



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EHITISTE PROJEKTEERIMISE INSTITUUT
EHITUSFÜÜSIKA JA ENERGIATÖHUSUSE ÕPPETOOL

Teaduslik uurimistöo projektis: „Interreg IVB Baltic Sea Region Project Co₂olBricks - Climate Change, Cultural Heritage & Energy Efficient Monuments“

Muinsuskaitse all oleva koolimaja tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse soojus- ja niiskustehnilise toimivuse uuring



Paul Klõšeiko, Endrik Arumägi, Targo Kalamees

Eessõna

Käesolev uurimistöo aruanne võtab kokku Tallinna Tehnikaülikooli ehitusfüüsika ja energiatõhususe õppetoolis projekti „Interreg IVB Baltic Sea Region Project Co₂olBricks - Climate Change, Cultural Heritage & Energy Efficient Monuments“ raames läbiviidud uurimisprojekti „Muinsuskaitse all oleva koolimaja tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse soojus- ja niiskustehnilise toimivuse uuring“.

Uurimistöo on tehtud Säästva Renoveerimise Infokeskuse (SRIK) tellimusel ja finantseerimisel. SRIK poole esindajad projektis olid:

- Tarmo Elvisto
- Silver Meejärv
- Kadi Varda

Täname uurimistöo tellijat ja rahastajat SRIK-i ning Kohtla Järve linna (Jelena Dulneva, Jelena Keningi, Riina Ivanova) lepliku ja vastutuleliku koostöö eest. Mõõte- ja sisekliimatagamissüsteemi loomise ning koostöö eest selle haldamisel täname IT-Villa OÜ-d. Samuti on tänatud materjalitootjate esindajad Tervemaja OÜ, Remmers Baltica OÜ ja Nordspur OÜ. Abi eest materjaliomaduste määramisel täname TTÜ Ehitustootluse instituudi Ehitusmaterjalide õppetooli töötajaid Tanel Tuisk, Eneli Liisma ja Mattias Põldaru.

Tallinnas, november 2013.

Autorid

Sisukord

1	Uuringu kirjeldus	4
1.1	Sissejuhatus	4
1.2	Uurimistöö eesmärgid	4
1.3	Meetodid	4
1.3.1	Välimõõtmised	5
1.3.2	Arvutuslik analüüs	12
2	Mõõtmistulemused	14
2.1	Kliimatingimused	14
2.2	Materjalide reageerimine kliimatingimuste muutustele	15
2.3	Testseinte niiskustehniline toimivus - suhteline niiskus soojustuse ja esialgse seina vahel	15
2.4	Soojusläbivus ja pinnatemperatuur	17
3	Arvutustulemused	18
3.1	Arvutusmudeli kalibreerimine	18
3.2	Spordi tn koolihoone seespoolse lisasoojustusega välisseina niiskustehniline toimivus	19
4	Tulemuste hindamine	22
4.1	Mõõtmistulemused	22
4.2	Arvutisimulatsioonid	23
5	Kokkuvõte	24
6	Kasutatud kirjandus	26

1 Uuringu kirjeldus

1.1 Sissejuhatus

Uuring keskendub Kohtla-Järvel, Spordi tänav 2 paikneva muinsuskaitse all oleva koolihoone tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse soojus- ja niiskustehniline toimivuse uurimisele.

Seespoolne lisasoojustamine on piirdetarindi soojus- ja niiskustehnilisest seisukohast riskantne tegevus. Peamised riskid on:

- kandeseina sisepinnatemperatuuri alandamisega seotud suhtelise niiskuse tõus üle kriitilise piiri, mille tagajärjeks võib olla hallituse kasv või veeauru kondenseerumine soojustatava välisseina sisepinnale;
- külmasildade mõju suurenemine;
- välisseina välispinna temperatuuri alanemine ja sellega kaasnev suurem risk külmakahjustuste tekkeks;
- hoonete soojuslik massiivsus väheneb;
- väheneb võimalus seina niiskuse ruumi poole välja kuivamiseks.

Kui mälestistel on raskendatud fassaadi välispinna muutmine ja planeeritakse seespoolset lisasoojustamist, peavad sellega seotud riskid olema maandatud. Seetõttu on vajalik eelnev põhjalik uuring, selgitamaks kuidas seespoolse lisasoojustusega välissein soojus- ja niiskustehniliselt toimib ja milliste materjalidega on riskid väiksemad.

1.2 Uurimistöö eesmärgid

Uurimisprojekti peamised eesmärgid on:

- lisasoojustatud välisseinte soojus- ja niiskustehnilise toimivuse analüüs reaalses kliimatingimustes välimõõtmiste abil;
- võrrelda nelja erineva soojustusmaterjali soojus- ja niiskustehnilist toimivust:
 - kaltsiumsilikaat (CaSi, materjal on leidnud kasutust Kesk-Euroopas tellishoonete välisseinte seespoolisel lisasoojustamisel; Eestis kasutuskogemus puudub);
 - poorbetoon (AAC);
 - vahtpolüisotsüanuraat (PIR, veeaurutihe soojustusmaterjal)
 - vahtpolüuretaan kapillaaraktiivsete kanalitega (iQ-T, kombinatsioon madala soojuslähivusega ja kapillaaraktiivsest materjalist)
- lisasoojustatud välisseinte soojus- ja niiskustehnilise toimivuse arvutuslik analüüs selgitamaks uuritud koolihoone välisseina lisasoojustamise lahenduste sobivust erinevatesse kliimakoormustesse.

1.3 Meetodid

Uuring viidi läbi kaheetapilisena:

- välimõõtmised seespoolse lisasoojustatud välisseinaga ehitismälestise juures (seina toimivus tegelikes kliimatingimustes, alusandmed arvutusmodeli kalibreerimiseks);
- dünaamilise arvutusmodeli kalibreerimine ja arvutuslik analüüs koolihoone välispiirde soojus- ja niiskustehnilise toimivuse kontrollimiseks dünaamilise simulatsiooni abil.



Joonis 1 Kohtla-Järve Spordi tn. 2 koolihoone välisvaated. Testruumi soojustatud osa asus all vasakul oleva foto esimese korruse akendeta seinal.

1.3.1 Välimõõtmised

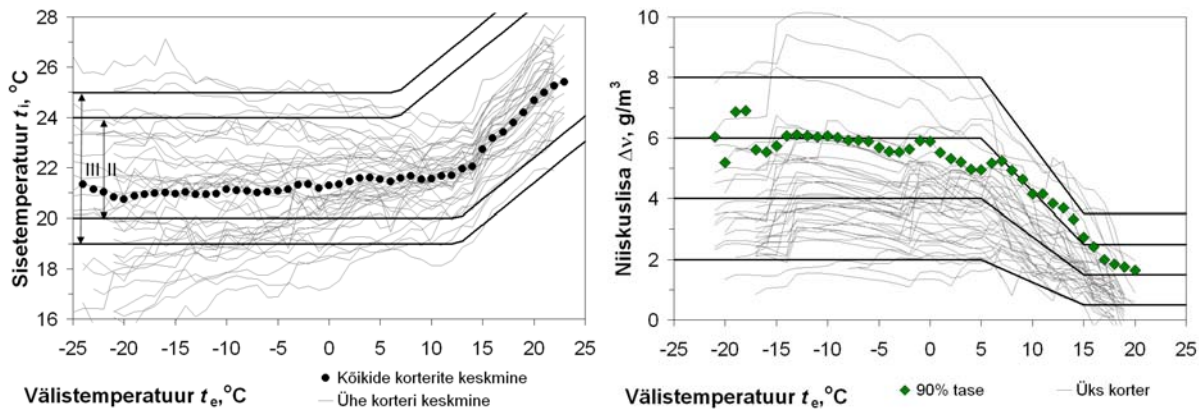
Välimõõtmised teostati Kohtla-Järve koolihoone (vt. Joonis 1) põhjapoolsel välisseinal selgitamaks lisasoojustatud tellisseina soojus- ja niiskustehnilist toimivust. Uuritav välissein rajati esimese korruse ühiselamu ruumi. Kasutatud ruum (edaspidi „testruum“) oli sobiv, kuna põhjafassaadil on madalam päikesekiirguse mõju.



Joonis 2 Soojustuse ja mõõteseadmete paigaldus.

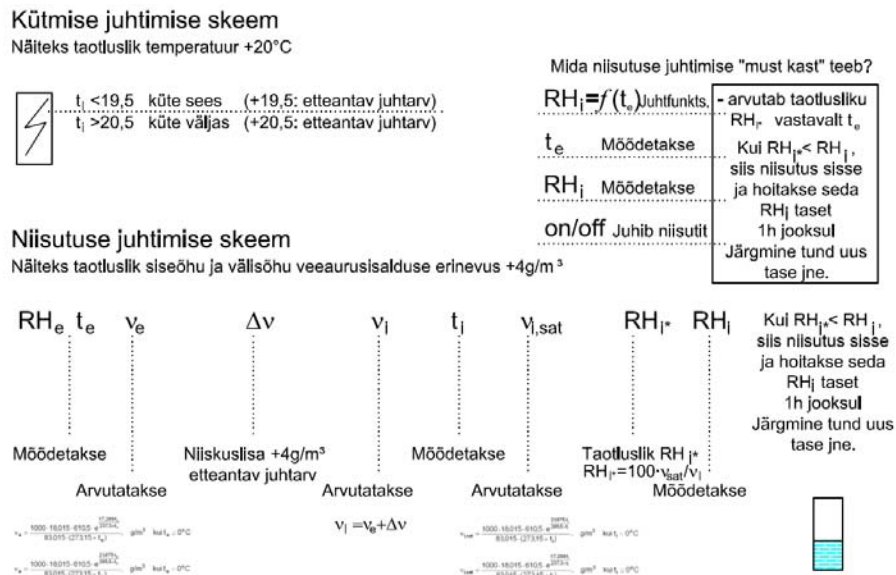
Testruumi sisekliimat reguleeriti elektrikütteradiaatori ja niisutiga, mida juhiti keskse andmetalletus- ning kliimatagamissüsteemiga.

Sisekliima parameetrid valiti vastavalt uurimistöös „Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga“ esitatud sisekliima mõõtmiste tulemustele (vt. Joonis 3) jälgendamaks Eesti telliskorterelamute sisekliimat (Kalamees et al 2010, 2012).



Joonis 3 Sisetemperatuuri (vasakul) ja niiskuslisa (paremal) sõltuvus välistemperatuurist Eesti telliskorterelamutes.

Testruumi temperatuuri ja õhuniiskust juhiti vastavalt välisõhu temperatuurile ja etteantud seadesuurustele. Joonis 3 on esitatud sisetemperatuuri sõltuvus välistemperatuurist (Joonis 3 vasak) ja niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist (Joonis 3 parem). Joonis 4 on esitatud ruumi kütte- ja niisutusseadme põhimõtteline juhtimise skeem.



Joonis 4 Testruumi sisekliima põhimõtteline juhtimise skeem.

