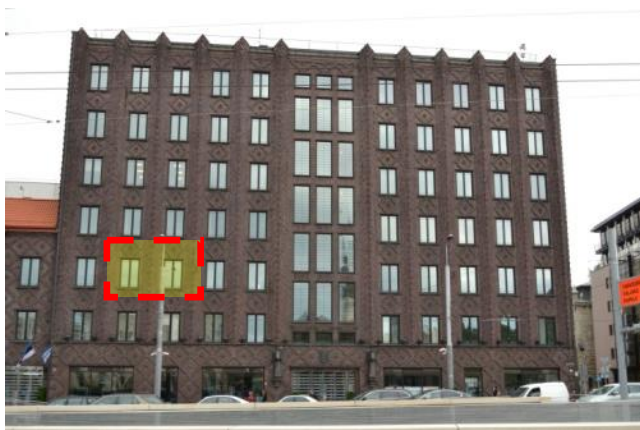




TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EHITISTE PROJEKTEERIMISE INSTITUUT
EHITUSFÜÜSIKA JA ENERGIATÖHUSUSE ÕPPETOOL



Vabaduse väljak 7 seespoolse lisasoojustuse niiskustehnilise toimivuse uuringu II etapi raport

Paul Klõšeiko

Targo Kalamees

Sisukord

1.	Sissejuhatus	4
2.	Uuritav objekt.....	4
2.1.	Hoone üldkirjeldus	4
2.2.	Seinakonstruktsioon	5
3.	Meetodid	6
3.1.	Välikatse üldkirjeldus	6
3.2.	Lisasoojustatud välisseinatarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse mõõtmine	6
3.3.	Välisseinatarindi ja sõlmede modelleerimine temperatuuriväljatarkvaras LBNL Therm 7.3	9
3.3.1.	Üldist.....	9
3.3.2.	Arvutusmodelid	9
3.3.3.	Hindamiskriteeriumid	10
3.4.	Välisseinatarindi modelleerimine tarkvaras IBK Delphin	11
3.4.1.	Programmi lühikirjeldus.....	11
3.4.2.	Arvutusmodelid	11
3.5.	Hindamiskriteeriumid	16
4.	Mõõtmistulemused	18
4.1.	Kliimatingimused mõõdetud perioodil	18
4.2.	Katsetarindi mõõtmistulemused	18
4.2.1.	Aknapale soojustuse taga.....	19
4.2.2.	Müüritises	20
4.2.3.	Seinasoojustuse taga.....	20
5.	Arvutuslik analüüs.....	22
5.1.	Temperatuuriväljaarvutused	22
5.2.	Soojus- ja niiskustehniliste arvutusmodelite kalibreerimine	24
5.2.1.	Kalibreerimisprotsessi käik	24
5.2.2.	Akendevaheline poorbetoonsein.....	24
5.2.3.	1D radiaatorinišš (andurid TRH5 ja SVP2)	27
5.2.4.	1D referentsseina müüritise väliskiht	28
5.2.5.	2D akendevaheline seinasõlm	30
5.3.	Arvutused niiskustehniliste testaastatega	33
5.3.1.	Üldist.....	33
5.3.2.	1D akendevaheline poorbetoonsein.....	33
5.3.3.	2D postisõlm	34
6.	Tulemuste hindamine	37
7.	Kasutatud kirjandus	38

1. Sissejuhatus

Uuring keskendub muinsuskaitse all oleva hoone tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse võimalikkuse ja selle soojus- ja niiskustehniline toimivuse uurimisele. Seespoolne lisasoojustamine on piirdetarindi soojus- ja niiskustehnilisest seisukohast üldiselt riskantne tegevus. Peamised riskid on:

- kandeseina sisepinnatemperatuuri alandamisega seotud suhtelise niiskus tõusuga üle kriitilise piiri, mille tagajärjeks võib olla hallituse kasv või veeauru kondenseerumine soojustatava välisseina sisepinnale;
- külmasildade mõju suurenemine;
- välisseina välispinna temperatuuri alanemine ja sellega suurem risk külmakahjustuste tekkeks;
- hoonete soojuslik massiivsus väheneb.

Kui mälestistel on keelatud välisfassaadi 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.

2. Uuritav objekt

2.1. Hoone üldkirjeldus

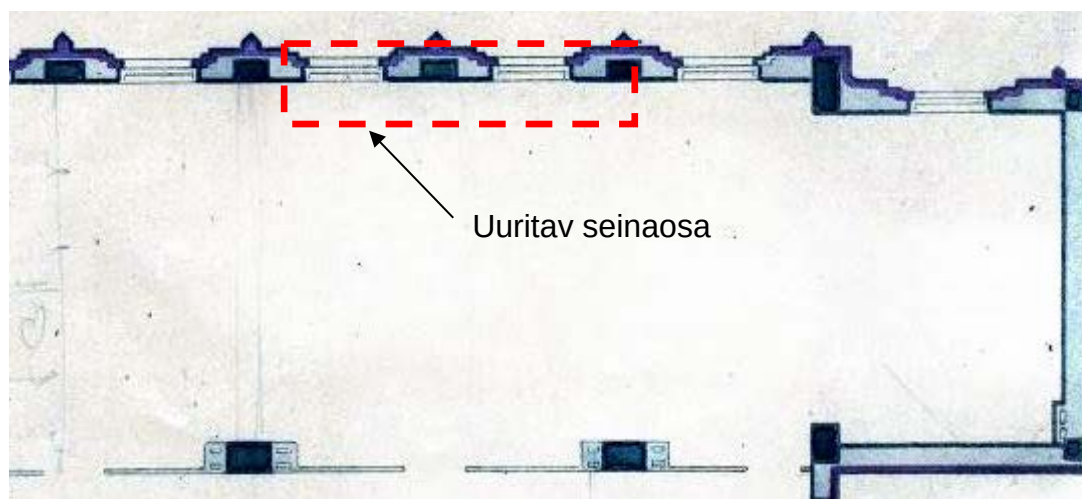
Uuritav hoone asub Tallinnas Vabaduse väljaku lõunaserval, põhimaht on orienteeritud ida-läänesuunaliselt. Tegemist on 1932. aastal valminud 7-korruselise büroohoonega, mille suletud netopind on 7800m². Hoone on ehitismälestis (3129, erandlik klinkerkivist fassaadidega esindushoone, <http://register.muinas.ee/?menuID=monument&action=view&id=3129>).



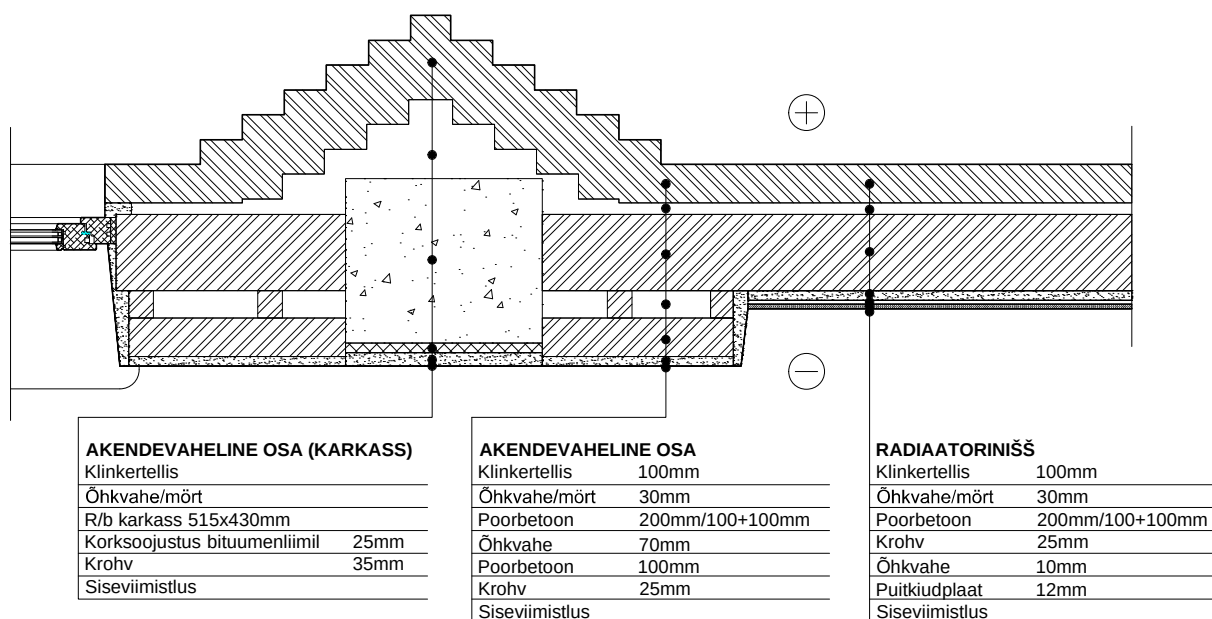
Joonis 1 Uuritav objekt – foto Vabaduse väljakult (vasakul, allikas: Ivar Leidus/Wikipedia) ja asukoht kaardil (allikas: Regio)

2.2. Seinakonstruktsioon

Lähtudes jaotisest **Error! Reference source not found.** selgitati välja olemasolev seinakonstruktsioon. Välisseinatarindi ligikaudsed kihid on antud joonisel Joonis 3. Lähtudes Tallinna Kultuuriväärtuste Ameti arhiivis olevast hoone kavandist, on hoones raudbetoonkarkass – selle olemasolu selgitati välja ka eeltööde käigus.



Joonis 2 III korruse plaani fragment (Eestimaa Kinnituse A.S. „EKA“ büroohoone kavand, 30 detsember 1929, Tallinna Kultuuriväärtuste Ameti arhiiv).



Joonis 3 Eeltööde käigus väljaselgitatud seinakonstruktsioon - vasakul horisontaallõige akna juures, paremal radiaatoriniši juures.

3. Meetodid

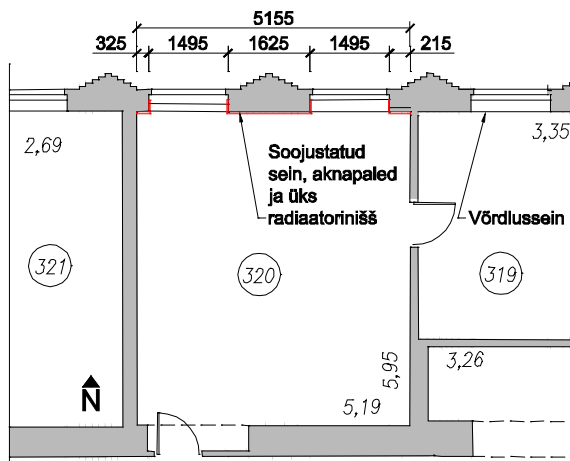
3.1. Välikatse üldkirjeldus

Välisseinauuring koosneb lisaasoojustatud ja lisaasoojustamata seina (võrdlussein) mõõtmisest. Katsesein asub uuritava objekti III korrusel (vt Joonis 4), uuritav seinaosa on suunatud põhja. Lisaasoojustamata seinaosa asub testruumi naaberruumis.

Katsetakse poorbetoonplaati Multipor kuna see osutus eeltööde käigus tehtud arvutisimulatsioonides optimaalseimaks kompromissiks niiskustehnilise toimivuse ning energia- ja kulutõhususe osas. Aknapaalede soojustamiseks uuriti 2 erineva paksusega XPS soojustuse mõju.

Testseina rajamine toimus järgnevatel perioodidel:

- | | |
|-----------------------------------|-------------|
| • Seinasiseste andurite paigaldus | 2.07.2014 |
| • Soojustuse liimimine | 2-4.07.2014 |
| • Krohvi- ja värvitööd | 8.07.2014 |
| • Esialgne andurite ühendamine | 10.07.2014 |
| • Andurite lõplik ühendamine | 07.10.2014 |



Joonis 4 Katseseina plaan (vasakul) ja perspektiivvaade (paremal).

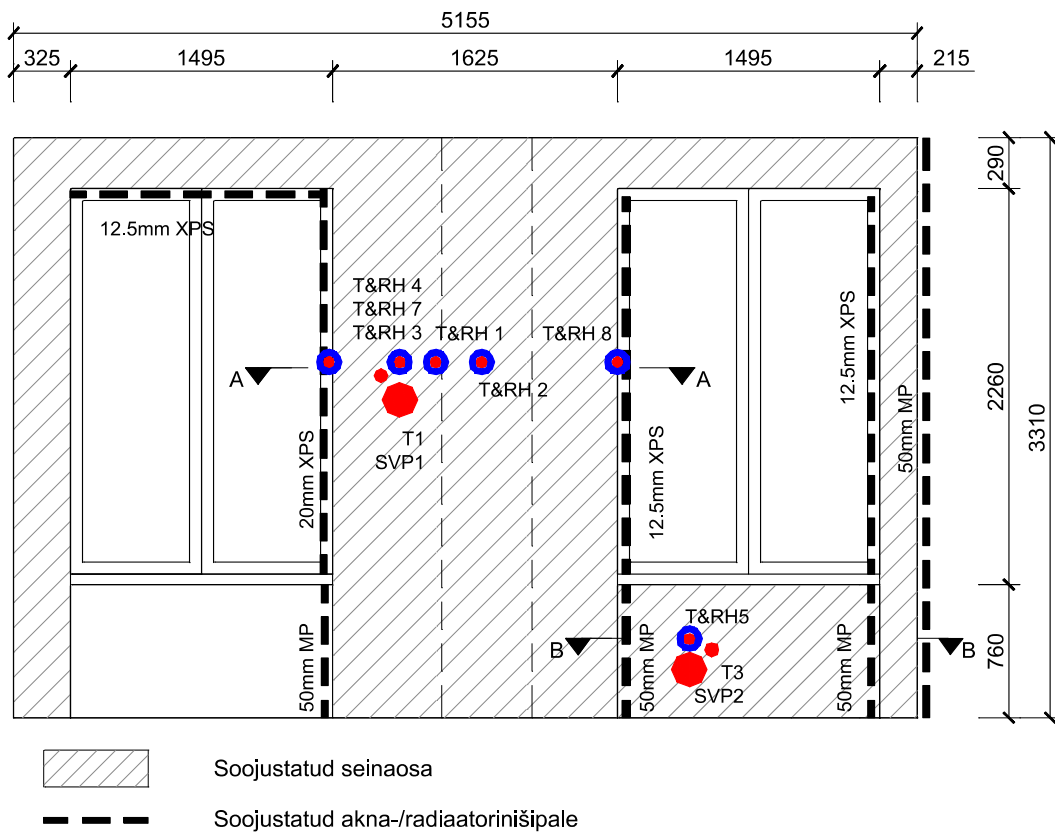
3.2. Lisaasoojustatud välisseinatarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse mõõtmine

Mõõteandurite paigalduskohad lisaasoojustatud seinas on järgmised (vt Joonis 5, Joonis 6 ja Joonis 7):

- Seinasised temperatuuri- ja suhtelise niiskuse andurid:
 - o TRH1: r/b posti ja poorbetooni liites soojustuse taga.
 - o TRH2: r/b karkassiposti keskel korksoojustuse taga;
 - o TRH3: soojustuse ja poorbetoonmüüritise vahel;
 - o TRH4: akendevahelise osa poorbetoonmüüritise- fassaadimüüritisevahelises õhkvahe;
 - o TRH5: soojustuse ja poorbetoonmüüritise vahel radiaatorinišis;
 - o TRH6: 20mm XPS soojustusega aknapale nurgas soojustuse ja müüritise vahel;
 - o TRH7: akendevahelise osa poorbetoonmüüritise väliskihis;
 - o TRH8: 12.5mm XPS soojustusega aknapale nurgas soojustuse ja müüritise vahel;
 - o VTRH: võrdlusseina akendevahelise osa poorbetoonmüüritise väliskihis

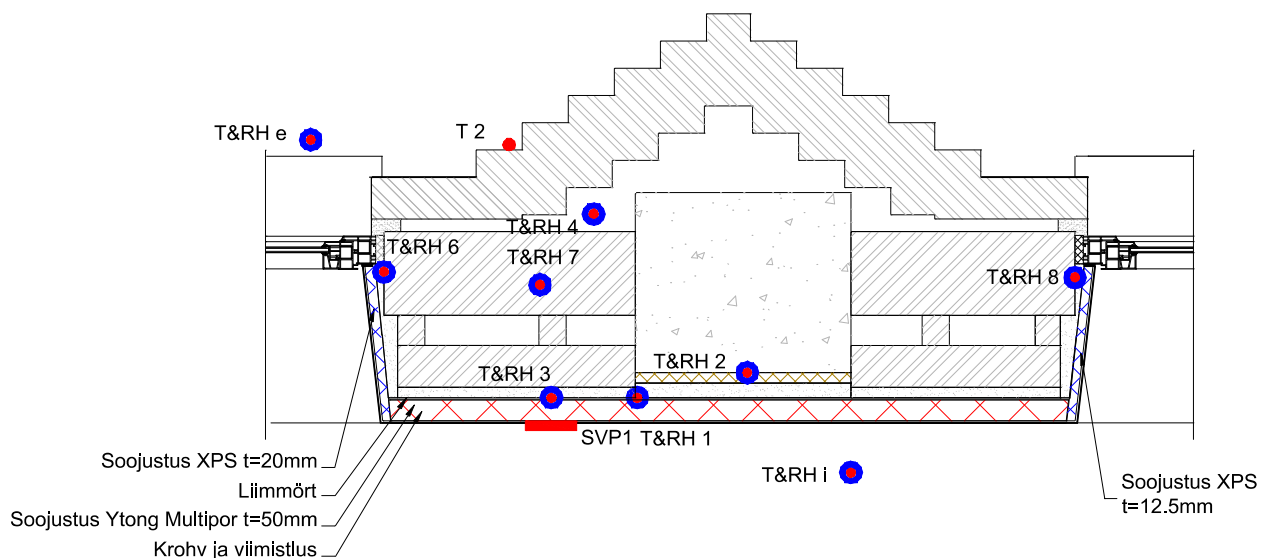
- Temperatuuri- ja suhtelise niiskuse andurid:
 - o TRHi: soojustatud ruumi sisekliima;
 - o TRHe: väliskliima;
 - o VTRHi: võrdlusruumi sisekliima.
- Soojusvooplaadid:
 - o SVP1: akendevahelise osa poorbetoonilõigu sisepinnal;
 - o SVP2: radiaatoriniši sisepinnal;
 - o VSVP: võrdlusseina akendevahelise osa poorbetoonilõigu sisepinnal.
- Temperatuuriandurid:
 - o T1: akendevahelise osa sisepind;
 - o T2: akendevahelise osa välispind;
 - o T3: radiaatoriniši sisepind;
 - o T4: radiaatoriniši välispind;
 - o VTsi: võrdlusseina sisepind;
 - o VTse: võrdlusseina välispind.

Mõõtmistulemuste salvestamiseks kasutatakse iseseisvaid mitmekanalilisi andmesalvesteid. Kõik mõõtetulemused salvestatakse 1-tunnise intervalliga.

