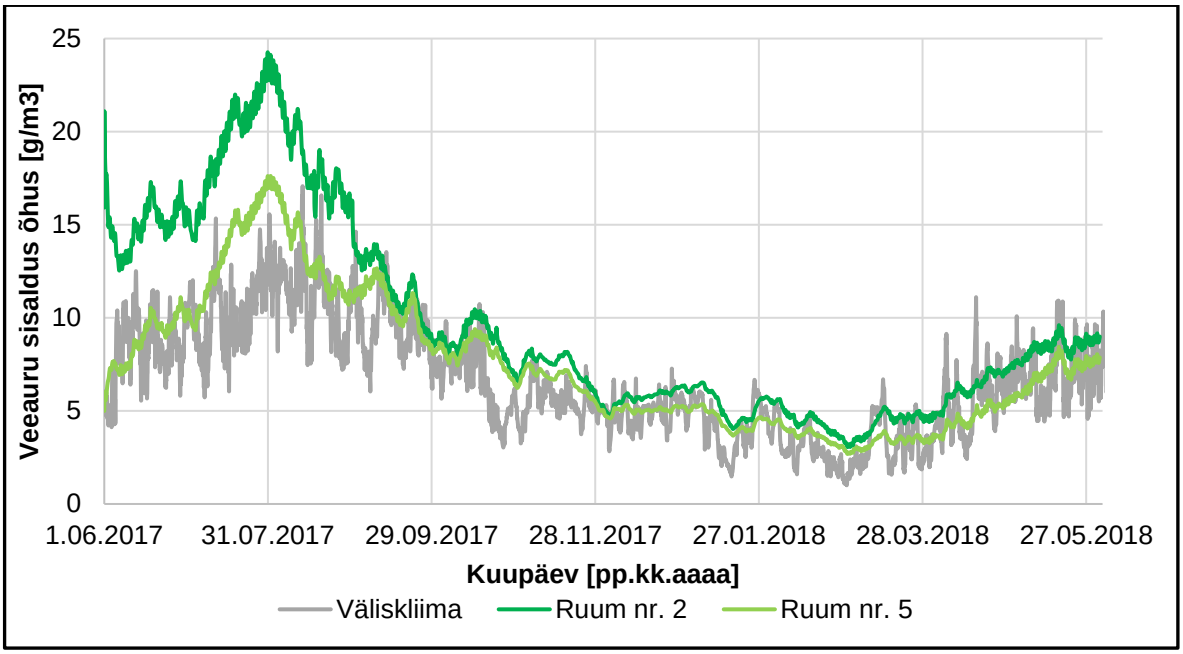


Joonis 53. Simuleeritud tsoonide 2 ja 5 õhutemperatuurid ning mõõdetud väliskliima temperatuur.



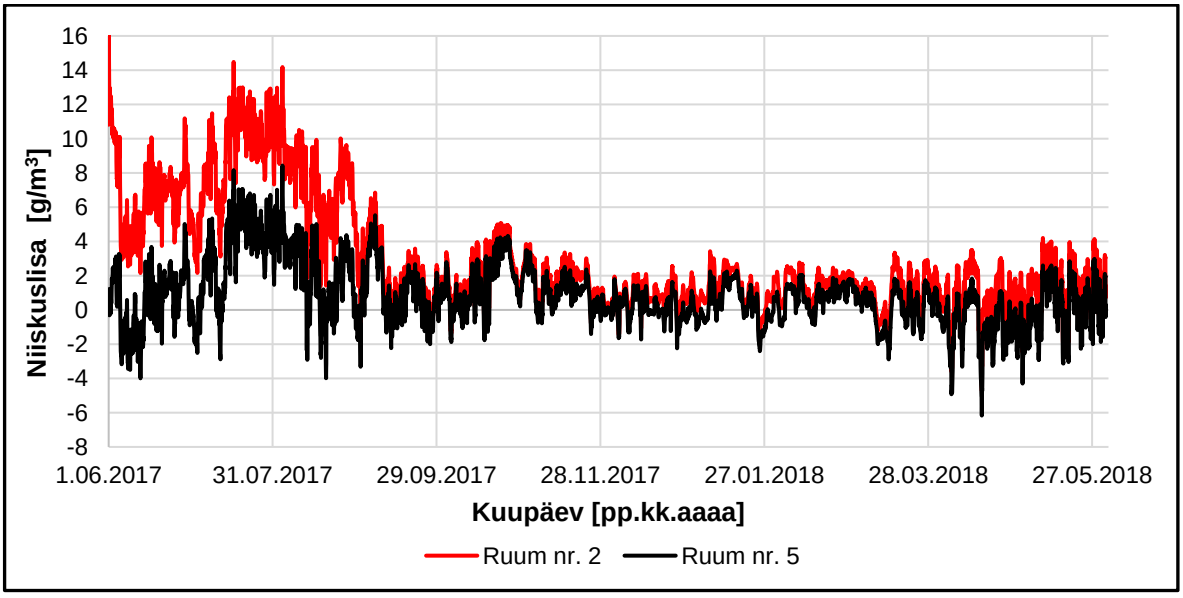
Joonis 54. Simuleeritud tsoonide 2 ja 5 õhu suhtelised niiskused ning mõõdetud väliskliima suhteline niiskus.

Suhtelise niiskuse ja veeaurusisalduse graafikutel on märgata suurt erinevust kuivamisperioodi ajal. Tsoonis nr 5 on suhtelise niiskuse tõus samuti silmatorkav, mis osutab ruumidevahelisele õhuringlusele.



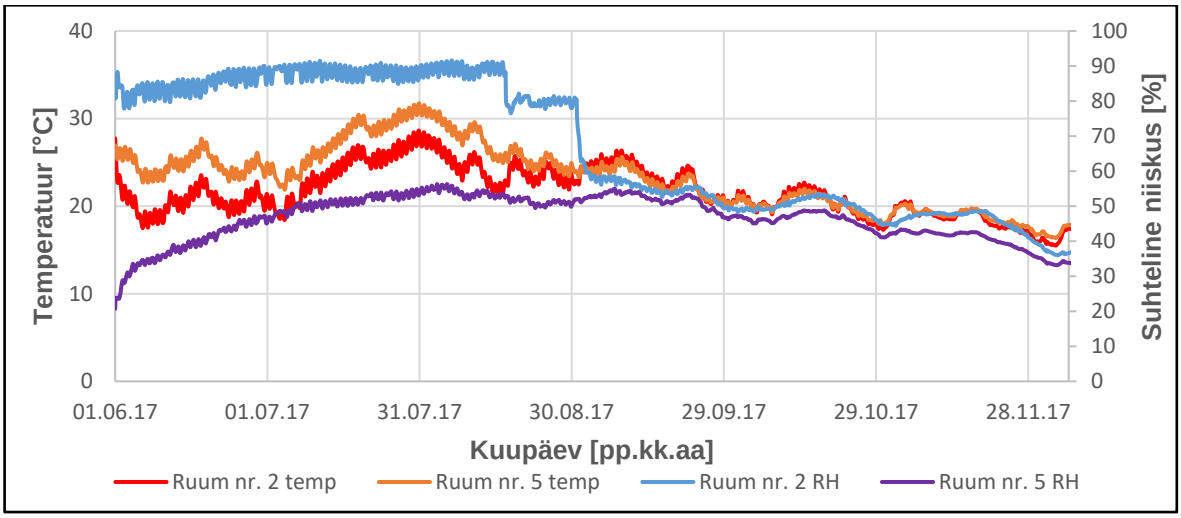
Joonis 55. Simuleeritud tsoonide 2 ja 5 veeauru sisaldused õhus ning mõõdetud välisõhu veeauru sisaldus.

Niiskuslisa on ruumis nr 2 keskmiselt 10 g/m^3, maksimaalselt ligi 14 g/m^3 ehitusniiskuse väljakuivamise perioodil, mis iseloomustaks suure niiskustootlusega ruume (nt basseiniruumid, pesumajad). Samuti on ka lühikese aja vältel tsoonis nr 5 suur niiskuslisa, kuid seda võiks pigem iseloomustada tavalise suurema kasutusega eluruumi niiskuslisaga.

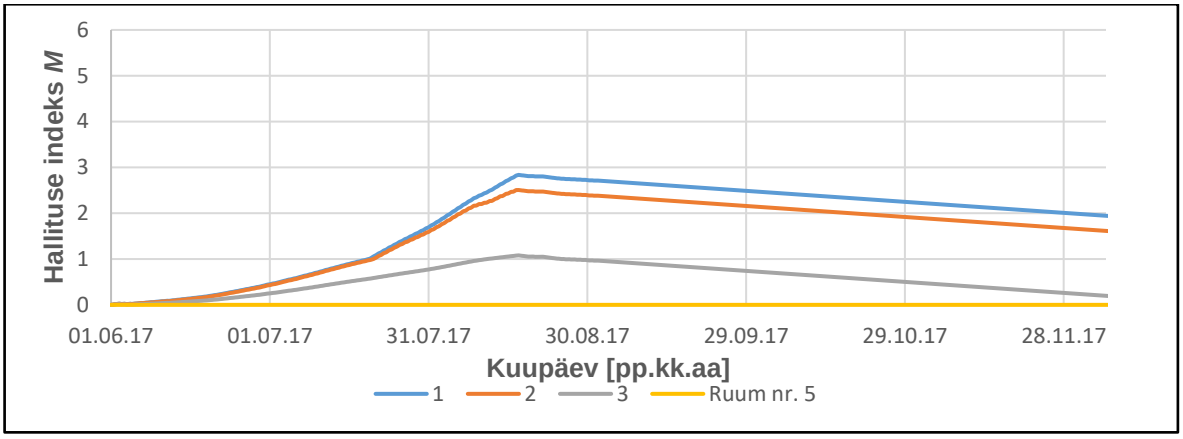


Joonis 56. Simuleeritud tsoonide 2 ja 5 niiskuslisade võrdlus.

Ruumi lagede sisepindade temperatuurid ja suhtelised niiskused on korrelatsioonis ruumiõhu temperatuuride ja suhteliste niiskustega. Tulemustest kajastub selgelt kõrgem suhteline niiskus märja tsooni (nr 2) katuslae sisepinnal ning madalam temperatuur võrreldes tsooniga 5.



Joonis 57. Ruumide katuslagede sisepinna temperatuurid ja suhtelised niiskused.



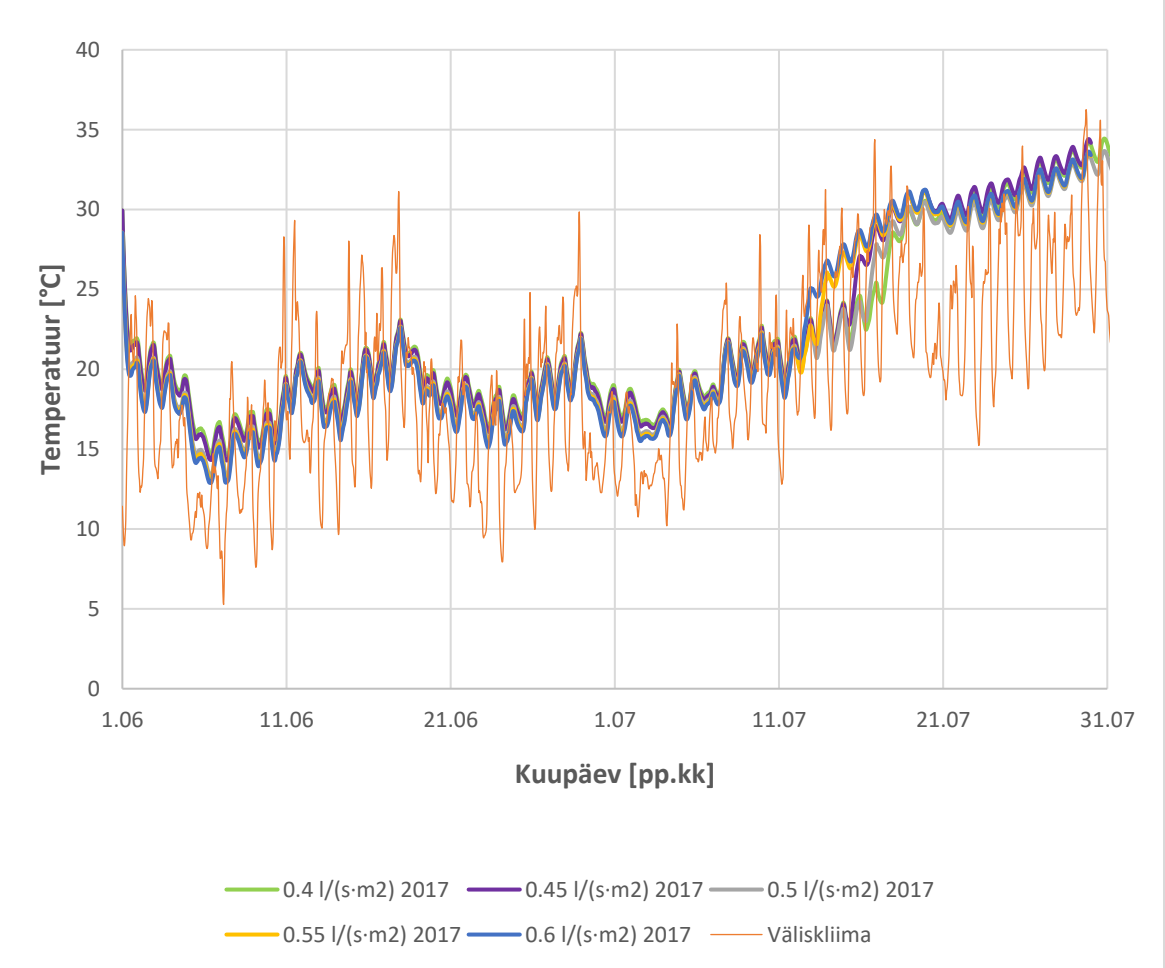
Joonis 58. Tsoonide nr 2 (graafik nr 1, 2, 3) ja tsooni nr 5 katuslagede hallituse indeksi kasvud.