Testruumi sisetemperatuuri seade arv oli 21°C. Niiskuslisa seade arvud valiti jälgendamaks tüüpilist renoveerimisprotsessi. Mõõtevahemikul esinesid järgmised niisutusperiodid:

- P1: soojustamine on lõpetatud, ruumi kütmine 27.03.2012...4.07.2012
- P2: niisutuse algus väljendamaks sissekolimist, kõrge niiskuslisa graafik. 4.07.2012...6.08.2012, Δv 2.1 g/m³
- P3: niisutusperiod uurimaks teistsuguse niiskuskoormuse mõju erinevatele seinaldikudele, keskkõrge niiskuslisa graafik. 6.08.2012...8.10.2012, Δv 2.9 g/m³
- P4: keskmine niiskuslisa graafik, 8.10.2012...14.12.2012, Δv 4.2 g/m³
- P5: madal niiskuskoormus, uurimaks erinevate seinaldikude väljakuivamise iseloomu, 14.12.2012-22.01.2013, Δv 2.5 g/m³ (niisutatud suhtelise niiskuse järgi)
- P6: keskkõrge niiskuslisa graafik, 22.01.2013-16.02.2013, Δv 4.6 g/m³,
- P7: kõrge niiskuslisa graafik, 16.02.2013-17.10.2013, Δv 3.6 g/m³

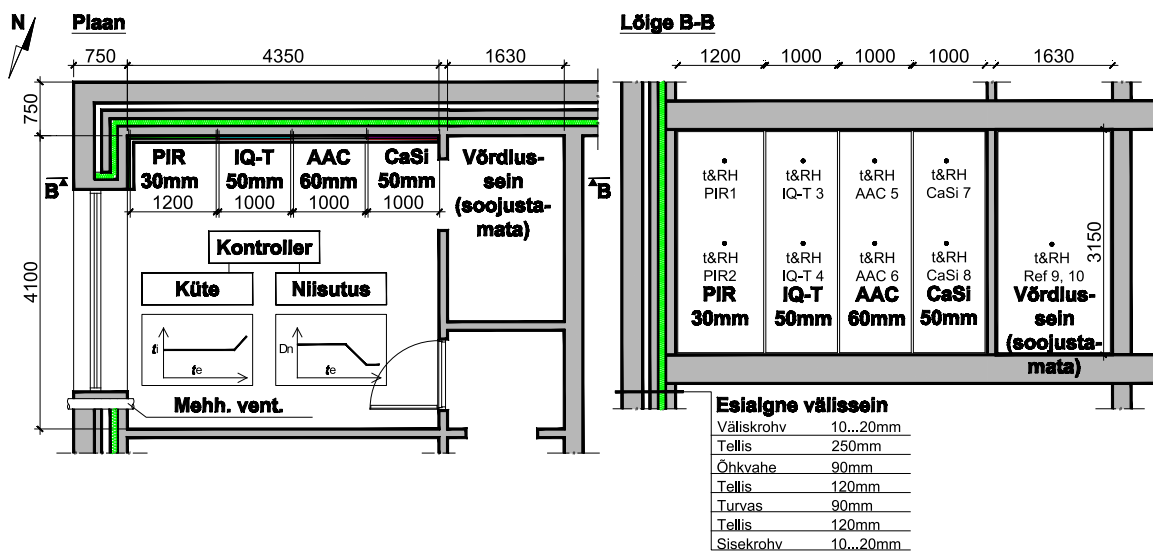
1.3.1.1 Katsetatavad soojustusmaterjalid

Esiolgne soojustamata välissein oli 73-75 cm paks: koosnes kolmest tellisekihist, õhkuvahest välis- ja keskmise tellisekihi vahel ning turbakihist keskmise ja sisemise tellisekihi vahel. (Joonis 5). Soojustuskihtide paksused valiti esindamiseks tüüpilisi tooteid ning vältimaks suuri soojuslähivuse erinevusi erinevate lisasoojustatud seinalõikude vahel. Lisasoojustamata seinosa, võrdlussein, asus testruumi avatud naaberruumis.

Testruumi välisseina olemasolev viimistlus eemaldati kuni tellisseina katva krohvikihini. Lisatud soojustusmaterjalid paigaldati lähtuvalt materjalitootja juhenditele. CaSi ja IQ-T paigaldus teostati tootjafirma poolt koolitatud tööjõu poolt. Soojustusmaterjalide paigaldusel kasutati süsteemseid tooteid, s.t. tootja poolt ettenähtud liimsegusid ja krohve.

Erinevate soojustusmaterjalidega testseinte lõigud eraldati üksteisest veeauru- ja õhutihedalt nii, et oleks välditud niiskuse ja õhu liikumine erinevate soojustusmaterjalidega soojustatud seinaosade vahel. Vältimaks niiskuse liikumist tellisseina tasapinnas lõigati seinuosade piirile ~6...8 cm sügavused vuugid, mis täideti alumiiniumfooliumi riba ja polüuretaanvahuga.

Testruumi välissein (põhjapoolne ilma akendeta otsasein ja läänepoolne sein kuni aknani) lisasoojustati kogu kõrguses ~1m laiustes osades kasutades nelja erinevat soojustusmaterjali (vt. Tabel 1, Joonis 6).



Joonis 5 Katseseina plaan ja lõige.

Tabel 1 Uuritud seinalõikude iseloomustus.



Seinalõik 1 (PIR)

Suletud pooridega polüisotsüanuraatvahtplaat: madala soojuseri juhtivusega ja suhteliselt kõrge veeaurudifusioonitakistusega moodustades aurutõkke.

Toode: SPU Anselmi

Soojustuse paksus 30mm, (plaat kokku 40mm)



Seinalõik 2 (iQ-T)

Polüuretaanplaat kapillaaraktiivsete kanalitega – ühendab madala soojuseri juhtivuse ja teatava kapillaaraktiivsuse.

Toode: Remmers iQ-Therm

Soojustuse paksus: 50mm



Seinalõik 3 (AAC)

Poorbetoonplaat, kõrge avatud poorsus, kapillaaraktiivne materjal, madal soojuseri juhtivus.

Toode: Ytong Multipor

Soojustuse paksus: 60mm



Seinalõik 4 (CaSi)

Kaltsiumsilikaat (väga kapillaaraktiivne materjal väga kõrge avatud poorsusega ja madala veeaurudifusioonitakistusega.

Toode: Remmers SLP N

Soojustuse paksus: 50mm

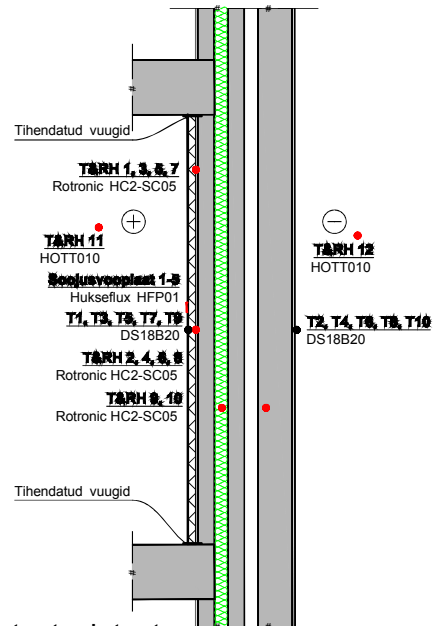
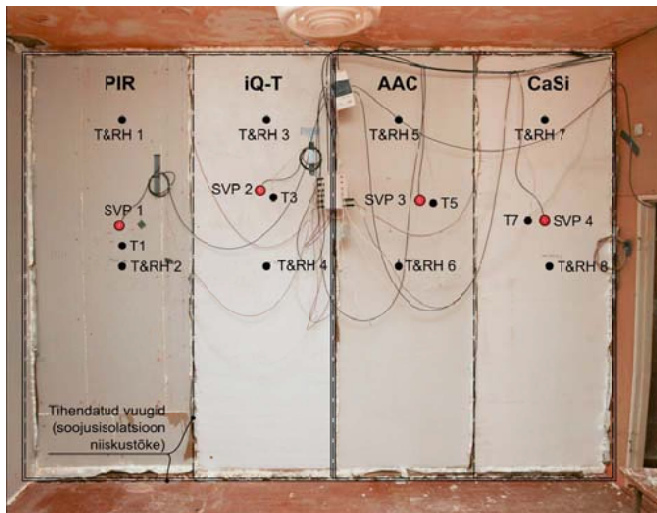
Seinalõik 5 (Ref)

Soojustamata võrdlussein.

1.3.1.2 Mõõteseadmed

Mõõtmistel kasutatud andurid ja andmesalvestid olid valitud nii, et olid täidetud järgmised tehnilised näitajad:

- Tarindisese temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmisel:
 - temperatuuri mõõtevahemik vähemalt: $-30\text{ °C} \dots +50\text{ °C}$;
 - temperatuuri mõõtetäpsus e. maksimaalne mõõteviga: $\leq \pm 0,3\text{ °C}$;
 - suhtelise niiskuse mõõtevahemik vähemalt $5\% \dots 99\%$;
 - suhtelise niiskuse mõõtetäpsus e. maksimaalne mõõteviga viga: $\leq \pm 2\%$;
 - mõõteanduri läbimõõt: $\leq \varnothing 5\text{ mm}$;
 - väljundsignaal: $0 - 1\text{ V}$ või $0-10\text{ V}$ või muu ostetava universaalse andmesalvestiga sobiv;
 - vajadusel ühenduslüli anduri ühendamiseks universaalse andmesalvestiga;
 - ühenduskaabli pikkus: $\geq 2\text{ m}$;
 - kalibreerimistunnistus.
- Tarindi pinnatemperatuuri mõõtmisel:
 - temperatuuri mõõtevahemik vähemalt: $-30\text{ °C} \dots +50\text{ °C}$;
 - temperatuuri mõõtetäpsus e. maksimaalne mõõteviga: $\leq \pm 0,4\text{ °C}$;
 - mõõteanduri läbimõõt: $\varnothing 4\text{ mm}$;
 - vajadusel ühenduslüli anduri ühendamiseks universaalse andmesalvestiga;
 - ühenduskaabli pikkus: $\geq 1,5\text{ m}$;
 - andmesalvestus:
 - salvestatakse pinnatemperatuur, logeri temperatuur ja suhteline niiskus
 - mõõteandmete salvestuse maht: >20000 lugemit
 - autonoomse toiteallika kestvus: > 1 aasta; patarei tühjenemine või vahetus ei tohi hävitada mõõteandmeid;
 - mõõteandmete salvestuse intervall: $1\text{ min} \dots 1\text{ h}$;
 - viitega käivituse võimalus;
 - andmete mahalaadimise võimalus ilma mõõtmist katkestamata;
- Soojusvoo plaat tarindit läbiva soojusvoo mõõtmisel:
 - mõõtevahemik vähemalt: $2\text{ W/m}^2 \dots 20\text{ W/m}^2$;
 - mõõtetäpsus e. maksimaalne mõõteviga: $\leq +5\% / -15\%$;
 - vajadusel ühenduslüli anduri ühendamiseks universaalse andmelogeriga;
 - ühenduskaabli pikkus: $\geq 2\text{ m}$.
- Diferentsiaalmanomeeter jätkuvaks õhurõhkude mõõtmiseks ja salvestamiseks hoone siseruumi ja väliskeskkonna vahel:
 - mõõteala $\pm 25\text{ Pa} \dots \pm 100\text{ Pa}$;
 - mõõtetäpsus $\pm 2\%$.