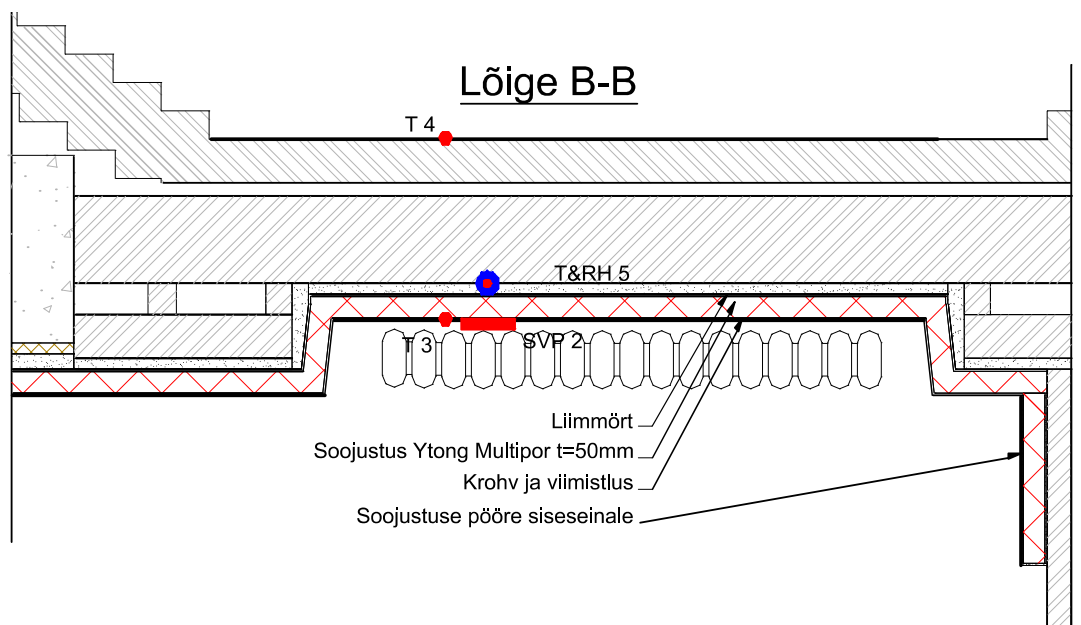


Joonis 5 Andurite paigutus testseinal: eestvaade.

Lõige A-A



Joonis 6 Andurite paigutus testseinas: lõige A-A (akendevaheline osa).



Joonis 7 Andurite paigutus testseinas: lõige B-B (radiaatorinišš).

Uuringus kasutati järgmisi seadmeid:

Temperatuur ja suhteline niiskus tarindis (RotronicAG 2011)

Toote nimetus: Rotronic Hygroclip HC2-C05
Mõõtepiirkond ja -täpsus: temperatuur -40...85 ±0.3 °C (23°C juures);
suhteline niiskus 0...100 ±1.0 %RH (23°C juures)
Vananemine: temperatuur < 0.1°C / aastas; < 1 %RH / aastas
Mõõtepea läbimõõt: 5mm
Tähis: T&RH

Soojusvoog (Hukseflux 2014)

Toote nimetus: Hukseflux HFP01
Mõõtepiirkond: -2000...+2000 W/m2, täpsus +5%/-5% (12 tunni summaarne)
Tähis: SVP

Pinnatemperatuurid (Anon 2013)

Toote nimetus: Onset Hobo TMC-HD
Mõõtepiirkond: -2000...+2000 W/m², täpsus ±0.25°C
Tähis: T

Õhutemperatuur ja suhteline niiskus (Anon 2010; Anon 2014)

Toote nimetus: Onset Hobo U12 and UX100
Mõõtepiirkond: -20...+70°C, täpsus ±0.21°C, ±2.5-3.5%_{RH}
Tähis: T&RH_i, T&RH_e

Andmesalvesti (Anon 2011b)

Toote nimetus: Grant Squirrel SQ2020 1F8
Täpsus: ±0.05% lugemist ja ± 0.025% mõõtepiirkonnast

Andmesalvesti (Anon 2011a)

Toote nimetus: Grant Squirrel SQ2010
Täpsus: ±0.1% lugemist ja ± 0.1% mõõtepiirkonnast

3.3. Välisseinatarindi ja sõlmede modelleerimine temperatuuriväljatarkvaras LBNL Therm 7.3

3.3.1. Üldist

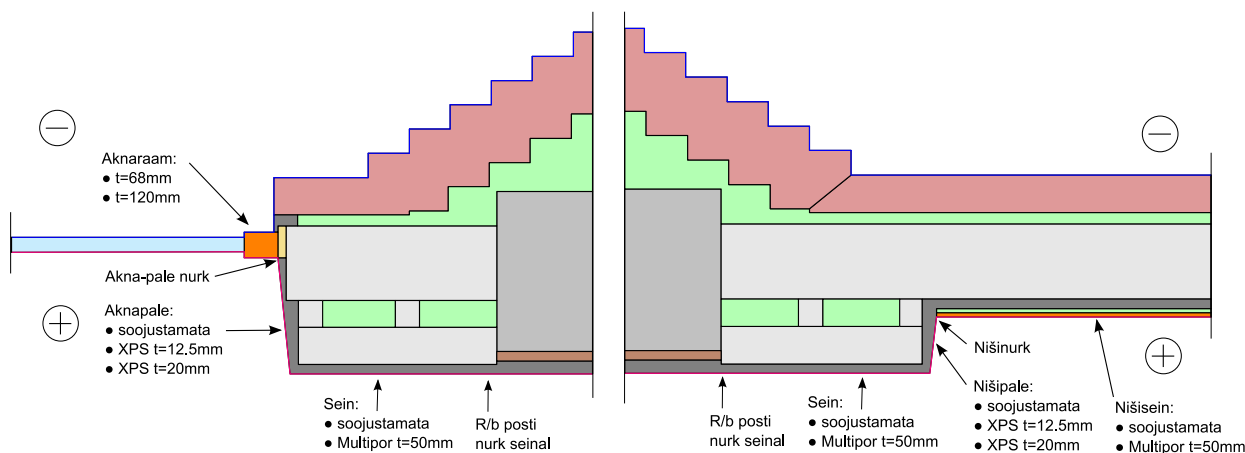
LBNL Therm on statsionaarne temperatuurivälja tarkvara, mis põhineb 2-dimensioonilisel soojusülekandevõrrandite lahendamisel lõplike elementide meetodil. Thermi abil saab lahendada 2D sõlmede soojusjuhtivusega seotud küsimusi ning hinnata külmasildade kriitilisusi kasutades indikaatorina nt temperatuuriindekseid.

3.3.2. Arvutusmodelid

Arvutustes oli ääretingimustena defineeritud sise- ja välistemperatuur (vastavalt +10°C ja 0°C) ning pindadele määratud sise- ja välispinnatakistused. Kõigil juhtudel oli välispinnatakistus $R_{se}=0.04\text{m}^2\cdot^\circ\text{K/W}$. Energiaarvutustes kasutati sisepinnatakistust $R_{si}=0.125\text{ m}^2\cdot^\circ\text{K/W}$, kriitiliste madalate pinnatemperatuuride vaatlemisel oli sisepinnatakistus $R_{si}=0.25\text{ m}^2\cdot^\circ\text{K/W}$.

Kasutusel oli 2 põhilist arvutusmodelit ning nende järgnevad variatsioonid:

- Akna ja akendevahelise osa horisontaalsõlm (Joonis 8 vasak):
 - o 68mm-paksuse aknaraamiga:
 - soojustamata referentsmodel;
 - soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustamata aknapale;
 - soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustus XPS t=12.5mm aknapalel;
 - soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustus XPS t=20mm aknapalel;
 - o 120mm-paksuse aknaraamiga:
 - soojustamata referentsmodel;
 - soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustamata aknapale;
 - soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustus XPS t=12.5mm aknapalel;
 - soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustus XPS t=20mm aknapalel;
- Radiaatoriniši ja karkassiposti horisontaalsõlm (vt Joonis 8 parem):
 - o soojustamata referentsmodel;
 - o soojustus Multipor t=50mm seinaosal, soojustamata radiaatoriniš ja nišipale;
 - o soojustus Multipor t=50mm seinaosal ja nišipalel, soojustamata radiaatoriniš;
 - o soojustus Multipor t=50mm seinaosal, radiaatorinišil ja nišipalel.



Joonis 8 Vasak: temperatuurivälja arvutusmodeli skeem akna horisontaalsõlme kohta (poolest aknast poole karkassipostini, L=1561mm).
Parem: temperatuurivälja arvutusmodeli skeem radiaatoriniši horisontaalsõlme kohta (poolest karkassipostist poole radiaatorinišini, L=1560mm).

Mudelites kasutatud materjalid annab Tabel 1. Et avatäite täpsed omadused ei olnud teda, oli akna paketi puhul arvestatud soojusläbivusega $U=0.64 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, lihtsustusena oli olemasolev plastraam asendatud 68mm-paksuse puitraamiga (omavad analoogset soojusläbivust).

Tabel 1 Tarkvaras Therm kasutatud materjaliomadused.

Materjal	Soojuseriijuhtivus λ , W/(m·K)
Lubisementkrohv	0.580
Montaaživaht	0.030
Poorbetoon	0.330
Puit	0.150
Korksoojustus	0.050
Soojustus Ytong Multipor	0.045
XPS	0.035
Klinkertellis	1.010
Betoon	2.100

3.3.3. Hindamiskriteeriumid

Tarkvaras Therm leitud tulemusi analüüsi soojus- ja niiskustehniliselt turvalise toimivuse aspektist temperatuurindeksite abil. Temperatuurindeks väljendab pinnatemperatuuri ja välistemperatuuri vahe suhet sise- ja välistemperatuuri vahesse (vt valem (1)). Mida madalam on temperatuurindeks, seda madalam on vaadeldava punkti temperatuur ja vastupidi. Võrreldes temperatuurindeksit ruumi kasutustingimustele vastavate piirväärtustega, saab ligikaudselt hinnata lahenduse turvalisust.

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} \quad (1)$$

kus:

- f_{si} temperatuurindeks, [-];
- t_{si} vaadeldava punkti pinnatemperatuur, [°C];
- t_e välistemperatuur, [°C];
- t_i sisetemperatuur, [°C].

Eestis on uute hoonete puhul sobiv kasutada minimaalse lubatud temperatuurindeksina $f_{Rsi}=0.8$. Renoveeritavates hoonetes, kus talvine niiskuslisa jääb alla 4g/m^3 ja suvel alla $+1\text{g/m}^3$, on piirväärtusteks hallituse vältimise kriteeriumi puhul $f_{Rsi}=0.65$ ja kondensaadi vältimisel $f_{Rsi}=0.55$.

3.4. Välisseinatarindi modelleerimine tarkvaras IBK Delphin

3.4.1. Programmi lühikirjeldus

Seespoolsest lisasoojustatud välisseina soojus- ja niiskustehnilise toimivuse analüüsiks kasutati dünaamilist kombineeritud niiskuse- ja soojuse liikumist arvestavat arvutustarkvara Delphin 5.8.1 (Grunewald 1997; Nicolai 2008). See võimaldas täpsemalt analüüsida tarindi soojus- ja niiskustehnilist toimivust, võttes arvesse muutuvaid keskkonnatingimusi ja materjaliomaduste keskkonnasõltuvust.

3.4.2. Arvutusmodelid

Arvutusmodelite ülesehitus

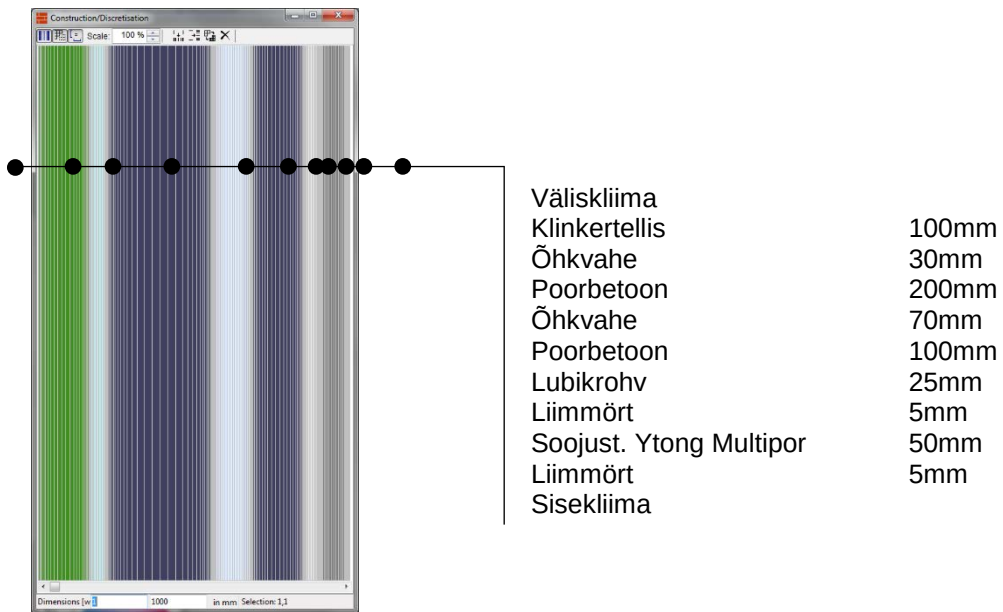
Erinevate seinalõikude arvutusmodelid koostati lähtudes esialgse seina avamisel ja katseseina rajamisel saadud infost. Kasutusel olid järgnevad modelid:

- 1-dimensiooniline mudel akna- ja r/b karkassivahelisest osast (lõikesse jäävad andurid TRH 3, 4, 7; T1, T2; SVP1), vt Joonis 9;
- 1-dimensiooniline mudel radiaatorinišist (lõikesse jäävad andurid TRH5, T3, T4, SVP2), vt Joonis 10;
- 1-dimensiooniline mudel soojustamata võrldusseinast (lõikesse jäävad andurid VTRH; VSVP; VT_{si} , VT_{se}), vt Joonis 11;
- 2-dimensiooniline mudel poolest r/b karkassipostist kuni aknani (lõikesse jäävad andurid TRH1, 2, 3, 4, 6, 7; T1, T2; SVP1), vt Joonis 12;
- 2-dimensiooniline kärbitud mudel poolest r/b karkassipostist kuni poorbetoonmüüritise sidekivireani (lõikesse jäävad andurid TRH1, TRH2), vt Joonis 13.

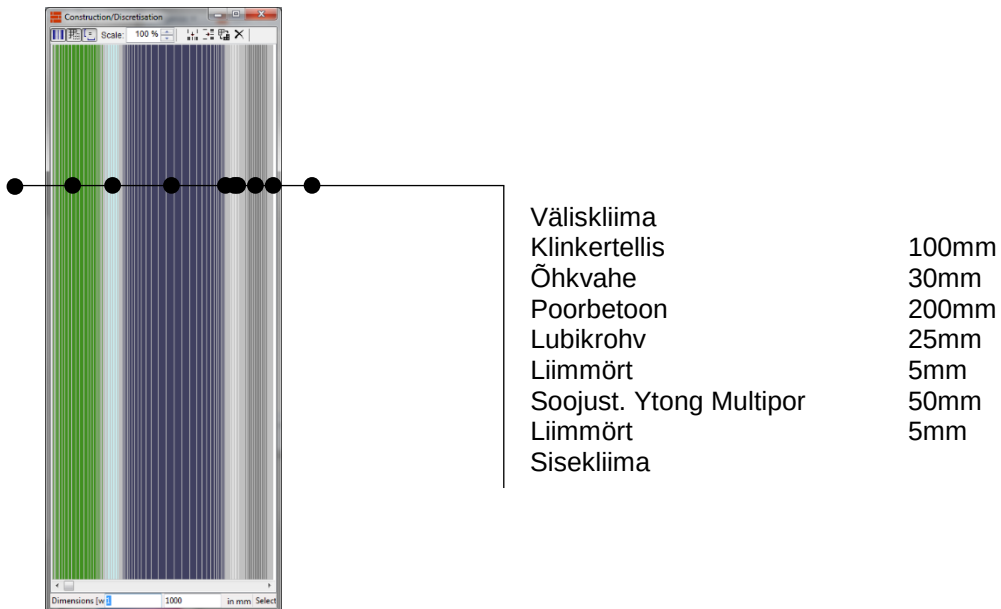
Sisestatud konstruktsioon tükeldatai erineva paksusega elementaarmahtudeks nõnda, et paksemad mahud asuvad homogeensete konstruktsiooniosade keskmises osas ning õhemad mahud erinevate konstruktsiooniosade kokkupuutepindade lähedal. 1-dimensiooniliste modelite puhul olid kihid paksusega 1...20mm, 2-dimensioonilistel modelitel suurendati arvutuste kiiruse huvides elementaarmahtude mõõte (1...43mm).

Sisepinna soojustakistuseks on arvestatud $R_{si}=0.125 \text{ m}^2\text{K/W}$ ning veeauru difusioonitakistuseks $3 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$, välispinna soojustakistuseks võeti $R_{se}=0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja veeauru difusioonitakistus $2 \cdot 10^{-7} \text{ s/m}$.

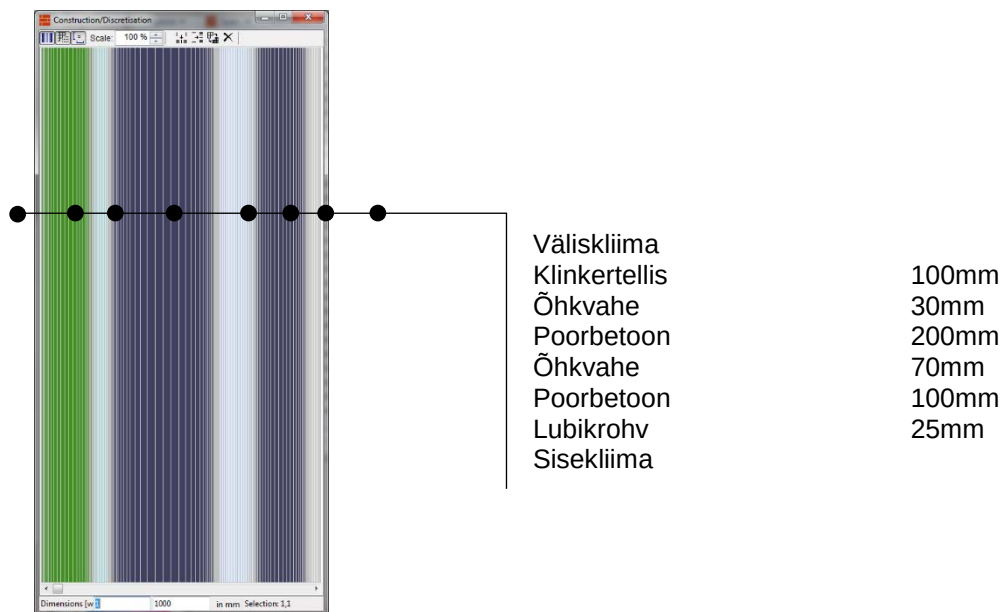
Seinamodelid olid kiirguse, tuule ja sademete korrektseks arvestamiseks defineeritud asuma Tallinna laiuskraadil (59.4°N) ning orienteeritud vastavalt reaalse seina asendile põhja/loodesse (356°). Algniiskused valiti lähtudes erinevatest kihtidest võetud katsekehade mõõdetud niiskussisaldustest ning vastavalt mõõtesüsteemist saadud esimestele usaldusväärsetele mõõtmistulemustele.



