



EIROPAS SAVIENĪBA

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



EIROPAS REĢIONĀLĀS
ATTĪSTĪBAS FONDS

Projekts (vienošanās Nr. 2011/0003/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/041)

**ES energoefektivitātes un optimāla telpu mikroklimata prasībām atbilstoša
kompozīta ēkas ārsienas konstruktīvā risinājuma no vietējām izejvielām
izstrāde, izmantojot multifizikālās modelēšanas metodi**

Informatīvā atskaite

Aktivitāte 2.3.

**„Optimālu ēku norobežojošo konstrukciju risinājumu izstrāde, izmantojot aktivitāšu 1.5
un 1.6 rezultātus un pielietojot būvfizikālo faktoru mijiedarbības, telpu mikroklimata
un būves energopatēriņa integrēto dinamisko modeli.”**

Aktivitātes periods: 01.04.2012 – 31. 12. 2012

Zinātniskais vadītājs: A. Jakovičs

Rīgā, 2013.g. martā

Saturs

1. Norobežozošo konstrukciju raksturlielumu, ēku energopatēriņa un telpu mikroklimata multifizikālā modelēšana	4
1.1. Mitruma dinamika saliktās būvkonstrukcijās Latvijas klimatiskajos apstākļos	4
1.1.1. Modelējamo stendu norobežozošo konstrukciju un testēšanas apstākļu īss apraksts	3
1.1.2. Klimatisko apstākļu uzdošana	6
1.1.3. Apstākļu uzdošana telpās modeļanalīzei	7
1.1.4. Temperatūras un relatīvā mitruma sadalījumu izmaiņas stendu būvkonstrukcijās gada ciklā	7
1.2. Dinamisko efektu ietekme uz energopatēriņu	19
1.3. Būvkonstrukciju termiskās inerces ietekme uz telpu pārkarsumu vasaras periodā – iekštelpu gaisa temperatūras svārstības	22
1.4. Energoresursu patēriņa aprēķina pieeju un programmatūras iespēju raksturojums	24
1.4.1. Vienmērīgā aprēķinu metode	26
1.4.2. Dinamiskā aprēķinu metode	26
1.4.3. Mēneša (vienmērīgās) aprēķina metodes un vienkāršās stundas (dinamiskās) aprēķina metodes rezultātu salīdzinājums	28
1.4.4. Aprēķinu programmas	29
1.4.4.1. EFA2	29
1.4.4.2. HeatMod6	30
1.4.4.3. PHPP7.1.	30
1.4.5. Aprēķina piemērs standarta daudzdzīvokļu ēkai (464. sērija)	32
1.5. Energoapatēriņa aprēķina ar HeatMod6, izmantojot mēnešu metodi, raksturojums	33
1.5.1. Galvenās atšķirības starp metodēm	34
1.5.2. Ievaddatu ekrānformu atšķirības	34
1.5.3. Klimata un citi automātiski nosakāmie dati	34
1.5.4. Rezultātu ekrānformu atšķirības	35
1.5.5. Galveno izmainīto ekrānformu attēli	35

1.6. Telpu mikroklimata īpatnības gaisa siltumsūkņa izmantošanas gadījumā apkurei un ventilācijai	42
1.6.1. Matemātiskajā modelī izmantotie pieņēmumi un risinātie vienādojumi	42
1.6.2. Stacionāra atrisinājuma iegūšanas metodika	43
1.6.3. Aprēķinu rezultāti	46
1.6.4. Rezultātu precizitāte un interpretācija	49
2. Optimizētas norobežojošās konstrukcijas	52
2.1. Konstruktīvie risinājumi	52

1. Norobežojošo konstrukciju raksturlielumu, ēku energopatēriņa un telpu mikroklimata multifizikālā modelēšana

1.1. Mitruma dinamika saliktās būvkonstrukcijās Latvijas klimatiskajos apstākļos

1.1.1. Modelējamo standu norobežojošo konstrukciju un testēšanas apstākļu īss apraksts

Kopumā tiek pētīti 5 standi ar atšķirīgu ārsienu uzbūvi, bet vienādiem pārsegumiem (grīdu, griestiem), logiem, durvīm, kā arī vienādām apkures, dzesēšanas un ventilācijas sistēmām, kas integrētas vienā iekārtā - gaisa siltumsūkņī.

Visi standi ir vienādi orientēti vidē un to norobežojošo konstrukciju aprēķina siltuma caurlaidības U ir aptuveni vienādas – $U=0,15 - 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (1.1. tabula). Visiem standiem ir ventilējamās ārsienu apdares, kā arī ventilējama pagrīde un bēniņi, tādējādi praktiski tiek izslēgta lietus un solārā starojuma tieša iedarbība uz norobežojošajām konstrukcijām. Standu grīdas laukumi – 9 m^2 , iekštelpu gaisa tilpumi – 27 m^3 .

Konstrukcijās ir izmantoti būvmateriāli ar

- dažādu īpatnējo siltuma ietilpību c_p , ko bieži tuvināti raksturo uzdodot būvkonstrukcijas laukuma vienības svaru (kg/m^2). Vismazākā siltuma ietilpība ir stendam, kas izveidots no saliekamiem finiera moduļiem ar minerālvates pildījumu, vislielākā – ārsienai, kas veidota no lielgabārīta keramiskajiem blokiem;
- dažādām ūdens tvaiku caurlaidības īpašībām, ko raksturo ar tvaiku difūzijas ekvivalentu gaisā μ (m). Vislielākā tvaiku caurlaidība ir minerālvatei ($\mu = 1$), vismazākā – prettvaiku barjerai (plēvei);
- atšķirīgu siltuma vadītspēju λ (W/mK) un tās atkarību no mitruma un temperatūras. Kokskaidu un minerālvatei šīs atkarības ir visizteiktākās, būtiski siltuma vadītspēja ar mitrumu mainās arī putubetonam (vieglbetonam), bet relatīvi vāji šī atkarība ir izteikta blīvajiem materiāliem – apmetumam, keramikai).

Tādējādi gaidāms, ka pat pie vienādām būvkonstrukciju aprēķina siltuma caurlaidībām U un pārējiem apstākļiem, dažādo standu energopatēriņš mainīgos āra klimatiskajos apstākļos var savā starpā atšķirties un atšķirties arī no atbilstoši MK noteikumiem Nr. 39 (2009) ar sezonas metodi aprēķinātajām vērtībām..

Pašreizējā pārejas procesu būvkonstrukcijās pētījumu posmā visu standu iekšpusē ir uzstādīta vienādu temperatūras apstākļu un ventilācijas intensitātes (gaisa apmaiņas)

automātiska uzturēšana. Gaisa mitruma režīms telpās netiek papildus regulēts – tas veidojas āra gaisa un būvkonstrukciju mitruma ietekmes rezultātā.

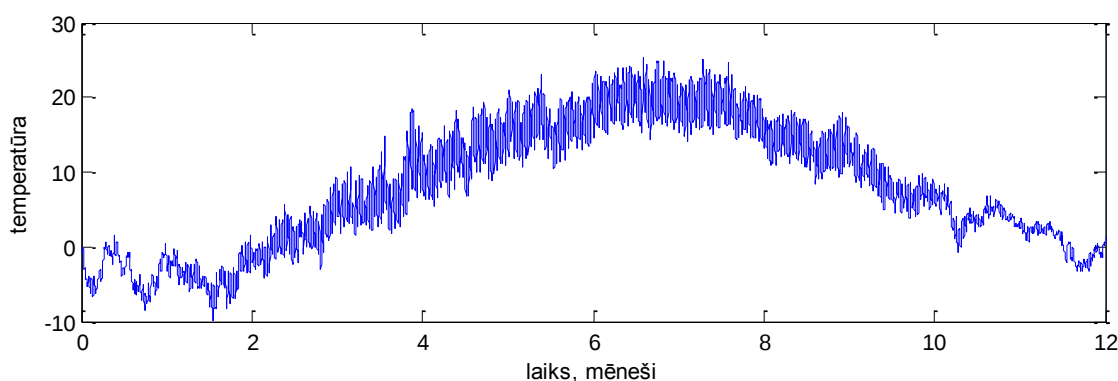
Tabula 1.1. Būvkonstrukciju varianti un to slāņu raksturlielumi (slāņi sakārtoti no ārpuses uz iekšpusi)

Konstrukcija	1. slānis	2. slānis	3. slānis	4. slānis	5. slānis
PLY $U=0.14$ $W/(m^2 \cdot K)$ 79 kg/m^2	Saplāksnis, $d=2\text{cm},$ $\lambda=0,17$ $W/(m \cdot K),$ $c=1500$ $J/(kg \cdot K)$	Akmens vate, $d=20,$ $\lambda=0,036^*,$ $c=850$	Saplāksnis, $d=2,$ $\lambda=0,17,$ $c=1500$	Fibrolīts, $d=7,5,$ $\lambda=0,068,$ $c=2100$	Kaļķu apm., $d=1,5,$ $\lambda=0,49,$ $c=840$
AER $U=0.14$ $W/(m^2 \cdot K)$ 165 kg/m^2	Pretvēja plāksne, $d=3,$ $\lambda=0,034,$ $c=850$	Akmens vate, $d=5$	Kaļķu apm., $d=1,5$	Putu betonu bloki, $d=37,5,$ $\lambda=0,072,$ $c=850$	Kaļķu apm., $d=1,5$
LOG $U=0.14$ $W/(m^2 \cdot K)$ 152 kg/m^2	Frēzbaļķis, $d=20,$ $\lambda=0,13,$ $c=2100$	Akmens vate, $d=20$	Tvaiku barjera/ Frēzbaļķis, $d=4$	Koka apdare, $d=4,$ $\lambda=0,13,$ $c=2100$	
CER $U=0.14$ $W/(m^2 \cdot K)$ 363 kg/m^2	Pretvēja plāksne, $d=3$	Akmens vate, $d=12,$	Kaļķu apm., $d=1,5$	Keramiskie bloki, $d=44,$ $\lambda=0,129,$ $c=850$	Kaļķu apm., $d=1,5$
Griesti $U=0.16$ $W/(m^2 \cdot K)$ 20 kg/m^2	Saplāksnis, $d=1,2$	Koka skaidu vate, $d=20,$ $\lambda=0,036,$ $c=850$	Saplāksnis, $d=0,4$	Akmens vate, $d=5$	Tvaiku barjera/ saplāksnis, $d=0,4$
Grīda $U=0.16$ $W/(m^2 \cdot K)$ 41.5 kg/m^2	Saplāksnis, $d=2,1$	Akmens vate, $d=20$	Tvaiku barjera/ saplāksnis, $d=2,1$	Akmens vate, $d=5$	Saplāksnis, $d=2,1$
Logs	$U=0,72 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)},$ rāmja daļa $0,28,$ laukums $1,8 \text{ m}^2,$ solārā starojuma enerģijas caurlaidība $g=0.5,$ dienvidu pusē				
Durvis	$U=0,82 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)},$ rāmja daļa $0,44,$ laukums $2,0 \text{ m}^2,$ $g=0.5,$ ziemeļu pusē				

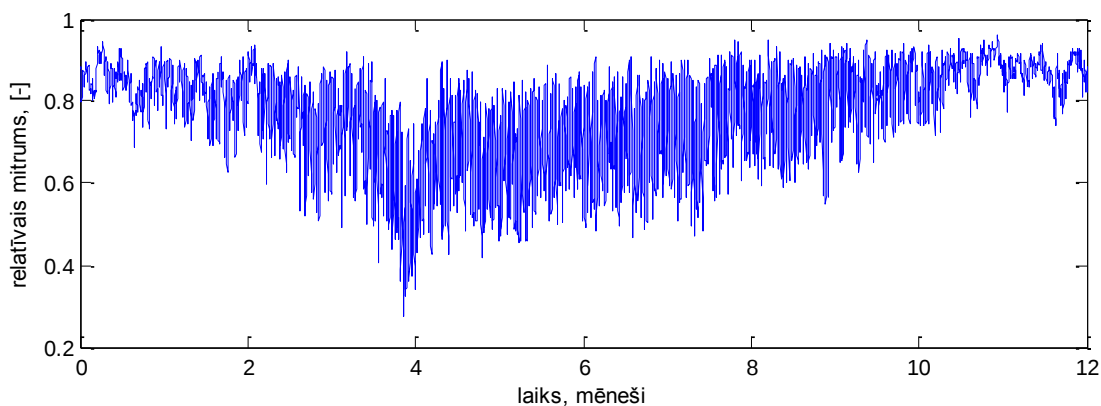
*-šeit visur norādītas siltuma vadītspējas vērtības sausā stāvoklī, bet aprēķinā tiek ņemta vērā to atkarība no mitruma

1.1.2. Klimatisko apstākļu uzdošana

Lai skaitliski analizētu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības īpašības un to izmaiņas, kā arī kondensāta rašanās riskus ilgtermiņā, tika izmantoti www.meteo.lv ilggadīgo novērojumu dati par klimatiskajiem apstākļiem Rīgā (āra gaisa temperatūru, mitrumu u.c.). Lai samazinātu atsevišķu gadu noviržu no klimatiskās normas ietekmi uz veicamās analīzes rezultātiem, katras stundas mērījumu dati tiek vidējoti laika periodā no 2006.-2011. gadam, tādējādi iegūstot attiecīgā periodu stundu vidējos datus – att. 1.1.2.1. un att. 1.1.2.2. piemēram attiecīgi parādītas šādas vidējotās āra gaisa temperatūras un relatīvais mitrums izmaiņas gada laikā.



Att. 1.1.2.1. - Vidējotās āra gaisa temperatūras izmaiņas gada ciklā Rīgā



Att. 1.1.2.2. - Vidējotās relatīvā mitrums izmaiņas gada ciklā Rīgā

Attēli uzskatāmi parāda, ka vidējā maksimālā temperatūra (aptuveni 25°C) tiek sasniegta jūlijā un augustā, bet zemākā (aptuveni -8°C) – janvārī un februārī, tomēr katrā atsevišķā gadā šie temperatūras ekstrēmi var būt vairāk vai mazāk izteikti. Līdzīgi arī āra gaisa vidējais relatīvais mitrums vairāk nekā 6 mēnešus gadā pārsniedz 80%, bet vidējā relatīvā mitrums minimums vērojams aprīļa beigās, kad tas samazinās līdz 30%.

Jāievēro, ka relatīvais mitrums neraksturo absolūto ūdens tvaiku daudzumu gaisā, bet gan tikai to, cik tuvu dotajā temperatūrā ūdens tvaiku daudzums gaisā ir piesātinātam stāvoklim (100% relatīvais mitrums), kad notiek kondensācija. Piem., pie 80% gaisa mitruma un temperatūras -8°C absolūtais ūdens daudzums gaisā ir 2 g/m^3 , bet pie 25°C – $18,4\text{ g/m}^3$. Pie iekštelpu temperatūras 18°C un gaisa mitruma 50% absolūtais ūdens daudzums gaisā ir $7,7\text{ g/m}^3$ - termiskā komforta nodrošināšanai šie parametri telpās ilgstoši (sezonāli) ir jāuztur pēc iespējas nemainīgi.

Ievērojot teikto ziemā dominē siltuma un ūdens tvaiku plūsma caur būvkonstrukcijām uz āru, bet vasaras periodā tā ir inversa – siltums un ūdens tvaiki var pārvietoties caur būvkonstrukcijām no ārpuses uz iekšpusi. Atšķirīga ir situācija caurspīdīgajās konstrukcijās (stiklojumos) – Saules starojums var papildus uzsildīt telpu gan aukstajā, gan siltajā gada laikā, bet mitruma apmaiņas caur stiklojumu praktiski nav. Mitruma apmaiņu starp iekštelpu un āra gaisu nodrošina arī ventilācija, piem., ziemā telpā ieplūstošais āra gaiss parasti ir ar mazu absolūto ūdens daudzumu. Tādēļ gaisa apmaiņas intensitāte ir būtiska pētot gan gaisa mitrumu telpā, gan tā izmaiņas būvkonstrukcijās.

1.1.3. Apstākļu uzdošana telpās modeļanalīzei

Lai dažādo būvkonstrukciju īpašības varētu salīdzināt telpās apkures periodā tika uzdota nemainīga temperatūra - 18°C un vienāds relatīvais mitrums – 50%. Ārpus apkures perioda apstākļi telpā netiek kondicionēti, t.i., temperatūra var paaugstināties, kas tuvināti atbilst situācijai dzīvojamās ēkās bez piespiedu ventilācijas un dzesēšanas sistēmām.

Vispirms tiek analizētas mitruma izmaiņas būvkonstrukcijās gada ciklā (1.1.4). Pēc tam tiek salīdzināts apkures siltuma patēriņš tabulā 1.1.1 aprakstītajām stendu konstrukcijām ar atšķirīgu ārsienu uzbūvi un vienādiem griestu, grīdas risinājumiem un logiem, durvīm. Var novērtēt solārā starojuma un gaisa apmaiņas intensitātes ietekmi uz siltuma patēriņu. Apskatot 3 gadījumus:

- solārā radiācija caur logu tiek ņemta vērā; gaisa apmaiņas nav ($n = 0$);
- solārā radiācija caur logu tiek ņemta vērā; gaisa apmaiņas intensitāte $n = 0,5\text{ 1/h}$;
- nav solārās radiācijas ietekmes caur logu un nav gaisa apmaiņas ($n = 0$).

1.1.4. Temperatūras un relatīvā mitruma sadalījumu izmaiņas stendu būvkonstrukcijās gada ciklā

Turpmākajos dinamiskajos 1D aprēķinos, izmantojot āra temperatūras un mitruma svārstību vidējotos gada ciklus Rīgā (*att. 1.1.2.1.* un *att. 1.1.2.2.*), tiek analizēti relatīvā

mitruma un temperatūras sadalījumi dažādajās testēšanas standu būvkonstrukcijās – no atšķirīgiem materiāliem veidotajās ārsienās un pārsegumos (Tabula 1.1.1). Tiek pieņemts, ka iekšā gaisa temperatūra un relatīvais mitrums ir nemainīgi visu gadu: attiecīgi $+18^{\circ}\text{C}$ un 50%. Tā kā apstākļi ārā un būvkonstrukciju siltuma vadītspēja laikā to mitruma izmaiņu dēļ mainās, tad

- aprēķins ir dinamisks – katrā laika momentā veidojas atšķirīgi temperatūru un mitruma sadalījumi;

- vasarā un ziemā sadalījumi atšķiras ne tikai kvantitatīvi, bet arī kvalitatīvi.

Attēlojums grafikos ir šāds:

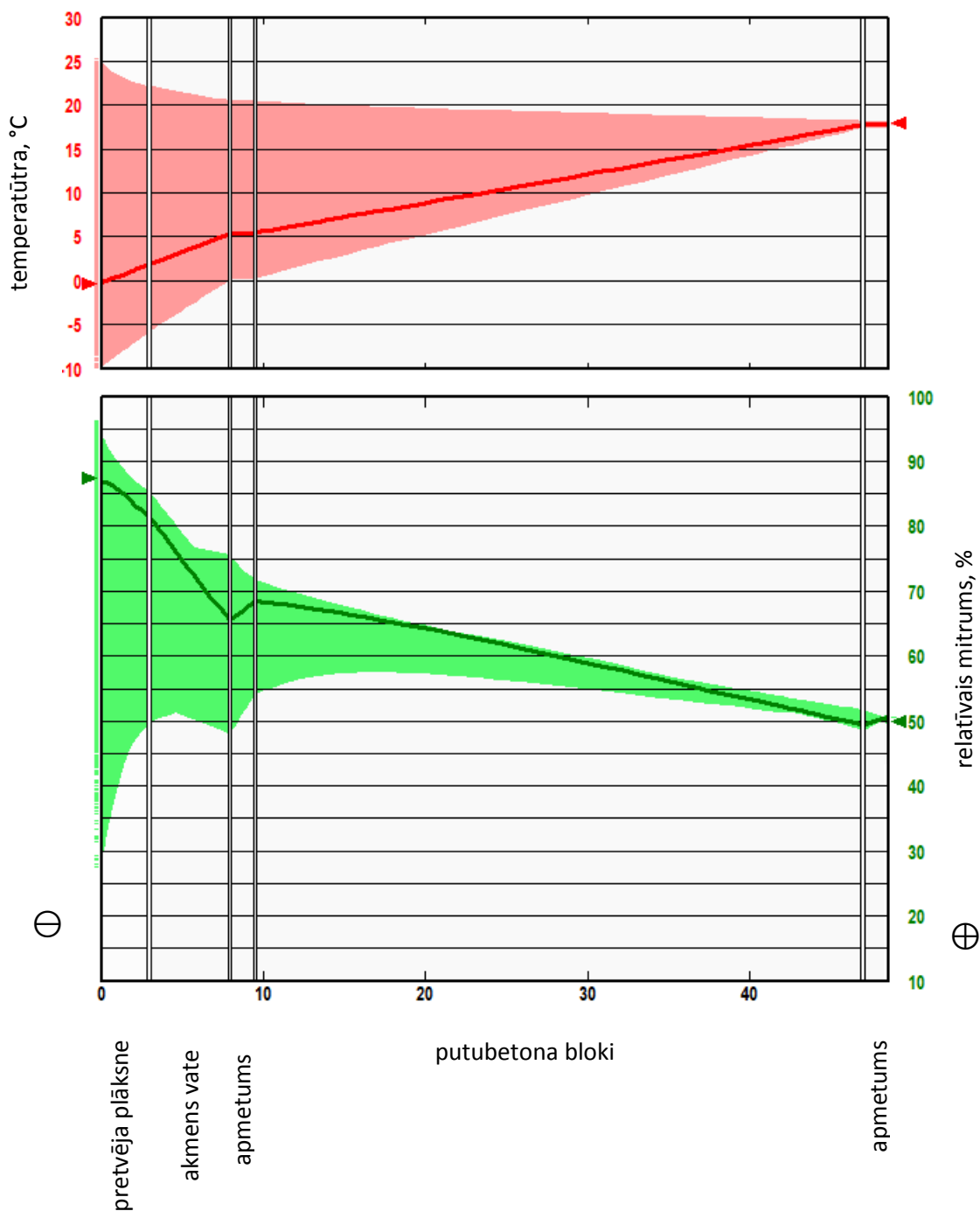
- norobežojošās konstrukcijas ārējā virsma ir iezīmēta ar „-“, (pa kreisi), bet iekšējā virsma ar „+” (pa labi);

- temperatūras un relatīvā mitruma sadalījumi būvkonstrukcijās parādīti attiecīgi ar sarkanām un zaļām līknēm. Ar atsevišķu līkni izcelts laika moments, kad dinamiskajā procesā āra temperatūra ir 0°C (jānorāda, ka sadalījums šajā gadījumā nesakrīt ar stacionāra aprēķina rezultātu pie fiksētas 0°C āra gaisa temperatūras);

- iekrāsotie (sarkanie un zaļie) apgabali grafikos parāda, kādā diapazonā attiecīgajā būvkonstrukcijā var svārstīties temperatūra un mitrums gada ciklā un tādējādi ļauj novērtēt arī kondensāta rašanās riskus.

Aprēķinos izmantota komerciāla programmatūra WUFI.

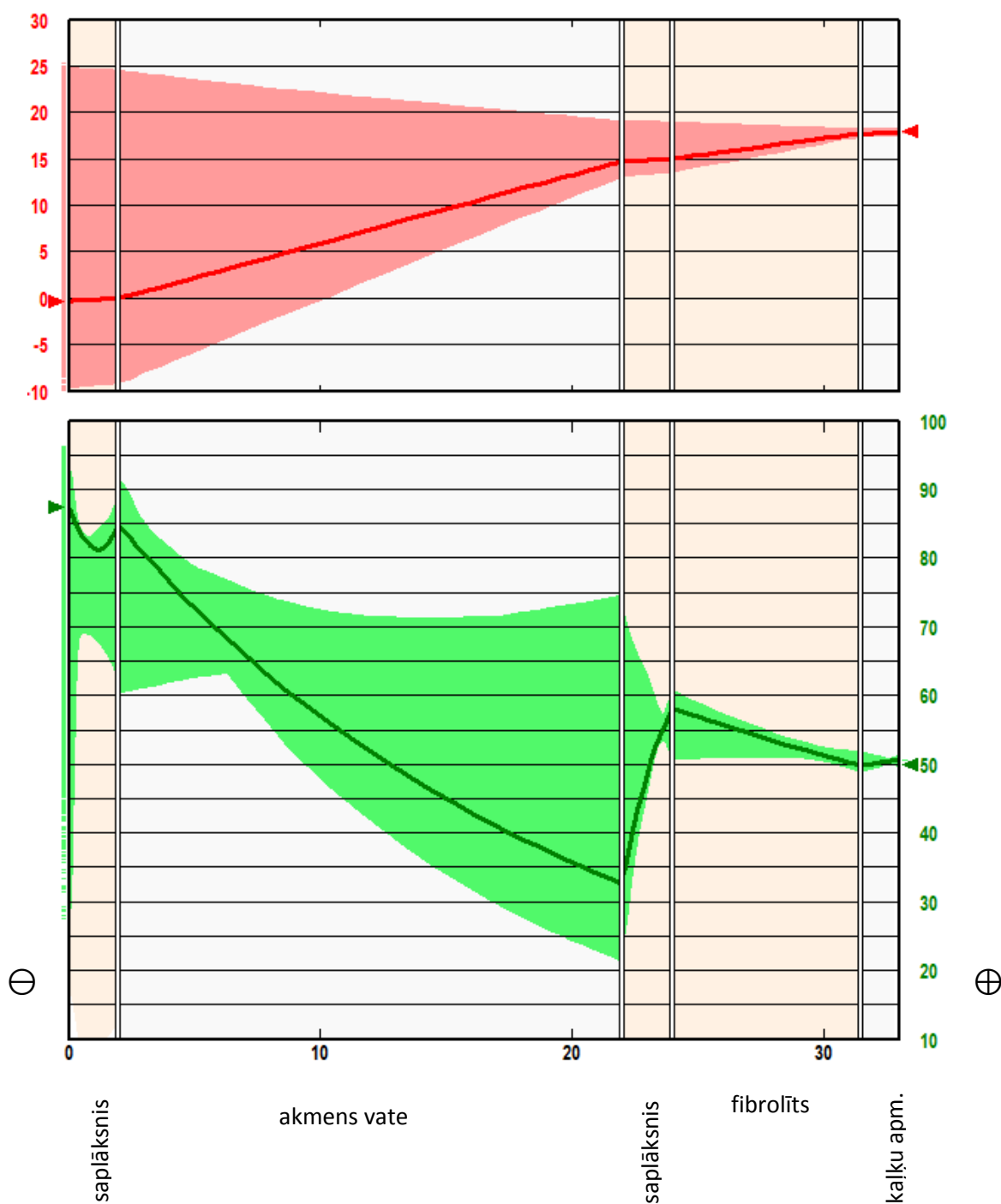
Putubetona bloku ārsiena (AER)



Att. 1.1.4.1. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

Maksimālais relatīvais mitrums tiek sasniegts pie pretvēja plāksnes ārējās virsmas, kondensāta risku konstrukcijas iekšienē gada ciklā nav. 80% relatīvā mitruma sliekšnis arī tiek sasniegts ziemā konstrukcijas ārējā slānī, kur temperatūra zema – mikroorganismu attīstības risku nav.

