



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
EHITUSTEADUSKOND

---

EHITISTE PROJEKTEERIMISE INSTITUUT

EHITUSFÜÜSIKA JA ENERGIATÕHUSUSE ÕPPETOOL

**MADAL- JA LIGINULLENERGIAHOONE PUIKSÕRESTIKSEINA  
NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS**

HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF WOOD-FRAME EXTERIOR WALL OF LOW- AND  
NEALY ZERO ENERGY BUILDING

**EEA 60 LT**

Üliõpilane: Peep Pihelo

Juhendaja: Prof. Targo Kalamees

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Tallinn 2015

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

\_\_\_\_\_ (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 083268 EAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

\_\_\_\_\_ (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud \_\_\_\_\_ (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees \_\_\_\_\_ (allkiri)

## 1. SISUKORD

1. SISUKORD.....	3
2. ÜHIKUD JA TÄHISTUSED .....	5
3. MÕISTED .....	7
4. SISSEJUHATUS .....	15
5. EESMÄRK .....	24
6. TEOREETILINE TAUST.....	25
6.1. Soojuslevi .....	25
6.2. Niiskuslevi.....	28
7. METOODIKA .....	36
7.1. Arvutustarkvara kirjeldus.....	36
7.2. Materjalide omadused.....	39
7.3. Arvutusmodeli kalibreerimine.....	41
7.3.1. Sein tüüp 1a .....	41
7.3.2. Sein tüüp 3a .....	43
7.3.3. Sein tüüp 5a .....	45
7.4. Arvutusmeetodid .....	47
7.5. Kliima, algtingimused, ääritingimused.....	53
7.5.1. Väliskliima .....	53
7.5.2. Sisekliima .....	54
7.5.3. Algtingimused.....	55
7.5.4. Ääritingimused.....	56
7.6. Analüüsitud madal- ja liginullenergiatarindid .....	56
7.6.1. Niiskustehniliste arvutuste baastarind .....	59
7.6.2. Analüüsitud puitsõrestikseinad hallitusindeksi arvutamiseks .....	60
7.6.3. Analüüsitud puitsõrestikseinad kondensaadi tekke arvutamiseks.....	61
7.6.4. Analüüsitud puitsõrestikseinad niiskuse väljakuivamise arvutamiseks .....	62
8. UURIMISTÖÖ TULEMUSED .....	63
8.1. Hallitusindeksi arvutustulemused .....	63
8.1.1. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt baastarindist .....	64
8.1.2. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt sein soojuslähivusest.....	69
8.1.3. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt tuuletõkkekihist .....	71
8.1.4. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt tuuletõkke lisasoojustuse paksusest ..	73

8.1.5.	Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt õhu- ja aurutõkkekihist .....	76
8.2.	Kondensaadi teke ja selle ajaline kestus .....	78
8.3.	Niiskuse väljakuivamise arvutustulemused .....	80
8.3.1.	Mineraalvilla ja tselluvilla võrdlus .....	80
8.3.2.	Märgpaigaldatud tselluvillaga soojustatud seinad .....	85
9.	TULEMUSTE ANALÜÜS JA HINDAMINE.....	90
9.1.	Hallitusindeksi arvutustulemuste analüüs .....	90
9.1.1.	Hallitusindeksi muutus võrreldes baastarindiga .....	90
9.1.2.	Seina soojusläbivuse mõju .....	91
9.1.3.	Tuuletõkke ja selle lisasoojustuskihi mõju.....	92
9.1.4.	Õhu- ja aurutõkkekihi mõju.....	95
9.2.	Kondensaadi tekke ja selle ajalise kestuse analüüs .....	96
9.3.	Niiskuse väljakuivamise arvutustulemuste analüüs.....	98
9.4.	Mineraalvilla ja tselluvilla olulisimad niiskustehnilised erinevused.....	100
10.	JÄRELDUSED .....	103
11.	KOKKUVÕTE .....	105
12.	ETTEPANEKUD EDASISEKS UURIMISTÖÖKS.....	107
13.	ABSTRACT.....	108
13.1.	Introduction .....	108
13.2.	Methods .....	110
13.3.	Results .....	114
13.4.	Discussion.....	119
13.5.	Conclusions.....	123
14.	VIIDATUD ALLIKAD.....	127

## 2. ÜHIKUD JA TÄHISTUSED

$A$	Pindala	$m^2$
$A_w$	Kapillaarne niiskusimavus	$kg/(m^2 \cdot s^{1/2})$
$c$	Materjali erisoojus	$J/(kg \cdot K)$
$c_a$	Õhu erisoojus	1005 $J/(kg \cdot K)$
$c_w$	Vee erisoojus	4187 $J/(kg \cdot K)$
$d$	Materjalikihi paksus	$m$
$D_w$	Veeauru difusioon	$m^2/s$
$\delta_a$	Õhu veeauru erijuhtivus	$m^2/s$
$\delta_p$	Veeauru erijuhtivus, potentsiaaliks veeauru osarõhk $p_v$	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$
$\delta_v$	Veeauru erijuhtivus, potentsiaaliks veeauru sisaldus $v$	$m^2/s$
ETA	Energiaühikusarv	$kWh/(m^2 \cdot a)$
$g$	Niiskusvoog, niiskusvoolu tihedus	$kg/(m^2 \cdot s)$
$g_l$	Vedeliku niiskusvoog, niiskusvoolu tihedus	$kg/(m^2 \cdot s)$
$g_v$	Veeauru niiskusvoog, niiskusvoolu tihedus	$kg/(m^2 \cdot s)$
<i>grad</i>	Gradient, suuruse muutusaste, muutumise määr pikkusühiku kohta	-
HAM	Analüüsitudel: soojus, õhk, niiskus (ingl.k. <i>heat, air, moisture</i> )	-
$K_l$	Materjali veejuhtivus	$s$
$\lambda$	Soojuserijuhtivus	$W/(m \cdot K)$
$m$	Mass	$kg$
$M$	Hallitusindeks (ingl.k. <i>mould index</i> )	-
$M_{max}$	Suurim võimalik hallitusindeksi väärtus	-
$M_w$	Vee molaarmass	18,015 $kg/kmol$
MRY	Niiskustehniliste arvutuste baasaasta (ingl.k. <i>moisture reference year</i> )	-
$\mu$	Difusioonitakistustegur	-
$\mu$	Gaasi moolimass	$kg$
$\eta_w$	Vedeliku dünaamiline viskoossus	$N \cdot s/m^2$
nZEB	Liginullenergiahoone (ingl.k. <i>nearly zero energy building</i> )	-
$P_l$	Poorivee rõhk	$Pa$
$P_n$	Normaalrõhk	101325 $Pa$
$p_{sat}$	Veeauru küllastusrõhk	$Pa$
$p_v$	Veeauru osarõhk	$Pa$
$\psi$	Materjali poorsus	$m^3/m^3$
$Q$	Soojushulk	$J$

$R$	Universaalne gaasikonstant	8314,41 J/(kmol·K)
$R$	Materjali soojustakistus	$m^2 \cdot K/W$
$RH$	Suhteline niiskus	%
$RH_{min}$	Hallituse tekkeks vajalik minimaalne suhteline õhuniiskus	%
$RH_{crit}$	Kriitiline suhteline niiskus	%
$R_{se}$	Tarindi välispinna soojustakistus	$m^2 \cdot K/W$
$R_{si}$	Tarindi sisepinna soojustakistus	$m^2 \cdot K/W$
$R_T$	Tarindi summaarne soojustakistus	$m^2 \cdot K/W$
$\rho$	Materjali tihedus	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	Õhu tihedus	1,2 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Vee tihedus	1000 kg/m <sup>3</sup>
$S_d$	Suhteline difusioonitakistus	m
$Z_v$	Kindla paksusega toote veeaurutakistus, veeaurusisalduse alusel	s/m
$Z_p$	Kindla paksusega toote veeaurutakistus, veeauru osarõhu alusel	$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$
$T$	Temperatuur	K
$t, \theta$	Temperatuur	$T - 273,15; \text{ } ^\circ\text{C}$
TRY	Energiaarvutuste baasaasta (ingl.k. <i>test reference year</i> )	-
$U$	Soojusläbivus (soojusjuhtivus)	$W/(m^2 \cdot K)$
$\Delta U$	Tarindi soojusläbivuse parandustegur	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_c$	Tarindi korrigeeritud soojusläbivus	$U + \Delta U; W/(m^2 \cdot K)$
$u$	Materjali niiskussisaldus, massi alusel	kg/kg
$V$	Ruumala	m <sup>3</sup>
$v$	Veeauru sisaldus õhus	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta v$	Niiskuslisa, veeauru sisalduse erinevus sise- ja välisõhus	kg/m <sup>3</sup>
$v_{sat}$	Veeauru küllastussisaldus õhus	kg/m <sup>3</sup>
$w$	Materjali niiskussisaldus, mahu alusel	kg/m <sup>3</sup>
$W_v$	Kindla paksusega toote veeaurujuhtivus, veeaurusisalduse alusel	m/s
$W_p$	Kindla paksusega toote veeaurujuhtivus, veeauru osarõhu alusel	$kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$

### 3. MÕISTED

**Absoluutne niiskus** (*water vapour content*) – ühes kilogrammis gaasis (õhus) leiduva veeauru mass grammides [g/kg]. Maksimalne võimalik absoluutne niiskus sõltub gaasi temperatuurist: mida külmem on gaas, seda vähem mahutab see veeauru ja vastupidi

**Arvutuslik soojuserijuhtivus** (*design value of thermal conductivity*) – ehitusmaterjali soojuserijuhtivus teatud kindlates keskkonnatingimustes, mida võib lugeda tarindisse kuuluva materjali või toote toimivusele tüüpiliseks; ehitusmaterjalil või -tootel võib olla rohkem kui üks soojuserijuhtivuse arvutussuurus, sõltuvalt erinevatest kasutus- ja keskkonnatingimustest;  $\lambda_U$  [W/(m·K)]

**Aurutõke** (*vapour barrier, vapour retarder*) – materjalikihi ja selle liitekohtade süsteem piirdetarindis, mille ülesanne on takistada liigset veeauru difusiooni tarindisse. Aurutõke tuleb paigaldada piirde sellele poolele, kus on suurem veeauru osarõhk (suurem veeauru sisaldus õhus). Eesti kliimas on aurutõkke sobivaks kohaks köetava ruumi sisepinna lähedale enne soojustust või 20 ... 50 mm soojustuse sisse. Aurutõkke liitekohad, vuugid ja läbiviikude kohad tuleb hoolikalt tihendada, et oleks tagatud vajalik aurutakistus. Kasutades aurutõkkematerjali õhutõkkena (ühtne auru- ja õhutõke), peavad selle paigaldus ja liitelahendused tagama lisaks aurutihendusele ka õhupidavuse

**Deklareeritav soojuserijuhtivus** (*declared value of thermal conductivity*) – ehitusmaterjali soojuserijuhtivus soojuse ja niiskuse referentstingimustel, mille deklareerib tootja vastavalt soojuserijuhtivuse mõõtetulemustele, antakse kindlaksmääratud kvantiili ja usaldusnivoo kohta ning vastab normaaltingimustes põhjendatud oodatavale kasutuseale. Mõõdetakse vastavalt standardile EVS EN ISO 10456 või vastavalt asjaomasele tootestandardile. Tootja vastutab soojuserijuhtivuse deklareeritava väärtuse määramise eest ning peab tõendama oma toote vastavust deklareeritavatele väärtustele;  $\lambda_D, \lambda_{declared}$  [W/(m·K)]

**Difusioon** (*diffusion*) – füüsikaline nähtus, mille mõjul erinevad gaasid või gaasi erinevad kontsentratsioonid moodustavad homogeense gaasisegu. Difusiooni teel liigub gaas kõrgemast kontsentratsioonist madalamale (suurema osarõhu poolt madalamale)

**Difusioonitakistustegur** (*water vapour resistance coefficient*) – näitab, mitu korda on antud materjali difusioonitakistus suurem kui sama paksusega seisval õhukihil. Mida suurem on difusioonitakistustegur, seda tugevamate aurutõkkeomadustega on antud

materjal. Difusioonitakistusteguriga ei saa hinnata läbi materjalikihi difundeeruva veeauru hulka – selle arvutamiseks tuleb arvestada ka kihi paksusega;  $\mu$  [-]

**Energiatõhususarv** (*energy performance value*) – arvutuslik summaarne tarnitud energiatega kaalutud erikasutus hoone standardkasutusel, millest arvatakse maha summaarne eksporditud energiatega kaalutud erikasutus; ETA [kWh/(m<sup>2</sup>·a)]

**Gaasi (õhu) veeaurusisaldus** (*water vapour content*) – ühes kuupmeetris gaasis (õhus) leiduva veeauru mass grammides;  $v$  [g/m<sup>3</sup>], vt. ka niiskus mahu järgi

**Hallitus** (*mould*) – kasvav mikroseeente koloonia mingil seene elutegevuseks vajalikke orgaanilisi aineid sisaldaval alusmaterjalil (substraadil). Hallitusseened kasvavad nii materjalide pinnal kui ka sees ning neil on tähtis roll looduse ringkäigus puidu lõplikul lagundamisel huumuseks

**Hallitusindeks** (*mould index*) – kirjeldab hallituse kasvu intensiivsust materjali pinnal. Mida kõrgem on hallitusindeksi väärtus, seda rohkem on materjali pinnal hallitust;  $M$  [-]

**Hoone sisekliima tagamine** (*indoor climate control*) – ruumide kütmine, jahutamine, ventileerimine valgustamine, tagades ruumide siseõhu kvaliteedi, soojusliku mugavuse, valgustuse ja akustika nõuetele vastavuse

**Hügrooskoopsus** (*hygroscopicity*) – ka niiskusimavus; materjali omadus imeda endasse niiskust otse õhust. Hügrooskoopsete materjalide niiskussisaldus kõigub vastavalt keskkonna muutustele, kui aga materjali ümbritsevas keskkonnas kaua aega muutusi ei toimu, saavutab materjal tasakaaluniiskuse

**Hüsterees** (*hysteresis*) – süsteemi või keha omadus, mis aeglustab süsteemi muutumist või takistab selle ennistumist esialgsesse olekusse. Sel juhul ei sõltu süsteemi väljundsuurus (keha olek) mitte ainult sisendsuurusest, vaid ka selle eelnenud olekust.

**Infiltratsioon** (*infiltration*) – õhu tiheduse erinevustest, tuulerõhkudest või ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevusest põhjustatud õhuvool läbi välispiirete õhulekkekohtade

**Kapillaarne vee liikumine** (*capillary water movement*) – materjali poorides toimuv kapillaari pinna märgumine, poorides esineva kapillaarjõu ja vee pindpinevuse toimetel. Mida väiksemad on poorid, seda kõrgemale vesi tõuseb või langeb. Poorses materjalis sõltuvad kapillaarse liikumise kiirus, ulatus ja vee liikumise hulk eelkõige materjalide



poorsusest ja pooride suuruse jaotusest. Kapillaarne vee liikumine võib toimuda nii vertikaal- kui horisontaalsuunas

**Kondenseerumine** (*condensation*) – veeauru veeldumine ehk üleminek gaasilisest olekust vedelasse. Kondenseerumine tekib juhul, kui õhk jahtub allapoole kastepunkti. Õhul on võime teatud temperatuuril siduda ainult teatud maksimaalne kogus niiskust. Kondenseerumine toimub materjali pinnal või selle sees, kui suhteline niiskus on 100% ja temperatuur on kastepunktist madalam

**Konvektsioon** (*convection*) – aine (s.h. gaasi või vedeliku) liikumisega kaasnev massi levik

**Kriitiline niiskus** (*critical humidity*) – materjali suhteline niiskus, mille ületamine võib põhjustada niiskuskahjustusi, sh. pinnaseisundi halvenemist, mikroobset kasvu või materjali lagunemist. Kriitiline niiskus sõltub materjalist ja selle määramisel lähtutakse tootja andmetest. Tootja andmete puudumisel võib kriitilise niiskuse piirväärtusena kasutada suhtelist niiskust 75% ja sellele vastavat materjali niiskussisaldust massi- või mahuprotsentides

**Kuluoptimaalse energiatõhususega hoone** (*cost-optimal energy efficiency building*) – hoone, mille energiatõhususarvu piirväärtus tagab minimaalsed elutsükli kogukulud, mis moodustuvad ehitusmaksumusest ning iga-aastastest energia-, hooldus- ja käituskuludest (arvestuslikult elamutele 30 aasta ja mitteelamutele 20 aasta elutsükli) nüüdisväärtuse investeerimisarvutusena

**Küllastustemperatuur** (*saturation temperature, dew point temperature*) – ka kastepunkt; temperatuur, mille juures õhus olev veeaur küllastub ja kondenseerub veeks või jääks;  $t_{sat}$  [°C]

**Külmasild** (*thermal bridge*) – ka soojasild; piirkond (punkt, joon, pind) hoone piirdes, mille soojusläbivus on lokaalselt suurem külgnevate alade vastavast soojusläbivusest. Materjalist põhjustatud külmasildade puhul toimub suurem soojuse kadu läbi materjali selle suurema soojuserijuhtivuse tõttu, võrreldes külgneva materjaliga

**Liginullenergiahoone** (*nearly zero energy building, nZEB*) – parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhusus- ja taastuvenergiatehnoloogiate lahendustega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille energiatõhususarv on suurem kui 0 kWh/(m<sup>2</sup>·a),

kuid mitte suurem kui Vabariigi Valitsuse määruses nr. 68 (30.08.2012) „Energiatõhususe miinimumnõuded“ sätestatud piirväärtus

**Madalenergiahoone** (*low energy building*) – parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhusus- ja taastuvenergiatehnoloogiate lahendustega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille puhul ei eeldata lokaalset elektri tootmist taastuvenergiaallikast

**Mineraalvill** (*mineral wool*) – soojustus- ja isolatsioonimaterjal (näit. kivivill, klaasvill), mis on valmistatud mineraalsest toorainest (vulkaanilised kivimid basalt või gabro, dolomiit, kvarts, lubjakivi jm) mis moodustavad kuni 98% selle kaalust, ülejäänud osa on vetthülgavad lisandid ja vaiksiedained (MW)

**Netonullenergiahoone** (*net zero energy building, ZEB*) – hoone, mille energiatõhususarv on 0 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Netonull-energiahoonesse võidakse hankida tarnitud energiat, kui see kompenseeritakse eksporditud energiaga

**Niiskus** (*moisture*) – vesi gaasilises, vedelas või tahkes olekus

**Niiskuse konvektsioon** (*moisture convection*) – niiskuse ülekandumine koos gaasi või vedelikuvooluga. Õhu- või niiskusvool kannab niiskust kaasas ja siirdab seda ühest punktist teise

**Niiskuslevi** (*moisture transfer*) – temperatuuride ja rõhu erinevusest tingitud niiskuse ülekanne ühelt kehalt või kehaosalt teisele. Toimub peamiselt difusiooni, konvektsiooni ja kapillaarsel teel

**Niiskusimavus** (*moisture absorption*) – vt. *hügroskoopsus*

**Niiskusjuhtivus** (*moisture conductivity*) – materjali omadus, mis kirjeldab niiskuse ülekannet vedelikulises faasis;  $\lambda_m$  [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)]

**Niiskuslisa** (*internal moisture excess*) – niiskuskoormust iseloomustav suurus; sise- ja välisõhu veeaurusisalduste või veeauru osarõhkude erinevus; sõltub niiskustootlusest, õhuvahetuskordsusest ruumis ning ruumi mahust;  $\Delta v$  [kg/m<sup>3</sup>]

**Niiskus mahu järgi** (*humidity by volume*) – veeauru mass jagatud gaasisegu massiga;  $v$  [kg/m<sup>3</sup>], vt. ka gaasi (õhu) veeaurusisaldus

**Niiskus massi järgi** (*humidity by mass*) – veeauru mass jagatud kuiva õhu massiga;  $x$  [kg/kg]

**Niiskussisadus** (*moisture content*) – iseloomustab niiskuse hulka materjali kogumahust või –kaalust. Niiskus võib materjali poorides esineda kolmes olekus (vesi, veeaur, jää). Materjali niiskussisaldus sõltub peamiselt ümbritseva õhu suhtelisest niiskusest ja temperatuurist ning materjali omadustest

**Niiskussisalduse maht mahu järgi** (*moisture content volume by volume*) – mahuline niiskussisaldus, aurustuva vee maht jagatud materjali mahuga;  $\psi$  [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

**Niiskussisalduse mass mahu järgi** (*moisture content mass by volume*) – aurustuva vee mass jagatud materjali mahuga;  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

**Niiskussisalduse mass massi järgi** (*moisture content mass by mass*) – aurustuva vee mass jagatud materjali massiga;  $u$  [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]

**Niiskusvoog** (*density of moisture flow rate*) – ka niiskusvoolu tihedus, niiskusvool vaadeldava pinna pindalaühiku kohta;  $g$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]

**Niiskusvool** (*moisture flow rate*) – niiskuse hulk, mis kandub ajaühikus läbi vaadeldava pinna. Erinevate niiskuse leviku komponentide koosmõju saame, kui niiskusvool jagada veeauru niiskusvooluks, vee niiskusvooluks ja konvektiivseks niiskusvooluks;  $G$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ]

**Paisutatud vahtpolüstüreen** (*expanded polystyrene*) – paisutatava polüstüreeni või ühest selle ühendi kaaspolümeeri graanulitest valmistatav, valdavalt õhuga täidetud kinnise (suletud) poorstruktuuriga jäik soojustusmaterjal (EPS)

**Piirdetarind** (*building envelope*) – ehitise põhiosa või piire, nagu sein, põrand, vahelagi, uks, aken, katus, mis eraldab ruumi teisest ruumist, välisõhust või pinnasest. Piirdetarindi välispind on välisõhupoolne pind, piirdetarindi sisepind on ruumidepoolne pind, näit. välisseina sisepind

**Piirdetarindi kogusoojustakistus** (*total thermal resistance*) – piirdetarindi üksikute kihtide arvutuslike soojustakistuste ning sise- ja välispindade soojustakistuste summa;  $R_T$  [ $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ]

**Poorsus** (*porosity*) – aine mahutavuse omadus, mille põhjuseks on väikeste, sageli silmaga mittenähtavate tühimike (õõnsuste) olemasolu aines. Poorsust iseloomustatakse pooride mahu ja aine kogumahu suhtena protsentides;  $\psi$  [-]

**Pressitud vahtpolüstüreen** (*extruded polystyrene*) – kinnise poorstruktuuriga polüstüreenist või ühest selle ühendpolümeerist paisutamise ja pressimisega valmistatud soojustusmaterjal (XPS)

**Sisekliima** (*indoor climate*) – füüsikaliste, keemiliste, mikrobioloogiliste jm tegurite kompleksne kogum. Sisekliimat mõjutavad enim hoone piirded, ventilatsioon, kütte ning jahutus. Sisekliima mõjutab oluliselt ruumides viibivate inimeste tervist, töövõimet ja enesetunnet

**Soojus** (*heat; quantity of heat*) – soojushulk, mis iseloomustab soojusvahetuse teel ülekantud energiahulka. Soojushulk loetakse kokkuleppeliselt positiivseks siis, kui energia suundub süsteemi sisse;  $Q$  [J; W·s]

**Soojuserijuhtivus** (*thermal conductivity*) – materjali omadus, mis väljendab soojusvoolu vattides, mis läbib 1 meetri paksuse ja 1 m<sup>2</sup> pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindade vahel on 1 K;  $\lambda$  [W/(m·K)]

**Soojuslevi** (*heat transfer*) – ka soojusülekanne, temperatuuride erinevusest tingitud soojuse ülekanne ühelt kehalt või kehaosalt teisele. Toimub peamiselt kolmel viisil: soojusjuhtivus, -konvektsioon, -kiirgus

**Soojusläbivus** (*thermal transmittance*) – tarindiomadusena kasutusel ka soojusjuhtivus, on tarindi omadus, mis väljendab summaarset soojusvoolu (soojusjuhtivus + konvektsioon + kiirgus) vattides läbi 1 m<sup>2</sup> pinnaga tarindi, kui temperatuuride vahe erinevate keskkondade vahel on 1 K;  $U$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]

**Soojustakistus** (*thermal resistance*) – kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada soojusvoogu läbi toote või elemendi, pinnalt pinnale, statsionaarsetes tingimustes;  $R$  [m<sup>2</sup>·K/W]

**Soojustus** (*thermal insulation; insulation material*) – materjal, mis on mõeldud soojuslevi vähendamiseks ning mille soojuslikud omadused tulenevad materjali keemilisest ja/või füüsikalistest omadustest

**Soojusvoog** (*heat flux*) – ka soojusvoolu tihedus, on soojusvool vaadeldava pinna pindalaühiku kohta;  $q$  [W/m<sup>2</sup>]

**Sorptsiooni kõver** (*sorption curve*) – ka hügrokoopse sorptsiooni kõver, poorse materjali niiskussisalduse ja ümbritseva õhu suhtelise niiskuse vaheline seos tasakaaluolekus

**Suhteline difusioonitakistus** (*water vapour diffusion-equivalent air layer thickness*) – veeauru difusioonitakistusega võrdne õhukihi paksus; liikumatu õhukihi paksus, millel on sama veeaurutakistus kui kõnealusel materjalikihil;  $S_d$ [m]

**Suhteline niiskus** (*relative humidity*) – õhu veeauru osarõhu suhe veeauru küllastusrõhuse samal temperatuuril; õhus oleva veeauru koguse ja õhus samadel tingimustel maksimaalselt sisalduda võiva veeauru koguse suhe;  $\varphi, \Phi$  [-];  $RH$  [%]

**Tasakaaluniiskus** (*equilibrium moisture content*) – materjalis seotud niiskuse hulk; tasakaaluseis, mille materjal teatud aja jooksul saavutab teatud konkreetsetes keskkonna- ja kliimatingimustes (õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus)

**Temperatuur** (*temperature*) – soojusnähtuste põhisuurus. Temperatuur iseloomustab mingi keha soojusenergia taset. Mida intensiivsem on aineosakeste (molekulide) korrapäratu soojuslik liikumine, seda kõrgem on aine temperatuur;  $t, \theta$  [°C];  $T$  [K]

**Tselluvill** (*cellulose wool*) – soojustus- ja isolatsioonimaterjal, mille tooraineks on peenestatud makulatuur või jahvatatud puitkiud, mis moodustab soojustuse massist 80 ... 90%. Tule- ja hallituskindluse saavutamiseks lisatakse sellesse booraksit või boorhapet kuni 20% soojustuse massist ehk 0,5 ... 1,0% soojustuse mahust (CW)

**Tuuletõke** (*wind barrier*) – materjalikihi ja selle liitekohtade süsteem piirdetarindis, mille ülesanne on takistada tuulest ja temperatuuride erinevusest tingitud välisõhu liikumist soojustusse ja tagasi. Niiskustehnilise toimivuse poolest on parim madala soojuserijuhtivuse ja veeaurutakistusega tuuletõkkematerjal. Tuuletõkke õhujuhtivuse piirväärtus on  $K_a < 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

**Valideeritud tarkvara** (*validated software*) – sisekliima ja energiaarvutuse tarkvara, mille valideerimiseks on teostatud võrdlusarvutus vastava standardi või metodika järgi. Valideerimiseks arvestatakse vastavaid Euroopa (EVS-EN), ISO, ASHRAE ja CIBSE standardeid ning IEA BESTEST metodikat või nendega samaväärseid muude riikide standardeid

**Veeaur** (*water vapour*) – vesi gaasilises olekus. Vesi aurab nii tahkes kui ka vedelas olekus sõltumata temperatuurist, millest sõltub vaid vee auramise intensiivsus. Kindlal

temperatuuril ja rõhul on ühes mahuühikus alati teatud hulk veeaurumolekule. Mida kõrgem on õhutemperatuur, seda rohkem sisaldab õhk veeauru

**Veeauru difusioon** (*water vapour diffusion*) – veeauru molekulide liikumine gaasisegus konstantse üldrõhu korral ühtlustamaks veeauru sisaldust õhus või veeauru osarõhku või veeauru liikumine läbi tahke ehitusaine. Vt. ka *difusioon*

**Veeaurujuhtivus** (*water vapour permeance*) – ka veeauruläbilaskvus, niiskusjuhtivus; materjali omadus, mis näitab, kui palju materjal vett (veeauru) endast läbi laseb. Veeaurujuhtivus sõltub materjali poorsusest ja pooride kujust;  $W_v$  (mahu järgi) [m/s],  $W_p$  (veeauru osarõhu järgi) [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)]

**Veeauru konvektsioon** (*water vapour convection*) – veeauru levimine gaasisegus, mis on tingitud gaasisegu liikumisest üldrõhu erinevuse tõttu ning veeaur liigub koos õhuga. Vt. ka *konvektsioon*

**Veeauru osarõhk** (*partial water vapour pressure*) – veeauru osarõhk gaasisegus, mis on proportsionaalne veemolekulide hulgaga antud gaasisegus;  $p_v$  [Pa]

**Veeaurutakistus** (*water vapour resistance*) – kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada niiskusvoogu läbi toote või element;  $Z_v$  (mahu järgi) [s/m],  $Z_p$  (veeauru osarõhu järgi) [m<sup>2</sup>·s·Pa/kg]

**Veeimavus** (*water absorption*) – materjali võime otseses kokkupuutes veega imeda enda pooridesse vett. Veeimavust saab väljendada kaalu või mahu järgi, mõlemal juhul on tegemist protsentuaalse tulemusega

**Õhutõke** (*air barrier*) – materjalikiht hoone piirdetarindis, mille peamine ülesanne on takistada õhu liikumist läbi piirdetarindi ja on tähtsaim materjalikiht piirde õhupidavuse tagamisel. Õhutõke võib olla lahendatud eraldi materjalikihiga või olla sama näiteks aurutõkkekihiga, soojustuskihiga, tuuletõkkega või kandetarindiga. Õhupidavuse tagab õhutõkke piisav õhupidavus ja tema liitekohtade tihedus. Õhutõkke vuugid ja läbiviikude kohad tuleb hoolikalt sulgeda selliselt, et oleks tagatud vajalik õhupidavus. Eelistatuim asukoht õhutõkkele on piirde sisepinnas, sisepinna lähedal enne soojustust või 20 ... 50 mm soojustuse sees. Piirde ruumipoolses osas takistab õhutõke kõige paremini niiske siseõhu konvektsiooni piirdesse. Õhutõkke õhujuhtivuse soovituslik piirväärtus on  $K_a < 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

#### 4. SISSEJUHATUS

Käesolev uurimistöö keskendub madal- ja liginullenergiahoone välispiirete niiskustehnilise toimivuse analüüsile puitsõrestikseina näitel. Uurimisalusteks teemadeks on suhtelise niiskuse, temperatuuri ja veeaurusisalduse muutus tarindites mittestatsionaarsetes tingimustes erinevate algtingimuste ja materjalide valiku korral. Nende näitajate põhjal hinnatakse niiskustehnilist seisundit tarindis, otsitakse kriitilisi piirväärtusi ja antakse hinnang vaadeldavate tarindite niiskustehnilisele turvalisusele.

Püstitatud eesmärkide saavutamisel leiavad käesolevas töös kasutust nii teaduskirjanduse analüüs kui soojus- ja niiskustehnilise arvutusmodeli kalibreerimine laborimõõtmistel ning praktilised arvutused soojus- ja niiskustehnilise arvutustarkvara abil. Töös kasutatud andmed pärinevad nii teadusajakirjade artiklitest, teaduskonverentside ettekannetest, käsiraamatutest, standarditest kui uurimistööde aruannetest. Laboriandmete ja tarindite uurimiseks on kasutatud modelleerimis- ja arvutustarkvara, mille abil on arvatud ja seejärel hinnatud materjalide ja tarindite parameetreid erinevate keskkonna- ja ääretingimuste korral.

Madal- ja liginullenergiahoone piirdetarindite kavandamine vajab hoolikat projekteerimist ning koos energiatõhususe põhimõtete järgmisega tuleb lahendada ka piirdetarindite niiskustehniline turvalisus ja tagada sobiv sisekliima. Soojus- ja niiskustehnilise projekteerimise eesmärgid võib jagada kolme põhivaldkonna vahel:

##### 1) Soojus

- Vähendada hoonete kütte- ja jahutuskulu
- Parandada soojuslikku mugavust hoonetes
- Tagada tarindite otstarbekohane soojusinerts
- Vältida mikrobioloogilist kasvu (hallitus, bakterid) hoonepiiretel

##### 2) Niiskus

- Vältida otseselt või kaudselt niiskusest tekkivaid probleeme
- Vältida liigse niiskuse voolu piirdesse
- Lahendada kaldvihmaga seotud probleemid
- Lahendada piirete kuivamisvõimalused
- Vältida materjalide lagunemist liigniiskuse mõjul
- Vältida piiretel ja piiretes mikrobioloogilist kasvu

- Vältida veeauru kondenseerumist
- Parandada ruumide niiskustingimusi

### 3) Õhk

- Tagada hoonepiirete õhupidavus
- Tagada sisekliima kvaliteet

Piirete niiskustehniline toimivus ja materjalide valik sõltuvad mitmetest teguritest:

- Ehitise asukohast
- Piirdele esitatavatest nõuetest
- Välis- ja sisekliimast
- Ruumide kasutusotstarbest
- Materjalide omadustest ja paigaldustingimustest

Soojus- ja niiskustehnilise projekteerimise põhimõtteid järgides on vajalik läbida mitmeid etappe ehitise kavandatud kasutusea tagamiseks ning tarindites kasutatavate materjalide keemiliste, füüsikaliste jms omaduste kontrollimiseks [1, 2, 3]. Nende tegevuste hulka kuuluvad:

#### 1) Materjalide valik:

- Materjalide soojus- ja niiskusjuhtivus
- Piirde soojusläbivus
- Külmasildade lisajuhtivus

#### 2) Hoone piirete niiskustehnilise toimivuse analüüs:

- Kondenseerumise ja hallituse tekke vältimise kontroll
- Niiskuse liikumine ja mõju materjalide kestvusele
- Sise- ja väliskliima muutuse mõju tarindi toimivusele
- Tarindite niiskumine ja kuivamine
- Lisasoojustamise mõju analüüs
- Soojusjuhtivus erinevatel aastaegadel
- Sisekliimatingimused
- Energiaarvutused



Eeltoodud kriteeriumite mittetäitmisel on mitmed negatiivsed mõjud:

- Piirete soojuslähivuse suurenemine (suurenevad soojakoad)
- Materjalide mahumuutused (näit. soojustuse vajumine)
- Suureneb materjalist lenduvate ühendite eralduvus
- Soodsad tingimused metallide korrosiooniks
- Suureneb tarindite niiskussisaldus ja tekivad soodsad tingimused hallituse tekkeks, näit.  $RH_{min}$  erinevate materjalide korral:
  - puit ja puidupõhised materjalid 75 ... 80%
  - paber kipsplaadil 80 ... 85%
  - mineraalvill 90 ... 95%
  - betoon 90 ... 95%

Tüüpilised niiskuskahjustused tekivad puuduliku projekteerimise ja halva ehituskvaliteedi tõttu ja eelkõige hoone välispiiretes – vundamendis, katuslaes, külma välisõhu kohal paiknevates konstruktsioonides, avatäidete ümbruses ja mujal välisseintes. Niiskusest tingitud kahjustuste peamiseks põhjusteks on mittesobivad materjalid või nende ebakvaliteetne paigaldus, samuti ruumide kasutusest tulenev niiskuskoormus, õhuvahetuse puudulikkus ja ruumide hooldamise ebapiisavus. Ehituskonstruktsioonides ja nende pindadel, materjalides ja ruumiõhus leidub alati niiskust ja mikroorganisme, mis satuvad hoonetesse maapõuest ja mujalt ümbritsevast loodusest. Nende hulk niiskusest kahjustatud hoonetes võib olla tunduvalt suurem kui ümbritsevas looduses. Pikaajaline niiskus põhjustab ehitusmaterjalide kahjustusi, nende lagunemist ja pehkimist [4, 5]. Praktiliselt kõik hoone või tarindi osad, mis niiskeks jäävad, muutuvad aja jooksul mikroorganismide kasvupinnaks. Märgades materjalides võib toimuda ka keemilisi muutusi, mille tulemusena eraldub ruumiõhku kahjulikke keemilisi ühendeid, millest mõned rikuvad ruumide sisekliimat ja võivad põhjustada terviseprobleeme.

Teatud mikroorganismide ilmumine pindadele ja materjalidesse on sõnum niiskus- ja hallituskahjustusest ning sellega kaasnevast terviseriskist. Niiskuskahjustuste korral võime täheldada nähtavat hallituse kasvu või näha kahjustuste tagajärgi: vee voolamise jälgi, pindade pundumist või irdumist, kattmaterjalide või värvi defekte, plaatide paisumist, krohvi murenemist. Niiskusest kahjustatud tarindites võib esineda ka sinihallitust ja pehkimist põhjustavaid seeni. Niisketes hoonetes eritub mikroorganismide elutegevuse tulemusena ruumiõhku probleeme tekitavaid lõhnu ka ehitusmaterjalidest, kui neisse ei ole piisavalt lisatud mikroorganismide kasvu pidurdavaid aineid. Sel juhul on

tunda ruumides läppunud nn. keldrilõhna, mis jääb kergesti külge rietele. Samuti võivad niiskusest kahjustatud hoonetes kasvavad mikroorganismid eritada ainevahetuse jääke, mis erinevad looduslikes tingimustes kasvavate mikroorganismide ainevahetuse jääkidest. Mikroorganismid, mis kasvavad niiskete materjalide pinnal, moodustavad eoseid ja kolooniaid ning eritavad ainevahetusprodukte ja neil on oma osa allergilise toime, tervisehäirete või haiguste tekkel. Mitmete mikroorganismide liikide ühistoime korral on ka nende poolt tekitatav ärritav toime tunduvalt suurem. See võib olla ka põhjuseks, et niiskus- ja hallituskahjustustega hoonetes viibivatel inimestel tekib mitmeid raskemaid tervisekahjustusi ja haigusi, näit. ülitundlikkus ehituskonstruksioonides olevate mikroorganismide ainevahetuse jääkidele [6]. Selliste ruumide kasutajatel võib esineda ka muid tervisehäired või ärritusnähte, mis mujal viibides kaovad (nn. „haige maja sündroom“).

Eestis on nii hoonete valdajate, tellijate kui ehitusettevõtjate hulgas viimastel aastatel juurdunud teadmised energiatõhususe ja sisekliima olulisusest, kuid vaatamata teadlaste poolt tehtud analüüsidele ning läbiviidud uuringutele [7, 8, 9, 10, 11, 12] on tarbijate teadmised ja kogemused energiatõhusate hoonete välispiirete niiskustehnilisest projekteerimisest ja ehitamisest tagasihoidlikud. Hoonete ehitamisel või renoveerimisel, lisasoojustamisel ning juurdeehituste rajamisel eksponeerivad nii tellijad kui tööde teostajad energiatõhusa lahendusena sageli niiskustehniliselt puudulikke lahendusi. Peamine tegur seejuures on piiretesse paigaldatavate materjalide niiskuslike omaduste ja kriitiliste kliima- ning kasutustingimuste mõju ebapiisav arvestamine. Sarnaseid probleeme on esinenud mitmete uurimistöode tulemustele tuginedes ka mujal, meie lähiriikides.

Välispiirete niiskustehnilist toimivust ja energiatõhususega seotud teemasid on viimastel aastatel põhjalikumalt uuritud. Soomes tehtud uurimustest energiatõhususe rangemate nõuete järgimisest ja madalenergiאהoonete välispiiretest [13, 14] selgub, et energiatõhususe nõuete karmistamine ja soojustuskihi paksuse suurendamine toovad kaasa mitte ainult ehitustehnoloogilisi ja tarindite muutusi, vaid võivad olla märkimisväärsete niiskusprobleemide allikaks piiretes ka kaugemas tulevikus kliima muutumisest tingituna [15, 16]. Belgia teadlased on välja toonud, et puitsõrestikul välispiiretes õhutõkke kasutamine külma välisõhu poolsel küljel [17] võib viia kondenseerumise, liigniiskuse ja hallituse tekkeni tarindis. Soomes on samuti uuritud puitsõrestikul välispiirete niiskustehnilist toimivust erinevates olukordades [18, 19, 20], milles tõdeti, et põhjamaises kliimas on tõhusa aurutõkkekihi kasutamise korral piirete

niiskuskahjustuste oht oluliselt madalam. Hoonete niiskuskahjustusi on uuritud ehitustehnilisest ja mikrobioloogilisest vaatenurgast ja selgitatud nn. „haige maja sündroomi“ tagamaid ja tekkepõhjusti [21, 22, 23]. Selgus, et mitmed terviseprobleemid nii hoonete kasutajatel kui ehitistel on põhjustatud pikaajalisest mitterahuldavast niiskusrežiimist ning puudulikust hoonete haldamisest, mis ilmnes hoonetes eelkõige hallitusena jahedamatel ja niiskematel pindadel siseruumides ning tarindites. Rootsis on uuritud renoveeritud ja lisasoojustatud hooneid ja sellega seotud probleeme töös, mis käsitleb välispiiretega seotud riske [24], kus on kirjeldatud niiskusest tingitud probleemide põhjusti madala energiatarbega hoonete välispiiretes. Enamikel juhtudel on üldistusena välja toodud, et peamine probleemide allikas on ventilatsiooni ja piisava tuulutuse puudulikkus ning sellest tingitud liigniiskus. Madalenergiahoonete puitsõrestikpiiretes kasutatavate materjalide omaduste ja niiskusrežiimi tagamise olulisust on uuritud nii Soome kui Rootsi teadlaste töödes [25, 26, 27], mis viitavad samuti suurema soojustuskihiga kaasnevatele niiskustehnilistele riskidele.

Samuti on tehtud mitmeid uuringuid arvutus- ja simulatsioonitarkvara võrdlemiseks ja valideerimiseks [28, 29, 30, 31, 32], mis kinnitavad arvutusprogrammide abil saadud mittestatsionaarse soojuse ja niiskuse samaaegse levi arvutustulemuste kattuvust laborikatsete tulemustega ning mis loevad seetõttu põhjendatuks sellise tarkvara kasutamist piirdetarindite analüüsimisel ja hindamisel uurimistööde käigus.

Eestis on valdkondlikud põhjalikumad uurimistööd käivitatud, ellu viidud ja jätkuvad Tallinna Tehnikaülikoolis ehitusfüüsika ja energiatõhususe õppetooli juures, liginullenergiahoonete kompetentsikeskuses prof. Jarek Kurnitski ja prof. Targo Kalamehe eestvedamisel [33, 34, 35, 36].

Kuna tarindite niiskusturvalisuse tagamine on madal- ja liginullenergiahoonete kavandamisel väga oluline ning selliste hoonete rajamine omakorda põhineb seatud energiasäästu eesmärkide täitmisel ja energiatõhususe meetmete rakendamisel, tuleb siinjuures vaadelda ka energiasäästu valdkonda pisut laiemalt nii Eestis kui mujal maailmas.

Energiaressursside säästlikum kasutus on olnud fookuses viimastel aastakümnetel kogu maailmas. Rahvusvahelise Energiaagentuuri (*International Energy Agency, IEA*) 2011.a. energiaraportist selgub, et alates aastast 1990 on globaalne energiaressursside nõudlus kasvanud ~45% ning tänase tarbimise ja poliitika jätkamisel on vaatamata energiakandjate hindade püsivale kasvule oodata nõudluse kasvu võrreldes 1990.aastaga

kuni kaks korda [37]. Jätkuv energia nõudluse kasv koos sellest tuleneva hinnatõusuga tingib aga seniste tarbimisharjumuste muutmise ning nõuab tõhusamate lahenduste väljatöötamist ja laialdasemat kasutuselevõttu.

Euroopas ei ole EL 27 riikide koondvaates energia lõpptarbimises viimasel paarikümnel aastal erinevate valdkondade lõikes osakaalude muutust ega kogutarbimise olulist vähenemist toimunud. Jõuliselt propageeritud energiasäästu meetmed ei ole aidanud tarbimist Euroopas märkimisväärselt vähendada.

Taastumatute maavarade tarbimise ohjeldamiseks, keskkonningimuste kontrolli all hoidmiseks ja säästlikumate energiaallikate kasutamiseks on Euroopa Liidus ehitiste ja hoonete energiatõhususe direktiividega [38, 39] kokku lepitud, et alates aastast 2021 rajatakse kõik uued hooned (avaliku sektori hooned alates aastast 2019) vastavuses liginullenergiahoonetele (ingl.k. *nearly zero energy buildings* ehk *nZEB*) kehtestatud nõuetega. Direktiivi 2010/31/EL rakenduskava [40] näeb ette, et aastaks 2021 väheneb Euroopa Liidus CO<sub>2</sub> emissioon 20%, energia lõpptarimine 20% ning taastuvenergia osakaal kogutarbimises suureneb kuni 20%-ni. Praeguse poliitika hindamise põhjal on selgunud, et ilma Euroopa Liidu täiendavate jõupingutusteta saavutatakse aastaks 2020 vaid 9% primaarenergia tarbimise kokkuhoidu [41]. Eesmärgiks seatud 20% vähenemise saavutamiseks tuleb kõige rohkem lisapingutusi teha kodumajapidamistel ja kolmandal sektoril (nii era- kui avaliku sektori hooned).

Eestis on alates 1990-ndatest toimunud suured muutused ja mitmete majandusharude ümberstruktureerimine, tööstuse ja põllumajanduse taandumine ning aeglane kasv viimastel aastatel. Kuigi energiakandjate hinnad on viimaste kümnendite jooksul mitmekordistunud, ei ole hoonete, eelkõige elamute energiatarbe osas olulisi muudatusi toimunud, hõivates täna kolmandiku energia lõpptarbimisest Eestis [42, 43, 44, 45, 46].

Eeltoodud direktiivide alusel ning lähtudes Ehitusseadusest [47] on Eesti Vabariigi Valitsuse poolt 30.augustil 2012 vastu võetud määruses nr. 68 „Energiatõhususe miinimumnõuded“ [48] defineeritud nii madalenergia-, liginullenergia- kui netonullenergiahoone, mille energiatõhususe miinimumnõuded on väljendatud energiatõhususarvuna (ETA). Hoonete summaarse energiakasutuse piirmäärad lähtuvad hoonete kasutamise otstarbest ning võtavad arvesse nende tehnilisi näitajaid.

Järgnevas tabelis (vt. Tabel 1) on kõnealuse määruse 2014.a. kehtivas redaktsioonis antud ETA piirväärtused hoonetüüpide kaupa uusehitistele, oluliselt rekonstrueeritavatele

hoonetele, madalenergia-, liginullenergia- ja netonullenergiahoonetele. Võrreldes varem kehtinud määrusega [49] on näiteks madalenergiahoonetele kehtestatud ETA nõudeid võrreldes varem kehtinud nõuetega ehitatavatele hoonetele karmistatud 33%.

**Tabel 1.** *Energiatõhususarvu (ETA) võrdlus [48].*

Hoone tüüp	Energiatõhususarv (ETA) [kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]				
	Ehitatavad hooned	Oluliselt rekonstrueeritavad hooned	Madalenergiahooned	Liginullenergiahooned	Netonullenergiahooned
Väikeelamud	< 160	< 210	< 120	< 50	0
Korterelamud	< 150	< 180	< 120	< 100	0
Büroohooned, raamatukogud, teadushooned	< 160	< 210	< 130	< 100	0
Ärihooned	< 210	< 270	< 160	< 130	0
Avalikud hooned	< 200	< 250	< 150	< 120	0
Kaubandushooned ja terminalid	< 230	< 280	< 160	< 130	0
Haridushooned	< 160	< 200	< 120	< 90	0
Koolieelsed lasteasutused	< 190	< 240	< 140	< 100	0
Tervishoiuhooned	< 380	< 460	< 300	< 270	0

Samuti on kõnealuses määruses nõutud, et ruumide soojusliku mugavuse tagamiseks ei või piirde soojusläbivus üldjuhul ületada väärtust 0,5 W/(m<sup>2</sup>·K) ning soojustuse valikul tuleb lähtuda sellest, et ehitus peab olema hea energiatõhususe tasemega.