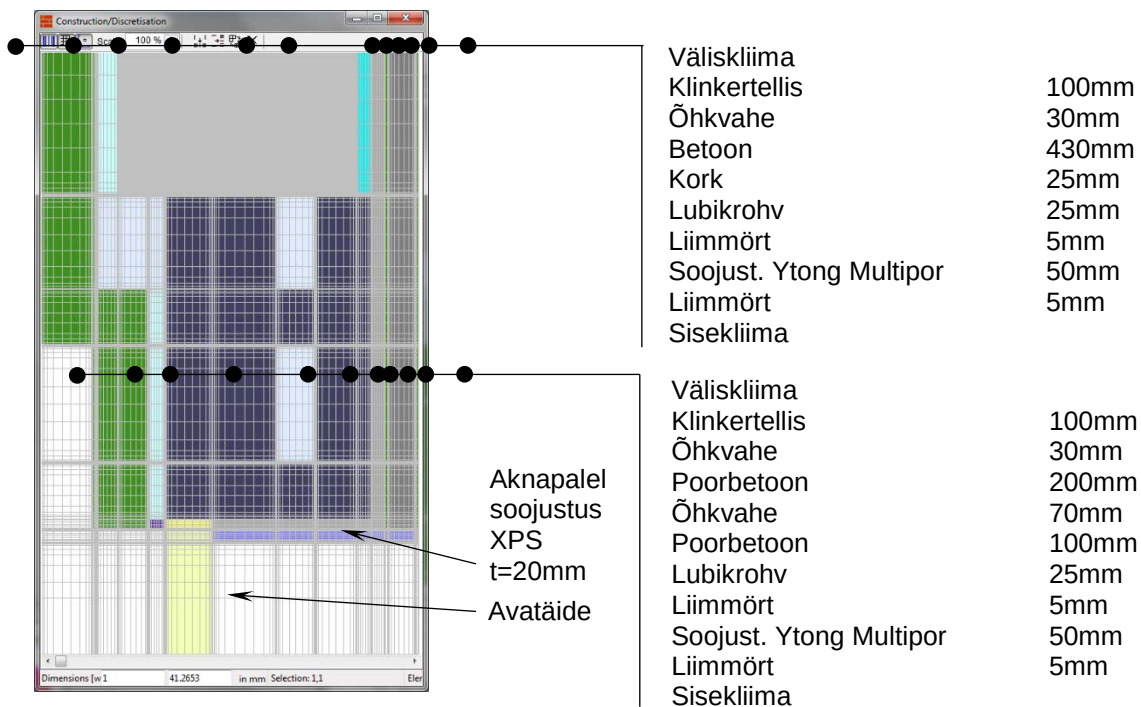
Joonis 9 Lisasoojustatud välissein: 1-dimensioonilise arvutusmodeli skeem programmis Delphin.



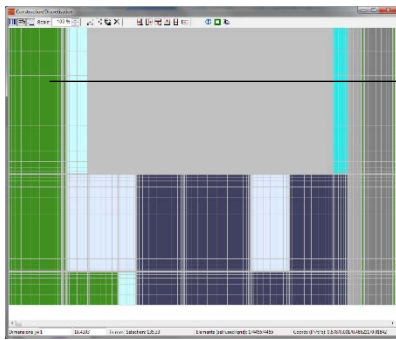
Joonis 10 Lisasoojustatud radiaatorinišš: 1-dimensioonilise arvutusmodeli skeem programmis Delphin.



Joonis 11 Lisasoojustamata võrdlussein: 1-dimensioonilise arvutusmodeli skeem programmis Delphin.



Joonis 12 Lisasoojustatud akendevaheline osa: 2-dimensioonilise arvutusmodeli skeem programmis Delphin („2D suur“).



Mudel on analoogne Joonis 12-l kujutatule, arvutuskiruse huvides on mahtu kärbitud poole sidekivini.

Joonis 13 Lisasoojustatud akendevaheline osa: lihtsustatud 2-dimensioonilise arvutusmodeli skeem programmis Delphin („2D väike“).

Materjaliandmed

Testseina ehitamiseks kasutatud materjalide soojus- ja niiskustehniliste omaduste 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 kasutat vähemoluliste materjalide puhul 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;
- täiendavad materjaliomadused nagu niiskusmahtuvus, kapillaarne veeimavus, materjaliomaduste sõltuvus keskkonnatingimustest (temperatuur, suhteline niiskus jne) pärinesid arvutustarkvara andmebaasist.

Paraku puuduvad täpsed materjaliandmed poorbetooni ja korksoojustuse kohta. Esimesel juhul määrati poorbetoonist katsekehade ligikaudne tihedus ning seejärel kasutati alusena materjali „Lightweight Concrete“. Seda muudeti vastavalt erinevate tihedustega materjalide „Blast furnace slag concrete“ omaduste interpoleerimisel saadud väärtustele. Kuna seinas esineva korksoojustuse kohta puuduvad igasugused andmed, siis kasutati Delphini andmebaasist pärinevat materjali „Insulation-Clay-Cork-FW“. Arvutusmodelite suurema usaldusväärsuse ja korrelatsiooni saavutamiseks mõõtmisandmetega, tuleks täpsustada mõlema materjali soojus- ja niiskustehnilisi omadusi. Lühikokkuvõtte kasutatud materjaliomadustest annab Tabel 2.

Tabel 2 Programmis Delphin koostatud arvutusmodelites kasutatud materjalide põhilised omadused.

Materjal	Materjali vaste programmis Delphin	Tihedus ρ	Eri- soojus c	Poorsus ψ	Efek- tiivne poorsus ψ_e	Soojus- erijuhtivus λ	Veeimavus A_w	Veeauru- difusiooni- takistus- tegur μ
			J/(kg·°K)	m³/m³	m³/m³	W/(m·°K)	kg/(m²·s ^{0.5})	-
Klinker- tellis	Old Building Clinker Hamburg Holstenkamp	2010	844	0.25	0.17	1.012	0.006	41
Poor- betoon	Lightweight concrete / Blast furnace slag concrete	1200	900	0.57	0.40	0.289	0.047	6
Lubi- krohv	Lime plaster	1498	802	0.43	0.43	0.410	0.010	9
Soojust. Ytong Multipor	Mineral Foam Multipor (from 2011)	99	1331	0.96	0.13	0.042	0.006	7
Liimmört	Glue Mortar (For Mineral Insulation Board)	830	815	0.69	0.54	0.155	0.003	13
Montaaži- vaht	Polyurethane- foam	45	1500	0.92	0.92	0.029	1.0E-04	104
Soojust. XPS	Polystyrene Board - Extruded	35	1500	0.91	0.91	0.035	8.0E-06	300
Puit	Spruce SW Radial	520	1189	0.70	0.69	0.130	0.058	236
Betoon	Concrete	2104	1000	0.22	0.22	2.100	0.013	76
Kork	Insulation-Clay- Cork-FW	460	803	0.83	0.43	0.068	0.036	20

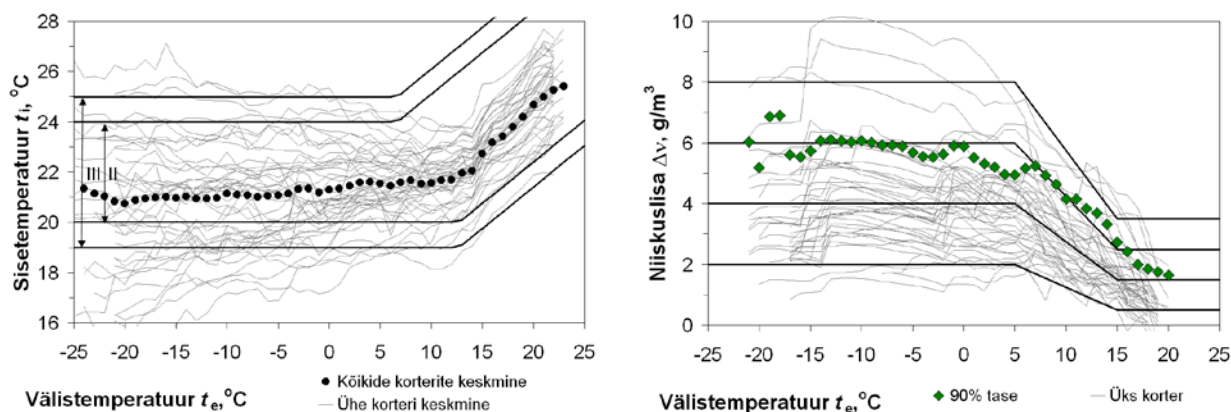
Kliimaatilised ääritingimused

Arvutusmodeli kalibreerimisel oli ääritingimusteks testruumis ja vahetult väljas mõõdetud temperatuur ja suhteline niiskus. Samuti olid kasutusel samal perioodil Ilmateenistuse Harku mõõtejaamas mõõdetud andmed sademete hulga, tuule suuna ja kiiruse kohta ning Tõravere hajusa ja otsese kiirguse andmed. Kõigi andmete samm on 1 tund.

Pärast arvutusmodeli kalibreerimist teostati arvutused, kasutades Eesti niiskustehnilisi difusioonitestaastad (Kalamees & Vinha 2004). Temperatuur, suhteline niiskus, tuule kiirus ja suund, sademete hulk on mõõdetud Väike-Maarja mõõtejaamas järgnevatel perioodidel:

- hallituse testaasta – juuli 1989 kuni juuni 1990;
- kondensaadi testaasta – juuli 1995 kuni juuni 1996.

Sisekliima parameetrid valiti vastavalt uurimistöös „Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga“ esitatud sisekliima mõõtmiste tulemustele (Kalamees et al. 2010; Kalamees et al. 2012). Joonis 14 esitab sisekliima väliskliimast sõltuvuse põhimõttelise skeemi. Siseõhu niiskust arvatati vastavalt 4g/m³ graafikule.



Joonis 14 Sisetemperatuuri (vasakul) ja niiskulisa (paremal) sõltuvus välistemperatuurist Eesti telliskorterelamutes (Kalamees et al. 2010).

3.5. Hindamiskriteeriumid

Kapillaaraktiivsete soojustusmaterjaide toimivuspiirideks pakub Künzeli (2011) kondenseerumise vältimise kriteeriumi $RH_{kriitil}=95\%$ ning lisaks ka külmumise vältimiseks minimaalset temperatuuripiiri. Arvestades poorides valitsevat rõhku ja lahustunud sooli, on tõenäoline, et jää teke on välditud ka siis, kui temperatuur kriitilises lõikes on -5°C .

Viitaneni (1999; 2009; 2007) hallitusmudel annab hallituse kasvu ääretingimused männi maltspuidule. Arvestades, et männi maltspuit on hallituse kasvule väga tundlik, võib mudelit teiste materjalide puhul pidada konservatiivseks. Samas on meetod siiski paindlikum ja võimaldab anda olukorrale reaalsema hinnangu kui fikseeritud 80%-line piirväärtus.

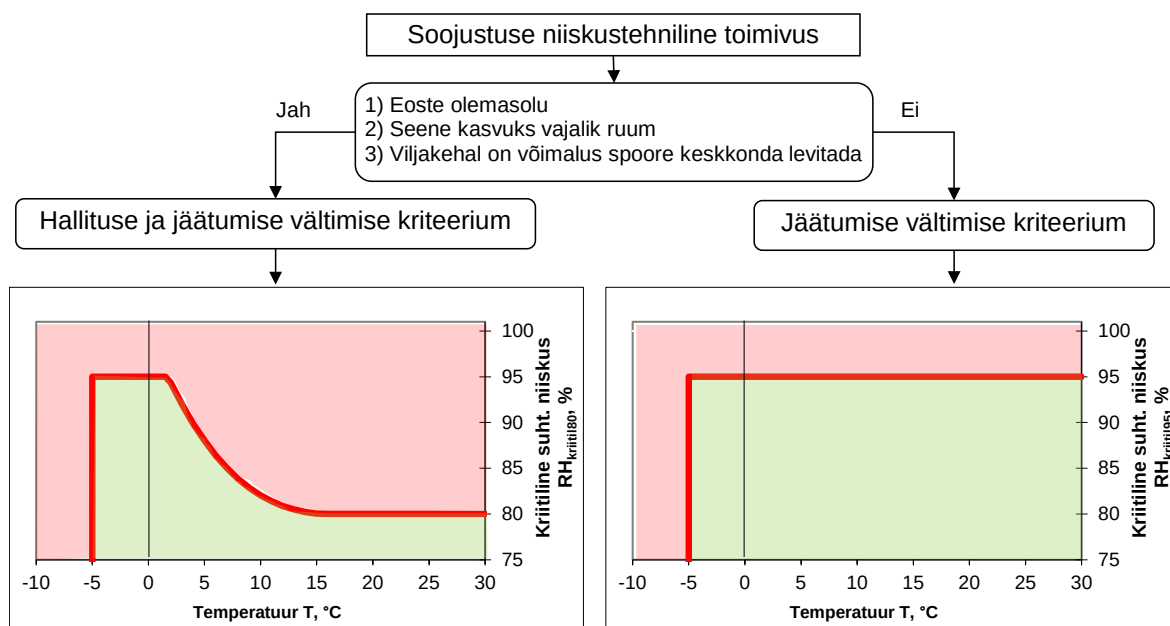
$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267t^3 + 0.160t^2 - 3.13t + 100.0, & \text{kui } t \leq 20^{\circ}\text{C} \\ 80\%_{RH}, & \text{kui } t > 20^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

kus:

- RH_{crit} kriitiline suhteline niiskus, $[\%_{RH}]$;
- t temperatuur, $[^{\circ}\text{C}]$.

Hallitusele vähetundlike materjalide puhul võib riskipiiriks pidada $85\%_{RH}$ (Ojanen et al. 2010). Välismüüritise ja poorbetooni vahel oleva õhkuvahe niiskusrežiimi analüüsimisel kasutati hallituse tekkepiirina valemit (2) ning nihutati seda 5% võrra.

Kokkuvõtlikult annab soojustuse ja esialgse seina vahelise kihi jaoks valitud hindamiskriteeriumitest ülevaate Joonis 15.



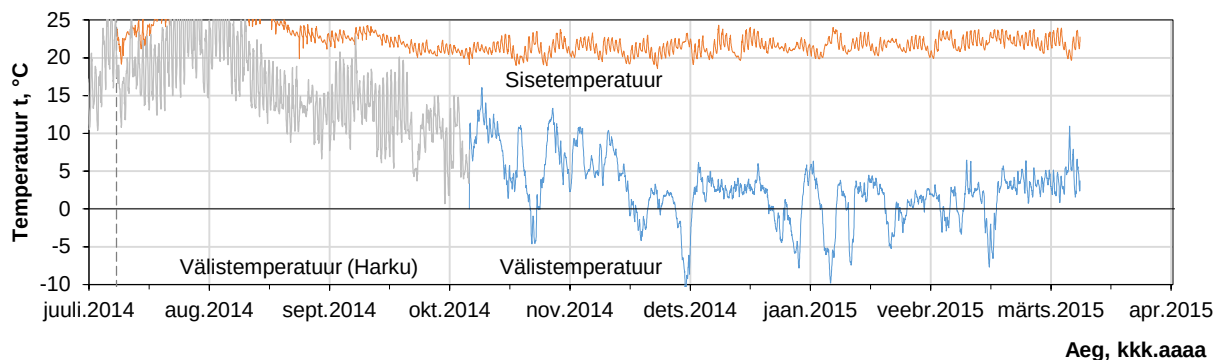
Joonis 15 Soojustuse niiskustehniliselt turvalise toimivuse hindamiskriteeriumid soojustussüsteemi ja esialgse seina vahelise kihi jaoks (Viitanen & Ojanen 2007; Viitanen et al. 2009; Kunzel 2011) .

4. Mõõtmistulemused

4.1. Kliimatingimused mõõdetud perioodil

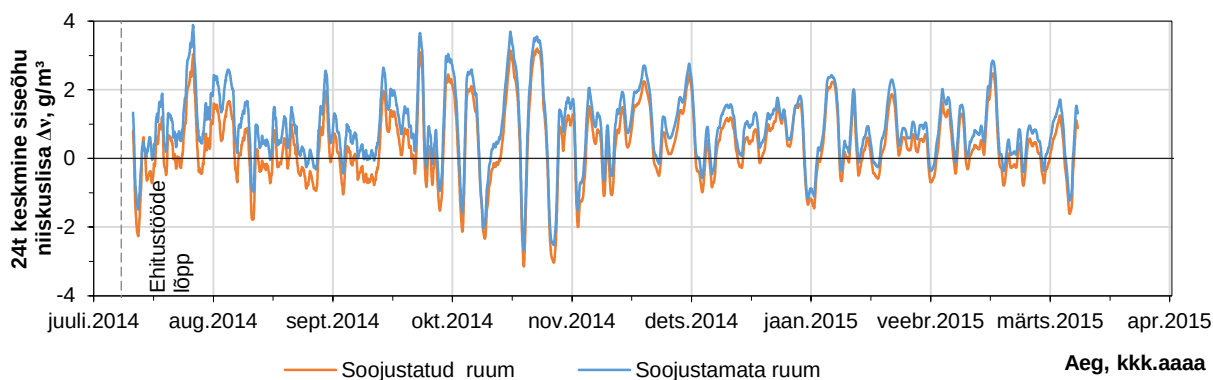
Uurimisobjektile mõõdetud sise- ja välistemperatuurid annab Joonis 16. Minimaalne mõõdetud välistemperatuur 2014/2015 aasta talvel oli -11.1°C ning keskmine temperatuur perioodil 1.nov. 2014...1.märts 2015 oli $+1.5^{\circ}\text{C}$, mis on oluliselt kõrgem kui minimaalselt varem esinenud.

Soojustatud ruumi keskmine sisetemperatuur perioodil 1.nov. 2014...1.märts 2015 oli 21.6 ning soojustamata ruumis 21.4 . Seoses kütte igapäevase väljalülitamisega tööajaväliseks perioodiks esines sisetemperatuuri ööpäevane kõikumine $<4^{\circ}\text{C}$ ulatuses.



Joonis 16 Mõõteperioodil testruumis ja väliskeskkonnas esinenud temperatuurid. Välise temperatuurianduri paigaldamisele eelnenud aja kohta on esitatud Ilmateenistuse Harku mõõtejaamas mõõdetud andmed.

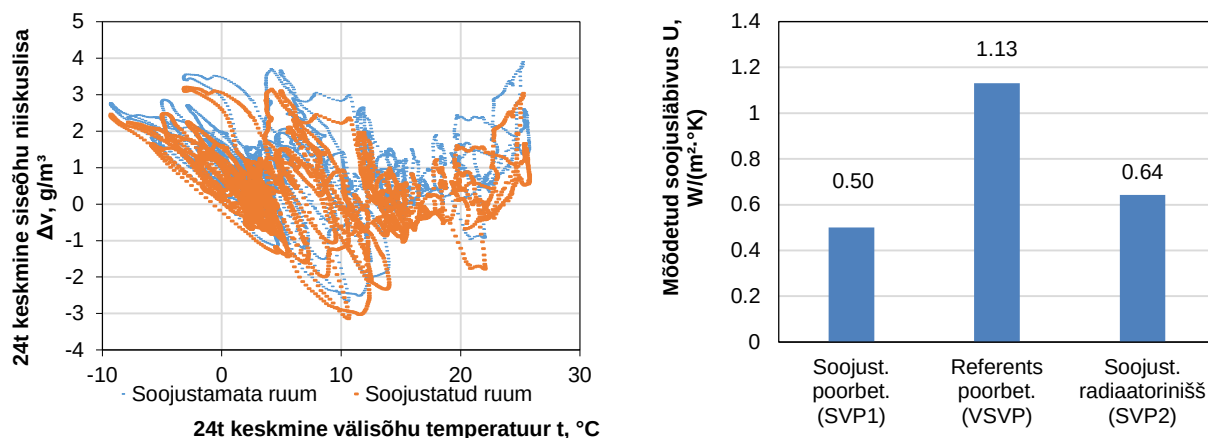
Niiskuskooormusi saab esitada niiskuselise abil. Niiskuselise näitab sise- ja välisõhu niiskussisalduste vahet, seejuures tähendavad positiivsed väärtused siseõhu kõrgemat niiskussisaldust. Uuritud ruumide niiskuselise graafik (Joonis 17) näitab, et niiskuskooormus on ruumides olnud suhteliselt madal. Ühe kasutajaga referentsruumis on niiskuskooormus tõenäoliselt kõrgema kasutajate tiheduse tõttu olnud mõnevõrra suurem.



