



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
EHITUSTEADUSKOND
EHITISTE PROJEKTEERIMISE INSTITUUT

EHITUSNIISKUSE MÕJU LISASOOJUSTAMISE MOODULELEMENTIDE NIISKUSTEHNILISELE TOIMIVUSELE

INFLUENCE OF MOISTURE DRY-OUT ON HYGROTHERMAL
PERFORMANCE OF PREFABRICATED MODULAR INSULATION ELEMENTS

EEK 60 LT
Magistritöö

Üliõpilane: **Magnus Lelumees**

Juhendaja: **Prof. Targo Kalamees**

Kaasjuhendaja: **Ekspert Peep Pihelo**

Tallinn, 2016.a.

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: 105200 EAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

..... (kaasjuhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees (allkiri)

Sisukord

1	Kasutatavad lühendid ja tähised	5
2	Sissejuhatus	7
2.1	Eesmärk.....	8
2.2	Uurimisküsimused	8
2.3	Metoodika	8
2.4	Töö olulisus.....	9
3	Tehases valmistatud lisasoojustamise elementidega renoveerimine.....	10
3.1	Korterelamute tehniline olukord Eestis	10
3.2	Elementidega lisasoojustamise idee ja protsessi kirjeldus.....	10
3.3	Elementide kirjeldus.....	12
3.3.1	Modulelementide konstruktsiooniline lahendus	12
3.3.2	Modulelementide multifunktsionaalsus.....	15
3.4	Modulelementidega lisasoojustamise niiskustehniline turvalisus	18
4	Niiskustehnilised arvutused	20
4.1	Niiskuse liikumine piirdetarindites	20
4.2	Kaldvihma koormus soojustatavale fassaadile	24
5	Meetodid	29
5.1	Vaadeldavate välistarindite konstruktsioonilised lahendused	29
5.1.1	Raudbetoon välisseinapaneelide konstruktsiooniline lahendus.....	29
5.1.2	Soojustuselementide konstruktsiooniline lahendus	30
5.2	Materjalide omadused.....	31
5.3	Soojus- ja niiskusrežiimi arvutustarkvara	32
5.3.1	Modelleerimine ja tasakaaluvõrrandid	33
5.4	Arvutusmudeli kalibreerimine	39
5.5	Mudeli ülesehitus	42
5.6	Väliskliima	43

5.7	Sisekliima.....	45
5.8	Kalduvihma mudel betooni niiskussisalduse arvutamisel	47
5.9	Hallituse kasvu mudel.....	53
5.9.1	Hallitusindeksi maksimumväärtused erinevatel materjalidel.....	57
5.9.2	Hallituse taandumine.....	58
6	Tulemused.....	60
6.1	Niiskussisaldus raudbetoonist välisseinapaneeli välimises betoonplaadis 60	
6.1.1	Aastaaegade ja kuude mõju.....	60
6.1.2	Ilmakaarte mõju.....	62
6.1.3	Vihma ja suhtelise niiskuse mõju.....	65
6.1.4	Betooni niiskussisalduse määramine edasisteks arvutusteks	66
6.2	Lisasoojustamise moodulelementidega välistarindi niiskustehniline toimivus	67
6.2.1	Algtingimused.....	67
6.2.2	Elementide niiskustehnilise toimivuse arvutuste tulemused	68
7	Tulemuste hindamine	79
7.1	Raudbetoon välisseinapaneeli välimise betoonkooriku niiskussisalduse hindamine.....	79
7.2	Lisasoojustamise moodulelementidega välistarindi niiskustehniline toimivus	83
8	Järeldused	88
9	Kokkuvõte	90
10	English summary	92
11	Viited.....	94
12	Lisad	98
12.1	Lisa 1.....	98
12.2	Lisa 2.....	108

1 Kasutatavad lühendid ja tähised

A_w	kapillaarne niiskusimavus; $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$
CFD	vedelikuvoogude dünaamiline modelleerimismetoodika, inglise keeles <i>computational fluid dynamics</i>
C_{mat}	hallituse kasvu taandumistegur; -
D_w	õhu veeauru juhtivus difusiooni teel; m^2/s
EMHI	Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut; alates 06.2013 Riigi Ilmateenistus
g	niiskusvoog, niiskusvoolu tihedus; $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
HAM	analüüsimudel: soojus, õhk, niiskus, inglise keeles <i>heat, air, moisture</i>
I_s	kaldvihma intensiivsus vertikaalpinnale; $\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
M	hallitusindeks; -
M_{crit}	kriitiline hallitusindeksi tase; -
M_{max}	suurim võimalik hallitusindeksi väärtus; -
MRY	niiskustehniliste arvutuste baasaasta, inglise keeles <i>moisture reference year</i>
OSB plaat	puitlaastplaat, inglise keeles <i>oriented strand board</i>
PE-kile	polüetüleenkile, kasutatakse õhu- ja aurutõkkekilena
r	horisontaalpinnale langev vihma intensiivsus; $\text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
R	materjali soojustakistus; $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
RH	suhteline niiskus; %
RH_{crit}	kriitiline suhteline niiskus; %
RH_{min}	hallituse tekkeks vajalik minimaalne suhteline õhuniiskus; %
S_d	suhteline difusioonitakistus; m
t	temperatuur; °C
TEP plaat	tsementfibroliit, levinud soojustusmaterjal 20. sajandi II pooles

U	soojuslähivus (soojusjuhtivus); $W/(m^2 \cdot K)$
u	materjali kaaluline niiskussisaldus; kg/kg
w	materjali niiskussisalduse mass mahu järgi; kg/m^3
v	tuule kiirus mõõdetud maapinnast kõrgusel 10 m; m/s
Δv	niiskuslisa, veeauru sisalduse erinevus sise- ja välisõhus; kg/m^3
λ	soojuserijuhtivus; $W/(m \cdot K)$
μ	difusioonitakistustegur; -
ρ	materjali tihedus; kg/m^3
ψ	materjali mahuline niiskussisaldus; m^3/m^3

2 Sissejuhatus

Eestis on üle 200 000 elamu kogupindalaga üle 66 miljoni ruutmeetri, kus elab ligikaudu 65% Eesti elanikkonnast. Pea pooled nendest hoonetest on ehitatud ajavahemikus 1961-1990 ning valdavalt tehases valmistatud betoonpaneelidest (Kalamees et al., 2013). Selliste hoonete välisseinte soojusläbivus on vahemikus 0,8 – 1,2 W/(m²*K) ja selliste hoonete energiatõhusus on 4-5 korda kehvem, kui tänapäevased normid nõuavad. Antud tüüpi elamute kavandatud kasutusiga on 50 aastat, mis on paljudel juhtudel peaaegu läbi või juba läbi saanud.

See on viinud olukorrani, kus väga paljude korterelamute kütte- ja ventilatsioonisüsteemid ning välistarindid vajavad täielikku renoveerimist. Hoonete sisekliima vajab parendamist, paljudes kohtades esinevad hallitusprobleemid ning elanikud kurdavad „haige maja“ sündroomide üle (Ilomets et al. 2011).

Lisaks on tarindite soojuskadude vähendamine hetkel suure tähelepanu all ning muutub lähitulevikus veelgi olulisemaks. Hoonete energiatõhususele esitatavad nõuded muutuvad järk-järgult rangemaks ning juba alates 2021. aastast peavad uued ehitised vastama liginullenergia hoonetele esitatavatele nõuetele. Projekteerijad, kinnisvaraarendajad ning –omanikud otsivad seetõttu innovaatilisi viise, kuidas minimeerida hoonete halduskulusid ning mis ei nõuaks samal ajal suuri alginvesteeringuid.

Üheks lahenduseks vanade hoonete, eelkõige korterelamute, renoveerimiseks on kasutada tehases valmistatud modulaarseid soojustuselemente, mis võimaldavad standardiseerida ja osaliselt automatiseerida ehitiste renoveerimist ja tõsta samal ajal ka ehitiste renoveerimise kvaliteeti (Veld, 2015). Selliste paneelidega on võimalik vähendada välisseinte soojusläbivust madalamaks, kui $U_{wall} = 0,11$ W/(m²*K) (Kalamees et al., 2016). Tehases toodetud paneelidega hoonete soojustamise ideed on Euroopas arutatud juba pea kümmekond aastat ning Kesk- ja Põhja-Euroopas on valmis ehitatud ka esimesed näidisprojektid (Heikkinen et al. 2009). Eestis plaanitakse renoveerida pilootobjekt, kus kasutatakse lisasoojustamise moodulelemente, käesoleva aasta teises pooles Tallinnas Akadeemia tee 5a elamu renoveerimisel liginullenergiahooneks.

Soojustuselementidega renoveerimise peamiseks eesmärgiks on hoone energiatõhususe oluline parendamine. Lisaks sellele tuleb tagada ka soojustatud

välistarindite niiskustehniline toimivus. Viimast mõjutavad enim algniiskuse tase olemasolevates välistarindi materjalikihtides, erinevad kliimategurid ja niiskuskormused ning lisasoojustamise moodulelementide konstruktsiooniline lahendus.

2.1 Eesmärk

Käesoleva inseneriõppe lõputöö eesmärkideks on:

- analüüsida raudbetoon välisseinapaneelide niiskussisaldust mõjutavate tegurite osatähtsusi;
- määrata lisasoojustamise moodulelementide niiskustehnilisteks arvutusteks raudbetoon välisseinapaneelide algniiskuse tase;
- hinnata lisasoojustamise moodulelementide erinevate konstruktsiooniliste lahenduste niiskustehnilist toimivust erinevates olukordades.

2.2 Uurimisküsimused

- Missugused kliimategurid ja kui suurel määral mõjutavad raudbetoonist välisseinapaneelide niiskussisaldust?
- Kui kõrge on raudbetoonist välisseinapaneeli algniiskuse tase erinevates kliimaatilistes tingimustes?
- Missugused algniiskuse tasemed võib võtta aluseks soojustuspaneelide niiskustehnilistel arvutustel?
- Kuidas on tagatud soojustuspaneelide niiskustehniline toimivus erinevate konstruktsiooniliste lahenduste ja erinevate algniiskuste juures?

2.3 Metoodika

Käesolevas töös kasutatakse püstitatud eesmärkide saavutamiseks ulatuslikku teaduskirjanduse analüüsi ning arvutusi soojus- ja niiskustehnilise arvutustarkvaraga. Arvutustarkvara alusmudel kalibreeritakse reaalse mõõtetulemuste alusel ning vastava arvutusmudeli põhjal koostatakse kõik järgnevad mudelid. Töös kasutatakse Eesti pikaajalisi kliimaandmeid ning nimetatud andmete modifikatsioone. Tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamisel tarindi sisese hallituse kasvu seisukohast kasutatakse Soome teadlaste poolt välja töötatud hallituse kasvu indeksi mudelit.

2.4 Töö olulisus

Väga suur hulk raudbetoonpaneelidest korterelamuid on jõudnud või jõudmas projektijärgse kasutusea lõpule (Kalamees et al., 2009). Asjaolu, et energiatõhususe miinimumnõuded uutele ja renoveeritavatele hoonetele muutuvad samuti järjest rangemaks, on loonud turul süveneva olukorra, kus nõudlus ökonoomsetele ja Eesti kliimas töötavatele renoveerimislahendustele järjest suureneb. Lisaks jäetakse vanade hoonete renoveerimise projektides tarindite niiskustehnilise toimivuse hindamine tihtipeale tahaplaanile ning keskendutakse eelkõige tarindite soojustakistuse tõstmisele.

Tarindisisene niiskustehniline toimivus sõltub suurel määral tarindile mõjuvatest erinevatest niiskuscoormustest – väliskliimast, niiskuslisast ja tarindisisestest materjalide algniiskuste tasemetest. Andmed ja arvutustulemused väliskliima ja niiskuslisa kohta on kerge vaevaga kättesaadavad. Ka uute, renoveerimisel kasutatavate materjalide algniiskuste tasemed on võimalik hõlpsasti määrata. Infot olemasolevate tarindite algniiskuse taseme kohta projekteerimishormides või standardites aga ei leia, kuna Eesti kliimale vastavate tasemete määramist pole varasemalt põhjalikult uuritud. Samuti puudub teadmine, missugused kliimategurid ning kui suures ulatuses olemasoleva tarindi algniiskuse taset mõjutavad.

Käesoleva töö tulemuste põhjal saab hinnata ühe elamute täismahulise renoveerimise alternatiivi – tehases toodetud soojustuspaneelidega soojustamise – ehitusfüüsikalist toimivust Eesti kliimas. Kui välistingimustes on raudbetoonist välisseinapaneeli välimise betoonplaadi niiskussisaldus ilma vihmata olukorras ligikaudu 60 kg/m^3 , millele vastav betooni suhtelise niiskuse tase on 80%, siis pärast lisasoojustamist langeb niiskuse tasakaalustumise tulemusena betooni niiskussisaldus ligikaudu 25 kg/m^3 , millele vastav betooni suhtelise niiskuse tase on 40%. See tähendab, et niiskuse tasakaalustumisest tulenev niiskusvoog läbi lisasoojustuse on $2,1 \text{ kg/m}^2$. Kaldvihma mõjul võib betooni niiskussisaldus tõusta aga kuni 135 kg/m^3 , mis suurendab omakorda niiskusvoogu läbi lisasoojustuse kolm korda. Käesolevas töös on uuritud soojustuselementide niiskustehnilist toimivust võttes aluseks Eesti kliimakoormused. Analüüsi tulemusel on leitud toimivad lahendused ning välja on toodud ka nende lahenduste toimivuse piirtingimused.

3 Tehases valmistatud lisasoojustamise elementidega renoveerimine

3.1 Korterelamute tehniline olukord Eestis

Üle 80% elamutest on Eestis ehitatud pärast II maailmasõda, peamiselt ajavahemikus 1961 – 1990. Enamik neist hoonetest on ehitatud kas tellistest või tehases valmistatud raudbetoonpaneelidest. Betoonpaneelid on valdavalt kaetud kivipurukattega või värvitud ning tellistest välisseinad on valdavalt täiendava pinnakatteta. Tellistest on enim kasutatud silikaattellist või keraamilist kärgtellist. Seda tüüpi hoonetel on tõsised külmasillad ning hoonete välisseinte soojuslähivus varieerub vahemikus 0,7 – 1,0 W/(m²·K) (Ilomets et al. 2011). Varasematest uuringutest selgub, et seda tüüpi hooneid on nii majanduslikust aspektist kui ka keskkonnasõbralikkuse aspektist mõistlikum renoveerida, kui lammutada ning uus hoone selle asemel ehitada (Kuusk et al. 2014). Välistarindite renoveerimine suurendab betoonfassaadide korrosioonikindlust (Ilomets et al. 2011) ja vähendab külmasildade sisepindadel hallituse kasvu riski (Ilomets et al. 2011).

Siiani on olnud levinuimaks lahenduseks elamu välistarindite suurema- või väiksemamahuline lisasoojustamine. Samas vajavad pea eranditult kõik seda tüüpi hooned täiemahulist renoveerimisest, mis tähendab ka hoone kütte- ja ventilatsioonisüsteemi kaasajastamist. Väga paljudel juhtudel jäetakse viimasena mainitud tööd kõrge alginvesteeringu tõttu tegemata. Tulemuseks on hooned, mille välispiirete soojustakistus on renoveerimiseelse olukorraga võrreldes küll kõrgem, kuid hoone sisekliima arvestatavalt paranenud pole.

Välistarindite renoveerimisel on hetkel Eestis levinuimaks turul pakutavaks lahenduseks fassaadide ja/või katuse lisasoojustamine. Käesolev töö uurib ühe lisasoojustamise alternatiivi – tehases valmistatud modulaarsete soojustuselementidega soojustamise – niiskustehnilist toimivust Eesti kliimas.

3.2 Elementidega lisasoojustamise idee ja protsessi kirjeldus

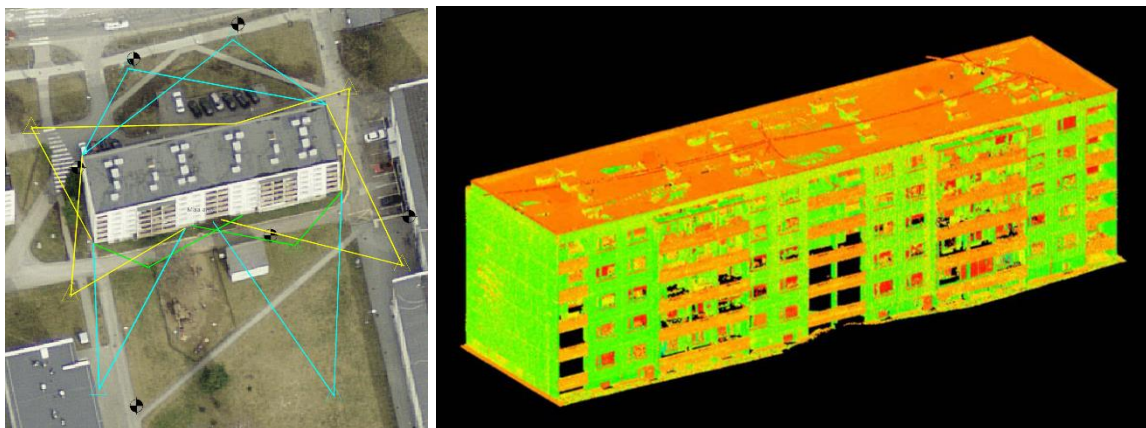
Vanade hoonete renoveerimine kipub enamjaolt olema oluliselt tülikam ja keerulisem, kui uute hoonete rajamine. Renoveerimist vajavatesse hoonetesse on keeruline mahutada tänapäeva nõuetele vastavaid kommunikatsioone (eelkõige ventilatsioonisüsteemi), kuna ruumi nende paigutamiseks on kas vähe või pole üldse. Protsessi teeb veelgi keerulisemaks olukord, kui renoveeritav hoone peab

ehitusprotsessi ajal kasutuskõlbulik olema. Elamute ja kortermajade renoveerimine toimub tihtipeale aga just nii, et hoone elanikud elavad ise renoveerimise ajal sees. Selline tööde kulg on ebamugav hoone elanike jaoks ja kulukam renoveerijale. Seetõttu on nii elanike kui ka ehitaja seisukohast oluline viia ehitamisprotsess nii lühikeseks, kui võimalik.

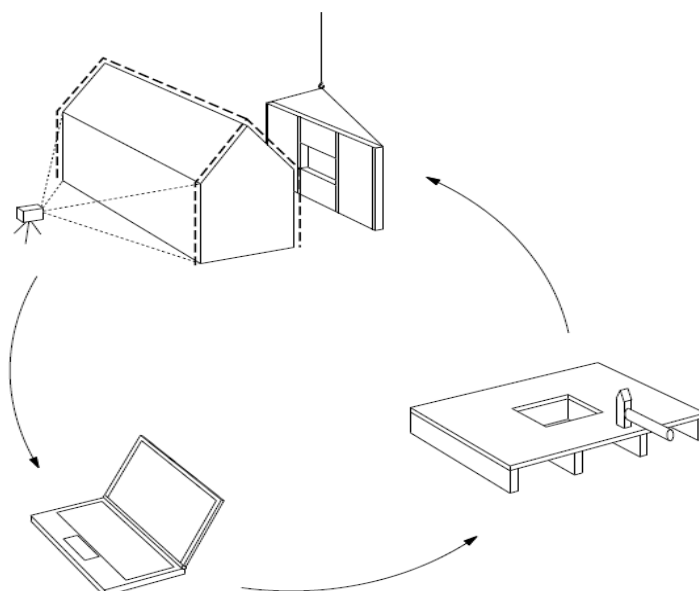
Üheks võimalikuks lahenduseks on elamu renoveerimine tehases valmistatud lisasoojustamise elementidega – nii välisseina kui ka katuslae elementidega. Sellise lahenduse eesmärgiks on teha maksimaalselt palju toiminguid tehases ning minimeerida ehitusplatsil ehitamisele kuluvat aega – ehitusplatsil toimuks vaid elementide paigaldamine, elementide vaheliste vuukide tihendamine ning vähesel määral eriosade ühendamistöid ja viimistlustöid. Tänu moodulelementide unikaalsusele (ühte positsiooni sobib vaid üks vastav moodul) saab luua optimeeritud tarnegraafiku – renoveerimisobjektile tuuakse vaid vastava päeva kogus elemente.

Lisaks renoveerimisprotsessi ajalisele minimeerimisele võiks tehases ehitamine eelduslikult ka ehitamise kvaliteeti tõsta. Tehases tootmine võimaldab paigaldada elementidesse avatäited, vajalikud uued kommunikatsioonid ning viimistleda ka elementide välispinnad tehase ergonoomilisemates ja kontrollitavates keskkonnatingimustes. Paindlik ning läbimõeldud tööjaotus alates projekteerimisest kuni valmistamiseni võimaldab teha just täpselt selliseid elemente, nagu konkreetsele hoonele vaja arvestades samal ajal hoone eripäradega. Tehases valmistamine võimaldab seega pakkuda paremat kvaliteeti ja toodangu vastupidavust, kiirendades samal ajal kogu renoveerimise protsessi. Ehitusplatsil muutuvad tööd aga see-eest lihtsamaks ning kiiremaks.

Kuna tehases toodetud elementide paigaldus nõuab arusaadavalt väga suurt täpsust, siis peab elamu renoveerimise protsess algama vana hoone ülesmõõdistamisest. Lihtsaim viis selleks oleks kasutada näiteks laserskanneerimist, mille alusel saab koostada renoveerimisele mineva elamu täpse mudeli. Laserskanneerimist iseloomustab Joonis 3.1. Seejärel saab projekteerida ning hiljem valmistada juba kõik elemendid täpselt tegelikule olukorrale vastavate mõõtudega. Kirjeldatud protsessi nimetatakse ka tagurpidi ehitamiseks (Heikkinen et al. 2009). Protsessi illustreerib Joonis 3.2.



Joonis 3.1 Laserskanneerimise skeem (vasakul) ning saadud punktipilv Akadeemia tee 5a ühiselamust (paremal)



Joonis 3.2 Lisasoojustamise elementidega renoveerimise protsess (Heikkinen et al. 2009)

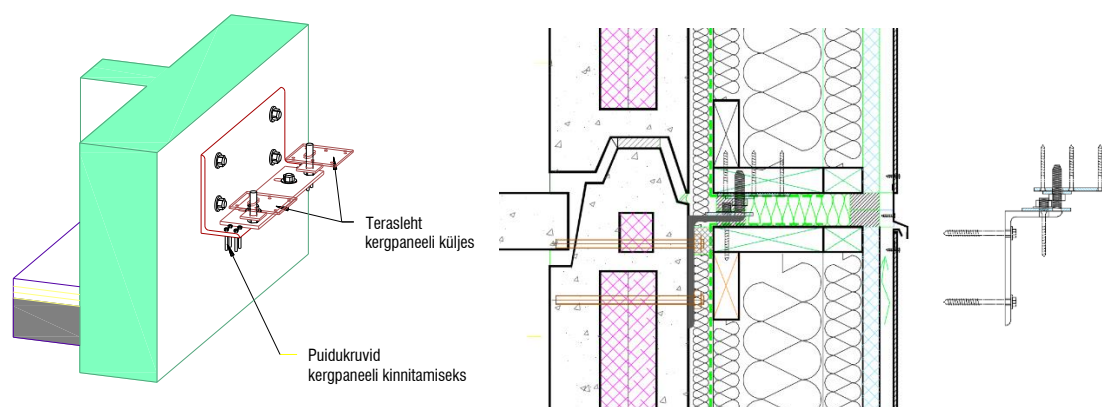
3.3 Elementide kirjeldus

3.3.1 Moodulelementide konstruktsiooniline lahendus

Lisasoojustamise moodulelementide näol on tegemist puitkarkassile rajatavate elementidega. Elemendi konstruktsioonilise osa moodustab puitkarkass, mille vahel on mineraalvillast soojustus. Puitkarkassi paksus valitakse kas lähtuvalt elemendile esitatavatest konstruktsioonilistest nõuetest või elemendi vajalikust soojustakistusest (sellisel juhul saab määravaks soojustuse kihi paksus). Puitkarkassi võib moodustada näiteks saepuidust, liimpuidust või puidust I-taladest (minimeerimaks külmasildade mõju ja vähendamaks puidu kulu). Karkassi peal,

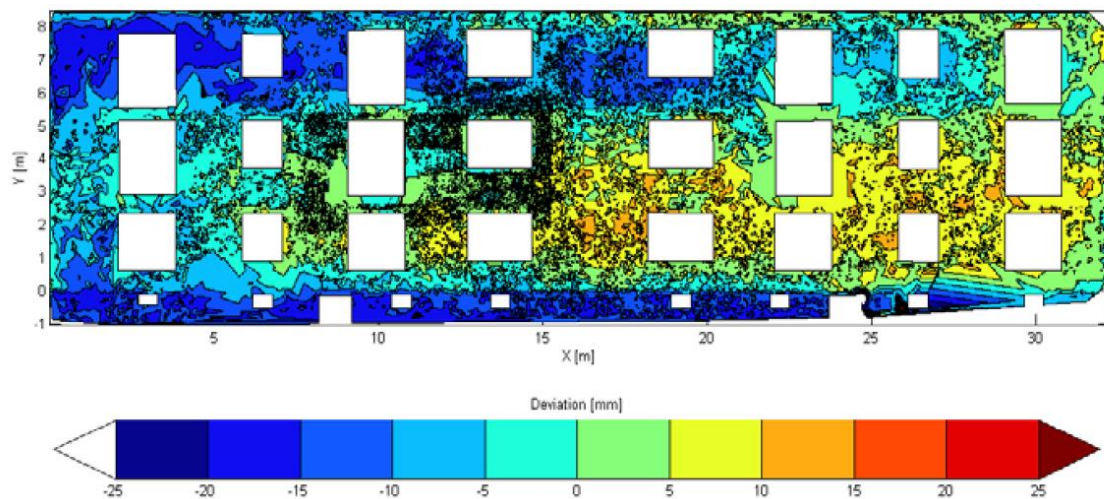
elemendi välisküljel, asub tuuletõke ja tuulutusvahe, mille peal omakorda fassaadi viimistlus, olgu selleks puitladis, mineriitplaat või muu taoline materjal. Elemendi siseküljel asub õhu- ja aurutõkkele ning elemendi ja olemasoleva välisseina vahele paigaldatakse puhverkiht (pehme mineraalvill), mis vastavalt seina kõverustele kokku pressitakse ja mis täidab olemasoleva seina ebatasasused.

Elemendi kinnituseks olemasoleva fassaadi külge on mitmeid erinevaid viise. Üheks võimaluseks on rajada paneelidele eraldi vundament, mille peale saab panna toetama esimese korruse seinaelemendid. Teiseks võimaluseks on kasutada terasest nurgikuid, mille peale toetatakse moodulelementide puitkarkass (Heikkinen et al. 2009). Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimisel on soojustuselementide kinnitamiseks plaanis kasutada reguleeritavaid terasest nurgikuid, mis võimaldavad objektil paneeli asetust kolmes suunas reguleerida (vt Joonis 3.3).



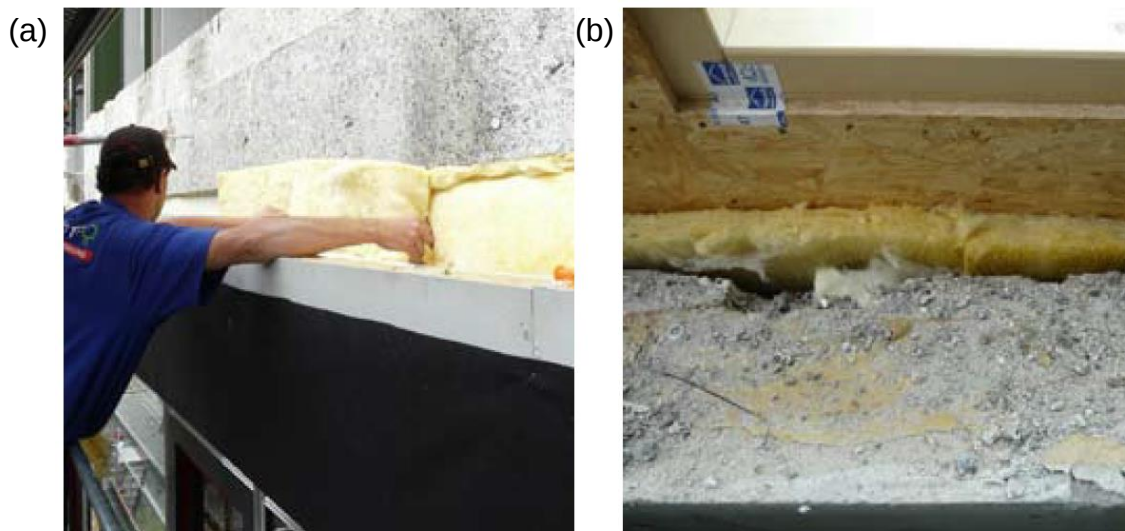
Joonis 3.3 Akadeemia tee 5a soojustuselementide kinnitamiseks kasutatavad terasnurgikud (Sirkel & Mall OÜ)

Olemasoleva fassaadi välispind on harva ideaalne tasapind. Ehituskvaliteet ja hoone vajumid on peaaimesed põhjused, miks hoonel on ebataasane välispind. Ebataasalisus võib varieeruda 10 millimeetrist kuni 60 millimeetrini. Joonis 3.4 illustreerib fassaadipinna ristisuunalisi ebataasasusi ühel 1950-tel Saksamaal Frankfurdis ehitatud elamul (Heikkinen et al. 2009).



Joonis 3.4 Fassaadipinna ebatasasused korterelamul Saksamaal, Frankfurdis (Heikkinen et al. 2009)

Selline soojustuselementide ja olemasoleva fassaadipinna vahel tekkinud õhkvahe tuleb elimineerida tagamaks uue välistarindi ehitusfüüsikaline toimivus ning tuleohutuse nõuetele vastavus. Üheks võimaluseks on kasutada tihendamiseks pehmet mineraalvilla, mida on võimalik kokku suruda vastavalt seina ebatasasustele. Sellisel juhul valitakse uute moodulelementide paigalduskaugus olemasolevast fassaadist fassaadipinna kõrgeimast tasapinnast lähtuvalt. Kui fassaadi ebatasasus kõigub näiteks 40 mm ulatuses, siis peaks tihendava paigaldusvilla paksus olema minimaalselt 50 mm. Joonis 3.5 illustreerib paigaldusvilla kihi fikseerimist ja elemendi ning olemasoleva fassaadi ühenduskohta aknalaua all.



Joonis 3.5 Paigaldusvilla fikseerimine (a) ja moodulelemendi ühendussõlm (b) (Heikkinen et al. 2009)

3.3.2 Moodulelementide multifunktsionaalsus

Moodulelementide põhimõtteliseks eeliseks on võimalus teha maksimaalselt palju toiminguid tehase kontrollitud tingimustes ning minimeerida seega ehitusele kuluvat aega. Näiteks avatäidete montaaž tehases võimaldab tihendada ja teipida kvaliteetsemalt avatäidete ja seina vahelise liitesõlme. Lisaks sellele elimineeritakse ehituse käigus ajaperiood, mil elamu siseruumid on avatud väliskeskkonnale ehk teisisõnu – vanad avatäited võib objektil demonteerida ka pärast uute avatäidetega elementide paigaldust.

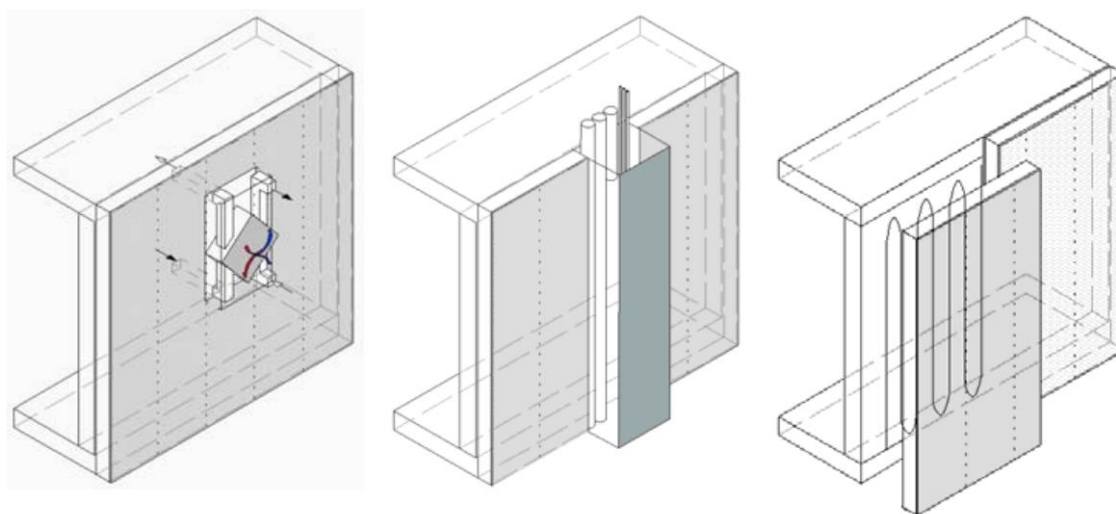
Kolmandaks oluliseks eeliseks moodulelementide juures on võimalus paigaldada elementidesse tehasetingimustes kõik vajalikud kommunikatsioonid. Vana hoone renoveerimine ei hõlma vaid piirdetarindite soojustakistuse tõstmist, vaid ka kõigi tehnosüsteemide uuendamist vastavaks tänapäeval kehtivate nõuetega. Hoone välispiirete soojustakistuse tõstmisel ja õhupidavuse parendamisel tuleb nõuetekohase sisekliima tagamiseks rajada hoone eripärasid arvestav kütte- ja ventilatsioonisüsteem. Vastasel juhul kajastub lisasoojustamise kasu vaid madalamates küttekuludes. Üksnes lisasoojustamist praktiseeritakse ka põhjusel, et uute nõuetekohaste tehnosüsteemide mahutamine vanasse hoonesse on vajaliku ruumi puudumise tõttu pea võimatu. Siinkohal on üheks alternatiiviks paigaldada kõik vajalikud uute tehnosüsteemide trassid moodulelementide sisse.

Seega pakuvad moodulelemendid lisaks välistarindite lisasoojustamisele ka võimalust integreerida elementi erinevaid aktiivseid ja passiivseid tehnosüsteeme.

Sellisel kujul võib moodulelemente nimetada „multifunktsionaalseteks moodulelementideks“ ja elemente on võimalik kasutada näiteks:

- hoone tehnoseadmete (päikesekollektorid, soojuspumbad või ventilatsiooniseadmed) paigaldamiseks
- hoone tehnosüsteemide torustike paigaldamiseks ja mahutamiseks
- passiivse seinakütteelemendi paigaldamiseks.

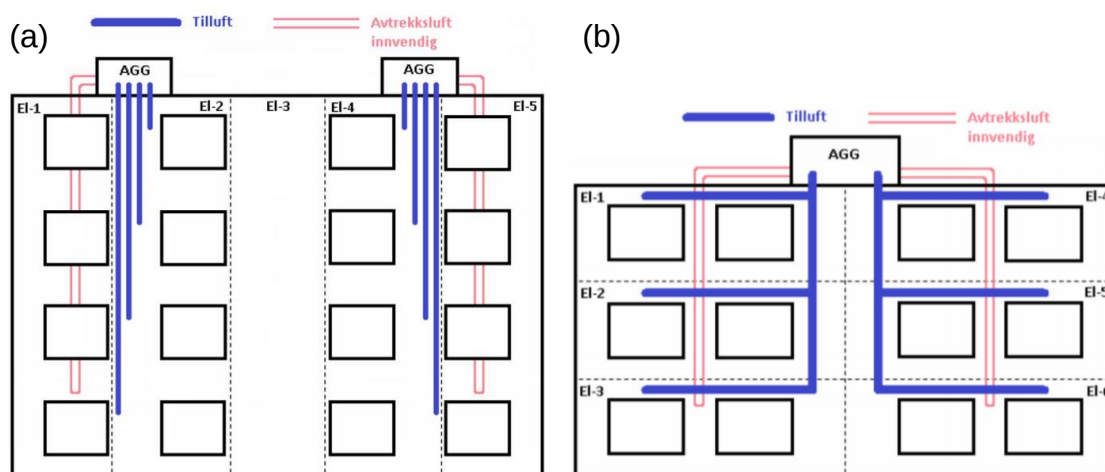
Joonis 3.6 illustreerib mainitud võimaluste rakendamist välisseina moodulelementides.



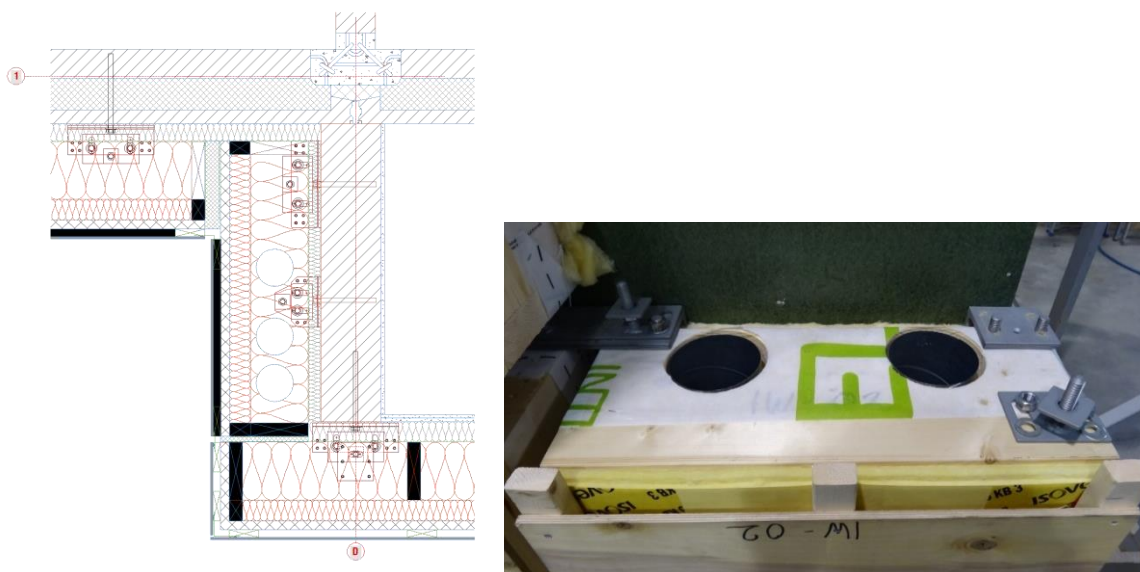
Joonis 3.6 Tehnosüsteemide integreerimise võimalused moodulelementidesse (Ott et al. 2014)

Tehnosüsteemide integreerimine moodulelementidesse muudab keerukamaks elementide paigaldamise objektil. Üks moodulelement katab üldjuhul osa hoonest, näiteks ühe korruse kõrguse ning ühe korteri pikkuse välisseina osa. Tehnosüsteemid läbivad hoonet aga terves ulatuses, antud käsitluses terve fassaadi ulatuses ning see toob kaasa tehnosüsteemide torustiku ühendamistööd objektil. Üheks võimaluseks on siin kasutada vertikaalseid välisseina paneele, kus iga teineteise all oleva korteri ventilatsioon on lahendatud eraldi torustikuga (vt Joonis 3.7 (a)). Teise alternatiivina võib kasutada ka horisontaalse paigaldusega moodulelemente, kus ventilatsioonisüsteemi magistraalliin on kõigil korteritel ühine (vt Joonis 3.7 (b)). Joonis 3.7-l on sinise ning punase värviga kujutatud vastavalt sissepuhke- ja väljatõmbe ventilatsioonitorustik. Vertikaalsete elementide kasutamisel on lihtsama geomeetriaga hoonete puhul võimalik vältida torustiku ühendamistööd objektil, kuid vertikaalsete elementide montaaž on elemendi

suuruse tõttu objektil keerulisem. Horisontaalsete elementide kasutamisel on võimalik ühendamistõid minimeerida kasutades kõigi korterite puhul ühist magistraaltoru. Sellisel juhul tuleb kasutada mürasummuteid ventilatsioonisüsteemis.



Joonis 3.7 Tehnosüsteemide paigaldus (a) vertikaalsete moodulelementide ja (b) horisontaalsete moodulelementide puhul (Ott et al. 2014)

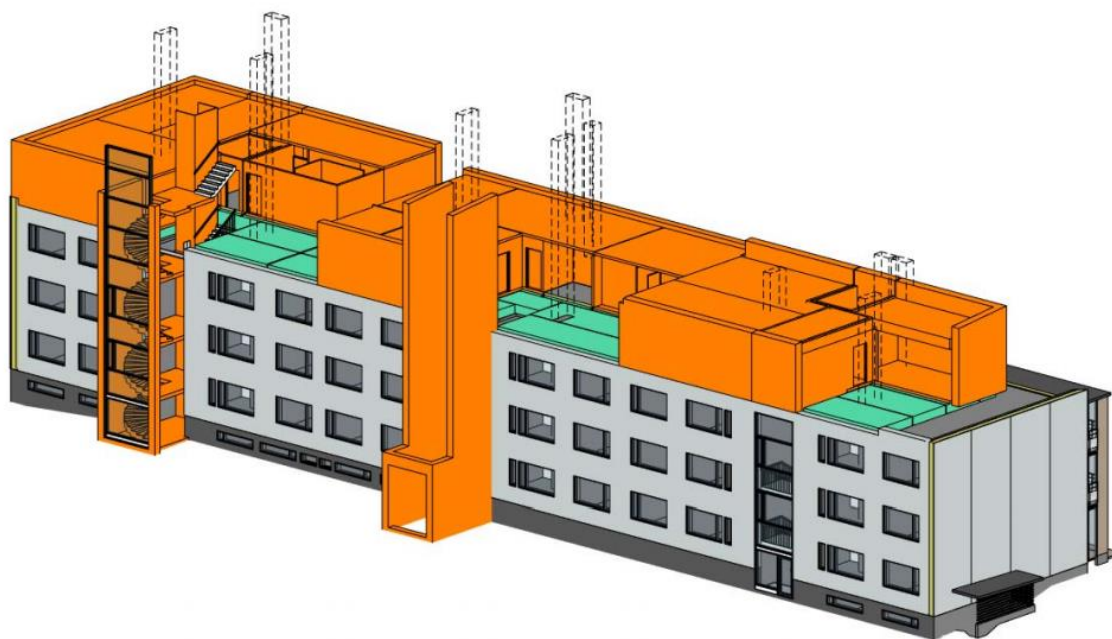


Joonis 3.8 Akadeemia tee 5a hoone projekti järgne ventilatsioonitorustiku paigaldus soojustuselementidesse

Akadeemia tee 5a renoveerimisel on plaanis teha ventilatsioonitorustikuga paneelid 2- ja 3-korruse kõrgused. Nii tekib ainult üks paneelide ühenduse koht ja torude teineteise sisse panek pole nii suur probleem.