**Tabel 2.** *Välispiirete soojusläbivus [48].*

Välispiirde tüüp	Välispiirde soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	
	Elamud	Mitteelamud
Välisseinad	0,12 ... 0,22	0,15 ... 0,25
Katused, põrandad	0,10 ... 0,15	0,10 ... 0,20
Aknad, ukсед	0,60 ... 1,10	0,60 ... 1,10

Määruse kehtivas redaktsioonis on antud välispiirete soojusläbivuse väärtused, millest võib välispiirete valikul esmasel lähenemisel lähtuda (vt. Tabel 2), kuid lõplike valikute tegemisel tuleb lähtuda hoone kompaktsusest, kasutusotstarbest ning kütte- ja ventilatsioonilahendustest. Kõnealuses määruses on sätestatud, et hoone välispiirded peavad olema pikaajaliselt õhupidavad ja piisavalt soojustatud ning otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse hoone energiatõhususe nõuetest, ruumide soojuslikust

mugavusest ja hallituse ning kondensaadi vältimisest külmasildadel, sisepindadel ja tarindites. Niiskuskonvektsiooni riskide vältimiseks tuleb tarindite kriitilised sõlmed (näit. sein ja vundamendi ning põranda ühendus, sein ja katuse ühendus, katuslae auru- või õhutõkke jätkukohad, läbiviigud) teha võimalikult õhupidavaks.

Eeltoodud nõuete täitmiseks võib välisseinte projekteerimisel tuua võrdluse, et kui täna rekonstrueeritakse eluhoonet, mille tulemusel  $ETA < 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , siis vastaks sellele välisseinte tavapärase soojustuskihti paksusega  $> 150 \text{ mm}$ . Samalaadse hoone ehitamine aga madalenergiahoone (ETA  $< 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) eeldab välisseintes soojustuskihti, mille paksus on  $> 250 \text{ mm}$  ning liginullenergiahoone puhul (ETA  $< 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) välisseinas soojustuskihti paksusega  $> 350 \text{ mm}$ . Kui sein soojusläbivuse  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  korral on soojustuskihi paksus  $250 \text{ mm}$ , siis soojusläbivuse vähendamisel näit. tasemeni  $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  on soojustuskihi paksuseks juba  $450 \text{ mm}$ .

Varasemates uurimistöodes esitatud andmetele tuginedes [50, 51, 52, 53] võib kinnitada, et suurema soojustuskihi paksuse ja madala soojusläbivusega välispiirete rajamisel tuleb lahendada mitmeid probleeme, mis on seotud tarindite niiskustehnilise toimivusega. Need tulenevad eelkõige tarindites niiskuse kondenseerumise ja hallituse tekke võimaluste ärahoidmisest, mis on tingitud madalenergiahoone välispiirete paksuse ja kliimatingimuste muutumisest.

Kohaldatavad standardid, näit. EVS-EN 15026 [54] ja EVS-EN ISO 13788 [55], viitavad samuti, et veeauru kondenseerumine on alati piirdetarindi soojuslikku ja niiskuslikku toimivust halvendav ning tarindid tuleb projekteerida ja ehitada nii, et veeauru kondenseerumist, hallituse kasvu ega muul viisil kriitilise suhtelise niiskuse ületust ei tekiks.

Antud töös on vaatluse all võimalikud niiskustehnilised riskid ja nende mõju eeltoodust lähtuvalt, võttes arvesse Eesti kliimatingimusi ning välispiirdes kasutatud materjalide omaduste (näit. niiskussisaldus, veeauruläbilaskvus, soojuserijuhtivus) ja keskkonningimuste muutusi. Uurimise ja analüüsi objektiks on hallituse (hallitusindeksi) muutus, kondenseerumise esinemine ja väljakuivamise kiirus ning nende tasemete muutused tarindi soojusläbivuse ja paksuse muutumisel. Samas on vaatluse all ka tarindi niiskustehnilise turvalisuse tagamisel väga olulised materjalid – õhu- ja aurutõke ning tuuletõkkematerjalid ning nende koostoime erinevates materjalide kombinatsioonides.

Meie kliimasse sobivate, energiasäästlike ja niiskustehniliselt turvaliste lahenduste väljatöötamine ja juurutamine annab paremad võimalused ka arendajatele, kohalikele ehitusettevõtetele ja materjalide tootjatele oma tootearendusse enam investeerida ning luua seeläbi rohkem siseriiklikku väärtust. Läbi nende meetmete luuakse eeldused ka kvaliteetsema elu- ja töökeskkonna säilitamiseks või loomiseks piirkondades, kus täna on hoonete valdajatel, aga ka riigil või kohalikul omavalitsusel suuri probleeme kaasatud poolte motiveerimisel. Käesolevas töös leiavad kajastamist soovitud ja kinnitust teadmised energiatõhusate ja niiskustehniliselt turvaliste puitkonstruktsioonide rajamisest, mis on sobivad meie põhjamaise kliima ja ehitustavadega.

Käesoleva töö teema – madal- ja liginullenergiahoonete välispiirete niiskustehniline toimivus ja sellega kaasnevate riskide hindamine – on seega oluline mitmel põhjusel:

- Poliitiliste otsuste, struktuurifondide ja eelarveliste vahendite toel on valminud, ellu viimisel ja planeerimisel suures mahus hoonete ehitus- ja renoveerimistöid, saavutamaks märgatavat kokkuhoidu energia tarbimisel, kuid eeltoodud uurimistulemustele toetudes võib öelda, et energiasäästu meetmete elluviimisel tuleb senisest enam tähelepanu pöörata niiskustehnilistele riskidele
- Valitud välispiirete lahenduste sobivuse kohta tuleb otsused langetada ehitusprotsessi algfaasis, mil tehakse ka suured kapitalimahutused, mida hiljem muuta on väga keeruline ja kallis. Pikaajaliselt toimivate lahenduste ja õigete otsuste tegemiseks tuleb lähtuda saadud kogemustest, uurimistööde tulemustest ja muutuvast keskkonnast
- Tehtud valikutest sõltuvad ka paljud kaasnevate sõlmede lahendused, mis peavad tõhusalt toimima minimaalsete riskidega ehitise kogu kavandatud eluea jooksul
- Eeltoodud valikutega on seotud keskkonnasäästu ning tervisliku elu- ja töökeskkonna aspektid: surve hoonetes kulutatava energia vähendamisele on seotud võimalike suurenevate riskidega hoone ja selle kasutajate tervisele
- Energiatõhusate ja majanduslikult põhjendatud ehitiste ning asjatundlikult lahendatud välispiirete rajamine on oluline nii riikidevaheliste kui siseriiklike kokkulepete ja eesmärkide täitmiseks, tööhõive tagamiseks, elukeskkonna ja elukvaliteedi tõstmiseks.

## **5. EESMÄRK**

Töö eesmärgiks on puitsõrestikseina näitel välja selgitada, kas ja millistel tingimustel on suurema soojustuskihi paksuse (250 ... 600 mm) ja suure niiskukoormuse korral tagatud madal- ja liginullenergiahoone välispiirde niiskustehniliselt turvaline toimivus ning millised võivad antud juhtudel olla hallituse tekke ja niiskuse kondenseerumise riskid muutlikes keskkonnatingimustes, kui piirdetarindites on kasutatud erinevate omadustega ehitusmaterjale.



## 6. TEOREETILINE TAUST

### 6.1. Soojuslevi

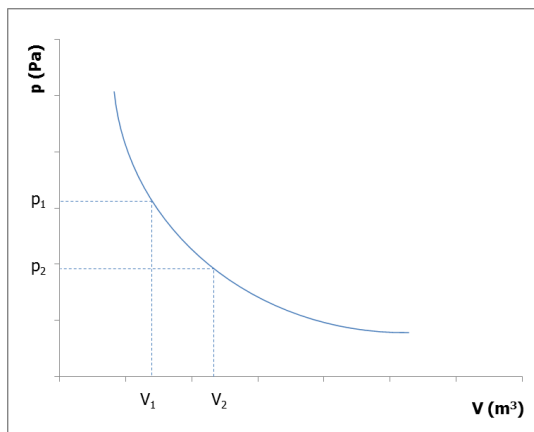
Gaaside seaduspärasusi ja termodünaamikat on uuritud mitme aastasaja vältel. 17.sajandil sõnastati inglise-iiri teadlase Robert Boyle'i [56] ja prantsuse teadlase Edme Marriotte'i [57] teeside järgi Boyle-Marriotte seadus: Jääval temperatuuril on gaasi rõhk pöördvõrdeline tema ruumalaga:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow p_1 * V_1 = p_2 * V_2 \quad (1)$$

Ideaalgaasid, mille kohta kehtib Boyle-Marriotte seadus ning mille siseenergia sõltub temperatuurist, sisaldavad võrdsetel mahtudel, rõhkudel ja temperatuuridel võrdse arvu molekule (Avogadro [58] seadus). Sellest tulenevalt, tähistades gaasi moolide arvu  $n_1$  ja  $n_2$ :

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot n_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2 \cdot n_2} = const \quad (2)$$

Järelikult on kõikide gaaside moolimahud võrdsetel rõhkudel ja temperatuuridel võrdsed. Isotermilise protsessi korral gaasi rõhu sõltuvus tema ruumalast on esitatud lisatud joonisel (vt. Joonis 1).



**Joonis 1.** *Ideaalgaasi rõhk ja ruumala. Isotermiline protsess.*

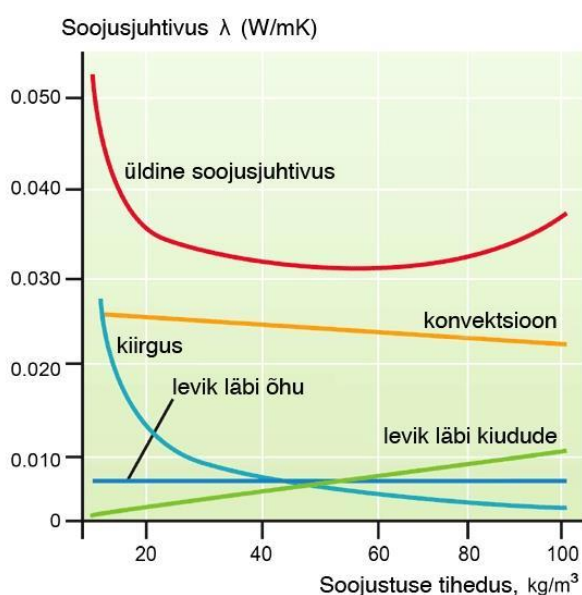
Gaaside isotermilised ( $T = const$ ), isobaarsed ( $P = const$ ) ja isohoorsed ( $V = const$ ) protsessid on ühendatud Clapeyron-Mendelejevi [59] [60] võrrandis:

$$p * V = \frac{m}{\mu} * R * T \quad (3)$$

kus  $V$  on  $m/\mu$  mooli gaasi maht temperatuuril  $T$  ja rõhul  $p$  ning  $R$  on universaalne gaasikonstant [8314,41 J/(kmol·K)].

Soojuslevi toimub üldjuhul mitme komponendi koosmõjul:

- Konvektsioon ehk gaasi või vedeliku liikumine ja segunemine
- Soojuskiirguse korral kiirgavad kehad soojuslaineid, mis neelduvad pindadel või peegelduvad tagasi keskkonda või läbivad pinna
- Soojusjuhtivus aine osakeste omavahelistes kontaktides energia ülekandumisel



**Joonis 2.** Soojuslevi komponendid mineraalvilla näitel [61].

Soojuslevi põhiseaduse formuleeris prantsuse matemaatik J.B.J. Fourier [62], uurides soojuslevi tahketes kehaes: soojusvool  $dQ$  kehas on võrdeline keha soojuseri juhtivusega  $\lambda$ , temperatuuri gradiendiga  $dt/dn$  ja isotermpinna pindalaga  $dA$

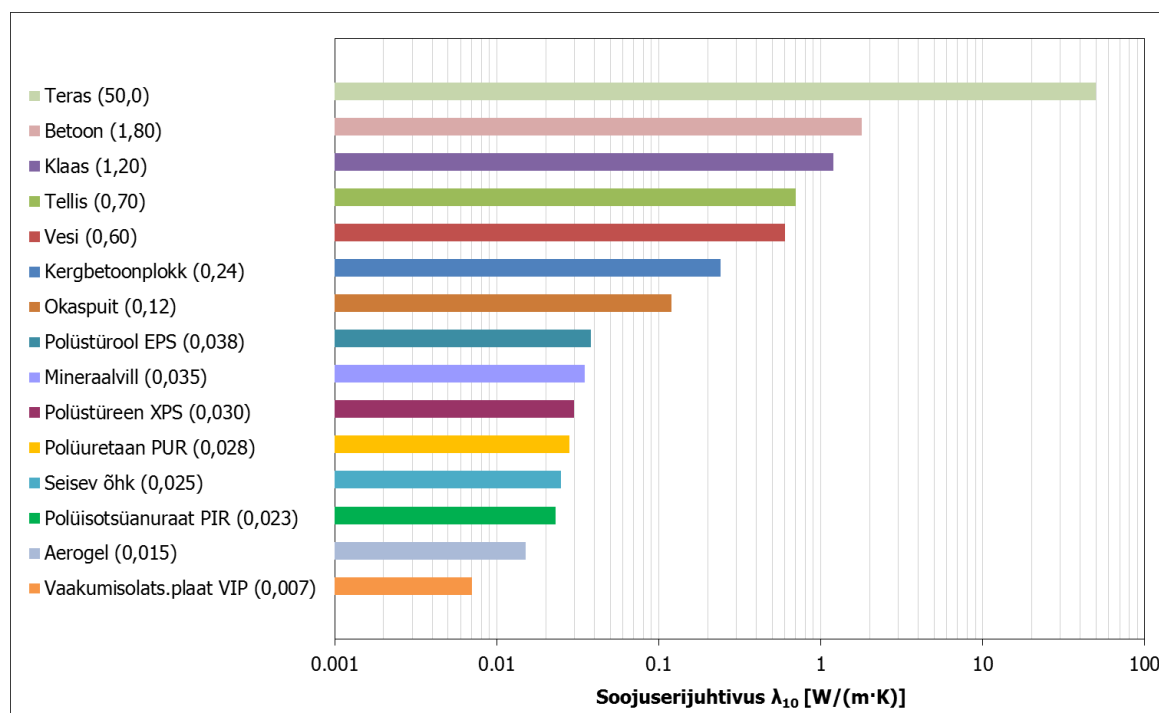
$$dQ = -\lambda * \frac{dt}{dn} * dA \tag{4}$$

Gaasides on soojust edasikandvateks osakesteks molekulid, mis oma kaootilisel liikumisel ja kokkupõrgetel annavad soojusenergiat edasi kihist kihti. Seetõttu on gaaside soojuseri juhtivus suurel määral molekulide liikumiskiirusest. Et aga molekulide kiirus iseloomustab gaasi temperatuuri, siis mõjutab ka temperatuur soojuseri juhtivuse väärtust.

Vedelikes on molekulide liikumise iseloom erinev gaasidest ning soojuseri juhtivus on peamiselt vedeliku füüsikalistest omadustest ja temperatuurist. Seejuures on iseloomulik,

et gaaside soojuserijuhtivus temperatuuri tõusuga suureneb, enamikel vedelikel aga väheneb.

Mittemetallilised tahked ained on keerulisema sisemise struktuuriga ja nende soojuserijuhtivus oleneb reast teguritest: aine struktuur, poorsus, tihedus, temperatuur, niiskus. Poorsetel materjalidel oleneb soojuserijuhtivus sageli ka voo suunast, s.t. aine ei ole isotroopne.



**Joonis 3.** Ehitusmaterjalide soojuserijuhtivuste võrdlus ( $\theta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

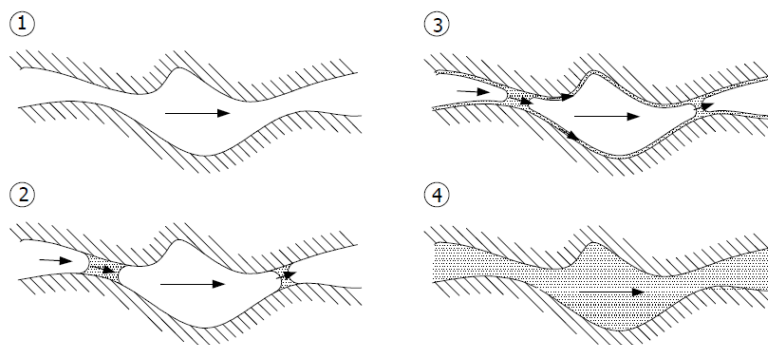
Joonis 3 näitab, et tarindile tugevuse ja jäikuse tagavad materjalid (näit. teras ja betoon) on palju kordi suurema soojuserijuhtivusega kui kerged materjalid (näit. mineraalvill, EPS või XPS). Seetõttu on eriti oluline suhtuda tähelepanelikult külmasildade isoleerimisse ning võimalike niiskus kriitiliste piirkondade tuvastamise hoonete kavandamisel ja kontrollimisse enne valmimist.

## 6.2. Niiskuslevi

Niiskuse liikumine veeauru või vedelikuna tarindi erinevate osade vahel või läbi tarindi võib toimuda erinevate protsesside toimetel nii gaasilises kui vedelas olekus:

- veeauru difusiooni teel, veeauru osarõhkude erinevuse tõttu;
- koos õhuvooluga, õhurõhkude erinevuse tõttu;
- pinddifusiooni teel materjali poorides, niiskussisalduse erinevuse toimetel;
- poori pinna märgumise teel, s.t. kapillaarjõudude avaldumiseks piisavalt väikestes poorides ja pragudes, kus vee liikumise tingib keskkonna niiskussisalduse erinevus (gradient);
- vaba veena (näit. sademete toimetel või hüdrostaatilise surve tõttu) läbi pragude ja liitekohtade, mis on kapillaarimendumiseks liiga suure läbimõõduga ning kus vee liikumine saab toimuda vee konvektsiooni ja raskusjõu toimetel.

Materjalid koosnevad sidemetega ühendatud osakestest, moodustades teineteisega seotud kristallvõre. Aineosakeste ja pooride suurus ning sidemete omadused määravad materjalide tugevuse, jäikuse ja poorsuse. Poorsete ehitusmaterjalide kapillaarid on üldjuhul sedavõrd väikese diameetriga, et hüdrostaatiline surve ei mängi antud protsessides olulist praktilist rolli ning niiskuse levik toimub peamiselt konvektsiooni, difusiooni ja kapillaarimendumise teel.



**Joonis 4.** Niiskuse liikumise viisid poorses keskkonnas [63].

Eeltoodud joonisel (vt. Joonis 4) kirjeldab skeem 1 madala niiskustaseme juures veeauru difusiooni, skeem 2 on kõrgema niiskustaseme korral veeauru difusioon koos samaaegse vähese vedeliku hulga liikumisega, skeem 3 kirjeldab üheaegset veeauru difusiooni, vedeliku pinddifusiooni ja vedeliku liikumist kõrge niiskustaseme korral, skeemil 4 on poorid täitunud veega ning tegemist on kapillaarses alas toimuva vedeliku liikumisega.

Sarnaselt Fourier' seadusele soojuslevi kohta (4) saab veeauru liikumist materjali poorides kirjeldada Fick'i [64] seadusega: gaasi difusioonivoog (voolu tihedus) kehas,  $g$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)], on võrdeline gaasi kontsentratsioonide erinevusega kahel pool keha

$$\vec{g} = -\delta_v * \text{grad } v = -\delta_p * \text{grad } p_v \quad (5)$$

kus  $\delta_v$  on materjali veeaurueri juhtivus veeauru sisalduse erinevuse põhjal (m<sup>2</sup>/s),  $\delta_p$  on materjali veeaurueri juhtivus veeauru osarõhkude erinevuse põhjal [kg/(m·s·Pa)],  $\text{grad } v$  on õhu veeaurusisalduse gradient [kg/(m<sup>3</sup>·m)] ja  $\text{grad } p_v$  on veeauru osarõhu gradient [kg/(m·s·Pa·m)].

Kindla paksusega  $d$  (m) materjali veeaurujuhtivuse  $W_v$  (m/s) ja  $W_p$  [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)] saame leida veeaurutakistuse  $Z_v$  (s/m) ja  $Z_p$  (m<sup>2</sup>·s·Pa/kg) või veeaurueri juhtivuse  $\delta_v$  ja  $\delta_p$  ning niiskusvoo  $g$  kaudu:

$$g = \delta_v * \frac{\Delta v}{d} = \delta_p * \frac{\Delta p}{d} \quad (6)$$

$$W_v = \frac{1}{Z_v} = \frac{\delta_v}{d} = \frac{g}{\Delta v} \quad (7)$$

$$W_p = \frac{1}{Z_p} = \frac{\delta_p}{d} = \frac{g}{\Delta p} \quad (8)$$

Veeaururõhu ja veeaurusisalduse omavahelise seose põhjal saab leida veeaurujuhtivuse  $W_p$  [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)]:

$$W_p = \frac{W_v}{(R/M_w) * (273,15 + \theta)} \quad (9)$$

kus  $R$  on universaalne gaasikonstant [8314,41 J/(kmol·K)],  $M_w$  on vee molaarmass (18,015 kg/kmol) ning  $\theta$  on temperatuur (°C).

Inglise teadlane William Thomson (tuntud kui lord Kelvin) [65] uuris 19.sajandil veeauru ja poorides kondenseeruva vee käitumist ning sõnastas seaduspärasuse, mida tänapäeval tuntakse Kelvini võrrandina

$$P_\ell = p_{sat(T)} + \frac{R * T * \rho_w}{M_w} * \ln\left(\frac{p}{p_{sat(T)}}\right) \quad (10)$$

Kelvini võrrand kirjeldab veeauru rõhu muutumist vedeliku ja auru liikumisel kapillaarides, tuginedes termodünaamika alustele. Poorivee rõhk  $P_l$  on võrdeline poore läbiva veeauru küllastusrõhu  $p_{sat}$  ja suhtelise niiskusega ( $p/p_{sat}$ ) antud temperatuuril  $T$ . Teisisõnu – veeaur kondenseerub pooriveeks, kui suhteline niiskus on kõrgem kui tasakaaluväärtus ning aurustub, kui suhteline niiskus on alla selle. Asetades antud võrrandisse arväärtused, näeme, et poorivee tõmbejõud on märkimisväärse suurusega (vt. Tabel 3). See on seotud pooride kumeral pinnal tekkiva veemeniskiga, mis sõltub poori raadiusest ja on võrdeline pooris realiseeruva pindpinevusjõuga.

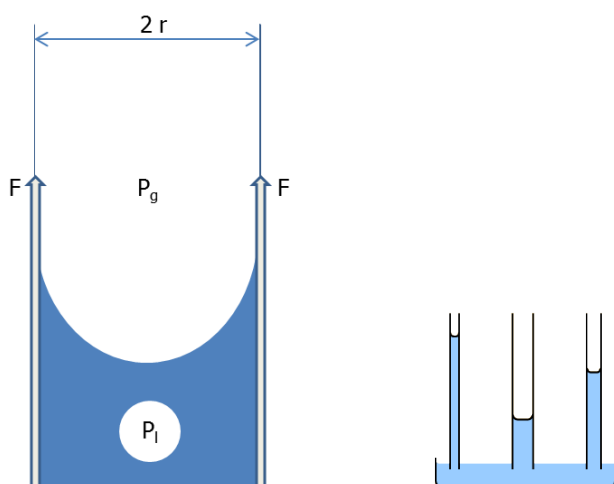
**Tabel 3.** Poorivee rõhu sõltuvus suhtelisest niiskusest, arvatuna Kelvini võrrandi põhjal ( $\theta = +22\text{ }^\circ\text{C}$ ).

RH(%)	70	80	90	95	100
$P_l$ (Pa)	-48583516	-30393908	-14349537	-6984515	2642 = $p_{sat}(\theta)$

Pooris oleva veeauru rõhu  $P_g$  ja vedeliku rõhu  $P_l$  kaudu saab avaldada poorirõhu  $s$ .

$$P_g - P_l = s = \frac{2 * \sigma * \cos \theta}{r} = \rho_w * g * h \quad (11)$$

kus  $\sigma$  on pindpinevusjõud (N/m),  $\theta$  on märgumisnurk,  $r$  on poori raadius (m),  $\rho_w$  on vedeliku tihedus ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  on raskuskiirendus ( $\text{m/s}^2$ ) ja  $h$  on vedelikusamba kõrgus (m). Seoseid illustreerib Joonis 5.



**Joonis 5.** Veeauru ja vedeliku rõhk pooris, analoogia kapillaartoruga.

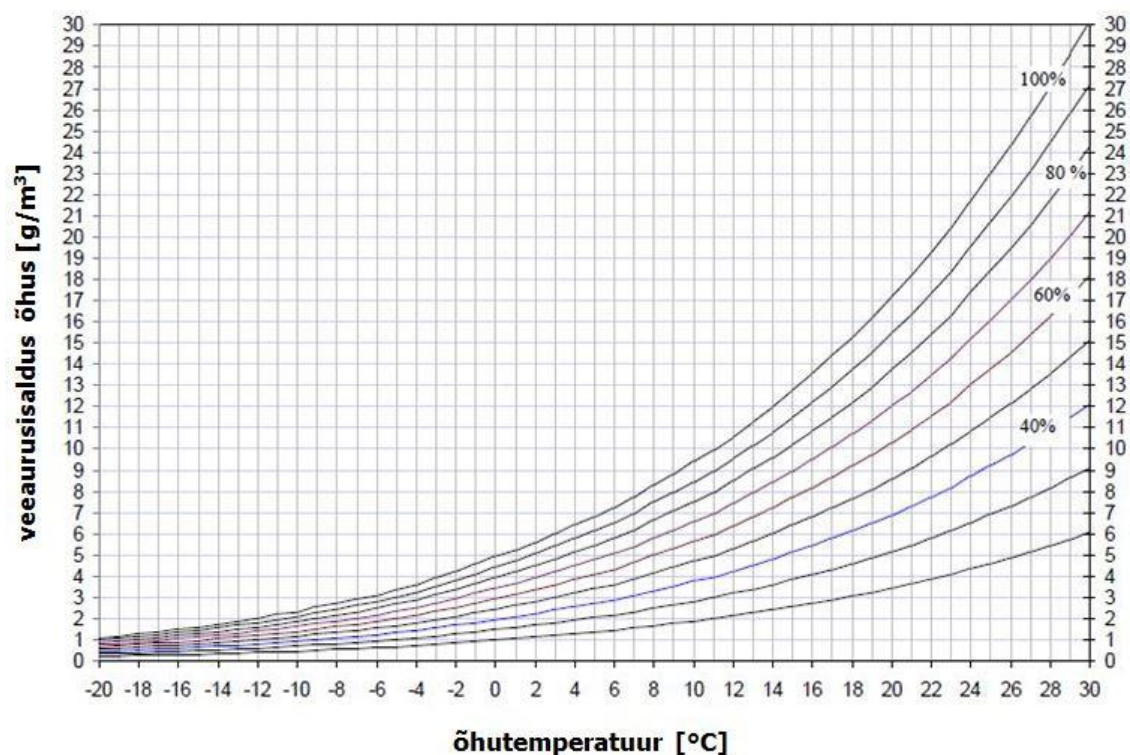
Veeauru küllastusrõhu  $p_{sat}$  (Pa) ja küllastussisalduse õhus  $v_{sat}$  ( $\text{g/m}^3$ ) ning nende seose õhu suhtelise niiskusega ( $\varphi$ , RH %) saab arvutada seostest:

$$p_{sat} = \begin{cases} 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} & \text{kui } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} & \text{kui } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

$$v_{sat} = \frac{M_w \cdot p_{sat}}{R \cdot T} \quad (13)$$

$$RH = \frac{p}{p_{sat}} \cdot 100\% = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100\% \quad (14)$$

Suhtelise niiskuse alusel saab hinnata ka tarindi niiskustehnilist toimivust. Erinevate materjalide niiskustehniliste omaduste võrdlemiseks tuleb vaadata veeaurusisalduse või veeauru osarõhu suurus. Igal temperatuuril on õhu veeaurusisaldusel kontsentratsiooniline piir: igal teatud temperatuuril (küllastustemperatuuril) ja rõhul (küllastusrõhul) saab õhk sisaldada maksimaalselt teatud koguse veeauru. Antud seost illustreerib Joonis 6. Kui see küllastustase ületatakse, hakkab veeaur kondenseeruma.



**Joonis 6.** Õhu maksimaalse veeaurusisalduse ja temperatuuri sõltuvus.

Hoonepiirdeid mõjutab nii suhteline niiskus kui ka absoluutne niiskus (õhu veeauru sisaldus). Õhu absoluutne niiskus määrab veeauru liikumise läbi hoonepiirde ja selles olevate materjalikihtide. Siseõhu suhteline niiskus sõltub niiskustootlusest ruumides

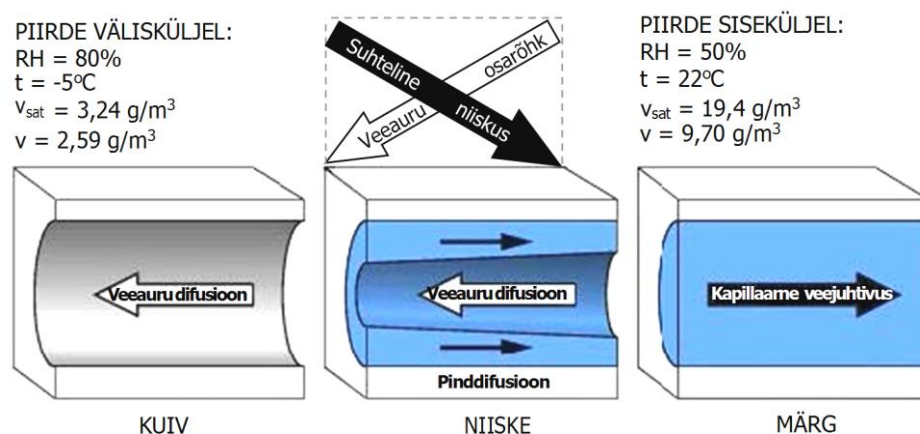
(inimese elutegevus, toidu valmistamine, pesemine jne), ventilatsioonist, õhuvahetusest ning välisõhust.

Prantsuse insener Henry Darcy [66] uuris vedelike liikumist poorses keskkonnas ning tõestas 1856.aastal, et kapillaarsel teel võib materjal kanduda ka horisontaalsuunas, s.t. raskusjõu puudumine ei ole antud protsessides takistuseks, kuid piirajaks võib olla poori raadius, märguva pinna suurus, temperatuur või suletud kapillaari otsas oleva õhu vastusurve. See on tuntud ka kui Darcy seadus:

$$g = -\frac{k_{\ell} * \rho_w}{\eta_w} * grad P_{\ell} \quad (15)$$

kus  $k_{\ell}$  on materjali veejuhtivus ( $m^2$ ),  $\eta_w$  on vee dünaamiline viskoossus ( $N \cdot s/m^2$ ) ja  $P_{\ell}$  on poorivee rõhk (Pa).

Mittestatsionaarset niiskuse ja soojuse liikumist hoonetarindites poorses materjalides on hakatud põhjalikult uurima alates möödunud sajandi keskpaigast, kui teadlased de Vries [67] ja Philip [68] alates 1960-ndatest ning hiljem ka Whitaker [69] ja Bear [70] 1970-ndatel panid aluse klassikalisele niiskuse ja soojuse koostoime uurimisele poorses materjalides.



**Joonis 7.** Niiskuse liikumine poorses keskkonnas [71].

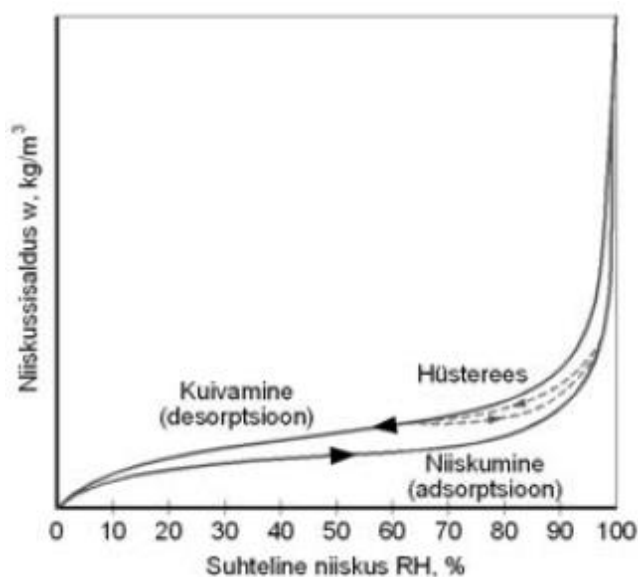
Kirjeldatud niiskuse transpordimehhanismid võivad rakenduda samaaegselt ja mõlemas suunas. Eeltoodud joonisel (vt. Joonis 7) on näide, kus talveperioodil meie kliimas, kui väljas on suhteline õhuniiskus 80%, õhutemperatuur -5 °C ja veeauru sisaldus välisõhus seega  $v = 2,59 \text{ g/m}^3$  ning tarindi soojemal poolel (näiteks siseruumides) on suhteline niiskus 50%, temperatuur +22 °C ja veeauru sisaldus seetõttu  $v = 9,70 \text{ g/m}^3$ , toimub veeauru difusioon soojemalt poolt külmema suunas, sest veeauru sisaldus (ja seega ka



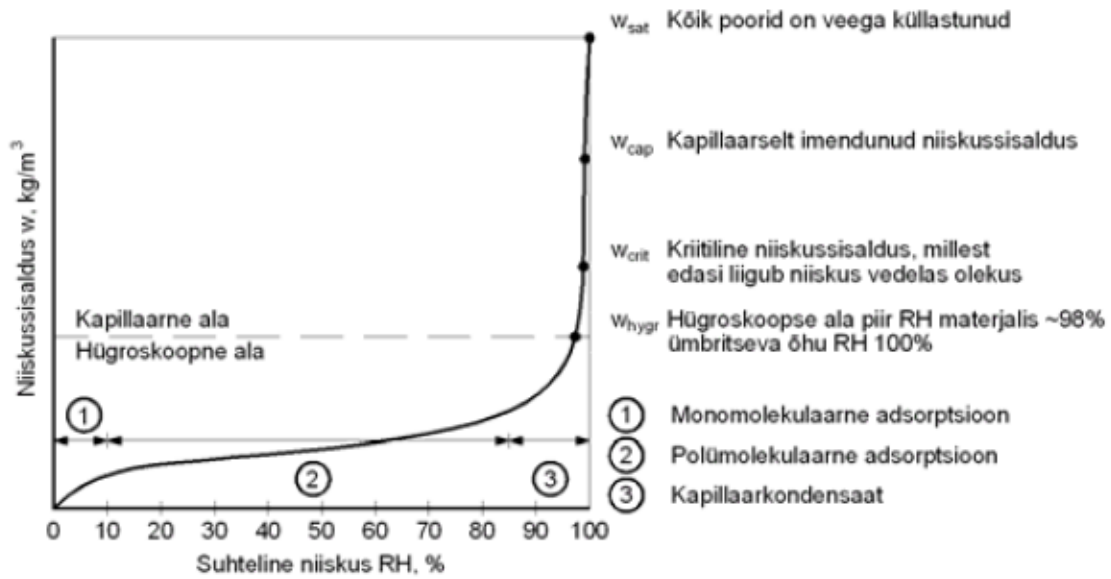
veeauuru osarõhk) on soojemal poolel kõrgem. Kuid samal ajal on külmemal poolel suhteline niiskus, seega ka poorivee rõhk suurem kui soojemal poolel, mis tingib vee kapillaarse liikumise poorides külmemalt soojema keskkonna suunas.

Poorsetel materjalidel on võime siduda ümbritsevast õhust niiskust (adsorptsioon ehk hügrooskoopsus) ning sellest vabaneda temperatuuri ja/või keskkonna niiskuse alanemisel (desorptsioon ehk kuivavus). Hügrooskoopsete materjalide niiskussisaldus kõigub vastavalt keskkonna (näit. õhu suhtelise niiskuse ja temperatuuri) muutustele. Kui aga ümbritsevas keskkonnas muutusi pikema aja jooksul ei toimu, saavutab materjal tasakaaluniiskuse. Materjalide struktuurist, pooride suurusest ja tihedusest sõltuvalt võib tasakaaluniiskus materjalides erineda väga suurel määral. Materjalide adsorptsiooni, desorptsiooni ja tasakaaluniiskust kujutavatelt joonistelt (vt. Joonis 8 ja Joonis 10) nähtub, et kuivamise ja niiskumise kõverad esitatud graafikutel ei kattu. See on tingitud hüstereesist – keha omadusest – mis aeglustab süsteemi muutumist või takistab selle ennistumist esialgsesse olekusse. Poorsete materjalide korral on üldjuhul kuivamise faasis tasakaaluniiskuse tase mõnevõrra kõrgem kui niiskumise faasis, mis on tingitud materjali poorides paikneva vee vabanemise väiksemast kiirusest võrreldes niiskumisega.

Järgnevatel joonistel (vt. Joonis 8 – Joonis 10) on esitatud tasakaaluniiskust, hüstereesi ja niiskussisalduse erinevaid faase kirjeldavad graafikud ning mõnede materjalide sorptsioonikõverad, kus potentsiaaliks on ümbritseva keskkonna suhteline niiskus  $RH$  (%).

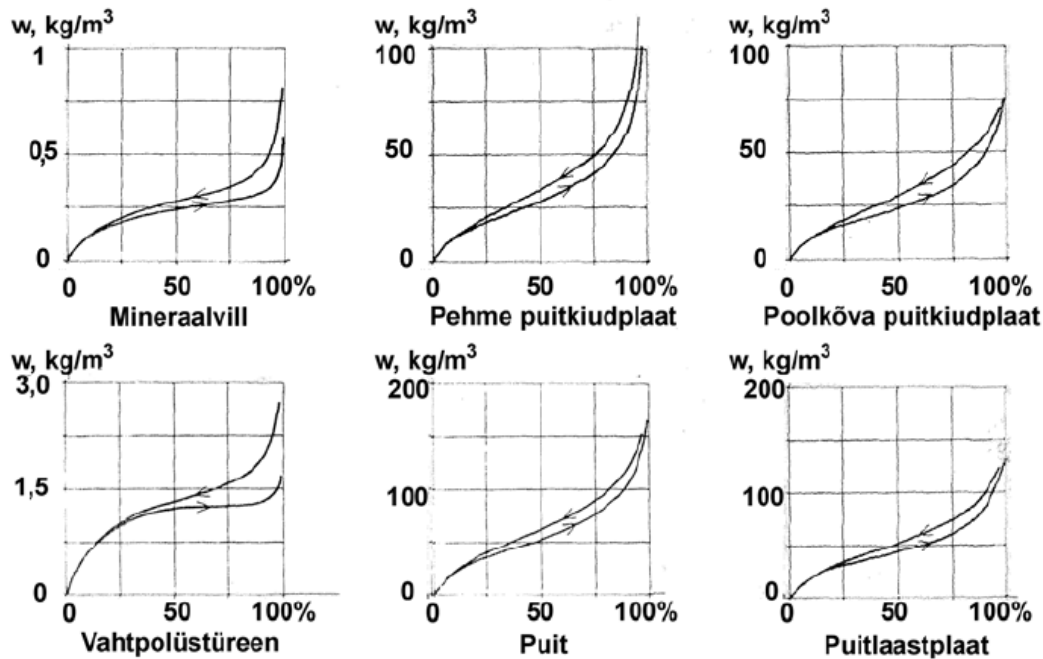


**Joonis 8.** Adsorptsioon, desorptsioon, hüsterees [72].



**Joonis 9.** Materjali niiskussisalduse erinevad faasid [73].

Sortptsioonikõveratel näidatakse tavaliselt materjali niiskussisaldus kaalu järgi  $u$  (kg/kg), mahu ja massi järgi  $w$  (kg/m<sup>3</sup>) või mahu järgi  $\psi$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>):



**Joonis 10.** Valik materjalide sorptsioonikõveraid [74].

Eeltoodut arvestades ja kasutades erinevate niiskuse leviku komponentide kirjeldamisel isotermilises protsessis sama potentsiaali, näiteks suhtelist niiskust, saame niiskusvoolu jagada veeauru niiskusvooluks  $g_v$ , vee niiskusvooluks  $g_l$  ja konvektiivseks niiskusvooluks  $g_k$ :

$$\vec{g} = -(g_v + g_l + g_k) \quad (16)$$

$$g_v = -\delta_v * \frac{\partial v}{\partial x} = -\delta_p * \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (17)$$

$$g_l = -D_w * \frac{\partial w}{\partial x} = -K_l * \frac{\partial P_l}{\partial x} \quad (18)$$

$$g_k = -R_a * \frac{\partial v}{\partial x} \quad (19)$$

kus  $D_w$  on vee difusioon ( $m^2/s$ ),  $K_l$  on veejuhtivus (s),  $P_l$  on poorivee rõhk (Pa),  $R_a$  on õhuvool läbi materjalikihi ( $m^3/s$ ) ja  $\partial x$  on materjalikihi paksuse muutus (m) [75].

Antud seaduspärasuste abil on võimalik hinnata tarindite niiskustehnilist seisundit ning modelleerida sõltuvalt ümbritseva keskkonna- või materjaliomadustest erinevaid välispiirete lahendusi, neid omavahel võrrelda ja nendega seotud riske kaaluda.

## 7. METOODIKA

Standardis EVS-EN 15026 on sõnastatud tingimused, mille kohaselt tuleb piirdetarindid projekteerida ja ehitada selliselt, et oleks tagatud niiskustehniline turvalisus ning hoone ei oleks otseselt või kaudselt niiskusest kahjustatud ja niiskus ei ületaks kriitilise niiskuse taset, s.h. oleks tagatud niiskus- ja hallituskahjustuste ning materjalide lagunemise vältimine.

Projekteerimistingimuste täitmise kontrollimiseks kasutatakse modelleerimistarkvara soojus- ja niiskuslevi hindamiseks mittestatsionaarsetes tingimustes, mitmekihilistes piirdetarindites, mille mõlemal pool mõjuvad muutuvad kliimatingimused. Soojus- ja niiskustehniline dünaamiline modelleerimine annab üksikasjalikku ja täpset teavet piirdetarindis esinevate niiskusriskide ja vastavate ennetavate meetmete rakendamise kohta. Dünaamilised mudelid võtavad arvesse soojuse ja niiskuse akumulatsioonide, varjatud soojuse mõju ja ülekandumist vedelike difusiooni ja konvektsiooni teel reaalses ääre- ja algtingimustes. Tänapäeval leiavad sellised mudelid ehituspraktikas laialdast kasutamist, mille tulemusena on soojus- ja niiskustehnilise modelleerimise täpsus oluliselt paranenud.

Uurimistöös püstitatud eesmärkide täitmiseks on soojus- ja niiskustehniliste arvutuste mudelit kalibreeritud laborimõõtmiste abil ning teostatud hulk praktilisi arvutusi antud soojus- ja niiskustehnilise arvutustarkvara abil. Antud uurimistöös on eeldatud, et tarindi soojustuskihid on homogeenised ning kasutatud õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkke-materjalid tagavad minimaalse õhuläbilaskvuse ja märkimisväärse konvektsioonita tarindid ning seetõttu ei ole nende mõju arvestatud.

### 7.1. Arvutustarkvara kirjeldus

Uurimistöös on kasutatud numbrilisi arvutisimulatsioone ja füüsikaliste mudelite hetkeolukorra uuringuid võimaldavat niiskustehniliste arvutuste tarkvara Delphin 5, mille väljatöötajateks ja arendajateks on Dresdeni Tehnikaülikooli teadlased Andreas Nicolai, John Grunewald, Heiko Fechner ja Ulrich Ruisinger [76]. Antud tarkvara on kalibreeritud ja valideeritud arvutusmudelite laborikatsetustega ning tarkvara arendamise käigus ja iga uue mooduli käivitamisel on arvutustulemusi võrreldud laboris mõõdetud tulemustega. Arvutusprogramm Delphin 5 on saanud korduvalt kinnitusi erinevatest allikatest tarkvara sobivuse, vastavuse ja rakendatavuse kohta:

- HAMSTAD (HAM mudeli standard) arvutuskriteeriumid 1 kuni 5 (soojus- ja niiskuslevi probleemid)
- EN 15026:2007 (tarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus)
- EN 10211:2007 (külmasillad hoones)

Soojuse ja niiskuse transpordimudelit, sellega seotud materjale ja kliimaandmete mudeleid on testitud mitmete teadusprojektide raames [28, 30] ja testhoonetes (näit. Umgebendehaus Ebersbachis ja Fachwerkhaus Niedersachsenis, Edemissenis Saksamaal). Programmi on võrreldud ka muude HAM tööriistadega (näit. kasutades HAMSTAD kriteeriume) ning see on hinnatud kui kiireim ja kasutajasõbralikum HAM simulatsioonivahend.

Võrdlusena on esitatud mitmed sarnasel otstarbel kasutuses olevad arvutusprogrammid koos põhiomaduste ja kasutusvõimalustega (vt. Tabel 4):

**Tabel 4.** Enamlevinud tarkvaraprogrammid niiskustehnilisteks arvutusteks [29].

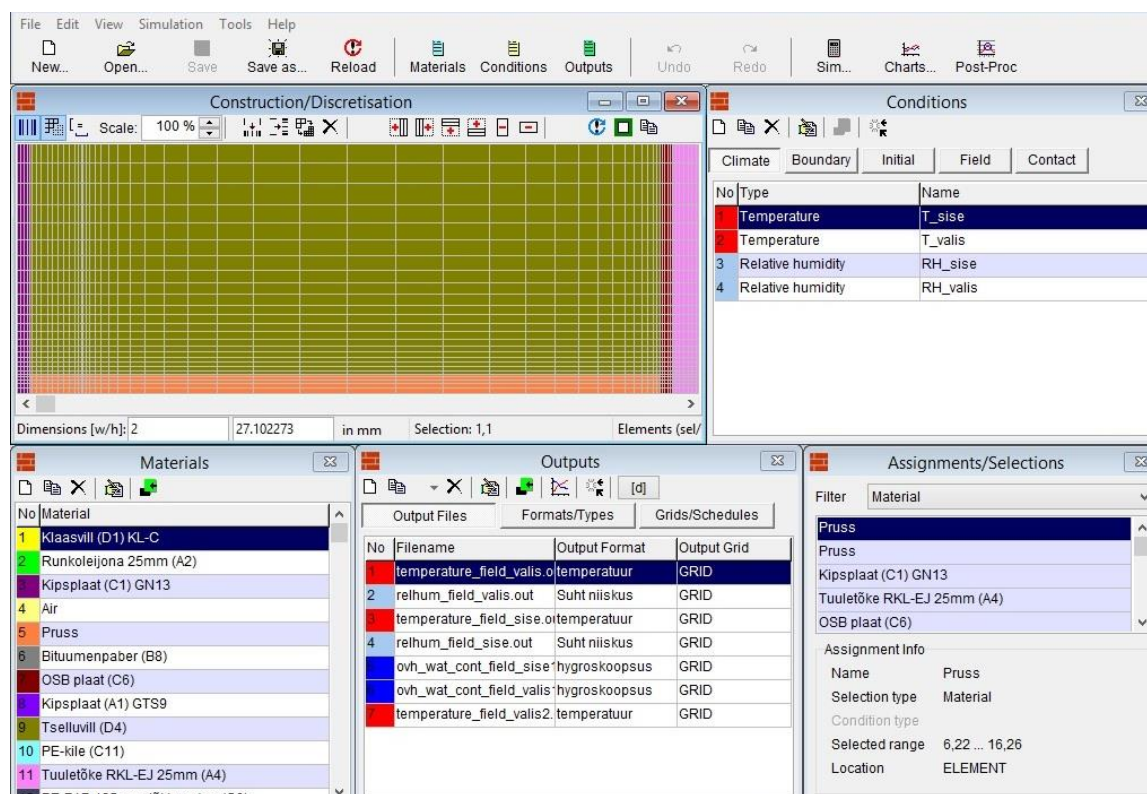
NIMETUS	TÜÜP	ÄÄRETINGIMUSED (VÄLISPINNAL)										ÄÄRETINGIMUSED (SISEPINNAL)			
		Temperatuur	Suhteline niiskus	Õhurõhk	Päikesekiirgus	Tuule kiirus	Tuule suund	Kaldvihm	Pikajärgeline soojuskiirgus	Pilvisus	Veelekked	Temperatuur	Suhteline niiskus	Õhurõhk	Korstnaefekt
1D-HAM	1D HAM	○	○	○	○				○			○	○		
BSim 2000	1D HM	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○	○	
<b>DELPHIN 5</b>	<b>1/2D HAMPS</b>	●	●	○	○	○	○	○	○			●	●	○	
EMPTIED	1D HAM	○	○	○								○	○	○	
GLASTA	1D HM	○	○		○				○			○			
hygIRC-1D	1D HAM	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○		○
HAMLab	1D HAM	○	○			○	○		○	○		○	○		
HAM-Tools	1D HAM	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○	○	
IDA-ICE	1D HAM	○	○	○	○	○	○		○			○	○		
MATCH	1D HAM	○	○		○	○			○	○	○	○	○		
MOIST	1D HM	○	○		○	○	○			○		○	○		
MOIST-EXP.	1/2D HAM	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
UMIDUS	1D HM	○	○		○	○	○					○	○		
WUFI	1/2D HM	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○		
TÜÜBI SELGITUSED	1D, 2D HAM HAMPS HM	Ühemõõtmeline, kahemõõtmeline arvutusmudel Soojuse, õhu ja niiskuse samaaegne transport Soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete samaaegne transport Soojuse ja niiskuse samaaegne transport													

- Käesolevas töös kasutatud ääritingimused

Käesolevas töös on kasutatud tarkvara Delphin 5 versiooni 5.6.8 põhifunktsioone:

- 1D, 2D arvutusmodelid
- Külmasildade ja kondensatsiooni arvutus tarindites
- Niiskuse ja temperatuuri arvutused tarindis
- Soojuslähivuse sõltuvus niiskusest
- Tarindite kuivamine ja niiskumine

Tarkvara abil arvutatud hetkväärtusi saab kuvada graafiliselt järelanalüüsi moodulis koondgraafikutel ja tabelites. Täiendava võimalusena saab kõiki sisestatud ja arvutatud andmeid eksportida-importida, võimaldamaks nende võrdlust andmebaaside või tabelarvutuste abil teiste arvutisimulatsioonide sooritavate arvutusprogrammidega.