Joonis 17 24 tunni keskmised mõõdetud niiskuselised soojustatud ja soojustamata ruumis.

4.2. Katsetarindi mõõtmistulemused

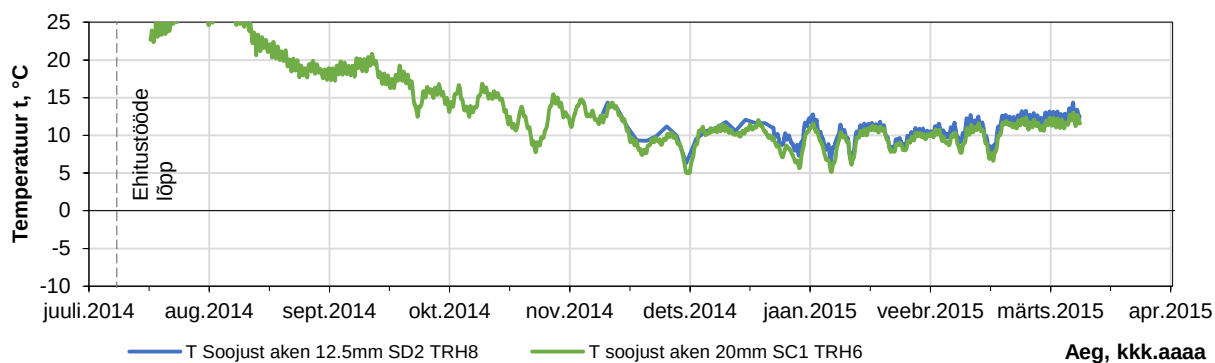
Erinevates punktides mõõdetud soojusvoogudest ja vastavate lõigete sise- ja välispinnatemperatuuridest arvutati nende lõigete soojusläbivused (vt Joonis 18 paremal). Referentsseinaga võrreldes vähenes lõigu soojusläbivus üle 2 korra. Radiaatorinišis, mille esialgne paksus oli süvistatud radiaatori tõttu väiksem, on soojusläbivus ka seetõttu mõnevõrra suurem. Arvestades radiaatorist põhjustatud suuremat sise- ja välispinna temperatuuride vahet, on soojustuse soojuskadude vähendamise efekt selles lõigus suurem. Kuna hoone sein ei ole homogeenne ning erinevate külmasildade mõju on suur, siis saab terve hoone võimaliku energiasäästu teada alles pärast vastavate arvutuste teostamist.



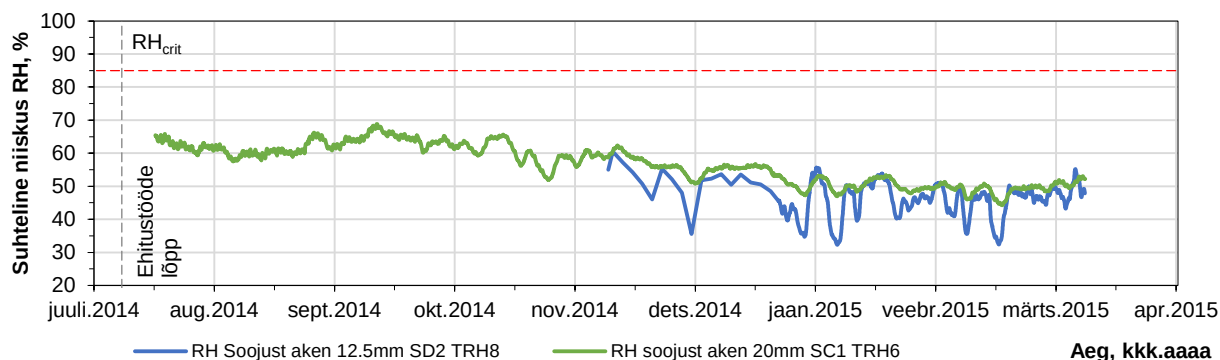
Joonis 18 Vasakul: soojustatud ja soojustamata ruumis mõõdetud 24 tunni keskmiste niiskuskulade sõltuvus välistemperatuurist. Paremal: mõõdetud soojusvoogudest ja pinnatemperatuuridest arvatud soojusläbivused.

4.2.1. Aknapale soojustuse taga

Joonis 19 ja Joonis 20 kujutavad testperioodil mõõdetud temperatuure ja suhtelise niiskuse tasemeid aknapalesoojustuse taga avatäite nurga lähedal. Esitatud on nii 12.5mm kui 20mm-paksuse XPS soojustuse lõigus mõõdetud andmed. Kuigi 12.5mm paksuse soojustuskihi puhul oli temperatuur mõnevõrra kõrgem ja suhteline niiskus seetõttu oodatult madalam, ei ületatud kummalgi juhul kriitilise suhtelise niiskuse ($\text{RH}_{\text{kriit}} \geq 85\%\text{RH}$) taset.



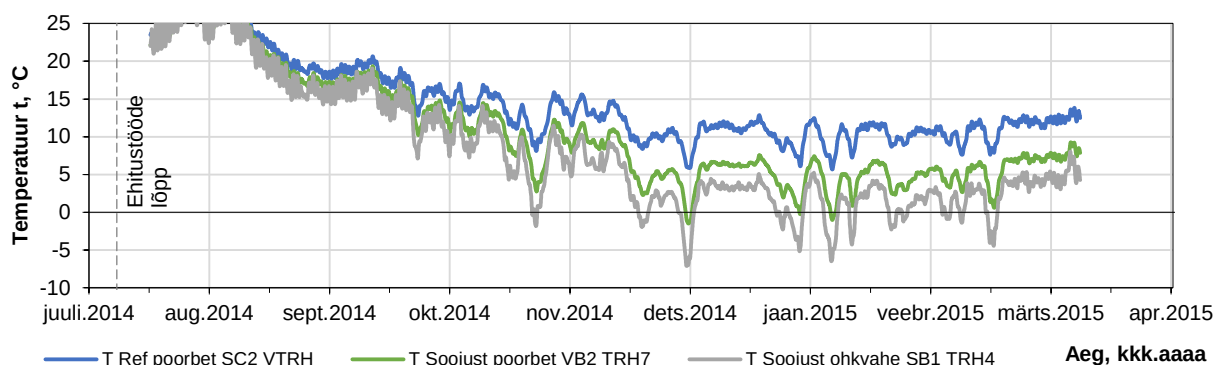
Joonis 19 Testperioodil mõõdetud temperatuurid aknapalesoojustuse taga.



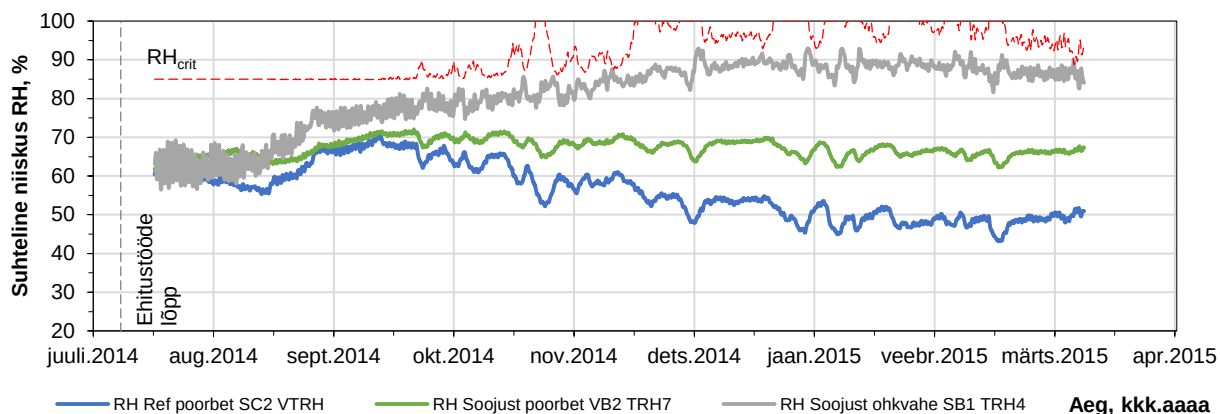
Joonis 20 Testperioodil mõõdetud suhtelise niiskuse tasemed aknapale soojustuse taga. Hallituse riskipiir $\text{RH}_{\text{kriit}} = 85\%$ vastavalt madalama hallitustundlikkusega materjalidele.

4.2.2. Müüritises

Joonis 21 ja Joonis 22 annavad vastavalt testperioodil mõõdetud temperatuurid ja suhtelise niiskuse tasemed müüritise sees ning ühtlasi ka poorbetoonmüüritise ja klinkermüüritise vahel olevas õhkvahes valitsenud tingimused. Hallitusmudeli kriitilise suhtelise niiskuse piire ei ülatata.



Joonis 21 Testperioodil mõõdetud suhtelise niiskuse tasemed soojustatud ja soojustamata akendevahelise osa poorbetoonmüüritise välimises kihis (vastavalt TRH7 ja VTRH) ja soojustatud lõigu müüritise- ja tellisvoodrivahelises õhkvahes (TRH4).

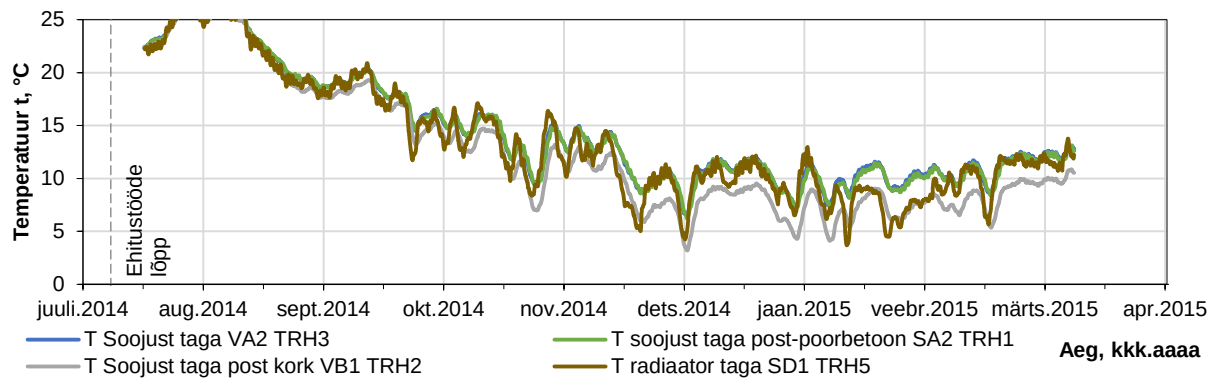


Joonis 22 Testperioodil mõõdetud temperatuurid soojustatud ja soojustamata akendevahelise osa poorbetoonmüüritise välimises kihis (vastavalt TRH7 ja VTRH) ja soojustatud lõigu müüritise- ja tellisvoodrivahelises õhkvahes (TRH4).

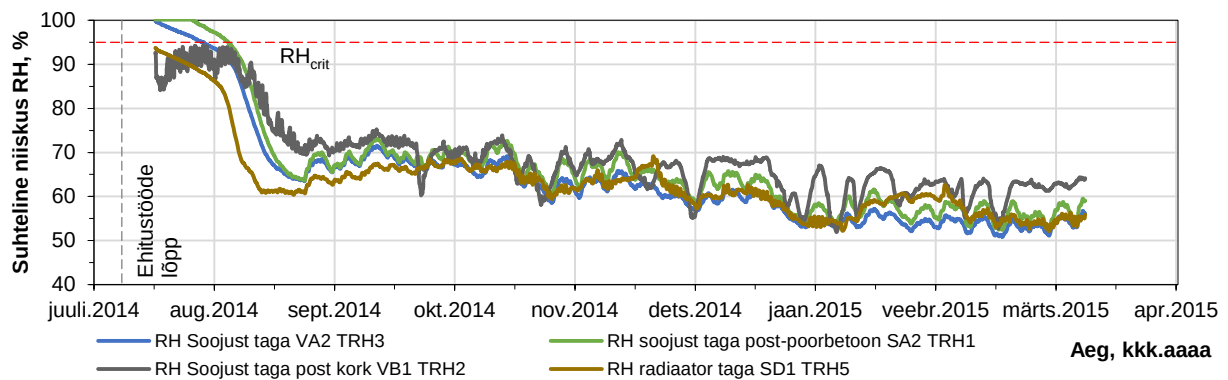
4.2.3. Seinasoojustuse taga

Joonis 23 ja Joonis 24 esitavad vastavalt testperioodil mõõdetud temperatuurid ja suhtelise niiskuse tasemed erinevates lõigetes lisasoojustuse taga. Kõigis mõõtepunktides oli möödunud talvel täidetud külmumise vältimise kriteerium. Korksoojustuse taga jäid mõõdetud temperatuurid talveperioodil oodatult teistest mõõtepunktidest madalamaks (tüüpiliselt $\sim 1\text{--}2^\circ\text{C}$ võrra). Teistega võrreldes enam kõikuva radiaatoriniši temperatuurandmete põhjal võib oletada, et jaanuari teisel poolel oli radiaator paar nädalat kas madalal režiimil või väljalülitatud.

Ehitusniiskuse väljakuivamiseks/niiskustasemete stabiliseerumiseks kulus ehitustööde lõpust ~ 1.5 kuud. Kiireimini kuivas välja radiaatorinišis asuv lõige (~ 40 päeva), ülejäänud lõigetes läks stabiilse taseme saavutamiseni ~ 50 päeva. Seejuures jäi korksoojustuse taga asuvas mõõtepunktis suhteline niiskus teistest punktides mõnevõrra kõrgemaks. Pärast väljakuivamist jäid maksimaalsed suhtelise niiskuse tasemed alla $\sim 70\%_{RH}$ ning kriitilist suhtelist niiskust ei ületatud.



Joonis 23 Testperioodil mõõdetud temperatuurid lisasoojustuse taga: poorbetooni pinnal (TRH3), r/b karkassiposti ja poorbetoonseina liitel (TRH1), esialgse korksoojustuse taga (TRH2) ja soojustatud radiaatorinišis (TRH5). $T_{\text{kriit.}} = -5^{\circ}\text{C}$ vastavalt jäätumise vältimise kriteeriumile.



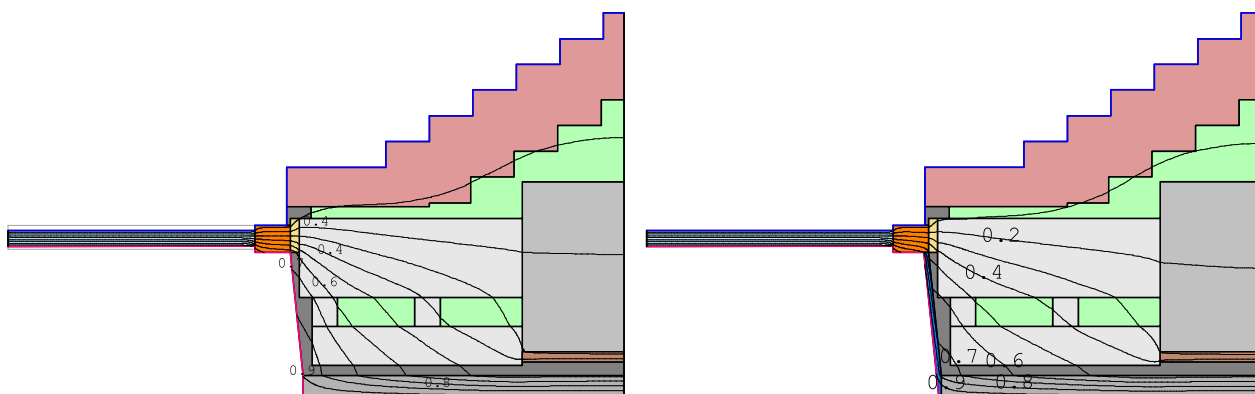
Joonis 24 Testperioodil mõõdetud suhtelise niiskuse tasemed lisasoojustuse taga: poorbetooni pinnal (TRH3), r/b karkassiposti ja poorbetoonseina liitel (TRH1), esialgse korksoojustuse taga (TRH2) ja soojustatud radiaatorinišis (TRH5). $RH_{\text{kriit.}} = 95\%_{RH}$ vastavalt kondenseerumise vältimise kriteeriumile.

5. Arvutuslik analüüs

5.1. Temperatuuriväljaarvutused

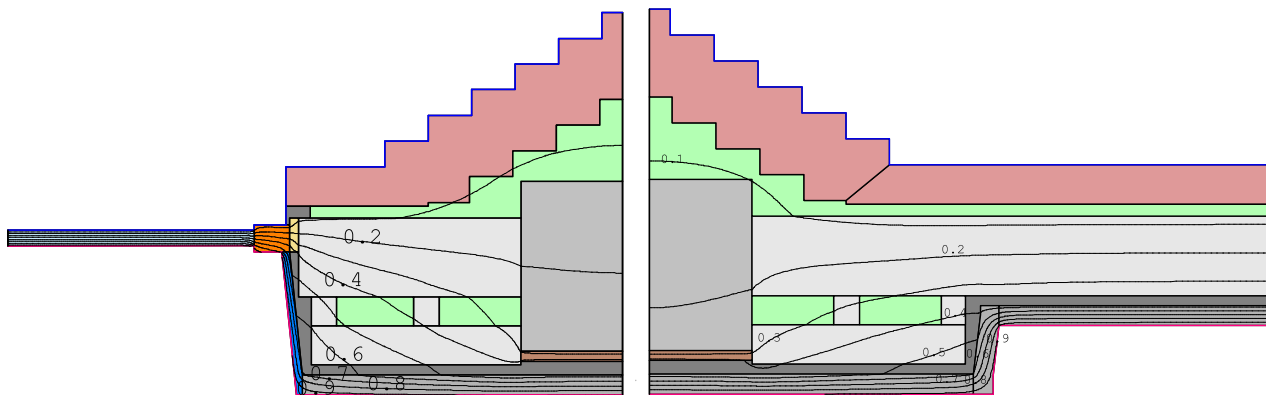
Joonis 25 ja Joonis 26 vasakul annavad **akna horisontaalsõlme** isothermid kolme erineva soojustuslahenduse puhul. Võrreldes referentsjuhuga langeb ainult seinasoojustust kasutades üldine pale pinnatemperatuur, ning teataval määral ka nurga temperatuurindeks (kuid ei lange alla piirväärtuse 0.65). Kuna suureneb soojusvoog läbi aknapale ning saavutatav energiakadude vähenemine pole maksimaalne.

Kui soojustada ka aknapale, siis selgub, et saavutatakse küll energiasääst, aga palesoojustusel on oluline mõju akna- ja palenurga pinnatemperatuuridele. Täpsemalt kujutab tekkivat olukorda Joonis 27 – nii 12.5 kui 20mm XPS soojustuse puhul on temperatuurindeks alla hallituse vältimise minimaalset piirväärtust 0.65. Kokkuvõtlikult annab nende juhtude kohta arvutustulemused Tabel 3.



Joonis 25 Vasakul: isothermid aknasõlmes soojustamata aknapale ja 50mm Multipor seinasoojustuse puhul. Sisepinnatakistus $R_{si}=0.25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{K/W}$. Paremal: isothermid aknasõlmes 12.5mm XPS soojustusega aknapale ja 50mm Multipor seinasoojustuse puhul. Sisepinnatakistus $R_{si}=0.25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{K/W}$.