Saplākšņu moduļu ārsiena (PLY)

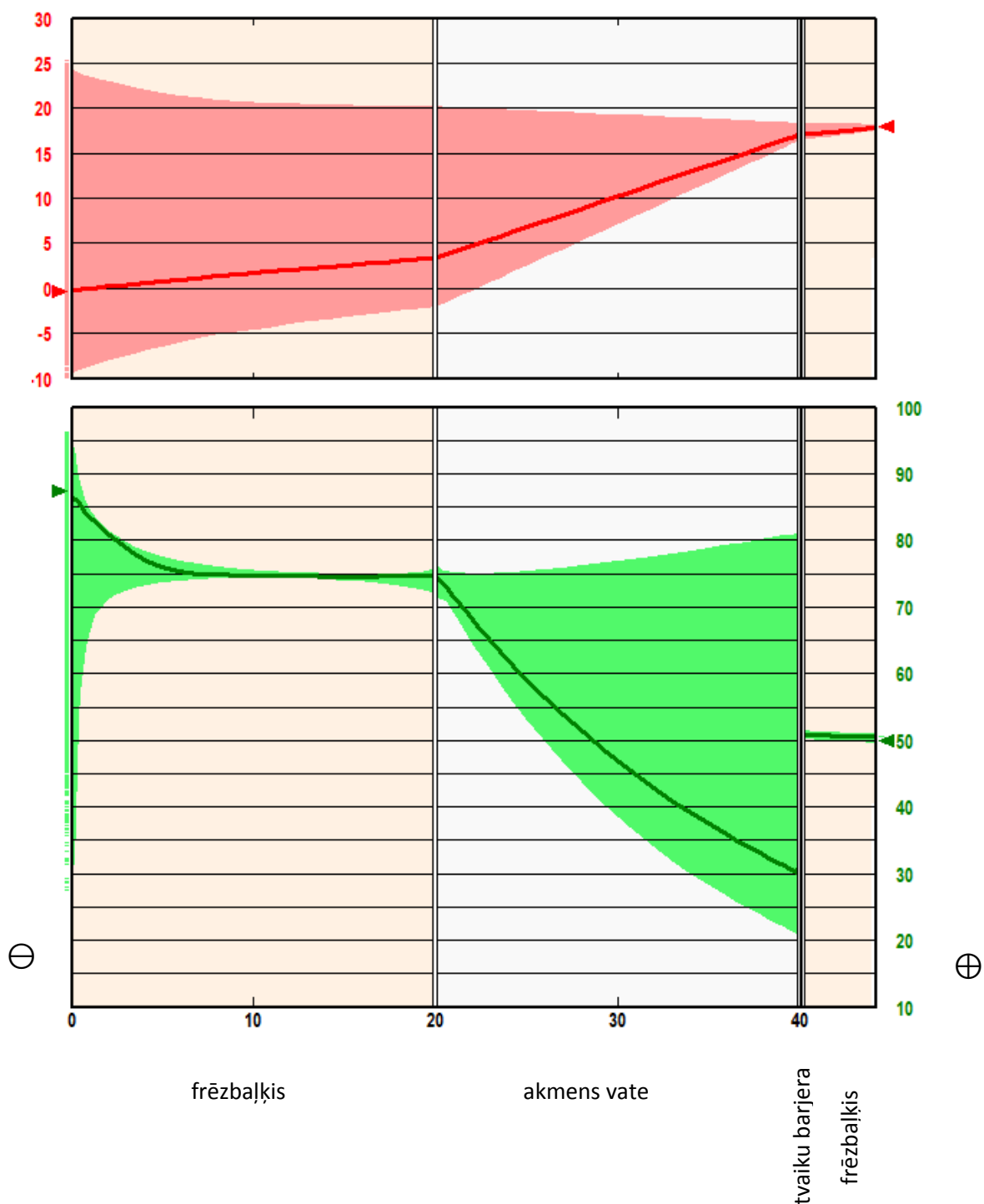


Att. 1.1.4.2. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

Aukstajā gadalaikā maksimālais relatīvais mitrums (90%) tiek sasniegts paneļu siltuma izolācijas materiāla ārējās virsmas tuvumā, kondensācijas risku var mazināt paneļu ārējā saplākšņa perforācija mitruma caurlaidības palielināšanai. Vasaras periodā augstākais relatīvais mitrums (līdz 75%) tiek sasniegts pie paneļu siltumizolācijas materiālu iekšējās

virsmas - paneļu ārsienas perforācija vēl vairāk palielinātu mikroorganismu augšanas risku šajā siltajā zonā vasarās periodā.

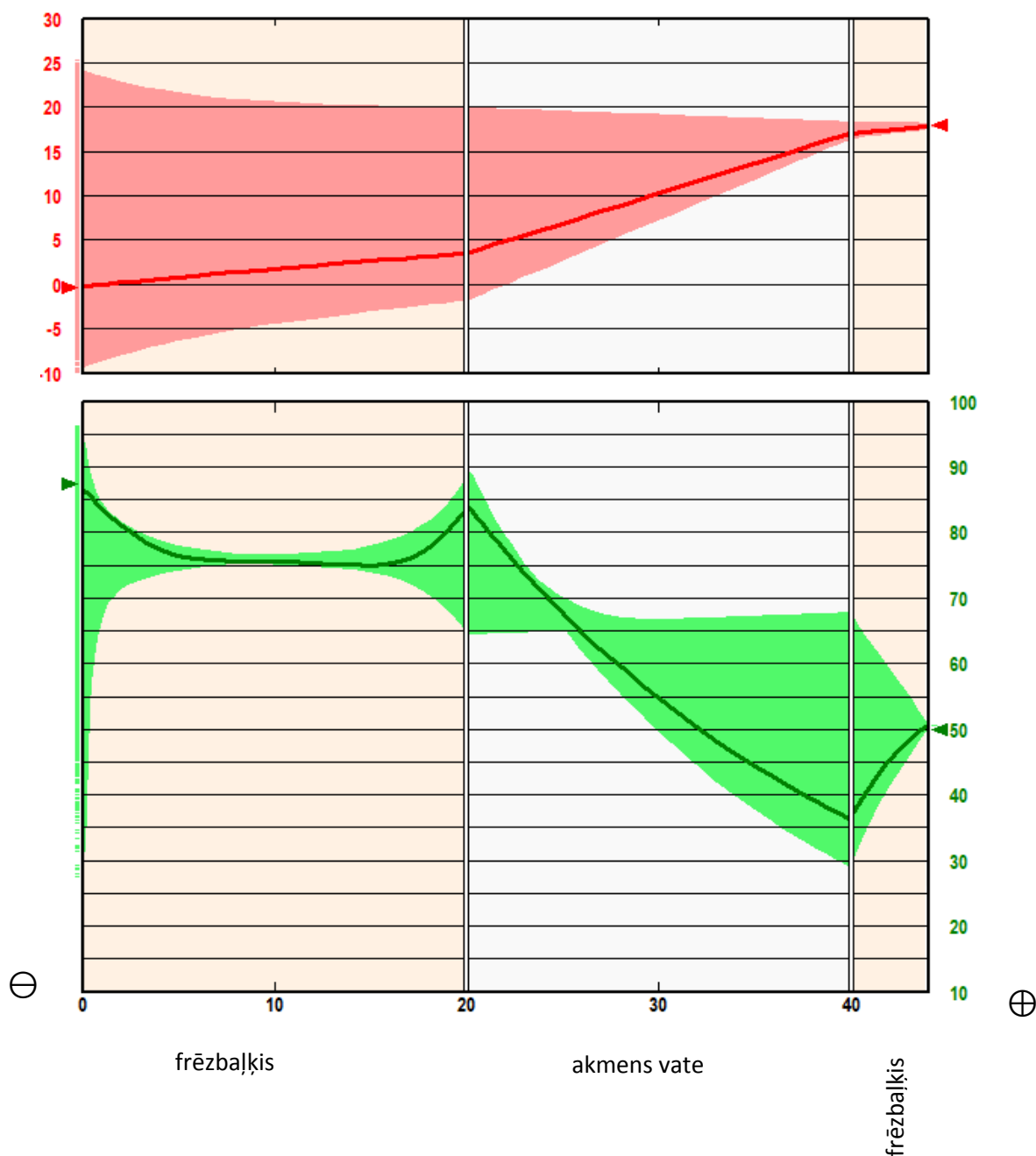
Frēzbaļķu ārsiena (ar prettvaiku plēvi) (LOG)



Att.1.1.4.3. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

Aukstajā gada laikā prettvaiku plēve efektīvi novērš kritisku relatīvā mitruma pieaugumu siltuma izolācijas materiālā – maksimālais relatīvai mitrums (75%) tiek sasniegts minerālvates ārējā slānī, kur zema ($<5^{\circ}\text{C}$) temperatūra. Vasarā nelabvēlīga situācija (80% mitrums, 18°C) ar lielu mikroorganismu augšanas risku var veidoties pie siltuma izolācijas materiāla iekšējās virsmas.

Frēzbaļķu ārsiena (bez prettvaiku plēves)

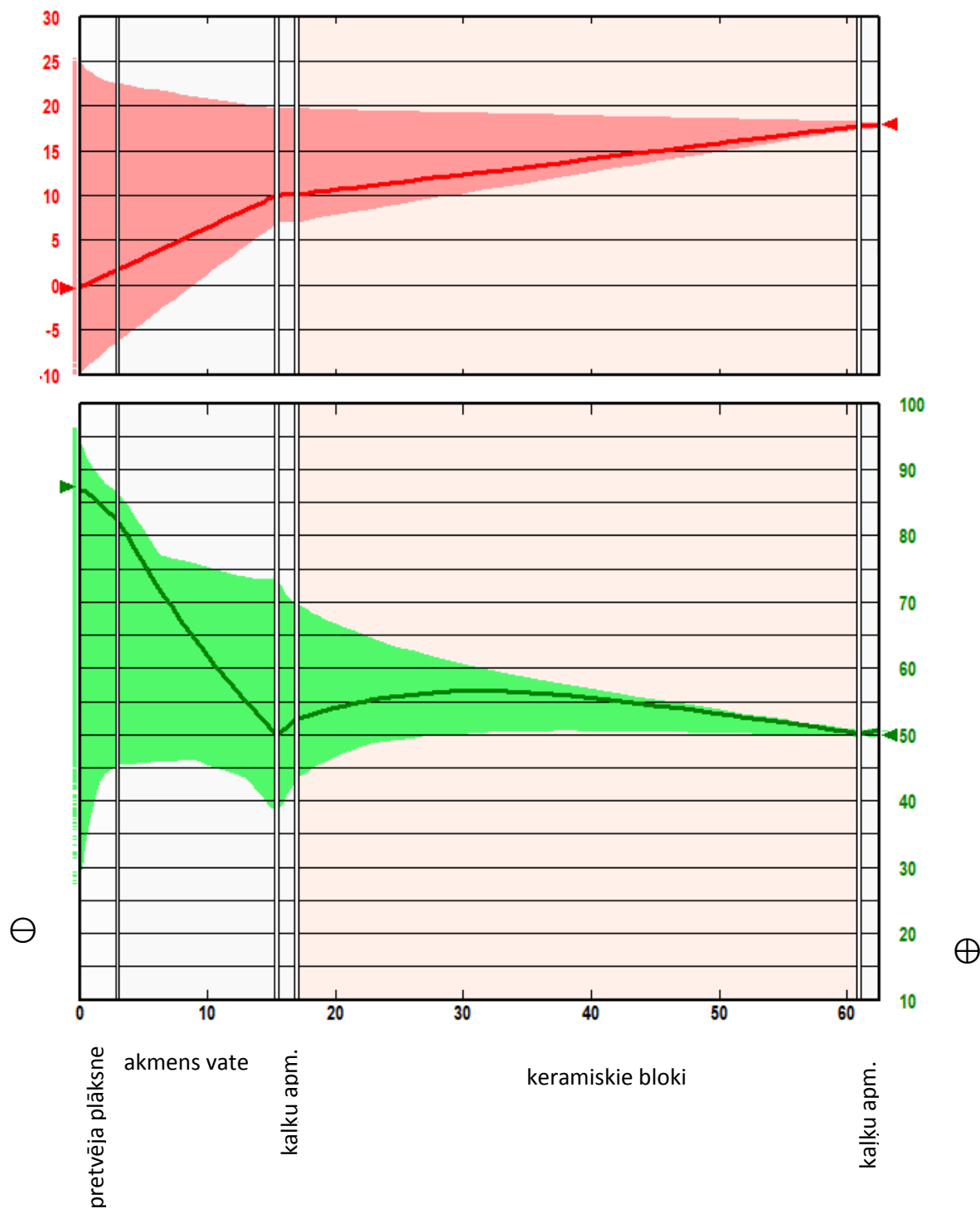


Att. 1.1.4.4. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

Aukstajā gadalaikā relatīvais mitrums pie frēzbaļķu un minerālvates robežvirsmas var sasniegt 90%, pastāv riski konstrukcijas ilgtspējai, tādēļ šāds risinājums netiek izmantots.

Vasarā minerālvates slānī situācija mazāk kritiska nekā iepriekš apskatītajā gadījumā ar prettvaiku barjeru.

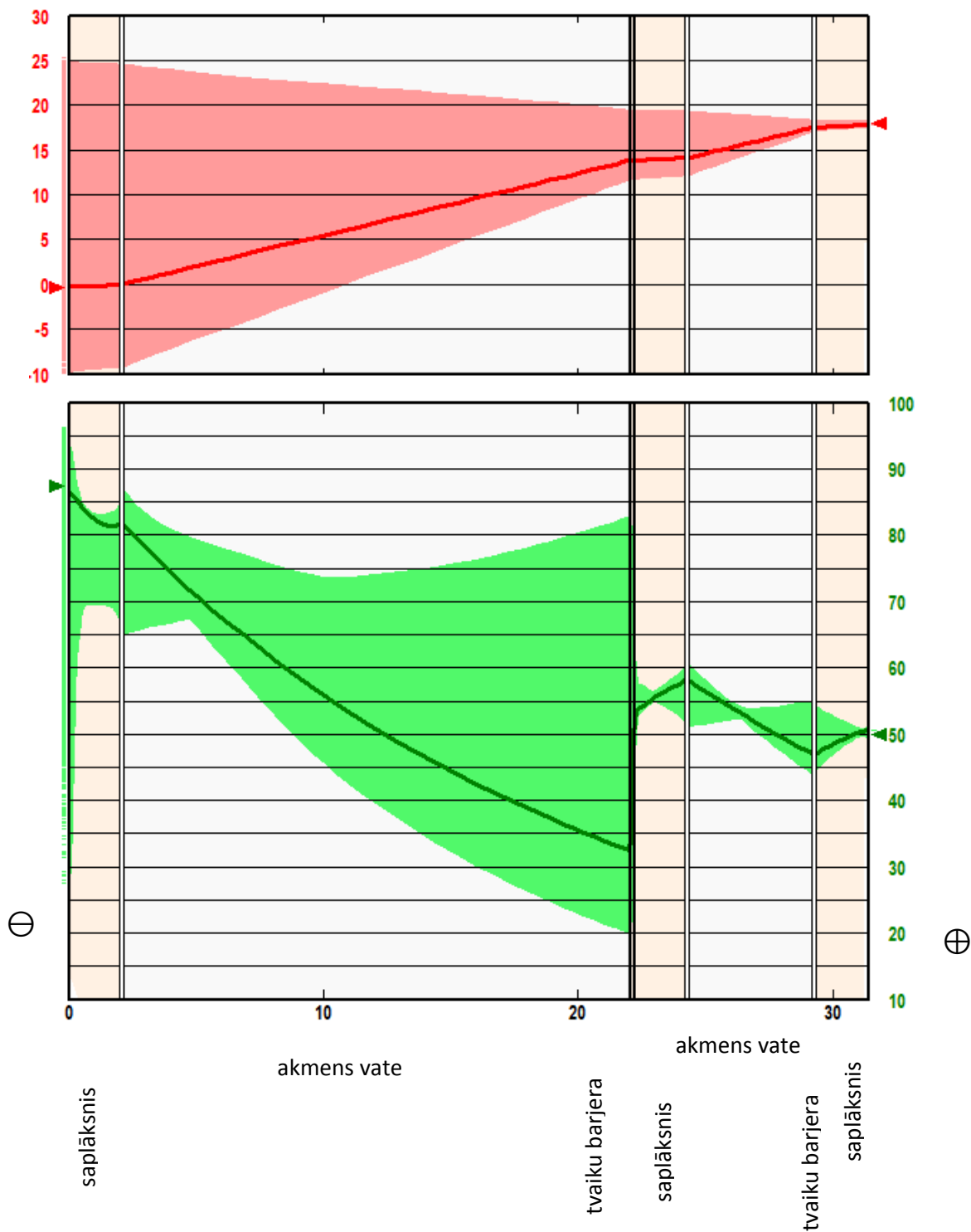
Dobo keramisko bloku ārsiena (CER)



Att.1.1.4.5. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

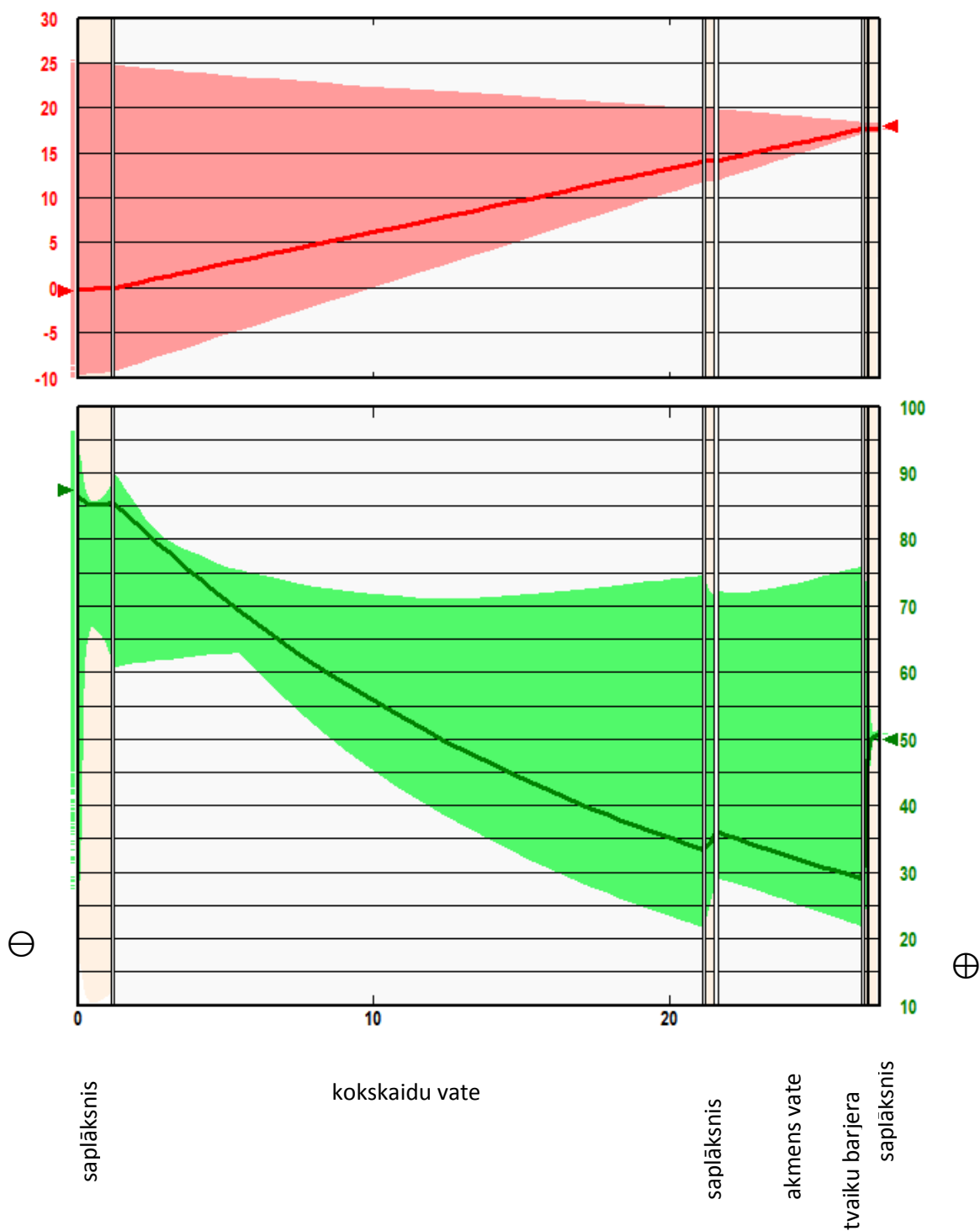
Liels relatīvais mitrums ziemas periodā tiek sasniegts konstrukcijas ārējā slānī, bet te ir zema temperatūra un mazs absolūtais ūdens daudzums konstrukcijā, kas riskus minimizē.

Grīda



Att.1.1.4.6. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

Griesti



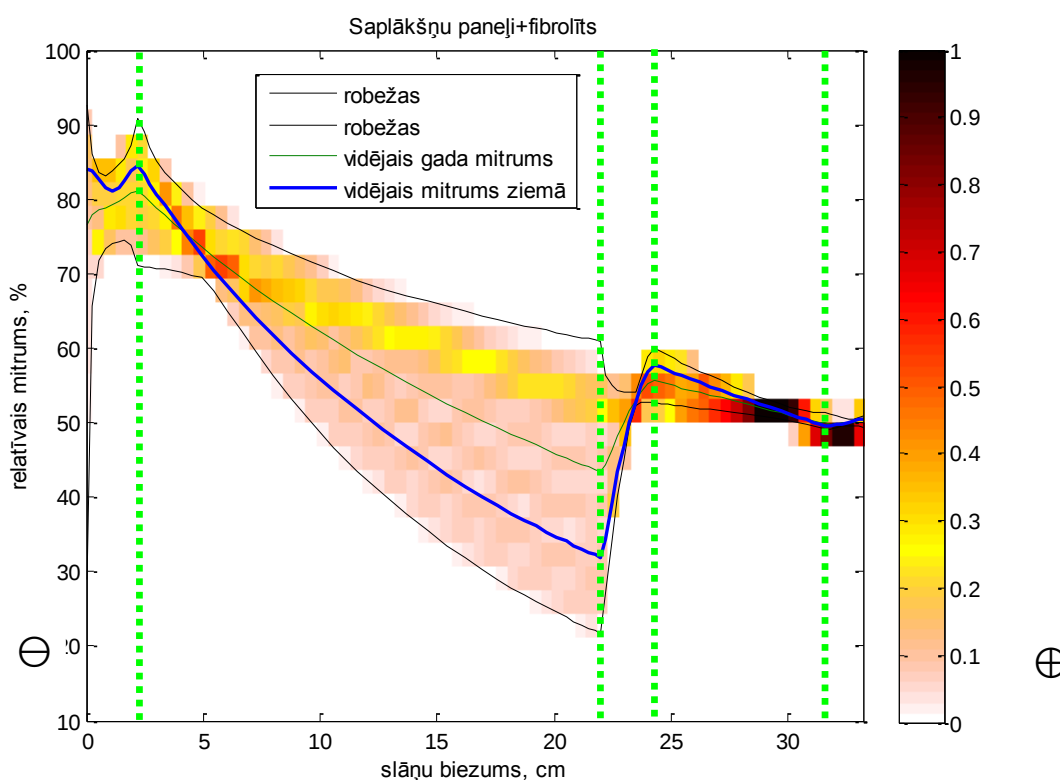
Att.1.1.4.7. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā

Turpmākajos piemēros tiek pētīts viss testēšanas stands ar (ārsienām, grīdu, griestiem, logiem un durvīm) kopumā tam veikts dinamisks 3D aprēķins. Tiek pieņemts, ka

- temperatūra iekšējā tiek uzturēta konstanta +18°C apkures sezonā, un mitrums iekšā ir nemainīgs visu gadu - 50%. Pārējā laikā temperatūra iekšējā mainās. Ārā ir paņemts gada cikls Rīgā (att. 1.1.2.1. un att. 1.1.2.2).

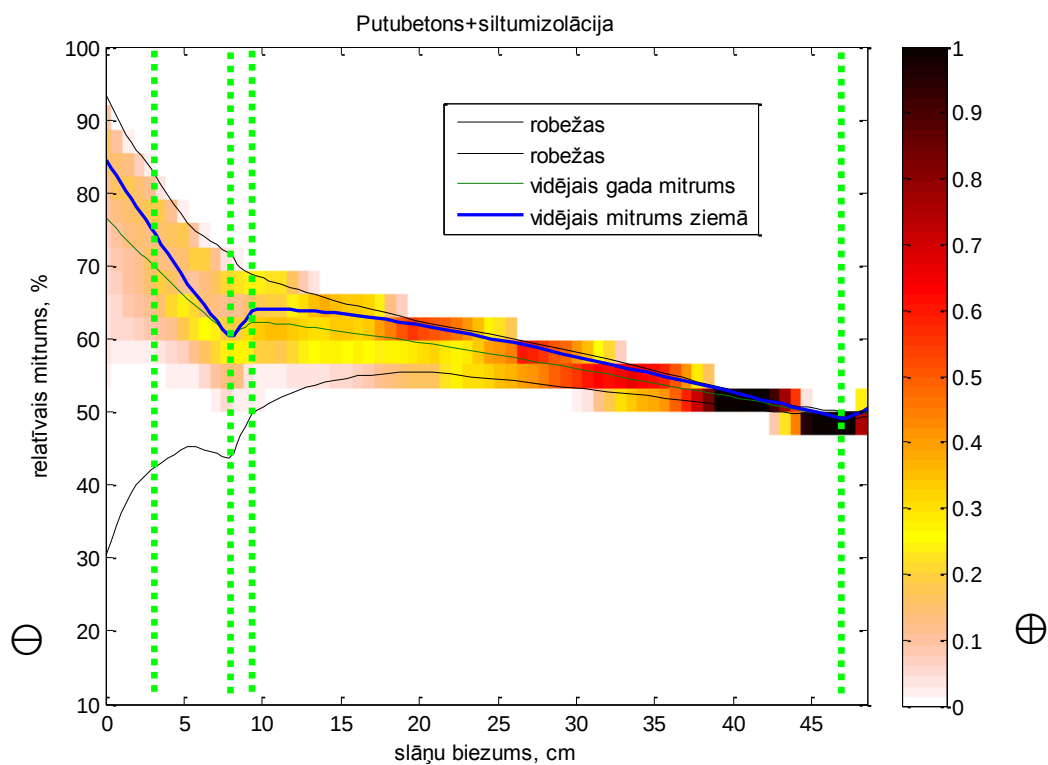
Grafikos ar krāsām ir parādīts arī tas, cik bieži gada laikā noteikts relatīvais mitrums realizējas kādā būvkonstrukcijas zonā. Piemēram, ja krāsa atbilst 0.2 vienībām, tas nozīmēs, ka 20% no gada laika relatīvais mitrums būs tāds konkrētajā būvkonstrukcijas vietā.