**Joonis 11.** Delphin 5 arvutusprogrammi töölaua vaade.

Uuritava piirdetarindi modelleerimiseks ja arvutuste läbiviimiseks määratakse, valitakse ja/või sisestatakse kasutaja poolt arvutusprogrammis järgmised parameetrid [77]:

- Tarindis kasutatud materjalid ja nende omadused
- Tarindi geomeetria (näit. mõõdetud kihtide paksused, paiknemine, ulatus)
- Algtingimused (näit. mõõdetud materjali omadused)
- Ääritingimused (näit. mõõdetud keskkonna- või kliimaandmed)

- Vaadeldavad, uurimisalused omadused
- Soovitud modelleerimistingimused
- Väljundite (väljatrükkide) valik ja sisu

## 7.2. Materjalide omadused

Uurimistöös analüüsitud ehitusmaterjalide alusandmetena on kasutatud arvutustarkvara Delphin 5 andmebaasis olemasolevat materjalide valikut koos vastavate arvnäitajatega. Arvutustarkvara andmebaasis on uurimisaluste materjalide arvnäitajaid modifitseeritud väärtustega, mis on saadud Tampere Tehnikaülikooli põhjalikust uurimusest ehitusmaterjalide ehitusfüüsikalistest omadustest temperatuuri ja suhtelise niiskuse funktsioonina [78].

Eelnimetatud töös olevaid andmeid on täpsustatud uurimistöös andmete abil, mis käsitles kliimamuutuste ja soojustuskihtide paksuste tõstmise mõju hoonete niiskustehnilisele toimivusele [14]. Kõnealustes töödes on uuritud enimkasutatavate materjalide ja tarindite olulisemaid ehitusfüüsikalisi näitajaid, mis vastavad Eestis ehituses kasutatavate toodete omadustele ja ehitustehnoloogiatele.

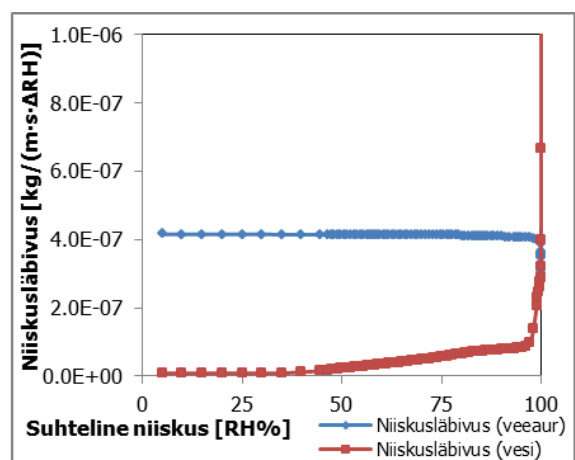
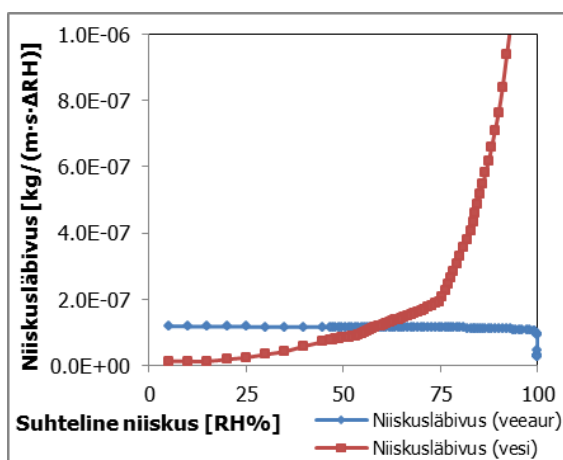
Arvutustes kasutatud materjalide andmed on esitatud järgnevates tabelites (vt. Tabel 5, Tabel 6) ning joonistel (vt. Joonis 12, Joonis 13).

**Tabel 5.** Arvutustes kasutatud ehitusmaterjalide niiskussisaldus [78].

Nimetus [mm] (tüüp)	Materjali niiskussisaldus sorptsioonikõvera alusel ( $m^3/m^3$ ) erineva suhtelise niiskuse korral ( $RH\%$ )					
	33	55	75	83	93	97
Puitkiudplaat Runko 25 mm (A2)	0,0125	0,0200	0,0280	0,0400	0,0650	0,0750
Puitlaastplaat OSB 12 mm (C6)	0,0310	0,0460	0,0780	0,1100	0,1600	0,1800
Kipsplaat GTS 9 mm (A1)	0,0061	0,0084	0,0095	0,0115	0,0182	0,0238
Kipsplaat GN 13 mm (C1)	0,0046	0,0061	0,0072	0,0084	0,0135	0,0180
Mineraalvill RKL 5...105 mm (A3)	0,0002	0,0003	0,0003	0,0010	0,0029	0,0033
Mineraalvill RKL-EJ 25 mm (A4)	0,0004	0,0005	0,0007	0,0017	0,0047	0,0054
Mineraalvill KL-C 50 mm (D1)	0,0004	0,0005	0,0008	0,0010	0,0019	0,0024
Tselluvill 50mm, 37 kg/m <sup>3</sup> (D4)	0,0019	0,0031	0,0048	0,0068	0,0130	0,0150
Tselluvill 50mm, 60 kg/m <sup>3</sup> (D4a)	0,0031	0,0050	0,0078	0,0110	0,0209	0,0246
Saepuru 50 mm (D6)	0,0110	0,0160	0,0240	0,0310	0,0420	0,0480

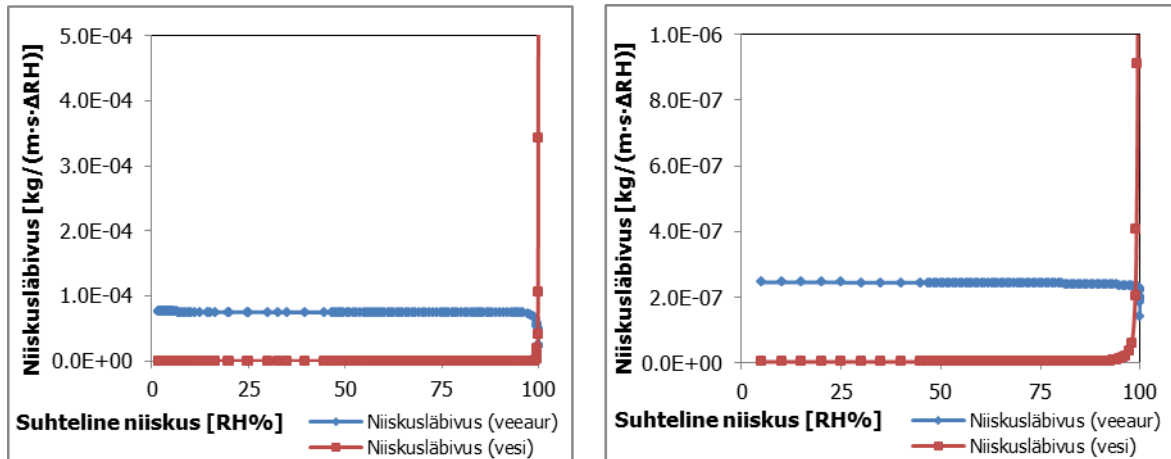
**Tabel 6.** Arvutustes kasutatud ehitusmaterjalide omadused [78].

Nimetus [mm] (tüüp)	Tihedus $\rho$	Poorsus $\psi$	Erisoojus $c$	Kapillaarne niiskus- imavus $A_w$	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Suhteline difusiooni- takistus $S_d$	Soojus- erijuhtivus $\lambda$ ( $\theta = 20\text{ °C}$ ; $RH = 86\%$ )
	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	J/(kg·K)	kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )	-	m	W/(m·K)
Puitlaastplaat OSB 12 mm (C6)	646	0,40	1500	0,0110	200		0,130
Kipsplaat GTS 9 mm (A1)	774	0,60	1100	0,0760	7,9		0,190
Kipsplaat GN 13 mm (C1)	574	0,77	1100	0,0761	6,9		0,210
Puitkiudplaat Runko 25 mm (A2)	280	0,85	2100	0,0054	5,0		0,050
Saepuru 50 mm (D6)	168	0,87	2500	0,1400	2,1		0,064
Tselluvill 37 kg/m <sup>3</sup> 50 mm (D4)	37	0,96	2000	0,0950	1,3		0,049
Tselluvill 60 kg/m <sup>3</sup> 50 mm (D4a)	60	0,95	2000	0,0650	1,5		0,043
Mineraalvill RKL 5...105 mm (A3)	73	0,94	850		1,4		0,031
Mineraalvill RKL-EJ 25 mm (A4)	104	0,90	850		1,8		0,031
Mineraalvill KL-C 50 mm (D1)	22	0,98	850		1,2		0,037
Tuuletõkkemembraan TyvekSoft 1 mm (B2)	247	0,60	1500			0,02	0,200
Bituumenpapp 1 mm (B8)	840	0,60	1500			0,09	0,120
Bituumenpaber 1 mm (B5)	940	0,60	1500			0,15	0,120
PE-PAP jõupaber 1 mm (C15)	990	0,06	1500			1,15	0,120
PE-PAP jõupaber 1 mm (C9)	756	0,06	2000			3,90	0,120
MTP jõupaber 0,5 mm (C7)	940	0,06	2000			5,00	0,120
PE-kile 0,2 mm (C11)	980	0,001	2300			30,0	0,400



**Joonis 12.** Arvutustes kasutatud ehitusmaterjalide niiskusläbivus. Puitkiudplaat (tüüp A2, vasakul) ja tselluvill (tüüp D4, paremal).





**Joonis 13.** Arvutustes kasutatud ehitusmaterjalide niiskusläbivus. Kipsplaat (tüüp C1, vasakul) ja saepuru (tüüp D6, paremal).

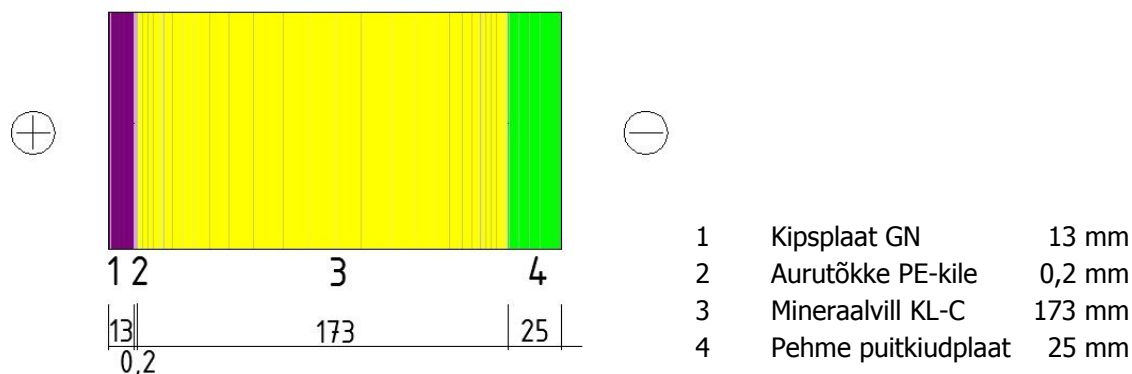
### 7.3. Arvutusmodeli kalibreerimine

Arvutusmudel on kalibreeritud Tampere Tehnikaülikoolis tehtud katsete abil [28]. Mõõtmisandmete fikseerimiseks kasutati kõigis uuritud tarindites soojustuskihtide sise- ja välispinnal elektroonilisi andureid, mille abil fikseeriti etteantud intervalliga mõõdetavad kliima- ja keskkonnanäitajad, mis seejärel salvestati arvutiprogrammi. Arvutustes tehtud lihtsustuste tõttu on võimalikud kõrvalekalded mõõdetud ja arvutatud tulemuste vahel. Võrreldes arvutustulemusi mõõdetud tulemustega, tuleb arvestada, et temperatuuri mõõteviga on  $\pm 0,4$  °C, temperatuuri keskmise väärtuse mõõteviga on  $\pm 0,2$  °C, suhtelise niiskuse ( $RH$ ) mõõteviga on  $\pm 2 \dots 3\%$  ja õhu veeaurisisalduse mõõteviga on  $\pm 0,05 \dots 0,5$  g/m<sup>3</sup>.

Arvutusmodeli kalibreerimiseks oli vaatluse all 3 erinevatest materjalidest koosnevat tarindit (edaspidi sein tüüp 1a, sein tüüp 3a ja sein tüüp 5a).

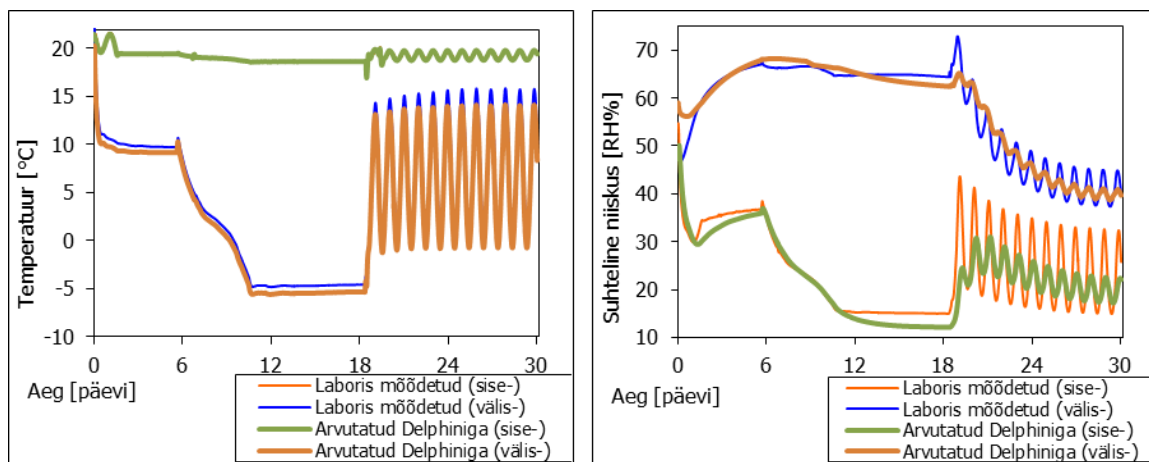
#### 7.3.1. Sein tüüp 1a

Tegemist on puitsõrestikseinaga, milles on kasutatud kandvate vertikaalpostidena männipuidust prusse (ristlõikega 50x173 mm), sammuga c/c 600 mm. Kandvate sõrestikupostide vaheline ruum on täidetud mineraalvillaga KL-C (tihedus 22 kg/m<sup>3</sup>) kogupaksusega 173 mm. Tarindi sisepinnale on paigaldatud PE aurutõkkekile paksusega 0,2 mm ning standardne siseviimistluse kipsplaat GN paksusega 13 mm. Sõrestikupostide välisõhu poolne külg on kaetud tuuletõkkeplaadiga, milleks on puitkiudplaat (tihedusega 280 kg/m<sup>3</sup>) paksusega 25 mm. Tarindi ristlõige ja materjalikihtide paksused on esitatud järgneval joonisel (Vt. Joonis 14).

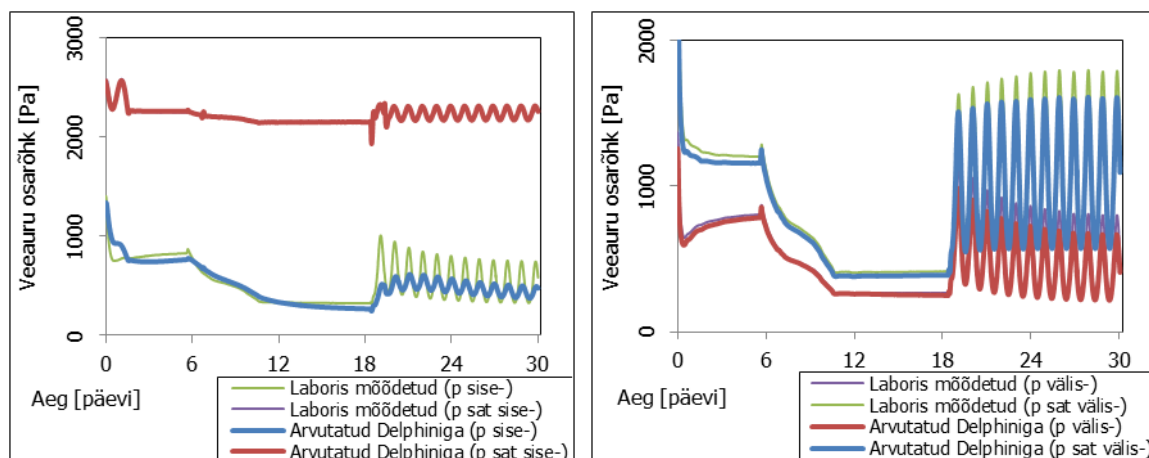


**Joonis 14.** Seina tüüp 1a - ristlõige ja kasutatud materjalid.

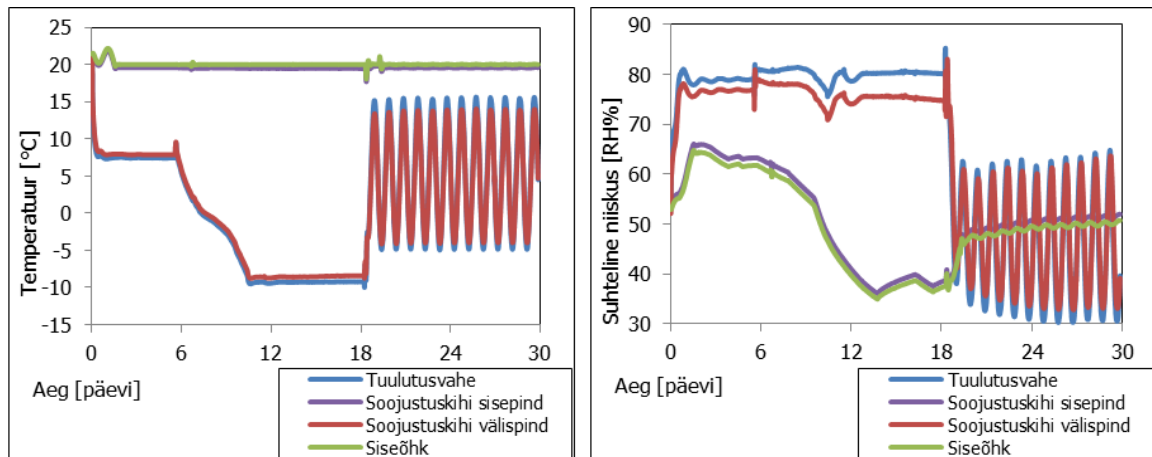
Järgnevatel joonistel on esitatud sein (tüüp 1a) mõõdetud ja arvatatud sise- ja välispinnatemperatuur, veeauru osarõhk, küllastusrõhk, suhteline niiskus ning mõõdetud kliima andmed (temperatuur ja suhteline niiskus).



**Joonis 15.** Sein 1a - Mõõdetud ja arvatatud temperatuur sise- ja välispinnal (vasakul) ning suhteline niiskus sise- ja välispinnal (paremal).



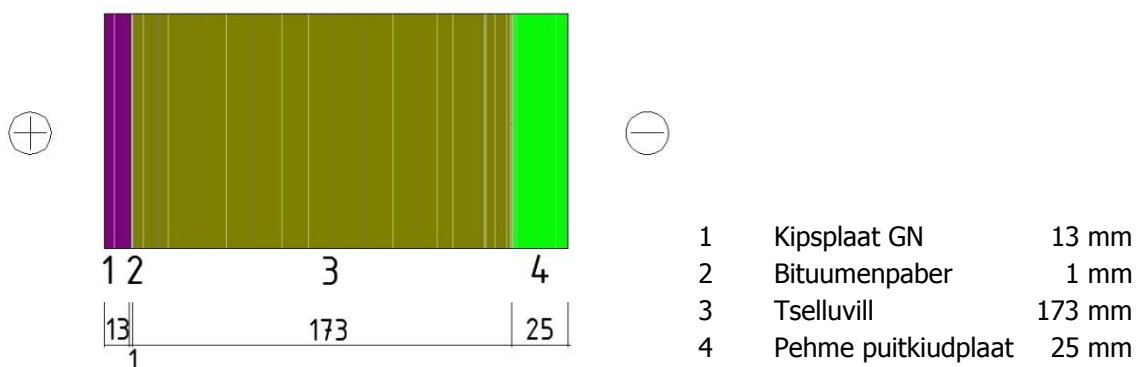
**Joonis 16.** Sein 1a - Mõõdetud ja arvatatud sisepinna (vasakul) ja välispinna (paremal) veeauru osarõhk  $p$  ja küllastusrõhk  $p_{sat}$ .



**Joonis 17.** Sein 1a - Mõõdetud kliima andmed: temperatuur (vasakul) ja suhteline niiskus (paremal).

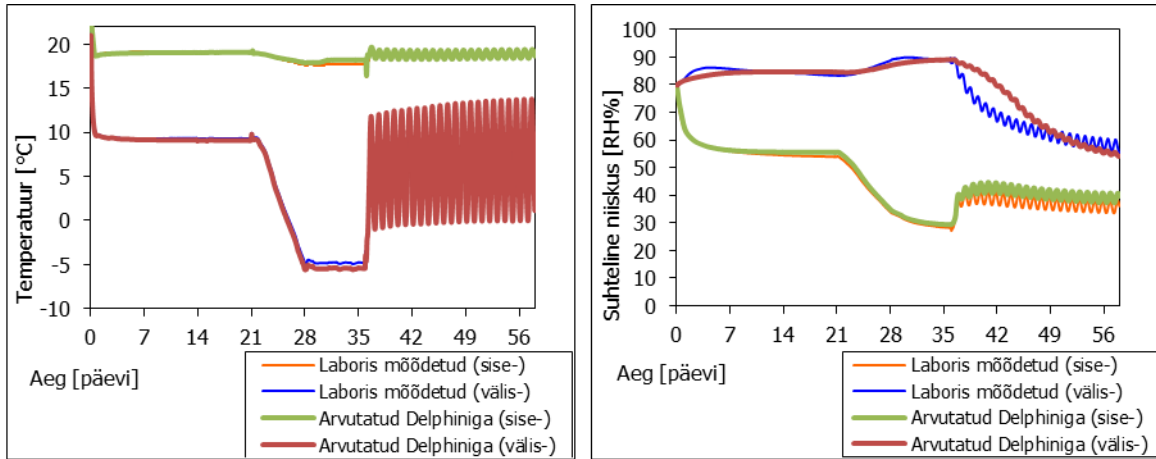
### 7.3.2. Sein tüüp 3a

Tegemist on puitsõrestikseinaga, milles on kasutatud kandvate vertikaalpostidena männipuidust prusse (ristlõikega 50x173 mm), sammuga c/c 600 mm. Kandvate sõrestikupostide vaheline ruum on täidetud tselluvillaga (tihedus 37 kg/m<sup>3</sup>) paksusega 173 mm. Tarindi sisepinnale on paigaldatud bituumeniga töödeldud õhu- ja aurutõkkepaber paksusega 1 mm ning standardne siseviimistluseks kasutatav kipsplaat GN paksusega 13 mm. Sõrestikupostide välisõhu poolne külg on kaetud tuuletõkkeplaadiga, milleks on puitkiudplaat (tihedusega 280 kg/m<sup>3</sup>) paksusega 25 mm. Tarindi ristlõige ja materjalikihtide paksused on esitatud järgneval joonisel (Vt. Joonis 18).

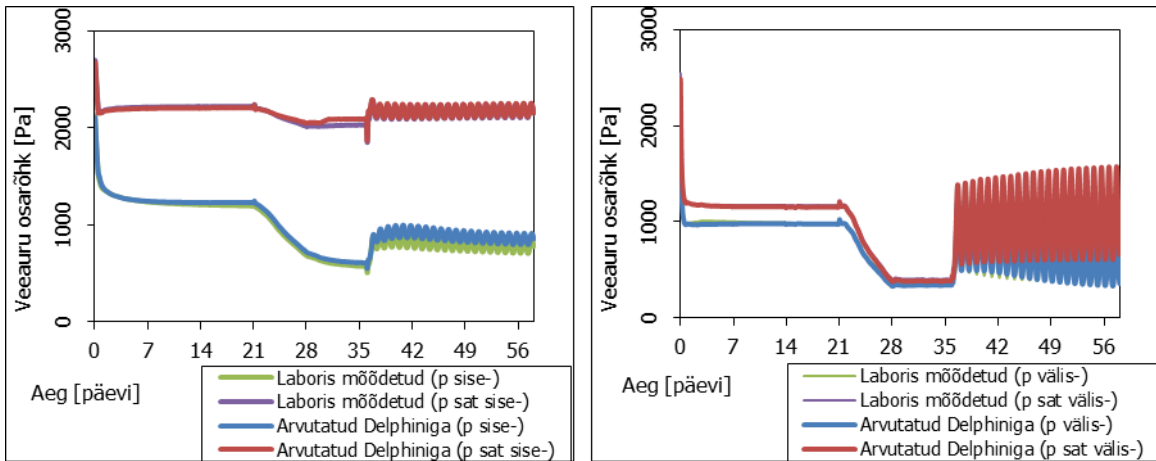


**Joonis 18.** Sein tüüp 3a - ristlõige ja kasutatud materjalid.

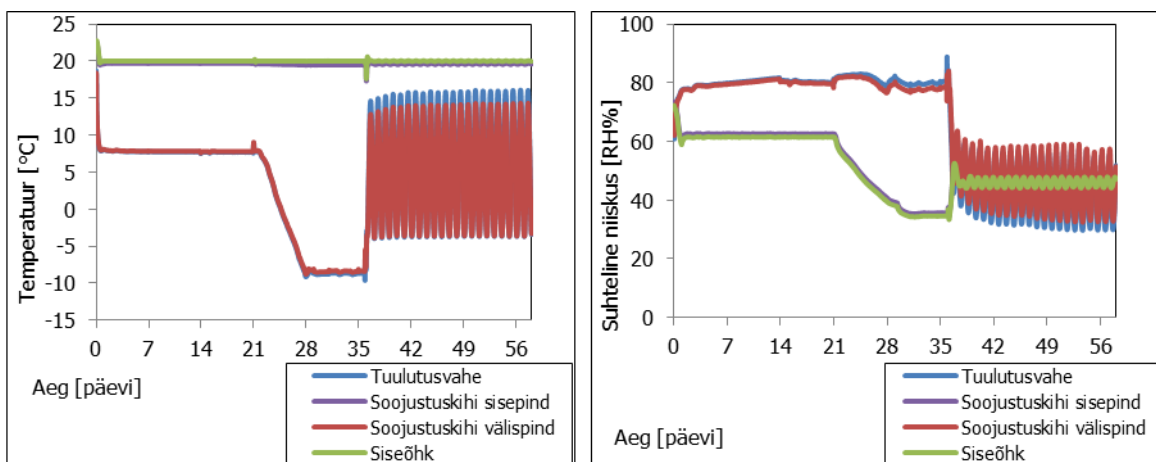
Järgnevatel joonistel on esitatud sein (tüüp 3a) mõõdetud ja arvatud sise- ja välispinnatemperatuur, veeauru osarõhk, küllastusrõhk, suhteline niiskus ning mõõdetud kliima andmed (temperatuur ja suhteline niiskus).



**Joonis 19.** Sein 3a - Mõõdetud ja arvutatud temperatuur sise- ja välispinnal (vasakul) ning suhteline niiskus sise- ja välispinnal (paremal).



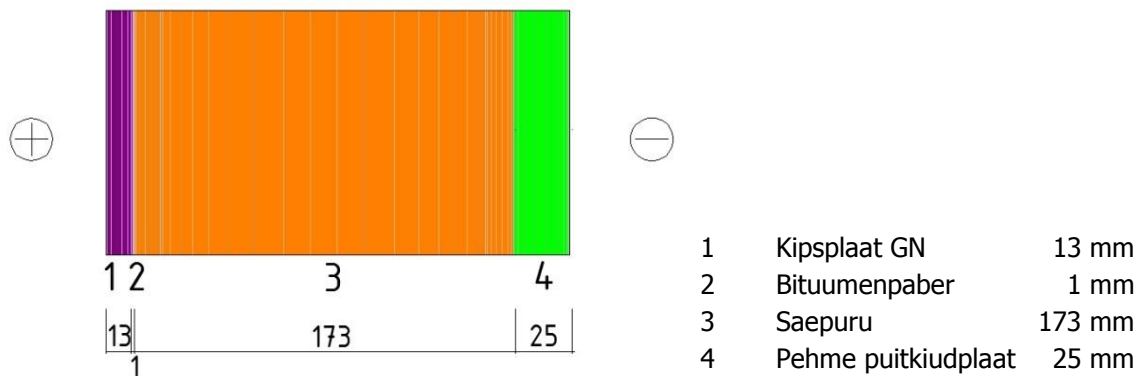
**Joonis 20.** Sein 3a - Mõõdetud ja arvutatud sisepinna (vasakul) ja välispinna (paremal) veeauru osarõhk  $p$  ja küllastusrõhk  $p_{sat}$ .



**Joonis 21.** Sein 3a - Mõõdetud kliima andmed: temperatuur (vasakul) ja suhteline niiskus (paremal).

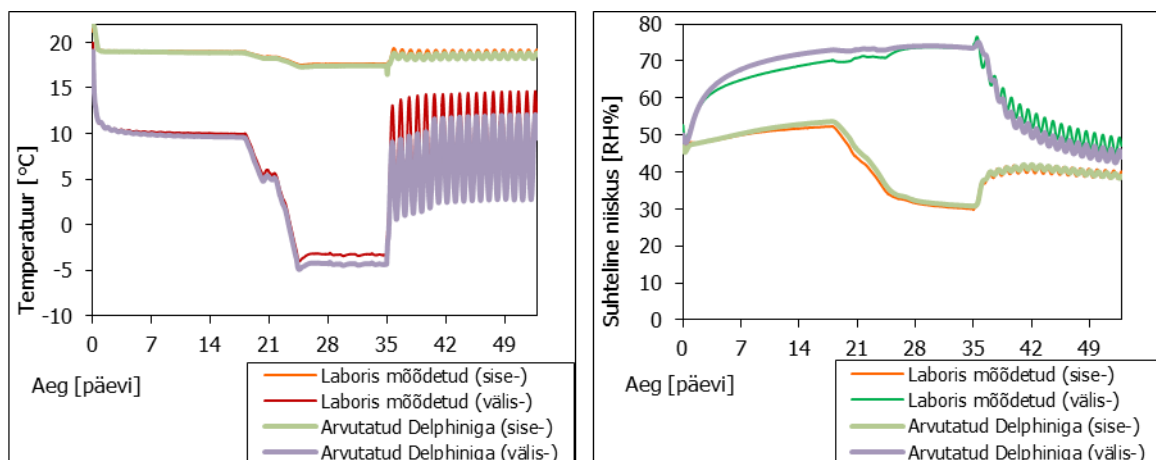
### 7.3.3. Seinä tüüp 5a

Tegemist on puitsõrestikseinaga, milles on kasutatud kandvate vertikaalpostidena männipuidust prusse (ristlõikega 50x173 mm), sammuga c/c 600 mm. Kandvate sõrestikupostide vaheline ruum on täidetud saepuruga (tihedus 168 kg/m<sup>3</sup>) paksusega 173 mm. Tarindi sisepinnale on paigaldatud bituumeniga töödeldud õhu- ja aurutõkkepaber paksusega 1 mm ning standardne siseviimistluseks kasutatav kipsplaat GN paksusega 13 mm. Sõrestikupostide välisõhu poolne külg on kaetud tuuletõkkeplaadiga, milleks on puitkiudplaat (tihedusega 280 kg/m<sup>3</sup>) paksusega 25 mm. Tarindi ristlõige ja materjalikihtide paksused on esitatud järgneval joonisel (Vt. Joonis 22).

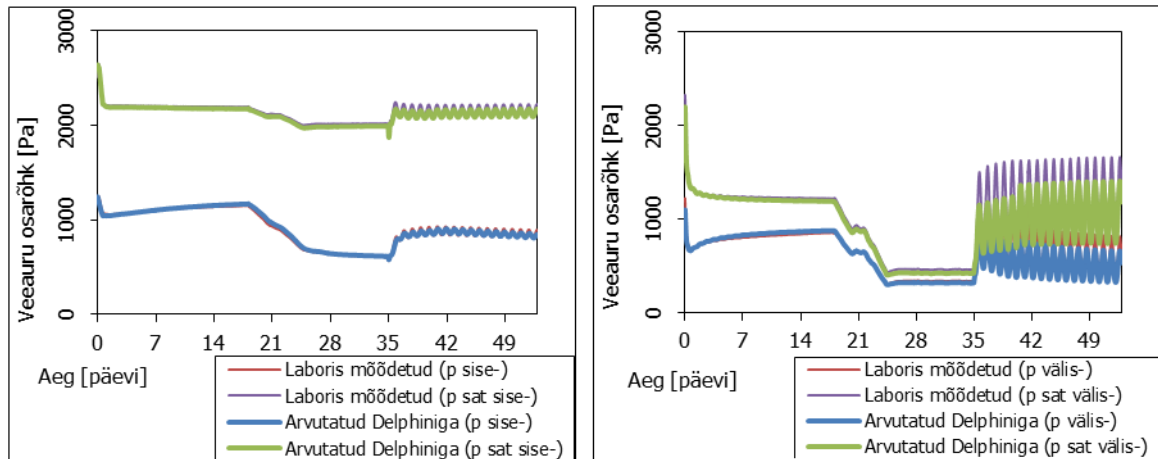


**Joonis 22.** Seinä tüüp 5a - ristlõige ja kasutatud materjalid.

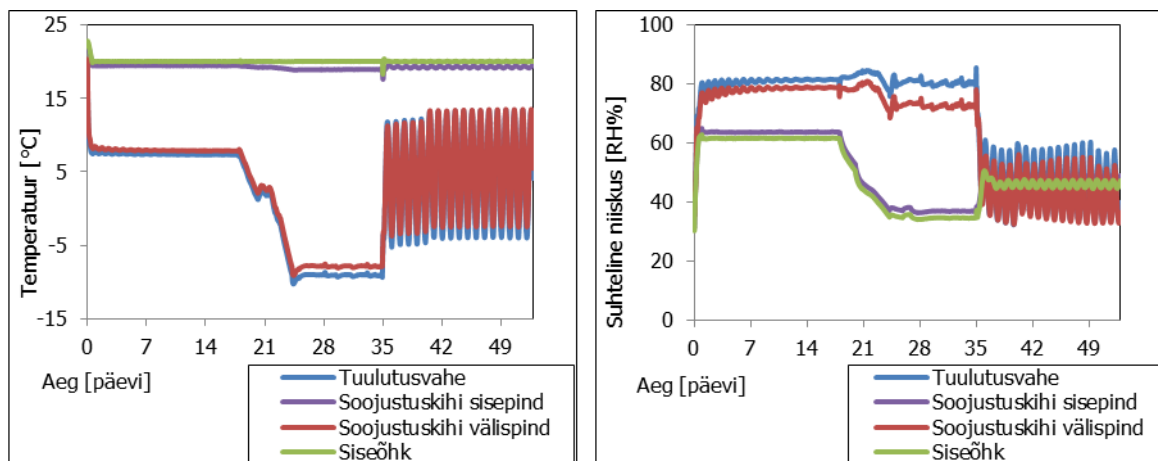
Järgnevatel joonistel on esitatud seinä (tüüp 5a) mõõdetud ja arvutatud sise- ja välispinnatemperatuur, veeauru osarõhk, küllastusrõhk, suhteline niiskus ning mõõdetud kliima andmed (temperatuur ja suhteline niiskus).



**Joonis 23.** Sein 5a - Mõõdetud ja arvutatud temperatuur sise- ja välispinnal (vasakul) ning suhteline niiskus sise- ja välispinnal (paremal).



**Joonis 24.** Sein 5a - Mõõdetud ja arvutatud sisepinna (vasakul) ja välispinna (paremal) veeauru osarõhk  $p$  ja küllastusrõhk  $p_{sat}$ .



**Joonis 25.** Sein 5a - Mõõdetud kliima andmed: temperatuur (vasakul) ja suhteline niiskus (paremal).

Eeltoodud andmete põhjal võib kinnitada, et kasutatud arvutusmudeli abil saadud tulemused ühtivad katsetulemustega, mistõttu on antud andmete ja arvutustarkvara kasutamine edaspidises töös põhjendatud ning vastab tegelikule olukorrale. Edaspidi arvutustes aluseks võetavate andmete ühtlustamiseks niiskustehnilise arvutusprogrammi andmetega on selle andmebaasis olevate materjalide ehitusfüüsikalisi näitajaid kohandatud eelviidatud katsetulemuste andmetega. Aluseks on võetud ning arvutusprogrammi sisse viidud Tabel 5 ja Tabel 6 esitatud andmed.

#### 7.4. Arvutusmeetodid

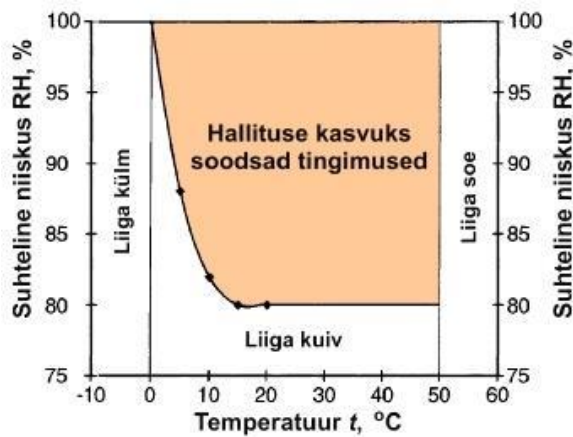
Niiskustehnilises analüüsis on kasutatud standardis EVS-EN 15026:2007 kirjeldatud soojus- ja niiskuslevi hindamise printsiipe mitmekihilistes piirdetarindites, mille mõlemal pool mõjuvad muutuvad kliimatingimused. Rakendatud arvutusmetoodika põhimõtted on järgmised:

- Väliskliima andmetena on kasutatud niiskustehnilise baasaasta (MRY) andmeid. Niiskustehnilisteks arvutusteks ei sobi keskmised kliimaandmed, vaid tuleb kasutada teatud kriteeriumi alusel valitud niiskustehniliselt kriitilisi kliimakoormusi. Seetõttu ei saa niiskustehnilisteks arvutusteks kasutada energiaarvutuste baasaastat (TRY). Veeauru kondenseerumise ja hallituse tekke riski kontrollimiseks hoonete välispiiretes niiskustehniliste arvutuste abil on küllastusvajaku ja hallituse kasvu mudeli abil valitud kaks niiskustehniliselt kriitilist baasaastat: Väike-Maarja 1989-1990 ja Väike-Maarja 1995-1996 [79], vt. ptk. 7.5.1
- vastavalt sisetemperatuuri sõltuvusele välistemperatuurist leitakse arvutuslikud sisetemperatuurid (vt. Joonis 28)
- vastavalt ruumide niiskuskooormusele leitakse niiskuslisa abil siseõhu veeaurusisaldus või veeauru osarõhk (vt. Joonis 29)
- vastavalt temperatuuridele ja veeauru sisaldusele leitakse suhtelised niiskused
- välispiire loetakse niiskustehniliselt toimivaks, kui ei looda hallituse tekkeks sobivaid tingimusi, ei teki veeauru kondenseerumist või muid piiret niiskustehniliselt kahjustavaid tingimusi (näiteks materjaliomaduste oluline muutumine)

Kui veeauru osarõhk ületab küllastusrõhu, hakkab veeaur piirdesse kondenseeruma. Kondensaadi tekke arvutustes on kriitiliseks loetud olukord, kui tarindis paiknevate materjalide poorides on suhteline niiskus  $RH > 97\%$  [19]. Antud piiri saavutamisel ja ületamisel on materjali poorid täitunud veega ning niiskuse difusioon aeglustub ja väljakuivamine on raskendatud.

Samuti ei ole lubatud niiskusest tingitud selliste deformatsioonide ilmnemine, mis võivad kaasa tuua liidete vastupidavuse vähenemise sel määral, et tarindi tugevus või jäikus ei ole tagatud. Kriteeriumitena võib käsitleda ka standardi DIN 4108-3 [80] nõudeid:

- kõrgendatud niiskustasemega perioodil tarindisse akumulunud niiskus saab välja kuivada kuivema perioodi jooksul
- kondenseerumine ei kahjusta tarindis paiknevaid materjale ega soodusta hallituse teket
- tarindi materjali poorides kondenseerunud vee hulk ei ületa 0,5 kg/m<sup>2</sup> kihtide kokkupuute piirkonnas, millest vähemalt üks on kapillaarsele niiskusele vastuvõtlik [81]
- tarindis ei tõuse kõrgendatud niiskuse tasemega perioodil puidu niiskuse tase enam kui 5 mahu% ning puitu sisaldavates toodetes mitte enam kui 3 mahu%



**Joonis 26.** Hallituse kasvuks soodsad keskkonnatingimused [82].

Hallitusseente tekkeks ja kasvuks on vajalik:

- sobiv suhteline niiskus kasvupinnal,  $RH \geq 75 \dots 80\%$
- temperatuur 0 ... +50 °C, arenguks parim temperatuur on +20 ... +35 °C
- sobiv kasvualus, piisavalt toitained, aluselisus  $pH5 \dots pH6$
- sobivate kasvutingimuse esinemise aeg (mida pikema aja jooksul soodsad tingimused hallitusseente kasvuks esinevad, seda intensiivsemalt toimub hallitusseente paljunemine)

Käesolevas töös on kasutatud matemaatilist mudelit [82] hallituse kasvu, taandumise ja hallitusindeksi arvutamiseks muutuvates keskkonnatingimustes, mille on 1990-ndatel välja töötanud Soome VTT teadlased A.Hukka [83] ja H.Viitanen [84] ning mida on hiljem edasi arendatud ja täiendatud [85, 86]. Mudelis on kirjeldatud hallituse kasvu, kiirust ja kriitilisi muutujaid ning arvesse võetud erinevate materjalide tundlikkuse korral hallituse kasvu ja taandumise intensiivsust [87]. Hallituse riskide hindamisel on aluseks



võetud teaduseksperimentide ja -mudelite põhjal koostatud hallitusindeksite klassifikatsioon (vt. Tabel 7).

**Tabel 7.** Hallitusindeksite kirjeldus ja määramise kriteeriumid [82].

Hallitusindeks $M$	Määramise kriteerium	Kriteeriumi kirjeldus
0	Hallitus puudub	Hallituse eoseid ei esine
1	Vähesel määral kasvu on võimalik tuvastada mikroskoobi abil	Seeneniidistiku kasvu algfaas
2	Mõõdukal määral kasvu on võimalik tuvastada mikroskoobi abil	Pinnast on kaetud enam kui 10% (vaadeldav mikroskoobi abil)
3	Vähesel määral kasvu on võimalik tuvastada visuaalselt	Uute eoste loomisfaas
4	Mõõdukal määral kasvu on võimalik tuvastada visuaalselt	Pinnast on kaetud enam kui 10% (vaadeldav visuaalselt)
5	Rohkel määral kasvu on võimalik tuvastada visuaalselt	Pinnast on kaetud enam kui 50% (vaadeldav visuaalselt)
6	Väga suurel määral ja aktiivset kasvu on võimalik tuvastada visuaalselt	Pinnast on kaetud 100% (vaadeldav visuaalselt)

**Tabel 8.** Materjalide hallituse kasvu tundlikkuse klassid ja materjalide näited [87].

Tundlikkuse klass	Materjalide näited
Väga tundlik (ingl.k. <i>very sensitive</i> )	Saetud, rohkelt orgaanilisi toitaineid sisaldav puit
Tundlik (ingl.k. <i>sensitive</i> )	Liimpuit, hõõveldatud puit, puitkiudplaat, puitlaastplaat
Keskmiselt vastupidav (ingl.k. <i>medium resistant</i> )	Betoon, kergbetoon, mineraalvill, polüesterkiud
Vastupidav (ingl.k. <i>resistant</i> )	Klaas, metall, tõhusaid kaitsevahendeid sisaldavad materjalid

Hallituse tekkeks ja kasvuks sobiv kriitiline suhteline niiskus määratakse järgmiselt:

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267 * \theta^3 + 0,16 * \theta^2 - 3,13 * \theta + 100 & \text{kui } \theta \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ RH_{min} & \text{kui } \theta > 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (20)$$

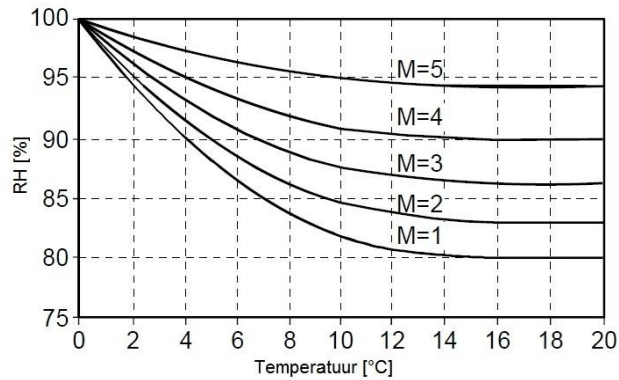
kus  $\theta$  on temperatuur vaadeldaval pinnal ( $^\circ\text{C}$ ) ja  $RH_{min}$  on hallituse tekkeks vajalik minimaalne suhteline õhuniiskus (vt. Tabel 9).