Võimaliku lahendusena on vaadeldud ka 120mm-paksuse puidust aknaraami mõju samade lahenduste puhul (vt Tabel 4). Võrreldes 68mm raamiga arvutatutest on mõnevõrra vähenenud soojuskaod. Temperatuurindeks on sel juhul akna- ja palenurgas kõrgem ning ületab tinglikku olemasolevat olukorda ka soojustatud juhul. Nii 12.5mm kui 20mm paksuse XPS palesoojustuse puhul on temperatuurindeks 0.69 (üle hallituse vältimise piiri $f_{Rsi}=0.65$).



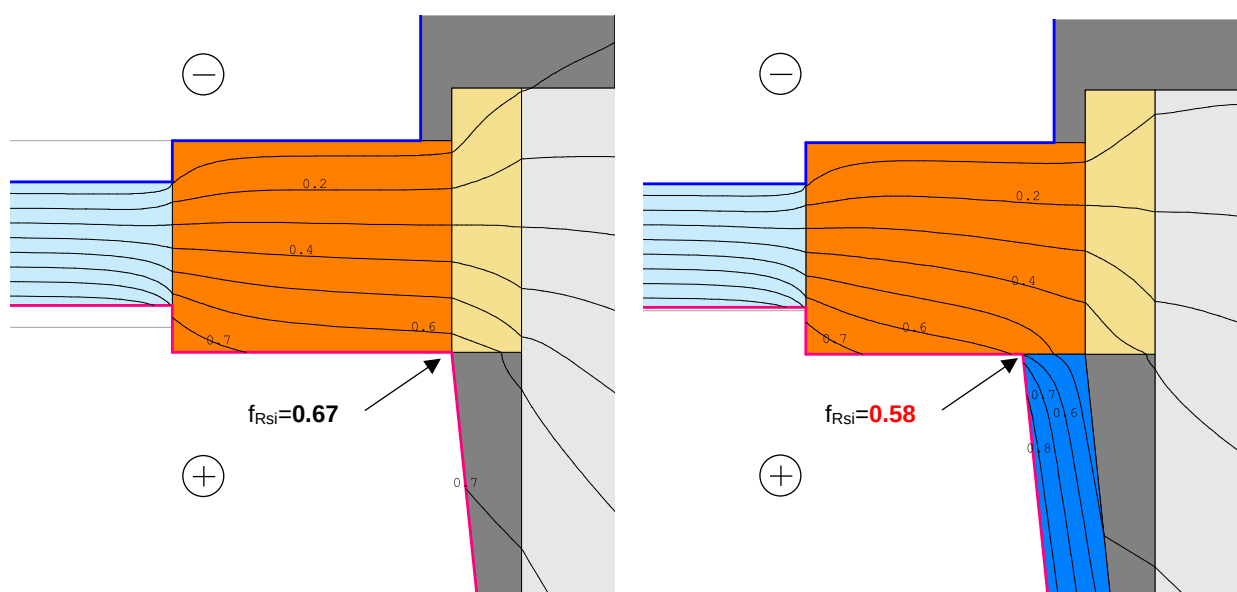
Joonis 26 Vasakul: isothermid aknasõlmes 20mm XPS soojustusega aknapale ja 50mm Multipor seinasoojustuse puhul. Sisepinnatakistus $R_{si}=0.25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{K/W}$. Paremal: isothermid radiaatoriniši sõlmes 50mm Multipor soojustuse puhul. Sisepinnatakistus $R_{si}=0.25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{K/W}$.

Tabel 3 Soojustuslahenduste arvatud mõju akna ja akendevahelise osa horisontaalsõlme temperatuuriindeksitele ja soojuslähivusele, elemendi pikkus 1561mm.

		Referentsmodel (aknaraam t=68mm)		50mm Multipor seinal		50mm Multipor seinal, 12.5mm XPS palel		50mm Multipor seinal, 20mm XPS palel	
Sisepinna soojustakistus R_{si} , $m^2 \cdot ^\circ K/W$		0.25	0.125	0.25	0.125	0.25	0.125	0.25	0.125
Temperatuuri- indeks f_{Rsi} , -	seinal (r/b post)	0.78	0.87	0.90	0.95	0.90	0.95	0.90	0.95
	pale-akna nurgas	0.67	0.78	0.65	0.77	0.59	0.71	0.58	0.70
Elemendi soojusjuhtivus L_{2D} , $W/(m \cdot ^\circ K)$			1.33		1.11		1.02		0.99
Soojusjuhtivuse muutus võrreldes referentsjuhuga, %					-17		-23		-26

Tabel 4 Soojustuslahenduste arvatud mõju akna ja akendevahelise osa horisontaalsõlme temperatuuriindeksitele ja soojuslähivusele, 120mm-paksune aknaraam, elemendi pikkus 1561mm.

		Referentsmodel (aknaraam t=120mm)		50mm Multipor seinal		50mm Multipor seinal, 12.5mm XPS palel		50mm Multipor seinal, 20mm XPS palel	
Sisepinna soojustakistus R_{si} , $m^2 \cdot ^\circ K/W$		0.25	0.125	0.25	0.125	0.25	0.125	0.25	0.125
Temperatuuri- indeks f_{Rsi} , -	seinal (r/b post)	0.78	0.87	0.90	0.95	0.90	0.95	0.90	0.95
	pale-akna nurgas	0.74	0.84	0.72	0.81	0.69	0.78	0.69	0.78
Elemendi soojusjuhtivus L_{2D} , $W/(m \cdot ^\circ K)$			1.25		1.02		0.95		0.93
Soojusjuhtivuse muutus võrreldes 68mm referentsjuhuga, %			-6		-23		-28		-30



Joonis 27 Vasakul: isotermid soojustamata aknapalega sõlmes. Sisepinnatakistus $R_{si}=0.25 m^2 \cdot ^\circ K/W$. Paremal: isotermid 20mm XPS soojustusega aknapalega sõlmes. Temperatuuriindeks avatäite nurgas on võrreldes soojustamata juhuga oluliselt langenud. Sisepinnatakistus $R_{si}=0.25 m^2 \cdot ^\circ K/W$.

Tabel 5 annab **radiaatoriniši** erinevate soojustuslahenduste arvutustulemused. Olukord on radiaatorinišis sarnane aknasõlmele – ka siin langevad seina soojustamisel pale pinnatemperatuur ja temperatuuriindeks ning tõuseb soojusvoog läbi selle pinna. Arvestades, et olemasoleval nišiseinal on ka puitkiudplaat, siis selle taga on temperatuuriindeks veelgi madalam. Teisalt, kuna tegemist on radiaatorinišiga ning radiaator tõstab piirete temperatuuri niigi (mida arvutused hetkel arvesse ei võtnud), siis on sõlm siiski soodsamas olukorras.

Radiaatoriniši tervikliku soojustamise puhul langeb oluliselt soojusvoog terves lõikes (ühtlaste temperatuuride puhul umbes poole võrra) ning arvestades radiaatorist põhjustatud suuremaid temperatuure, siis on sääst veelgi suurem. Joonis 26 paremal näitlikustab radiaatoriniši horisontaalsõlme isoterme täieliku soojustuslahenduse korral.

Tabel 5 Soojustuslahenduste arvutuslik mõju karkassiposti ja radiaatoriniši horisontaalsõlme temperatuuriindeksitele ja soojuslähivustele, elemendi pikkus 1560mm.

		Referentsmodel		50mm Multipor sein		50mm Multipor sein ja palel		50mm Multipor sein, palel ja nišis	
Sisepinna soojustakistus R_{si} , $m^2 \cdot ^\circ K/W$		0.25	0.125	0.25	0.125	0.25	0.125	0.25	0.125
Temperatuuri-indeks f_{Rsi}, -	seinal (r/b post)	0.77	0.86	0.90	0.95	0.90	0.94	0.89	0.94
	pale-niši nurgas	0.74	0.83	0.69	0.79	0.73	0.83	0.81	0.88
Elemendi soojusjuhtivus L_{2D}, $W/(m \cdot ^\circ K)$			1.45		1.20		1.12		0.74
Soojusjuhtivuse vähenemine võrreldes referentsjuhuga, %					-17		-23		-49

5.2. Soojus- ja niiskustehniliste arvutusmodelite kalibreerimine

5.2.1. Kalibreerimisprotsessi käik

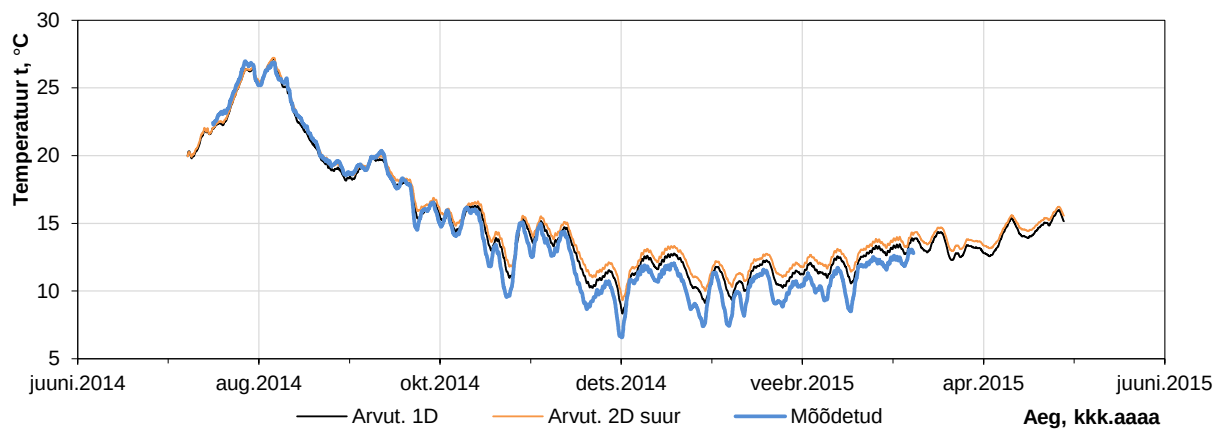
Kuna olemasoleva seina materjalide kohta ei olnud nende soojus- ja niiskustehnilised omadused täpselt teada, katsetati arvutusmodelites programmi Delphin andmebaasist pärinevaid materjale. Erinevate materjalidega arvutatud tulemusi võrreldi seinas mõõdetud andmetega ning vajadusel valiti teine materjal või muudeti usutavuse piires nende omadusi. Muutmise aluseks oli proovikehade tihedus ning andmebaasist leitud sarnaste tihedustega materjalide omaduste interpoleerimine. Olemasoleva müüritise poorbetooni kirjeldava materjali aluseks jäi materjal „Lightweight Concrete“, mida muudeti materjalide „Blast furnace slag concrete“ alusel.

5.2.2. Akendevaheline poorbetoonsein

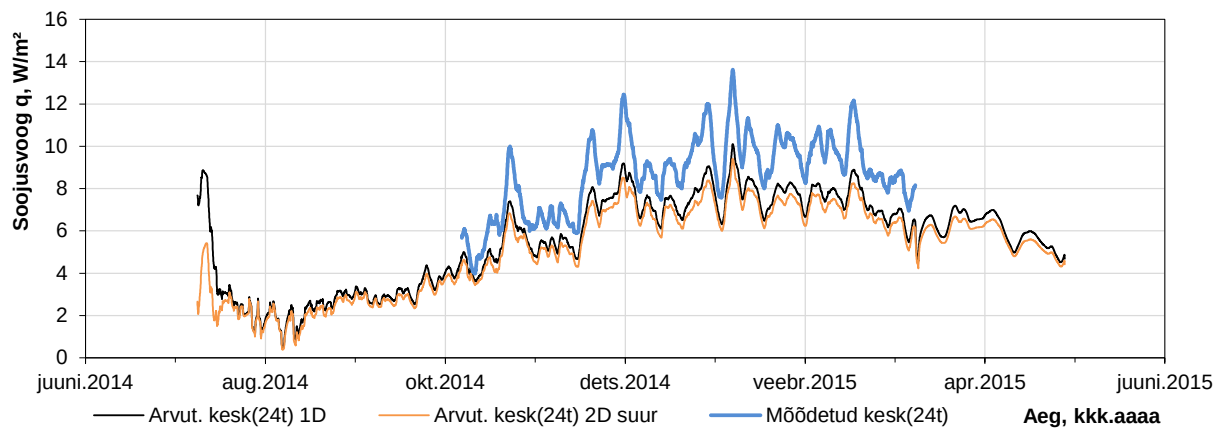
Soojustuse ja esialgse müüritise vahel (andurid TRH3 ja SVP1)

Akendevahelise osa poorbetoonmüüritise soojus- ja niiskusežiimi modelleerimise täpsust kujutavad Joonis 28 kuni Joonis 31, mis annavad kalibreerimise aluseks olnud mõõdetud suurused ja vastavates punktides simuleeritud tulemused. On näha, et kasutades lõplikult valitud materjaliomadusi, pole 1D (Joonis 9) ja suurel 2D mudelil (Joonis 12) olulist vahet ning 1-dimensiooniline mudel suudab peale kõiki muid suurusi peale suhtelise niiskuse (milles summeeruvad temperatuuri ja suhtelise niiskuse arvutustel tehtud vead) isegi mõnevõrra täpsemalt modelleerida. Soojusvoogude osas on mõlemal mudelil puudujääke, mis võib olla tingitud materjaliomaduste ebatäpsusest ja õhkvahe oleva õhu ventileerumisest välisõhuga või korrustevahelisest ringlusest.

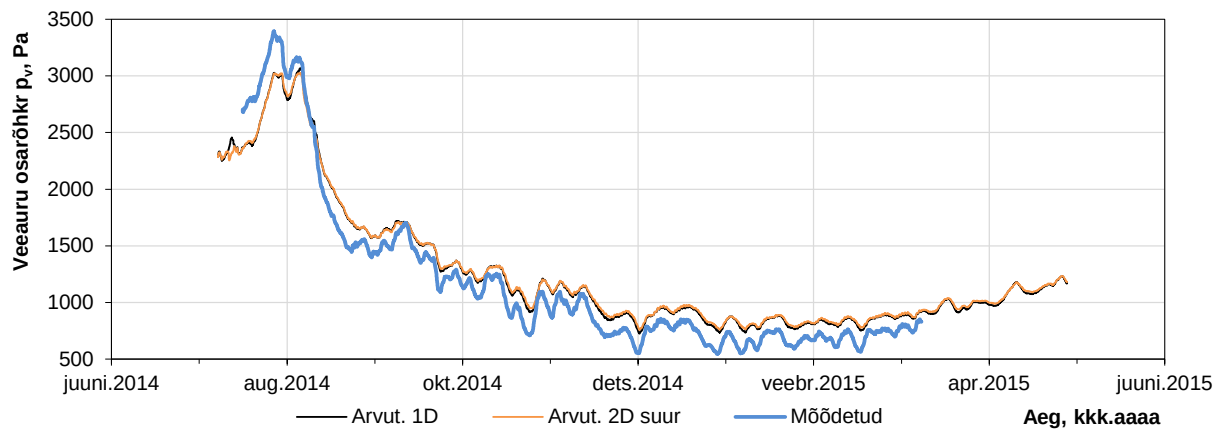
Soojustusmaterjali toimivuse kriteeriume arvestades on arvutusmodelid temperatuuride osas tagavara kahjuks (1D mudeli puhul $\sim 2^\circ C$ ja suure 2D mudeli puhul $\sim 3^\circ C$) ning suhtelisi niiskusi vaadeldes tagavara kasuks.



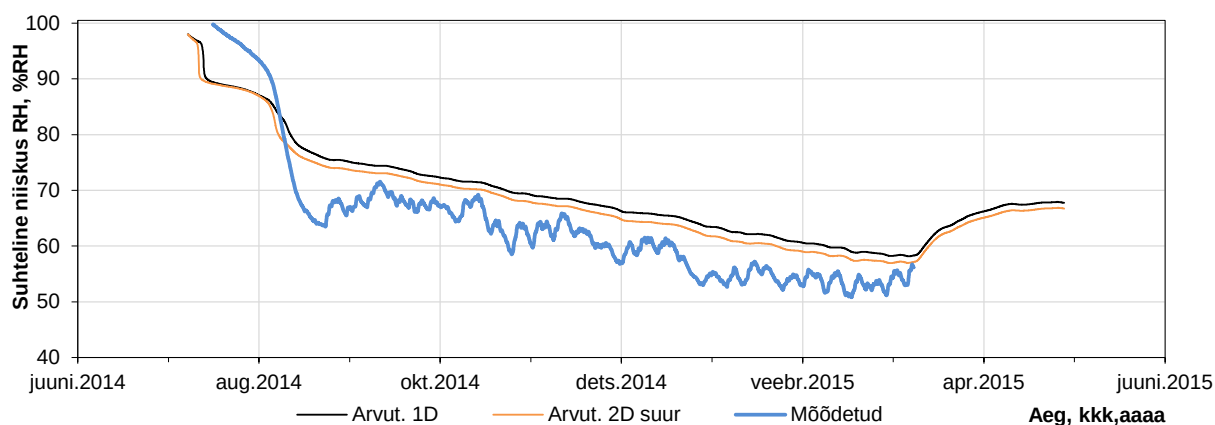
Joonis 28 Mõõdetud (TRH3) ja simuleeritud temperatuurid lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni ja lisasoojustuse vahel.



Joonis 29 Mõõdetud (SVP1) ja simuleeritud 24 tunni keskmised soojusvood lisasoojustatud akendevahelises poorbetoonilõigus tarindi sisepinnal.



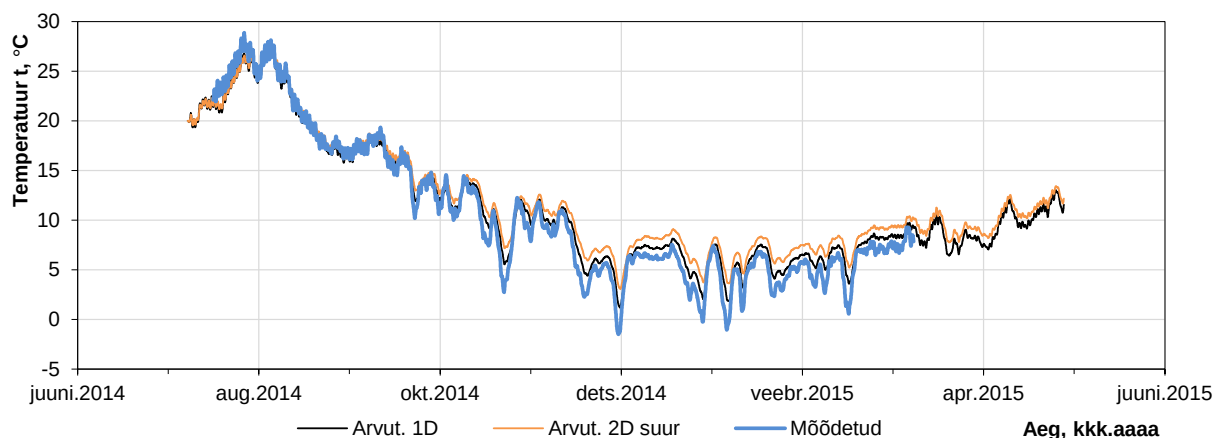
Joonis 30 Mõõdetud (TRH3) ja simuleeritud veeauru osarõhud lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni ja soojustuse vahel.