Joonis 6 Andurite paigutus seinas, vaade ja lõige testseintest.

Mõõteandurite paigalduskohad lisasoojustatud seinas:

- tellisseina ja soojustuse vahel 1/2 ja 2/3 kõrgusel: kokku 8 tk temperatuur, suhteline niiskus ;
- piirdetarindi sise- ja välispind: kokku 8 tk temperatuur, suhteline niiskus;
- piirdetarindi soojusvool, andur seina sisepinnal: kokku 4 tk soojusvool;
- sise- ja välisõhurõhkude erinevus mõõdetakse diferentsiaalmanomeertiga: 1tk;

Mõõteandurite paigalduskohad lisasoojustamata seinas (võrdlussein):

- piirdetarindi sise- ja välispind 1/2 kõrgusel: kokku 2 tk temperatuur;
- piirdetarindi sees kahel sügavusel 1/2 kõrgusel: kokku 2 tk temperatuur, suhteline niiskus;
- piirdetarindi soojusvool, andur seina sisepinnal: kokku 1 tk soojusvool.

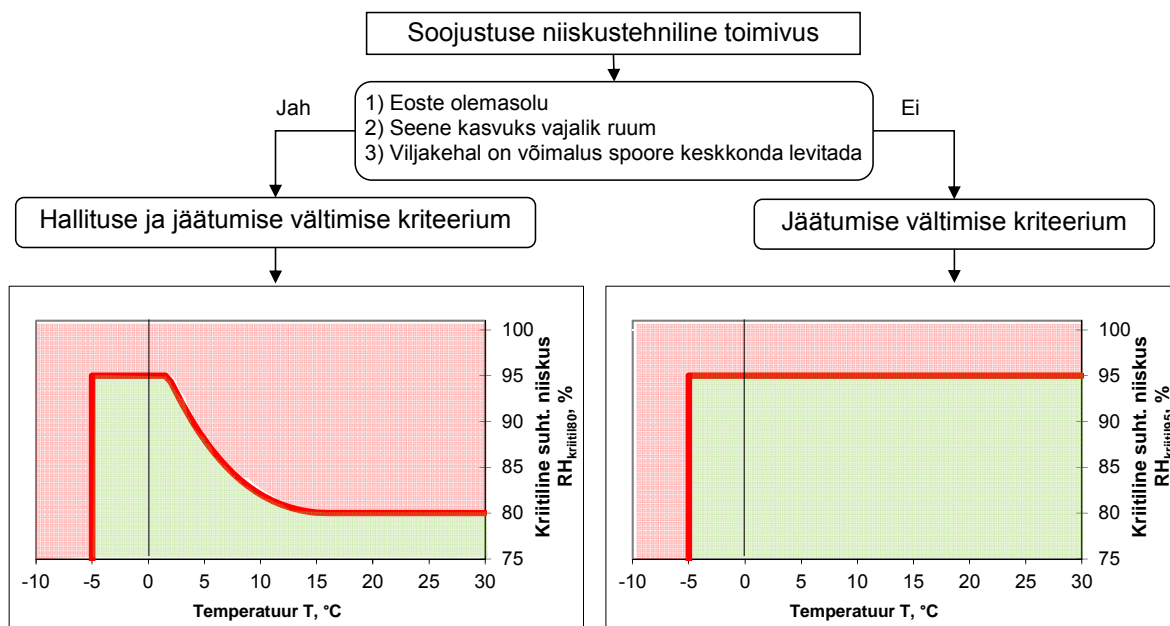
Lisaks seinas mõõdetavatele temperatuuridele ja suhtelise niiskuse tasemetele mõõdeti temperatuuri ja suhtelist niiskust testruumis ning hoone lähedal õues.

Lisaks temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmistele teostati olemaoleva seina niiskuskliku algolukorra määramiseks seina niiskussisalduse kaardistus ja määrati erinevatest kihtidest võetud telliste niiskussisaldused gravimeetriselt. Peale kohapealset mõõtmist määrati labori tingimustes seinast võetud proovitelliste poorsus, veeimavus (A_w) ning tihedus.

1.3.1.3 Soojus- ja niiskustehnilise toimivuse hindamiskriteeriumid

Soojustusmaterjalide turvalise toimivuse väljaselgitamiseks hinnati niiskustehnilisi näitajaid seina ristlõikes. Kuna lisasoojustades temperatuur seina sisepinnal tõuseb ja suhteline niiskus seinal langeb, väheneb 1-mõõtmelises olukorras seina sisepinna kriitilisus kondensaadi ja hallituse tekkeks võrreldes soojustamata olukorraga. Et lisasoojustamine langetab temperatuuri esialgse seina ja soojustuse liites, osutub enamasti kriitiliseks pinnaks just see.

Hindamiskriteeriumid erinevatele soojustusmaterjalidele on valitud vastavalt nende eripäradele – kuna CaSi, IQ-T ja AAC liimitakse terves seina pinnas ja kasutusel pole hallitustundlikke materjale, on lähtuvalt Joonis 7-st nendel materjalidel määravaks jäätumise vältimise kriteerium RH_{crit95} (Künzel 2011). Kuna PIR paigaldatakse nael- või kruvitüüblitega, seina ja soojustuse vahele võib jääda õhuruumi ning soojustuse seinapoolne pind on tootmisprotsessi iseärasuste tõttu kaetud paberiga, on selle materjali puhul lisaks jäätumise vältimisele vaja jälgida ka hallituse vältimise kriteeriumi RH_{crit80} (Hukka & Viitanen 1999, Viitanen & Ojanen 2007).



Joonis 7 Soojustuse niiskustehniliselt turvalise toimivuse hindamiskriteeriumid soojustussüsteemi ja esialgse seinavahekihi jaoks (Künzel 2011, Viitanen & Ojanen 2007).

1.3.2 Arvutuslik analüüs

Selgitamaks välja antud seinatüübi ja seespoolse lisasoojustuse toimivuse sõltumist teistsugustest kliimatingimustest ning niiskuskoormustest teostati arvutuslik analüüs.

1.3.2.1 Kasutatud materjalide soojus- ja niiskustehnilised omadused

Arvutusmudeli kalibreerimiseks ja arvutusliku analüüsi teostamiseks on vajalik võimalikult täpselt ja põhjalikult teada katseseinas esinevate materjalide omadusi.

Testseina ehitamiseks kasutatud materjalide soojus- ja niiskustehniliste materjaliomaduste ning renoveerimisel kasutatavate soojustusmaterjalide omaduste puhul kasutati võimalikult palju materjalitootjate ja programmi Delphin andmebaasis olemasolevaid usaldusväärseid andmeid.

- veeaurujuhtivusena kasutati tootja poolt esitatud andmeid, mis on mõõdetud vastavalt standardile EVS-EN 12572:2002 (Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties) või on mõõdetud vastavatel Euroopa tehnilistele spetsifikatsioonidele läbiviidud testidel. Mõõdetud andmete puudumisel teostati vajalikud lisamõõtmised, vähemoluliste materjalide puhul kasutati standardis EVS-EN 12524:2000 (Building materials and products - Energy related properties – Tabulated design values) toodud tabelväärtusi või arvutustarkvara andmebaasi väärtusi.
- soojuserijuhtivuse väärtustena kasutati tootja poolt esitatud andmeid (EVS-EN ISO 10456:2000 (Building materials and products – Procedure for determining declared and design thermal values) või standardis EVS-EN 12524:2000 (Building materials and products – Energy related properties – Tabulated design values) toodud tabelväärtusi või arvutustarkvara andmebaasi väärtusi;
- täiendavalt vajalikud materjaliomadused on: niiskusmahtuvus, kapillaarne veeimavus, materjaliomaduste sõltuvus keskkonnatingimustest (temperatuur, suhteline niiskus), jne.

Tabel 2 Simulatsioonides kasutatud materjalide soojus- ja niiskustehnilised omadused.

Omadus	RH	Esiälge seina materjalid				Soojustusmaterjalid			
		Välis-krohv	Tellis	Turvas	Sise-krohv	PIR	iQ-T	AAC	CaSi
Kuivtihedus, kg/m ³		1270	1880	150	1800	35	49	126	297
Soojuseri juhtivus, λ, W/(m·K)	0%	0.55	0.70	0.07-0.09	0.82	0.020	0.029	0.045	0.067
	33%	0.56	0.70	0.07-0.09	0.82	0.020	0.029	0.046	0.071
	75%	0.58	0.70	0.07-0.09	0.83	0.021	0.029	0.047	0.075
	≥ 93%	0.59	0.71	0.07-0.09	0.83	0.022	0.030	0.054	0.077
Niiskussisaldus, kg/m ³	33%	11	4.8	9.1	2.3	0.49	0.27	1.3	16
	75%	57	6.4	18	9.2	0.96	0.35	3.4	21
	≥ 93%	75	13	42	25	4.4	1.4	16	26
Veeaurudifusiooni-takistustegur, μ, -	0%	12	25	2	12	400	51	6	11
	33%	12	25	2	12	400	51	6	11
	75%	14	25	2	13	400	51	6	11
	≥ 93%	14	26	2	13	400	51	6	11
Veeimavus, A _w , kg/(m ² h ^{0.5})		0.0093	0.055	0.15	0.127	1.0·10 ⁻⁷	0.013	0.0036	0.39

1.3.2.2 Kasutud arvutustarkvara

Seespoolset lisasoojustatud välisseina soojus- ja niiskustehnilise toimivuse analüüsiks kasutati dünaamilist arvutustarkvara *Delphin 5.8.1* (Grunewald 1997, 2000, Nicolai 2008). Dünaamiline niiskusprogramm võimaldab täpsemalt analüüsida tarindi soojus- ja niiskustehnilist toimivust võttes arvesse muutuvaid keskkonnatingimusi ja materjaliomaduste keskkonnasõltuvust.

Arvutuslikus analüüsis kasutati mudelite kalibreerimiseks katseseinas mõõdetud andmeid. Seina soojus- ja niiskustehnilise toimivuse kindlaksmääramisel kasutati niiskustehniliste testaastate andmeid (Kalamees & Vinha 2004) ja telliselamute mõõtmistulemustel põhinevaid sisekliima arvutusmudeleid (Kalamees 2010, 2012).