Ar zilu līniju parādīts vidējais relatīvais mitrums ziemas periodā (no decembra sākuma līdz februāra beigām). Zaļās vertikālās raustītās līnijas apzīmē būvkonstrukcijas slāņu robežas

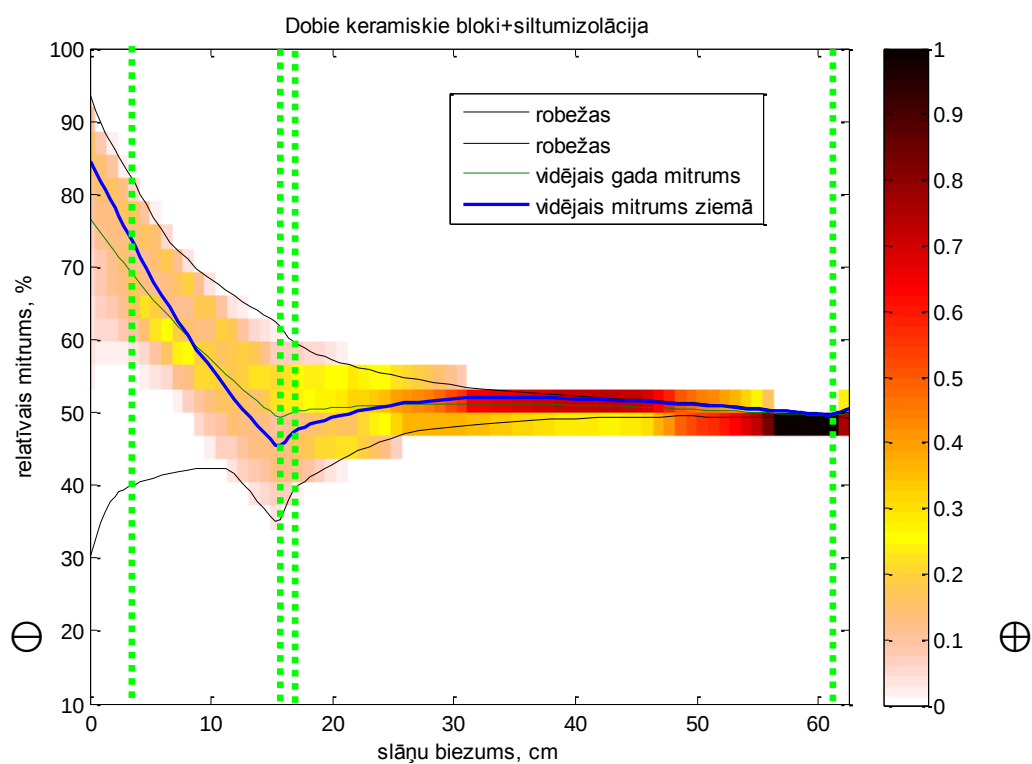


Att.1.1.4.8. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi saplākšņa paneļu (PLY) būvkonstrukcijā

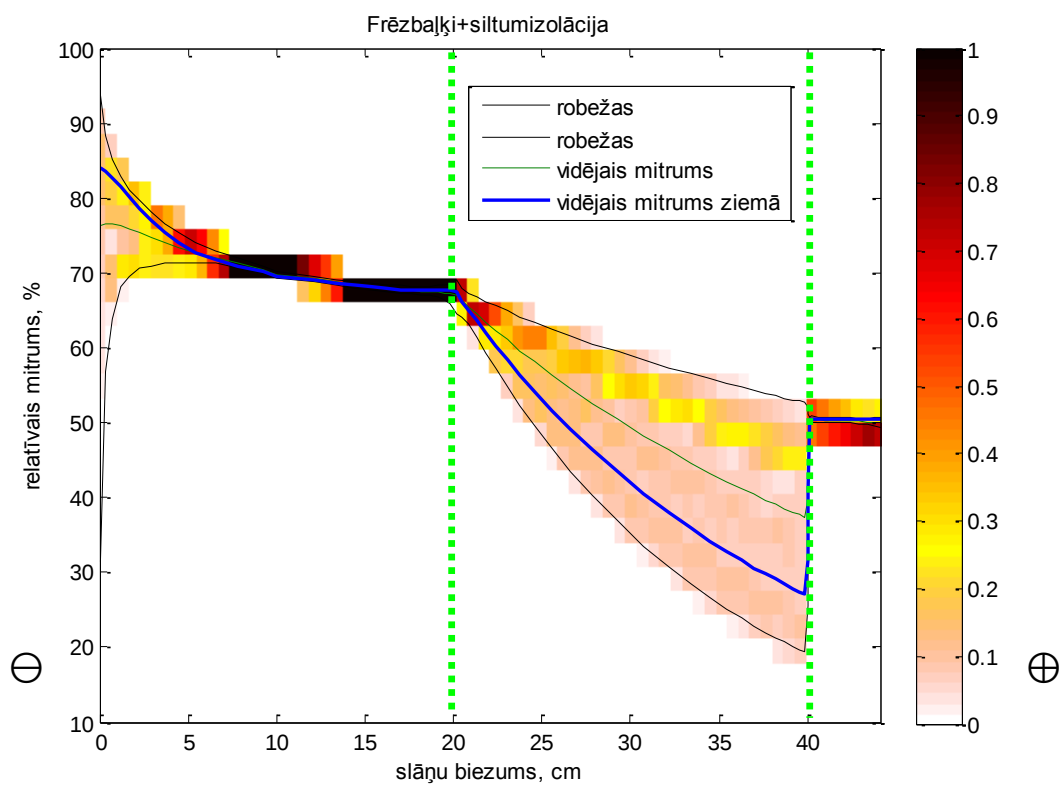
Attēls 1.1.4.8 uzskatāmi parāda, ka liels relatīvais mitrums (līdz 90%) pie minerālvates ārējās virsmas veidojas mazāk nekā ¼ daļu no gada laika, bet ½ no gada laika gaisa mitrums minerālvates slānī var sasniegt 50%. Šādā veidā iespējams analizēt arī sekojošajos attēlos parādītos sadalījumus citām būvkonstrukcijām un novērtēt tajās ar mitrumu saistītos kondensāta rašanās, būvkonstrukciju bojājumu un sēnīšu augšanas riskus.



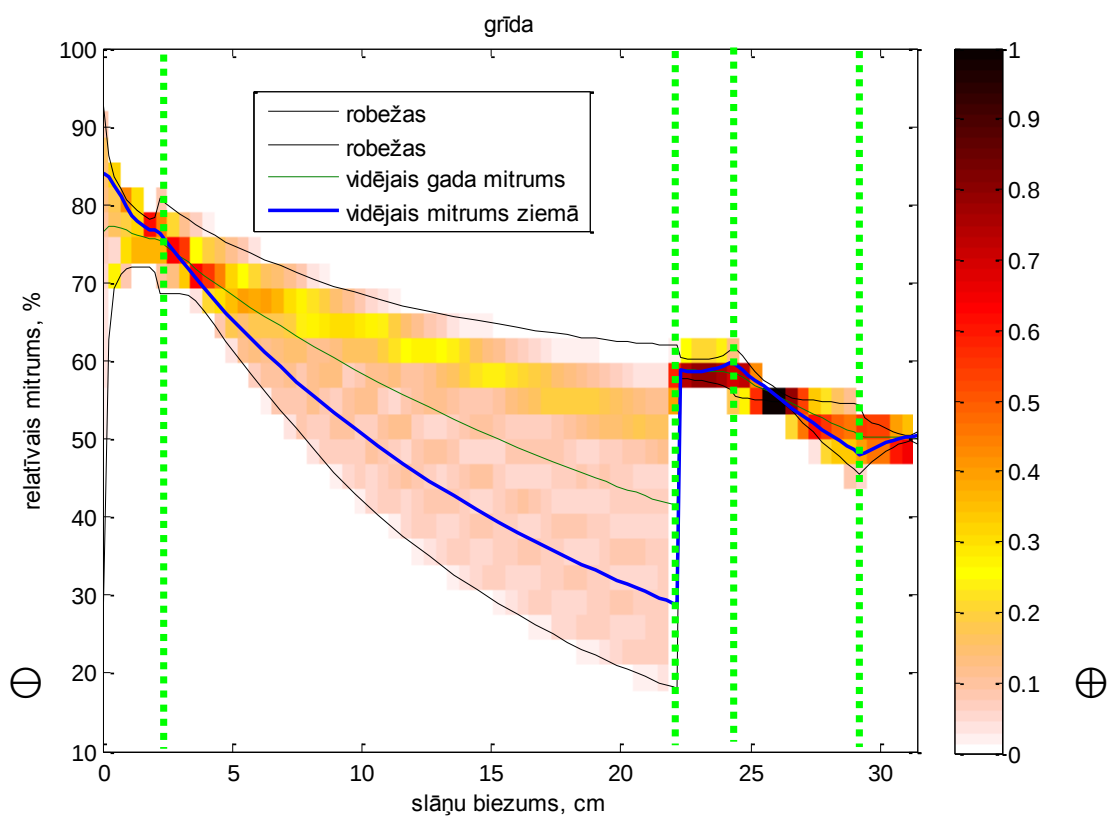
Att.1.1.4.9. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi putubetona ārsienā (AER)



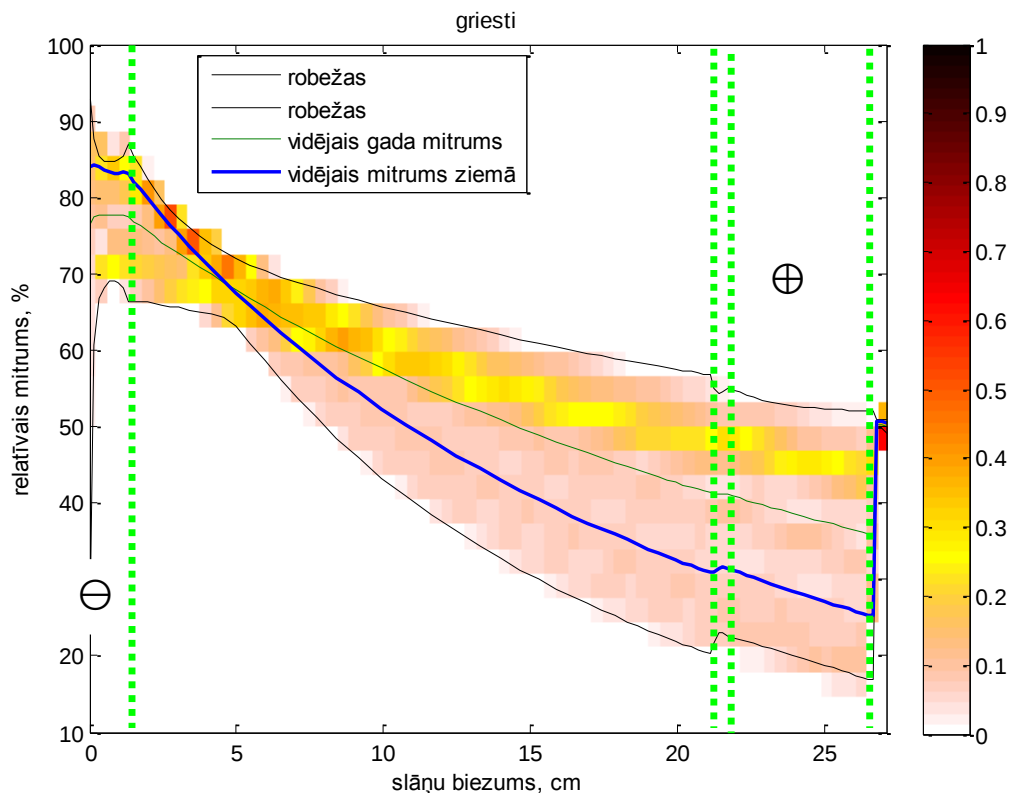
Att.1.1.4.10. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi keramisko bloku (CER) ārsienā



Att. 1.1.4.11. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi frēzbaļķu (LOG) būvkonstrukcijā



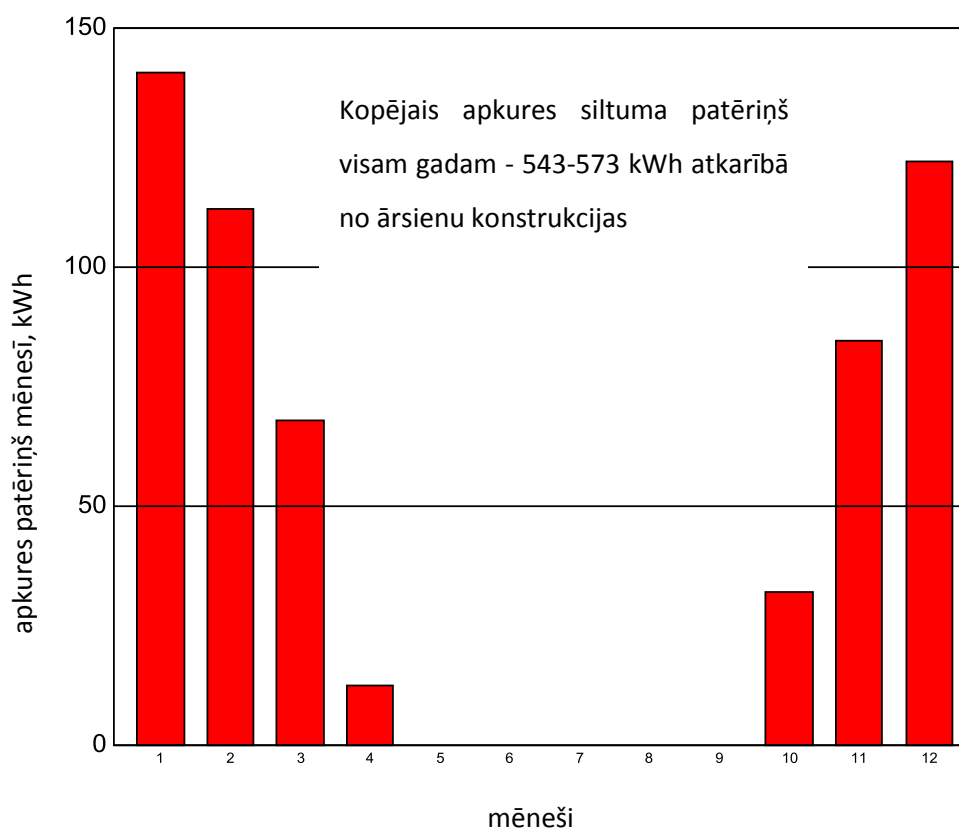
Att.1.1.4.12. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi karkasa grīdas konstrukcijā



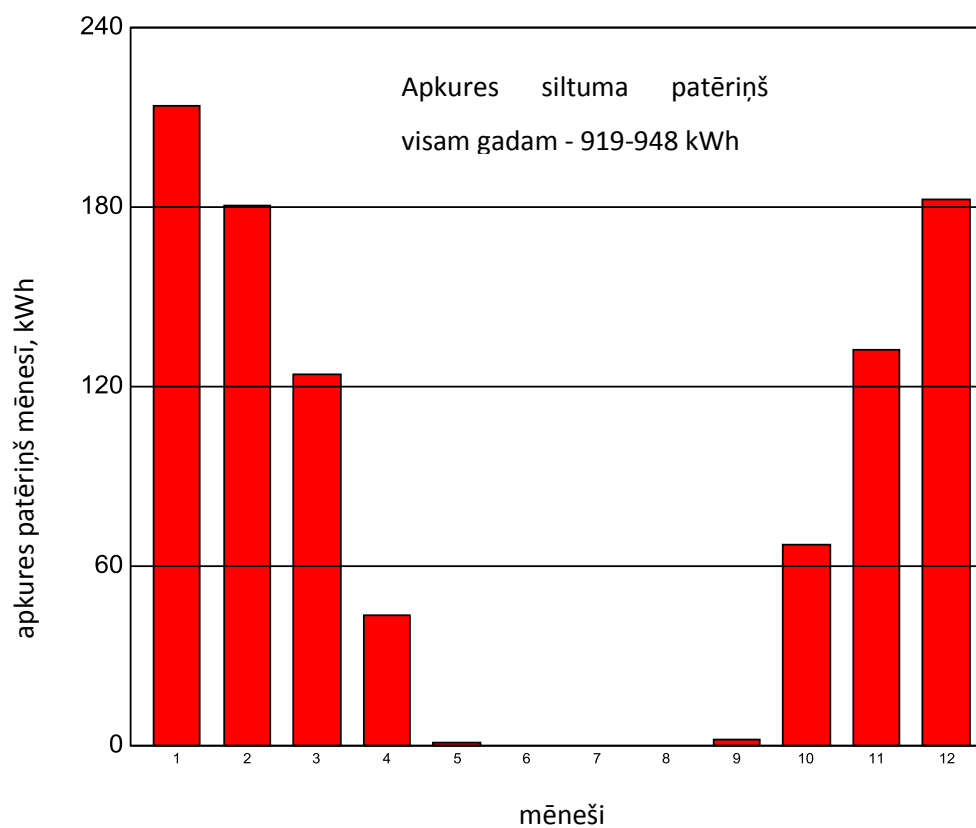
Att.1.1.4.13. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi griestu pārseguma konstrukcijā

1.2. Dinamisko efektu ietekme uz energopatēriņu

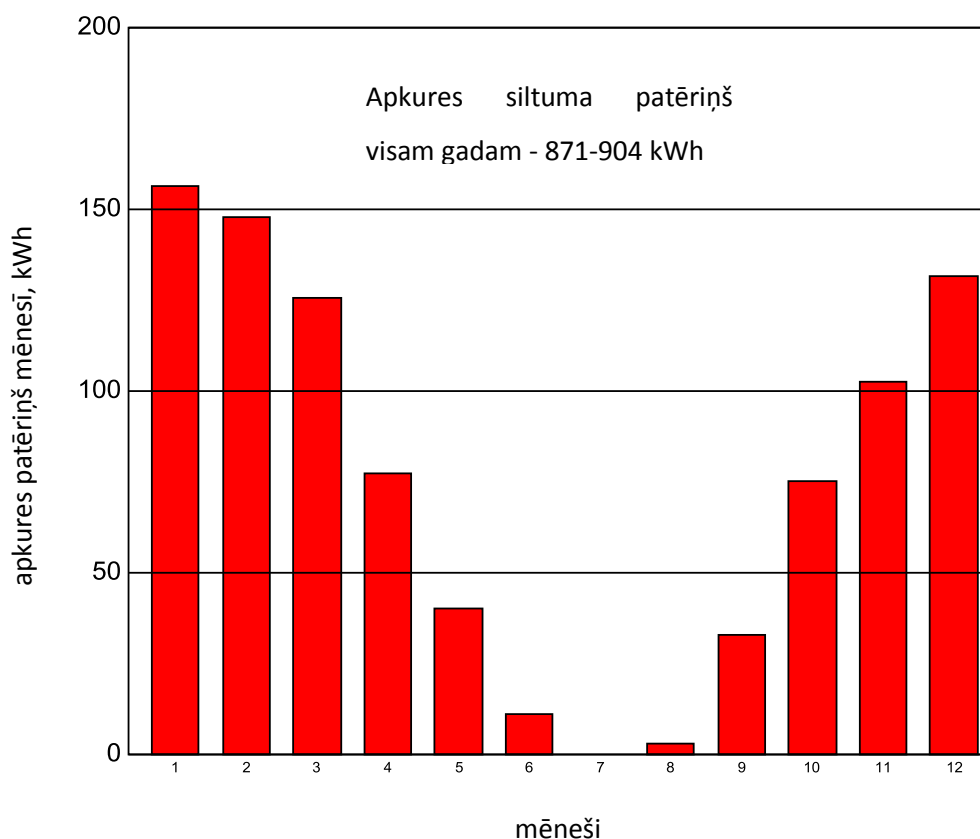
Attēlos 1.2.1. – 1.2.3. kā piemēri parādīti aprēķinātie apkures siltuma patēriņi pa mēnešiem saplākšņa moduļu stendam, taču līdzīgi sadalījumi pa mēnešiem ir arī pārējiem testēšanas stendiem un kopējais apkures sezonas patēriņš stendos no dažādām būvkonstrukcijām atšķiras maz – atšķirības ir 3 – 5% robežās. Iegūtais rezultāts parāda, ka pētāmo stendu būvkonstrukciju termiskās inerces atšķirību ietekme uz energopatēriņu apkurei ir relatīvi maza. Jānorāda, ka šķietami visvieglākās konstrukcijas stendu no finiera paneļiem, kas pildīti ar siltuma izolācijas materiālu, masivitāti (kg/m^2) un attiecīgi arī termisko inerci būtiski palielina iekšpusē esošais 7,5 cm fibrolīta slānis un apmetums.



Att. 1.2.1. - Apkures patēriņa sadalījums pa mēnešiem (kWh), bez gaisa apmaiņas ($n=0$), bet ievērojot solārā starojuma ietekmi caur logu.



Att. 1.2.2. - Apkures patēriņa sadalījums pa mēnešiem (kWh) ar gaisa apmaiņu ($n = 0,5 \text{ 1/h}$) un ievērojot solārā starojuma caur logu ietekmi.



Att. 1.2.3. - Apkures patēriņa sadalījums pa mēnešiem (kWh). Netiek ņemta vērā ne gaisa apmaiņa, ne solārā starojuma ietekme caur logu.

Aprēķinātā energopatēriņa salīdzinājums šajos piemēros parāda, ka

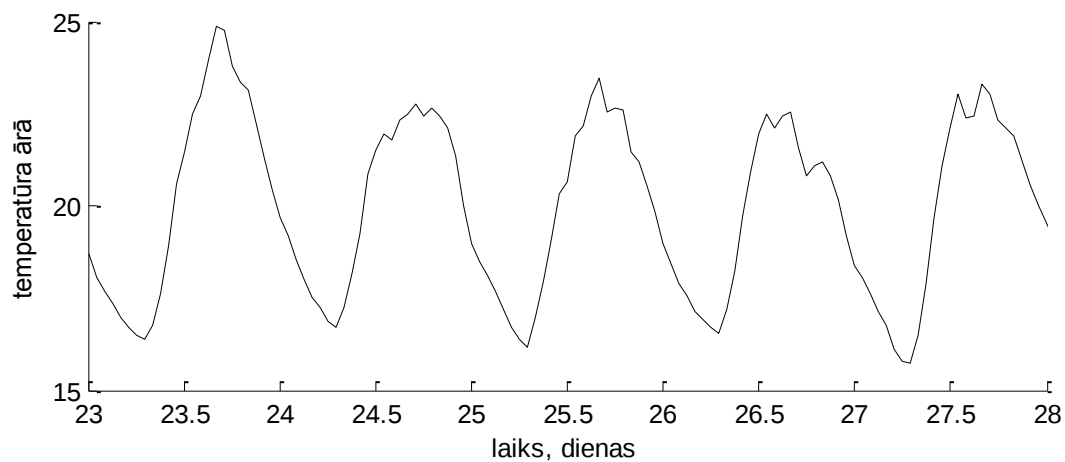
- caur loga stikloto daļu dienviņu pusē, kas veido apmēram 15 % no attiecīgās ārsienas kopējā laukuma, solārā starojuma pievadītais siltuma daudzums apkures sezonā ir gandrīz tik pat liels, kā normālas intensitātes ventilācijas ($n=0,5$ 1/h) bez rekuperācijas radītie siltuma zudumi un tādējādi tos lielā mērā var kompensēt (loga stikla paketes solāra starojuma enerģijas caurlaidība $g=0,5$);

- ventilācijas siltuma zudumi pie $n=0,5$ nosaka aptuveni 40% no apkures siltuma patēriņa, tādējādi gaisa iepriekšēja uzsildīšanai, izmantojot izplūstošā gaisa siltumu, zemes siltumu vai citus paņēmienus, ir potenciāli lielas iespējas kopējā energopatēriņa samazināšanai;

- ja telpas netiktu ventilētas un nebūtu tiešas solārā starojuma ietekmes caur logu, tad tikai vissiltākajā (jūlija) mēnesī telpās būtu nodrošināta vismaz 18°C temperatūra bez papildus apkures.

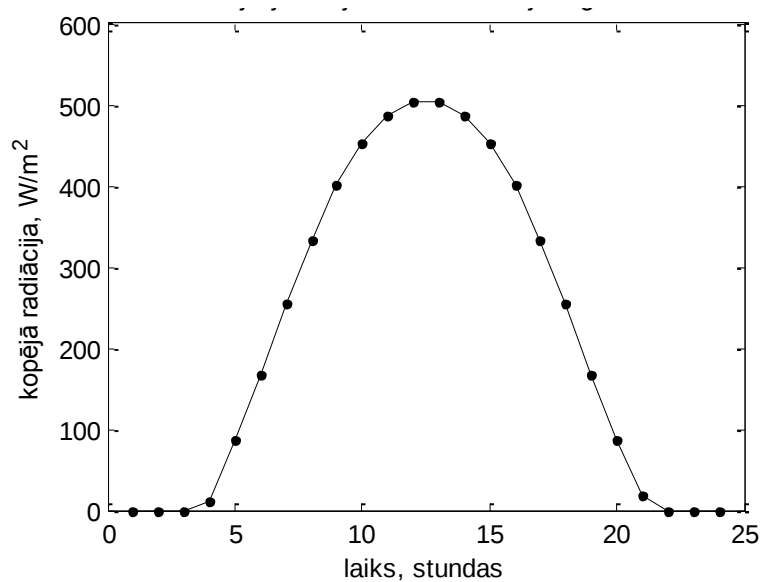
1.3. Būvkonstrukciju termiskās inerces ietekme uz telpu pārkarsumu vasaras periodā - iekštelpas gaisa temperatūras svārstības

Lai novērtētu temperatūras svārstības telpā, no vidējotajiem temperatūras datiem tiek apskatītas 5 gada karstākās dienas jūlija mēnesī (*att. 1.3.1.*), pieņemot, ka telpa netiek ne papildus dzesēta ne sildīta, bet ventilācijas intensitāte ir nemainīga $n=0,5$ 1/h. Āra gaisa temperatūra šajā periodā svārstās starp 17 °C naktī un 25°C dienā.