Kui hallitusindeksi  $M$  muutus aja  $t$  jooksul on lineaarne ning aeg on väljendatud nädalates, siis võib hallitusindeksi muutust väljendada diferentsiaalvõrrandina:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\exp(-0,68 * \ln \theta - 13,9 * \ln RH + 0,14 * W - 0,33 * SQ + 66,02)} \quad (21)$$

kus  $\theta$  on temperatuur ( $^\circ\text{C}$ ),  $W$  on puidu tüüp (0 = mänd; 1 = kuusk) ja  $SQ$  on pinna töötlus (0 = saetud; 1 = originaalpind).

Hallitusindeksi suurimad võimalikud väärtused  $M_{max}$  sõltuvalt temperatuurist ja suhtelisest niiskusest on esitatud järgneval joonisel (vt. Joonis 27).



**Joonis 27.** Hallituse kasvuks vajaliku suhtelise niiskuse sõltuvus temperatuurist erinevate hallitusindeksi maksimumväärtuste ( $M_{max}$ ) korral [82].

Arvestamaks hallituse kasvu kiiruse muutust ajas ja taandumise tsüklilisust, tuleb kasutada korrigeerimisfaktoreid  $k_1$  ja  $k_2$ . Kui  $M < 1$ , siis on kasvu kiirus väiksem kui hilisematel perioodidel, mil  $M \geq 1$ . Tegur  $k_1$  on korrigeerimisfaktori, mis korrigeerib hallituse kasvu vahemikus  $0 < M < 3$  ning selle arvutamisel võetakse aluseks referentsmaterjalina männipuit, mille omadused ja hallituse toime on põhjalikult läbi uuritud [85, 87]:

$$k_1 = \begin{cases} \frac{t_{M=1, m\ddot{a}nd}}{t_{M=1}} & \text{kui } M < 1 \\ 2 * \frac{t_{M=3, m\ddot{a}nd} - t_{M=1, m\ddot{a}nd}}{t_{M=3} - t_{M=1}} & \text{kui } M \geq 1 \end{cases} \quad (22)$$

kus  $t_{M=1}$  on reaktsiooniaeg (nädalates) hallituse kasvuks tasemeni  $M = 1$  ja  $t_{M=3}$  on reaktsiooniaeg (nädalates) hallituse kasvuks tasemeni  $M = 3$ .

Tegurid  $t_{M=1}$  ja  $t_{M=3}$  arvutatakse seostest:

$$t_{M=1} = \exp(-0,68 * \ln \theta - 13,9 * \ln RH + 0,14 * W - 0,33 * SQ + 66,02) \quad (23)$$

$$t_{M=3} = \exp(-0,74 * \ln \theta - 12,72 * \ln RH + 0,06 * W + 61,50) \quad (24)$$

Tegur  $k_2$  korrigeerib hallituse kasvukõverat vahemikus  $4 < M < 6$ :

$$k_2 = \max [1 - \exp[2,3 * (M - M_{max})], 0] \quad (25)$$

Hallituse kasvuks soodsate tingimuste ning hallituse kasvu ja taandumise mittelineaarsuse arvesse võtmiseks ühendame valemid (22), (23), (24) ja (25) hallitusindeksi  $M$  muutuse arvutamiseks, kui ajaühikuks on 1 päev:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 * \exp(-0,68 * \ln \theta - 13,9 * \ln RH + 0,14 * W - 0,33 * SQ + 66,02)} * k_1 * k_2 \quad (26)$$

Suurim võimalik hallitusindeksi väärtus  $M_{max}$  leitakse järgmiselt:

$$M_{max} = A + B * \left( \frac{RH_{crit} - RH_i}{RH_{crit} - 100} \right) - C * \left( \frac{RH_{crit} - RH_i}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (27)$$

kus  $A$ ,  $B$  ja  $C$  on tegurid, mis sõltuvad materjali tundlikkuse klassist. Kuna  $M_{max}$  väärtusest sõltub ka tegur  $k_2$ , on materjalide tundlikkuse klasside kaupa antud teguritele  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $k_1$  ja  $k_2$  konstantsed väärtused. Samuti on piiratud  $RH_{min}$  väärtused. Andmed tundlikkuse klasside kaupa on toodud järgnevas tabelis (vt. Tabel 9).

**Tabel 9.** Tegurite väärtused tundlikkuse klassides [87]. Vt. klasside kirjeldused Tabel 8.

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

Kuivemal perioodil muutuvad keskkonnatingimused hallituse kasvule ebasoodsaks (näit.  $RH < RH_{crit}$ ), olemasolev hallitus väheneb ja selle juurdekasv lakkab. Hallituse hulga muutust kuival perioodil ei pruugi visuaalselt küll täheldada, kuid juurdekasvu aeglustumist sel perioodil võib selgelt märgata. Mõningad muutused on tajutavad pärast 6 tunnilist kuiva perioodi, kuid pärast 24 tunni möödumist on mõju selgelt märgatav ning kasvu aeglustumine täheldatav. Hallituse taandumise matemaatiline kirjeldus on antud ajavahemiku kaudu, mis on möödunud kuiva perioodi algusest ( $t - t_1$ ):

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0,00133 & \text{kui } t - t_1 \leq 6 \text{ tundi} \\ 0 & \text{kui } 6 \text{ tundi} < t - t_1 \leq 24 \text{ tundi} \\ -0,000667 & \text{kui } t - t_1 > 24 \text{ tundi} \end{cases} \quad (28)$$

kus  $M$  on hallitusindeks ja  $t$  on aeg tundides.

Hallituse taandumise arvutamisel tuleb arvestada ka materjalide erinevaid omadusi ja toimet. Selleks on mudelis puidust erinevate materjalide jaoks kasutusel materjali hallituse taandumistegur  $C_{mat}$ , mis arvestab materjalide hallituse taandumise intensiivsust ning selle erinevust võrreldes referentsmaterjali – männipuiduga:

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{mat} = C_{mat} * \left(\frac{dM}{dt}\right)_0 \quad (29)$$

kus  $C_{mat}$  on materjali hallitusindeksi taandumistegur,  $(dM/dt)_0$  on referentsmaterjali – männipuidu – hallituse taandumise kiirus. Järgnevas tabelis (vt. Tabel 10) on  $C_{mat}$  väärtused, mis on saadud eksperimentaalselt antud mudeli väljatöötamisel (Ojanen et al 2010).

**Tabel 10.** Materjali hallituse taandumistegurid [87].

Taandumistegur $C_{mat}$	Taandumisteguri kirjeldus võrreldes referentsmaterjaliga
1,00	Töötlemata puit, sarnased omadused männipuidule
0,50	Keramsiitplokid, madalam taandumise tempo
0,25	Betoon, mineraalvill, PUR, oluliselt madalam taandumise tempo
0,10	Kergetoon, EPS, polüesterkiud, taandumine peaaegu puudub

Hallitusindeksi kriitiline väärtus niiskustehniliste arvutuste põhjal hallituse vältimiseks tarindi külma välisõhu poolisel pinnal on  $M \leq 2,3$  [28]. Käesolevas töös on hallitusindeksi kriitiline väärtus hallituse vältimiseks tarindi sees seatud tasemele  $M < 1$  [88] vastavalt hallitusindeksi mudelile (vt. Tabel 7). Lisaks on analüüsis kriitiliste tingimustena kasutatud standardis EVS-EN 15026 antud piirväärtusi (vt. Joonis 28 ja Joonis 29):

- Niiskuslisa  $\Delta v = 1 \dots 2 \text{ g/m}^3$  (soojal perioodil, kui  $t_e \geq +20 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- Niiskuslisa  $\Delta v = 4 \dots 6 \text{ g/m}^3$  (külmal perioodil, kui  $t_e \leq +5 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Niiskuslisa normväärtuste näiteid külmal perioodil:

- $\Delta v 4 \text{ g/m}^3$ : Eluruumid asustustihedusega  $> 30 \text{ m}^2$  inimese kohta
- $\Delta v 6 \text{ g/m}^3$ : Eluruumid asustustihedusega  $< 30 \text{ m}^2$  inimese kohta

Analüüsitud on eeltoodud niiskuskiitiliste tingimuste täitmist tarindis, et saada infot selle kohta, millistel teguritel on kõige kriitilisem mõju:

- Piirdetarindis erinevate soojustusmaterjalide kasutamisel
- Piirdetarindi soojuslähivuse samm-sammulisel muutmisel
- Soojustuskihi välispinnal paikneva tuuletõkkekihi veeaurutakistuse muutmisel

- Soojustuskihi välispinnal paikneva tuuletõkkekihi soojustakistuse muutmisel
- Tarindis paikneva õhu- ja aurutõkkekihi veeaurutakistuse muutmisel
- Tarindis paiknevate materjalide kapillaarse niiskusimavuse muutmisel
- Tarindis paiknevate materjalide algniiskuse muutmisel

## 7.5. Kliima, algingimused, ääritingimused

Hoone piirdetarindite hindamisel lähtutakse kõige raskematest tingimustest, mis võiksid hoone kasutamisel esineda. Kliimatingimused on valitud vastavalt standarditele EVS-EN ISO 13788, EVS-EN 15026 ja niiskustehnilisele baasaastale (MRY).

### 7.5.1. Väliskliima

Väliskliima andmete aluseks on kahe niiskustehnilise baasaasta (MRY) tunniandmed, mis on kriitilised Väike-Maarjas 1989.a. juulikuust kuni 1990.a. juunikuuni hallituse tekke riskide hindamiseks ning 1995.a. juulikuust kuni 1996.a. juunikuuni kondenseerumise riskide kontrollimiseks [79]. Niiskustehniliste baasaastate kuude keskmised väärtused on antud järgnevas tabelites (vt. Tabel 11 ja Tabel 12).

**Tabel 11.** Niiskustehnilise baasaasta kuu keskmised väärtused hallituse vältimise kontrollimiseks, Väike-Maarja 1989-1990 [79].

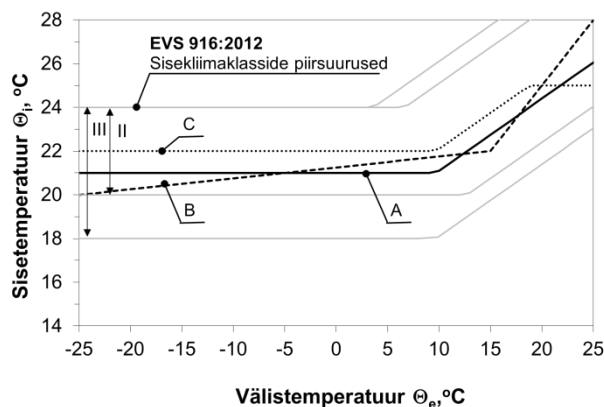
Kuu nimetus	Õhutemperatuur	Suhteline niiskus	Tuule kiirus	Sademed
	°C	%	m/s	mm
Juuli	16,7	71	3	83
August	14,2	84	4	125
September	11,2	89	3	41
Oktoober	5,2	89	4	87
November	0	92	5	55
Detsember	-4,7	89	5	40
Jaanuar	-3,1	90	5	62
Veebruar	1,4	91	6	94
Märts	1,4	79	5	63
Aprill	6,9	65	4	11
Mai	9,5	65	4	31
Juuni	13,8	70	3	31

**Tabel 12.** Niiskustehnilise baasaasta kuu keskmised väärtused veeauru kondenseerumise kontrollimiseks, Väike-Maarja 1995-1996 [79].

Kuu nimetus	Õhutemperatuur	Suhteline niiskus	Tuule kiirus	Sademed
	°C	%	m/s	mm
Juuli	15,4	72	4	68
August	15,1	77	3	81
September	10,4	85	3	54
Oktoober	7,6	88	4	80
November	-1,8	86	4	62
Detsember	-7,9	87	3	28
Jaanuar	-8,3	90	3	8
Veebruar	-11,8	83	4	28
Märts	-3,9	72	3	12
Aprill	3,4	69	3	25
Mai	9,4	73	4	73
Juuni	13,3	75	3	43

### 7.5.2. Sisekliima

Sisekliima parameetrid on valitud vastavalt standarditele EVS-EN ISO 13788 ja EVS-EN 15026 jäljendamaks Eesti elamute sisekliimat (vt. Joonis 28 ja Joonis 29). Temperatuuri ja niiskuslisa arvutusgraafikutest on leitud arvutuslik sisetemperatuur ja arvatud suhteline niiskus. Arvestatud on niiskuslisaga  $\Delta v = 6 \text{ g/m}^3$  (külmal perioodil,  $t_e \leq +5 \text{ °C}$ ) ja  $\Delta v = 2 \text{ g/m}^3$  (soojal perioodil,  $t_e \geq +20 \text{ °C}$ ). Vahepealsed niiskuslisa väärtused ( $+5 \text{ °C} < t_e < +20 \text{ °C}$ ) on leitud lineaarse interpoleerimise abil. Arvestatud on ka sise- ja välisõhurõhkude erinevusega 10 Pa, mis võtab arvesse summeritud õhu tiheduste erinevuse, tuule mõju ja ventilatsiooni mõju külmal perioodil.



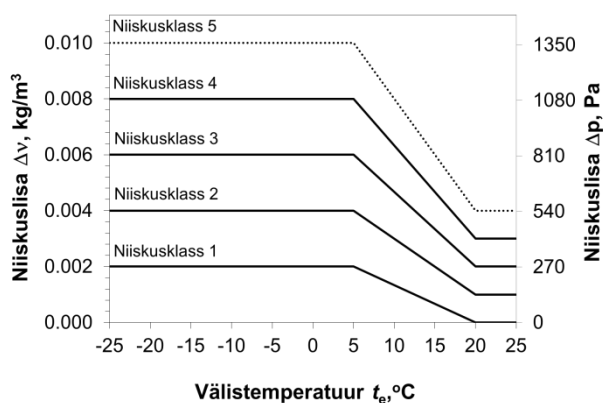
**Tüüpolukord A:** Välistemperatuuri abil juhitud elamu keskküttesüsteem vanemates (näiteks < 2000.a. ehitatud) elamutes

**Tüüpolukord B:** Lokaalne küte

**Tüüpolukord C:** Välistemperatuuri abil juhitud elamu keskküttesüsteem uuemates (näiteks  $\geq 2000.a.$  ehitatud) elamutes + jahutus

**Joonis 28.** Arvutusliku sisetemperatuuri sõltuvus välistemperatuurist standardi EVS-EN 15026 rakendamisel elamute projekteerimisel Eestis (EVS-EN 15026). Käesolevas töös on kasutatud tüüpolukorra B väärtusi.

Hoonete projekteerimisel Eestis kasutatakse niiskukoormuste määramisel Joonis 29 esitatud niiskuslisa sõltuvust välistemperatuurist. Niiskuslisa on suveperioodil eeldatavalt väiksem, tulenevalt suvisest suuremast ruumide ventileerimisest ja võimalikust väiksemast niiskustootlusest (näiteks elamute juures pesu kuivatus õues). Niiskusklassid 1, 2 ja 3 on saadud Eestis tehtud mõõtmistest ning niiskusklassid 4 ja 5 on saadud ekstrapoleerimise teel (suurem niiskustootlus). Arvutuslikud niiskuslisa väärtused on saadud Eesti elamute mõõtetulemustest 90% kvantiili tasemel [8, 9, 10, 11, 12].



**Niiskusklass 5:** Spordihallid, köögid, sööklad

**Niiskusklass 4:** Eriotstarbelised hooned, näit. pesumajad, pruulikojad, basseinid

**Niiskusklass 3:** Teadmata niiskukoormusega elamud; eluruumid asustustihedusega < 30 m<sup>2</sup> inimese kohta

**Niiskusklass 2:** Eluruumid asustustihedusega > 30 m<sup>2</sup> inimese kohta

**Niiskusklass 1:** Väga väikese niiskustootlusega uued mittelelamud: töö- ja õpperuumid jms.

**Joonis 29.** Arvutusliku niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist Eesti hoonetel (EVS-EN 15026). Käesolevas töös on kasutatud niiskusklassi 3 väärtusi.

### 7.5.3. Algtingimused

Tarindite analüüsimisel on algtingimusteks valitud niiskustehnilise baasaasta (MRY) tunniandmed nii hallituse tekke kui veeauru kondenseerumise riskide hindamisel (vt. ptk. 7.5.1 ja ptk. 7.5.2). Arvutused on tehtud erinevate ehituse algusaegade alusel, saamaks võrdlusandmeid võimalike erinevuste kohta sõltuvalt algniiskusest ja väljakuivamise kestusest lähtuvalt tarindi püstitamise algusajast:

Arvutusperiood 1: alates aasta algusest, jaanuar – detsember (12 kuud)

- Algniiskus  $RH = 85\%$
- Algtemperatuur  $\theta = +10$  °C
- Niiskuslisa  $\Delta v = 1$  g/m<sup>3</sup> (soojal perioodil); 4 g/m<sup>3</sup> (külmal perioodil)

Arvutusperiood 2: alates aasta teisest poolest, juuli – juuni (12 kuud)

- Algniiskus  $RH = 80\%$
- Algtemperatuur  $\theta = +22$  °C
- Niiskuslisa  $\Delta v = 1$  g/m<sup>3</sup> ; 4 g/m<sup>3</sup>

Arvutusperiood 3: alates aasta algusest, jaanuar – detsember (12 kuud)

- Algniiskus  $RH = 85\%$

- Algtemperatuur  $\theta = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Niiskulisla  $\Delta v = 2\text{ g/m}^3$  ;  $6\text{ g/m}^3$

Arvutusperiood 4: alates aasta teisest poolest, juuli – juuni (12 kuud)

- Algniiskus  $RH = 80\%$  ;  $90\%$
- Algtemperatuur  $\theta = +22\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Niiskulisla  $\Delta v = 2\text{ g/m}^3$  ;  $6\text{ g/m}^3$

#### 7.5.4. Ääritingimused

Tarindite analüüsimisel on ääritingimusteks valitud algtingimustest sõltuvad soojuslähivus ja veeauru difusioon. Arvutusprogramm Delphin 5 arvutab ette antud andmete alusel:

- piirdetarindi soojuslähivuse tarindi materjalide soojuseri juhtivuse ning sise- ja väliskliima tunniandmete (temperatuurinäitude) põhjal
- piirdetarindi veeauru difusiooni tarindi materjalide niiskussisalduse, veeauru juhtivuse ning sise- ja väliskliima tunniandmete (temperatuurinäitude ja suhtelise niiskuse näitude) põhjal.

#### 7.6. Analüüsitud madal- ja liginullenergiatarindid

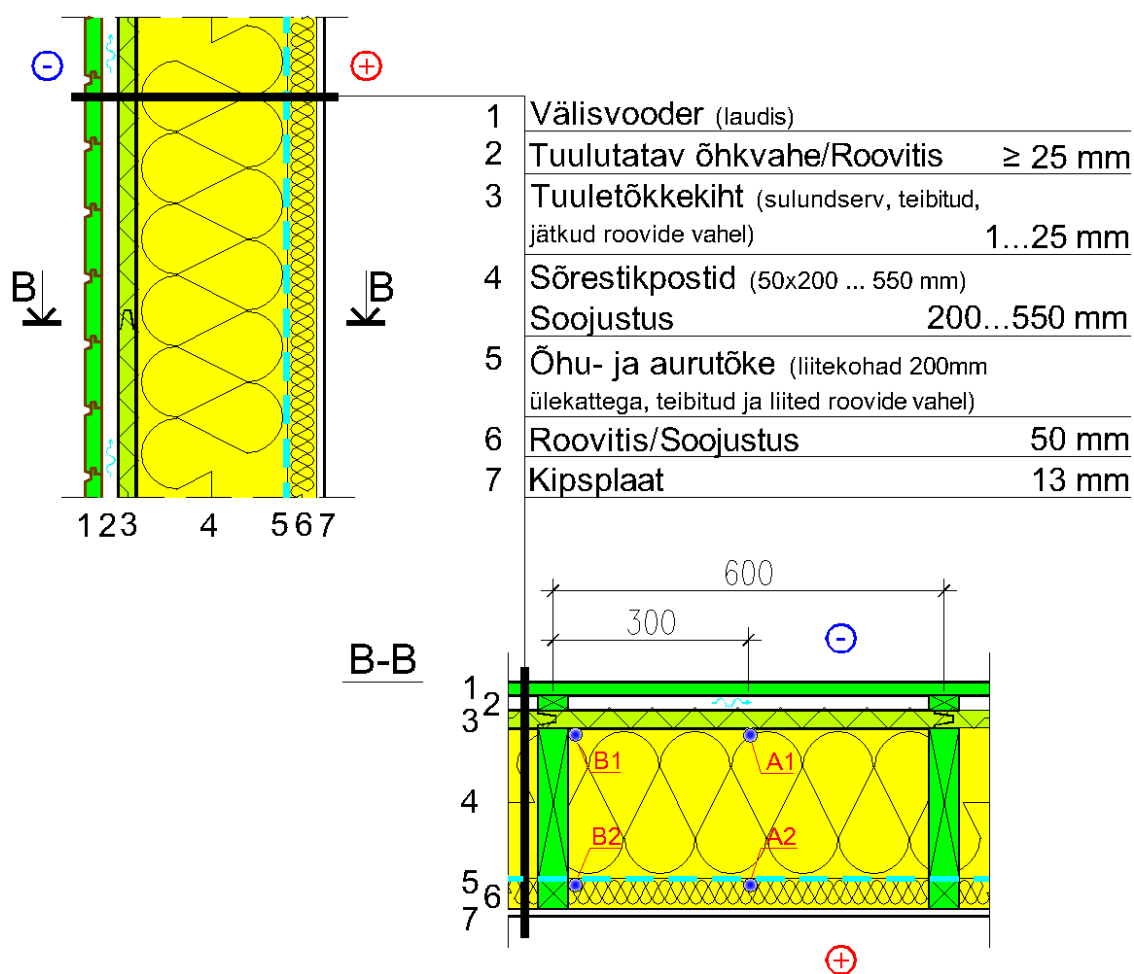
Uurimistöös on analüüsitud puitsõrestikseina tarindeid erinevate soojustusmaterjalide ja nende paksuste korral, kui seinaga soojuslähivus  $U = 0,08$ ;  $0,10$ ;  $0,12$ ;  $0,14$  ja  $0,17\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Analüüsitud madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseinte soojuslähivuste arvutamisel on lähtutud järgmistest soojustuskihtide paksustest mineraalvillast ja tselluvillast soojustuskihtide korral:

**Tabel 13.** Analüüsitud puitsõrestikseinte soojustuskihtide paksused arvutuste läbiviimisel.

Soojuslähivus	Mineraalvill [mm]			Tselluvill [mm]		
	Siseviimistluse ja õhu- ja auru- tõkkekihi vahel	Õhu- ja aurutõkkekihi ning tuuletõkke vahel	KOKKU	Siseviimistluse ja õhu- ja auru- tõkkekihi vahel	Õhu- ja aurutõkkekihi ning tuuletõkke vahel	KOKKU
0,17	50	200	250	50	200	250
0,14	50	250	300	50	250	300
0,12	50	300	350	50	300	350
0,10	50	400	450	50	400	450
0,08	50	550	600	50	550	600



Niiskustehniliste näitajate võrdlemiseks ja nende mõju analüüsimiseks on tarindites kasutatud erinevaid soojustusmaterjale (mineraalvill, tselluvill), auru- ja õhutõkke-materjale (polüetüleenkile, polüetüleeniga töödeldud jõupaber, bituumenpapp ja -paber) ja tuuletõkkekematerjale (puitkiudplaat, tihed mineraalvillaplaat, polümeerist tuuletõkkekemembraan, tuuletõkke kipsplaat, puitlaastplaat), neid omavahel kombineerides. Kasutatud materjalide tehnilised näitajad on toodud eespool (vt. Tabel 5 ja Tabel 6). Arvutuste sooritamiseks valiti tarindi ristlõikes (vt. Joonis 30) esmalt võimalike suurimate niiskuskooormuste ja kriitiliste temperatuuridega mõõtepunktid A1, A2, B1 ja B2.



**Joonis 30.** Vaadeldav piirdetarind ja niiskustehniliseks analüüsiks valitud mõõtepunktid A1, A2, B1 ja B2 välispiirdes.

Uuritud puitsõrestikseintes (vt. Joonis 30) on kasutatud kandvate vertikaalpostidena männipuidust prusse sammuga c/c 600 mm (ristlõikega 50x200 mm) või komposiitposte (kus 50x200 mm prusside küljel paikneb jäik puitlaastplaat), sõltuvalt põhisoojustuskihi paksusest ja otstarbekusest. Lisaks kandvatele postidele on ruumipoolsel küljel täiendav männipuidust roovitis sammuga c/c 600 mm (ristlõikega 50x50 mm). Kandvate

sõrestikupostide ja 50 mm roovide vaheline ruum on täidetud kerge mineraalvillaga (tihedus 22 kg/m<sup>3</sup>), kuivpaigaldatud tselluvillaga (tihedus 37 kg/m<sup>3</sup>) või märgpaigaldatud tselluvillaga (tihedus 60 kg/m<sup>3</sup>; veesisaldus paigaldusel ≈ 25 kg/m<sup>3</sup>) kogupaksuses 250 ... 600 mm (vastavalt tarindi soojuslähivusele). Kandvate postide ja täiendava 50 mm roovitise vahel paikneb õhu- ja aurutõkkekiht (kleebitud vuugid ülekattega 200 mm, mis paiknevad roovitisel). Seinä sisepinda katab 13 mm standardne siseviimistluse kipsplaat. Sõrestikupostide välisõhu poolne külg on kaetud tuuletõkkekihiga, mille liitekohad paiknevad kandvatel sõrestikupostidel.

Arvutused tehti järgmiste parameetrite kontrollimiseks:

- Hallitusindeksi  $M$  väärtus (lubatud piirväärtus vaadeldavas punktis  $M < 1$ )
- Kondensaadi hulk ja kondensaadi ajaline kestus (piirväärtuseks kondenseerunud vee hulk  $< 0,5 \text{ kg/m}^2$ , kondenseerumise kestuse aeg päevades)
- Niiskuse väljakuivamise kiirus (tasemeni  $RH = 75\%$ , aeg päevades)

Kontrollarvutuste läbiviimisel erinevate niiskuskooormuste ja ehituse algusaegade põhjal ning saadud tulemuste võrdlemisel selgus, et nii hallituse kui kondensaadi tekkeks tuleb kriitiliseks lugeda perioodi alates kalendriaasta teisest poolest. See on tingitud asjaolust, et antud perioodi alguses (suvi ja varasügis) on välistemperatuurid ja õhus sisalduva absoluutse niiskuse hulk maksimaalsel tasemel. Tarindite kinnikatmine ei võimalda neil enne temperatuuritasemete langust talve- ja kevadperioodideks, kui suhteline niiskus on väga kõrge, välja kuivada. Suletud tarindis paiknev ehitusniiskus ning siseruumidest lisanduv veeauru hulk võivad sobimatu materjalide valiku korral viia kiiresti hallituse ja kondensaadi tekkeni tarindis [89]. Lähtuvalt valitud arvutusperioodist nr. 4 (vt. ptk. 7.5.3) on arvutustes algtemperatuuriks valitud  $\theta = +22 \text{ }^\circ\text{C}$ , algniiskuseks  $RH = 80\%$  ja  $90\%$  ning niiskuslisa  $\Delta v \leq 2 \text{ g/m}^3$  (soojal perioodil,  $t_e \geq +20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ja niiskuslisa  $\Delta v \leq 6 \text{ g/m}^3$  (külmal perioodil,  $t_e \leq +5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Tarindi sisepinnale lähemal, vahetult õhu- ja aurutõkkekihi ning soojustuskihi kokkupuutejoonel asuvates punktides A2 ja B2 on kogu vaadeldud perioodi vältel temperatuur ja suhteline niiskus tasemel, mille juures antud kliima- ja algtingimustel arvutatud hallitusindeksi väärtus jäi allapoole kriitilist piiri, sõltuvalt seinä soojuslähivusest, vahemikku  $0,05 < M < 0,25$  ning arvutustulemuste põhjal niiskuse kondenseerumist antud punktides ei toimunud.

Välispiirde tuuletõkke- ja soojustuskihi kokkupuutejoonel puitsõrestiku posti kõrval paiknevas punktis B1 on temperatuur suhteliselt kõrge puitpostide soojuslähivusest

tingituna, suhteline niiskus madal ning seetõttu ei ole seal soodsaid tingimusi hallituse tekkeks ja niiskuse kondenseerumiseks.

Punktis A1, mis paikneb puitsõrestiku kandvate püstpostide vahel, tuuletõkke- ja soojustuskihi kokkupuutejoonel, on temperatuur võrreldes muude vaadeldud kriitiliste piirkondadega madalam, seetõttu on ka suhtelise niiskuse tase märgatavalt kõrgem ning eeldused niiskuskahjustuste tekkeks kõige suuremad. Hallitusindeksi ja kondensaadi tekke arvutusteks loeti andmeid punktis A1, algniiskusega  $RH = 80\%$  ning niiskuse väljakuivamise arvutusteks punktis A1 ja B1, algniiskusega  $RH = 80\%$  ja  $90\%$ . Ülejäänud punktides, kui mittekriitilistes, andmete edasist kogumist läbi ei viidud. Kokku arvutati ja analüüsiti üle 500 erineva arvutusolukorra hallituse ja kondensaadi tekke ning niiskuse väljakuivamise tingimuste uurimiseks.

### 7.6.1. Niiskustehniliste arvutuste baastarind

Analüüsitavate seinakonstruktsioonide võrdlemisel on baastarindiks valitud sulundservadega, 22 mm puitkiud-tuuletõkkeplaadiga Steico (tüüp A2 analoog;  $Z_p = 5,56E+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 4,08E+03 \text{ s}/\text{m}$ ; vt. Tabel 5 ja Tabel 6) kaetud ja 250 mm mineraalvillaga (tüüp D1;  $Z_p = 1,52E+09 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 1,11E+04 \text{ s}/\text{m}$ ) soojustatud puitsõrestiksein (vt. Joonis 31), soojusläbivusega  $U_{\text{soojustus min.vill}} = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Õhu- ja aurutõkkekihina on kasutatud polüetüleeniga töödeldud PE-jõupaberit (tüüp C15;  $Z_p = 5,81E+09 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 4,26E+04 \text{ s}/\text{m}$ ). Siseviimistluseks on kasutatud standardset 13 mm kipsplaati (tüüp C1;  $Z_p = 4,53E+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 3,33E+03 \text{ s}/\text{m}$ ). Antud kliima- ja algtingimustes on baastarindi hallitusindeks  $M = 0,99$ .



**Joonis 31.** Niiskustehnilisteks arvutusteks valitud baastarind;  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $M = 0,99$ .

### 7.6.2. Analüüsitud puitsõrestikseinad hallitusindeksi arvutamiseks

Hallitusindeksi  $M$  väärtused arvutati eelpool kirjeldatud puitsõrestikseintele soojuslähivusega  $U = 0,08; 0,10; 0,12; 0,14$  ja  $0,17$  W/(m<sup>2</sup>·K). Nimetatud tarindites on kasutatud erinevate soojustus-, tuuletõkke-, õhu- ja aurutõkkematerjalide kombinatsioone (materjalide andmed vt. Tabel 5 ja Tabel 6):

#### Siseviimistluskiht:

- variant 1: 13 mm, standardne kipsplaat (tüüp C1)

#### Soojustus (kihi paksus vastavalt tarindi soojuslähivusele):

- variant 1: 250 ... 600 mm, mineraalvill (D1)
- variant 2: 250 ... 600 mm, tselluvill (D4)
- variant 3: 250 ... 600 mm, tselluvill (D4a)

#### Õhu- ja aurutõke:

- variant 1: 1 mm, bituumenpapp (B8)
- variant 2: 1 mm, bituumenpaber (B5)
- variant 3: 1 mm, PE-jõupaber (C15)
- variant 4: 1 mm, PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 1,25$  m)
- variant 5: 1 mm, PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 1,35$  m)
- variant 6: 1 mm, PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 1,55$  m)
- variant 7: 1 mm, PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 2,20$  m)
- variant 8: 1 mm, PE-jõupaber (C9)
- variant 9: 0,5 mm, PE-jõupaber (C7)
- variant 10: 0,2 mm, PE-kile (C11)

#### Tuuletõke:

- variant 1: 22 mm, puitkiudplaat (A2 analoog)
- variant 2: 25 mm, mineraalvillaplaat (A4)
- variant 3: 9 mm, tuuletõkke kipsplaat (A1)
- variant 4: 12 mm, puitlaastplaat (C6)
- variant 5: 1 mm, tuuletõkkemembraan (B2)
- variant 6: 9+25 mm, tuuletõkke kipsplaat + mineraalvillaplaat (A1+A4)
- variant 7: 12+25 mm, puitlaastplaat + mineraalvillaplaat (C6+A4)
- variant 8: 22 mm + varieeruv, puitkiudplaat + mineraalvillaplaat (A2 anal.+A3)
- variant 9: 9 mm + varieeruv, tuuletõkke kipsplaat + mineraalvillaplaat (A1+A3)
- variant 10: 12 mm + varieeruv, puitlaastplaat + mineraalvillaplaat (C6+A3)

### 7.6.3. Analüüsitud puitsörestikseinad kondensaadi tekke arvutamiseks

Kondensaadi tekke ja selle ajalise kestuse arvutused tehti eelpool kirjeldatud puitsörestikseintele soojusläbivusega  $U = 0,08; 0,12$  ja  $0,17$   $W/(m^2 \cdot K)$ . Nimetatud soojusläbivustega tarindites on kasutatud erinevate soojustus-, tuuletõkke-, õhu- ja aurutõkkematerjalide kombinatsioone (materjalide tüübid vt. Tabel 5 ja Tabel 6):

#### Siseviimistluskiht:

- variant 1: 13 mm, standardne kipsplaat (tüüp C1)

#### Soojustus (kihi paksus vastavalt tarindi soojusläbivusele):

- variant 1: 250 ... 600 mm, mineraalvill (D1)
- variant 2: 250 ... 600 mm, tselluvill (D4)

#### Õhu- ja aurutõke:

- variant 3: 1 mm, PE-jõupaber (C15)
- variant 5: 1 mm, PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 1,35$  m)
- variant 7: 1 mm, PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 2,20$  m)
- variant 8: 1 mm, PE-jõupaber (C9)
- variant 10: 0,2 mm, PE-kile (C11)

#### Tuuletõke:

- variant 1: 22 mm, puitkiudplaat (A2 analoog)
- variant 2: 25 mm, mineraalvillaplaat (A4)
- variant 5: 1 mm, tuuletõkkemembraan (B2)
- variant 7: 12+25 mm, puitlaastplaat + mineraalvillaplaat (C6+A4)

Arvutuste algtingimusteks ja lähteandmeteks olid valitud nii hallitusindeksi kui kondensaadi tekke arvutustes järgmised tingimused:

- Algniiskus:  $RH = 80\%$
- Algtemperatuur:  $\theta = +22$  °C
- Niiskuslisa: niiskuslisa  $\Delta v \leq 2$   $g/m^3$  (soojal perioodil,  $t_e \geq +20$  °C)  
niiskuslisa  $\Delta v \leq 6$   $g/m^3$  (külmal perioodil,  $t_e \leq +5$  °C)
- Arvutusperiood: 12 kuud, juuli – juuni (MRY, Väike-Maarja 1989-1990, hallitusindeksi arvutustes)  
12 kuud, juuli – juuni (MRY, Väike-Maarja 1995-1996, kondensaadi tekke arvutustes)
- Andmed: mõõtepunktist A1 (vt. Joonis 30), sammuga 1 tund

#### 7.6.4. Analüüsitud puitsörestikseinad niiskuse väljakuivamise arvutamiseks

Niiskuse väljakuivamise arvutused tehti eelpool kirjeldatud puitsörestikseintele soojusläbivusega  $U = 0,08; 0,12$  ja  $0,17$   $W/(m^2 \cdot K)$ . Nimetatud soojusläbivustega tarindites on kasutatud erinevate soojustus-, tuuletõkke-, õhu- ja aurutõkkematerjalide kombinatsioone (materjali tüüp vt. Tabel 5 ja Tabel 6):

##### Siseviimistluskiht:

- variant 1: 13 mm, standardne kipsplaat (tüüp C1)

##### Soojustus (kihi paksus vastavalt tarindi soojusläbivusele):

- variant 1: 250 ... 600 mm, mineraalvill (D1)
- variant 2: 250 ... 600 mm, tselluvill (D4)
- variant 3: 250 ... 600 mm, tselluvill (D4a)

##### Õhu- ja aurutõke:

- variant 3: 1 mm, PE-jõupaber (C15)

##### Tuuletõke:

- variant 1: 22 mm, puitkiudplaat (A2 analoog)
- variant 2: 25 mm, mineraalvillaplaat (A4)
- variant 7: 12+25 mm, puitlaastplaat + mineraalvillaplaat (C6+A4)

Arvutuste algtingimusteks ja lähteandmeteks olid valitud niiskuse väljakuivamise arvutustes järgmised tingimused:

- Algniiskus:  $RH = 90\%$  (soojustuse variant 1 ja variant 2)  
 $RH = 80\%$  (soojustuse variant 3)
- Algtemperatuur:  $\theta = +22$  °C
- Niiskuslisa: niiskuslisa  $\Delta v \leq 2$   $g/m^3$  (soojal perioodil,  $t_e \geq +20$  °C)  
niiskuslisa  $\Delta v \leq 6$   $g/m^3$  (külmal perioodil,  $t_e \leq +5$  °C)
- Arvutusperiood: 12 kuud, juuli – juuni (MRY, Väike-Maarja 1989-1990, hallitusindeksi ja niiskuse väljakuivamise arvutustes)
- Andmed: mõõtepunktist A1 (vt. Joonis 30), sammuga 1 tund (soojustuse variant 1, variant 2 ja variant 3)  
mõõtepunktist B1 (vt. Joonis 30), sammuga 1 tund (soojustuse variant 3)

## 8. UURIMISTÖÖ TULEMUSED

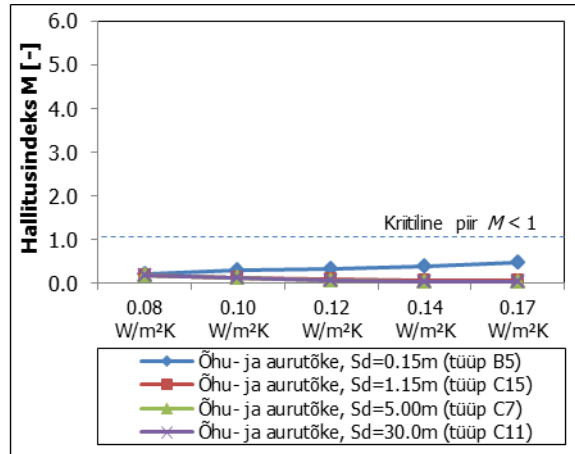
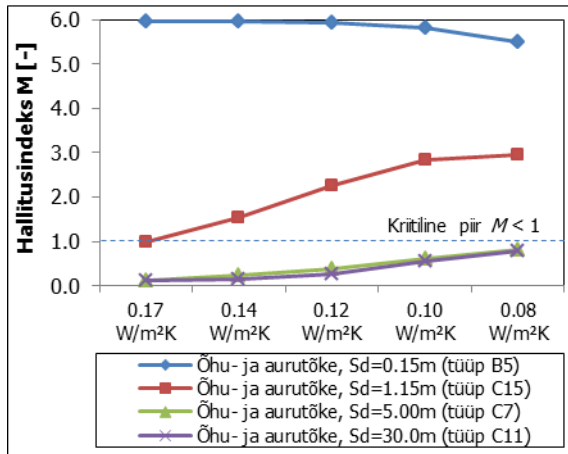
### 8.1. Hallitusindeksi arvutustulemused

Hallitusindeksi väärtus suurenes tarindi soojuslähivuse vähenemisel, samuti madalama veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekihi ja suurema veeaurutakistusega tuuletõkkekihi korral ning ületas kriitilise piiri  $M < 1$ . Uuritud tarindite korral täheldati seina soojuslähivuse tasemel  $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ja alla selle intensiivsemat hallitusindeksi kasvu võrreldes arvatud tulemustega seina soojuslähivuse  $U = 0,14$  või  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  korral.

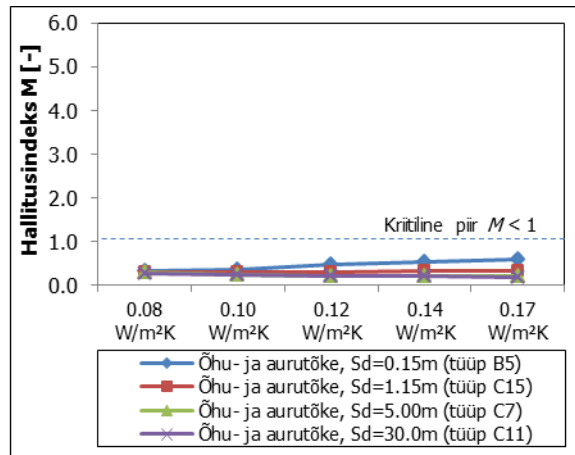
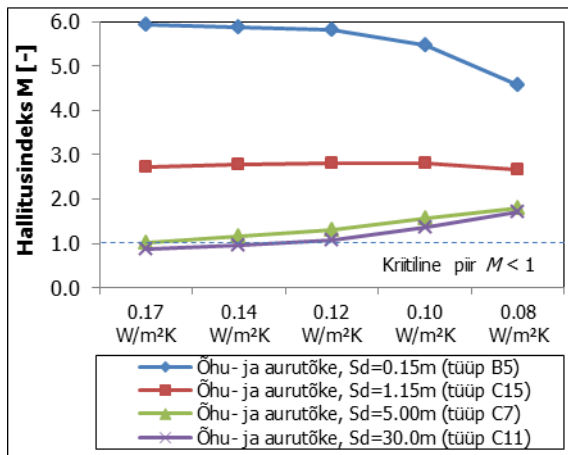
Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seintes bituumenpaberist õhu- ja aurutõkkekihi (tüüp B5,  $Z_p = 6,92\text{E}+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 5,08\text{E}+03 \text{ s}/\text{m}$ ) kasutamisel oli hallitusindeksi väärtus  $0,7 \leq M \leq 5,9$ . Samadel tingimustel oli tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seintes hallitusindeksi väärtus  $0 < M \leq 0,6$ . Arvutustulemuste erinevused vähenesid õhu- ja aurutõkkekihi veeaurutakistuse suurenemisel. PE-kilest õhu- ja aurutõkkekihi (tüüp C11,  $Z_p = 8,99\text{E}+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 6,60\text{E}+05 \text{ s}/\text{m}$ ) korral olid hallitusindeksi väärtused mineraalvillaga soojustatud seintes samade algandmete korral  $0 < M \leq 2,6$ . Tselluvillaga soojustatud seintes oli samal juhul hallitusindeksi väärtus  $0 < M \leq 0,3$ .

Mineraalvillast (tüüp D1) mittehügrokoopse ja tselluvillast (tüüp D4) hügrokoopse soojustusega puitsõrestikseinte võrdlemisel selgus, et samaväärsete algtingimuste korral (sarnane algtemperatuur ja algniiskus, õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkematerjalid) oli tselluvillaga soojustatud seintes hallitusindeksi tase oluliselt madalam mineraalvillaga soojustatud seintega võrreldes, jäädes arvatud juhtudel allapoole kriitilist väärtust  $M < 1$ . Näitena on esitatud arvutustulemused erinevate õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkematerjalidega tarindite kohta, vt. Joonis 32 ja Joonis 33.

Erandina oli tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas hallitusindeksi tase üle kriitilise piiri ( $M > 1$ ) juhul, kui tuuletõkkematerjalina oli kasutatud 12 mm puitlaastplaati (tüüp C6,  $Z_p = 1,21\text{E}+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90\text{E}+04 \text{ s}/\text{m}$ ) ning seda sõltumata õhu- ja aurutõkkematerjali tõhususest (vt. Joonis 34 – Joonis 37). Hallitusindeks ületas lubatud piiri ka juhul, kui algniiskuseks oli valitud  $RH = 90\%$  kuivpaigaldatud tselluvilla (tüüp D4) ja  $RH = 80\%$  märgpaigaldatud tselluvilla (tüüp D4a) korral, kus hallitusindeksi väärtused ulatusid tasemeni  $M \leq 2,5$  kui seina soojuslähivus  $U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ning  $M \leq 2,0$  kui seina soojuslähivus  $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Vt. arvutustulemused ptk. 8.3.1 ja ptk. 8.3.2.



**Joonis 32.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõkkeks on 22 mm puitkiudplaat (tüüp A2 analoog).



**Joonis 33.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõkkeks on 9 mm tuuletõkke kipsplaat (tüüp A1).

### 8.1.1. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt baastarindist

Sarnaselt baastarindile (vt. ptk. 7.6.1), mille soojusläbivus  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ja hallitusindeks  $M = 0,99$ , kasvas hallitusindeks madalama soojusläbivusega ( $U = 0,14; 0,12; 0,10; 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) tarindite korral mineraalvillaga soojustatud seintes soojusläbivuse  $U \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$  vähenemisel. Erandiks olid seinad, kui tuuletõkkeks oli kasutatud suhteliselt kõrge veeaurutakistusega puitlaastplaati (tüüp C6,  $Z_p = 1,21\text{E}+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90\text{E}+04 \text{ s}/\text{m}$ ) või tuuletõkke kipsplaati (tüüp A1,  $Z_p = 3,59\text{E}+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 2,64\text{E}+03 \text{ s}/\text{m}$ ), mille korral arvutuslik hallitusindeks kõrgetel tasemetel vähenes, kui seina soojusläbivus  $U < 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

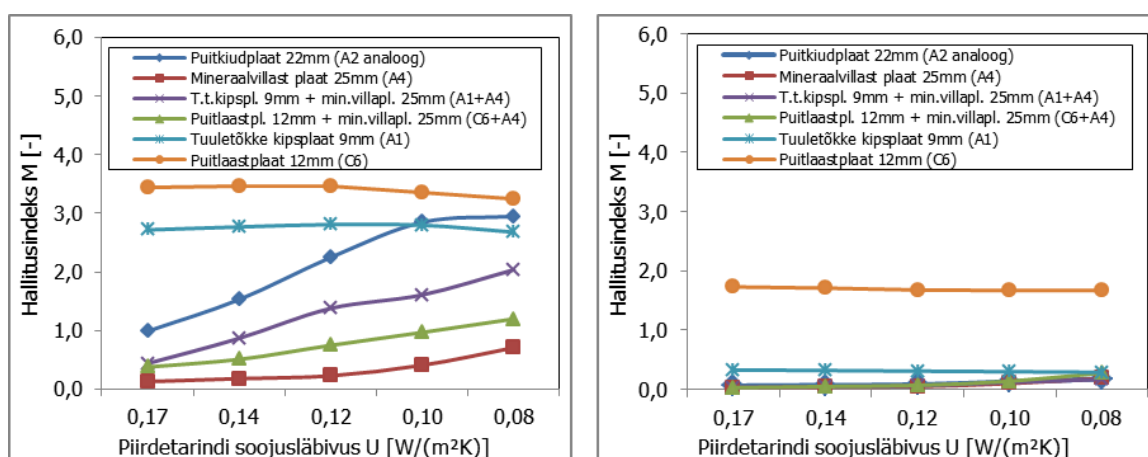


Tselluvillaga soojustatud sein hallitusindeksi tase ja taseme tõus oli võrreldes mineraalvillast soojustusega seinaga oluliselt madalam, jäädes vahemikku  $0 \leq M \leq 0,3$ , välja arvatud juhul, kui seinas oli tuuletõkkekihina kasutatud puitlaastplaati (tüüp C6), mille korral hallitusindeks  $1,6 \leq M \leq 1,7$ . Arvutatud tulemused on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 14) ja joonisel (Joonis 34), kus kõigi seinte korral oli õhu- ja aurutõkkematerjaliks PE-jõupaber (tüüp C15,  $Z_p = 5,81E+09 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 4,26E+04 \text{ s}/\text{m}$ ).