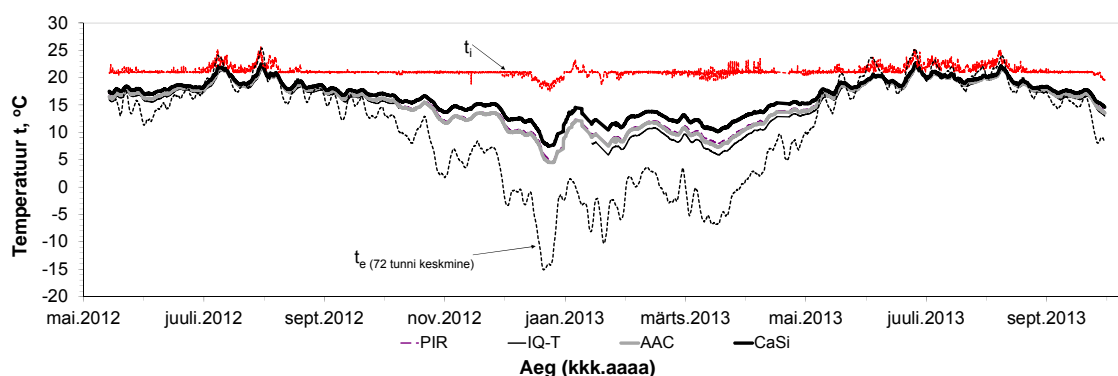
2 Mõõtmistulemused

2.1 Kliimatingimused

Kõik mõõtetulemused salvestati 1-tunnise intervalliga aasta ja 5 kuu pikkuse perioodi kohta. Mõõtmistulemuste salvestamiseks kasutati kesket mõõte- ja kliima tagamise süsteemi.

Sise- ja välistemperatuurid ning temperatuurid esialgse seina ja soojustuse vahel on antud joonisel Joonis 8.

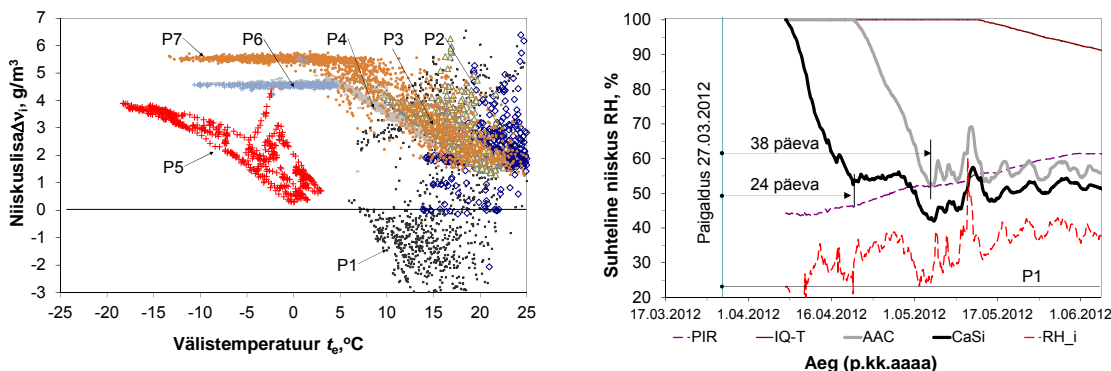
Kuigi välistemperatuur püsis detsembris üle nädala pidevalt alla -10°C , ei langenud temperatuur üheski seinalõigus soojustuse taga miinuskraadidesse, seega külmumise vältimise kriteerium oli mõõteperioodil täidetud.



Joonis 8 Sise- ja välistemperatuurid ning temperatuurid soojustuse ja esialgse seina vahel.

Sisetemperatuur oli kütteperioodil praktiliselt konstantne ($+21\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), suurem langus (sisetemperatuuri miinimum $+17.5^{\circ}\text{C}$) esines külmal detsembril ning oli põhjustatud ruumi täiendava kütteseadme madalast võimsusest.

Joonis 9 vasakul näitab niiskulisa ja samal ajal valitsenud välistemperatuuri seost. Eristatavad on erinevad niisutusperioodid, Joonis 11 kuni Joonis 14 näitavad ka erinevate niisutusperioodide ajalisi kestusi.



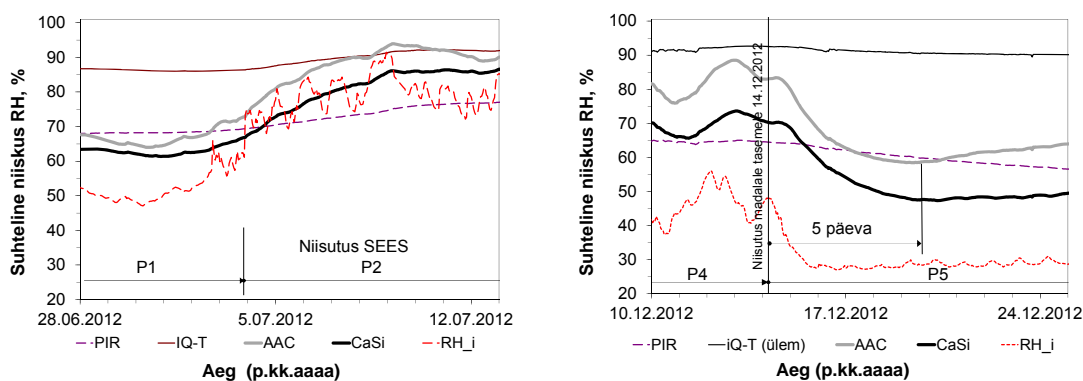
Joonis 9 Vasakul: niiskulisa sõltuvus välistemperatuurist niisutusperioodide kaupa. Paremalt: niisutuseta kuivamisperiood – suhtelised niiskused soojustussüsteemide ja esialgse seina vahel; märgpaigaldusega süsteemide väljakuivamise kestus.

2.2 Materjalide reageerimine kliimatingimuste muutustele

Joonis 9 paremal annab suhtelised niiskused perioodil vahetult pärast paigaldust – niisutus pole sisse lülitatud ja saab jälgida ehitusniiskuse väljakuivamist. Kõige kiiremini kuivas välja CaSi (24 päeva jooksul), AAC lõik jõudis samale tasemele 38 päevaga ning iQ-T madalaim suhtelise niiskuse tase enne niisutuse algust oli 88% (3 kuud pärast paigaldust).

Joonis 10 vasakul annab suhtelised niiskused soojustuse taga niisutuse sisse lülitamisel (üleminek perioodilt 1 perioodile 2). Ilmneb kaks käitumisviisi – madala veeaurudifusioonitakistusega materjalide (AAC ja CaSi) taga järgib suhtelise niiskuse tase muutusi sisekliimas hästi. PIR ja iQ-T reageerisid samas aeglasemalt.

Joonis 10 paremal näitab teist kuivamisperioodi, auru paremini juhtivad materjalid stabiliseeruvad umbes 5 päevaga.

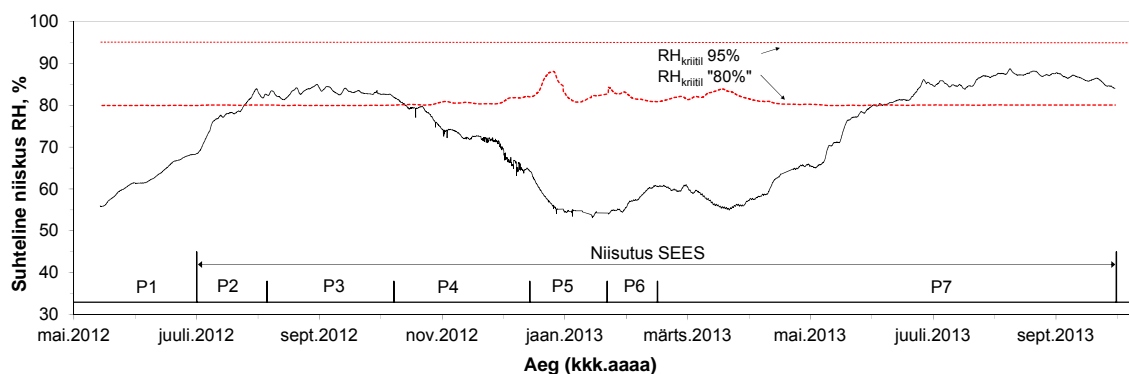


Joonis 10 Vasakul: suhtelise niiskuse tasemed soojustuse taga niisutuse sisselülitamisel. Paremal: suhtelise niiskuse tasemed soojustuse taga niisutuse madalale tasemele lülitamisel; aeg, mis niiskusele avatumatel materjalidel kulub stabiilse suhtelise niiskuse taseme saavutamiseks.

2.3 Testseinte niiskustehniline toimivus - suhteline niiskus soojustuse ja esialgse seina vahel

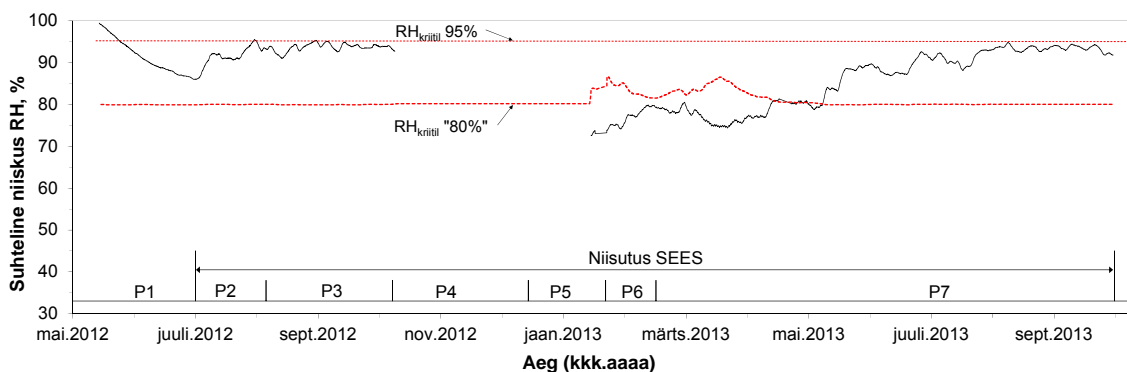
Joonis 11 kuni Joonis 14 annavad suhtelise niiskuse tasemed soojustussüsteemide ja esialgse seina vahel. Samadel joonistel on antud ka niiskustehnilise toimivuse hindamiskriteeriumid. $RH_{crit}^{80\%}$ sõltub konkreetses punktis hetkel valitsevast temperatuurist – temperatuuridel alla $\sim 15^{\circ}C$ on $RH_{crit}^{80\%}$ üle 80%.

Soojustussüsteemi PIR lõigus mõõdetud suhtelised niiskused (Joonis 11) ületasid $RH_{crit}^{80\%}$ 197 päeva 504 päevases mõõteperioodist (39%). Kriitilised perioodid esinesid hilissuvest kuni varatalveni.