Eelpool kirjeldatud moodulelemendid võimaldavad koos hoone fassaadide renoveerimisega ehitada ka hoone laiendusi – hoone laiendamist

horisontaalsuunas või lisakorruste juurde ehitamist. Analoogselt välisseina moodulelementidele on ka laienduste tegemisel eesmärgiks teha maksimaalselt palju toiminguid tehasetingimustes ja minimeerida seega ehitusprotsessi pikkust. See vähendab laiendatava hoone elanikel häiritust ja võimaldab neil ehitustegevuse ajal hoonet sihtotstarbeliselt kasutada. Võimalikku näidet illustreerib Joonis 3.9, mis kujutab Soomes Siltamäkis asuva 3-korruselise elamu võimalikku laiendust moodulelementidega (Ott et al. 2014, Heikkinen et al. 2009).



Joonis 3.9 Soomes Siltamäkis asuva 3-korruselise hoone laiendus moodulelementidega (kujutatud oranžiga) (Ott et al. 2014)

3.4 Moodulelementidega lisasoojustamise niiskustehniline turvalisus

Korterelamute välisseinte soojusläbivust on majanduslikult optimaalne vähendada kuni $U = 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. See eeldab aga ligikaudu 300 mm paksust lisasoojustust hoone välistarinditele (Kuusk, Kalamees, 2015). Mitmed autorid on jõudnud varasemates uuringutes järeldusele, et hoone välistarindite soojusläbivuse vähendamine suurendab tarindisisese hallituse riski kõrge soojustakistusega tarindites (Vinha et al. 2013), (Fedorik et al. 2015), (Pihelo, Kalamees 2016). Pikem ehitusaegse niiskuse väljakuivamise periood halvendab oluliselt välistarindite niiskustehnilist toimivust. Seetõttu on oluline pöörata tähelepanu tarindite niiskustehnilisele toimivusele eelkõige kõrge soojustakistusega tarindites.

Varasemalt on uuritud erinevate omadustega OSB plaatide kasutamist lisasoojustamise moodulelementide niiskus- ja aurutõkkena (Homb et al, 2014). Kriitilisemates asukohtades oli hallituse kasvuks soodsaid tingimusi ligikaudu 20% kogu arvutusajast, mis autorite järelduste kohaselt pole küll kriitiline, kuid siiski märkimist väärt.

Punktis 3.3 kirjeldatud konstruktsiooni eripärasid arvestades on oluline kontrollida elemendi niiskustehnilist toimivust eelkõige tuuletõkkeplaadi siseküljel ning aurutõkkele sisepinnal pehme paigaldusvilla kihis. Mõlemas asukohas võib olemasoleva välisseina esialgse kõrge algniiskuse taseme tõttu esineda veeauru kondenseerumist või areneda soodne keskkond hallituse kasvuks

4 Niiskustehnilised arvutused

4.1 Niiskuse liikumine piirdetarindites

Hoone tarindite niiskustehnilise projekteerimise eesmärgiks on vältida veest ja niiskusest tekkivaid probleeme tarindites. Nimetatud eesmärgi võib jagada järgmisteks alameesmärkideks (Kalamees 2012/13):

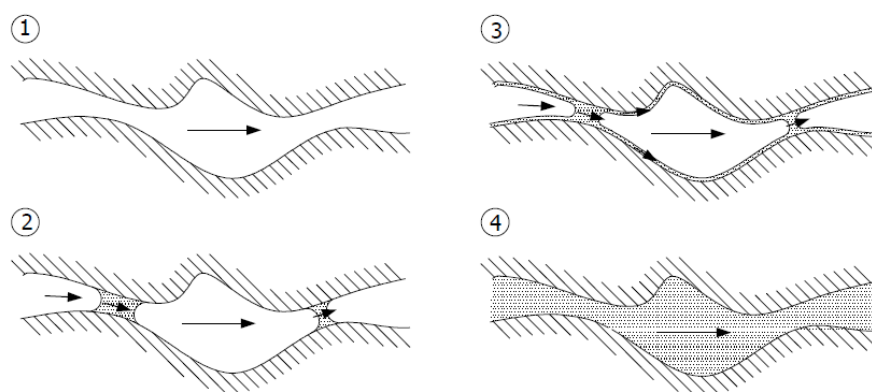
- vältida liigse niiskuse voogu tarindisse;
- minimeerida kaldvihmast tingitud probleeme;
- parandada piirete kuivamisvõimalusi;
- vältida materjalide lagunemist liigniiskuse mõjul;
- vältida piiretes ja piiretel mikrobioloogilist kasvu (hallitus ja bakterid) või veeauru kondenseerumist;
- parandada ruumide niiskustingimusi.

Hoonepiirete niiskustehnilist toimivust hinnatakse lihtsustatud kujul tingimusega $RH < RH_{crit}$, kus RH_{crit} on kriitiline suhteline niiskus, mis põhjustab erinevaid niiskuskahjustusi tarindis. Sellisteks kahjustusteks on näiteks hallituse teke tarindis, veeauru kondenseerumine, materjalide lagunemine liigniiskuse mõjul ja muud taolised kahjustused. Niiskustehnilise projekteerimise ülesandeks ongi hinnata tarindis tekkida võivaid niiskustehnilisi probleeme ning määrata neile vastavad kriitilised ääritingimused, mil nimetatud probleemide teke on veel välistatud.

Vesi võib materjalides esineda kõigis kolmes olekus – jääna, veeauruna või vedelal kujul. Veeaur tekib kas materjalis oleva vee aurustumisel või tungib sinna ümbritsevast keskkonnast. Vedelas olekus vesi võib materjalides esineda keemiliselt seotud veena, füüsikaliselt seotud veena või vaba veena. Materjalides olev vaba vesi asub eranditult ehitusmaterjalide poorides. Materjalide pooriehitus on aga keeruline, kuna vähesed materjalid on homogeenised. Seega mõjutab pooriehitus materjalide niiskustehnilisi omadusi – niiskusmahtuvust ja niiskustlõbivust. Materjali niiskussisaldust võib iseloomustada kolme erineva suuruse alusel – materjali kaaluline niiskussisaldus u (kg/kg), materjali niiskussisalduse mass mahu järgi w (kg/m³) või materjali mahuline niiskussisaldus ψ (m³/m³) ning see sõltub materjali ümbritseva õhu suhtelisest niiskusest,

temperatuurist (kõrgel temperatuuril on materjali niiskussisaldus väiksem) ja materjali omadustest.

Poorsetes materjalides liigub niiskus gaasilises ja vedelas olekus. Liikumine võib materjalides toimuda erinevatel viisidel – veesurve mõjul, raskusjõu mõjul, (pooride) pinna märgudes, konvektsiooni, pinddifusiooni või difusiooni teel. Lisaks võib liikumine toimuda ka termodifusiooni, osmoosi või efusiooni teel, kuid need liikumisviisid esinevad harvemini. Üldjuhul on poorsete ehitusmaterjalide kapillaarid sedavõrd väikese diameetriga, et hüdrostaatiline surve on pigem väikse osatähtsusega ning niiskuse levik toimub peamiselt konvektsiooni, difusiooni ja kapillaarimendumise teel.



Joonis 4.1 Niiskuse liikumise viisid poorses keskkonnas (Peuhkuri, 2003)

Joonis 4.1-l iseloomustab olukord 1 veeauru difusiooni (materjali niiskussisaldus on madal), olukord 2 veeauru difusiooni koos väikse hulga vedeliku liikumisega (materjali niiskussisaldus on kõrgem), olukord 3 üheaegset veeauru difusiooni, vedeliku pinddifusiooni ja vedeliku liikumist (materjali niiskussisaldus on kõrge) ja olukorras 4 on materjali poorid täitunud veega, mis liigub kapillaarses alas erinevate jõudude mõjul (Pihelo, 2015).

Pinna märgumine ehk vedeliku liikumine mööda pinda sõltub adhesiooni- ja kohesioonijõu vastastikusest suhtest. Kohesioonijõu mõjul on kõik vedeliku molekulid (välja arvatud samas vedeliku pinnakihi olevad molekulid) omavahel kõigist suundadest vastasmõjus. Pindmised molekulid on pindpinevusjõu mõjul tõmmatud vedeliku sisse, mistõttu püüab vedelik oma pinna suurust vähendada. Materjali pinna ja vee molekulide vahel mõjub adhesiooni jõud. Märgumine toimub seega vedeliku ja tahke keha molekulide vastastikmõjul, mille alusel jaotatakse materjalid hüdrofoobseks (mittemärguva pinnaga materjalid) ja hüdrofiilseteks

(märguva pinnaga materjalid). Seetõttu põhjustavad peene kapillaari sees hüdrofiilse materjali puhul kohesioonijõududest suuremad adhesioonijõud vedeliku edasiliikumist, kusjuures vastavat liikumist nimetatakse kapillaarsuseks ja see võib toimuda nii vertikaal- kui ka horisontaalsuunas.

Konvektsiooni korral liigub tarindisene niiskus õhuvoolu mõjul läbi poorse materjali või tarindis olevate pragude ja aukude kaudu. Poorses materjalis võib konvektsioon olla tingitud õhu tiheduste erinevustest tarindi erinevates asukohtades, õhusurvest, tuulest või ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevusest. Konvektsiooni teel liikuv absoluutne niiskusvoog sõltub õhuvoost ja voolava õhu veeaurusisaldusest. Absoluutset niiskusvoogu iseloomustab valem 1:

$$g_{conv,abs} = \dot{v}_a \cdot \nu \quad (1)$$

kus:

- $g_{conv,abs}$ on konvektsiooni abil liikuv absoluutne niiskusvoog, [kg/(s·m²)];
- $\dot{v}_a$ on õhuvoog, [m³/(m²·s)];
- ν on voolava õhu veeaurusisaldus, [kg/m³].

Konvektsiooni abil liikuv niiskusvoog:

$$g_{conv} = \dot{v}_a \cdot (\nu_1 - \nu_2) \quad (2)$$

kus:

- g_{conv} on konvektsiooni abil liikuv niiskusvoog, [kg/(s·m²)];
- ν_1, ν_2 on õhu veeaurusisaldus kahel pool materjali, [kg/m³].

Õhu voolu läbi poorse materjali iseloomustab Darcy seadus (vt valem 3).

$$\dot{v}_a = -\frac{k_a \cdot \Delta P}{\eta_a \cdot d} = -\kappa_a \frac{P_2 - P_1}{d} = \kappa_a \frac{P_1 - P_2}{d} \quad (3)$$

kus:

- $\dot{v}_a$ on õhuvoog, [m³/(m²·s)];
- k_a on materjali õhu läbilaskvus, [m²];
- κ_a on materjali õhuerijuhtivus, [m³/(m·s·Pa)];

- P on õhu rõhk, [Pa];
- d materjali paksus, [m];
- η_a õhu dünaamiline viskoossus, [N·s/m²].

Kui siseruumides on näiteks alarõhk, siis imendub külm ja kuiv välisõhk konstruktsiooni sisse pragude ja vuukide kaudu. Tarindi sees õhk soojeneb, tema suhteline õhuniiskuse langeb ja see võib konstruktsioone kuivatada. Õhu soojenemise ja niiskuse aurustumise tõttu tarind jahtub. Vastupidisel juhul, kui siseruumides on ülerõhk, imendub soe ja niiske siseõhk konstruktsiooni sisse pragude ja vuukide kaudu. Tarindi sees õhk jahtub, tema suhteline õhuniiskuse tõuseb ja see võib konstruktsioone niisutada. Kui siseõhu niiskussisaldus on kõrgem, kui välisõhu või konstruktsiooni sisese õhu küllastusniiskussisaldus, kondenseerub veeaur piirdekonstruktsiooni.

Difusioon on füüsikaline nähtus, mille mõjul erinevad gaasid või gaasi erinevad kontsentratsioonid moodustavad homogeense gaasisegu. Difusiooni teel liigub gaas kõrgemast kontsentratsioonist madalamale ehk teisisõnu suurema osarõhu poolt madalama osarõhu poole. Veeauru liikumist materjalide poorides saab kirjeldada Fick'i esimese seadusega, mis kirjeldab aine liikumist – gaasi difusioonivoog kehas on võrdeline gaasi kontsentratsioonide erinevusega kahel pool keha. Fick'i seadust iseloomustavad valemid 4 ja 5 (Fick 1855).

$$\vec{g} = -\delta_v \cdot \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4)$$

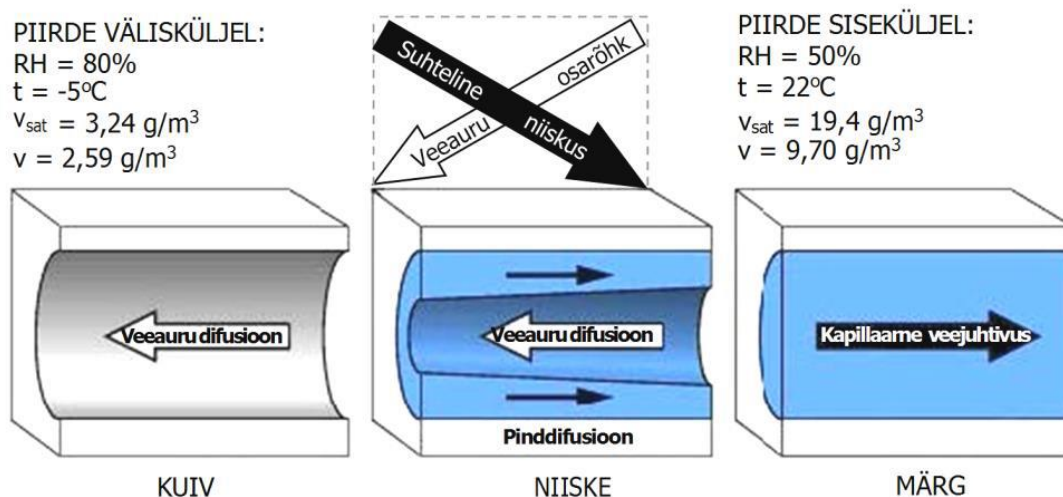
$$\vec{g} = -\delta_p \cdot \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z} \right) \quad (5)$$

kus:

- g on veeauru difusioonivoog (ka difusioonivoolu tihedus), [kg/(m²·s)];
- δ_v on materjali veeaurujuhtivus veeaurusisalduse erinevuse järgi, [m²/s];
- ∇v on õhu veeaurusisalduse tõus, [kg/(m³·m)].

Kirjeldatud niiskuse transpordimehhanismid võivad rakenduda samaaegselt ja mõlemas suunas. Külmal perioodil (näiteks Eesti kliimas talvetingimustel) on soojemal siseruumide poolel kõrgem veeauru osarõhk ja madalam suhteline niiskuse. Kui materjal on kuiv, toimub veeauru liikumine sisekeskkonnast

väliskeskonda difusiooni teel. Materjali niiskussisalduse tõustes moodustub pooride seintele veekile, mis on paksem külmemal poolel, kuna seal on kõrgem suhteline niiskus ja seega ka kõrgem poorivee rõhk. See tingib vee kapillaarse liikumise poorides külmemalt soojema keskkonna suunas. Kirjeldatud olukorda iseloomustab Joonis 4.2.



Joonis 4.2 Niiskuse liikumine samaaegse difusiooni ja pinddifusiooni toimel (www.wufi.de)

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. Kui see küllastustase ületatakse, hakkab veeaur kondenseeruma.

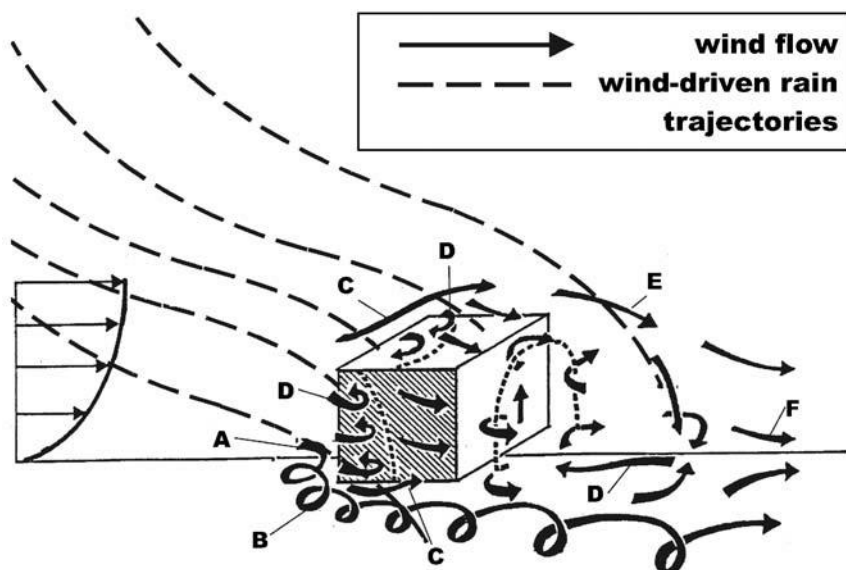
4.2 Kaldvihma koormus soojustatavale fassaadile

Kaldvihm on hoone välistarindile tuulega kanduv vihm. Hoone välistarinditele mõjuv kaldvihm on kõige suurema osatähtsusega tarindi niiskustehnilise allikas, mis mõjutab fassaadi niiskustehnilist kestvust ja vastupidavust. Kaldvihmast tingitud kahjustuste hulka kuuluvad näiteks fassaadide märgumine, külmakahjustused, sooladest tingitud härmatise tekkimine ning pragude tekkimine ja areng. Kaldvihm sõltub paljudest parameetritest – hoone geometriast, keskkonna topoloogiast, hoone fassaadi asukohast, tuulekiirusest ja -suunast, tuulekeeriste intensiivsusest, sademete intensiivsusest, vihmapiisa suuruselt ja

vihmasaju ajalisest kestusest. Kuna kaldvihma mõjutavaid tegureid on palju ning selle arvutamine on seetõttu keerukas, on kaldvihma arvutamiseks loodud erinevaid arvutusmudeleid (Blocken, Carmeliet, 2004).

Vihma ja tuule koosmõju tekitab kaldvihma iseloomustava vektorsuuruse. Tuule lähenedes hoonele tekib hoone välisseina tasapinna ümber spetsiifiline muster, kus erinevate tasapindade lõikekohtades esinevad erinevad tuulekeerised (vt Joonis 4.3). Seetõttu muutub ka kaldvihma vihmapiiskade trajektoor hoone läheduses, mis tingib fassaadipinna ebaühtlase märgumise. Viimast kirjeldab kaldvihmategur (inglise keeles *catch ratio*), mis sõltub kuuest peamisest tegurist:

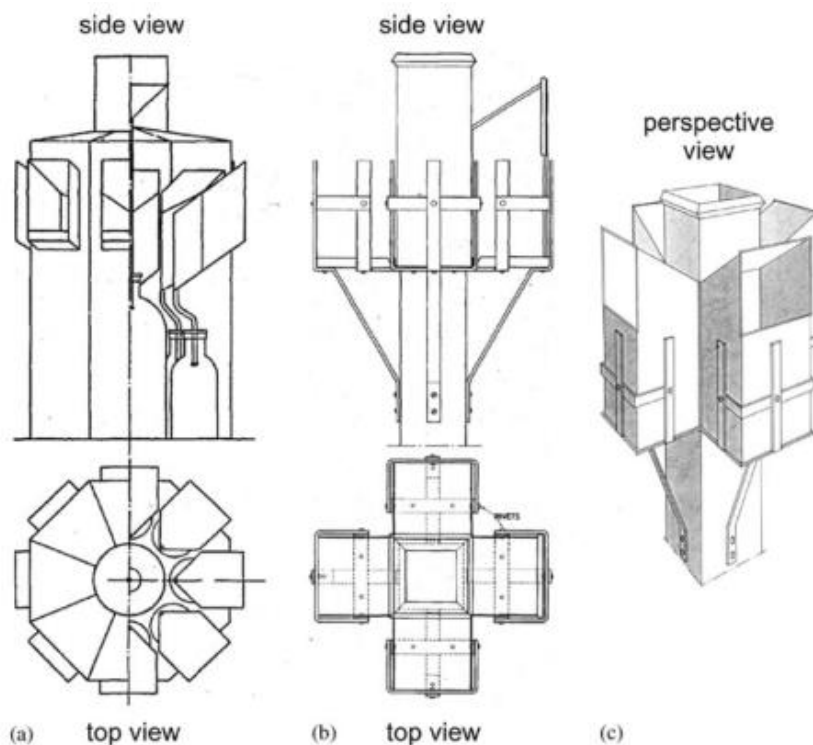
- hoone geomeetriast ja topoloogiast;
- vaadeldava punkti asukohast fassaadil;
- tuule kiirusest;
- tuule suunast;
- horisontaalse vihma intensiivsusest;
- horisontaalse vihma vihmapiiskade suuruste jaotusest.



Joonis 4.3 Tuuleiilide ja –keeriste tekkimine hoone ümbruses ning vastavad kaldvihma trajektoorid (Blocken, Carmeliet, 2004)

Kaldvihma koguse määramiseks on kolm põhimõtteliselt erinevat meetodit – eksperimentaalne, poolempiiriline või numbriline meetod. Neist esimene, eksperimentaalne meetod arenes välja 19. sajandil Euroopas. Meetodi põhimõte seisneb vastavate mõõteseadmetega andmete kogumises ning nende hilisemas analüüsis. Võimalikke mõõteseadmeid illustreerib Joonis 4.4. Analoogeteid

mõõteseadeid loodi ka seintele kinnitamiseks määramaks kaldvihma kogust konkreetses seina asukohas. 19. ja 20. sajandil kogutud mõõtetulemustest on järeldatud, et kaldvihma intensiivsus suureneb proportsionaalselt tuule kiirusega ja horisontaalse vihma intensiivsusega ning et hoone fassaadil märguvad vihma tõttu enim fassaadi ülemised nurgad, ülemine serv ja külgmised servad.



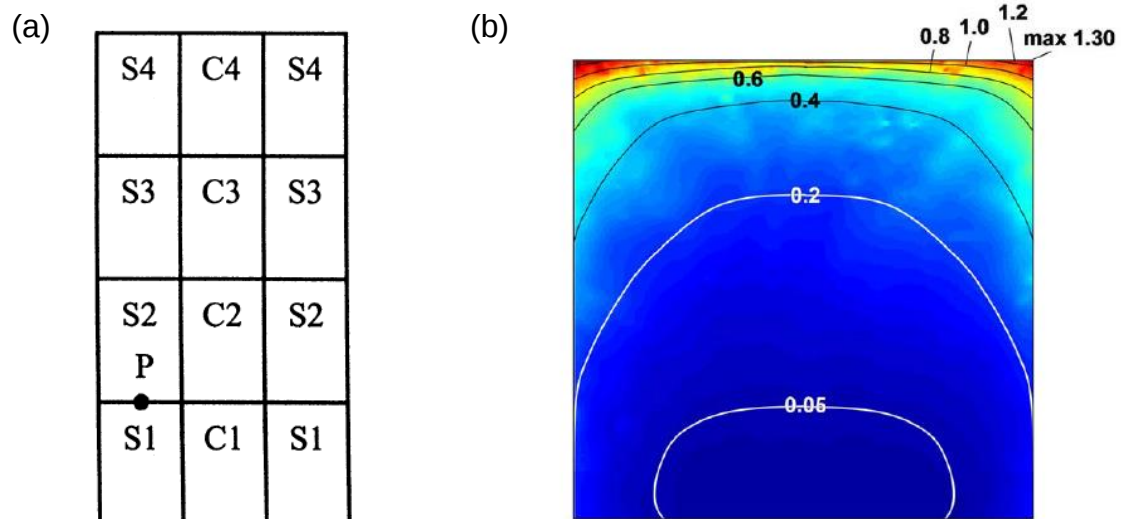
Joonis 4.4 Kaldvihma koguse määramise mõõteriista näide (1936) (Blocken, Carmeliet, 2004)

Kaldvihma mõõtetulemused kirjeldavad hoone fassaadi märgumist siiski väga üldiselt. Mõõtetulemused kehtivad üldjuhul vaid kitsa piirkonna kohta, kus mõõtetulemused läbi viidi ning lisaks on kaldvihma mõõtmise näol tegemist pikaajalise protsessiga. Alates 20. sajandist mõõdavad mitmed ilmajaamad vastava piirkonna kliimaandmeid: horisontaalsete sademete hulka, tuulekiirust ja –suunda, temperatuuri, õhu suhtelist niiskust, päikesekiirgust jm vastava piirkonna ilmastikku iseloomustavaid parameetreid. Seetõttu lõid teadlased poolempiirilised meetodid kaldvihma intensiivsuse hindamiseks ilmajaamades mõõdetud andmete põhjal. Selliseid poolempiirilisi mudeleid on mitmeid, mis kõik hindavad kaldvihma intensiivsust sarnastel põhimõtetel, kuid annavad mõnevõrra erinevaid lõpptulemusi. Poolempiirilisi mudeleid on omavahel võrrelnud Jael Kotkas oma TTÜ lõputöös 2015. aastal, kust selgub, et erinevused erinevate mudelite vahel on

märkimisväärsed ning soovitab kasutada kaldvihma intensiivsuse arvutamisel Henriques mudelit, standardi ISO 15927-3 mudelit, tarkvara WUFI mudelit või tarkvara Delphin mudelit. Täpsemateks andmetöötlusteks sobivad ISO standardi ja tarkvara Delphin arvutusmudelid, mida on kasutatud ka käesolevas lõputöös (Kotkas, 2015). Mainitud arvutusmudeleid on pikemalt kirjeldatud punktis 5.8.

Poolempiirilised kaldvihma mudelid võivad anda küll ligikaudseid arvutustulemusi hoone fassaadile mõjuva kaldvihma koormuse määramisel, kuid ei pruugi aga olla piisavad hindamaks näiteks täielikku kaldvihma koormuse jaotust hoone fassaadil või erinevate hoone detailide mõju fassaadi märgumisele. Sellistel juhtudel tuleb kaldvihma koormusi arvutada numbriliste meetodite abil. Levinuimaks lahenduseks on siin vedelikuvoogude dünaamiline modelleerimismetoodika (inglise keeles *Computational Fluid Dynamics, CFD*), mis kaldvihma arvutuste juures kasutab vihmapiisa trajektoorina hoone ümber liikuva õhuvoolu mustrit. CFD arvutustulemusi on võrreldud ka vastavate eksperimentaalsete mõõtetulemustega, mille põhjal on järeldatud, et kaldvihma arvutamine CFD meetoditega ei erine eksperimentaalselt saadud tulemustest. CFD meetodi suurimaks puuduseks võib aga pidada asjaolu, et need mudelid on väga aeganõudvad ja töömahukad (Blocken, Carmeliet, 2002).

Erinevate CFD mudelite abil on varasemalt uuritud ka kaldvihma koormuse jaotust hoone fassaadil. Choi on 1994. aastal määranud 2D CFD arvutuste põhjal kaldvihmategurite jaotuse hoone fassaadil (Choi, 1994). Vastavat jaotust iseloomustab Joonis 4.5 (vasakul). Blocken ja Carmeliet on fassaadi märgumise mustri CFD arvutuste põhjal veelgi täpsemalt välja arvutanud (vt Joonis 4.5 paremal). Jooniselt on näha, et kriitiliseimad kaldvihma koormused mõjuvad hoone fassaadi ülemistes nurkades, kus on kaldvihma koormus oluliselt kõrgem, kui näiteks hoone alaosas fassaadi keksel (Blocken, et al. 2009). Sama tendentsi illustreerivad ilmekalt ka reaalelulised fotod (vt Joonis 4.6).



Joonis 4.5 Kaldvihma koormused fassaadile (a) Choi (Choi, 1994) ja (b) Blocken & Carmeliet' järgi (Blocken et al. 2009)



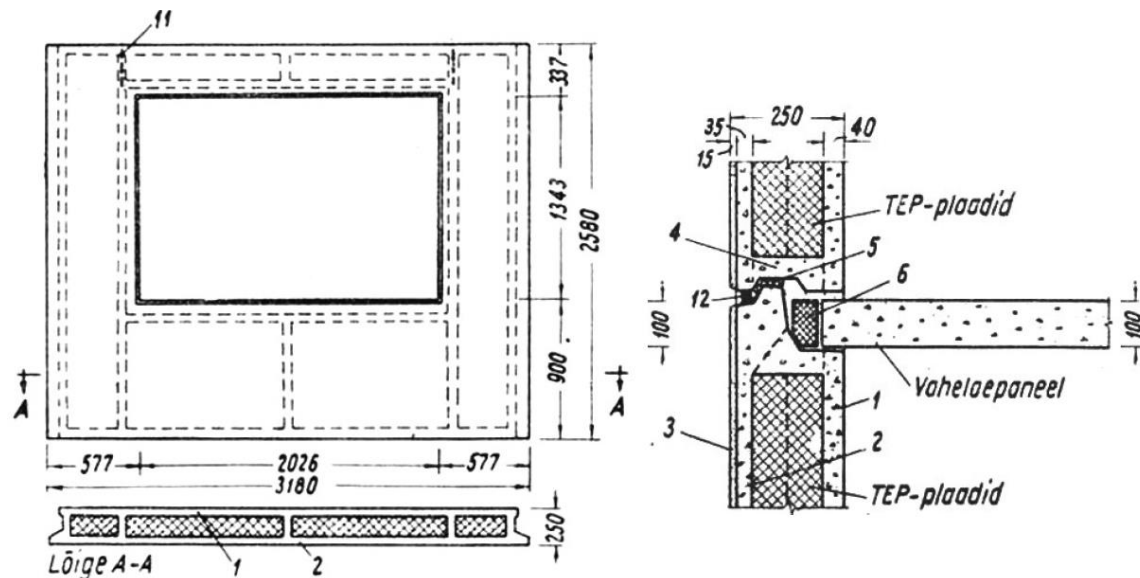
Joonis 4.6 Kaldvihma poolt põhjustatud fassaadi märgumine (Kalamees, erakogu)

5 Meetodid

5.1 Vaadeldavate välistarindite konstruktsioonilised lahendused

5.1.1 Raudbetoon välisseinapaneelide konstruktsiooniline lahendus

Suurpaneel lamute välisseinapaneelid on valdavalt kolmekihilised ning paksusega 230-300 mm. Paneeli sisemise kihi moodustab kandev raudbetoonplaat paksusega 50-130 mm. Välise kihi moodustab teine raudbetoonplaat paksusega 50-60 mm. Välise kihi pinnaks on üldjuhul kas kivipurukate või sile, värvitud betoon. Paneelide vahel on soojustuseks kas mineraalvillast, TEP-plaadist, fenoplastist või vahtpolüstüreenist 100-150 mm paksune soojustuse kiht. Joonis 5.1-l on näidatud välisseinapaneelide jooniseid paneel lamute projektidest (Saar, 2013).

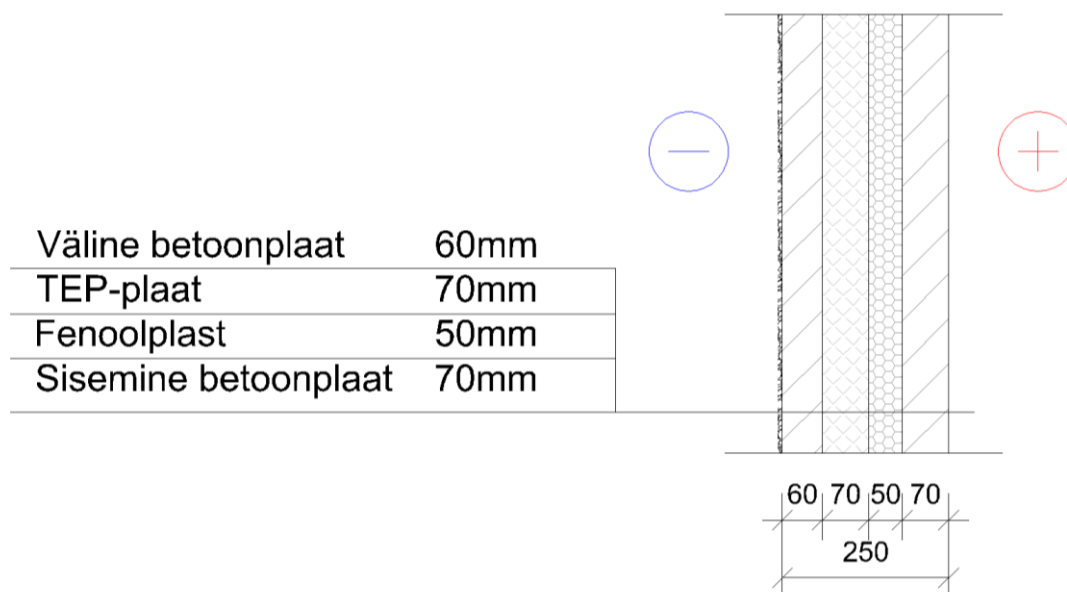


Joonis 5.1 Välisseinapaneel (vasakul) ja välisseinapaneelide liitesõlm vahelaepaneeli juures (paremal) (Saar, 2013)

Joonis 5.1-l olevad tähised:

1. Välisseinapaneeli sisemine raudbetoonikoorik;
2. Välimine raudbetoonikoorik;
3. Välimine terrasiit-viimistluskiht;
4. Keramsiitbetoon;
5. Vahtkummist (poroisoolist) või tõrvatud nõõrist tihend;
6. Pergamiiniga ümbritsetud mineraalvati riba
11. Tõsteaasad
12. Mastiks

Käesolevas töös tehtud arvutuste aluseks on võetud Akadeemia tee 5a ühiselamu välisseinapaneeli konstruktiivne lahendus – 70 mm paksuse sisemise raudbetoonplaadi ja 60 mm paksuse välimise raudbetoonplaadiga seinakonstruktsioon. Plaatide vaheliseks soojustuseks on välimise raudbetoonplaadi pool 70 mm paksune TEP-plaat ning sisemise betoonplaadi pool 50 mm paksune fenoplast. Kirjeldatud seinakonstruktsioon on toodud Joonis 5.2-l ning materjalide omadused näidatud Tabel 5.1-s.



Joonis 5.2 Akadeemia tee 5a ühiselamu välisseina tüüplõige

5.1.2 Soojustuselementide konstruktsiooniline lahendus

Renoveerimiseks kasutatavate lisasoojustuse moodulelementide konstruktsioon on näidatud Joonis 5.3-l. Olemasoleva raudbetoon välisseinapaneeli välispinna ebatasasuste hajutamiseks paigaldatakse soojustuselemendi ja betoonpaneeli vahele pehme mineraalvill paksusega 10-50 mm. Soojustuselement ise koosneb puitprussidest ristlõikega 195x45 mm ja 70x45 mm (kahes kihis), mille vahel on samuti kahes kihis mineraalvillast soojustus. Soojustuselemendi siseküljele on projekteeritud aurutõkkele ning välisküljele 30 mm mineraalvillast tuuletõkkeplaat. Soojustuselemendi fassaadipinna moodustab 8 mm fassaadiplaat, mis on tagant tuuldud.

Tabel 5.1 Uuritava tarindi materjalide omadused

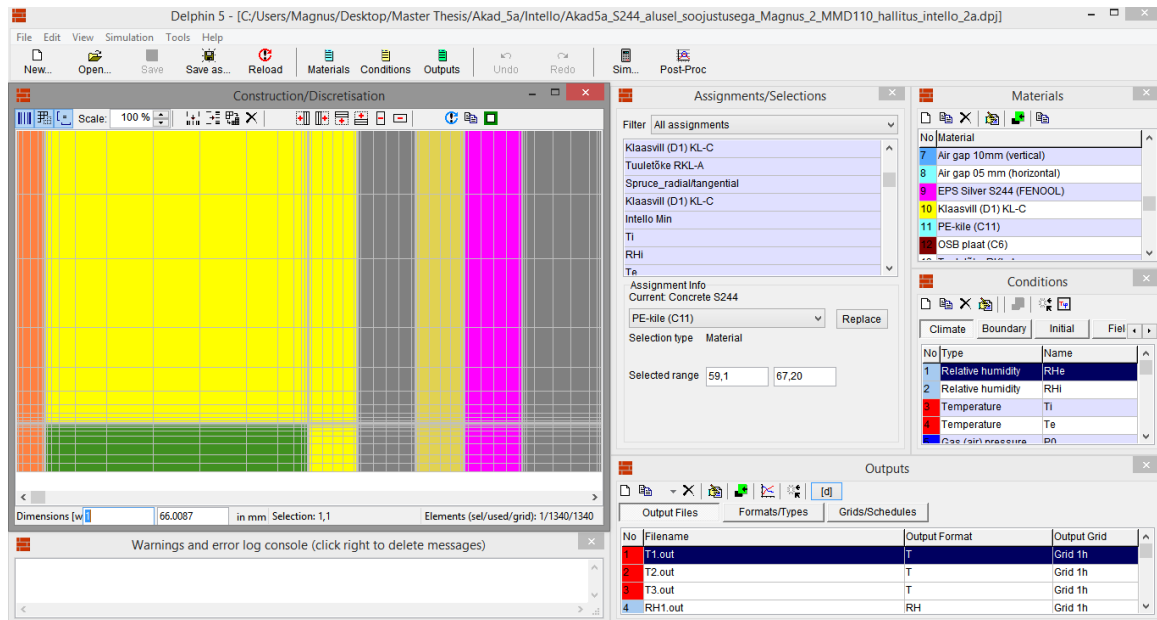
Materjal	Soojus- erijuhtivus λ , W/(m·K)	Niiskussisaldus mass w, kg/m ³					Difusiooni- takistustegur μ , -	Tihedus ρ , kg/m ³	Avatud poorsus m ³ /m ³	Kapillaarsus- tegur A_w , kg/(m ² ·s ^{0,5})
RH		33%	55%	75%	83%	97%	83%			
Betoon	1,500	38,0	53,0	78,0	86,0	134	41,0	2320	0,14	0,0200
TEP-plaat	0,140	6,0	11,0	15,0	21,0	32,0	3,80	500	0,93	0,0089
Fenoplast	0,064	0,25	0,32	0,36	0,54	0,98	2,85	30	0,90	0,0010
Puit (mänd)	0,130	32,0	45,0	80,0	108	185	40,0	450	0,62	0,0155
Mineraal villast tuuletõke	0,031	0,21	0,28	0,29	0,96	3,30	1,50	104	0,90	
Mineraalvillast soojustus	0,037	0,14	0,18	0,36	0,80	2,40	1,20	22	0,98	
SVR* „Intello“ (0,25m<S_d<25m)	0,230						45404	700	0,39	0,0001
SVR* „Isover Duplex Vario“ (0,2m<S_d<5m)	0,230						25585	462	0,59	0,0001
Aurutõkke kile (PE-kile)	0,400						89000	980	0,001	
OSB	0,130	30,0	35,0	40,0	45,0	113	165	595	0,90	0,002
* Smart vapor retarder - muutuva veeaurutakistusega aurutõkketõke										

5.3 Soojus- ja niiskusrežiimi arvutustarkvara

Käesolevas lõputöös on tehtud uuritavate tarindite soojus- ja niiskustehnilised arvutused tarkvara Delphin 5.8 abil. Delphin tarkvara on välja töötatud Saksamaal Dresdeni Tehnikaülikooli Ehitusklimatoloogia instituudis ülikooli teadlaste Andreas Nicolai, John Grunewaldi, Heiko Fechneri ja Ulrich Ruisingeri poolt. Delphin 5.8 on numbrilisi arvutusmeetodeid kasutav dünaamiline simulatsiooniprogramm, millega on võimalik määrata soojuse, niiskuse ja aine liikumist poorses materjalides. Delphin tarkvara on võimalik kasutada paljude erinevate eesmärkide jaoks (Grunewald, Nicolai, 2015):

- Külmasildade arvutamine, sealhulgas hügrotermiliste probleemide hindamine;

- Sisemiste soojustuste kavandamine ja hindamine;
- Ventileeritud fassaadide ja katuste hindamine;
- Aastase kütteenergia vajaduse arvutamine;
- Väljakuivamisprobleemide lahendamine;
- Hallitusriskide arvutamine



Joonis 5.4 Kuvatõmmis programmist Delphin 5.8

Tarkvaraga on võimalik arvutada konstruktsioone nii ühe- kui ka kahemõõtmelistena. Arvutuste ja simulatsiooni läbiviimiseks tuleb kasutajal määrata järgmised algandmed:

- konstruktsiooni geomeetria
- materjalid
- algtingimused
- ääretitingimused
- soovitatavad väljundid ja nende sisu
- arvutamise ja simulatsiooni sätted

5.3.1 Modelleerimine ja tasakaaluvõrrandid

Tarkvara Delphin 5.8 aluseks on *CHAMPS* füüsikaline mudel. *CHAMPS* on lühend sõnadest „*coupled heat, air, moisture, pollutant simulation*“ või „*heat, air, moisture, pollutants and salt transport*“, mis tähendab kombineeritud soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete simulatsiooni. Nimetatud mudel koosneb mitmetest osatuletistega

võrranditest, mille lahendamiseks kasutatakse lõplike elementide meetodit, täpsemalt lõpliku ruumala kontrolli meetodit. Tarkvara jaotab sisestatud konstruktsioonilise geomeetria ühemõõtmelistes arvutustes kas võrdse või muutuva paksusega materjalikihtideks ning kahemõõtmelistes arvutustes kas võrdse või muutuva pindalaga niinimetatud tükikesteks. Kasutajal on võimalik määrata ka elementide arv, mille alusel jagab tarkvara ise konstruktsiooni vastavateks osadeks. Integreerimisel üle ruumala on võrrandid lahutatud harilikeks diferentsiaalvõrranditeks, mille kõik tundmatud sõltuvad ajast. Nimetatud diferentsiaalvõrrandid lahendatakse arvmeetodeid kasutava lahendaja (inglise keeles *solver*) abil (Grunewald, Nicolai, 2015).

