



**Vabaduse väljak 10 seespoolse lisasoojustuse konsultatsioon,
lahenduste väljatöötamine ja niiskustehnilise toimivuse uuring**

Lõpparuanne (etapid I, II ja III)

Paul Klõšeiko

Targo Kalamees



Sisukord

1.	Sissejuhatus	4
2.	Uuritav objekt.....	4
2.1.	Hoone üldkirjeldus	4
2.2.	Seinakonstruksioon	5
3.	Meetodid	7
3.1.	Välikatse üldkirjeldus	7
3.2.	Lisasoojustatud välisseinatarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse mõõtmine	7
3.1.	Välisseinatarindi ja sõlmede modelleerimine 2D soojuslevi modelleerimise tarkvaras LBNL Therm 7.3	9
3.1.1.	Arvutusmudelid	9
3.1.2.	Hindamiskriteeriumid	10
3.2.	Välisseinatarindi modelleerimine SÕN tarkvaras IBK Delphin	11
3.2.1.	Töö etapid.....	11
3.2.2.	Programmi lühikirjeldus.....	11
3.2.3.	Arvutusmudelid	11
3.2.4.	Hindamiskriteeriumid	17
4.	Mõõtmistulemused	18
4.1.	Tähelepanekuid ehitusprotsessist	18
4.2.	Sise- ja väliskliima mõõteperioodil	19
4.3.	Soojusvood ja pinnatemperatuurid	22
4.4.	Andurid seinas	23
5.	Arvutuslik analüüs.....	26
5.1.	Statsionaarne 2D soojuslevianalüüs	26
5.1.1.	Välisseina horisontaallõige	26
5.1.2.	Välisseina nurgasõlme horisontaallõige.....	27
5.1.3.	Välissein-siseseina horisontaalsõlm	28
5.1.4.	Välisseina viimase ja eelviimase korruse vertikaalsõlm.....	29
5.2.	I etapp: esmased SÕN arvutused ja renoveerimislahenduse valik	31
5.2.1.	Üldist.....	31
5.2.2.	Tarindi niiskussisaldus	31
5.2.3.	Suhteline niiskus	32
5.2.4.	Temperatuur	35
5.2.5.	Järeldused ja soojustuslahenduse valik.....	35
5.3.	II etapp: SÕN mudeli kalibreerimine mõõtmistulemuste põhjal	36
5.3.1.	Kalibreerimisprotsess.....	36
5.3.2.	Seina põhiosa (1D ja 2D mudelid)	36
5.3.1.	Soojustatud betoonvöö seina ülemises osas (1D mudel)	41



5.4.	III etapp SÕN arvutused 1970...2012 aastate väliskliimaga	43
5.4.1.	Üldist.....	43
5.4.2.	Seina 2D horisontaallõige	43
5.4.3.	Betoonvöö seinä ülemises osas.....	50
6.	Kokkuvõte	53
6.1.	I etapp: esmased SÕN arvutused ja renoveerimislahenduse valik	53
6.2.	II etapp: Mõõtmistulemused	53
6.3.	II etapp: 2D soojuslevi modelleerimine ja külmasillaanalüüs	54
6.4.	II etapp: 1D ja 2D soojus- ja niiskustehniliste arvutusmodelite kalibreerimine	54
6.5.	III etapp: 1D ja 2D soojus- ja niiskustehnilised arvutused 1970-2012 kliimaandmetega	54
6.6.	Üldkokkuvõte	55
7.	Kasutatud kirjandus	56
LISA I: infrapunatermograafia		
LISA II: renoveerimislahendus		

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.

Seoses objektil esinenud hallituskahjustustega ning vajadusega vältida tervisekahjustusi ja taastada asutuse töö, uuriti arvutuslikult võimalike renoveerimislahenduste mõju eesmärgiga valida neist optimaalseim.

2. Uuritav objekt

2.1. Hoone üldkirjeldus

Uuritav hoone asub Tallinnas Vabaduse väljaku põhjaserval, põhimaht on orienteeritud idaläänesuunaliselt. Tegemist on 1937. aastal valminud 8-korruselise büroohoonega, mille suletud netopind on 8510m². Hoone on ehitismälestis (3094, Tallinna esinduslikumaid funktsionalistlikke hooneid,

<http://register.muinasee/public.php?menuID=monument&action=view&id=3094>).



Joonis 1 Uuritav objekt – foto Vabaduse väljakult (vasakul, allikas: H. Kuningas/Muinsuskaitseamet) ja asukoht kaardil (allikas: Regio)

2.2. Seinakonstruktsioon

Hoone 8. korruse välisseinad olid seestpoolt lisasoojustatud puitkarkassil mineraalvillsoojustusega, soojustuse siseruumidepoolne külg oli kaetud aurutõkkega ning see omakorda kipsplaadiga. Välisseinal asunud riulite eemaldamisel selgus, et seinapinnad olid kaetud hallitusega (Joonis 2 vasak ja Joonis 3). Vastavalt TTÜ Materjaliuuringute teaduskeskuse analüüsi protokollile nr 201503UK (Kallavus 2015) esines seinast võetud (üksteisest eraldamata) proovidel hallitusseente *Stachybotrys atra* ja *Phoma sp.* kasvu ning identifitseerimatuid eoseid.

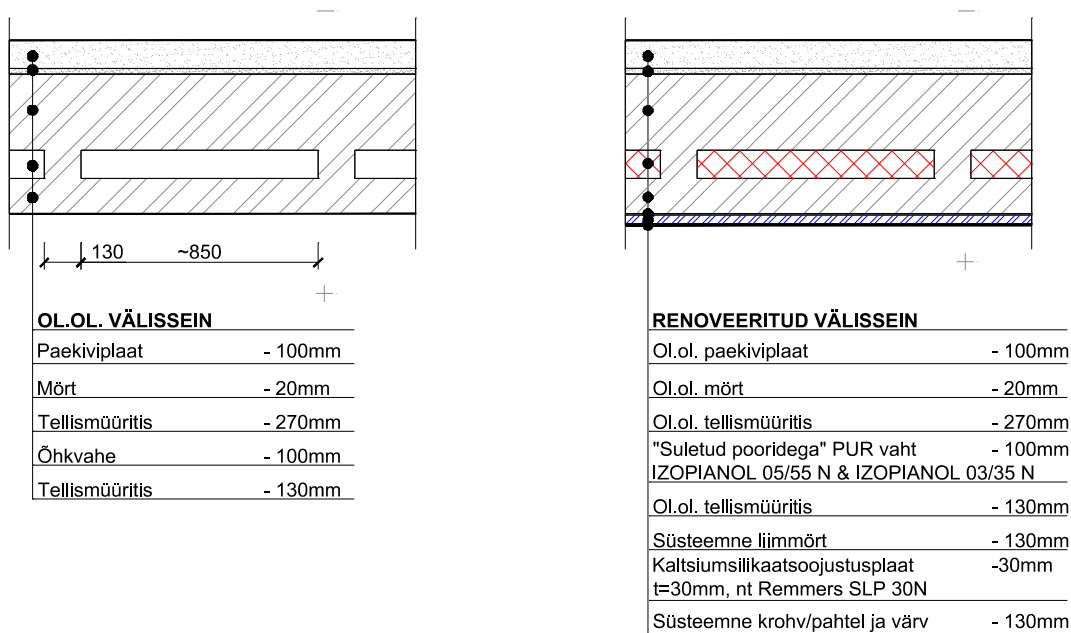


Joonis 2 Vasakul: hallituskahjustustega välisseina sisepind enne lisasoojustuse lammutamist (foto allikas: tellija).
Paremal: juhtmete läbiviiguga aurutõkkele tekitatud ava on põhjustanud õhulekkeid ning võimalikke niiskuskahjustusi soojustusse.



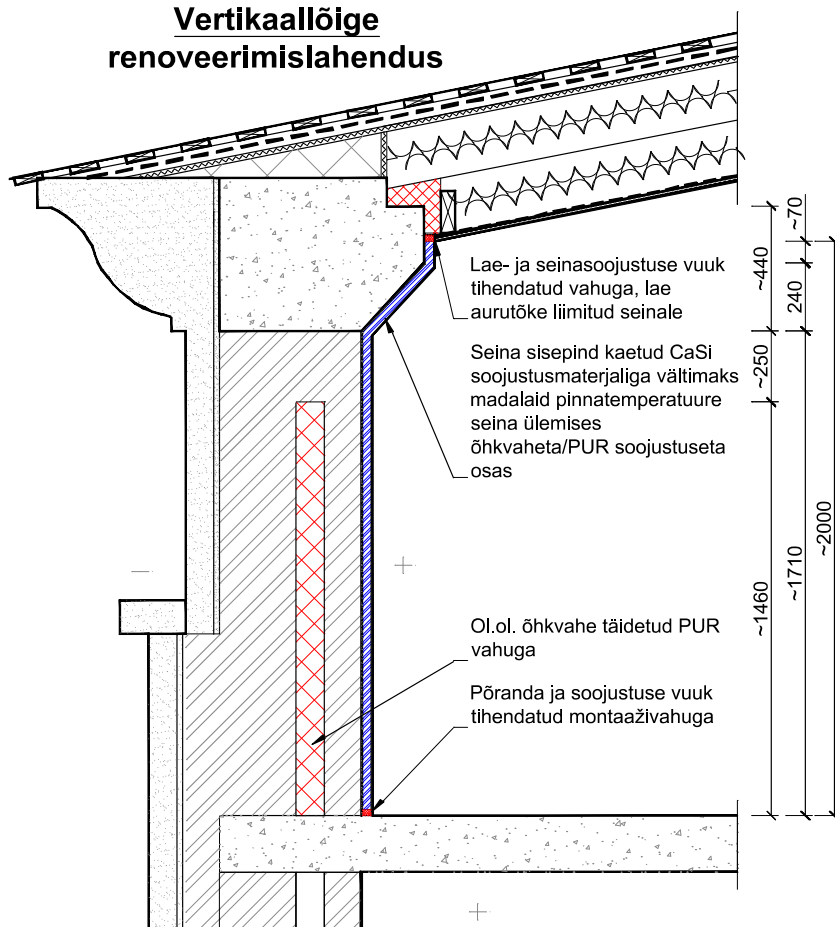
Joonis 3 Välisseina sisepind eelneva seespoolse lisasoojustamise lammutamise ajal (foto allikas: tellija).

Kärnide puurimisega ning konstruktsiooni avamisega andurite paigaldamise käigus selgitati välja välisseinatarindi esialgne konstruktsioon. Käesoleva raporti 5.1 ja 5.2 peatükis kirjeldatud tulemuste alusel valiti soojustuslahendus ning realiseeriti 2015 aasta kevadel. Seinatarindi ligikaudsed kihid ning renoveerimislahenduse annavad Joonis 4 ja Joonis 5.



Joonis 4 Välistseinarindi horisontaallõiked: olemasolev olukord (vasakul) ja renoveerimislahendus (paremal).

Vertikaallõige renoveerimislahendus



Joonis 5 Välistseinarindi vertikaallõige: põhimõtteline renoveerimislahendus.

3. Meetodid

3.1. Välikatse üldkirjeldus

Välisseinatarindi mõõtmine on vajalik seni testimata ja arvutuslikult sobivaimaks peetud lahenduse toimivuse tõendamiseks. Mõõtmiseks töötati välja süsteem, mis võimaldab mõõta Vabaduse väljaku poole jääva 8. korruse välisseina erinevate kihtide niiskus- ja soojustehnilisi parameetreid, et seejärel hinnata selle toimivust.

Sündmuste ajakava:

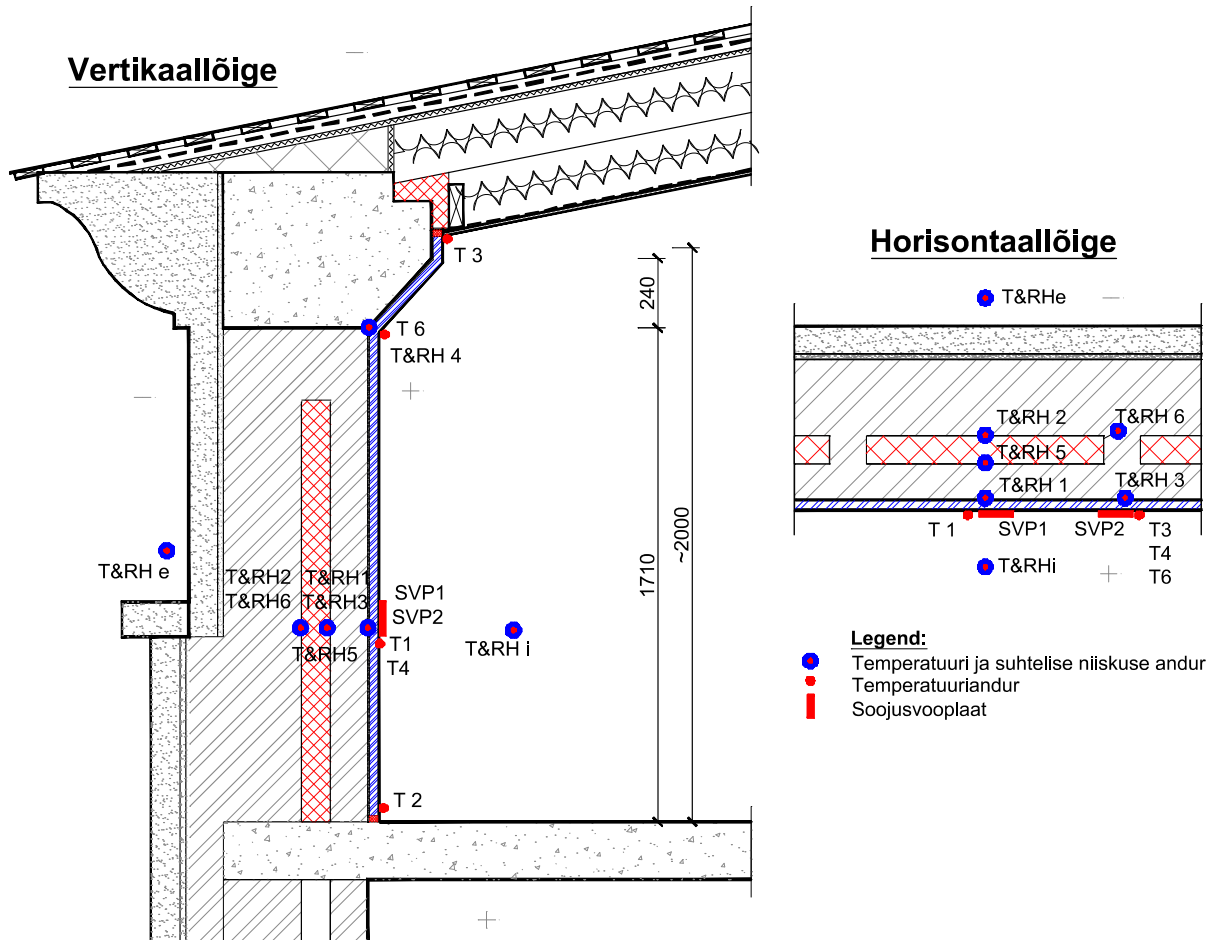
- Hallituse avastamine ja esialgse soojustuse lammutamine jaanuar 2015
- Seinasiseste andurite paigaldus 21.03.2015
- Vahu süstimine tellismüüritise õhkvaheesse 23.03.2015
- CaSi soojustuse paigaldus ja krohvimine aprilli esimene pool 2015
- Andurite manuaalne mahalugemine 21.03.2015...11.06.2015
- Andurite ühendamine automaatse andmesalvestiga 11.06.2015

3.2. Lisasoojustatud välisseinatarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse mõõtmine

Mõõteandurite paigalduskohad lisasoojustatud seinas on järgmised (vt Joonis 6):

- Seinasised temperatuuri- ja suhtelise niiskuse andurid:
 - TRH1: sidekividevahelises osas CaSi soojustuse taga.
 - TRH2: sidekividevahelises osas süstvahu taga;
 - TRH3: sidekivirea kohal CaSi soojustuse taga;
 - TRH4: eenduva r/b tala ja vertikaalse seina servas soojustuse taga;
 - TRH5: sidekividevahelises osas süstvahu ees;
 - TRH6: sidekivi välises müüritisekihis;
- Temperatuuri- ja suhtelise niiskuse andurid:
 - TRHi: soojustatud ruumi sisekliima;
 - TRHe: väliskliima;
- Soojusvooplaadid:
 - SVP1: seina sidekividevahelise osa sisepinnal;
 - SVP2: seina sisepinnal sidekivirea kohal;
 - VSVP: võrdlusseina akendevahelise osa poorbetoonilõigu sisepinnal.
- Temperatuuriandurid:
 - T1: seina sidekividevahelise osa sisepinnal;
 - T2: seina alaserv;
 - T3: seina ülaser;
 - T4: seina sisepinnal sidekivirea kohal;
 - T6: seina sisepinnal eenduva ja vertikaalse osa serval;

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



Joonis 6 Mõõteandurite paigutus tarindis vertikaallõikel (vasakul) ja horisontaallõikel (paremal).

Uuringus kasutati järgmisi seadmeid:

Temperatuur ja suhteline niiskus tarindis (Rotronic AG 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 (Grant Instruments 2011)

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

3.1. Välisseinatarindi ja sõlmede modelleerimine 2D soojuslevi modelleerimise tarkvaras LBNL Therm 7.3

LBNL Therm on statsionaarne soojuslevi modelleerimise 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.

3.1.1. Arvutusmudelid

Arvutuste teostamisel lähtuti standardist EVS-EN ISO 10211:2008 (Eesti Standardikeskus 2008). Kasutatud arvutusmodelite skeemid on selguse mõttes antud peatükis 5.1 koos vastavate arvutustulemustega.

Tabel 3.1 annab antud mudelites kasutatud materjalikihtide soojuserijuhtivused ja õhkvahede soojustakistused. Ääritingimustena kasutati sisetemperatuuri $t_i=20^\circ\text{C}$ ja välistemperatuuri $t_e=-20^\circ\text{C}$. Välispinna soojustakistuseks R_{se} kasutati väärtust $0.04\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, kuna uuringu põhirõhk oli niiskustehnilisel toimivusel, siis enamasti oli sisepinna soojustakistus $R_{si}=0.25\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Energiaarvutusteks kasutati sisepinna soojustakistust $R_{si}=0.125\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

Tabel 3.1 Tarkvaras Therm kasutatud materjalomadused.

Materjal	Soojuseri juhtivus λ, W/(m·K)
Lubitsementkrohv/mört	0,720
Montaaži vaht	0,030
Tellis	0,860
Paekivi	2,100
Puit	0,150
Betoon	2,100
Kipsplaat	0,250
Mineraalvill	0,038
Süstvaht	0,022
Soojustus Remmers SLP CS	0,072
Liimmört	0,560
Soojustuse viimistluspahtel	0,120
	Soojustakistus R, m²·K/W
Õhkvahe, soojusvoog hor., $t > 25$ mm	0,180
Õhkvahe, soojusvoog alla, $t = 22$ mm	0,175
Õhkvahe, soojusvoog üles, $t > 25$ mm	0,160

3.1.2. Hindamiskriteeriumid

Tarkvaras Therm leitud tulemusi analüüsiti soojus- ja niiskustehniliselt turvalise toimivuse aspektist temperatuuriindeksite abil. Temperatuuriindeks väljendab pinnatemperatuuri ja välistemperatuuri vahe suhet sise- ja välistemperatuuri vahesse (vt valem (1)). Mida madalam on temperatuuriindeks, seda madalam on vaadeldava punkti temperatuur ja vastupidi. Võrreldes temperatuuriindeksit ruumi kasutustingimustele vastavate piirväärtustega, saab hinnata lahenduse niiskustehnilist turvalisust.

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

kus:

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

Eestis on uute hoonete puhul sobiv kasutada minimaalse lubatud temperatuuriindeksina $f_{Rsi}=0,8$. Hoonetes, kus niiskuslisa on pikaajaliselt dokumenteeritud ning talvine keskmine niiskuslisa jääb alla 2g/m^3 ja suvel alla $+0,5\text{g/m}^3$, on piirväärtusteks hallituse vältimise kriteeriumi puhul $f_{Rsi}=0,65$ ja kondensaadi vältimisel $f_{Rsi}=0,55$.

3.2. Välisseinatarindi modelleerimine SÕN tarkvaras IBK Delphin

3.2.1. Töö etapid

Seestpoolt lisasoojustatud välisseina soojus- ja niiskuslikud arvutused järgnevalt:

- I etapp:
 - Esmased arvutused enne katseseina ehitust, et leida sobiv renoveerimislahendus, mille toimivust välimõõtmistega kinnitada;
- II etapp:
 - Arvutusmodelite kalibreerimine vastavalt mõõtmistulemustele;
- III etapp:
 - Soojus- ja niiskustehnilised 1D ja 2D arvutused välimõõtmistega kalibreeritud arvutusmodeliga, sh: mõõtmiste põhjal koostatud sisekliimamudel, müürikivide põhiliste materjalomaduste määramine.

3.2.2. Programmi lühikirjeldus

Seespoolt lisasoojustatud välisseina soojus- ja niiskustehnilise toimivuse analüüsiks kasutati dünaamilist kombineeritud niiskuse- ja soojuse liikumist arvestavat arvutustarkvara Delphin 5.8.3 (Grunewald 1997; Nicolai 2008). See võimaldas täpsemalt analüüsida tarindi soojus- ja niiskustehnilist toimivust, võttes arvesse muutuvaid keskkonnatingimusi ja materjalomaduste keskkonnasõltuvust.

3.2.3. Arvutusmodelid

Arvutusmodelite ülesehitus

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

I etapis:

- 1-dimensiooniline mudel läbiva betoonvööga osast, vt Joonis 7;
- 1-dimensiooniline mudel tellisseina sidekiviosast (ülesehituselt analoogne eelmisele mudelile).

II ja III etapis:

- 1-dimensiooniline mudel süstvahuga soojustatud õhkvahelõik, (Joonis 8);
- 1-dimensiooniline mudel tellisseina sidekiviosast (Joonis 9);
- 2-dimensiooniline mudel tellisseina põhiosast (Joonis 10);
- 1-dimensiooniline mudel läbiva betoonvööga osast (Joonis 12).

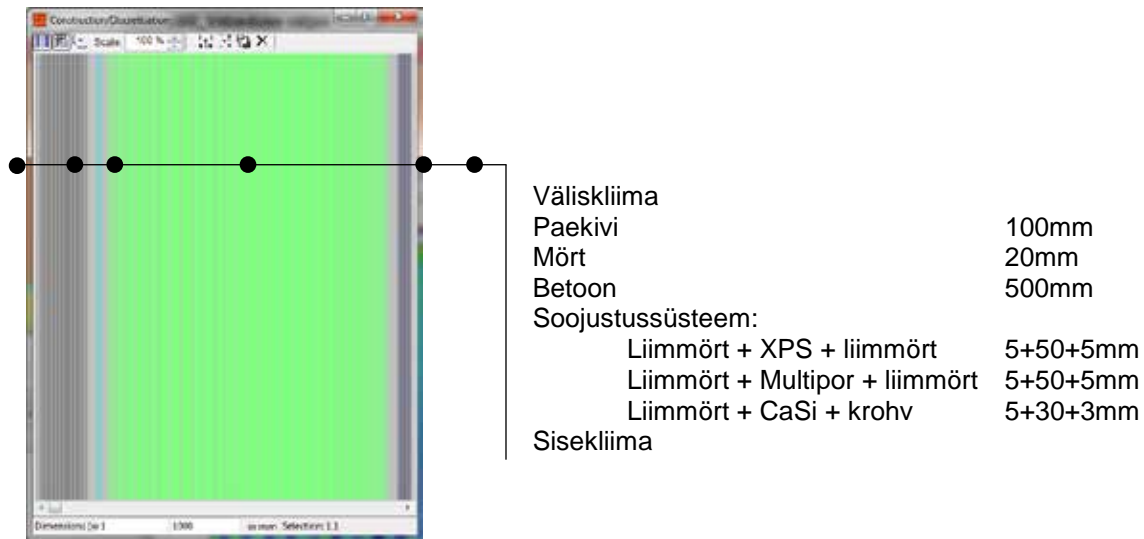
III etapis:

- 2-dimensiooniline mudel tellisseina põhjapoolsest 38cm-paksusest põhiosast (Joonis 11).

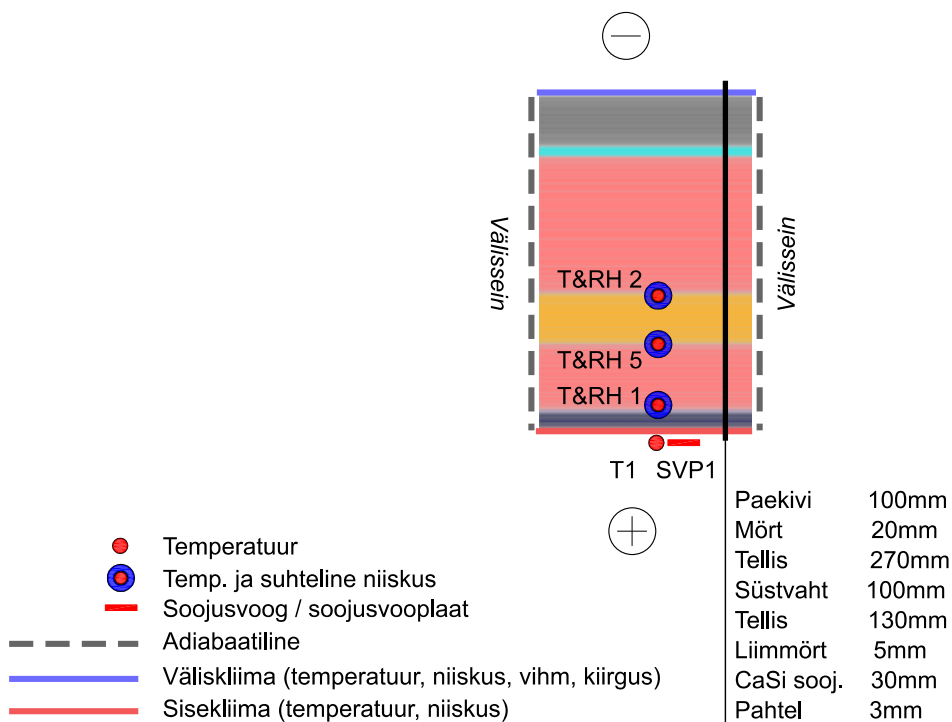
Sisestatud konstruktsioon tükeldati erineva paksusega elementaarmahtudeks nõnda, et paksemad mahud asuvad homogeensete konstruktsiooniosade keskmises osas ning õhemad mahud erinevate konstruktsiooniosade kokkupuutepindade lähedal. Kihid olid paksusega 1...20mm.

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 $2 \cdot 10^{-7} \text{ s/m}$.

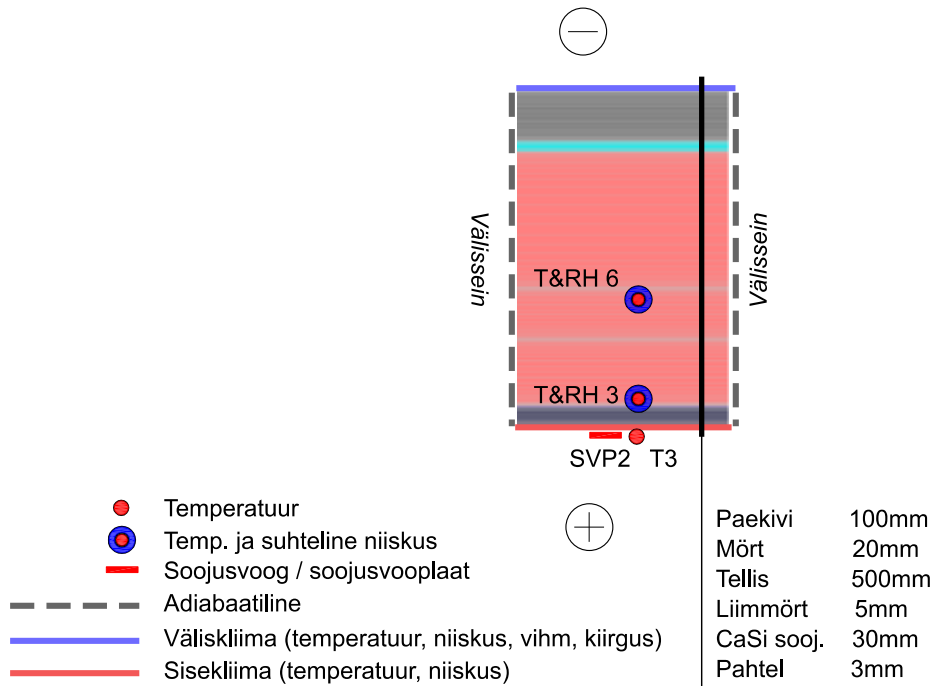
Seinamodelid olid kiirguse, tuule ja sademete korrektseks arvestamiseks defineeritud asuma Tallinna laiuskraadil (59.4°N). I ja II etapis olid modelid orienteeritud vastavalt reaalse seina asendile lõunasse (179°). Pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (III etapp) prooviti läbi kõik Vabaduse väljak 10 seinte suunad ning valiti neist kriitilisimad (läände ja põhja).



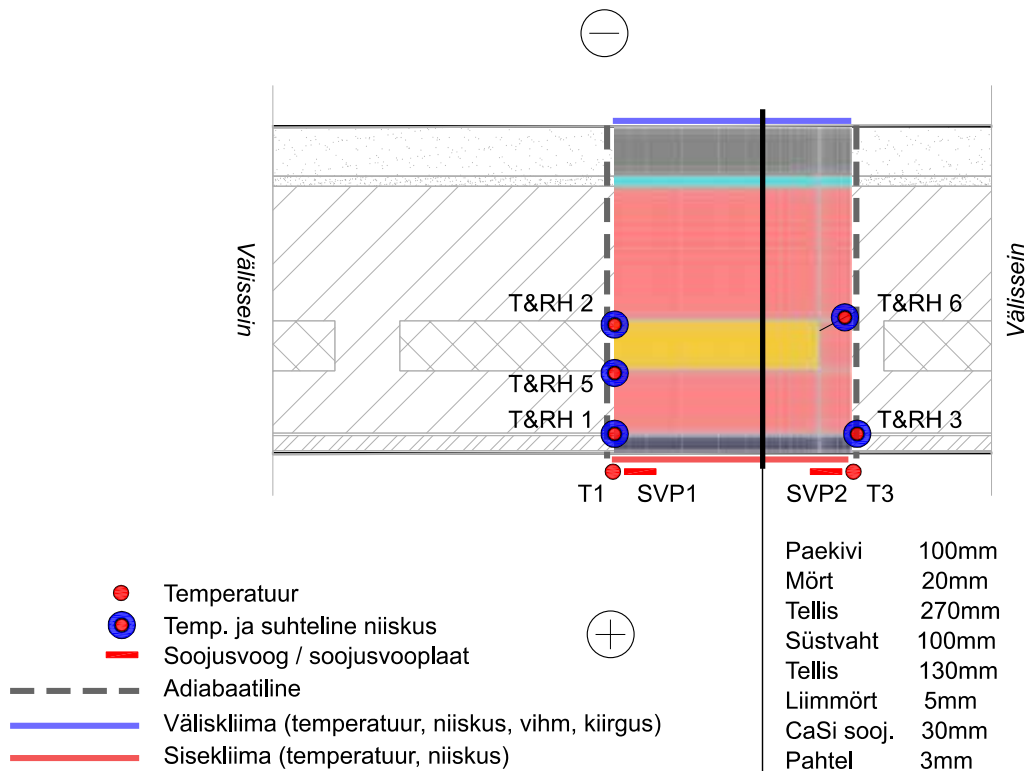
Joonis 7 I etapis kasutatud arvutusmodell: lisasoojustatud välissein: 1-dimensioonilise arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.