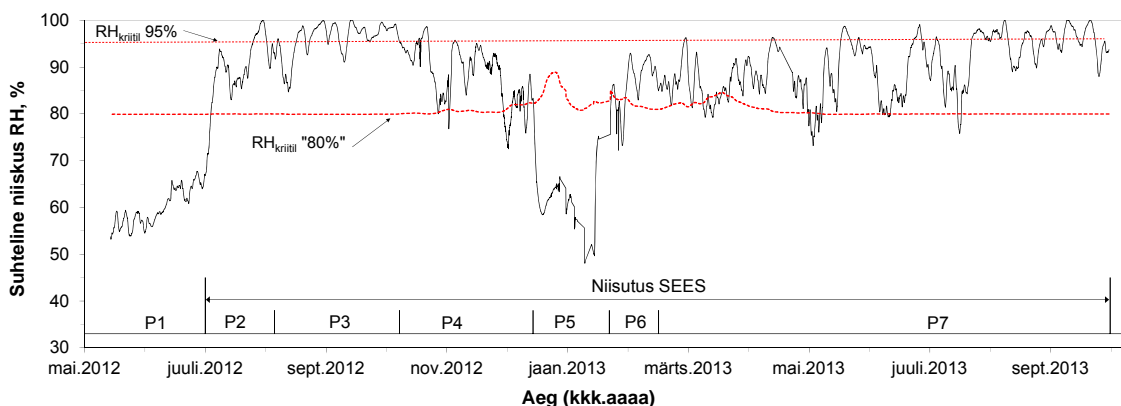
Joonis 11 Suhteline niiskus PIR plaadi ja esialgse seina vahel; niisutusperioodid.

iQ-T seinosaas (Joonis 12) esines 2012. aasta oktoobrist kuni 2013. aasta jaanuarini mõõtesüsteemi viga. iQ-T kõrge suhtelise niiskusega perioodid olid sarnased PIR lõigule, aga madalamast auru difusioonitakistusest tingituna on RH tasemed kõrgemad. Materjali iseloomu arvestades pole hallituse vältimise kriteerium määrav ning kriitiline suhteline niiskus on 95%. Piirväärtust ületati 15 päeval 407-päevasest mõõteperioodist (3.68%).



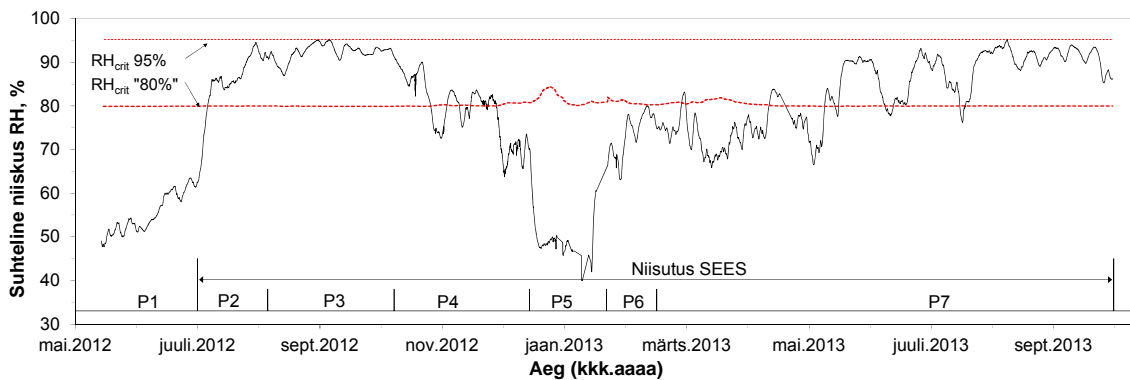
Joonis 12 Suhteline niiskus soojustuse iQ-T ja esialgse seinavahe vahel; niisutusperioodid.

Kuna muutused sisekliimas jõuavad AAC seinalõigis (Joonis 13) kriitilise pinnani eelnevatest materjalidest kiiremini, ületati kõrge niiskuskooormusega perioodidel $RH_{crit95\%}$ 25% ajast (129 päeval 504-päevasest perioodist). Suhteline niiskus püsis kõrge terve aasta lõikes.



Joonis 13 Suhteline niiskus soojustuse AAC ja esialgse seinavahe vahel; niisutusperioodid.

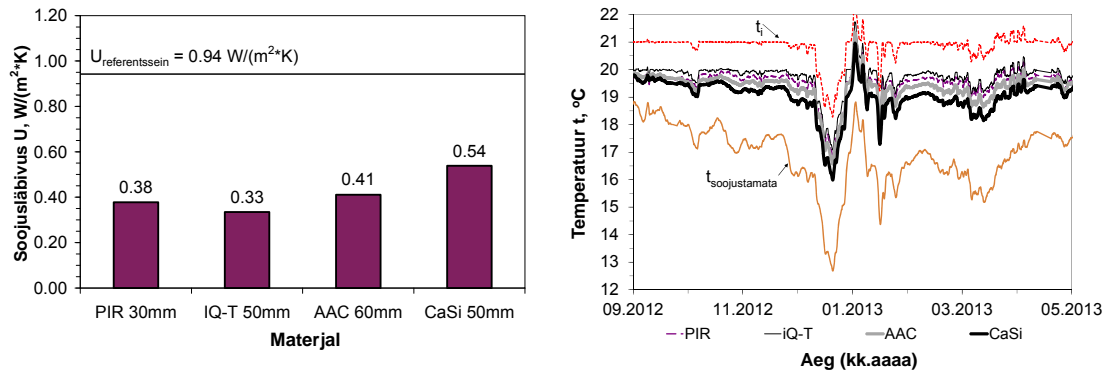
Sarnaselt AAC lõiguga reageeris difusioonile avatud CaSi (Joonis 14) kiiresti siseruumi niiskuskooormuse muutustele. CaSi puhul püsis suhteline niiskus siiski madalam, 95% piiri ületati 2.7 päeva (niisutusperioodil 3) 504-päevasest perioodist (0.5%). Selle põhjuseks on materjali kõrgem soojuserijuhtivus ning madalam kihi paksus – temperatuurid soojustuse taga on madalamad. Absoluutsed niiskused soojustuse taga olid AAC ja CaSi lõikudes sarnased, kuid viimase puhul esinesid kõrge niiskuskooormusega hetkedel järjepidevalt madalamad väärtused ning sellest tingituna ka madalamad suhtelised niiskused. Kuna CaSi puhul on kapillaarne veejuhtivus kõrgem, siis on selline tulemus ka oodatav ning niiskustehnilise toimivuse seisukohalt vajalik.



Joonis 14 Suhteline niiskus soojustuse CaSi ja esialgse seina vahel; niisutusperioodid.

2.4 Soojuslähivus ja pinnatemperatuur

Seina soojuslähivus on arvatud mõõdetud soojusvoo ja pinnatemperatuuride järgi perioodil 1.09.2012-28.12.2012. Periood valiti lähtudes madalatest temperatuurikõikumistest ja päikesekiirgusest. Seinalõikudes mõõdetud keskmised soojuslähivuse väärtused on antud graafikul Joonis 15 vasak.



Joonis 15 Vasakul: seinalõikude keskmised soojuslähivused perioodi 1.09.2012-28.12.2012 kohta
Paremal: 24 tunni keskmised temperatuurid erinevate seinalõikude sisepinnal perioodil september 2012...mai 2013

Mõõdetud temperatuurid seina sisepinnal annab Joonis 15 parem. Keskmised sisepinnatemperatuurid püsisid 19.2-19.8°C vahel, samas kui soojustamata seinalõigul mõõdetud kuu keskmine temperatuur oli 17.3°C (keskmine siseõhutemperatuur samal perioodil oli 20.9°C). Detsembri külmal perioodil oli soojustamata võrdlusseinal pinnatemperatuur keskmiselt 13.1°C, samas kui soojustatud lõikudes püsis temperatuur seinapinnal olenevalt materjalist 3-4°C kõrgemal (keskmine siseõhutemperatuur 19.0°C).

3 Arvutustulemused

3.1 Arvutusmodeli kalibreerimine

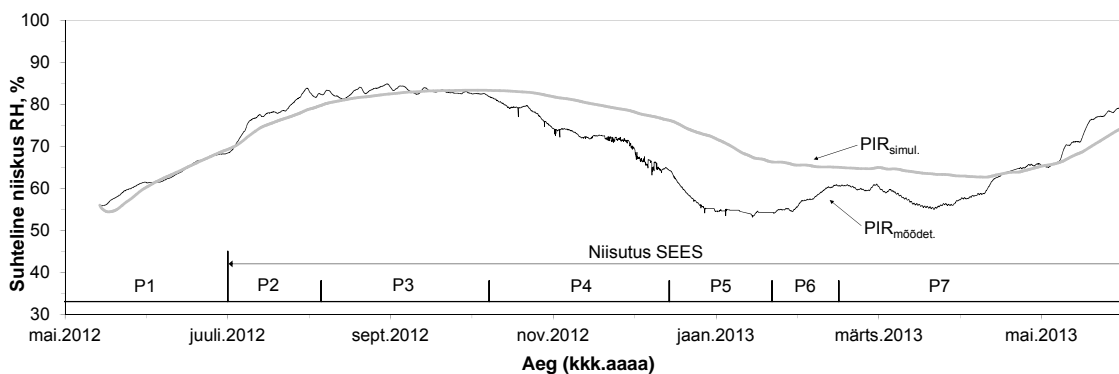
Arvutusprogrammis Delphin 5.8.1 koostati kõigi seinalõikude kohta arvutusmodelid, Tabel 2 annab põhiliste materjalikihtide omadused ja paksused. Täiendavalt olid modelleeritud ka soojustusmaterjalide süsteemsed liimise- ja krohvikihid.

Kasutusel oli 1-mõõtmeline arvutusmodel. Kuna müritise vuukide mõju arvutustulemustele oli väike, siis nende arvestamisest loobuti (tagavara kasuks). Konvektsiooni õhkvahes ja soojustuses ei arvestatud.

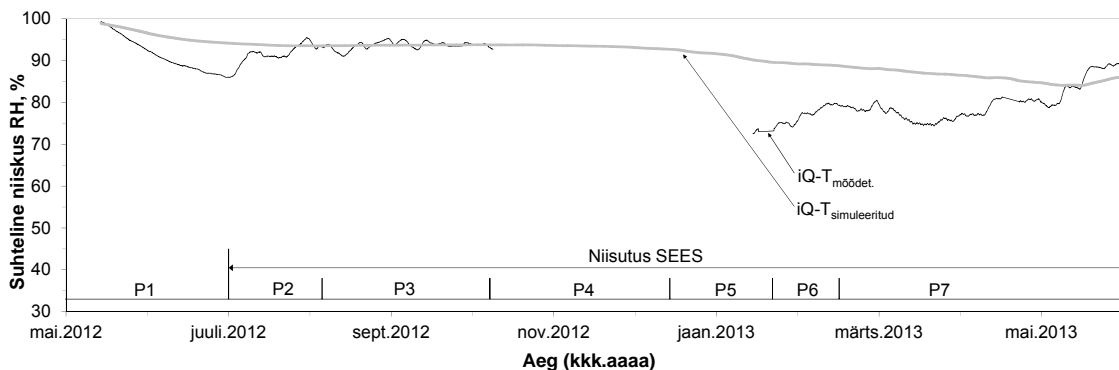
Mõõtmis- ja arvutustulemuste võrdlemiseks ning tõlgendamiseks jälgiti soojusvooge soojustuse pinnal ning temperatuure, absoluutseid ja suhtelisi niiskusi soojustussüsteemi taga. Erisuste korral muudeti materjalide ja nende kihtide madala usaldusväärsusega parameetreid tõenäolistes piirides parima korrelatsiooni saamiseni.