Tarkvara Delphin 5 on mitmel korral ka edukalt valideeritud nii programmi loojate poolt kui ka teiste teadlaste ja institutsioonide poolt. Erinevate teadusprojektide raames on testitud soojuse- ja niiskuse transpordimudelit ja sellega seotud materjale (Kalamees, Vinha, 2003), (Scheffler, 2008). Viimane tarkvara autorite poolne valideerimine toimus 2013. aastal, kui tarkvara testimine läbis edukalt HAMSTAD arvutuskriteeriumid 1 kuni 5 ja vastavuse standarditele DIN EN 15026 ja DIN EN ISO 10211. HAMSTAD on HAM-mudelite standard, kus arvutuskriteeriumid 1 kuni 5 kirjeldavad soojus-, niiskus- ja õhuvoogusid ehitusmaterjalides. Standard DIN EN ISO 10211 kirjeldab hoonete külmasildade arvutamist ning standard DIN EN 15026 kirjeldab ehitiste osade soojus- ja niiskustehnilist toimivust. Tabel 5.2 annab ülevaate kirjeldatud valideerimistest (Sontag et al. 2013).

Tabel 5.2 Ülevaade valideerimise testimise variantidest

	Energia- bilanss	Niiskuslik tasakaal	Õhu massi tasakaal	Kaldvihm	Mõõtmel- lus
HAMSTAD arvutuskriteerium 1	X	X			1D
HAMSTAD arvutuskriteerium 2	X	X			1D
HAMSTAD arvutuskriteerium 3	X	X	X		1D
HAMSTAD arvutuskriteerium 4	X	X		X	1D
HAMSTAD arvutuskriteerium 5	X	X			1D
DIN EN 15026	X	X			1D
DIN EN ISO 10211	X				2D

Järgnevalt on toodud tasakaaluvõrrandid, mida tarkvara lahendamisel kasutab.

Niiskuslik tasakaal:

Tasakaaluvõrrandi eelduseks ja lihtsustuseks arvestatakse, et (Grunewald, Nicolai, 2015):

- jääd ei teki
- vee difusioon ja faasidevaheline rõhkude erinevus on tühiselt väikesed (seega neid ei arvestata)
- kehtib Kelvini seadus poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta
- tahkete materjalide deformatsioonid on tühiselt väikesed (seega seda ei arvestata)
- kõikide faaside vahel esineb rõhkude tasakaal.

Valem 6 esitab niiskuse massi tasakaaluvõrrandi.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v}} = \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_w}] + \sigma_{REV}^{m_{w+v}} \quad (6)$$

kus:

- $\rho_{REV}^{m_{w+v}}$ on koguniiskuse (vedeliku ja veeauru) tihedus antud ruumalaühikus, [kg/m³];
- $j_{conv}^{m_w}$ on vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog, [kg/(m²·s)];
- $j_{conv}^{m_v}$ on veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog, [kg/(m²·s)];
- $j_{diff}^{m_w}$ on veeauru difuusse liikumise voog, [kg/(m²·s)];
- $\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$ on niiskuslisa/- kadu antud ruumalaühikus, [kg/(m³·s)].

Vee liikumine kapillaarsel teel:

$$j_{conv}^{m_w} = c_t^{m_w} \cdot j_{conv}^{m_t}$$

$c_t^{m_w} = 1$ on tegur, mis määrab vee kontsentratsiooni vedelikus, [-]

$$j_{conv}^{m_t} = -K_l \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g \right] \quad (7)$$

kus:

- K_l on vedela vee juhtivus, [kg/(m·s·Pa)];
- p_l on vedela vee rõhk, [Pa];
- ρ_l on vedela vee tihedus, [kg/m³];
- g on gravitatsioonikonstant, [m/s²].

Veeauru liikumine konvektiivsel teel:

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} \cdot j_{conv}^{m_g} \quad (8)$$

kus:

- $c_g^{m_v}$ on veeauru massi kontsentratsioon gaasis, [kg/kg].

$$c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v} \quad (9)$$

kus:

- p_v on veeauru osarõhk, [Pa];
- p_a on õhu rõhk, [Pa];
- R_a on universaalne gaasikonstant, [J/(kg·K)].

- R_v on veeauru gaasikontant, [J/(kg·K)].
- $j_{conv}^{m_g}$ on gaasi konvektiivne voog, [kg/(m²·s)].

Difusiooni teel liikuv veeaur:

$$j_{diff}^{m_w} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (10)$$

kus:

- $D_{v,air}(T)$ on seisva õhu veeaurujuhtivus, [m²/s];
- μ on difusioonitakistustegur, [-];
- $f(\theta_g)$ on funktsioon gaasi mahust ruumalaühikus, [-];
- θ_g on gaasi maht ruumalaühikus, [m³/m³].

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \quad (11)$$

kus:

- θ_{por} on materjali poorsus, [m³/m³];
- θ_l on vee maht ruumalaühikus, [m³/m³].

Õhu massi tasakaal:

Tasakaaluvõrrandi eelduseks arvestatakse, et (Grunewald, Nicolai, 2015):

- kuiv õhk koosneb O₂, N₂ ja teistest vähemtähtsatest osakestest, välja arvatud VOC-d (*volatile organic compounds* ehk lenduvad orgaanilised ühendid) ja H₂O (veeaur)
- õhk koosneb kuivast õhust, veeaurust (H₂O) ja VOC-dest
- soojuse, niiskuse ja saasteainete transport ei oma õhu liikumisele muud efekti peale üleslükkejõu
- arvestatakse vaid laminaarse gaasivooluga
- liikumisfaasis on kineetiline energia tühiselt väike, seega sellega ei arvestata
- kuiva õhu gaasikontant kehtib ka niiskele õhule

Valem 12 esitab õhu konvektiivse liikumise voo.

$$\dot{j}_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} \cdot \dot{j}_{conv}^{m_g} \quad (12)$$

kus:

- $c_g^{m_a}$ on õhu massi konsentratsioon gaasis, [kg/kg].

$$c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_v}{R_a} \quad (13)$$

kus:

- p_v on veeauru osarõhk, [Pa];
- p_a on õhu rõhk, [Pa];
- R_a on universaalne gaasikonstant, [J/(kg·K)].
- R_v on veeauru gaasikonstant, [J/(kg·K)].
- $\dot{j}_{conv}^{m_g}$ on gaasi konvektiivse liikumise voog, [kg/m²·s].

$$\dot{j}_{conv}^{m_g} = -K_g \left[\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g g \right] \quad (14)$$

kus:

- K_g on materjali gaasi läbilaskvus [s];
- p_g on gaasi rõhk, [Pa];
- ρ_g on gaasi tihedus, [kg/m³].

$$p_g = \frac{p_g}{R_a T} \quad (15)$$

kus:

- T on temperatuur, [K].

Energiabilanss:

Tasakaaluvõrrandi eelduseks arvestatakse, et (Grunewald, Nicolai, 2015):

- siseenergia ja entalpia vaheline erinevus on tühiselt väike, seega sellega ei arvestata
- kõikide faaside vahel esineb temperatuuride tasakaal

Valem 16 esitab energiabilansi võrrandi.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{diff}^Q + u_l \cdot j_{conv}^{m_l} + u_g \cdot j_{conv}^{m_g} + h_v \cdot j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} \cdot j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^U \quad (16)$$

kus:

- ρ_{REV}^U on siseenergia tihedus, [J/m³];
- j_{diff}^Q on soojusenergia voog, [W/m²];
- u_l on vee eri siseenergia, [J/kg];
- $j_{conv}^{m_l}$ on vee konvektiivse liikumise voog, [W/m²];
- u_g on gaasi eri siseenergia, [J/kg];
- $j_{conv}^{m_g}$ on gaasi konvektiivse liikumise voog, [W/m²];
- h_v on veeauru entalpia, [J/kg];
- $j_{diff}^{m_v}$ on veeauru difuusse liikumise voog, [W/m²];
- $h_{voc,g}$ on lenduvate orgaaniliste osakeste eri entalpia, [J/kg];
- $j_{diff}^{m_{voc,g}}$ on lenduvate orgaaniliste osakeste difuusse liikumise voog, [W/m²];
- σ_{REV}^U on energiakaod/ -lisad antud ruumalaühikus, [W/m³·s].

$$j_{diff}^Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (17)$$

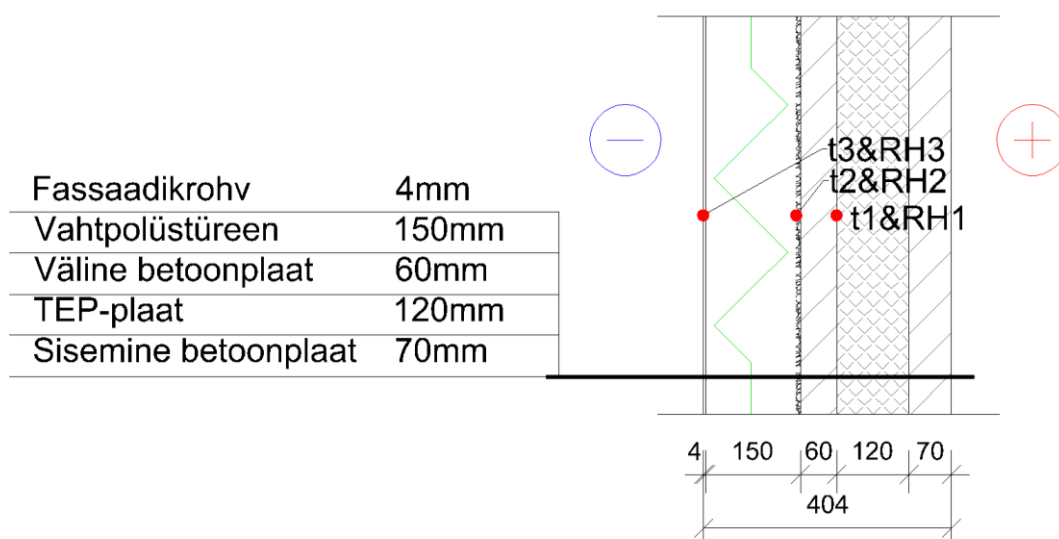
kus:

- λ on materjali soojuserijuhtivus, [W/(m·K)];
- T on temperatuur, [K].

5.4 Arvutusmodeli kalibreerimine

Käesolevas lõputöös on esimene Delphini arvutusmodel loodud eesmärgiga kalibreerida arvutustulemused vastavaks reaalselele mõõtetulemustele. Reaalsed mõõtetulemused saadi Tallinnas asuva Sõpruse puistee 244 elamult, mis renoveeriti 2011. aastal ja mille mõõtetulemusi hiljem põhjalikult analüüsiti. Välisseina lisasoojustamiseks kasutati 150 mm vahtpolüstüreeni või 150 mm mineraalvilla (Ilomets, Kalamees, 2013). Renoveerimistöode käigus paigaldati konstruktsiooni erinevatesse kihtidesse andurid, mille abil saadi soojustamise järgset olukorda iseloomustavad mõõtetulemused seina punktides 1, 2 ja 3 (vt

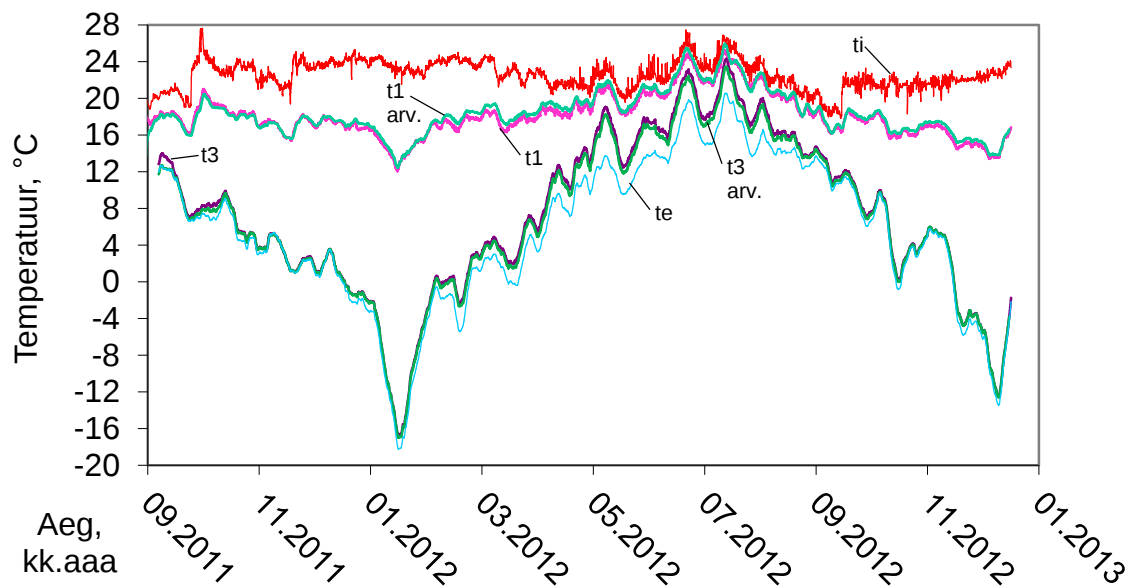
Joonis 5.5). Käesolevas töös on kalibreeritud 150 mm vahtpolüstüreeniga soojustatud välisseina lahendus. Valitud hoone välisseina konstruktiivne lahendus iseloomustab suurpaneelelamute ühte levinuimat välisseina tüüplahendust. Seetõttu on võetud kalibreeritud mudel aluseks ka kõikide järgnevate arvutusmodelite loomisel.



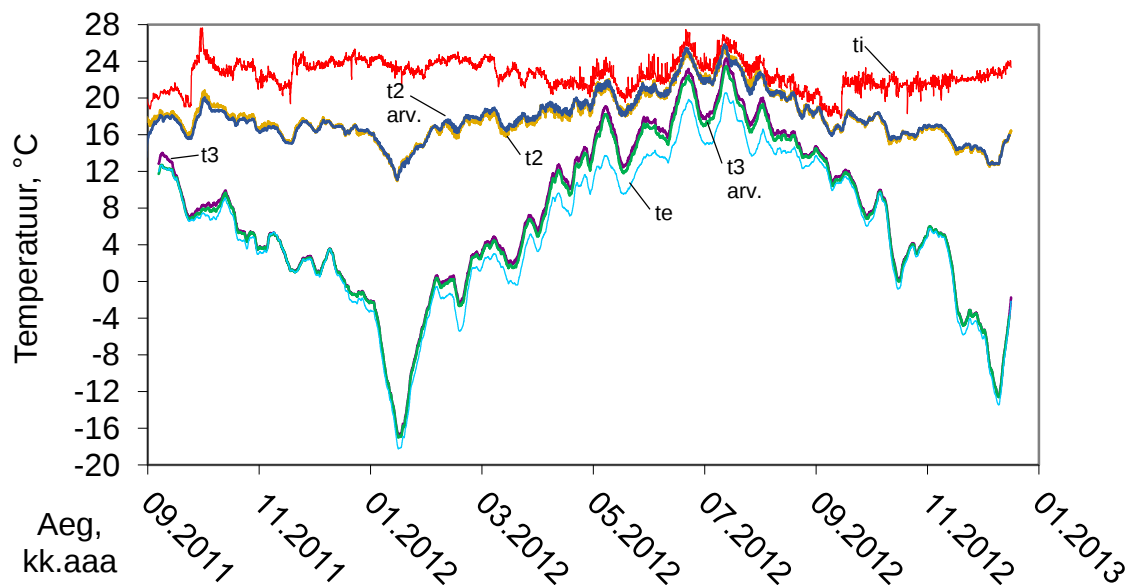
Joonis 5.5 Sõpruse puistee 244 elamu välisseina tüüplõige koos mõõtepunktide asukohtadega

Delphini arvutusmodeli geomeetria on loodud Sõpruse puistee 244 hoone välisseina põhjal ning nii sisekliima kui ka väliskliima (temperatuur ja suhteline niiskus) on mõõdetud hoone asukohas. Arvutusperioodi pikkuseks on valitud poolteist aastat ning ajaliseks arvutuste intervalliks 1 tund.

Mõõtmistulemuste ja Delphin tarkvara arvutustulemuste võrdlused on järgnevatel joonistel. Joonis 5.6 iseloomustab temperatuuride võrdlust eelpool näidatud punktides 1 ja 3, Joonis 5.7 temperatuuride võrdlust punktides 2 ja 3. Joonistel kujutatud t_e graafik iseloomustab välisõhu temperatuuri ning t_i siseõhu temperatuuri. Joonis 5.8 iseloomustab suhtelise niiskuse võrdlust punktides 1, 2 ja 3.

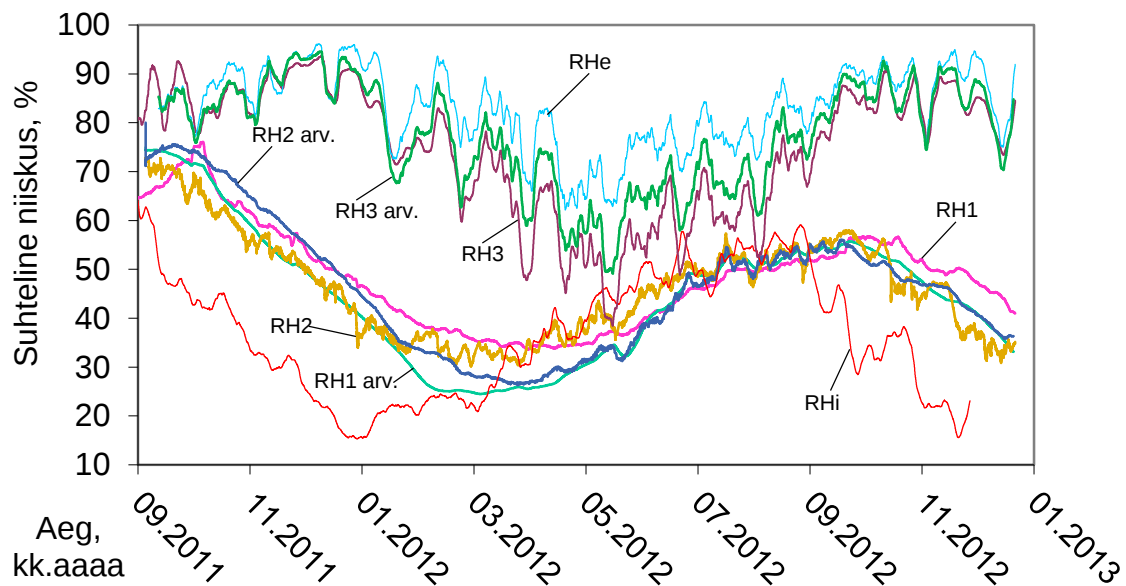


Joonis 5.6 Arvutustarkvaraga Delphin arvutatud temperatuuride võrdlus reaalsete mõõtmistulemustega TEP-plaadi välisküljel (punkt 1) ja krohvi ja lisasoojustuse vahel (punkt 3) (vt Joonis 5.5)



Joonis 5.7 Arvutustarkvaraga Delphin arvutatud temperatuuride võrdlus reaalsete mõõtmistulemustega lisasoojustuse siseküljel (punkt 2) ja krohvi ja lisasoojustuse vahel (punkt 3) (vt Joonis 5.5)

Delphini tarkvaraga arvutatud temperatuurid kajastavad võrdlemisi täpselt reaalseid mõõtmistulemusi. Suhtelise niiskuse puhul on erinevused suuremad, kuid nii arvutustulemused kui ka mõõtmistulemused järgivad samu trende.



Joonis 5.8 Arvutustarkvaraga Delphin arvutatud suhtelise niiskuse võrdlus reaalsete mõõtmistulemustega TEP-plaadi välisküljel (punkt 1), lisasoojustuse siseküljel (punkt 2) ja krohvi ja lisasoojustuse vahel (punkt 3) (vt Joonis 5.5)

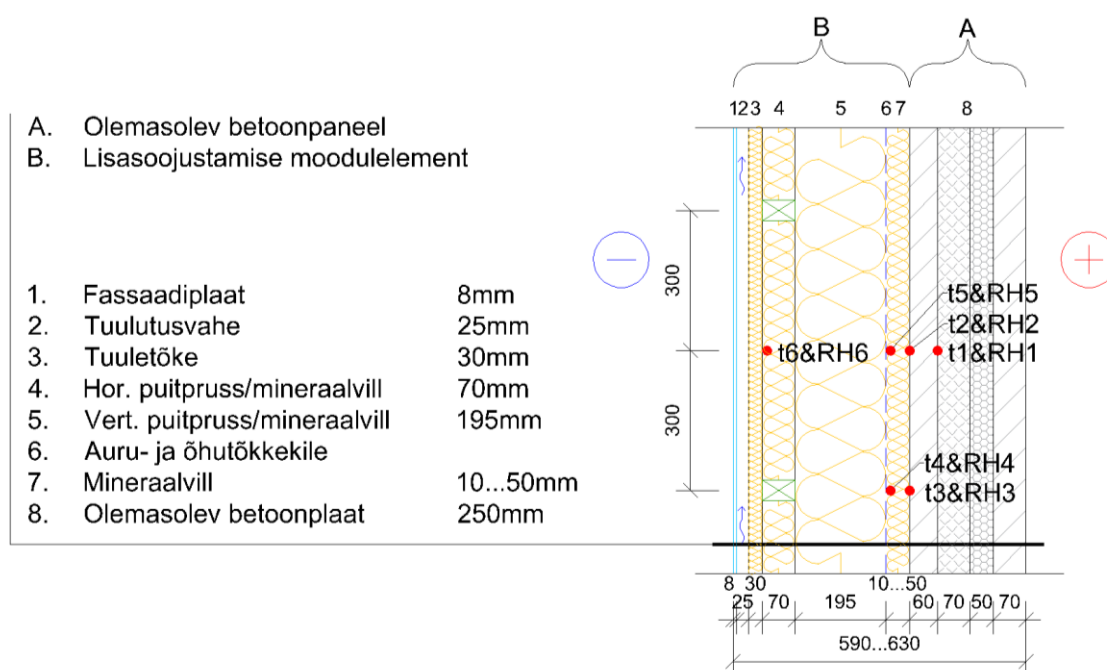
5.5 Mudeli ülesehitus

Väliskliima mõju arvutamisel fassaadile on kasutatud ühemõõtmelist 1D mudelit Delphini tarkvaras. Betoonpaneeli kihid – väline ja sisemine betoonplaat ning vahepealne soojustus – on jagatud muutuva paksusega kihtideks. Esimene ja viimane materjalikiht on minimaalse paksusega 1 mm ning keskmised materjalikihid on maksimaalse paksusega 3-5 mm.

Käesolevas töös uuritava soojustuspaneeliga välistarindi niiskustehnilised arvutused on tehtud kahemõõtmelise 2D mudeliga. Kahemõõtmelise mudeli puhul on kõik materjalid jagatud mõlemas suunas muutuva paksusega kihtideks. Järgitud on sama põhimõtet – esimene ja viimane materjalikiht on minimaalse paksusega 1 mm ning keskmised materjalikihid on maksimaalse paksusega 3-10 mm.

Mudeli väljundiks (inglise keeles *output*) väliskliima mõju arvutamisel on terve välise betoonkooriku keskmine niiskussisaldus, mis võtab arvesse nii vedelat, tahket kui aurustunud kujul vee sisalduse. Viimase kahe – tahket ja aurustunud kujul vee – osakaal on võrreldes vedelal kujul tarindis oleva vee osakaaluga väga väike, moodustades kogumahust alla ühe protsendi. Tarkvara arvutab niiskussisalduse intervalliga 1 tund etteantud ajaperioodi jooksul. Niiskussisalduse ühikuks on kg/m^3 .

Lisasoojustamise moodulelemendiga välistarindi niiskustehnilistel arvutustel on väljunditeks valitud temperatuur ning suhteline niiskus enim huvi pakkuvates punktides tarindi sees. Punkt 3 asub prusside taga pehme paigaldusvilla sisepinnal, punkt 4 prusside taga aurutõkke kile sisepinnal, punkt 5 prusside vahel aurutõkke kile sisepinnal ning punkt 6 prusside vahel tuuletõkke plaadi sisepinnal. Nimetatud punktid on näha Joonis 5.9-l. Analoogselt väliskliima mudeli arvutustele arvutab ka siin mudel kõik väljundid tunni ajase intervalliga etteantud ajaperioodi jooksul. Suhtelise niiskuse ühikuks on % ning temperatuuri ühikuks °C.



Joonis 5.9 Arvutatav välisseina konstruktsioon ning vaadeldavate arvutuspunktide asukohad

5.6 Väliskliima

Raudbetoonist välisseina välise betoonkooriku niiskussisalduse arvutamisel on väliskliima andmetena kasutatud 1970-2012 Tõravere meteoroloogiajaama mõõtmistulemusi. Tõravere meteoroloogiajaama andmete kasutamine on valitud seetõttu, et nimetatud ilmajaamast on teada ka kõik päikesekiirguse andmed.

Hajusa ja otsese päikesekiirguse ning sademete andmed on mõõdetud tunnise intervalliga kogu perioodi vältel. Välisõhu temperatuuri, suhtelise niiskuse, tuulesuuna ja -tugevuse andmed on mõõdetud perioodil 01.1970-08.2003 kolmetunnise intervalliga ning perioodil 09.2003-06.2012 ühetunnise intervalliga.

Kõik andmed, mis olid mõõdetud kolmetunnise intervalliga, on interpoleeritud tunnise intervalliga andmeteks.

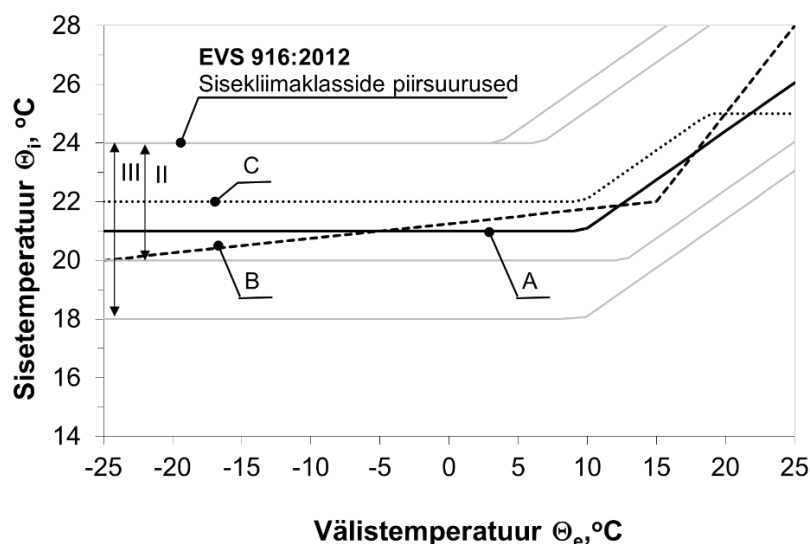
Soojustuspaneeliga välisseina niiskustehnilistes arvutustes on kasutatud väliskliima andmetena hallituse tekke ja veeauru kondenseerumise niiskustehnilisi testaastaid. Vastavalt standardile EVS-EN 15026:2007 tuleb mitmekihilistes piirdetarindites hinnata soojus- ja niiskustehnilisi printsiipe lähtuvalt standardis toodud arvutuspõhimõtetest. Selle järgi tuleb väliskliima andmetena kasutada MRY (inglise keeles *moisture reference year*) ehk niiskustehnilise baasaasta andmeid, kuna keskmised kliimaandmed niiskustehnilisteks andmeteks ei sobi – kasutama peab niiskustehniliselt kriitilisi kliimakoormusi. Kalamees ja Vinha on varasemalt määranud veeauru kondenseerumise ja hallituse tekke riski kontrollimiseks Eesti kliimale vastavad kaks niiskustehniliselt kriitilist baasaastat – Väike-Maarja 1989–1990 ja Väike-Maarja 1995-1996 (Kalamees, Vinha, 2004).

Juhul, kui soojustuspaneeli niiskustehniliste arvutuste arvutusperioodi pikkus on üle ühe aasta, on eelpool mainitud baasaasta kliimaandmeid kasutatud tsükliliselt. Vastavate baasaastate väliskliima andmetest on kasutatud välisõhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse andmeid. Sademete, tuule ning päikesekiirguse andmete kasutamisest on loobutud, kuna nende mõju on moodulelemendi niiskustehnilisele toimivusele uuritavat konstruktsioonilist lahendust silmas pidades kaduvväike. Tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamisel uuritakse punkte, mis asuvad soojustuskihi sees. Nimetatud punkte päikesekiirgus ja kaldvihm aga oluliselt ei mõjuta, kuna tagant tuulutatav fassaadiplaat kaitseb tarindit vastavate kliimamõjude eest.

Päikesekiirguse arvestamisel eristatakse lühikesi ja pikki kiirguslaineid, kusjuures käesolevas töös on kasutatud lühikesi kiirguslaineid. Lühikesed kiirguslained jagunevad omakorda kaheks, otseseks ning hajusaks päikesekiirguseks. Valdav osa arvutustest on tehtud vaid hajusa kiirgusega. Selline kliimaparameetrite valik iseloomustab varjulisi kohti fassaadil, mis on niiskustehnilisest seisukohast lähtudes tihtipeale kõige kriitilisemad. Päikesekiirgust arvestab tarkvara vastavalt sisestatud arvutuspinna kaldele maapinna suhtes, asetusele ilmakaarte suhtes ning geograafilisele laiuskraadile. Käesolevas töös on päikesekiirguse mõju analüüsitud olemasoleva raudbetoon välisseina välimise betoonkooriku niiskussisalduse arvutamisel.

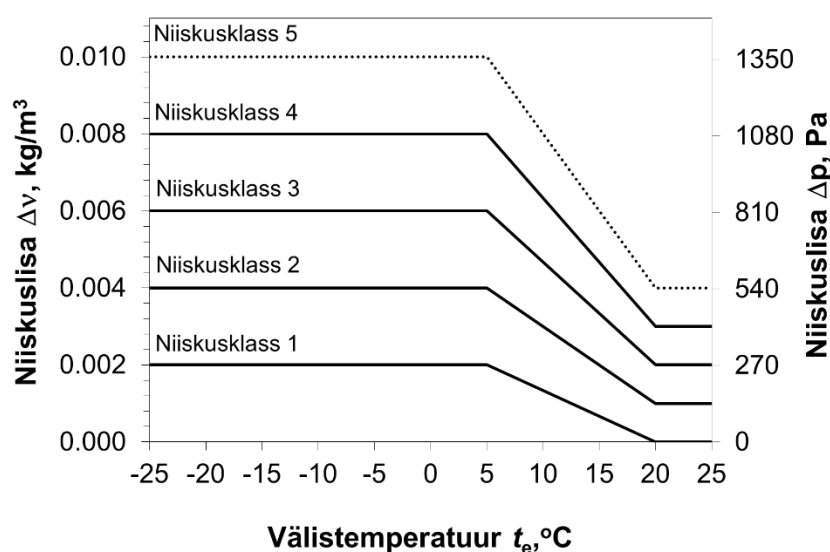
5.7 Sisekliima

Sisekliima koormuste määramisel on oluline arvestada nende parameetrite sõltuvust väliskliima parameetritest. Siseõhu niiskustase sõltub peamiselt niiskustootlusest siseruumides, mis on omakorda põhjustatud peamiselt hoonesisesest inimtegevusest. Seetõttu on sisekliima andmed tuletatud vastavatest mõõtmistulemustest Eesti elamutes, mille alusel on määratud niiskustehniliselt kriitilised sisekliima koormused (Arumägi et al. 2015), (Kalamees et al. 2011), (Kalamees, 2006). Arvutustes on kasutatud standardi EVS EN 15026:2007 järgset arvutuslikku siseõhu temperatuuri, mis on otseses sõltuvuses välisõhu temperatuurist vastavalt tüüpolukorrale B (vt Joonis 5.10) ja siseõhu niiskuskoormuste määramisel on kasutatud niiskuslisa sõltuvust välistemperatuurist vastavalt niiskusklassile 3 (vt Joonis 5.11). Tüüpolukord B iseloomustab lokaalse küttega elamuid ja niiskusklass 3 teadmata niiskuskoormusega elamuid asustustihedusega kuni 30 m² inimese kohta. Arvutuslikud niiskuslisa väärtused on saadud Eesti elamute mõõtetulemustest 90% protsentiili tasemel, mis tähendab, et niiskuskoormuse normatiivväärtustest kõrgemaid väärtusi ei tohi esineda rohkem, kui 10% juhtudest (EVS-EN 15026). Joonis 5.11-l on näha, et külmemal perioodil (eelkõige talvekuudel) on niiskuslisa kõrgem, kui soojemal perioodil. See tuleneb peamiselt kahest aspektist – külmal perioodil ventileeritakse küttekulude minimeerimiseks siseruume vähem ning summaarne siseruumides veedetud aeg on pikem.



- Tüüpolukord A: Välitemperatuuri abil juhitud elamu keskküttesüsteem vanemates (näiteks < 2000. a ehitatud) elamutes
- Tüüpolukord B: Lokaalne küte
- Tüüpolukord C: Välitemperatuuri abil juhitud elamu keskküttesüsteem uuemates elamutes (näiteks ≥ 2000. a ehitatud) + jahutus

Joonis 5.10 Arvutusliku sisetemperatuuri sõltuvus välitemperatuurist standardi EVS-EN 15026 rakendamisel elamute projekteerimisel Eestis. (EVS-EN 15026)



- Niiskuklass 5: Spordihallid, köögid, sööklad
- Niiskuklass 4: Eriotstarbelised hooned, nt. pesumajad, pruulikojad, basseinid
- Niiskuklass 3: Teadmata niiskustootlusega elamud. Eluruumid asustustihedusega kuni 30 m² inimese kohta
- Niiskuklass 2: Eluruumid asustustihedusega üle 30 m² inimese kohta
- Niiskuklass 1: Väga väikese niiskustootlusega uued mitteelamud: töö- ja õpperuumid, jms.

Joonis 5.11 Arvutusliku niiskulisa sõltuvus välitemperatuurist Eesti hoonetel (EVS-EN 15026)

Kalamees ja Ilomets on 237 elamu mõõtmistulemusi analüüsid leidnud, et mõõdetud keskmine niiskuslisa külmal perioodil on $2,8 \text{ g/m}^3$ standardhälbega $1,6 \text{ g/m}^3$. 90% protsentiili tase külmal perioodil varieerub vahemikus $3\text{-}6 \text{ g/m}^3$ ning sõltub eelkõige inimtegevusest siseruumides. Keskmisi väärtusi on sobilik kasutada stohhastilistes arvutustes ning 90% protsentiili väärtusi deterministlikes arvutustes. Analüüsitud tulemustest lähtuvalt on eluruumide elanike arv määravaimaks teguriks sisekliima koormuste valikul (Ilomets, Kalamees, 2016). Käesoleva lõputöö niiskustehnilised arvutused on deterministlikud ning sellest tulenevalt on valitud arvutuslikku niiskuslisa iseloomustama niiskusklass 3.

Seega on raudbetoon välisseinapaneeli välimise betoonplaadi niiskussisalduse arvutamisel kasutatud Tõravere meteoroloogiajaama mõõtmistulemustest aastatel 1970-2012 vastavalt eespool kirjeldatud põhimõtetele tuletatud sisekliima koormusi (temperatuur ja suhteline niiskus). Mõlemad sisekliima andmed on arvutatud tunni ajase intervalliga andmetena.

Lisasoojustuse moodulelemendi niiskustehnilise toimivuse arvutustel on kasutatud Väike-Maarja meteoroloogiajaama 1989-1990 ja 1995-1996 aastate väliskliima mõõtetulemustest vastavalt eespool kirjeldatud põhimõtetele tuletatud sisekliima koormusi (temperatuur ja suhteline niiskus). Ka siin on mõlemad sisekliima andmed arvutatud tunni ajase intervalliga andmetena.

5.8 Kaldvihma mudel betooni niiskussisalduse arvutamisel

Sademed mõjutavad hoone fassaadi sellele langeva kaldvihma kaudu, küllastades betooni poore veega või tõstes oluliselt betooni poorirõhu niiskussisaldust. EMHI kliimaandmete hulgast on teada sademed, mis on mõõdetud tunnise intervalliga horisontaalpinnale langenud sademete hulgana ($\text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = \text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), tuulesuund kraadides ning tuuletugevus (m/s). Vastavate andmetega on arvutatud fassaadile langeva kaldvihma koormus kasutades selleks poolempiirilisi valemeid või vastavat arvutustarkvara (Saar, 2013). Käesolevas lõputöös on hoonele mõjuva kaldvihma koormus arvutatud poolempiiriliste meetodite kahe erineva mudeliga – arvutustarkvara Delphin kaldvihma mudeliga ja standardis ISO 15927-3 toodud valemite alusel.

Tarkvara Delphin kaldvihma mudeli integreerimine tarkvara aluseks olevale CHAMPS koodiga ning vastava mudeli eksperimentaalne valideerimine on tehtud

teadlaste Bert Blockeni ja Jan Carmeliet' poolt. Delphini kaldvihma mudel kasutab rohkem tegureid kaldvihma arvutamiseks, kui standard ISO 15927-3. Delphinis on vastavate kaldvihma tegurite arvutamiseks valemid 18, 19 ja 20.

$$j_{rain,nor}^{m_v} = k_{wind} \cdot k_{rain} \cdot j_{rain,hor}^{m_w} \quad (18)$$

kus:

- $j_{rain,nor}^{m_v}$ on vihma intensiivsus seina tasapinnale, [kg/m²·s]
- k_{wind} on tuule koefitsent, [-]
- k_{rain} on vihmale avatuse tegur, [-]
- $j_{rain,hor}^{m_w}$ on vihma intensiivsus horisontaalsele tasapinnale, [kg/m²·s]

Vihma mudel avaldub kujul:

$$\beta_{wind} = \begin{cases} |a_{wall} - \alpha_{wind}| & \text{if } |a_{wall} - \alpha_{wind}| \leq \pi, \text{ else} \\ 2\pi - |a_{wall} - \alpha_{wind}| & \end{cases} \quad (19)$$

$$k_{wind} = \begin{cases} 0 & \text{if } \left(\beta_{wind} \geq \frac{\pi}{2} \right) \vee (v_{wind} \leq 0); \text{ else} \\ \frac{\cos(\beta_{wind})}{\sqrt{1 + 1141 \cdot \sqrt{\frac{3600 \cdot j_{Rain,hor}^{m_w}}{v_{wind}^4}}}} \cdot \exp\left(-\frac{12}{5 \cdot \sqrt[4]{3600 \cdot j_{Rain,hor}^{m_w}}} \right) & \end{cases} \quad (20)$$

kus:

- β_{wind} on tuule kaldenurk, [°]
- k_{wind} on tuule koefitsent, [-]
- α_{wall} on seina orientatsioon ilmakaarte suhtes, [°]
- α_{wind} on tuule suund, [-]
- v_{wind} on tuule kiirus, [m/s]

Valem 18 arvutab kaldvihma koguse ja koosneb kolmest muutujast. Tegur k_{wind} on tuule koefitsient ning arvestab tuule suuna mõju sõltuvalt seina normaalist ja tuule kiirusest. Tegur k_{rain} on keskkonnategur, mis arvestab seina varjatust tuule ja vihma eest. Tegur $j_{rain,hor}$ on horisontaalpinnale langeva vihma kogus.

Valem 20 võtab arvesse tuule suunda ja seina asetust. Kui tuule suund on suurem kui 90 kraadi kummalegi poole seina normaali, siis tuule koefitsiendi arvutamisel võrrandisüsteemiga 20 on tulemuseks null.

Võrrandisüsteem 20 arvestab lisaks, et tuule kiirusel null on ka tuule koefitsient null. Igal muul juhul arvutatakse välja tuule koefitsient, mis lisatakse valemisse 18 (Grunewald, Nicolai, 2015), (Kotkas 2015).

Delphin võtab arvesse ka vihma temperatuuri. Kui temperatuur langeb alla -2 kraadi, arvestab Delphin sademeid lumena ning ei võta neid kaldvihma arvutamisel arvesse. Lisaks arvestab tarkvara ka fassaadi väliste kihtide veega küllastumist – kui välised kihid on veega küllastunud, tekib fassaadile nn veekile ja ülejäänud fassaadile langev vihm jookseb mööda fassaadi maha.