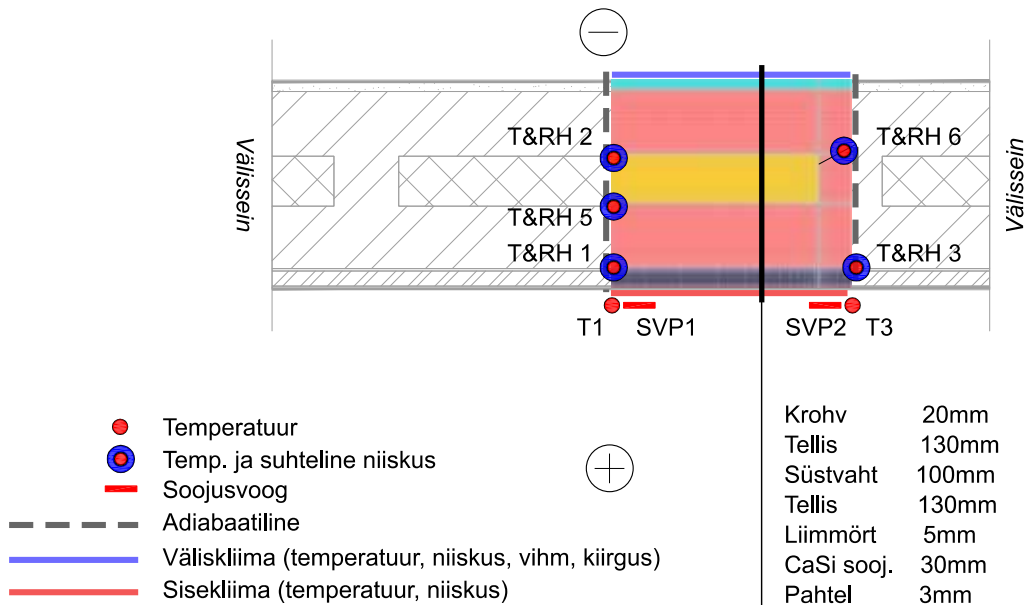
Joonis 8 Kalibreerimisel ja pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (II ja III etapp) kasutatud välisseina põhiosa süstvahulõigu 1D arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.



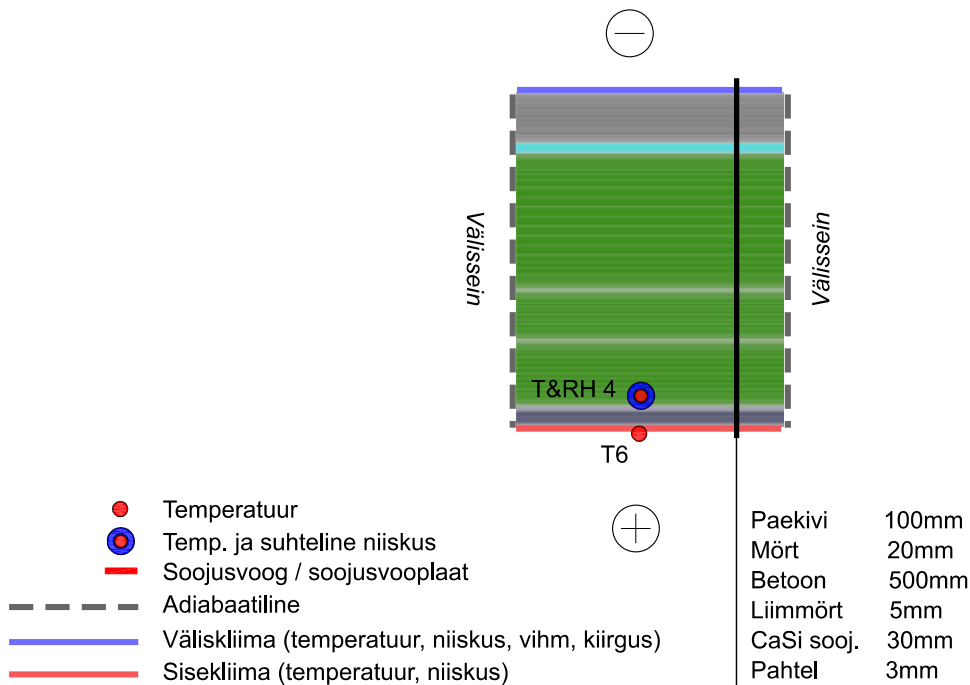
Joonis 9 Kalibreerimisel ja pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (II ja III etapp) kasutatud välisseina põhiosa sidekivilõigu 1D arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.



Joonis 10 Kalibreerimisel ja pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (II ja III etapp) kasutatud välisseina põhiosa 2D arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.



Joonis 11 Pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (III etapp) kasutatud põhjapoolse 38cm-paksuse välisseina põhiosa 2D arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin (NB: eeldatav konstruktsioon).



Joonis 12 Kalibreerimisel ja pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (II ja III etapp) kasutatud välisseina ülemise betoonvöö 1D arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.

Materjaliandmed

Uuritud tarindi 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 või on mõõdetud vastavatel Euroopa tehnilistele spetsifikatsioonidele läbiviidud testidel. Ja8CT@p06JUd Ja8CT@p06JUd
- 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.

Tabel 2 Programmis Delphin koostatud arvutusmudelites kasutatud materjalide põhilised omadused.

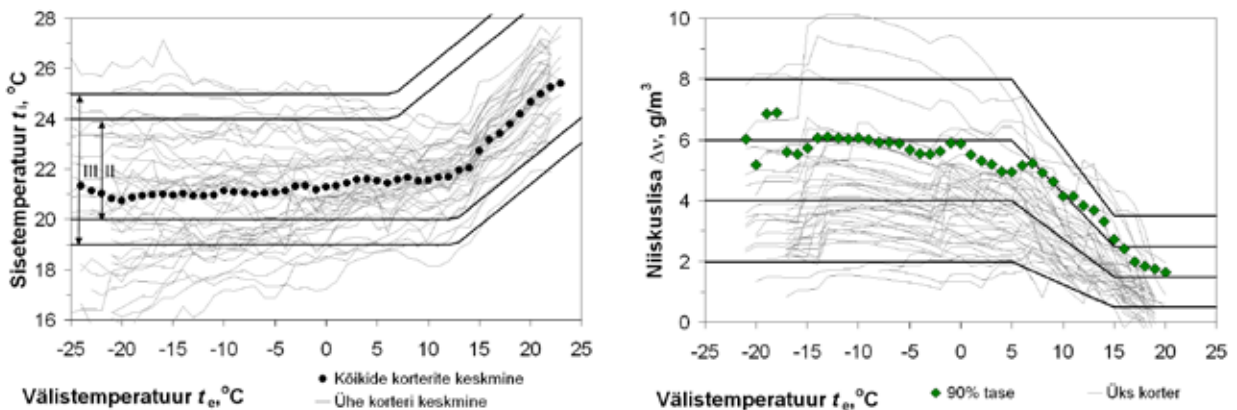
Materjal	Materjali vaste programmis Delphin	Tihedus ρ	Eri-soojus c J/(kg·°K)	Poorsus ψ m ³ /m ³	Efektiivne poorsus ψ_e m ³ /m ³	Soojus-erijuhtivus λ W/(m·°K)	Veeimavus A_w kg/(m ² ·s ^{0.5})	Veeauru-difusiooni-takistus- μ -
Paekivi	Shell Limestone Krensheim	2440	850	0.13	0.127	2.300	0.004	140
Mört	Lime Cement Mortar	1570	1000	0.41	0.25	0.700	0.176	11
Soojust. Ytong Multipor	Mineral Foam Multipor (from 2011)	99	1331	0.96	0.13	0.042	0.006	7
Liimmört	Glue Mortar (For Mineral Insul. Board)	830	815	0.69	0.54	0.155	0.003	13
Soojust. XPS	Polystyrene Board - Extruded	35	1500	0.91	0.91	0.035	8.0E-06	300
Soojust. CaSi	Remmers SLP	296	997	0.89	0.87	0.063	0.39	4.6
Liimmört (CaSi)	Attachment mortar SLP	1313	862	0.50	0.29	0.497	0.005	19
Krohv (CaSi)	Anti-mould plaster	465	1173	0.81	0.73	0.106	0.013	8
Tellis	Old Building Brick Rote Kaserne Potsdam (inner brick 2)	2049	847	0.23	0.24	0.86	0.34	19
Izopianol 03/35 süstvaht		39	1500	0.92	0.92	0.022	0.0001	38
Betoon	Concrete	2104	1000	0.22	0.2199	2.100	0.01	76

Lühikokkuvõtte kasutatud materjaliomadustest annab Tabel 2. Uuringu alguses puudusid täpsemad materjaliandmed tellismüritise kohta kohta. Enne soojustamist võeti seinast proovikehad, arvutusmodelite suurema usaldusväärsuse ja korrelatsiooni saavutamiseks mõõtmisandmetega täpsustati materjali soojus- ja niiskustehnilisi omadusi. Laboratoorselt määrati telliste järgmised parameetrid: tihedus, veeimavus, veeaurudifusioonitakistustegur, sorptsioonkõver. Nende alusel valiti programmi Delphin andmebaasist analoogsed materjalid, millest modelleerimistulemuste ja mõõteandmete võrdlusel valiti parim vaste.

Kliimaatilised ääritingimused

Väliskliimana kasutati Tartu/Tõravere meteoroloogiajaamas pikaajaliselt mõõdetud andmeid, kuna sealt on kliimaandmed kõige täiuslikumad (on olemas ka kiirgusandmed). Temperatuur, suhteline niiskus, tuule kiirus ja suund, sademete hulk ja kiirus on mõõdetud perioodilt 1. juuni 1970-1. juuni 2013.

I etapis valiti sisekliima parameetrid vastavalt uurimistöös „Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga“ esitatud sisekliima mõõtmiste tulemustele (Kalamees et al. 2010; Kalamees et al. 2012). Joonis 13 esitab sisekliima väliskliimast sõltuvuse põhimõttelise skeemi. Siseõhu niiskuslisa arvutati vastavalt 4g/m^3 graafikule.



Joonis 13 I etapi sisekliima: sisetemperatuuri (vasakul) ja niiskuslisa (paremal) sõltuvus välistemperatuurist Eesti telliskorterelamutes (Kalamees et al. 2010).

II etapis kasutati sise- ja väliskliimana perioodil aprill 2015...aprill 2016 objektis mõõdetud temperatuure ja suhtelisi niiskusi (Joonis 18, Joonis 19, Joonis 20). Täiendavalt oli väliskliimaparameetriteks tuule kiirus, tuule suund ja sademete hulk Ilmateenistuse Tallinn-Harku aeroloogiajaamast ning otsene ja hajuskiirgus Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamast.

III etapis oli väliskliima sama mis I etapis. Sisetemperatuurimudel oli koostatud vastavalt Vabaduse väljak 10 testruumis mõõdetutele (sisetemperatuuri 24h keskväärtuse sõltuvus välistemperatuurist vastavalt Joonis 22 parem ja kellaajast sõltuvad muutused vastavalt Joonis 21). Siseõhu suhtelise niiskuse arvutamisel kasutati niiskuslisa $\Delta v=3\text{g/m}^3$ graafikut (vastavalt Vabaduse väljak 7 läbi viidud laiemapõhjalisele sisekliimauuringule (Klõšeiko & Kalamees 2015)).

3.2.4. Hindamiskriteeriumid

Kapillaaraktiivsete soojustusmaterjalide toimivuse piirideks pakub Künzel (2011) kondenseerumise vältimise kriteeriumi $RH_{kritil}=95\%$ 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 (Hukka & Viitanen 1999; Viitanen et al. 2009; Viitanen & Ojanen 2007) hallitusmudel annab hallituse kasvu ääretingimused männi maltspuidule (vt valem (2)). 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 $80\%_{RH}$ -line piirväärtus.

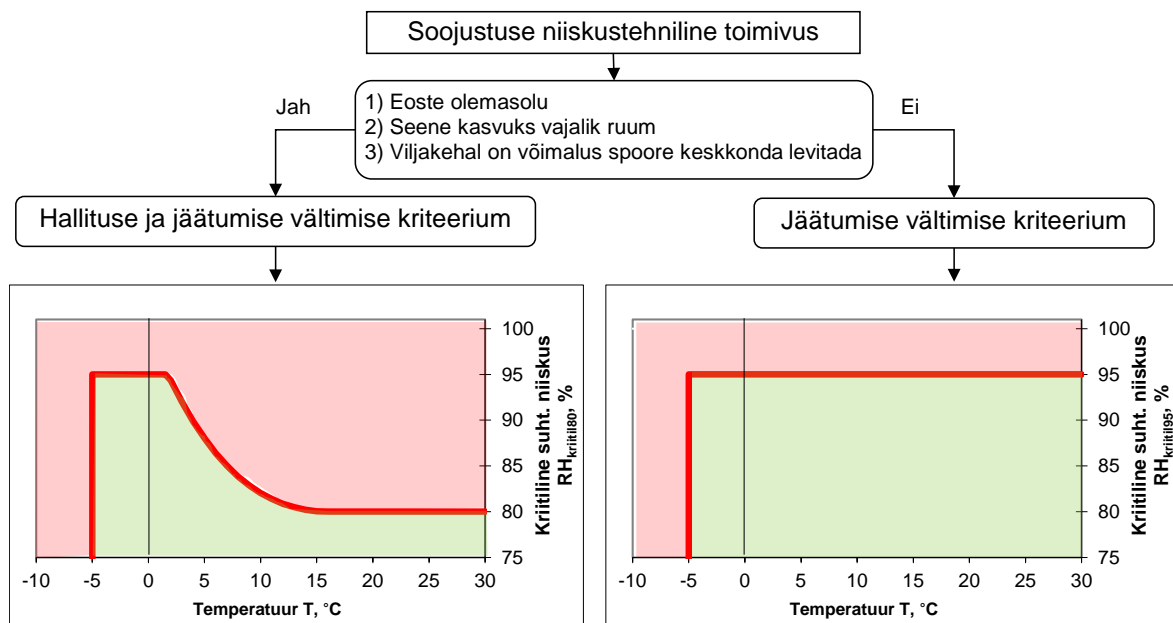
$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267t^3 + 0.160t^2 - 3.13t + 100.0, & \text{kui } t \leq 20^{\circ}\text{C} \\ 80\%_{RH}, & \text{kui } t > 20^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

kus:

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

Kokkuvõtlikult annab kapillaaraktiivsete soojustusmaterjalide ja esialgse seinä vahelise kihi jaoks valitud hindamiskriteeriumitest ülevaate Joonis 14.

Hallitusele vähetundlike materjalide puhul võib riskipiiriks pidada $85\%_{RH}$ (Ojanen et al. 2010).



Joonis 14 Soojustuse niiskustehniliselt turvalise toimivuse hindamiskriteeriumid soojustussüsteemi ja esialgse seinä vahelise kihi jaoks (Viitanen & Ojanen 2007; Viitanen et al. 2009; Künzel 2011).

4. Mõõtmistulemused

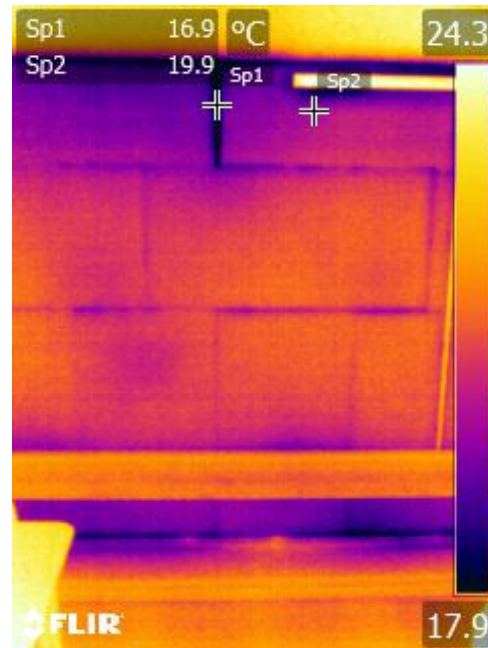
4.1. Tähelepanekuid ehitusprotsessist

Kaltsiumsilikaatsoojustust paigaldades tuleb jälgida, et soojustusplaadi taha ei jääks õhkvahet – vastasel juhul ei toimi soojustus niiskustehniliselt enam eesmärgipäraselt. Joonis 15 kujutab näidet ebakorrektselt paigaldusest. Liiga kaua seisnud segu oli liiga jäik ja seda polnud võimalik plaati paigaldades piisavalt kokku suruda. Tööde kvaliteeti saab kontrollida nt paigaldatud soojustuse koputades – väär paigaldus „kajab“ rohkem.



Joonis 15 CaSi soojustus tuleb selle korrektseks toimimiseks paigaldada ilma õhkvaheta – antud juhul on liimsegu liiga kaua kokkusegatuna seisnud ning muutunud liiga jäigaks.

Samuti on soojustuse paigaldusel oluline, et plaatide omavahelised vuugid saaksid kokkusurutud ja liimsegust puhtad. Joonis 16 toob näite vastupidisest juhust – vuugis on märgata olulist temperatuurierinevust ja temperatuuriindeksi langust ning võib kriitilisemale sõlmele sattudes põhjustada neid niiskustehnilisi riske.



Joonis 16 Soojustuse paigalduse korrektsus mõjub ka soojuslikust aspektist – liiga lai ja/või liimsegu täis soojustusplaatide vuuk on langetanud temperatuuri $\sim 3^{\circ}\text{C}$ võrra ning temperatuurindeksit f_{Rsi} 0.09 võrra.

Sisepindade viimistluskihina kasutatud pahtlis oli märgata soojustusplaatide vuukidega kohakuti tekkinud pragusid (Joonis 17). Kuigi esialgselt oli renoveerimislahenduses ettenähtud pahtlikihis ka armeerimisvõrgu kasutamine, siis ehitusprotsessis materjalide tarnija loal sellest loobuti. Kas armeerimisvõrk oleks pragusid vältinud, vajab täiendavat uurimist.



Joonis 17 CaSi soojustuse viimistluspahtlisse soojustusplaatide vuukidega kohakuti tekkinud praod.

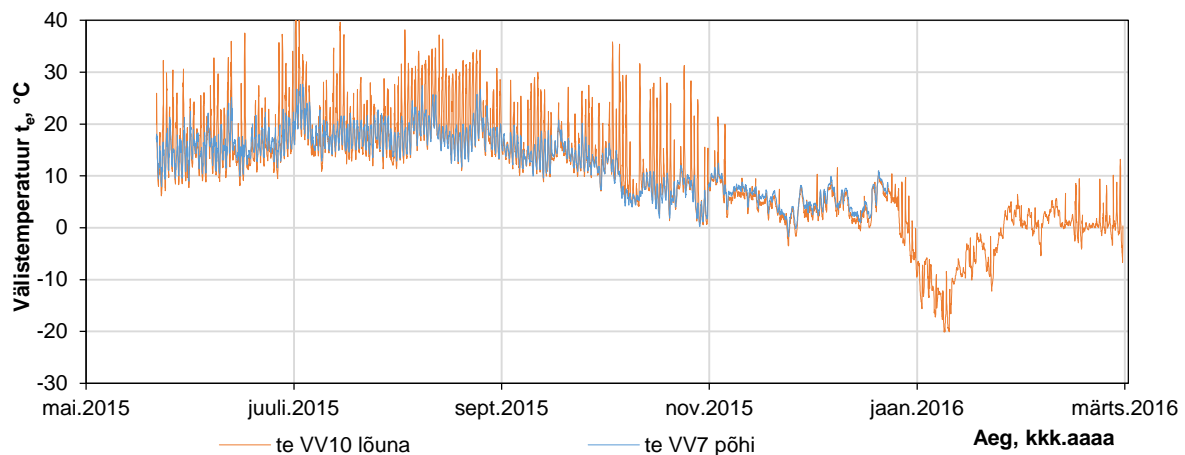
4.2. Sise- ja väliskliima mõõteperioodil

Kuna antud katselõik oli suunaga lõunasse, mõjutab seda päikesekiirgus. Joonis 18 annab võrdlevalt Vabaduse väljak 10 lõunafassaadil ning Vabaduse välja 7 põhjafassaadil mõõdetud temperatuurid. Kui augustis oli Vabaduse väljak 10 lõunafassaadil mõõdetud temperatuur $\sim 3^{\circ}\text{C}$ kõrgem kui Vabaduse väljak 7 põhjafassaadil, siis talvel oli madalama päikesekiirguse

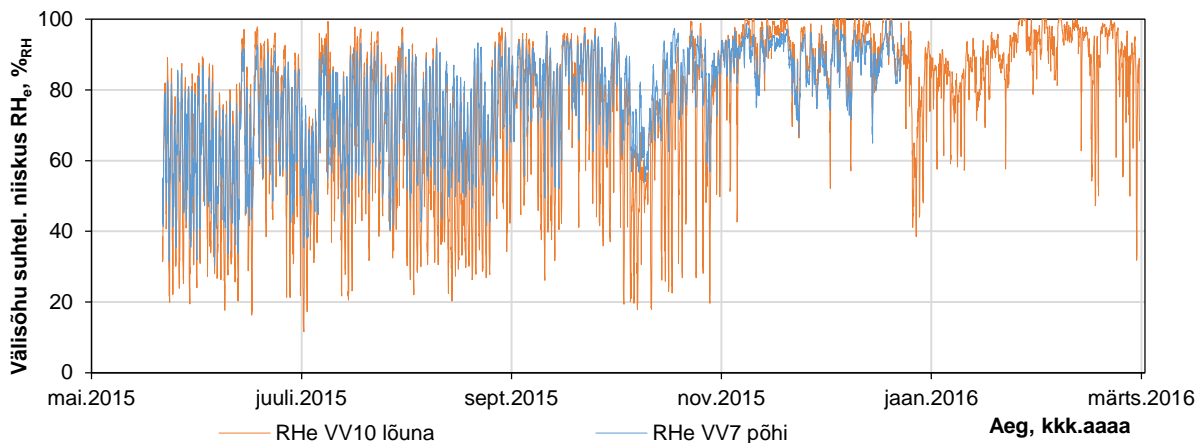
intensiivsuse tõttu vahe väiksem (0.8°C). Päikesekiirgus põhjustas lõunafassaadil ka suuremat ööpäevast õhutemperatuuri kõikumist, maksimaalne mõõdetud temperatuur ulatus 44°C -ni.

Sarnaselt hiljutiste aastatega, oli 2015/2016 aasta talv suhteliselt pehme. Vabaduse väljak 10 lõunafassaadil oli mõõteperioodi minimaalne temperatuur -20.1°C ning kõige külmema kuu (jaanuari) keskmine temperatuur oli -6°C .

Välisõhu suhtelised niiskused mõlemal fassaadil annab Joonis 19. Õhu mõõdetud niiskussisaldus oli mõlemal fassaadil praktiliselt sama (kogu perioodi keskmiste erinevus oli $0.2\text{g}/\text{m}^3$) ning suhteliste niiskuste vahe põhjustas erinev temperatuur.

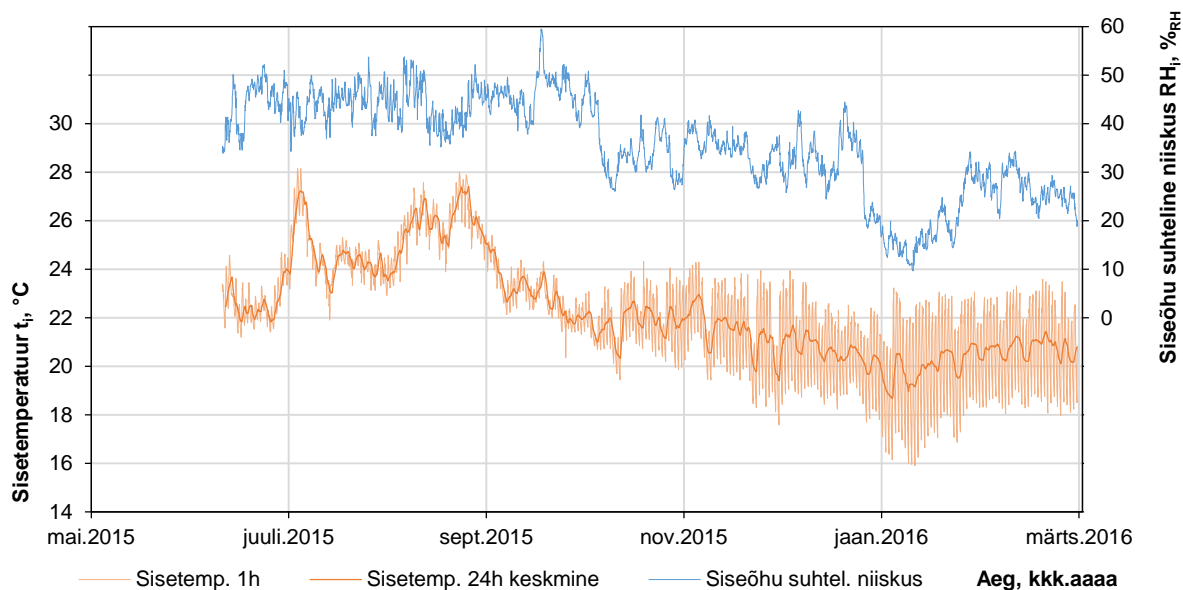


Joonis 18 Välitemperatuurid mõõdetuna Vabaduse väljak 10 lõuna- ja Vabaduse väljak 7 põhjafassaadil.

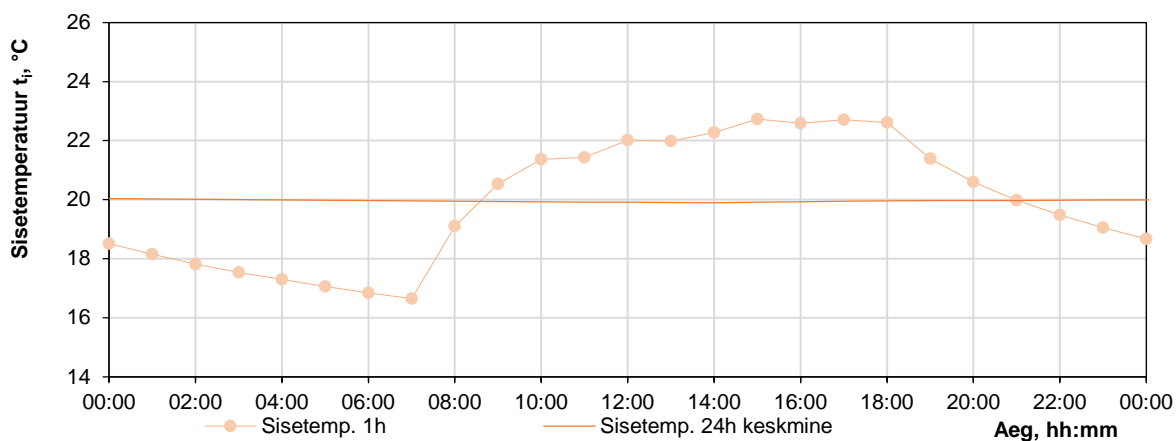


Joonis 19 Suhteline niiskus mõõdetuna Vabaduse väljak 10 lõuna- ja Vabaduse väljak 7 põhjafassaadil.

Siseõhu suhtelise niiskuse ja temperatuuri mõõteperioodil annab Joonis 20. Sisekliimat mõjutas oluliselt perioodiliselt toimiv küttesüsteem põhjustades kõikumisi nii temperatuuris kui suhtelises niiskuses. Tüüpilise kütteperioodi ööpäevase temperatuuriprofiili annab Joonis 21, jaanuari madala välitemperatuuriga poolel langes öine ruumitemperatuur 16 kraadini ning tõusis päeval 22 kraadini. Suvel oli ööpäevane sisetemperatuuri kõikumine väiksem (kütteperioodiväline aeg), samas olid sisetemperatuurid juulist septembrini vahemikus 24...28 kraadi.

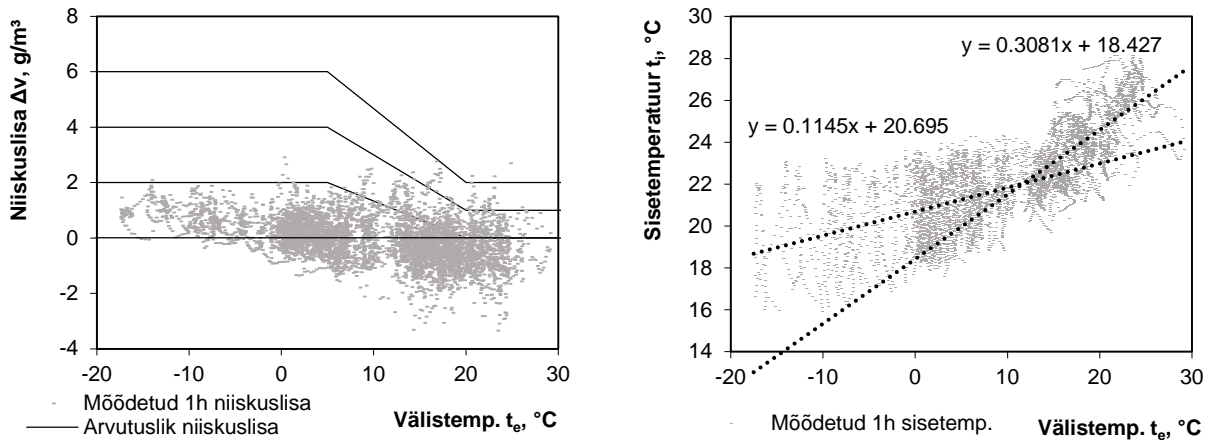


Joonis 20 Testruumis mõõdetud siseõhu temperatuur ja suhteline niiskus.