**Tabel 14.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas, kui baastarindi hallitusindeks  $M = 0,99$  ning õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-jõupaber (tüüp C15,  $S_d = 1,15 \text{ m}$ ).

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud sein soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud sein soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	3,0	2,9	2,3	1,5	0,99 *)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Mineraalvillaplaat 25mm (A4)	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4)	2,0	1,6	1,4	0,9	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4)	1,2	1,0	0,8	0,5	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0
Kipsplaat 9mm (A1)	2,7	2,8	2,8	2,8	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Puitlaastplaat 12mm (C6)	3,3	3,4	3,5	3,5	3,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7

\*) BAASTARIND

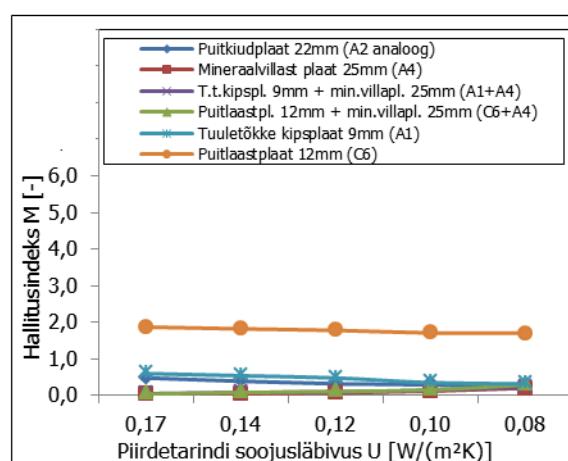
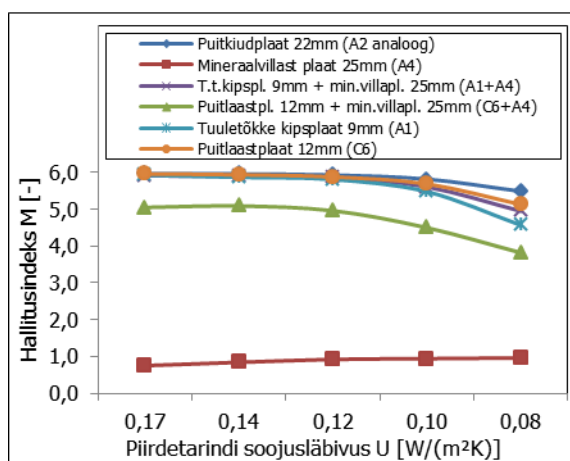


**Joonis 34.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja baastarindi hallitusindeks  $M = 0,99$  ning õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-jõupaber (tüüp C15,  $S_d = 1,15 \text{ m}$ ).

Võrdlusena on esitatud arvutustulemused (Vt. Tabel 15 ja Joonis 35) seintele, kus oli kasutatud samu tuuletõkkematerjale, kuid õhu- ja aurutõkkekihiks oli valitud madala veeaurutakistusega bituumenpaber (tüüp B5;  $Z_p = 6,92E+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 5,08E+03 \text{ s}/\text{m}$ ). Hallitusindeksi väärtus oli lubatud piires mineraalvillaga soojustatud seinas vaid juhul, kui tuuletõkkeks oli mineraalvillaplaat (tüüp A4). Tselluvillaga soojustatud seinas oli antud juhul hallitusindeksi piirväärtus ületatud, kui tuuletõkkeks oli kasutatud puitlaastplaati (tüüp C6).

**Tabel 15.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas, kui õhu- ja aurutõkkekihiks on bituumenpaber (tüüp B5,  $S_d = 0,15 \text{ m}$ ).

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	5,5	5,8	5,9	6,0	6,0	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
Mineraalvillaplaat 25mm (A4)	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4)	5,0	5,6	5,9	5,9	5,9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4)	3,8	4,5	5,0	5,1	5,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0
Kipsplaat 9mm (A1)	4,6	5,5	5,8	5,9	5,9	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6
Puitlaastplaat 12mm (C6)	5,1	5,7	5,9	5,9	6,0	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9

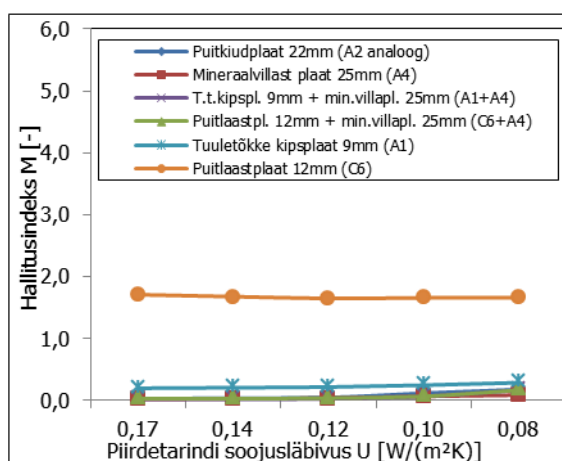
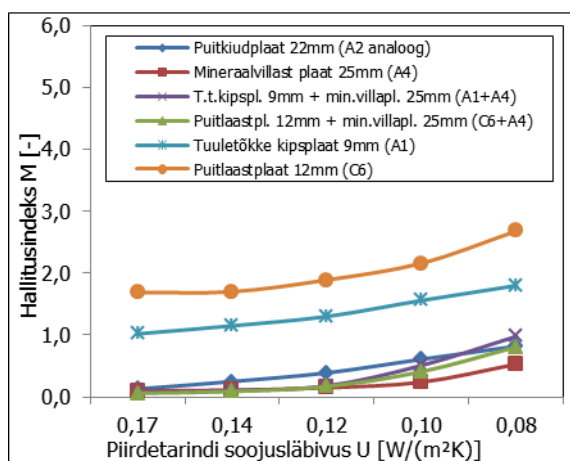


**Joonis 35.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkekihiks on bituumenpaber (tüüp B5,  $S_d = 0,15 \text{ m}$ ).

Asendades eelpool vaadeldud tarindites õhu- ja aurutõkkematerjali veeaurutakistuselt efektiivsema PE-jõupaberi (tüüp C7,  $Z_p = 2,43E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 1,79E+05 \text{ s}/\text{m}$ ) vastu ning jättes kõik muud näitajad muutmata (vt. Tabel 16 ja Joonis 36), jäi hallitusindeksi tase lubatud piiresse ( $M < 1$ ), välja arvatud juhtudel, kui tuuletõkkeks oli kasutatud puitlaastplaati (tüüp C6) ning mineraalvillaga soojustatud seinas ka juhul, kui tuuletõkkeks oli kasutatud tuuletõkke kipsplaati (tüüp A1) ja seinasoojuslähivus  $U < 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

**Tabel 16.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas, kui õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-jõupaber (tüüp C7,  $S_d = 5,0 \text{ m}$ ).

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinasoojuslähivus $U \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinasoojuslähivus $U \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Mineraalvillaplaat 25mm (A4)	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4)	1,0	0,5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4)	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm (A1)	1,8	1,6	1,3	1,2	1,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Puitlaastplaat 12mm (C6)	2,7	2,2	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

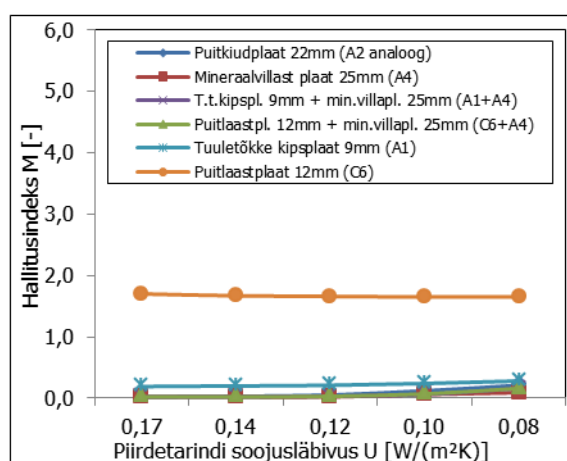
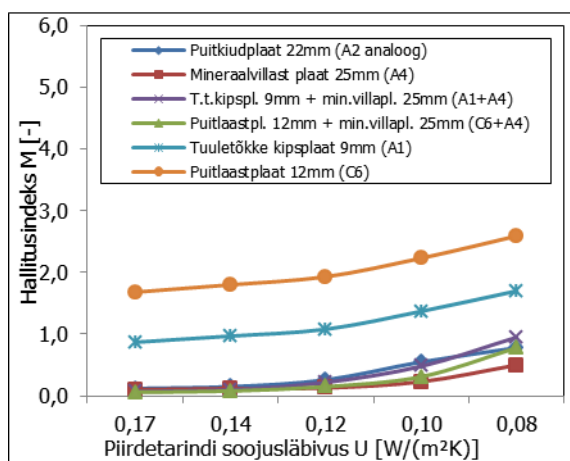


**Joonis 36.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkekiht on PE-jõupaber (tüüp C7,  $S_d = 5,0 \text{ m}$ ).

Sarnane oli tulemus ka juhul, kui tarindites oli õhu- ja aurutõkkematerjaliks veel kõrgema veeaurutakistusega PE-kile (tüüp C11,  $Z_p = 8,99E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 6,60E+05 \text{ s}/\text{m}$ ) ning kõik muud näitajad jäid muutmata (vt. Tabel 17 ja Joonis 37). Ka sel juhul jäi hallitusindeksi tase lubatud piiresse ( $M < 1$ ), välja arvatud juhtudel, kui tuuletõkkeks oli kasutatud puitlaastplaati (tüüp C6) ning mineraalvillaga soojustatud seinas ka juhul, kui tuuletõkkeks oli kasutatud tuuletõkke kipsplaati (tüüp A1) ja seinas soojuslähivus  $U < 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

**Tabel 17.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas, kui õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-kile (tüüp C11,  $S_d = 30,0 \text{ m}$ ).

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinas soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	0,8	0,6	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Mineraalvillaplaat 25mm (A4)	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4)	1,0	0,5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4)	0,8	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm (A1)	1,7	1,4	1,1	1,0	0,9	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Puitlaastplaat 12mm (C6)	2,6	2,2	1,9	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7



**Joonis 37.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkekiht on PE-kile (tüüp C11,  $S_d = 30,0 \text{ m}$ ).

### 8.1.2. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt seinä soojusläbivusest

Antud arvutustes seati kõigis mineraalvillast soojustusega analüüsitud seintes õhu- ja aurutõkkekihi ning tuuletõkkekihi omadused seinas võrreldes baastarindiga (vt. ptk. 7.6.1) selliselt, et kõigil juhtudel, kui seinä soojusläbivus  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , oli hallitusindeks võrdne baastarindi hallitusindeksiga ehk  $M = 0,99$ .

Arvutustulemused näitasid, et hallitusindeks  $M$  suurenes võrdeliselt seinä soojusläbivuse  $U[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$  vähenemise ja tuuletõkkekihi veeaurutakistuse suurenemisega, saavutades võrreldes algolukorraga (kui  $M = 0,99$ ) 1,3 ... 3 korda kõrgema hallitusindeksi väärtuse ning ulatudes seinä soojusläbivuse  $U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  korral tasemeni  $M = 1,3$  (kui tuuletõkkematerjaliks oli 25 mm mineraalvillaplaat, tüüp A4) ja tasemeni  $M = 3,0$  (kui tuuletõkkematerjal oli 22 mm puitkiudplaat, tüüp A2 analoog).

Mineraalvillaga soojustatud seinä korral ületas hallitusindeksi algväärtus seinä soojusläbivuse  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  korral olulisel määral lubatud kriitilise väärtuse  $M < 1$  juhtudel, kui tuuletõkkekihina kasutati puitlaastplaati (tüüp C6) või tuuletõkkemembraani (tüüp B2). Seetõttu ei vaadeldud antud arvutustes nende tuuletõkkematerjalidega kaetud tarindite edasisi arvutusolukordi seinte madalamate soojusläbivuste korral.

Samadel tingimustel arvutati hallitusindeksid ka seintele, milles oli kasutatud soojustuskihina hügrokoopsete omadustega tselluvilla (tüüp D4). Sel juhul jäi hallitusindeksi väärtus vahemikku  $0 \leq M \leq 0,5$ , kuid ka siin ületas seinä hallitusindeks kriitilise väärtuse  $M < 1$  juhul, kui tuuletõkkekihina kasutati puitlaastplaati (tüüp C6). Kui tuuletõkkeks oli tuuletõkkemembraan (tüüp B2), oli hallitusindeksi väärtus  $0,4 \leq M \leq 0,5$ . Arvutatud tulemused on esitatud lisatud tabelis (Tabel 18) ja joonisel (Joonis 38).

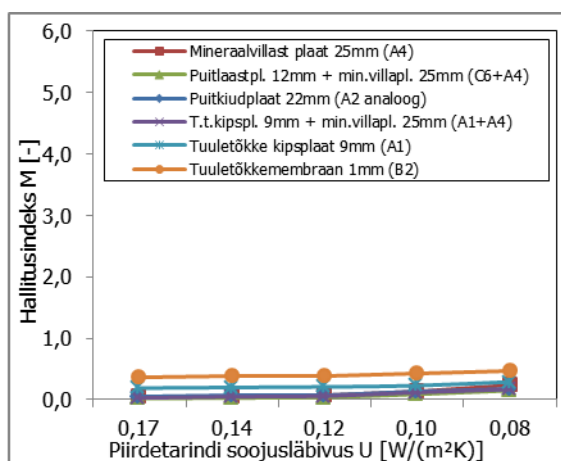
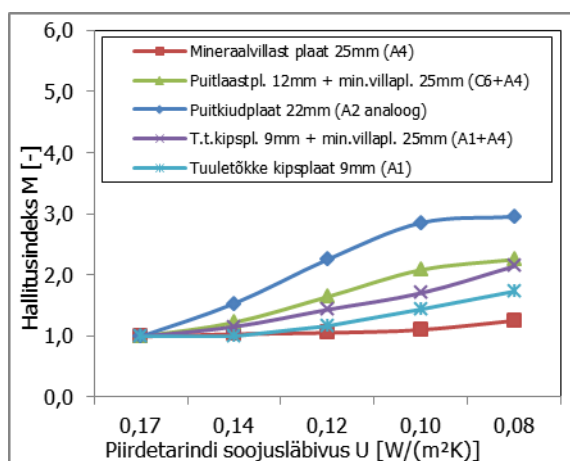
**Tabel 18.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui mineraalvillaga soojustatud seina soojuslähivuse  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  korral hallitusindeks  $M = 0,99$ .

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Mineraalvillaplaat 25mm (A4) *1)	1,3	1,1	1,1	1,0	0,99	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4) *2)	2,3	2,1	1,6	1,2	0,99	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4) *3)	2,1	1,7	1,4	1,2	0,99	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog) *4)	3,0	2,9	2,3	1,5	0,99 *)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Kipsplaat 9mm (A1) *5)	1,7	1,4	1,2	1,0	0,99	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Tuuletõkkemembraan 1mm (B2) *6)	N/A	N/A	N/A	N/A	> 0,99	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Puitlaastplaat 12mm (C6) *7)	N/A	N/A	N/A	N/A	> 0,99	N/A	N/A	N/A	N/A	> 0,99

\*) BAASTARIND

Märkus: Antud tabelis toodud seintes on õhu- ja aurutõkkematerjalid:

- 1) bituumenpapp, tüüp B8,  $S_d = 0,09 \text{ m}$
- 2) PE-jõupaber, tüüp C15 analoog,  $S_d = 0,50 \text{ m}$
- 3) PE-jõupaber, tüüp C15 analoog,  $S_d = 0,95 \text{ m}$
- 4) PE-jõupaber, tüüp C15,  $S_d = 1,15 \text{ m}$
- 5) PE-kile, tüüp C7 analoog,  $S_d = 3,30 \text{ m}$
- 6) PE-kile, tüüp C11,  $S_d = 30,0 \text{ m}$
- 7) foolium-aurutõke,  $S_d > 1000 \text{ m}$



**Joonis 38.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja mineraalvillaga soojustatud seina soojuslähivuse  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  korral hallitusindeks  $M = 0,99$ . Õhu- ja aurutõkkehid on kirjeldatud Tabel 18.

### 8.1.3. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt tuuletõkkekihist

Antud arvutustes seati baastarindi (vt. ptk. 7.6.1) ja sellega sarnase tuuletõkkekihiga (22 mm puitkiudplaat, tüüp A2 analoog) seinte, mille soojusläbivused on  $0,08 \leq U \leq 0,17$  W/(m<sup>2</sup>·K), hallitusindeksi väärtused võrdseks baastarindi hallitusindeksiga ehk  $M = 0,99$ . Seejärel arvutati hallitusindeksi väärtus ka ülejäänud seintele samade õhu- ja aurutõkkematerjalidega.

Arvutustulemused näitasid, et hallitusindeksi väärtus  $M < 0,99$  seinte korral, mil tuuletõkkeks oli kasutatud 25 mm mineraalvillaplaati (tüüp A4), samuti juhul, kui oli kasutatud 12 mm puitlaastplaadi ja 25 mm mineraalvillaplaadi kombinatsiooni (tüüp C6 + A4).

Hallitusindeksi kriitiline piir ( $M < 1$ ) ületati seina korral, mille  $U = 0,08$  W/(m<sup>2</sup>·K), kus tuuletõkkeks oli kasutatud tuuletõkkematerjalide kombinatsiooni 9 mm tuuletõkke kipsplaat + 25 mm mineraalvillaplaat (tüüp A1 + A4). Hallitusindeksi kriitiline piir ületati kõigil vaadeldud juhtudel mineraalvillaga soojustatud seintes ka siis, kui tuuletõkkeks oli lisasoojustuseta 12 mm puitlaastplaat (tüüp C6) või 9 mm tuuletõkke kipsplaat (tüüp A1) või tuuletõkkemembraan (tüüp B2).

Samade algväärtustega arvutati ka seinte hallitusindeksid, milles oli kasutatud soojustuskihina tselluvilla (tüüp D4). Sel juhul jäi hallitusindeksi väärtus vahemikku  $0 < M \leq 0,5$ , kuid ka siin ületas seina hallitusindeksi väärtus kriitilise väärtuse ( $M < 1$ ) juhul, kui tuuletõkkekihina kasutati puitlaastplaati (tüüp C6). Arvutatud tulemused on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 19) ja joonisel (Joonis 39).

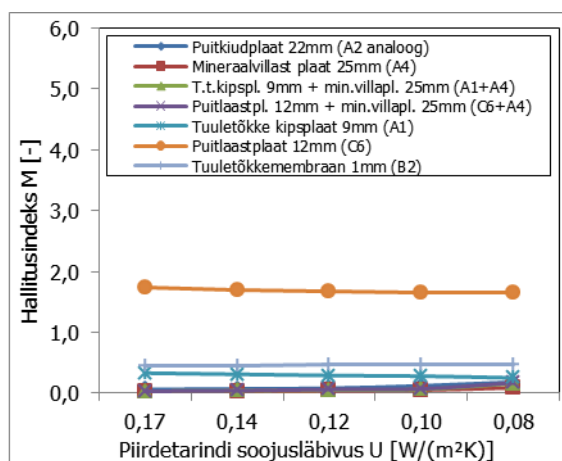
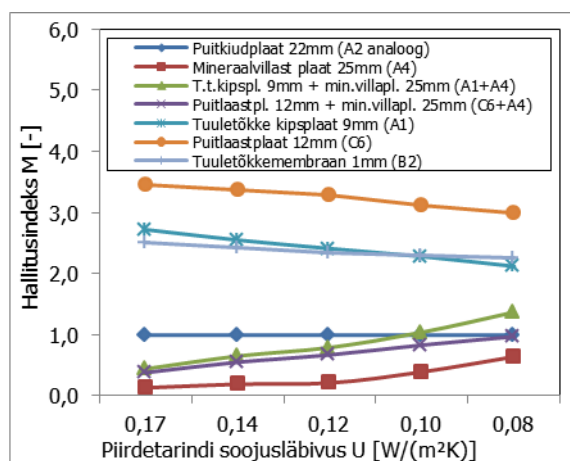
**Tabel 19.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui 22 mm tuuletõkkeplaadiga (tüüp A2 analoog) ja mineraalvillast soojustusega (tüüp D1) tarindite korral on hallitusindeks  $M = 0,99$ .

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99 *)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Mineraalvillaplaat 25mm (A4)	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4)	1,4	1,0	0,8	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4)	1,0	0,8	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Kipsplaat 9mm (A1)	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Puitlaastplaat 12mm (C6)	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Tuuletõkkemembraan 1mm (B2)	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4

\*) BAASTARIND

Märkus: Antud tabelis toodud seintes on õhu- ja aurutõkkematerjalid, sõltuvalt soojusläbivusest:

- Seina soojusläbivus  $U = 0,17$  W/(m<sup>2</sup>·K), PE-jõupaber, tüüp C15,  $S_d = 1,15$  m
- Seina soojusläbivus  $U = 0,14$  W/(m<sup>2</sup>·K), PE-jõupaber, tüüp C15 analoog,  $S_d = 1,25$  m
- Seina soojusläbivus  $U = 0,12$  W/(m<sup>2</sup>·K), PE-jõupaber, tüüp C15 analoog,  $S_d = 1,35$  m
- Seina soojusläbivus  $U = 0,10$  W/(m<sup>2</sup>·K), PE-jõupaber, tüüp C15 analoog,  $S_d = 1,55$  m
- Seina soojusläbivus  $U = 0,08$  W/(m<sup>2</sup>·K), PE-jõupaber, tüüp C15 analoog,  $S_d = 2,20$  m



**Joonis 39.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja kui 22 mm tuuletõkkeplaadiga (tüüp A2 analoog) ja mineraalvillast soojustusega tarindite korral on hallitusindeks  $M = 0,99$ . Õhu- ja aurutõkkelihid on kirjeldatud Tabel 19.



#### **8.1.4. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt tuuletõkke lisasoojustuse paksusest**

Antud arvutustes seati mineraalvillast soojustusega (tüüp D1) seintes õhu- ja aurutõkkekihi ning tuuletõkkekihi omadused selliselt, et kõigil juhtudel oli hallitusindeks  $M \leq 0,99$ . Vaatluse all olid seinad, kus tuuletõkkematerjalina oli kasutatud 22 mm puitkiudplaate (tüüp A2 analoog), 25 mm mineraalvillaplaate (tüüp A4), 9 mm tuuletõkke kipsplaate (tüüp A1) ning 12 mm puitlaastplaate (tüüp C6).

Valitud tarindite korral kasutati tuuletõkkekihi soojustakistuse tõstmiseks vajadusel erinevates paksustes mineraalvillaplaate (tüüp A3), et täita seatud hallitusindeksi piirväärtuse ( $M < 1$ ) kriteerium. Arvutustulemustest nähtub, et tuuletõkkekihile lisatav vajalik soojustuskihi paksus suurenes võrdeliselt kogu tarindi soojustuskihi paksuse suurenemisega, ulatudes teatud juhtudel kuni 105 mm-ni. Samuti on märgatav õhu- ja aurutõkkekihi mõju – madalama veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekihi korral on vajalik tuuletõkkekihi lisasoojustuskiht paksem.

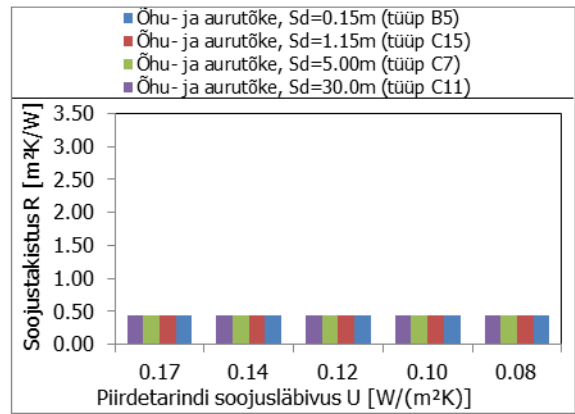
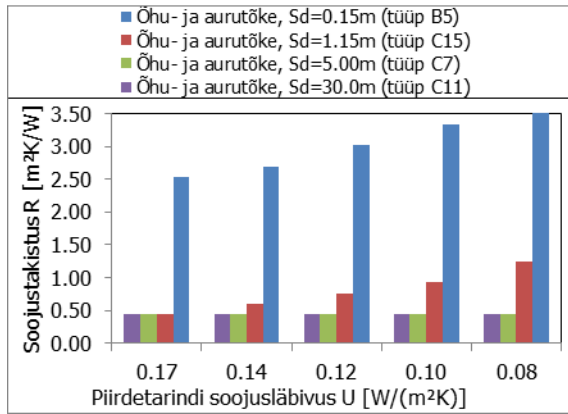
Samadel tingimustel arvutati ka tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinad hallitusindeksi väärtused. Arvutustulemuste põhjal selgus, et nõutud hallitusindeksi väärtuse tagamiseks oli tuuletõkkekihi lisasoojustamine vajalik 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) korral. Muudel vaadeldud juhtudel oli hallitusindeksi väärtus  $M < 1$  ilma olemasoleva tuuletõkkematerjali soojustakistust või kihi paksust tõstmata. Arvutatud tulemused on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 20) ja joonistel (Joonis 40 – Joonis 42).

**Tabel 20.** Tuuletõkkekihi soojustakistus  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ] koos tuuletõkke välispinnale lisatud soojustuse paksusega [mm] <sup>1)</sup> erinevate tuuletõkete korral mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tarindi hallitusindeks  $M \leq 0,99$ .

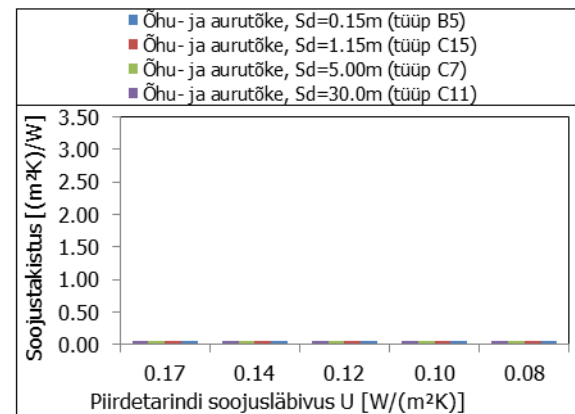
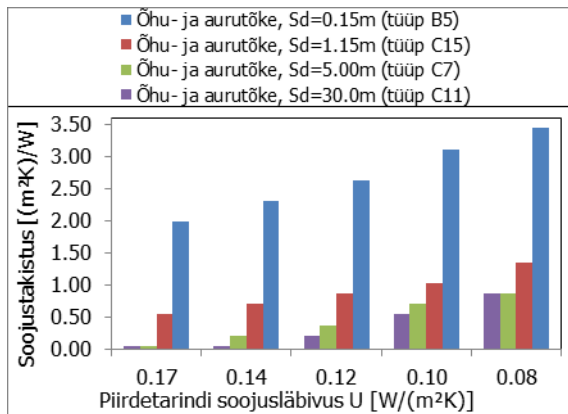
Tuuletõke [mm] (tüüp) + lisakiht (tüüp)		Õhu- ja aurutõke (tüüp) $S_d$ [m]	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]				
			0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog) + lisa mineraalvillaplaat (A3)	Lisa [mm]	(B5)	95	90	80	70	65	0	0	0	0	0
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=0,15m$	3,50	3,34	3,02	2,70	2,54	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
	Lisa [mm]	(C15)	25	15	10	5	0 *)	0	0	0	0	0
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=1,15m$	1,25	0,92	0,76	0,60	0,44 *)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
	Lisa [mm]	(C7)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=5,00m$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
	Lisa [mm]	(C11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=30,0m$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	
Kipsplaat 9mm (A1) + lisa mineraalvillaplaat (A3)	Lisa [mm]	(B5)	105	95	80	70	60	0	0	0	0	0
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=0,15m$	3,43	3,11	2,63	2,31	1,98	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Lisa [mm]	(C15)	40	30	25	20	15	0	0	0	0	0
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=1,15m$	1,34	1,02	0,85	0,69	0,53	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Lisa [mm]	(C7)	25	20	10	5	0	0	0	0	0	0
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=5,00m$	0,85	0,69	0,37	0,21	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Lisa [mm]	(C11)	25	15	5	0	0	0	0	0	0	0
$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=30,0m$	0,85	0,53	0,21	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Puitlaastplaat 12mm (C6) + lisa mineraalvillaplaat (A3)	Lisa [mm]	(B5)	100	90	75	65	60	5	5	5	5	5
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=0,15m$	3,32	3,00	2,51	2,19	2,03	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	Lisa [mm]	(C15)	35	25	20	15	10	5	5	5	5	5
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=1,15m$	1,22	0,90	0,74	0,58	0,41	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	Lisa [mm]	(C7)	20	15	10	5	5	5	5	5	5	5
	$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=5,00m$	0,74	0,58	0,41	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	Lisa [mm]	(C11)	20	15	10	5	5	5	5	5	5	5
$R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]	$S_d=30,0m$	0,74	0,58	0,41	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	

\*) BAASTARIND

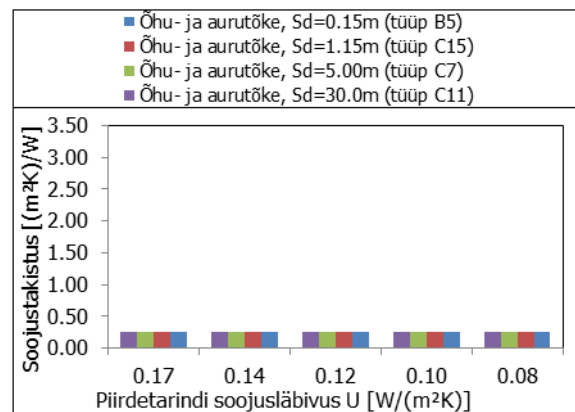
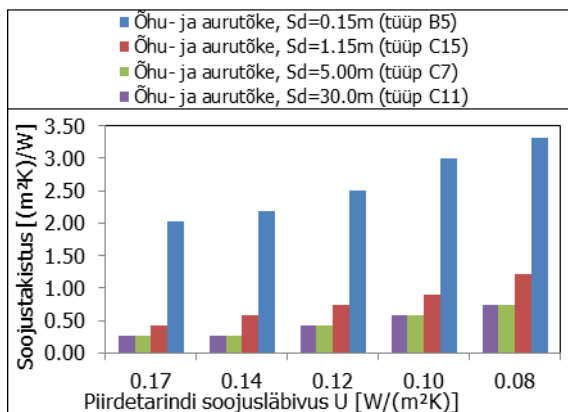
<sup>1)</sup> Tuuletõkke lisasoojustuskihi paksus on ümardatud ülespoole (tagavara kasuks) sammuga 5 mm



**Joonis 40.** Tuuletõkkekihi soojustakistus  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ] koos 22 mm puitkiudplaadi (tüüp A2 analoog) välispinnale lisatud soojustusega (mineraalvillaplaat, tüüp A3) mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja hallitusindeks  $M \leq 0,99$ . Lisakihi kirjeldus Tabel 20.



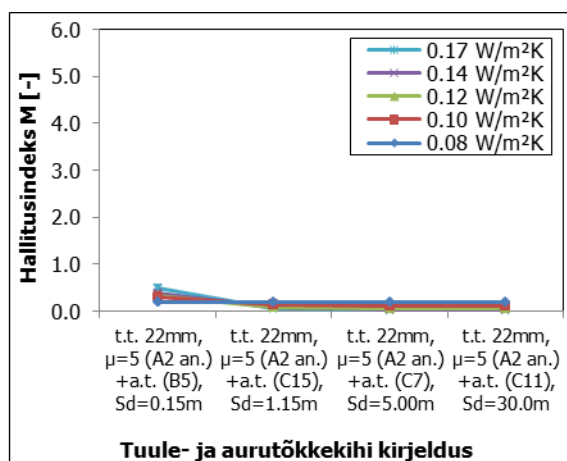
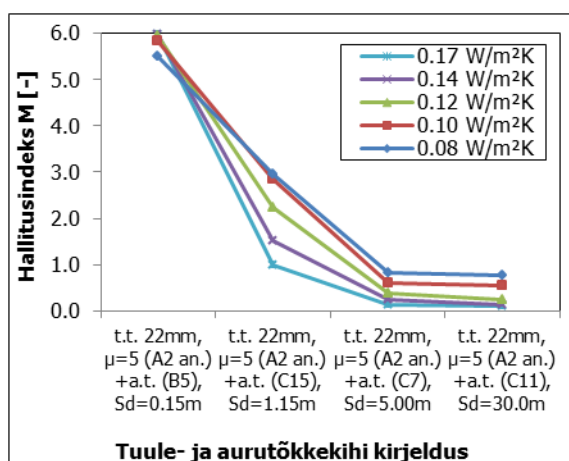
**Joonis 41.** Tuuletõkkekihi soojustakistus  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ] koos 9 mm tuuletõkke kipsplaadi (tüüp A1) välispinnale lisatud soojustusega (mineraalvillaplaat, tüüp A3) mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja hallitusindeks  $M \leq 0,99$ . Lisakihi kirjeldus Tabel 20.



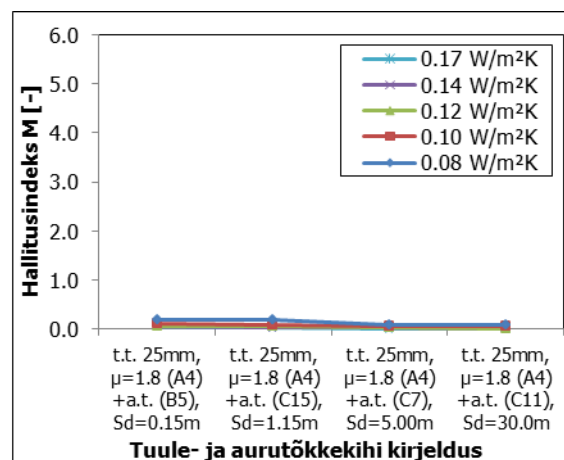
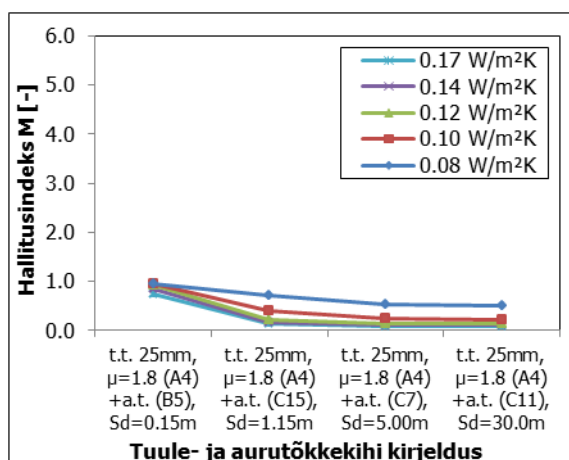
**Joonis 42.** Tuuletõkkekihi soojustakistus  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ] koos 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) välispinnale lisatud soojustusega (mineraalvillaplaat, tüüp A3) mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja hallitusindeks  $M \leq 0,99$ . Lisakihi kirjeldus Tabel 20.

### 8.1.5. Niiskustehniline turvalisus lähtuvalt õhu- ja aurutõkkekihist

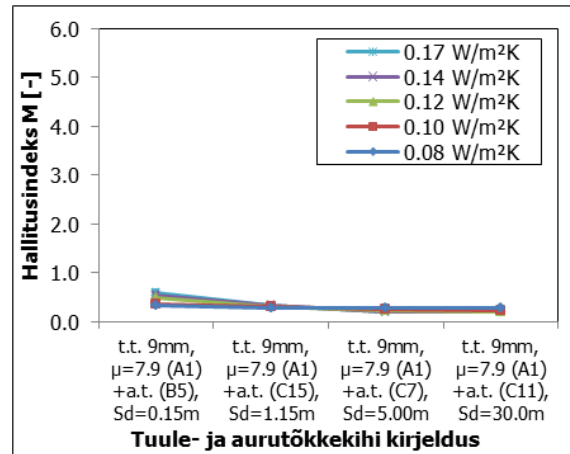
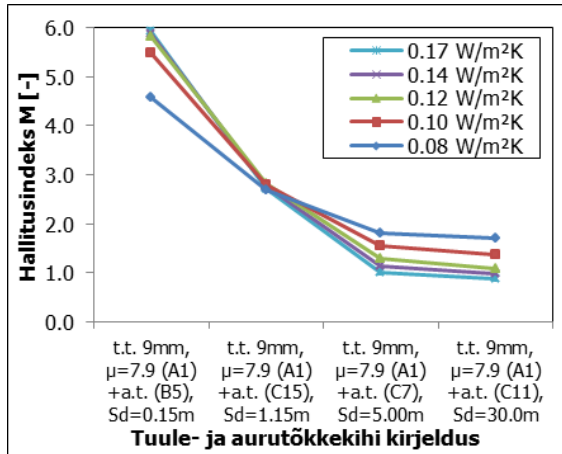
Antud arvutustes võrreldi mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seintes õhu- ja aurutõkkekihi mõju hallitusindeksi muutumisele erinevate tuuletõkkematerjalide korral. Tulemustest nähtub, et hallitusindeks tõusis üle kriitilise piiri ( $M > 1$ ) juhtudel, kui õhu- ja aurutõkkeks oli kasutatud madalama veeaurutakistusega materjale (näit. tüüp B5 või tüüp C15). Samuti on tulemustest näha, et suurema veeaurutakistusega tuuletõkkeplaatide kasutamisel (näit. tuuletõkke kipsplaat, tüüp A1 või puitlaastplaat, tüüp C6) oli hallitusindeksi tase alati kõrgem muude uuritud tuuletõkkematerjalidega võrreldes, vaatamata õhu- ja aurutõkkekihi tõhususele. Tulemused on esitatud järgnevatel joonistel (vt. Joonis 43 – Joonis 48).



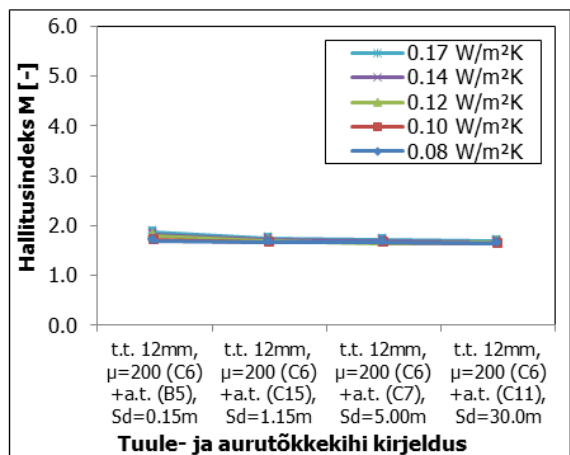
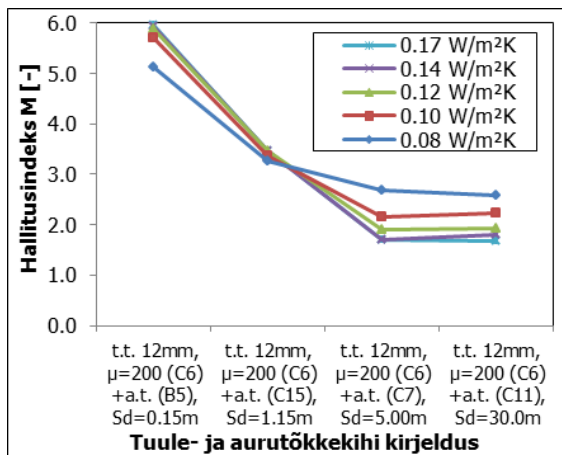
**Joonis 43.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide (a.t.) korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõkke (t.t.) on 22 mm puitkiudplaat (tüüp A2 analoog).



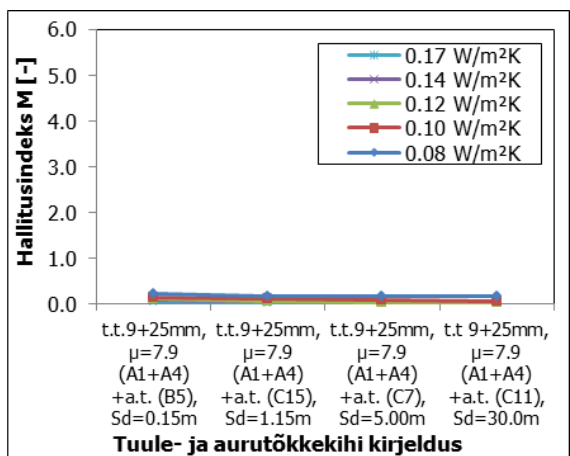
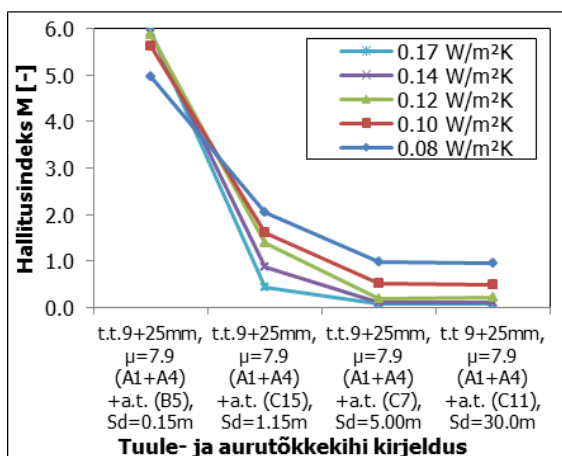
**Joonis 44.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide (a.t.) korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõkke (t.t.) on 25 mm mineraalvillaplaat (tüüp A4).



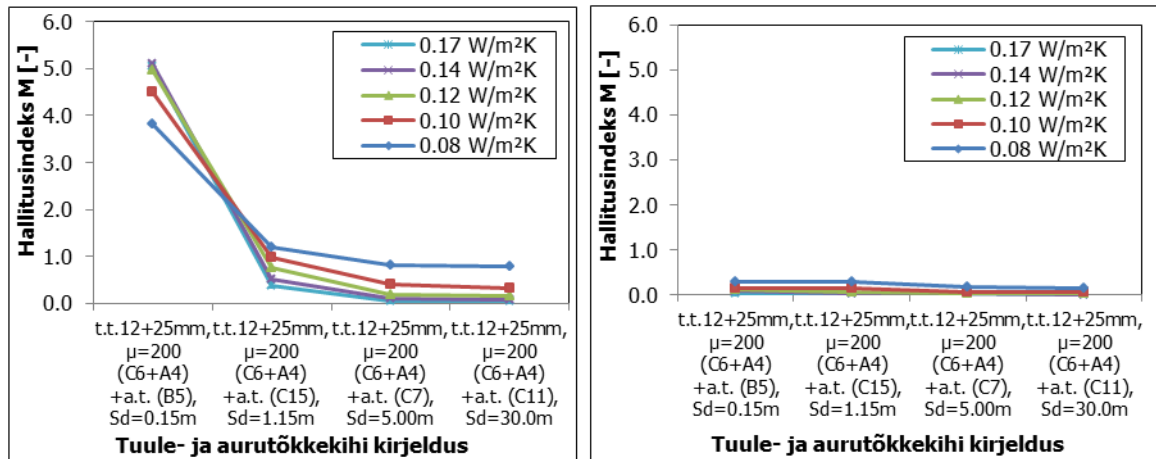
**Joonis 45.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide (a.t.) korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõke (t.t.) on 9 mm t.t. kipspl. (tüüp A1).



**Joonis 46.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide (a.t.) korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõke (t.t.) on 12mm puitlaastpl. (tüüp C6).



**Joonis 47.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide (a.t.) korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõke (t.t.) on 9 mm tuuletõkke kipsplaadi (tüüp A1) ja 25 mm mineraalvillaplaadi (tüüp A4) kombinatsioon.



**Joonis 48.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate õhu- ja aurutõkkematerjalide (a.t.) korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja tuuletõke (t.t.) on 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadi (tüüp A4) kombinatsioon.

## 8.2. Kondensaadi teke ja selle ajaline kestus

Arvutuste käigus kontrolliti, kas madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseintes, mille hallitusindeksi väärtus  $M \leq 0,99$ , tekkis vaadeldaval perioodil olukordi, kus seina mõõtepunktis A1 või B1 (vt. Joonis 30) olid tingimused soodsad niiskuse kondenseerumiseks. Kriteeriumiks oli kondenseerumine tarindis, kui  $RH > 97\%$ . Üles märgiti ka kondensaatpäevade arv ning tekkiva kondensaatvee hulk  $[g/m^2]$ .

Vaadeldud tarinditega läbi viidud arvutuste tulemusel selgus, et baastarindis (vt. ptk. 7.6.1) toimus mõõtepunktis A1 niiskuse kondenseerumine koguses 2 ... 9000  $g/m^2$  ning järjestikuste kondensaatpäevade arv oli 66 ... 85 päeva, sõltuvalt seina soojusläbivusest. Kondensaatpäevad jäid vaadeldaval perioodil ajavahemikku detsembrist kuni märtsini, mil välistemperatuurid olid vahemikus  $-23\text{ °C} \leq t_e \leq -1\text{ °C}$  ning välisõhu suhteline niiskus vahemikus  $50\% \leq RH \leq 100\%$ . Intensiivsem kondenseerumine toimus perioodil, kui välisõhu temperatuur  $t_e < -20\text{ °C}$  ja suhteline niiskus  $RH > 80\%$ . Arvutuste andmed vt. Tabel 21 ning Tabel 22.

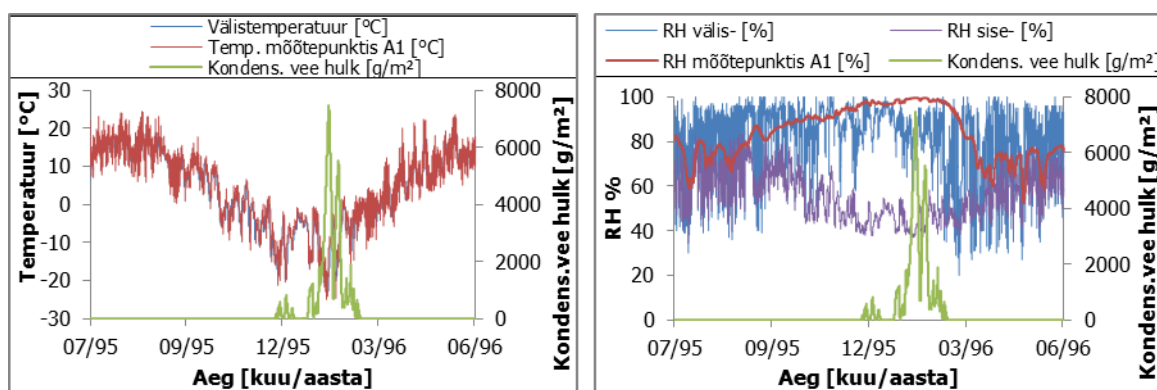
Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud ning tuuletõkkemembraaniga (tüüp B2) või 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud tarindite korral ilmnes, et külmal perioodil, detsembrist märtsikuuni, oli antud tüüpi seintes kondenseerumise tõenäosus ning kondenseerunud niiskuse kogus suur (vt. arvutustulemused Tabel 21). Näide baastarindis arvatud kondenseerumisest on esitatud lisatud joonisel (vt. Joonis 49).

**Tabel 21.** Niiskuse kondenseerumine mõõtepunktis A1, erinevate tuuletõkkmaterjalide korral mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja hallitusindeks  $M \leq 0,99$  (v.a. tuuletõkkmembraan (tüüp B2), mille korral hallitusindeksi väärtused mineraalvillaga seinas  $2,3 \leq M \leq 2,5$ ).