Delphini mudeli puhul pole täpselt teada, mis asukohale fassaadil arvutustulemused vastavad. Programmi arendajate sõnul arvestab Delphin fassaadi kaldvihmakooormuse arvutamisel ligikaudu 10 x 10 m seinaosa keskmist väärtust. Blocken ja Carmeliet uurimuse järgi ülehindab aga Delphin vihmakoormust fassaadile (Blocken, Carmeliet, 2002). Varasemalt on tarkvara arendajad soovitanud arvutada kaldvihm iseseisvalt välja ning sisestada see fassaadi normaalisuunalise komponendina programmi.

ISO standardi 15927-3 kohaselt arvutatakse fassaadile (vertikaalpinnale) mõjuv kaldvihm valemiga 21:

$$I_s = \frac{2}{9} \cdot v \cdot r^{\frac{8}{9}} \cdot \cos(D - \Theta) \quad (21)$$

kus:

- I_s on kaldvihma intensiivsus vertikaalpinnale
- v on vastav tuule kiirus m/s, mõõdetud maapinnast kõrgusel 10 m
- r on horisontaalpinnale langeva vihma intensiivsus mm/(m²*h)
- $(D - \Theta)$ on nurk fassaadipinna ja vastaval ajahetkel puhuva tuulesuuna vahel

ISO standard annab ka juhised kaldvihma koormuse määramiseks vastavas konkreetses asukohas. Selleks tuleb eelpool toodud kaldvihma intensiivsus I_s

korrutada läbi erinevate teguritega. Asukohast sõltuvat kaldvihma koormust vertikaalpinnale iseloomustab valem 22:

$$I_{WS} = I_S \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \quad (22)$$

kus:

- I_{WS} on asukohast sõltuv kaldvihma koormus vertikaalpinnale
- I_S on kaldvihma intensiivsus vertikaalpinnale vastavalt valemile 21
- C_R on asukoha kõrgust maapinnast ja maastiku reljeefsust arvestav tegur
- C_T on topograafia tegur, mis arvestab üksikutest mägedest vm takistavatest objektidest tingitud tuule kiiruse muutust
- O on tegur, mis arvestab tuule varju, mis on tekitatud vähemalt sama kõrge teise objekti poolt, kui vaadeldava punkti kõrgus maapinnast
- W on tegur, mis arvestab seina iseärasusi ning vaadeldava punkti asukohta fassaadil

Maastiku reljeefsuse koefitsient C_R kõrgusel z leitakse valemitega 23 ja 24:

$$C_R(z) = K_R \cdot \ln(z/z_0), \text{ kui } z \geq z_{\min} \quad (23)$$

$$C_R(z) = C_R(z_{\min}), \text{ kui } z < z_{\min} \quad (24)$$

Valemities kasutatavad parameetrid K_R , C_R ja $z_{\min}$ on toodud Tabel 5.3-s.

Tabel 5.3 Maastiku reljeefsuse koefitsendi arvutusparameetrid K_R , C_R ja $z_{\min}$

Maastiku tüüp	Kirjeldus	K_R	z_0	$z_{\min}$
0	Meri või kaldapiirkond, mis on avatud merele.	0,16	0	1
I	Järved või tasane horisontaalne maastik ilma olulise taimkatteta ja ilma takistusteta.	0,17	0,01	1
II	Maastik madala taimkattega (nagu rohi) ja üksikute takistustega (puud, hooned), mille vaheline kaugus võrdub vähemalt 20-kordse kõrgusega.	0,19	0,05	2
III	Maastik, mis on kaetud ühtlase taimkatte või ehitistega või üksikute takistustega, mille vaheline kaugus ei ole suurem 20-kordsest kõrgusest (nagu maa-asulad, äärelinnapiirkond, ühtlaselt metsaga kaetud alad).	0,22	0,3	5
IV	Maastik, kus vähemalt 15 % pinnast on kaetud hoonetega, mille keskmine kõrgus ületab 15 m.	0,23	1	10

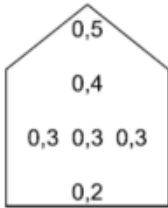
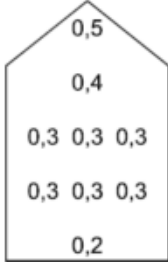
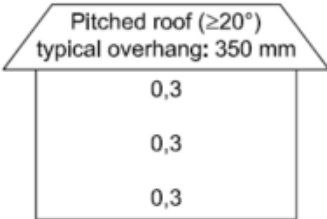
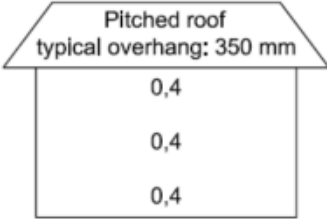
Tegurit C_T kasutatakse sellistes olukordades, kus hoone asub rohkem kui poole peal nõlva kõrgusest või pooleteistkordse kalju kõrguse ulatuses alates kalju põhjast. Teguri suurus varieerub vahemikus 1 – 1,6, kus esimene kehtib juhul, kui ümbritseva nõlva kalle on alla 5% ja teine olukorras, kus hoone asub järsu astangu serval või mäeharjal.

Takistustegur O arvestab takistuse asumist vaateväljas, kus vaateväljaks peetakse vastavast asukohast seinal arvestatavat horisontaaltasandi osa, mida piiritlevad seinaga normaalist mõlemal pool 25° nurga all lähtuvad kiired. Kui tegemist on pika seinaga, võivad takistusteguri O väärtused sein ulatuses varieeruda märkimisväärselt. Kui hoone välisseina kuju suunab tuult mingis punktis vastu välisseina (ehk töötab nõ lehrina), tuleb takistustegur O võtta võrdseks ühega. Muudel juhtudel on takistusteguri O väärtused toodud Tabel 5.4-s.

Tabel 5.4 Takistusteguri O väärtused

Takistuse kaugus seinast	Takistustegur O
4...8 m	0,2
8...15 m	0,3
15...25 m	0,4
25...40 m	0,5
40...60 m	0,6
60...80 m	0,7
80...100 m	0,8
100...120 m	0,9
üle 120 m	1,0

Tegur W võtab arvesse erinevaid sein parameetreid. Fassaadile jõudva vihma kogus sõltud konkreetse sein tüübist, sein kõrgusest, katuseräästade olemasolust, tellisfassaadi puhul kivide suunast jne. Lisaks sellele varieerub fassaadile jõudva vihma kogus suuresti ka erinevates asukohtades seinal. Tingituna tuulekeeristest hoone nurkade ja katuse ümber on vastavates piirkondades kaldvihma koormus reeglina märkimisväärselt suurem. Teguri W suurust iseloomustab Joonis 5.12.

Description of wall	Average value	Distribution
Two-storey gable	0,4	
Three-storey gable	0,3	
Multi-storey building with flat roof (pitch < 20°)	0,2 for a ten-storey building, for example, but with a higher intensity at top	0,5 for top 2,5 m 0,2 for remainder
Two-storey wall with eaves	0,3	
Three-storey wall with eaves	0,4	
Two-storey building with flat roof (pitch < 20°)	0,4	

Joonis 5.12 Seina parameetreid iseloomustava teguri W väärtused (ISO 15927-3)

Käesolevas lõputöös on kaldvihma koormused arvutatud nii Delphin tarkvara kaldvihma mudeliga kui ka ISO standardi järgse kaldvihma mudeliga. Võrreldes erinevaid arvutustulemusi võib öelda, et nii Delphini kui ka standardi järgsed summaarsed kaldvihma kogused on väga sarnased. Kuna aga standard ISO 15927-3 annab selged juhised erinevate kaldvihma kogust mõjutavate tegurite määramisel, on käesolevas lõputöös otsustatud järgida tarkvara Delphin arendajate soovitus – kaldvihm on standardi järgsete valemitega välja arvutatud ning sisestatud tarkvarasse fassaadisuunalise komponendina.

Kaldvihma koguste arvutamisel on kasutatud järgmisi parameetreid:

- tuule kiirus v ja vihma intensiivsus r on võetud Tõravere meteoroloogiajaama mõõtmistulemustest
- fassaadipinna ning tuulesuuna vaheline nurk on arvutatud Tõravere meteoroloogiajaama mõõtmistulemuste alusel
- hoone kõrgus z on valitud lähtuvalt 5-korruselisest Akadeemia tee 5a ühiselamust, kus hoone kõrgus $z = 16$ m
- topograafia tegur $C_T = 1$ (hoone asub võrdlemisi tasasel maal)
- takistuste tegur $O = 0,3$ (linnaruumis asuvad lähimad takistused 8...15 m kaugusel)
- seina tegur $W = 0,5$ (mitmekorruselise hoone ülemine 2,5 m kõrgune osa, kus vihmakoormus on suurim).

Eelpool kirjeldatud andmetega on arvutatud fassaadile mõjuvad kaldvihma kogused tunnise intervalliga aastatel 1970 – 2012 ning vastavad andmed on sisestatud edasisteks arvutusteks tarkvarasse Delphin fassaadi normaalsuunalise vihmakomponendina.

5.9 Hallituse kasvu mudel

Tarindi niiskustehnilist toimivust on võimalik hinnata matemaatiliste mudelite abil, mis iseloomustavad hallituse kasvu erinevatel ehitusmaterjalidel. Hallituse kasv on üks esimesi indikaatoreid, mis viitab materjalis olevale liigsele niiskusele. Lisaks mõjutab hallituse kasv siseõhu kvaliteeti ning tarindi nähtavate pindade visuaalset kvaliteeti. Hallituse kasvu on võimalik ennustada kasutades selleks matemaatilist mudelit, mis kasutab huvi pakkuvates punktides temperatuuri ja suhtelise niiskuse andmeid ning arvutab selle järgi hallitusindeksi M (Ojanen et al. 2010). Käesolevas töös on kasutatud Soome teadlaste poolt loodud matemaatilist hallituse hindamise mudelit (Hukka, Viitanen, 1999).

Nimetatud mudel arvestab lisaks temperatuurile ja suhtelisele niiskusele ka pikemaid kuivi ja/või külmi perioode, kus reaalses elus hallitus ei kasva vaid pigem taandub. Mudel kasutab erinevaid mehhanisme modelleerimaks hallituse taandumis- ja kasvuperioode.

Hallituse kasvu mudel arvestab materjalide omapäradega. Materjalide omadusi arvestatakse liigiti – materjalid on esitatud erinevates hallituse kasvu klassides:

vastupidav (inglise keeles *resistant*), keskmiselt vastupidav (inglise keeles *medium sensitive*), tundlik (inglise keeles *sensitive*) või väga tundlik (inglise keeles *very sensitive*).

Hallituse kasv on üks esimesi indikaatoreid, mis vihjab tarindisisesele mikrobioloogilise elutegevuse tekkele. Seega võib hallituse kasvu indeksit kasutada konstruktsioonide niiskustehnilise käitumise hindamisel. Hallitus ei kahjusta küll otseselt materjali, aga viitab liialt kõrgele niiskuse tasemele konstruktsioonis ning teistele liialt kõrge niiskustasemest põhjustatud riskidele, näiteks kõdunemisele.

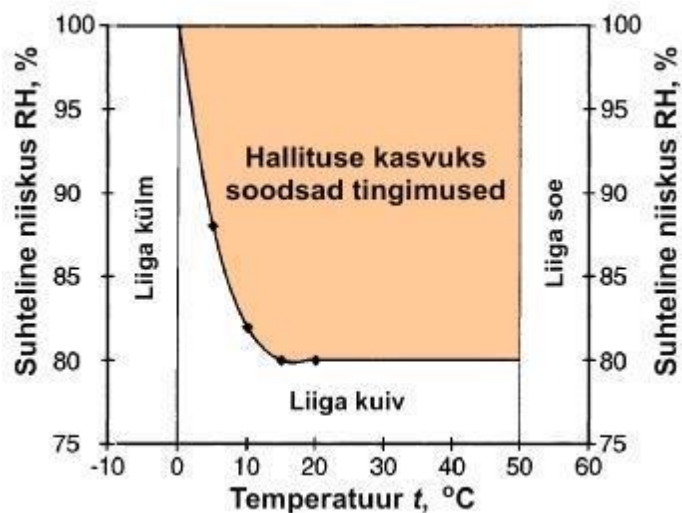
Hallituse kasvu iseloomustab hallituse indeks M, mis varieerub vahemikus 0...6. Esialgne mudel arendati välja hallituse kasvu hindamiseks puitmaterjalidel, kuid 2009. aastal uuendati mudelit nii, et hallituse kasvu saab hinnata ka teistel ehitusmaterjalidel ning arvestades materjalide erineva tundlikkusega hallituse kasvu ja taandumise suhtes (Ojanen et al. 2010).

Tabel 5.5 Hallitusindeksi M väärtuste kirjeldused

Indeks	Kasvustaadiumi kirjeldus
0	Kasv puudub
1	Väikesed üksikud hallituse kolded materjali pinnal (mikroskoobiga nähtavad)
2	Mitmed lokaalsed hallituse kolded materjali pinnal (mikroskoobiga nähtavad)
3	Silmaga nähtavad hallituse kolded materjali pinnal, < 10% kaetud, või < 50% kaetud mikroskoobiga vaadeldes
4	Silmaga nähtavad hallituse kolded materjali pinnal, < 10%-50% kaetud, või > 50% kaetud mikroskoobiga vaadeldes
5	Rohke silmaga nähtav hallituse kasv materjali pinnal, > 50% kaetud
6	Tihe ja rohke hallituse kasv materjali pinnal, ligi 100% kaetud

Nimetatud hallituse kasvu iseloomustav mudel põhineb sobivate keskkonnatingimuste ajalisel kestusel, mis on vajalikud mikrobioloogilise kasvu alguseks. Hallituse kasvu seisukohast väga tundlike materjalide – näiteks puidu – minimaalseks suhtelise niiskuse tasemeks peetakse 80%, et hallitus hakkaks kasvama. Vastupidavamatel materjalidel on vastav kasvutingimus ilmselgelt kõrgem või peab materjal oluliselt kauem kasvuks soodsates

keskkonnatingimustes olema. Hallituse kasvuks vajalikke soodsaid keskkonnatingimusi iseloomustab Joonis 5.13.



Joonis 5.13 Hallituse kasvuks soodsad keskkonnatingimused (Hukka, Viitanen, 1999)

Valem 25 iseloomustab kriitilist suhtelise niiskuse taset erinevatel temperatuuridel. Nimetatud kriitiline väärtus iseloomustab madalaimat niiskustaset, kus hallituse kasv on võimalik, kui materjal on piisavalt kaua vastavates keskkonnatingimustes.

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267 \cdot T^3 + 0,160 \cdot T^2 - 3,13 \cdot T + 100,0 & \text{kui } T \leq 20 \\ RH_{min} & \text{kui } T > 20 \end{cases} \quad (25)$$

Algsel puidupõhistele materjalidele suunatud hallitusindeksi väärtus leitakse valem 26 abil.

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

kus:

- tegur k_1 iseloomustab kasvu intensiivsust (vt valem 27),
 - W puidu liiki (0 = mänd, 1 = kuusk),
 - SQ pinna kvaliteeti ($SQ = 0$ saepuidul, $SQ = 1$ kuivatis kuivatatud puidul).
- Teistel materjalidel kasutatakse $SQ = 0$, mis elimineerib nimetatud teguri.

$$k_1 = \begin{cases} 1 & \text{kui } M \leq 1 \\ \frac{2}{t_{M=3}/t_{M=1} - 1} & \text{kui } M > 1 \end{cases} \quad (27)$$

kus:

- tegur $t_{M=1}$ iseloomustab aega, mis kulub hallituse kasvamise alguseni ja
- tegur $t_{M=3}$ aega, mis kulub materjalil jõudmaks hallitusindeksi tasemeni $M = 3$.

Tegur k_2 iseloomustab kasvu kiiruse muutlikkust, kui hallituse indeks M läheneb oma maksimumväärtusele ($4 < M < 6$). Tegur k_2 arvutatakse valemiga 28:

$$k_2 = \max[1 - \exp[2,3 \cdot (M - M_{\max})], 0] \quad (28)$$

kus maksimaalne hallitusindeksi väärtus $M_{\max}$ sõltub valitsevatest keskkonnatingimustest:

$$M_{\max} = 1 + 7 \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - 2 \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (29)$$

Valemis 29 on RH_{crit} hallituse kasvu algamiseks vajalik suhtelise niiskuse piirväärtus.

Mitte puidupõhistele materjalidele määratakse tegur k_1 männipuidu tegurite põhjal valemitega 30 ja 31:

$$k_1 = \frac{t_{M=1, pine}}{t_{M=1}} \quad \text{kui } M < 1 \quad (30)$$

$$k_1 = 2 \cdot \frac{t_{M=3, pine} - t_{M=1, pine}}{t_{M=3} - t_{M=1}} \quad \text{kui } M \geq 1 \quad (31)$$

Valemities 30 ja 31 iseloomustab alaindeks „pine“ referentsmaterjali männipuidu vastavaid väärtusi.

Tabel 5.6 Hallituse kasvu tundlikkuse klassid ja mõned vastavad materjalide näited

Tundlikkuse klass	Materjal
Väga tundlik	Töötlemata puit; sisaldab palju bioloogiliseks kasvuks vajalikke toitaineid; nt männipuit.
Tundlik	Hööveldatud puit, paberiga kaetud plaadid, puidupõhised plaadid
Keskmiselt vastupidav	Tsemendi- või plastipõhised materjalid, mineraalvill
Vastupidav	Klaas- ja metalltooted, materjalid mis on kaetud hallituse kasvu tõkestavate pinnakatetega

5.9.1 Hallitusindeksi maksimumväärtused erinevatel materjalidel

Hallituse kasvu intensiivsus on domineeriv tegur kasvu simuleerimisel, kui hallitusindeksi M väärtus ei lähene vastavale materjalile iseloomulikule maksimumväärtusele. Iseloomulikud maksimumväärtused seavad kasvule piirangud ning piiravad hallitusindeksi väärtused realistlike tasemeteni. Mitte puidupõhiste materjalide hallitusindeksi maksimumväärtused saab leida valemiga 32:

$$M_{\max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (32)$$

Vastavate koefitsientide A , B ja C väärtused sõltuvad materjali klassist. Uus hallitusindeksi maksimumväärtus mõjutab ka teguri k_2 väärtust. Koefitsientide A , B ja C väärtused vastavalt hallituse kasvu tundlikkuse klassidele on toodud Tabel 5.7-s. Tabel annab väärtused ka hallituse kasvu intensiivsust iseloomustavale tegurile k_1 .

Tabel 5.7 Koefitsientide A , B ja C väärtused vastavalt hallituse kasvu tundlikkusele

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

5.9.2 Hallituse taandumine

Viitaneni hallitusindeksi mudel võtab arvesse ka hallituse taandumist, kui keskkonnatingimused hallituse kasvu enam ei võimalda. Teisisõnu toimub see juhul, kui suhteline niiskus on madalam, kui suhtelise niiskuse kriitiline tase. Lisaks arvestab see ka temperatuuri tingimusi: hallitus ei kasva, kui temperatuur on alla 0°C. Hallituse taandumist männipuidul iseloomustab valem 33:

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0,00133, & \text{kui } t - t_1 \leq 6h \\ 0, & \text{kui } 6h < t - t_1 \leq 24h \\ -0,000667, & \text{kui } t - t_1 > 24h \end{cases} \quad (33)$$

kus M on hallitusindeks ja t on aeg tundides alates hetkest t_1 , kui keskkonnatingimused materjali pinnal muutusid selliseks, mis ei võimalda hallituse kasvu. Pikemate perioodide jooksul (nädal, kuu) annab valem 33 praktiliselt lineaarse hallitusindeksi vähenemise.

On tõenäoline, et pikaaegsed hooajalised niiskustingimuste muutused põhjustavad võrreldes lühiajaliste tsüklitega erinevaid hallituse taandumise mustreid. Ka materjali enda omadused avaldavad suurt mõju hallituse taandumise protsessile.

Hallituse taandumist teistel materjalidel iseloomustab valem 34:

$$\frac{dM}{dt_{mat}} = C_{mat} \cdot \frac{dM}{dt_0} \quad (34)$$

kus:

- $(dM/dt)_{mat}$ on hallituse taandumise intensiivsus vastaval materjalil,
- $(dM/dt)_0$ on hallituse taandumise intensiivsus männipuidul (valem 33),
- C_{mat} on koefitsent, mis iseloomustab hallituse taandumist. Nimetatud koefitsendi väärtused on toodud Tabel 5.8-s.

Tabel 5.8 Hallitusindeksi taandumise koefitsendi C_{mat} väärtused

C_{mat}	Kirjeldus
1,0	Männipuit algmudelis, lühikesed perioodid
0,5	Märkimisväärne taandumine
0,25	Tagasihoidlik taandumine
0,1	Peaaegu olematu taandumine

Tabel 5.8-s toodud klassifikatsioon põhineb vähestel mõõtmistulemustel ning nende kasutamisel peaks arvestama, et tegu on esialgsete hinnangutega (Ojanen et al. 2010).

Hallitusindeksi mudel on loodud erinevate materjalide pikaajaliste katsetamiste tulemuste põhjal, kusjuures mudeli loomisel kasutati tulemuste keskmisi väärtusi.

6 Tulemused

Käesolevas lõputöös tehtud arvutused võib struktureerida järgmiselt:

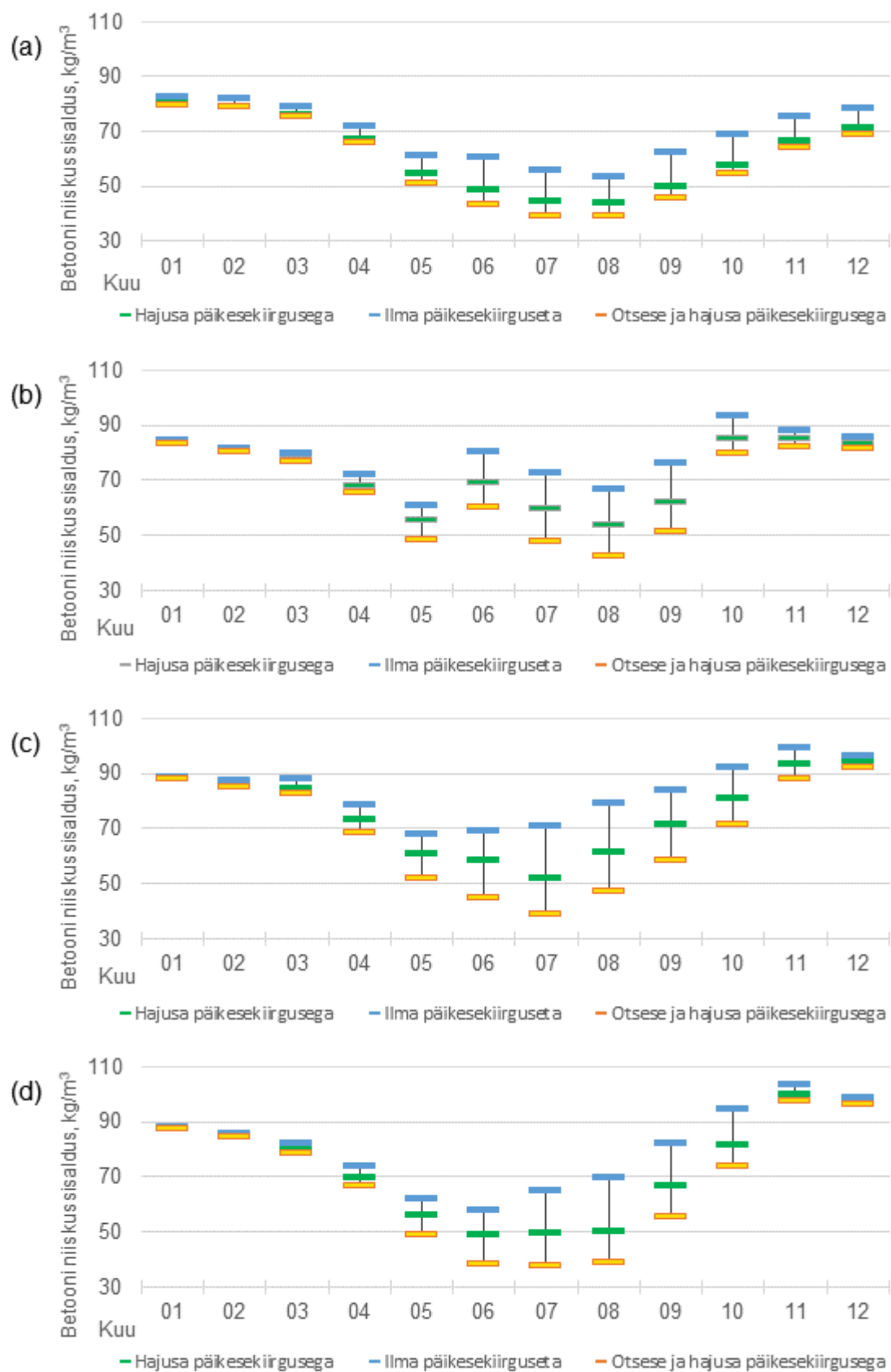
1. Raudbetoon välisseina välimise betoonkooriku niiskussisalduse arvutamine kasutades erinevaid kliimaatilisi koormusi
2. Lisasoojustamise moodulelemendiga tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamine erinevate õhu- ja aurutõkke materjalide kasutamisel:
 - 2.1. PE (polüetüleen) aurutõkkekilega element
 - 2.2. muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekilega element
 - 2.3. Puitlaastplaadi (OSB) kasutamine õhu- ja aurutõkke elemendina.

6.1 Niiskussisaldus raudbetoonist välisseinapaneeli välimises betoonplaadis

6.1.1 Aastaaegade ja kuude mõju

Erinevate aastaaegade ja kuude väliskliima mõju hindamiseks raudbetoonist väliskooriku niiskussisaldusele on simulatsioonitarkvaraga Delphin arvutatud väliskooriku summaarne niiskussisaldus erinevate ajaperioodide jooksul vastavate väliskliima andmetega. Niiskussisalduse arvutamisel on kasutatud EMHI mõõdetud andmeid, täpsemalt õhu temperatuuri, suhtelist niiskust, hajusat päikeseikiirgust, horisontaalvihma kogust, tuulesuunda ja –tugevust.

Hindamaks ilmakaarte ning päikeseikiirguse ligikaudset mõju, on arvutusi alustatud 1,5 aasta pikkuse perioodi kliimaandmetega. Päikeseikiirguse mõju hindamiseks on arvutused tehtud koos otsese ja hajusa päikeseikiirgusega, ainult hajusa päikeseikiirgusega ning ilma päikeseikiirguseta. Arvutustulemused on kujutatud Joonis 6.1-l.



Joonis 6.1 Kuu keskmine betooni niiskussisaldus (a) põhja-, (b) ida-, (c) lõuna- ja (d) läänepoolse fassaadil kuude lõikes

Arvutustulemustest selgub, et kõige kriitilisem aeg on hilissügis ja talv, täpsemalt oktoober, november, detsember ja jaanuar. Ilmakaarte osas domineerivad lõuna ja lääs, kus kriitilisematel kuudel on betooni niiskussisaldus 20-25% kõrgem võrreldes teiste ilmakaartega.

Ootuspäraselt on niiskussisaldus kõrgeim ilma päikesekiirgusega arvatatud olukorras ning madalaim otsese ja hajusa kiirgusega arvatatud olukorras. Päikesekiirguse mõju on oluliselt domineerivam suvekuudel, kui päikesekiirgus on intensiivsem ning pikemaajalisem. Talvekuudel ja hilissügisel, kui betooni niiskussisaldus on kõrgeim, muutub päikesekiirguse mõju kohati pea olematuks. Seetõttu on edasised arvutused tehtud kõik vaid hajusa päikesekiirgusega. Selline olukord annab tulemuse tagavara kasuks ning imiteerib olukorda, kus hoone välisfassaad on otsese päikesekiirguse eest varjatud.

6.1.2 Ilmakaarte mõju

Eelnevalt on välja toodud, et kõige kriitilisemateks ilmakaarteks on lõuna ning lääs. Täpse ettekujutuse saamiseks on analüüsitud EMHI kliimaandmeid ajaperioodil 1970 - 2012.

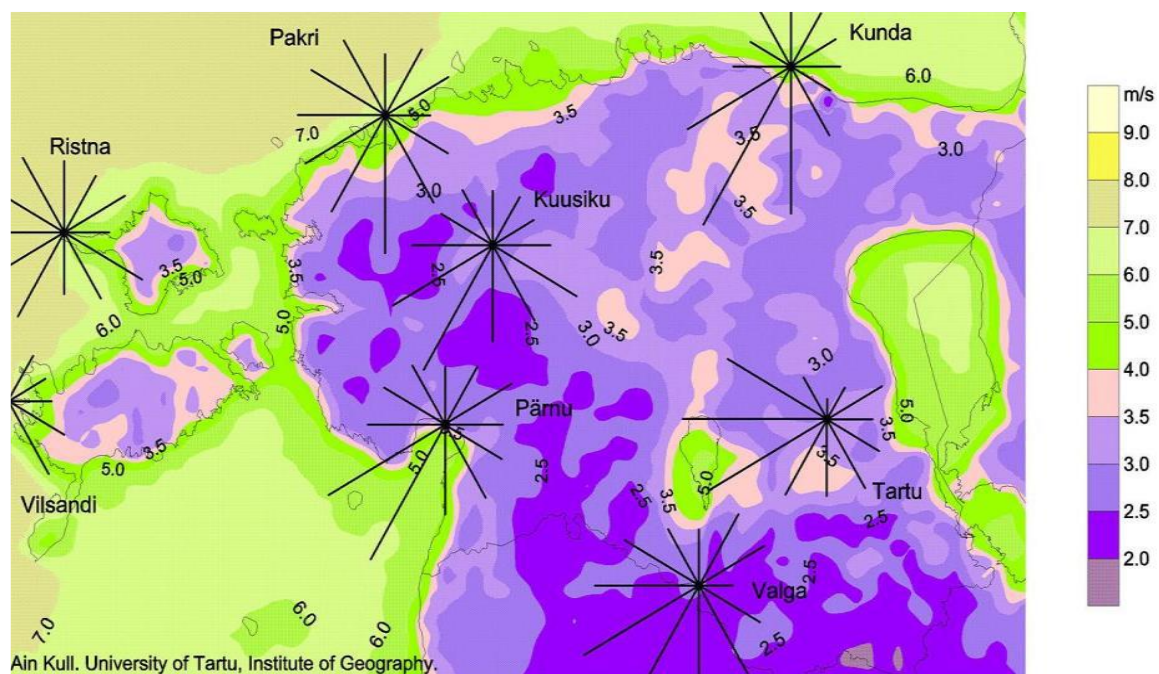
Tuulesuundade esinemissageduste graafikult ilmneb, et Eestis puhuvad valdavalt lõuna-, lääne- ja edelatuuled. Nimetatud ilmakaartest puhub tuul kohati pea kaks korda enam, kui näiteks kagust või loodest. Joonis 6.2 iseloomustab 43 aasta tuulesuundade esinemissagedust.



Joonis 6.2 Tuulesuundade esinemissagedus aastatel 1970-2012

Tartu Ülikooli vanemteadur Ain Kull on modelleerinud ja analüüsinud ka tuulesuundade esinemissagedusi ning keskmisi tuuletugevusi erinevates

Eestimaa piirkondades. Joonis 6.3 kujutab vastavaid tulemusi. Jooniselt on näha, et analoogselt EMHI kliimaandmete analüüsile on ka Tartu Ülikooli vanemteadur Ain Kull leidnud, et Eestis puhuvad valdavalt lõuna-, lääne- või edelasuunalised tuuled ning keskmine tuulekiirus on 2-3 m/s sisemaal ning 4-7 m/s rannikualadel.

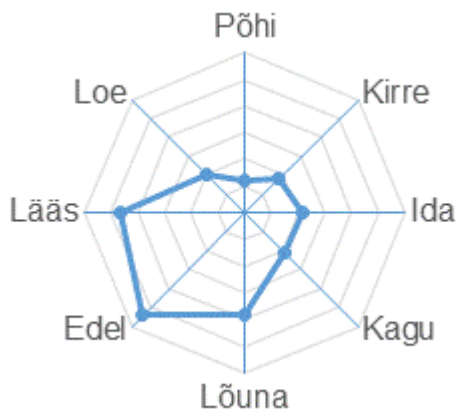


Joonis 6.3 Valdavad tuulesuunad ja –tugevused erinevates piirkondades Eestis (Ain Kull)

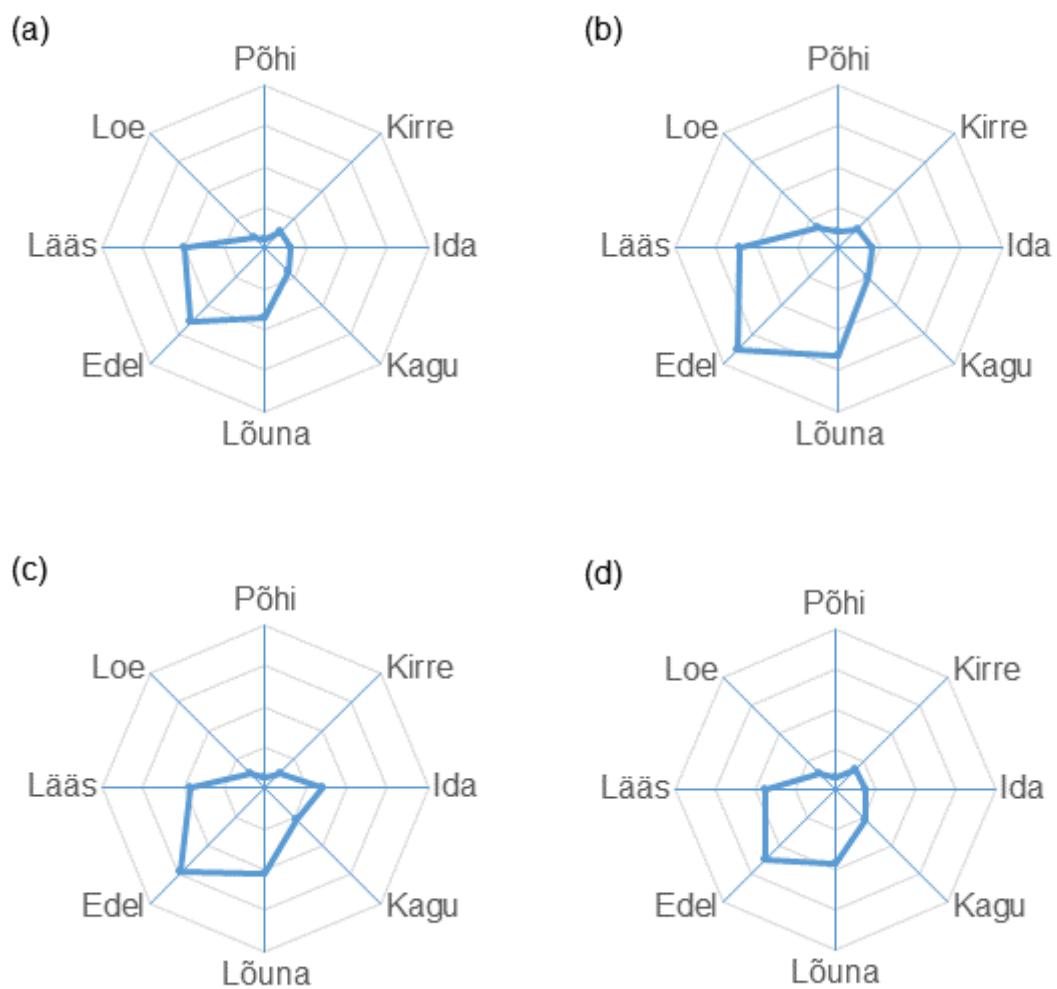
Betoonväliskooriku niiskussisaldus sõltub aga eelkõige kaldvihmast, mida mõjutavad lisaks tuulesuunale ka vastav tuulekiirus ning horisontaalpinnale langevate sademete hulk. Kaldvihma arvutamisest on täpsemalt juttu punktis 5.8.

Standardijärgse kaldvihma koormused ilmakaarte lõikes on esitatud Joonis 6.4-l. Ka siin domineerivad eelkõige lõuna-, lääne- ja edela ilmakaared. Joonis 6.5 iseloomustab kaldvihma koormuseid kriitilisemate kuude – jaanuari, oktoobri, novembri ja detsembri – lõikes. Suurimad kaldvihma kogused esinevad endiselt samades ilmakaartes, kusjuures kõige kriitilisemaks võib pidada edela ilmakaart.

Sellest tulenevalt on edaspidised arvutused tehtud edela ilmakaare suhtes, kus kaldvihma koormus on suurim.



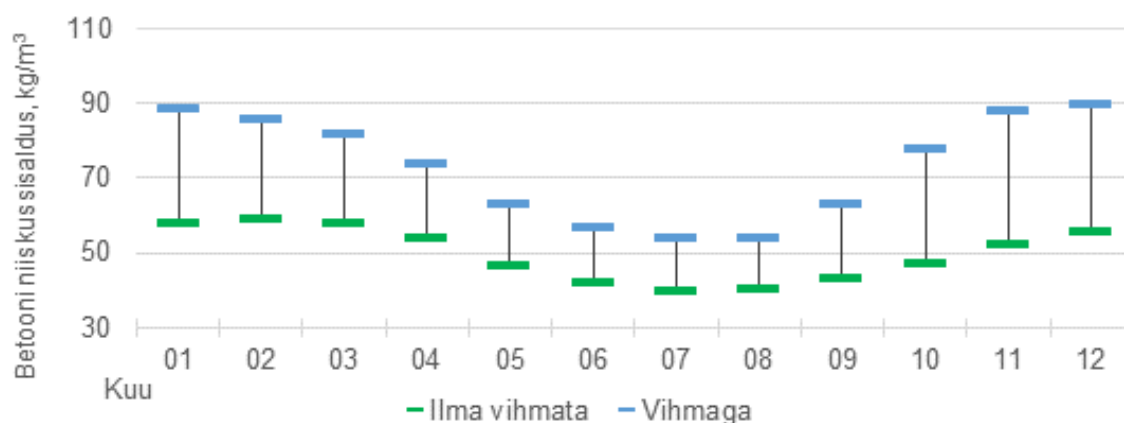
Joonis 6.4 Standardi järgne summaarne kaldvihm aastatel 1970-2012



Joonis 6.5 Standardi järgne summaarne kaldvihm aastatel 1970-2012 (a) jaanuaris, (b) oktoobris, (c) novembris ja (d) detsembris

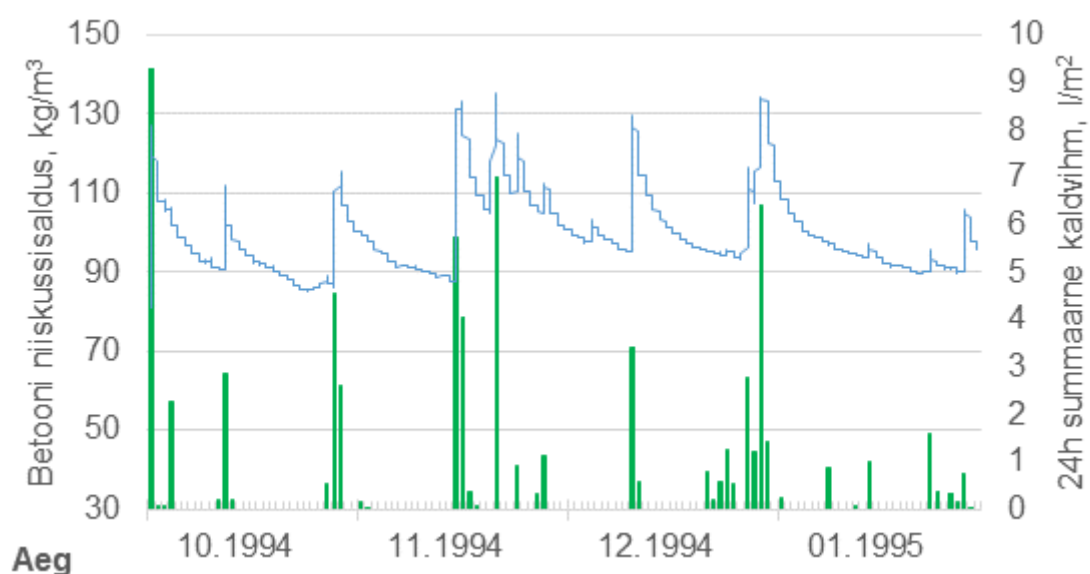
6.1.3 Vihma ja suhtelise niiskuse mõju

Hindamaks sademete mõju olulisust betoonkooriku niiskussisaldusele on võrdluseks arvutatud sama mudel ka ilma sademeteta. Joonis 6.6-l on esitatud edelasuunalise fassaadi 43 aasta kuude keskmised betoonkooriku niiskussisaldused koos vihmaga ning ilma vihmata. Sademetega arvutatud betooni niiskussisaldus on pea kõigi kuude lõikes kolmandiku võrra kõrgem, kui ilma sademeteta arvutatud betooni niiskussisaldus.