Joonis 21 Testruumi sisetemperatuuri tüüpiline ööpäevane kõikumine kütteperioodil (14. jaanuaril 2016).

Ruumi niiskuskoormust väljendab niiskuslisa. Testruumis oli koormus madal, hetkväärtuste maksimumid jäid alla 4g/m^3 (vt Joonis 22 vasak) ning nädala keskmiste maksimumid alla 1g/m^3 niiskuslisa graafiku. Sisetemperatuuri ja välistemperatuuri omavahelist sõltuvust kujutab Joonis 22 (parem).

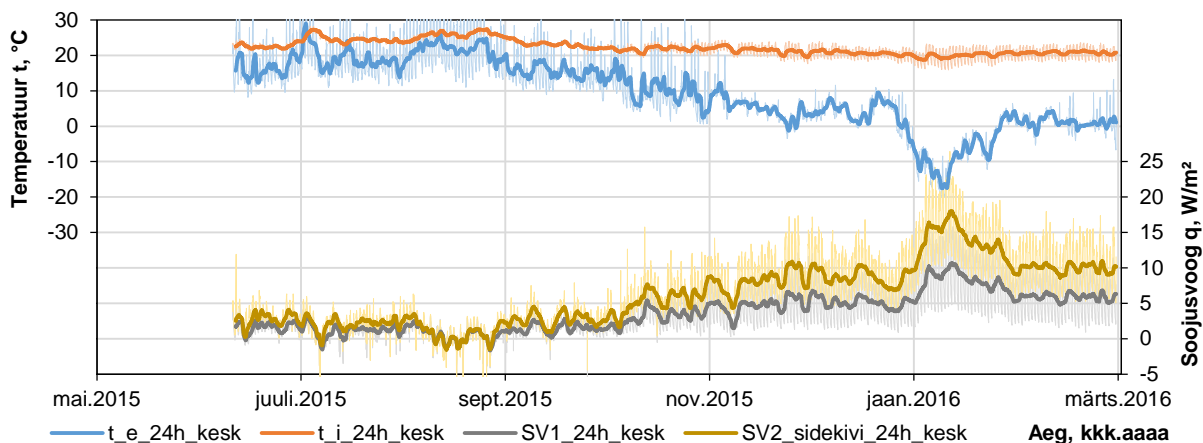


Joonis 22 Mõõdetud niiskusisa (vasakul) ja sisetemperatuuri (paremal) sõltuvus välistemperatuurist. Niiskuslisagraafikudel on esitatud niiskuslisa standardkõverad ning temperatuurigraafikul on antud $t_e < 15^\circ\text{C}$ ja $t_e > 15^\circ\text{C}$ jäävate punktipilvede lineaarsed trendijooned ja nende valemid.

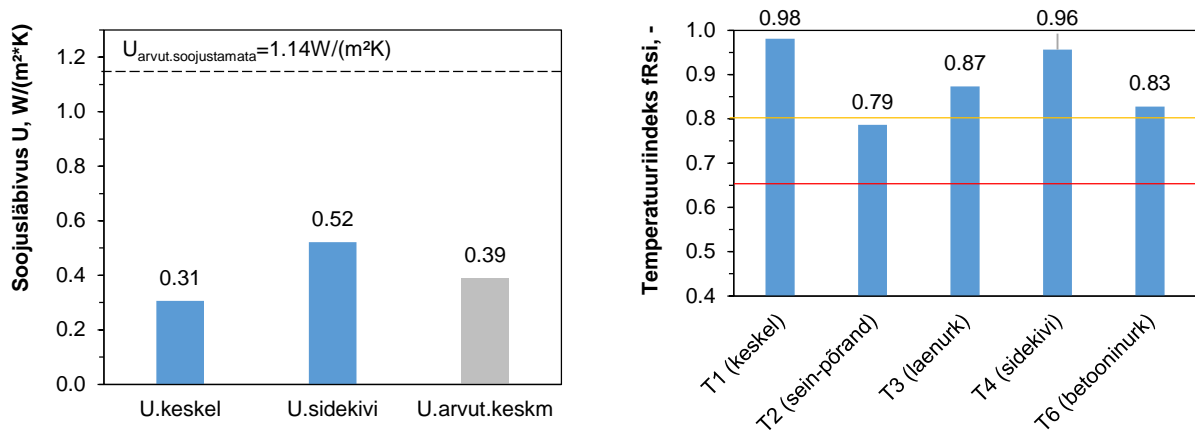
4.3. Soojusvood ja pinnatemperatuurid

Joonis 23 annab katselõigus mõõdetud soojusvood ning samal ajal valitsenud sise- ja välistemperatuurid. Oodatult on suurema temperatuuride vahe puhul soojusvoog intensiivsem (talvine periood) ning vastupidi.

Soojusvooplaatide ning sise- ja välistemperatuuride järgi saab leida tarindilõikude soojuslähivused, neid kujutab Joonis 24 (parem). Lisatud on ka eeltööde käigus 2D temperatuuriväljaarvutusega leitud soojustamata seina soojuslähivus. Müüritise sidekivireaga kohakuti asuva soojusvooanduri mõõtetulemuste alusel leitud soojuslähivus on sidekiviridade vahel asuvaga võrreldes 1.7 korda suurem – sidekivi on võrreldes PUR vahuga täidetud õhkvahega külmasild. Võrreldes soojustamata seinaga on soojuslähivus pärast soojustamist langenud üle 2 korra.



Joonis 23 Katselõigus mõõdetud soojusvoogude ja sise- ning välistemperatuuri 24 tunni keskvaartused (jamejooned) ja 1 tunni hetkväärtused (heledad peenjooned).

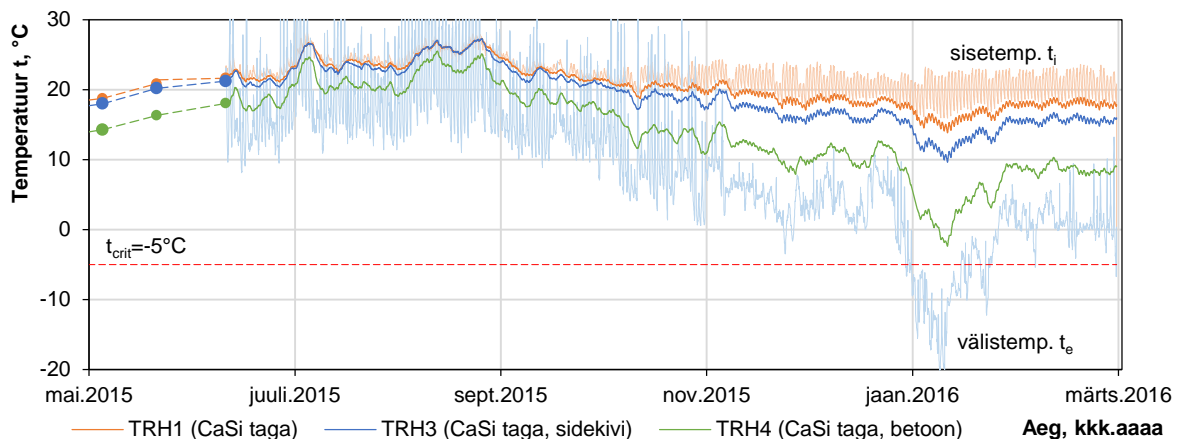


Joonis 24 Vasakul: perioodil 1.11.2015...29.02.2016 mõõdetud soojusvoogude ning sise- ja välistemperatuuride järgi arvutatud soojuslääbivused ja soojustamata tarindi modelleeritud soojuslääbivus. Paremal: katselõigu erinevate punktide temperatuurindeksid (arvutatud perioodil 1.11.2015...29.02.2016 mõõdetud sise-, välis- ja pinnatemperatuuride järgi)

Tarinditele kinnitatud pinnatemperatuurid annavad infot tarindi pinnakihi hallitusohu kohta. Perioodi 1.11.2015...29.02.2016 keskmised siseõhu-, välisõhu- ja pinnatemperatuuride järgi arvutatud temperatuurindeksid annab Joonis 24 (vasak). Madalaim temperatuurindeks (0.79) mõõdeti anduriga T2 (seina-põranda nurgas). Kuigi see on alla uute kortermajade soovitusliku piiri (0.8), siis arvestades ruumis esinevat madalat niiskust ja kasutusviisi, ei ole tohiks madal temperatuurindeks antud juhul probleeme valmistada. Ülejäänud pinnatemperatuurid näitade järgi leitud temperatuurindeksid jäävad vahemikku 0.83...0.98, mida saab pidada heaks tulemuseks.

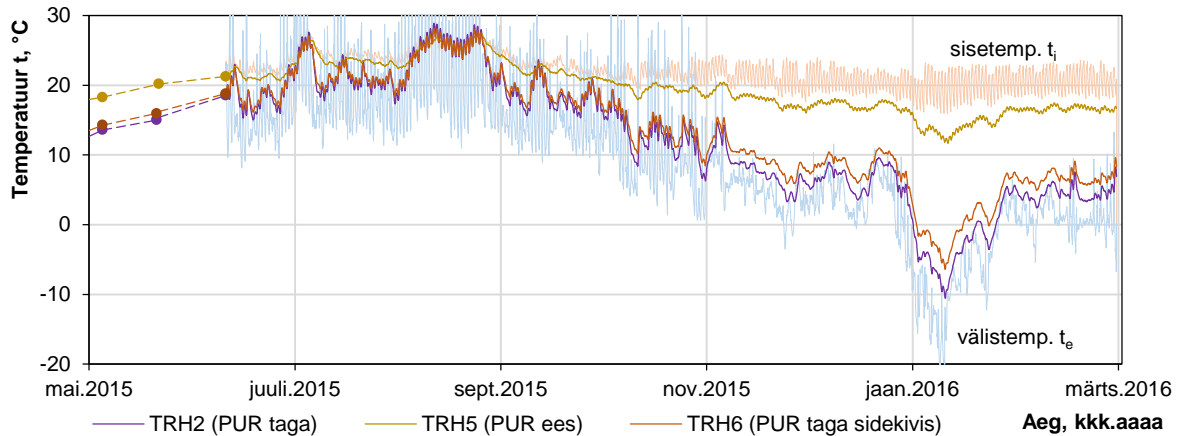
4.4. Andurid seinas

Temperatuurid CaSi soojustuse taga annab Joonis 25. CaSi süsteemi jäätumise vältimiseks peaks temperatuur jääma üle $-5^{\circ}C$ ning see kriteerium on mõõteperioodil täidetud. Kõige kriitilisem on olukord betoonkarniisi ja tellisseina liites (andur TRH4), kus pole õhkvahet, mida PUR vahuga soojustada oleks saanud. Samas on CaSi soojustus selles lõigus vajalik, et tõsta pinnatemperatuure ning vältida hallitust seina sisepinnal.



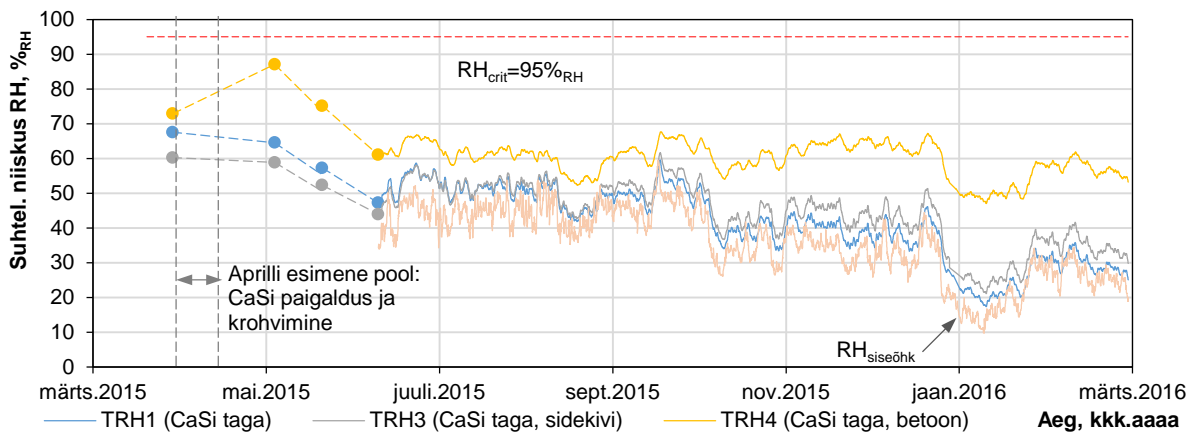
Joonis 25 Katselõigus mõõdetud temperatuurid CaSi soojustuse ja esialgse seina vahel, välis- ja sisetemperatuur ning külmumise vältimiseks minimaalne lubatav temperatuur ($-5^{\circ}C$).

Joonis 26 kujutab temperatuure PUR soojustuse ees, taga ja sidekivi tagumises pinnas. Kuna TRH5 asub PUR soojustusest ruumi pool, siis on temperatuur seal kõrge. Samas TRH2 ja TRH6 on põhilistest soojust isoleerivatest kihtidest väljaspool ning seetõttu on ka nendes mõõdetud temperatuur lähedane välistemperatuurile. Temperatuurid väljaspool PUR soojustust on piisavalt madalad, et võimaldada poorides oleva vee jäätumist, kuid erinevalt CaSi soojustuse liimikihist on sealne materjal külmakindlam ning samuti pole vähemalt mõõdetud punktides valitsenud suhtelise niiskuse tasemed piisavalt kõrged külmakahjustuste tekkeks.



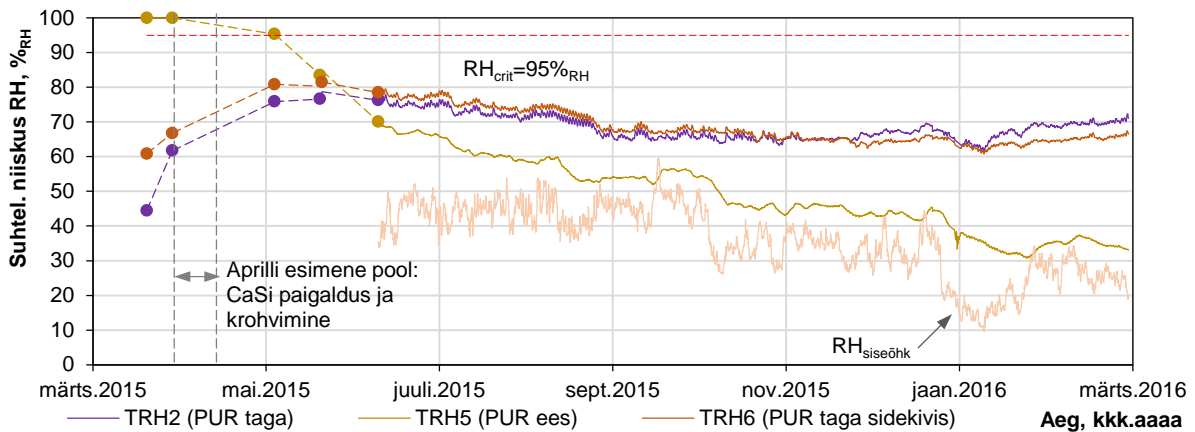
Joonis 26 Katselõigus mõõdetud temperatuurid PUR soojustuse ees, taga ning sidekivis ning välis- ja sisetemperatuur.

Suhtelised niiskusi CaSi taga kujutab Joonis 27. Piirväärtust $RH_{crit}=95\%_{RH}$ mõõteperioodil ei ületatud. Kõrgeimad RH tasemed on betoonkarniisi ja tellisseina liites (andur TRH4). Pärast ehitusniiskuse väljakuivamist jääb suhteline niiskus seal 50 ja 70% $_{RH}$ vahele. Kuna CaSi juhib suhteliselt hästi veeauru, on selle kihi niiskussisaldus tugevalt sõltuvuses sisekliimast ja selle muutustest.



Joonis 27 Katselõigus mõõdetud suhteline niiskus CaSi soojustuse ja esialgse seina vahel ning maksimaalne lubatav suhtelise niiskuse tase (95% $_{RH}$).

PUR soojustuse juurde paigutatud andurite suhteliste niiskuste tasemed annab Joonis 28. Niiskus on jälgitud punktides üldiselt madal. Soojustuse paigaldusele eelnevalt anduris TRH4 (PUR vahu toapoolse pinna ja tellise vahel) esinenud kõrge RH võib olla tingitud tellise puhastamisest anduri paigaldamisel ning mitte kajastada materjali reaalselt niiskustaset. Sellele viitab ka sidekivi sees asunud anduri (TRH6) oluliselt madalam algne näit. Kuna PUR vaht juhiv veeauru suhteliselt halvasti, on suhteline niiskus PUR vahust välispinnal pool asuvate andurite (TRH2 ja TRH6) näidud stabiilsemad kui CaSi taga asunud andurites. Et kütteperioodil on siseõhu suhteline niiskus madal, on madal ka sisemise tellisekihi niiskus ning seda kajastab anduri TRH5 langev näit.



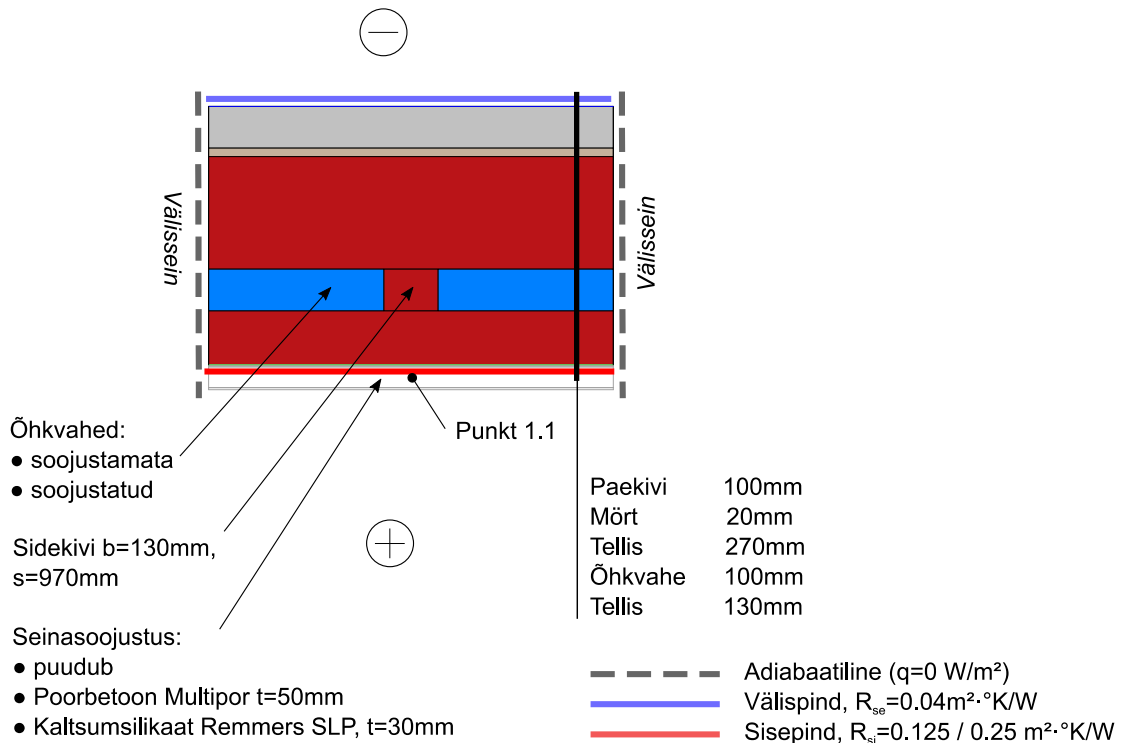
Joonis 28 Katselõigus mõõdetud suhteline niiskus PUR soojustuse ees, taga ning sidekivis. Samuti on antud külmakahjustuste vältimiseks tinglik suhtelise niiskuse ülempiir (95%_{RH}).

5. Arvutuslik analüüs

5.1. Statsionaarne 2D soojuslevianalüüs

5.1.1. Välisseina horisontaallõige

Välisseina horisontaallõike mudelist saab ülevaate seina põhiosa soojuslikust toimivusest (eelkõige soojuskadude vähenemise kohta) erinevatel soojustusvariantidel. Samuti saab hinnata variantide mõju temperatuuriindeksile. Mudeli skeemi annab Joonis 29.



Joonis 29 Välisseina horisontaallõike arvutusmudeli skeem tarkvaras Therm.

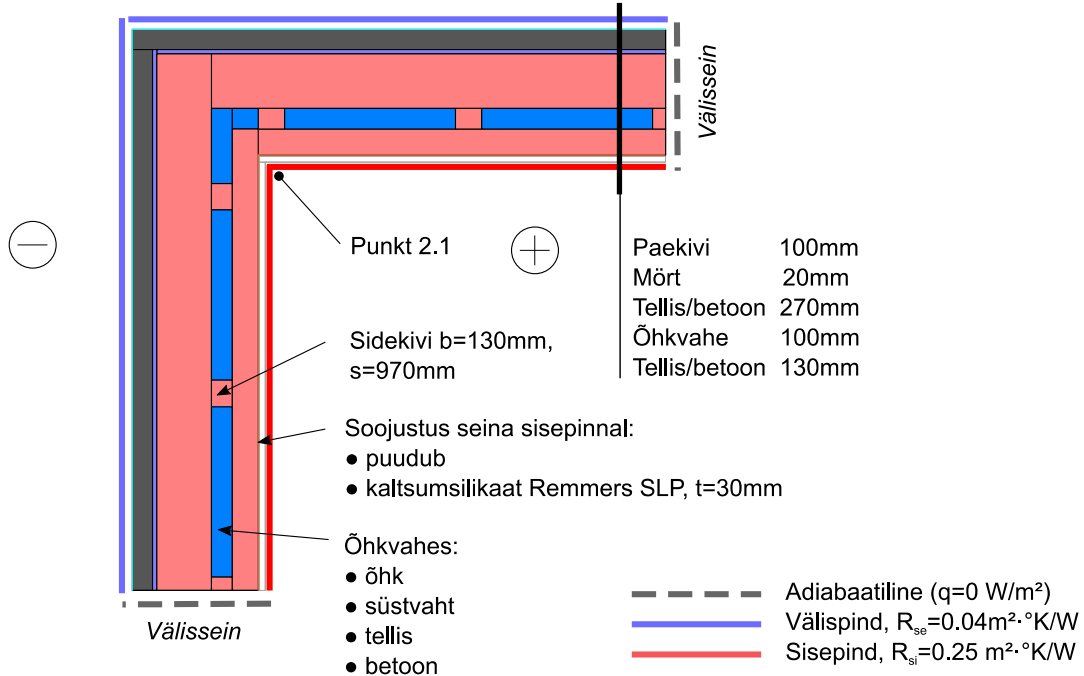
Tabel 3 annab mudeli arvutustulemused. Soojusläbivus U on arvatud terve arvutusulatuses kohta – kuna arvutusulatus on võetud vastavalt sidekivide sammule (~97cm), siis on see ka soojustatud tarindi keskmine soojusläbivus. Ainult süstvahuga soojustades säilivad külmasillad sidekivide näol, sellegipoolest on seina soojusläbivus võrreldes esialgse juhuga üle 2x madalam. Kui lisaks vahule lisada ka soojustus seina sisepinnale, on energiasääst veelgi suurem. Kõigi soojustuslahenduste temperatuuriindeksid on üle soovitatava minimaalse väärtuse ($f_{Rsi} \geq 0.8$).

Tabel 3 Välisseina horisontaallõike soojuslevianalüüsi arvutustulemused, poolpaksu kirjaga on tähistatud ehitatud lahendus.

Arvutusmudel	1.1 temperatuuriindeks f_{Rsi} , -	Soojusläbivus U, W/(m ² ·K)
Soojustamata	0.75	1.14
Süstvaht õhkvahes	0.82	0.49
Süstvaht õhkvahes + Multipor poorbetoon 50mm sisepinnal	0.92	0.30
Süstvaht õhkvahes + CaSi soojustus 30mm sisepinnal	0.88	0.39

5.1.2. Välisseina nurgasõlme horisontaallõige

Välisseina nurgasõlm (vt Joonis 30) kujutab üht võimalikest kriitilistest punktidest, selle hindamiseks saab jälgida temperatuuriindeksit punktis 2.1 (seina sisenurgas).



Joonis 30 Välisseina horisontaalse nurgasõlme arvutusmodeli skeem tarkvaras Therm (geomeetria on eelduslik).

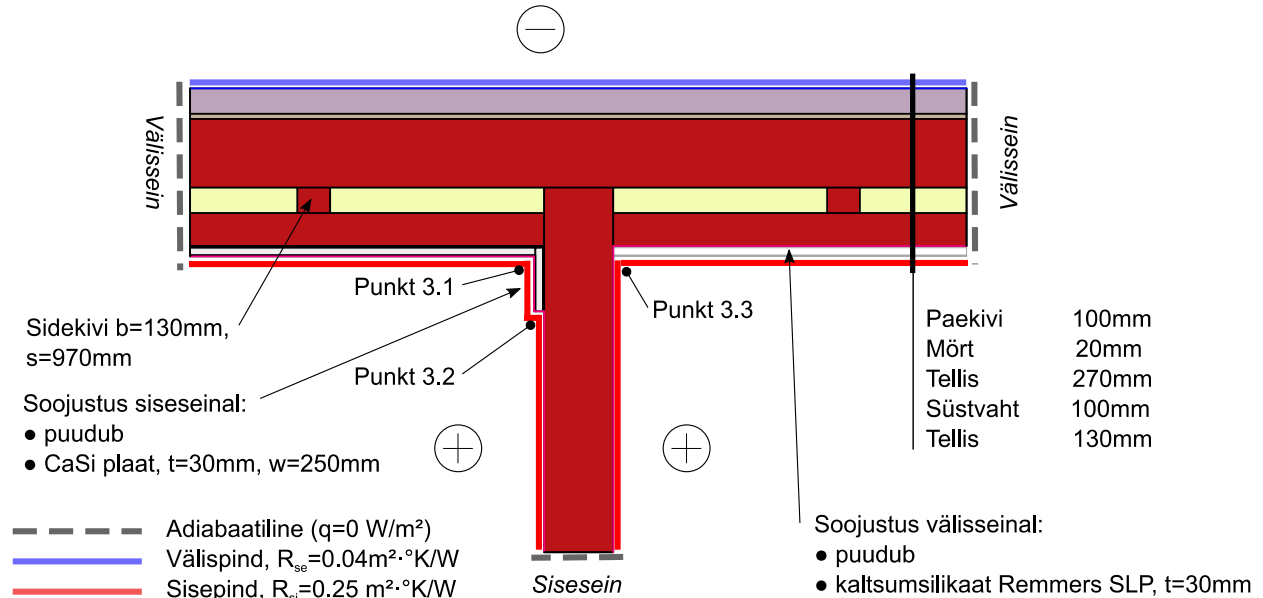
Tabel 4 annab mudeli arvutustulemused. Soojustamata mudelid annavad eeldatult madalaimad tulemused. Soojustamata betoonvöö temperatuuriindeks on väga madal (0.44) – tarind vajab lisaks õhkvahe vahuga täitmisele soojustuskihti ka sisepinnale. Tarindi geomeetria on mõnevõrra konservatiivne (reaalse betoonvöö ja välise paeviimistluse paksus suurenevad seina ülaosas).

Tabel 4 Välisseina nurgasõlme horisontaallõike soojuslevianalüüsi arvutustulemused, poolpaksu kirjaga on tähistatud ehitatud lahendus.

Arvutusmodel	2.1 temperatuuriindeks f_{Rsi} -
Soojustamata õhkvahega	0.60
Süstvaht õhkvahe	0.74
Süstvaht õhkvahe + CaSi 30mm sisepinnal	0.76
Täistellis (õhkvaheeta sein), soojustamata	0.58
Täistellis (õhkvaheeta sein) + CaSi 30mm sisepinnal	0.68
Täisbetoon (õhkvaheeta sein), soojustamata	0.44
Täisbetoon (õhkvaheeta sein) + CaSi 30mm sisepinnal	0.61

5.1.3. Välissein-siseseina horisontaalsõlm

Ka välissein-siseseina nurk võib osutuda kriitiliseks. Joonis 31 annab selle arvutusmodeli põhimõtteskeemi. Kriitiline olukord võib ilmneda juhul kui välissein on soojustatud, aga temperatuur siseseina-välisseina liites seetõttu langeb. Samuti võib probleemiks osutuda välis- ja siseseina ainult ühelt poolt soojustamine.



Joonis 31 Välissein-siseseina horisontaalsõlme arvutusmodeli skeem tarkvaras Therm (geomeetria on eelduslik).