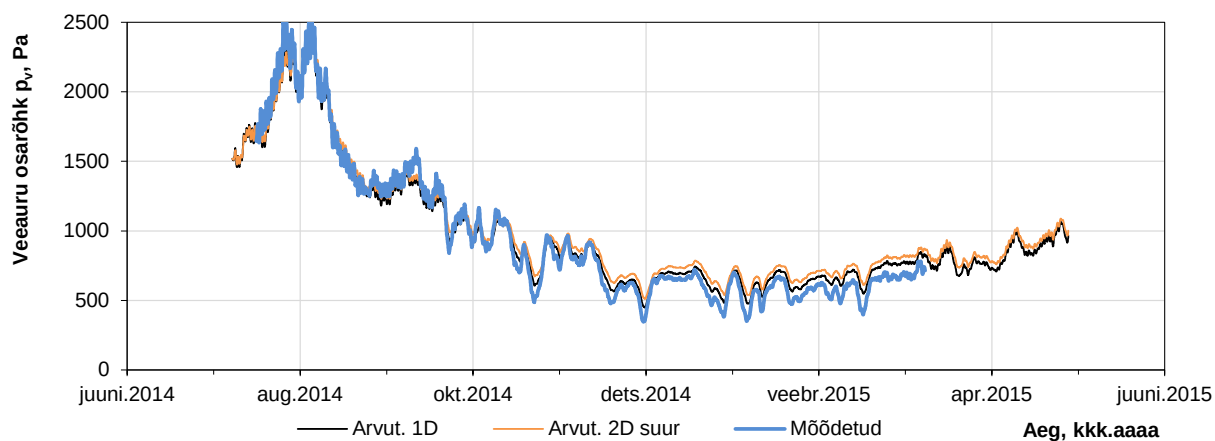
Joonis 31 Mõõdetud (TRH3) ja simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed akendevahelise poorbetooni ja lisasoojustuse vahel.

Soojustatud seina poorbetoonmüüritise väliskiht (andur TRH7)

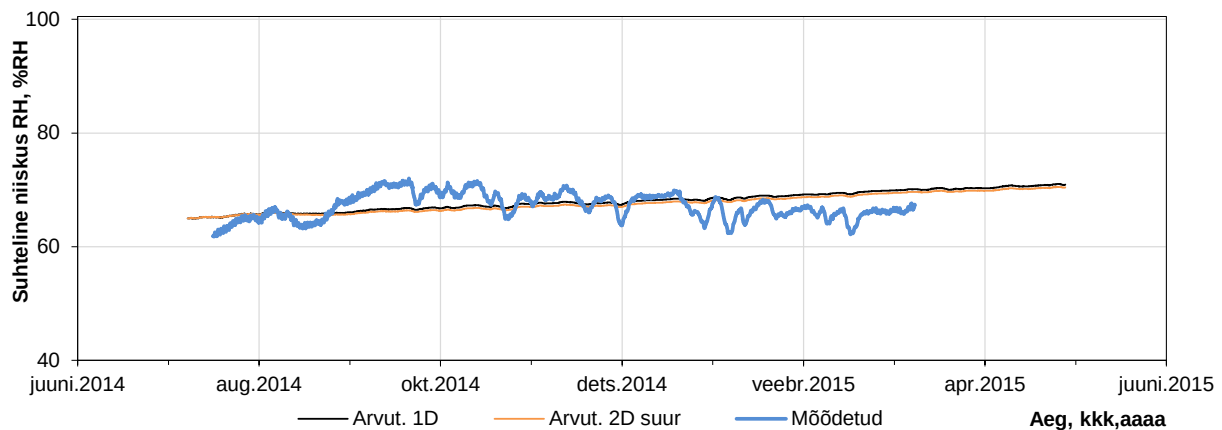
Esialgse seina poorbetoonmüüritise väliskihis asuva anduri TRH7 põhjal saab anda hinnagu 1D (Joonis 9) ja suure 2D mudeli (Joonis 12) selle punkti modelleerimise täpsusele. Rahuldavad tulemused on saavutatud nii 1D kui suure 2D mudeliga. Soojustusmaterjali toimivuse kriteeriume arvestades on arvutusmudelid temperatuuride osas tagavara kahjuks (1D mudeli puhul $\sim 3^{\circ}\text{C}$ ja suure 2D mudeli puhul $\sim 5^{\circ}\text{C}$) ning suhtelisi niiskusi vaadeldes tagavara kasuks.



Joonis 32 Mõõdetud (TRH7) ja simuleeritud temperatuurid lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni väliskihis.



Joonis 33 Mõõdetud (TRH7) ja simuleeritud veeauru osarõhud lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni väliskihis.

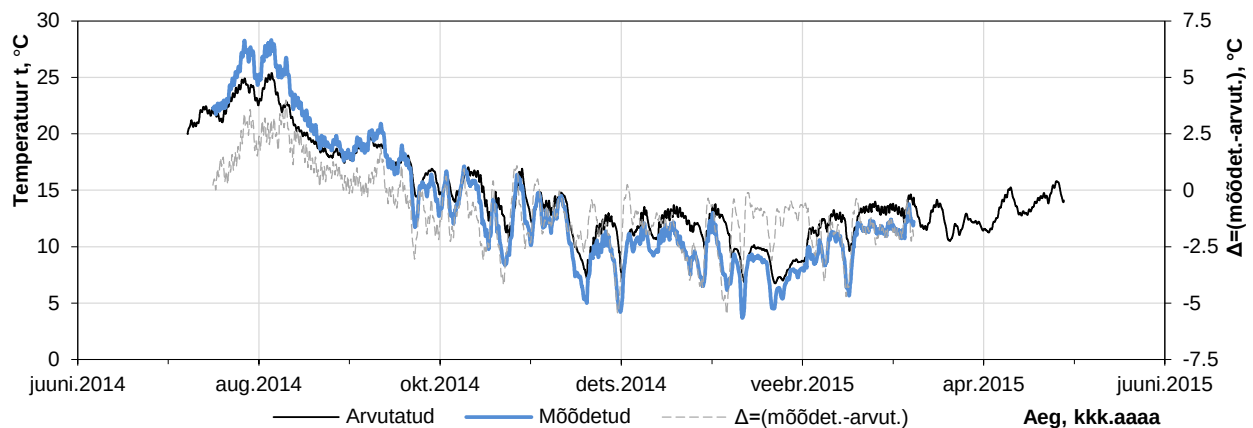


Joonis 34 Mõõdetud (TRH7) ja simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni väliskihis.

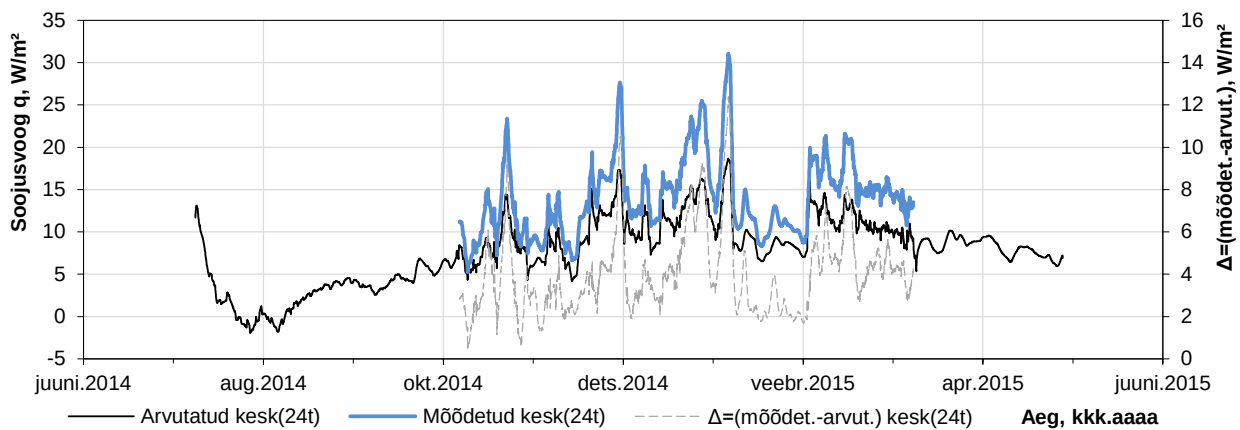
5.2.3. 1D radiaatorinišš (andurid TRH5 ja SVP2)

Radiaatoriniši soojustuse taga asuva anduri TRH5 ja seina sisepinnal asuva soojusvooplaadi SVP2 põhjal saab hinnata simuleeritud 1D radiaatoriniši arvutusmodeli (Joonis 10) täpsust. Joonis 35 kuni Joonis 38 annavad arvutatud ja mõõdetud tulemused. Mõõdetud temperatuurid soojustuse taga on madalamad ja soojusvood seina sisepinnal on suuremad kui arvutusmodeli järgi arvutatult. See võib vihjata nii ebatäpsetele materjaliandmetele kui fassaaditellise ja poorbetoonmüüritise vahelises õhkvahe toimuvatele õhuringlustele. Viimast võimendavad tõenäoliselt ka radiaatorist ja õhemast müüritisest tingitud kõrgemad temperatuurid poorbetooni välispinnal.

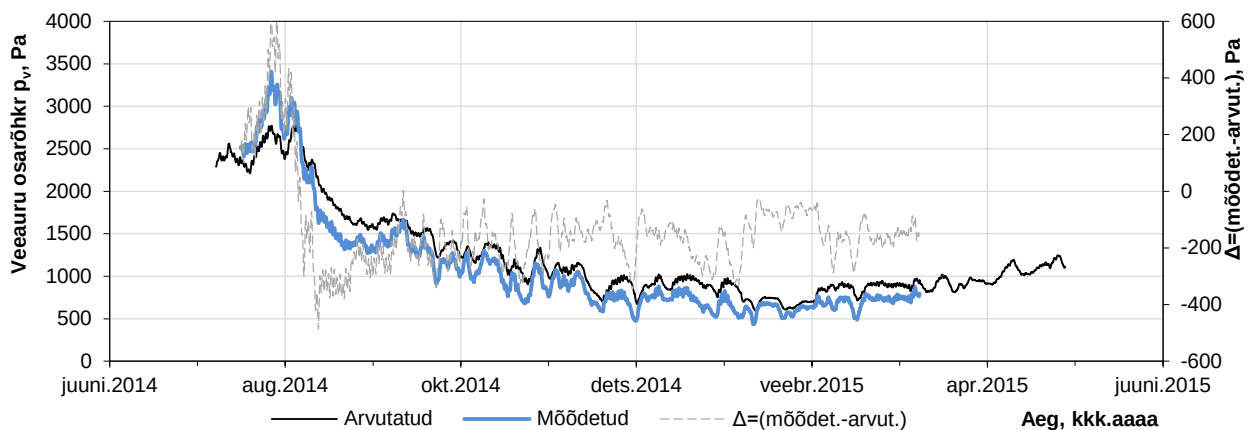
Soojustusmaterjali toimivuse kriteeriume arvestades on arvutusmodel temperatuuride osas tagavara kahjuks ($\sim 3^{\circ}\text{C}$) ning suhtelisi niiskusi vaadeldes tagavara kasuks.



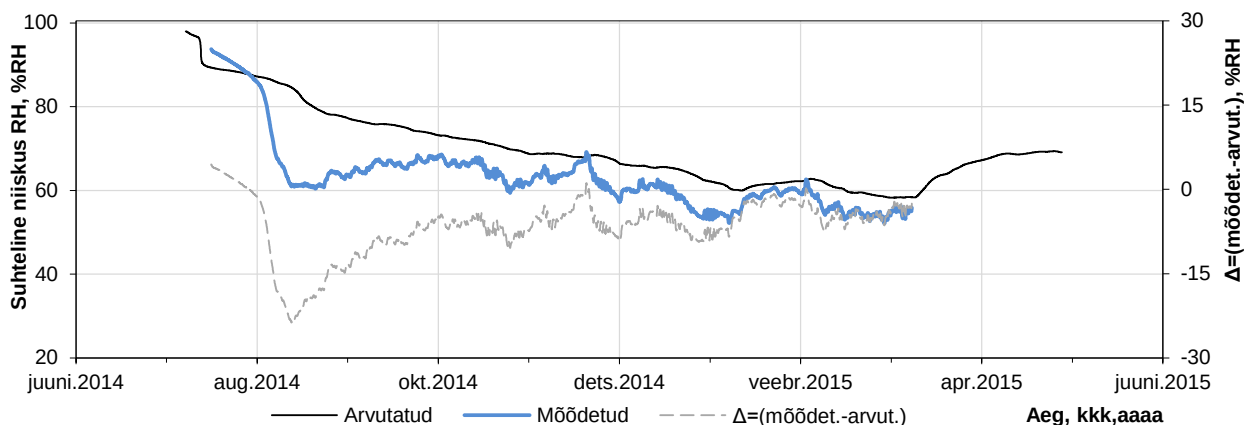
Joonis 35 Mõõdetud (TRH5) ja simuleeritud temperatuurid lisasoojustatud radiaatorinišis poorbetooni ja lisasoojustuse vahel.



Joonis 36 Mõõdetud (SVP2) ja simuleeritud 24 tunni keskmised soojusvood lisasoojustatud radiaatorinišis tarindi sisepinnal.



Joonis 37 Mõõdetud (TRH5) ja simuleeritud veeauu osarõhud lisasoojustatud radiaatorinišis poorbetooni ja lisasoojustuse vahel.

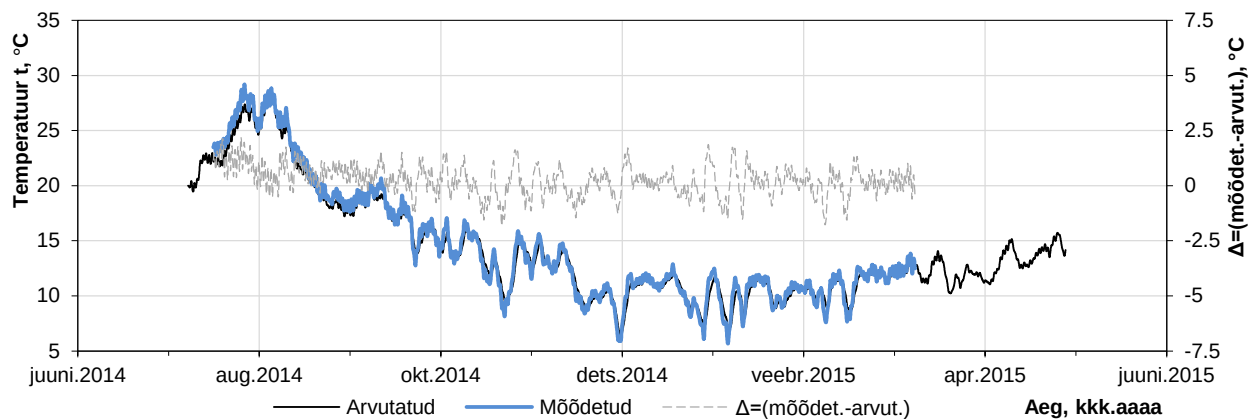


Joonis 38 Mõõdetud (TRH5) ja simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed lisasoojustatud radiaatorinišis poorbetooni ja lisasoojustuse vahel.

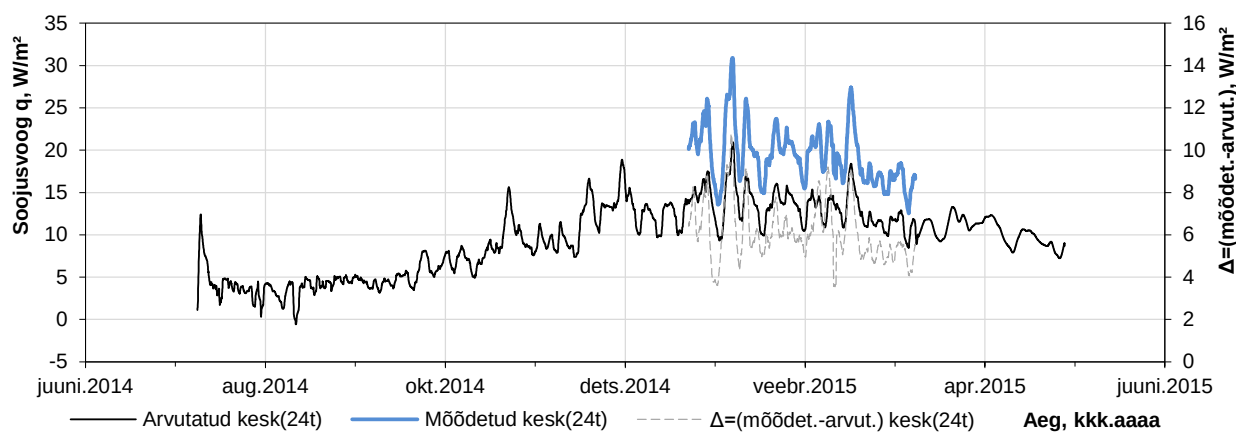
5.2.4. 1D referentsseina müüritise väliskiit

Referentsseina müüritise väliskihis asuva anduri VTRH ja seina sisepinnal asuva soojusvooplaadi VSVP põhjal saab hinnata referentsseina 1D arvutusmudeli (Joonis 11) täpsust. Joonis 39 kuni Joonis 42 annavad arvutatud ja mõõdetud tulemused. Kuigi poorbetooni väliskihis mõõdetud temperatuurid ühtivad üsna hästi arvutustulemustega, on reaalsed soojusvood arvutatutest kõrgemad. Põhjuseks võivad taas olla nii ebatäpsed materjaliandmed kui fassaaditellise ja poorbetoonmüüritise vahelises õhkvahe toimuvad õhuringlused. Et arvutatud veeauu osarõhud on reaalistest kõrgemad, siis võib arvata, et toimub õhkvahe

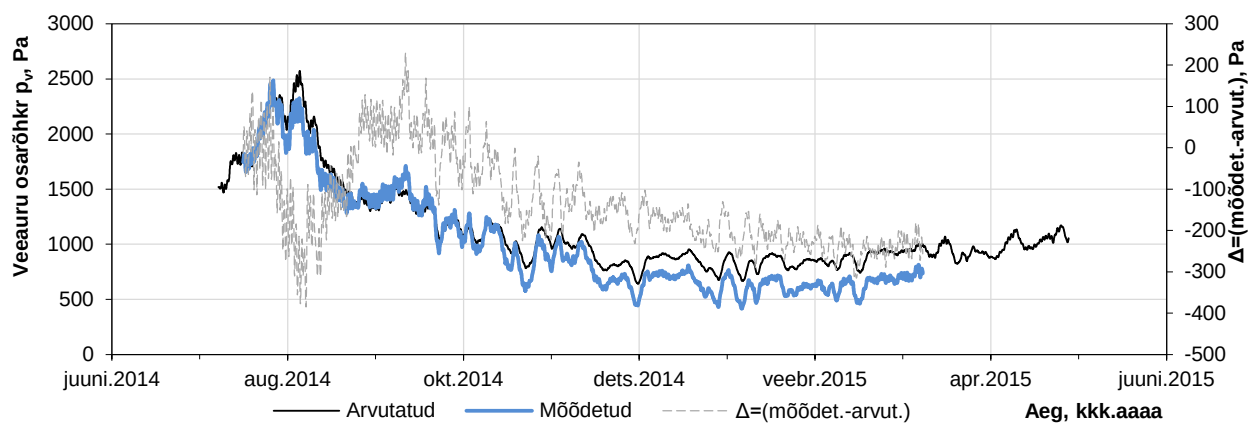
ventileerumine kuivema välisõhuga. Viga veeauru osarõhkude leidmisel mõjutab ka otseselt suhtelise niiskuse arvutustulemust.