Joonis 6.6 Betooni keskmine niiskussisaldus aastatel 1970 – 2012 kuude lõikes ilma vihmata ja vihmaga olukorras

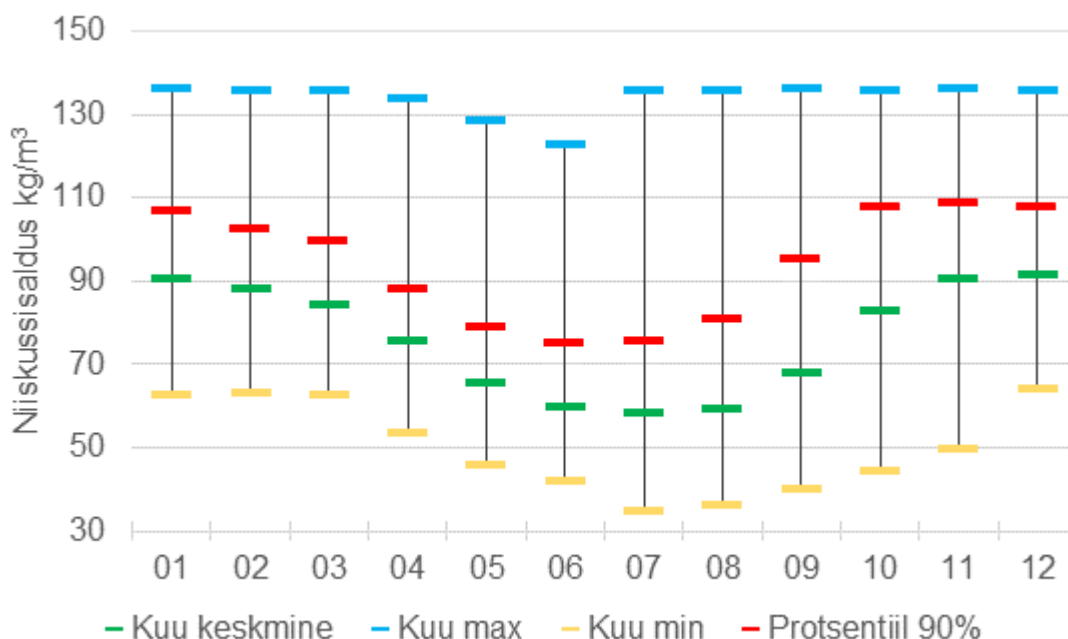
Kaldvihma ja betooni niiskussisalduse vahelise sõltuvuse hindamiseks on samad arvutustulemused kuvatud ka Joonis 6.7-l, mis iseloomustab betooni niiskussisalduse kõikumist tulenevalt kaldvihma kogusest.



Joonis 6.7 Betooni niiskussisaldus sõltuvalt kaldvihma kogusest

6.1.4 Betooni niiskussisalduse määramine edasisteks arvutusteks

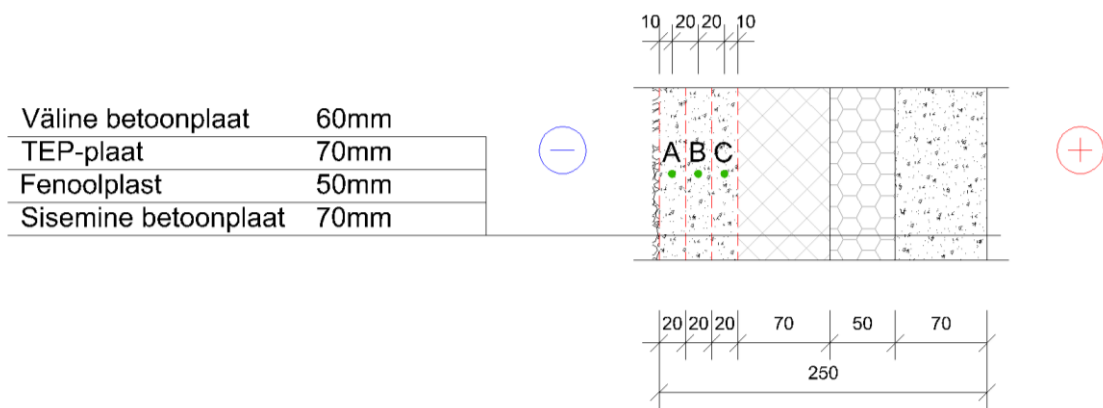
43 aasta kuude keskmised, maksimaalsed ja minimaalsed betooni niiskussisaldused on kujutatud Joonis 6.8-l. Minimaalsed betooni niiskussisalduste väärtused kopeerivad keskmiste väärtuste kõikumist kuude lõikes, kuid maksimaalne niiskussisaldus läheneb kõikidel kuudel peale mai ja juuni niiskussisalduse absoluutse maksimumväärtuseni. Niiskussisalduse minimaalsed ja maksimaalsed väärtused erinevad teineteisest võrdlemisi suures ulatuses.



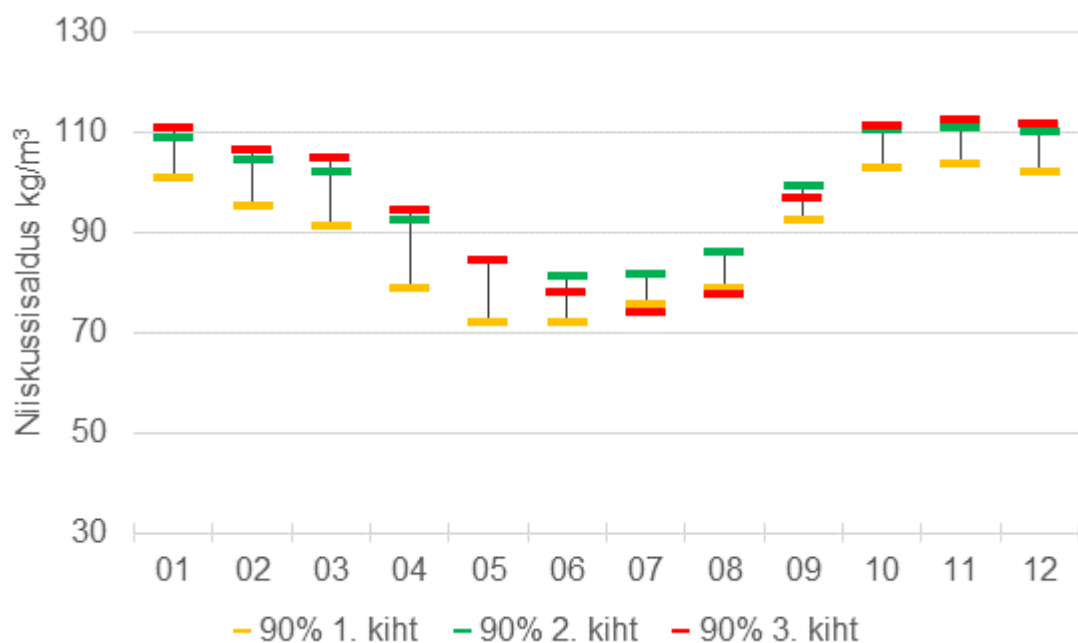
Joonis 6.8 Betooni niiskussisalduse minimaalne, maksimaalne, keskmine ja 90% protsentiili tase kuude lõikes aastatel 1970 - 2012

Betooni niiskussisalduse 90% protsentiili tasemed kopeerivad samuti keskmiste väärtuste kõikumist kuude lõikes ning annavad edasisteks arvutusteks prima aluse. Vastavate andmete põhjal on kriitilisemad kuud oktoober, november, detsember ja jaanuar, kus betooni niiskussisaldus võib tõusta kuni 110 kg/m³.

Täpsemaks analüüsiks on arvutatud niiskussisaldused ka välise betoonkooriku kolmes erinevas punktis (punktid 1, 2 ja 3), mis asuvad erinevatel sügavustel (vt Joonis 6.9). Erinevate kihtide niiskussisalduste 90% protsentiili väärtused on toodud Joonis 6.10-l. Kõrgeim 90% protsentiili järgne niiskussisaldus on kolmandas kihis ja novembrikuus – 112 kg/m³.



Joonis 6.9 Välisseina välimise betoonpaneeli arvutuspunktide 1, 2 ja 3 asukohad



Joonis 6.10 Betooni niiskussisalduse 90% protsentiili tasemed 1., 2. ja 3. kihis kuude lõikes (vt Joonis 6.9)

6.2 Lisasoojustamise moodulelementidega välistarindi niiskustehniline toimivus

6.2.1 Algtingimused

Moodulelementide niiskustehnilise toimivuse arvutuste lähteandmete valikul on lähtutud punktis 6.1 arvutatud kaldvihma mõju tulemustest raudbetoonist välisseinale. Raudbetoonpaneeli väliskooriku algseks niiskussisalduseks on valitud erinevate arvutuste jaoks kolm peamist suurust – 110 kg/m³, mis on iseloomulik 90% protsentiili tasemele kõige kriitilisemal kuul novembris, 90 kg/m³, mis on iseloomulik keskmisele tasemele kriitilisematel kuudel novembris,

detsembris ja jaanuaris ning 70 kg/m^3 , mis on iseloomulik hiliskevade ja suvekuude keskmistele tasemetele.

Betoonpaneeli sisemise betoonkooriku algse niiskussisalduse määramisel on lähtutud siseõhu temperatuurist ning suhtelisest niiskusest, mille alusel on valitud algseks niiskussisalduseks 45 kg/m^3 . Betoonkoorikute vaheliste soojustusmaterjalide ja lisasoojustuse moodulelemendi materjalide algne niiskussisaldus on määratud tarkvara Delphin poolt. Nimetatud materjalide algseks niiskussisaldus on tuletatud materjali algsest suhtelise niiskuse tasemest, milleks on $RH=65\%$.

Arvutuste sise- ja väliskliima parameetrite valikut on kirjeldatud punktides 5.7 ja 5.6 ning materjalide omadusi on kirjeldatud punktis 5.2. Kuna lisasoojustuse moodulelementide fassaadikatteks on tuulutusvahelise fassaadiplaat, siis on vihma ning päikesekiirguse mõju tarindisisele punktidele tühine. Nimetatud põhjusel on arvutused tehtud ilma vihma ja päikesekiirguse mõjuta.

Arvutustulemusi on hinnatud neljas asukohas. Asukohtade valiku põhjendus on toodud punktis 5.5 ning asukohad on näidatud Joonis 5.9-l.

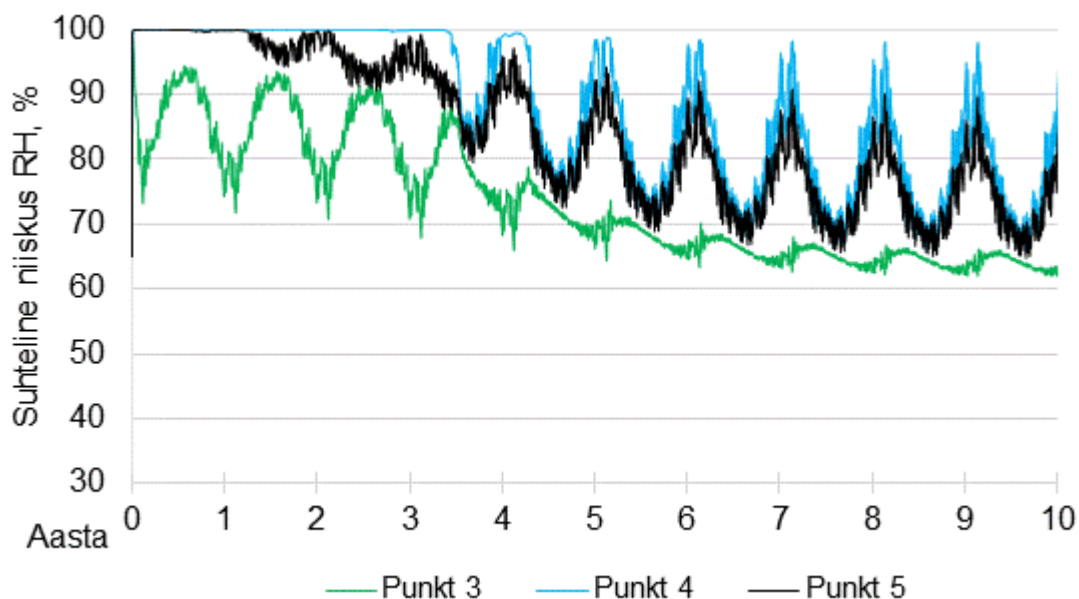
6.2.2 Elementide niiskustehnilise toimivuse arvutuste tulemused

PE aurutõkkele

Esimeseks arvutusvariandiks on valitud PE (polüetüleen) aurutõkkelelega element. Vastava konstruktsioonilise lahendusega moodulelement on ette nähtud projekteerija poolt Akadeemia tee 5a ühiselamu renoveerimisel. Aurutõkkelele on konstruktsioonis vajalik mitmel põhjusel. Esiteks on oluline tagada soojustatud tarindi õhupidavus, et projekteeritud soojusläbivus ka reaalselt renoveeritud tarindis paika peaks. Teiseks on väga suure tõenäosusega olemasolevas välisseinas erinevad praod, mistõttu on sisemisest niiskuskoormusest tingitud niiskusvoog suurem. See suurendab aga omakorda kondenseerumise ja hallituse tekke riski tarindi sees. Seetõttu on oluline paigaldada lisasoojustamise elemendi siseküljele aurutõkkelele.

Arvutused on läbi tehtud 90% protsentiili väärtusega kõige kriitilisemast betoonpaneeli väliskooriku algniiskusest – 110 kg/m^3 . Kuna PE-kile difusioonitakistus on väga kõrge, on tulemusi analüüsitud punktides 3, 4 ja 5 (vt

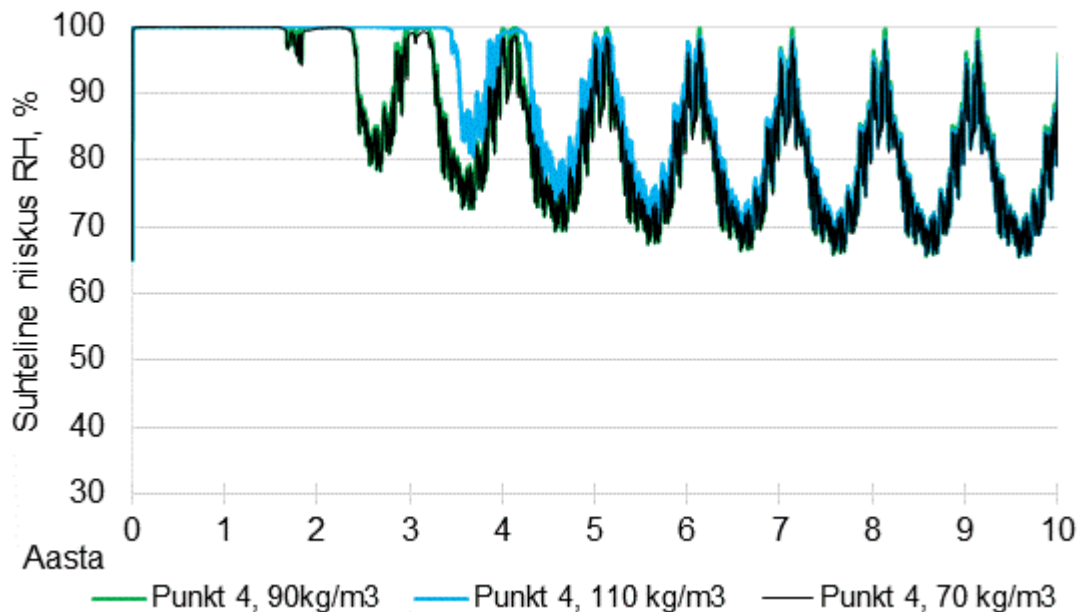
Joonis 5.9). Arvutusperioodi pikkuseks on valitud 10 aastat eesmärgiga hinnata niiskuse välja kuivamise kiirust. Arvutustulemused on kujutatud Joonis 6.11-l.



Joonis 6.11 Suhteline niiskus 10 aasta jooksul lisasoojustuse elemendi erinevates asukohtades: aurutõkkele taga (punkt 5), aurutõkkele taga puitprussi juures (punkt 4) ja paigaldusvilla siseküljel (punkt 3) (vt Joonis 5.9)

Tulemustest selgub, et kõige kriitilisem olukord on punktis 4, kus villa suhteline niiskus on ligikaudu kolme ja poole aasta vältel ligi 100%, kusjuures suhteline niiskus tõuseb 100% lähedale veel järgmistel aastatelgi. Ka punktis 5 on mineraalvilla suhteline niiskus ligi 100% pooleteise aasta jooksul. Selline olukord põhjustab aurutõkke taga mineraalvilla kihis hallituse kasvu ja veeauru kondenseerumise ning konstruktsiooni niiskustehniline toimivus pole tagatud.

Kuna punktis 4 on olukord kõige kriitilisem, on vastav punkt arvatud läbi ka betoonpaneeli väliskooriku algniiskustega 90 kg/m^3 ja 70 kg/m^3 iseloomustamiseks erinevaid võimalikke algolukordi elementide paigaldamise hetkel. Joonis 6.12 iseloomustab vastavaid arvutustulemusi.



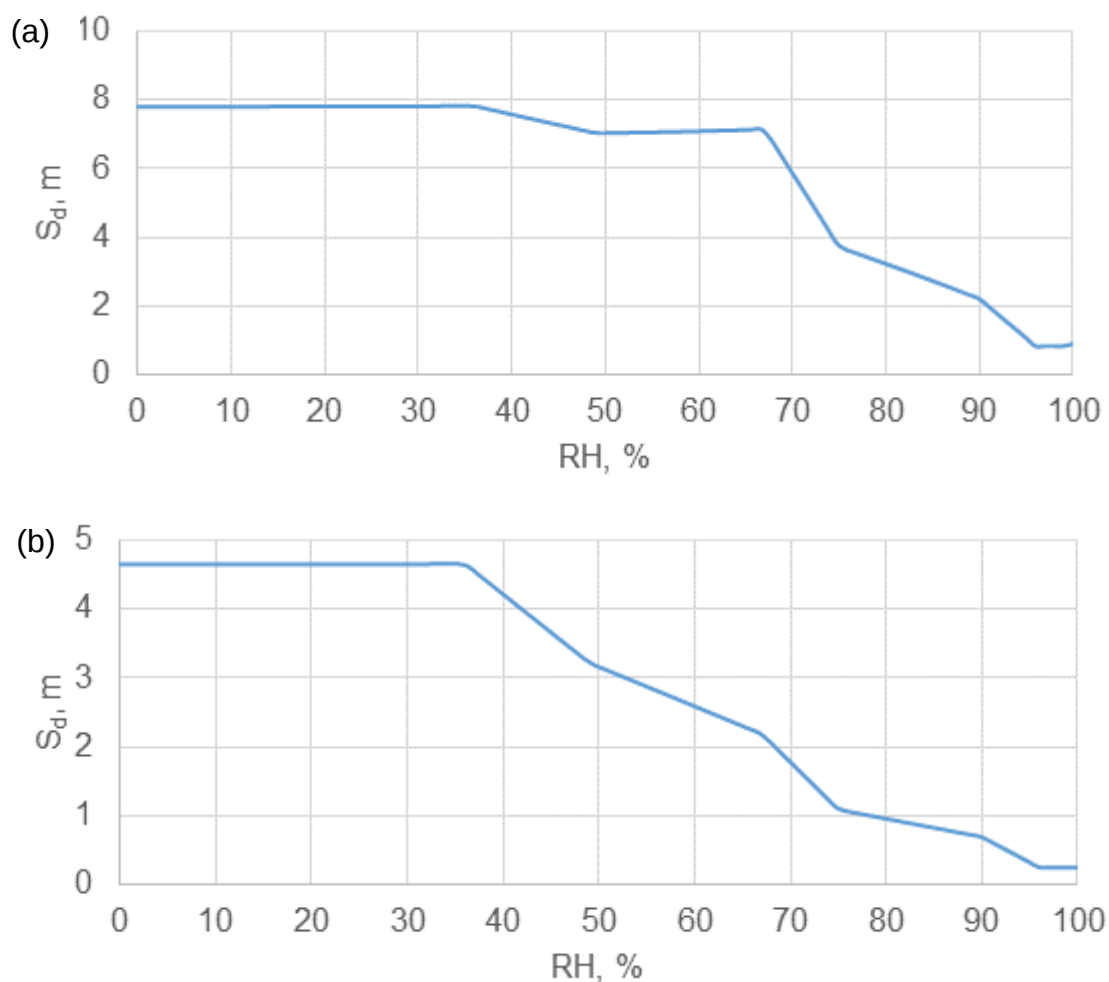
Joonis 6.12 Suhteline niiskus 10 aasta jooksul elemendi aurutõkkele taga puitprussi juures (punktis 4 vt. Joonis 5.9), erineva betooni algniiskusega arvutustulemused

Mõlema algniiskuse, nii 90 kg/m^3 kui ka 70 kg/m^3 juures on olukord endiselt kriitiline, kusjuures terve 10-aastase perioodi vältel on suhtelise niiskuse taseme erinevus mõlema algniiskuse puhul punktis 4 minimaalne. Aurutõkke taguse villa suhtelise niiskuse tase on esimesel 2,5 aastal pidevalt ligi 100%. Ka järgnevatel aastatel tõuseb suhteline niiskus lühemaajaliselt pea 100%-ni.

Muutuva veeaurutakistusega aurutõke

PE-aurutõkkele elemendi konstruktsioonis on aurutõkke tagune mineraalvilla kiht esimeste aastate jooksul pidevalt märg. Nimetatud probleemi üheks leevendamise võimaluseks on kasutada PE-aurutõkkele asemel muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekilet. Muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekilena on kasutatud kahte erinevat alternatiivi, kus esimese difusioonitakistus varieerub vahemikus $0,25 \text{ m} < S_d < 25 \text{ m}$ ning teisel $0,2 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$. Muutuva difusioonitakistusega aurutõkkele tööpõhimõtte seisneb selles, et kui ümbritsev suhtelise niiskuse tase tõuseb, muutub kile difusioonitakistus madalamaks ning kui suhtelise niiskuse tase langeb, muutub difusioonitakistus kõrgemaks. Seega, kui vaadeldavas soojustuselemendis aurutõkkele taga tõuseb suhtelise niiskuse tase kõrgeks, lubab kile üleliigselt niiskusel läbi elemendi välja kuivada. Tegemist on kindlasti parema alternatiiviga, kui aurutõkkekileta lahendus, kuna tarindisse liikuv niiskusvoog on kontrollitav. Ümbritseva keskkonna suhtelise niiskuse ja

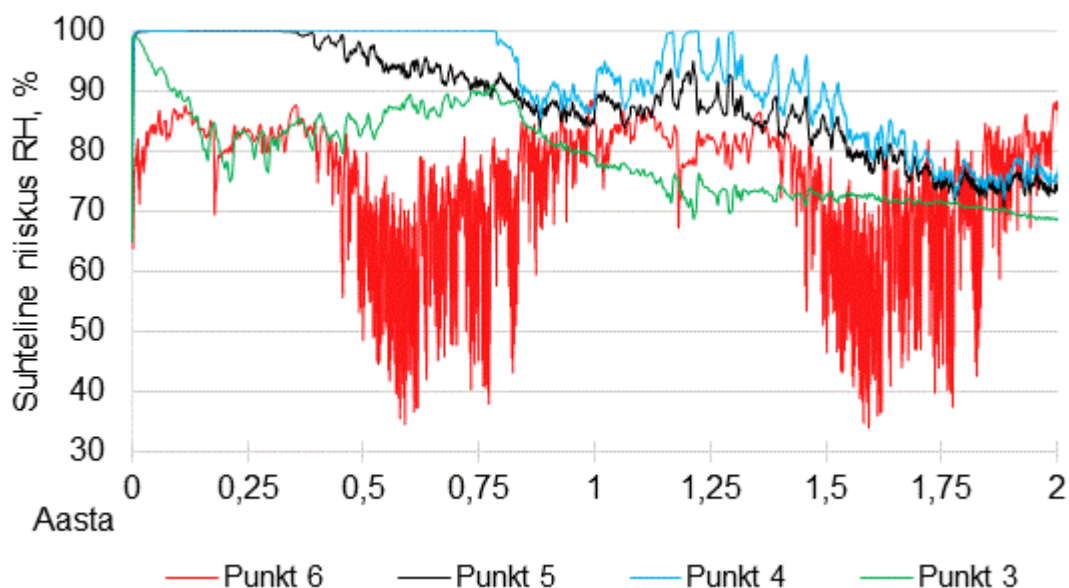
aurutõkkele difusioonitakistuse suhet iseloomustab Joonis 6.13, kus on kujutatud nimetatud materjali mõlemat alternatiivi „Intello“ (a) ja „Isover Vario KM Duplex“ (b). Joonisel kujutatud $S_d(RH)$ funktsioonid on koostatud laboratoorsete mõõtmistulemuste alusel Dresdeni Tehnikaülikoolis.



Joonis 6.13 Arvutustes kasutatud muutuva veeaurutakistusega aurutõkkelede „Intello“ (a) ja „Isover Vario KM Duplex“ (b) suhtelise difusioonitakistuse ja ümbritseva keskkonna suhtelise niiskuse suhe, Dresdeni Tehnikaülikooli laboratoorsed mõõtmistulemused

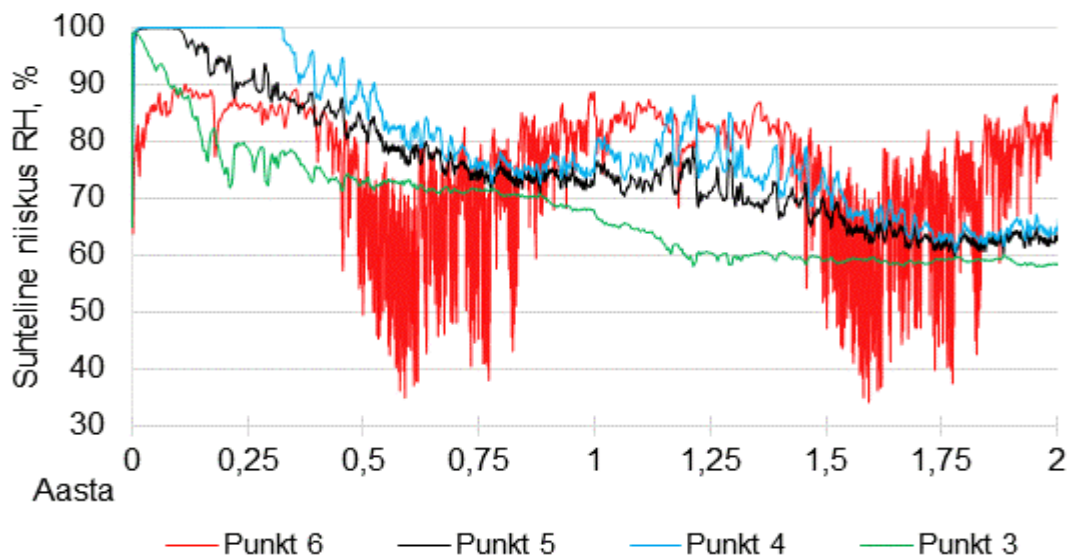
Muutuva veeaurutakistusega aurutõkkeledega arvutusvariandis võib tekkida probleeme ka punktis 6 – kui aurutõkke kile laseb rohkem veeauru läbi, võib punktis 6 tuuletõkke taga tõusta suhtelise niiskuse tase kõrgemaks, mis omakorda soodustab hallituse teket. Seetõttu on käesolevas arvutusvariandis vaatluse all ka punkt 6.

Arvutusperioodi pikkuseks on valitud kaks aastat, et hinnata niiskuse välja kuivamise kiirust punktides 4 ja 5. Joonis 6.14 iseloomustab vastavaid arvutustulemusi aurutõkkelega „Intello“.



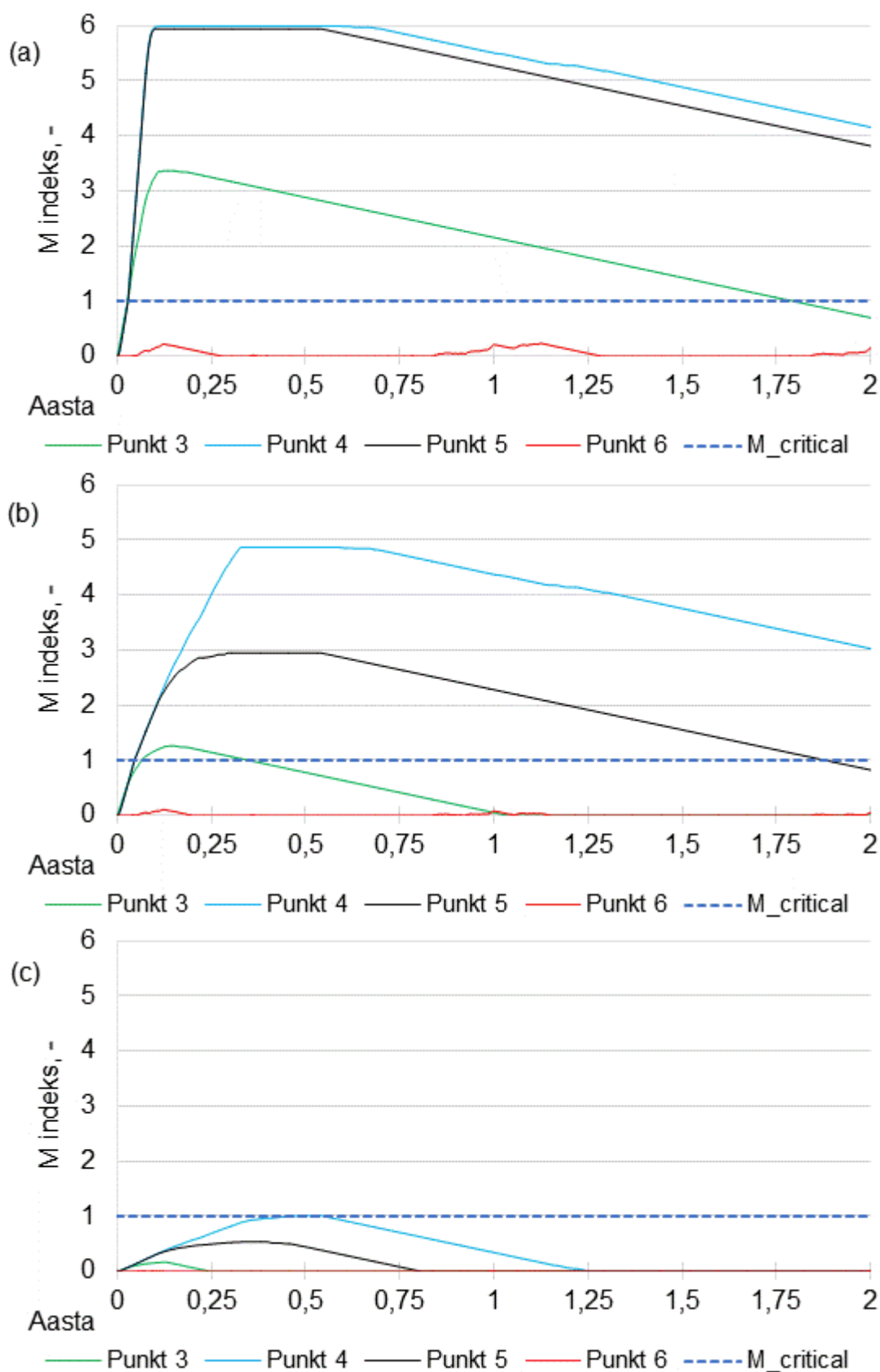
Joonis 6.14 Suhteline niiskus 2 aasta jooksul muutuva veeaurutakistusega aurutõkkega „Intello“ elemendi erinevates asukohtades: tuuletõkke taga (punkt 6), aurutõkkele taga (punkt 5), aurutõkkele taga puitprussi juures (punkt 4) ja paigaldusvilla siseküljel (punkt 3) (punktide asukohad vt Joonis 5.9)

Punktis 4 on olukord kõige kriitilisem, kus suhtelise niiskuse tase on pea aasta vältel 100% ligidal ning tõuseb sama kõrgele ka teise aasta kriitilistel kuudel. Ka punktides 3 ja 5 on suhtelise niiskuse tase üle 80% võrdlemisi pikalt – esimesel juhul ligikaudu aasta ning teisel juhul ligikaudu poolteist aastat.



Joonis 6.15 Suhteline niiskus 2 aasta jooksul muutuva veeaurutakistusega aurutõkkega „Isover Vario KM Duplex“ elemendi erinevates asukohtades: tuuletõkke taga (punkt 6), aurutõkkele taga (punkt 5), aurutõkkele taga puitprussi juures (punkt 4) ja paigaldusvilla siseküljel (punkt 3) (punktide asukohad vt Joonis 5.9)

„Isover Vario KM Duplex“ aurutõkkega soojustuselemendi arvutustulemustest selgub, et nimetatud kile kasutamisel kuivab niiskus punktide 3, 4 ja 5 oluliselt kiiremini välja, kui PE aurutõkkele variandi või „Intello“ aurutõkkega alternatiivi puhul. Punktis 6 tõuseb suhteline niiskus kõige kõrgemale. Hindamaks olukorda hallituse kasvu seisukohast on arvatud vastavates kohtades ka hallitusindeksite väärtused. Vastavad arvutused on tehtud Soome teadlaste poolt loodud matemaatilise hallitusmodeli alusel. Nimetatud hallitusmudel on täpsemalt juttu punktis 5.9 ning muutuva veeaurutakistusega aurutõkkele elemendi hallitusindeksid eelpool toodud asukohtades on näha Joonis 6.16-l.



Joonis 6.16 Hallitusindeks erinevates asukohtades (vt Joonis 5.9) ja erineva hallituse kasvu tundlikkuse juures: (a) väga tundlik (nt puitmaterjal), (b) tundlik (nt puidupõhised plaadid) ja (c) keskmiselt vastupidav (nt tsemendi baasil tooted, mineraalvill)

Tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamiseks on määratud kriitiline hallitusindeksi tase $M_{crit} = 1,0$. Vastava taseme juures võib esineda küll esimesi hallituse kasvu ilminguid, kuid need on tühiselt väiksed ning kui konstruktsioon hallituse kasvuks soodsates keskkonnatingimustes pidevalt ei viibi, siis hallitus materjalis levida ei tohiks; pigem toimub hallituse järk-järguline taandumine.

Elemendi materjalidele on antud esimeses arvutuses hallituse kasvu tundlikkuse klassiks „väga tundlik“, mis on iseloomulik materjalidele, mis sisaldavad palju bioloogiliseks kasvuks vajalikke toitaineid. Selliseks materjaliks on näiteks männipuit. Joonis 6.16-I on näha, et väga tundliku materjali puhul hakkab hallitus levima nii punktis 3, 4 kui ka 5 – ühesõnaga terve aurutõkkele tagune hallitab suure tõenäosusega täies ulatuses.

Teises arvutuses on valitud tundlikkuse klassiks „tundlik“, mis on iseloomulik näiteks hõõveldatud puidule ja erinevatele puidupõhistele plaatidele. Ka siin on Joonis 6.16-I näha, et hallitusindeks on punktis 4 lühiajaliselt pea 5,0, mis tähendab rohket silmaga nähtavat hallituse kasvu, kus üle 50% materjali pinnast on hallitusega kaetud.

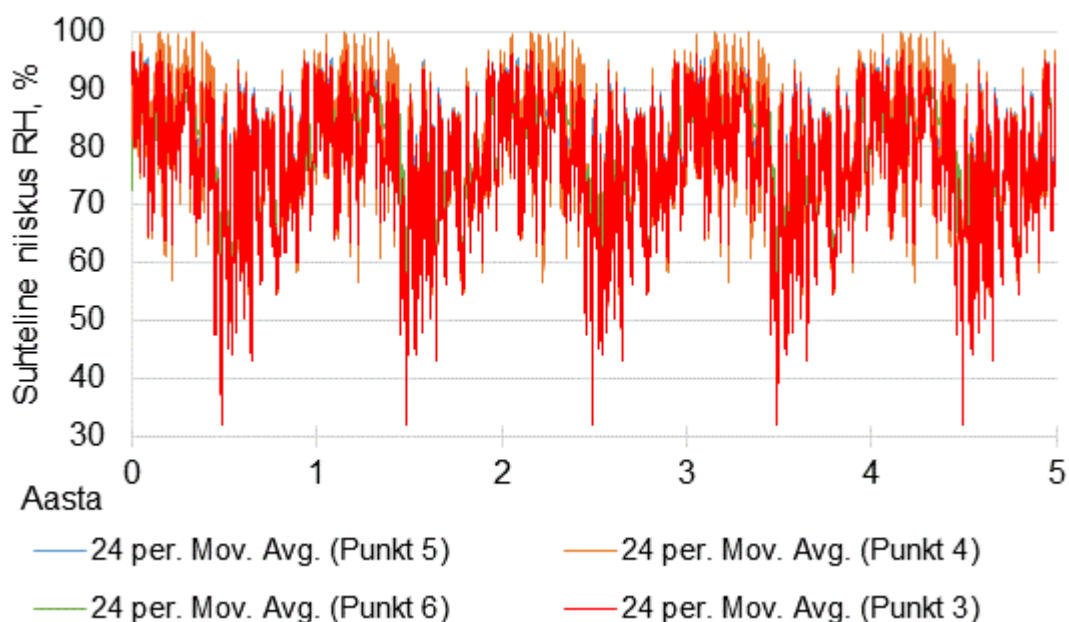
Kolmandas arvutuses on valitud tundlikkuse klassiks „keskmiselt vastupidav“, mis on iseloomulik tsemendi- ja plastipõhistele materjalidele ning mineraalvilladele. Sellises olukorras jääb hallitusindeksi tase kõikides punktides alla varem määratud kriitilise taseme $M_{crit} = 1,0$. Kõige riskantsem asukoht on endiselt punkt 4, kuid arvutustulemuste järgi jääb selles punktis hallitusindeksi maksimumtase alla 1,0 ning ligikaudu 15 kuu möödudes langeb hallitusindeks nulli.

Hallitusindeksi taandumise koefitsent C_{mat} on kõigi kolme arvutuse puhul valitud $C_{mat} = 0,25$, mis on iseloomulik tagasihoidlikule hallituse taandumisele. Kuna täpsed juhised koefitsendi valikuks puuduvad, on lähtutud pigem kriitilisema taandumiskiirusega koefitsendist. Kuna vaadeldavad punktid 3, 4, 5 ja 6 asuvad kõik mineraalvilla erinevates kihtides, siis võib väita, et tundlikkuse klass „keskmiselt vastupidav“ on tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamiseks kõige asjakohasem.

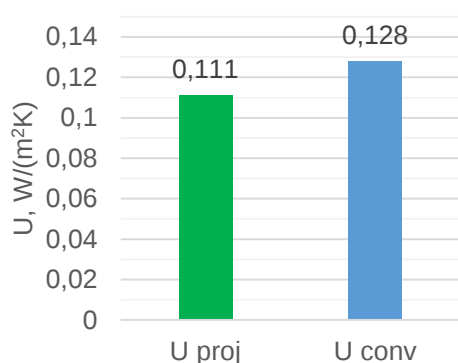
Soojustuspaneeli taguse konvektsiooniga olukord

Ühe võimaliku alternatiivina on arvutatud olukord, kus olemasoleva raudbetoonist välisseinapaneeli ja paigaldusvilla vahel esineb rõhkude erinevusest tingitud

konvektsioon. Idee pärineb analoogsetest Sõpruse puistee 244 elamu arvutustest. Konvektsiooni põhjustav rõhkude erinevus on võetud Sõpruse puistee 244 mudeli lähteandmetest ning õhkvahe laiuseks on valitud analoogselt Sõpruse puistee 244 mudelile 1...10 mm. Vastavaid arvutustulemusi iseloomustab Joonis 6.17, kus on kujutatud vaadeldavate punktide 24 tunni keskmised suhtelise niiskuse tasemed. Kõigi nelja vaadeldava punkti suhtelise niiskuse tasemed käituvad väga sarnaselt.



Joonis 6.17 Suhtelise niiskuse 24 h keskmised väärtused 5 aasta jooksul PE-kilega lisasoojustuse elemendi erinevates asukohtades (vt Joonis 5.9), konvektsiooni esinemine tarindis

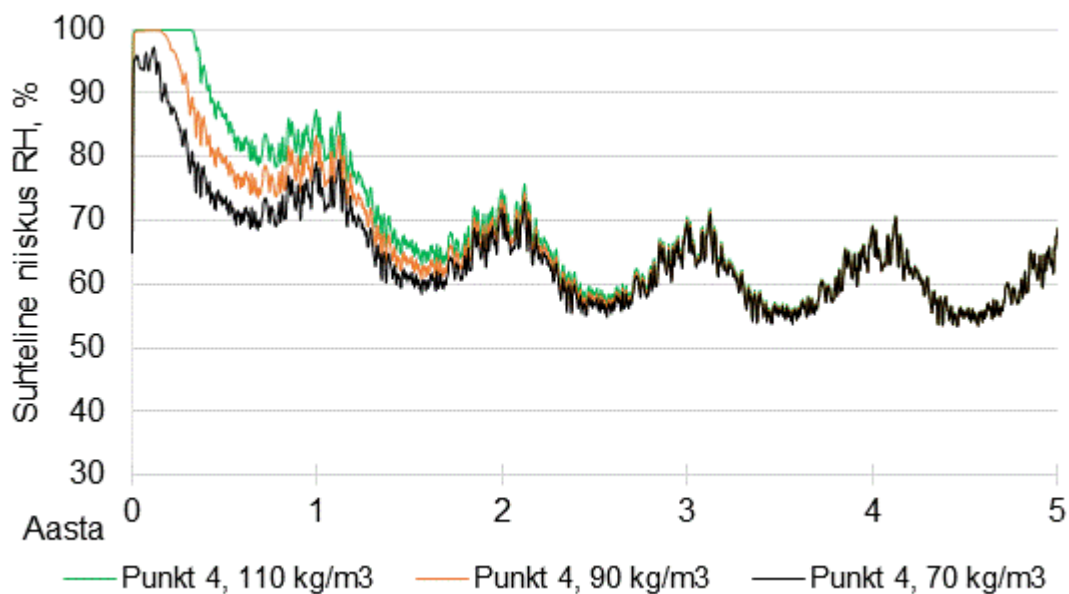


Joonis 6.18 Soojuslähivuse erinevus konvektsiooni esinemisel tarindis

Kui projekteeritud tarindi soojuslähivus on $U = 0,111 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, siis konvektsiooniga tarindi puhul on soojuslähivus suurem – $U_{\text{conv}} = 0,128 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Joonis 6.18 illustreerib soojuslähivuse erinevust konvektsiooni esinemisel tarindis.