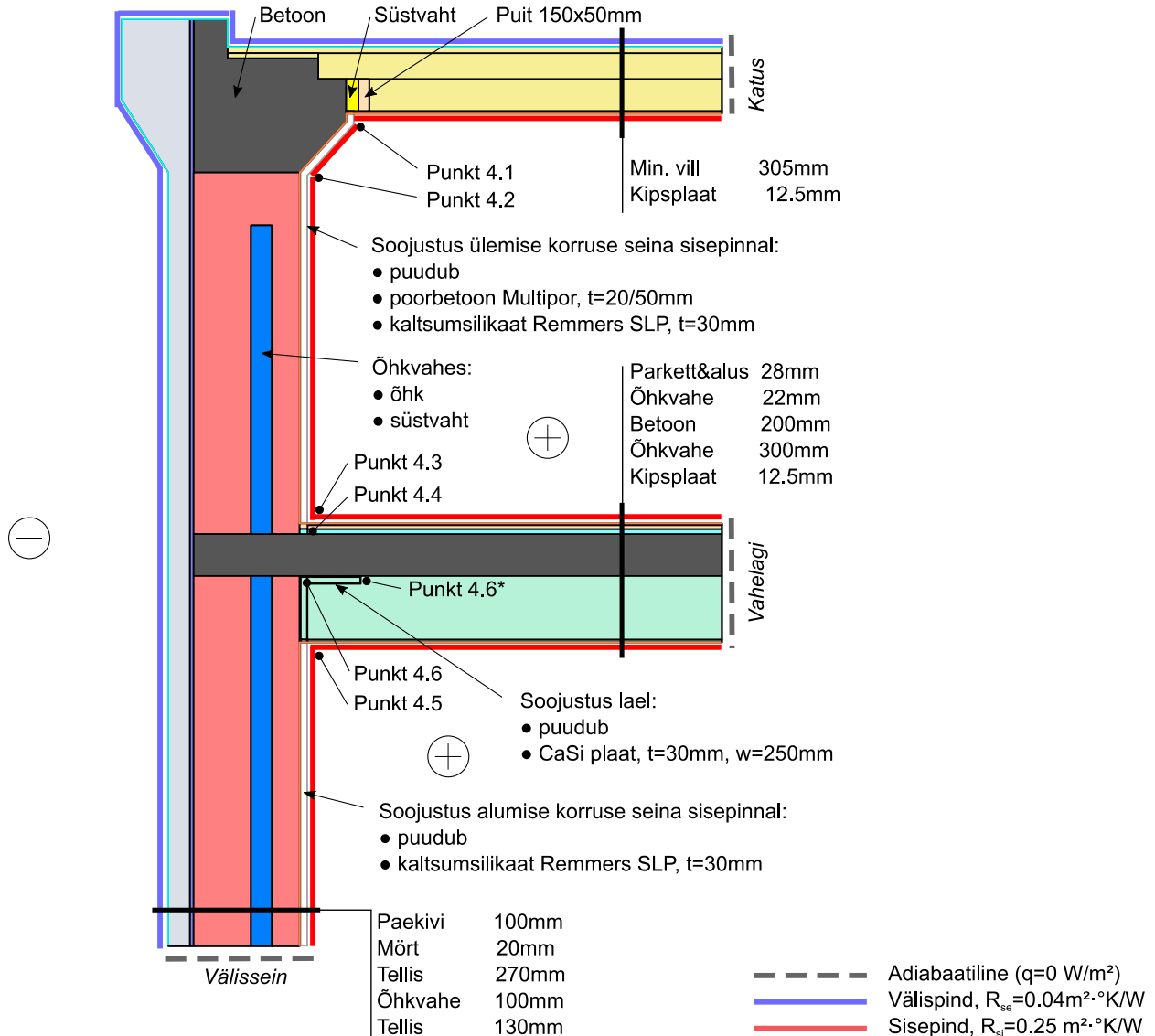
Tabel 5 annab sõlme arvutustulemused. Selgub, et nii süstvahuga täidetud õhkvahet kui täistelliseseina puhul ei ole temperatuuriindeks piisavalt madal, et oleks tingimata vaja siseseina soojustada. Samas betoonvöö puhul on see vajalik, seejuures tuleb jälgida, et soojustataks ruumid mõlemalt poolt siseseina (eelkõige juhul kui ruumides esineb niiskustootlus).

Tabel 5 Välissein-siseseina horisontaalsõlme soojuslevianalüüsi arvutustulemused.

Arvutusmudel		Temperatuuriindeks vaadeldavas punktis f_{Rsi} -		
		3.1	3.2	3.3
Süstvaht õhkvahes	Soojustamata sisesein, CaSi $t=30\text{mm}$ välisseina sisepinnal	0.83		0.83
	250mm laiuselt ühelt küljelt soojustatud sisesein, CaSi $t=30\text{mm}$ ühe ruumi välisseina sisepinnal	0.89	0.93	0.80
Õhkvaheta välissein (täistellis)	Soojustamata sisesein, CaSi $t=30\text{mm}$ välisseina sisepinnal	0.74		0.74
	250mm laiuselt ühelt küljelt soojustatud sisesein, CaSi $t=30\text{mm}$ ühe ruumi välisseina sisepinnal	0.84	0.91	0.73
Õhkvaheta välissein (betoonvöö)	Soojustamata sisesein, CaSi $t=30\text{mm}$ välisseina sisepinnal	0.62		0.62
	250mm laiuselt ühelt küljelt soojustatud sisesein, CaSi $t=30\text{mm}$ ühe ruumi välisseina sisepinnal	0.76	0.86	0.50

5.1.4. Välisseina viimase ja eelviimase korruse vertikaalsõlm

Välisseina viimase ja eelviimase korruse vertikaalsõlm võimaldab vaadelda mitmeid potentsiaalselt ohtlikke punkte (laenurk 4.1, betoonvöö 4.2, jne). 2016. aastal täiendati esialgset mudelit, et vaadelda ka punkte alumise korruse võimaliku ripplae taga (4.5 ja 4.6). Joonis 32 annab arvutusmudeli põhimõtteskeemi.



Joonis 32 Välisseina viimase korruse ja põranda vertikaalsõlme skeem tarkvaras Therm (eelviimase korruse ja vahelae konstruktsioon eelduslik).

Tabel 6 annab mudeli arvutustulemused. Soojustamata ja süstvahuga täidetud öhkvahe juhitudel on betoonvöö ja laenurga temperatuurindeks väga madal (0.56) ja sisepinnal täiendava soojustuse kasutamine on põhjendatud. 30mm CaSi valiti kui kompromiss kõrgema temperatuurindeksi ja võrreldes 50mm Multiporiga vähemate külmumistsüklite arvuga soojususe taga (tarkvaras Delphin tehtud arvutuste alusel). Täpsustatud 2016. aasta mudeliga arvutatud temperatuurindeksid näitavad, et kuigi hetkel valitud soojustuslahendus tegi olukorra alumisel korrusel marginaalselt (ripplae taga ja laenurgas langes f_{Rsi} 0.01 võrra) halvemaks, siis alumiste korruste soojustamisel on võimalik olukorda oluliselt soodsamaks muuta.



Tabel 6 Välisseina viimase ja eelviimase korruse vertikaalsõlme soojuslevianalüüsi arvutustulemused, poolpaksu kirjaga on tähistatud ehitatud lahendus.

Arvutusmudel	Temperatuurindeks vaadeldavas punktis f_{Rsi} , -					
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Soojustamata	0.56	0.56	0.75		0.75	
Süstvaht õhkvahe	0.56	0.56	0.78		0.76	
Multipor poorbetoon 50mm sisepinnal	0.83	0.81	0.75		0.70	
Süstvaht õhkvahe + Multipor poorbetoon 50mm sisepinnal	0.83	0.82	0.78		0.73	
Süstvaht õhkvahe + Multipor poorbetoon 20mm sisepinnal	0.77	0.74	0.77		0.74	
Süstvaht õhkvahe + CaSi 30mm sisepinnal	0.77	0.74	0.78		0.74	
2016 Soojustamata	0.56	0.56	0.70	0.67	0.67	0.75
2016 Viimane korrus soojustatud (süstvaht + 30mm CaSi)	0.79	0.71	0.83	0.70	0.66	0.74
2016 Viimane + eelviimane korrus soojustatud	0.79	0.71	0.84	0.72	0.73	0.89
2016 Viimane + eelviimane korrus + eelviimase korruse lagi soojustatud	0.79	0.71	0.83	0.69	0.83	0.90

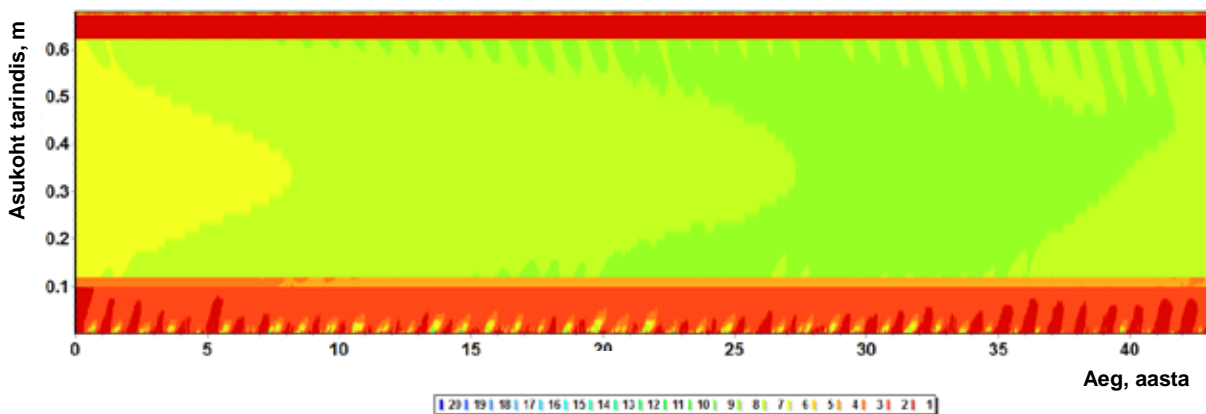
5.2.1 etapp: esmased SÕN arvutused ja renoveerimislahenduse valik

5.2.1. Üldist

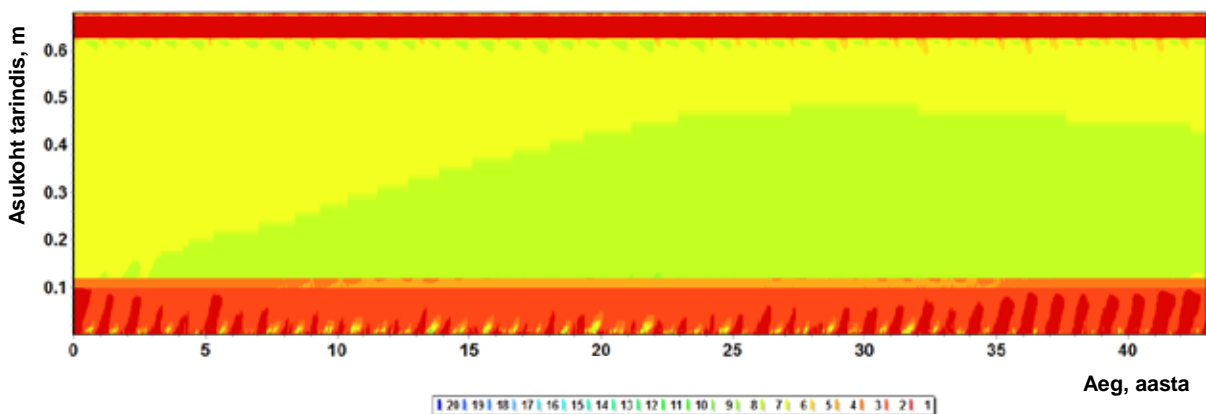
Läbiva betoonikihiga arvutusmodeli tulemused olid kriitilisemad kui sidekiviga müüritist käsitlevas mudelis. Lihtsuse huvides on esitatud vaid läbiva betoonikihi lõikest koostatud arvutusmodeli tulemused.

5.2.2. Tarindi niiskussisaldus

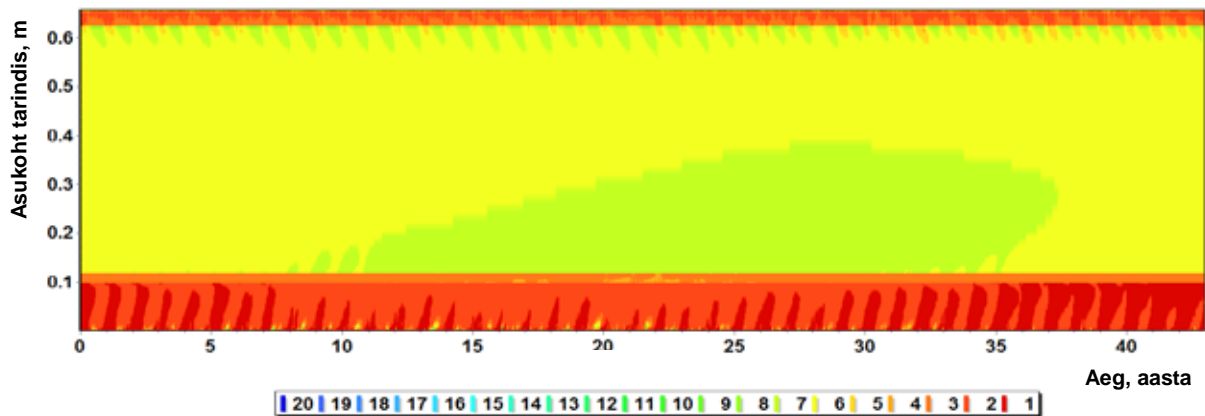
Erinevate soojustussüsteemide mõju tarindi niiskusrežiimile saab ilmestada materjali niiskussisaldusega. Terve 1-dimensioonilise seinamudeli niiskussisaldused annavad joonised Joonis 33 kuni Joonis 35. XPS puhul on kolmest võrreldud lahendusest niiskussisaldus kõrgeim. Seejuures on oluline, et kõrgemad tasemed on nii esialgse tarindi sise- kui välispinna lähedal – see tähendab, et vaatamata materjali suhtelisele aurutihedusele, on sisekliimal siiski seos tarindi niiskusrežiimiga. Multipor ja CaSi lõigus oli niiskustasemed madalamad, kuid Multipori puhul kuivab pärast suuremate vihmakoormustega aastaid betooniosa aeglasemalt välja. Arvutustulemustest on näha, et difusioonile avatud ja n.ö. kapillaaraktiivsete soojustussüsteemide (CaSi, Multipor) puhul on betoonikihi seespoolne osa kuivem kui veeaurtiheda soojustuse (XPS) korral.



Joonis 33 Tarindi veesisaldus (%V) 50mm XPS lisasoojustusega tarindis.



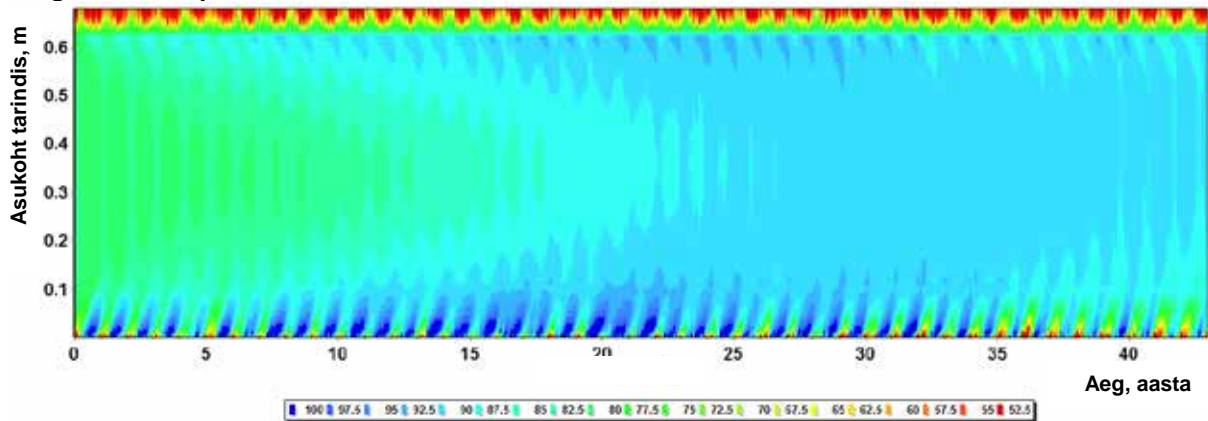
Joonis 34 Tarindi veesisaldus (%V) 50mm Multipor lisasoojustusega tarindis



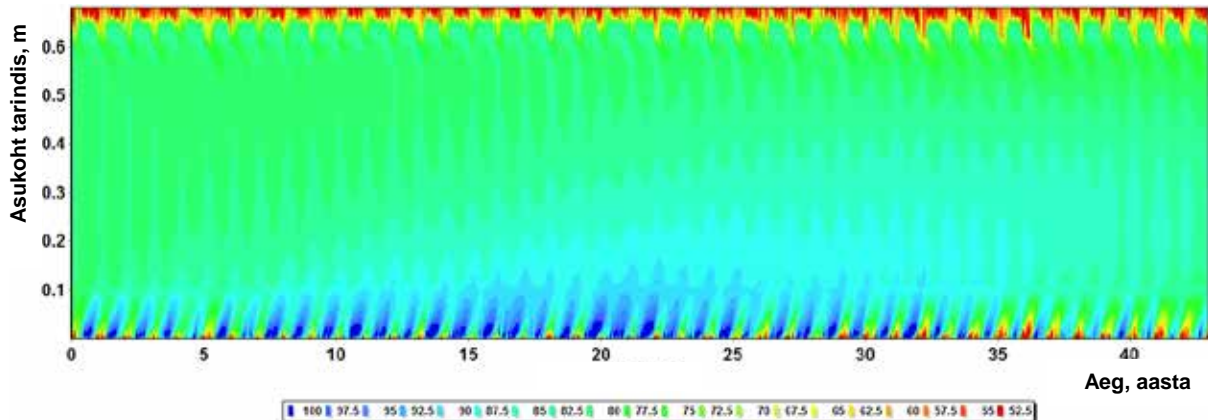
Joonis 35 Tarindi veesisaldus (%V) 30mm CaSi lisasoojustusega tarindis.

5.2.3. Suhteline niiskus

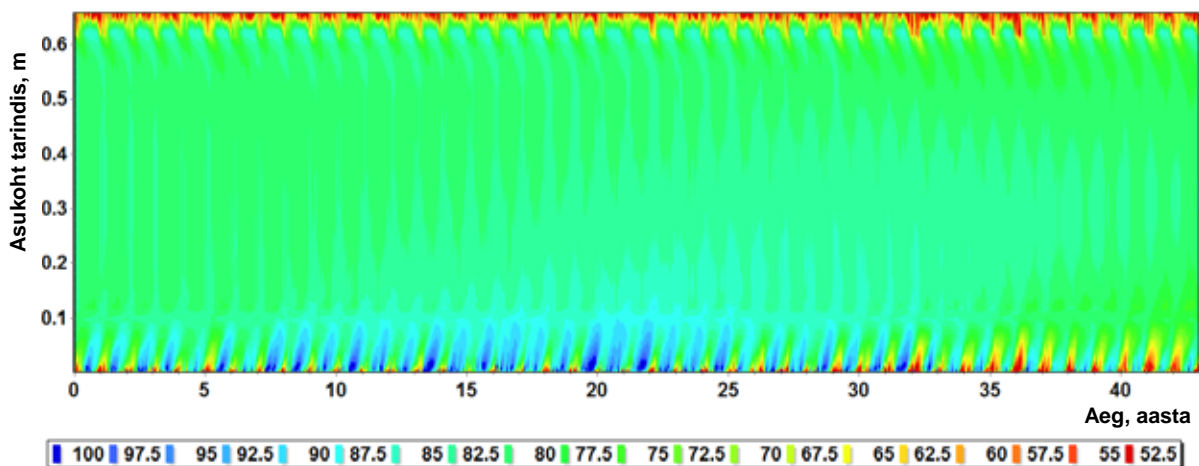
Välisseina ülaosa (betoontala) erinevate lisasoojustuslahenduste mõju tarindi suhtelisele niiskusele annavad Joonis 36 kuni Joonis 38. On näha, et XPS soojustussüsteemi kasutades on suhteline niiskus betooni kihi sees stabiilne, aasta lõikes on kõikumise amplituud ~2%RH ning terve arvutusperioodi jooksul muutub vahemikus 80-91%RH. Niiskusallikad on nii sise- kui väliskeskond, paekivist väliskihi suhteline niiskus on seejuures palju ebastabiilsem kuivades ning niiskudes pidevalt uuesti. Sarnaselt materjali veesisalduse tulemustele, on ka suhtelise niiskuse tasemed XPS soojustuse puhul terve tarindi lõikes kõrgemad kui CaSi ja Multipor soojustuse korral. Samuti on näha toapoolses betoonikihis niiskuse akumulatsiooni. See vihjab viimaste CaSi ja Multipor soojustussüsteemide madalamale soojus- ja aurutakistusele ning kõrgemale veejuhtivusele.



Joonis 36 XPS lisasoojustus (t=50mm): suhteline niiskus (%RH) tarindi betoonseinaosa erinevates kihtides 43-aasta reaalse kliima puhul.

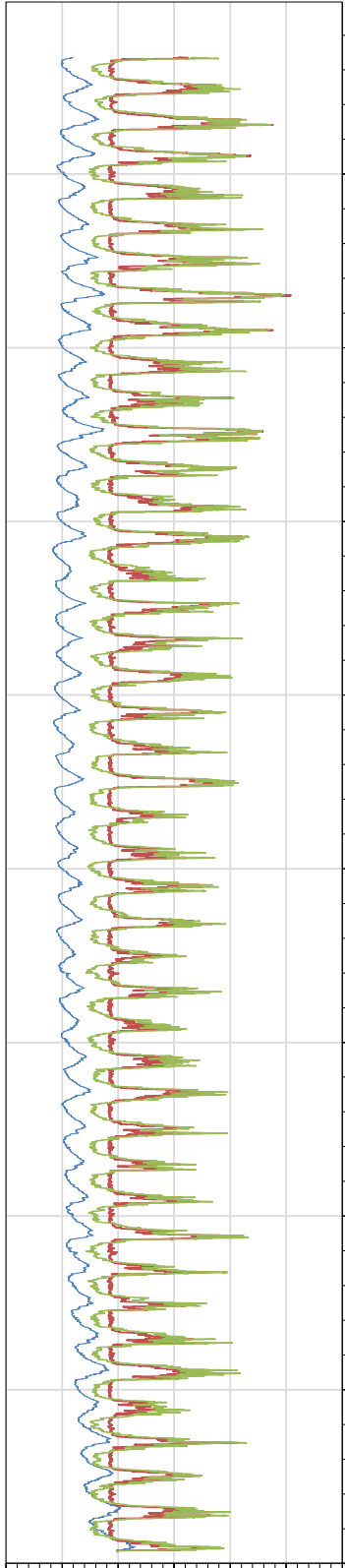


Joonis 37 Multipor lisasoojustus ($t=50\text{mm}$): suhteline niiskus (%RH) tarindi betoonseinaosa erinevates kihtides 43-aasta reaalse kliima puhul.

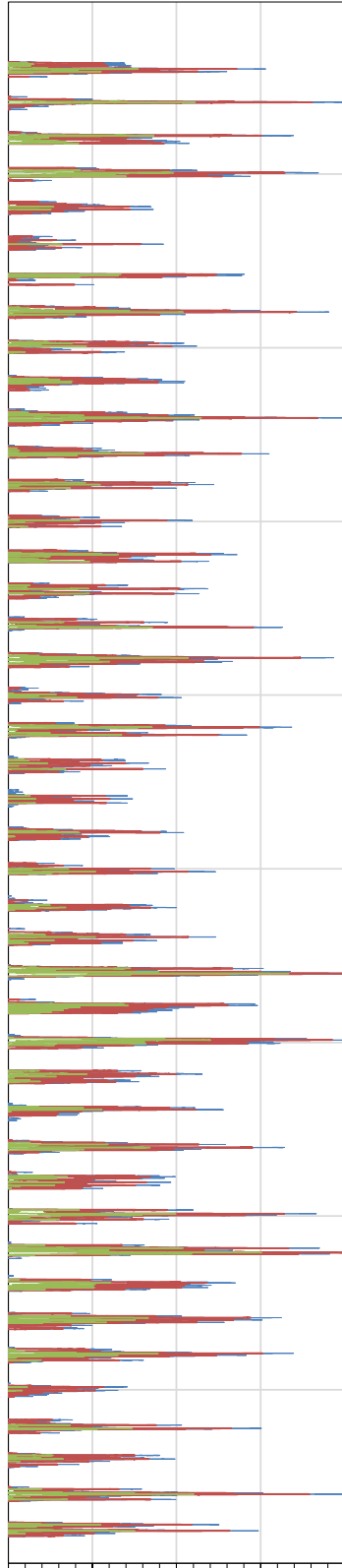


Joonis 38 CaSi lisasoojustus ($t=30\text{mm}$): suhteline niiskus (%RH) tarindi betoonseinaosa erinevates kihtides 43-aasta reaalse kliima puhul.

Lisasoojustuskihi taga asuvas pinnas valitsevad suhtelise niiskuse tasemed annab täpsemalt Joonis 39. XPS puhul on taas RH kõrgeim, püüdes talveperioodidel 90%RH piirimail. Multipor ja CaSi kõrgeimad RH tasemed on piiratud materjalide suure niiskusmahtuvusega. Nendest tasemetest kõrgemaks RH uuritud tingimustel ei tõuse, mis näitab, et kapillaaraktiivne soojustus toimib vastavalt oma eesmärgile ning toimivuse piire pole ületatud. Tuginedes varasematele kogemustele (Klõšeiko & Kalamees 2013; Klõšeiko 2014) võib eeldada, et eksploatatsioonis on hügroskoopsusest ja kapillaarsest veejuhtivusest tingitud stabiilne RH tase arvutustulemustest mõnevõrra kõrgem.



Joonis 39 Suhteline niiskus soojustuskihi taga erinevate isasoojustussüsteemide puhul.



Joonis 40 Temperatuur soojustuskihi taga erinevate isasoojustussüsteemide puhul.

5.2.4. Temperatuur

Joonis 40 annab temperatuurid seespoolse lisasojustuskihi taga. Arvutustulemus pikaajaliste kliimaandmetega näitab, et betoontarindis ei täideta eelkõige kapillaaraktiivsete materjalide puhul tähtsat jäätumise vältimise kriteeriumi. Selle kohta annab infot Tabel 7. 30mm CaSi soojustus on tingituna oma madalamast soojustakistusest võrreldes 50mm Multiporiga turvalisem valik, kuna kriteeriumi rikkuvaid aastaid on sel juhul üle 3 korra vähem (CaSi puhul 8 ja Multipori puhul 29 43-st).

Tabel 7 Külumise vältimise kriteeriumi täitmise võrdlus soojustussüsteemide vahel.

	Soojustussüsteem		
	XPS t=50mm	Multipor t=50mm	CaSi t=30mm
Aastaid, mil kriteeriumi ei täidetud:	35*	29	8
Kriteeriumi mittetäitmise aastate osakaal 43-st aastast:	81%*	67%	19%
Võimalikke soojustussüsteemi külumistsükleid:	113*	68	10

* XPS süsteemi puhul ei ole soojustuse külumise vältimise kriteerium määrav, kuid on tabelis antud süsteemide omavaheliseks võrdlemiseks.

5.2.5. Järeldused ja soojustuslahenduse valik

Arvutustulemustest selgub, et aurutiheda ja kõrgema soojustakistusega 50mm-paksuse XPS soojustuse tagajärjeks on niiskem ja külmem esialgne konstruktsioon, mis omakorda võib suurte kaldvihmakormuste korral põhjustada külmakahjustuste intensiivistumist. Difusioonile avatud n.ö. kapillaaraktiivsed materjalid näitasid esialgse seina osas kõrgemaid temperatuure ja madalamat niiskussisaldust.

Nii 50mm Multipor kui 30mm CaSi ei täitnud teatud aastatel jäätumise vältimise kriteeriumi, põhjuseks esialgse seina (läbiv betoon) madal soojustakistus. Kuna eesmärk on pakkuda ruumide kasutajatele tervislikku töökeskkonda, siis on soojustamine vajalik. Kuna CaSi puhul oli võimalik tagada kriitilistes punktides ruumi sisepinnal piisavalt kõrge temperatuur ning samas oli külumise vältimise kriteeriumi rikutud Multiporiga võrreldes oluliselt vähem, valiti betoonosa katmiseks 30mm-paksune CaSi soojustus. Et vältida astet seinas ja vähendamaks tellismüüritise sidekiviridadest põhjustatud külmasildu, nähti ette CaSi soojustusega katta lisaks betoonile ka alumine tellismüüritiseosa. Valitud lahenduse annavad Joonis 4 ja Joonis 5.

5.3. II etapp: SÕN mudeli kalibreerimine mõõtmistulemuste põhjal

5.3.1. Kalibreerimisprotsess

Mudelite kalibreerimiskäik oli järgmine: laboratoorselt (telliskivi) ja tootja andmelehtede (süstvaht) järgi määratud materjalomaduste põhjal valiti programmi andmebaasist sobivaid vasteid; seejärel kasutati materjale arvutusmudelites ning võrreldi tulemusi mõõdetud tulemustega. Süstvahu omadusi muudeti vastavalt tootja väljatoodud parameetritele. Allpool on esitatud parima korrelatsiooni saavutanud tulemused (kasutatud materjalid ja omadused annab Tabel 2).

5.3.2. Seinä põhiosa (1D ja 2D mudelid)

Üldist

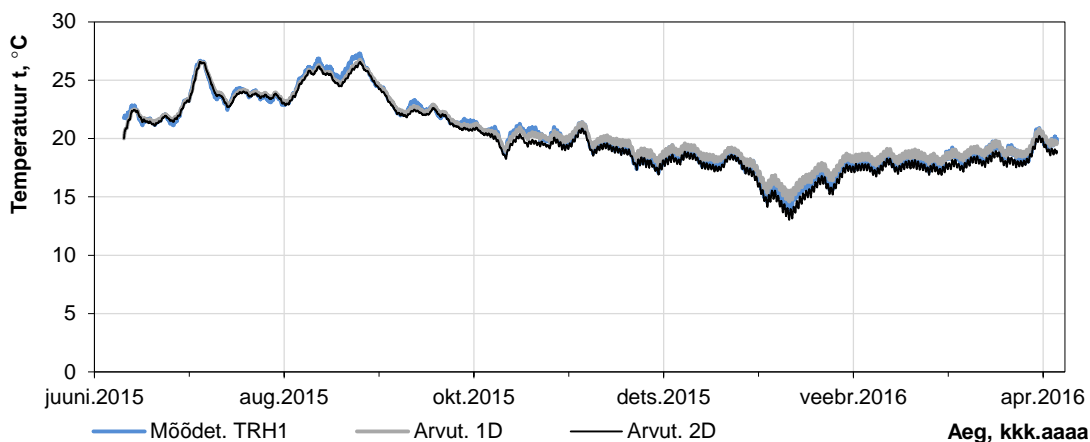
Kuna uuritud tarind pole homogeenne vaid koosneb erinevatest sise- ja välispinnaga paralleelsetest ja risti asetsevatest kihtidest, võrreldi mõõtmistulemustega erinevaid modelleerimisvariante. 1D mudelite kasutamine on kiirem, kuid tõenäoliselt ebatäpsem, 2D mudel võtab paremini arvesse reaalselt konstruktsiooni ning niiskuse ja soojuste liikumist selles, kuid on mitmekordselt ajamahukam.

1D mudelid koostati a) sidekividevahelises lõigus (süstvahuga täidetud õhkvahe keskel, vt Joonis 8) ja b) sidekivilõigus (läbiv tellis, vt Joonis 9). 2D mudel hõlmab mõlemat lõiku (vt Joonis 10).