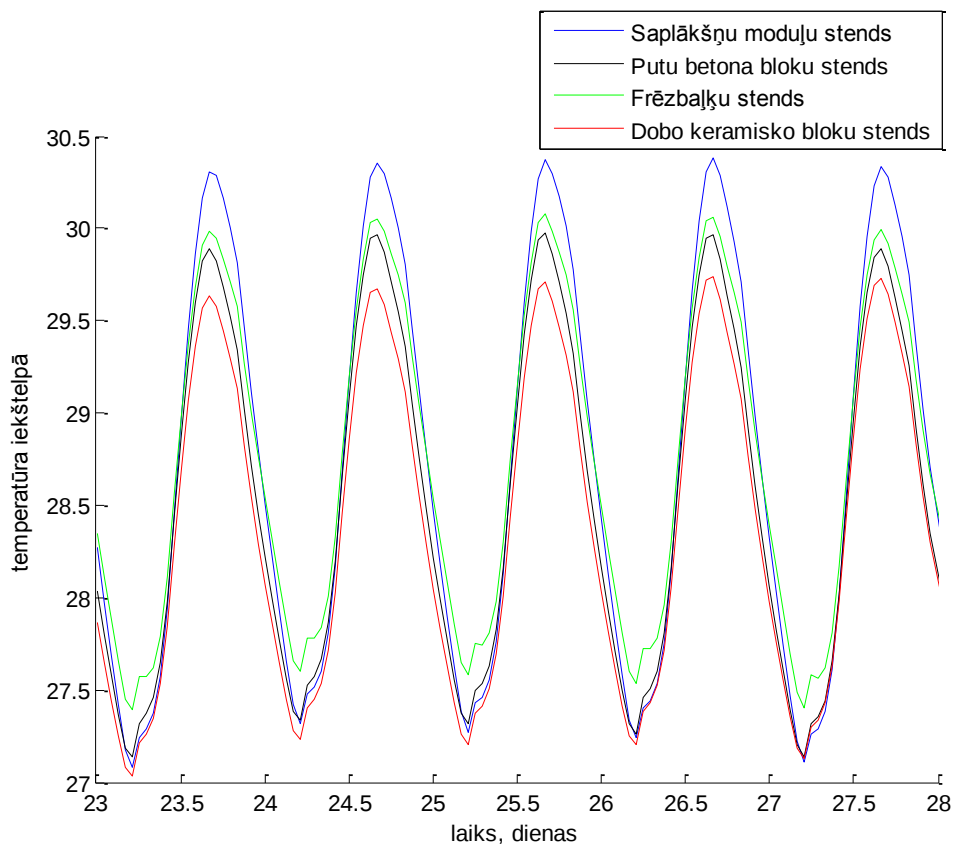


Att. 1.3.1. - Gaisa temperatūra ārā jūlija karstākajā periodā

Bez tam, ievērojot arī mākoņainības ietekmi, tiek noteikts vidējais solārā starojuma enerģijas blīvums (*att. 1.3.2.*), daļa no enerģijas caur logu dienvidu pusē ($S=1,25$ m², $g=0,5$) nonāk stenda iekštelpā un būtiski izmaina tās gaisa temperatūru.



Att. 1.3.2. - Kopējais vidējais radiācijas siltuma plūsmas blīvums jūlija dienā uz horizontālas virsmas.



Att. 1.3.3. - Gaisa temperatūras svārstības iekšējā telpā dažādos stendos. Ievērota solārā radiācija caur logu un gaisa apmaiņa – $n=0,5$ 1/h

Salīdzinot āra gaisa (att. 1.3.1.) un iekšējās gaisa temperatūras (att. 1.3.3.), redzams, ka iekšējās sagaidāmā temperatūra (ja logs netiks aizklāts ar ārējām žalūzijām), būs būtiski

augstāka nekā āra temperatūra vasaras karstākajās dienās – maksimālā temperatūra telpā ar mazu gaisa tilpumu ($V=27\text{ m}^3$) dienā pat par 7°C var pārsniegt āra temperatūru. Naktī šī atšķirība var sasniegt pat 10°C , kas rada būtisku termisko diskomfortu. Nelabvēlīgā situācija izskaidrojama ar to, ka Saule dienā piesilda nelielo telpu un uzsilda būvkonstrukcijas, bet gaiss pa nakti nepaspēj atdzist, jo būvkonstrukcijas pakāpeniski atdod uzkrāto siltumu un ja naktī netiek veikta papildus ventilācija (piem., turēts vaļā logs). Tas parāda, ka pat bez papildus dzesēšanas sistēmas, intensificējot ventilācijas režīmu (it īpaši naktī), Latvijā ir iespējams būtiski uzlabot telpu termiskā komforta apstākļus. Tomēr optimāla telpu termiskā komforta nodrošināšanai arī Latvijas klimatā karstākajos vasaras mēnešos (jūlija un augustā) var būt nepieciešama dzesēšanas sistēmu uzstādīšana.

Tā kā saplākšņa moduļu stenda (PLY) ar fibrolīta slāņa iestrādi telpas iekšpusē siltuma ietilpība un siltuma inerce tomēr ir vismazākā, tad gaisa temperatūras svārstības diennakts ciklā tajā ir vislielākās un sasniedz $3,2^\circ\text{C}$, tomēr pat vismasīvākajā stendā no keramiskajiem blokiem šīs diennakts temperatūru svārstības ir tikai par 20% mazākas. Teiktais parāda solārā starojuma dominējošo temperatūras svārstībās pētāmo stendu gaisā.

Sava veida „anomālija” vērojama frēzbaļķu stendā, kur minimālā temperatūra naktī ir nedaudz ($<0,5^\circ\text{C}$) augstāka kā citos stendos. Tas izskaidrojams ar siltuma izolācijas materiāla novietojumu konstrukcijas iekšpusē (skat. Tabulu 1.1.1).

1.4. Energoresursu patēriņa aprēķina pieeju un programmatūras iespēju raksturojums

Vispārīgā gadījumā ēka ir relatīvi sarežģīta termodinamiska sistēma. Siltumenerģijas patēriņa analīzē apkures sezonas laikā jānovērtē:

- apkārtējās vides stāvoklis: klimatiskā josla, vidējās diennakts, mēneša, gada temperatūras, valdošo vēju virziens un ātrums, apbūves rajona un ēku ģeogrāfiskais novietojums;
- būvkonstrukciju termiskā inerce, kas atkarīga no materiālu siltumietilpības;
- siltuma pārnese vadīšanas ceļā ēku norobežojošās konstrukcijās;
- siltuma pārnese konvekcijas ceļā ap norobežojošām konstrukcijām un apkures sistēmas elementiem;
- siltuma pārnese starojuma ceļā no ēkas norobežojošām konstrukcijām un no apkures sistēmas elementiem;
- apkures un ventilācijas sistēmu īpatnības un jauda.

Ideālā gadījumā, modelējot ēkas siltumenerģētisko stāvokli, būtu jārisina nestacionārs siltumapmaiņas vienādojums katrā telpā un katrā būvkonstrukcijā, ņemot vērā gan gaisa un mitruma plūsmas, gan starojumu.

Fizikālo parādību matemātiskās modelēšanas pamatprincips ir tāds fizikālās parādības raksts, kurš atspoguļo procesa raksturīgās un būtiskās īpašības, neievērojot otršķirīgās parādības un tajā pašā laikā to matemātiski aprakstošās sakarības jeb matemātiskais modelis ir racionāli atrisināms ar pieejamiem resursiem.

Ēkas energoresursu patēriņa analīzes mērķis ir kontrolēt ēkas energoefektivitāti un iespējas to optimizēt. Lai šo mērķi realizētu, ir izstrādātas metodikas un programmas, kas nodrošina ēkas energobilances matemātiskā modeļa izveidi. Dažādām metodikām un programmām atšķiras aprēķinu detalizācijas līmenis un pieņēmumi, kā arī papildus iegūstamie rezultāti, atkarībā no sagaidāmās lietotāju mērķauditorijas. Turpinājumā raksturota LR normatīvos aktos noteiktā Ēku energoefektivitātes aprēķina metode, tās pamatā esošais standarts un ēkas energobilances aprēķina programmas - *EFA2*, *HeatMod6* un *PHPP 7.1*.

Latvijā ēkas energoefektivitātes aprēķina metodi nosaka Ministru kabineta noteikumi Nr.39 (spēkā no 2009.gada 13.janvāra, izdoti saskaņā ar Ēku energoefektivitātes likumu) (turpmāk – MK noteikumi Nr.39). Šie noteikumi nosaka aprēķinu kārtību, sastādot enerģijas bilanci ēkas līmenī.

Saskaņā ar MK noteikumiem Nr.39, sastādot enerģijas bilanci ēkas inženiertehnisko sistēmu līmenī, kā arī, ja ēkai aprēķinātā apkurei nepieciešamā enerģija ir mazāka par 50 kilovatstundām uz aprēķina platības kvadrātmetru gadā, jāveic detalizēts aprēķins saskaņā ar standartu **LVS EN ISO 13790:2009 "Ēku energoefektivitāte. Telpu apsildīšanas un dzesēšanas energopatēriņa rēķināšana"** (turpmāk – LVS EN ISO 13790:2009). MK noteikumi Nr.39 izstrādāti saskaņā ar LVS EN ISO 13790:2009 un tiešā vai netiešā veidā kopumā atsaucas uz 17 Latvijas valsts standartiem (sk. pielikums Nr.1), kas izmantojami, lai aprēķinātu vai veiktu pieņēmumus par nepieciešamajām aprēķinu komponentēm.

MK noteikumi Nr.39 enerģijas bilances aprēķinam ēkas līmenī nosaka divas pieejas – **vienmērīgo un dinamisko metodi**, tomēr pilnā apmērā nosaka pamataprēķinu kārtību tikai vienmērīgajai metodei un šajā aprēķinā nepieciešamo ēkas dinamisko parametru noteikšanai. Vienmērīgā un dinamiskā metode detalizētāk aprakstīta LVS EN ISO 13790:2009, kā arī ar to saistītajos standartos.

Standarts LVS EN ISO 13790:2009 nosaka enerģijas bilances sastādīšanu ēkas vai tās sistēmu līmenī, apskatot tikai jūtamo enerģijas bilanci, t.i., enerģijas daudzumu, kas nepieciešams, lai nodrošinātu noteiktu temperatūru telpā, mērītu pēc sausā termometra. Gaisa mitrināšanai un/vai sausināšanai nepieciešamā enerģija tiek rēķināta atsevišķi.

Aprēķinu procedūra saskaņā ar LVS EN ISO 13790:2009 ir šāda:

1. izvēlas aprēķinu metodi;
2. definē kondicionētās un nekondicionētās zonas kopumā;
3. ja nepieciešams, definē atšķirīgu aprēķinu zonas (sk. – aprēķini pa zonām);
4. definē iekštelpu parametrus zonās un āra klimatu;
5. aprēķina katram laika solim un ēkas zonai nepieciešamo enerģiju apkurei un dzesēšanai;
6. apkopo rezultātus aprēķiniem dažādiem laika soļiem un dažādām zonām, ko apkalpo tās pašas sistēmas, un aprēķina nepieciešamo enerģiju apkurei un dzesēšanai, ņemot vērā sistēmas enerģijas zudumus;
7. apvieno aprēķinu rezultātus dažādām zonām un sistēmām;
8. aprēķina apkures un dzesēšanas sezonas garumu (vai arī tas var būt definēts nacionālajās normās dažādām ēkām vai saskaņā ar citiem parametriem, kā tas ir saskaņā ar MK noteikumiem Nr.39).

Atkarībā no nosacījumiem, var tikt veikti 3 dažādu veidu aprēķini pa zonām:

- **vienas zonas aprēķins** (ja ir atšķirīgi parametri atsevišķās zonas platībās, piemēram, temperatūra, gaisa apmaiņa u.c. tad kā ieejas datus lieto vidējos svērtos lielumus visām aprēķinu metodēm);
- **nesaistītais multizonu jeb daudzzonu aprēķins bez termālā savienojuma** (ieejas dati tiek definēti katrai zonai atsevišķi, saskaņā ar vienas zonas ieejas datu noteikšanas principu);
- **saistītais multizonu aprēķins ar termālo savienojumu** (izmanto tikai specifiskām situācijām, kad nevar izmantot pirmās divas metodes).

1.4.1. Vienmērīgā jeb kvazistacionārā aprēķinu metode

Vienmērīgā aprēķinu metode tiek lietota, ja tiek izmantots salīdzinoši garš aprēķina periods (tipiski mēnesis vai visa sezona), dinamiskos efektus ņemot vērā empīrisku koeficientu veidā. Vienmērīgā aprēķina metode tiek saukta arī par **mēneša aprēķina metodi**, ko standarts LVS EN ISO 13790:2009 apraksta pilnībā. Mēneša aprēķina metodes speciāls

gadījums ir **sezonas aprēķina metode** (nedefinējot parametrus katram mēnesim atsevišķi). Vienmērīgās aprēķinu metodes trūkums ir liela relatīvā kļūda atsevišķiem mēnešiem, it īpaši tuvu apkures/dzesēšanas sezonas sākumam vai beigām.

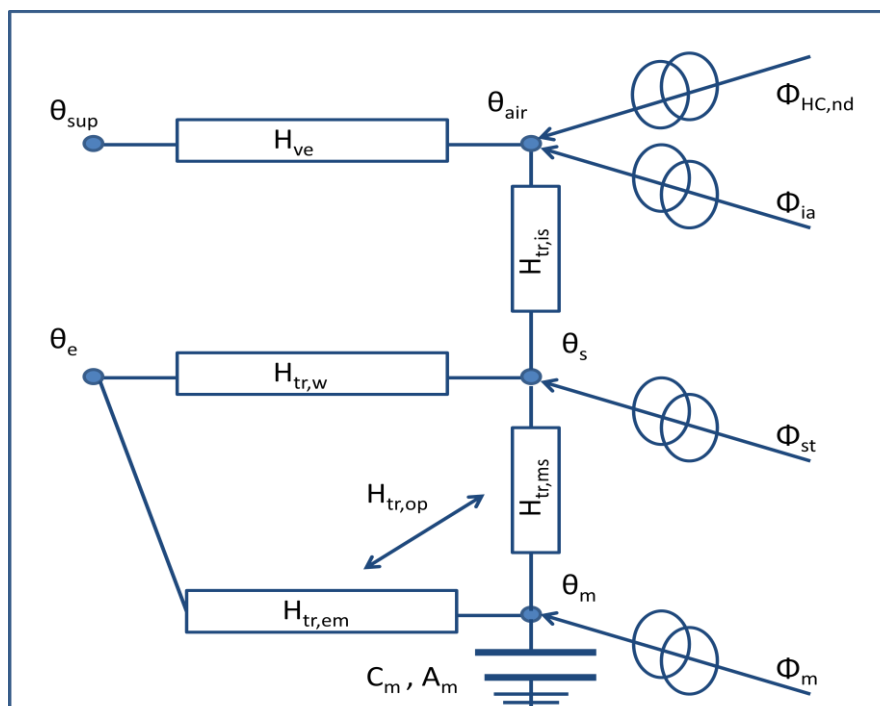
1.4.2. Dinamiskā aprēķinu metode

Dinamiskā aprēķina metode izmantojama, ja aprēķina siltuma bilanci īsā laika periodā, (tipiski – viena stunda) ņemot vērā piegādāto siltumu, siltuma zudumus un ēkas masu. Dinamisko aprēķinu metodi iedala:

- 1) **detalizētā simulācijas (matemātiskās lauku modelēšanas) metode** (standarts LVS EN ISO 13790:2009 to neapraksta);
- 2) **vienkāršā stundas aprēķina metode** (vienkāršots detalizētās simulācijas metodes aprēķins), ko standarts LVS EN ISO 13790:2009 apraksta pilnībā.

Dinamiskās aprēķina metodes rezultāti nav validējami atsevišķai stundai lielas relatīvās kļūdas dēļ, parasti optimāls periods tiek izvēlēts 1 nedēļa, t.i., ievaddati katrai stundai 1 nedēļas garumā par klimatu, ēku un sistēmām, iekšējiem siltuma izdalījumiem.

Dinamiskā vienkāršā stundas aprēķina metodē (ar nosaukumu “trīs līniju krustpunkta stundas metode”), tiek izmantots R-C (pretestības-kapacitātes) aprēķina modelis, konkrēti 5RC1 (5 pretestības un 1 kapacitāte) – sk. *att.1.4.1*. Dinamiskā vienkāršā stundas aprēķina metode nodrošina apkures/dzesēšanas nepieciešamības aprēķinu pēc vidējās svērtās gaisa un vidējās starojuma temperatūras (katrai svara faktors 0.5), metode ņem vērā ēkas masivitāti un siltuma inerci.



Att. 1.4.1. Dinamiskā vienkāršā stundas aprēķina metode (trīs līniju krustpunkta stundas metode, 5RC1 (5 pretestības un 1 kapacitāte) aprēķina modelis)

Attēlā 1.4.1. izmantoti sekojoši apzīmējumi:

$\Phi_{HC,nd}$ – nepieciešamā jauda apkurei un/vai dzesēšanai [W];

C_m – siltumietilpība [J/K];

A_m – efektīvās masas laukums [m^2];

Siltuma izdalījumu jauda [W] - iekšējie Φ_{int} un solārie Φ_{sol} , kas sadalīti komponentēs: Φ_{ia} ;

Φ_m un Φ_{st} ;

Siltuma pārvades koeficienti [W/K]:

H_{ve} – siltuma pārnese ar ventilāciju;

$H_{tr,w}$ – logiem, durvīm, piekārtās un stiklotās sienas (termālā masa = 0);

$H_{tr,op}$ – necaurspīdīgiem elementiem, kas sadalīts komponentēs $H_{tr,em}$ – emisija un $H_{tr,ms}$ – pārnese;

$H_{tr,is} = h_{is} \cdot A_{tot}$ - apvienotā siltuma pārnese, kur h_{is} – siltuma pārnese starp gaisa mezglu θ_{air} un virsmas mezglu θ_s , ar konstantu lielumu $h_{is} = 3,45$ [W/($m^2 \cdot K$)] un $A_{tot} = A_{at} \cdot A_f$ – platība visām virsmām, kas saskaras ar ēkas zonu, kur A_{at} raksturo proporciju starp iekšējo virsmu un grīdu platību (var pieņemt $A_{at} = 4,5$) un A_f – kondicionētā platība [m^2];

Temperatūras [$^{\circ}C$]:

θ_{sup} – pieplūdes gaisam; θ_{air} – gaisam telpā; θ_e – āra gaisam; θ_m – termiskajai masai;
 θ_s – paredzētā/uzstādītā temperatūra, kur $\theta_s = (\theta_{\text{air}} + \theta_{r,mn}) / 2$, un $\theta_{r,mn}$ - vidējā starojuma temperatūra.

1.4.3. Aprēķinu programmas

1.4.3.1. EFA 2

Programma *EFA2* (Ēkas energoEfektivitātes Aprēķins, 2.versija, 26.06.2012., pirmā versija 2009.gadā) ir MS Excel vidē bāzēta aprēķina programma, kas nodrošina ēkas siltuma bilances matemātiskā modeļa izveidi un energoefektivitātes aprēķinu saskaņā ar MK noteikumiem Nr.39, atbilstoši vienmērīgajai sezonas aprēķina metodei. Šo programmu lietojumiem rekomendē Latvijas Ekonomikas ministrija.

Programma paredzēta telpu kondicionēšanai (apkurei un dzesēšanai) nepieciešamās enerģijas aprēķinam. Apkures periods, kuram programmā tiek veikti aprēķini, ir periods, kas noteikts LBN 003-01 „Būvklimatoloģija”, vadoties pēc ēkas novietojuma - uzdotās tuvākās ģeogrāfiskās vietas Latvijas teritorijā, kura tiek piedāvāta izvēlnē, vai arī lietotāja paša uzdots „nenormēts” apkures periods. Dzesēšanai nepieciešamā enerģija tiek aprēķināta programmā lietotāja uzdotam dzesēšanas perioda ilgumam kalendārā gada laikā.

Programma paredzēta nesaistītu vairākzonu aprēķinu ar 1 - 3 apkures/dzesēšanas zonām veikšanai. Katrā no zonām iespējams veikt gan apkures un dzesēšanas aprēķinu, gan arī tikai vienu no tiem (piem., vienā zonā - tikai dzesēšanas aprēķins, otrā - tikai apkures aprēķins, trešā gan dzesēšanas, gan apkures aprēķins). Ja kādā zonā tiek veikts gan apkures, gan dzesēšanas aprēķins, tad ģeometriski (telpiski) apkures un dzesēšanas zona sakrīt. Ja nepieciešams veikt apkures aprēķinu ģeometriski (telpiski) atšķirīgās zonās, tad var izveidot vienu zonu, kurā tiek veikts apkures aprēķins un otru, kurā tiek veikts tikai dzesēšanas aprēķins. Jebkurā gadījumā apkures un dzesēšanas aprēķini tiek veikti atdalīti. Programma nodrošina energosertifikāta, pagaidu sertifikāta sagatavošanu un to pielikumu, kā arī energoaudita pārskata formas daļēju aizpildīšanu – formā neaizpildīti paliek tie lauki, kuru aizpildei nepieciešamā informācija nav iekļauta energoefektivitātes aprēķinam atbilstoši MK noteikumiem nr. 39 nepieciešamo datu kopā.

Programmā *EFA2* lietotāja ērtībām:

- visu lielumu nosaukumi sniegti izvērstā veidā, pievienojot tiem arī apzīmējumus (kur tie ir) un mērvienības;

- daudzos gadījumos ievadāmajiem lielumiem vēl pievienoti papildus komentāri un skaidrojumi gan pie attiecīgajām šūnām, gan izklājlokšņu augšējā daļā;
- ievadāmo un aprēķināto lielumu lauki marķēti dažādās krāsās un pirmajā izklājlokšnē (sākulapā) dots marķējuma skaidrojums;
- izklājlokšnēs tiek veikta lietotāja ievadāmo datu loģiskā kontrole;
- daudziem lielumiem piemērotas vērtības var izvēlēties no pievienotajiem sarakstiem vai tabulām;
- var veikt daudzslāņainu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības aprēķinus;
- papildus iespējams veikt energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu saimnieciskā izdevīguma aprēķinu.

1.4.3.2. *HeatMod6*

Programma *HeatMod6* (6.versija, 2011., pirmā versija 2001.gadā) ir tīmeklī bāzēta energoefektivitātes aprēķina programma, ēkas matemātiskā modeļa izveidei un energoefektivitātes aprēķinam saskaņā ar MK noteikumiem Nr.39, izmantojot vienmērīgo mēneša (aprēķina periods 12 mēneši) un sezonas aprēķina metodi. Šīs programmas izstrāde un pilnveidošana veido daļu no šī projekta aktivitātēs iekļautajiem darbiem.

Programma *HeatMod6* realizē visas programmai *EFA2* uzskaitītās funkcijas (skat. iepriekš) un papildus nodrošina:

- 1) iespēju izvēlēties vienmērīgās metodes mēneša vai sezonas aprēķinu;
- 2) piekļuvi datiem no jebkuras mūsdienīgas ierīces (dators, *Ipad*, *smartphone*, u.t.t.);
- 3) neatkarību no operētājsistēmas (*Windows*, *Linux*, *MacOS*, *ChromeOS*, *Android*, u.c.);
- 4) resursu nenoslogošanu, jo programma nav jāinstalē;
- 5) datu glabāšanas drošību;
- 6) vienmēr aktuālu aprēķina algoritmu, atbilstoši aktuālajām izmaiņām normatīvos;
- 7) *pdf* formāta energosertifikāta sagatavošanu un izdruku;
- 8) individuālu datu bāzu un konstrukciju modeļu izveidi, aprēķināto projektu glabāšanu praktiski neierobežotā apjomā;
- 9) iespēju veikt papildus aprēķinus (piemēram, siltuma caurlaidība konstrukcijām, kas atrodas saskarē ar grunti);
- 10) iespēju iegūt aprēķina rezultātus vizuāli uzskatāmā formā (grafiki, diagrammas).

1.4.3.3. PHPP 7.1.

Programma *PHPP* 7.1 (The Passive House Planning (Design) Package, 7.1. versija, 2012., pirmā versija 1998.gadā) ir MS Excel vidē bāzēta aprēķina programma, kas nodrošina ēkas matemātiskā modeļa izveidi, ar mērķi veikt ēkas telpisko, būvkonstrukciju un inženiersistēmu projektēšanu, energoefektivitātes aprēķinu atbilstoši EN 13790 (saturiski identisks LVS EN ISO 13790:2009) un sertificēšanu atbilstoši „pasīvās ēkas” nosacījumiem. Programmas un sertifikācijas prasības izstrādātas „Passive House Institute”.

PHPP 7.1. aprēķina pamatā ir visas ēkas kā vienas zonas aprēķins, izmantojot vienmērīgo mēneša (aprēķina periods 12 mēneši) vai sezonas aprēķina metodi.

Veicot „pasīvās ēkas” (ar ļoti lielu laika konstanti) energoefektivitātes aprēķinu saskaņā ar standartu EN 13790, rezultāta precizitāte nenozīmīgi atšķiras, ja salīdzina ar aprēķinu „parastai ēkai” – iegūtais rezultāts var būt nedaudz „optimistiskāks”.

Programmas *PHPP* 7.1. uzbūve, vizuālais noformējums un lietotāja paredzētās funkcionālās ērtības, rīki un aprēķini ir līdzīgi programmai *EFA2*, izņemot saimnieciskā izdevīguma aprēķinu.

Lai veiktu ēkas energoefektivitātes aprēķinu, programma *PHPP* 7.1. nodrošina:

- 1) klimatisko datu izvēli dažādu valstu pilsētām no datu bāzes un individuālu datu bāzes papildināšanas iespēju;
- 2) detalizētus aprēķinus siltuma zudumiem caur grunti (piem., ņemot vērā gruntsūdeņu ietekmi);
- 3) detalizētu loga konstrukcijas U-vērtības noteikšanu (piem., ņemot vērā loga ģeometriju, orientāciju, rāmju garumu un platumu, U_g un U -vērtības, termiskos tiltus – atkarībā no loga konstrukcijas iebūvēšanas veida);
- 4) datu bāzi mehāniskās ventilācijas iekārtu izvēlei ar nepieciešamajiem tehniskiem datiem, ar papildus aprēķiniem vairākām ventilācijas iekārtām un papildus aprēķinu katras atsevišķas telpas ventilācijas projektēšanai (atsevišķs *Excel* fails).

Papildus ēku energoefektivitātes aprēķinam, programma *PHPP* 7.1. nodrošina:

- 1) aprēķinus, kas nepieciešami ēkas mikroklimata nodrošinājuma kontrolei (piem., telpu pārkaršanas biežums, siltuma ieguvumu aprēķins (atsevišķi dzīvojamām un nedzīvojamām ēkām));
- 2) aprēķinus, kas nepieciešami inženiersistēmu projektēšanai (piem., dzesēšanas enerģijas patēriņš, apsildes un dzesēšanas iekārtu jaudas, telpu dzesēšanas

risinājumi, karstā ūdens un elektroenerģijas patēriņš, centralizēta un decentralizēta apkure u.c.);

- 3) inženiertehnisko iekārtu datu bāzes (dažādā apjomā) un raksturlielumus.