Simulatsiooni tulemustest selgus, et pööningu sektsioonis, kus põrandal olev mineraalvill on vett täis ning hakkab loomulikult välja kuivama ja põhjustab hallituse kasvu sama tsooni puitkonstruktsioonidel. Kõrval olevatesse tsoonidesse niiskuse kuivamise mõju ei ulatu ja seal ei teki hallitust. Selline simulatsioon iseloomustaks olukorda, kus pööningu mingi sektsioon oleks saanud sademevett enne katuse monteerimist ning peale ajutiste katete eemaldamist. Antud olukorras saaks kahjustada ainult sektsioon kuhu sademevesi oleks sadanud, sest tekkinud hallituse indeks selles ruumis oli katusel vastavalt graafikule nr 1 (kasvukiiruse ja maksimaalse hallituse tundlikkuse klassid 1) 2,8; graafikule nr 2 (kasvukiiruse tundlikkuse klass 1 ja maksimaalse hallituse tundlikkuse klass 2) 2,5 ja graafikule nr 3 (kasvukiirus 2 ja

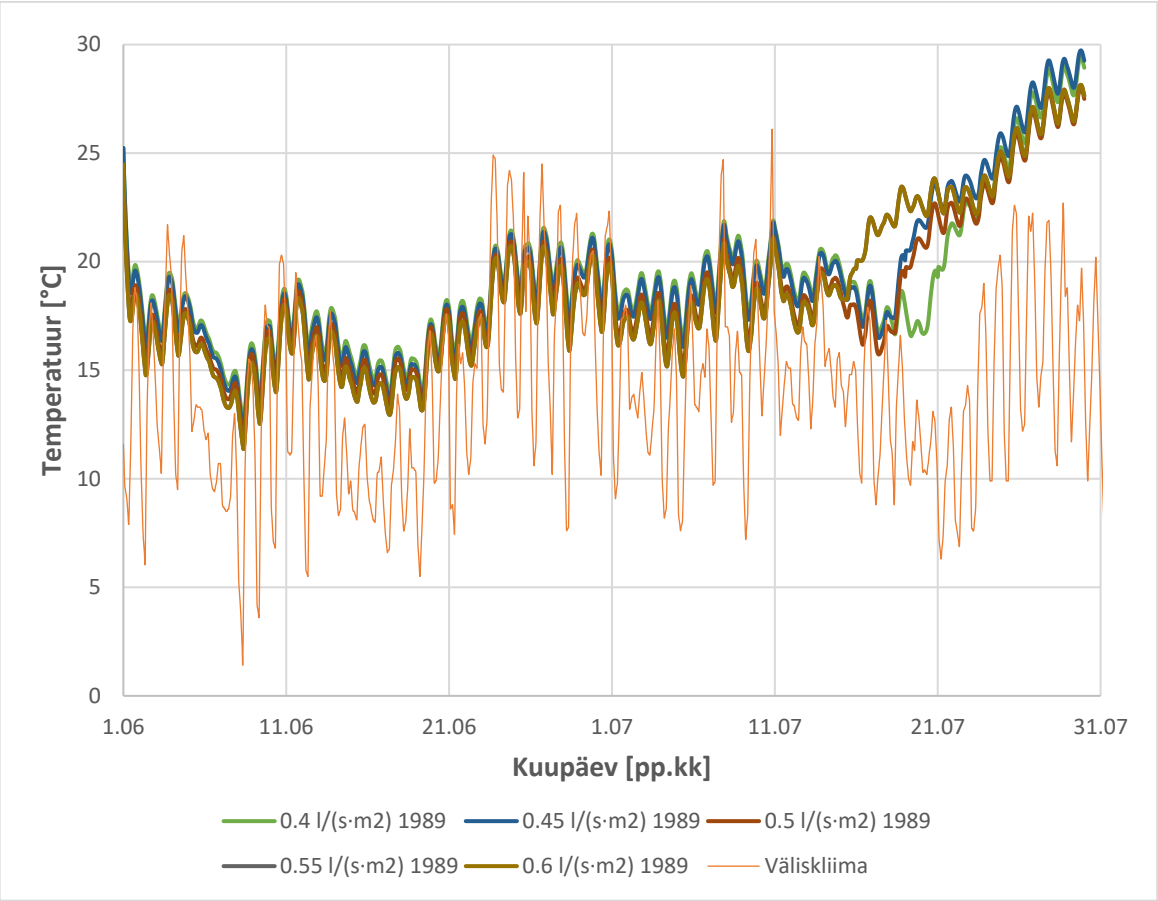
maksimaalne hallitus 1) 1,1. Ruumis nr 5 ei tekkinud hallituse kasvuks sobilikke tingimusi (M=0) ühegi kriteeriumi järgi.

4.3.4 Pööningu ventileerimine (ja kütmine) pärast veekahjustust

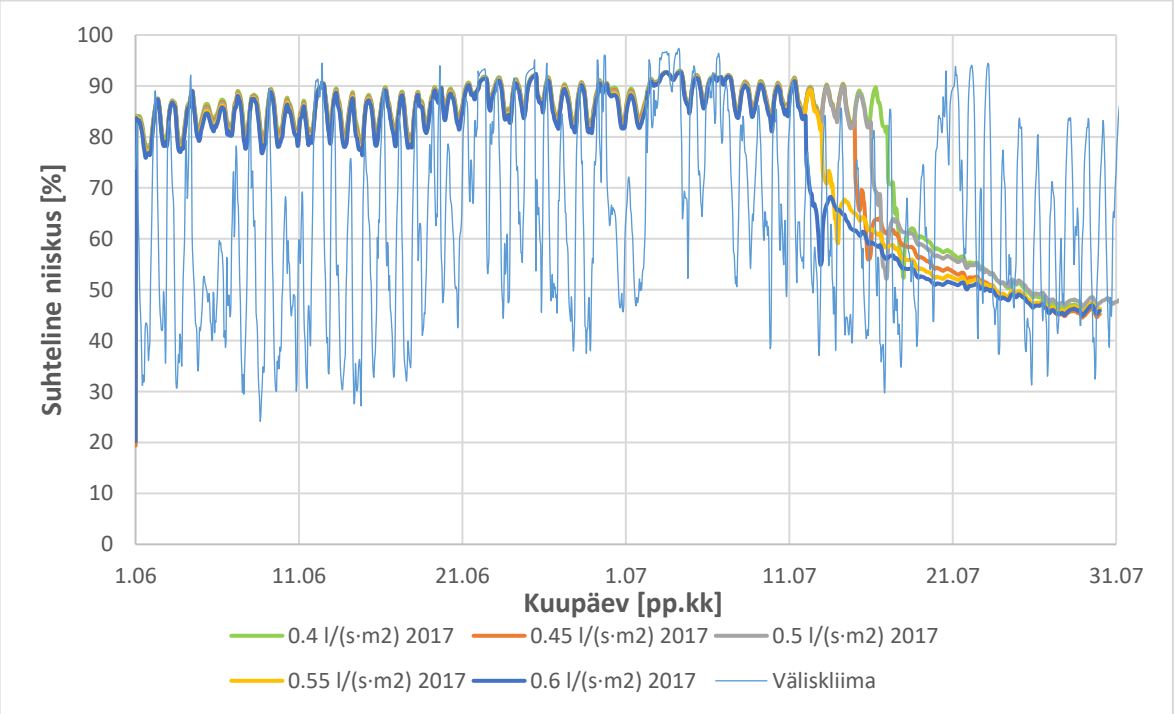
Suvise simulatsiooni perioodiks on valitud 1. juuni 2017 kuni 31. juuli 2017, mida on omakorda võrreldud Eesti hallituse testaasta sama ajavahemikuga, kliimaandmed mõõdetud Väike-Maarjas 1989-90 (Kalamees ja Vinha, 2004). Võrdlus on tehtud kriitilisema olukorra leidmiseks, sest hallituse kasvu hindamisel on samuti arvestatud kõige kriitilisema kriteeriumiga (hallituse kasvukiiruse tundlikkuse klass 1, maksimaalse hallituse tundlikkuse klass 1). Mudelis on pööningule paigaldatud ventilaatorid, mis tagavad pööningul õhuvahetuse vahemikus 300-450 L/s (täpsemalt valitud õhuvahetushulgad 0,40; 0,45; 0,50; 0,55 ja 0,60 L/(m^2·s) ja ventileeritav pindala pööningul 750 m^2). Pööningule mudeldatud lisaniiskuse kogus endiselt 6,5 m^3 ning hallituse indeksi kriteeriumiks M > 1. Simulatsiooni tulemused võetud tsoonist nr 2 (vt Joonis 28). Ruumiõhu temperatuuride ning suhteliste niiskuste graafikutel märgata erinevusi hetkel (juuli keskpaik), mil ehitusniiskus on välja kuivanud.



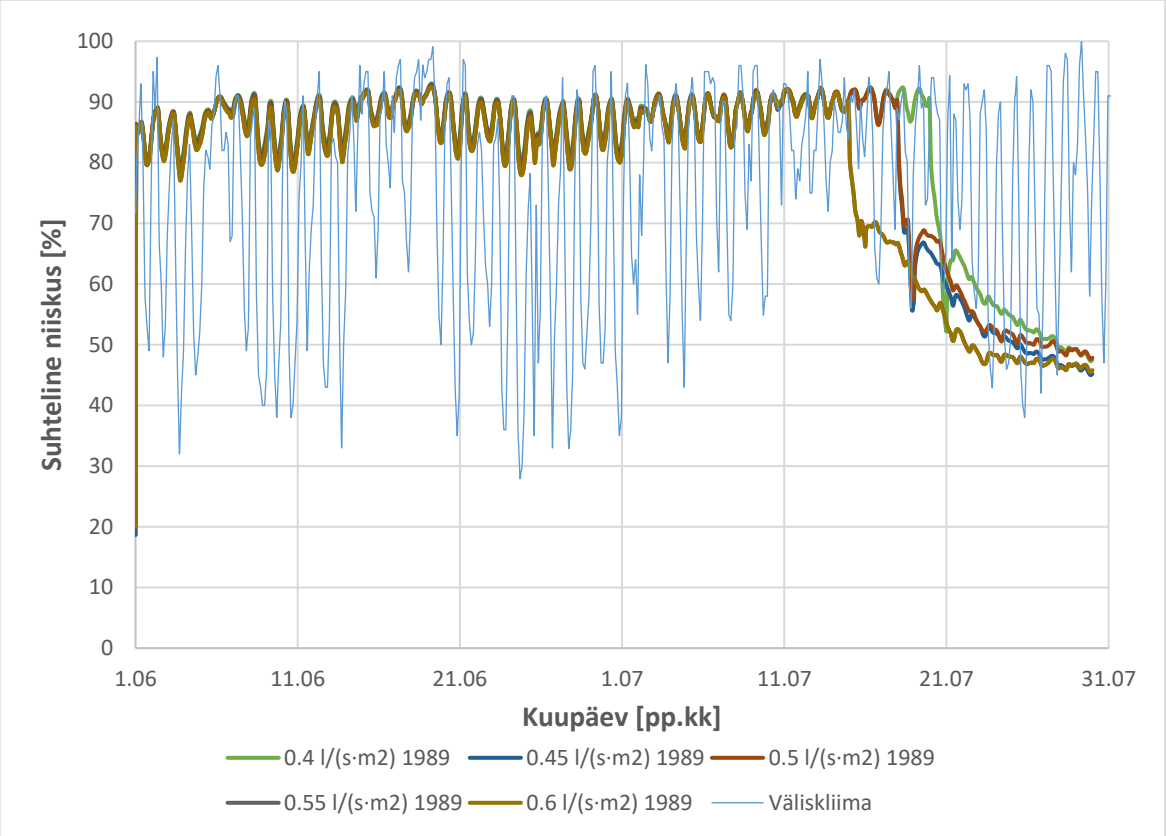
Joonis 59. Simuleeritud pööningu õhutemperatuurid erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.



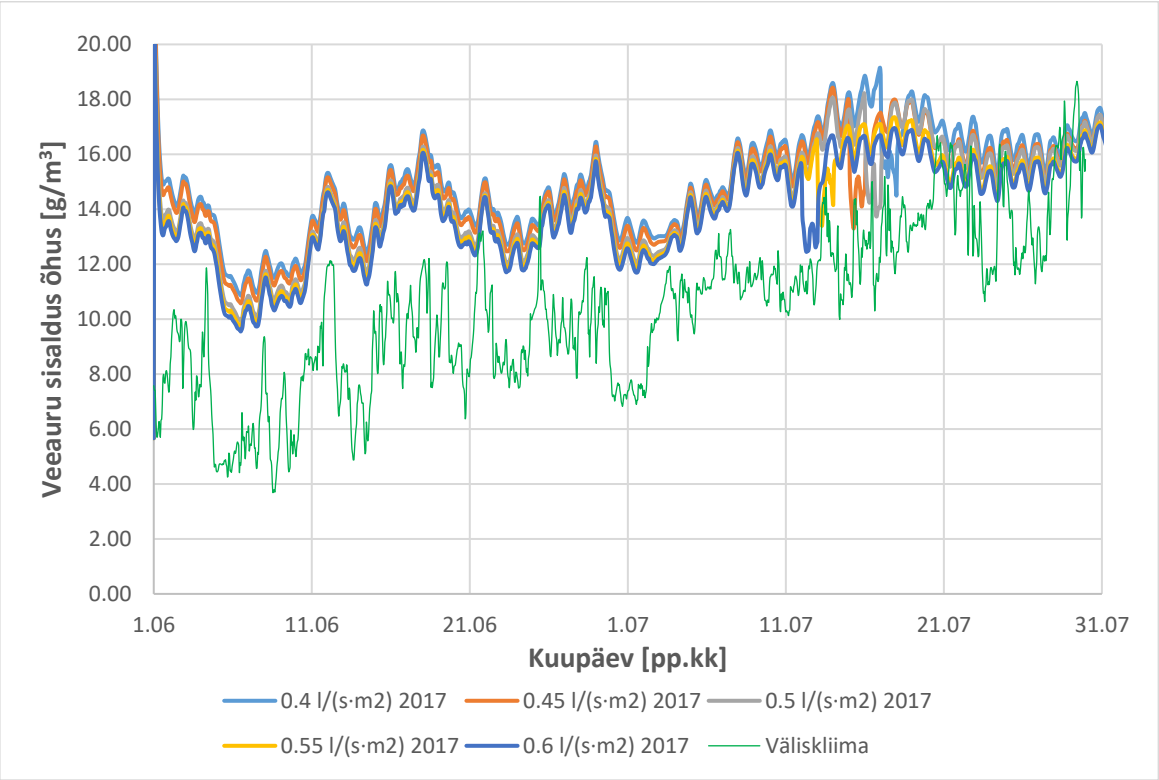
Joonis 60. Simuleeritud pööningu ruumiõhu suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1989. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.