Joonis 16 kuni Joonis 19 annavad kõigi seinalõikude mõõdetud ja simuleeritud suhtelised niiskused soojustussüsteemide taga. Kuna programmi aluseks olevad võrrandid kirjeldavad niiskuse ja energia tasakaalu, siis suhteliseks niiskuseks teisendades mõlema tasakaalu leidmisel tekkinud vead summeeruvad ning graafikud väljendavad simulatsiooni üldist täpsust. Samas on suhteline niiskus üks põhilisi parameetreid materjalide kahjustusfunktsioonides ning seeläbi toimivuse kirjeldamisel.

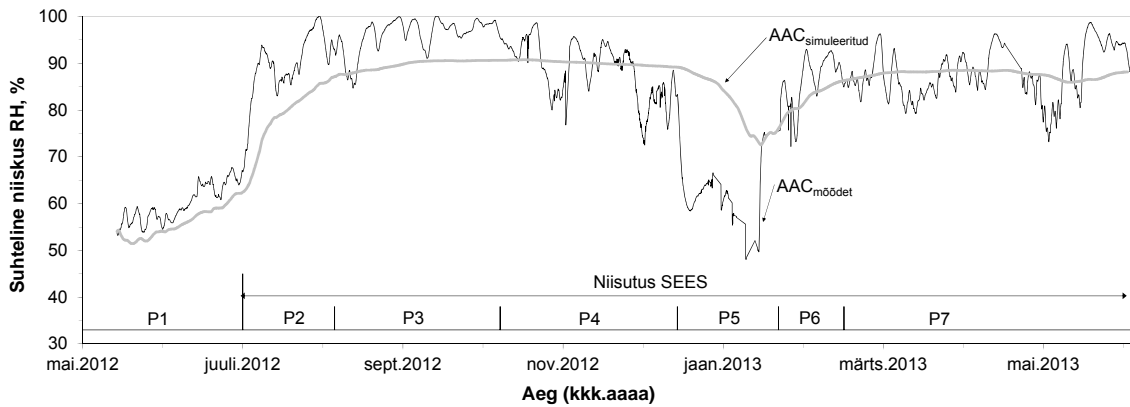
Rahuldavad korrelatsioonid saavutati PIR ja iQ-T mudelitega. Kuna simuleeritud suhtelise niiskuse väärtused nii CaSi kui AAC puhul olid mõõdetutest tunduvalt madalamad (seega tagavara kahjuks), tuleks tulevikus simulatsioone hinnates arvestada nt 5-10%_{RH} suuruse varuga.



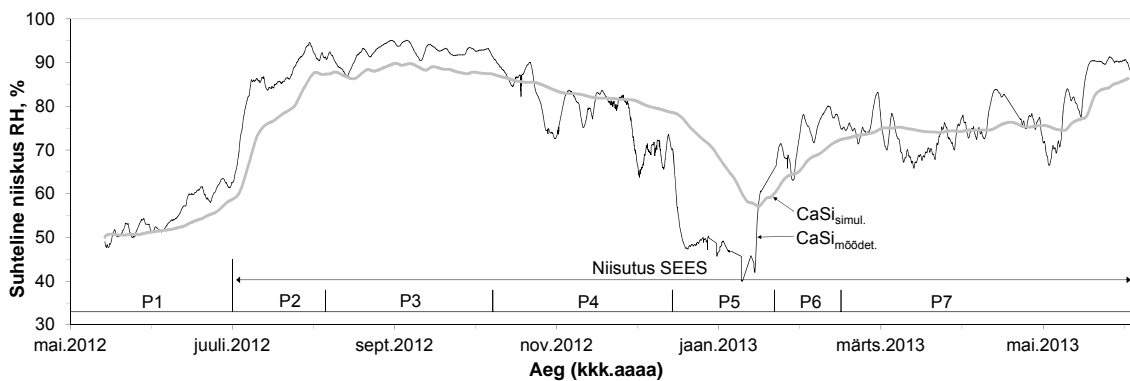
Joonis 16 Mõõdetud ja simuleeritud suhtelised niiskused soojustuse PIR ja esialgse seinaga vahel.



Joonis 17 Mõõdetud ja simuleeritud suhtelised niiskused soojustuse iQ-T ja esialgse seinaga vahel.



Joonis 18 Mõõdetud ja simuleeritud suhtelised niiskused soojustuse AAC ja esialgse seinaga vahel.



Joonis 19 Mõõdetud ja simuleeritud suhtelised niiskused soojustuse CaSi ja esialgse seinaga vahel.

3.2 Spordi tn koolihoone seespoolse lisasoojustusega välisseina niiskustehniline toimivus

Kuna mõõtmistulemused võimaldasid seina toimivust hinnata vaid kliimaatilist juhulikul aastal, sisekliima niiskuskooormuses esines erinevate koormustega perioode ning mõõtesüsteemis rikked, tuleb süsteemidele parema hinnangu andmiseks simuleerida samu seinalõike ühtlase sisekliima niiskuskooormusega ning väliskliimaga, mis esindaks niiskustehnilisest aspektist kriitilisi aastaid.

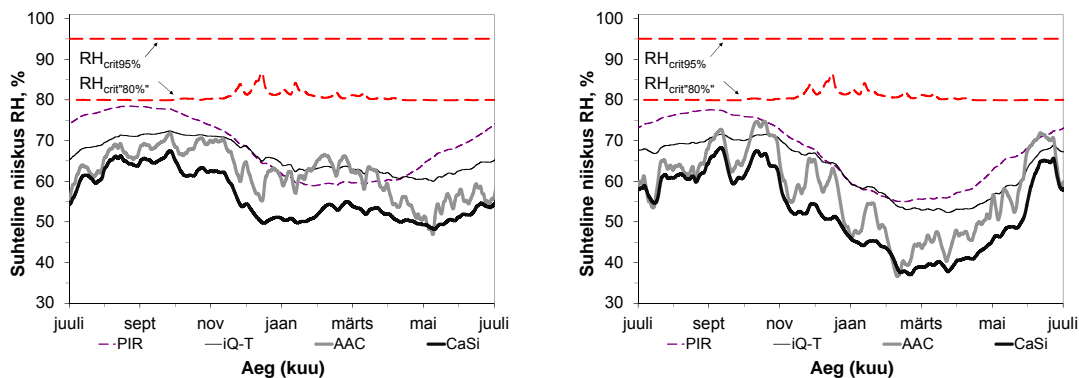
Selleks sobib kasutada väliskliimana Eesti niiskustehnilisi testaastaid (Kalamees ja Vinha 2004) ning sisekliimat vastavalt erinevatele kasutusprofiilidele.

Käesolevas uuringus kasutati sisekliima niiskuslisa funktsiooni lähtudes Eesti telliskorterelamute uuringust (Kalamees et al 2010, 2012). Vastavalt hoone võimalikele kasutusotstarvetele valiti koormused järgnevalt:

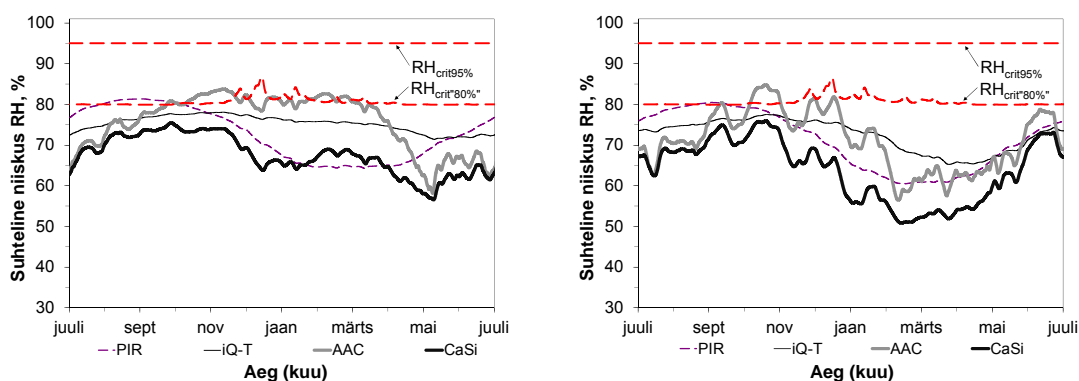
- $\Delta v +2 \text{ g/m}^3$ – kool või büroo
- $\Delta v +4 \text{ g/m}^3$ – madala niiskuskooormusega korter
- $\Delta v +6 \text{ g/m}^3$ – kõrge niiskuskooormusega korter

Joonis 20 kuni Joonis 22 annavad simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed soojustussüsteemide ja esialgse seinaga kokkupuutepinnal erinevatel niiskuskooormustel hallituse testaasta (vasakul) ja kondenseerumise testaasta (paremal) tingimustel.

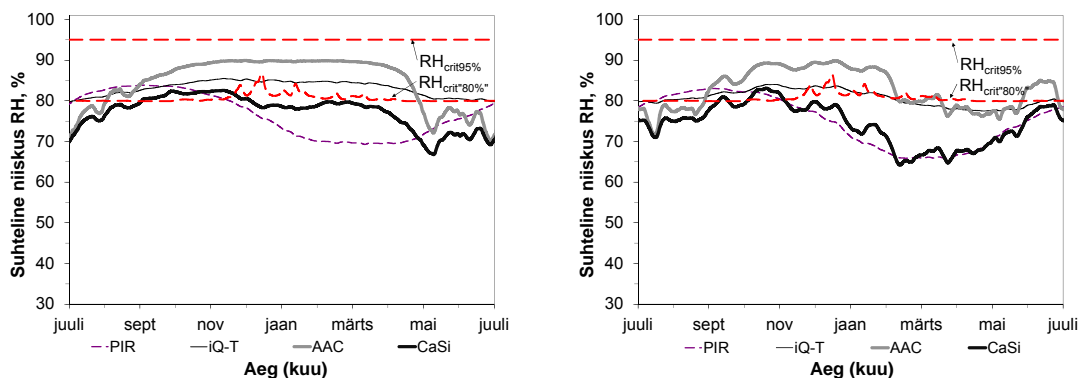
Joonis 23 näitlikustab soojustuse taga oleva kihi absoluutse niiskuse tasemeid erinevatel niiskuskooormustel.