OSB plaadi kasutamine aurutõkkena

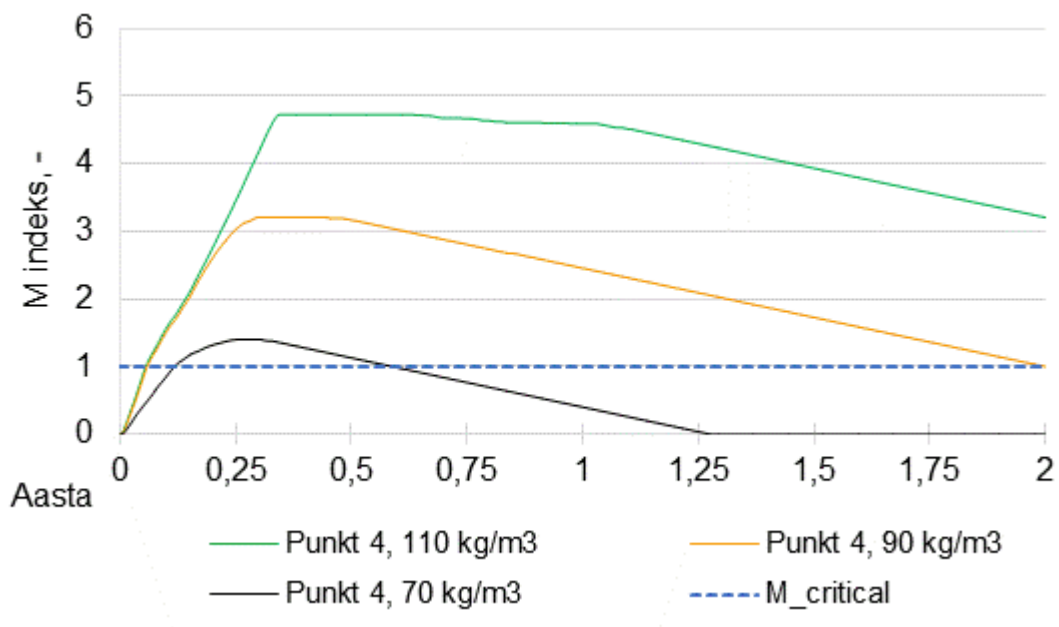
Alternatiivse variandina on tehtud niiskustehnilised arvutused ka sellise lisasoojustuse moodulelemendi konstruktsiooniga, kus aurutõkkekihina on tarindis kasutusel OSB plaat. OSB plaadi peamiseks eeliseks on võimalus kasutada seda materjali ka konstruktiivse elemendina, mis tagab transpordil või montaažil vajaliku soojustuselemendi külgsuunalise jäikuse. Kuna varasemates arvutustulemustes selgus, et aurutõkkekihi sisepinnal puitprussi taga olev punkt 4 on niiskustehnilise toimivuse seisukohast kõige kriitilisem, on käesoleva konstruktsiooniga elemendi puhul vaatluse all nimetatud asukoht. Suhtelise niiskuse tasemed punktis 4 erinevate betoonpaneeli väliskooriku algniiskuse tasemete juures on näidatud Joonis 6.19-I.



Joonis 6.19 Suhteline niiskus 5 aasta jooksul elemendi aurutõkkekihi (OSB plaadi) taga puitprussi juures, erineva betooni algniiskusega arvutustulemused

110 kg/m³ algniiskuse juures on suhtelise niiskuse tase punktis 4 üle 80% ligikaudu aasta. 90 kg/m³ algniiskuse puhul langeb suhtelise niiskuse tase küll ligikaudu pooleks aastaks alla 80%, kuid esimese aasta lõpus tõuseb uuesti üle 80% taseme. Madalaima algniiskuse taseme 70 kg/m³ juures langeb suhteline niiskus alla 80% juba ligikaudu nelja kuu möödudes ning hiljem enam üle 80% ei tõuse. Kõigi erinevate betooni algniiskuse tasemete juures muutub suhtelise niiskuse tase punktis 4 peaaegu võrdseks kahe aasta möödudes.

Kuna puidupõhistel materjalidel on 80% suhtelise niiskuse tase hallituse kasvuks vajaliku kriitilise algniiskuse tase, on tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamiseks arvatud ka hallitusindeksite väärtused. Vastavad tulemused on kujutatud Joonis 6.20-l. OSB plaadi puhul on tegemist puidupõhise materjaliga ning seetõttu on hallitusindeksi arvutamisel lähtutud tundlikust (inglise keeles *sensitive*) materjaliklassist. Jooniselt on näha, et nii 110 kg/m³ kui ka 90 kg/m³ algniiskuse taseme juures on hallitusindeksi väärtus aurutõkkekihi taga punktis 4 kahe aasta jooksul üle 1,0. Algniiskuse 70 kg/m³ juures on hallitusindeksi tase ligikaudu poole aasta pikkuse perioodi jooksul vahemikus 1,0 – 1,5, kuid pärast seda hallitus taandub tasemeni 0.



Joonis 6.20 Hallitusindeks M aurutõkkekihi sisepinnal puitprussi taga punktis 4 erinevate betooni algniiskuste juures

7 Tulemuste hindamine

7.1 Raudbetoon välisseinapaneeli välimise betoonkooriku niiskussisalduse hindamine

Käesolevas lõputöös on raudbetoonist välisseinapaneeli niiskussisalduse hindamiseks analüüsitud EMHI 42 aasta kliimaandmeid ning arvutatud vastavate kliimaandmete põhjal fassaadile mõjuvad kaldvihma koormused ning raudbetoonpaneeli väliskooriku niiskussisaldused.

Betooni niiskussisaldus osutus kõrgeimaks hilissügisel ja talvel. Vastavad tulemused on igati ootuspärased, kuna hilissügisel ja talvel on temperatuurid oluliselt madalamad ning päikesekiirguse mõju tunduvalt väiksem, kui kevadel, suvel või sügise alguses. Madalamate temperatuuride ja nõrgema päikesekiirguse korral on niiskuse välja kuivamine betooni pooridest aeglasem, mis on betooni kõrgema niiskussisalduse peamisi põhjuseid. Päikesekiirguse mõju illustreerib ilmekalt ka Joonis 6.1, kus on näha, et nii hajusa kui ka otsese päikesekiirguse mõjumisel on betooni niiskussisaldus suvekuudel, kui päikesekiirgus on intensiivsem, märkimisväärselt madalam. Seetõttu on edasistes arvutustes keskendutud eelkõige kõige kriitilisemate kuude – oktoobri, novembri, detsembri ja jaanuari – andmetele ja arvutustulemustele. Päikesekiirguse juures on edasistes arvutustes loobutud otsese päikesekiirguse mõjust hoone fassaadile. Kui hajus päikesekiirgus mõjub välispiiretele igas olukorras, siis otsese päikesekiirguse eest võib hoone välispiire varjatud olla. Sellisel juhul ei kajastaks arvutustulemused tegelikku kriitilist olukorda ja seetõttu ongi vastavast kiirgusest loobutud.

Betooni niiskussisalduse hindamiseks ilmakaarte suhtes erineva orientatsiooniga välispiirete korral on analüüsitud 42 aasta EMHI meteoroloogiajaama mõõtetulemusi. Mõõtetulemuste summaarse tuulesuundade esinemissageduse alusel võib öelda, et Eestis on määravad lõuna-, lääne- ja edelatuuled. Niiskussisaldus sõltub aga eelkõige kaldvihma koormusest, mistõttu peavad samaaegselt olema esindatud sademed ja vastavasuunaline tuul. ISO standardi järgi arvutatud kaldvihma mõju on endiselt suurim lõuna-, lääne- ja edela ilmakaares, kus fassaadile mõjuvad kaldvihma koormused on kuni viis korda kõrgemad võrreldes näiteks põhjasuunaga. Nii summaarse kui ka kuudepõhiste kaldvihma rooside jooniselt on näha, et ilmakaarte osas on määravaimaks

edelasuund. Seetõttu on kõik edasised arvutused tehtud edelasuunalise fassaadipinna suhtes. Lõuna-, lääne- ja edelasuuna suurem mõju on saadud 42 aasta keskmiste arvutustulemuste põhjal. Konkreetse hoone välistarindite niiskussisalduse hindamisel tuleb kindlasti lähtuda ka muust vastavale hoonele omapärasest spetsiifikast – varjuliste kohtade olemasolu ja suurus fassaadil, ümbritseva keskkonna mõju (teiste hoonete ja kõrghaljastuse kaugus hoonest), meretuulte mõju jmt.

Kaldvihma mõju arvestamiseks betooni niiskussisalduse arvutusel on betoonpaneeli väliskooriku niiskussisaldus arvutatud 42 aasta jooksul ilma vihmata olukorras. Viimasel juhul on betooni niiskussisaldus oluliselt madalam. Näiteks ühes kriitilisemas kuus detsembris on vastav erinevus suurim – kaldvihmaga arvutustulemuste korral on 42 aasta detsembrikuu keskmine niiskussisaldus 90 kg/m^3 , ilma vihmata arvutuste korral aga vaid 55 kg/m^3 . Seega on betooni niiskussisalduste erinevus märkimisväärne - erinevus ulatub pea 40%-ni. Siit võib järeldada, et kaldvihma koormus avaldab fassaadipaneeli niiskussisaldusele väga suurt mõju. Ka Joonis 6.7 kinnitab viimast väidet. Vastavate arvutuste järgi suureneb betooni niiskussisaldus vihmase ilma korral hüppeliselt ligikaudu $20 - 40 \text{ kg/m}^3$ ning pärast seda langeb järk-järgult keskmise tasemeni.

Käesoleva uurimuse kaldvihma arvutuste peamiseks eesmärgiks on määrata betoonpaneelide väliskooriku algniiskuse tase kriitilisematel kuudel oktoobris, novembris, detsembris ja jaanuaris. Selleks on arvutatud väliskooriku niiskussisaldus 42 aasta jooksul vastavate välis- ja sisekliima andmetega.

Arvutustulemuste keskmised väärtused on igati ootuspärased. 42 aasta kõigi aastate keskmised betooni niiskussisaldused on kriitilisematel kuudel 90 kg/m^3 , mis tähendab, et betooni suhtelise niiskuse tase on ligikaudu 97% ning vähem kriitilisematel kuudel 58 kg/m^3 , mistähendab, et betooni suhtelise niiskuse tase on ligikaudu 80%. Betooni niiskussisalduse absoluutsed miinimumväärtused 42 aasta jooksul kuude lõikes kopeerivad keskmiste väärtuste kõikumist. Miinimumväärtused kõiguvad vahemikus $35 - 63 \text{ kg/m}^3$, millele vastav suhtelise niiskuse vahemik on ligikaudu 50 – 85%. Siit järeldub, et ka kriitilisematel kuudel võib niiskussisaldus olla võrdlemisi madal, mis on tingitud tõenäoliselt erakorralistest soojalainetest ja/või pikematest sademetevaesetest perioodidest

hilissügisel või talvel. Selliseid olukordi võib Eesti kliimas 42 aasta pikkuse perioodi jooksul suure tõenäosusega ette tulla.

Arvutustulemuste juures on mõnevõrra üllatav, et betooni niiskussisalduse absoluutsed maksimumsuurused 42 aasta jooksul kuude lõikes on ligikaudu võrdsed, ulatudes kuni 136 – 137 kg/m³. Sellisele niiskussisaldusele vastav suhtelise niiskuse tase on 99 – 100%, mis tähendab, et betoon on pea täielikult märgunud. Vaid mais ja juunis on maksimaalsed väärtused mõnevõrra madalamad, vastavalt 129 kg/m³ ja 123 kg/m³ ning vastavate suhtelise niiskuse tasemetega 98 – 99%. Kuna tegemist on 42 aasta pikkuse perioodi absoluutsete maksimumväärtustega, siis ei kujuta graafikul olevad maksimumväärtused ühe konkreetse aasta tulemusi, vaid arvutusperioodi kõige kriitilisemaid tulemusi. Sellegipoolest selgub arvutustulemustest, et ka kuivemal kevadisel ja suvisel perioodil võib betoonpaneeli väliskooriku suhtelise niiskuse tase tõusta pea 100%-ni. See on tingitud tõenäoliselt pikematest (> 24 h) vihma perioodidest, mida võib Eesti kliimas ette tulla ka suvekuudel.

Arvutustulemuste absoluutsed miinimum- ja maksimumväärtused erinevad teineteisest väga suurel määral. Seetõttu on keeruline ja ebaratsionaalne lähtuda tarindi ehitusfüüsikalise turvalisuse hindamisel nendest väärtustest. Ehitusfüüsikalistes arvutustes peetakse üldjuhul kriitiliseks tasemeks 90% protsentiili taset, mis tähendab, et 90% juhtudest on uuritav tarind ehitusfüüsikaliselt turvaline. Vastavad tasemed kopeerivad samuti arvutustulemuste keskmisi väärtusi kuude lõikes olles keskmistest väärtustest 14 – 28% kõrgemad. Kriitilisemate kuude betooni niiskussisalduse 90% protsentiili tase ulatub 110 kg/m³ ning kuivemate kuude niiskussisalduse 90% protsentiili tase 75 kg/m³. Esimesel juhul on vastav betooni suhteline niiskus ligikaudu 99% ja teisel juhul ligikaudu 85%. Nende arvutustulemuste alusel tuleks hinnata lisasoojustatava tarindi niiskustehnilist turvalisust.

Lisaks kaldvihmale mõjutavad fassaadipaneeli niiskussisaldust ka välised temperatuurid ja suhteline niiskus. Esimesest sõltub soojuskiirguse intensiivsus ning teisest veeauru osarõhk väliskliima poolel. Soojuskiirguse intensiivsusest sõltub betooni poorides oleva vee väljakuivamise kiirus ja veeauru osarõhust veeauru difusioon ning pooride pinnal mõjuv pinddifusioon. Need mõjutavad betoonpaneeli väliskooriku niiskussisaldust kooriku erinevates kihtides. Seetõttu

on arvatud betoonpaneeli väliskooriku niiskussisalduse 90% protsentiili tasemed kolmes võrdse paksusega kihis eraldi. Välimine kiht on aastaringelt pea eranditult kõige kuivem, kuna vastavat kihti mõjutab päikesekiirgus kõige rohkem. Kõige niiskem on olukord kolmandas, kõige seesmises kihis, kust on niiskuse välja kuivamine kõige aeganõudvam. Selle kihi maksimaalne 90% protsentiili tasemele vastav niiskussisaldus on 112 kg/m^3 , millele vastav suhtelise niiskuse tase on ligikaudu 99 – 100%. Keskmise kihi niiskussisaldus on kriitilisematel kuudel paar protsenti madalam ning välimise kihi niiskussisaldus ligikaudu 10% madalam. Vastavate arvutustulemuste põhjal võib samuti hinnata lisasoojustatava tarindi niiskustehnilist turvalisust.

Eelpool toodud arvutustulemusi kasutades tuleb meeles pidada, et arvutustes on kaldvihma intensiivsus arvatud kriitiliseimas asukohas - mitmekorruselise lamekatusega hoone ülemises servas ning edelasuunalisel välisseinal, kuhu mõjub üks intensiivsemaid kaldvihma koormusi. Nimetatud arvutuste algingimused on aga igati õigustatud, kuna tarindite lisasoojustamine tehakse üldjuhul tervel fassaadipinnal korraga, mistõttu peab tarindite niiskustehniline toimivus olema tagatud kõigil asukohtadel hoone fassaadil. Siiski võib tegelik betooni niiskussisaldus olla eelpool toodud 90% protsentiili tasemest nii kõrgem kui madalam. Seetõttu, kui soovitakse täpsele reaalsele olukorrale vastavaid tulemusi, on soovituslik puurida huvi pakkuva hoone betoonpaneeli väliskoorikust proovikehad ning määrata tegelik niiskussisaldus proovikeha mõõtmistel laboris.

Betoonpaneelidest välisseinte niiskussisalduse taset ja selle kõikumisi Eesti kliimas pole varem uuritud, mistõttu on keeruline käesoleva töö tulemuste võrdlemine teiste teadlaste, õppejõudude või tudengite tööde tulemustega. Kaldvihma koormuste arvutamisel olid arvutuste algandmed kõik tunni ajase intervalliga ja sellest tulenevalt on ka kaldvihma koormus arvatud tunni ajase intervalliga. Jael Kotkas on oma lõputöös aga järeldanud, et tunni aja pikkune ajaresolutsioon võib anda arvestatavalt erinevaid tulemusi kaldvihma intensiivsuse arvutamisel võrreldes lühema intervalliga arvutustulemustega. Meteoroloogiajaama sademete mõõtetulemused kirjeldavad sademete hulka tunni aja jooksul, mis näiteks 10-minutilise intervalli puhul võib tähendada ühtlast vihmakoormust terve tunni vältel või ühte 10-minutilist paduvihma hoogu, kus ülejäänud 50 minuti jooksul oli tegelik olukord ilma sademeteta. Suurema

ajaresolutsiooniga tehtud arvutused siiski pigem ülehindavad arvutustulemusi, kuna pikk ja ühtlane vihmakoormus tõstab betooni niiskussisaldust oluliselt rohkem, kui üks lühike paduvihm, kus suur osa veest jookseb lihtsalt mööda fassaadi maha.

7.2 Lisasoojustamise moodulelementidega välistarindi niiskustehniline toimivus

Lisasoojustamise moodulelementide niiskustehnilise toimivuse hindamisel on lähtutud raudbetoonist välisseinapaneeli niiskussisalduse arvutustulemustest. Niiskustehnilist toimivust on hinnatud erinevate algniiskuste korral – 110 kg/m³, mis vastab 90% protsentiili tasemele kõige kriitilisemal kuul novembris, 90 kg/m³, mis vastab keskmisele tasemele kõige kriitilisemal kuul novembris ja 70 kg/m³, mis vastab hiliskevade ja suve keskmisele betooni niiskussisalduse tasemele.

Esimese arvutusvariandi konstruktsiooniline lahendus on võetud Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimise projekti alusel, kus lisasoojustuse moodulelementide sisepinnale on ette nähtud kõrge difusioonitakistusega PE-aurutõkkele. Ootuspäraselt on algniiskuse 110 kg/m³ korral olukord mõlemas punktis (punktid 4 ja 5) paigaldusvilla aurutõkkele poolses kihis üle kriitilise taseme. Suhteline niiskus on esimese paari aasta jooksul pea pidevalt 100%, mis tähendab, et paigaldusvill aurutõkke kile taga on konstantselt märg. Selline tarind pole juba veeauru kondenseerumise vältimise seisukohast niiskustehniliselt turvaline. Nii pikaajaline kõrge suhtelise niiskuse tase paigaldusvilla kihtides põhjustab kindlasti ka hallituse kasvu villakihis ning võib põhjustada materjalide lagunemist.

Punktide omavahelises võrdluses selgub, et kõige kriitilisem on olukord punktis 4. Punktid 4 ja 5 on võrreldes punkt 3-ga kriitilisemad eelkõige seetõttu, et seal on mõnevõrra madalam temperatuur ning seega kõrgem suhtelise niiskuse tase. Mõlemad punktid asuvad kõrge difusioonitakistusega aurutõkkele taga, mistõttu „koguneb“ niiskus eelkõige just kiletagustesse kihtidesse. Punkt 4 on võrreldes punkt 5-ga kriitilisem seetõttu, et asub soojustuselemendi puitprussi taga, mistõttu on seal veidi madalam temperatuur ning seetõttu kõrgem suhtelise niiskuse tase.

Aurutõket ei saa soojustuselementide konstruktsioonist aga ära jätta, kuna sellisel juhul kuivab suurem osa betoonpaneelis olevast niiskusest välja läbi lisasoojustuse

moodulelemendi. Selline lahendus võib probleeme tekitada punktis 6, kus temperatuur on külmemal ajal oluliselt madalam ning kus võib seetõttu esineda veeauru kondenseerumist või hallituse teket. Ilma aurutõkkekileta konstruktsiooni puhul on läbi soojustuselemendi liikuv niiskusvoog põhimõtteliselt kontrollimatu ning kui siseruumides peaks tekkima mingil põhjusel suurem niiskuskooormus või esineb olemasolevas välisseinas näiteks pragu, suureneb läbi soojustuselemendi liikuv niiskusvoog veelgi. Küll võib aga öelda, et kui kümne aasta pikkuse perioodi jooksul PE-aurutõkkekilega konstruktsiooni puhul suhtelise niiskuse tase punktides 4 ja 5 nii aeglaselt väheneb, siis betoonpaneelis olev algniiskus läbi olemasoleva betoonpaneeli enda siseruumidesse välja ei kuiva.

Alternatiivse variandina on arvutatud variant, kus PE-aurutõkkekile asemel on kasutatud muutuva veeaurutakistusega aurutõkkeid ($0,25\text{m} < S_d < 25\text{m}$ ning $0,2\text{m} < S_d < 5\text{m}$). Selliste kilede suhteline difusioonitakistus on kõrge ümbritseva suhtelise niiskuse korral madal ning suhtelise niiskuse taseme alanedes suureneb aurutõkkekilede difusioonitakistus. Muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekile kasutamisega kaasneb kindlasti ka suurem niiskusvoog läbi soojustuselemendi, mistõttu on käesoleva arvutusvariandi puhul vaatluse all ka tuuletõkke taga olev arvutuspunkt 6. Arvutustulemuste järgi on ootuspäraselt sellise variandi puhul paigaldusvilla kihis suhtelise niiskuse tase madalam, kui PE aurutõkkekilega konstruktsiooni puhul.

Muutuva veeaurutakistusega aurutõkkega „Intello“ soojustuselemendi korral toimub ligikaudu esimese 1 – 1,5 aasta jooksul veeauru kondenseerumine aurutõkke taga paigaldusvilla kihis. Seetõttu ei saa pidada nimetatud aurutõkkega soojustuselementi töötavaks lahenduseks. Alternatiivse muutuva veeaurutakistusega aurutõkkega soojustuselemendis on kondenseerumise oht oluliselt väiksem – paigaldusvilla kihis punktis 4 on suhteline niiskus 100% lähedal esimese 3 kuu jooksul. Seetõttu on tarindi niiskustehnilist toimivust kontrollitud ka hallitusindeksi mudeli alusel. Hallitusindeksi mudeli juures on kriitiliseks tasemeks võetud $M = 1,0$, mis tähendab, et materjali pinnal võivad esineda küll mikroskoobiga nähtavad väikesed üksikud hallituse kolded, kuid hallituse laialdasemat kasvu ei esine. Vastavaid arvutustulemusi hinnates võib öelda, et keskmiselt vastupidavate materjalide kasutamisel hallituse kasvu ei esine – hallitusindeksi tase ei ole vaadeldava perioodi jooksul kordagi suurem ühest ning

vähem kui pooleteise aasta möödudes langeb tase nulli lähedale. Seega on vaadeldava tarindi puhul tarindi niiskustehniline olukord tagatud, kuna kõik vaadeldavad punktid asuvad mineraalvilla kihis, mis vastab hallitusindeksi mudeli järgi keskmiselt vastupidavale klassile. Siin peab aga meeles pidama, et hallituse kasvu seisukohalt tundlike või väga tundlike materjalide kasutamine aurutõkke kile taga on välistatud. See tähendab näiteks seda, et soojustuselemente olemasolevale välisseinale puitroovituse abil kinnitada ei tohi – puit on hallituse kasvu mudeli järgi väga tundlik materjal ja arvutustulemuste järgi hakkab sellisel juhul materjali pinnal hallitus kasvama.

Akadeemia tee 5a ühiselamu välisseina paneelid, mille põhjal on käesolevas töös koostatud arvutusmodelid, on kaetud kivipuru kattega. Arvestades asjaolusid, et välisseina ebatasasused on vahemikus 10-50 mm, võib tekkida olukord, kus paigaldusvill pole ideaalselt tihedalt olemasoleva betoonpaneeli ning uue soojustuselemendi vahele surutud. Selline olukord võib lubada minimaalse konveksiooni teket olemasoleva välisseinapaneeli ja paigaldusvilla vahel. Analooogne olukord oli ka Sõpruse puistee 244 elamu arvutusmodelis, kus vahtpolüstüreeni ja olemasoleva raudbetoon välisseinapaneeli vahel oli modelleeritud vertikaalne õhkvahe koos väikese rõhuerinevusega. Seetõttu on käesolevas lõputöös arvatud PE-aurutõkkekillega konstruktsiooniline lahendus ka koos konveksiooniga. Nimetatud olukord muudab kindlasti arvutuspunktid 3, 4 ja 5 vähem kriitiliseks, kuna lubab niiskusel otse paigaldusvilla kihist välja kuivada. Arvutustulemustest selgub, et konveksiooniga olukorra puhul on suhtelise niiskuse tase ootuspäraselt madalam ning veeauru kondenseerumise ohtu tarindis pole. Konveksioon toob kaasa suhtelise niiskuse taseme suuremaamplituudilise kõikumise vahemikus 50% - 100% aurutõkke taga paigaldusvilla kihtides. Sellisel juhul mõjuvad hallituse kasvuks soodsad keskkonnatingimused liialt lühiajaliselt põhjustamaks hallituse kasvu paigaldusvilla kihis.

Üldjuhul on konveksiooni esinemist tarindis soovitatav vältida, kuna tarindi soojustakistus sellisel juhul väheneb ning konstruktsioon pole enam õhutihe. Lisaks peab kindlasti arvestama, et konveksiooni tekkimine olemasoleva välisseina ja soojustuselemendi vahel on pigem erandlik ning vastavatest arvutustulemustest ei saa seega otseseid järeldusi teha. Tarindi soojustakistuse vähenemine tähendab, et esialgselt projekteeritud välistarindite soojapidavus on

madalam ja vastavalt dimensioneeritud küttelahendused võivad vajada korrigeerimist. Arvutuses kasutatud konveksiooni tekitava rõhkude erinevus on võetud Sõpruse puiestee 244 elamu kalibreeritud arvutusmudelist, mis aga ei pruugi kajastada tegelikku rõhkude erinevust tarindis. Tegelikku rõhkude erinevuse saamiseks tuleks mõõta vastava konstruktsiooniga tarindi paigaldusvilla õhutakistus ning arvutada määratud õhutakistusest ning temperatuuride erinevusest tingitud rõhkude erinevus ühe paneeli kõrguse ulatuses. Käesolevas lõputöös konveksiooni aga nii detailselt määratud pole. Küll võib aga väita, et kui eelpool toodud konveksioonita arvutustes on tarindi niiskustehniline toimivus tagatud, siis on vastav tarind niiskustehniliselt turvaline ka juhul, kui olemasoleva välisseinapaneeli ja lisasoojustuse moodulelemendi vahel peaks esinema konveksioon.

OSB plaate võib tarindis samuti kasutada aurutõkkekihina. Kuna OSB plaate on võimalik kasutada ka konstruktiivse elemendina tarindis (näiteks elemendi külgsuunalise jäikuse tagamiseks), osutub see huvitavaks alternatiiviks aurutõkkekillega elementidele. Seetõttu on käesolevas töös uuritud ka OSB plaadiga lisasoojustuse moodulelemendi niiskustehnilist toimivust. Aurutõkkekihi sisepinnal puitprusside taga olev punkt 4 on eelpool kirjeldatud arvutustes osutunud kõige kriitilisemaks, mistõttu on OSB plaadiga soojustuselemendi niiskustehnilist toimivust analüüsitud nimetatud punktis. Vaatluse all on olnud kolm erinevat raudbetoonist välisseinapaneeli betoonväliskooriku niiskussisalduse taset – 110 kg/m^3 , 90 kg/m^3 ja 70 kg/m^3 .

Suhtelise niiskuse tase langeb kõigi kolme erineva algniiskuse puhul esimese paari kuu jooksul, mistõttu kondenseerumise ohtu punktis 4 ei eksisteeri. Samas on suhtelise niiskuse tase üle 80% piisavalt pikalt, mis suurendab hallituse kasvu riski OSB plaadi sisepinnal. Seetõttu on arvutatud hallitusindeksi M väärtused kõigi kolme erineva algniiskuse taseme juures. Kuna OSB plaadi näol on tegemist puidupõhise materjaliga, on arvutused tehtud „tundlikule“ materjaliklassile vastavate parameetritega. Algniiskuse tasemete 110 kg/m^3 ja 90 kg/m^3 juures on hallitusindeksi väärtus kahe aasta jooksul pidevalt üle 1,0, mis tähendab, et OSB plaadi sisepinnal toimub ulatuslik hallituse kasv ning tarindi niiskustehniline toimivus pole seega tagatud. Algniiskuse 70 kg/m^3 juures on hallitusindeksi väärtus ligikaudu poole aasta pikkuse perioodi jooksul vahemikus 1,0 – 1,4. Veidi enam kui

aasta möödudes on hallitus plaadi pinnalt aga täielikult taandunud. Kuna hallituse kasvu indeks üle 1,5 ei tõuse ning hallitus taandub täielikult, võib pidada teatud mööndustega tarindit niiskustehniliselt toimivaks. Siinkohal tasub meeles pidada, et niivõrd madal algniiskuse tase võib esineda vaid hiliskevadel või suvel. Seega on OSB plaadiga soojustuselementide kasutamine turvaline eelkõige vaid suvel renoveerimisel.

Lisaks õhu- ja aurutõkkekihi erinevatele materjaliomadustele mõjutavad lisasoojustuse moodulelementide niiskustehnilist toimivust ka rida teisi tegureid. Soojustuselemendi soojustusmaterjalide omadused ning materjalide paksused määravad tarindi üldise soojustakistuse, millest sõltub tarindisisene temperatuur. Sobiva temperatuuri olemasolu on aga teatavasti üheks hallituse kasvu eeltingimuseks. Tuuletõkkeplaadi omadustel on samuti suur mõju. Analoogete konstruktsiooniga soojustuselementides tõstab kõrgema difusioonitakistusega tuuletõkkeplaadi kasutamine suhtelise niiskuse taset tuuletõkke sisepinnal, mis toob omakorda kaasa hallituse kasvu riski suurenemise vaadeldavas kihis.

8 Järeldused

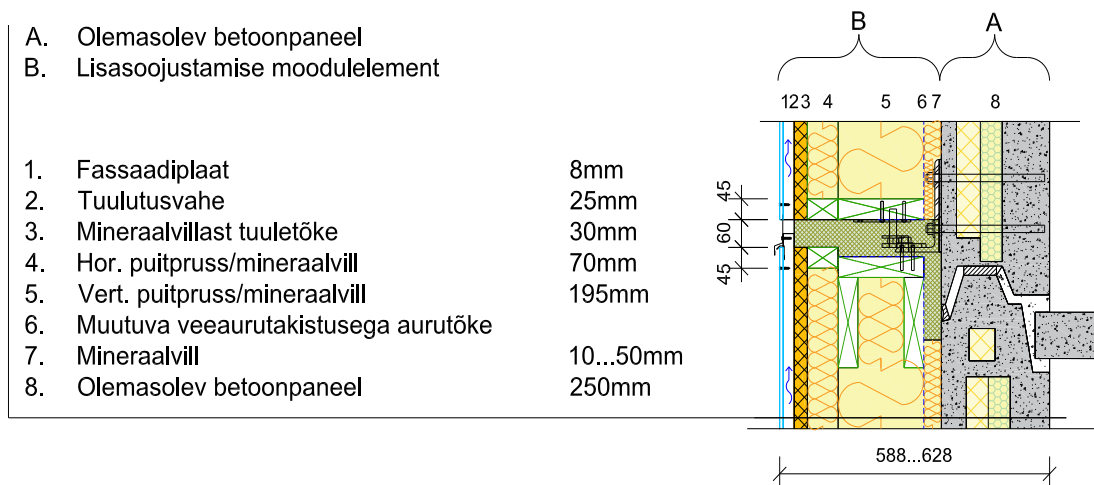
Raudbetoonist välisseinapaneeli välimise betoonkooriku niiskussisalduse hindamisel võib välja tuua järgmised järeldused:

- välisseina raudbetoonpaneeli niiskussisaldus on kõrgeim hilissügisel ja talvel – oktoobris, novembris, detsembris ja jaanuaris;
- Eestis mõjub suurim kaldvihmakormus lõuna-, lääne- ja edelasuunalistele fassaadidele, mis on kriitilisematel kuudel tõenäoliselt kõrgeima niiskussisaldusega. Samas peab iga hoone puhul hindama konkreetset olukorda;
- kaldvihma koormus on hoone fassaadi niiskussisaldust üks enim mõjutavatest teguritest;
- kriitilisematel kuudel on raudbetoonpaneeli välise betoonkooriku niiskussisalduse 90% protsentiili tase 110 kg/m^3 ja keskmine niiskussisalduse tase 90 kg/m^3
- vähem kriitilisematel suvekuudel on raudbetoonpaneeli välise betoonplaadi niiskussisalduse keskmine tase madalam – ligikaudu 70 kg/m^3 ;
- olemasoleva välisseina täpne niiskussisaldus sõltub väga paljudest teguritest ning võib seetõttu erinevate hoonete puhul varieeruda suures ulatuses. Täpse tulemuse saamiseks tuleb teostada täpsed mõõtmised. Eelpool toodud arvud iseloomustavad vastavaid suurusjärke, mida võib esialgsel projekteerimisel aluseks võtta.

Lisasoojustamise moodulelementide niiskustehnilise toimivuse hindamisel võib esile tuua järgmised järeldused:

- aurutõkke kasutamine moodulelemendi siseküljel on tarindi niiskustehnilise toimivuse tagamiseks vajalik;
- PE-aurutõkke kile kasutamisel pole tarindi niiskustehniline toimivus tagatud nii kriitilisematel sügis- ja talvekuudel kui ka vähem kriitilisematel suvekuudel;
- muutuva veeaurutakistusega aurutõkke ($0,2\text{m} < S_d < 5\text{m}$) kasutamisel on tarindi niiskustehniline toimivus tagatud, kui kriitilises paigaldusvilla kihis kasutatakse hallituse kasvule keskmiselt vastupidavaid materjale (näiteks mineraalvill, tsemendipõhised materjalid);

- soojustuselemendiga tarindit läbiv konvektsioon vähendab arvestatavalt tarindi soojustakistust, kuid suurendab tarindi niiskustehnilist turvalisust. Samas ei saa konvektsiooni tekkimist soojustuselementidega tarindis eeldada, kuna eesmärgiks on õhutihe konstruktsioon;
- OSB plaadiga lisasoojustamise moodulelementi niiskustehniline toimivus on tagatud vaid siis, kui raudbetoonist välisseinapaneeli betoonväliskooriku niiskussisalduse tase on $< 70 \text{ kg/m}^3$ (tõenäoline suvekuudel ning räästaga hoonete puhul).



Joonis 8.1 Niiskustehniliste arvutuste järgselt toimiv lisasoojustamise moodulelementidega välisseina lahendus

9 Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata erinevate tegurite mõju ja osatähtsust raudbetoonist välisseinapaneelide niiskussisaldusele, määrata lisasoojustamise moodulelementide niiskustehnilisteks arvutusteks raudbetoonist välisseinapaneelide algniiskuse tase ning hinnata lisasoojustamise moodulelementide erinevate konstruktsiooniliste lahenduste niiskustehnilist toimivust erinevates algolukordades. Tegurite mõju ja niiskustehnilise toimivuse arvutuste mudel oli üles ehitatud Akadeemia tee 5a hoone andmete põhjal, kuna nimetatud hoone plaanitakse käesoleva aasta teises pooles kirjeldatud meetotite alusel renoveerida.

Lisasoojustamise elementide näol on tegemist tehases valmistatud puitkarkassil soojustuselementidega. Sellised elemendid annavad võrreldes tavapärase lisasoojustamisega mitmeid eeliseid. Tehase kontrollitud tingimustes on elementide ehitamine automatiseeritum ja kvaliteetsem ning kõrge tehasevalmidusega elemendid lühendavad objektil renoveerimiseks kuluvat aega märkimisväärselt. Kuna elamute renoveerimisel on enamjaolt hoone ehitamise ajal kasutusel, tähendab elementidega renoveerimine hoone elanike jaoks ka lühemat ehitustegevusega kaasnevat ebamugavat aega. Lisaks pakuvad kirjeldatud soojustuselemendid võimalust paigaldada tehases elementide sisse ka uued tehnosüsteemid, mille paigaldamine ja mahutamine vana hoone tehnoshahtidesse oleks ebamugav või lausa võimatu. Lisaks välistarindite soojustakistuse tõstmisele ja hoone tehnosüsteemide rekonstrueerimisele peavad kirjeldatud elemendid tagama ka uue tarindi niiskustehnilise toimivuse. Viimase uurimine oli käesoleva lõputöö peamiseks eesmärgiks.

Kuna tarindi niiskustehniline toimivus sõltub eelkõige niiskuskoormustest ja tarindi materjalide algniiskuse tasemetest, siis on hinnatud esimeses järjekorras erinevate tegurite mõju raudbetoon välisseinapaneelide välimise betoonkooriku niiskussisaldusele. Selleks on analüüsitud EMHI 42 aasta Eesti kliima andmeid ning vastavate kliimaandmetega tehtud arvutused tarkvaraga Delphin 5.8. Kaldvihma koormused hoone fassaadile on arvutatud standardi ISO 15927-3 alusel. Ootuspäraselt on kliima, eelkõige kaldvihma mõju betooni niiskussisaldusele väga suur. Kaldvihm suurendab välistarindi niiskussisaldust kriitilisematel kuudel pea 40% võrra. Kriitilisematel kuudel hilissügisel ja talvel peab

projekteerimisel arvestama algse betooni niiskussisaldusena ligikaudu 110 kg/m^3 , mis vastab arvutustulemuste 90% protsentiili tasemele ning vähem kriitilisematel kuudel suvel ligikaudu 70 kg/m^3 . Nimetatud numbrid on küll heaks orientiiriks, aga kuna iga hoonega kaasnevad omad eripärad, tuleb kindlasti enne renoveerimist lisasoojustuse moodulelementidega hinnata ja vajadusel mõõta vastava hoone tarindite tegelikku olukorda.

Soojustuselementidega tarindi niiskustehnilist toimivust on analüüsitud kolme erineva konstruktsiooniga elemendi näitel, kus iga variandi aurutõkkekilena on kasutusel erinev materjal. Esimesel juhul on aurutõkkekilena kasutatud PE-aurutõkkekilet, teisel juhul muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekilet ning kolmandal juhul OSB plaati. Aurutõkkekile kasutamine on kindlasti vajalik, kuna aitab hoida läbi soojustuselemendi liikuvat niiskusvoogu kontrolli all. Tarindite niiskustehnilist toimivust on hinnatud veeauru kondenseerumise ja hallituse kasvu seisukohast, kus mõlemal juhul on kasutatud vastavaid kriitilisi väliskliima andmeid ning nende alusel arvutatud sisekliima andmeid. Arvutustulemuste järgi pole mistahes algniiskuse taseme juures PE-aurutõkkekile kasutamisel tarindi niiskustehniline toimivus tagatud – tarindis toimub veeauru kondenseerumine ning hallituse kasv. Muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekile kasutamine on turvalisem – kile lubab niiskusel läbi tarindi järk-järgult välja kuivada. Selle variandi puhul ei saa aga soojustuselemendi ning olemasoleva välisseina vahel hallituse kasvu vältimiseks kasutada puidupõhiseid materjale.

Kuna lisasoojustamise moodulelementide transpordil ja montaažil on oluline tagada elementide külgsuunaline jäikus, võib osutuda vajalikuks OSB plaadi kasutamine. OSB plaadi omaduste poolest võib seda kasutada ka soojustuselemendi aurutõkkekihina. Sellise konstruktsiooniga elemendi kasutamisel on tarindi niiskustehniline toimivus tagatud vaid madala raudbetoonist välisseinapaneeli betoonväliskooriku algniiskuse taseme juures – kui betooni niiskussisalduse tase on $< 70 \text{ kg/m}^3$, siis võib eeldada, et hallituse kasv on tarindis minimaalne ning kiirelt taanduv ning elemendi kasutamine on niiskustehniliselt turvaline.

10 English summary

The purpose of this study was to evaluate the influence and importance of different factors to the moisture content of external reinforced concrete slab and determine the critical moisture content level of concrete to assure the hygrothermal performance of a prefabricated modular insulation elements. The calculation models are based on a dormitory building located in Tallinn, Estonia that is planned to renovate with prefabricated modular insulation elements.

Prefabricated modular insulation elements are – as the name says – insulation elements that are manufactured in the controlled and ergonomic environment of a factory. Such elements are usually built on wooden framework and insulated with mineral wool. Prefabricated elements have many advantages compared to conventional insulation methods. Firstly, prefabrication enables to automatize the production and improve the quality and speed of renovation process. Secondly, renovating with such elements shortens the time needed on the construction site remarkably and therefore causes less inconvenience to the habitants of the building. And thirdly, prefabricated modular insulation elements are multifunctional in many ways. For example – into these elements can be installed new building service systems that are otherwise extremely difficult or even impossible to house because of lack of the space. In addition to increasing the thermal resistance such elements also have to assure the hygrothermal performance of the renovated buildings' envelope.