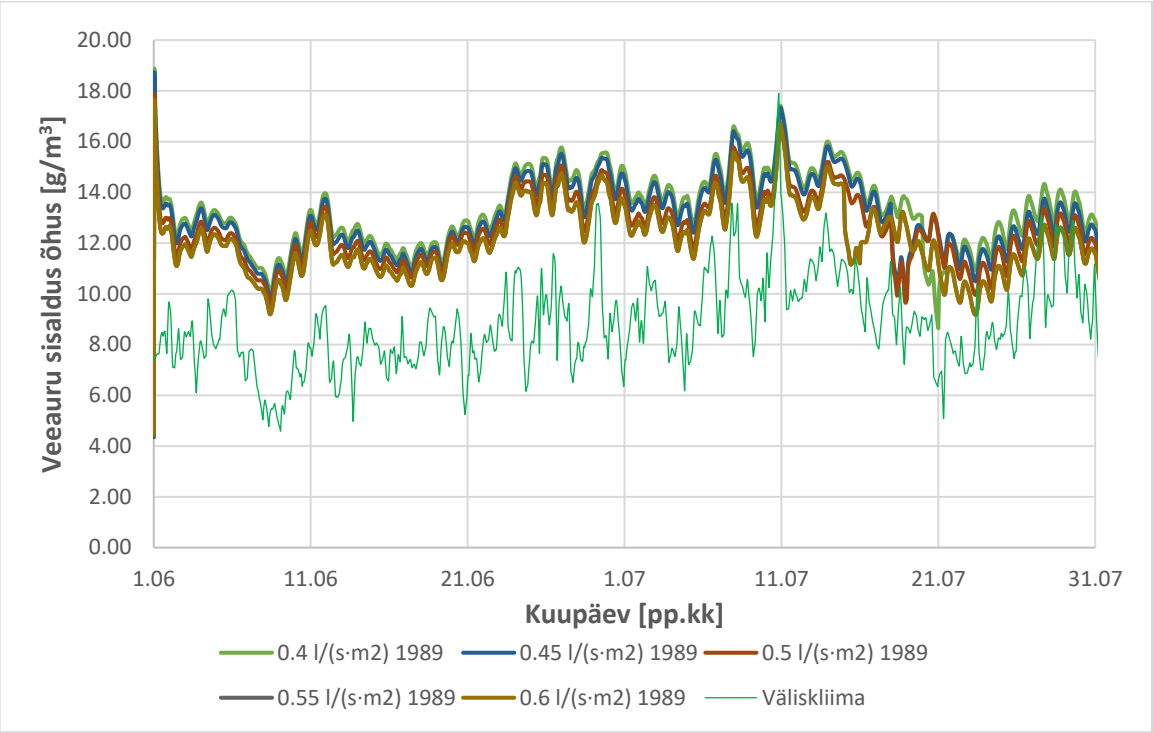
Joonis 61. Simuleeritud pööningu ruumiõhu suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.



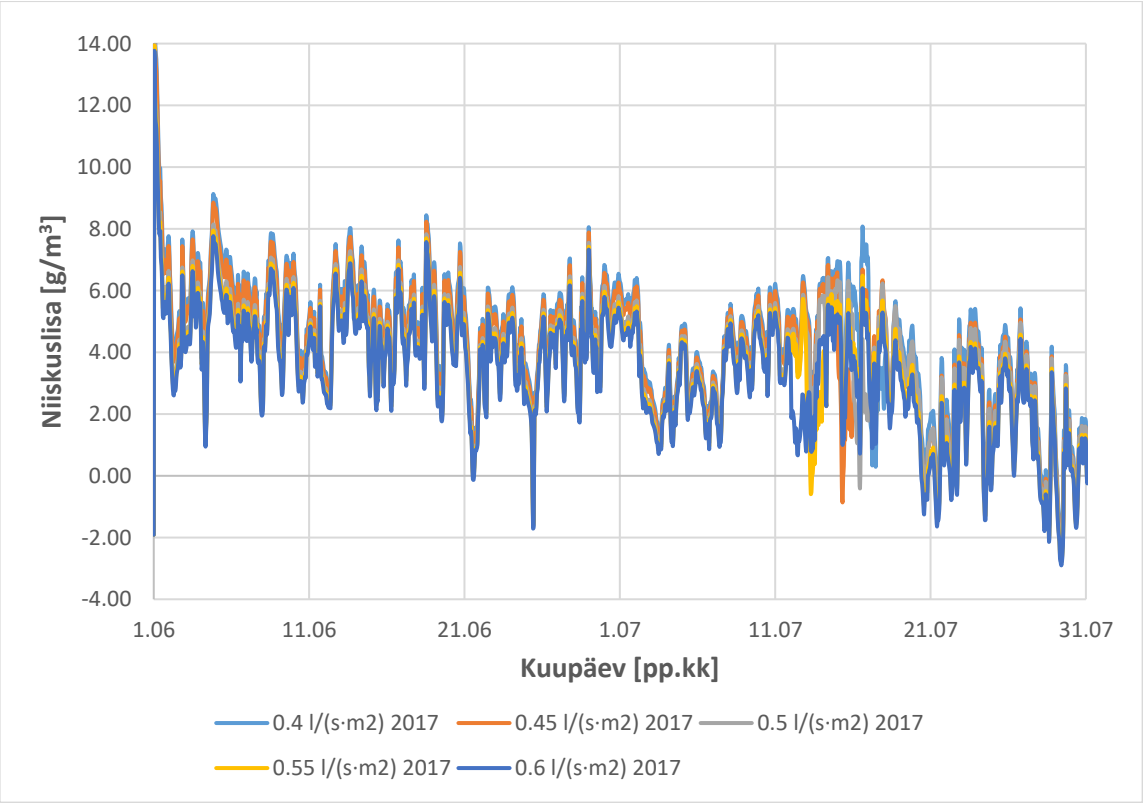
Joonis 62. Simuleeritud pööningu ruumiõhu suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1989. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.



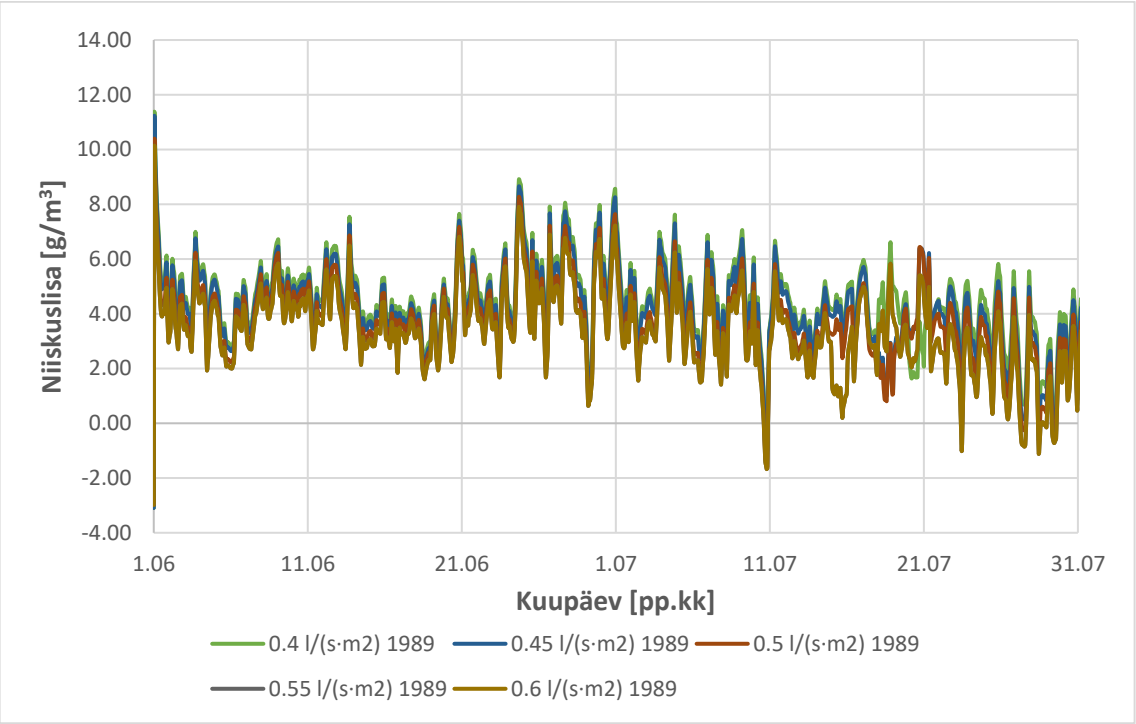
Joonis 63. Simuleeritud pööningu ruumiõhu veeauru sisaldused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.



Joonis 64. Simuleeritud pööningu ruumiõhu veeauru sisaldused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1989. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.

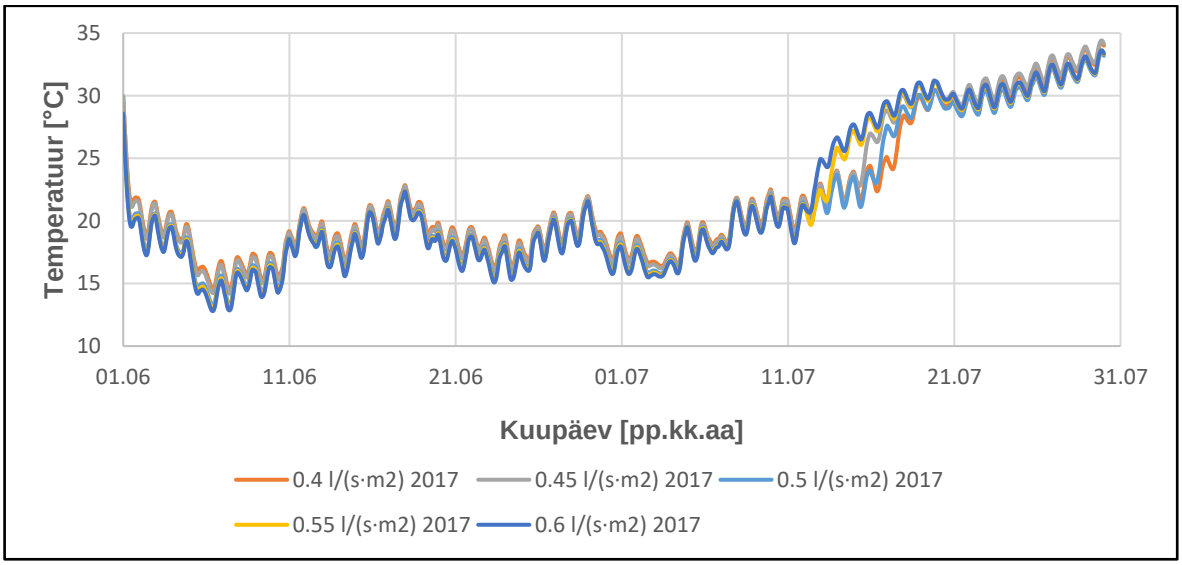


Joonis 65. Simuleeritud pööningu ruumiõhu niiskuslisa erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.

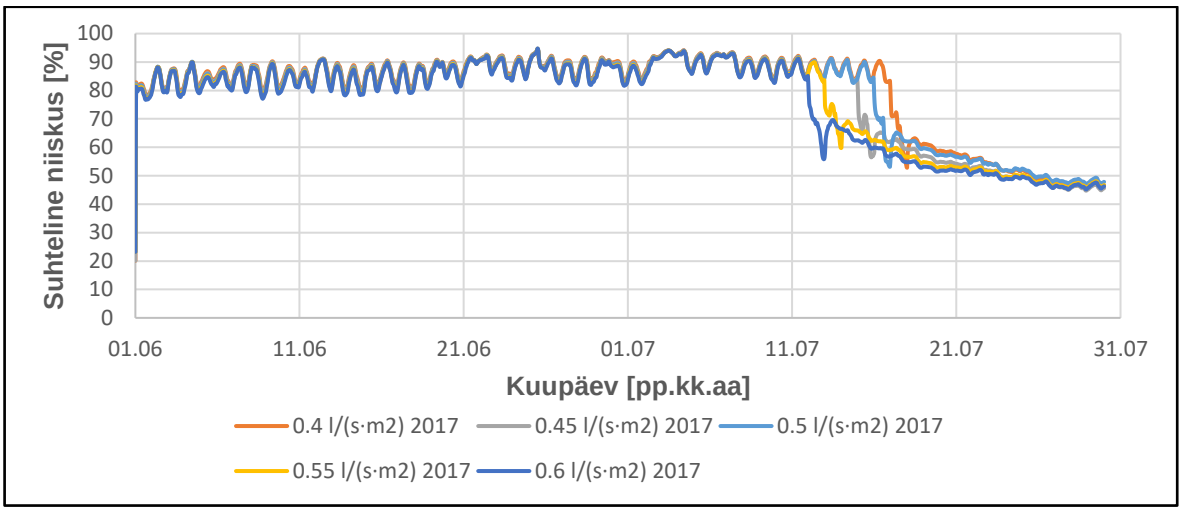


Joonis 66. Simuleeritud pööningu ruumiõhu niiskuslisa erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1989. aasta suveperioodi väliskliima andmetega.