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Kondens. päevad ja kondens. maks.hulk [g/m <sup>2</sup> ]	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)] ning õhu- ja aurutõke (tüüp)			Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)] ning õhu- ja aurutõke (tüüp)		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
		$S_d = 2,20$ m (C15 an.)	$S_d = 1,35$ m (C15 an.)	$S_d = 1,15$ m (C15)	$S_d = 2,20$ m (C15 an.)	$S_d = 1,35$ m (C15 an.)	$S_d = 1,15$ m (C15)
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	Kondens. päevi	85	83	66 *)	0	0	0
	Hulk [g/m <sup>2</sup> ]	6919	9184	7462 *)	0	0	0
Tuuletõkkmembraan 1mm (B2)	Kondens. päevi	7	10	14	0	0	0
	Hulk [g/m <sup>2</sup> ]	471	525	792	0	0	0
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvilla-plaat 25mm (C6+A4)	Kondens. päevi	5	0	0	0	0	0
	Hulk [g/m <sup>2</sup> ]	397	0	0	0	0	0
Mineraalvilla-plaat 25mm (A4)	Kondens. päevi	0	0	0	0	0	0
	Hulk [g/m <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	0	0
Tuuletõkke kipspl. 9mm + mineraalvilla-plaat 25mm (A1+A4)	Kondens. päevi	12 *)	5 *)	0	0	0	0
	Hulk [g/m <sup>2</sup> ]	287 *)	124 *)	0	0	0	0

\*) BAASTARIND

\*1)  $S_d = 3,00$  m \*2)  $S_d = 10,0$  m



**Joonis 49.** Näide niiskuse kondenseerumisest mõõtepunktis A1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinas, soojusläbivusega  $U = 0,17$  W/(m<sup>2</sup>·K), kui algniiskus  $RH = 80\%$ , hallitusindeks  $M \leq 0,99$ , õhu- ja aurutõke on PE-jõupaber (tüüp C15,  $S_d = 1,15$  m). Muud andmed vt. Tabel 21.

Tuuletõkkmembraaniga (tüüp B2) kaetud seina korral seatud kriteeriumitele vastavat lahendust ei leidunud. 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud tarinditele

leidus sobiv lahendus mõlema kriteeriumi täitmiseks juhtudel, kui kasutati eelnevast valikust tõhusamaid õhu- ja aurutõkkematerjale. Kokkuvõtte on esitatud lisatud tabelis (vt. Tabel 22).

**Tabel 22.** Niiskuse kondenseerumine mõõtepunktis A1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) ja tuuletõkke kipsplaadiga (tüüp A1) kaetud ning mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja hallitusindeks  $M \leq 0,99$ .

Tuuletõkke [mm] (tüüp)	Kondens. päevad ja kondens. maks.hulk [g/m <sup>2</sup> ]	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)] ning õhu- ja aurutõkke (tüüp)			Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)] ning õhu- ja aurutõkke (tüüp)		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
		$S_d = 30,0m$ (C11)	$S_d = 3,90m$ (C9)	$S_d = 2,40m$ (C15 an.)	$S_d = 30,0m$ (C11)	$S_d = 3,90m$ (C9)	$S_d = 2,40m$ (C15 an.)
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	Kondens. päevi	12	2	0	0	0	0
	Hulk [g/m <sup>2</sup> ]	414	130	0	0	0	0

### 8.3. Niiskuse väljakuivamise arvutustulemused

Niiskuse väljakuivamise arvutuste käigus uuriti, kui kiiresti toimub vaadeldaval perioodil mõõtepunktis A1 seina väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seintes. Paralleelselt koguti ka andmeid hallitusindeksi  $M$  taseme kohta samal perioodil.

Arvutused vaadeldaval perioodil seina mõõtepunktides A1 ja B1 tehti ka märgpaigaldatava tselluvilla (tüüp D4a) kohta, et tuvastada hallituse riske ning võrrelda seina väljakuivamise aegade pikkust erinevate tarindite ja algniiskuse korral.

#### 8.3.1. Mineraalvilla ja tselluvilla võrdlus

Antud osas arvutati ja võrreldi väljakuivamise aega mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) erinevas paksuses soojustatud seintes, kus tuuletõkkekihina oli lisaks baastarindis (vt. ptk. 7.6.1) kasutatud 22 mm puitkiudplaadile (tüüp A2 analoog) muudel juhtudel kasutatud 25 mm mineraalvillaplaati (tüüp A4) ning 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadi (tüüp A4) kombinatsiooni.

Arvutustes oli algniiskus seatud kõrgemale tasemele  $RH = 90\%$  ning algtemperatuur tasemele  $\theta = +22$  °C. Arvutusperioodi pikkuseks oli 12 kuud, mõõtmisi alustati aasta teisest poolest, et saada suurema niiskuskooormusega ja kriitilisemad tingimused.



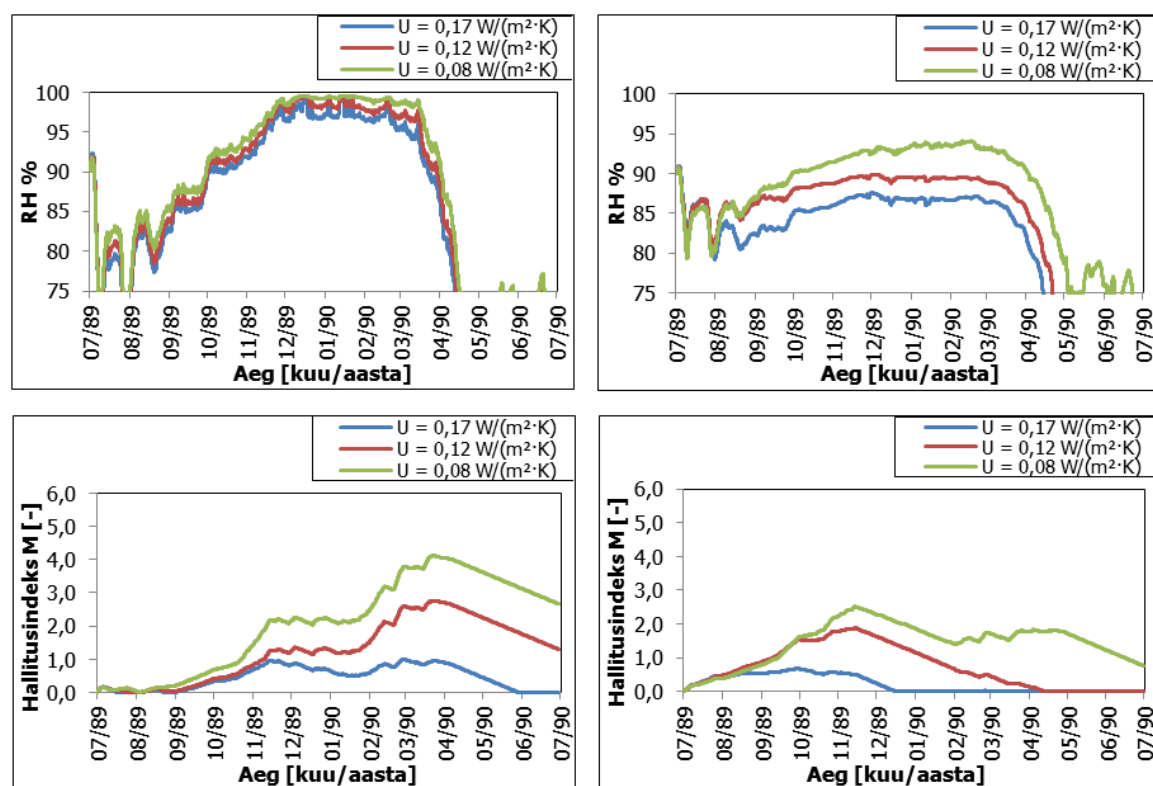
Vaatluse all olid madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseinad, mille soojuslähivus  $U = 0,08; 0,12$  ja  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Arvutuste tulemusel selgus, et kõrgema algniiskuse taseme ( $RH = 90\%$ ) korral olid hallitusindeksi maksimumväärtused märgatavalt kõrgemad võrreldes eelnevate arvutusolukordadega, kus algniiskuseks oli valitud  $RH = 80\%$ . Tulemused on esitatud järgnevas tabelites (Tabel 23 – Tabel 25) ja joonistel (Joonis 50 – Joonis 53).

**Tabel 23.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  möötepunktis A1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 90\%$ .

Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinaga soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]			Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinaga soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog); $S_d = 1,16\text{m}$ (C15 an.)	Väljakuivamise aeg [päevi]	290	287	286 *)	307	295	288
	Hallitusindeks $M$	4,1	2,7	1,0 *)	2,5	1,9	0,7

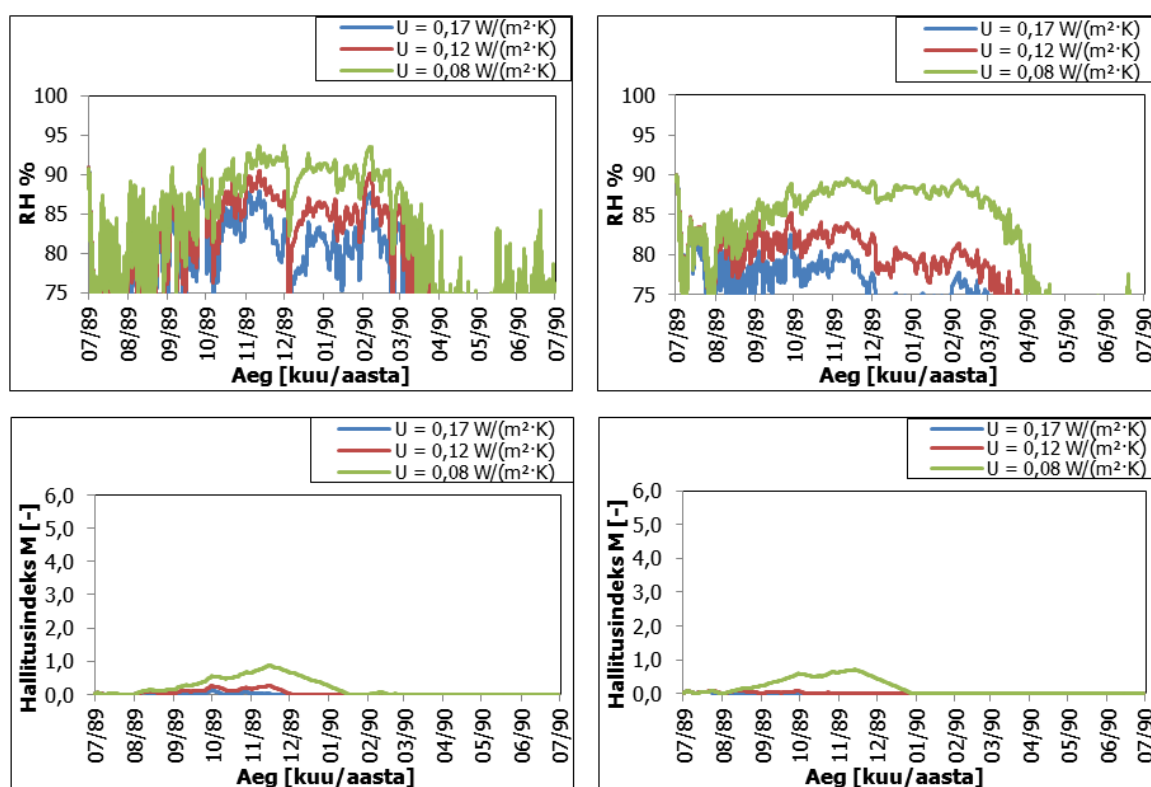
\*) BAASTARIND



**Joonis 50.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  möötepunktis A1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 90\%$ . Muud andmed vt. Tabel 23.

**Tabel 24.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  möötepunktis A1, 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 90\%$ .

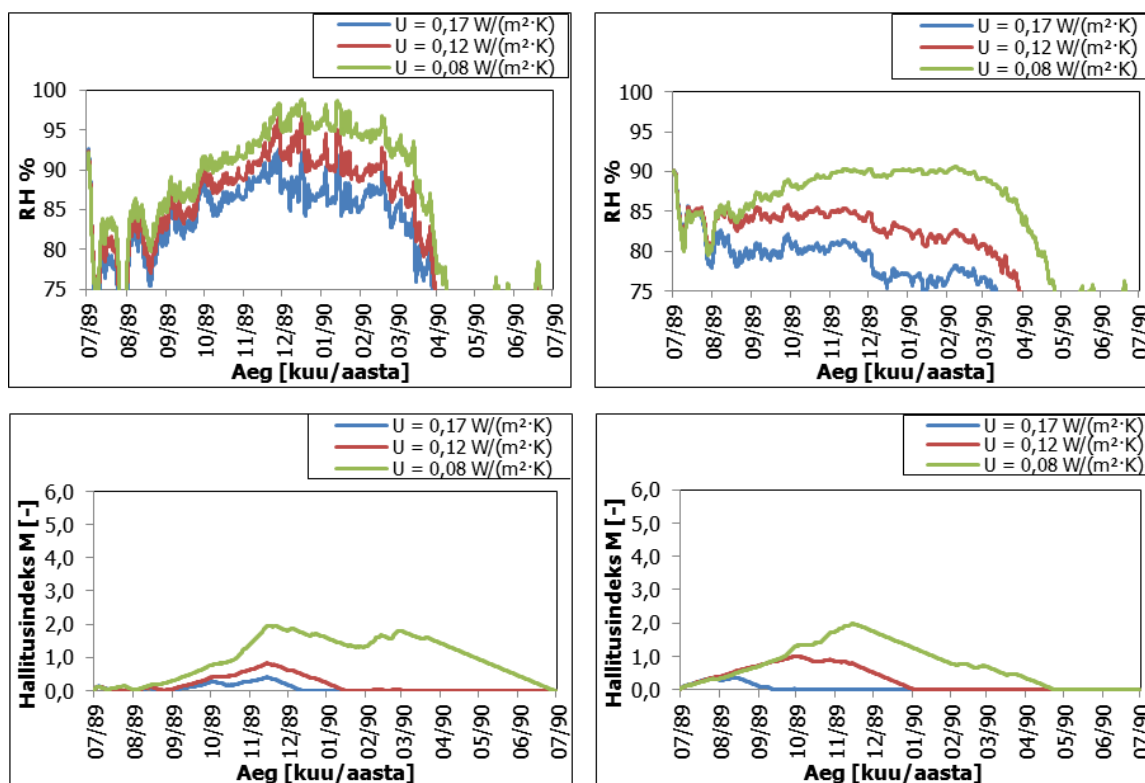
Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinaga soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]			Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinaga soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
Mineraalvilla-plaat 25mm (A4); $S_d = 1,16m$ (C15 an.)	Väljakuivamise aeg [päevi]	293	291	279	281	256	244
	Hallitusindeks $M$	0,9	0,3	0,1	0,7	0,1	0,1



**Joonis 51.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  möötepunktis A1, 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 90\%$ . Muud andmed vt. Tabel 24.

**Tabel 25.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  mõõtepunktis A1, 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 90\%$ .

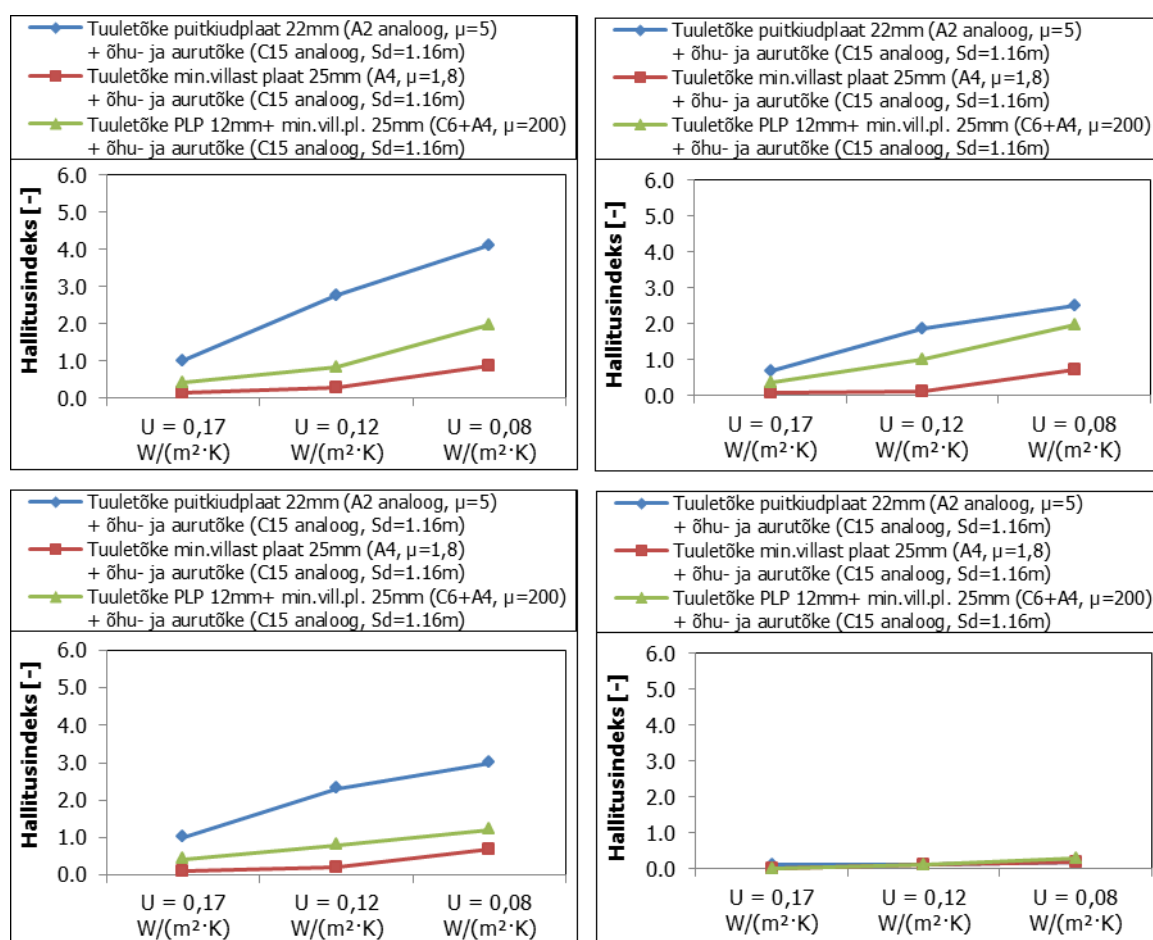
Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]			Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvilla-plaat 25mm (C6+A4); $S_d = 1,16m$ (C15 an.)	Väljakuivamise aeg [päevi]	283	274	272	299	272	254
	Hallitusindeks $M$	1,9	0,8	0,4	2,0	1,0	0,4



**Joonis 52.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  mõõtepunktis A1, 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 90\%$ . Muud andmed vt. Tabel 25.

Algniiskusega  $RH = 90\%$ , mõõtepunktis A1 mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinas arvatud hallitusindeksi väärtused võrreldes algniiskusega  $RH = 80\%$  samade õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkematerjalide korral (vt. Joonis 34 ja Joonis 53) näitavad, et mineraalvillaga soojustatud seintes olid hallitusindeksi algväärtused mõlemal juhul sarnased. Kuid hallitusindeksi kasv oli algniiskuse  $RH = 90\%$  arvutusolukorras suurem

ning hallitusindeksi väärtused 22 mm tuuletõkkeplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud seinas ulatusid tasemeni  $M = 4,1$ , samal ajal kui madalama algniiskuse ( $RH = 80\%$ ) korral oli sama materjali korral hallitusindeksi suurim väärtus  $M = 2,9$ . Sarnast erinevust oli näha ka juhul, kui tuuletõkkeks oli 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillplaadi (tüüp A4) kombinatsioon: kui  $RH = 80\%$ , siis oli hallitusindeksi väärtus  $M = 1,2$ ; kui  $RH = 90\%$ , siis oli hallitusindeksi väärtus  $M = 2,0$ . Mineraalvillast 25 mm tuuletõkkeplaadi korral oli erinevus väiksem, kuid võrreldes hallitusindeksiga  $M = 0,7$  (kui  $RH = 80\%$ ) oli hallitusindeks  $M = 0,9$  (kui  $RH = 90\%$ ).



**Joonis 53.** Võrdlus algniiskusega  $RH = 90\%$  (üleval) ja  $RH = 80\%$  (all): Hallitusindeksi  $M$  väärtus möötepunktis A1, mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas, kui õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-jõupaber (C15 analoog,  $S_d = 1,16 m$ ).

Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seintes samadel tingimustel tehtud hallitusindeksi arvutused näitasid, et algniiskuse  $RH = 90\%$  korral olid nii hallitusindeksi algväärtused kui maksimumid oluliselt kõrgemad võrreldes algniiskusega  $RH = 80\%$ . Kui algniiskuse  $80\%$  korral oli hallitusindeksi väärtus valitud materjalide lõikes  $0 < M < 0,3$ , siis  $90\%$  algniiskusega oli vastav väärtus vahemikus  $0,1 < M < 2,5$ . Kõige väiksem oli muutus

tselluvillaga soojustatud ja 25 mm mineraalvillaplaadiga kaetud seinas: kui  $RH = 80\%$ , siis  $M = 0,3$ ; kui  $RH = 90\%$ , siis  $M = 0,7$ . Kõige suurem oli tselluvillaga soojustuse korral muutus 22 mm puitkiudplaadiga kaetud seinas: kui  $RH = 80\%$ , siis  $M = 0,2$ ; kui  $RH = 90\%$ , siis  $M = 2,5$ .

### 8.3.2. Märtpaigaldatud tselluvillaga soojustatud seinad

Antud osas arvutati ja võrreldi väljakuivamise aega märtpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a, vee sisaldus paigaldusel  $\approx 25 \text{ kg/m}^3$ ) soojustatud tarindites, kus tuuletõkkekihina oli kasutatud 22 mm puitkiudplaati (tüüp A2 analoog) või 25 mm mineraalvillaplaati (tüüp A4) või 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadi (tüüp A4) kombinatsiooni. Arvutustes oli algniiskus seatud tasemele  $RH = 80\%$  ning algtemperatuur  $\theta = +22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Arvutusperioodi pikkuseks oli 12 kuud. Mõõtmisi alustati aasta teisest poolest, et saada suurema niiskuskooormusega ja kriitilisemad tingimused. Vaatluse all olid madal- ja liginullenergiahoone seinad, mille soojusläbivus  $U = 0,08; 0,12$  ja  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

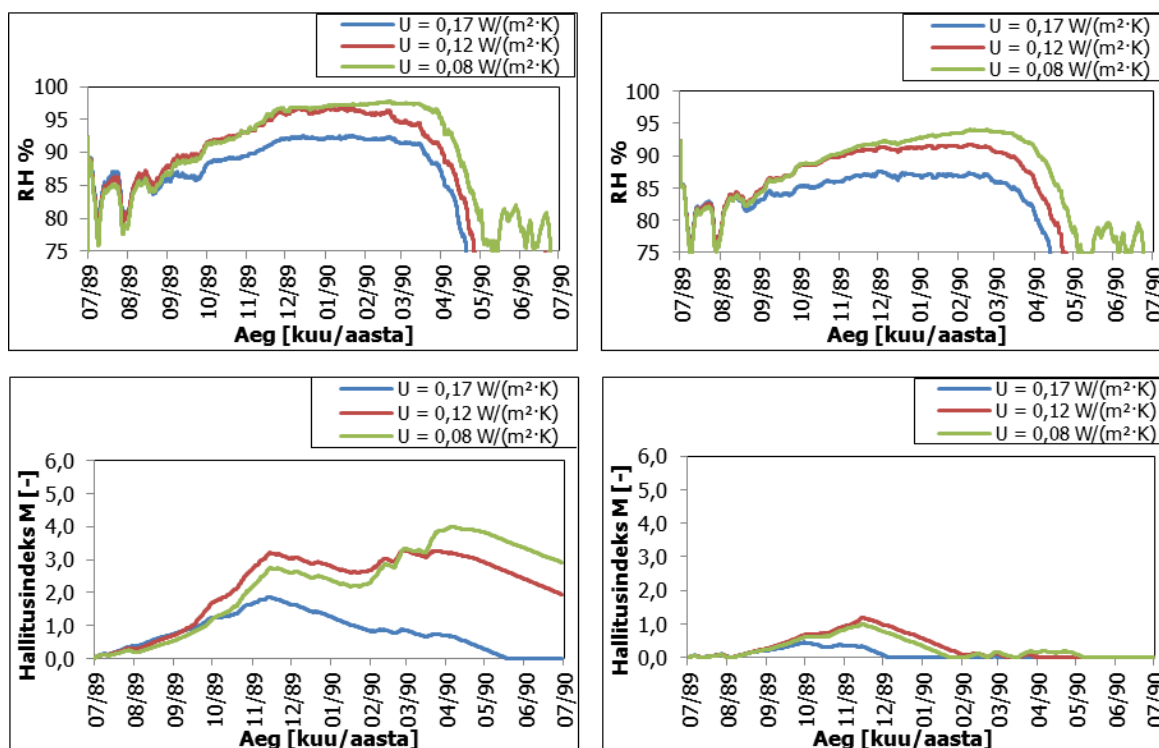
Arvutused tehti mõõtepunktides A1 ja B1, et tuvastada hallituse riske ning võrrelda seina väljakuivamise aegade pikkust erinevate tarindite korral nii sõrestikuposti kõrval, kus soojusläbivus on suurem ja temperatuurid kõrgemad, kui postide vahelisel alal, kus temperatuurid on madalamad ja suhtelise niiskuse tase seetõttu kõrgem.

Märtpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinte hallitusindeks  $M$  ning väljakuivamise aeg kasvavad seina soojusläbivuse vähenemisel. Mõõtepunktis B1, mis paiknes tuuletõkke- ja soojustuskihi piiril, kandva püstposti kõrval, oli hallitusindeks kõigi valitud tuuletõkkematerjalide korral allpool kriitilist piiri, välja arvatud juhul, kui tuuletõkkeks oli 22 mm puitkiudplaat (tüüp A2 analoog) ning seina soojusläbivus  $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , kus hallitusindeks  $M = 1,2$ . Vt. Joonis 54.

Võrdluseks on esitatud andmed märtpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seintest erinevate tuuletõkkematerjalidega, kus õhu- ja aurutõkkekihina on kasutatud PE-jõupaberit (tüüp C15, vt. Joonis 54 – Joonis 56) või PE-kilet (tüüp C11) ja bituumenpappi (tüüp B8), vt. Joonis 57. Tulemused on esitatud järgnevas tabelites (Tabel 26 – Tabel 29).

**Tabel 26.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$ , mõõtepunktis A1 ja B1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas kui algniiskus  $RH = 80\%$ .

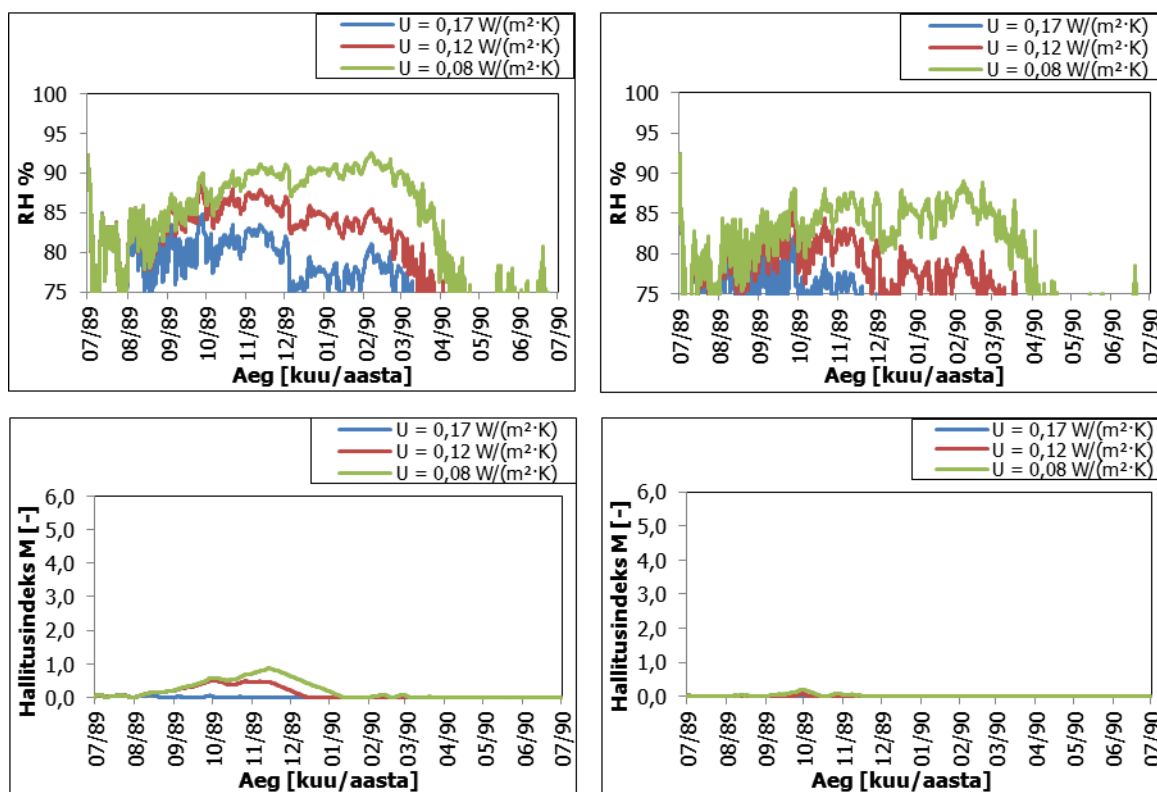
Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]; punktis A1			Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]; punktis B1		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog); $S_d = 1,15m$ (C15)	Väljakuivamise aeg [päevi]	359	299	294	359	296	287
	Hallitusindeks $M$	4,0	3,3	1,9	1,0	1,2	0,5



**Joonis 54.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  mõõtepunktis A1 (vasakul) ja B1 (paremal), 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkehiks on PE-jõupaber (tüüp C15,  $S_d = 1,15 m$ ). Muud andmed vt. Tabel 26.

**Tabel 27.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$ , mõõtepunktis A1 ja B1, 25 mm mineraalvillaplaadiga tüüp A4) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$ .

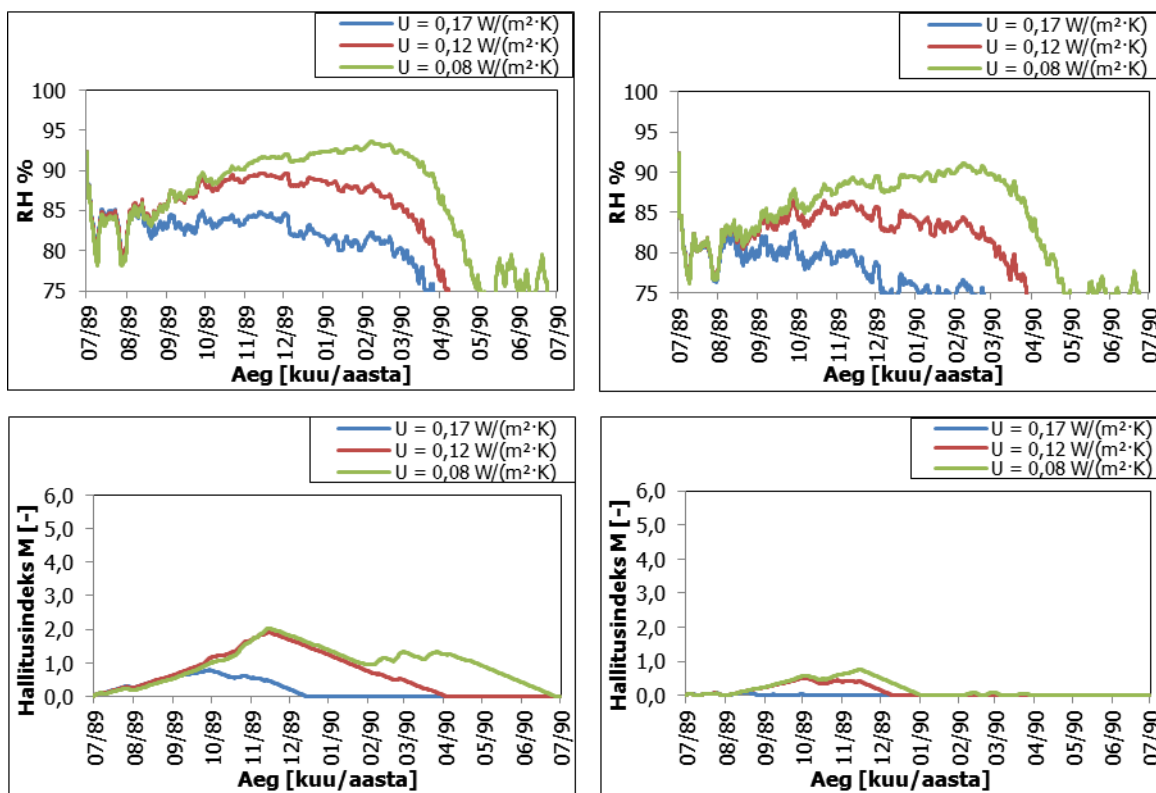
Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]; punktis A1			Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]; punktis B1		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
Mineraalvilla-plaat 25mm (A4); $S_d = 1,15m$ (C15)	Väljakuivamise aeg [päevi]	355	269	261	278	262	99
	Hallitusindeks $M$	0,9	0,5	0,1	0,2	0,1	0



**Joonis 55.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  mõõtepunktis A1 (vasakul) ja B1 (paremal), 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkehik on PE-jõupaber (tüüp C15,  $S_d = 1,15 m$ ). Muud andmed vt. Tabel 27.

**Tabel 28.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$ , mõõtepunktis A1 ja B1, 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$ .

Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]; punktis A1			Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]; punktis B1		
		0,08	0,12	0,17	0,08	0,12	0,17
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4); $S_d = 1,15m$ (C15)	Väljakuivamise aeg [päevi]	358	281	269	358	270	237
	Hallitusindeks $M$	2,0	1,9	0,8	0,8	0,5	0,1

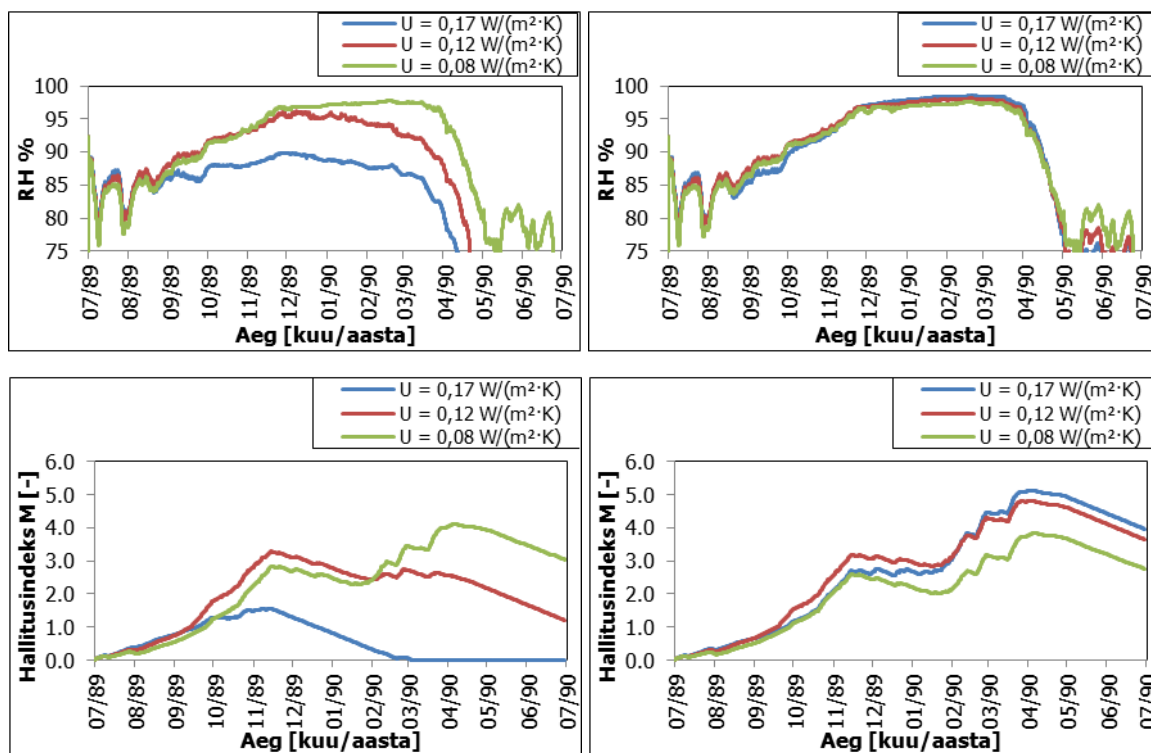


**Joonis 56.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$  mõõtepunktis A1 (vasakul) ja B1 (paremal), 12 mm puitlaastplaadi (tüüp C6) ja 25 mm mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-jõupaber (tüüp C15,  $S_d = 1,15 m$ ). Muud andmed vt. Tabel 28.



**Tabel 29.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$ , mõõtepunktis A1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$ .

Tuuletõke [mm] (tüüp); õhu- ja aurutõke (tüüp)	Väljakuivamise aeg [päevi] Tasemeni $RH = 75\%$ ja hallitusindeks $M$	Tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]; punktis A1		
		0,08	0,12	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog); $S_d = 30,0m$ (C11)	Väljakuivamise aeg [päevi]	359	295	285
	Hallitusindeks $M$	4,1	3,3	1,6
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog); $S_d = 0,09m$ (B8)	Väljakuivamise aeg [päevi]	359	357	356
	Hallitusindeks $M$	3,9	4,8	5,1



**Joonis 57.** Niiskuse väljakuivamine tasemeni  $RH = 75\%$  ja hallitusindeks  $M$ , mõõtepunktis A1, 22 mm puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ning märgpaigaldatud tselluvillaga (tüüp D4a) soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$  ja õhu- ja aurutõkkekihiks on PE-kile (tüüp C11,  $S_d = 30,0 m$ , vasakul) või bituumenpapp (tüüp B8,  $S_d = 0,09 m$ , paremal). Muud andmed vt. Tabel 29.

## 9. TULEMUSTE ANALÜÜS JA HINDAMINE

Arvutustulemuste analüüsi käigus leidis kinnitust, et madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseina niiskustehnilise toimivuse juures on määravaks nii kliimatingimused ja tarindi soojuslähivus kui ka soojustuskihi, õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkematerjalide omadused. Arvutustulemustest selgus, et väga oluline roll on algniiskuse tasemel. Kui algniiskusega  $RH = 80\%$  oli seina hallitusindeks lubatud kriitilisest piirist ( $M < 1$ ) allpool, siis algniiskuse tõstmisel tasemele  $RH = 90\%$  ületas samade omadustega tarindis maksimaalne hallitusindeksi  $M$  väärtus lubatud kriitilise piiri mõnel juhul mitmekordselt.

Kondensaadi tekke ja selle kestuse arvutamisel lähtuti kättesaadavatest andmetest selle kohta, et kondenseerumine poorsetes materjalides toimub kapillaarses alas, kui  $RH > 97\%$  ja difuusne niiskusvoog on minimaalne, materjali poorid on täitunud veega ning ei suuda enam pooridesse lisanduvat vaba vett siduda. Teise lähteallikana kasutati vastavalt standardile DIN 4108-3 lubatud maksimaalset niiskuse kondenseerumise hulka ( $< 0,5 \text{ kg/m}^2$ ) tarindis kokkupuutuvatel pindadel [80]. Mõõdeti ka kondensaatpäevade arvu, kuid ilma piirväärtusi seadmata, sest selle kriitilisuse kohta lähteallikaid ei leidunud. Valitud tingimuste korral selgus, et kondenseerumine tarindites mõõdetud punktis toimus vaid väga külmal perioodil detsembrist märtsikuuni, kui välistemperatuurid olid ööpäevaringselt madalamad kui  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 9.1. Hallitusindeksi arvutustulemuste analüüs

Hallitusindeksi taseme ja selle muutumise põhjuste analüüsimiseks arvutati hallitusindeksi  $M$  väärtusi erinevates arvutusolukordades, et leida faktorid, mis enim mõjutavad hallitusindeksi taset ja selle muutumist.

#### 9.1.1. Hallitusindeksi muutus võrreldes baastarindiga

Antud juhul oli baastarindi (vt. ptk. 7.6.1) hallitusindeks seatud tasemele  $M = 0,99$  kui seina soojuslähivus  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Jälgiti hallitusindeksi muutust kõigi vaadeldud seinatüüpide korral muid näitajaid muutmata.

Arvutustulemusi võrreldes (Vt. Tabel 14 ja Joonis 34) on näha, et hallitusindeksite tasemed võrreldes baastarindiga on väga erinevad ning seina soojuslähivuse vähenemisel ja soojustuskihi paksuse ehk suhtelise niiskusmahtuvuse suurenemisel kasvab ka maksimaalne hallitusindeksi  $M$  väärtus. Võrreldes hallitusindeksi taset ja

muutust mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seintes (vt. Joonis 34 – Joonis 37), on selgelt näha, et tselluvillaga soojustatud seintes suureneb hallitusindeks samuti seinaga soojuslähivuse vähenemisel ja soojustuskihi paksuse suurenemisel, kuid hallitusindeksi tase on oluliselt madalamal ning ületab kriitilise piiri (s.t.  $M > 1$ ) vaid juhtudel, kui tuuletõkkekihina on kasutatud muude siintoodud materjalidega võrreldes madalama niiskuselähivusega 12 mm puitlaastplaati (tüüp C6;  $Z_p = 1,21E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90E+04 \text{ s}/\text{m}$ ). Mineraalvillaga soojustatud seintes on hallitusindeksi kasv seinaga soojuslähivuse vähenemisel väiksem, kui tuuletõkkekihiks on madala veeaurutakistusega mineraalvillaplaat (tüüp A4). Suurema veeaurutakistusega tuuletõkkekihtide korral on hallitusindeksi kasv märgatavalt intensiivsem ning on seinaga soojuslähivuse  $U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  korral ligi 3 korda kõrgem võrreldes mineraalvillast tuuletõkkega seinaga.

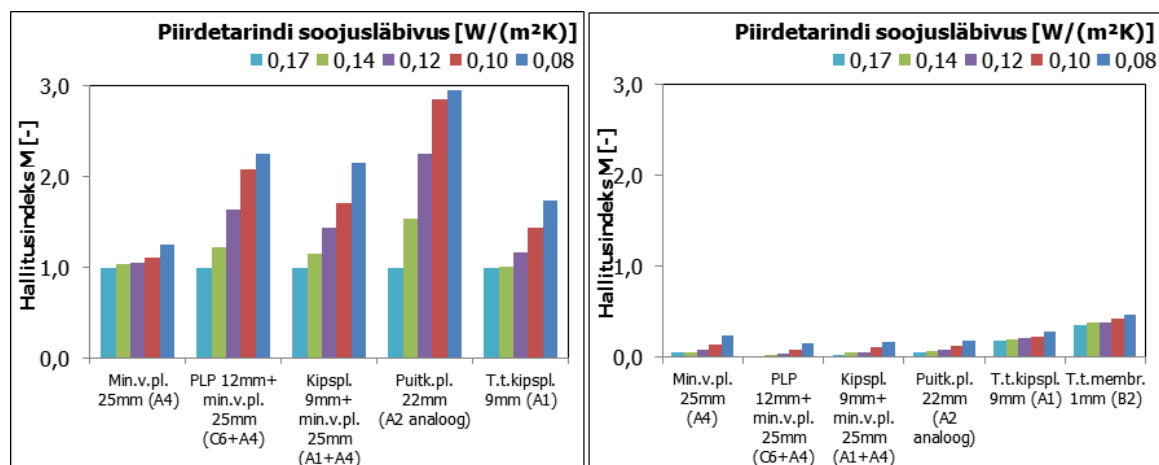
Kokkuvõttes võib kinnitada, et hallitusindeks kasvab võrdeliselt seinaga soojuslähivuse vähenemisega ning kasv on oluliselt madalam hügrokoopse soojustusmaterjali korral ning juhtudel, kui kasutatakse tuuletõkkekihina madala veeaurutakistusega materjale. Sarnaseid järeldusi leiab ka varasematest töödest [18, 26, 78]. Erinevate niiskustehniliste omadustega materjalide kasutamisel ning soojustuskihi paksuste suurendamisel tuleb kindlasti arvestada asjaoluga, et niiskuskahjustuste risk kasvab ning hallitusindeksi väärtused ja kasv võivad erineda mitmekordselt.

### 9.1.2. Seinaga soojuslähivuse mõju

Peatükis 8.1.2 kirjeldatud arvutustes võrreldi sarnaste algtingimuste (kliima, algtemperatuur, suhteline niiskus ja niiskuslisa) ning tarindis kasutatud võrdsete materjaliomadustega (samad õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkekihi materjalid), kuid erineva soojuslähivusega puitsõrestikseintes hallitusindeksi taset ja muutust soojuslähivuse muutumisel.

Andmete võrdlemisel selgub, et sõltumata materjalide soojuserijuhtivusest ja tuuletõkke- ning õhu- ja aurutõkkekihtide tõhususest vähenevad hallitusindeksi väärtuste erinevused seinaga soojuslähivuse vähenemisega proportsionaalselt, kuid erinevatel tasemetel. Hügrokoopse tselluvilla korral on tasemete muutus märgatavalt madalam võrreldes mineraalvillast soojustusega seintega. Samuti on täheldatav mineraalvillast tuuletõkkekihiga seinte korral hallitusindeksi taseme väiksem muutus võrreldes muude vaadeldud materjalidega, mis on seletatav selle materjali madala veeimavuse ning difusioonitakistusega.

Joonis 58 näitab hallitusindeksi tasemete ja nende muutumise erinevust mineraal- ja tselluvillaga soojustatud seintes.



**Joonis 58.** Hallitusindeksi  $M$  väärtused erinevate tuuletõkkematerjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas võrreldes baastarindiga. Siin kõigi seinte korral: algniiskus  $RH = 80\%$  ja kui seina soojuslähivus  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , siis  $M = 0,99$ . Õhu- ja aurutõkkekihid on kirjeldatud Tabel 18.

Hallitusindeks suureneb võrdeliselt seina soojuslähivuse vähenemisega, kuid sama soojuslähivusega seintes, erinevate soojustus-, õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkematerjalide korral võivad hallitusindeksi väärtused, seega ka hallituse tekke tõenäosus, väga suurel määral erineda.

### 9.1.3. Tuuletõkke ja selle lisasoojustuskihi mõju

Peatükis 8.1.3 esitatud arvutustulemustest nähtub, et suurema veeaurulähilaskvusega ja külmemalt poolelt lisasoojustuskihiga kaetud tuuletõkkematerjalide korral on hallitusindeksi tasemed erinevate seinte soojuslähivuste korral kriitilise taseme piires. See on seletatav asjaoluga, et lisasoojustuse korral on tuuletõkkekihi taga oleva soojustuse temperatuur kõrgem ja seega ka suhteline niiskus madalam ning hallituse tekke riskid seetõttu väiksemad.

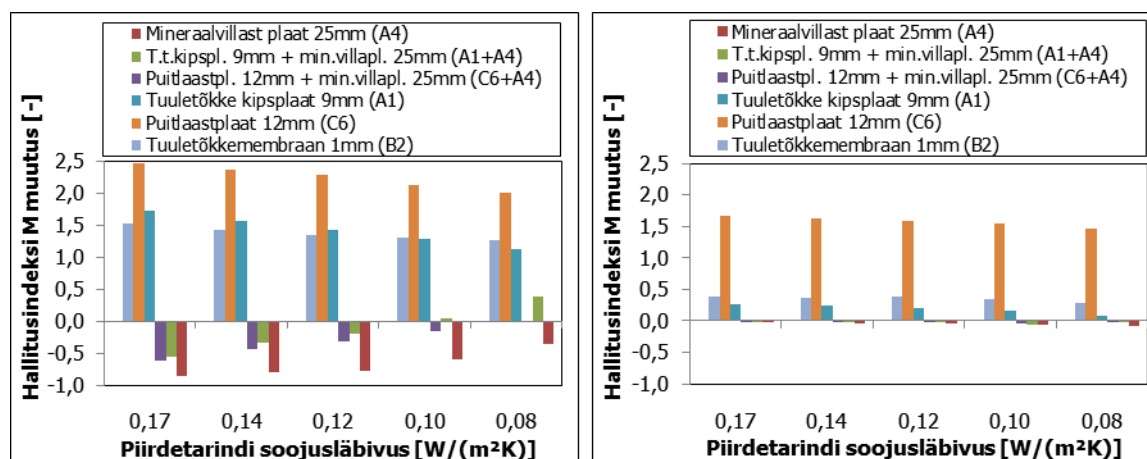
Järgnevas tabelis (Tabel 30) ja joonisel (Joonis 59) on kõigis puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud ja mineraalvillaga soojustatud seintes, kui soojuslähivus  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , seatud hallitusindeks tasemele  $M = 0,99$ . Tabel kirjeldab arvutatud hallitusindeksi taseme muutust võrreldes puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) kaetud seinaga. Andmed põhinevad arvutustulemustel, mis on toodud Tabel 19. Andmete võrdlemisel selgub, et sõltumata materjalide soojuseriituvusest ja tuuletõkke- ning õhu- ja aurutõkkekihtide tõhususest vähenevad hallitusindeksi väärtuste erinevused

seina soojuslähivuse vähenemisega proportsionaalselt. See on seletatav sellega, et suurematel hallitusindeksi tasemetel ( $M > 2$ ) on materjalid juba märgatavalt niiskunud ning vee hulk oluliselt ei muutu soojustuskihi paksuse suurenemisel.