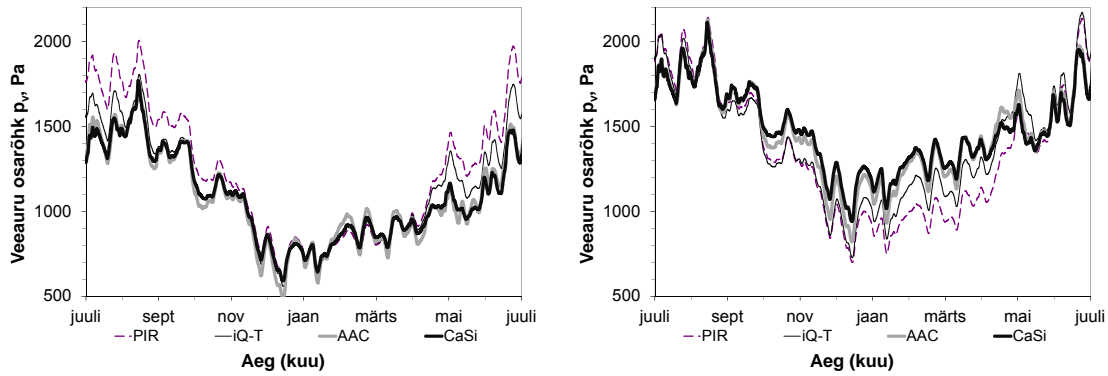
Joonis 20 Arvutustulemused – suhtelised niiskused soojustussüsteemide taga ühe aasta jooksul pärast stabiilse seisundi saavutamist, niiskuslisa $\Delta v=2\text{g/m}^3$
 Vasakul: Eesti hallituse testaasta tingimustes
 Paremal: Eesti kondenseerumise testaasta tingimustes



Joonis 21 Arvutustulemused – suhtelised niiskused soojustussüsteemide taga ühe aasta jooksul pärast stabiilse seisundi saavutamist, niiskuslisa $\Delta v=4\text{g/m}^3$
 Vasakul: Eesti hallituse testaasta tingimustes
 Paremal: Eesti kondenseerumise testaasta tingimustes



Joonis 22 Arvutustulemused – suhtelised niiskused soojustussüsteemide taga ühe aasta jooksul pärast stabiilse seisundi saavutamist, niiskuslisa $\Delta v=6\text{g/m}^3$
 Vasakul: Eesti hallituse testaasta tingimustes
 Paremal: Eesti kondenseerumise testaasta tingimustes



Joonis 23 Arvutustulemused – veeauru osarõhk (absoluutne niiskus) soojustuse taga ühe aasta jooksul pärast stabiilse seisundi saavutamist Eesti hallituse testaasta tingimustes Vasakul: niiskuslisa $\Delta v=2 \text{ g/m}^3$
Paremalt: niiskuslisa $\Delta v=6 \text{ g/m}^3$

Tabel 3 Arvutustulemused – minimaalsed ja maksimaalsed suhtelise niiskuse tasemed erinevatel kliimatingimustel, kriitilise suhtelise niiskuse ületamise kestuse osakaal arvutusaasta kestusesse protsentuaalselt.

Soojustusmaterjal	Testaasta	Niiskuslisa, $\Delta v, \text{ g/m}^3$	RH		$RH > RH_{crit}$
			Min.	Maks.	%
PIR, 30mm	Hallitus	+2	59	79	0
		+4	64	82	19
		+6	69	84	36
	Kondensaat	+2	55	79	0
		+4	61	81	10
		+6	66	83	30
iQ-T, 50mm	Hallitus	+2	61	73	0
		+4	72	79	0
		+6	80	86	0
	Kondensaat	+2	53	73	0
		+4	66	78	0
		+6	78	84	0
AAC, 60mm	Hallitus	+2	47	72	0
		+4	58	84	0
		+6	70	90	(kond.*)
	Kondensaat	+2	37	76	0
		+4	57	85	0
		+6	72	90	(kond.*)
CaSi, 50mm	Hallitus	+2	49	68	0
		+4	57	76	0
		+6	67	83	0
	Kondensaat	+2	37	69	0
		+4	51	76	0
		+6	64	83	0

* tõenäoline suhtelise niiskuse taseme alahindamine, vt jaotus 2.3.

Tabel 3 annab ülevaate suhtelise niiskuse tasemetest soojustuse ja esialgse seina vahel erinevatel sise- ja väliskliima tingimustel. Samuti on antud kriitilise suhtelise niiskuse ületamise kestuse osakaal aastast.

4 Tulemuste hindamine

4.1 Mõõtmistulemused

Kuna tegemist oli välimõõtmisega, siis võrreldes laboratoorsete tingimustega on sel juhul katsetulemustele ja täpsusele mõjuvaid tegureid rohkem.

Vältimaks võimalikke niiskus- ja soojusvooge erinevate seinalõikude vahel, eraldati need ~50mm sügavate vuukidega, mis täideti alumiiniumfooliumi ja polüuretaanvahuga. Kuigi testseinte vahel võis esineda teatavaid lekkeid, siis potentsiaal nii niiskuse kui soojuste liikumiseks oli madal ning mõju katsetulemustele vähene.

Teine ja tõenäoliselt ka põhiline mõõtmistulemusi ning seinte otsest võrdlust mõjutav tegur võis olla soojustuse ebaühtlane jaotus seinas ning võimalikud õhuvoolud seinas õhkvahedes.

Samuti esines mõõtmisüsteemi rikkeid, mille tagajärjel ei eksisteeri kõiki andmeid terve mõõtmisperioodi kohta ning ühtlasi oli häiritud niisutusüsteemi töö. Katseseina pinna- ja õhutemperatuure ning Keskkonnaagentuuri Ilmateenistuse Jõhvi kliimaandmeid võrreldes ilmneb, et katseseina välisõhu temperatuur pole mõõdetud täpselt. Sellel on mõju ka niisutusüsteemi tööle ning potentsiaalselt võis ruumis olla mõõdetust kõrgem niiskustaseme.

Välispinna temperatuurid kõigis katseseina lõikudes (nii soojustusega kui ilma) olid sarnased. Pinnatemperatuuri mõjutab eelkõige välistemperatuur. Kuna katsesein asus suunaga põhja poole, oli päikesekiirguse mõju minimaalne. Ühtlased temperatuurid on seletatavad ka suhteliselt paksu ja kihilise seinakonstruktsiooniga.

Seinalõikude sisepinna temperatuurides olid erinevused suuremad, kõige suurem oli erinevus võrreldes referentsseinaga kõrgema soojustakistusega iQ-T kihil ning kõige madalam CaSi lõigus. See ühtib oodatud tulemustega.

Külmumis-sulamistsüklikest põhjustatud kahjustused tekivad veega küllastunud seintes tõenäoliselt temperatuuridel alla 0°C. Madalam külmumistemperatuur on tingitud tellisepoorides olevatest sooladest ning poorirõhust – sobivaks piiriks võib lugeda -5...0 °C (Vesikari 1998, Künzel 2011). Katseseinas soojustuse taga külmumis-sulamistsükleid ei esinenud – seda isegi juhul, kui hindamiskriteeriumiks seada konservatiivselt 0 °C.

Madalaim suhteline niiskus esines PIR seinas lõigus (kuivpaigaldus, suhteliselt aurutihe materjal) ning kõrgeim AAC lõigus (märgpaigaldus, veeauru difusioonile avatud). Kuna PIRi paigalduse käigus seinas täiendavalt vett ei lisatud, näitab RH tase selles lõigus eelkõige olemasoleva konstruktsiooni niiskuse taset. Kõigi ülejäänud materjalide puhul toimus paigaldus liimsegudega ning see kajastub ka paigaldusjärgse perioodi niiskustasemetes.

Kuna kõigil märgpaigaldusega materjalidel oli tootja juhenditest lähtuvalt kasutusel ~5mm paksune liimisegu kiht, oli kõigis seinalõikudes soojustuse taha lisatud vee kogus praktiliselt sarnane. iQ-T puhul oli erinevalt teistest paksem pealmise krohvi kiht (10-15mm vs 2mm CaSi ja 5mm AAC puhul). Katse näitas, et konstruktsiooni lisatud ehitusniiskus võib põhjustada pikki kõrge suhtelise niiskusega perioode. Riskifaktoriteks on nii väliskliima kui seinte ebapiisav kasutussevõtmiseeelne väljakuivamine. Kõige kriitilisem on vajaliku väljakuivamise tagamine iQ-T puhul, CaSi ja AAC puhul oli see periood tunduvalt lühem.

Jälgendamaks ruumi kasutamist elamispinnana, kasutati niisutist ja ventilaatorist koosnevat süsteemi, mis lülitati sisse 3 kuud pärast materjalide paigaldust. Niisutuse alguses on ilmne CaSi ja AAC seinalõikude niiskustaseme muutuse tunduvalt kiirem mõju soojustuse tagasele suhtelisele niiskusele. Samuti on erinevus kuivamise kiiruses perioodidel 1 ja 5. Teisel kuivamisperioodil (5) on materjalidetaguse niiskustaseme langus madalama niiskustaseme, mehaanilise ventilatsiooni ja välisõhu madala niiskustaseme tõttu tunduvalt kiirem.

Mõõtmistulemused näitavad kõigil juhtudel kõrgeid suhtelise niiskuse tasemeid ning AAC lõigus ka võimalikku kondenseerumist. Kõigis seinalõikudes esines pikki perioode, kus valitsesid sobilikud soojus- ja niiskustingimused (vt pt 1.3.1.3, Viitanen 2007, 2010) hallituse kasvuks. Kui täidetud on Joonis 7-l esitatud tingimused, siis ei saa hallituse vältimise kriteerium määravaks. Katsetatud materjalidest tuleb järgida hallituse vältimise kriteeriumit PIR soojustusel, ülejäänutel on määrav jäätumise vältimise kriteerium. Samas tuleks jälgida, et paigaldusel ja eksploatatsioonis oleksid täidetud tingimused, mis lubavad kohaldada jäätumise vältimise kriteeriumi. Kriitilised piirid olid oluliselt ületatud PIRi ($RH_{crit}>80\%$) ja AAC lõikudes ($RH_{crit}>95\%$).

Iga renoveerimise tähtis aspekt on ka piirdetarindite soojustakistuse suurendamine. Selle tagajärjel langevad energiakaod ja tõuseb elanike soojuslik mugavus. Soojustakistus arvutati mõõdetud pinnatemperatuuride vahe ning soojusvoo kaudu. Soojustamine tõstis tarindi soojustakistust olenevalt lahendusest 1.7...2.9 kordselt. Kõrgeim kasv saavutati iQ-T lõigus ning see kajastus ka sisepinnatemperatuuris, mis talveperioodil oli ~3 °C kõrgem kui soojustamata võrdlusseinal. Märkatav soojusliku mugavuse kasv saavutati seejuures kõigi lahendustega.

4.2 Arvutisimulatsioonid

Hindamaks erinevate sise- ja väliskliimatingimuste mõju seinalahenduste niiskustehnilisele toimivusele koostati arvutusmodelid, mis kalibreeriti mõõtmistulemuste alusel. Seejärel kontrolliti arvutisimulatsioonidega materjalide sobivust erinevatesse niiskuskooormustesse Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes.

Kõigil juhtudel ei langenud temperatuur soojustuse taga alla 4°C – esialgse tarindi sisekihis on jäätumine seega välditud.

Madalatel niiskuskooormustel (kontor, kool: $\Delta v=+2 \text{ g/m}^3$) toimisid kõik lahendused rahuldavalt. PIRiga soojustatud seinal esinesid praktiliselt kogu aeg teistest lahendustest kõrgemad suhtelise niiskuse tasemed (erandiks hallituse testaasta kevadperiood, vt Joonis 20 vasak).