First part of this study evaluates the influence and importance of different factors to the moisture content of external reinforced concrete slab. The initial moisture content of the existing concrete slab is one of the critical factors that influences the hygrothermal performance of the installed modular insulation element. The climate data measured by the Estonian Weather Service during the past 42 years between 1970 – 2012 is analyzed and used in the calculations to evaluate the moisture content of the external concrete slab. The calculations are made with Delphin 5.8 software and the intensity of the wind-driven rain is calculated according to the standard ISO 15927-3. As expected, the influence of different climatic factors, especially the influence of wind-driven rain, is extremely big. Wind-driven rain rises the moisture content of external concrete nearly 40% compared to dry state during the most critical months in the late autumn and winter. The 90th percentile of the

moisture content of external concrete slab during the critical months is 110 kg/m^3 and during the least critical months in summer 70 kg/m^3 . Hence these values depend strongly on the peculiarities of the building, an evaluation of the described results have to be done before applying them on other buildings.

The hygrothermal performance of prefabricated modular insulation elements is analyzed on the basis of three different elements, where different water vapour barriers are used. The hygrothermal performance is evaluated on the basis of avoiding the mold growth and vapour condensation in the material layers. In the first element a PE-foil is used as a water vapour barrier on the inner surface of the insulation element. The hygrothermal performance of such element is not guaranteed regardless of the initial moisture content. The mineral wool layer behind the vapour barrier is constantly wet during the first two or three years, which also causes a wide-spread mold growth on the mineral wool. The dry-out of initially moist concrete slabs, insulated and covered with air and vapour barrier layer, may take several years. In the second element a smart vapour retarder is used as a vapour barrier. In such case the smart vapour retarder allows the moisture dry-out if the surrounding relative humidity is high and therefore the vapour condensation behind the vapour barrier is avoided. Mold growth inside the insulation element can be also avoided if medium resistant materials are used behind the vapour barrier – this means that wood or wood-based materials must be avoided.

Transport and montage of the prefabricated modular insulation elements may demand a sideward rigidness of the element. Therefore an OSB may be used as an vapour resistance layer and stiffener of the insulation element. The hygrothermal performance of such element is guaranteed only if the moisture content of external reinforced concrete slab is less than 70 kg/m^3 . This means that renovation may be likely done only during the summertime (in colder climates), when the risk for mold growth on the inner layer of OSB is minimal.

11 Viited

Arumägi, E., Kalamees, T., Kallavus, U. 2015. Indoor climate conditions and hygrothermal loads in historic wooden apartment buildings in cold climates. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences

Arvutustarkvara WUFI juhend. www.wufi.de. 2016

Blocken, B., Carmeliet, J. 2002. Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building, Wind and Structures

Blocken, B., Carmeliet, J. 2004. A review of wind-driven rain research in building science. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

Blocken, B., Deszö, G., Van Beeck, J., Carmeliet, J. 2009. The mutual influence of two buildings on their wind-driven rain exposure and comments on the obstruction factor. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

Choi, E. C. C. 1994. Determination of wind driven rain intensity on building faces. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

EVS-EN 15026:2007. Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus – niiskuslevi hindamine numbrilise modelleerimisega. Eesti Standardikeskus

Fedorik, F., Malaska, M., Hannila, R., Haapala, A. 2015. Improving the thermal performance of concrete-sandwich envelopes in relation to the moisture behaviour of building structures in boreal conditions, Energy and Buildings

Fick, A. E. 1855. Saksa füüsik, sõnastas 1855.a. uurimistöö tulemusena difusiooni põhiseaduse, mida tuntakse ka Fick'i esimese seadusena

Grunewald, J., Nicolai, A. 2005 – 2015. Delphin 5 User manual and program reference. Technische Universität Dresden

Heikkinen, P., Kaufmann, H., Winter, S., Larsen, K. E, et al. 2009. TES EnergyFaçade – prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope. TES EnergyFaçade research project

Homb, A., Time, B., Gullbrekken, L., Vågen, M., Korsnes, S., Halstedt, H., Geving, S., Päätaalo, J., Lylykangas, K. 2014. Book 4 Building physics. “smartTES –

Innovation in timber construction for the building modernization” transnational research project

Hukka, A., Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology

Ilomets, S., Kalamees, T. 2013. Case-Study Analysis on Hygrothermal Performance of ETICS on Concrete Wall after Low-Budget Energy Renovation. Tallinn University of Technology

Ilomets, S., Kalamees, T. 2016. Indoor hygrothermal loads for deterministic and stochastic design of the building envelope of dwellings in cold climates. Sage Journals

Ilomets, S., Kalamees, T., Agasild, T., Õiger, K., Raado, L.-M. 2011. Durability of concrete and brick facades of apartment buildings built between 1960-90 in Estonia. 12DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components

Ilomets, S., Kalamees, T., Paap, L. 2011. Evaluation of the thermal bridges of prefabricated concrete large-panel and brick apartment buildings in Estonia. 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere

ISO/DIS 15927-3. Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data – Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data

Kalamees, T. 2006. Indoor Climate Conditions and Ventilation Performance in Estonian Lightweight Detached Houses. Indoor and Built Environment

Kalamees, T. 2012/13. Ehitusfüüsika. Loengukonspekt. Tallinna Tehnikaülikool

Kalamees, T., Ilomets, S., Arumägi, E., Alev, Ü., Kõiv, T.-A., Mikola, A., et al. 2011. Indoor hygrothermal conditions in estonian old multi-storey brick apartment buildings. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate

Kalamees, T., Kurnitski, J., Kuusk, K., Pikas, E., Tark, T., Uutar, A., Allikmaa, A. 2013. Eesti energiamajanduse arengukava ENMAKi uuendamise hoonete energiasäästupotentsiaali uuring

Kalamees, T., Lupišek, A., Mørck, O.C., Borodinecs, A., Aalmeida, M., Rovers, R., et al. 2016. What kind of heat loss requirements nZEB and deep renovation sets for building envelope? Czech Technical University in Prague

Kalamees, T., Vinha, J. 2003. Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. Building and Environment

Kalamees, T., Vinha, J. 2004. Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. Journal of Thermal Envelope and Building Science

Kalamees, T., Õiger, K., Kõiv, T-A, et al. 2009. Eesti eluasemefondi suurpaneelkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Tallinna Tehnikaülikooli uuringu lõppraport

Kotkas, J. 2015. Kaldvihmamudelite võrdlev analüüs soojus- ja niiskustehnilisteks arvutusteks Eesti kliimas ja vastava laboratoorse katseseadmestiku arendamine. Tallinna Tehnikaülikool

Kuusk, K., Ilomets, S., Kalamees, T., Tuudak, S., Luman, A. 2014. Renovation vs. demolition of an old apartment building: energy use, economic and environmental analysis. 10th Nordic Symposium on Building Physics

Kuusk, K., Kalamees, T. 2015. nZEB Retrofit of a Concrete Large Panel Apartment Building, Energy Procedia

Ojanen, T., Viitanen, H., Vinha, J., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Saiminen, K. 2010. Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. Ettekanne ASHRAE konverentsil Buildings XI Conference

Ott, S., Loebus, S., Time, B., Homb, A., Botsch, R. 2014. Book 3 Multifunctional TES. "smartTES – Innovation in timber construction for the building modernization" transnational research project

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

Pihelo, P. 2015. Madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseina niiskustehniline toimivus, Tallinna Tehnikaülikool

Pihelo, P., Kalamees, T. 2016. The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall, Journal of Building Engineering

Saar, J. 2013. Raudbetoonfassaadi armatuurterase aktiivse korrosiooni analüüs. Tallinna Tehnikaülikool

Scheffler, G.A. 2008. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. Dresden University of Technology

Sontag, L., Nicolai, A., Vogelsang, S. 2013. Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin. Technische Universität Dresden

Veld, P.O. 2015. MORE-CONNECT: Development and Advanced Prefabrication of Innovative, Multifunctional Building Envelope Elements for Modular Retrofitting and Smart Connections, Energy Procedia

Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., et al. 2013. Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Research Report, Tampere

12 Lisad

12.1 Lisa 1

Lisa 1: Pihelo, P., Lelumees, M., Kalamees, T. Konverentsiartikkel: „Potential of Moisture Fry-out from Concrete Wall in Estonian Climate“. International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering. Conference segment on Moisture in Materials and Structures. 22-24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

POTENTIAL OF MOISTURE DRY-OUT FROM CONCRETE WALL IN ESTONIAN CLIMATE

Peep Pihelo ⁽¹⁾, Magnus Lelumees ⁽¹⁾, Targo Kalamees ⁽¹⁾

(1) Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia

1. Abstract

The efficient way to meet the nearly zero energy buildings (nZEB) design ideology – remarkable reduction of heat losses – is to build highly insulated buildings. This study observes the hygrothermal performance of prefabricated concrete large panel element of a multi-storey building, planned to be renovated according to nZEB requirements. The validated calculation program Delphin was used to calibrate the calculation model. On the basis of measured data, the model was calibrated and calculations were made to evaluate the hygrothermal risks. The analysis showed that the hygrothermal performance of concrete wall is most dependent on constructional moisture content, dry-out capability and wind-driven rain load as well as on the N-E-S-W orientation of the wall. The results showed the highest moisture content in the wall's external concrete slab on south-west direction in the last quarter and the first months of the year, when the moisture content was 110-114 kg/m³. This study showed that in the design of highly insulated concrete walls in cold and humid climate it is important to properly evaluate the initial state of constructions and consider critical weather loads in order to determine the feasible hygrothermal performance.

2. Introduction

The energy efficiency and overall condition improvement of apartment buildings is receiving more attention, supported by global agreements and European Union (EU) legislation with local activities. In Estonia this is one of the target actions concerning the fulfilment of energy efficiency improvement expectations as 65% of people in Estonia live in apartment houses. There are 264,000 dwellings in Estonia with a total net area of $66,692 \cdot 10^3 \text{ m}^2$. Nearly half of these buildings, constructed between 1961-1990, are built of prefabricated concrete large panel elements where the thermal transmittance of original external walls is $U=0.8\text{-}1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, which is 4-5 times higher than what is considered reasonable today. The designed service life of this type of buildings was 50 years, which is almost over for formerly built houses and therefore complex decisions have to be made and actions taken, but there are also many risks to consider. The systems and entire building envelopes need comprehensive renovation. Indoor climate needs to improve as moisture excess may contribute to serious mould problems on colder surfaces, habitants of this type of houses are complaining about the “sick house syndrome”. In combination with high indoor humidity load and thermal bridges, mould growth risk is high in the outer parts of the building envelope as well if additional insulation and finishing layers have been installed to meet up-to-date energy efficiency objectives.

Several renovation projects of existing prefabricated concrete large panel buildings have been completed in the past few years and new highly insulated buildings are designed and built in Estonia according to energy efficiency requirements and adapted standards. The multi-storey apartment house in Tallinn, built of prefabricated concrete large panels, was fully renovated and analysed in 2012 [1].

EU has adopted an ambitious vision for the energy efficiency of its buildings. By the end of 2021 all new buildings must meet nZEB requirements. The EU directive 2010/31/EU on energy performance of buildings [2,3] encourages the transition from fossil fuels to renewable energy sources in the building sector and underlines the importance of reducing energy dependency and greenhouse gas emissions.

Kuusk et al. [4] have shown that thermal transmittance of large panel apartment buildings' envelope is feasible to reduce down to $U=0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ but $\sim 300 \text{ mm}$ of insulation has to be installed on the external envelope. Vinha et al. [5], Fedorik et al. [6], as well Pihelo and Kalamees [7] have pointed out that decreasing of thermal transmittance of the building envelope could increase the mould risk in highly insulated buildings. Longer constructional moisture dry-out time and capabilities are weakening the hygrothermal condition of the entire building envelope. Therefore, it is needed to pay special attention to the hygrothermal performance and moisture safety of the design and building processes of highly insulated buildings.

In this study the potential of moisture dry-out from the prefabricated concrete large panel wall in Estonia was analysed to collect data for further nZEB design and renovation of that type of buildings.

3. Methods

3.1. Description of the building type

The building type studied is a five-storey house of flats, constructed from typified prefabricated concrete large panel elements (Figure 1 left). The panel consists from 3 sections: 60 mm external reinforced concrete slab + 120 mm wood-chip insulation layer + 70 mm internal reinforced concrete slab. The typical height of panels is 2750 mm and the width varies depending on the dimensions of rooms. The panel covers the area of external wall of one room as one part, all joists and conjunctions are filled with mortar. The external

panel is covered with gritstone on the outside, inside panels are plastered and finished with paint or wallpaper.

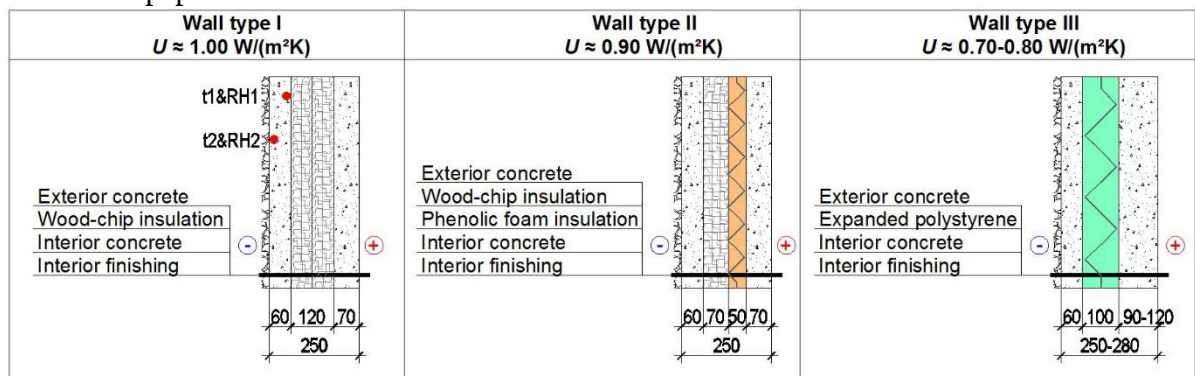


Figure 1. Overview of the typified multi-storey prefabricated concrete large panel elements.

It is intended to perform a deep renovation of a building, which has been made of prefabricated concrete large panel elements, as an Estonian pilot for the EU funded project of developed and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for modular retrofitting and connections [8].

3.2.Simulations

The dynamic hygrothermal simulation program Delphin, which was developed at the Technical University of Dresden and validated [9,10], was used in this study. Delphin is a simulation program for coupled heat, moisture and matter transport in porous building materials and it is used for different applications, e.g. calculation of mould growth risks with consideration of climate impacts, radiation, wind-driven rain, structure conditions and materials modelling.

The calculation model was calibrated with help of measurement data from previous comparable project [1] where hygrothermal data of typical concrete wall (Figure 1, wall type I, points t1&RH1 and t2&RH2) was collected for 2 years. Initial moisture content of the building materials, which was used in the calculations (Table 1), was equal to the measured equilibrium moisture content of materials used in the calibration model (initial temperature 12°C and relative humidity (RH) 70%). Calculations with the model were in good agreement with the measured data (see Figure 2), therefore the model is reliable for further research in this study.

Table 1. Properties of materials of studied structure.

	Density ρ , kg/m ³	Thermal conductivity λ , W/(m·K)	Open porosity m ³ /m ³	Moisture storage function ψ , m ³ /m ³				Water vapour resistance factor μ , -
RH, %				33	55	83	97	80
Concrete panel	2320	1.50	0.14	0.02	0.04	0.06	0.11	41
Wood chip insulation	500	0.14	0.93	0.01	0.02	0.03	0.06	3.80

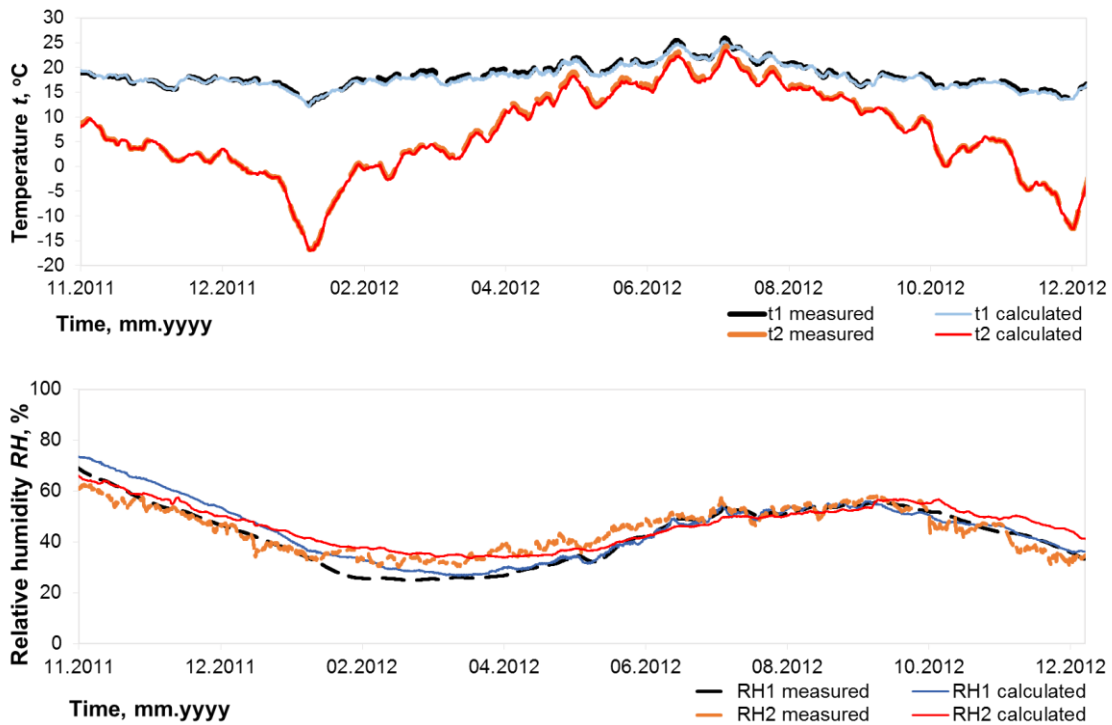


Figure 2. Measured and calculated data of temperature (above) and RH (below) in wall type I (Figure 1 left, points t1&RH1 and t2&RH2).

3.3. Boundary conditions

For the assessment of potential of moisture dry-out, 43 years (1970-2012) hourly data of the hygrothermal characteristics of Estonia was applied for outdoor climate – vertical rain flow density on the horizontal area, radiation, wind velocity and direction, outdoor RH and temperature. Indoor climate measurements from Estonian dwellings [11–13] were used for the determination of critical indoor hygrothermal conditions. For simulations, the following conditions were used: average indoor temperature, which was dependent on the outdoor temperature (Figure 3 left) and 90th percentile of indoor humidity of class 3, representing dwellings with high humidity load (Figure 3 right) and high occupancy according to national appendix of EVS-EN 15026 [14], which was expressed as indoor moisture excess Δv (kg/m^3).

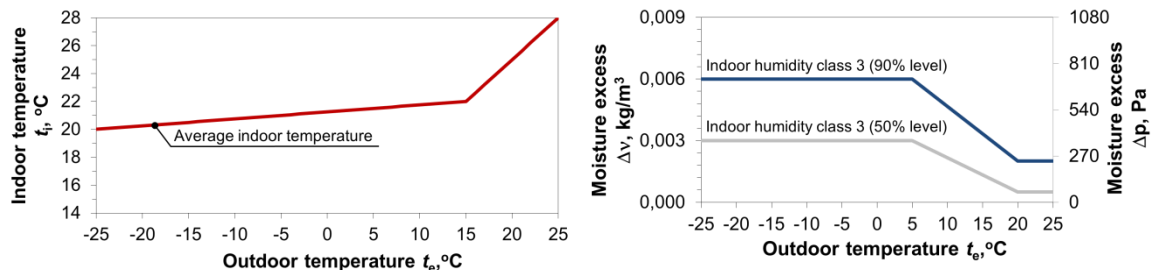


Figure 3. Dependency of indoor temperature (left) and design value of moisture excess (right) on the outdoor temperature.

Impact of wind-driven rain was taken into account according to EVS-EN ISO 15927-3 methodology [15]. Eq.1-Eq.3 characterises the calculation model of wind-driven rain to vertical wall surface:

$$I_A = \frac{2}{9} \frac{\sum v r^{\frac{8}{9}} \cos(D - \theta)}{N} \quad (1)$$

$$I_{WA} = I_A C_R C_T O W \quad (2)$$

$$C_R(z) = K_R \ln(z/z_0) \quad (3)$$

where I_A is airfield annual index (l/m^2), v is hourly mean wind speed (m/s), r is hourly rainfall total (mm), D is hourly mean wind direction from north (deg), θ is wall orientation relative to nord, N is number of years of available data, I_{WA} is wall annual index (l/m^2), C_R is roughness coefficient, C_T is topography coefficient, O is obstruction factor, W is wall factor, K_R is terrain factor, z is height above ground, z_0 is roughness length. In our calculations, values and coefficients were used as follows: $K_R = 0.24$ (terrain category IV), $z = 16$ (height above ground), $z_0 = 1$ (terrain category IV), $C_T = 1$ (no upwind slope), $O = 0.3$ (distance of obstruction from wall < 15 m), $W = 0.5$ (wall factor for building with flat roof, for top 2.5 m).

4. Results

4.1. Assessment of critical periods of moisture load and N-E-S-W orientation of a walls

The initial examination of structures was done in 4 main orientations – north, east, south and west. At this stage the moisture content w (kg/m^3) was calculated for the entire studied period of 43 years for different orientations of walls on a monthly basis, without taking into account the impact of wind-driven rain. The results showed the highest moisture content in external concrete slab to occur in the last quarter and the first months of the year. 90th percentile values of moisture content went up to 76 kg/m^3 and maximum values up to 80 kg/m^3 (Figure 4 left).

The rain flow density to the surface was calculated correspondingly (Figure 4 right) where the values were highest at the last quarter of a year, starting from September and going up to 8.7 kg/m^2 while calculated 90th percentile values were 5.1 kg/m^2 .

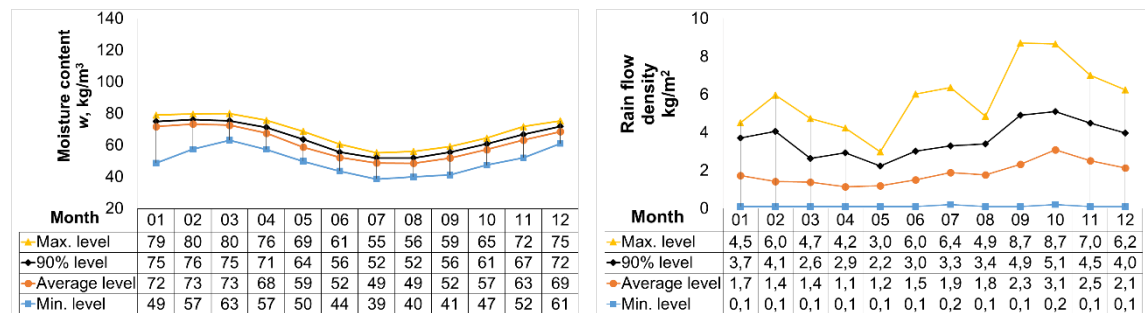


Figure 4. Moisture content in external concrete slab without wind-driven rain impact (left) and rain flow density to the surface (right) in south direction during the studied period (1970-2012).

The analysis was continued with the evaluation of impact of wind and rain to constructional moisture content. In Figure 5, the prevalent directions of wind and rain during the studied period in different orientations (1970-2012) are shown.

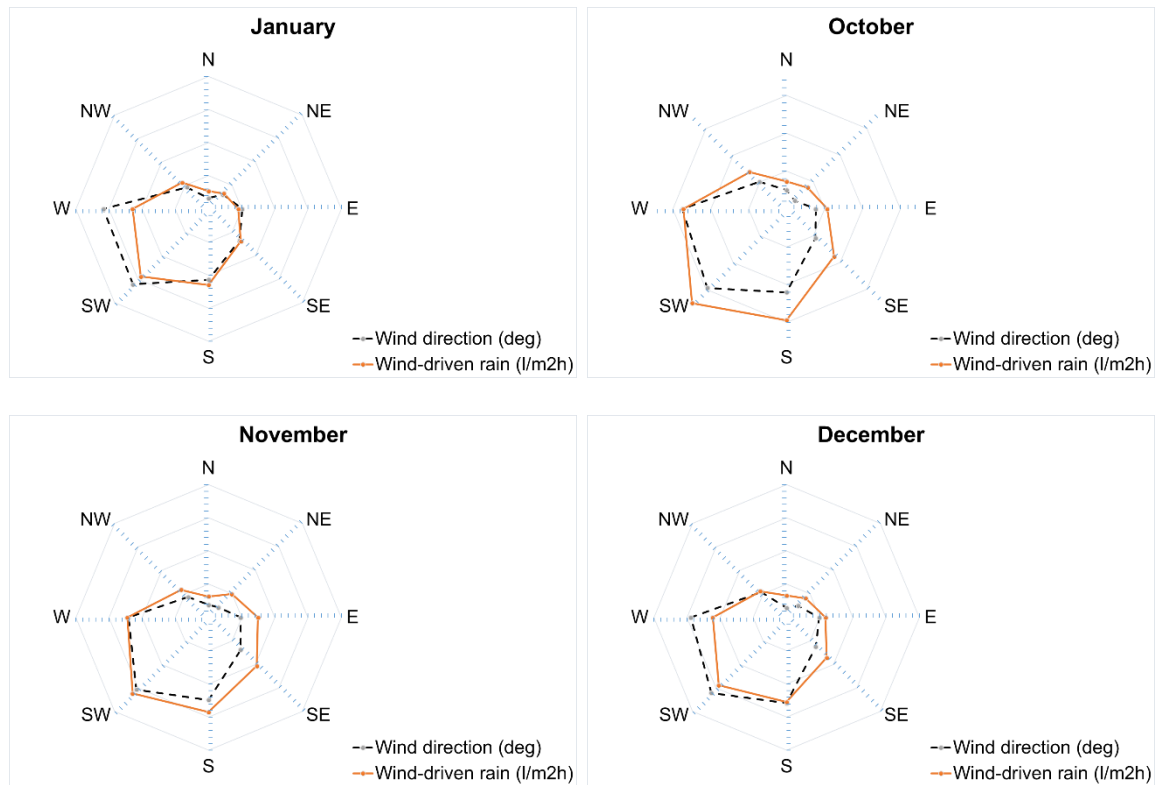
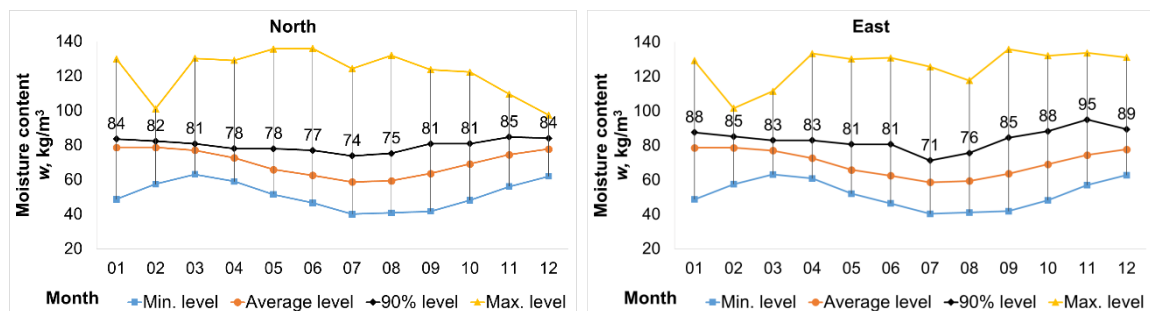


Figure 5. Schematic of prevalent directions of wind and wind-driven rain during the studied period (1970-2012).

The calculation results showed higher influence of wind-driven rain to hygrothermal performance of a wall on western and southern sides of the building – the maximum moisture content there was about 15-20% higher than on northern and eastern sides. At the same time the annual tendency of moisture load remained the same as in the previous phase – the most critical periods were the last quarter and the first month of the year (see Figure 6).



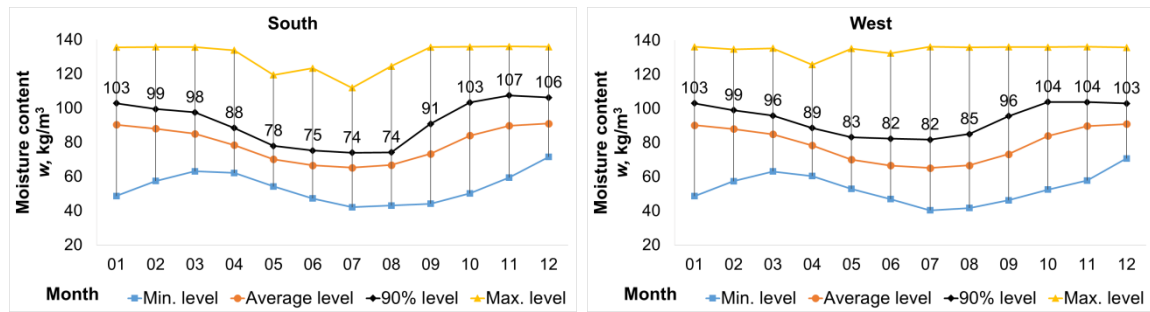


Figure 6. Monthly distribution of moisture content for external 60 mm concrete slab in different orientations with wind-driven rain during the studied period (1970-2012).

In the period studied (1970-2012) the moisture content extent over the hygroscopic range ($\sim 136 \text{ kg/m}^3$) in south orientation was observed for 10 years and in west orientation for 12 years in the autumn and winter periods, which provides high level of probability of full saturation to appear in external concrete slab on that period of the year.

Subsequently the moisture load analysis was continued with south-western wall as the most critical, where according to Figure 5 the prevailing wind-driven rain load was the highest and the external concrete slab moisture content in different zones (see Figure 7 right) was analysed. Figure 7 (left) illustrates the 90th percentile of each calculated point (A, B and C) and 90th percentile of the entire external slab moisture distribution in south-western side. The highest 90th percentile level of moisture content (114 kg/m^3) was at 20 mm inner zone, calculated in point C in November.

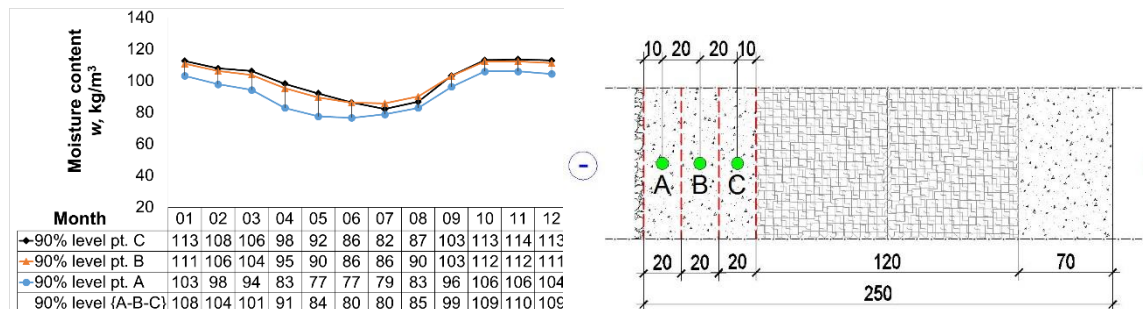


Figure 7. Monthly distribution of moisture content for external concrete slab in south-western orientation with wind-driven rain in points A, B and C (left) during the studied period (1970-2012) and schematic layout of zones and calculation points A, B and C (right) in external concrete slab section of wall type I (see Figure 1 left).

5. Discussion

With the analysis of typified prefabricated concrete large panel elements for a long-term period (1970-2012) it was observed that the highest constructional moisture content in the middle and inner 20-40 mm zone of external 60 mm concrete slab and the most critical to hygrothermal performance months are November, December and January. This could be explained with the moisture dry-out, diffusion and absorption phenomenon: the weather conditions (wind and sun radiation) in outer layer of external wall contribute to faster dry-out of moisture. But at the end of the year and during colder periods with heavy rains, the moisture load is higher and moisture dry-out times are longer. Therefore, the moisture will accumulate and redistribute inside the structure and risks of mould growth increase

respectively. The calculations showed that during autumn and winter periods, the external concrete slab may stay close to the full saturation phase and the wall will dry out only in March-April. Longer periods of a high moisture load contribute to the corrosion processes to activate and moisture growth risk rises.

Comparison of results of moisture content with and without impact of wind-driven rain showed that in walls without impact of wind-driven rain (e.g. buildings with slope roofs and with wide eaves) the moisture content is high in the first quarter of the year and reaches maximum in March. Moisture level is relatively high in the last quarter of a year as well, which could be explained with lower radiation intensity and temperatures, hence with higher *RH*. These circumstances contribute to lower dry-out capabilities of the entire external slab.

In buildings where roof edges, eaves or other construction details do not provide protection from wind-driven rain load, the moisture load of external envelope are noticeably higher and dominating maximum is achieved during the last quarter of the year. According to Choi [16] and Blocken and Carmeliet [17], the highest loads are at the top corners of vertical wall. Therefore, it is essential to take into account higher moisture load when designing this type of buildings in order to assure hygrothermal performance in the critical areas of the external envelope as well.

The analysis also showed that the orientation of the building has its role in the structure's moisture content and consequently its dry-out capability. In Estonian climate, where south and west winds are prevailing, the moisture load is correspondingly higher in structures opened to south, south-west and west directions. Initial moisture redistribution analysis in areas with higher moisture loads has shown that inner zones may contain higher volumes of moisture and the dry-out capabilities are weaker compared to areas closer to the external surface.

To determine the up-to-date energy efficiency and nZEB demands and to insulate the concrete large panel walls, thorough calculations of moisture dry-out capabilities have to be made and proper solutions designed as the calculations in this study have shown that initial moisture content in external concrete slab is high, about 110 kg/m^3 . After the installation of additional external side insulation and vapour protection layer (if any), the temperature of the outer layers of the wall will drop and its estimated *RH* level will stay most likely at level 50-60%. This means that about $40\text{-}50 \text{ kg/m}^3$ of water needs to dry out from the existing wall. The thermal resistance and vapour permeability in outer layers has to be high and mould growth risks have to be evaluated as an essential part of preliminary hygrothermal design process.

6. Conclusions

The design of highly insulated external envelopes is a demanding process where hygrothermal analysis has a very important role. Based on studies made, we may claim that prior to the installation of new layers onto an existing envelope, which may probably change the hygrothermal performance considerably, the designer has to examine the existing structures thoroughly and take into account not only the indoor and outdoor climate but also the consequences because of constructional moisture loads, dry-out capability and orientation of the designed structures.

The potential of moisture dry-out analysis of this study is based on the cold climate in Estonia and is exhaustive material for further hygrothermal design of buildings made of prefabricated concrete large panel elements in cold climate. The calculations in this research have shown that initial moisture content in the concrete slab with the impact of

wind-driven rain and other weather conditions, orientation and seasonable factor, is 137 kg/m³ as maximum, 110 kg/m³ as 90th percentile and 90 kg/m³ as average. In Estonia the moisture load to wall surface is highest in south-west direction, through October to December and in January.

However, after fulfilling the load-bearing requirements, other layers in the building envelope are frequently designed according to the required thermal transmittance and visual appearance. However, relying on the present and preceding studies, the design of hygrothermal performance of the future nZEB highly insulated building envelope, based on the common knowledge and practices may most likely appear insufficient. And at the same time, considerable change of climate conditions forces us to reassess the common practices as well.

7. Acknowledgements

This research was supported by the Estonian Centre of Excellence in Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts, ZEBE, grant TK146 funded by the European Regional Development Fund, and by the Estonian Research Council, with Institutional research funding grant IUT1-15 and by EU funded Horizon 2020 project “Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for modular retrofitting and smart connections” (MORE-CONNECT).

8. References

- [1] Ilomets, S., Kalamees, T., Case-study analysis on hygrothermal performance of ETICS on concrete wall after low-budget energy-renovation, in: Proc. XII Int. Conf. Perform. Exter. Envel. Whole Build. XII Int. Conf. Perform. Exter. Envel. Whole Build. Florida, USA, December 1-5, 2013, ASHRAE, 2013.
- [2] 2010/31/EU, EPBD recast: EU-Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, 2010.
- [3] 2002/91/EC, EU-Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. European Commission, 2002.
- [4] Kuusk, K., Kalamees, T., nZEB Retrofit of a Concrete Large Panel Apartment Building, *Energy Procedia*. 78 (2015) 985–990. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.038.
- [5] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., et al., Ilmastomuutoksen ja lämmöneristysten lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Research Report; 159., Tampere, 2013.
- [6] Fedorik, F., Malaska, M., Hannila, R., Haapala, A., Improving the thermal performance of concrete-sandwich envelopes in relation to the moisture behaviour of building structures in boreal conditions, *Energy and Buildings*. 107 (2015) 226–233. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.020.
- [7] Pihelo, P., Kalamees, T., The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall, *Journal of Building Engineering*. 6 (2016) 29–38. doi:10.1016/j.jobbe.2016.02.002.
- [8] Veld, P.O., MORE-CONNECT: Development and Advanced Prefabrication of Innovative, Multifunctional Building Envelope Elements for Modular Retrofitting and Smart Connections, *Energy Procedia*. 78 (2015) 1057–1062. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.026.
- [9] Nicolai, A., Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials, Syracuse University, 2008.
- [10] Grunewald, J., Diffusiver und konvektiver Stoff-und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Dresden University of Technology, 1997.
- [11] Arumägi, E., Kalamees, T., Kallavus, U., Indoor climate conditions and hygrothermal loads

- in historic wooden apartment buildings in cold climates, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 64 (2015) 146–156. doi:10.3176/proc.2015.2.03.
- [12] Kalamees, T., Ilomets, S., Arumägi, E., Alev, Ü., Kõiv, T.-A., Mikola, A., et al., Indoor hygrothermal conditions in estonian old multi-storey brick apartment buildings. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, in: 12th Int. Conf. Indoor Air Qual. Clim., 2011.
 - [13] Kalamees, T., Indoor Climate Conditions and Ventilation Performance in Estonian Lightweight Detached Houses, *Indoor and Built Environment*. 15 (2006) 555–569. doi:10.1177/1420326X06073076.
 - [14] EVS-EN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation, Eesti Standardikeskus, 2007.
 - [15] EVS-EN ISO 15927-3, Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 3: Calculation of a drivingrain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data, Eesti Standardikeskus, 2009.
 - [16] Choi, E.C., Wind-driven rain on building faces and the driving-rain index, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 79 (1999) 105–122. doi:10.1016/S0167-6105(97)00296-1.
 - [17] Blocken, B., Carmeliet, J., The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 94 (2006) 101–127. doi:10.1016/j.jweia.2005.11.001.

12.2 Lisa 2

Lisa 2: Pihelo, P., Lelumees, M., Kalamees, T. Konverentsiartikkel: „Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements“. SBE16 Tallinn and Helsinki Conference; Build Green and Renovate Deep, 5-7 October 2016, Tallinn and Helsinki, in: Energy Procedia (2016)

SBE16 Tallinn and Helsinki Conference; Build Green and Renovate Deep, 5-7 October 2016, Tallinn and Helsinki

Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements

Peep Pihelo^{a1}, Magnus Lelumees^a, Targo Kalamees^a

^a Tallinn University of Technology, Chair of Building Physics and Energy Efficiency, Ehitajate tee 5, Tallinn 19086, Estonia

Abstract

Renovation with prefabricated modular panels is one way to achieve high energy efficiency and quality both in production and installation processes. The 5-storey building, which is being fully renovated in Tallinn, Estonia, will be insulated with prefabricated modular renovation elements. The hygrothermal performance of the envelope was evaluated with calibrated dynamic hygrothermal simulations and with a mould index model, where calculation results were in good agreement with measured data and are therefore reliable for further research. The calculations were made to evaluate the hygrothermal risks in the building envelope and after the prefabricated modular elements were installed, the focus was on studying concrete wall's dry-out capability and the use of vapor barrier. The initial moisture content of the concrete wall and a right choice of air&vapor barrier layer has considerable impact on the entire envelope performance. As a result of this study, we claim that the risk of mould growth in this structure can be minimized, when the initial moisture content (IMC) of the existing concrete large panel element is $w \leq 55 \text{ kg/m}^3$ and PE-foil as air&vapor barrier is used or when IMC is $w \leq 75 \text{ kg/m}^3$ and the oriented strand board (OSB) as vapor control layer or when IMC is $w \leq 110 \text{ kg/m}^3$ and smart vapor retarder ($0.2 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$) on the mounted modular element as vapor control layer is used, in combination with the prefabricated modular element's insulation, with high thermal resistance and vapor permeability (thermal resistance $R \geq 7.5 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$; equivalent air layer thickness $S_d \leq 0.5 \text{ m}$), and wind barrier ($R \geq 0.8 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$; $S_d \leq 0.05 \text{ m}$) layers. In the renovation of prefabricated concrete large panel buildings, it is possible to achieve good results and build sustainable solutions according to up-to-date requirements of nZEB in a cold and humid climate.

© 2016 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the organizing committee of the SBE16 Tallinn and Helsinki Conference.