**Tabel 30.** Hallitusindeksi  $M$  muutus erinevate tuuletõkkmaterjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1) ja tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinas võrreldes baastarindiga, kui algniiskus  $RH = 80\%$ . Öhu- ja aurutõkkekigid on kirjeldatud Tabel 19.

Tuuletõke [mm] (tüüp)	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinaga soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seinaga soojuslähivus $U$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog); Hallitusindeks $M = 0,99$	0	0	0	0	0 <sup>*)</sup>	0	0	0	0	0
Mineraalvillaplaat 25mm (A4)	-0,4	-0,6	-0,8	-0,8	-0,9	-0,1	-0,1	0	0	0
Kipsplaat 9mm + mineraalvillaplaat 25mm (A1+A4)	0,4	0,1	-0,2	-0,3	-0,6	-0,1	-0,1	0	0	0
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillaplaat 25mm (C6+A4)	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	0	-0,1	0	0	0
Kipsplaat 9mm (A1)	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Puitlaastplaat 12mm (C6)	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
Tuuletõkkemembraan 1mm (B2)	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4

\*) BAASTARIND



**Joonis 59.** Hallitusindeksi  $M$  muutus erinevate tuuletõkkmaterjalide korral mineraalvillaga (tüüp D1, vasakul) ja tselluvillaga (tüüp D4, paremal) soojustatud seinas võrreldes baastarindiga, kui algniiskus  $RH = 80\%$ . Öhu- ja aurutõkkekigid on kirjeldatud Tabel 19.

Erinevate tuuletõkkematerjalide kasutusvõimalusi hallitusindeksi kriitilise piiri ( $M < 1$ ) ületamise vältimiseks kirjeldati ptk. 8.1.4, kus olid välja toodud uuritud tuuletõkkematerjalidele lisatud soojustuskihi paksused. Tuuletõkkematerjal, mis on reeglina suurema tiheduse ja väiksema poorsusega kui põhisojustuse kihid, on vahetus kontaktis külma välisõhuga. Seetõttu muutub niiskusrežiim soojustuse ja tuuletõkkekihi kokkupuutejoonel järsult. Niiskusvoog, mis läbib suhteliselt madala veeaurutakistusega (näit. mineraalvill) või kõrge tasakaaluniiskuse tasemega (näit. tselluvill) soojustuskihi, muutub tuuletõkkekihini jõudes sedavõrd, et kogu juurdekanduv niiskus ei jõua piisaval hulgal läbi tihedama tuuletõkkekihi tarindist väljuda. Samas on tuuletõkkekihi temperatuur külmal perioodil madalam seina sisemiste kihtide temperatuurist. See toob kaasa tuuletõkkekihis suhtelise niiskuse taseme tõusu sellisel määral, et võib käivitada kapillaarse niiskusvoo vastupidises suunas ja vesi hakkab liikuma tagasi tarindisse.

Selle protsessi leevendamiseks on vajalik tuuletõkkekihi soojusläbivust vähendada, et alandada suhtelise niiskuse taset ja tekkiva kapillaarvee hulka antud piirkonnas. Selleks valiti tarinditele, kus arvatud hallitusindeksi väärtus ei rahuldanud seatud kriitilise piiri tingimust ( $M < 1$ ), tuuletõkkekihi välispinnale jäigast mineraalvillaplaadist (tüüp A3) lisasoojustuskiht selliselt, et peale lisasoojustamist oleks tagatud seinas hallitusindeksi tase  $M < 1$ . Vaatluse all olid seinad, kus tuuletõkkematerjalina oli kasutatud 22 mm puitkiudplaate (tüüp A2 analoog), 25 mm mineraalvillaplaate (tüüp A4), 9 mm tuuletõkke kipsplaate (tüüp A1) ning 12 mm puitlaastplaate (tüüp C6). Valitud tarindite korral kasutati tuuletõkkekihi soojustakistuse tõstmiseks erinevates paksustes mineraalvillaplaate (tüüp A3).

Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinte korral selgus arvutuste tulemusel, et mineraalvillaplaadiga (tüüp A4) kaetud tarindites puudus vajadus tuuletõkkekihi täiendavaks lisasoojustamiseks, sõltumata õhu- ja aurutõkkekihi tõhususest. Muude tuuletõkkematerjalide korral varieerus tuuletõkkekihi vajalik minimaalne lisasoojustuskiht vahemikus 5 ... 105 mm, sõltuvalt tuuletõkkekihi omadustest ning õhu- ja aurutõkkekihi tõhususest. Kõigi tuuletõkkekihi lisasoojustusega kaetud seinte korral täheldati korrelatsiooni lisasoojustuse kihi paksuse kasvu, seina soojusläbivuse vähenemise ning õhu- ja aurutõkkekihi tõhususe languse vahel. Suurema soojusläbivusega seina ja väiksema veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekihi korral peab soojustuskihist erinevale tuuletõkkekihile lisama suurema lisasoojustuse kihi, et mitte ületada hallitusindeksi kriitilist väärtust ( $M < 1$ ).

#### 9.1.4. Õhu- ja aurutõkkekihi mõju

Arvestades kliimatingimustest sõltuvat asjaolu, et meie laiuskraadidel on suurem osa aastast temperatuurid köetavates töö- ja eluruumides kõrgemad kui väljas ning veeauru osarõhk siseruumides tavakasutusel kõrgem, tuleb välispiirete projekteerimisel arvestada ka niiskusvooga, mis võib piiretesse liikuda suunaga seestpoolt väljapoole, läbides selles paikneva erinevate omadustega kihte. Madalama veeauruläbilaskvusega kihtides võib toimuda selle käigus liigniiskuse kogunemine ja sellest tingitud niiskuskahjustused ning hallituse teke. Seetõttu on niiskuse läbipääsu takistava õhu- ja aurutõkkekihi olemasolu ja kvaliteetne paigaldus madal- ja liginullenergiahoonete piirete sisepoolel väga oluline.

Eelpool kirjeldatud arvutusolukordades (vt. ptk. 8.1.1 ja ptk. 8.1.2) oli kasutatud õhu- ja aurutõkkematerjale, mille suhteline difusioonitakistus  $S_d = 1,15$  m (PE-jõupaber, tüüp C15),  $S_d = 5,00$  m (PE-jõupaber, tüüp C7) ja  $S_d = 30,0$  m (PE-kile, tüüp C11). Selliste omadustega õhu- ja aurutõkkekiht oli enamikel juhtudel piisav, et tagada suurema soojusläbivusega tarindis sobiv niiskusrežiim ja takistada niiskuse läbipääsu sellistes kogustes, mis võiks tekitada kriitilisel hulgal hallitust erinevate omadustega tuuletõkkematerjalide korral. Erandiks olid suure veeauruläbilaskvusega õhu- ja aurutõkkekihiga (bituumenpaber, tüüp B5,  $S_d = 0,09$  m) ja madala veeauruläbilaskvusega puitlaastplaadiga (tüüp C6) ja tuuletõkke kipsplaadiga (tüüp A1) kaetud seinad, mis mineraalvillast soojustuse korral tekitasid olukorra, kus sõltumata õhu- ja aurutõkke efektiivsusest oli tarindis üle kriitilise taseme ( $M > 1$ ) hallituse teke täheldatav. Sama toimus ka tselluvillaga soojustatud ja puitlaastplaadiga (tüüp C6) kaetud seinas.

Joonis 35 näitab, et mineraalvillaga soojustatud seinaga korral on madala veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekiht (näit. bituumenpaber, tüüp B5) lubatud vaid juhul, kui tuuletõkkeks on madala veeaurutakistusega, antud juhul 25 mm, mineraalvillast tuuletõkkeplaat (tüüp A4;  $Z_p = 2,27E+08$  m<sup>2</sup>·s·Pa/kg;  $Z_v = 1,67E+03$  s/m). Suurema niiskusmahtuvusega tselluvillaga soojustatud seinas oli olukord hallitusele kriitiline vaid juhul, kui tuuletõkkeks oli madalama niiskusläbivusega puitlaastplaat (tüüp C6;  $Z_p = 1,21E+10$  m<sup>2</sup>·s·Pa/kg;  $Z_v = 8,90E+04$  s/m).

Võrreldes eespool toodud tulemusi (Tabel 14, Joonis 34 – Joonis 37, Joonis 43 – Joonis 48) on selgelt tuvastatav, et õhu- ja aurutõkkekihi niiskustakistuse suurenemisel väheneb kogu tarindi niiskusrežiimi halvenemise risk ning hallitusindeks väheneb. See kinnitab veelkord õhu- ja aurutõkkekihi niiskusläbivuse olulist rolli kogu seinaniiskustehnilises toimivuses. Nimetatud andmete põhjal võib kinnitada, et kerge

mineraalvillaga (näit. tüüp D1) soojustatud puitsõrestikseinas on lubatud õhu- ja aurutõkkeks kasutada bituumenpaberit (näit. tüüp B5;  $Z_p = 6,92E+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 5,08E+03 \text{ s}/\text{m}$ ) vaid juhul, kui tuuletõkkematerjali veeaurujuhtivus ei ole madalam, kui on 25 mm mineraalvillaplaadil (näit. tüüp A4,  $\mu = 1,8$ ,  $Z_p = 2,27E+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 1,67E+03 \text{ s}/\text{m}$ ).

Tselluvillaga (näit. tüüp D4) soojustatud puitsõrestikseintes õhu- ja aurutõkkekihile kõrgeid nõudmisi veeaurutakistuse osas ei esitata, sest erinevate veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekihtide ( $Z_p = 6,92E+08 \dots 8,99E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 5,08E+03 \dots 6,60E+05 \text{ s}/\text{m}$ ) korral kriitilist hallitusindeksi piiri ei ületatud. Küll aga ei ole lubatud tselluvillaga soojustatud seinas kasutada tuuletõkkeks kõrge veeaurutakistusega puitlaastplaate ilma lisasoojustuskihita (näit. 12 mm, tüüp C6,  $Z_p = 1,21E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90E+04 \text{ s}/\text{m}$ ), sest sel juhul on hallituse teke vältimatu. Seega on veelkord kinnitust leidnud, et õhu- ja aurutõkkekihi veeauruläbilaskvus mõjutab väga olulisel määral seda, milliseks kujuneb välispiirdes niiskuse hulk.

## 9.2. Kondensaadi tekke ja selle ajalise kestuse analüüs

Kondensaadi tekke ja selle ajalise kestuse kohta tehtud arvutustest (vt. ptk. 8.2) selgub, et suurema niiskusmahtuvusega tselluvill (tüüp D4) suudab vett siduda suures koguses ning on seetõttu tarindisse sisenevale niiskusele puhvriks ja kondensaati ei teki. Mittehügrokoopse mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seintes on tekkiva kondensaadi hulk ja selle ajaline kestus vaadeldud tarindites kõige suurem juhul, kui tuuletõkkeks on kasutatud puitkiudplaati (tüüp A2 analoog). See on seletatav asjaoluga, et väikese niiskusmahtuvusega mineraalvill laseb kogu siseneva niiskuse endast läbi vaba veena ja puitkiudplaadi veeauruläbilaskvus võrreldes soojustuskihiga on mitmeid kordi väiksem. Seetõttu tõuseb tuuletõkkeplaadi ja soojustuskihi kokkupuute piirkonnas suhteline õhuniiskus üle 97% ning püsib sel tasemel pikka aega, kui temperatuurid väljas on allpool 0 °C.

Kondensaadi tekkimist oli võimalik vähendada või vältida, kui suurendati seinas kasutatud õhu- ja aurutõkkekihi veeaurutakistust – kasutades PE-jõupaberi (tüüp C15) asemel PE-kilet (tüüp C11), oli vaadeldud tarindites kondensaatpäevade arv väiksem ning tekkiva kondensaadi hulk allpool seatud kriitilist piiri ( $< 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ ) või puudus üldse ning seda vaatamata tarindi soojuslähivuse vähenemisele.



Arvutustulemused näitasid, et tuuletõkkekihi veeaurutakistus omab suuremat tähtsust kui soojustakistus – madala veeaurutakistusega mineraalvillplaadi (tüüp A4;  $Z_p = 2,27E+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 1,67E+03 \text{ s}/\text{m}$ ,  $R = 0,81 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) kasutamisel kondenseerumist ei esinenud, samal ajal kui suurema veeaurutakistusega puitlaastplaadi (tüüp C6,  $Z_p = 1,21E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90E+04 \text{ s}/\text{m}$ ) ja mineraalvillplaadi (tüüp A4) kombinatsiooni korral (tuuletõkkekihi soojustakistus  $R = 0,90 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) siiski teatud määral kondenseerumist esines.

**Tabel 31.** Õhu- ja aurutõkkekihi ning tuuletõkkekihi veeaurutakistuste  $Z_p$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ] minimaalne suhtarv  $Z_{p(\text{auaurtõke})} : Z_{p(\text{tuuletõke})}$  ning õhu- ja aurutõkkekihi suhteline difusioonitakistus  $S_d$  erinevate tuuletõkete korral mineraalvillaga ja tselluvillaga soojustatud seinas, kui algniiskus  $RH = 80\%$ , hallitusindeks  $M < 1$  ning kondensaadi hulk  $< 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ .

Tuuletõke [mm] (tüüp) + lisakiht [mm] (tüüp)	Tuule- tõkkekihi soojus- takistus $R$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]					Tselluvillaga (tüüp D4) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]				
	Õhu- ja aurutõkke- kihi suhteline dif.takistus $S_d$ [m]	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
Puitlaastplaat 12mm + mineraalvillplaad 25mm (C6+A4)	$R = 0,90$	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
	$S_d$	2,20	1,80	1,35	1,25	1,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Kipsplaat 9mm + mineraalvillplaad 25mm (A1+A4)	$R = 0,85$	85:1	42:1	25:1	13:1	9:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
	$S_d$	10,0	4,80	3,00	1,55	1,00	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Mineraalvilla plaat 25mm (A4)	$R = 0,81$	3:1	3:1	3:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
	$S_d$	0,15	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Puitkiudplaat 22mm (A2 analoog)	$R = 0,44$	267:1	90:1	35:1	27:1	22:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
	$S_d$	30,0	10,0	3,90	3,00	2,40	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Kipsplaat 9mm (A1)	$R = 0,05$	X	X	413:1	139:1	88:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
	$S_d$	X	X	30,0	10,0	7,00	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Puitlaastplaat 12mm (C6)	$R = 0,09$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tuuletõkke- membraan 1mm (B2)	$R = 0,01$	X	X	X	X	X	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1
	$S_d$	X	X	X	X	X	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Märkused:

Suhtarvud ( $Z_{p(\text{auaurtõke})} : Z_{p(\text{tuuletõke})}$ ) on ümardatud ülespoole lähima täisarvuni

X – antud algingimuste ja materjalide valiku korral sobiv lahendus puudub

Võttes aluseks peatükis 8.1 toodud hallitusindeksi ja peatükis 8.2 toodud kondensaadi tekke arvutustulemused, saame esitada kokkuvõtte, milline on vähim lubatud õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkekihi veeaurutakistuste  $Z_p$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ ] suhe antud algingimustel  $Z_{p(\text{aaurtõkke})} : Z_{p(\text{tuuletõkke})}$  selleks, et nii hallitusindeksi piirväärtuse ( $M < 1$ ) kui kondensaadi lubatud tekkekoguse ( $< 0,5 \text{ kg/m}^2$ ) kriteeriumid oleksid samaaegselt täidetud. Tulemused on esitatud järgnevas tabelis (vt. Tabel 31).

Seega leidis ka kondensaadi tekke arvutustulemuste põhjal kinnitust, et õhu- ja aurutõkkekihil on väga oluline roll konstruktsiooni siseneva ja selles liikuva niiskuse hulga reguleerimisel. Suurema veeaurutakistusega kiht tarindi sisepinnale lähedases seinas tagab madalama niiskuse taseme kogu konstruktsioonis. Kondensaadi ajalise kestuse kohta võrdlusmaterjali või kriitilisi hinnanguid varasemates teadustöodes ei leidu. Samas on märgitud, et kondensaadi pikaajaline kestus võib avaldada mõju tarindi püsivusele ning luua tingimused hallitusseente arenguks [24, 26]. Ka eeltoodud analüüsist selgub, et kondenseerumisega samaaegselt ilmnevad tarindis hallituse tekkeks soodsad tingimused, eelkõige kõrge suhtelise niiskuse taseme tõttu.

Eeltoodud andmete võrdlemisel samalaadsete varasemate uurimustega [14, 52] on võimalik leida sarnasusi puitkiudplaadi (A2 analoog) ja mineraalvillaplaadi (tüüp A4) korral, kus mineraalvillast soojustusega seinas on suhtarv  $Z_{p(\text{aaurtõkke})} : Z_{p(\text{tuuletõkke})}$  vahemikus 2:1 kuni 267:1, sõltuvalt tarindi soojuslähivusest ja kasutatud tuuletõkkematerjalist. Täielikku sarnasust varem tehtud analüüsides ei ole, sest kasutatud on nii erinevaid niiskulisa  $\Delta v$  [ $\text{kg/m}^3$ ] väärtusi kui kliimatingimusi. Ülaltoodust nähtub ka, et näit. Soome ehitusmäärustikus [90] antud minimaalne suhtarv 5:1 ei ole antud tüüpi tarindite korral alati piisav. Suurimad erinevused antud soovitusel on puitkiudplaadiga (tüüp A2 analoog) ning tuuletõkke kipsplaadiga (tüüp A1) kaetud puitsõrestikseinte puhul.

### 9.3. Niiskuse väljakuivamise arvutustulemuste analüüs

Niiskuse väljakuivamise arvutustes kasutati kontrolltasemeks suhtelist niiskust  $RH = 75\%$ , millest ülalpool ilmneb inimorganismile ohtlikke mikrobioloogilisi protsesse ja tekib hallitust [91]. Niiskuse väljakuivamise hindamisel vaadeldi ka aega päevades, mis kulus seinas sellise tasemeni jõudmiseks. Tarindeid võrreldi nii erineva algniiskuse kui erinevate soojustus-, õhu- ja aurutõkke- ning tuuletõkkematerjalide kasutamisel (vt.

Tabel 23 – Tabel 25 ja Joonis 50 – Joonis 53). Kõigil vaadeldud juhtudel on täheldatav, et seina soojusläbivuse vähenemisel niiskuse väljakuivamise aeg pikeneb. Selle põhjuseks võib pidada suuremat veeauru hulka seinas suurema seina mahu korral. Eeltoodud võrdlusandmetest nähtub, et kui õhu- ja aurutõkkekihi veeaurutakistus on madalam ja seinte väljakuivamiseks kulub enam aega, on ka hallitusindeksi väärtus suurem. Samas ei ole väljakuivamise aegade erinevused suures sõltuvuses seinte soojusläbivusest, kuid muutused seina soojusläbivuse vähenemisel suurenevad tselluvillaga soojustatud seintes, kui  $U < 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Tähelepanu tuleb siinjuures pöörata sellele, et hallitusindeksi piirväärtuse ( $M < 1$ ) kriteerium ei ole mitmetel juhtudel täidetud, mistõttu tuleb vältida kõrge algniiskusega materjalide paigaldust, tarindite püstitamist ning niiskete pindade sulgemist (arvutustes oli antud juhul kasutatud kõrgemat algtaset  $RH = 90\%$ ). Eeltoodud arvutused näitavad, et selliselt püstitatud piiretes on hallituse teke ja niiskuse kondenseerumine väga tõenäoline. Antud materjalide valiku ja algtingimuste korral oli aktsepteeritav vaid madala veeaurutakistusega mineraalvillaplaatide (tüüp A4) kasutamine, mille korral hallitusindeksi piirväärtuse tingimused olid täidetud.

Kuigi märgpaigaldatava tselluvilla (tüüp D4a) kasutamisel oli algniiskus  $RH = 80\%$ , on siin hallitusindeksite tasemed ja väljakuivamise aeg päevades suuremad. Selle põhjuseks on märgpaigaldatava tselluvilla suur veesisaldus paigalduse hetkel, mis ulatub 50%-ni soojustuse kogukaalust. Eeltoodud andmed kinnitavad teadmist, et tselluvilla märgpaigalduse järgselt peab soojustus olema enne viimistluse paigaldamist korralikult kuivanud, et vähendada tarindites hallituse tekke ja kondenseerumise riske väljakuivamata materjalide niiskuse tõttu. +20 °C juures võtab see seinte puhul aega vähemalt 5 ... 6 nädalat [89]. Protsessi kiirendamiseks on soovitatav ruume korralikult kütta ja tuulutada või kasutada spetsiaalseid õhukuivateid. Kui soojustus paigaldatakse hilissügisel, jääb talvel pool soojustusest ja selle kuivamisaeg lükkub kevadesse ja pikeneb märgatavalt.

## 9.4. Mineraalvilla ja tselluvilla olulisimad niiskustehnilised erinevused

Eeltoodud arvutustulemusi arvestades, kus ilmnes mineraalvilla ja tselluvillaga soojustatud seintes hallitusindeksi tasemete suur erinevus, vaatamata sarnastele algingimustele, uuriti analüüsitud andmeid selleks, et leida mõjutajaid selliste erinevuste taga. Kuna nii mineraal- kui tselluvilla soojuseri juhtivuse ning veeaurutakistuse omadused on sarnased, tuleb erinevuste põhjusi otsida materjalide veesisalduste erinevustes. Näit. tselluvilla tasakaaluniiskuse on 75% suhtelise õhuniiskuse korral  $4,8 \text{ kg/m}^3$ , kuid mineraalvillal vaid  $0,8 \text{ kg/m}^3$ .

Analüüsimiseks anti mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seintes soojustusmaterjalile järk-järgult ükshaaval erinevaid tselluvilla (tüüp D4) omadusi ning võrreldi arvutatud hallitusindeksite väärtusi seejuures baastarindiga. Järgnevas tabelis (Tabel 32) ja joonisel (Joonis 60) on esitatud antud analüüsi kokkuvõtte.

**Tabel 32.** Hallitusindeksi  $M$  väärtus ja selle muutus võrreldes baastarindiga mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinas, kui mineraalvillast soojustusele on ükshaaval antud tselluvilla (tüüp D4) omadusi. Tuuletõke on 22 mm puitkiudplaat (tüüp A2 analoog), algniiskus  $RH = 80\%$ . Õhu- ja aurutõkkekihid on kirjeldatud Tabel 19.

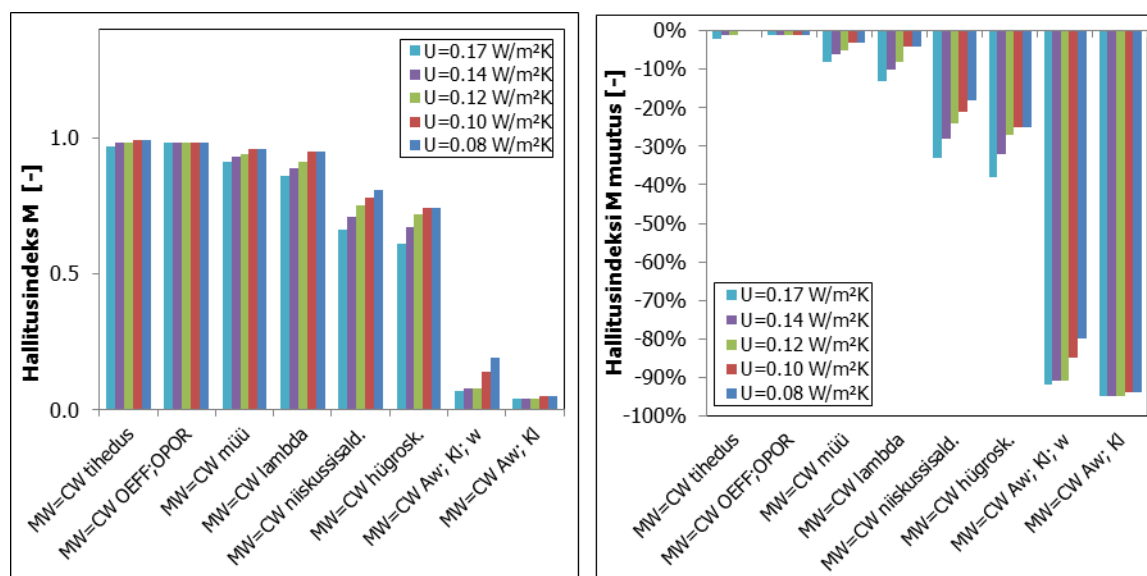
Muudetud parameeter MW = mineraalvill (D1) CW = tselluvill (D4)	Hallitusindeks $M$					Hallitusindeksi muutus				
	Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]					Mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seina soojusläbivus $U$ [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]				
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17
MW originaal	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99 *)	0%	0%	0%	0%	0%
MW=CW tihedus	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0%	0%	-1%	-1%	-2%
MW=CW OEFF;OPOR	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%
MW=CW müü ( $\mu$ )	0,96	0,96	0,94	0,93	0,91	-3%	-3%	-5%	-6%	-8%
MW=CW lambda ( $\lambda$ )	0,95	0,95	0,91	0,89	0,86	-4%	-4%	-8%	-10%	-13%
MW=CW niiskussisal. ( $w$ )	0,81	0,78	0,75	0,71	0,66	-18%	-21%	-24%	-28%	-33%
MW=CW hügroskoopsus	0,74	0,74	0,72	0,67	0,61	-25%	-25%	-27%	-32%	-38%
MW=CW $A_w$ ; KI; $w$	0,19	0,14	0,08	0,08	0,07	-80%	-85%	-91%	-91%	-92%
MW=CW $A_w$ ; KI ●	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	-94%	-94%	-95%	-95%	-95%

\*) BAASTARIND

● Suurimad erinevused

Eeltoodud tabelis toodud andmete selgituseks: mineraalvillale (tüüp D1) on antud ükshaaval tselluvilla (tüüp D4) füüsikalisi omadusi:

- MW originaal min.vill soojustus oma tegelike andmetega, baastarind
- MW=CW tihedus min.villale on antud tselluvilla tihedus
- MW=CW OEFF;OPOR min.villale on antud tselluvilla poorsuse näitajad
- MW=CW müü min.villale on antud tselluvilla difusioonitakistustegur  $\mu$
- MW=CW lambda min.villale on antud tselluvilla soojuseri juhtivus  $\lambda$  [W/(m·K)]
- MW=CW niiskussisald. min.villale on antud tselluvilla niiskussisaldus  $w$  [kg/m<sup>3</sup>]
- MW=CW hügrosk. min.villale on antud tselluvilla hügroskoopsus
- MW=CW  $A_w$ ;  $K_f$ ;  $w$  min.villale on antud tselluvilla kapillaarne niiskusimavus  $A_w$  [kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup>)], veejuhtivus  $K_f$  [s] ja niiskussisaldus  $w$  [kg/m<sup>3</sup>]
- MW=CW  $A_w$ ;  $K_f$  min.villale on antud tselluvilla kapillaarne niiskusimavus  $A_w$  [kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup>)] ja veejuhtivus  $K_f$  [s]



**Joonis 60.** Hallitusindeksi  $M$  väärtus (vasakul) ja selle muutus võrreldes baastarindiga (paremal) mineraalvillaga (tüüp D1) soojustatud seinas, kui mineraalvillast soojustusele on ükshaaval antud tselluvilla (tüüp D4) omadusi. Tuuletõke on 22 mm puitkiudplaat (tüüp A2 analoog), algniiskus  $RH = 80\%$ . Õhu- ja aurutõkkekihid on kirjeldatud Tabel 19.

Iga järgneva uue omaduse andmisel on hallitusindeks uuesti arvatud. Enne igat hallitusindeksi väärtuse arvutust on eelnevalt muudetud andmed asendatud originaali andmetega, et korraga oleks muudetud ainult üks parameeter ning saaks tuvastada määrava tähtsusega omaduse, mis tingib hallitusindeksite erinevuse mineraalvillast ja

tselluvillast soojustusmaterjalide võrdluses ning mis järelkult selgitab ka olulisima kriteeriumi, mis määrab seina niiskustehnilise seisundi muutuse.

Tulemused näitavad, et tiheduse, poorsuse, difusioonitakistuse ja soojuseri juhtivuse muutmine ei toonud kaasa olulisi muutusi hallitusindeksi väärtuses – muutused vähenemise suunas jäid vahemikku 0 ... 13%. Niiskussisalduse  $w$  [kg/m<sup>3</sup>] omaduste andmisel on soojuslähivuse  $U = 0,17$  W/(m<sup>2</sup>·K) korral võrreldes baastarindiga hallitusindeks juba 33% madalam ning erinevus kahaneb soojuslähivuse vähenedes,  $U = 0,08$  W/(m<sup>2</sup>·K) korral on see 18%. Sarnaseid tulemusi andis ka veekindluse omaduse omistamine. See on seletatav asjaoluga, et suurema soojuslähivuse korral on ka soojustuse kogumaht tarindi ristlõikes väiksem võrreldes madalama soojuslähivusega seintega (erinevus soojustuse mahus [m<sup>3</sup>] on vaadeldud tarindites 2,4 korda).

Suurimad erinevused, mis ka määravad mineraalvilla ja tselluvilla niiskustehnilise käitumise, tulevad ilmsiks, kui anda mineraalvillale tselluvilla kapillaarse veeimavuse  $A_w$  [kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup>)] ja veejuhtivuse  $K_l$  [s] omadused. Sellisel juhul muutuvad mineraalvilla hallitusindeksi väärtused 80 ... 95% madalamaks (vt. Tabel 32). Peamiseks põhjuseks sellise erinevuse esinemisel on tselluvilla 6 korda suurem niiskusmahtuvus ning veejuhtivus võrreldes mineraalvillaga. Suurematel niiskus-koormustel jaotub niiskus tarindis ümber ja see seotakse soojustusmaterjali poorides ning ümbritseva keskkonna suhtelise niiskuse alanedes vabaneb soojustus niiskusest.

Samal põhjusel on ka tselluvillaga soojustatud tarindites võimalik kasutada väiksema veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkematerjale (näit. bituumenpaber ( $Z_p = 6,92E+08$  m<sup>2</sup>·s·Pa/kg;  $Z_v = 5,08E+03$  s/m), tüüp B5, või bituumenpapp ( $Z_p = 4,55E+08$  m<sup>2</sup>·s·Pa/kg;  $Z_v = 3,34E+03$  s/m), tüüp B8).

## 10. JÄRELDUSED

Uurimistöö käigus kogutud andmete ja vaadeldud tarindite analüüsi põhjal on kinnitust leidnud varasemates samateemalistes uurimistöodes välja toodud tulemused ja hinnangud puitsõrestikseinte niiskustehniliste parameetrite ja toimivuse põhimõtete kohta. Võib kinnitada, et puitsõrestikseina niiskustehnilist turvalisust on võimalik tagada erinevate soojustusmaterjalidega kõikide soojuslähivuste juures, kuid madal- ja liginullenergiahoonete kavandamisel ja elluviimisel tuleb suurt tähelepanu pöörata tarindi niiskustehnilisele toimivusele ning seda ehitise kavandamise ja püstitamise käigus kontrollida.

Puitsõrestikseintes, kus soojustamiseks kasutatakse kergeid ja poorseid materjale (näit. mineraalvill, tselluvill), on tarindi niiskusturvalisuse tagamiseks vajalik piisava veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekiht, mis paikneks tarindi siseküljel, soovituslikult näit. siseviimistlusplaadi ja 50 mm soojustuskihi taga. Samuti on oluline sobiva tuuletõkkekihi valik, mis lisaks kaitsele läbipuhumise eest peab toimima tõhusalt ka niiskuse läbilaskvuse aspektist. Selleks, et tarindis sisalduv ehitusaegne ja sinna hoonete kasutamisel igapäevaselt lisanduv niiskus saaksid piisaval hulgal ja vajalikus tempos tarindist välja pääseda, tuleb lisaks toimivale tuulutusvahele jälgida, et tuuletõkkekihi soojustuslähivus ning veeaurutakistus oleksid minimaalsed.

Tehtud analüüside ja arvutuste tulemusel selgus, et madala veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekiht on lubatud vaid juhul, kui tuuletõkkeks on heade soojustusomadustega ning veeauru difusioonile avatud tuuletõkkematerjal (näit. mineraalvillast plaat). Sel juhul on ka kõige kriitilisemate kliimaolude korral hallituse ja kondensaadi tekke tõenäosus väike ning tarindi niiskustehniline turvalisus tagatud.

Ehituse algusaegadest on kriitiline hilissuvi ning sügis, mil suhteliselt kõrgete õhutemperatuuride tõttu on vee hulk õhus suur ning seetõttu ka ehitistesse sattuv niiskuse hulk suurem kui külmemal ja kuivemal aastaajal.

Uurimisandmetest nähtub ka, et oluline osa on tarindi ja materjalide algniiskusel. Kui materjalide algniiskuse  $RH = 80\%$  korral ei ole suure niiskusmahtuvusega tselluvillaga soojustatud seinas niiskuskahjustuste risk suur, siis algniiskuse  $RH = 90\%$  juures on niiskuskahjustused ilmsed. Mittehügrokoopse mineraalvillast soojustuse korral on niiskuskahjustuste risk võrreldes tselluvillaga märgatavalt suurem, sest vaba vett on tarindis rohkem ning madalamatel temperatuuridel (eelkõige talveperioodil) on

kondenseerumine vältimatu, kui õhu- ja aurutõkkekiht on madala veeaurutakistusega ning tuuletõkkematerjal ei suuda kogu tarindis liikuvat niiskust vajalikul hulgal läbi juhtida.

Kondensaadi arvutuste käigus ilmnes, et sein, mis on sobiv hallituse tekke riskide puudumise osas, ei pruugi seda olla kondensaadi tekke osas. Seega on tarindi sobivuse ja niiskusturvalisuse hindamiseks alati vajalik analüüsida nii hallituse tekke kui kondenseerumise riske.

Niiskuse väljakuivamise osas on olulisimad tegurid sarnased hallituse ja kondensaadi tekke riskidele. Kõrge veeaurutakistusega õhu- ja aurutõkkekiht tarindi sisepinnal ning madala veeaurutakistuse ja piisava soojusjuhtivusega tuuletõkkekiht soojustatud tarindi välispinnal on eelduseks ka tarindi kiiremale väljakuivamisele.

Uurimistöös leidsid kinnitust viited ja teadmised sellest, et meie kliimas on madal- ja liginullenergiahoonete välispiirete kavandamisel ja rajamisel puitsõrestiktarinditena olemas mitmed niiskustehniliselt turvalised lahendused. Olulisimad märksõnad siinjuures on paigaldatavate materjalide niiskustehniline sobivus ning projekteeritud kriteeriumite vastavus keskkonna- ja kliimatingimustele lähtuvalt madal- ja liginullenergiahoonete tähendusest.



## 11. KOKKUVÕTE

Puidu ja puidupõhiste, kohalikul toorainel põhinevate ehitusmaterjalide kasutamine energiasäästlike hoonete rajamisel on igati põhjendatud. Seda nii keskkonnasäästu, ressursside kui inimvara vaates. Kuid kaasaegsete ja energiatõhusate hoonete välispiiretena puitsõrestikseinte rajamisel tuleb lisaks kasutatavate materjalide üldehituslikele näitajatele alati tähelepanu pöörata ka nende niiskustehnilistele omadustele – veeauruläbilaskvus, veeimavus, niiskusmahtuvus. Märksa olulisem roll kui materjali madal soojuseri juhtivus, on õhu- ja aurutõkkekihi ning külma välisõhuga vahetus kontaktis oleva tuuletõkkekihi õigesti valitud veeaurutakistusel. Tuuletõkkekihi suurem veeauru läbilaskvus ning õhu- ja aurutõkkekihi tõhus veeaurutakistus on seda olulisem, mida suurem on tarindi kogupaksus. Õhu- kuid samas veeaurutihedate tuuletõkkematerjalide kasutamine annab küll efektiivse kaitse tarindi läbipuhumise vastu, kuid niiskuse liikumise takistamine võib saada liginull- ja madalenergiatarindite niiskustehnilisele toimivusele ja majandamisele saatuslikuks.

Antud valdkonna keerukust ja mõjutegurite mitmekülgset arvestades on selge, et unikaalset mudelit, mis sobiks projekteerimiseks igakordselt muutuvaid tegureid arvesse võtmata, ei ole võimalik luua. Selle põhjuseks on ka kliimaolude ning ehitiste kasutusotstarvete, välispiirete ja sisekliima tingimuste mitmekesisus.

Käesoleva töö kokkuvõtteks on esitatud mõned tegurid, mille arvestamine on alati oluline:

- Puitsõrestikul välispiirete niiskustehnilist toimivust parandavad tuuletõkkeplaadi soojatakistuse tõstmine ja aurutakistuse alandamine ning välispiirde siseosa aurutakistuse tõstmine, samuti soojustuse ja tuuletõkkeplaadi hügroskoopsuse tõstmine
- Mida suurem on siseõhu niiskuslisa, seda kõrgem on tuuletõkkeplaadi sisepinna niiskustase
- Mida väiksema aurutakistusega on õhu- ja aurutõkkekiht, seda kõrgemale tõuseb tuuletõkkeplaadi sisepinna niiskustase
- Aurutõkke valik sõltub ka sisekliimast ja seda kogu ehituse kasutusea jooksul tekkida võivast sisekliimast
- Õhu- ja aurutõkketa konstruktsioon ei toimi üle nelja kuu: detsembrist märtsi keskpaigani on tuuletõkkeplaadi sisepind märg

- Aurutõkke veeaurutakistus peab olema mittehügrokoopsete soojustusmaterjalide korral kuni 400 ja hügrokoopse soojustuskihi korral kuni 6 korda suurem tuuletõkke veeaurutakistusest (sõltuvalt soojustuse ja tuuletõkkekihi omadustest)
- Piirdes kasutatava puidu niiskussisaldus peab ehitusperioodil olema < 18%
- Tselluvill on oluliselt suurema niiskusmahtuvusega kui mineraalvillad. Kuna tselluvilla tasakaaluniiskuse saavutamise aeg on pikem, märgub materjal aeglasemalt. Kuid analoogselt märgumisega toimub ka kuivamine aeglasemalt
- Piirdesse paigaldatud tselluvilla niiskussisaldus peab peale ehitusperioodi lõppu olema < 12%
- Märtpaigaldatud tselluvilla väljakuivamine +20 °C juures võtab seinte puhul aega vähemalt 5 ... 6 nädalat
- Piirde niiskusrežiimi mõjutavad oluliselt tuuletõkkeplaadi omadused: niiskusjuhtivus, soojatakistus, mõnevõrra ka niiskusmahtuvus; tuuletõkkeplaadi suurem soojatakistus vähendab oluliselt külmasildade mõju; suurem soojatakistus tõstab tuuletõkkeplaadi sisepinna temperatuuri, alandades sellega pinna suhtelist niiskust ja suurendades piirde kuivamispotentsiaali
- Tuuletõkkeplaadi suurem niiskusjuhtivus võimaldab piirdesse kogunenud niiskusel kiiremini välja kuivada
- Tuuletõkkeplaadi niiskussisaldus kõigub suures ulatuses, sellest sõltuvalt muutuvad ka tema omadused: soojajuhtivus, niiskusjuhtivus, niiskusest tingitud mahumuutused
- Mineraalvillast tuuletõkkeplaadid ei "mängi" niiskussisalduse muutudes nii palju kui puitkiust tuuletõkkeplaadid
- Võrreldes samades tingimustes mineraalvillast, puitkiudplaadist ja kipsplaadist tuuletõkkeplaatide omadusi, võib tõdeda, et mineraalvillast tuuletõkkeplaadi sisepinna suhteline niiskus on kõige madalam, seda tänu tema suuremale soojatakistusele ja veeaurujuhtivusele

## 12. ETTEPANEKUD EDASISEKS UURIMISTÖÖKS

Käesoleva uurimistöö tulemusi hinnates ja rakendades tuleks põhjalikumalt uurida madal- ja liginullenergiahoone muude välispiirete ja sõlmede niiskustehnilist toimivust ning nende koostoimet, samuti kiirguse, tuule, kaldvihma, konvektsiooni ja õhuläbilaskvuse mõjusid.

Põhjalikuma projekteerimiseks sobiva alusmaterjali koostamiseks tuleb teha analüüsid ka pikematele vaatlusperioodidele ning erinevate algtingimuste korral meie piirkonna kliimast ja selle muutumisest lähtuvalt. Töö annab küll indikatsioonid võimalike tasemete kohta, kuid nende põhjalikumaks analüüsimiseks ning täpsete andmete saamiseks on vajalik teha detailsed arvutused kõigi eelnimetatud arvutusolukordade jaoks, kaasates analüüsitavate materjalide ja tarindite hulka ka massiivtarindid (betoon, tellis, kergplokk, krohvitud välispiirded jms).

Täpsemat analüüsi vajavad ka majanduslikud aspektid – kas niiskustehniliselt turvalise tarindi ja selle erinevate materjalikihtide maksumus on põhjendatud ning milline on nende pikaajaline mõju, arvestades kliimamuutusi ja materjalide vananemist. Ning kas materjalide ja välispiirete niiskuskriitiline valik on igal juhul õigustatud või saab riske maandada ka muude majanduslikult põhjendatud meetmetega.

## 13. ABSTRACT

### 13.1. Introduction

The present study focuses on the analysis of the hygrothermal performance of building envelopes of a low-energy and nearly zero-energy buildings (nZEB) by the example of the wood-frame wall. The topics under investigation include the change in the relative humidity, temperature and water vapour content in structures under unsteady conditions. The objective of the work is to find out whether and under which conditions a higher thickness of the thermal insulation layer (250 ... 600 mm) and a high moisture load will ensure the hygrothermally secure performance of building envelopes of nZEB by the example of a wood-frame wall and whether there will be any risks related to the formation of mould and moisture condensation under the varying environmental conditions if building materials of different properties have been used in structures, as well as what types of risks may appear in such cases.

To achieve the objectives set, the analysis of scientific literature and the calibration of the thermal and hygrothermal calculation model with the help of laboratory measurements are used in the present study, as well as practical calculations by the means of HAM modelling software. The data used in the study originates from articles of scientific journals, reports at scientific conferences, handbooks, standards and research reports.

The decrease of heat losses of buildings is required for future low-energy and nearly zero-energy buildings. The present study observes the potential hygrothermal risks and their effect of highly insulated wood-frame exterior wall using cold climate conditions. Various types of walls with different thermal transmittance between 0,17 ... 0,08  $W/(m^2 \cdot K)$ , material combination and boundary conditions were studied by using the risk of mould growth as performance criteria. With careful selection of materials it is possible to design wood-frame exterior wall which are moisture safe and provide low thermal transmittance. There was higher  $RH$ , higher risk for mould growth, and longer drying out period is in walls with lower thermal transmittance when the only changed parameter was thickness of the insulation. For wind barriers with higher thermal transmittance and water vapour permeability the increase of mould growth risk during lowering the thermal transmittance was lower. Those for building envelope of future nZEB needs much careful hygrothermal design for building envelope than previously.

The hygrothermal performance of building envelopes and topics related to energy efficiency has been studied thoroughly in recent years. It has been found from investigations performed in Finland about the compliance with stricter requirements for energy efficiency and about the building envelopes of low-energy buildings [13, 14] that more strict requirements for the energy efficiency and increase of the thickness of the thermal insulation layer will bring along not only changes in building technology and in structures but may become a source of substantial moisture-related problems in building envelopes also in the far future as a result of the climate change. Scientists from Belgium [17] have brought out that the use of an air barrier on the side of the cold ambient air in external wood-framed building envelopes could cause the formation of condensation and mould in the structure. In Finland [15, 16, 19] also the hygrothermal performance of external wood-framed building envelopes has been investigated in different situations, where it was recognised that in the Nordic climate the risk of moisture damages in building envelopes is essentially lower if an efficient vapour barrier layer is used. In Sweden, the renovated buildings fitted with additional thermal insulation and problems related to it have been researched in a study [24] that deals with the risks related to building envelopes and describes the origins of problems caused by moisture in building envelopes of the low-energy buildings. In most cases, it has been brought out as a generalisation that the main source of problems is the deficiency of the ventilation and the lack of sufficient aeration as well as the high level of moisture caused by it. The importance of the properties of materials used in wood-framed building envelopes of low-energy buildings and of ensuring the correct moisture regime has been studied in the works of many scientists [13, 14, 52, 53] that also refer to the hygrothermal risks accompanying the thicker thermal insulation layer.

In Estonia, the domain-related, more thorough studies have been started, completed and are ongoing in the competence centre for nZEB at the Chair of Building Physics and Energy Efficiency at the Tallinn University of Technology under the guidance of professors Jarek Kurnitski and Targo Kalamees [8, 9, 10, 11, 12].

Based on the data presented in previous studies we can confirm that for the construction of building envelopes with thicker thermal insulation layer and lower thermal transmittance, we have to solve many problems related to the hygrothermal performance of structures. These problems result mainly from the elimination of the possibilities of moisture condensation and mould formation that are caused by the

change in the thickness of the building envelopes in low-energy buildings as well as change in the climatic conditions.

The applicable standards EVS-EN 15026 [54] and EVS-EN ISO 13788 [55] also refer to the fact that the condensation of water vapour will always worsen the thermal and moisture-related performance of the building envelope and the structures should be designed and built in a way that there will be no condensation of water vapour nor growth of mould and the critical relative humidity will not be exceeded.

The present study observes the potential risks and their effect based on the above mentioned facts, taking into account the climatic conditions in Estonia, changes in the physical properties (e.g. moisture content, water vapour permeability, heat conductivity) of materials used in the building envelope as well as changes in the environmental conditions. The subject of the research and the analysis is mainly the changes of mould index, the presence of condensation and the speed of its drying-out as well as changes in their levels at the change of the thermal transmittance and the thickness of the structure. At the same time, the study also deals with materials that play a very important role in ensuring the hygrothermal safety of the structure – air and vapour barrier as well as wind barrier materials and their joint performance in different material combinations.

### **13.2. Methods**

To achieve the objectives set for the research work, the model for thermal and hygrothermal calculations has been calibrated by means of laboratory measurements. Numerous practical calculations have been performed with the help of HAM modelling software. Several studies have been carried out previously for the validation of the calculation and simulation software [30, 31, 32] that confirm the matching of the calculation results for the simultaneous spread of unsteady heat and moisture obtained with the help of calculation software with the results of laboratory tests, and that consider the use of such software for the analysis of building envelopes as well as for the assessment in the course of the research work reasonable.

In the present work, the simulation program Delphin 5 [77] for the coupled heat, moisture and matter transport in porous building material has been used. The calculation software has been calibrated and validated with laboratory tests of the calculation

models [28]. The range of materials present in the database of the calculation software Delphin 5 together with the corresponding numerical indicators has been used as basic data for the building materials analysed in the study. The numerical indicators of the researched materials have been modified in the material database of the calculation software with values obtained from an extensive study by the Tampere University of Technology on the physical properties of building materials as a function of temperature and relative humidity [78]. The data included in the above-mentioned work has been specified with the help of the data from the research that dealt with the impact of climate changes and the increase in the thickness of thermal insulation layers to the hygrothermal performance of the building [14]. In these works, the most important building physical indicators of the most widely used materials and structures have been studied that correspond to the properties and building technologies used in the Estonia.