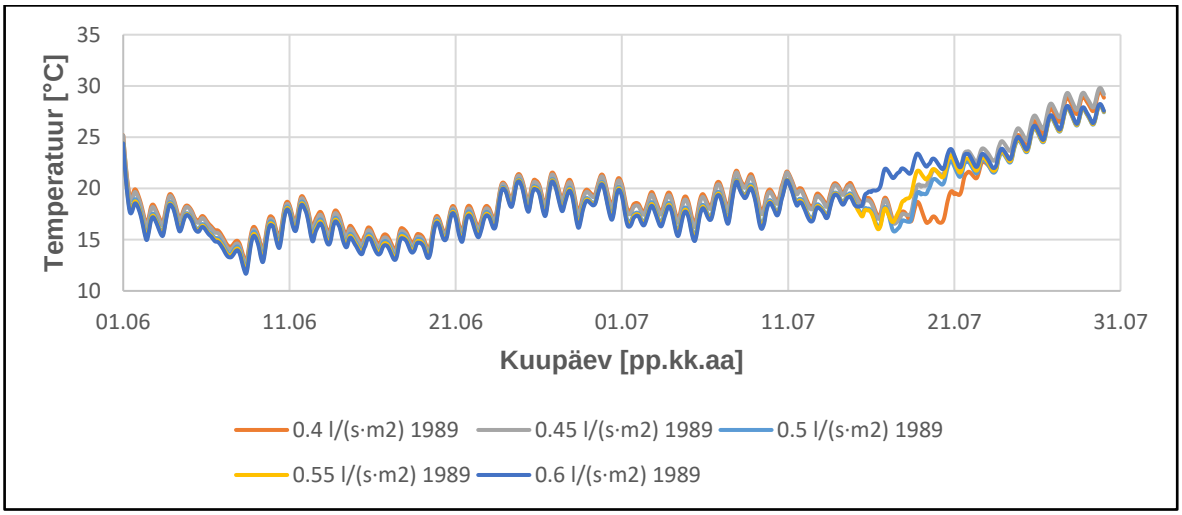
Simulatsiooni ruumiõhu andmed suuri erinevusi ei kajasta, sest ventilatsiooni õhuvooluhulga erinevus on marginaalne. Suurim erinevus on perioodil, mil eri aegadel ehitusniiskus välja kuivab ning see kajastub eriti hästi suhteliste niiskuste graafikutelt (vt Joonis 61 ja Joonis 62) kui ka temperatuuride graafikutel (vt Joonis 59 ja Joonis 60) on erinevus tuvastatav. Niiskuslisade graafikutelt nähtub, et alguses olev suur liigniiskus taandub kiirelt ja jääb kõikuma niiskuslisa 4 g/m^3 ümber. Seega ventilaatoritest on abi niiske õhu likvideerimisel.



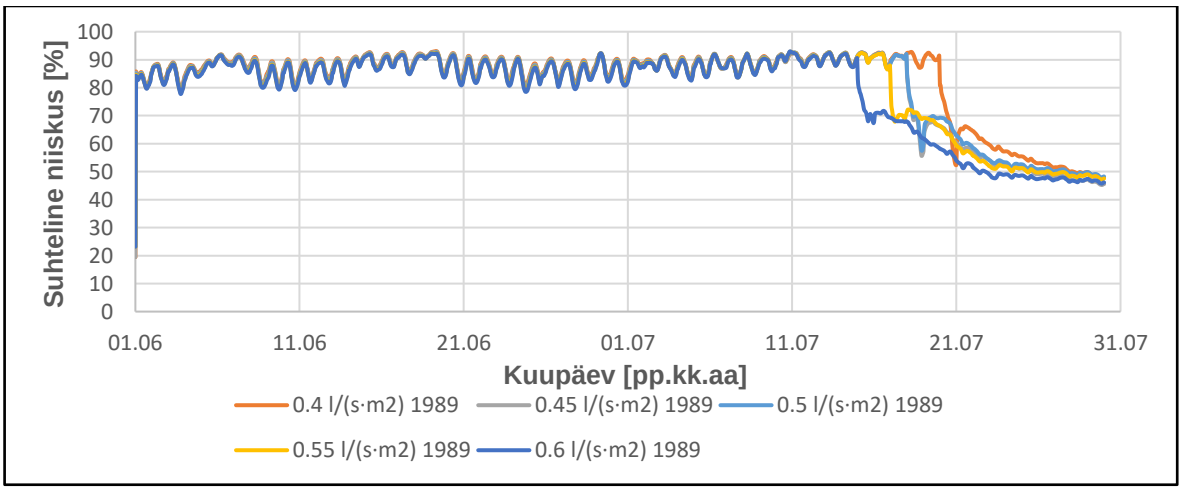
Joonis 67. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna temperatuurid erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. a suveperioodil.



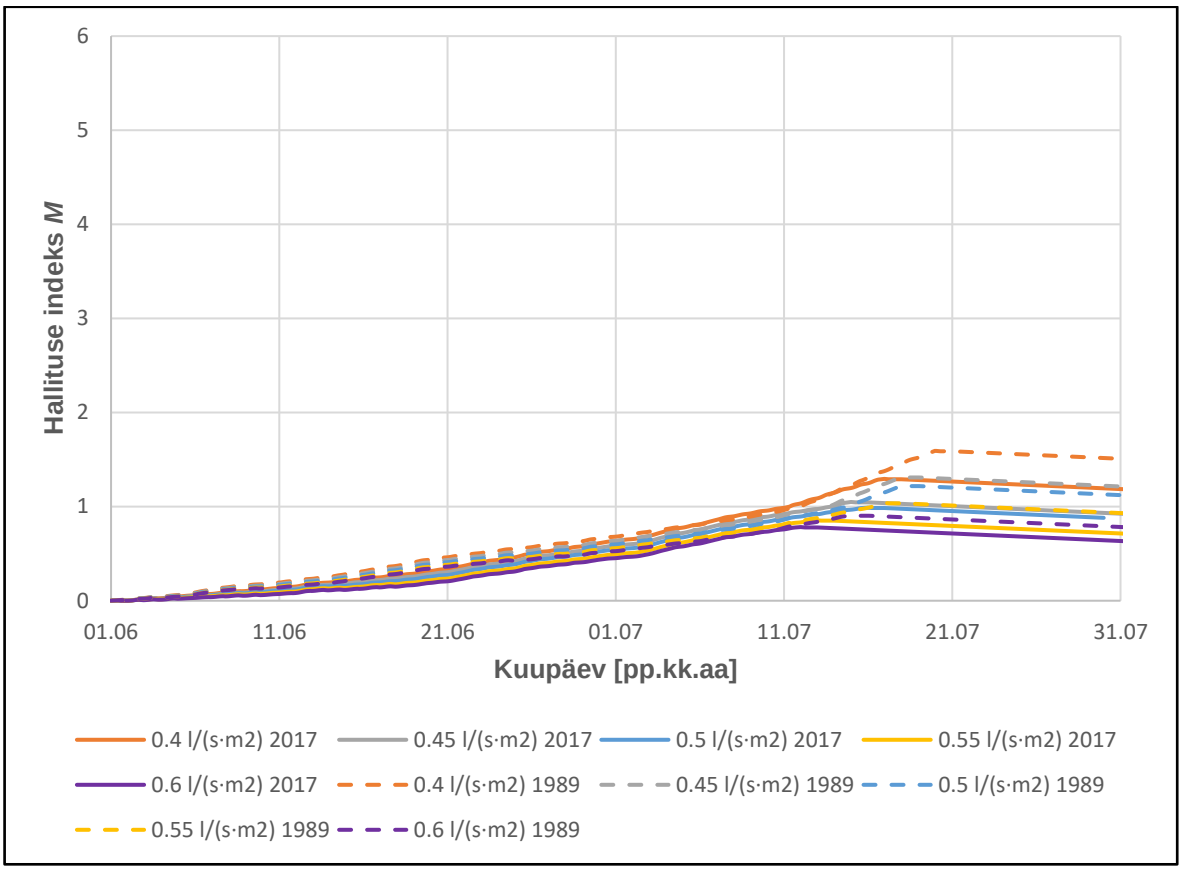
Joonis 68. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. a suveperioodil.



Joonis 69. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1989. a suveperioodil.



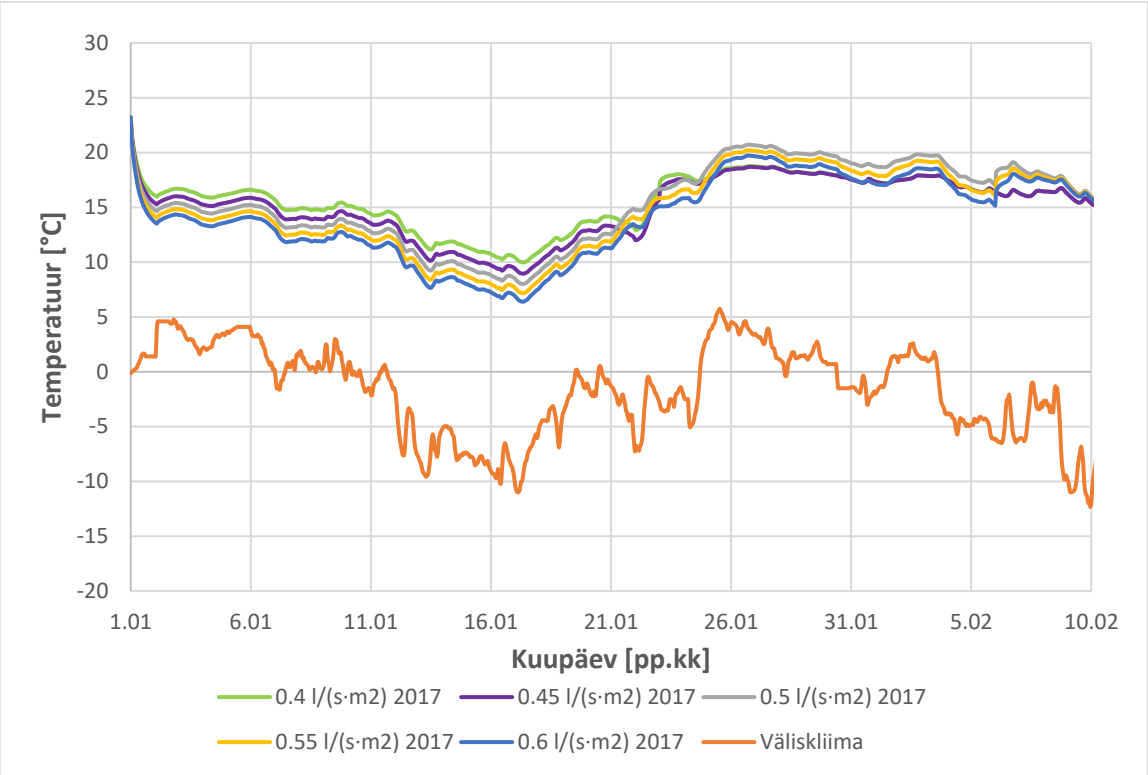
Joonis 70. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. a suveperioodil.



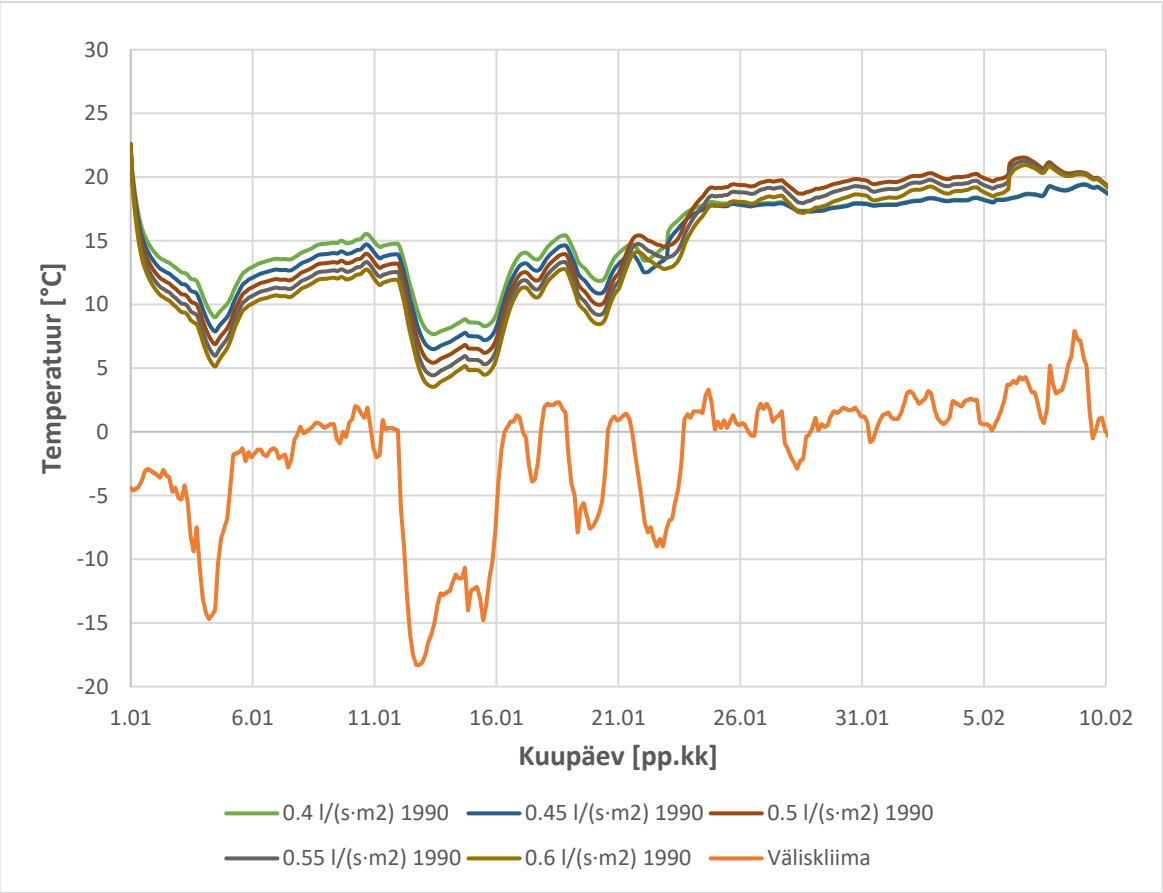
Joonis 71. Hallituse indeksi eri aastate kliimaandmete ning õhuvooluhulkadega suvel.