1.4.4. Aprēķina piemērs standarta daudzdzīvokļu ēkai (464.sērija)

Lai salīdzinātu minēto programmu funkcionalitāti un ar tām iegūtos rezultātus, tika veikti aprēķini dažāda veida ēkām. Tabulā 1.4.1 parādīti ģeometriskie ieejas dati vienam no šo aprēķinu piemēriem – nerenovētai sērijveida (464. sērija) daudzdzīvokļu ēkai, bet tabulā 1.4.2 apkopoti galvenie rezultāti un atšķirības starp tiem – atšķirība % norādīta pēdējā kolonā iekavās. Iegūtie rezultāti parāda, ka galvenās atšķirības nosaka izmantoto klimatisko datu atšķirības – būtiski lielāki solārās enerģijas ieguvumi programmā *PHPP* izmantojot Viļņas klimatiskos datus. Vienādojot solāros ieguvumus, apkures siltuma enerģijas atšķirības ir nelielas - aptuveni 3%. Salīdzinošie aprēķini apstiprina visu šo programmu piemērotību energoefektivitātes aprēķinam.

Tabula 1.4.1. 464. Sērijas daudzdzīvokļu ēkas ģeometrijas dati

Aprēķina platība (dzīvojamā + kāpņu telpa)	2680,56	m²
Logi Z pusē	13,00	m ²
Logi A pusē	164,32	m ²
Logi D pusē	13,00	m ²
Logi R pusē	195,64	m ²
Horizontāli logi	0,00	m ²
Ārdurvis	6,93	m ²
Ārsienas uz āra vidi	1345,50	m ²
Ārsienas uz grunti	0,00	m ²
Jumts/bēniņi uz āra vidi	485,70	m ²
Pamatu grīda/pagraba griesti	485,70	m ²
Kāpņu telpa- Āra gaiss	63,09	m ²
Kāpņu telpa- bēniņi	45,57	m ²
Kāpņu telpa - pagrabs	45,57	m ²
Termiskie tilti uz āra vidi	720,06	m
Termiskie tilti pa perimetru	1218,00	m
Pamatu grīdas termiskais tilts	822,50	m
Siena uz blakus ēku	0,00	m ²
Ārējā virsma kopā	2864,02	m²

Tabula 1.4.2. Sākuma dati un aprēķina rezultāti:

Parametrs:		Programma	
Nosaukums	mērvien	EFA2, HeatMod6	PHPP 7.1. (atšķirība, %)
Sākuma dati			
Klimata dati pilsētai	-	Rīga, Latvija	Viļņa, Lietuva
Apkures sezonas ilgums	dnn	pieņemts 224	224 (+0.00 %)
Gada vid. āra gaisa temperatūra	°C	+6.2	+6.2 (+0.00 %)
Aprēķina rezultāti			
Kopējie siltuma zudumi ar pārvadi apkurei	kWh/m ² gadā	130.0	126.2 (-2.92 %)
Kopējie siltuma zudumi ar ventilāciju apkures periodā	kWh/m ² gadā	57.0	54.7 (-4.04 %)
Kopējie siltuma zudumi apkures daļai	kWh/m² gadā	187.0	180.8 (-3.32 %)
Kopējie iekšējie siltuma ieguvumi apkures periodā	kWh/m ² gadā	76.8	76.9 (+0.13 %)
Saules siltuma ieguvumu summa apkures periodā	kWh/m ² gadā	11.1	20.5 (+84.68 %)
Kopējais siltuma ieguvums apkures daļai	kWh/m² gadā	88.0	97.5 (+10.80 %)
Siltuma bilances koeficients apkurei		0.54	0.54 (+0.00 %)
Ieguvumu izmantošanas faktors apkurei	%	98	98 (+0.00 %)
Apkurei nepieciešamā enerģija	kWh/m² gadā	101.0	85.5 (-15.35 %)
Koriģēta apkurei nepieciešamā enerģija (pieņemot vienādus saules siltuma ieguvumus apkures periodā 20.5 kWh/m ² gadā)	kWh/m² gadā	88.3	85.5 (-3,17 %)

1.5. Energopatēriņa aprēķina ar *HeatMod6*, izmantojot mēnešu metodi, raksturojums

Projekta ietvaros vispirms tika izveidota ēku energoefektivitātes aprēķina metodika un programmatūra, kas bija bāzēta uz gada jeb sezonas bilances aprēķina. Maza energopatēriņa ēkām var būt nepieciešams veikt precīzāku aprēķinu, tādēļ iepriekš minētā sezonas metode

tika pilnveidota un detalizēta, lai varētu veikt precīzākus energopatēriņa aprēķinus apsildei un dzesēšanai, izmantojot mēneša siltuma bilances modeli, kas atbilst standarta LVS NE ISO 13790 nosacījumiem.

1.5.1. Galvenās atšķirības starp metodēm

Atšķirībā no sezonas metodes, mēnešu metode veic nevis vienu energopatēriņa aprēķinu, bet gan energopatēriņa aprēķinus katram mēnesim, līdz ar to tā ņem vērā nevis sezonas vidējos datus, bet gan katra mēneša vidējos parametrus. Pie tiem pieder:

- telpu komforta nosacījumi (pamatā iekštelpas temperatūras);
- klimata dati (ārgaisa temperatūra, Saules starojums, noēnojuma dati u.c.);
- citi dati, kas var būt atšķirīgi dažādos mēnešos (ventilācijas gaisa plūsmas piegādes temperatūra, temperatūras būvelementu ārpusē, stikloto virsmu mobilā saules noēnojuma redukcijas koeficients, dinamiskie parametri u.c.).

Līdz ar to mēnešu metodes gadījumā gan ievaddati, gan izvaddati jeb rezultāti ir pieejami par katru mēnesi, kas ļauj precīzāk novērtēt apkurei un dzesēšanai nepieciešamo enerģiju.

1.5.2. Ievaddatu ekrānformu atšķirības

Tā kā mēnešu metodes gadījumā tiek veikti vairāki aprēķini, nevis viens, līdz ar to arī aprēķina rezultāti ir atkarīgi no aprēķina mēneša. Tāpēc arī *HeatMod6* ekrānformas vairs nevar būt tādas pašas, kā sezonas aprēķinā, jo katra ekrānforma var saturēt gan tādus datus, kuri nemainās atkarībā no mēnešiem un ir uzdodami vienu reizi, gan tādus datus, kur mainās atkarībā no mēnešiem vai ir uzdodami katram mēnesim. Ja ekrānforma satur aprēķina rezultātus, kuri ir atkarīgi no mēnešiem, tad tajā papildus tiek attēlota izvēlne ar mēnešiem, lai lietotājs varētu ērti aplūkot aprēķina rezultātus par jebkuru mēnesi. Šāda pieeja nozīmē to, ka katrai ekrānformai ir jābūt dinamiskai – katra lauka izmaiņām ir jāattēlo visu atkarīgo lauku izmaiņas. Ja ekrānforma satur ievaddatus, kas var būt uzdodami katram mēnesim, tad tajā tiek attēloti ievadlauki ar iespēju ievadīt attiecīgos datus katram mēnesim.

1.5.3. Klimata un citi automātiski nosakāmie dati

Tā kā mēnešu metode veic aprēķinus par katru mēnesi, tai vairs nav nepieciešami visi dati, kas ir nepieciešami sezonas metodei. Vairs nav nepieciešamība uzdot vidējo saņemto saules starojumu pa debespusēm, jo šāda informācija tiek izgūta no katra mēneša klimata datiem; apkurei vai dzesēšanai nepieciešamais dienu skaits arī vairs netiek uzdots, bet gan tiek aprēķināts, ņemot vērā to, vai attiecīgajā mēnesī ir nepieciešama apkure un/vai dzesēšana.

1.5.4. Rezultātu ekrānformu atšķirības

Datu atkarība parādās ne tikai ievaddatu ekrānformās, bet arī rezultātos. Galvenās atšķirības ir šādas:

- datu apkopojumā ir iespējams apskatīt katra mēneša enerģijas bilanci;
- datu grafiskā vizualizācija ļauj apskatīt apkures un dzesēšanas enerģijas sadalījumu pa mēnešiem, kā arī katra mēneša enerģijas bilanci, iekšējo avotu un Saules ieguvumu sadalījumus;
- sertifikāta pielikums satur visus ievaddatus, attiecīgi arī tādus, kuri ir ievadīti pa mēnešiem.

1.5.5. Galveno izmainīto ekrānformu attēli

Projekta ievaddatu ekrānformas

The screenshot shows the 'Sākuma uzstādījumi' (Initial settings) tab of a software interface. It contains two sections: 'Projekta sākuma uzstādījumi' (Project initial settings) and 'Saules parametri' (Solar parameters). In the first section, 'Nosaukums' (Name) is 'Daudzdzīvokļu ēkas sagatave' (Multi-apartment building preparation), 'Aprēķins tiks veikts' (Calculation will be performed) is 'pa mēnešiem' (by month), and 'Projekta ēka' (Project building) has radio buttons for 'jauna/renovēta' (new/renovated) and 'esoša' (existing), with 'esoša' selected. In the second section, 'Ēka atrodas sekojošos platuma grādos' (Building is located in the following latitude degrees) has radio buttons for '56°' and '58°', with '56°' selected. At the bottom are 'Saglabāt' (Save) and 'Dzēst' (Delete) buttons.

Att. 1.5.5.1. - Sākuma iestādījumos vairs nav nepieciešams norādīt saņemto Saules starojumu pa debespusēm

The screenshot shows the 'Pamatdati' (Basic data) tab. It contains a sub-menu bar with 'Projekta detaļas' (Project details), 'Ēkas īpašnieks' (Building owner), 'Energoauditors' (Energy auditor), 'Energoaudita pasūtītājs' (Energy audit orderer), and 'Papildinformācija' (Additional information). The main area has fields for 'Ēkas tips' (Building type) set to 'Daudzdzīvokļu ēka' (Multi-apartment building), 'Adrese' (Address) set to 'Brīvības 1', 'Aprēķina datums' (Calculation date) set to '2011.10.28', and 'Tuvākā apdzīvotā vieta' (Nearest populated area) set to 'Rīga'. A 'Saglabāt' (Save) button is at the bottom.

Att. 1.5.5.2. – Pamatdatos vairs netiek attēlota pilsētas vidējā āra gaisa temperatūra un normatīvais apkures dienu skaits

Projekta rezultātu ekrānformas

Sākuma uzstādījumi

Pamatdati

Izmēritie patēriņi

CO₂

Rezultāti

Datu apkopojums

Datu vizualizācija

Attēli

Pielikumi

Sertifikāts

Kopējais apkurināmo grīdu laukums (m²)

2 500

Kopējais telpu tilpums (m³)

3 000

Izmēritā enerģijas patēriņa korekcija laikapstākļu dēļ

Koriģētais enerģijas patēriņš pa visiem gadiem Q

Wh

kWh/m²

0

0

Aprēķina rezultāti

Vidējie aprēķina rezultāti

janvārī

Kopējie siltuma pārvades zudumi

Wh

kWh/m²

Apkurei Q_{apk,pr}

47 717 567

19.09

Dzesēšanai Q_{dz,pr}

Siltuma zudumu koeficienti

Kopējie siltuma zudumi ar ventilāciju

Wh

kWh/m²

Apkures periodā Q_{apk,ve}

15 355 937

6.142

Dzesēšanas periodā Q_{dz,ve}

Iekšējo siltuma ieguvumu summa

Wh

kWh/m²

Apkures periodā Q_{apk,iek}

13 244 688

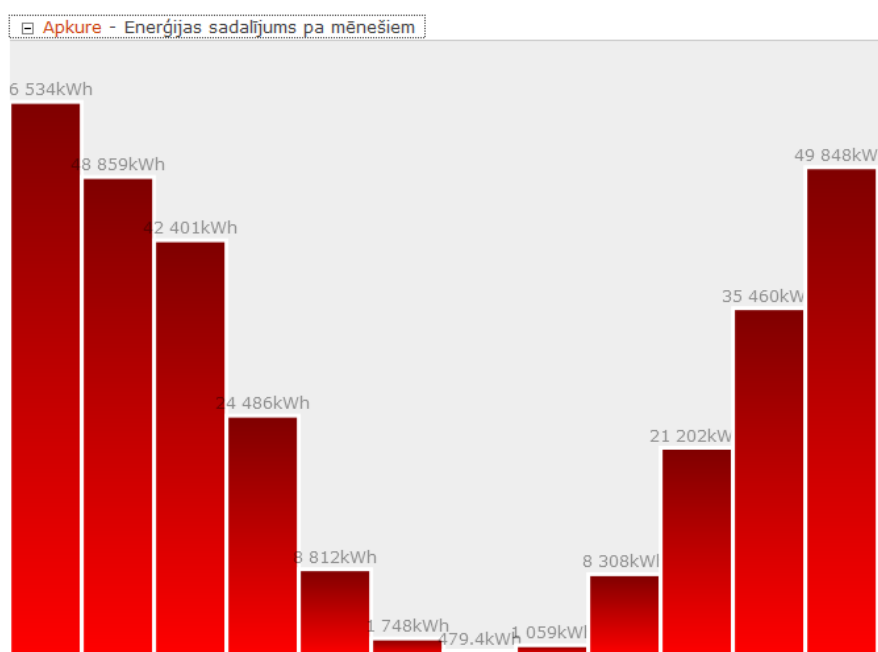
5.298

Dzesēšanas periodā Q_{dz,iek}

13 244 688

5.298

Att. 1.5.5.3. – Datu apkopojumā ir iespējams apskatīt bilances datus jebkurā mēnesī



Att. 1.5.5.4. – Datu vizualizācijā ir iespēja skatīt gan enerģijas sadalījumus pa mēnešiem, gan arī citu raksturlielumu datus katrā mēnesī grafiskā veidā

Zonas ievaddatu ekrānformas

Pamatdati
 Pārvade
 Ventilācija
 Avoti
 Saule
 Aprēķins
 Pārtraukumi

Zonas pamatdati Iekštelpu temperatūra

• Apkurei uzstādītā iekštelpu temperatūra T (°C)

janvārī	19
februārī	19
martā	19
aprīlī	19
maijā	19
jūnijā	19
jūlijā	19
augustā	19
septembrī	19
oktobrī	19
novembrī	19
decembrī	19

Att. 1.5.5.5. – Iekštelpu temperatūru var uzdot katram mēnesim citu, bieži atšķirīgas temperatūras tiek uzdotas ziemas un vasaras sezonās

Pamatdati
 Pārvade
 Ventilācija
 Avoti
 Saule
 Aprēķins
 Pārtraukumi

Zonas kopējais norobežojošo konstrukciju laukums (m^2) 2 988

Zonas siltuma zudumu koeficients H_T (W/K) 3 011

• Aprēķina rezultāti

Vidējie aprēķina rezultāti janvārī

• Zonas normatīvais siltuma zudumu koeficients

Apkurei $H_{TR,1}$ (W/K) 11.78

Dzesēšanai $H_{TR,1}$ (W/K)

• Zonas kopējie siltuma pārvades zudumi

Apkurei $Q_{apk,pr}$ (Wh) 53 094 195

Dzesēšanai $Q_{dz,pr}$ (Wh)

Att. 1.5.5.6. – Pārvades apkopojumā ir iespējams apskatīt datus par katru mēnesi

☐ Dabiskā ventilācija (ieskaitot infiltrāciju)

Gaisa apmaiņas koeficients n_d (1/h)	0.95	
Gaisa plūsmas likme kondicionētajās platībās $q_{ve,d}$ (m ³ /h)	2 850	
Darbības laika daļa aprēķina periodā $f_{t,d}$ (-)	1	
Siltuma zudumu koeficients ar gaisa plūsmu $H_{ve,d}$ (W/K)	969	

☐ Gaisa plūsmas piegādes temperatūra

Sakrīt ar ārējās temperatūru? ☐ jā ☒ nē

☐ **Apkures** periodā $T_{2, pieg,d}$ (°C)

janvārī	
februārī	
martā	
aprīlī	
maijā	
jūnijā	
jūlijā	
augustā	
septembrī	
oktobrī	
novembrī	
decembrī	

Att. 1.5.5.7. – Ventilācijai ir iespēja norādīt katram mēnesim citu gaisa plūsmas piegādes temperatūru

Apkure Dzesēšana

☐ Aprēķina rezultāti

Vidējie aprēķina rezultāti

☐ Caurspīdīgie būvelementi - Rezultējošā siltuma plūsma no saules siltuma ieguvumiem

Ziemeļu fasādē $\Phi_{sol,z}$ (W)	
Dienvidu fasādē $\Phi_{sol,d}$ (W)	489.4
Rietumu fasādē $\Phi_{sol,r}$ (W)	
Austrumu fasādē $\Phi_{sol,a}$ (W)	
Horizontālām virsmām $\Phi_{sol,h}$ (W)	

☐ Necaurspīdīgie būvelementi - Rezultējošā siltuma plūsma no saules siltuma ieguvumiem

Ziemeļu fasādē $\Phi_{sol,z}$ (W)	81.3
Dienvidu fasādē $\Phi_{sol,d}$ (W)	411.3
Rietumu fasādē $\Phi_{sol,r}$ (W)	89.88
Austrumu fasādē $\Phi_{sol,a}$ (W)	82.05
Horizontālām virsmām $\Phi_{sol,h}$ (W)	27.44

☐ Kopā

Siltuma ieguvumi no saules **apkures** periodā $Q_{apk,sol}$ (Wh)

Att. 1.5.5.8. – Saules ieguvumu apkopojumā ir iespēja apskatīt datus par katru mēnesi

Pamatdati	Pārvade	Ventilācija	Avoti	Saule	Aprēķins	Pārtraukumi
Apkure Dzesēšana						
Bezdimensionāls skaitliskais parametrs $a_{apk,0}$		1				
Norādītā laika konstante $\tau_{apk,0}$		15				
Ēkas vai ēkas zonas laika konstante τ_{apk}		14.67				
Skaitliskais parametrs a_{apk} atbilstoši laika konstantei τ_{apk}		1.978				
Aprēķina rezultāti Vidējie aprēķina rezultāti janvārī						
Apkurei uzstādītā temperatūra $T_{1,apk}$ (°C)		19				
Apkures sezonas ilgums t (h)		744				
Kopējie siltuma zudumi						
Ar pārvadi apkurei $Q_{apk,pr}$ (Wh)		53 094 195				
Ar ventilāciju apkures periodā $Q_{apk,ve}$ (Wh)		17 086 183				
Kopā apkures daļai $Q_{apk,z}$ (Wh)		70 180 378				
Kopējie siltuma ieguvumi						
No iekšējiem avotiem apkures periodā $Q_{apk,iek}$ (Wh)		13 244 688				
No saules apkures periodā Q_{sol} (Wh)		878 943				
Kopā apkures daļai $Q_{apk,ieg}$ (Wh)		14 123 631				

Att. 1.5.5.9. – Aprēķinu rezultātu apkopojumā ir iespēja apskatīt datus par katru mēnesi

Pamatdati	Pārvade	Ventilācija	Avoti	Saule	Aprēķins	Pārtraukumi
Apkure Dzesēšana						
Aprēķina rezultāti Vidējie aprēķina rezultāti janvārī						
Enerģija nepārtrauktai apkurei $Q_{apk,N}$ (Wh)		56 533 924				
Apkures pārtraukumu korekcijas						
Apkures laika daļa nedēļā $f_{N,apk}$ (-)		1				
Pārtraukuma laiks (īsākais un garākais) $t_{apk,pr}$ (h)		2		6		
Pārtraukuma laikā uzstādītā temperatūra $T_{apk,pr}$ (°C)		19				
Enerģija pārtrauktai apkurei $Q_{apk,pr}$ (Wh)		56 533 924				
Apkures aprēķins "brīvdienų" režīmā						
Apkures laika daļa apkures periodā $f_{apk,N}$ (-)		1				
"Brīvdienų" laikā uzstādītā temperatūra $T_{apk,pr}$ (°C)		12				
Enerģija "brīvdienų" apkures režīmā $Q_{apk,uzt}$ (Wh)		36 194 927				
Galarezultāts						
Nepieciešamā rezultējošā enerģija apkurei Q_{apk} (Wh)		56 533 924				
Saglabāt						

Att. 1.5.5.10. – Pārtraukumiem ir iespēja apskatīt datus par katru mēnesi

Būvelementa pārvades ievaddatu ekrānformas

Pamatdati Pārvade Saule

Temperatūra ārpusē Pārvades dati U aprēķins

• Temperatūra būvelementa ārpusē

Sagrīt ar ārējais temperatūru? ☐ jā ☒ nē

janvārī
februārī
martā
aprīlī
maijā
jūnijā
jūlijā
augustā
septembrī
oktobrī
novembrī
decembrī

• Aprēķina mēnesis

Vidējie aprēķina rezultāti janvārī

Temperatūru starpība apkurei (°C) 19

Temperatūru starpība dzesēšanai (°C)

Saglabāt

Att. 1.5.5.11. – Katram būvelementam ir iespēja uzdot temperatūru tā ārpusē par katru mēnesi, kā arī apskatīties katra mēneša temperatūru starpību apkurei un dzesēšanai

Pamatdati Pārvade Saule

Temperatūra ārpusē Pārvades dati U aprēķins

• Aprēķina mēnesis

Vidējie aprēķina rezultāti janvārī

• Būvelementa parametri

Būvelementa laukums (m²) 500

Būvelementa iepriekš uzdotā konstrukcija -

Siltuma caurlaidības koeficients U (W/(m² K)) 1.2

	U _{RN}	U _{RM}
Apkurei (W/(m² K))	0.2004	0.2405
Dzesēšanai (W/(m² K))		

Lineārie termiskie tilti

Punktveida termiskie tilti

• Aprēķina rezultāti

Rezultējošais siltuma zudumu koeficients H_T (W/K) 650

Saglabāt

Att. 1.5.5.12. – Katra būvelementa pārvades datus ir iespēja apskatīt normatīvo un maksimālo siltuma caurlaidības koeficientu vērtības katram mēnesim

Būvelementa noēnojuma ievaddatu ekrānformas

Pamatdati		Pārvade	Saule
Būvelementa dati		Noēnojumu saraksts	Noēnojuma dati
Noēnojums		Noklusētais ēnojums	
• Noēnojuma dati			
Nosaukums		Noklusētais ēnojums	
Necaurspīdīgās daļas projicētais laukums A_c (m ²)		450	
• Ārējo šķēršļu apēnojuma koeficienti			
Rezultējošais ēnojuma samazināšanas faktors F_{en} (-)		0.99	
Horizonta leņķis		10	
Ēnojuma korekcijas faktora daļa F_h (-)		0.99	
Pārkares leņķis		0	
Ēnojuma korekcijas faktora daļa F_p (-)		1	
Barjeras leņķis		0	
Barjeras ir abās pusēs?		☐ jā ☒ nē	
Ēnojuma korekcijas faktora daļa F_l (-)		1	
• Aprēķina rezultāti			
Vidējie aprēķina rezultāti		apkures sezonā (1.X-15.I)	
Ārējās virsmas siltuma pretestība R_{se} (m ² K/W)		0.04	
Efektīvais savācošais laukums $A_{s,k}$ (m ²)		15.12	

Att. 1.5.5.13. – Noēnojumos necaurspīdīgiem elementiem ir iespēja apskatīt aprēķina rezultātus katram mēnesim

Pamatdati		Pārvade	Saule
Būvelementa dati		Noēnojumu saraksts	Noēnojuma dati
Noēnojums		Bez ēnojuma	
• Noēnojuma dati			
Nosaukums		Bez ēnojuma	
Elementa projicētais laukums $A_{l,p}$ (m ²)		138	
• Ārējo šķēršļu apēnojuma koeficienti			
Rezultējošais ēnojuma samazināšanas faktors F_{en} (-)		1	
• Ēnojuma ar pārvietojamības nosacījumiem aprēķins			
Ir aizsegs?		☐ jā ☒ nē	
• Aprēķina rezultāti			
Vidējie aprēķina rezultāti		apkures sezonā (1.X-15.I)	
Ēnojuma samazināšanas faktors $F_{en,g}$		0.4	
Efektīvais savācošais laukums $A_{s,k}$ (m ²)		9.246	
• Saņemtais saules starojums			
Apkures periodā $E_{s,k}$ (W/m ²)		59.7	
Dzesēšanas periodā $E_{s,k}$ (W/m ²)		59.7	
• Saules siltuma ieguvumi			
Apkures periodā $\Phi_{sol,k}$ (W)		552	
Dzesēšanas periodā $\Phi_{sol,k}$ (W)		552	
Saglabāt			

Att. 1.5.5.14. – Noēnojumos caurspīdīgiem elementiem ir iespēja apskatīt aprēķina rezultātus katram mēnesim

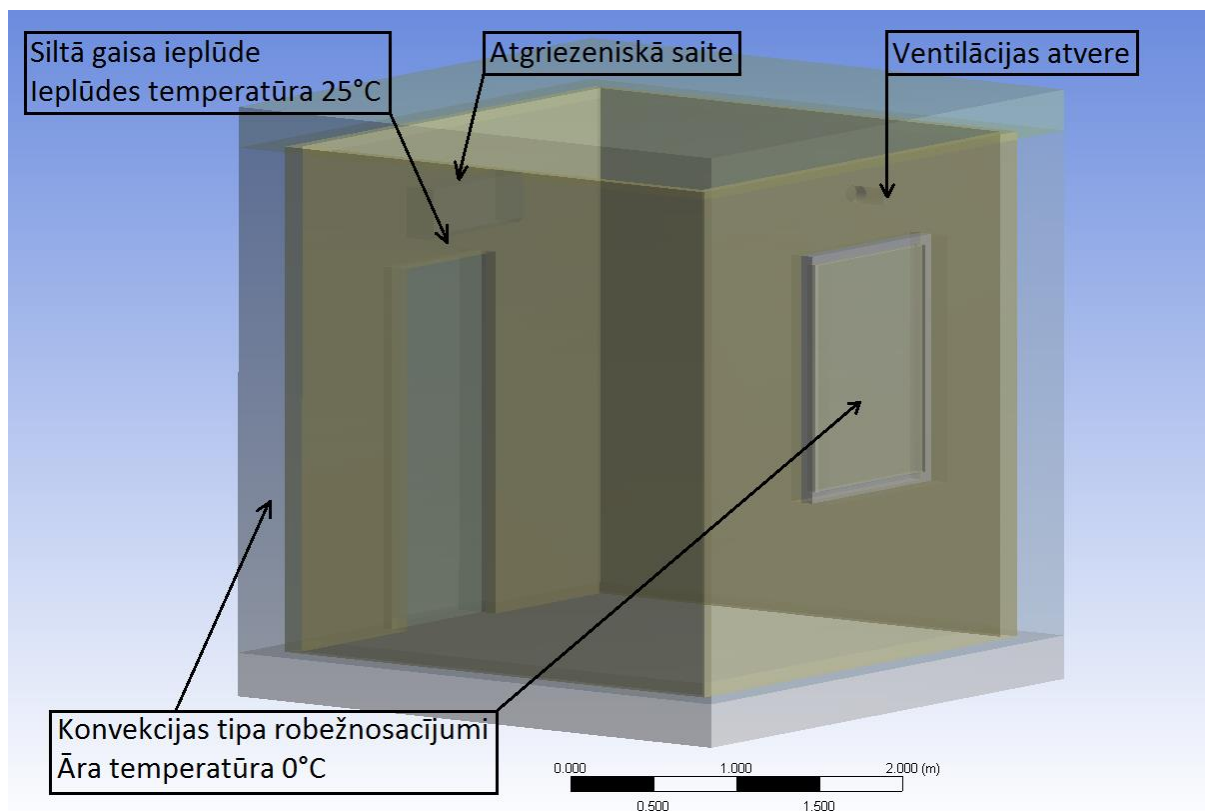
1.6. Telpu mikroklimata īpatnības gaisa siltumsūkņa izmantošanas gadījumā apkurei un ventilācijai

1.6.1. Matemātiskajā modelī izmantotie pieņēmumi un risinātie vienādojumi

Iepriekš tika izveidots multifizikāls matemātiskais modelis, lai teorētiski prognozētu gaisa plūsmas un temperatūras sadalījumus telpās, ja sildīšanai un dzesēšanai tiek izmantota gaisa plūsma - gaisa siltuma sūkņi. Lai skaitliski realizētu aprēķinus tika lietota komerciāla programmpakete ANSYS/CFX, kura balstīta uz galīgo tilpumu metodi. Siltuma pārnese vispārīgā gadījumā notiek ar siltuma starošanu, siltuma vadīšanu un vielas pārnesei - konvekciju. Ņemot vērā, ka pie mazas temperatūru starpības siltuma starojuma ietekme ir minimāla, šis apstāklis, izstrādājot modeli, netika ņemts vērā. Siltuma pārnese cietā vielā notiek vadīšanas ceļā un tāpēc būvkonstrukcijās tika risināts tikai siltuma vadīšanas vienādojums.