Keywords: nZEB prefabricated modular renovation solutions, hygrothermal performance, moisture safety, energy efficiency;

Introduction

A decrease in heat losses of buildings is an obligatory demand for highly insulated and nearly Zero Energy Buildings (nZEB). With agreements on the worldwide and the EU level, we are looking for at least a 20% reduction of energy use compared to previous decades. These expectations are driven by means of optimization of resources use, energy and time, as well as clean and healthy environment. The energy efficiency and whole improvement of condition of residential buildings has been receiving more attention as

* Corresponding author. Tel.: +372 6202405
E-mail address: peep.pihelo@ttu.ee

more than 70% of them are over 30 years old and about 35% are more than 50 years old [1]. In Estonia about 65% of people live in apartment buildings, the designed service life of this type of buildings is 50 years, which is almost over for formerly constructed buildings. Research of current technical conditions of Estonian old concrete element housing stock refers to satisfactory conditions in terms of load-bearing, but highlights insufficient energy performance, indoor climate and hygrothermal performance of the building envelope [2].

Designers, developers and owners are in search of innovative ways to minimize operating costs and environmental impact of buildings, while also increasing their functionality. Feasibility of these measures is still under discussion in order to find better solutions with lower investments [3–5]. Using prefabricated modular insulation elements when renovating buildings is one possible way to standardize and industrialize manufacturing processes and increase the quality [6]. Kalamees et al. [7] showed that modular insulation panels should decrease the thermal transmittance of walls to $U_{\text{wall}}=0.11\text{--}0.47\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ depending on the climate and national requirements in European countries.

However, designing highly insulated building envelopes is a demanding process where hygrothermal performance plays a critical role in order to reach sustainable outcomes. Many authors have pointed out that decreasing thermal transmittance of the building envelope could increase mould risk in highly insulated buildings [8–11]. Gullbrekken et al. [12] concluded that the risk for mould growth increases somewhat, but that in general, this can be prevented by making right choices when selecting materials and constructions. Nevertheless, the negative effect of a longer drying period of built-in moisture has a more pronounced effect than that of the colder outer parts of the wall. Longer constructional moisture dry-out period and obstacles of its capability weaken the whole building envelope hygrothermal condition. Therefore, it is necessary to pay special attention to the hygrothermal performance and moisture safety of the design and building processes of highly insulated buildings.

The aim of this study is to analyze the hygrothermal performance of the building envelope, made of concrete large panels and additionally insulated with prefabricated modular elements in Estonia. Purpose of this study is to provide input to further process of the hygrothermal design of nZEB and the renovation of prefabricated concrete large panel multi-storey buildings.

Methods

Description of the constructions

The building type studied in this research is a 5-storey apartment building, constructed from typified prefabricated concrete large panel elements (Fig. 1 left). The existing concrete panel with a thickness of 250 mm consists from 2 concrete sections and insulation layers: 60 mm external reinforced concrete slab + 70 mm wood-chip insulation layer + 50 mm phenolic foam insulation layer + 70 mm internal reinforced concrete slab. Typical height of panels is 2700 mm and the width varies depending on the dimensions of rooms. The external side of the panels is covered with gritstone, the interior side of the panels is caulk and finished with paint or wallpaper. The thermal transmittance of existing wall is $U=0.9\text{--}1.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

It is intended to perform a full renovation of a building as an Estonian pilot in EU funded project of developed and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for modular retrofitting and connections (MORE-CONNECT) [6]. In the pilot project, the building envelope will be insulated and rendered with the help of prefabricated modular renovation elements (Fig. 1, pos.B). The total thickness of modular element in the current project is 340–380 mm, depending on the surface flatness of the existing wall. To fill the unevenness and roughness of the existing surface, 10–50 mm light mineral wool as filling layer is intended to be added onto the inner side of the modular element (Fig. 1, pos.7). The timber-frame structure is filled with 265 mm mineral wool (Fig. 1, pos.4 and pos.5) in two layers (with insulation thermal resistance $R\geq 7.5\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ and equivalent air layer thickness $S_d\leq 0.5\text{ m}$) and covered with 30 mm dense mineral wool wind barrier ($R\geq 0.8\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $S_d\leq 0.05\text{ m}$). The 25 mm ventilated airgap (Fig. 1, pos.3) is covered with 8 mm finishing hardboard, which also provides a firm rain screen to the structure beneath. For protection from weather impacts during the construction process and from constructional moisture, the inner side of the module is designed to be protected with air&vapor barrier layer (Fig. 1, pos.6). The designed thermal transmittance of the external wall is $U_{\text{wall}}=0.11\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ and the airtightness of the entire building envelope $q_{50}=0.2\text{--}0.3\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. To avoid the thermal bridges and minimize the impact of air leakages, smart connectors and innovative fixings, also sealants and polyurethane (PUR) foam will be used at critical joints.

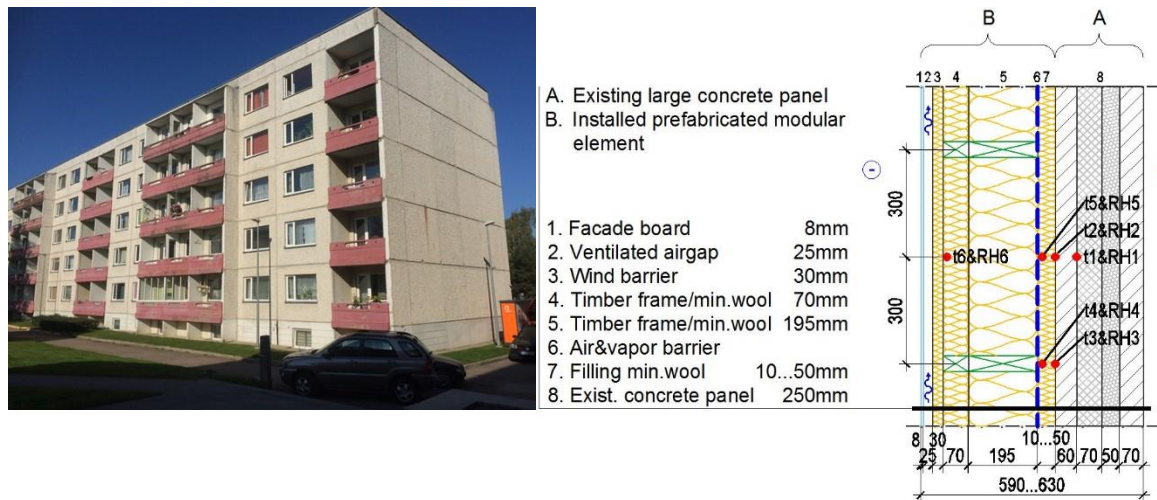


Fig. 1. Overview of the existing building before renovation (left) and solution (designed by architecture and design bureau Sirkel&Mall OÜ) of concrete large panel covered with prefabricated modular element (right).

Hygrothermal simulations

The dynamic hygrothermal simulation program Delphin, which was developed at the Technical University of Dresden and has been successfully validated [13,14], was used in this study. Delphin is a simulation program for coupled heat, moisture and matter transport in porous building materials and it is used for different applications, e.g. calculation of mould growth risks with consideration of climate impacts, radiation, wind-driven rain, structure conditions and modelling of materials.

The calculation model was calibrated with the help of measurement records from a previous, comparable project where hygrothermal data of concrete wall in points 1 and 2 (see t1&RH1 and t2&RH2 in Fig. 1 right) was collected for 2 years and then analyzed [15,16]. In the current study, the calculations were made in points 3, 4, 5 and 6 (see t3&RH3, t4&RH4, t5&RH5 and t6&RH6 in Fig. 1 right) with initiation time in November as the most critical.

In this research a mathematical model, designed in Finland [17,18], was used for the calculation of mould growth, decrease and mould index (M) in changing conditions. According to this model, in the course of fluctuating humidity conditions, the total exposure time for response of growth of mould fungi is affected by the time periods of high and low humidity conditions, as well as the humidity and temperature level. In the simulation of mould growth, it is crucial to know the lowest (threshold) conditions where fungal growth is possible on different materials. The time period that is needed for the onset of mould growth and growth intensity, is mainly dependent on water activity, temperature, exposure time and surface quality of the substrate. The boundary curve for the risk of mould growth in the range of temperature between 5 to 40°C on a wooden material can be described by a polynomial function (see Eq.1).

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267 * t^3 + 0,16 * t^2 - 3,13 * t + 100 & \text{when } t \leq 20^\circ\text{C} \\ RH_{min} & \text{when } t > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

where t is temperature on the investigated material surface (°C) and RH_{min} represents the minimum level of relative humidity (RH), where mould growth is possible (varies according to the sensitivity of the material, for example RH_{min} =80% for wood or 85% for concrete). In the current study, the critical value of the mould index was set to level $M=1$ (no growth, pores are not activated) according to the mould index model to avoid the formation of mould in a structure. In order to compare the hygrothermal indicators and to analyze their impact, different materials have been used in the calculations (see Table 2).

Table 2. Properties of materials in structures studied.

Material	Thermal conductivity λ , W/(m·K)	Moisture storage function w , kg/m ³					Water vapor resistance factor μ , -	Density ρ , kg/m ³	Open porosity m ³ /m ³	Water absorption coefficient A_w , kg/(m ² ·s ^{0.5})
RH		33%	55%	75%	83%	97%	83%			

Concrete*	1.500	38.0	53.0	78.0	86.0	134	41.0	2320	0.14	0.0200
Wood chip insulation*	0.140	6.00	11.0	15.0	21.0	32.0	3.80	500	0.93	0.0089
Phenolic foam insulation*	0.064	0.25	0.32	0.36	0.54	0.98	2.85	30	0.90	0.0010
Timber (pine)	0.130	32.0	45.0	80.0	108	185	40.0	450	0.62	0.0155
Oriented strand board (OSB)	0.130	31.0	46.0	78.0	110	183	165	646	0.40	0.0113
Mineral wool wind barrier	0.031	0.21	0.28	0.29	0.96	3.30	1.50	104	0.90	
Mineral wool insulation	0.037	0.14	0.18	0.36	0.80	2.40	1.20	22	0.98	
Vapor barrier PE-foil	0.400							89000	980	0.001
Smart vapor retarder (0.2 m<S _d <5 m)	0.230						800	460	0.59	0.0001

* Materials in the existing prefabricated concrete large panel element (see section A, Fig. 1 right)

Boundary conditions

The calculations in our previous research [16] have shown that the initial moisture content in the concrete facade without the wind-driven rain moisture load is $w=75 \text{ kg/m}^3$ as an average and with the impact of wind-driven rain, orientation and seasonable factor 137 kg/m^3 as maximum, 110 kg/m^3 as 90th percentile and 90 kg/m^3 as an average. In Estonia the moisture load to wall surface, caused by wind-driven rain, is highest in south-west direction, through October to December and in January. Indoor climate measurements from Estonian dwellings [19–21] were used to determine critical indoor hygrothermal conditions. For simulations, the following conditions were used: average indoor temperature, which is dependent on the outdoor temperature (Fig. 2 left) and 90th percentile of indoor humidity of class 3, representing dwellings with high humidity load (Fig. 2 right) and high occupancy according to national appendix of EVS-EN 15026 [22], expressed as indoor moisture excess Δv (kg/m^3).

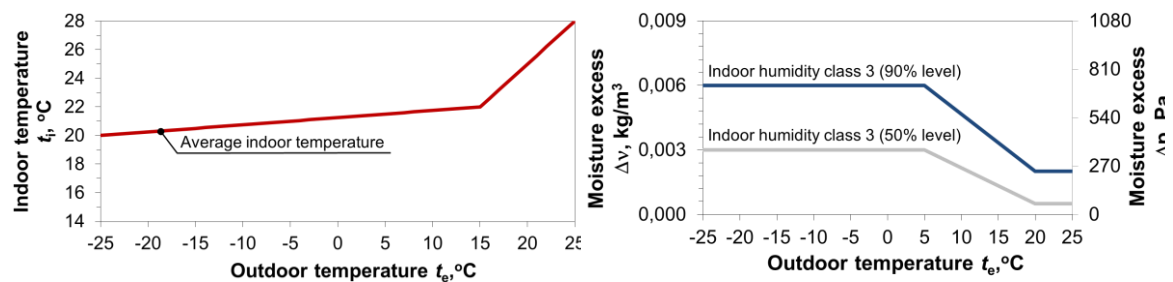


Fig. 2. Dependency of indoor temperature (left) and design value of moisture excess (right) on the outdoor temperature.

In the assessment of hygrothermal risks, the hourly data of the moisture reference year (MRY), critical to mould growth and water vapor condensation in Estonia, was applied to outdoor climate [23]. According to Estonian energy test reference year (TRY) the daily maximum at summer time is $+19...+22^\circ\text{C}$, in winter period $+3...+7^\circ\text{C}$; monthly average at summer time is $+14...+17^\circ\text{C}$, in winter period $-5...0^\circ\text{C}$ and daily minimum at summer time is $+8...+12^\circ\text{C}$, in winter period $-14...-10^\circ\text{C}$ [24].

Results

The initial simulation of the structure was done in points 3, 4, 5 and 6 (see t3&RH3, t4&RH4, t5&RH5 and t6&RH6 in Fig. 1 right). The initial moisture content of the existing concrete large element external slab was set to $w=110 \text{ kg/m}^3$ as the starting state. RH was observed throughout a 5-year period. Initially the solution was designed so that the PE-foil was used as air&vapor barrier (Fig. 1, pos.6), serving the purpose of the basic suitable solution for timber-frame structures in cold climate conditions [25]. The highest RH level was found on the inner surface of PE-foil air&vapor barrier, in the location of wooden studs (in point 4, see Fig. 1). At this location the insulation was at full saturation state for more than $3\frac{1}{2}$ years (see Fig. 3, P4). For more than a 1-year period, 100% of RH was also detected on the inner surface of the PE-foil air&vapor barrier between wooden studs (see Fig. 3, P5). In the analyzed points 3 and 6, RH dropped in the course of 3-4 months to the level of equilibrium state and thereupon followed normal weather dynamics (see Fig. 3, P3 and P6).

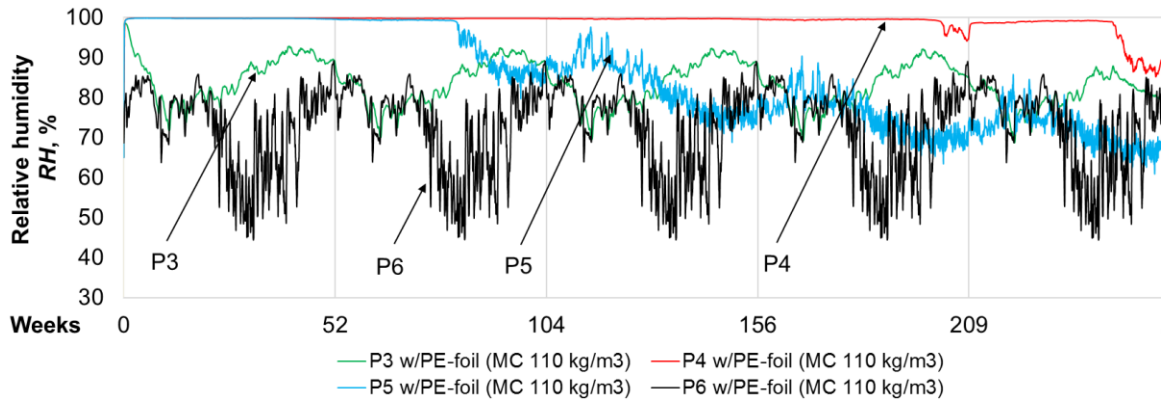


Fig. 3. RH in the analyzed points 3, 4, 5 and 6 with PE-foil as air&vapor barrier layer in the structure throughout 5-year period when the initial moisture content of the concrete large panel is $w=110 \text{ kg/m}^3$.

As a result of the preceding calculations, analysis was continued in the most critical hygrothermal performance point 4 (see t_4 & RH_4 in Fig. 1 right), on the inner surface of the PE-foil air&vapor barrier, in the location of wooden studs as the highest RH level in the analyzed period was observed there. In this location, the RH was calculated with a different air&vapor barrier and control layers and with a number of the initial moisture content levels in the external slab of existing concrete large element (75 kg/m^3 , 90 kg/m^3 and 110 kg/m^3) in order to replicate the different moisture loads and at the same time, compare moisture load impact with different air&vapor control layers.

The lowest moisture load at the monitored point was detected in the solution without an air&vapor barrier layer (see Fig. 4) and the highest level was reached with the solution where the initial moisture content of concrete large element was set to 110 kg/m^3 and a PE-foil as air&vapor barrier layer was used. As a result of this stage, it was decided to continue with smart vapor retarder with changing equivalent air layer thickness ($0.2 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$) as vapor control layer, instead of PE-foil.

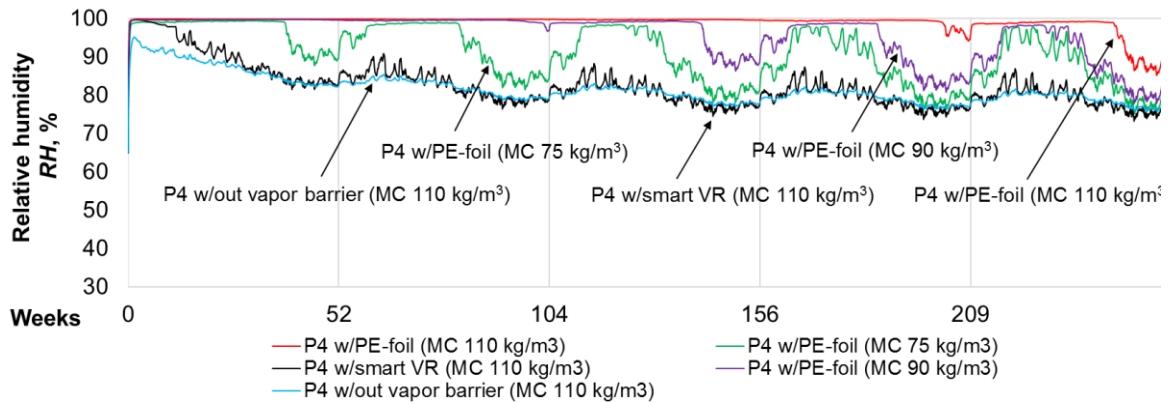


Fig. 4. RH on the inner surface of the air&vapor barrier, in the location of wooden studs in point 4 with the different vapor control layers and different initial moisture content (MC) of concrete large element throughout a 5-year period.

The analysis was continued with monitoring the RH level in the points 3, 4, 5 and 6 throughout a $2\frac{1}{2}$ year period when smart vapor retarder with changing equivalent air layer thickness properties ($0.2 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$) as air&vapor control layer was used and the initial moisture content of the concrete large panel was $w=110 \text{ kg/m}^3$. The RH level in monitored points dropped after initiation relatively quickly and reached an equilibrium state in the course of 4-5 months (see Fig. 5 left). The highest level of RH throughout the calculated period was observed in point 4. The overall trend of RH in point 6 was higher than in the first stage of simulations (see Fig. 3) and the lowest levels were detected in point 5.

The final stage of the assessment of moisture dry-out and hygrothermal performance of the structure was conducted with the calculation of mould indexes in monitored points 3, 4, 5 and 6 with the mould growth and decline model [17,18]. To the materials in the structure was initially given the rating of “very sensitive” in the sensitivity classification, which is described in the mould growth model as a class for untreated wood with lots of nutrients for biological growth. These calculations gave unsatisfactory results (i.e. $M > 1$) in points 3, 4 and 5 (see Fig. 5 right).

At the next step the sensitivity class “sensitive” was applied, which is described as class for planed wood, paper-coated and wood-based products. In the most critical point 4 and in the point 5, the mould index exceeded the critical level ($M>1$).

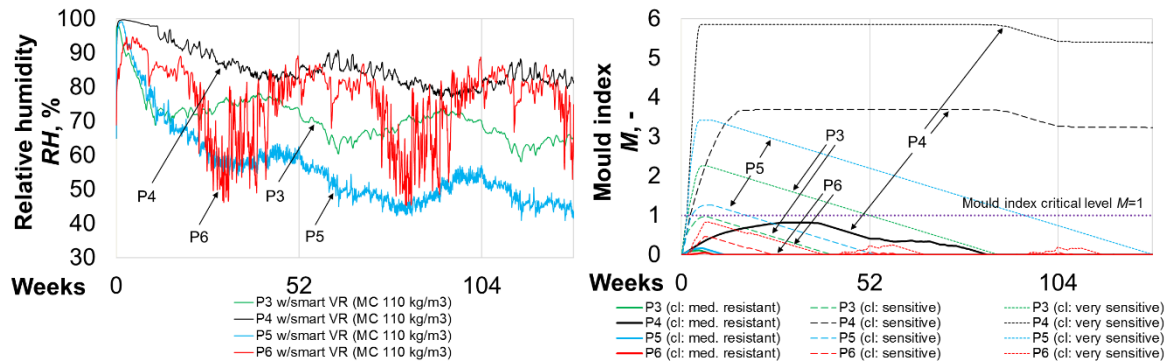


Fig. 5. *RH* in the analyzed points 3, 4, 5 and 6 with vapor retarder ($0.2\text{m}<S_d<5\text{m}$) when the initial moisture content of the concrete large panel is $w=110\text{ kg/m}^3$ (left). Calculation results of mould indexes (M) with different sensitivity classes in the points 3, 4, 5 and 6 with smart vapor retarder ($0.2\text{m}<S_d<5\text{m}$) when the initial moisture content of the concrete large panel is $w=110\text{ kg/m}^3$ (right).

Taking into account the properties of construction and materials in the analyzed structure points, the sensitivity class was switched to “medium resistant”, which is the class for cement or plastic based materials and mineral fibers and describes the situation in monitored points most accurately. The mould index was recalculated and in the most critical point 4, the result obtained was under the critical level ($M<1$). No noteworthy mould formation in other points (3, 5 and 6) was detected as a result of this calculation stage as well.

As an alternative, the solution with oriented strand board (OSB) as a vapor retarder layer was examined instead of thin rolled vapor retarder. For the evaluation of this solution the *RH* in point 4 was observed throughout a 2½ year period and mould index was calculated with 22 mm OSB, when the initial moisture content of the existing concrete large element external slab was $w=75\text{ kg/m}^3$ or 110 kg/m^3 . The calculation results indicated that with initial moisture content $w=75\text{ kg/m}^3$ or 110 kg/m^3 of concrete large element, the *RH* level in monitored point 4 dropped gradually in the course of 8-10 months to its equilibrium state, which was followed by a period of normal weather dynamics (see Fig. 6 left).

Subsequently, the mould index M was calculated with the same conditions with mould growth sensitivity class “very sensitive”, following the properties of the wooden-based OSB. The results indicated that the mould index remained under the critical level ($M<1$) when the initial moisture content of the concrete slab was $w\leq 75\text{ kg/m}^3$, meaning basically situation without wind-driven rain load. When the initial moisture content of concrete slab was $w>75\text{ kg/m}^3$ then the mould index calculations gave unsatisfactory results in point 4 (i.e. $M>1$, see Fig. 6 right).

Mould index was calculated also with the same conditions in point 4 with originally designed solution, where PE-foil as air&vapor barrier layer was intended to use and the initial moisture content of the existing concrete large element external slab was $w=75\text{ kg/m}^3$, 90 kg/m^3 or 110 kg/m^3 . With the stated initial moisture content levels and with all mould growth model sensitivity classes, the calculated mould index exceeded the critical level to a large extent ($M>3$). Calculations of the mould index in point 4, when PE-foil as air&vapor barrier layer was used, gave satisfactory results (i.e. $M<1$) in sensitivity class “medium resistant” only in cases where the initial moisture content of the existing concrete large element external slab was $w\leq 55\text{ kg/m}^3$. Calculations with higher sensitivity classes (“sensitive” and “very sensitive”) gave unsatisfactory results (i.e. $M>1$) in point 4, which indicates that in this type of structure, with PE-foil (or with similar to its vapor resistance material) it is not allowed to use untreated wood and wood- or paper-based materials.

Therefore, meeting the requirements of the hygrothermal performance solution was ascertained in point 4 with smart vapor retarder with changing equivalent air layer thickness $0.2\text{ m}<S_d<5\text{ m}$ when the initial moisture content of existing concrete large panel was $w\leq 110\text{ kg/m}^3$ or with 22 mm OSB when the initial moisture content of the existing concrete large panel was $w\leq 75\text{ kg/m}^3$ or with PE-foil when the initial moisture content of existing concrete large panel was $w\leq 55\text{ kg/m}^3$. In all of these solutions prefabricated modular element’s insulation thermal resistance was $R\geq 7.5\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ with equivalent air layer thickness $S_d\leq 0.5\text{ m}$ and element’s insulation layers were covered with 30 mm dense mineral wool wind barrier ($R\geq 0.8\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$; $S_d\leq 0.05\text{ m}$) and firm facade boarding.

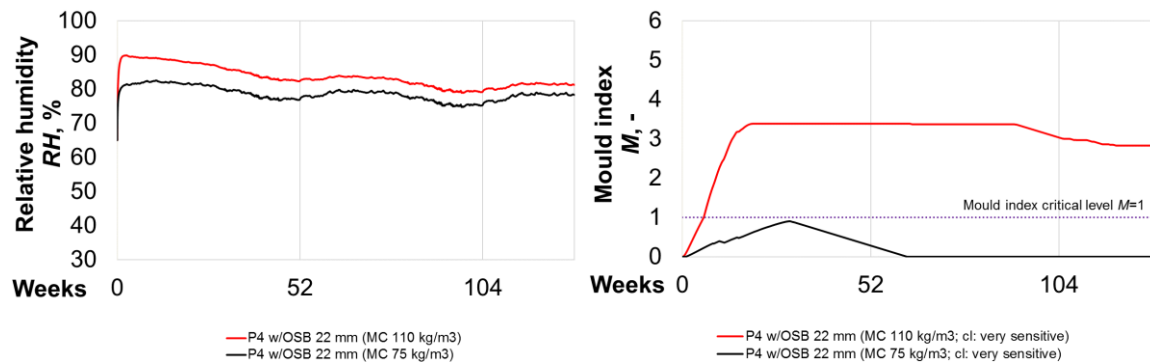


Fig. 6. RH in the analyzed point 4 with OSB as vapor retarder when the initial moisture content of the concrete large panel is 75 kg/m^3 or 110 kg/m^3 (left). Calculation results of mould indexes (M) with the class “very sensitive” in the point 4 with OSB as vapor retarder when the initial moisture content of the concrete large panel is 75 kg/m^3 or 110 kg/m^3 (right).

Discussion

In the course of the analysis of the calculation results it was confirmed that both initial moisture load and the hygrothermal properties of the air&vapor barrier materials are determinative for hygrothermal performance, particularly for the level of the mould index and changes in it. The values of the RH and mould index, and consequently the probability of mould formation, may vary to a very high extent in the case of walls with the same thermal transmittance when there are differences in initial moisture load as well as in air, vapor and wind barrier materials.

Considering the fact, that it is common in cold climate that most of the year the indoor moisture load is higher than on the outside, the hygrothermal design of building envelopes should also consider the moisture flux that may penetrate into the building envelope with the direction from inside to outside and pass layers with different properties in the building structures (e.g. cracks or open junctions in the internal side of the structures). In the course of this process, unregarded moisture may accumulate in the structure's layers and cause higher moisture load and mould formation in addition to higher thermal transmittance. The calculations where PE-foil was used as an air&vapor barrier with high vapor resistance (see Fig. 3 and Fig. 4), showed that there is a very high risk of occurrence of humidity problems. Moisture volume, drying out and moving through the existing wall layers, is trapped behind the foil (see points $t4$ & $RH4$ and $t5$ & $RH5$ in Fig. 1) and RH level will stay there at the full saturation state for many years. Mould index calculation results in critical point 4 (see $t4$ & $RH4$ in Fig. 1) with PE-foil as air&vapor barrier layer were in compliance with analysis results of RH levels and confirmed that the high initial moisture content of existing concrete element (in this case $w > 55 \text{ kg/m}^3$) will lead to extensive moisture growth. When using a vapor retarder with changing equivalent air layer thickness properties (e.g. $0.2 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$), the risk of moisture accumulation in the structure is lower and the entire envelope will obtain the equilibrium moisture state in 4-5 months.

However, it is very important to note that this approach is true if outer layers (i.e. insulation and wind barrier) will not resist the moisture flow and the vapor control layer ensures the required moisture resistance. Nevertheless, sometimes there is an unavoidable need to consider alternatives. If the design or transportation restrictions of factory-made modular elements does not allow the use of thin rolled vapor retarders or rigid and a stiffening layer on modules is required, then OSB is a functional solution. As the calculations in this study have demonstrated, this solution has strict limits: during the construction works, when prefabricated modules will be installed onto the building, the initial moisture content of an existing construction must not exceed the limit $w = 75 \text{ kg/m}^3$. According to the measurements and calculations [15,16], the moisture content is about 75 kg/m^3 in existing, previously constructed and in good condition concrete elements only in the dry (not rainy) summer-time period. In the Estonian humid and cold climate conditions, starting from September and lasting until the end of April, the average moisture content in concrete elements is around $90\text{--}110 \text{ kg/m}^3$.

As preceding calculations have shown, there are big differences of hygrothermal performance and risks of failure when designed air&vapor barrier and/or wind barrier layers will be changed in the construction process without complementary control calculations. Many authors [8,10–12] have pointed out that in highly insulated buildings, high thermal resistance and vapor permeability of wind barrier layer are the key components of the well-functioning highly insulated building envelope. Longer constructional moisture dry-

out period is worsening the hygrothermal condition of the entire building and its envelope. On the other hand, if vapor control layer is missing, then at conjunction surfaces of existing and new layers mould risk is low, but the further moisture flux cannot be controlled. It is very important to take into account and to consider the possible building technology mistakes or cracks and open joints in existing structures which allows uncontrolled moisture flow to move towards to outer layers where it may cause the problems because of moisture excess as described above. Particularly because of unknown state of existing structures and primarily because of its moisture content, this is a firm suggestion to conduct the hygrothermal measurements of existing structures before final design decisions and construction works.

Therefore, the evaluation of building state, presence and properties of the air and vapor barrier layer, preventing (or allowing) the penetration of moisture, as well as its high quality of installation, are very important on the surface of the existing concrete building envelopes in renovation process towards to nZEB. Based in this study, we may declare that the importance of that is arising if the existing structures with relatively high moisture content are covered with new thick insulation and finishing layers.

Conclusions

The hygrothermal performance of the building envelope, constructed of concrete large panels and covered with prefabricated modular elements in Estonia was analyzed in this research to collect data for further process of hygrothermal design of nZEB and renovation of prefabricated concrete large panel multi-storey buildings.

The most important factors for the moisture dry-out are similar to the risks related to the formation of mould and water vapor condensate. Contrariwise to the common timber-frame wall, where the PE-foil as the air&vapor barrier does not cause any serious problems to the hygrothermal performance, in modular insulation panels it prevents the constructional moisture dry-out and causes high risk of mould formation. In other words – an air&vapor barrier layer with high water vapor resistance on the surface of the moist existing structure may lead to high moisture accumulation between the installed air&vapor barrier and existing structures. The dry-out of initially moist concrete slabs, that have been insulated and covered with an air&vapor barrier layer, may take several years. The condition of existing structures and uncontrolled high indoor moisture excess load may cause unexpected moisture flux and increase humidity loads in the structure.

A functional assembly solution is presented as a conclusion of this study (see Fig. 7). This is modified alternative to initially designed solution (see Fig. 1) with remarks to important details and units from a point of view of the hygrothermal performance.

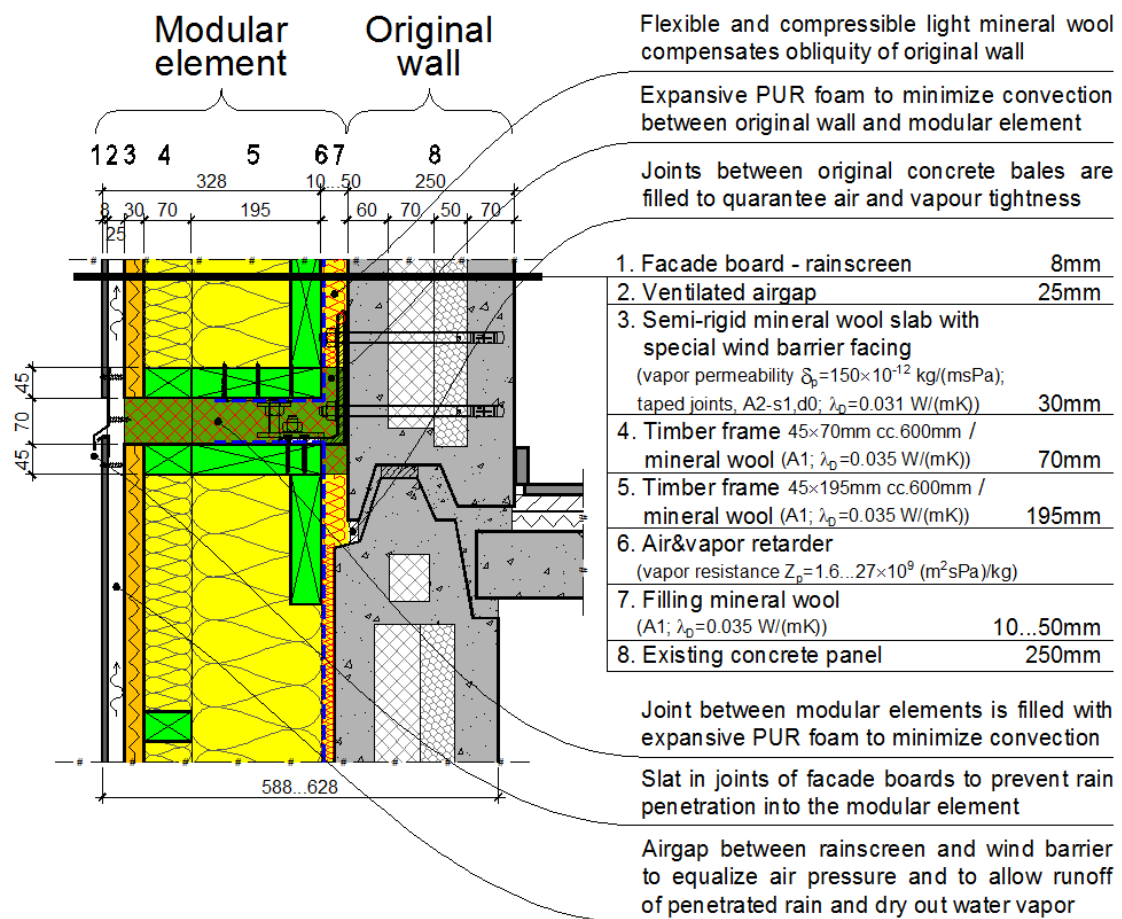


Fig. 7. Modified external wall with modular element, based on hygrothermal calculations.

Meeting the requirements of the hygrothermal performance of studied solutions was ascertained with smart vapor retarder with changing equivalent air layer thickness $0.2 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$ when the initial moisture content of existing concrete large panel was $w \leq 110 \text{ kg/m}^3$ or with 22 mm OSB as vapor control layer when the initial moisture content of the existing concrete large panel was $w \leq 75 \text{ kg/m}^3$ or with PE-foil as air&vapor barrier when the initial moisture content of existing concrete large panel was $w \leq 55 \text{ kg/m}^3$.

As a result, with preliminary measurements of building state and designing, carefully considered vapor control layer, the vapor permeability of which is controlled by hygrothermal calculations, and with insulation and wind barrier layers with high thermal resistance and vapor permeability, it is possible to achieve good results and build sustainable solutions according to the up-to-date requirements of nZEB with prefabricated renovation modules on concrete large panel buildings renovation in cold and humid climate.

Acknowledgements

This research was supported by the Estonian Centre of Excellence in Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts, ZEBE, grant TK146 funded by the European Regional Development Fund, and by the Estonian Research Council, with Institutional research funding grant IUT1-15 and by EU funded Horizon 2020 project “Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for modular retrofitting and smart connections (MORE-CONNECT)”.

References

- [1] Balaras, C.A., Drousa, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis, S., Deterioration of European apartment buildings, *Energy and Buildings*. 37 (2005) 515–527. doi:10.1016/j.enbuild.2004.09.010.
- [2] Kuusk, K., Kalamees, T., nZEB Retrofit of a Concrete Large Panel Apartment Building, in: *Energy Procedia*, 2015: pp. 985–990. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.038.
- [3] Pikas, E., Thalfeldt, M., Kurnitski, J., Liias, R., Extra cost analyses of two apartment buildings for achieving nearly zero and

- low energy buildings, *Energy*. 84 (2015) 623–633. doi:10.1016/j.energy.2015.03.026.
- [4] Kalamees, T., Paap, L., Kuusk, K., Mäuring, T., Hallik, J., Valge, M., et al., The first year's results from the first passive house in Estonia, in: J. Arfvidsson, L.-E. Harderup, A. Kumlin, B. Rosencrantz (Eds.), *Proc. 10th Nord. Symp. Build. Phys.*, 15–19 June 2014 Lund, Sweden, 2014; pp. 758–765.
 - [5] Kuusk, K., Kalamees, T., Retrofit cost-effectiveness: Estonian apartment buildings, *Building Research & Information*. (2015) 1–15. doi:10.1080/09613218.2016.1103117.
 - [6] Veld, P.O., MORE-CONNECT: Development and Advanced Prefabrication of Innovative, Multifunctional Building Envelope Elements for Modular Retrofitting and Smart Connections, *Energy Procedia*. 78 (2015) 1057–1062. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.026.
 - [7] Kalamees, T., Lupišek, A., Mørck, O.C., Borodinecs, A., Aalmeida, M., Rovers, R., et al., What kind of heat loss requirements nZEB and deep renovation sets for building envelope?, in: *Cent. Eur. Towar. Sustain. Build.*, University Centre for Energy Efficient Buildings Czech Technical University in Prague, 22–24 June 2016 Prague, 2016.
 - [8] Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., et al., Ilmastomuutoksen ja lämmöneristuksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa (in english: Effects of Climate Change and Increasing of Thermal Insulation on Moisture Performance of Envelope, Tampere, 2013.
 - [9] Mundt-Petersen, S.O., Moisture Safety in Wood Frame Buildings - Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety, Lund University, 2015.
 - [10] Pihelo, P., Kalamees, T., The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall, *Journal of Building Engineering*. 6 (2016) 29–38. doi:10.1016/j.jobbe.2016.02.002.
 - [11] Fedorik, F., Malaska, M., Hannila, R., Haapala, A., Improving the thermal performance of concrete-sandwich envelopes in relation to the moisture behaviour of building structures in boreal conditions, *Energy and Buildings*. 107 (2015) 226–233. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.020.
 - [12] Gullbrekken, L., Geving, S., Time, B., Andresen, I., Holme, J., Moisture conditions in well-insulated wood-frame walls. Simulations, laboratory measurements and field measurements, *Wood Material Science & Engineering*. (2015) 232–244. doi:http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2015.1064473.
 - [13] Nicolai, A., Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials, Syracuse University, 2008.
 - [14] Grunewald, J., Diffusiver und konvektiver Stoff-und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen (in english: Diffusive and Convective Mass and Energy Transport in Capillary Porous Building Materials), Dresden University of Technology, 1997.
 - [15] Ilomets, S., Kalamees, T., Case-study analysis on hygrothermal performance of ETICS on concrete wall after low-budget energy-renovation, in: *Proc. XII Int. Conf. Perform. Ext. Envel. Whole Build.* XII Int. Conf. Perform. Ext. Envel. Whole Build. Florida, USA, December 1-5, 2013, ASHRAE, 2013.
 - [16] Pihelo, P., Lelumees, M., Kalamees, T., Potential of Moisture Dry-out from Concrete Wall in Estonian Climate, in: *Int. RILEM Conf. Mater. Syst. Struct. Civ. Eng. Conf. Segm. Moisture Mater. Struct.* 22-24 August 2016, Tech. Univ. Denmark, Lyngby, Denmark, Lyngby, Denmark, 2016.
 - [17] Hukka, A., Viitanen, H., A mathematical model of mould growth on wooden material, *Wood Science and Technology*. 33 (1999) 475–485. doi:10.1007/s002260050131.
 - [18] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K., Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials, in: *Therm. Perform. Ext. Envel. Build.* XI, ASHRAE, 2010.
 - [19] Arumägi, E., Kalamees, T., Kallavus, U., Indoor climate conditions and hygrothermal loads in historic wooden apartment buildings in cold climates, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 64 (2015) 146–156. doi:10.3176/proc.2015.2.03.
 - [20] Kalamees, T., Ilomets, S., Arumägi, E., Alev, Ü., Kõiv, T.-A., Mikola, A., et al., Indoor hygrothermal conditions in estonian old multi-storey brick apartment buildings. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, in: *12th Int. Conf. Indoor Air Qual. Clim.*, 2011.
 - [21] Kalamees, T., Indoor Climate Conditions and Ventilation Performance in Estonian Lightweight Detached Houses, *Indoor and Built Environment*. 15 (2006) 555–569. doi:10.1177/1420326X06073076.
 - [22] EVS-EN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation, Eesti Standardikeskus, 2007.
 - [23] Kalamees, T., Vinha, J., Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations, *Journal of Building Physics*. 27 (2004) 199–220. doi:10.1177/1097196304038839.
 - [24] Kalamees, T., Kurnitski, J., Estonian climate analysis for selecting the test reference year, in: *HB 2006 - Heal. Build. Creat. a Heal. Indoor Environ. People, Proc.*, 2006; pp. 207–212. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84871561761&partnerID=tZOTx3y1>.
 - [25] Vinha, J., Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions: A method of determining a sufficient water vapour resistance of the internal lining of a wall assembly, 2007.