Üldine trend simulatsioonide tulemustest, viitab hallituse testaasta kriitilisusele, kuna antud perioodi puhul oli samade õhuvooluhulkadega kõrgem hallituse indeks just testaastal. Järeldub, et minimaalse õhuvooluhulga 0,6 L/(m^2·s) kohesel rakendamisel oleks suudetud hallituse teke ära hoida, kui eeldus ehitusniiskuse koguse kohta on õige. Konservatiivsem meede oleks arvestada suurema õhuvooluhulgaga, eriti olukorras mil liigse ehitusniiskuse avastamise ja ehitustööde lõpu vahele jääb pikem ajavahemik. Graafikutel maksimaalsete hallitusindeksite vahemik on *M*=0,8...1,6. Antud ventilaatorite vooluhulkadega kulus aega 6-7 nädalat, et antud niiskus välja kuivatada.

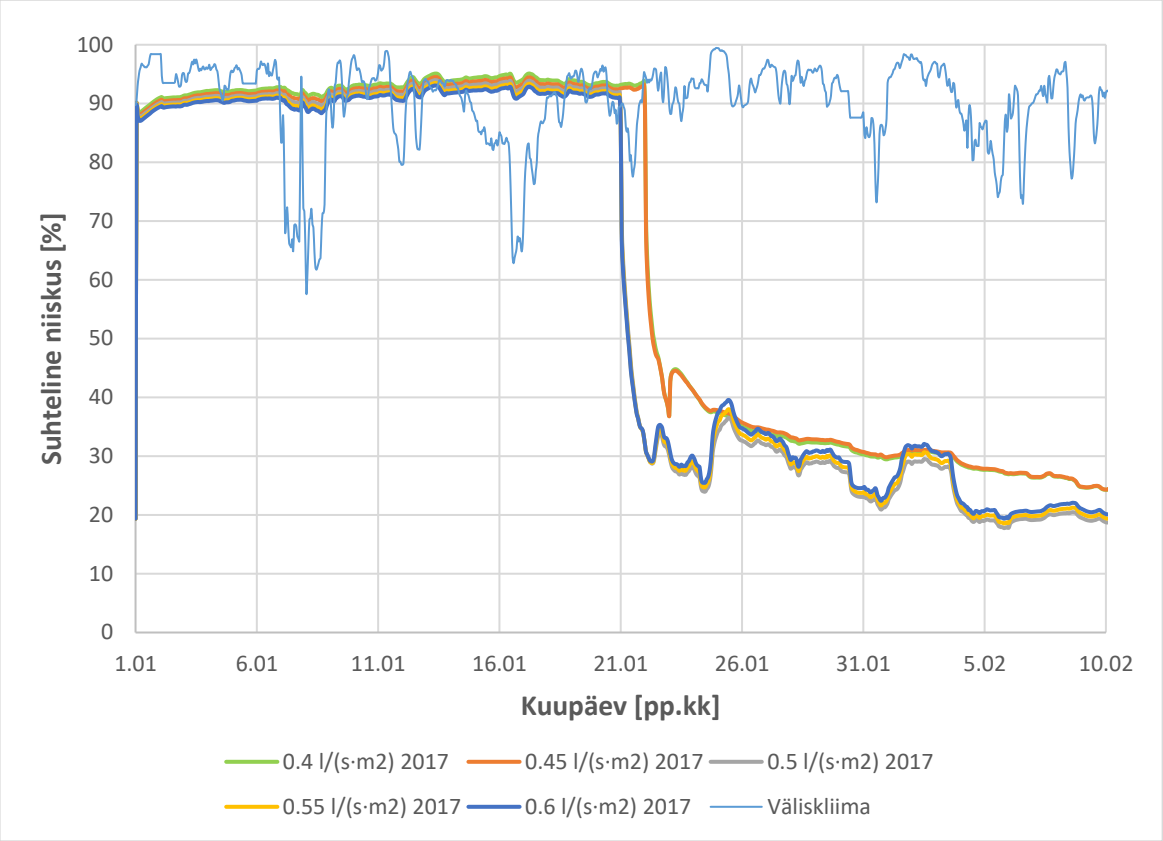
Sarnased simulatsioonid sooritati ka talveperioodi jaoks (perioodiks valiti 1. jaanuar 2017 kuni 2. märts 2017). Lisaks peatüki alguses mainitud ventileerimismeetoditele on pööningule mudeldatud 10 erinevat 2 kW küttevõimsusega küttekeha, mis soojendavad ruumiõhku. Simulatsiooni tulemustest on märgata marginaalseid erinevusi temperatuurides, suurema ventilatsiooni õhuvooluhulgaga on temperatuur madalam välisõhu jahedama temperatuuri tõttu. Peale ehitusniiskuse väljakuivamist on märgata erinevusi eri vooluhulkade vahel suhtelise niiskuse graafikutel (vt Joonis 74 ja Joonis 75), kust joonistub välja hetk, mil ehitusniiskus on välja kuivanud (oluline langus suhtelisel niiskusel).



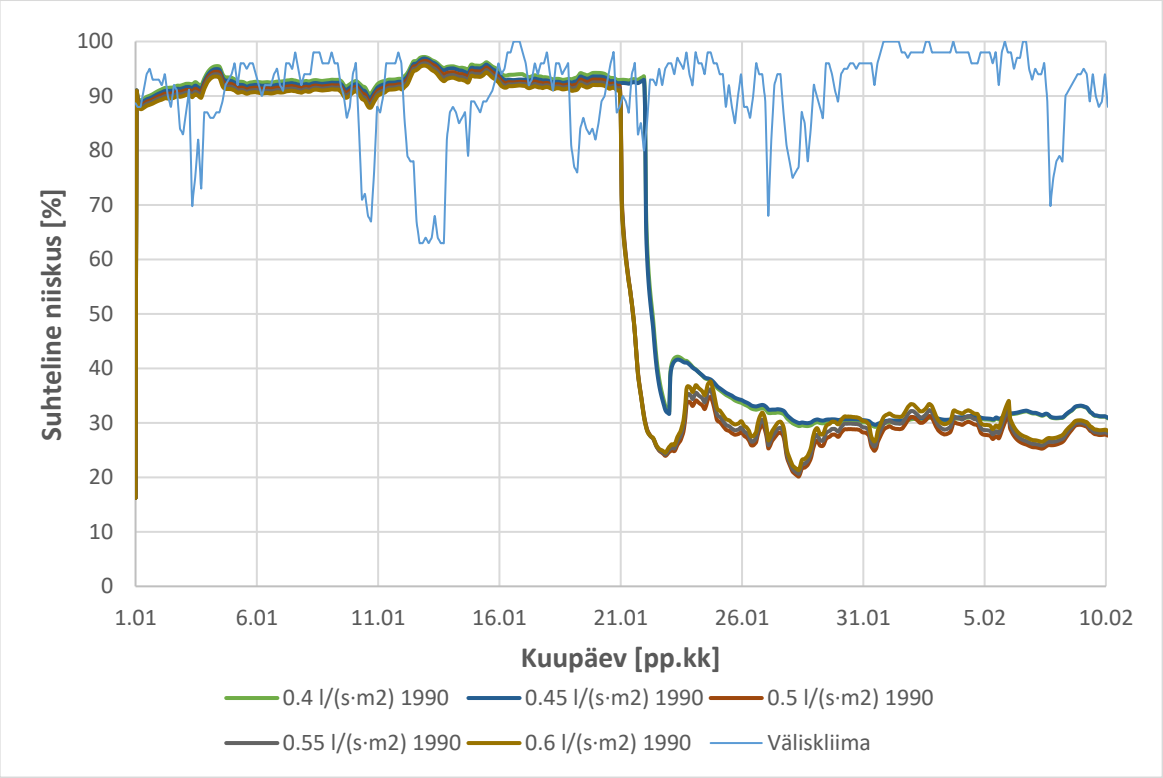
Joonis 72. Simuleeritud pööningu ruumiõhu temperatuurid erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.



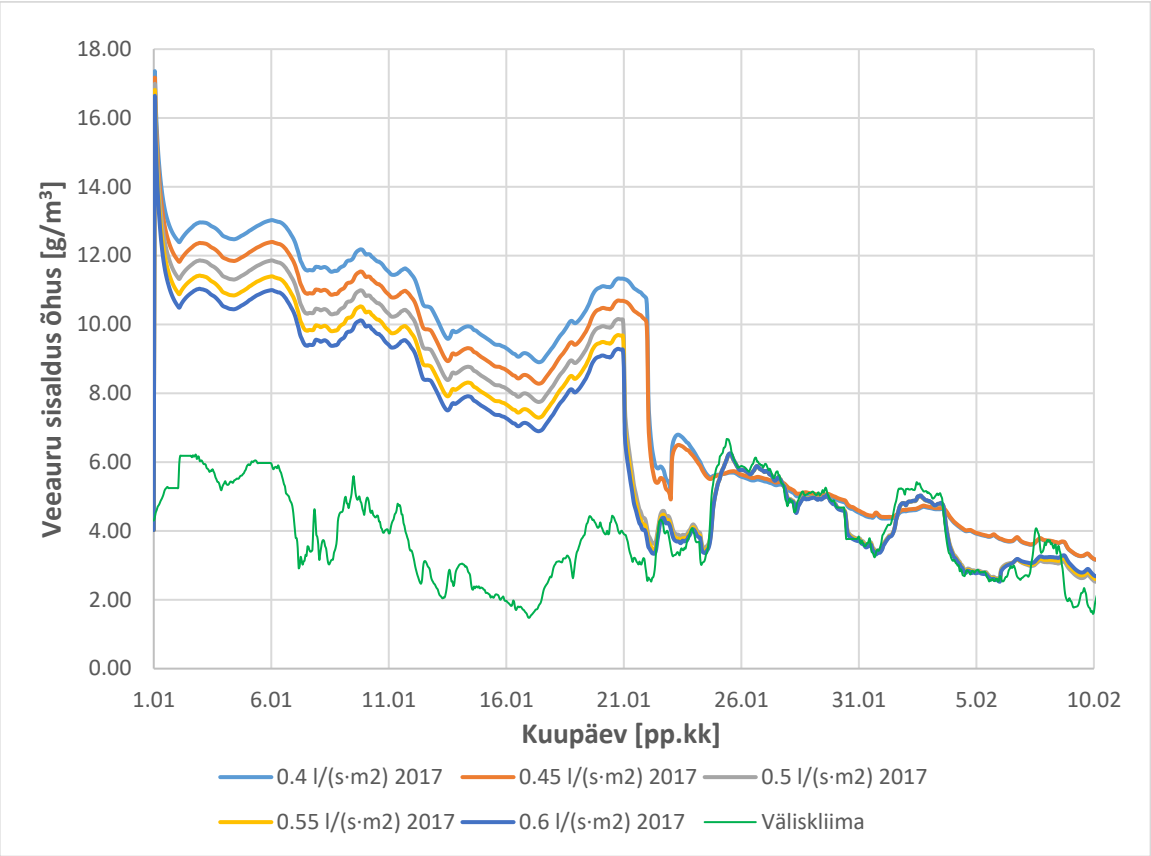
Joonis 73. Simuleeritud pööningu ruumiõhu temperatuurid erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1990. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.



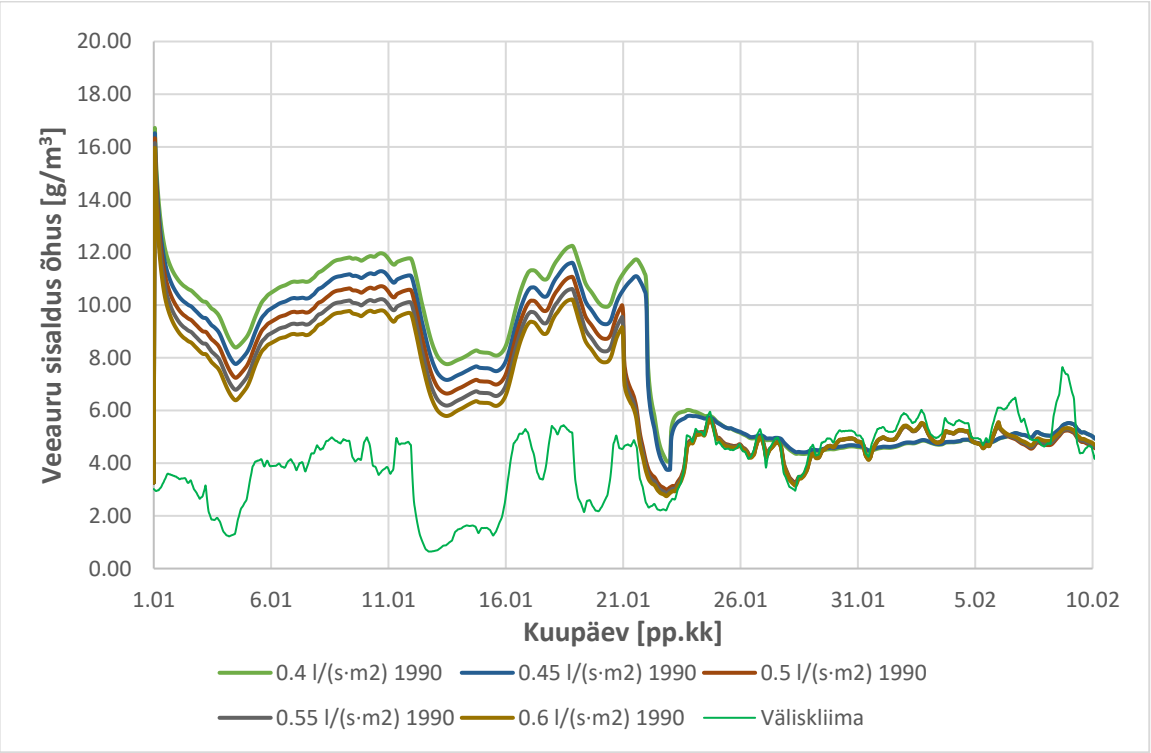
Joonis 74. Simuleeritud pööningu ruumiõhu suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.