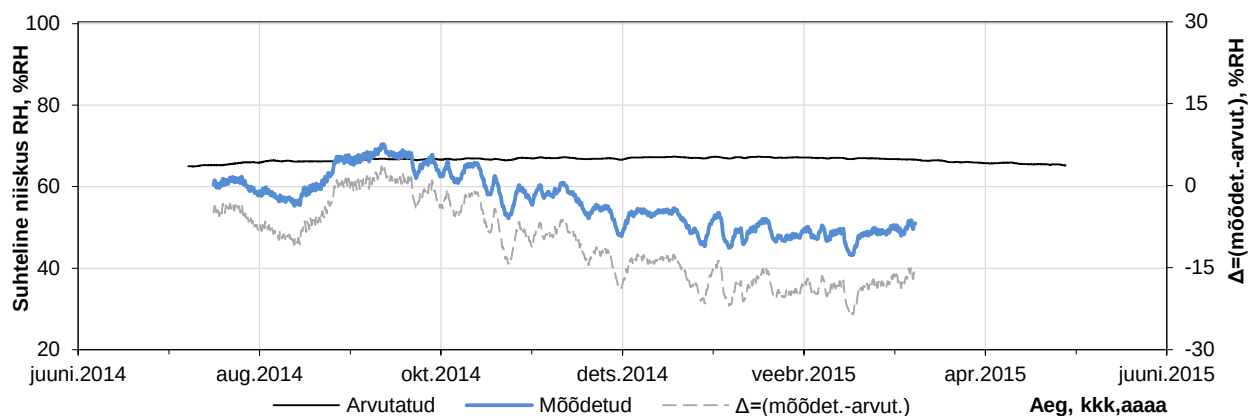
Joonis 39 Mõõdetud (VTRH) ja simuleeritud temperatuurid soojustamata akendevahelise poorbetooni väliskihis.



Joonis 40 Mõõdetud (VSVP) ja simuleeritud 24 tunni keskmised soojusvood soojustamata akendevahelises poorbetoonilõigus tarindi sisepinnal.



Joonis 41 Mõõdetud (VTRH) ja simuleeritud veeauru osarõhud lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni väliskihis.



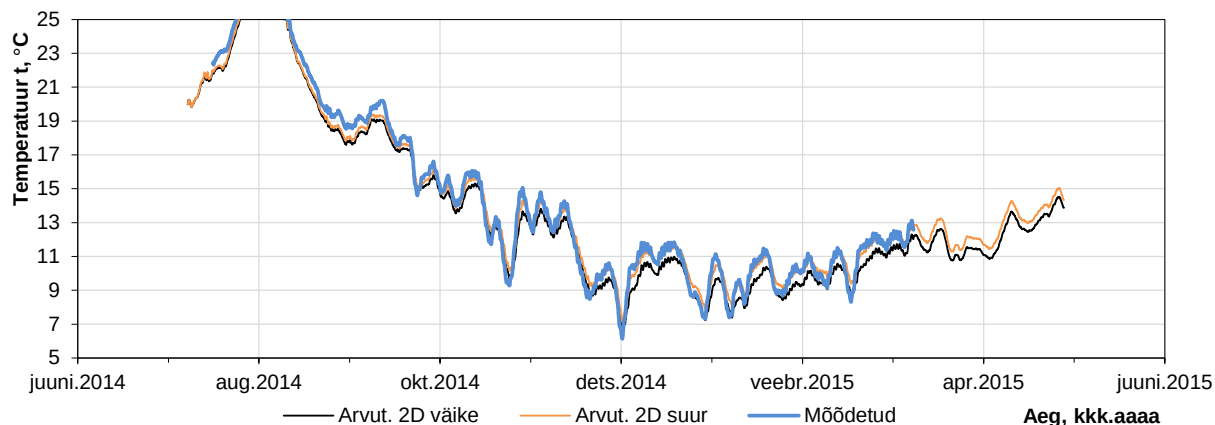
Joonis 42 Mõõdetud (VTRH) ja simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed lisasoojustatud akendevahelise poorbetooni väliskihis.

5.2.5. 2D akendevaheline seinasõlm

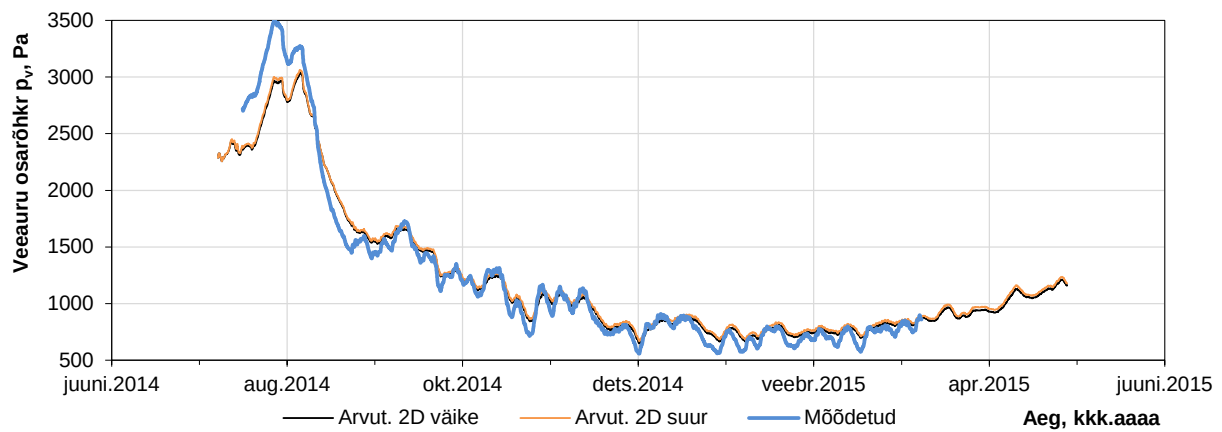
Poorbetooni ja r/b karkassiposti liide (andur TRH1)

Anduri TRH1 alusel kalibreeriti arvutusmodelite karkassiposti ja poorbetoonmüüritise liitekoht. Joonis 43 kuni Joonis 45 annavad nii mõõdetud kui arvutatud tulemused. Suure 2D mudeli arvutustulemuste korrelatsioon mõõtmistulemustega on parem kui lihtsustatud 2D mudeli puhul nii temperatuuride, veeauru osarõhkude kui suhteliste niiskuste puhul. Üldiselt on mõõtmis- ja arvutustulemuste kokkulangevus mõlema mudeli puhul hea.

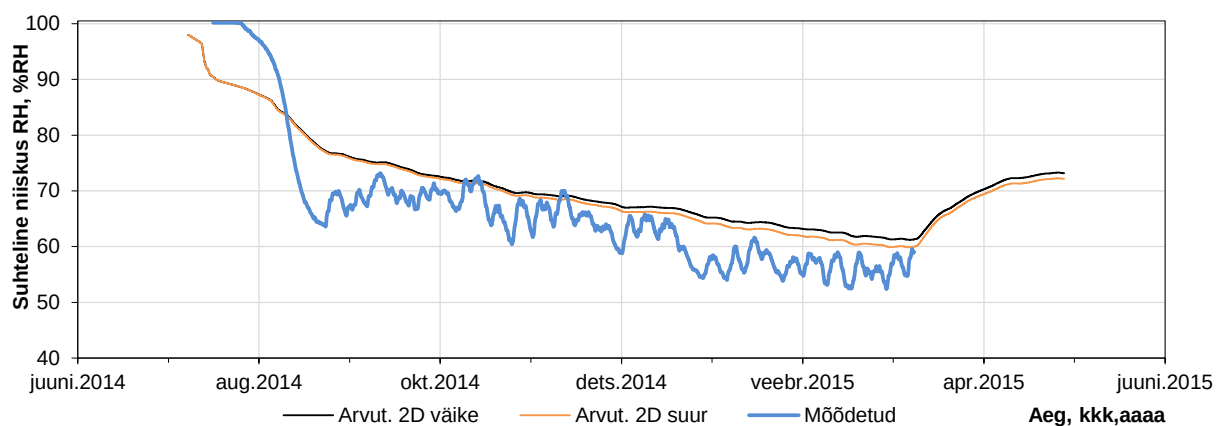
Mõlema arvutusmudeli puhul on arvutatud temperatuur madalam ning veeauru osarõhk ja suhteline niiskus kõrgemad kui mõõdetud – vead on tagavara kasuks.



Joonis 43 Mõõdetud (TRH1) ja simuleeritud temperatuurid lisasoojustatud r/b karkassiposti ja poorbetooni liites lisasoojustuse ja ol.ol. tarindi vahel.



Joonis 44 Mõõdetud (TRH1) ja simuleeritud veeauru osarõhud lisasoojustatud r/b karkassiposti ja poorbetooni liites lisasoojustuse ja ol.ol. tarindi vahel.

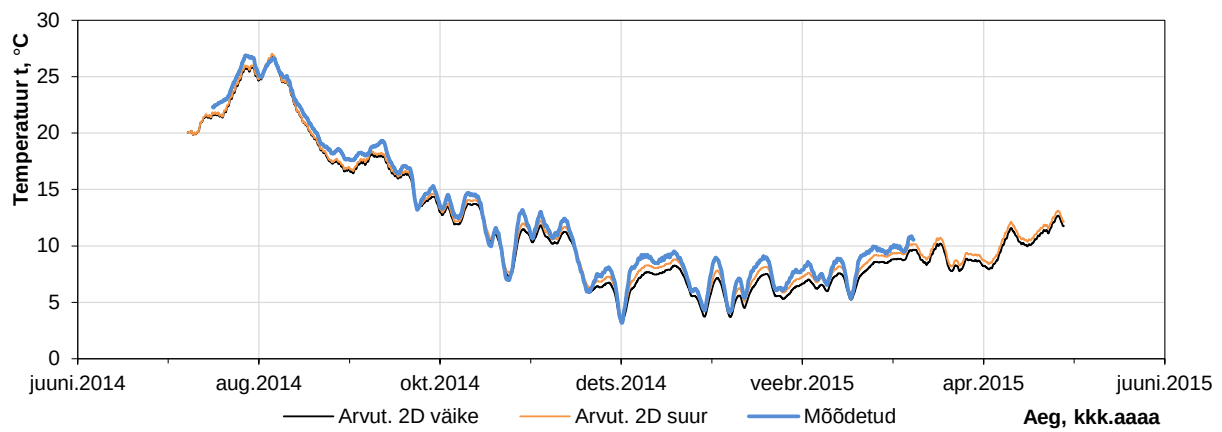


Joonis 45 Mõõdetud (TRH1) ja simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed lisasoojustatud r/b karkassiposti ja poorbetooni liites lisasoojustuse ja ol.ol. tarindi vahel.

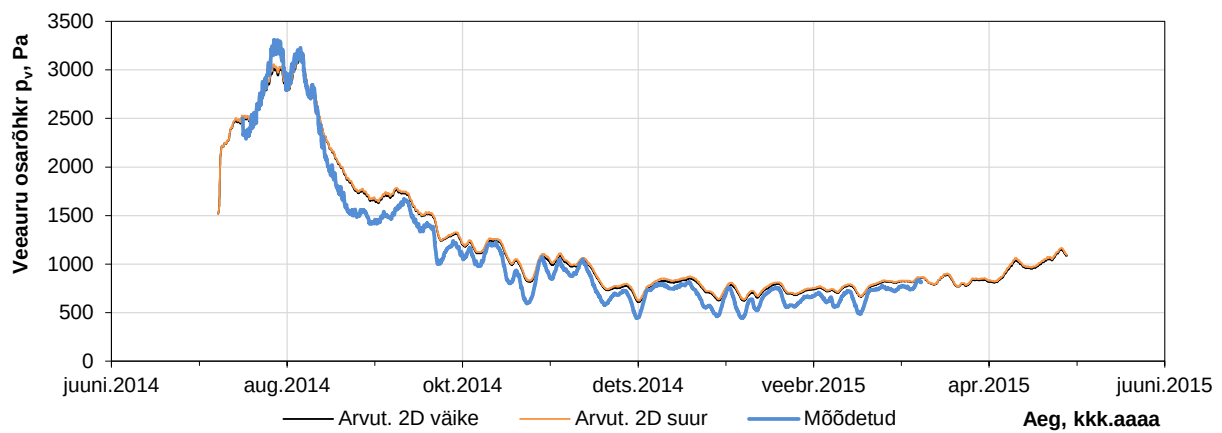
R/b karkassiposti pinnal ol.ol. korksoojustuse taga (andur TRH2)

Anduri TRH2 alusel kalibreeriti arvutusmodelid korksoojustuse karkassipostipoolses kihis. Joonis 46 kuni Joonis 48 annavad nii mõõdetud kui arvutatud tulemused. Suure 2D mudeli arvutustulemuste korrelatsioon mõõtmistulemustega on parem kui lihtsustatud 2D mudeli eelkõige temperatuuride osas. Kuna korksoojustuse niiskuslike omaduste kohta on andmed väga puudulikud, siis veeauru osarõhkude ja suhtelise niiskuse arvutustulemused ülehindavad niiskustasemeid.

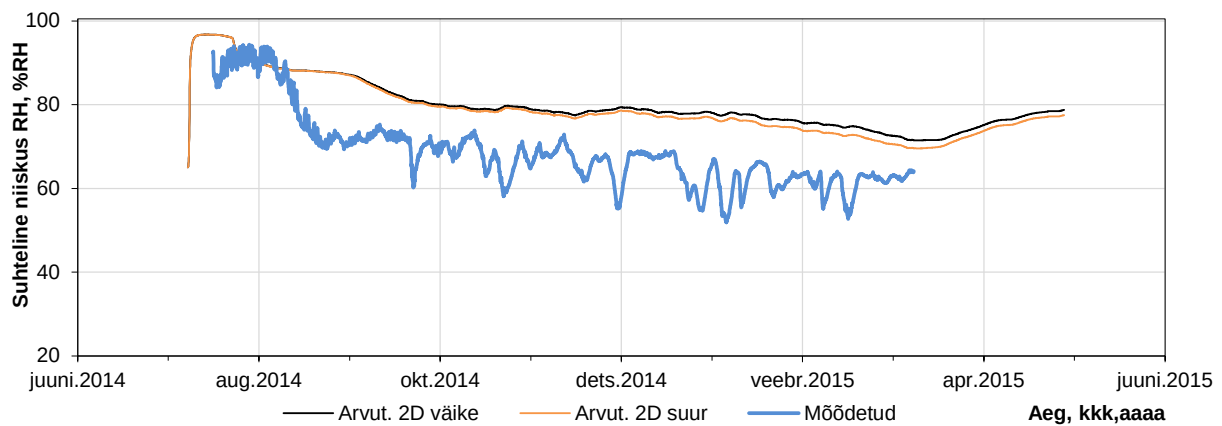
Mõlema arvutusmudeli puhul on arvutatud temperatuur madalam ning veeauru osarõhk ja suhteline niiskus kõrgemad kui mõõdetud – vead on tagavara kasuks.



Joonis 46 Mõõdetud (TRH2) ja simuleeritud temperatuurid lisasoojustatud r/b karkassiposti ja poorbetooni liites lisasoojustuse ja ol.ol. tarindi vahel.



Joonis 47 Mõõdetud (TRH2) ja simuleeritud veeauru osarõhud lisasoojustatud r/b karkassiposti ja poorbetooni liites lisasoojustuse ja ol.ol. tarindi vahel.



Joonis 48 Mõõdetud (TRH2) ja simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed lisasoojustatud r/b karkassiposti ja poorbetooni liites lisasoojustuse ja ol.ol. tarindi vahel.

5.3. Arvutused niiskustehniliste testaastatega

5.3.1. Üldist

Arvutusmodelite kalibreerimise alusel valiti niiskustehniliste testaastatega modelleerimiseks 1D akendevahelise osa soojustatud poorbetoonilõik (Joonis 9), 1D võrdlusseina mudel (Joonis 11) ning arvutuskirjuse huvides lihtsustatud 2D mudel (Joonis 13). Tulemused näitavad, milliseks oleks arvutusmodelitekohaselt osutunud välikatses mõõdetud punktides temperatuurid ja suhtelise niiskuse tasemed kliimaatiliselt kriitilisematel testaastatel.

Arvutustes korraldati testaastate kliimat 5 korda, neist kriitilisimaiks osutus viimane ehk 5. aasta ning need tulemused on järgnevas jaotises ka esitatud.

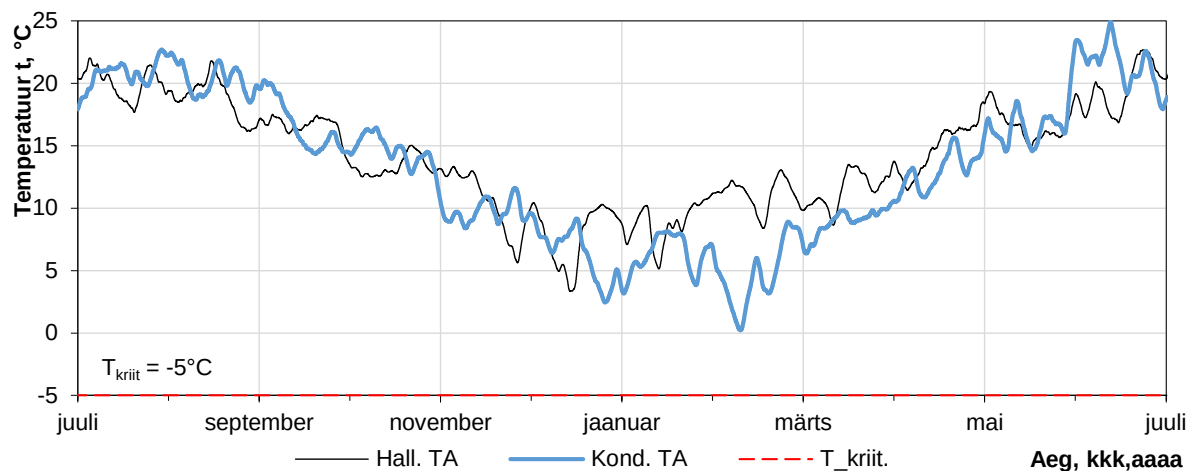
5.3.2. 1D akendevaheline poorbetoonsein

Joonis 49 annab akendevahelise poorbetoonseina soojustuse taga arvutatud temperatuurid. Madalaim temperatuur esines kondensaadi testaastal (0.2°C). Arvestades, et kalibreerimisel tehti viga $\sim 3^{\circ}\text{C}$ tagavara kahjuks, siis mõlemal juhul oli jäätumise vältimise kriteerium ($t \geq -5^{\circ}\text{C}$) siiski rahuldatud.