Siltuma vadīšana gaisā notiek galvenokārt vielas pārnesei dēļ, tāpēc papildus siltuma vadīšanas vienādojumam ir nepieciešams risināt Navjē-Stoksa vienādojumus, kas nosaka gaisa kustību. Tā kā gaisa kustība telpā ir turbulenta, tad nepieciešams izmantot kādu turbulences modeli. Analīzes rezultātā kā piemērots tika izvēlēts $k-\omega$ SST turbulences modelis, jo tas nodrošina labus vidējās turbulētās plūsmās apraksts tuvinājumus gan sienu tuvumā, kur tiek lietots $k-\omega$ turbulences modelis, gan arī tilpumā, kur tiek lietots $k-\epsilon$ turbulences modelis. Gaisa plūsma pie maziem ātrumiem (ātrumi, kas ievērojami mazāki par skaņas ātrumu gaisā 343 m/s) var tikt uzskatīta par nesaspiežamu, kas pētāmajā situācijā izpildās. Eksperimentāli ir noteikts, ka maksimālais ātrums eksperimentālajos stendos nepārsniedz 2 - 3 m/s. Nesaspiežamības pieņēmums ļauj pielietot Businesska (*Boussinesq*) tuvinājumu, lai aprakstītu konvekciju, respektīvi, tiek pieņemts, ka gaisa blīvums ir konstants, bet konvekciju izraisa tilpuma spēks, kas ir atkarīgs no temperatūras un darbojas uz katru gaisa elementu.

Lai arī testa stendi nav ideāli simetriski, slīpā jumta dēļ, matemātiskajā modelī tās tiek uzskatītas par simetriskām, jo neapsildāmā bēniņu daļa detalizēti netiek apskatīta, uzdodot uz ārējām virsmām konvekcijas tipa (trešā veida) robežnosacījumus, bet stenda apsildāmajai iekšējai eksistē simetrijas plakne. Tas nozīmē, ka fizikālajiem laukiem ir jābūt simetriskiem pret attiecīgo plakni un ir iespējams aprēķināt lauku sadalījumus, izmantojot tikai pusi modeļa ģeometrijas un pielietojot simetrijas robežnosacījumus, kas ļauj ievērojami samazināt aprēķinu resursietilpību un laiku.



Att 1.6.1.1. Aprēķinu modeļa shematisks attēlojums

Uz apgabala ārējām robežām ar apkārtējo vidi ir uzdoti dabiskās konvekcijas tipa robežnosacījumi, kur siltuma apmaiņas koeficients $\alpha = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ un apkārtējā temperatūra ir uzdota 0°C . Gaisa ieplūde tiek modelēta, siltumsūkņa iekšējā bloka atverē uzdodot konstantas temperatūras gaisa plūsmu, kurai katrā gadījumā ir atšķirīgs ieplūdes ātrums un virziens.

1.6.2. Stacionāra atrisinājuma iegūšanas metodika

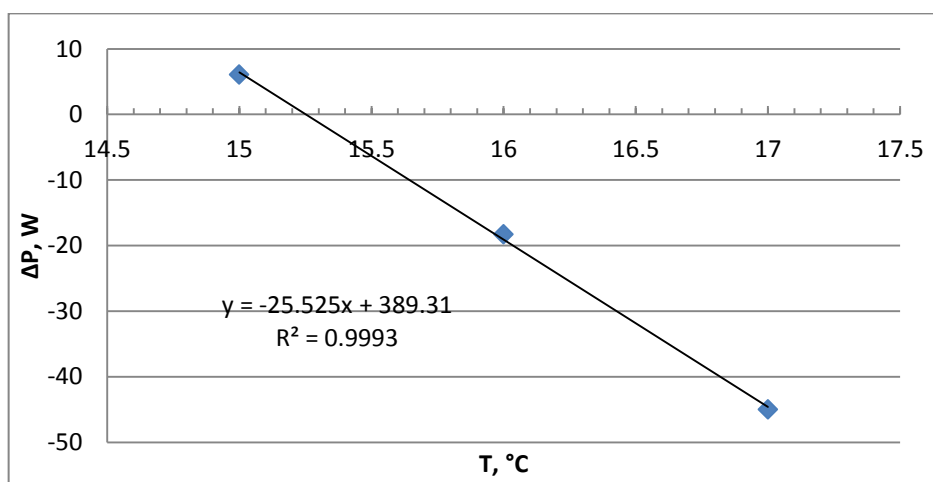
Hidrodinamiskos procesus, kuri ir izteikti nelineāri, aprakstošās vienādojumu sistēmas skaitliskie risinājumi pie noteiktām parametru kombinācijām var kļūt nestabili un daudzos gadījumos neizdodas iegūt stacionāru vidējotās plūsmas ainu – saglabājas būtiskas vidējotās plūsmas oscilācijas. Šeit būtiski nošķirt skaitlisko parametru izvēles noteiktās risinājuma nestabilitātes no fizikālo procesu rakstura un mijiedarbību noteiktās nestabilitātes. Tāpat būtiski kontrolēt, lai modelī izpildītos arī enerģijas un masas saglabāšanās. Lai izvairītos no skaitliskās nestabilitātes tika apskatītas divi veidi kā iegūt fizikāli ticamu atrisinājumu.

Pirmā pieeja saistās ar sākotnēji stacionāra atrisinājuma iteratīvu iegūšanu, kuram neizpildās iepriekš minētie un no modeļa ģeometrijas izrietošie simetrijas nosacījumi. Pēc šāda atrisinājuma iegūšanas to lieto kā sākuma nosacījumu nestacionāram (laikā mainīgam)

aprēķinam, kuram, nemainot robežnosacījumus, jādod tāds pats rezultāts kā stacionārā gadījumā. Ir sagaidāms, ka pēc kāda laika iegūtā plūsmas aina kļūs simetriska un stacionāra.

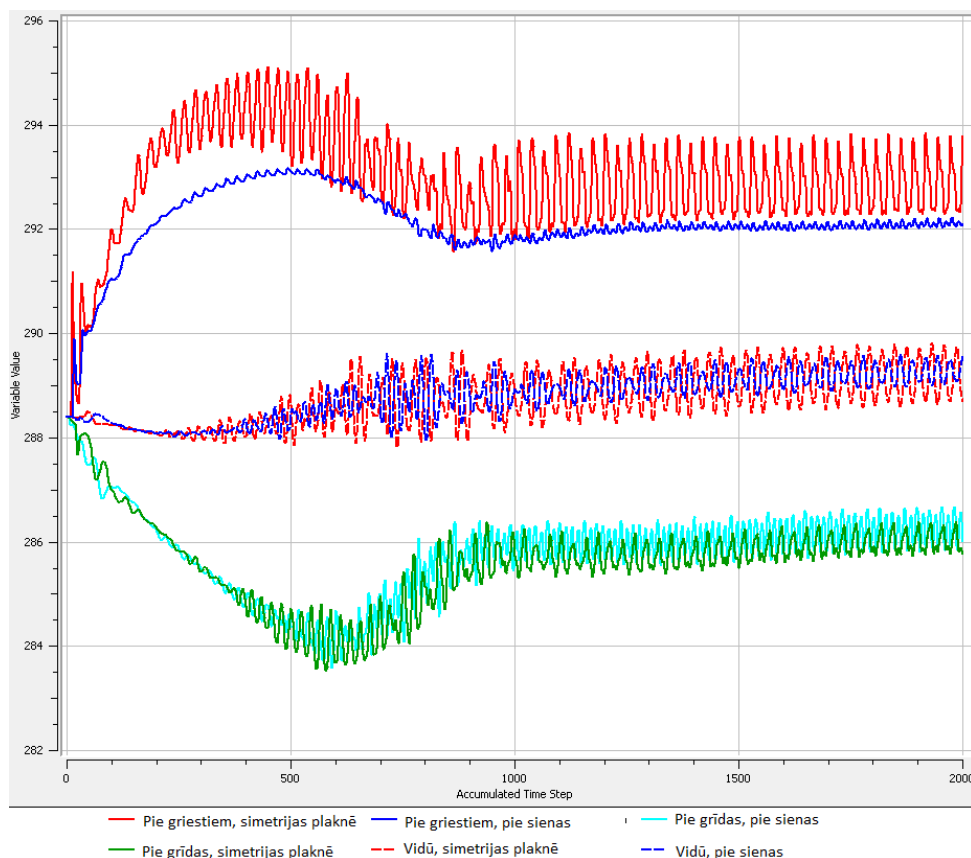
Otra iespēja ir iegūt stacionāru pagaidu atrisinājumu, kuram izpildās simetrijas nosacījumi, tas iespējams veicot nelielu skaitu iterāciju (pie izmantotā režģa elementu skaita empīriski konstatēts, ka aptuveni 100 iterācijas ir optimāls skaits). Šāda veida atrisinājumi ir jūtīgi pret sākuma nosacījumiem, tāpēc viegli iegūt atrisinājumu, kuram neizpildās enerģijas saglabāšanās. Šī iemesla dēļ nepieciešams labs sākuma tuvinājums temperatūrai, lai izpildītos enerģijas saglabāšanās likums. To viegli pārbaudīt aprēķinot modeļa siltuma bilanci. Simetriska atrisinājuma iegūšana iespējama, ja tiek lietoti stacionāri vienādojumi, bet aprēķins tiek pārtraukts pirms sākas oscilācijas ap līdzsvara stāvokli. Izmēģinot abas pieejas tika secināts, ka pirmā prasa nesamērojami lielākus datora resursus, tāpēc tika atmesta, līdz ar to nepieciešami labi sākuma tuvinājumi temperatūrai.

Temperatūras sākuma nosacījumu veiksmīgai izvēlei tika izmantotas divas pieejas: pirmā - veikt stacionāru aprēķinu pietiekami ilgi pie patvaļīgi izvēlētām sākuma vērtībām, līdz izpildās siltuma bilances prasības; otrā – veikt vairākus īsus aprēķinus (100 iterācijas) pie dažādām sākuma vērtībām un siltuma bilances nesakritību attēlo kā funkciju no uzdotās sākuma temperatūras. Kā redzams (*att. 1.6.2.1.*), tad iegūto sakarību labi var aprakstīt ar taisni, ja sākuma minējumi ir pietiekami tuvi meklējamam atrisinājumam.



Att. 1.6.2.1. Siltuma daudzuma disbalansa atkarība no izvēlētās sākuma temperatūras un datu aproksimācija ar taisni; no taisnes vienādojuma tiek iegūta temperatūras sākuma vērtība, lai aprēķinā nodrošinātu labu siltuma bilances izpildīšanos.

Izmantojot šo aproksimāciju ērti var atrast tādu sākuma temperatūru, kurai siltuma bilance izpildās. Aprēķini parādīja, ka precīzāka un aprēķinu laika ziņā ekonomiskāka ir otrā metode.

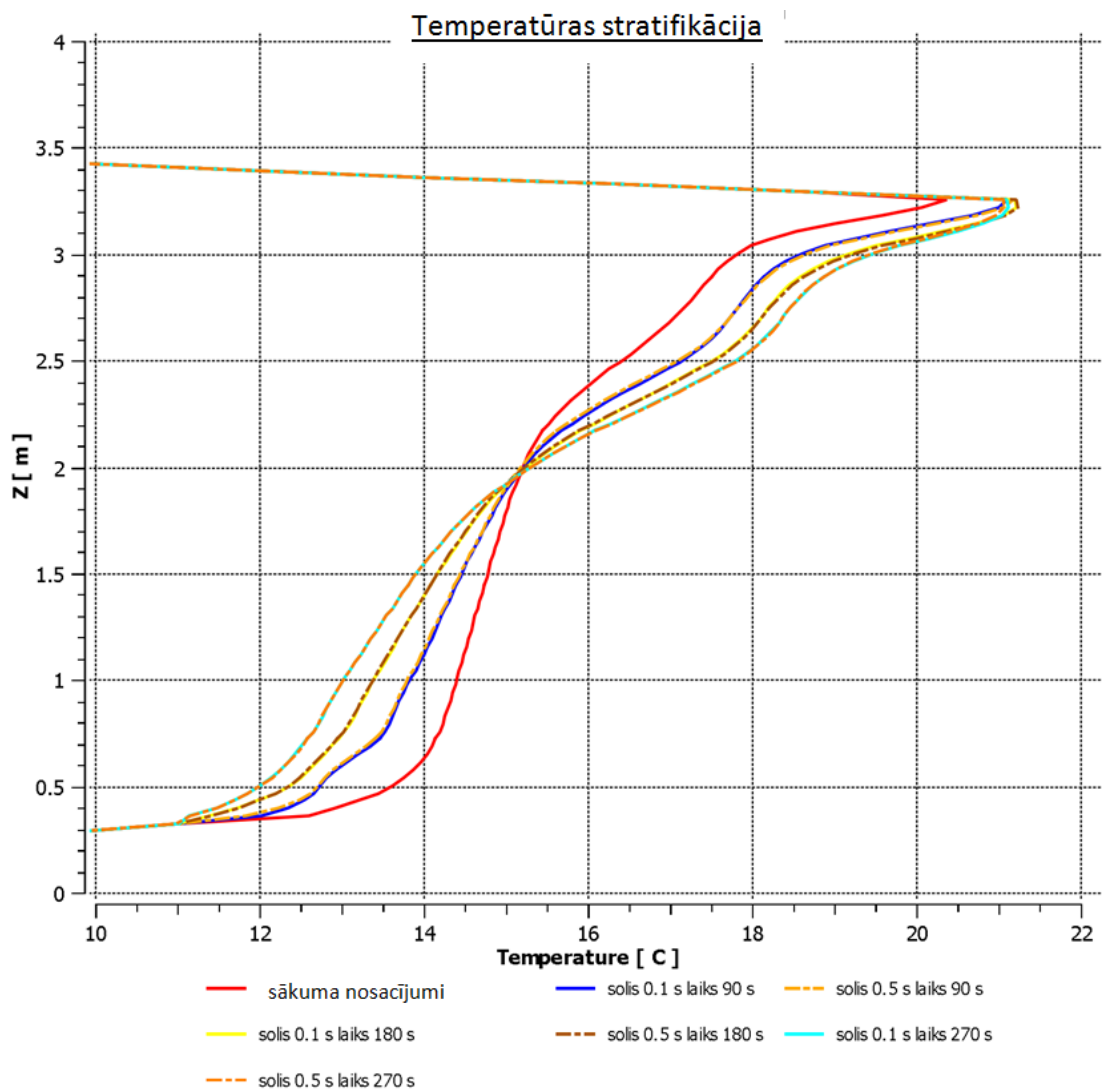


Att. 1.6.2.2. Monitoringa punktu vērtības, rēķinot stacionāru vienādojumu, punkti atlikti 20 cm no sienas, griestiem un grīdas.

Apskatot pusi no modeļa ģeometrijas ar simetrijas robežnosacījumiem tā vertikālajā vidusšķēlumā nav iepriekš minētās asimetrijas problēmas, bet atrisinājums tāpat konverģē uz stacionāru sadalījumu vidējotai plūsmai (*att. 1.6.2.2.*). Atrisinājums patiešām sasniedz kādu zināmu vērtību, bet sākas oscilācijas ap to. Liela svārstību amplitūda nozīmē, ka arī aprēķinu kļūda ir tāda, tāpēc arī šajā gadījumā tika nolemts lietot jau izstrādāto pieeju ar nestacionāru aprēķinu pēc 100 stacionārām iterācijām. Šādi iegūtais atrisinājums atrodas svārstošā atrisinājuma robežās.

Lai uzskatāmi nodemonstrētu, ka iegūtie rezultāti patiešām tiecas uz kvazistacionāru stāvokli tiek apskatītas temperatūras (*att. 1.6.2.3.*), kuras iegūtas veicot 100 iterācijas stacionāram aprēķinam un temperatūras, kuras iegūtas pēc laika intervāliem 90, 180 un 270 sekundes. Temperatūras tika reģistrētas uz vertikāles telpas grīdas viduspunktā. Laikā manīgiem aprēķiniem ir svarīgi izpildīt Kuranta kritēriju režģa un laika solim pie noteiktiem ātrumiem. Atklātām shēmām ir svarīgi, lai Kuranta kritērija vērtība būtu mazāka par 1, bet slēptām shēmām tā var pārsniegt 1 un joprojām dot fizikāli pareizu rezultātu. Tā kā tiek lietota slēpta shēma, tad papildus tika veikti aprēķini dažādiem laika soļiem, lai pārbaudītu, kāda ir

to ietekme uz rezultātu (*att.1.6.2.3.*). Kā redzams, tad pieckārtīgas laika soļa izmaiņas no 0,5 līdz 0,1 praktiski neiespādo rezultātu.

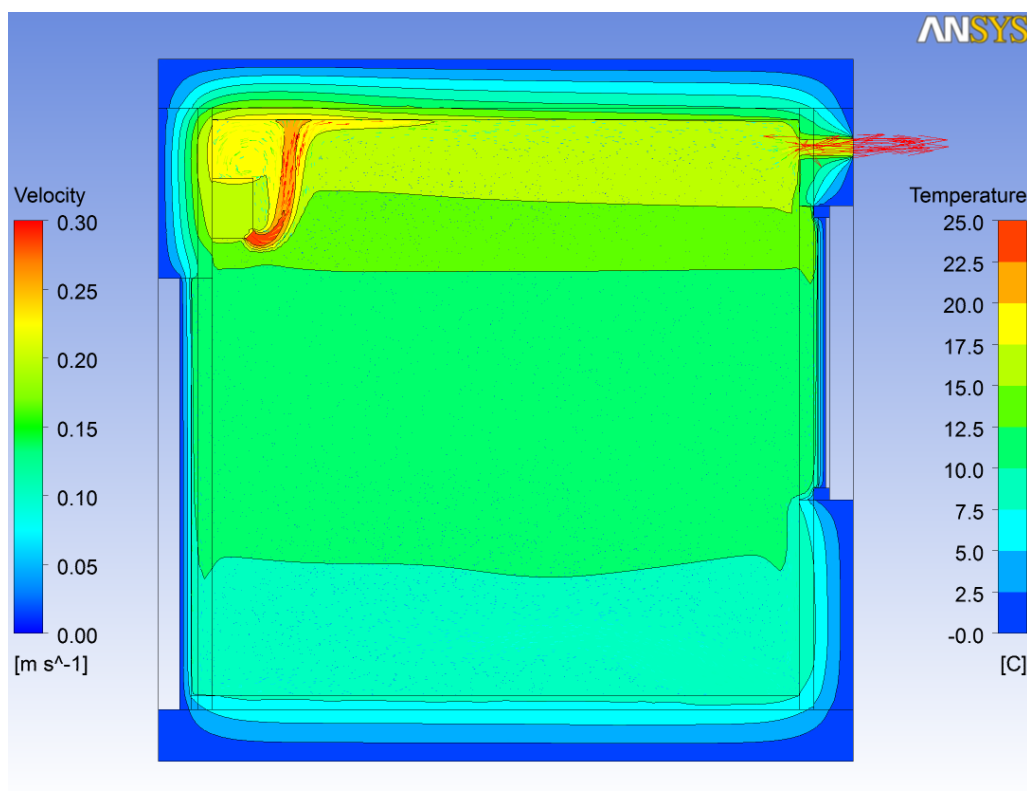
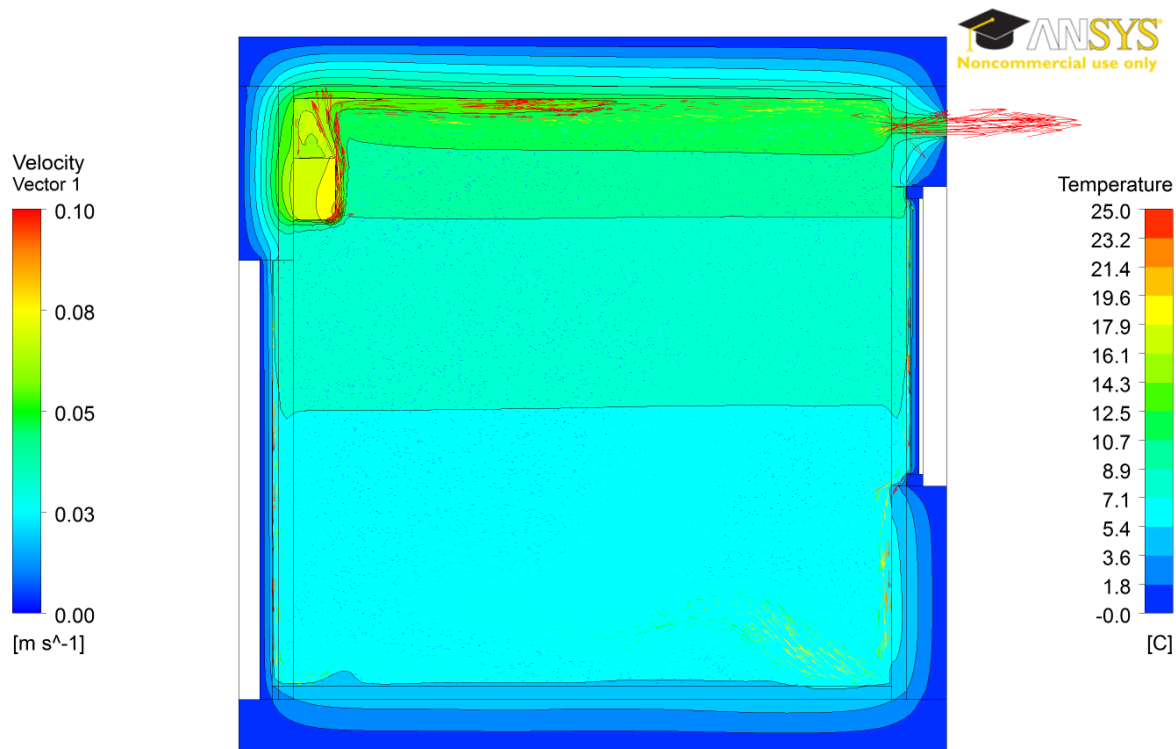


Att. 1.6.2.3. Temperatūras sadalījums uz vertikāles telpas grīdas viduspunktā.