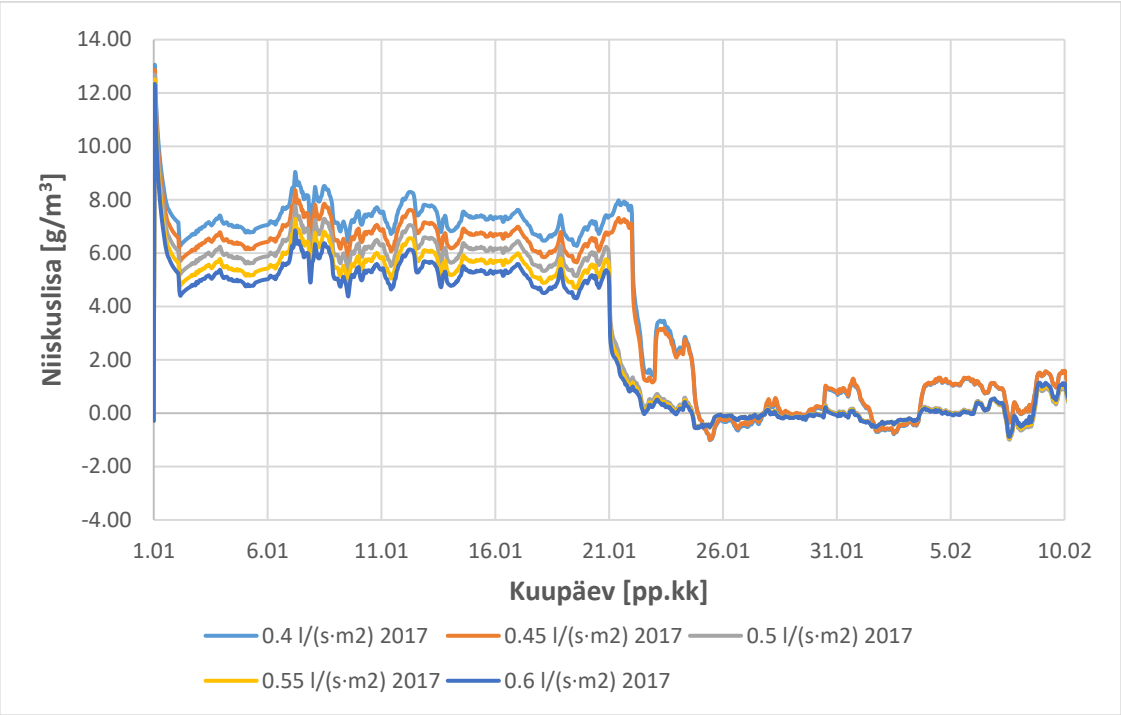
Joonis 75. Simuleeritud pööningu ruumiõhu suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1990. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.



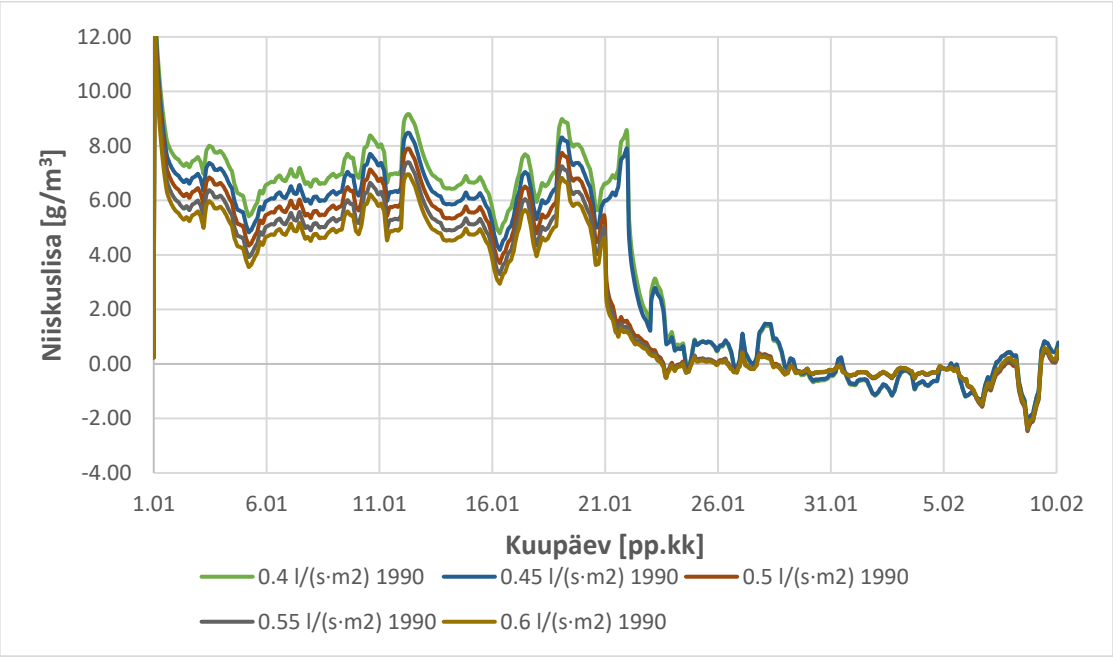
Joonis 76. Simuleeritud pööningu ruumiõhu veeauru sisaldused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.



Joonis 77. Simuleeritud pööningu ruumiõhu veeauru sisaldused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1990. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.

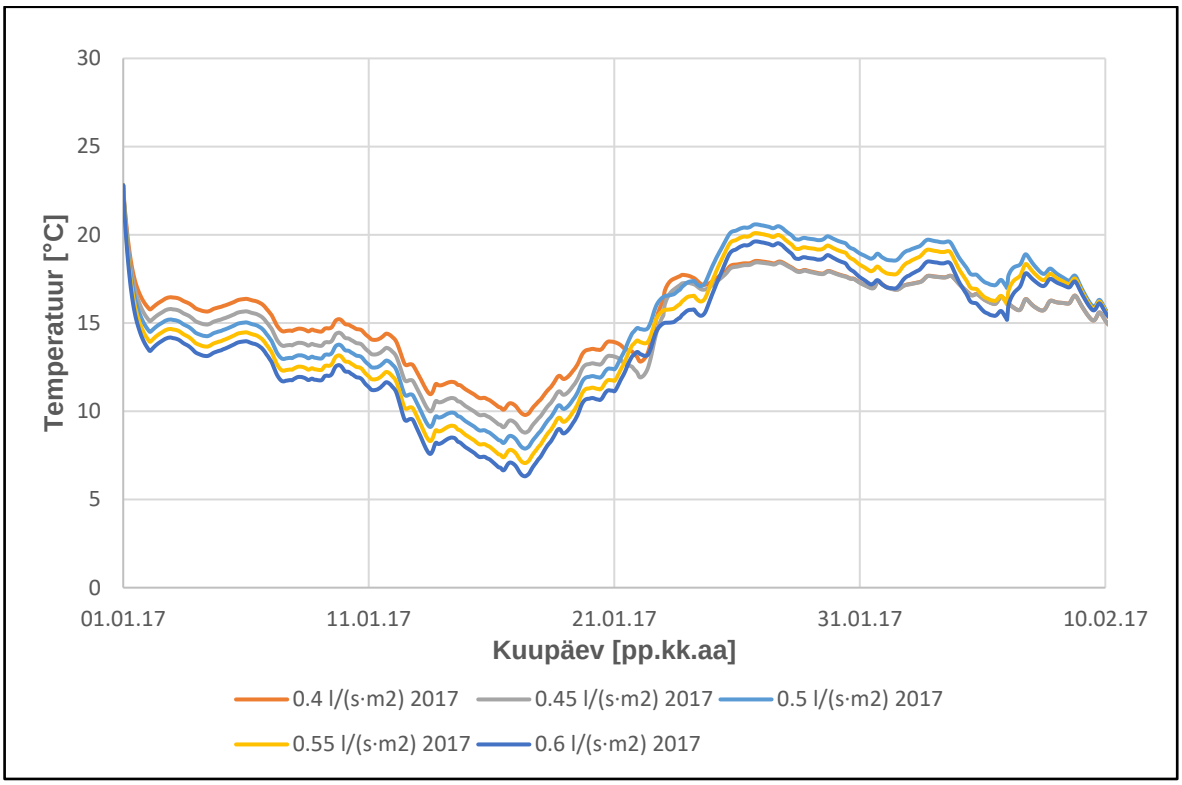


Joonis 78. Simuleeritud pööningu ruumiõhu niiskuslisa erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.

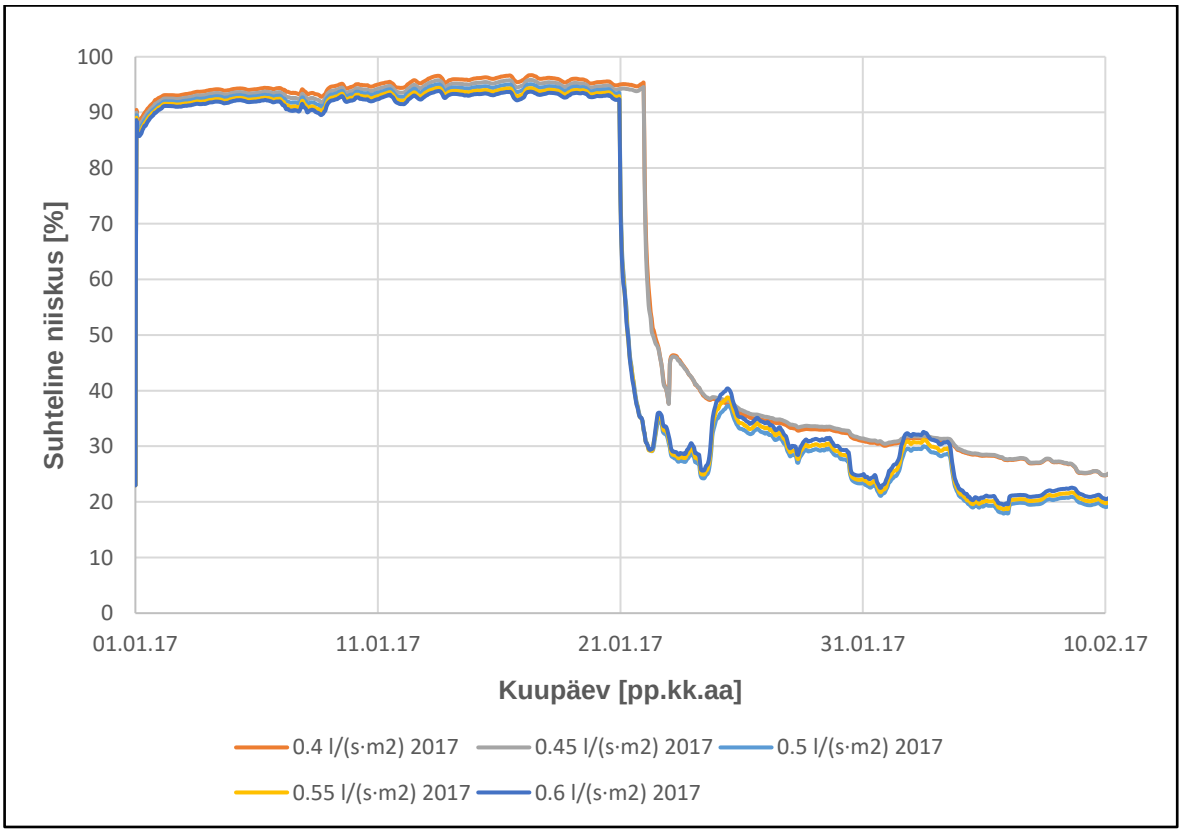


Joonis 79. Simuleeritud pööningu ruumiõhu niiskuslisa erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1990. aasta talveperioodi väliskliima andmetega.

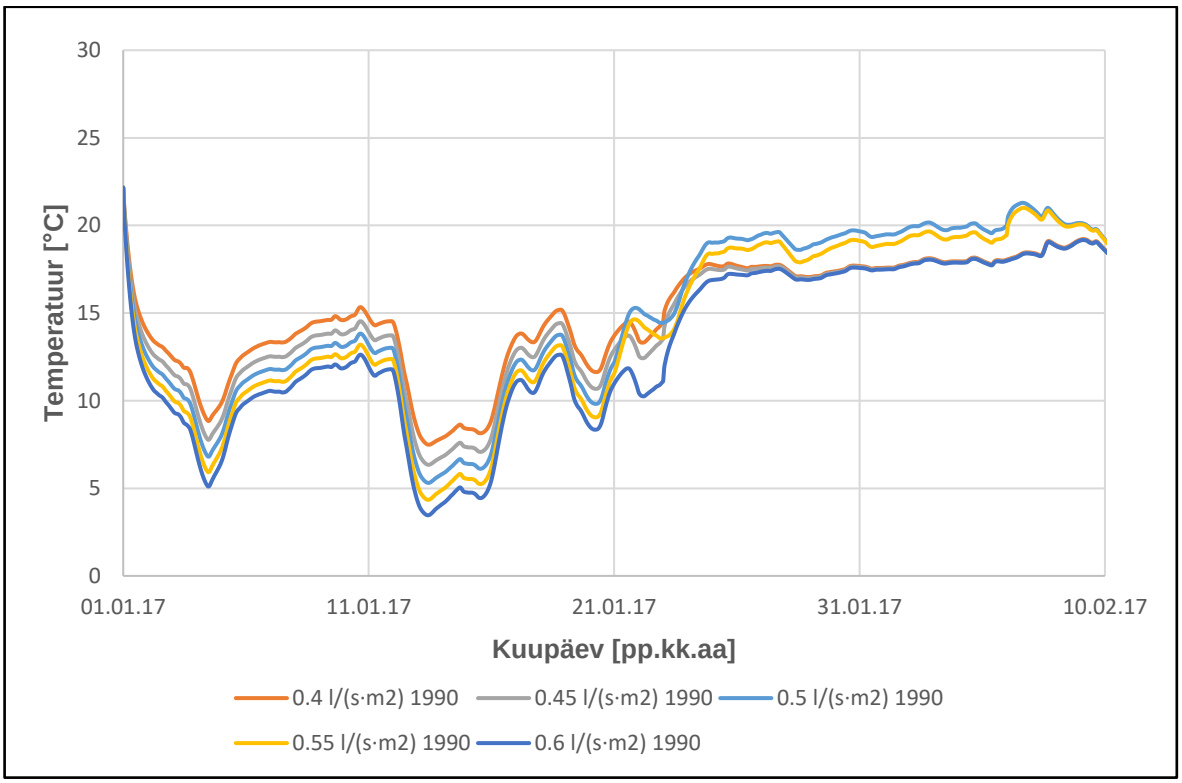
Simulatsioonitulemused osutavad niiskuse oluliselt kiiremale välja kuivamisele (3..3,5 nädalat) kui suveperioodil. Kiiruse erinevuses on lisaks 20 kW küttevõimsusele oluline ka talveperioodil välisõhu oluliselt madalam veeauru sisaldus kui suviti. Niiskuslisa jääb pärast ehitusniiskuse väljakuivamist nullilähedaseks.