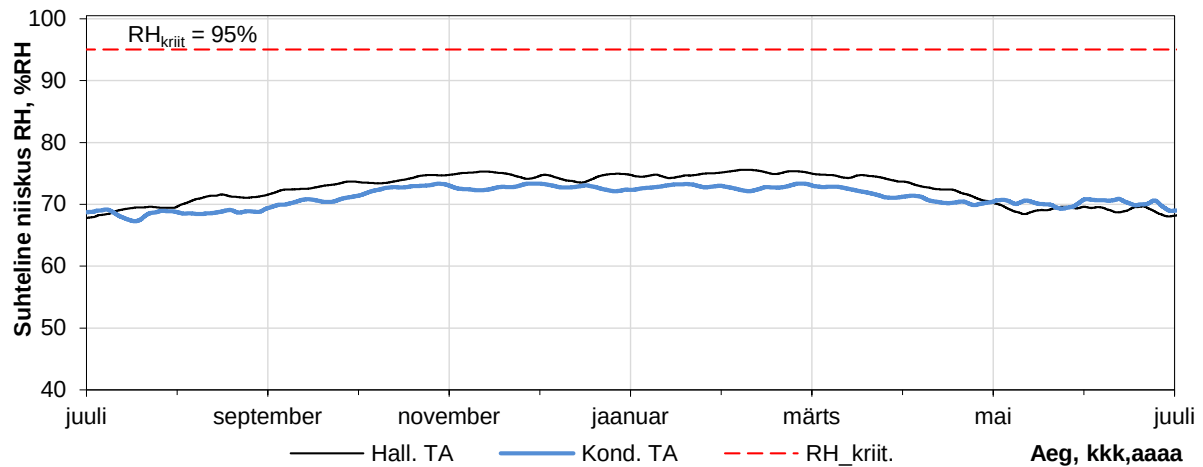
Suhtelised niiskused (Joonis 50) olid mõlemal testaastal madalad (maksimaalne $75.6\%_{\text{RH}}$ esines hallituse testaastal). Kalibreerimisel tehtud viga oli tagavara kasuks ning kondensaadi vältimise kriteeriumi ($95\%_{\text{RH}}$) ei ületatud.

Joonis 51 kujutab esialgse seina niiskussisaldust (1m^2 seinapinna kohta). Kuna soojustatud seina temperatuur on võrdlusseinast mõnevõrra madalam, siis on ka selle niiskussisaldus $\sim 4\text{kg/m}^2$ kõrgem.

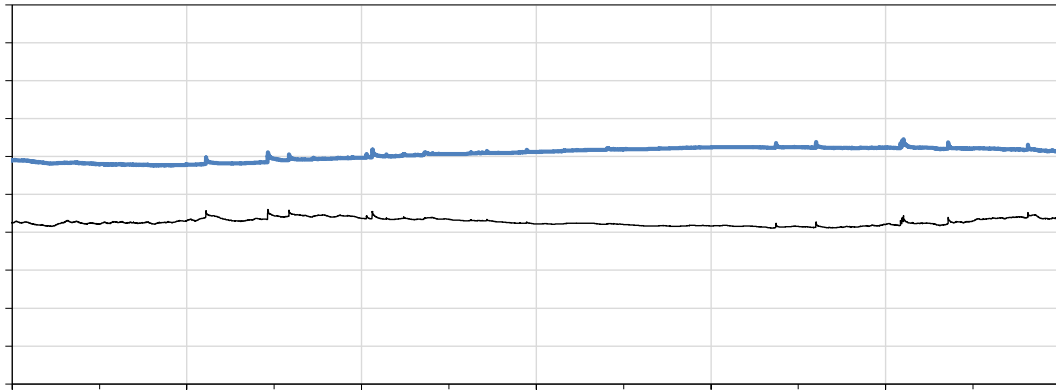
Eelnevale tuginedes võib väita, et soojustatud seina toimivus on selles lõikes niiskustehnilise testaastate tingimustes tagatud.



Joonis 49 Simuleeritud temperatuurid poorbetooni ja soojustuse vahel Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (1D akendevahelise osa mudel). $T_{\text{kriit.}} = -5^{\circ}\text{C}$ vastavalt jäätumise vältimise kriteeriumile.



Joonis 50 Simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed poorbetooni ja soojustuse vahel Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (1D akendevahelise osa mudel). $RH_{kriit.} = 95\%_{RH}$ vastavalt kondenseerumise vältimise kriteeriumile.

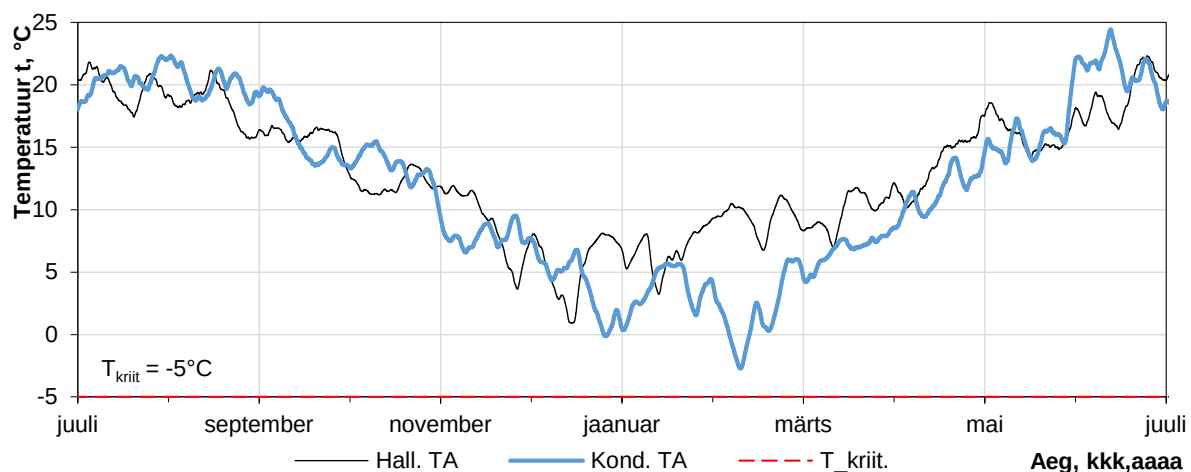


Joonis 51 Simuleeritud esialgse seina summaarne niiskussisaldus $1m^2$ seinapinna kohta Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (1D akendevahelise osa mudel).

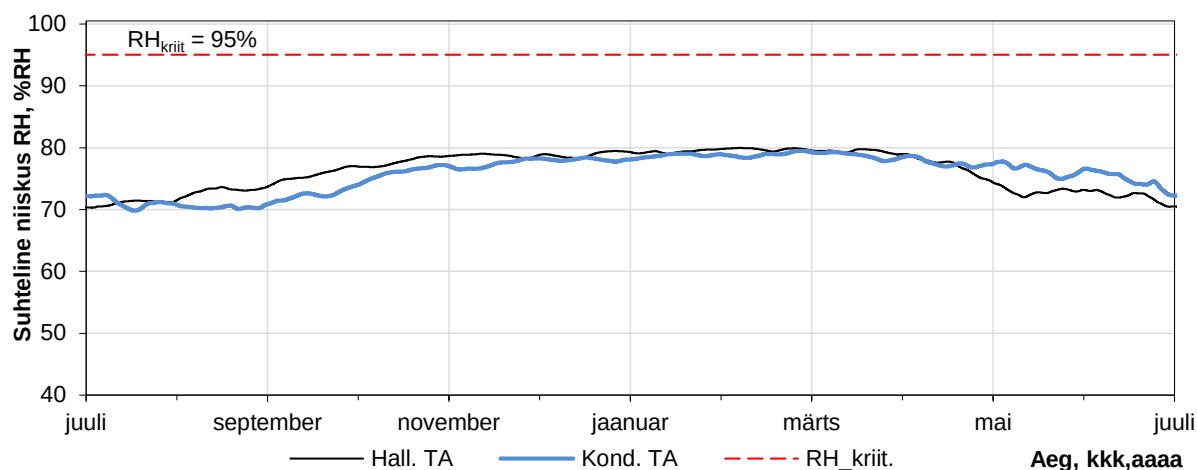
5.3.3. 2D postisõlm

Poorbetooni ja r/b karkassiposti liites soojustuse taga esines madalaim temperatuur ($-2.6^{\circ}C$) samuti kondensaadi testaastal (vt Joonis 52). Arvestades, et kalibreerimisel tehtud viga oli tagavara kasuks, võib nii hallituse kui kondensaadi testaastaga jäätumise vältimise kriteeriumi ($t \geq -5^{\circ}C$) rahuldatuks lugeda.

Samas punktis polnud suhtelise niiskuse maksimumväärtuste osas erinevatel testaastatel olulist vahet (vt Joonis 53). Mõlemal juhul on märgata soojustuseks kasutatud Ytong Multipori kapillaaraktiivsuse ja niiskuspuhverdamise mõju ning esines maksimaalselt $80\%_{RH}$ tase. Arvutused näitavad, et kondensaadi vältimise kriteerium on täidetud.



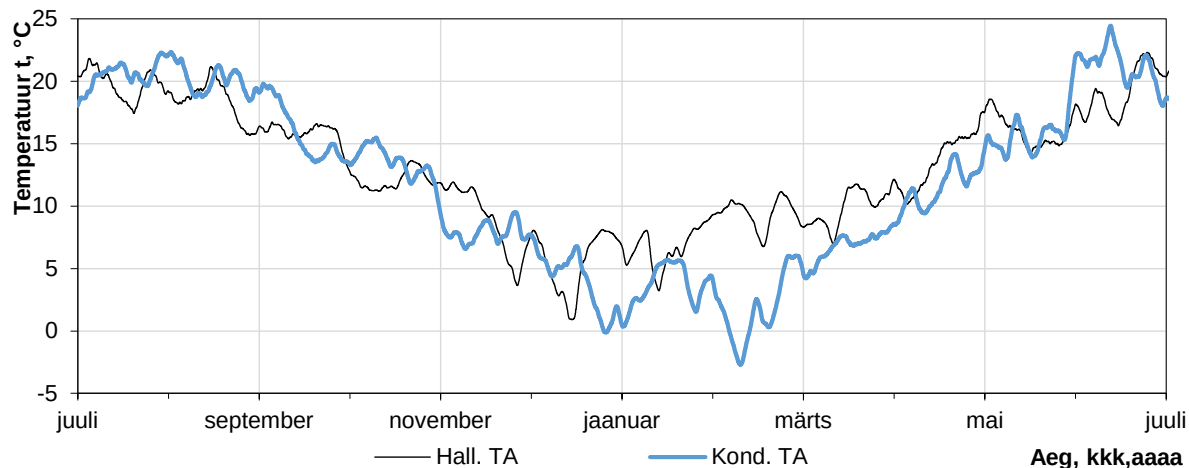
Joonis 52 Simuleeritud temperatuurid poorbetooni ja karkassi liites soojustuse taga Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (lihtsustatud 2D poorbetooni-r/b posti arvutusmodel „2D väike“). $T_{\text{kriit}} = -5^{\circ}\text{C}$ vastavalt jäätumise vältimise kriteeriumile.



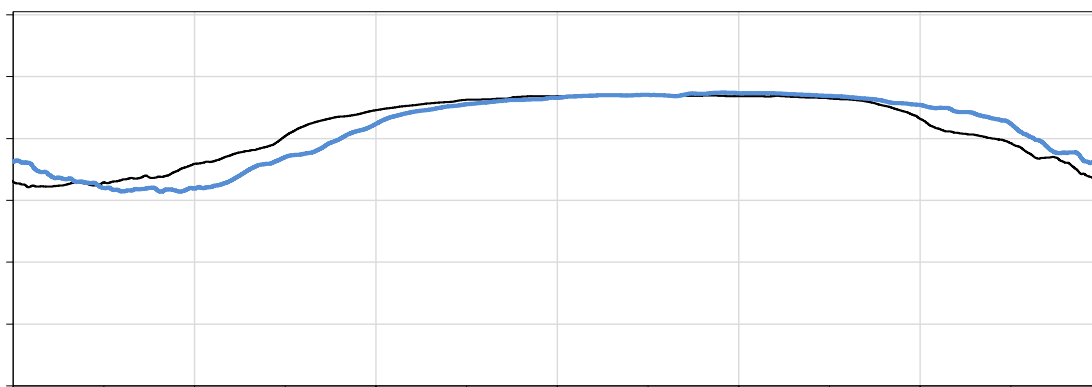
Joonis 53 Simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed poorbetooni ja karkassi liites soojustuse taga Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (lihtsustatud 2D poorbetooni-r/b posti arvutusmodel „2D väike“). $RH_{\text{kriit}} = 95\%_{\text{RH}}$ vastavalt kondenseerumise vältimise kriteeriumile.

R/b karkassiposti ja olemasoleva korksoojustuse vahel esinenud temperatuurid niiskustehniliste testaastate tingimustes annab Joonis 54. Nagu eelnevatelgi punktidel põhjustab siingi miinimumtemperatuuri kondensaadi testaasta, kuid erinevalt eelnevatest juhtudes pole siin jäätumise vältimine oluline (kuna lõikes pole kapilaaraktiivne mõrdiga liimitud soojustus).

Joonis 55 annab korksoojustuse väliskihis esinenud suhtelised niiskused. Kui võrrelda arvutatud väärtusi hallituse vältimise kriteeriumiga, siis selgub, et viimast on ületatud nii kondensaadi kui hallituse testaasta puhul. Kuna korksoojustuse hallitusetundlikkus pole täpselt teada ning mudelite kalibreerimisel selgus, et niiskustasemeid ülehinnatakse, siis ei ole hallituse teke kindel, kuid vajab täiendavat analüüsi.



Joonis 54 Simuleeritud temperatuurid r/b karkassi ja korksoojustuse vahel Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (lihtsustatud 2D poorbetooni-r/b posti arvutusmudel „2D väike“).



Joonis 55 Simuleeritud suhtelise niiskuse tasemed r/b karkassi ja korksoojustuse vahel Eesti niiskustehniliste testaastate tingimustes (lihtsustatud 2D poorbetooni-r/b posti arvutusmudel „2D väike“). $RH_{kriit.} \geq 80\%_{RH}$ vastavalt Viitaneni hallitusmudelile.

6. Tulemuste hindamine

Katseseina mõõtmistulemused

Energeetilisest seisukohast toomis lisasoojustatud tarind hästi – soojustatud seiniosa mõõdetud soojusläbivus langes tänu soojustamisele üle 2 korra ning see loob eeldused saavutamaks energiasäästu.

Mõõteperioodil suvi 2014 ... kevad 2015 olid mõõtetulemused kõigis punktides soojus- ja niiskustehniliselt soodsad. Toimivuskriteeriumite kriitilisi piire ei ületatud üheski mõõtepunktis. Eelnevat toetas kliimaatiliselt erandlik soe talv (minimaalne mõõdetud välistemperatuur oli -11.1°C) ning siseruumide madal niiskuskooormus. Võib eeldada, et võimalikud probleemid lahenduse toimivuses ei pruukinud ilmned.

Soojus- ja niiskustehnilised arvutused

Lisaks võimalusele oodata kliimaatiliselt kriitilisemat aastat, saab tarindi niiskus- ja soojustehnilist toimivust hinnata ka arvutisimulatsioonide teel, milleks kalibreeriti arvutusmodelid. Teatud lõikudes on arvutusmodelitega saavutatud mõõdetutega analoogsed tulemused, teatud lõikudes on puudusi. See viitab eelkõige materjaliandmete ebatäpsusele ja õhuringlusele õhkvahes. Puudused esinevad eelkõige kõrgete niiskussisalduste juures toimivate nähtuste kirjeldamisel, mis (olles toimivuspiiride lähedal) on eriti tähtsad.

Teadmatuse vähendamiseks tuleks mõõta ära proovikehade materjaliandmeid. Kuna müüritisel ja betoonkarkassil on suur niiskusmahtuvus ja –inerts ning neis toimuvate protsesside kestus on pikk, siis annab 2015 aasta suvine mõõteperiood täiendava võimaluse arvutusmodelit korrigeerida.

Temperatuuriväljaarvutused 2D sõlmede kohta

Ainult seinasoojustuse kasutamine suurendab soojusvoogu läbi akna- ja radiaatoriniši palede ning saavutatav võit energiakadude vähendamisel ei ole maksimaalne. Lisaks langeb võrreldes referentsjuhtudega ka palede keskmine temperatuur. Aknapalede soojustamiseks uuriti 2 võimalust: 12.5mm ja 20mm XPS soojustusplaadiga. Mõlemaga kärbiti oluliselt soojuskadusid, kuid avatäite nurgas langes temperatuurindeks ohtlikult madalale – tekib hallituseoht ning läheneb ka kondensaadiriskipiir. Lahenduseks võib siin näha koos seinte lisasoojustamisega ka akende vahetust energiatõhusamate ja samas ka arhitektuurselt sobivamate vastu – eelkõige tuleks eelistada 120mm-paksuse puitraamiga aknaid – nendega modelleerides tõusis soojustatud palenurga temperatuurindeks soojustamiseelse olukorra tasemele.

Ei saa kindlalt väita, et olemasolevate akende puhul hallituse- või kondensaadiriskid realiseeruvad, kuna sisekliimast sõltuvad riskipiirid on valitud teatava varuga. Täpsemalt peaks selgust tooma hoones mõõdetud sisekliima analüüs, mis teostatakse järgmises etapis.

Radiaatorinišisõlmes tekkis sarnane olukord, kuid uue avatäite asemel on siin võimalik soojustada radiaatorinišisein 50mm-paksuse Multipor soojustuse kihiga. Katselõigus oli lahendus teostatav ning arvutuslikult tagas olulise soojuskadude vähenemise. Et arvutustes eeldati ääretõusimustena ühtlast temperatuuri, on reaalsuses nišiseina soojustamisel radiaatori kõrge temperatuuri (s.t. soojusülekanne suurema potentsiaali) tõttu energiasääst veelgi suurem.

7. Kasutatud kirjandus

Anon, 2014. HOBO ® External Temp / RH Data Logger (UX100-023) Manual.

Anon, 2010. HOBO ® U12 Temp/RH/ 2 External Data Logger (Part # U12-013).

Anon, 2011a. Squirrel 2010 series data logger datasheet.

Anon, 2011b. Squirrel 2020 series data logger datasheet.

Anon, 2013. TMCx-HD Water / Soil Temperature Sensor.

Grunewald, J., 1997. *Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*. TU Dresden. Available at: http://books.google.ee/books/about/Diffusiver_und_konvektiver_Stoff_und_Ene.html?id=Gb3AtgAACAAJ&pgis=1 [Accessed March 31, 2014].

Hukka, A. & Viitanen, H., 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, 33(6), pp.475–485. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s002260050131>.

Hukseflux, 2014. Hukseflux HFP01 Brochure. , p.1. Available at: http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/HFP01_v1003.pdf [Accessed March 28, 2014].

Kalamees, T. et al., 2012. *Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord – ajavahemikul 1990–2010 kasutusele võetud korterelamud*, Tallinn. Available at: http://www.kredex.ee/public/Uuringud/Uute_korterelamute_uuring_2012.pdf [Accessed March 28, 2014].

Kalamees, T. et al., 2010. *Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga Uuringu lõppraport*, Tallinn.

Kalamees, T. & Vinha, J., 2004. Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. *Journal of Building Physics*, 27(3), pp.199–220. Available at: <http://jen.sagepub.com/content/27/3/199.abstract> [Accessed April 1, 2014].

Künzel, H.M., 2011. Bauphysik der Innendämmung und Bewertungsverfahren. In *1. Internationaler Innendämmkongress 2011*. Dresden: TU Dresden, pp. 9 – 16.

Nicolai, A., 2008. *Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials*. Syracuse University. Graduate School: ProQuest. Available at: <http://books.google.com/books?id=ndv5G4MaFSQC&pgis=1> [Accessed March 31, 2014].

Ojanen, T. et al., 2010. Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings XI*. Available at: http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/2010_B11_papers/104_Ojanen.pdf [Accessed January 12, 2015].

RotronicAG, 2011. HygroClip 2 (HC2) Humidity Temperature Probes: User Guide.

Viitanen, H. et al., 2009. Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics*, 33(3), pp.201–224. Available at: <http://jen.sagepub.com/content/33/3/201.abstract> [Accessed March 28, 2014].

Viitanen, H. & Ojanen, T., 2007. Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X*. p. 8. Available at: http://web.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session_PDFs/162_New.pdf [Accessed March 28, 2014].