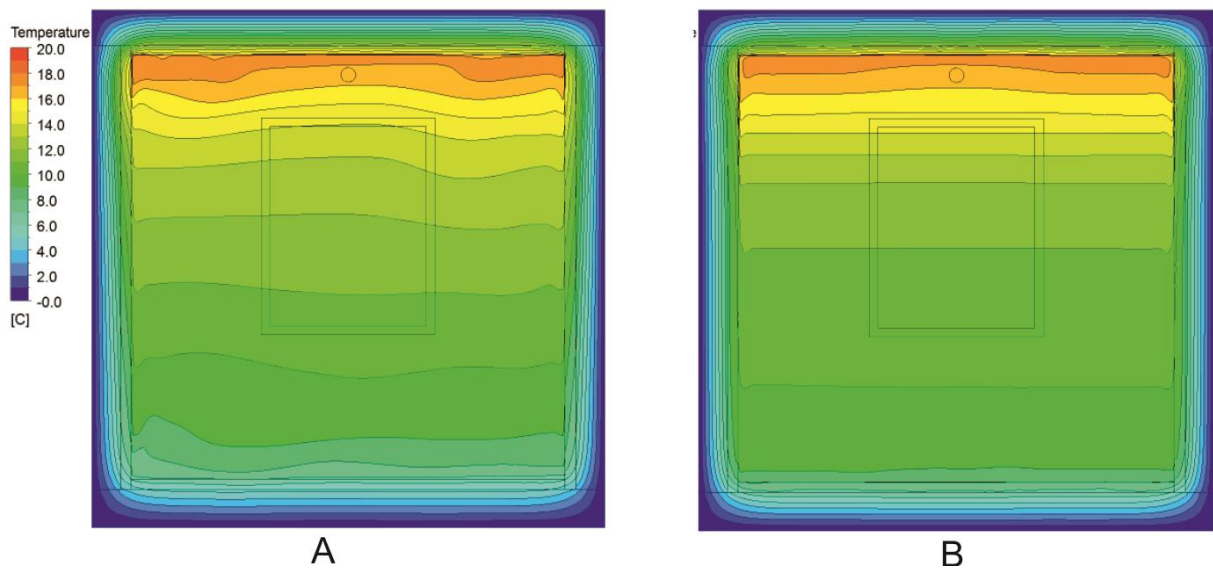
1.6.3. Aprēķinu rezultāti

Sākotnēji tika analizēts robežgadījums, kad nav atgriezeniskās saites - viss ieplūstošais gaiss izplūst no telpas caur ventilācijas atveri. Var redzēt, ka šajā gadījumā nozīmīga ir ventilācijas atveres novietojuma augstuma izvēle, jo siltais gaiss, kas ieplūst telpā, nespēj sasildīt to, jo izplūst ārā, nesamaisījies ar zemāk esošajiem gaisa slāņiem (*att.1.6.3.1*) - temperatūru starpība pa vertikāli telpas visusdaļā var sasniegt pat 10°C. Tika arī novērtēts, cik labi ir izpildās aprēķinu simetrija, attēlojot temperatūras izolīnijas uz vertikālas plaknes, kas perpendikulāra telpas simetrijas plaknei un gaisa plūsmas pamatvirzienam, gadījumā, kad

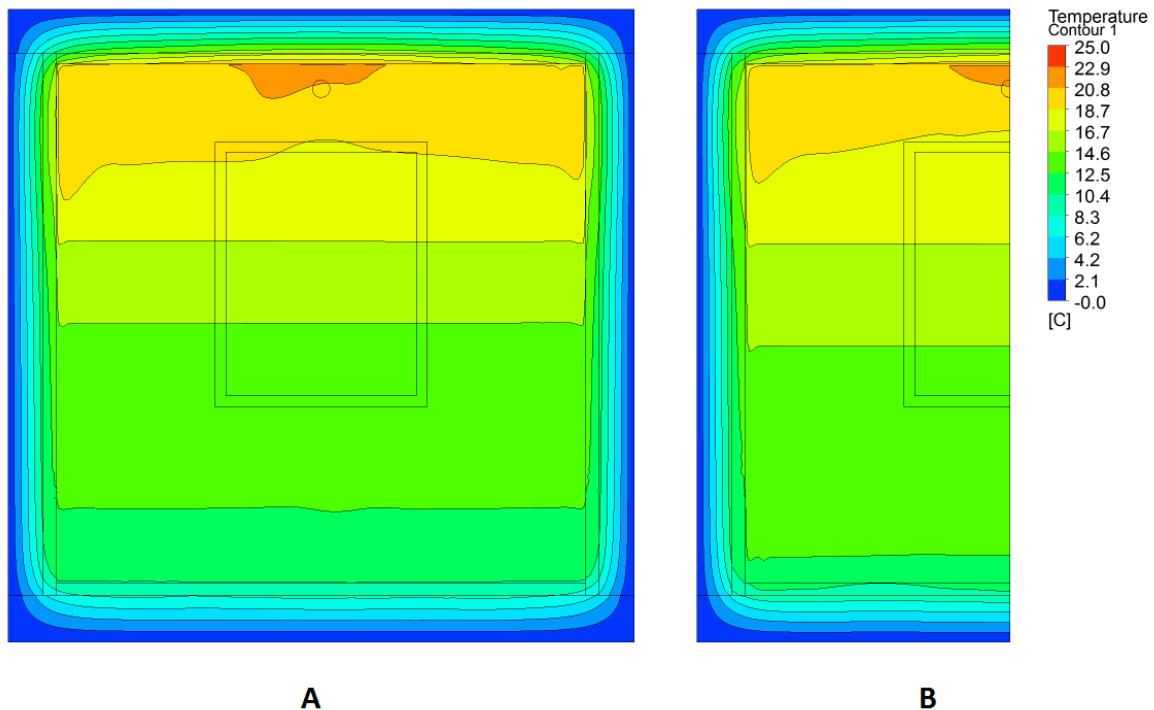
ieplūdes ātrums ir 0.3 m/s un gaisa apmaiņas intensitāte $n=1.8 \text{ h}^{-1}$ (att.1.6.3.2). Redzams, tad pēc 100 iterāciju stacionāra aprēķina ir manāma neliela asimetrija, bet pēc 300 s nestacionāra aprēķina lauka asimetrija ir gandrīz izzudusi.



Att. 1.6.3.1. Robežgadījums, kad viss gaiss, kas tiek ievadīts telpā caur siltumsūkni, izplūst caur ventilācijas atveri. Gaisa ieplūdes ātrumi attiecīgi $v = 0,1$ un 0.3 m/s , bet ieplūdes temperatūra $T = 25^{\circ}\text{C}$.



Att. 1.6.3.2. Temperatūras izolīnijas pēc 100 iterācijām stacionāram aprēķinam (a) un laikā mainīgam aprēķinam pēc 300 s (b). Gaisa ieplūdes ātrums $v=0.3$ m/s un tā temperatūra $T=25^{\circ}\text{C}$, gaisa recirkulācijas nav.

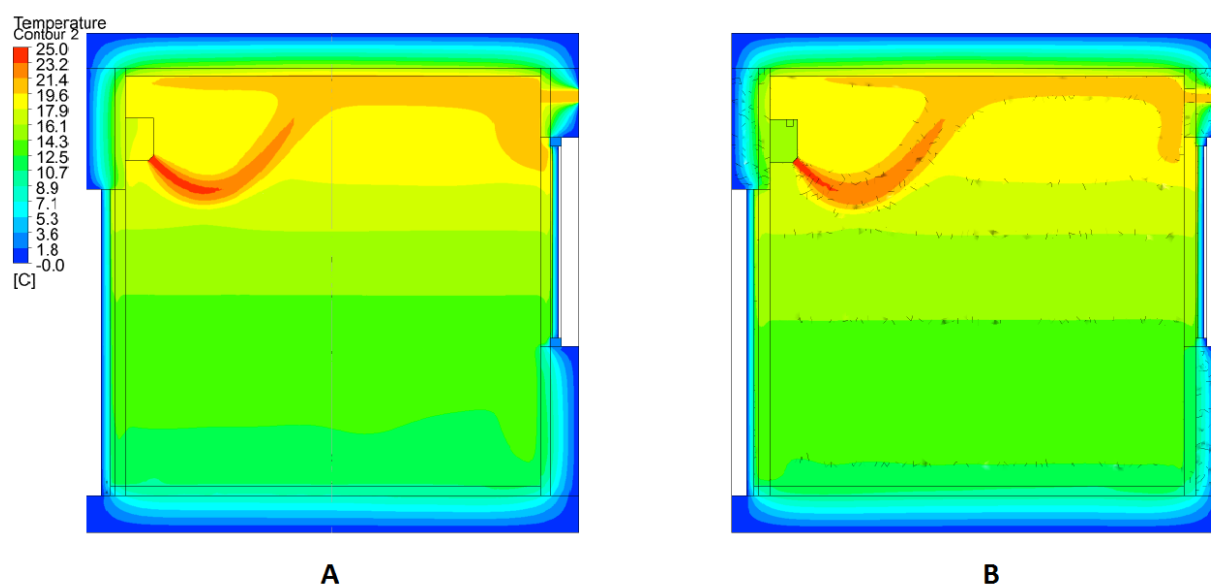


Att. 1.6.3.3. Temperatūras izolīnijas pie ieplūdes ātruma 0.6 m/s ar atgriezeniskos saiti un gaisa apmaiņu $n=0.6$ h⁻¹: a) pilnais modelis b) puse no modeļa ar simetrijas robežnosacījumiem.

Pēc tam tika veikti aprēķini, kur ievērota gaisa recirkulācija caur siltuma sūkni. Recirkulācija jeb atgriezeniskā saite šeit jāsaprot kā gaisa daļa, kuru siltuma sūkns neņem no āra, bet iesūc atpakaļ no testa stenda. Šī atgriezeniskā saite ļauj ievērojami palielināt gaisa ieplūdes ātrumus praktiski nepalielinot siltuma zudumus, bet tādējādi labāk samaisīt augšējās

un apakšējos gaisa slāņus. Tika salīdzināti pilna modeļa aprēķini ar puses no modeļa aprēķiniem, kur pielietoti simetrijas robežnosacījumi. Puses modelim simetrija izpildās vienmēr, tāpēc arī attēlota tikai puse (att. 1.6.3.3.b). Redzams, ka pilnais modelis dod aptuveni tāds pašus rezultātus. Šeit jāpiezīmē, ka atšķirības var būt radušās gan nelielās asimetrijas dēļ, gan arī sākuma nosacījumu dēļ.

Labi redzams (att. 1.6.3.4.), ka gaisa ar temperatūru 25°C ieplūdes ātruma palielināšana būtiski palielina temperatūras līmeni telpā un augšējie un apakšējie gaisa slāņi savā starpā labāk sajaucās – temperatūru starpība uz vertikāles telpas vidusdaļā būtiski samazinās līdz 5°C.

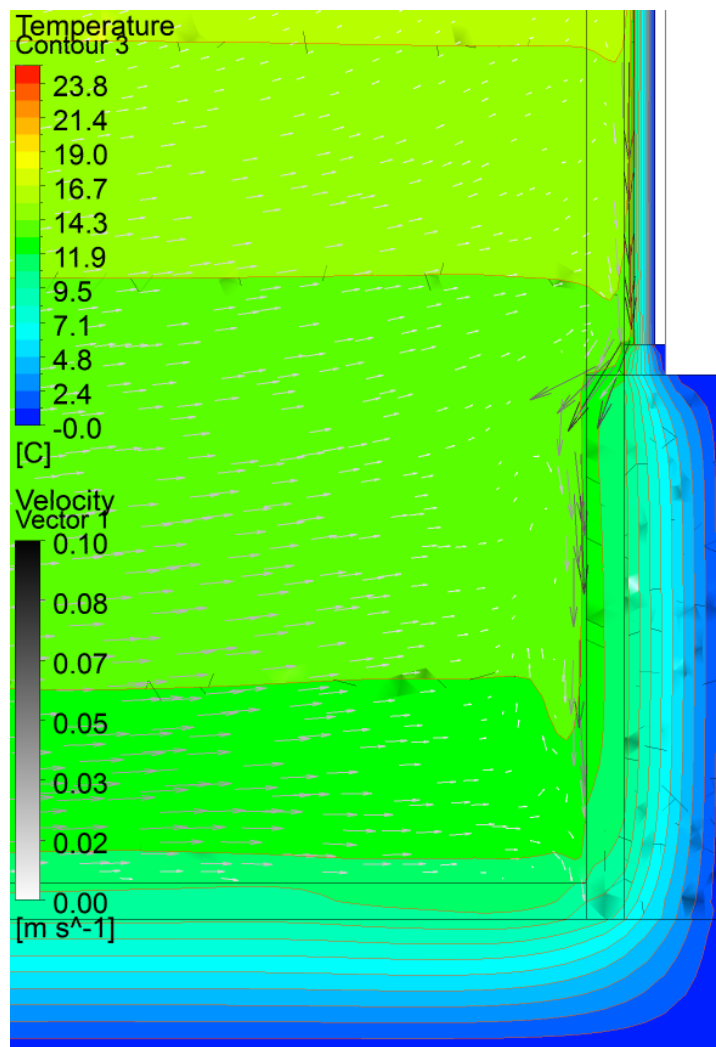


Att. 1.6.3.4. Ieplūdes ātrums 0.6 m/s ar atgriezeniskos saiti un gaisa apmaiņu 0.6 h^{-1} sānu skats: a) pilns modelis b) puse modeļa ar simetrijas robežnosacījumiem.

1.6.4. Rezultātu precizitāte un interpretācija

Matemātiskā modeļa neprecizitāte (neatbilstība fizikālajai situācijai dabā) var rasties vairākos veidos. Vispirms jāvērtē, cik labi turbulences modelis apraksta reālo plūsmu telpā. Izmantotais $k-\omega$ SST turbulences modelis ir gadu gaitā pārbaudīts dažādās situācijās un izotropas turbulences tuvinājumā labi tās apraksta. Neprecizitātes var rasties sienu tuvumā, kur ir stagnējoši apgabali (gaisa masu kustība nenotiek), kā arī apgabali ar lielu gaisa masu paātrinājumu. Analizējot rezultātus redzams, ka tie kvalitatīvi atbilst sagaidāmajiem (att. 1.6.4.1.). Pirmkārt jāpiezīmē, ka izpildās praksē novērojami stūra efekti, jo telpas stūris ir vēsāks nekā ārsienu virsmas tiešā tā tiešā tuvumā. Otrkārt - sienā, kur ir divi materiāli, ekvidistantas izolīnijas ir retākas izvietotas materiālā ar lielāku siltuma vadītspēju. Tas ir loģiski, jo temperatūras kritums (gradients) te ir zemāks. Var redzēt, ka sienas un it īpaši loga,

kura siltuma caurlaidība ir būtiski lielāka nekā ārsienai, virsmas tuvumā ir intensīvas gaisa plūsmas, kas vērstas uz leju. Šis rezultāts ir fizikāli pareizs, jo robežslānī temperatūra ir ievērojami zemāka, kas liek gaisam atdzist un virzīties uz leju smaguma spēka laukā. Telpas iekšpusē turpretim gaisa plūsmu ātrumi ir nelieli.



Att. 1.6.4.1. Stenda modeļa fragments, kurā redzams ātrumu un temperatūru lauks stūrī zem un pie loga.

Tā kā apstākļi ir stacionāri, tad atbilstoši tam ir jāizpildās siltuma un masas saglabāšanās likumiem (tabula 1.6.4.). Kā redzams, tad siltuma bilance labi izpildās atgriezeniskās saites gadījumā, bet sliktāk pie zemākiem ieplūdes ātrumiem bez atgriezeniskās saites. Šeit jānorāda, ka gaisa temperatūras sākuma vērtības tika uzdotas dažādos veidos – caurplūdes gadījumā tas bija nesimetriska stacionārā risinājuma vidējā temperatūras vērtība, bet atgriezeniskās saites gadījumā - iepriekš aprakstītā metode ar lineāras aproksimācijas izmantošanu.

Tabula 1.6.4. Siltuma bilances aprēķins dažādu gaisa ieplūdes ātrumu un gaisa apmaiņas intensitātes gadījumos

	Siltuma bilances aprēķins					Mērvienība
	ieplūdes ātrums	0.6	0.1	0.2	0.3	[m/s]
	gaisa apmaiņa	0.6	0.6	1.2	1.8	[1/h]
	recirkulācija	daļēja	nav	nav	nav	-
Zudumi	logs	-6.76	-9.08604	-11.8835	-13.6166	[W]
	siena	-48.07	-40.89744	-54.2686	-60.0715	[W]
	grīda	-10.76	-9.60057	-11.8228	-16.255	[W]
	griesti	-15.64	-19.11222	-24.4689	-27.6394	[W]
	durvis	-8.15	-9.34263	-12.9553	-14.005	[W]
	ventilācija	-43.70	-61.55	-141.18	-253.78	[W]
	atgriezeniskā saite	-81.00	0	0	0	[W]
	zudumi kopā	-214.08	-149.5889	-256.5791	-385.3675	[W]
Avots	ieplūde	214.00	132.19	262.29	390.91	[W]
	starpība	-0.08	-17.3989	5.7109	5.5425	[W]

Kā redzams gadījumā bez atgriezeniskās saites (recirkulācijas), pievadītā jauda ieplūdei aug lineāri, bet atgriezeniskās saites gadījumā pie ieplūdes ātruma 0.6 m/s jauda ir mazāka nekā pie ieplūdes ātruma 0.2 m/s bez recirkulācijas. Tas skaidrojams ar to, ka daļa siltā gaisa nonāk atpakaļ siltuma sūknī varbūtiski augstāku temperatūru nekā āra gaisa temperatūra un līdz ar to, patērētā jauda šī gaisa sasildīšanai līdz 25°C ir daudz mazāka. Ventilācijas siltuma zudumi ir atkarīgi no gaisa, kas izplūst no telpas temperatūras. Tā kā notiek temperatūras stratifikācija, tad caur ventilācijas atveri virs loga vienmēr izplūdis siltākais gaiss, ja vien nenotiks ļoti intensīva aktīva gaisa samaisīšana. Tomēr ļoti intensīva sajaukšana prasītu tik lielu ieplūdes ātrumu, ka telpā netiktu nodrošināti komfortabli apstākļi dzīvošanai. Šeit var palīdzēt ventilācijas atveres pārvietošana telpā, piem., tās novietošana telpas apakšā, jo šādā gadījumā izplūstu aukstāks gaiss.

Apskatot vidējo telpas temperatūru (tabula 1.6.5) var redzēt, ka recirkulācija ir būtiski svarīga, lai pie normālas gaisa apmaiņas intensitātes ($n=0,6$ 1/h) nodrošinātu telpā normālu temperatūras režīmu. Šis papildus ieplūdēs ātrums ļauj gaisam labāk samaisīties, kas ir pamatā tam, lai zemākajos slāņos temperatūra būtu augstāka. Lai vēl palielinātu iekārtas efektivitāti būtu ieteicams ieplūdi recirkulācijai izveidot dažādos telpas punktos, jo tādā gadījumā gaisa masas būtu spiestas samaisīties ar vēl lielāku intensitāti.

Tomēr, lai sasniegtu telpā vidēji 18 - 20°C temperatūru būtu nepieciešams vēl palielināt vai nu gaisa ieplūdes ātrumu, vai arī paaugstināt ieplūstošā gaisa temperatūru virs

25°C Abos gadījumos pastāv diskomforta riski lielu gaisa ātrumu vai karsta gaisa ieplūdes dēļ. Teiktais parāda, ka šādas gaisa siltumsūkņa sistēmas izmantošanas apkurei ziemas periodā optimizācija ir pietiekami sarežģīts uzdevums, bet, izmantojot matemātisko modelēšanu to var būtiski atvieglot.

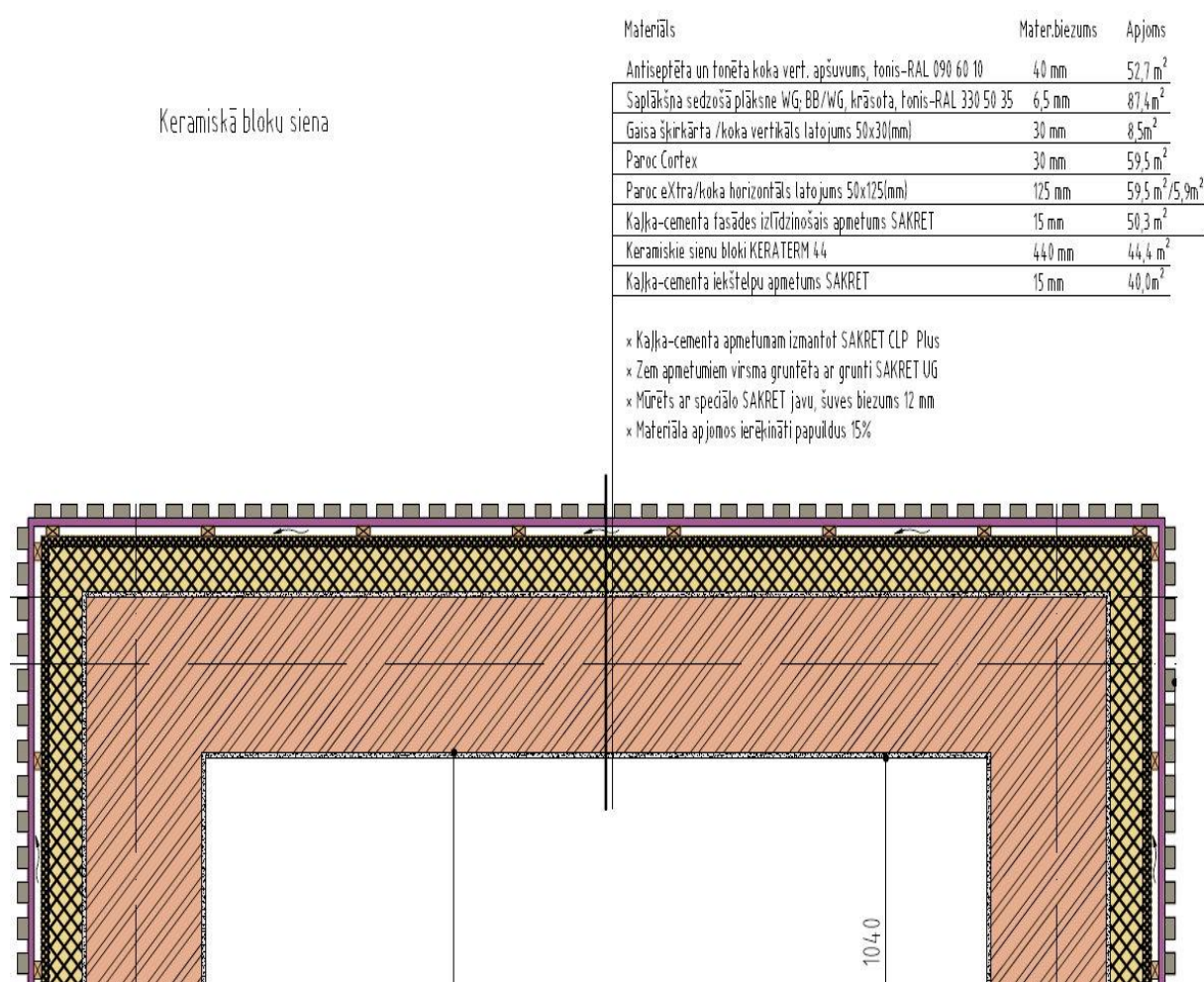
Tabula 1.6.5: Telpas gaisa vidējā temperatūra dažādiem apsildes režīmiem

Ieplūdes ātrums, m/s	0.1	0.2	0.3	0.6
Atgriezeniskā saite	nav	nav	nav	ir
Vidējā telpas gaisa temperatūra, °C	7.7	11	13.8	15.2

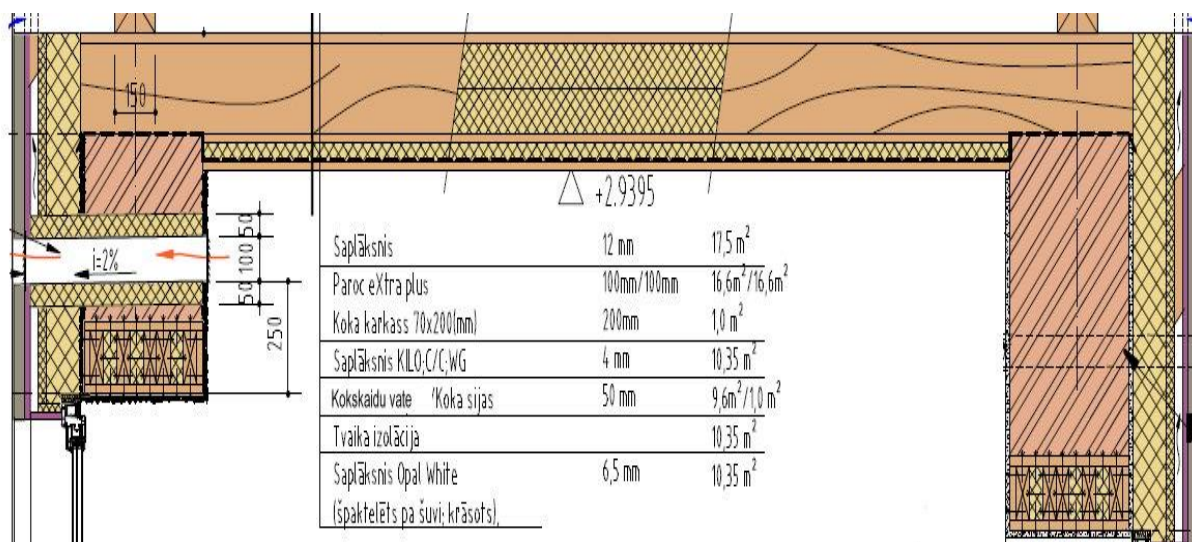
2. Optimizētas norobežojošās konstrukcijas

2.1. Konstruktīvie risinājumi

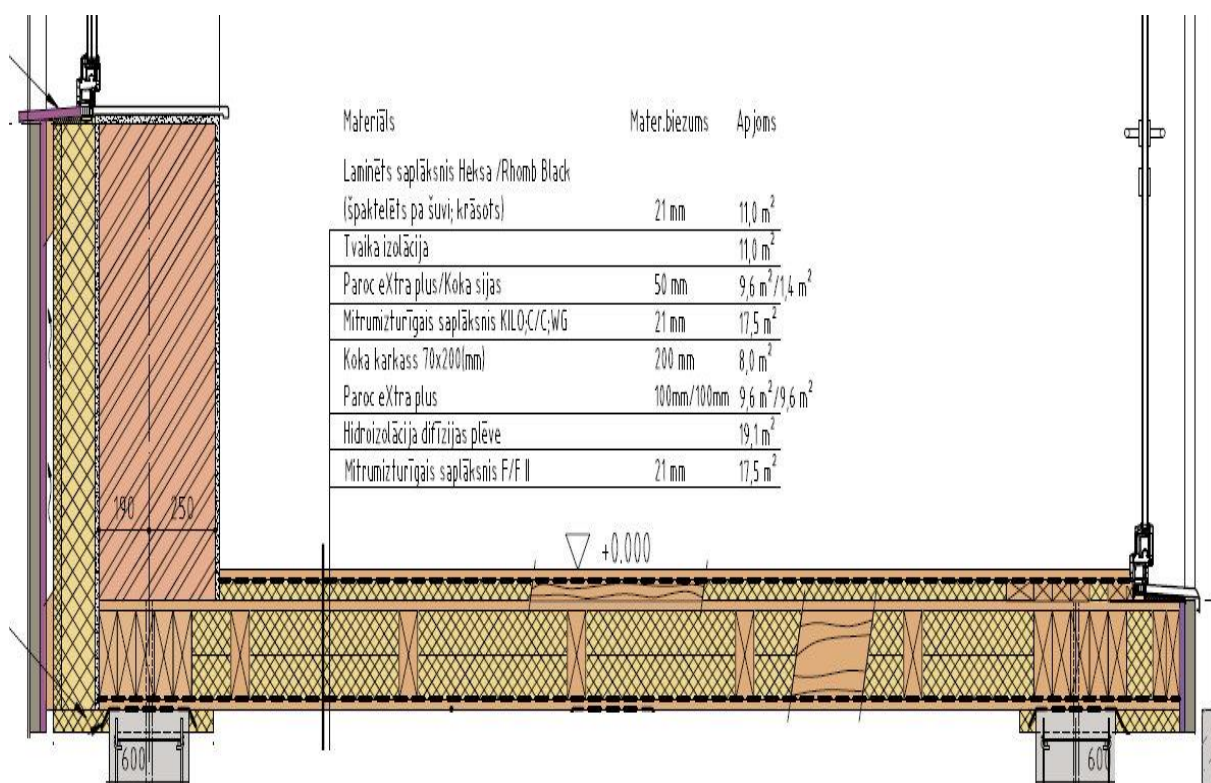
a) Dobie keramiskie bloki ar minerālvates siltumizolācijas slāni ārpusē (turpmāk CER)