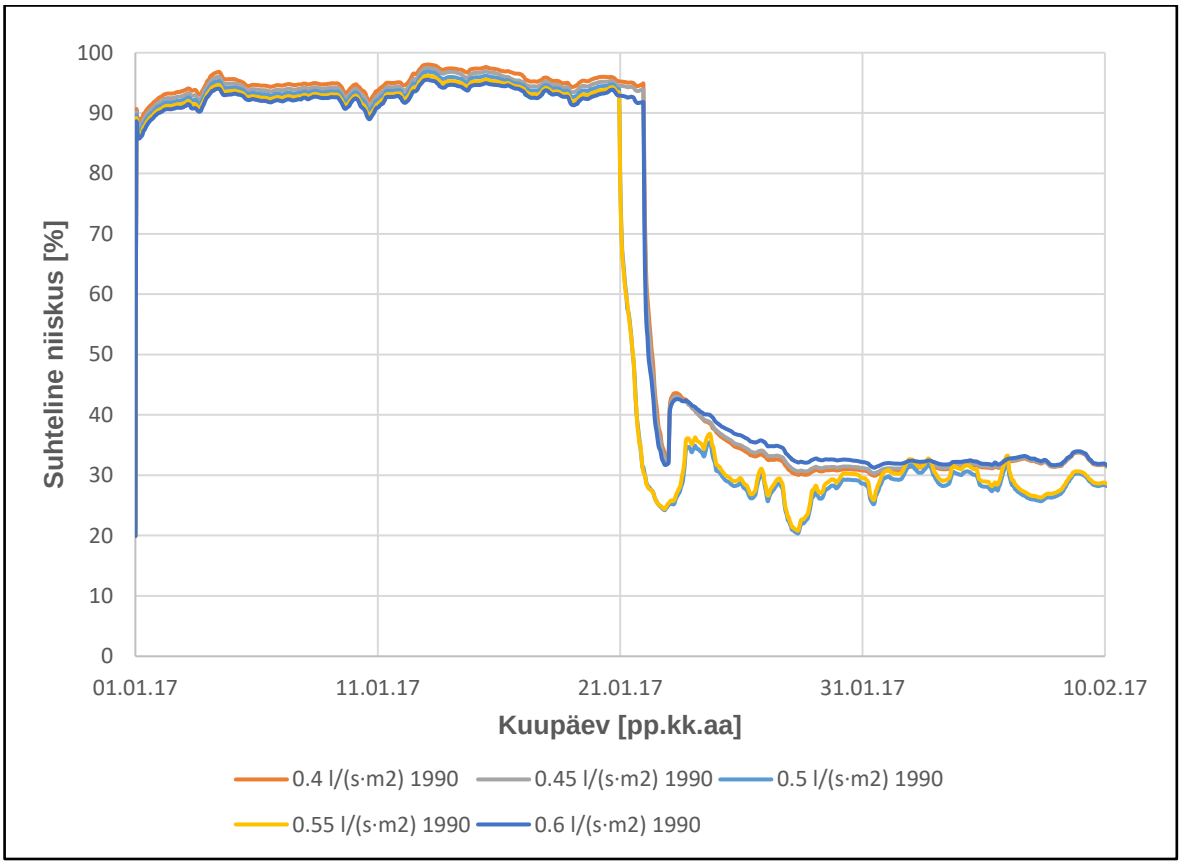
Joonis 80. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna temperatuurid erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. a talveperioodil.



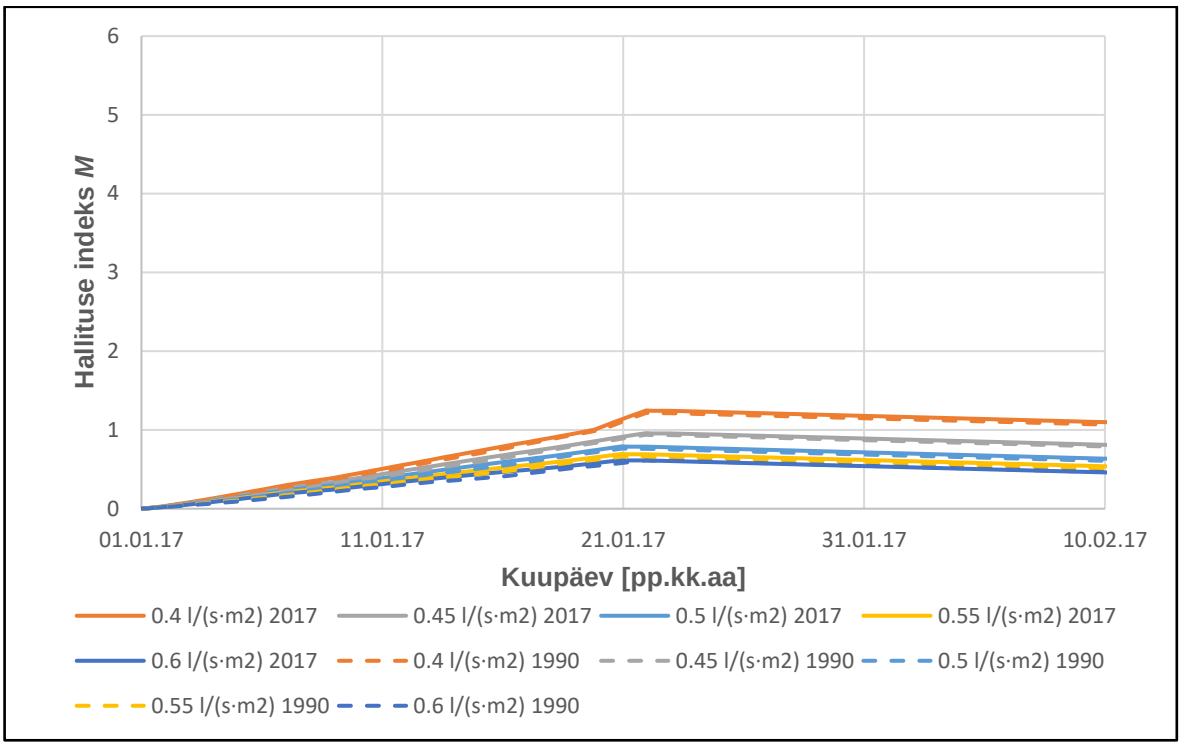
Joonis 81. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 2017. a talveperioodil.



Joonis 82. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna temperatuurid erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1990. a talveperioodil.



Joonis 83. Simuleeritud katuslae OSB sisepinna suhtelised niiskused erinevate ventilatsiooni õhuvooluhulkadega 1990. a talveperioodil.



Joonis 84. Hallituse indeksi eri aastate kliimaandmete ning õhuvooluhulkadega talvel.

Tulemuste põhjal saab järeldada seekord, et hallituse indeksid olid kriitilisemad 2017. aasta kliimaandmetel tehtud simulatsioonidega. Selgub, et talvel oleks minimaalse õhuvooluhulga 0,45 L/(m^2·s) kohesel rakendamisel oleks suudetud hallituse teke ära hoida, kui eeldus ehitusniiskuse koguse kohta on õige. Antud simulatsiooniga selgus, et hallituse tekke ära hoidmiseks piisab ligi kolmest nädalast ventileerimisest valitud õhuvooluhulkadega. Graafikutel maksimaalsete hallitusindeksite vahemik on *M*=0,61...1,25.

4.4 Tulemuste hindamine

Magistritöö raames sooritatud simulatsiooni tulemus andis aimdust pööningul olevast olukorrast peale ehituse lõppu, mis tingis hallituse kasvuks sobivate tingimuste tekkega. Andmetest selgus, et katuse sisepinnal olevad tingimused tagasid hallituse indeksi suurusjärgus *M*=4,7..5,5. Selline indeks tagaks matemaatilise mudeli põhjal silmnähtava hallituse kasvu, ent kuna antud katusetarindi sisepinnad on pindalalt väga suured ning simulatsioonist saadud tulemused annavad üle pinna keskmised väärtused, siis võivad lokaalsed kahjustused olla kohati veelgi suuremad ning ka tingimused reaalsuses võisid olla teised, sest läbivaatusel avastati laialdast hallituse kasvu osadel pindadel.

Simulatsiooni erinevused mõõtetulemustega olid võrdlemisi väikesed, mis viitab sellele, et IDA-ICE tarkvaraga saab edukalt modelleerida märgunud tarinditega ruumi sisekliimat. Vaadeldava perioodi võrreldavate temperatuuride keskmine erinevus on 0,14°C. Suurimad erinevused jäävad vahemikku ±3..5°C. Suhtelise niiskuse keskmine erinevus 1,7% ning suurimad erinevused on ±9..10% vahemikus. Niiskuslisa keskmine erinevus on 0,14 g/m^3 ja suurimad erinevused on ±3 g/m^3 vahel. Põhinedes keskmistele erinevustele, siis nende hinnangul kajastab simulatsioon reaalset situatsiooni üsna täpselt.

Võrreldes algset simulatsiooni alternatiivse simulatsiooniga, kus mineraalvillaplaadid põrandale paigaldatakse peale katuse ehitust, on olukord selgelt parem, sest ei teki ohtu hallitusele, kuna toolvärgist väljakuivav ehitusniiskus on võrreldes põrandalt väljakuivava ehitusniiskusega oluliselt väiksem, seega ei põhjusta see pööningul olevale sisekliimale nii suurt suhtelist niiskust ja niiskuslisa kui algne simulatsioon ehk reaalne objektil olev olukord seda põhjustas.

Alternatiivsest simulatsioonist, kus paigutati vesi ühe ruumi põrandale ning prooviti leida selle vee auramise mõju teistele ruumidele, järeldus üsna olematu mõju, kuna hallituse tekkeks sobilikud tingimused tekkisid vaid ruumis, kus vesi oli põrandal. Seega oleks olnud hoone katuse hoolikas katmine kasulik, kuna piiratud sektsioonist oleks olnud lihtne eemaldada märgunud villaplaadid.

Pööningule ventilatsiooni paigaldamine ja tööle jätmine seitsmeks nädalaks oleks likvideerinud liigse ehitusniiskuse, kui ventilatsioon oleks töötanud minimaalse õhuvooluhulgaga 0,6 L/(m^2·s) kohe peale katuse ehitamise lõppu.

Talvisel perioodil piisas ehitusniiskuse väljakuivatamiseks ligi 3 nädalat, kasutades 20 kW küttevõimsusega kütteseadmeid ning ventilatsiooniseadet õhuvooluhulgaga 0,45 L/(m^2·s).

Käesoleva uurimuse peamiseks puuduseks on kogu hoone HAM mudeldamise puhul see, et niiskuse levimisel ei arvestata vedela vee liikumisega tarindite vahel ning ei arvestata 2D ega ka 3D niiskusleviga.

Alternatiivne võimalus oleks olnud ka õhukuivatitega ehitusniiskuse väljakuivatamine, mis oleks lihtsa arvutusega võtnud aega ligi 20 päeva, kui arvestada nii, et pööningule paigaldatakse 4 kuivatit ning iga seadme võimsus on eraldada 80 liitrit veeauru õhus ööpäeva jooksul. Eeldati, et suhteline niiskus pööningul on 80% ning temperatuur 20°C (suveperiood) ning akumuleerunud ehitusniiskuse kogus on 6 500 liitrit vett.

5. JÄRELDUSED

HAM mudeli kasutamine hoone niiskusturvalisuse hindamiseks on oluline, sest mudel arvestab siis niiskuse liikumisega läbi tarindite ja arvestab ka niiskuse puhverdamisega. Vastasel juhul oleks mudeliga sooritatud simulatsiooni tulemused reaalsusega võrreldes ebatäpsemad ning tulemustest järelduks suurem ventilatsiooni õhuvahetuse hulk. Uurimus tõestas, et hoone kombineeritud soojus- ja niiskuslevi modelleerimist on võimalik kasutada niiskusturvalisuse strateegiate väljatöötamiseks. Arvutustulemused olid piisavalt heas kooskõlas, et mudelit saaks kasutada edasises modelleerimises. Simulatsiooni nõrkuseks võib pidada lokaalsete punktide mudeldamise täpsust.

Arvutustulemused näitasid selget seost pööningul tekkinud hallituse kasvu ja pööningu põrandale salvestunud sademete hulga vahel. Simuleeritud tulemused osutasid pööningu puitpindadel tekkivale silmnähtavale hallituse kasvule, mis tegelikkuses olidki lokaalselt massilise hallitusega kaetud. Mudel ei võimaldanud lokaalsete kahjustuste hindamist, ent probleemi olemasolu sai mudeliga sooritatud simulatsiooniga tõestada.

Oluline erinevus simulatsiooni tulemuste ja tegelikkuse vahel oli see, et simulatsioon hindas hallituse kasvu madalama pinnatemperatuuriga ja seetõttu kõrgema pinna suhtelise niikusega välisseinte sisepindadel suuremaks kui katuslae sisepindadel. Simulatsioon arvutab ruumi ühe sõlmpunktina ega arvesta asjaoluga, et hallitama läinud katuslagi oli otse niiskustoodangu ehk märja villaplaadi kohal. Seetõttu tuleb arvutustulemusi käsitleda ettevaatlikult ja lisada neile varutegur, mis arvestaks mudeli ebaideaalsusega. Lisaks peab juhtima tähelepanu teostatud ehitustöödele antud objekti puhul. Nimelt ei paigaldatud pööningu ehitamise ajal ehitatava hooneosa kohale vihma eest katvat presenti, mis oleks välistanud sademete sattumise pööningule ning hilisemas staadiumis, kui seda tehti, siis ei oldud presendiga korralikult kaetud pööningut, vaid presendi servadest sai vesi voolata pööningule.