Paberist seinapoolse kihi tõttu on PIR soojustust kasutades tarvilik täita hallituse vältimise kriteeriumi. Sellest tulenevalt ei ole antud seinakonstruktsiooni puhul konkreetne toode sobilik elamutesse ($\Delta v>+4 \text{ g/m}^3$). Kriitiline periood on hilissuvest kuni varaste talvekuudeni. See võib olla tingitud väliskliimast, millest tingituna tellismüüritis suve- ja sügiskuudel niiskub ning siseruumidesse kuivamine on PIRi suhteliselt kõrge difusioonitakistuse tõttu piiratud. Paberi kasutamist PIRi tootmisprotsessis soojustuse seinapoolse kihina tuleks kriitiliselt analüüsida ning võimalusel leida selle asemel ohutum materjal.

iQ-T soojustusega seinalahendus võimaldas madalatel niiskuskooormustel seina niiskusel paremini siseruumidesse kuivada kui PIRi puhul. Sellest tingituna olid suhtelise ja absoluutse niiskuse tasemed üldiselt madalamad. Kõrgetel niiskuskooormustel oli ka suhteline niiskus kõrge, kuid ei ületanud siiski kriitilist piiri ühelgi kontrollitud niiskuskooormusjuhtumil. Kõrgetel niiskustasemetel oli absoluutne niiskus iQ-T lõigus madalam kui difusioonile avatud materjalidel.

Niiskuse liikumisele avatumate materjalide puhul on kriitilised perioodid talvel ja kevadel, mis on tingitud niiskusvoost siseruumidest läbi soojustuse seina. Võttes arvesse arvutusmodelite kalibreerimisel saadud kogemusi kasutati AAC ja CaSi puhul kondenseerumise vältimise kriteeriumina $RH_{crit}= 85-90\%$ (vt pt 2.3). Arvestades seda parandust, võib AAC soojustusega tarindis esineda kondensaat nii hallituse kui ka kondensaadi testaastaga niiskuslisa $\Delta v=+6 \text{ g/m}^3$ (kõrge niiskuskooormusega elamud).

5 Kokkuvõte

Ajalooliste hoonete energiatõhususe tõstmisel tuleb seespoolse lisasoojustuse kasutamist alati hoolikalt analüüsida. Seespoolne soojustus on välispidisest alati riskantsem lahendus. Seespoolne lisasoojustamine ei tohi suurendada niiskustehnilise toimivusega seotud riske. Juhul, kui välispidine soojustus pole võimalik, siis korrektselt teostatud seespidine lisaisolatsioon võib olla üks renoveerimisvõimalusi. Seejuures tuleb lahendus alati välja töötada arvestades kliimatingimusi (vihm, sisemine niiskuskooormus, kütte- ja ventilatsioonilahendus jne.) ja soojustatava seina konstruktsiooni. Reeglina eeldab see alati projekteerimiseelset uuringut olemasolevate tingimuste (materjalomaduste ja kliimakoormuste) välja selgitamiseks ning projekteerimisetapis lahenduse toimivuse kontrollimist muutuvates ääritingimustes.

Lisasoojustuse paksus selgitatakse välja projekteerimise käigus, arvestades soojustatava seiniosa soojuslähivust, materjalomadusi ja kliimakoormusi. Kapillaaraktiivsete materjalide kasutuseeldus on soojustatava seiniosa kõrgete niiskussisalduste taluvus, kui soojustamise tõttu tõuseb mõne materjali niiskussisaldus üle selle talvuspiiri, siis kapillaaraktiivseid materjale kasutada ei tohi.

Materjalomadused, mis mõjutavad seespoolse lisasoojustuse kasutusvõimalusi on paksus, soojuseri juhtivus, veeaurujuhtivuse, veejuhtivus, õhueri juhtivus. Kapillaaraktiivseks võiks nimetada materjali, kus kapillaarne veejuhtivus omab tähtsat rolli soojustusmaterjali toimivuses.

Käesolevas uuringus käsitleti nelja erinevat soojustusmaterjali nii välikatse kui arvutisimulatsioonide abil. Kaasatud olid nii veeaurutihedad kui kapillaaraktiivsed niiskuse liikumisele avatud materjalid.

Katseliselt mõõdeti soojustusmaterjalide niiskustehnilist toimivust reaalses seinakonstruktsioonis ning mõõtmistulemuste alusel kalibreeriti arvutusmudel. Seejärel kontrolliti arvutisimulatsioonidega materjalide sobivust erinevatesse niiskuskooormustesse Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes. Simulatsioonid tehti kõigi seinalõikudega järgmistel siseõhu niiskussisaldadel: $\Delta v +2 \text{ g/m}^3$ (kool või büroo), $\Delta v +4 \text{ g/m}^3$ (madala niiskuskooormusega korter) ja $\Delta v +6 \text{ g/m}^3$ (kõrge niiskuskooormusega korter).

Katse- ja simulatsioonitulemused näitavad, et konkreetse seinakonstruktsiooni puhul on madala niiskuskooormusega (niiskussisaldus $\Delta v +2 \text{ g/m}^3$) kasutamiseks sobivad kõik materjalid.

Kuna 30mm PIR plaadi puhul ületati kriitilise suhtelise niiskuse taset nii 4 kui 6 g/m^3 niiskussisalduse tingimustes, ei saa seda toodet praegusel kujul konkreetse seinatüübiga elamute soojustamiseks soovitada. Kasutuspotentsiaali oleks tootel, millel puuduks plaadi „külmal“ poolel paberikiht, probleemiks võib osutuda sademete mõju esialgse seina niiskusrežiimile – aurutiheda materjaliga pärsitakse selle ruumidesse kuivamise võimalusi.

iQ-T käitus sarnaselt PIR soojustusele, kuid võimaldas teataval määral kapillaarset vee- ja difuusset veeauru liikumist. PIRist erineva paigaldustehnoloogia ja koostise tõttu ei ületanud 50mm iQ-T soojustusega seinalahendus siiski talle seatud kriitilist piiri ühelgi kontrollitud niiskuskooormusjuhtumil.

AAC ja CaSi absoluutse niiskuse tase oli enamikul mõõteperioodist sarnasel tasemel ning erinevus suhtelises niiskuses tulenes kihi erinevatest soojustakistustest. CaSi puhul esinesid kõrge niiskuskooormusega perioodidel järjepidevalt madalam absoluutne niiskus ning sellest tingituna ka madalamad suhtelised niiskused. Arvestades CaSi kõrgemat kapillaarset veejuhtivust, oli see ka oodatav tulemus. 60mm AAC kiht oli sobiv 1D situatsioonides niiskussisaldusega $\Delta v +2$ ja $+4 \text{ g/m}^3$, aga kõrge niiskuskooormusega elamute (niiskussisaldus $\Delta v +6 \text{ g/m}^3$) puhul esines kondenseerumisrisk. 50mm CaSi niiskustehniline toimivus oli sobiv kõigil katsetatud niiskuskooormustel.

Tulemused näitavad, et ehitusniiskus võib seinas põhjustada pikki kõrge suhtelise niiskusega perioode. Enamikul mõõteperioodist eksisteerisid olemasoleva seina ja lisasoojustuse vahel hallituse kasvuks sobilikud soojus- ja niiskustingimused. Seega tuleb soojustustööde aeg lähtuvalt materjali iseloomust sobivalt planeerida ning tagada ehitustööde kvaliteet, et täita konstruktsiooni kõrgendatud suhtelise niiskuse tasemete lubamise eeltingimused.

Kõik soojustuslahendused tõstsid seina sisepinna temperatuuri ning soojuslikku mugavust võrreldes soojustamata seinalõiguga märgatavalt ning langes pinnapealse suhtelise niiskuse tase ja hallitusoht. Tarindi soojuslääbivus langes soojustatud seinalõikudes olenevalt materjalist ja selle paksusest 2-3 korda.

Kuna tegemist on alusuuringuga ja keskenduti 1D situatsioonile, siis enne materjalide konkreetseesse hoonesse sobivaks tunnistamist, on täiendavalt vajalik läbi analüüsida 2D sõlmed (välisseinte sõlmed lagedega, siseseintega, avatäidetega jms.), täpsustatud kliimatingimused (seina orientatsiooni mõju) ning kontrollida koolihoones teiste võimalike seinakonstruktsioonide olemasolu (nende leidumisel ka mõju soojustuse toimivusele).

Mõõtmis- ja arvutustulemustele tuginedes võib järeldada, et ajaloolistesse hoonetesse sobivate sisemise soojustuse tüüplahenduste väljatöötamiseks on sobivad kõik uuritud materjalid. Tingituna nende väga erinevatest omadustest võivad sõltuvalt soojustatavast konstruktsioonist sobilikuks osutada erinevad lahendused. Kõrge siseruumide niiskuskooormuse puhul on sobilikumad aurutihedad materjalid. Madala niiskuskooormusega, aga välistest teguritest (nt kaldvihmast) tugevalt mõjutatud konstruktsioonidel võib määravaks saada siseruumidesse kuivamise võimalus (vajalikud on materjalide kapillaaraktiivsed omadused). Kuna soojustuse toimivus ei sõltu ainult soojustusmaterjalidest, vaid väga suurel määral ka konkreetsest olemasoleva konstruktsiooni tüübist ja materjalidest, saab selliseid tulemusi pidada üldisteks ning lõplik sobivus tuleb välja selgitada objektipõhiselt.

6 Kasutatud kirjandus

Grunewald, J. 1997. *Diffusiver und konvektiver Stoff-und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*. TU Dresden

Hukka, A. and Viitanen H. 1999. A mathematical model of mold growth on wooden material, *Wood Science and Technology*, 33(6): 475-485.

Kalamees, T. (toim) 2010. *Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord. Uuringu lõppraport*. Tallinna Tehnikaülikool, 93

Kalamees, T. (toim) 2012. *Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord - ajavahemikul 1990-2010 kasutusele võetud korterelamud. Uuringu lõpparuanne*. Tallinna Tehnikaülikool, 137

Kalamees, T.; Vinha, J. 2004. Estonian climate analysis for selecting moisture reference years for hygrothermal calculations. *Journal for Thermal Envelope & Building Science*, 27(3), 199 - 220.

Künzel, H. M. 2011. Bauphysik der Innendämmung und Bewertungsverfahren, *Proc. of the 1. Internationaler Innendämmkongress*. 2011, ISBN 3-940117-07-6, 9-16

Nicolai, A., et al. 2008. An efficient numerical solution method and implementation for coupled heat, moisture and salt transport: The Delphin Program. *Research Report on Priority Program DFG SPP 1122*. In: Franke L, Dekkelmann G, Espinosa-Marzal R (eds) Cuilliver Verlag. ISBN 978-3-86727-902-4: 85–100.11

Vesikari E. 1998. *Prediction of service life of concrete structures by computer simulation*. Helsinki University of Technology. Licentiate's thesis. 131p.

Viitanen H., Vinha J., Salminen K., Ojanen T., Peuhkuri R., Paajanen L., Lahdesmaki K. 2010 Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures, *Journal of Building Physics*, 33 (3) , pp. 201-224.

Viitanen, H., Ojanen, T. 2007. Improved model to predict mold growth in building materials, *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X*, Florida.

Fotode viited:

Joonis 1:

Kohtla- Järve algkool, RM F 105:405, SA Virumaa Muuseumid,
<http://muis.ee/museaalview/1303246>

Kohtla-Järve I Keskkool, RM F 207:8, SA Virumaa Muuseumid,
<http://muis.ee/museaalview/1985201>