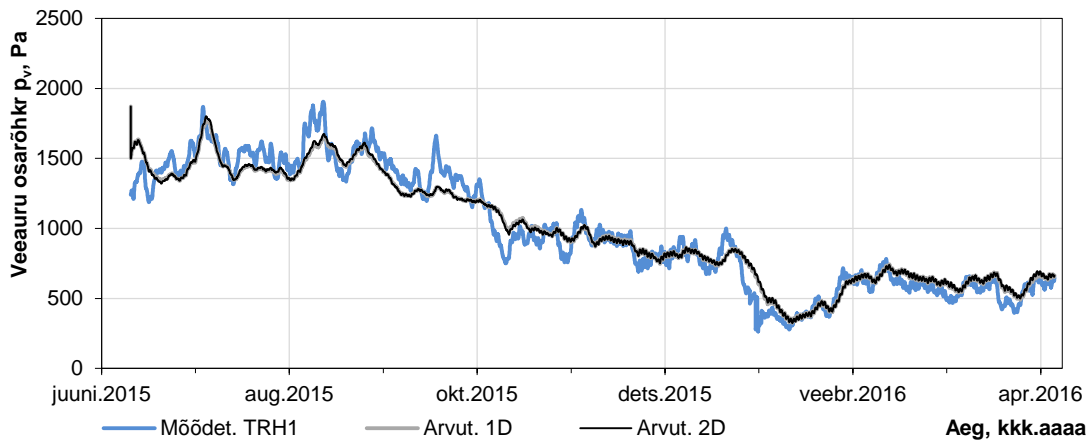
Sidekividevaheline osa (süstvahuga täidetud õhkvahe keskel)

TRH1 - CaSi soojustuse ja sisemise tellisekihi vahel

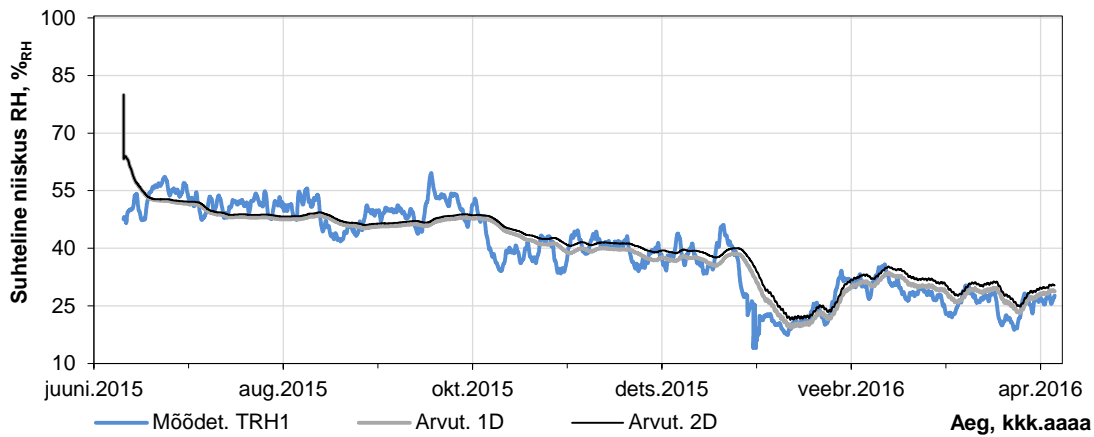
Korrelatsioon mõõdetud ja arvutatud tulemuste vahel on väga hea (vt Joonis 41 kuni Joonis 44). Vahetult CaSi soojustuse taga asuva kihi olukorda kujundab eelkõige hoone sisekliima. Kuna sidekivid on antud mõõtepunkti suhteliselt kaugel ja tellis ning süstvaht on omavahel aurujuhtivuselt sarnased, siis suudab selles punktis toimuvat niiskuslikku olukorda hästi modelleerida ka 1D mudel. Soojuslikult on sidekivide mõju siiski olemas – soojusvoog on 1D mudeli puhul ~20% võrra alahinnatud, samas kui 2D mudel suudab olukorda täpselt hinnata.



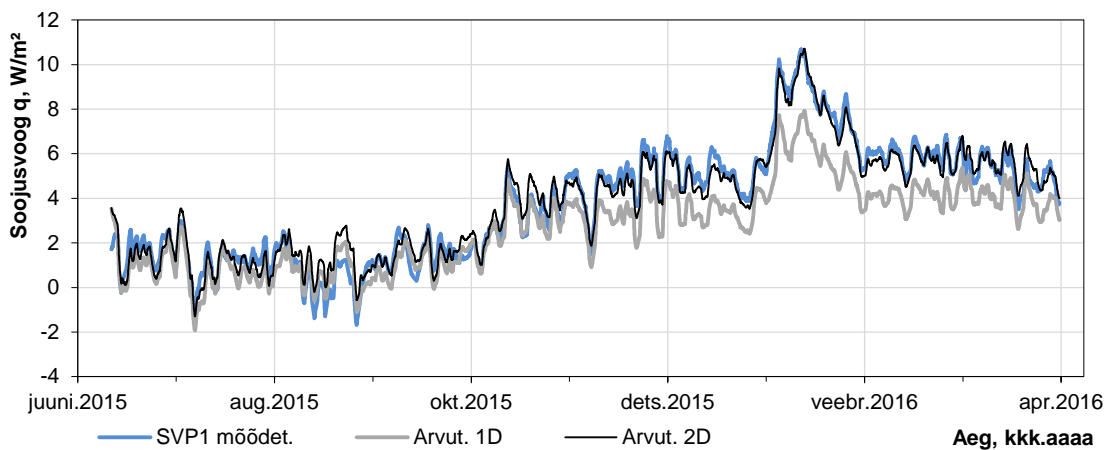
Joonis 41 Mõõdetud ja arvutatud temperatuurid sisemise tellisekihi ja CaSi soojustuse vahel (TRH1).



Joonis 42 Mõõdetud ja arvutatud veeauru osarõhud sisemise tellisekihi ja CaSi soojustuse vahel (TRH1).



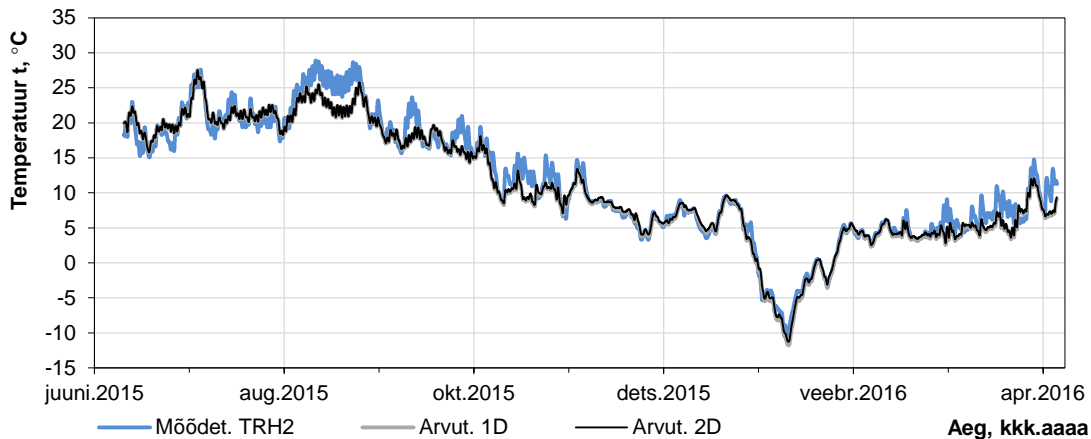
Joonis 43 Mõõdetud ja arvutatud suhtelised niiskused sisemise tellisekihi ja CaSi soojustuse vahel (TRH1).



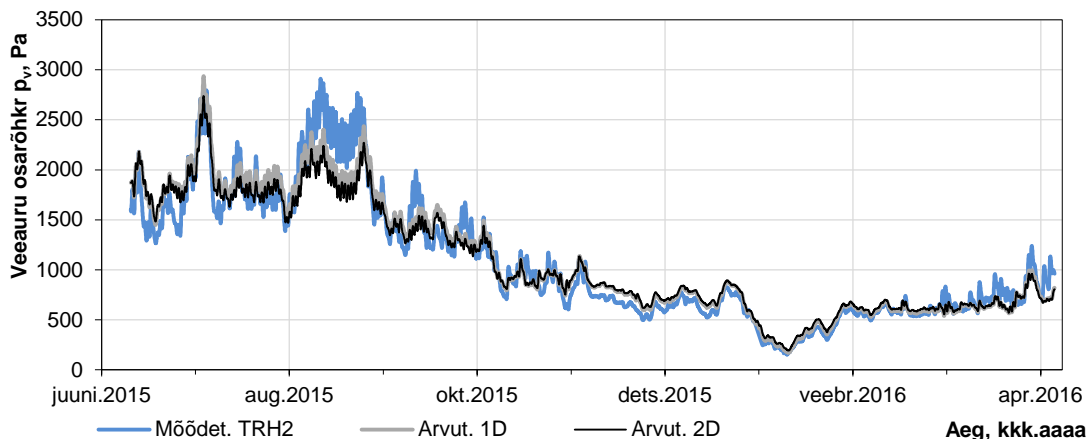
Joonis 44 Mõõdetud (SVP1) ja arvutatud soojusvood seina sisepinnal (sidekividevaheline lõik).

TRH2 – süstvahu ja välise tellisekihi vahel

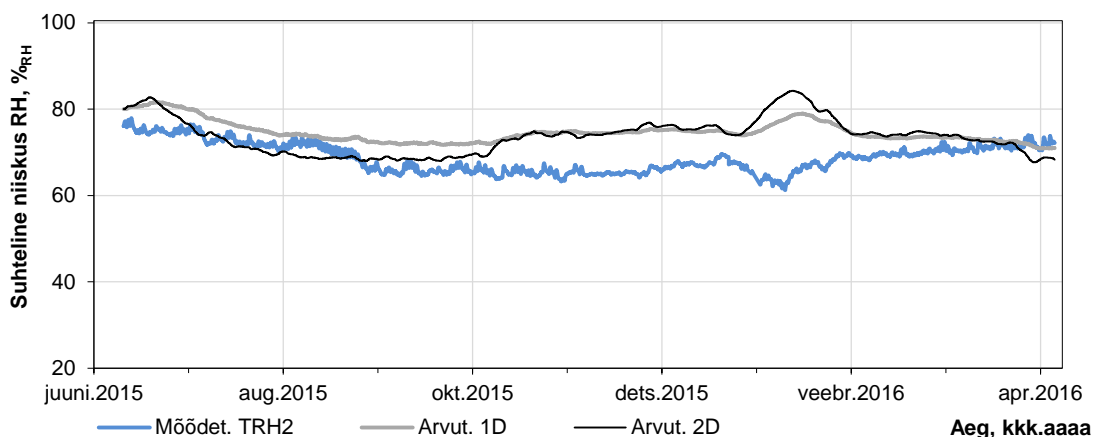
Soojuslikult on korrelatsioon selles punktis hea (Joonis 45). Mõningased puudujäägid on suvisel perioodil, mida võib põhjustada kiirgusandmete päritolu (Tõravere). Niiskuslikult (Joonis 46 ja Joonis 47) ülehindavad nii 1D kui 2D mudel talvisel perioodil veeauru osarõhke ja suhtelisi niiskusi viidates puudustele nt paekivi omadustes ja vihmakoormuse täpses hindamises. Tekkinud viga on tagavara kasuks.



Joonis 45 Mõõdetud ja arvutatud temperatuurid süstvahu ja välise tellisekihi vahel (TRH2).



Joonis 46 Mõõdetud ja arvutatud veeauru osarõhud süstvahu ja välise tellisekihi vahel (TRH2).

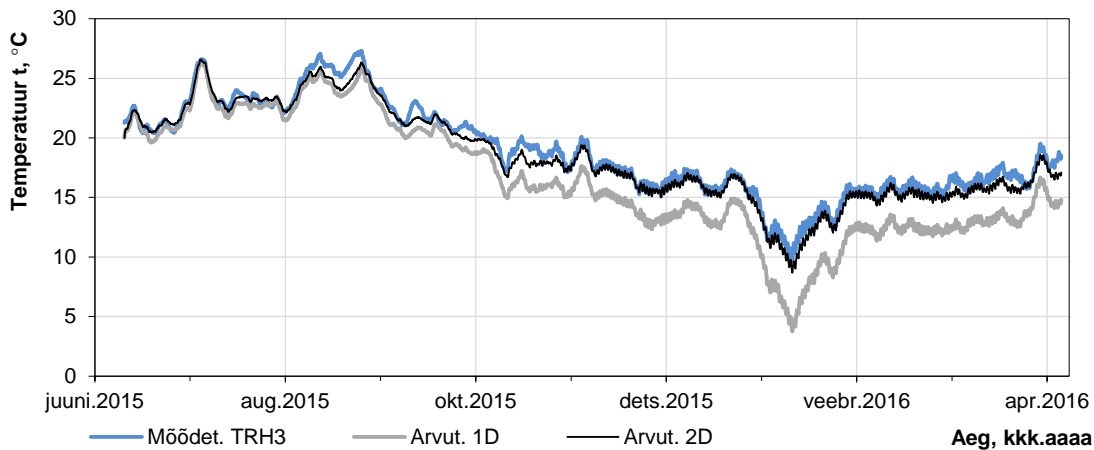


Joonis 47 Mõõdetud ja arvutatud suhtelised niiskused süstvahu ja välise tellisekihi vahel (TRH2).

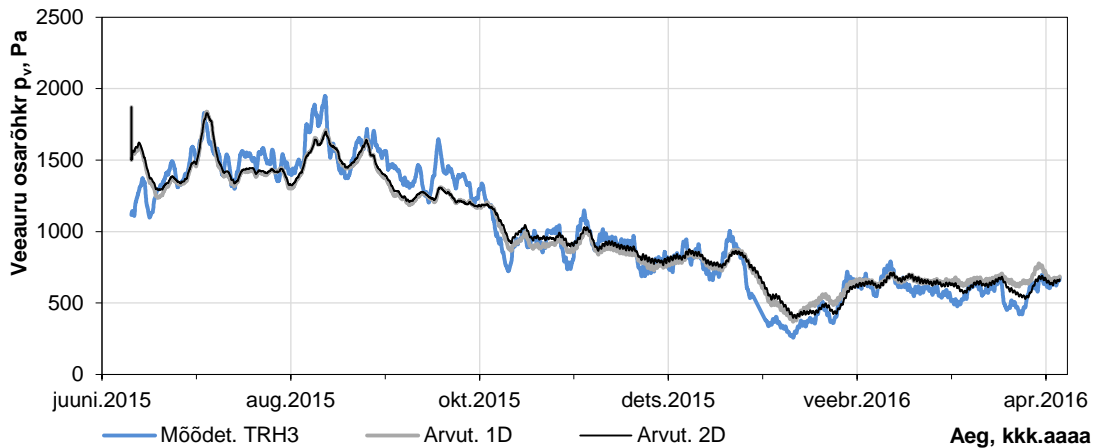
Sidekilõik

TRH3 – CaSi soojustuse ja sidekivi vahel

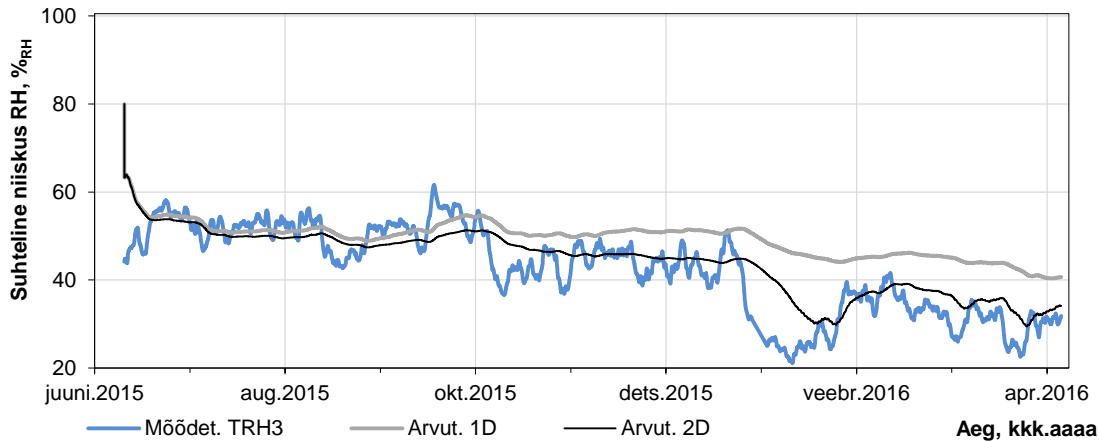
Sidekivi sisepinnal väljendub 2D ja 1D mudeli suurim erinevus – nii temperatuurid (Joonis 48) ja soojusvood (Joonis 51) on tervikliku mudeli puhul heas korrelatsioonis mõõdetud tulemustega, samas kui 1D mudelil on temperatuurid alahinnatud ja soojusvoog ca 1.5 kordselt ülehinnatud. Veeauru osarõhud (Joonis 49) on nii 1D kui 2D mudelil sarnased ning suhteline niiskus (Joonis 50) väljendab 1D mudeli puhul alahinnatud temperatuuri põhjustades reaalsest kõrgemaid väärtusi.



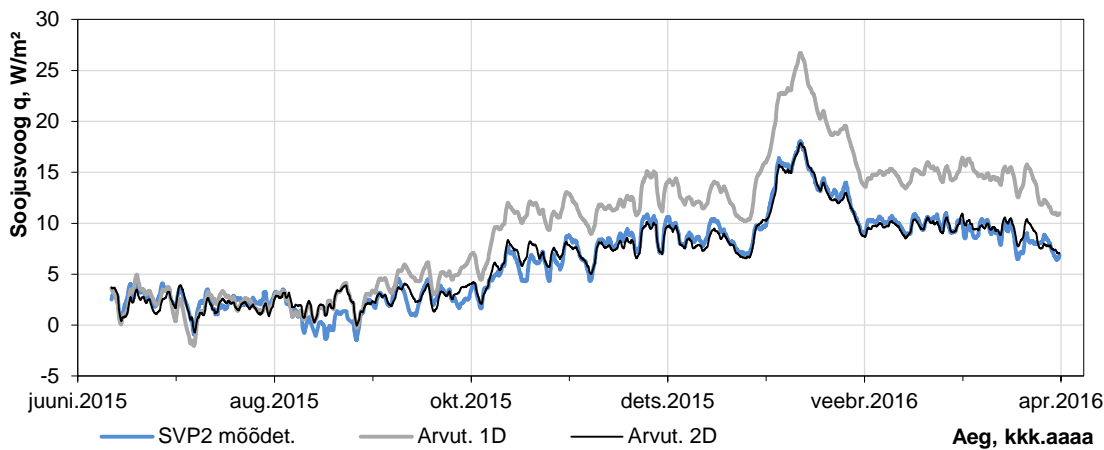
Joonis 48 Mõõdetud ja arvutatud temperatuurid CaSi soojustuse ja sidekivi vahel (TRH3).



Joonis 49 Mõõdetud ja arvutatud veeauru osarõhud CaSi soojustuse ja sidekivi vahel (TRH3).



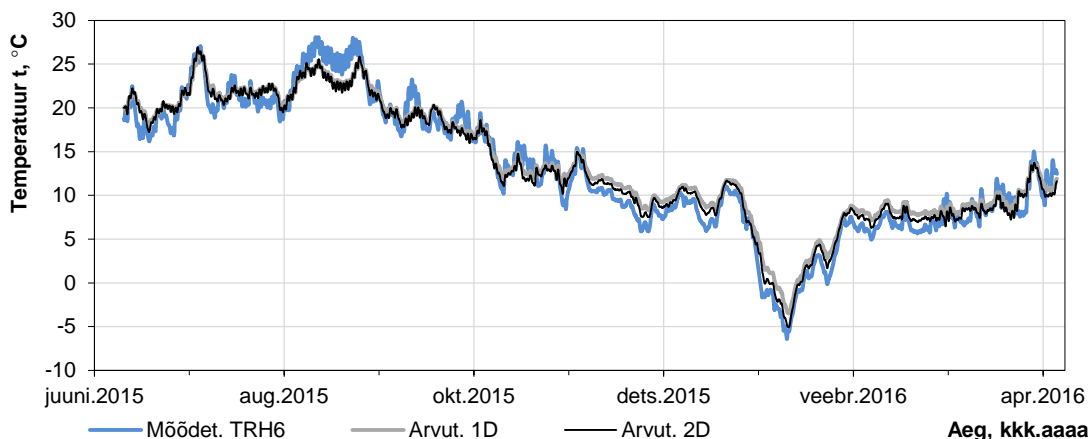
Joonis 50 Mõõdetud ja arvutatud suhtelised niiskused CaSi soojustuse ja sidekivi vahel (TRH3).



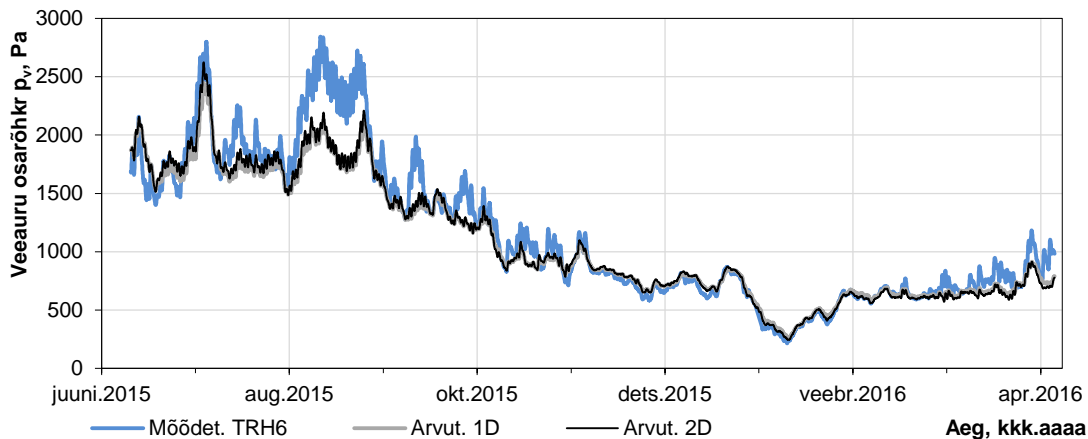
Joonis 51 Mõõdetud (SVP2) ja arvutatud soojusvood seina sisepinnal (sidekivide kohal).

TRH6 – sidekivi sees (välise tellisekihi poolel)

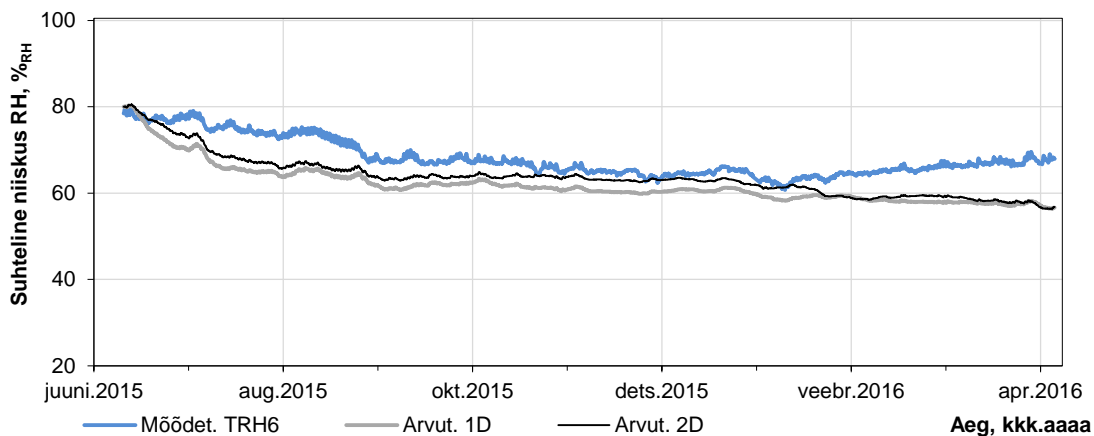
Soojuslikult (Joonis 52) on nii lihtsustatud kui detailne mudel talvisel perioodil mõnevõrra mittekonservatiivsed (viga 1D mudelil $\sim 2^{\circ}\text{C}$ ja 2D mudelil $\sim 1^{\circ}\text{C}$). Veeauru osarõhud (Joonis 53) on talvisel perioodil mõlema mudeli puhul suhteliselt täpsed, samas ülejäänud ajal alahinnatud (ebasoodne viga). Temperatuuri ja veeauru osarõhkude vead summeeruvad suhtelise niiskuse arvutamisel (Joonis 54) ning parim korrelatsioon on 2D mudelil.



Joonis 52 Mõõdetud ja arvutatud temperatuurid sidekivi sees välise tellisekihi poolel (TRH6).



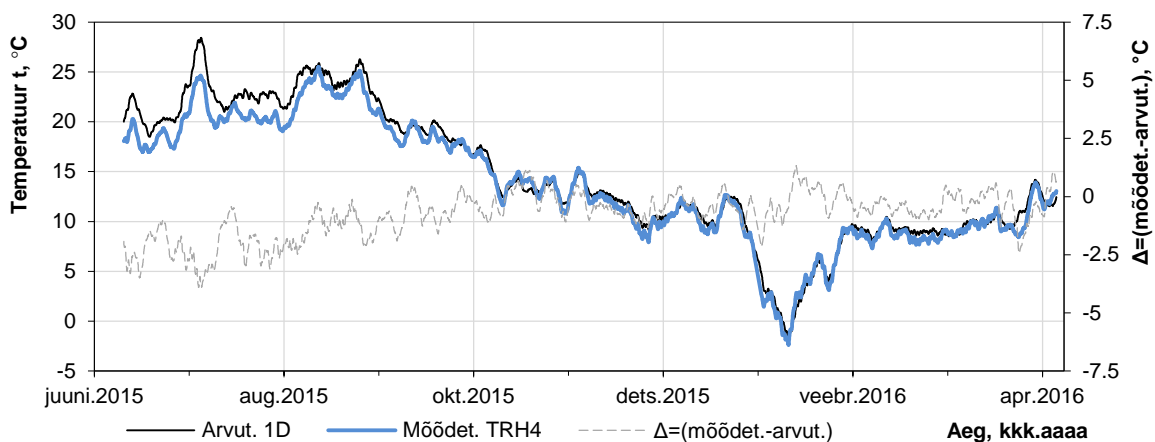
Joonis 53 Mõõdetud ja arvutatud veeauru osarõhud sidekivi sees välise tellisekihi poolel (TRH6).



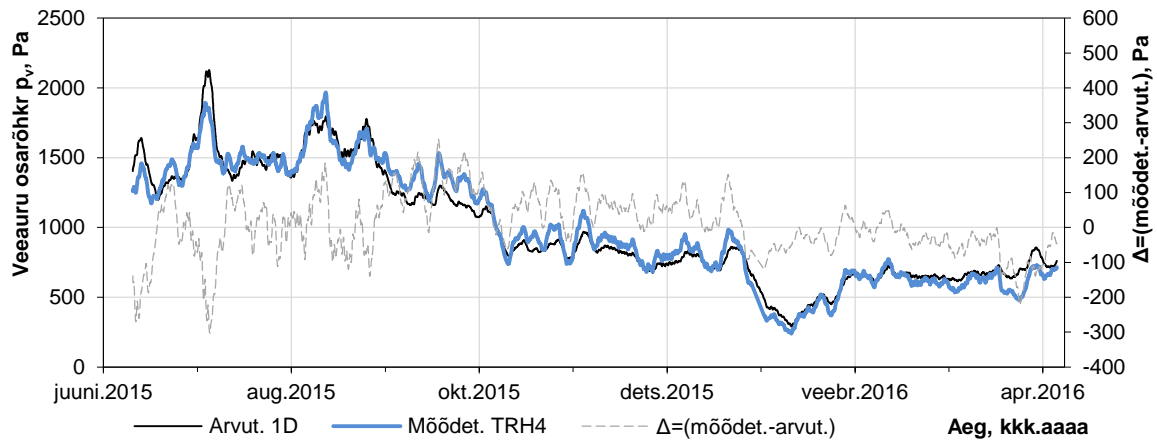
Joonis 54 Mõõdetud ja arvutatud suhtelised niiskused sidekivi sees välise tellisekihi poolel (TRH6).

5.3.1. Soojustatud betoonvöö seina ülemises osas (1D mudel)

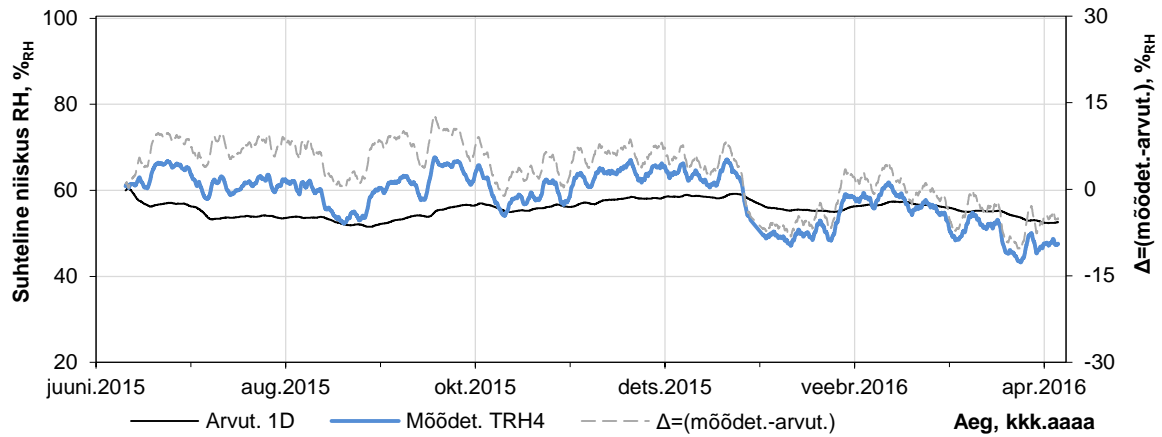
Tarindi lihtsam geomeetria võimaldab kasutada 1D mudelit, vt Joonis 12. Arvutatud temperatuuride (Joonis 55) korrelatsioon on talvisel perioodil hea, jäädes talvisel perioodil 0...1°C vahele. See viitab, et kuigi tarindit ei avatud, siis tõenäoliselt on massiivse konstruktsiooni eeldus õige. Suhtelise niiskuse tasemed (Joonis 57) on arvutuslikult stabiilsemad kui mõõdetult, uuritud perioodi esimesel poolel kuni ca 10%_{RH} madalamad kui mõõdetud, samas talvisel ja perioodi teisel poolel mõõdetuga kattuvad või mõnevõrra kõrgemad.



Joonis 55 Mõõdetud ja arvutatud temperatuurid betooni ja CaSi soojustuse vahel (TRH4).



Joonis 56 Mõõdetud ja arvutatud veeauru osarõhud betooni ja CaSi soojustuse vahel (TRH4).



Joonis 57 Mõõdetud ja arvutatud suhtelised niiskused betooni ja CaSi soojustuse vahel (TRH4).