Simulatsiooniga, kus välistati mineraalvillade paigaldus pööningu põrandale enne katuse ehitamist, tõestati niiskusturvalisuse poole pealt ohutu variant ehitustööde teostamiseks. Selline ehitusviis poleks simulatsiooni tulemuste põhjal põhjustanud hallituse tekkeks sobivaid tingimusi.

Hallituse teket oleks saanud pööningul vähendada ka peale ehituse lõppu kiire reageerimisega ning paigaldada pööningule ajutine ventilatsiooniseade (ventilaatorid), mis tekitaks õhuvahetuse niiskuse väljakuivatamise tarbeks ning oht hallituse tekkeks oleks kõrvaldatud. Niisamuti oleks antud ohtu võimalik ennetada ka külmal perioodil paigaldades pööningule lisaks ventilatsiooniseadmele ka küttekehad, mis soojendaksid külma niisket õhku.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö raames on uuritud kogu hoone kombineeritud soojus- ja niiskuslevi modelleerimise põhjal hinnata hoone niiskusturvalisust. Eesmärgiks oli analüüsida hallituse tekke põhjust simulatsioonide abil ning leida niiskusturvalisemaid strateegiad Akadeemia tee 5a ühiselamu põhjal. Hallituse tekke hüpoteetiliseks põhjuseks peeti pööningule akumuleerunud ehitusniiskust.

Uurimustöö käigus koostati kombineeritud niiskus- ja soojuslevi mudeleid juhtumi hindamiseks ning niiskusturvaliste alternatiivsete lahenduse loomiseks. Mudelite täpsuse hindamiseks ja kalibreerimiseks olid abiks varasemad mõõtetulemused ja kogutud andmed uuritava hoone pööningu ning korterite sisekliimast ning väliskliimast. Simulatsiooni tulemuste hindamisel oli omakorda abiks 2017. aastal tehtud Akadeemia tee 5a pööningu ekspertiis, milles märgiti ära peamised niiskuskahjustused ning nende täpsed asukohad ja ühtlasi andis ekspertiis ülevaate ehitustööde ajaloost.

Simulatsioonide tulemused osutasid eelpool mainitud probleemile, et pööningul alanud hallituse kasvu põhjustas ehitusperioodi ajal pööningule paigaldatud mineraalvillaplaatidesse akumuleerunud ehitusniiskus, mis peale hoone valmimist hakkas välja kuivama ning põhjustas kõrge niiskustaseme pööningul, mis on soodne hallituse kasvule. Ühes niiskusturvalisuse strateegia simulatsioonis välistati mineraalvillaplaatide paigaldus enne katuse ehituse lõppu ning tulemused osutasid oluliselt madalamale niiskustasemele, mis poleks põhjustanud hallituse kasvu tekkimist pööningu puitpindadel. Hallituse tekke ennetamine oleks teise niiskusturvalisuse strateegia simulatsiooni põhjal olnud võimalik pööningu ventileerimisega suvisel perioodil õhuvooluhulgaga 0,6 L/(m^2·s), kus ehitusniiskuse väljakuivatamiseks oleks kulunud seitse nädalat. Talvisel perioodil oleks olnud vaja kütta pööningut 20 kW võimsusega kütteseadmetega ning ventileerida õhuvooluhulgaga 0,45 L/(m^2·s) kolm nädalat, et ennetada hallituse teket.

Magistritöö käigus leidis tõestust ka asjaolu, et hoonete mudelite koostamisel tarindite niiskuspuhverdamise ja niiskusjuhtivusega arvestamine muudab oluliselt simulatsiooni tulemusi ning antud omadustega mittearvestamine võib põhjendamatult tingida suurema ventileerimisvajaduse õhu suure veeauru sisalduse tõttu, kuid üldiselt ei ole eluhoonetes suur veeauru sisaldus õhus probleem.

SUMMARY

This master's thesis incorporates a research which focuses on studying the modelling of combined heat and moisture distribution of the entire building to evaluate moisture safety. The purpose was to analyse the reasons behind mould's growth by simulations of dormitory at Akadeemia 5a. Another purpose was to create alternative simulations to find strategies that would have prevented mould growth. The hypothetical cause of mould formation was considered to be the extra moisture that accumulated in the attic of the dormitory during the construction.

During the research, many combined heat and moisture distribution models were developed to assess and study the case to provide moisture-safe solutions. Previous measurements and collected data on the indoor and outdoor climate of the attic were helpful to evaluate and calibrate the accuracy of the models. In addition to collected data, an examination composed in 2017 of the attic's situation assisted to evaluate simulations' results. The examination noted the main moisture damages and their exact locations on the plan. Also, the examination provided an overview of the history building's construction works.

The simulations results indicated the problem that the growth of mould in the attic was caused by the extra moisture that accumulated during the construction works' period. The accumulated moisture started to dry out after the building was completed and caused high humidity in the attic. One particular simulation of the moisture safety strategy, in which the installation of mineral wool boards before the completion of the roof was ruled out, the results indicated a significantly lower moisture level. The mould growth could have been prevented if the moisture levels were low. The second moisture safety strategy proved that ventilating the attic at air flow rate 0,6 L/(m^2·s) for seven weeks during the summer period after construction works could have prevented the formation of mould on wooden surfaces. During the winter period, ventilating the attic at air flow rate 0,45 L/(m^2·s) and heating with a power of 20 kW for three weeks could have prevented the mould growth.

This research asserted that considering the moisture conductivity and moisture buffering of the building materials in energy simulation models significantly changes the results. Simulation results can lead to higher ventilation requirements due to higher water vapour content in the air when ignoring these materials' properties.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Ab, E. S. (2002) „IDA Indoor Climate and Energy 3 . 0", (January).

Adan, O. C. G. ja Samson, R. A. (2011) *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*, *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. doi: 10.3920/978-90-8686-722-6.

Arlian, L. G. *et al.* (2001) „Reducing relative humidity is a practical way to control dust mites and their allergens in homes in temperate climates", *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 107(1), lk 99–104. doi: 10.1067/mai.2001.112119.

Arumägi, E. ja Kalamees, T. (2012) „Validation of a Simulation Model for Hygrothermal Performance of Log Wall with Internal Thermal Insulation in Cold Climate", *Proceedings of 5th IBPC*. Kyoto, lk 345–352.

Arumägi, E. ja Kalamees, T. (2014) „Analysis of energy economic renovation for historic wooden apartment buildings in cold climates", *Applied Energy*, 115, lk 540–548. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.041.

Arumägi, E. ja Kalamees, T. (2016) „Design of the first net-zero energy buildings in Estonia", *Science and Technology for the Built Environment*, 22(7). doi: 10.1080/23744731.2016.1206793.

Björsell, N. *et al.* (1999) „IDA Indoor Climat and Energy", *Building Simulation*, 2, lk 1035–1042.

Bornemann, T., Brischke, C. ja Alfredsen, G. (2014) „Decay of wooden commodities - moisture risk analysis, service life prediction and performance assessment in the field", *Wood Material Science and Engineering*, 9(3), lk 144–155. doi: 10.1080/17480272.2014.904431.

Delgado, J. M. P. Q. *et al.* (2010) „A critical review of hygrothermal models used in porous building materials", *Journal of Porous Media*, 13(3), lk 221–234. doi: 10.1615/JPorMedia.v13.i3.30.

Delgado, J. M. P. Q. *et al.* (2013) *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*, *Springer*. doi: 10.1007/978-3-642-35003-0.

Dinwoodie, J. M. (2004) *Timber:Its Nature and Behavior*.

Ferroukhi, M. Y. *et al.* (2016) „Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: A dynamic co-simulation approach", *Building Simulation*, 9(5), lk 501–512. doi: 10.1007/s12273-016-0292-5.

Häupl, P. *et al.* (2017) *Lehrbuch der Bauphysik, Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima*.

Hens, H. (2012) *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*, *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. doi: 10.1002/9783433601297.

Hukka, A. ja Viitanen, H. A. (1999) „A mathematical model of mould growth on wooden material", *Wood Science and Technology*, 33(6), lk 475–485. doi: 10.1007/s002260050131.

Ilomets, S., Kalamees, T. ja Vinha, J. (2018) „Indoor hygrothermal loads for the deterministic and stochastic design of the building envelope for dwellings in cold climates", *Journal of Building Physics*, 41(6), lk 547–577. doi: 10.1177/1744259117718442.

Johansson, P., Bok, G. ja Ekstrand-Tobin, A. (2013) „The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth onwood compared to steady state conditions", *Building and Environment*, 65, lk 178–184. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.04.004.

Johansson, P., Svensson, T. ja Ekstrand-Tobin, A. (2013) „Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials", *Building and Environment*, 62, lk 201–209. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.01.012.

Kalamees, T. (2007) *Hygrothermal Criteria for Design and Simulation of Buildings*. Available at: papers2://publication/uuid/73CF97F5-CF30-4C9C-806C-4CCCE36A4D20.

Kalamees, T. *et al.* (2017) *Akadeemia tee 5a ühiselamu pööningu niiskus- ning hallituskahjustuste ulatus ning likvideerimisega seotud tegevused*.

Kalamees, T. ja Kurnitski, J. (2010) „Moisture Convection Performance of External Walls and Roofs", *Journal of Building Physics*, lk 225–247. doi: 10.1177/1744259109343502.

Kalamees, T. ja Vinha, J. (2004) „Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations", *Journal of Building Physics*, 27(3), lk 199–220. doi: 10.1177/1097196304038839.

Kalbe, K., Kukk, V. ja Kalamees, T. (2020) „Identification and improvement of critical joints in CLT construction without weather protection", *E3S Web of Conferences*, 172, lk 1–8. doi: 10.1051/e3sconf/202017210002.

Kallavus, U. (2021) *Analüüsi protokoll Nr. 20210310/UK*.

Kukk, V., Kers, J. ja Kalamees, T. (2020) „Field measurements and simulation of an massive wood panel envelope with ETICS", *Wood Material Science & Engineering*, lk 1–8. doi: 10.1080/17480272.2020.1712738.

Kurnitski, J. (2001) „Ground moisture evaporation in crawl spaces", *Building and Environment*, 36(3), lk 359–373. doi: 10.1016/S0360-1323(00)00013-5.

Kurnitski, J. ja Vuolle, M. (2000) „Simultaneous Calculation of Heat , Moisture , and Air Transport in an Modular Simulation Environment", *Estonian Academy Publishers*, lk 25–47.

Kuusk, K., Kalamees, T. ja Maivel, M. (2014) „Cost effectiveness of energy performance improvements in Estonian brick apartment buildings", *Energy and Buildings*, 77, lk 313–322. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.026.

Langmans, J., Klein, R. ja Roels, S. (2013) „Numerical and experimental investigation of the hygrothermal response of timber frame walls with an exterior air barrier", *Journal of Building Physics*, 36(4), lk 375–397. doi: 10.1177/1744259112473934.

Mjörnell, K. ja Olsson, L. (2019) „Moisture Safety of Wooden Buildings – Design, Construction and Operation", *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 24(1), lk 29–35. doi: 10.5755/j01.sace.24.1.23230.

Moon, H. J., Ryu, S. H. ja Kim, J. T. (2014) „The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings", *Energy and Buildings*, 75, lk 439–446. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.02.039.

Mukhopadhyaya, P. ja Kumaran, M. K. (2007) *Heat-Air-Moisture Transport: Measurement on Building Materials*.

Napp, M. ja Kalamees, T. (2015) „Energy use and indoor climate of conservation heating, dehumidification and adaptive ventilation for the climate control of a mediaeval church in a cold climate", *Energy and Buildings*, 108(June 2020), lk 61–71. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.013.

Olsson, L. (2020) „Moisture safety in CLT construction without weather protection - Case studies, literature review and interviews", *E3S Web of Conferences*, 172, lk 1–8. doi: 10.1051/e3sconf/202017210001.

Othman, N. L. *et al.* (2015) „A Case Study on Moisture Problems and Building Defects", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 170, lk 27–36. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.01.011.

Peuhkuri, R. (2003) *Moisture dynamics in building envelopes. PhD. Thesis. Report R-071. Denmark : Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark,*.

Pihelo, P., Lelumees, M. ja Kalamees, T. (2016) „Potential of Moisture Dry-out from Concrete Wall in Estonian Climate", *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering. 22-24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark*. Lyngby, Denmark, 21-24 August, lk 289–298.

Rode, C. ja Grau, K. (2003) „Whole building hygrothermal simulation model", *ASHRAE Transactions*, 109 PART 1(November), lk 572–582.

Rode, C., Hens, H. ja Janssen, H. (2008) *Moisture Response Closing seminar Nordic*

Building Physics Conference.

Sirkel & Mall (2016) „Akadeemia tee 5a rekonstrueerimine".

Tariku, F. *et al.* (2002) „Summary Report from Task 3 of MEWS Project at the Institute for Research in Construction – Hygrothermal Properties of Several Building Materials", *National Research Council of Canada*, (March 2002), lk 71. doi: 10.4224/20386076.

Tariku, F., Kumaran, K. ja Fazio, P. (2011) „Determination of indoor humidity profile using a whole-building hygrothermal model", *Building Simulation*, 4(1), lk 61–78. doi: 10.1007/s12273-011-0031-x.

Vereecken, E. ja Roels, S. (2012) „Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation", *Building and Environment*, 51, lk 296–310. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.11.003.

Viitanen, H. A. (2017) *Suomalainen homemalli*, *Tampere Ülikool*. Available at: https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/.

Wolkoff, P. (2018) „Indoor air humidity, air quality, and health – An overview", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), lk 376–390. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.015.

Woloszyn, M. ja Rode, C. (2007) „IEA Annex 41 , MOIST-ENG Modelling Principles and Common Exercises -Final Report", *IEA ECBCS Annex 41 Subtask 1 report*, (July), lk 1–161.

Woloszyn, M. ja Rode, C. (2008) „Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings", *Building Simulation*, 1, lk 5–24. doi: 10.1007/s12273-008-8106-z.

Zhang, M. *et al.* (2017) „Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption", *Applied Thermal Engineering*, 124, lk 337–345. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.05.173.