The information about the materials used in calculations is presented in the attached tables (see Tab.5, Tab.6) and in figures (see Fig.12, Fig.13). Comparisons of the calculation and measurement results of the structures used for the calibration of the calculation model have been presented in the attached figures (see Fig.15 – Fig.25).

The applied calculation method is based on the following principles:

- Data of the moisture reference year (MRY) has been used as the information about the ambient climate. In order to check the risk of the water vapour condensation and the mould formation in the building envelopes of buildings by means of hygrothermal calculations, two hygrothermally critical reference years have been selected with the help of the saturation deficiency and mould growth models: Väike-Maarja, Estonia, 1995–1996 and Väike-Maarja, Estonia, 1989–1990 [79], see Chapter 7.5.1.
- Parameters for the indoor climate have been selected in accordance with standards EVS-EN ISO 13788 and EVS-EN 15026 in order to imitate the indoor climate in Estonian residential buildings.
- According to the dependence of the indoor temperature on the outdoor temperature, the design indoor temperatures will be found (see Fig.28).
- According to the moisture load of the premises, the water vapour content of the indoor air and the partial pressure of the water vapour will be found with the help of the internal moisture excess (see Fig.29).

- According to the temperatures and the water vapour content, relative humidity will be calculated.
- The building envelope is considered functional in relation to its hygrothermal properties, if no conditions suitable for the formation of mould will be created, and if no other conditions appear that may damage the building envelope due to its hygrothermal properties (e.g. essential change in material properties).

It has been presumed in the present work that the thermal insulation layers of the structure are homogeneous and that the used air, vapour and wind barrier materials ensure the minimum air permeability and structures without any considerable convection. Wooden boarding or brick cladding for facade was assumed to provide rain-screen for thermal envelope. Therefore, the impacts of water vapour convection and rain have not been taken into account.

The risk of mould growth was used as performance criteria to predict the acceptability of the hygrothermal performance. A mathematical model has been used in the present research for the calculation of the mould growth, decline and the mould index in changing conditions, designed by the scientists of the VTT Technical Research Centre of Finland [82] and developed further by researchers [85, 86]. Also the intensity of the mould growth and decline in case of different material sensitivities has been taken into account [87]. The assessment of risks for the formation of mould is based on the classification of mould indexes prepared on the basis of scientific experiments and models (see Tab.7). For the mould index calculation see formulas (20) – (29).

In the present work, the critical value of the mould index is set to the level  $M < 1$  according to the mould index model to avoid the formation of mould in a structure (see Tab.7). In addition, the limit values given in the standard EVS-EN 15026 have been used as critical moisture conditions in the analysis (see Fig.28 and Fig.29):

- Internal moisture excess  $\Delta v = 1 \dots 2 \text{ g/m}^3$  (in the warm period when  $t_e \geq +20 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- Internal moisture excess  $\Delta v = 4 \dots 6 \text{ g/m}^3$  (in the cold period when  $t_e \leq +5 \text{ }^\circ\text{C}$ )

In the calculations of condensate formation, the situation is considered critical if the relative humidity in the pores of the materials, used in the structure, is  $RH > 97\%$  [19]. When the given limit value is reached or exceeded, the pores of the material are filled with water, the moisture diffusion slows down and the drying-out becomes complicated. As a criterion, the requirement of the standard DIN 4108-3 [80] has been applied according to which the volume of the condensing water in a structure must not exceed



0.5 kg/m<sup>2</sup> in case at least one of the materials located in the contact area is susceptible to the capillary absorption.

The relative humidity of  $RH = 75\%$  was used as a reference level in the calculations of the moisture drying-out above which microbiological processes dangerous to the human body is evident and mould is formed [88, 91]. The time in days, needed for a structure to reach such a level of the relative humidity, was measured. At the same time, also the mould index values for the given period were fixed.

In the analysis of structures, the thermal transmittance and the water vapour diffusion depending on the initial conditions have been selected as boundary conditions. Both in the assessment of risks related to the formation of mould and to the condensation of the water vapour (see Chapter 7.5.1 and Chapter 7.5.2), the hourly data of the moisture reference year (MRY) have been selected for the initial conditions. The calculations are based on the following initial conditions:

- Calculation period: from the second half of the year, July – June (12 months)
- Initial humidity:  $RH = 80\%$  ;  $90\%$
- Initial temperature:  $\theta = +22$  °C
- Internal moisture excess:  $\Delta v \leq 2$  g/m<sup>3</sup> ;  $\leq 6$  g/m<sup>3</sup>

In the study, the structures of the wood-framed wall have been investigated when the thermal transmittance of the wall is  $U = 0,08; 0,10; 0,12; 0,14$  and  $0,17$  W/(m<sup>2</sup>·K). To compare the hygrothermal indicators and to analyse their impact, different thermal insulation materials (mineral wool, cellulose wool), vapour and air barrier materials (polyethylene foil, kraft paper processed with polyethylene, bitumen paper) as well as wind barrier materials (fibreboard, dense mineral wool board, polymer wind barrier membrane, wind barrier gypsum board, chipboard) have been used in the structures by combining these materials with each other. To perform the calculations, measurement points A1 and B1 with possible maximum moisture loads and critical temperatures were selected in the cross-section of the structure (see Fig.30).

In this work the fulfilling of the above-mentioned conditions in the structures has been analysed in order to get information about the factors that have the most moisture-critical effect:

- Different thermal insulation materials influence in the building envelope
- Thermal transmittance step by step changes of the building envelope

- Water vapour resistance changes in the wind barrier layer laid on the external surface of the thermal insulation layer
- Thermal resistance changes in the wind barrier layer laid on the external surface of the thermal insulation layer
- Water vapour resistance changes in the air and vapour barrier layer in the structure
- Capillary moisture absorption changes of materials located in the structure
- Initial moisture changes of materials used in the structure

### 13.3. Results

#### **Effect of change in the thickness of the thermal insulation if all other parameters remain the same**

In the calculation situations where the thermal transmittance of walls  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  and the mould index have been set equal to the mould index of the reference level (i.e.  $M = 0,99$ ) and all other parameters remained constant, the calculation results showed that the mould index increased proportionally to the decrease in the thermal transmittance of the wall  $U [\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$  and to the increase in the water vapour resistance of the wind barrier layer, and reached, compared to the initial situation (with  $M = 0,99$ ), to a 1,3 ... 3 times higher value of the mould index, and extended at the thermal transmittance of the wall  $U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  to the level  $M = 1,3$  (with 25 mm mineral wool board as a wind barrier) and to the level  $M = 3,0$  (with 22 mm mineral fibreboard as a wind barrier). Under the same conditions, the mould indexes were also calculated for the walls where cellulose wool with hygroscopic properties was used as a thermal insulation layer. In this case, the value of the mould index remained in the range of  $0 \leq M \leq 0,5$ , but the mould index of the wall exceeded the critical value of  $M < 1$  also here, when 12 mm chipboard was used as a wind barrier layer. When a wind barrier membrane was used, the value of the mould index was  $0,4 \leq M \leq 0,5$ . The calculated results are presented in the attached table (Tab.18) and in the figure (Fig.38).

#### **Effect of a change in the thermal transmittance of the wind barrier layer**

To meet the criterion of the limit value of the mould index ( $M < 1$ ), denser mineral wool boards with different thicknesses were used on the external surface of the wind barrier layer to reduce the thermal transmittance in case of selected structures. The calculation

results show that the thickness of the necessary thermal insulation layer to be added to the wind barrier layer increased proportionally to the increase in the thickness of the thermal insulation, extending in some cases up to 105 mm. The impact of the air and vapour barrier layer is also noticeable – in case of a layer with lower water vapour resistance, the necessary additional thermal insulation layer is thicker. Under the same conditions, also the values of the mould index for the wall insulated with cellulose wool were calculated. Based on the calculation results, it was found that additional thermal insulation of the wind barrier layer was necessary in case of the 12 mm chipboard in order to ensure the required value of the mould index. In other observed cases the value of the mould index was  $M < 1$  without increasing the thermal resistance or layer thickness of the existing wind barrier material. The calculation results are presented in the table (Tab.19, 20) and in the figures (Fig.40 – Fig.42).

### **Effect of the change in the air and vapour barrier layer**

In the calculations, the effect of the air and vapour barrier layer in the walls insulated with mineral wool and cellulose wool to the change of the mould index was compared in case of different wind barrier materials. The results show that the mould index exceeded the critical limit ( $M > 1$ ) in cases when materials with lower water vapour resistance (e.g., bitumen paper, type B5, or PE kraft paper, type C15) were used as the air and vapour barrier. The results also show that when wind barrier boards (e.g. wind barrier gypsum board or chipboard) with higher water vapour resistance were used, the level of the mould index was always higher compared to the other studied wind barrier materials, irrespective of the efficiency of the air and vapour barrier layer. Results have been presented in the attached figures (see Fig.43 – Fig.48).

After replacing the air and vapour barrier material in the structures with a more effective one regarding its water vapour resistance ( $Z_p = 2,43E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 1,79E+05 \text{ s}/\text{m}$ ) and leaving all other indicators unchanged (see Tab.15 and Fig.35), the level of the mould index remained in the permitted limits ( $M < 1$ ), except in cases, when a wind barrier gypsum board or chipboard was used as a wind barrier and the thermal transmittance of the wall was  $U < 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . The result was similar also in the case where PE foil with even higher water vapour resistance ( $Z_p = 8,99E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 6,60E+05 \text{ s}/\text{m}$ ) was used in structures as an air and vapour barrier material, and all other indicators remained unchanged (see Tab.16 and Fig.36). The level of the mould index remained in the permitted limits ( $M < 1$ ) also in this case, except in cases where

the chipboard was used as a wind barrier material, and also in the a wall insulated with mineral wool in case a wind barrier gypsum board was used as a wind barrier material and the thermal transmittance of the wall was  $U < 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

### **Water vapour condensation**

In the course of the calculation of the condensate formation and its duration, it was checked whether in the wood-frame walls of low-energy and nearly zero-energy buildings the mould index of which is equal to  $M \leq 0,99$ , situations appeared in the observed period where the conditions were favourable for the moisture to condensate in the measurement points A1 or B1 of the wall (see Fig.30). The criterion was the condensation in the structure if  $RH > 97\%$ . The number of days of condensation as well as the quantity of the formed condensate water [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] was also registered.

As a result of the calculations performed with the observed structures, it was found that in the reference structure (see Chapter 7.6.1), condensation formed in the measurement point A1 in the amount of 2 ... 9000  $\text{g}/\text{m}^2$ , and that the number of consecutive condensation days was 66 ... 85 days depending on the thermal transmittance of the wall. In the observed period, the condensate days remained in the period from December to March when the ambient temperatures were  $-23 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_e \leq -1 \text{ }^\circ\text{C}$  and the relative humidity of the ambient air was  $50\% \leq RH \leq 100\%$ . The more intensive condensation occurred when the temperature of the ambient air was lower than  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  and the relative humidity was  $RH > 80\%$ . In the measurement point B1, no condensation formed in the observed walls. For the observed structures, no condensation formed in the walls insulated with cellulose wool. See the calculation data in Tab.21, 22 and in Fig.49. In case of walls covered with a wind barrier membrane and insulated with mineral wool, no solution was found for the given initial conditions and material selection that would fulfil both criteria (limit value of the mould index and the avoidance of condensate formation). At the same time, a suitable solution was found for the structures covered with 22 mm fibreboard to fulfil both criteria, when air and vapour barrier materials more effective than in the previous selection were used. The summary of the calculation results are presented in the attached table (Tab.22).

### **Moisture drying-out**

In the course of the calculations of the moisture drying-out it was investigated how fast the drying-out of the wall will take place under the observed period in the measurement

point up to the level of  $RH = 75\%$  in the walls insulated with mineral wool and with cellulose wool. Simultaneously, data was collected about the mould index in the same period. In the calculations, the initial moisture was set to a higher level,  $RH = 90\%$ , and the initial temperature was  $\theta = +22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wood-frame walls of the low-energy and the nearly zero-energy building were under observance, the thermal transmittance of which was  $U = 0,08; 0,12$  and  $0,17\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

As a result of the given calculation, it was found that in case of a higher initial moisture ( $RH = 90\%$ ), the maximum values of the mould index were noticeably higher compared to the calculation conditions where  $RH = 80\%$  was selected for the initial moisture. The time of drying-out and the value of the mould index decrease when the water vapour resistance of the air and vapour barrier layer increases, and also when the water vapour resistance decreases. The results are presented in tables (Tab.23 – Tab.25) and in the figures (Fig.50 – Fig.53).

With the wet-installed cellulose wool (type D4a), the calculations were performed in the measurement points A1 and B1 with the initial moisture  $RH = 80\%$  in order to identify the mould risks and to compare the wall drying-out duration in case of different structures both beside the frame column where the thermal transmittance and the temperatures are higher, and in the area between columns where the temperatures are lower and the level of the relative humidity therefore higher. The results are presented in tables (Tab.26 – Tab.29) and in the figures (Fig.54 – Fig.57). The mould index and the drying-out time of walls insulated with wet-installed cellulose wool will rise proportionally to the decrease in the thermal transmittance. The growth will increase and the drying-out time will extend noticeably more if the thermal transmittance of the wall is  $U < 0,12\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . The solution of the wall insulated with wet-installed cellulose wool did not meet always the conditions of the critical value of the mould index ( $M < 1$ ) in case PE kraft paper was used as the air and vapour barrier (type C15) and the wind barrier was a 22 mm fibreboard or a combination of the 12 mm chipboard and the 25 mm mineral wool board.

### **Differences of hygrothermal properties of mineral wool and cellulose wool**

It was found from the comparison of wood-framed walls with non-hygroscopic mineral wool and hygroscopic cellulose wool thermal insulation that in case of equivalent initial conditions (similar initial temperature and initial humidity, similar air and vapour barrier materials and wind barrier materials) that the level of mould in walls insulated with

cellulose wool was noticeably lower compared to the wall insulated with mineral wool, remaining below the critical value  $M < 1$  in the calculated occasions. See examples in Fig.32 and Fig.33. As an exception, the level of the mould index of the wall insulated with cellulose wool exceeded the critical level ( $M > 1$ ) in cases where 12 mm chipboard ( $Z_p = 1,21E+10 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90E+04 \text{ s}/\text{m}$ ) were used – irrespective of the efficiency of the air and vapour barrier material (see Fig.34 – Fig.37).

Taking into account the above-mentioned calculation results where a big difference between the mould index levels was found in the walls insulated with mineral wool and cellulose wool, irrespective of similar initial conditions, the analysed structures were further studied in order to find out factors behind such differences. For this purpose, in the walls insulated with mineral wool (type D1), different properties of the cellulose wool (type D4) were added to the thermal insulation material, and the values of the calculated mould indexes were compared to the reference structure. As an explanation for the data presented in the attached table (Tab.32) and figure (Fig.61): physical properties of the cellulose wool (type D4) were given to the mineral wool (type D1) one by one:

- MW originaal                      mineral wool insulation with its actual data, reference structure
- MW=CW tihedus                      density of the cellulose wool has been given to the mineral wool
- MW=CW OEFF;OPOR                      porosity indicators of the cellulose wool has been given to the mineral wool
- MW=CW müü                      water vapour resistance coefficient  $\mu$  of the cellulose wool has been given to the mineral wool
- MW=CW lambda                      thermal conductivity  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] of the cellulose wool has been given to the mineral wool
- MW=CW niiskussisald.                      moisture content  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] of the cellulose wool has been given to the mineral wool
- MW=CW hügrosk.                      hygroscopicity of the cellulose wool has been given to the mineral wool
- MW=CW  $A_w$ ;  $K_l$ ;  $w$                       absorption coefficient of water  $A_w$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ ], water permeability  $K_l$  [ $\text{s}$ ] and moisture content  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] of the cellulose wool has been given to mineral wool

- $MW=CW A_w; K_l$                       absorption coefficient of water  $A_w$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ ] and water conductivity  $K_l$  [s] of the cellulose wool has been given to mineral wool

After giving each new physical property, the mould index has been recalculated. Before calculating each value of the mould index, the previously changed data has been replaced with original data to ensure that only one parameter would be changed at a time, and that it would be possible to identify the property of determinative importance that causes the difference of the mould index in the comparison of the thermal insulation materials made of mineral wool and of cellulose wool, and consequently determines the change in the hygrothermal state.

The displayed results show that the change in density, porosity, diffusion resistance and thermal conductivity did not bring out essential changes in the value of the mould index – the changes in the direction of decrease remained between 0 ... 13%. While rendering the properties of the moisture content  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], in case of the thermal transmittance  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , the mould index is already 33% lower compared to the reference structure, and the difference is reduced when the thermal transmittance decreases, and in case of  $U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  it is 18%. When the mineral wool is rendered the properties of the absorption coefficient of water  $A_w$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ ] and of the water permeability  $K_l$  [s] of the cellulose wool, then the values of the mould index decrease 80 ... 95% in the wall insulated with the mineral wool.

#### 13.4. Discussion

In the course of the analysis of the calculation results it was confirmed that for the level of the mould index and its change, both climate changes and the thermal transmittance of the structure as well as hygrothermal properties of the air, vapour and wind barrier materials are determinative. The values of the mould index increase proportionally to the decrease in the thermal transmittance of the wall, but in the walls with the same thermal transmittance, in case of different thermal insulation as well as air, vapour and wind barrier materials, the values of the mould index, and consequently the probability of the mould formation, may vary to a very high extent.

Taking into account the fact, depending on the climate on our latitudes, that most of the time of the year the temperature in heated working and living rooms is higher than

outdoors and the partial pressure of the water vapour of the indoor air is higher in the normal operating mode, the design of building envelopes should also consider the moisture flux that may penetrate into the building envelopes with the direction from inside to outside and pass layers with different properties in the building structures. In the course of this process, the moisture may accumulate in the layers with lower water vapour permeability and cause moisture damages and mould formation. Therefore, the presence of the air and vapour barrier layer preventing the penetration of moisture as well as its high quality of installation, are very important on the inner surface of the building envelopes in low-energy and nearly zero-energy buildings.

In the calculation situations described above, air and vapour barrier materials were used with the water vapour diffusion-equivalent air layer thickness  $S_d = 1,15$  m (PE kraft paper, type C15),  $S_d = 5,00$  m (PE kraft paper, type C7) and  $S_d = 30,0$  m (PE foil, type C11). On several occasions, the air and vapour barrier layer of such properties is sufficient to ensure an appropriate moisture regime in a structure with higher thermal transmittance, and to prevent the penetration of moisture in quantities that could cause the formation of mould to a critical extent in case of wind barrier materials with different properties. The exception included walls covered with chipboard with low water vapour permeability and wind barrier gypsum board that, in case of the mineral wool thermal insulation, created a situation where the formation of mould in the structure was noticed exceeding the critical level (or  $M > 1$ ), irrespective of the efficiency of the air and vapour barrier. The same occurred in the wall insulated with cellulose wool and covered with chipboard. Thus, it was once again proved that the water vapour permeability of the air and vapour barrier layer has a significant impact on the amount of moisture forming in the external building envelope.

In the cold season, the temperature of the wind barrier layer is lower than the temperature in the inner layers of the walls. This causes the level of the relative humidity in the wind barrier layer to rise to such an extent that it may start the capillary moisture flux in the opposite direction, and the water starts flowing back into the structure. To alleviate this process, it is necessary to reduce the thermal transmittance of the wind barrier layer in order to decrease the level of the relative humidity and the volume of the capillary water in this area. Due to this, for the structures where the value of the mould index did not satisfy the set critical condition ( $M < 1$ ), an additional layer of rigid mineral wool board thermal insulation for the external surface of the wind barrier layer was selected in way that the level of the mould index of  $M < 1$  would be ensured in



the wall after the installation of the additional thermal insulation. For every wall covered with additional thermal insulation of the wind barrier layer, a correlation between the increase in the thickness of the layer of the additional thermal insulation, the decrease in the thermal transmittance of the wall, and the reduction of the efficiency of the air and vapour barrier layer was noticed. In case of a wall with lower thermal transmittance and of an air and vapour barrier layer with lower water vapour resistance, it is necessary to add a thicker layer of additional thermal insulation to the wind barrier layer different from the thermal insulation layer in order not to exceed the critical value of the mould index.

The attached table (see Tab.31) includes a summary, showing the minimum permissible relation between the water vapour resistance  $Z_p$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ ] of the air and vapour barrier layer and the wind barrier layers on given initial conditions in order for the value of the mould index to be  $M < 1$  and condensation level  $< 0,5 \text{ kg/m}^2$ . By comparing the previous data with previous similar studies [14, 52], it is possible to find similarities with the fibreboard (A2 analogue) and the mineral wool board (type A4), where the ratio  $Z_{p(\text{vapour barrier})} : Z_{p(\text{wind barrier})}$  in the wall with the mineral wool thermal insulation is in the range between 2:1 and 267:1 depending on the thermal transmittance of the structure and the used wind barrier material. There is no complete similarity with the previously performed analysis, because both different values of internal moisture excess  $\Delta v$  [ $\text{kg/m}^3$ ] and different climatic conditions have been used. The information above also shows that the minimum ratio 5:1 given in the National Building Code of Finland [90] is not always sufficient for the structures of the given type [52]. The biggest differences from the given recommendation exist in case of wood-framed walls, covered with fibreboard (type A2 analogue) and with wind barrier gypsum board (type A1).

For the calculation of the condensate formation and its duration, it was proceeded from the available information about the fact that the condensation in porous materials occurs in the capillary area, at the level of  $RH > 97\%$ , when the diffusive moisture flux is minimal, since the pores of the material are filled with water and cannot bind the free water added to the pores anymore and therefore, the water starts to condensate. The calculation results (see Tab.21, 22) clearly show that the water vapour resistance of the wind barrier layer is of higher importance than the thermal resistance – no condensation occurred when the mineral wool with low water vapour resistance (type A4;  $Z_p = 2,27\text{E}+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ ;  $Z_v = 1,67\text{E}+03 \text{ s/m}$ ,  $R = 0,81 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ ) was used, whereas in case of the combination of the chipboard with higher water vapour resistance (type C6,

$Z_p = 1,21E+10 \text{ m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 8,90E+04 \text{ s}/\text{m}$ ) and the mineral wool board (type A4; thermal resistance of the combined wind barrier layer  $R = 0,90 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ) condensation occurred to a certain extent. Thus, on the basis of the results of the condensate formation calculations, it was confirmed that the air and vapour barrier layer plays an important role in the regulation of the quantity of moisture entering the structure and moving in the structure. A layer with higher water vapour resistance in the part of the wall closer to the warmer inner surface of the structure ensures a lower moisture level in the whole structure. There is no reference material or critical assessments in previous scientific studies about the duration of the condensation. At the same time it is mentioned that a long duration of the condensation may affect the stability of the structure and create conditions for the development of mould [24, 51]. It has been also found out from the above study that conditions favourable for the formation of mould in the structure occur simultaneously with the condensation because of the relatively high level of humidity.

The relative humidity of  $RH = 75\%$  was used as a reference level in the moisture drying-out calculations above which microbiological processes dangerous to the human body are evident and mould is formed [91]. The calculation results showed that the level of the initial humidity plays a very important role. As the mould index of the wall with the initial humidity  $RH = 80\%$  was below the allowed critical level ( $M < 1$ ), then after the initial humidity was risen to the level  $RH = 90\%$ , the maximum value of the mould index in the structure with similar properties exceeded the allowed critical limit value in some cases multiple times. In all cases, it can be observed that the drying-out time of the moisture extends when the thermal transmittance decreases. This is caused by the bigger amount of moisture (water) in the wall in case the volume of the wall is higher. The comparison data presented above show that the value of the mould index is higher when the water vapour resistance of the air and vapour barrier layer is lower and the drying-out of the walls lasts longer. At the same time, the differences in the drying-out times are not largely dependent on the thermal transmittance of walls, but, while the thermal transmittance in the wall decreases, the changes in the walls insulated with cellulose wool increase, if  $U < 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Here it should be noted that in several cases the criterion of the mould index limit value ( $M < 1$ ) is not fulfilled and thus the installation of materials, the construction of structures and closing of moist surfaces with high initial moisture should be avoided (in this case, the initial level  $RH = 90\%$  was used in calculations). For the given material selection and initial conditions, only the use of

mineral wool wind barrier board with low water vapour resistance (e.g. type A4) was acceptable, in case of which the mould index limit value conditions were fulfilled.

The biggest differences that determine the hygrothermal behaviour of the mineral wool and the cellulose wool appeared when the mineral wool was given the properties of the absorption coefficient of water  $A_w$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ ] and of the water permeability  $K_f$  [s] of the cellulose wool. In this case, the mould index values in the wall with mineral wool insulation decreased 80 ... 95%. Similar results were also achieved when water resistance properties were given (see Tab.32 and Fig.60). It can be explained with the fact that in case of a higher thermal transmittance, also the total volume of the thermal insulation in the cross-section of the structure is lower compared to walls with the lower thermal transmittance (difference in the volume [ $\text{m}^3$ ] of the thermal insulation in the observed structures is 2,4 times). The main reason for the presence of the above-mentioned difference is the fact that the humidity capacity and the water conductivity of the cellulose wool are 6 times higher compared to the mineral wool. In higher moisture loads, the moisture will be relocated in the structure and it will be bound in the pores of the hygroscopic thermal insulation material. When the ambient relative humidity drops, the thermal insulation will get rid of the moisture. For the same reason, it is also possible to use air and vapour barrier materials with lower water vapour resistance in the structures insulated with cellulose wool (e.g. bitumen paper ( $Z_p = 6,92\text{E}+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 5,08\text{E}+03 \text{ s}/\text{m}$ ), type B5, or bitumen cardboard ( $Z_p = 4,55\text{E}+08 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ;  $Z_v = 3,34\text{E}+03 \text{ s}/\text{m}$ ), type B8).

### 13.5. Conclusions

Wood-frame exterior walls with different thermal transmittance and material combinations were analysed by hygrothermal simulation in this study to see how much and what direction the increase of thermal insulation influences to hygrothermal performance of building envelope. The risk of mould growth was used as performance criteria to predict the acceptability of the hygrothermal performance.

Due to higher  $RH$  there was higher risk for mould growth between insulation and wind barrier in walls with lower thermal transmittance when the only changed parameter was thickness of the insulation. For wind barriers with higher thermal transmittance and water vapour permeability the increase of mould growth risk during of lowering the

thermal transmittance was lower. When the wind barrier has low thermal resistance and vapour permeability, it may need an additional thermal insulation. The drying out of constructional moisture was longer for walls with lower thermal transmittance causing also higher risk for mould growth. In comparison of insulation materials, cellulose wool showed lower mould index than mineral wool, when other selection of materials remained the same. Those for building envelope of future nZEB needs much careful hygrothermal design for building envelope than previously.

Based on the data collected during the study and the structures analysed, the results about the hygrothermal parameters of the wood-framed walls and about the principles of their performance presented in the previous studies on the same topic have been confirmed. The most important keywords here are the hygrothermal suitability of the materials to be installed as well as the conformity of the design criteria and of the built result to the environmental and climatic conditions in the sense of nZEB planning. It was confirmed in the course of the study that in wood-frame walls where lightweight and porous materials (e.g. mineral wool, cellulose wool) are used as thermal insulation, it is necessary to provide an air and vapour barrier layer with sufficient water vapour resistance that would be located on the inner surface of the structure, e.g. behind of the interior finishing board and the 50 mm thermal insulation layer, in order to ensure the moisture safety of the structure. This is especially important when non-hygroscopic thermal insulation materials are used.

In addition to the protection from blowing through, just as important is the selection of a suitable wind barrier layer that should function efficiently also from the aspect of the moisture permeability. If a wind barrier material with good thermal insulation properties and open to the water vapour diffusion (e.g. mineral wool board) is used, the probability of the formation of mould and condensate is low and the hygrothermal performance of the structure is ensured also in the most critical climatic conditions. Therefore there is no need to fear wood- frame structures for future nZEB. Hygrothermal performance of wood-frame exterior wall dependent most of all on thermal resistance of wind barrier and vapour permeability of wind barrier and vapour barrier layers.

With regard to the starting times of construction works, the time in late summer and in autumn is critical due to relatively high air temperatures, the quantity of water in the air is high, and therefore also the quantity of moisture getting into building is higher than in colder and dryer seasons.

The research data also shows that the initial humidity of the structure and materials plays an essential role. If the initial humidity of materials is  $RH = 80\%$ , the risk of moisture damages in the wall insulated with cellulose wool thermal insulation, that has high moisture capacity, is not high. If the initial humidity is  $RH = 90\%$ , the moisture damages will be obvious. In case of a thermal insulation with non-hygroscopic mineral wool, the risk of moisture damages is noticeably higher, as the structure contains more free water and the condensation is inevitable at lower temperatures (especially in winter) when the air and vapour barrier layer has a low water vapour resistance and the wind barrier material is not able to lead through the whole moisture moving in the structure sufficiently.

With the calculations of condensate it was found that a wall that is suitable with regard to the absence of mould formation risks, may not be appropriate with regard to the formation of condensate, and vice versa. Thus, in order to assess the suitability and the moisture safety of the structure, it is always necessary to analyse both the risks for the formation of mould and for the formation of condensate.

The most important factors for the drying-out of the moisture are similar to the risks related to the formation of mould and condensate. An air and vapour barrier layer with high water vapour resistance on the inner surface of the structure and a wind barrier layer with low water vapour resistance and high thermal resistance on the external surface of the structure are the prerequisites for the faster drying of the structure.

When constructing wood-framed walls for the energy-efficient buildings, in addition to the thermal parameters of the used materials, attention should be paid to the hygrothermal properties – water vapour permeability, equilibrium level of humidity, water absorption. The water vapour resistance of the air and vapour barrier layer as well as the water vapour resistance of the wind barrier layer in direct contact with the cold ambient air play a much more important role than the low thermal conductivity of the material. The higher the total thickness of the structure, the more important is the higher water vapour permeability of the wind barrier layer. The usage of airtight but also water vapour tight wind barrier materials will certainly give an efficient protection from the blow through of the structure, but the prevention of the moisture movement may become critical for the hygrothermal performance and the stability of the low-energy and nearly zero-energy structures.

Taking into account the complexity of the domain and the diversity of influence factors, it is clear that it is not possible to create a unique model that would be suitable for design, without considering the ever changing factors. This is caused by the diversity of climatic conditions as well as the use of buildings, types and compactness of building envelopes and different indoor climate conditions. When the thermal transmittance of wood-frame exterior wall is decreased only by increasing of thickness insulation, the risk on mould growth increased. For some wind barrier materials the increase of mould growth risk during lowering the thermal transmittance was lower. These materials can be described by higher thermal transmittance and water vapour permeability. Those for building envelope of future nZEB much careful hygrothermal design for building envelope is needed. During construction, the change of materials without over-calculating the design solution should not be allowed.

In order to get a more thorough data, suitable for the design process, further analyses based on longer observation periods and with different initial conditions due to the Estonian climate and its changing should be made. The present work will certainly give indications about the possible levels, but in order to analyse them more thoroughly and to get accurate results, it is necessary to perform detailed calculations for all above-mentioned calculation situations, by including also massive structures (concrete, bricks, lightweight block, building envelopes with rendering) to the range of materials and structures to be analysed.

In the future studies also economic aspects will require further analysis – whether the total cost of different material layers of hygrothermally safe structure is optimal with regard to its cost, and what is their long-time impact taking into account climatic changes and ageing of materials. Also, whether the moisture-critical selection of materials and building envelopes is always justified, or could the risks be managed with economically justified other methods.

## 14. VIIDATUD ALLIKAD

- 
- [1] Seppänen, O., Seppänen, M. 1998. Hoone sisekliima kujundamine, Koolibri, Tallinn
- [2] Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset, Rakennustieto, Helsinki
- [3] Ilomets, S. 2013. Niiskus piirdetarindites, ettekanne Ehituskeskuse seminaril, Tallinna Tehnikaülikool
- [4] Ympäristöministeriö. 1997. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus, Rakentaminen, Helsinki
- [5] Ympäristöministeriö. 1997. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus, Rakentaminen, Helsinki
- [6] Hurme, M. 2002. Kosteus- ja homevaurio-ongelmat työpaikolla. Opas työterveyshuoltoa varten, Työterveyslaitos, Helsinki
- [7] Hamburg, A. et al. 2010. Renoveeritud ja vähemalt üks aasta ekspluatatsioonis olnud elamute ehitusfüüsikalise olukorra uuring, Tallinna Tehnikakõrgkool
- [8] Kalamees, T. et al. 2009. Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Lõppraport, Tallinna Tehnikaülikool
- [9] Kalamees, T. et al. 2010. Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Uuringu lõppraport, Tallinna Tehnikaülikool
- [10] Kalamees, T. et al. 2011. Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Uuringu lõpparuanne, Tallinna Tehnikaülikool
- [11] Kalamees, T. et al. 2011. Maaelamute sisekliima, ehitusfüüsika ja energiasääst. Uuringu I etapi lõpparuanne, Tallinna Tehnikaülikool
- [12] Kalamees, T. et al. 2012. Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord – ajavahemikul 1990–2010 kasutusele võetud korterelamud. Uuringu lõpparuanne, Tallinna Tehnikaülikool
- [13] Vinha, J. et al. 2008. Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [14] Vinha, J. et al. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [15] Venäläinen, A. 2009. Ilmastonmuutos, Soome Meteoroloogiaiinstituudi uuringu tulemuste esitlus, Soome

- 
- [16] Jokisalo, J. 2011. Rakennuksen lämmöneristystaso ja terminen massa muuttuvassa ilmastossa, ettekanne FRAME seminaril, Aalto Yliopisto
- [17] Langmans, J., Klein, R., Roels, S. 2012. Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: A laboratory investigation, *Building and Environment* 10/2012; 56:192–202
- [18] Vinha, J. et al. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [19] Vinha, J. 2007. Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions, PhD thesis, Tampere University of Technology
- [20] Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T., Vinha, J. 2009. Building leakage, infiltration and energy performance analyses for Finnish detached houses, *Building and Environment* 44 (2009)
- [21] Romo, I. 1996. Energiaa säästävät koetalot. Ratkaisut ja tulokset, Rakennustieto, Helsinki
- [22] Leivo, V. 1998. Opas kosteusongelmiin – Rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu
- [23] Kero, P. 2011. Kosteus- ja homevauriokorjausprosessin arviointi kuntien kiinteistöissä, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [24] Hagentoft, C.-E. 2007. Risk of performance failure in new and retrofitted building envelopes, uuringu ettekanne, Göteborg Chalmers University
- [25] Arfvidsson, J., Harderup, L.-E. 2010. Moisture Safety in Cold Attics with Thick Thermal Insulation, uuringu ettekanne, Lund University
- [26] Vinha, J. 2013. Energiatohokkaan rakennuksen ja vaipparekenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta, ettekanne RESCA seminaril, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [27] Mundt-Petersen, O., Harderup, L.-E., Arfvidsson, J. 2013. Important Factors Affecting the Risk of Mold Growth in Well-Insulated Wood Frame Walls in Northern European Climates, ettekanne Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, ASHRAE
- [28] Kalamees, T., Vinha, J. 2003. Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures, *Building and Environment* 38 (2003)
- [29] Kalamees, T., Kurnitski, J. 2007. Moisture convection performance on the joint of external wall and attic floor - laboratory tests and two-dimensional simulation model validation, *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*, Helsinki University of Technology



- 
- [30] Scheffler, G.A. 2008. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage, Dresden University of Technology
- [31] Ramos, N., Delgado, J., Barreira, E., Freitas, V. 2010. Hygrothermal Numerical Simulation: Application in Moisture Damage Prevention, Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics, Prof. Lutz Angermann (Ed.), ISBN: 978-953-307-153-4, InTech
- [32] Langmans J, Klein R, Roels S. 2013. Numerical and experimental investigation of the hygrothermal response of timber frame walls with an exterior air barrier. Journal of Building Physics 2013; 36:375–97
- [33] Kalamees, T. 2012. Madalenergia- ja liginullenergiahoonete kavandamine. Juhend büroo ja avalike hoonete tellijale, Tallinna Tehnikaülikool
- [34] Kalamees, T., Tark, T. 2012. Madalenergia- ja liginullenergiahoonete kavandamine. Juhend korterelamute projekteerijatele, ehitajatele ja tellijatele, Tallinn
- [35] Kalamees, T., Tark, T. 2012. Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine. Juhend väikeelamute projekteerijale, ehitajale ja tellijale, Tallinn
- [36] Kurnitski, J. 2012. Kuluoptimaalsed madal- ja liginullenergiamaajad, ettekanne Kredexi seminaril, Tallinna Tehnikaülikool
- [37] Rahvusvahelise Energiaagentuuri (*International Energy Agency, IEA*) raport „Word Energy Outlook 2011“, allikas: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications>
- [38] Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2002/91/EÜ, 16.12.2002, ehitiste energiatõhususe kohta, Euroopa Liidu Teataja L1/65
- [39] Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19.05.2010, hoonete energiatõhususe kohta, Euroopa Liidu Teataja L153/13
- [40] Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi, (2010/31/EL) hoonete energiatõhususe kohta, rakenduskava „EU Climate Action Plan“ (dets 2008), tuntud ka kui Euroopa Liidu „20-20-20“ poliitika
- [41] SEC (2011) 277 final, 08.03.2011. Euroopa Komisjoni energiatõhususe kava (*Energy Efficiency Plan 2011*) lisa – mõjuhindang
- [42] Majandusministeerium. 2001. Eesti Energeetika 1991-2000, Tallinn
- [43] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. 2007. Eesti energeetika arvudes 2007, Tallinn
- [44] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. 2007. Energiasäästu sihtprogramm 2007-2013, Tallinn

- 
- [45] Eesti Statistika Kvartalikirj. 1/13. Quarterly Bulletin of Statistics Estonia, Statistikaamet, 2013
- [46] Eesti Arengufond. 2014. ENMAK 2030+. Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030, eelnõu 18.12.2014
- [47] Riigikogu. 2002. Ehitusseadus, redaktsiooni kehtivus 01.07.2014 - 30.06.2015, RT I, 29.06.2014, 13
- [48] Riigi Teataja. Vabariigi Valitsuse määrus nr. 68, Energiatõhususe miinimumnõuded, redaktsiooni jõustumise kuupäev 27.01.2014. RT I, 24.01.2014, 7
- [49] Riigi Teataja. Vabariigi Valitsuse määrus nr. 258, Energiatõhususe miinimumnõuded, redaktsiooni kehtivus 12.09.2009 - 08.01.2013. RT I, 05.09.2012, 10
- [50] Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T. 2003. Puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailu omakotitalossa, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [51] Vinha, J. 2012. Energiatehokkaan rakennuksen kosteustekninen toiminta, ettekanne esitlusel Energiatehokas rakentaminen, Tekniikka & Talous, Helsinki
- [52] Mäkitalo, M. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- [53] Mundt-Petersen, O. 2013. Moisture Safety in Wood Frame Walls. Thesis, Lund University, Sweden
- [54] EVS-EN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation, Eesti Standardikeskus
- [55] EVS-EN ISO 13788:2012, Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods, Eesti Standardikeskus
- [56] Robert Boyle (1627-1691), iiri füüsik ja keemik, uurides õhu ruumala sõltuvust rõhust, avastas 1660.a. seaduspärasuse, et kui gaasi temperatuur hoida muutumatuna, siis gaasi ruumala vähendamisel kaks korda suureneb ka rõhk kaks korda
- [57] Edme Mariotte (1620-1684), prantsuse füüsik, kelle olulisim töö oli 4-köiteline „*Essais de physique*“ (1676-1681), millest tuntuim on II osa „*De la nature de l'air*“ (1679), mis sisaldab uurimust gaaside kokkusurutavuse ja mahu seostest, mille seaduspärasuse avastas ja sõnastas 17 aastat varem Robert Boyle ja mida tänapäeval tuntakse Boyle-Marriotte'i seadusena
- [58] Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856), itaalia füüsik ja keemik, kes 1811.a. avaldas artikli "*Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des*

---

*molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons*'. Artiklis kirjeldas ta seaduspära, mille kohaselt eri gaaside võrdses ruumalas sisaldub võrdsel temperatuuril ja rõhul võrdne arv aineosakesi. Seaduspära sai tema auks nime Avogadro seadus

[59] Benoît Paul Émile Clapeyron (1799-1864), prantsuse insener ja füüsik, termodünaamika ja ideaalse gaasi üks esimesi uurijaid, tuletas võrrandi, mis kehtestab seosed aine sulamistemperatuuri ja keemistemperatuuri ning rõhu vahel

[60] Dmitri Ivanovitš Mendelejev (1834-1907), vene keemik, uuris gaasi tasakaaluoleku parameetreid ning koostas ideaalse gaasi olekuvõrrandi, mida tuntakse tänapäeval Clapeyron-Mendelejevi võrrandina

[61] Kivivillast soojustus- ja isolatsioonimaterjalide tootja Paroc kodulehekülj www.paroc.ee, 2014

[62] Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), prantsuse füüsik ja matemaatik, avaldas 1822.a. töö „*Théorie analytique de la chaleur*“, milles ta tugineb arutluskäigul Newtoni seadusele kehade jahtumisest, nimelt, et soojusvool kahe kõrvuti asetseva molekuli kuumutamisel on proportsionaalne väga väikese erinevusega nende temperatuuris

[63] Peuhkuri, R. 2003. Moisture Dynamics in Building Envelopes, PhD thesis, Technical University of Denmark

[64] Adolf Eugen Fick (1829-1901), saksa füüsik, avastas 1855.a. uurimistöö tulemusena, et mida rohkem kontsentratsioon mingis suunas muutub, seda rohkem osakesed difusioonil selles suunas liiguvad ning sõnastas difusiooni põhiseaduse: difusioonis osalevate osakeste voog läbi pinnauhiku on võrdeline kontsentratsiooni gradiendiga, mida tänapäeval tuntakse Fick'i esimese seadusena

[65] William Thomson (1824-1907), tuntud ka kui lord Kelvin, inglise füüsik ja matemaatik, kes on ajalukku läinud eelkõige termodünaamika aluste uurijana. Oluline töö on "*On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam*" (1851). Võttis kasutusele absoluutse nulltemperatuuri mõiste (-273,15 °C). Tõestas ja sõnastas termodünaamika põhimõtete alusel seaduspärasuse, mis kirjeldab kapillaaris aururõhu muutmise seost meniski raadiusega: aururõhk kumeral pinnal on suurem kui tasapinnal. Antud seost tunneme Kelvini võrrandi nime all

[66] Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858), prantsuse insener, kes on andnud märkimisväärse panuse hüdraulika uurimisse. Uurides vedeliku liikumist liivas ja selle abil

---

vee filtreerimise võimalusi, selgus, et vooluhulk on võrdeline toru ristlõikepinna ja rõhkude erinevusega ning sõltuv materjalide omadustest. Antud seadus on nimetatud Darcy seaduseks

[67] Daniel A. de Vries, hollandi päritolu Austraalia teadlane, modifitseeris 1952.a. termopaari ning kasutas seda pinnastes soojuse ja niiskuse leviku uurimisel ja arvutustulemustega võrdlemisel mittestatsionaarses arvutusolukorras. Avaldas 1975.a. uurimustöö „*Heat transfer in soils*“ (Semin on Heat and Mass Transfer in the Environ of Veg, Heat and Mass Transfer in the Biosphere. Issue Pt 1, 1975, Pages 5-28)

[68] John Robert Philip (1927-1999), Austraalia füüsik ja pinnaseuurija, kes uuris soojuse ja massi levi ning eksperimenteeris pinnaste infiltratsiooni ja veejuhtivuse seostega. Avaldas 1972.a. uurimustöö „*Hydrostatics and Hydrodynamics in Swelling Media*“ (IAHR, Developments in Soil Science, Elsevier, 1972, Volume 2, 341-355, Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, SN-0166-2481)

[69] Stephen Whitaker, Ameerika teadlane, pinnaste ja vedelike mehaanika, difusiooni ja soojuslevi uurija. Avaldas 1973.a. uurimustöö „*The transport equations for multi-phase systems*“ (Chemical Engineering Science, Volume 28, Issue 1, January 1973, Pages 139–147)

[70] Jacob Bear, Iisraeli teadlane, kes on uurinud ja modelleerinud vedelike dünaamikat pinnastes. Avaldas 1979.a. uurimustöö „*Analysis of flow against dispersion in porous media – Comments*“ (Journal of Hydrology, Elsevier, February 1979)

[71] Arvutustarkvara WUFI juhend, [www.wufi.de](http://www.wufi.de), 2012

[72] Kalamees, T. 2012. Ehitusfüüsika loengumaterjalid, Tallinna Tehnikaülikool

[73] Kalamees, T. 2013. Ehitusfüüsika loengumaterjalid, Tallinna Tehnikaülikool

[74] Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka, Rakennustieto, Helsinki

[75] Hagentoft, C-E. 2001. Introduction to Building Physics, Studentlitteratur, Lund

[76] Arvutustarkvara Delphin 5 arendus- ja töörühma liikmed, allikas: <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/contact.php>

[77] Grunewald, J., Nicolai, A. 2006. Delphin 5 User manual and program reference, TU Dresden

[78] Vinha, J. et al. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, Tampereen Teknillinen Yliopisto

[79] Kalamees, T., Vinha, J. 2004. Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations, Journal of Thermal Envelope & Building Science 27 (2004)

- 
- [80] Saksa tööstusnorm DIN 4108-3:2001 "*Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden-Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*", p. 5.2.1.
- [81] Sarnastele tasemetele (sõltuvalt tingimustest ja materjalidest lubatud kondenseerumine 0,15 ... 1,0 kg/m<sup>2</sup>) viitab ka Soome Ehitusinseneride Liidu (RIL) juhendkogumik RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnitelu ja tutkimukset, lk. 64, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki
- [82] Hukka, A., Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33 (1999) 475-485. Springer-Verlag
- [83] Antti Hukka, Soome teadlane, uurinud puidu ja puidupõhiste toodete füüsikalisi omadusi ning loonud nende hindamiseks mitmeid matemaatilisi mudeleid, hallitusindeksi määramise matemaatilise mudeli üks väljatöötajatest 1990-ndatel
- [84] Hannu Viitanen, Soome teadlane, VTT vanemteadur ja bioprotsesside tiimijuht, hallitusindeksi määramise matemaatilise mudeli üks väljatöötajatest 1990-ndatel
- [85] Viitanen, H., Ojanen, T. 2007. Improved model to predict mould growth in building materials. In: *Thermal performance of the exterior envelopes of Ahole buildings X-proceedings CD, 2-7 December. Clearwater Beach, USA, ASHRAE, DOE, ORNL*
- [86] Viitanen, H. et al. 2010. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics* 2010 (33) no. 3, 201-224
- [87] Ojanen, T. et al. 2010. Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials, ettekanne ASHRAE konverentsil Buildings XI Conference
- [88] Sarnasele tasemele viitab ka Soome Ehitusinseneride Liidu (RIL) juhendkogumik RIL 255-1-2014, lk.64
- [89] Kalamees, T. 2002. Alternatiivseid soojustusmaterjale puitkarkasshoonetele. Artikkel ajakirjas *Ehitaja* 7-8(71-72) 2002
- [90] Soome ehitusmäärustik C2, p. 4.1.1.2, *Suomen rakentamismääräyskokoelma, Kosteus, Määräykset ja ohjeet*, Ympäristöministeriö 1998
- [91] Rootsi riiklik elamumajanduse, ehituse ja planeerimisamet Boverket (BBR) kirjeldab oma normatiivdokumendis (BFS 2011:6, BBR) ehitusmaterjalide suhtelist niiskust RH = 75 % kui kriitilist taset, millest ülalpool ilmneb inimorganismile ohtlikke mikrobioloogilisi protsesse ja tekib hallitust