5.4. III etapp SÕN arvutused 1970...2012 aastate väliskliimaga

5.4.1. Üldist

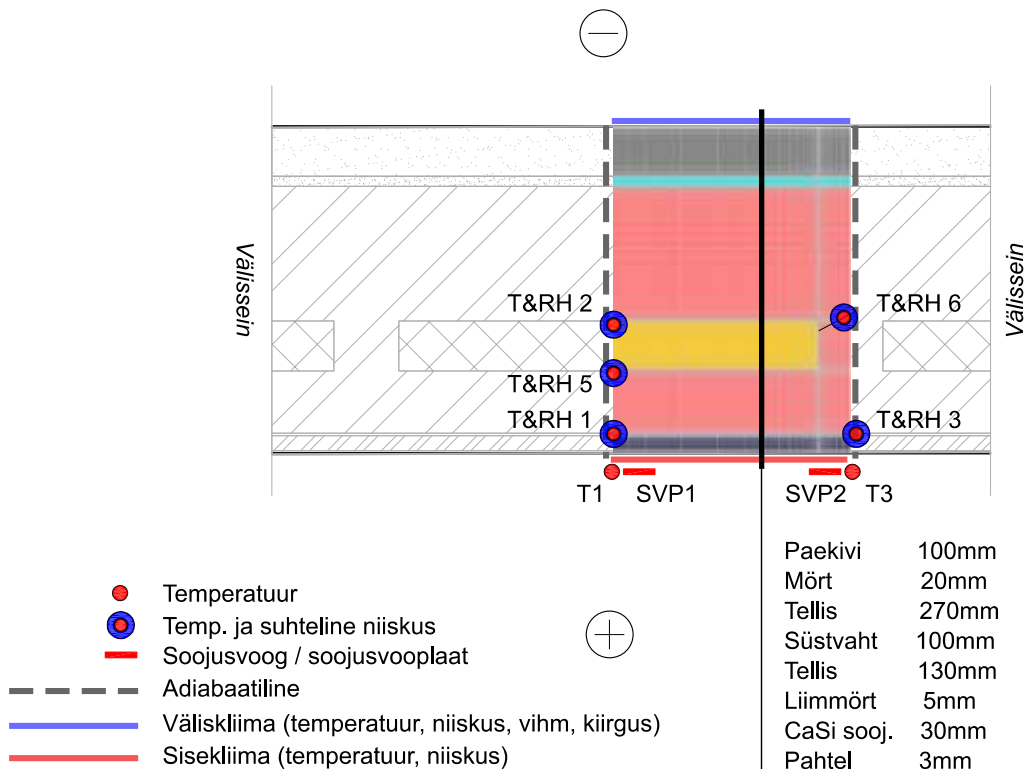
Arvutustes kasutati 42 aasta kliimaandmeid ning arvutustulemused on seetõttu mahukad. Nendest parema ülevaate saamiseks leiti iga arvutusaasta (alguse ja lõpuga 1. juunil) minimaalsed temperatuurid ja maksimaalsed suhtelised niiskused. Kõige kriitilisem aasta esitatakse mõlema parameetri eraldi graafikul.

Analüüsi käigus selgus, et hoone 4-st küljest on kriitilisimad põhja- ja läänesuunas orienteeritud seinad. Põhjasuunas on seinale paistev päikesekiirgus minimaalne ning läänesuunal on suurim vihmakoormus. Võimaliku sisetemperatuuri muutuse mõju väljaselgitamiseks uuriti nii mõõdetud sisekliima alusel koostatud sisetemperatuuri mudelit kui 1 kraadi võrra alandatud temperatuurigraafikut. Kuna tarkvaras Delphin on võimalus kasutada ka jää mõju modelleerimist, on selle mõju väljaselgitamiseks tehtud läänepoolse seina kohta lisaks arvutus jäämudeliga. Esitatud on arvutused erinevate kombinatsioonidega eelloetletud teguritest.

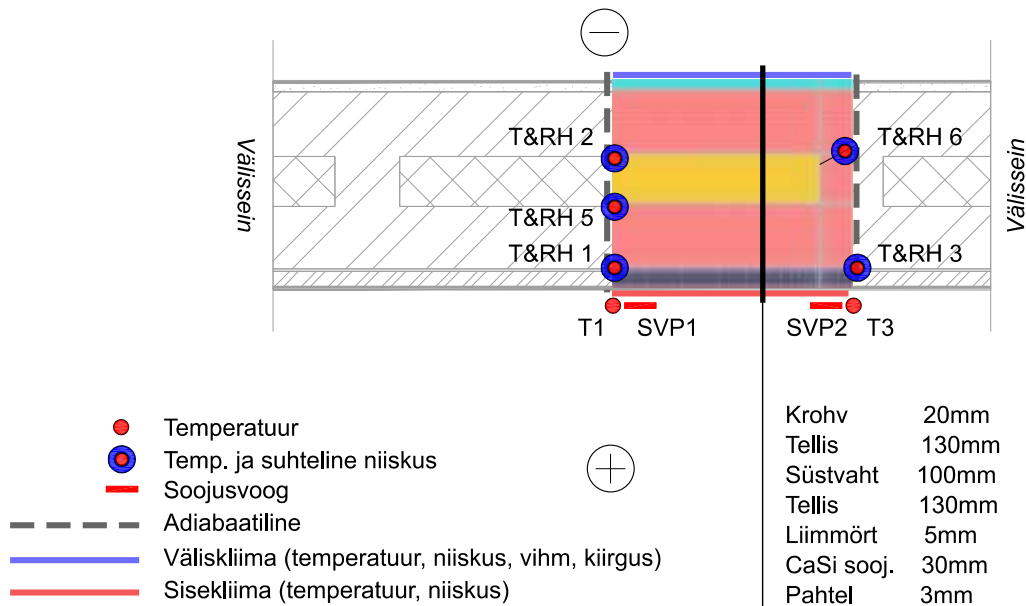
5.4.2. Sein 2D horisontaallõige

Üldist

Modelleerimisel kasutati 2D mudeleid. Lisaks kalibreerimisel kasutatud seinamudelile (vt Joonis 58) uuriti ka põhjapoolset õhemat ja paekivikatteta 38cm-paksust seina (Joonis 59).



Joonis 58 Kalibreerimisel ja pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (II ja III etapp) kasutatud välisseina põhiosa 2D arvutusmudeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.

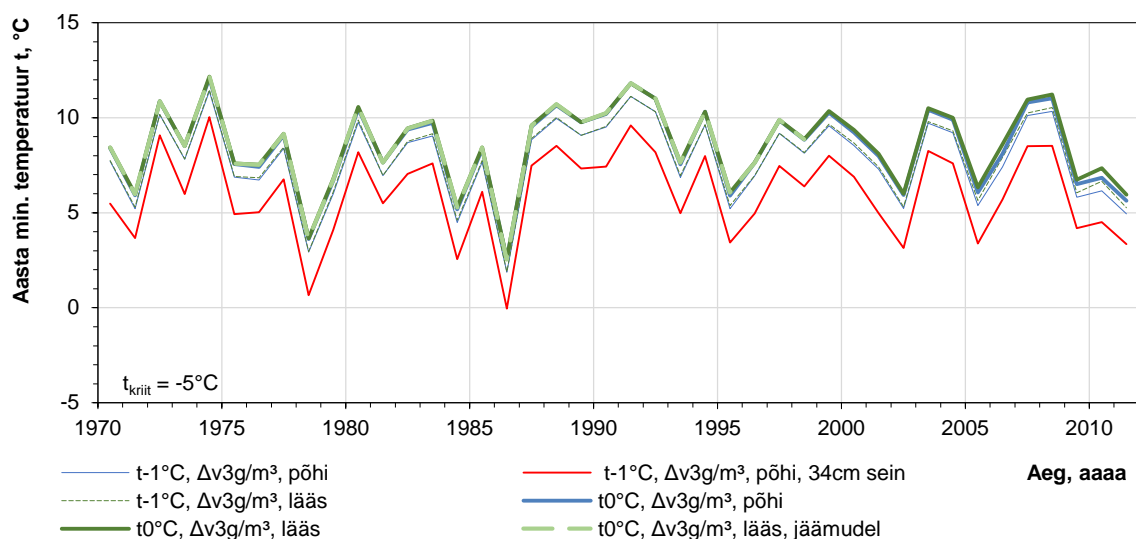


Joonis 59 Pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (III etapp) kasutatud põhjapoolse õhema 38cm-paksuse välisseina põhiosa 2D arvutusmudeli skeem SÕN tarkvaras Delphin (NB: eeldatav konstruktsioon).

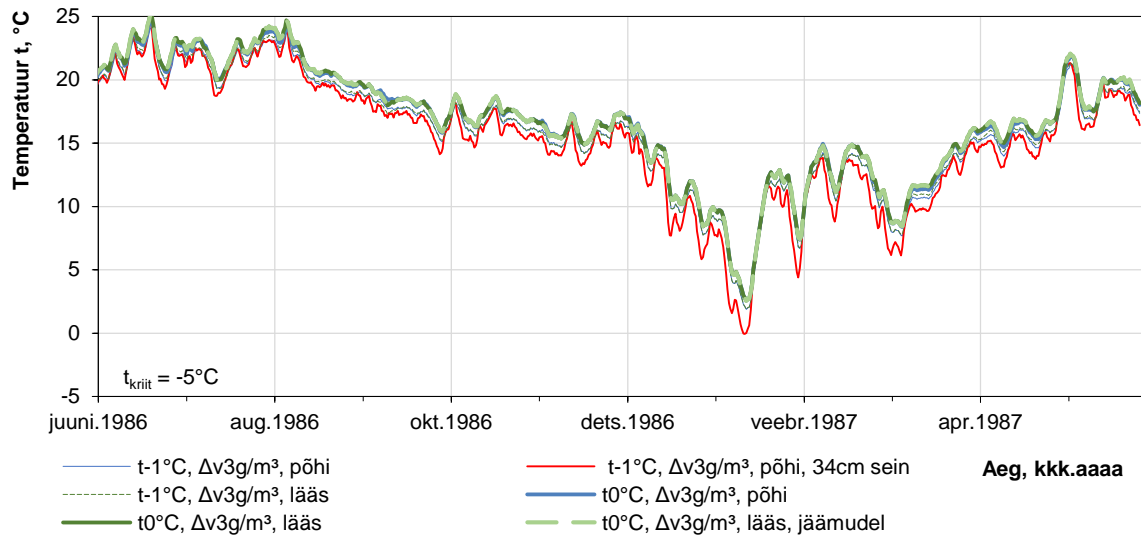
TRH3 – CaSi soojustuse ja sidekivi vahel

TRH3 on seina põhiosa kriitilisim punkt CaSi soojustuse taga. Joonis 60 annab minimaalsed temperatuurid selles punktis aastate lõikes. Selgus, et kriitilisim oli aasta 1986/1987 (Joonis 61).

Ilmakaarel ja jäämudelil puudub oluline mõju. Rohkem määras sisetemperatuuri langetamine – 1 kraadi võrra madalam sisetemperatuur mõjutab temperatuuri soojustuse taga ~0.8 kraadi. Põhjapoolne 38cm paks sein on baasvariandist ($t=0^{\circ}\text{C}$, $\Delta v=3\text{g}/\text{m}^3$, läänesuund) ca 2.5 kraadi külmem. Kuigi minimaalsed temperatuurid langevad 0°C -ni, on toimivuse piirini -5°C siiski veel varu.

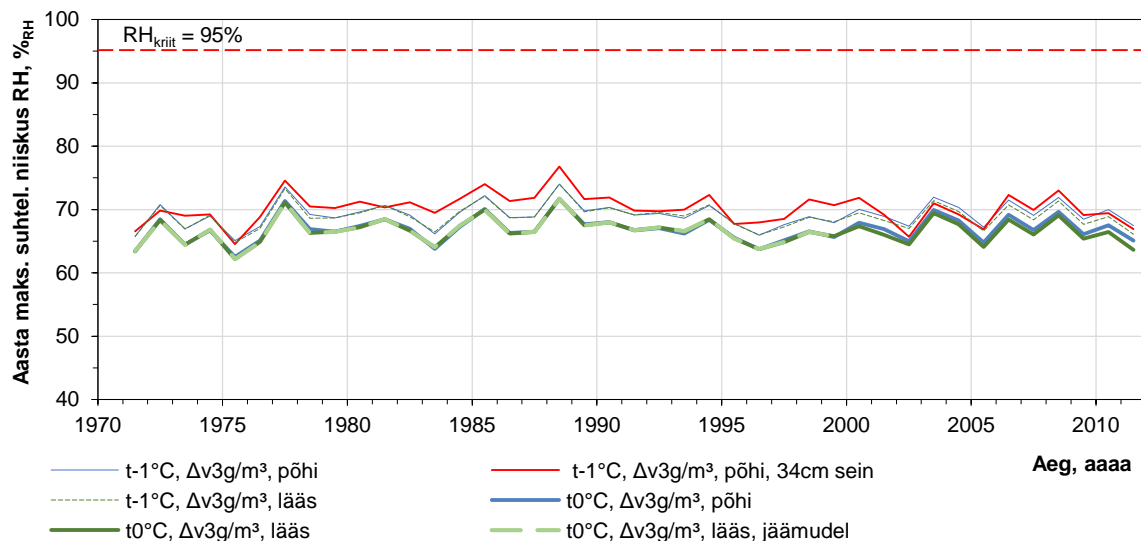


Joonis 60 Aastate madalaimad arvatud temperatuurid CaSi soojustuse taga sidekivi pinnal (punkt TRH3).

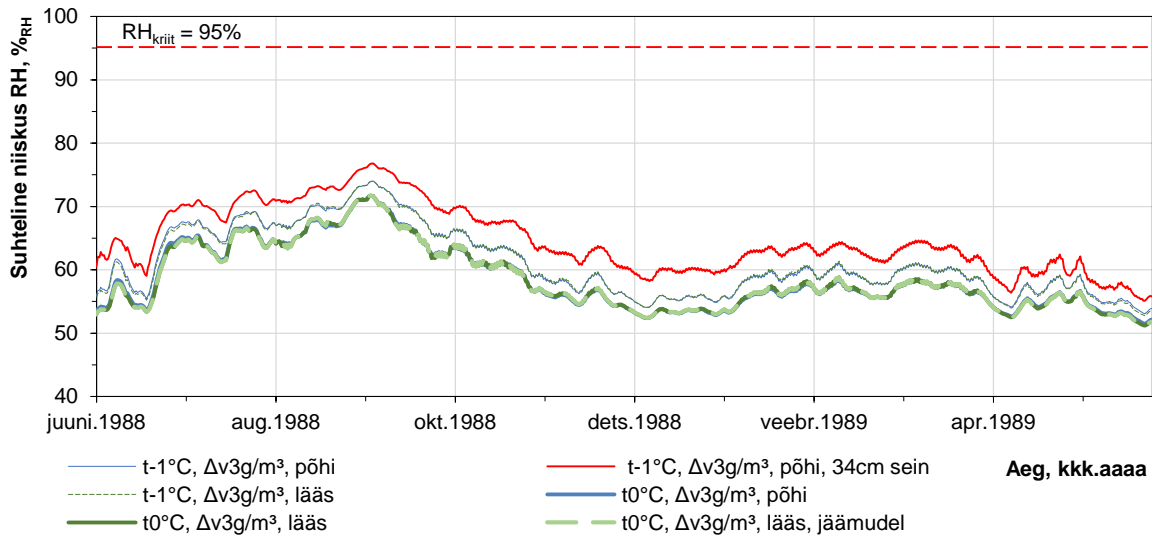


Joonis 61 Kriitilisima aasta temperatuurid CaSi soojustuse taga sidekivi pinnal (punkt TRH3)

Suhteliste niiskuste osas annab aasta maksimumväärtused punktis TRH3 Joonis 62. Kriitilisim oli aasta 1988/1989 (Joonis 63). Ilmakaarel ja jäämudelil oluline mõju puudub. Variantidel, kus sisetemperatuuri on langetatud -1°C on suhteline niiskus ca $2\%_{\text{RH}}$ kõrgem. 38cm paksune sein on teistest veelgi niiskem ($2-4\%_{\text{RH}}$), aga siiski on maksimumväärtus $77\%_{\text{RH}}$ kaugel toimivuse piirist ($95\%_{\text{RH}}$).



Joonis 62 Aastate kõrgeimad arvatud suhtelised niiskused CaSi soojustuse taga sidekivi pinnal (punkt TRH3).

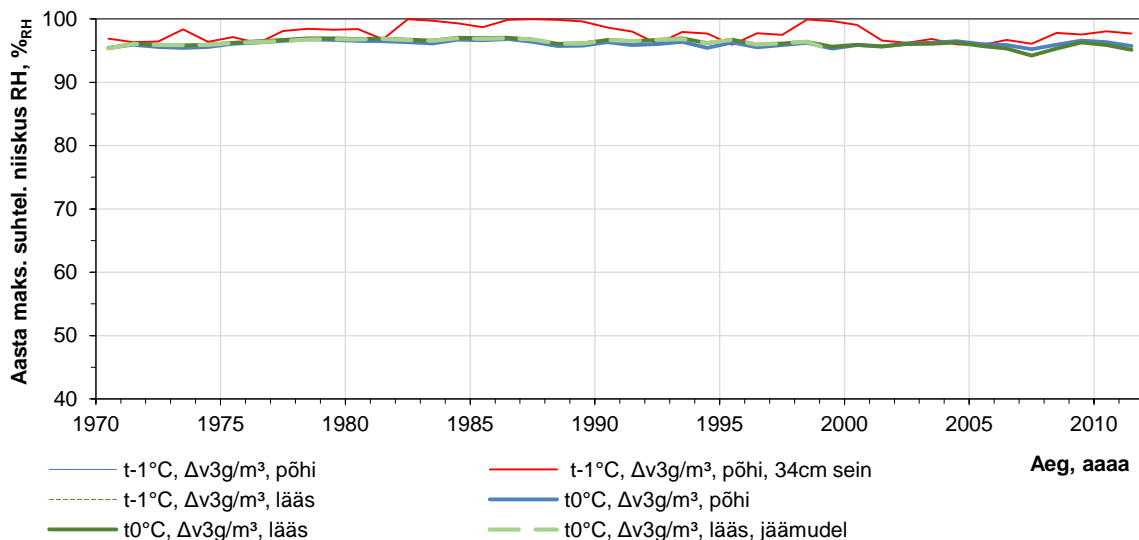


Joonis 63 Kriitilisima aasta arvatud suhtelised niiskused CaSi soojustuse taga sidekivi pinnal (punkt TRH3).

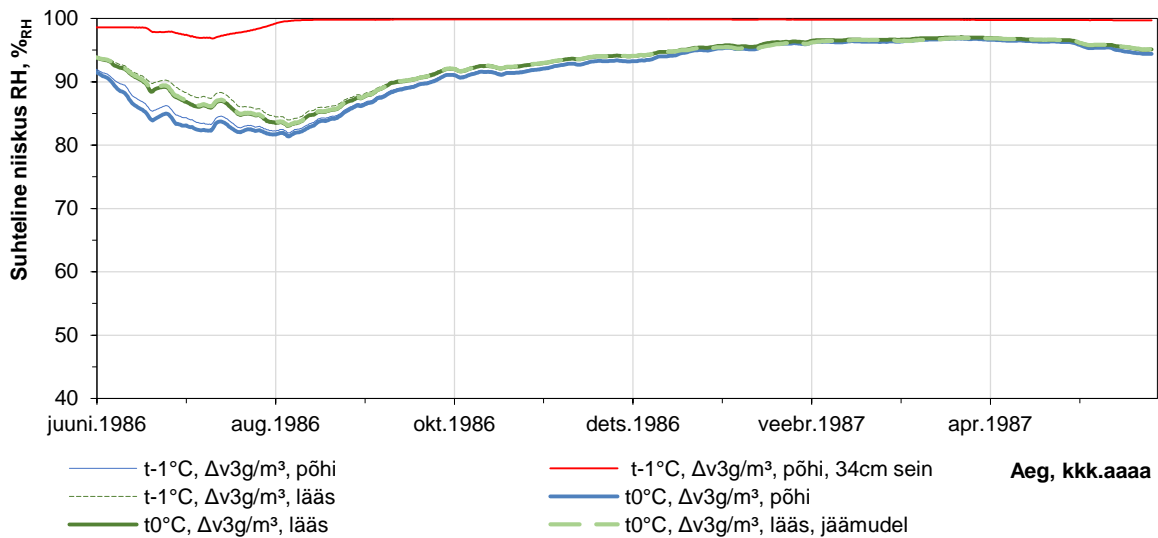
TRH2 – süstvahu ja telliskivi vahel külmal poolel

Illustreerimaks niiskuslikku olukorda süstvahust väljaspool (suurema väliskeskkonna mõju all), on antud suhtelise niiskuse väärtused punktis TRH2 (süstvahust vahetult väljaspool). Aastate maksimumid (Joonis 64) on baastarindil suhteliselt stabiilsed, õhema (põhjapoolne 38cm-paksune sein) tarindi puhul on niiskusmahtuvus madalam ja materjali küllastus saabub kiiremini.

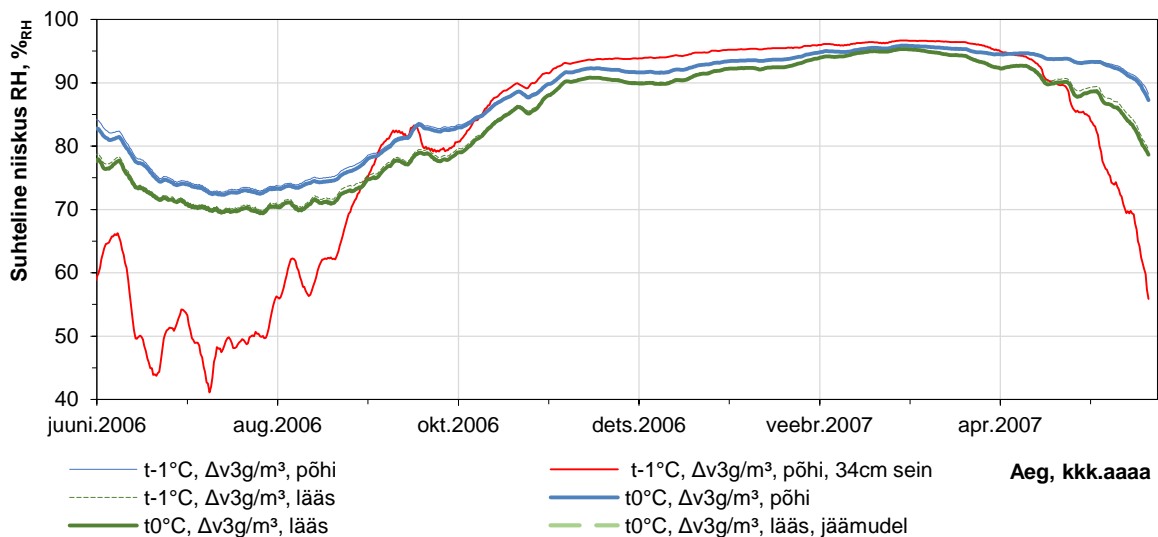
Joonis 64 annab kõige niiskema aasta (1986/1987) ja Joonis 65 kõige kuivema aasta (2006/2007) suhtelise niiskuse väärtused selles punktis. Niiskemal aastal on suur vihmakoormus, mis küllastab kiirelt õhema tarindi (38cm paksuse põhjapoolse seina) ning selline olukord jätkub ka vaadeldava aasta lõpuni. Kuival aastal kuivab 38cm sein rohkem välja, samas kui maksimumväärtused on kõigil variandid sarnased.



Joonis 64 Aastate kõrgeimad arvatud suhtelised niiskused telliskivi ja süstvahu vahel (punkt TRH2).



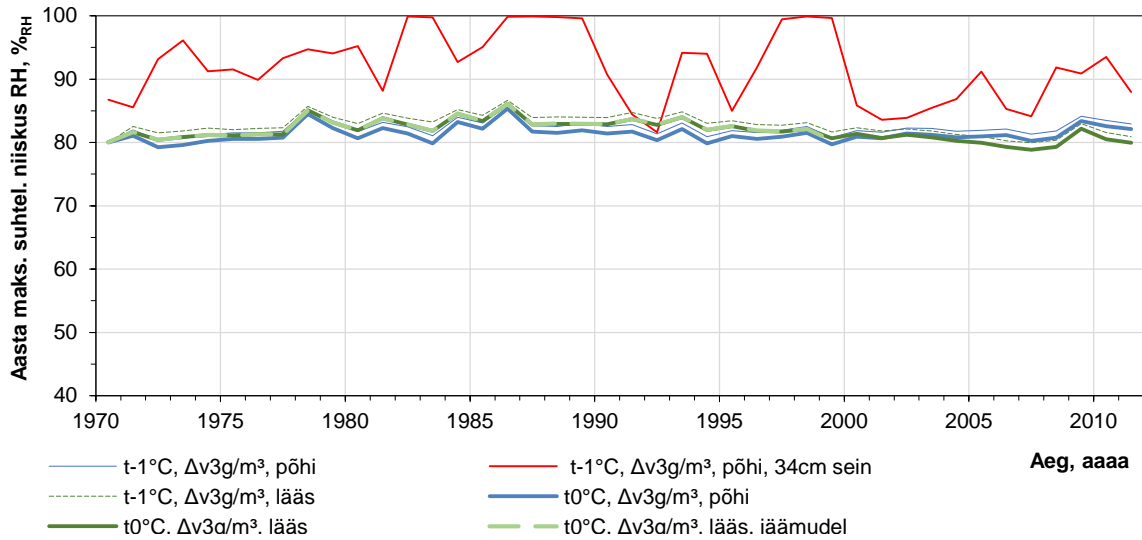
Joonis 65 Arvutatud suhtelised niiskused telliskivi ja süstvahu vahel (punkt TRH2) kõige niiskemal aastal.



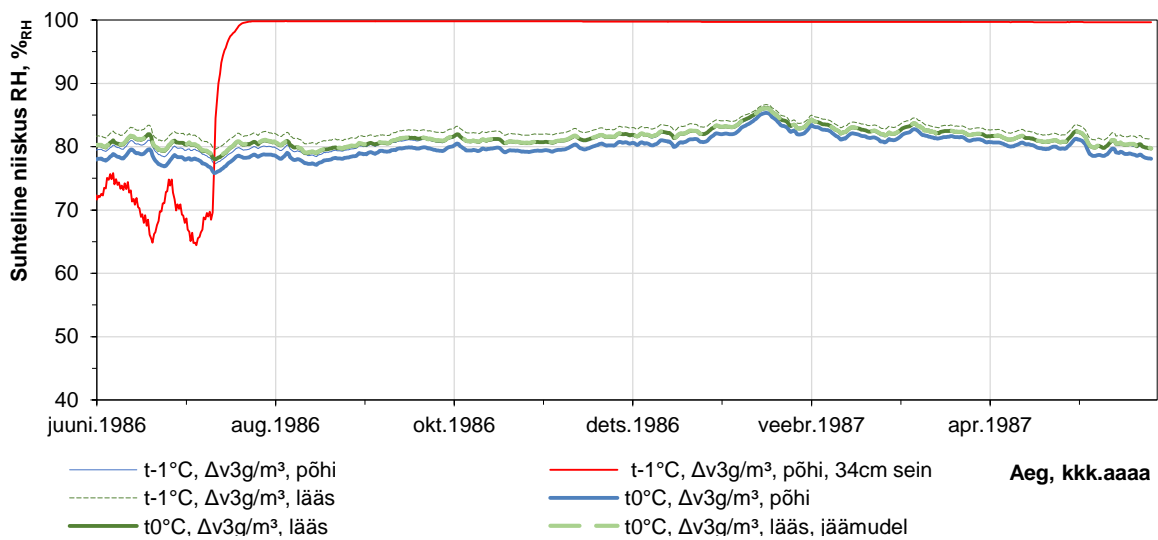
Joonis 66 Arvutatud suhtelised niiskused telliskivi ja süstvahu vahel (punkt TRH2) kõige kuivemal aastal.

TRH6 – sidekivi sees külmemal poolel

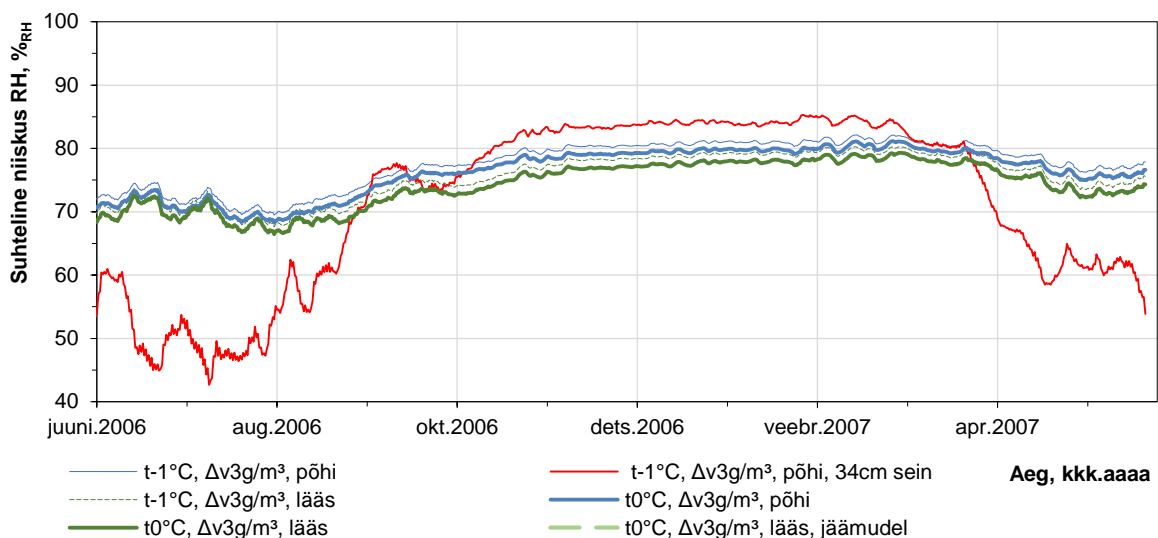
Analoogselt süstvahu taga asuvale TRH2 punktile on sidekivi välimisel poolel märgata 38cm-paksusel seina niiskussisalduse tugevat sõltuvust vihmakoormusest (Joonis 67). Erinevalt TRH2 väärtustest kõigub baasjuhtudel sidekivis oleva punkti niiskussisaldus nii niiskema (Joonis 68) kui kuivema (Joonis 69) aasta lõikes vähem – see on tõenäoliselt seotud täiendava niiskusliku mahtuvusega (sidekivi ühendab sisemise ja välimise tellisekihi).



Joonis 67 Aastate kõrgeimad arvutatud suhtelised niiskused sidekivi sees (punkt TRH6).



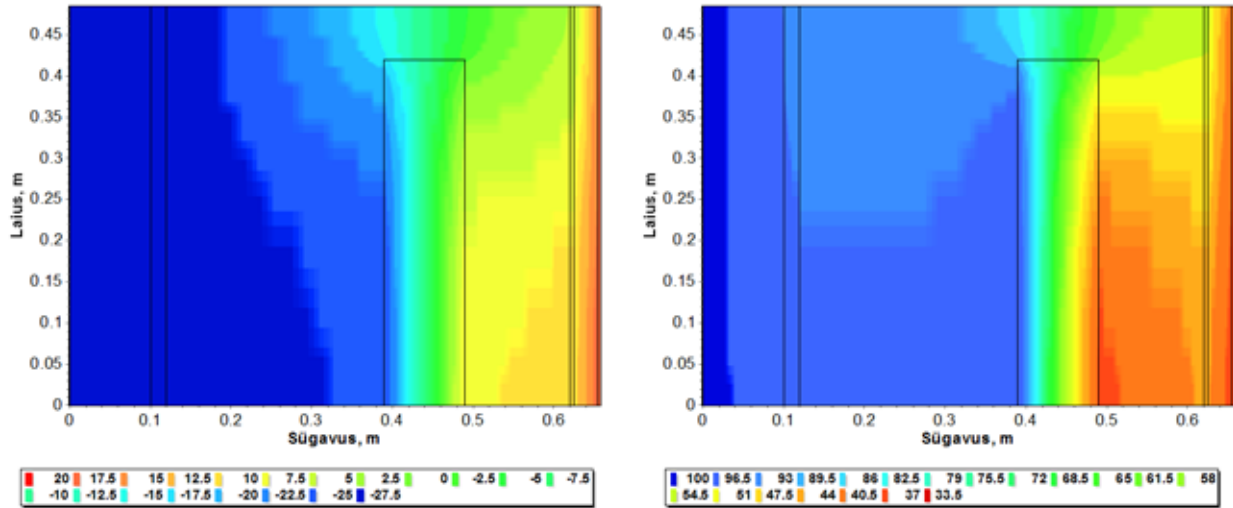
Joonis 68 Arvutatud suhtelised niiskused sidekivi sees (punkt TRH6) niiskeimal aastal.



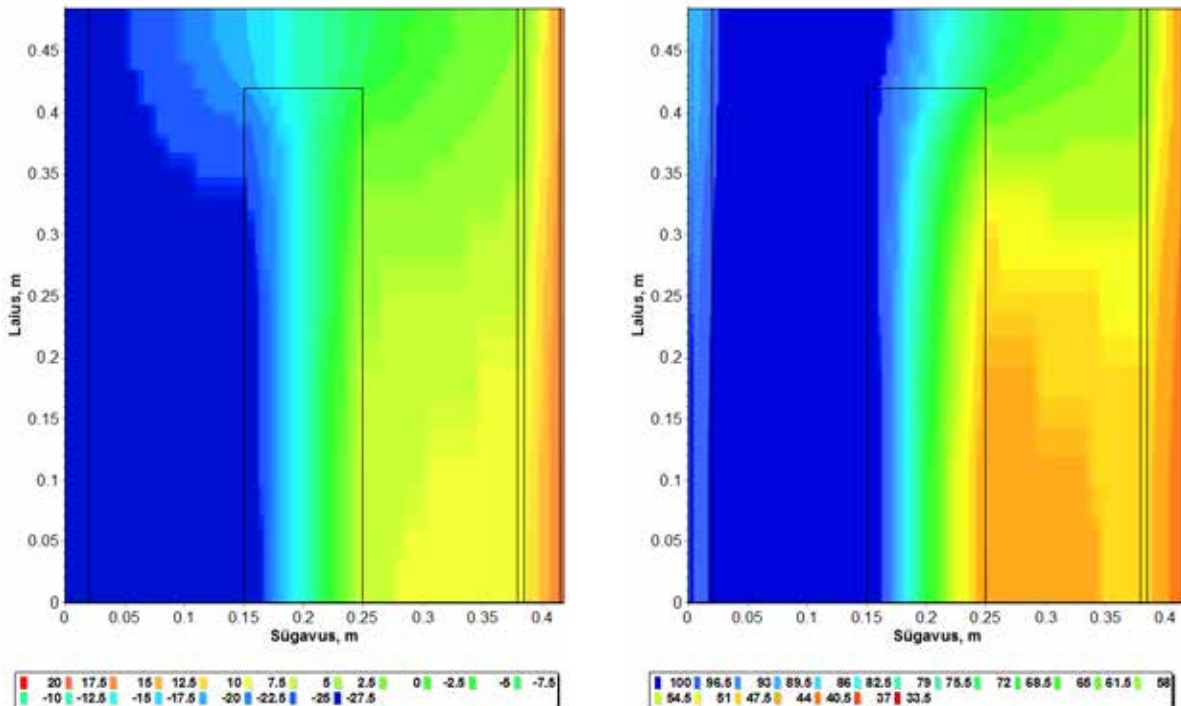
Joonis 69 Arvutatud suhtelised niiskused sidekivi sees (punkt TRH6) kõige kuivemal aastal.

Temperatuuri ja suhtelise niiskuse jaotus terves konstruktsioonis

Joonis 70 ja Joonis 71 annavad vastavalt seina põhiosa baasmudeli ja 38cm-paksuse põhjafassaadi 2D mudeli temperatuuri ja suhtelise niiskuse jaotuse 12. jaanuaril 1987. Sel hetkel oli temperatuur konstruktsioonis madalaim ning niiskus kõrge. Mudeleid omavahel võrreldes on näha, et temperatuur on õhemas seinas madalam ning niiskus oluliselt kõrgem.



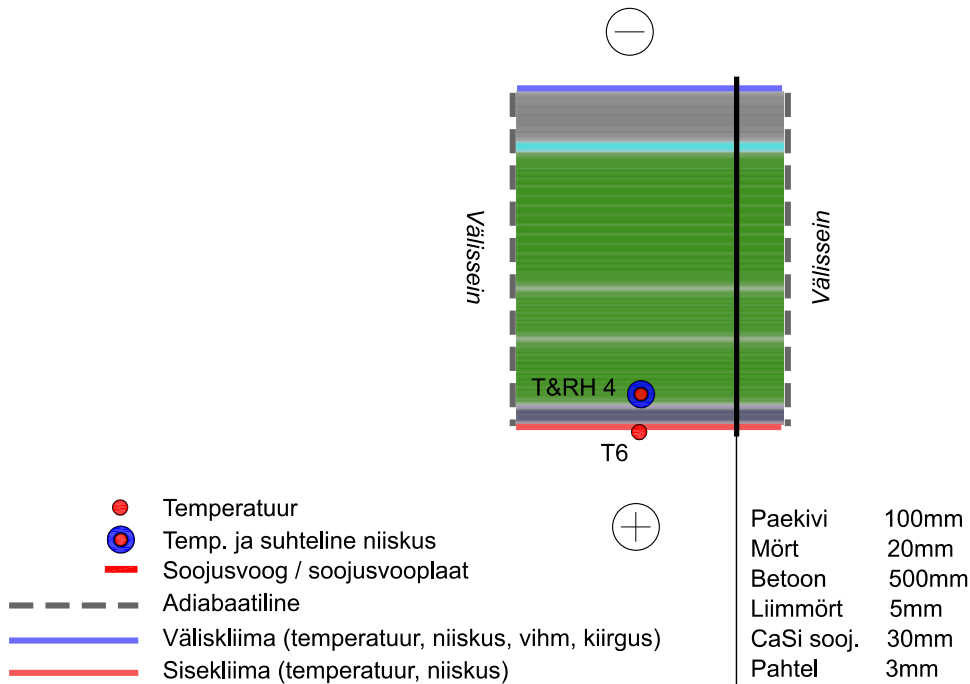
Joonis 70 Temperatuur (vasakul) ja suhteline niiskus (paremal) läänepoolses seinas 12. jaanuaril 1987.



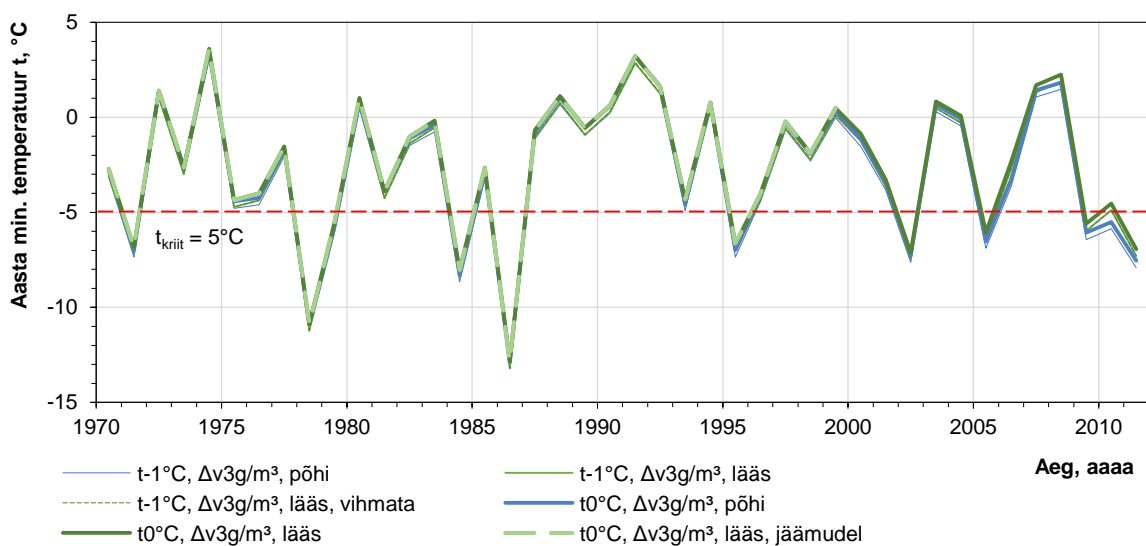
Joonis 71 Temperatuur (vasakul) ja suhteline niiskus (paremal) 38cm-paksuses seinas 12. jaanuaril 1987.

5.4.3. Betoonvöö seina ülemises osas

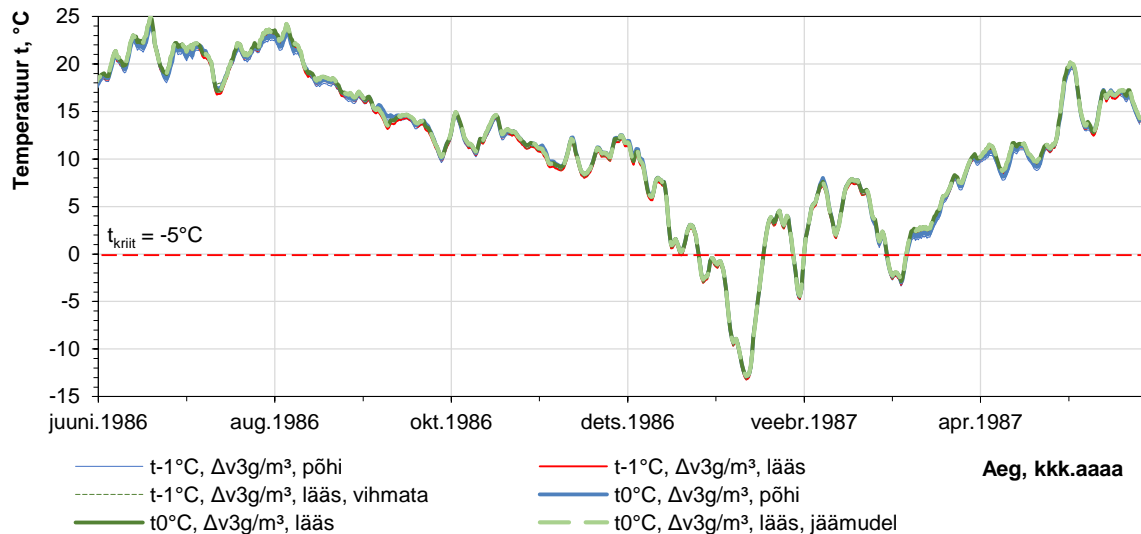
Arvutusmodeli skeemi annab Joonis 72. Mõõtmistulemuste kriitilisim punkt oli seina ülemises osas olev betoonvöö, sama kehtib ka modelleerimisel pikaajaliste kliimaandmetega. Temperatuur soojustuse taga langeb kõigil arvutuskombinatsioonidel alla -5°C 11-l aastal 42-st (Joonis 73). Minimaalseimad temperatuurid esinevad aastal 1986/1987 (vt Joonis 74). See ei tähenda otseselt, et soojustussüsteem ei toimi – külmakahjustuste tekkeks on vajalik ka kõrge niiskus.



Joonis 72 Kalibreerimisel ja pikaajaliste kliimaandmetega modelleerimisel (II ja III etapp) kasutatud välisseina ülemise betoonvöö 1D arvutusmodeli skeem SÕN tarkvaras Delphin.

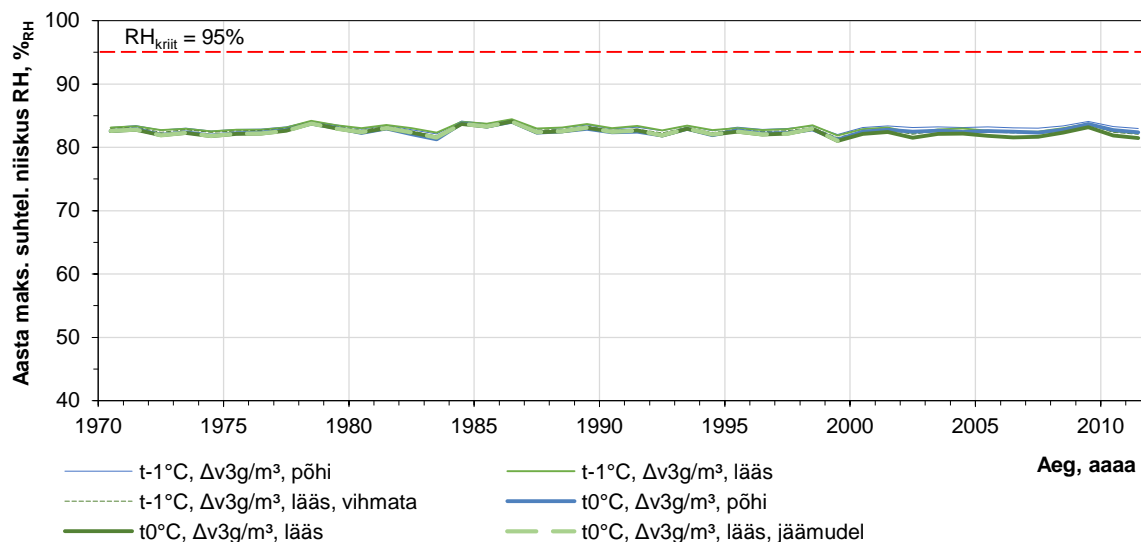


Joonis 73 Aastate madalaimad arvatud temperatuurid CaSi soojustuse ja betooni vahel (punkt TRH4).

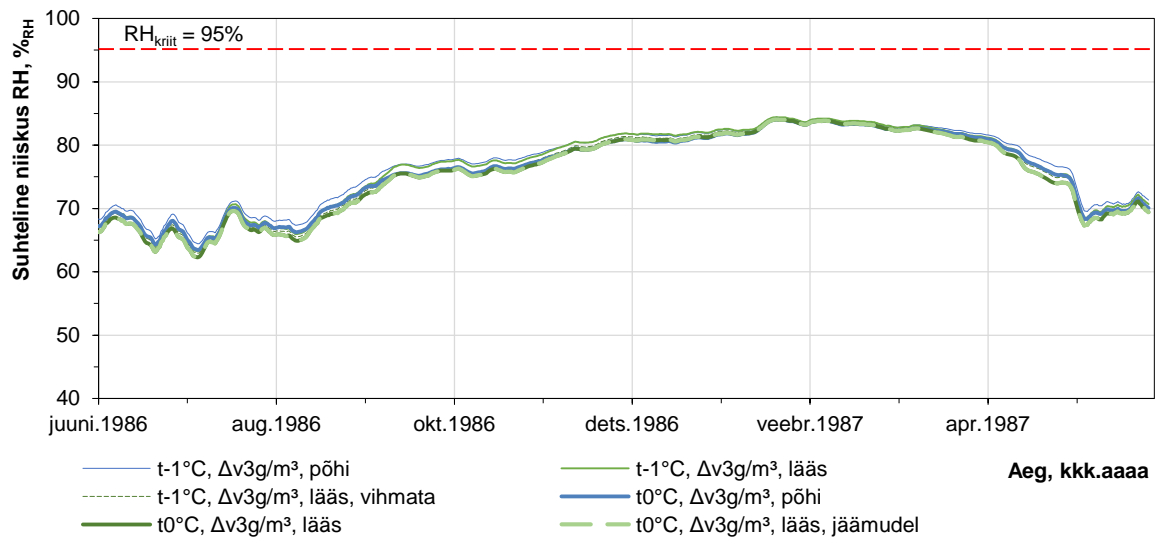


Joonis 74 Arvutatud temperatuurid CaSi soojustuse ja betooni vahel (punkt TRH4) kõige külmemal aastal.

Kuna tegemist on niiskuslikult massiivse konstruktsiooniga ning selle niiskusmahtuvus on üsna suur, siis on aastate maksimaalsete suhteliste niiskuste kõikumine väike ja erinevate arvutuskombinatsioonide mõju on kriitilisel hetkel väga madal (Joonis 75). Kriitilisim on aasta 1986/1987 (Joonis 76) – see ühtib minimaalsete temperatuuride aastaga ning vihmakoormus ei oma suhteliselt veetiheda seina sisekihtidele suurt mõju. Kõrgeim selles lõikes esinev suhteline niiskus on $84\%_{RH}$, mis vastab soojustuse liimi $14\%_{sat}$ küllastusastmele (piirväärtus on $30\%_{sat}$) ning toimivuse piire ei ületata.



Joonis 75 Aastate kõrgeimad arvutatud suhtelised CaSi soojustuse ja betooni vahel (punkt TRH4).



Joonis 76 Arvutatud suhtelised niiskused CaSi soojustuse ja betooni vahel (punkt TRH4) kõige niiskemal aastal.

6. Kokkuvõte

6.1.I etapp: esmased SÕN arvutused ja renoveerimislahenduse valik

Esialgse lahenduse leidmiseks arvutati massiivtellisest seinosa ja betoonvöö soojustamiseks läbi 3 varianti:

- a) 50mm-paksuse XPS soojustuse,
- b) 50mm-paksuse poorbetoonsoojustuse Multipor ning
- c) 30mm kaltsiumsilikaatsoojustusega (CaSi) kaetud tarindid.

Arvutustulemustest selgub, et aurutiheda ja suurema soojustakistusega 50mm-paksuse XPS soojustuse tagajärjeks on väiksem soojuskadu (külmem esialgne konstruktsioon, aga suurem niiskussaldus, mis omakorda võib suurte kaldvihmakooormuste korral põhjustada külmakahjustuste intensiivistumist. Väiksema soojustakistusega ja difusioonile avatud n.ö. kapillaaraktiivsed materjalid andsid tulemuseks esialgse seina osas kõrgemaid temperatuure (suurem soojuskadu) ja madalamat niiskussisaldust.

Nii 50mm Multipor kui 30mm CaSi ei täitnud teatud aastatel jäätumise vältimise kriteeriumi, põhjuseks esialgse seina (läbiv betoon ja tellis) väiksem soojustakistus. Kuna eesmärk on pakkuda ruumide kasutajatele tervislikku töökeskkonda, siis on olemasoleva välisseina lisasoojustamine vajalik. Kuna CaSi puhul oli võimalik tagada kriitilistes punktides ruumi sisepinnal piisavalt kõrge temperatuur ning samas oli külmumise vältimise kriteeriumi rikunud Multiporiga võrreldes oluliselt vähem, valiti betoonosa katmiseks 30mm-paksune CaSi soojustus. Et vältida astet seinas ja vähendamaks tellismüüritise sidekiviridadest põhjustatud külmasildu, nähti ette CaSi soojustusega katta lisaks betoonile ka alumine tellismüüritiseosa.

6.2.II etapp: Mõõtmistulemused

Mõõteperioodil aprill 2015...aprill 2016 katselõigust kogutud andmete järgi ei rikunud ühtegi seatud toimivuse kriteeriumi – välisseina sisepinnal mõõdetud temperatuurindeksid olid piisavalt kõrged, et vältida hallitusohtu, CaSi soojustuse taga ei langenud temperatuur alla jää tekkepiiri (-5°C) ning suhteline niiskus ei ületanud $95\%_{\text{RH}}$.

Kõige madalam temperatuurindeks esines põranda-seina liites (andur T2) – vahelage ei soojustatud ning ka seina õhkvahesse süstitud PUR vaht ei katkestanud sealset külmasilda täielikult.

Kõige kriitilisem CaSi soojustuse taga asuv punkt oli betoonikarniisi-tellisseina liites (andur TRH4), kus esines madalaim temperatuur ja kõrgeim suhteline niiskus.

Mõõdetud soojusläbivus soojustatud tarindis oli 2...4 korda väiksem kui soojustamata seina puhul (arvutuslikult määratud). See võimaldab energiasäästu, parandab ruumi soojuslikku mugavust kõrgema pinnatemperatuuri tõttu ning ühtlasi vähendab hallituse tekkeohtu seinte sisepinnal.

Soojustatud tarindite termograafiline analüüs ühtis üldjoontes 2D soojuslevi arvutustulemustega, aga samas või välja ehituskvaliteedi võimalikud probleemid: soojustusplaatide vuugid võivad olla täitunud liimseguga või pole soojustusplaadid tihedalt teineteise vastas. See põhjustab teataval määral külmasildu ning temperatuurindeksi alanemist. Tulevaste modelleerimistulemuste tõlgendamisel tuleks neid vigu arvestada.

Tuleb meeles pidada, et mõõtetulemused on kujundanud kliimaatilisel juhul mõõteperiood 2015/2016 aastal ning madal siseõhu niiskuskooormus. On võimalik, et kriitilisemad ääretingimused võivad viia teistsugustele tulemustele – selle väljaselgitamiseks teostati vastavad soojus- ja niiskustehnilised simulatsioonid arvutuslike ääretingimustega.

6.3. II etapp: 2D soojuslevi modelleerimine ja külmasillaanalüüs

Tarkvaras Therm uuriti erinevate tarindilahenduste soojuslikku käitumist statsionaarses (st stabiilsete ääritingimustega) olukorras. Hinnati nii variantide soojusläbivust kui niiskusturvalisuse seisukohast temperatuurindekseid.

Lisasoojustatud välisseina arvatud soojusläbivus sobis mõõtmistulemustega ning näitas keskmiselt ~3x madalamaid soojuskadusid läbi seinatarindi (võrreldes soojustamata seinaga).

Sisepindade niiskusturvalisuse tagamiseks on põhjendatud lisaks õhkvahede täitmisele PUR vahuga ka sisepinna katmine 30mm CaSi soojustusega. Eelkõige on see vajalik betoonvöö ja massiivtellige lõigus. Samuti tuleks betoonvöö ja massiivtellige tõttu soojustus ~25cm laiuselt ka tellisest siseseintele keerata. Soojustustööd viimasel korral ei halvendanud märkimisväärselt alumise korruse olukorda.

6.4. II etapp: 1D ja 2D soojus- ja niiskustehniliste arvutusmudelite kalibreerimine

Tarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse hindamiseks kriitilisematel kliimatingimustel kalibreeriti arvutusmudelid mõõtetulemuste alusel. Laboratoorselt määratud ja tootja andmelehtedes antud materjalomaduste põhjal tehti esimene valik arvutustarkvara andmebaasist sobivate materjalivastete leidmiseks. Seejärel katsetati erinevaid materjale mudelites ning võrreldi mõõtmistulemustega. Parima korrelatsiooniga variante kasutati edaspidisteks arvutusteks.

Korrelatsioon mõõtmis- ja arvutustulemuste vahel oli senistest analoogsetest uuringutest parim. Seinapõhiosa mittehomogeensusest tulenevalt andis täpsemad tulemusi 2D arvutusmudel. Mõningasi puudusi esines välimiste seinakihtidega. Tõenäoliselt on siin põhjuseks täpselt määramata paekivi omadused ja vihmakoormus.

6.5. III etapp: 1D ja 2D soojus- ja niiskustehnilised arvutused 1970-2012 kliimaandmetega

Soojustatud tarindi toimivuse kindlamaks väljaselgitamiseks uuriti erinevaid kombinatsioone välis- ja sisekliimast ning tarindilahendustest. Kliimatingimuste aluseks oli 1970-2012 väliskliima terviklikud väliskliimaandmed, mille põhjal genereeriti täiendavalt sisekliima (vastavalt Vabaduse väljak 10 ruumides mõõdetud temperatuurile ja suhtelisele niiskusele) ja kaldvihm. Arvutustes kasutati eelnevalt mõõtmiste alusel kalibreeritud 1D ja 2D mudeleid.

Kuigi soojustatud betoonvööl esines talveperioodidel kõrgeid suhtelisi niiskusi ja külmumispiirist madalamaid temperatuure, siis niiskussisaldused ei olnud külmakahjustuste tekkeks piisavalt kõrged.

Arvutused näitasid, et vahetult CaSi soojustuse taga tekitab riskantsema olukorra praegusest madalam sisetemperatuur ja kõrgem siseõhu niiskustase, samas kui süstvahust väljaspool kasvab kaldvihma ja väliskliima mõju.

6.6. Üldkokkuvõte

- Modelleerimise alusel võib öelda, et uuritud tarindid on praegustel tingimustel niiskustehniliselt toimivad.
- Kui niiskuskooormus ruumides tõuseb, võib probleeme esineda hoone nurkades betoontalal, kus temperatuurindeks on ka projekteeritud lahendusel madal ning mida veelgi alandavad soojustuse paigaldusel tekkinud külmasillad.
- Riskialdis on 38cm-paksune põhjapoolne välissein, milles arvutuste alusel põhjustab kaldvihm kõrgeid niiskussisaldusi. Kui märjale seinale toetuvad nt puittalad on võimalik, et süstvahtu läbivates talaotstes tekib hallituse ja/või mädanikuoht. Kui puittalad tõesti välimisele tellisekihile toetuvad (nt eelviimase-viimase korruse vahelagi), on soovitatav välja selgitada talaotste hetkeolukord – eelnevalt oli tarind aastaid mineraalvillaga soojustatud ja aurutõkkega tihendatud – lahendus, mis peaks põhjustama veelgi kõrgemat tellisseina niiskussisaldust.
- Uuringu tulemused kehtivad konkreetse tarindi ja sõmlahenduste kohta. Kui tulevikus soovitakse soojustada ka alumised korrused, tuleks esimese sammuna tutvuda sealsete sõmlahenduste ja seinakonstruktsiooniga ning vajadusel täiendada praegust arvutuslikku analüüsi. Sama kehtib ka ruumide kasutusviisi muutmisel.
- Projekteerimis- ja ehitusprotsessi õnnestumiseks on hädavajalik mõlemasse kaasata seespoolse lisasoojustamise osas pädev ehitusekspert.
- Käesolev uurimistöo näitas protsessi, mille abil võib olla seespoolse lisasoojustamine õnnestuda:
 - Ehitusauditi abil tuvastatavuse olemasolevate tarindite ja liitekohtade lahendused ning ruumide niiskuskooormused;
 - Laboratoorsete katsetega määratakse tarindites kasutatavate materjalide soojuslikud ja niiskuslikud omadused;
 - 1D ja 2D arvutusimulatsioonide abil teostatakse arvutused ja valitakse antud tarindid arvestades sobivaim lisasoojustamise lahendus ;
 - Vastavalt väljatöötatud lisasoojustamise lahendusele tehakse katsesein ja mõõdetakse selle soojuslikku ja niiskuslikku toimivust vähemalt ühe aasta pikkuselt perioodil;
 - Mõõtmistulemuste alusel kalibreeritakse arvutusmudel;
 - Täpsustatud arvutusmudeli abil tehakse arvutused arvutuslikel ääritingimustel;
 - Alles pärast eelneva läbitegemist võib otsustada seespoolse lisasoojustuse lahenduse toimivuse ja teostatavuse üle.

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, 2013. TMCx-HD Water / Soil Temperature Sensor.
- Eesti Standardikeskus, 2008. EVS-EN ISO 10211:2008 Thermal Bridges in Building Construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations. , pp.1–10.
- Grant Instruments, 2011. Squirrel 2020 series data logger datasheet.
- 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.
- Kallavus, U., 2015. *ANALÜÜSI PROTOKOLL Nr. 201503UK*, Tallinn.
- Klõšeiko, P., 2014. *Seespoolse lisasoojustusega tellisseina soojus- ja niiskustehniline toimivus Kohtla-Järve koolimaja näitel / Hygrothermal performance of a brick wall with interior thermal insulation: a case study in Kohtla-Järve school building*. Tallinna Tehnikaülikool / Tallinn University of Technology.
- Klõšeiko, P. & Kalamees, T., 2013. Eesti uuritud kirikute ehitustehniline seisund. In T. Kalamees, ed. *The final report of research of project “Sustainable Management of Historic Rural Churches in the Baltic Sea Region (SMC)”*. Tallinn-Visby: Tallinn University of Technology / Conservation Centre Kanut.
- Klõšeiko, P. & Kalamees, T., 2015. *Vabaduse väljak 7 seespoolse lisasoojustuse niiskustehnilise toimivuse uuringu lõpparuanne*, Tallinn.
- 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].
- Rotronic AG, 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].

LISA 1

Vabaduse väljak 10 viimase (8.) korruse termograafiline mõõdistamine



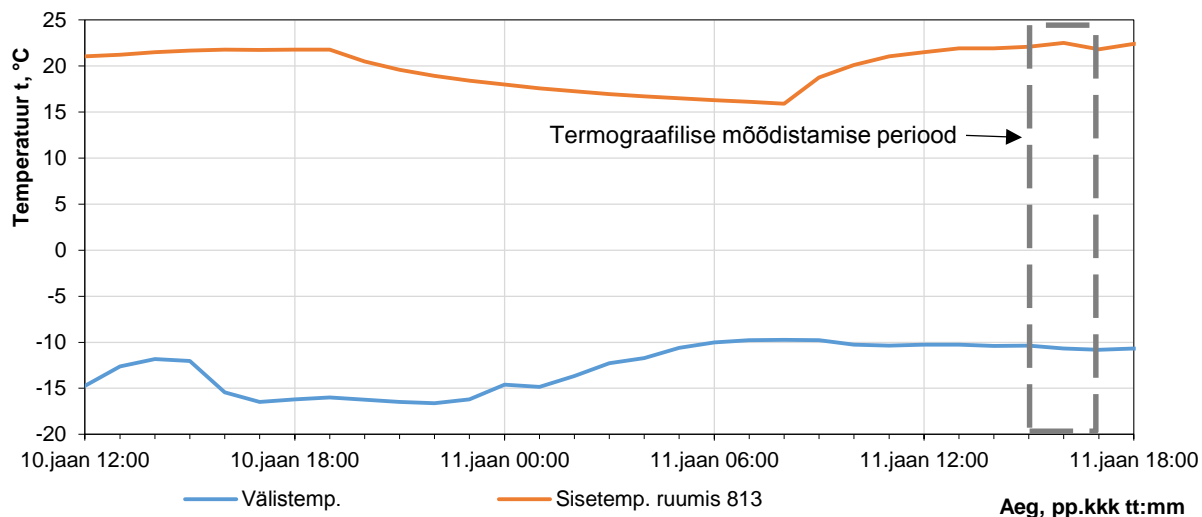
Koht: Vabaduse väljak 10 viimane (8.) korrus, **Tallinn**
Aeg: 11.01.2016 kell 15:00...17:00
Mõõtja: Paul Klõšeiko
Eesmärk: Selgitada välja võimalikud külmasillad ja kontrollida paigaldatud lisasoojustuse toimivust.

Mõõteseadmed ja meetodika

- Uurimistöös on kasutatud FLIR Systems E320 – termokaamerat (mõõtevahemik $-20^{\circ}\text{C} \dots +500^{\circ}\text{C}$, mõõtetäpsus: $\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$). Termovisiooni mõõtmistel on järgitud standardit EVS-EN 13187:2001 „Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method”.

Mõõtetingimused

- Objektil mõõdetud välistemperatuur: -10°C ja sisetemperatuur $+21 \dots 25^{\circ}\text{C}$.
- Mõõtmistele eelnenud 24 tunni sise- ja välisõhu temperatuurid annab Joonis 1. Täiendavalt mõõdeti iga uuritud ruumi temperatuuri vahetult termografeerimise ajal.



Joonis 1 Vabaduse väljak 10 välistemperatuur ja sisetemperatuur ruumis 813 termografeerimise ja sellele eelnenud ajal.

Tulemused ja nende tõlgendamine

- Termopildid on selguse mõttes esitatud koos tavapildiga. Temperatuurid on antud punktväärtustena ning nende kohta on arvatatud ka temperatuuriindeks. Oluliste leidude kohta on lisatud kommentaar.
- Termopiltidel on temperatuuriskaala muudetud samaks ja temperatuuri mõõtepunktide emissioonitegurid on korrigeeritud vastavalt mõõdetava pinna materjalile. Sisetemperatuurid on seatud vastavalt konkreetse ruumis mõõdetud temperatuurile.

- Külmasilla kriitilisuse määrab sisetemperatuuri, T_{in} ja välistemperatuuri, T_{out} vahe suhe sisepinnatemperatuuri, T_{sin} ja välistemperatuuri vahe suhtesse: $f_{Rsi} = \frac{T_{sin} - T_{out}}{T_{in} - T_{out}}$,

mida nimetatakse temperatuuriindeksiks (EVS-EN ISO 13788:2001 Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods).

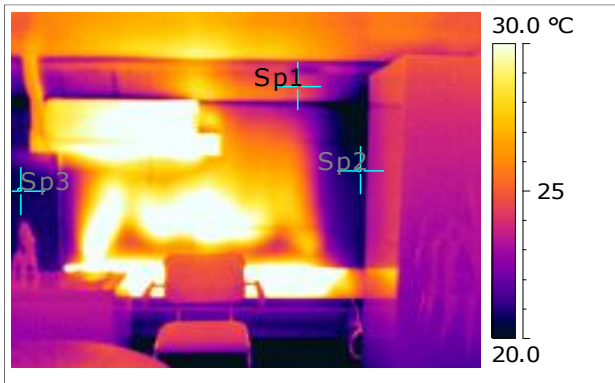


- Et vältida hallituse tekkeriski peab temperatuuriindeks suure niiskuskooormusega hoonetes (niiskuslisa (sise- ja välisõhu absoluutse niiskuse erinevus) $\Delta v=6 \text{ g/m}^3$, $T_{\text{out}} < 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $\Delta v=2 \text{ g/m}^3$, $T_{\text{out}} > 15 \text{ }^\circ\text{C}$) olema $f_{\text{Rsi}} \geq 0.8$ ja väiksema niiskuskooormusega (niiskuslisa $\Delta v=4 \text{ g/m}^3$, $T_{\text{out}} < 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $\Delta v=1.5 \text{ g/m}^3$, $T_{\text{out}} > 15 \text{ }^\circ\text{C}$) olema $f_{\text{Rsi}} \geq 0.65$. Uuritud korrusel on kõikides rumides mehaaniline sissepuhke-valjatombe ventilatsioon ning puudub pidev niiskuskoomus. Külmasildade temperatuuriindeksi piirväärtuseks võib lugeda ruumides $f_{\text{Rsi}} > 0.65$.

Hoone iseloomustus

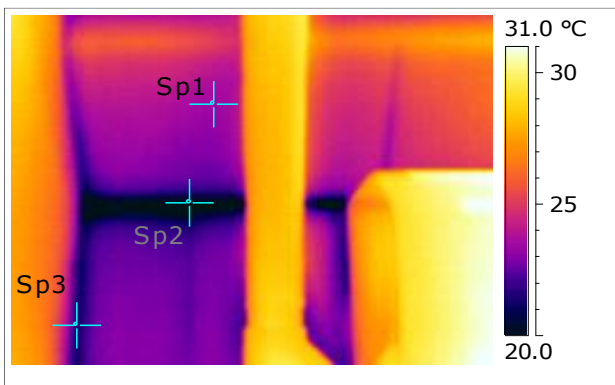
- olemasoleva hoone värskelt valminud seespoolne lisasoojustus;
- 8-korruseline büroohoone, välisseinad koosnevad tellismüüritisest, mis on väljast viimistletud paekiviplaadidega. 8. korruse renoveerimislahendus nägi ette tellismüüritise õhkvähe täitmist PUR vahuga ning sisepindade katmist 30mm-paksuse kaltsiumsilikaatsoojustusega.
- 8. korruse kütmine on lahendatud elektriradiaatoritega, ventilatsioon mehaanilise sissepuhke-väljatõmbesüsteemina;

Tulemused



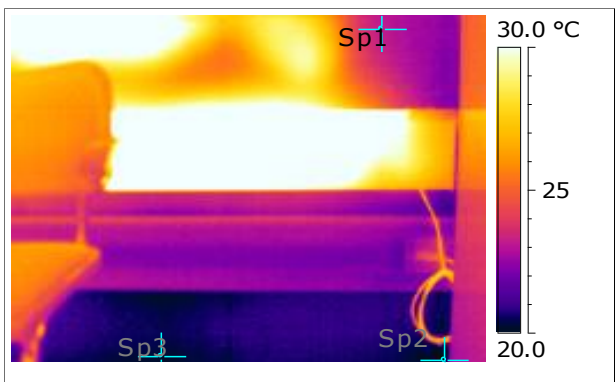
Sp1 Temperature 24.6 °C $f_{Rsi.Sp1}$ 1.03
 Sp2 Temperature 20.4 °C $f_{Rsi.Sp2}$ 0.90
 Sp3 Temperature 20.4 °C $f_{Rsi.Sp3}$ 0.90

Joonis 2 Ruum 807 ($t_i=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)



Sp1 Temperature 23.3 °C $f_{Rsi.Sp1}$ 0.99
 Sp2 Temperature 18.0 °C $f_{Rsi.Sp2}$ 0.83
 Sp3 Temperature 21.4 °C $f_{Rsi.Sp3}$ 0.93

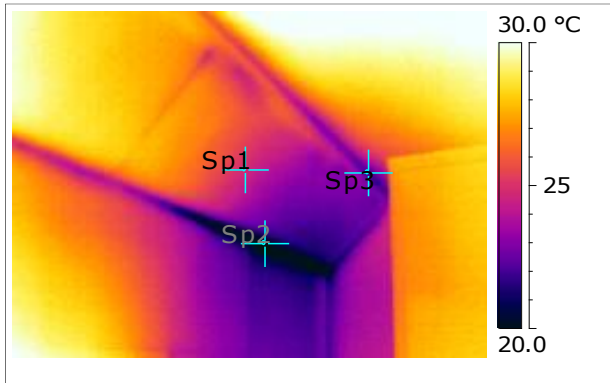
Joonis 3 Ruum 807 ($t_i=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)



Sp1 Temperature 23.1 °C $f_{Rsi.Sp1}$ 0.98
 Sp2 Temperature 20.2 °C $f_{Rsi.Sp2}$ 0.89
 Sp3 Temperature 20.2 °C $f_{Rsi.Sp3}$ 0.89

Joonis 4 Ruum 807 ($t_i=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)



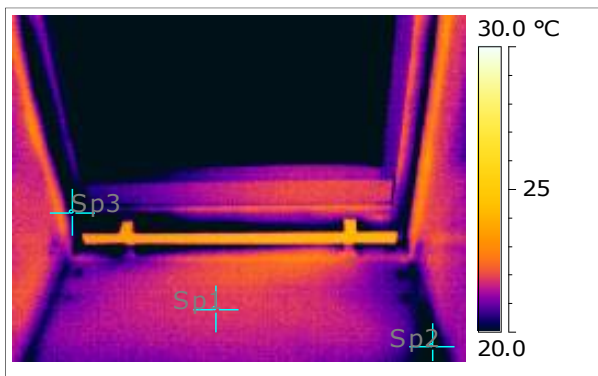


Sp1 Temperature 24.6 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 1.03
 Sp2 Temperature 17.0 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.80
 Sp3 Temperature 21.7 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.94

Joonis 5 Ruum 807 ($t_i=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

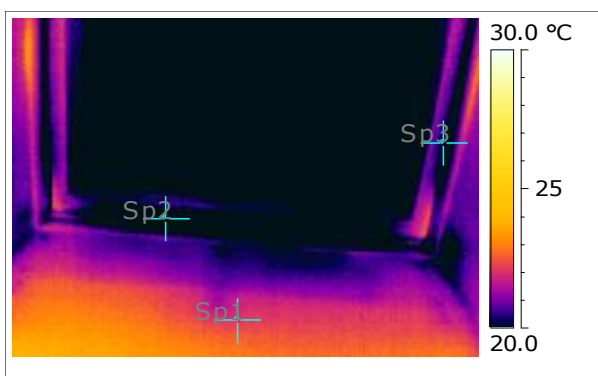


Madal pinnatemp. sein ja kaldlae nurgas kapi taga, kuhu toasoe nii hästi ligi ei pääse, võimalik mörti täis soojustuspladiuuk.



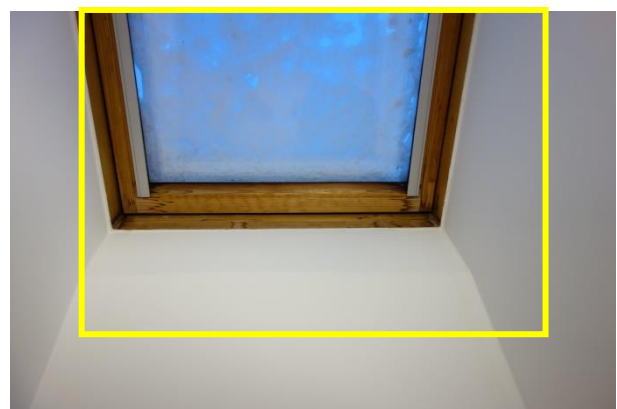
Sp1 Temperature 21.8 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.94
 Sp2 Temperature 18.4 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.84
 Sp3 Temperature 17.6 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.82

Joonis 6 Ruum 807 ($t_i=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

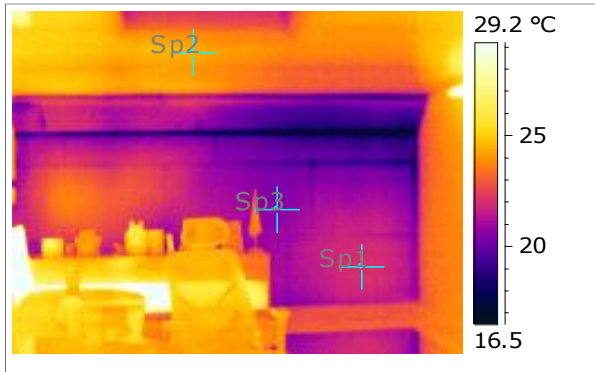


Sp1 Temperature 22.1 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.95
 Sp2 Temperature 12.1 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.66
 Sp3 Temperature 16.9 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.80

Joonis 7 Ruum 807 ($t_i=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

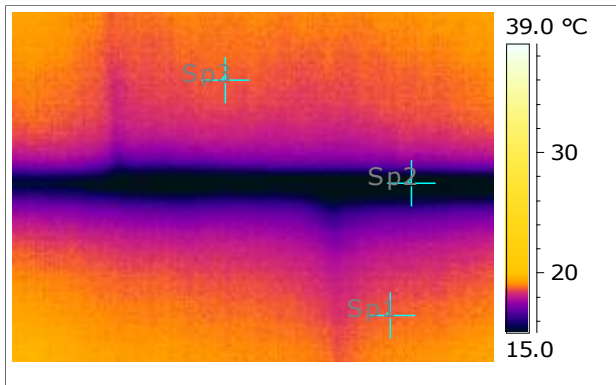


Õhulekkest põhjustatud madal temperatuur katusakna lengi ja raami vahel



Sp1 Temperature 22.0 °C
Sp2 Temperature 24.2 °C
Sp3 Temperature 20.6 °C

Joonis 8 Ruum 806 ($t_i=+23,4^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

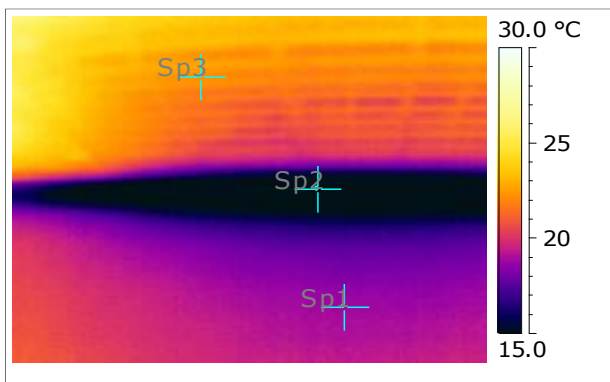


Sp1 Temperature 18.9 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.87
Sp2 Temperature 12.5 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.68
Sp3 Temperature 19.0 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.87

Joonis 9 Ruum 806 ($t_i=+23,4^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

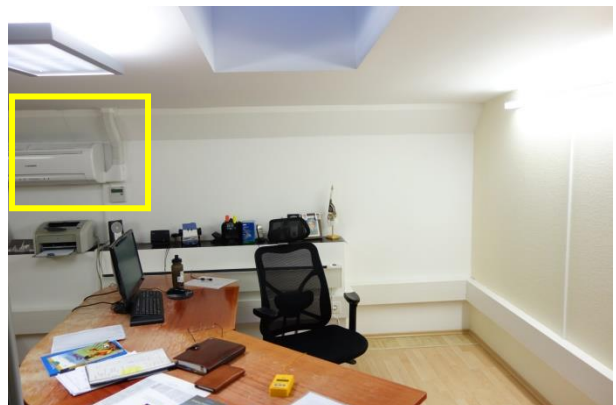


Madal pinnatemperatuur betoonsilluse (kaldune osa) ja välisseina nurgas (Sp2)

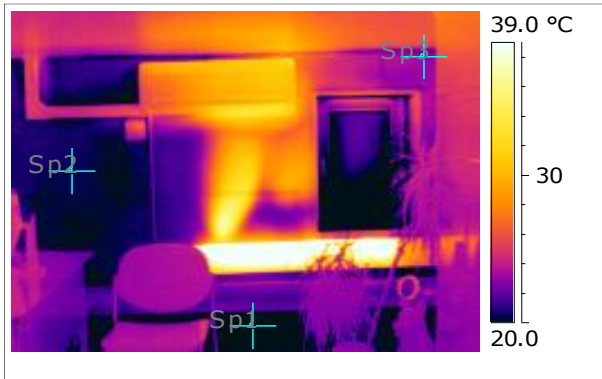


Sp1 Temperature 18.8 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.87
Sp2 Temperature 11.1 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.64
Sp3 Temperature 22.3 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.97

Joonis 10 Ruum 806 ($t_i=+23,4^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

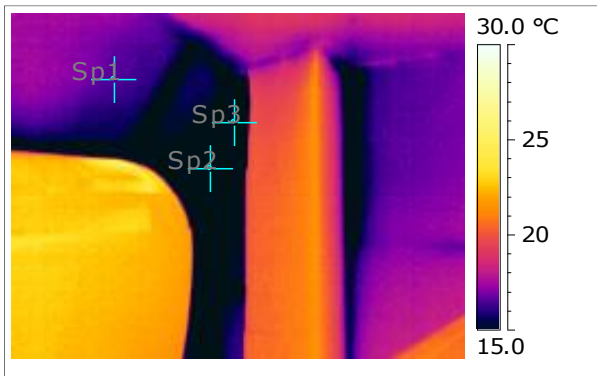


Madal pinnatemperatuur betoonsilluse (kaldune osa) ja jahuti vahel (Sp2).



Sp1 Temperature 19.2 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.88
Sp2 Temperature 20.6 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.92
Sp3 Temperature 23.0 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.99

Joonis 11 Ruum 802 ($t=+23,4^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)

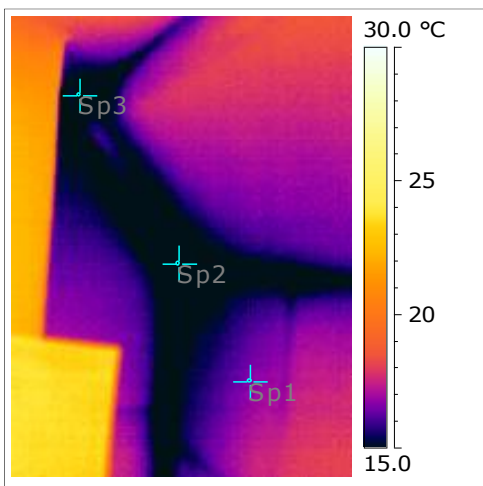


Sp1 Temperature 16.6 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.80
Sp2 Temperature 7.3 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.52
Sp3 Temperature 7.8 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.54

Joonis 12 Ruum 803 ($t=+23,7^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)



Väga madal pinnatemperatuur betoonsilluse (kaldune osa) ja välisseina nurgas(Sp2).

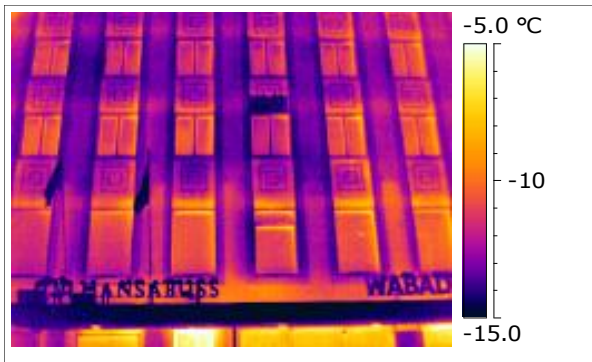
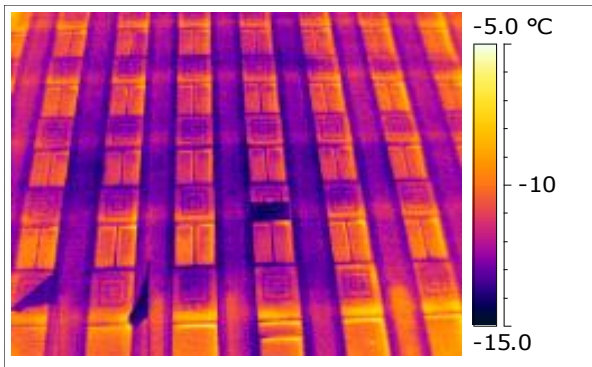
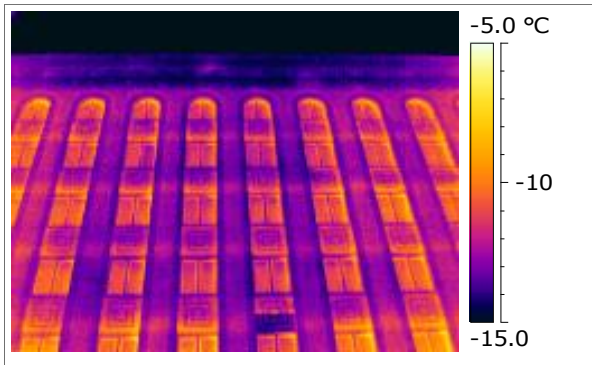


Sp1 Temperature 16.7 °C $f_{Rsi,Sp1}$ 0.80
Sp2 Temperature 6.8 °C $f_{Rsi,Sp2}$ 0.51
Sp3 Temperature 11.4 °C $f_{Rsi,Sp3}$ 0.64

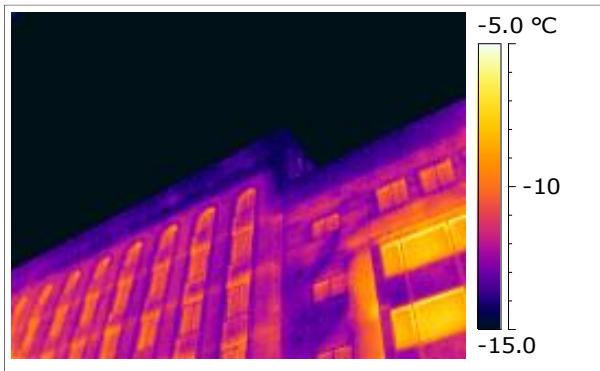
Joonis 13 Ruum 813 ($t=+23,2^{\circ}\text{C}$, $t_e=-10^{\circ}\text{C}$)



Väga madal pinnatemperatuur betoonsilluse (kaldune osa) ja välisseina nurgas(Sp2&3). Võimalik, et soojustuse vuugid on mörti täis.



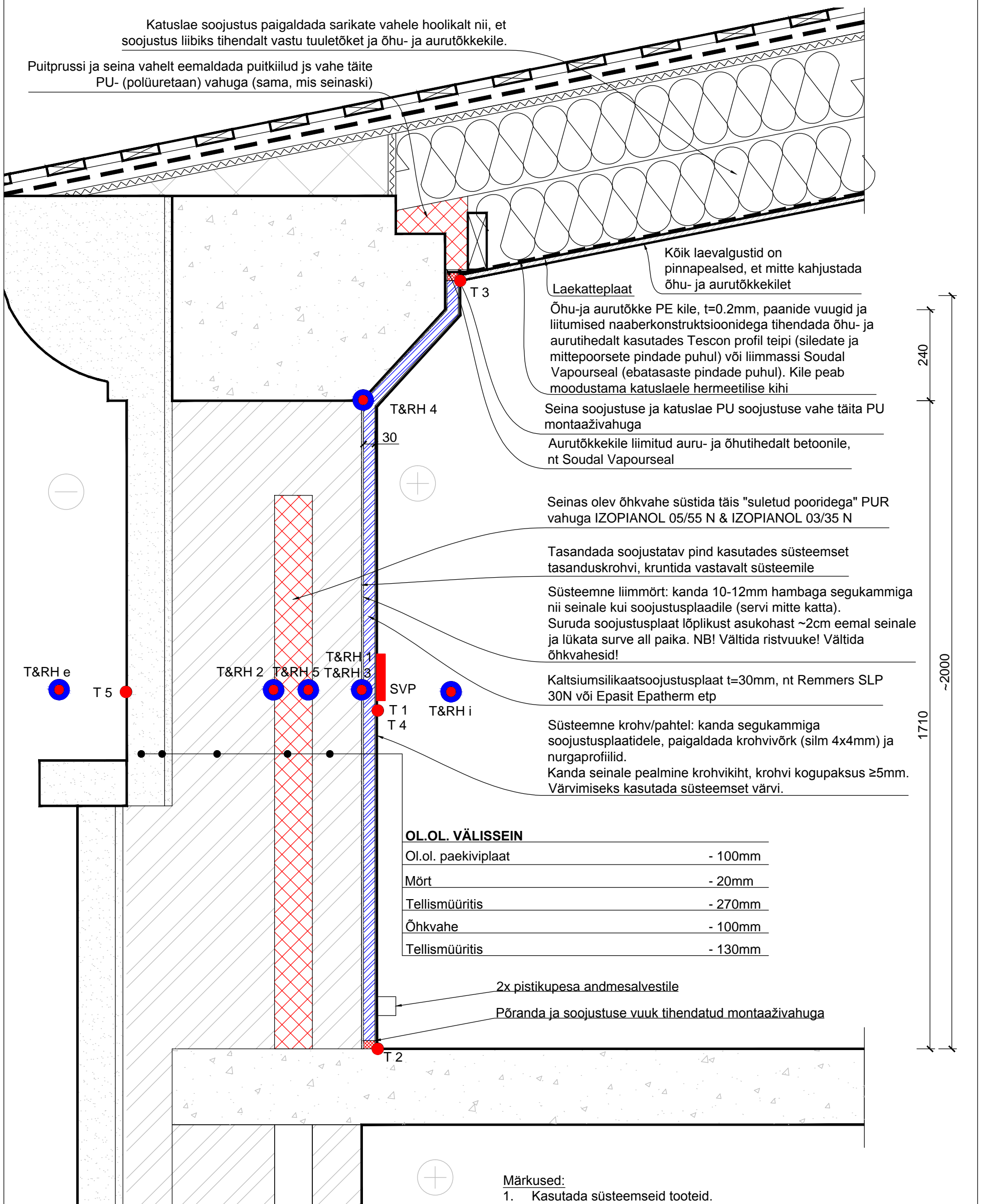
Seest poolt lisasojustatud viimase korruse välisseina välispinnatemperatuur on madalam, kui hoone teiste välisseinteosade pinnatemperatuur.



LISA 2
Vabaduse väljak 10 viimase (8.) korruse renoveerimislahendus

Katuslae soojustus paigaldada sarikate vahele hoolikalt nii, et soojustus liibiks tihendalt vastu tuuletõket ja õhu- ja aurutõkkekile.

Puitprussi ja seina vahelt eemaldada puitkiilud js vahe täite PU- (polüuretaan) vahuga (sama, mis seinaski)



Kõik laevalgustid on pinnapealsed, et mitte kahjustada õhu- ja aurutõkkekilet

Laekatteplaat

Õhu- ja aurutõkke PE kile, $t=0.2\text{mm}$, paanide vuugid ja liitumised naaberkonstruktsioonidega tihendada õhu- ja aurutihedalt kasutades Tescon profil teipi (siledade ja mittepoorsete pindade puhul) või liimmassi Soudal Vapourseal (ebatasaste pindade puhul). Kile peab moodustama katuslaele hermeetilise kihi

Seina soojustuse ja katuslae PU soojustuse vahe täita PU montaaživahuga

Aurutõkkekile liimitud auru- ja õutihedalt betoonile, nt Soudal Vapourseal

Seinas olev õhkvahe süstida täis "suletud pooridega" PUR vahuga IZOPIANOL 05/55 N & IZOPIANOL 03/35 N

Tasandada soojustatav pind kasutades süsteemset tasanduskrohvi, kruntida vastavalt süsteemile

Süsteemne liimmört: kanda 10-12mm hambaga segukammiga nii seinale kui soojustusplaadile (servi mitte katta). Suruda soojustusplaat lõplikult asukohast ~2cm eemal seinale ja lükata surve all paika. NB! Vältida ristvuuke! Vältida õhkvaheid!

Kaltsiumsilikaatsoojustusplaat $t=30\text{mm}$, nt Remmers SLP 30N või Epasit Epatherm etp

Süsteemne krohv/pahtel: kanda segukammiga soojustusplaatidele, paigaldada krohvivõrk (silm 4x4mm) ja nurgaprofiilid. Kanda seinale pealne krohvikih, krohvi kogupaksus $\geq 5\text{mm}$. Värvimiseks kasutada süsteemset värvi.

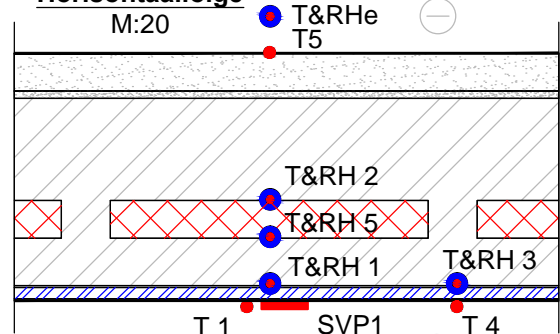
OL.OL. VÄLISSEIN

Ol.ol. paekiviplaat	- 100mm
Mört	- 20mm
Tellismüüritis	- 270mm
Õhkvahe	- 100mm
Tellismüüritis	- 130mm

2x pistikupesa andmesalvestile

Põranda ja soojustuse vuuk tihendatud montaaživahuga

Horisontaallõige



Legend:

- Temperatuuri ja suhtelise niiskuse andur
- Temperatuuriandur
- | Soojusvooplaat

Märkused:

1. Kasutada süsteemseid tooteid.
2. Enne paigaldust tutvuda ka materjalitootja juhenditega.
3. Minimeerida katuslae aurutõkke rikkumist kruvide jms-ga.
4. Materjalid ja nende asendamine kooskõlastada lahenduse autoriga.
5. Kaltsiumsilikaadi liim kanda nii seinale kui plaadile (võib põhjustada täiendavat materjalikulu), vältida õhkvaheid soojustuse taga.
6. Kaltsiumsilikaatsoojustuse siseviimistluskiht (värv) vastavalt tootja süsteemile, aurutihedate värvide ja tapeetide kasutamine ei ole lubatud.
7. Välisseina ristumisel tellistest siseseinaga tuleb soojustust 250mm ulatuses siseseinale jätkata.
8. Välisseina ristumisel kergkonstruktsioonist siseseinaga tuleb sisesein läbi lõigata ja soojustus jätkata välisseinal pidevana.

TELLIJA	Tallinna Linnavalitsus Vabaduse väljak 7, Tallinn	töö	Tellisseina renoveerimislahendus			
OBJEKT	Vabaduse väljak 10, Tallinn	PROJ.	T. Kalamees P. Klõšeiko			
JOONIS	Soojustatav sein Vertikaallõige	KUUPÄEV	STAADIUM	MÕÕTK.	LEHT	
		12.03.2015	TP	M1:10	1	