Att. 2.1.1. - CER sienas konstruktīvais risinājums

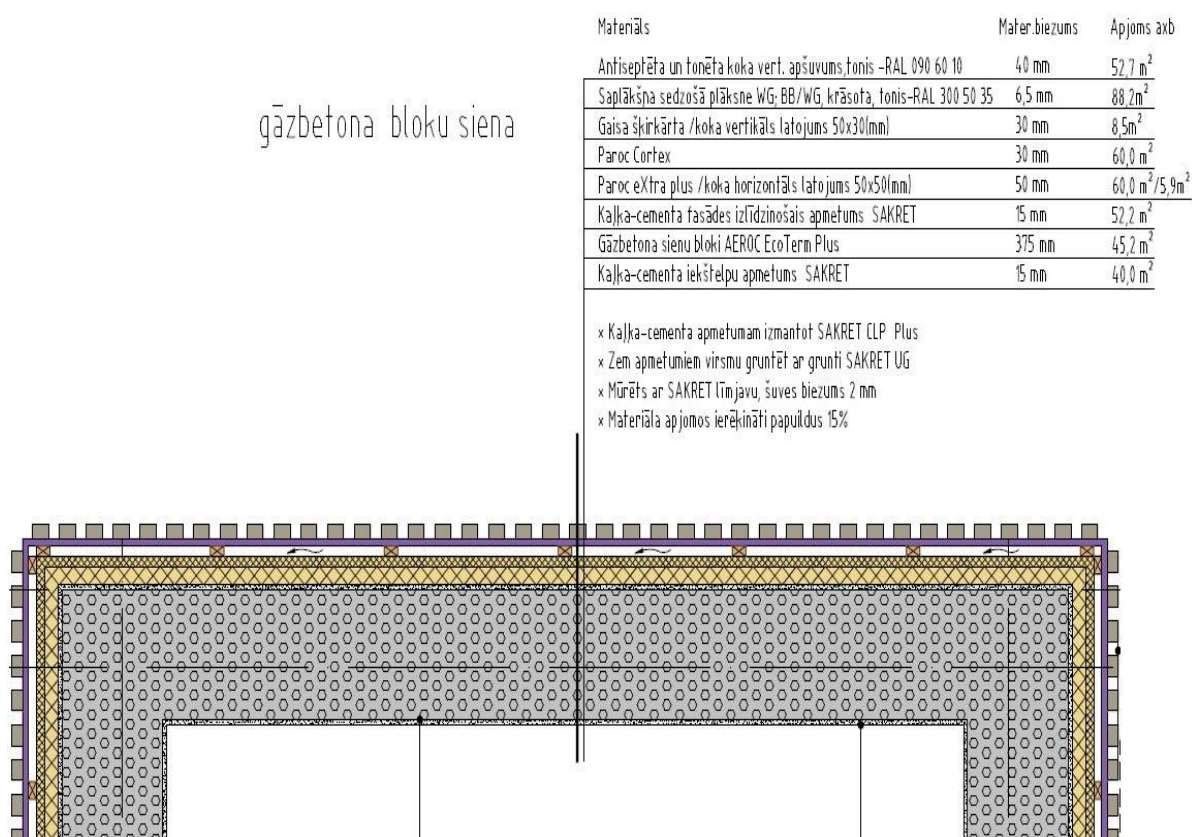


Att. 2.1.2. - CER griestu konstruktīvais risinājums

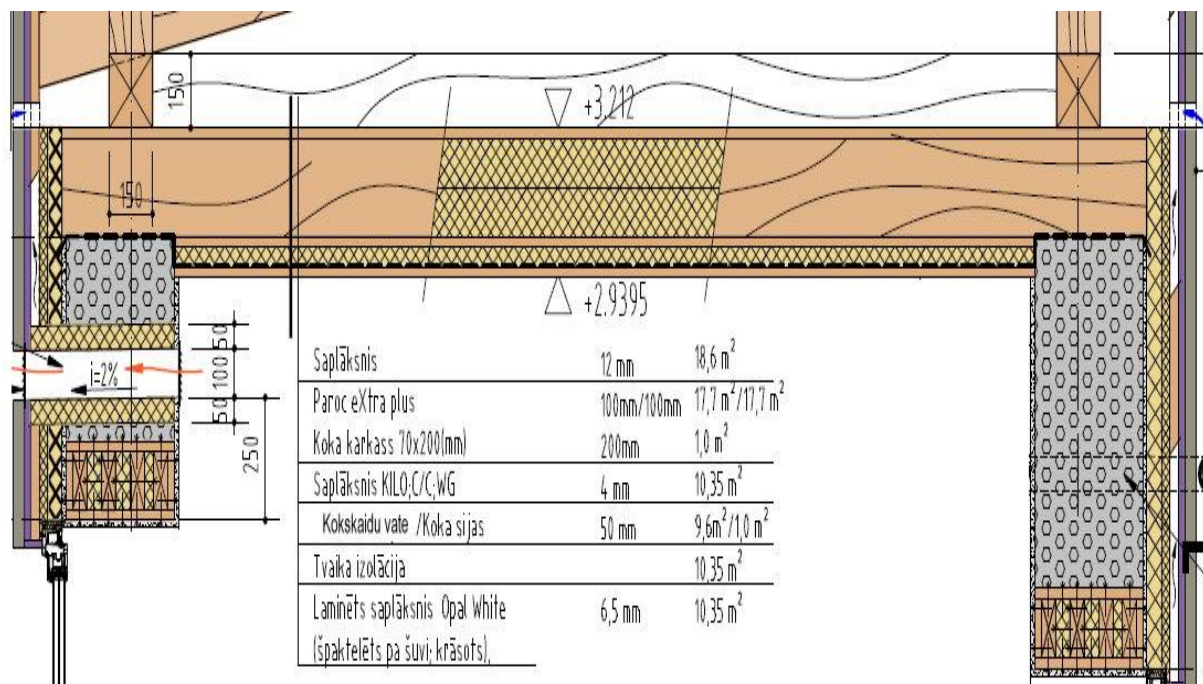


Att. 2.1.3. - CER grīdas konstruktīvais risinājums

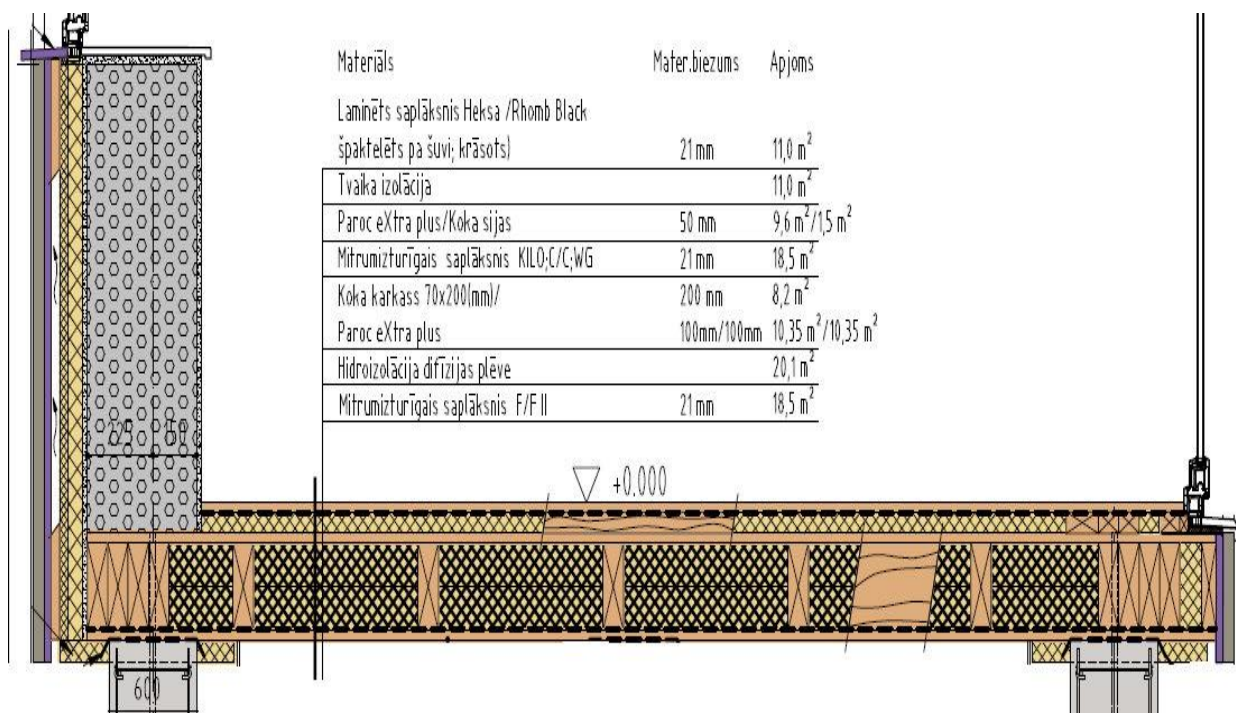
b) Gāzbetona bloki ar minerālvates siltumizolācijas slāni ārpusē (turpmāk AER)



Att. 2.1.4. - AER sienas konstruktīvais risinājums



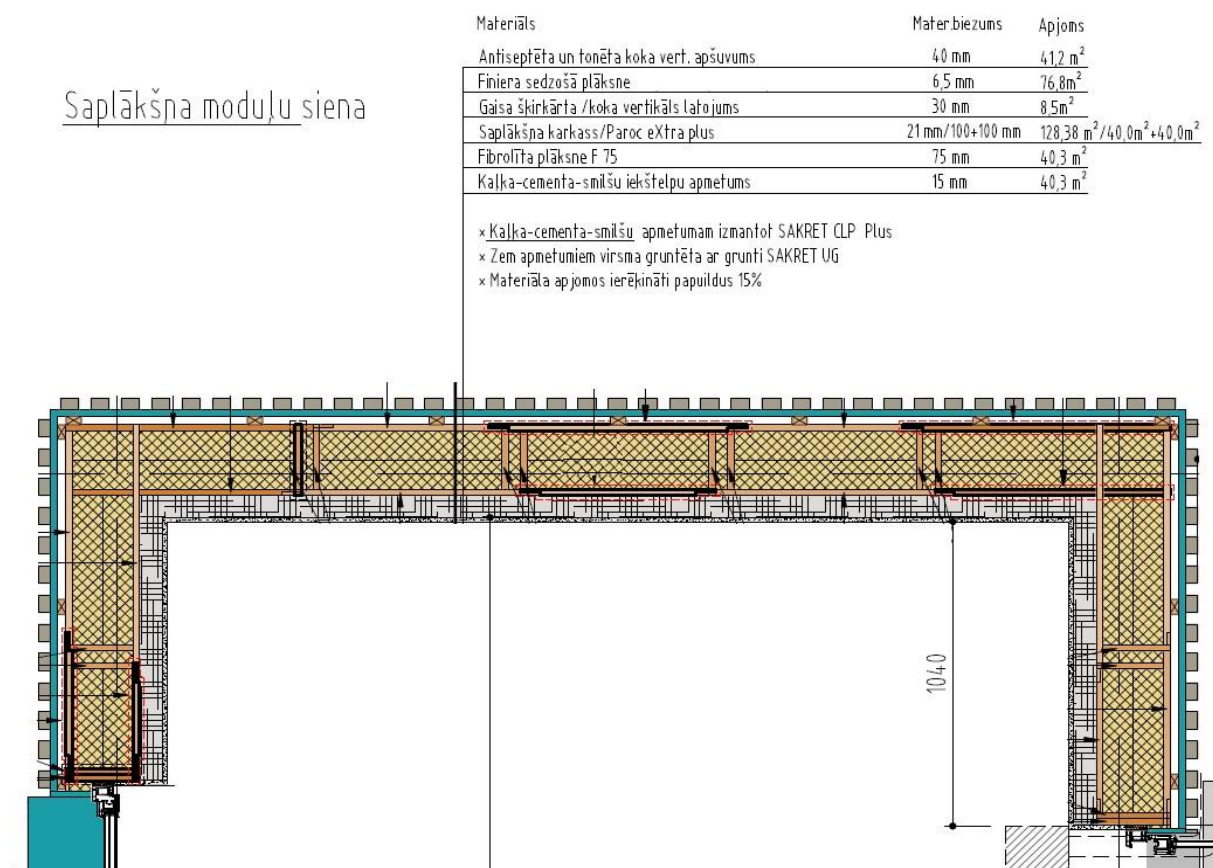
Att. 2.1.5. - AER griestu konstruktīvais risinājums



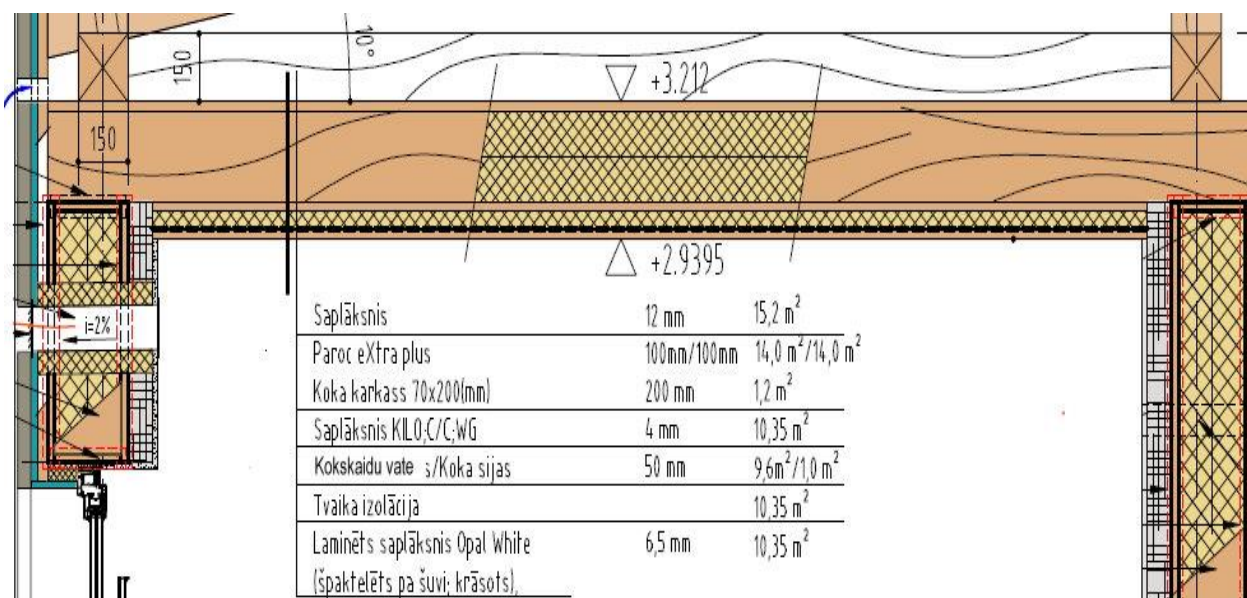
Att. 2.1.6. - AER grīdas konstruktīvais risinājums

c) Moduļveida saplākšņa paneļi ar minerālvates siltumizolācijas pildījumu (turpmāk PLY)

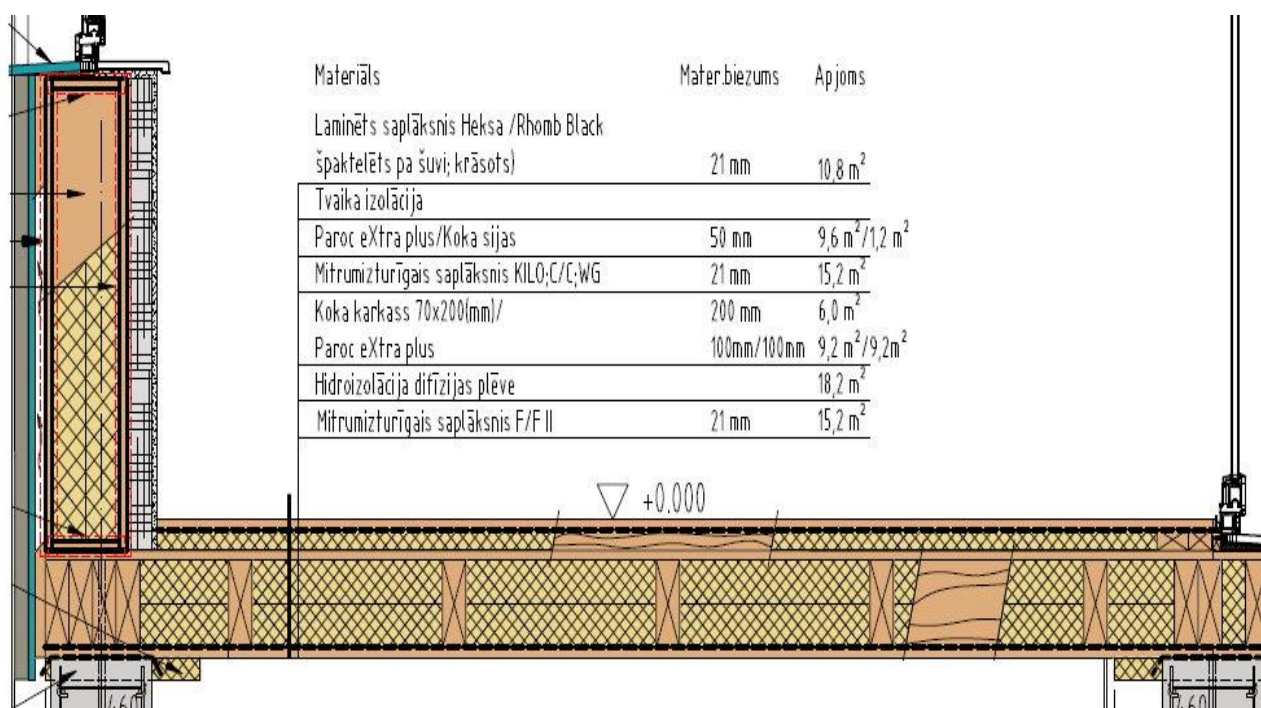
Saplākšņa moduļu siena



Att. 2.1.7. - PLY sienas konstruktīvais risinājums



Att. 2.1.8. - PLY griestu konstruktīvais risinājums



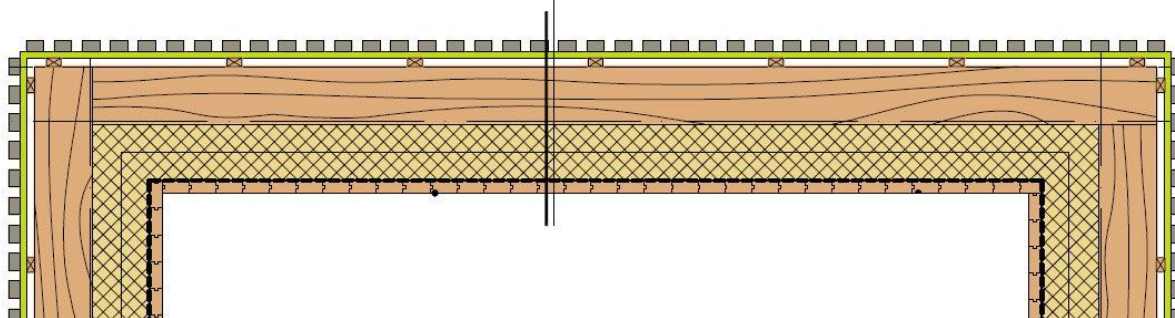
Att. 2.1.9. - PLY grīdas konstruktīvais risinājums

d) Frēzbaļķi ar minerālvates siltumizolācijas slāni iekšpusē un koka iekšējo apdari (turpmāk LOG)

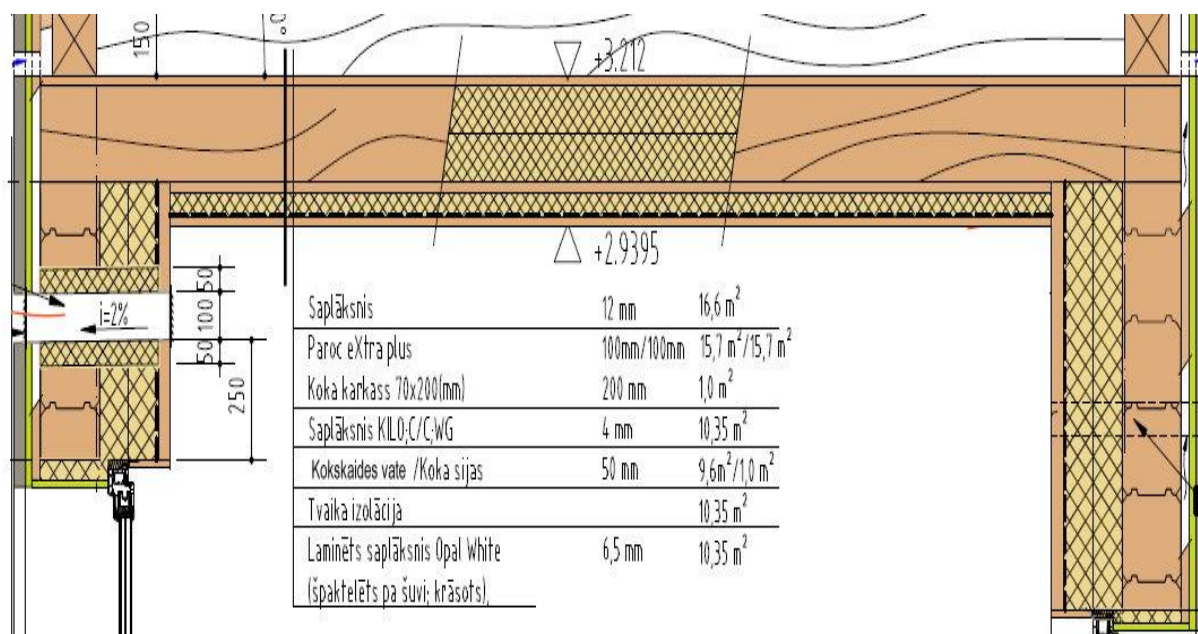
frēzbaļķu siena

Materiāls	Materiāla biezums	Apjoms
Antiseptēta un tonēta koka vert. apšuvums, tonis - RAL 090 60 10	40 mm	50,7 m ²
Saplākšņa sedzošā plāksne WG, BB/WG, krāsota, tonis -RAL 100 80 80	6,5 mm	83,5 m ²
Gaisa šķirkāta /koka vertikāls laņojums 50x30(mm)	30 mm	8,5 m ²
Dores frēzbaļķis	200 mm	51,2 m ²
Paroc eXtra plus/koka vertikāls laņojums 50x100(mm)	100 mm	41,4 m ² /4,8 m ²
Paroc eXtra plus /koka horizontāls laņojums 50x100(mm)	100 mm	41,4 m ² /4,8 m ²
Tvaika izolācija		46,4 m ²
Frēzbaļķu imitācijas koka apdare/ vertikāls apšuvums	40 mm	41,0 m ²

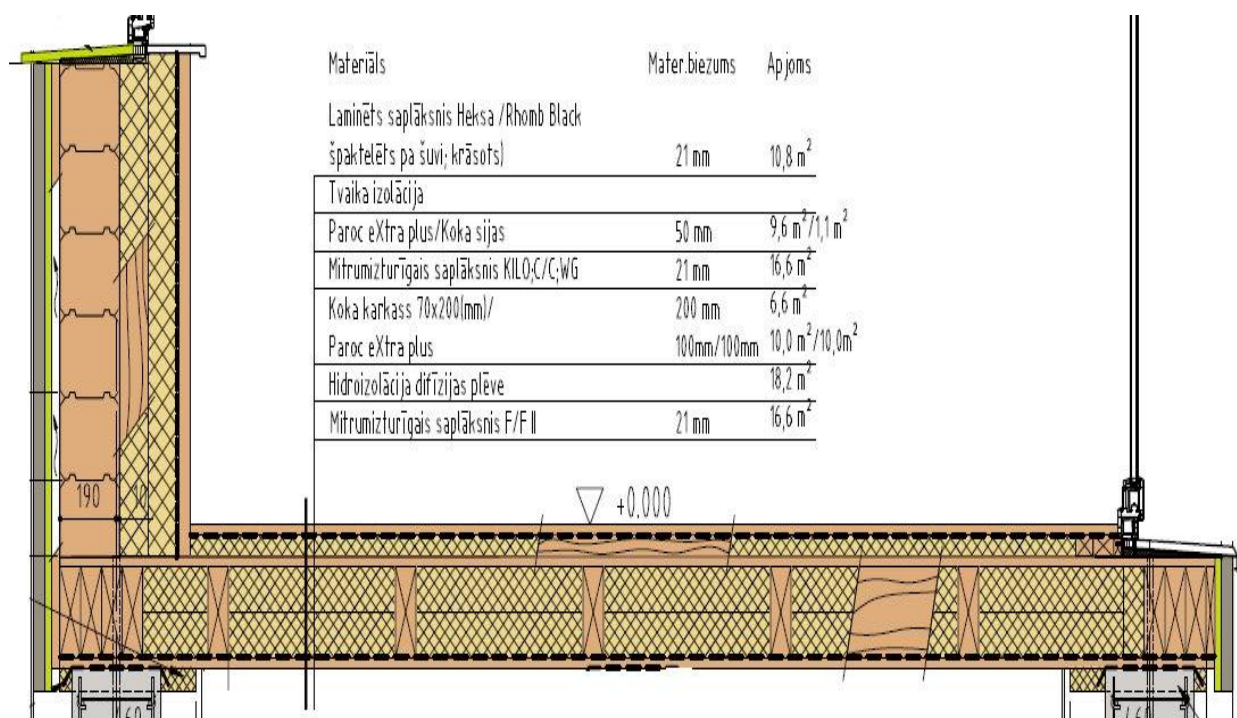
x Materiāla apjoms ierēķināti papildus 15%



Att. 2.1.10. - LOG sienas konstruktīvais risinājums



Att. 2.1.11. - LOG griestu konstruktīvais risinājums



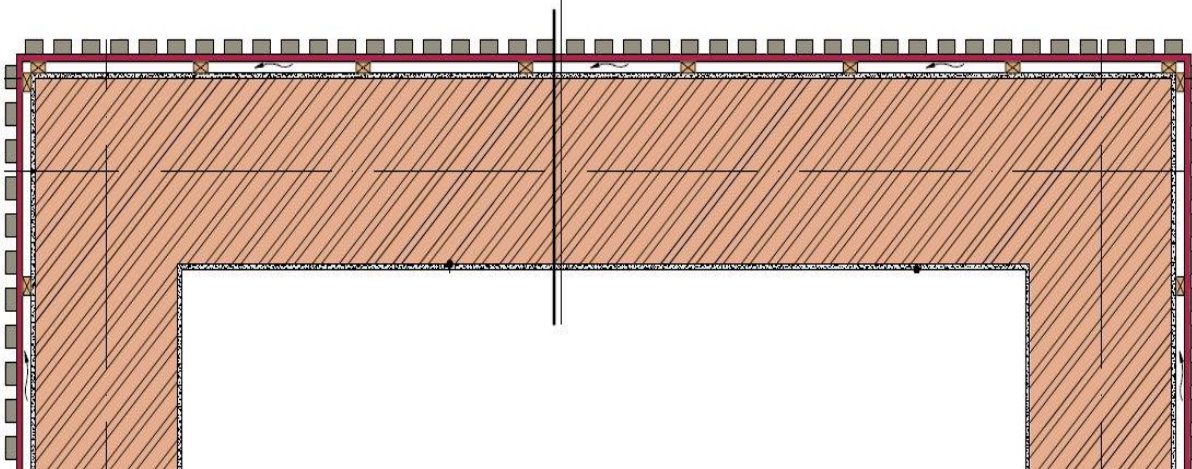
Att. 2.1.12. - LOG grīdas konstruktīvais risinājums

e) Dobie keramiskie bloki ar speciālu siltumizolācijas granulu pildījumu (turpmāk EXP)

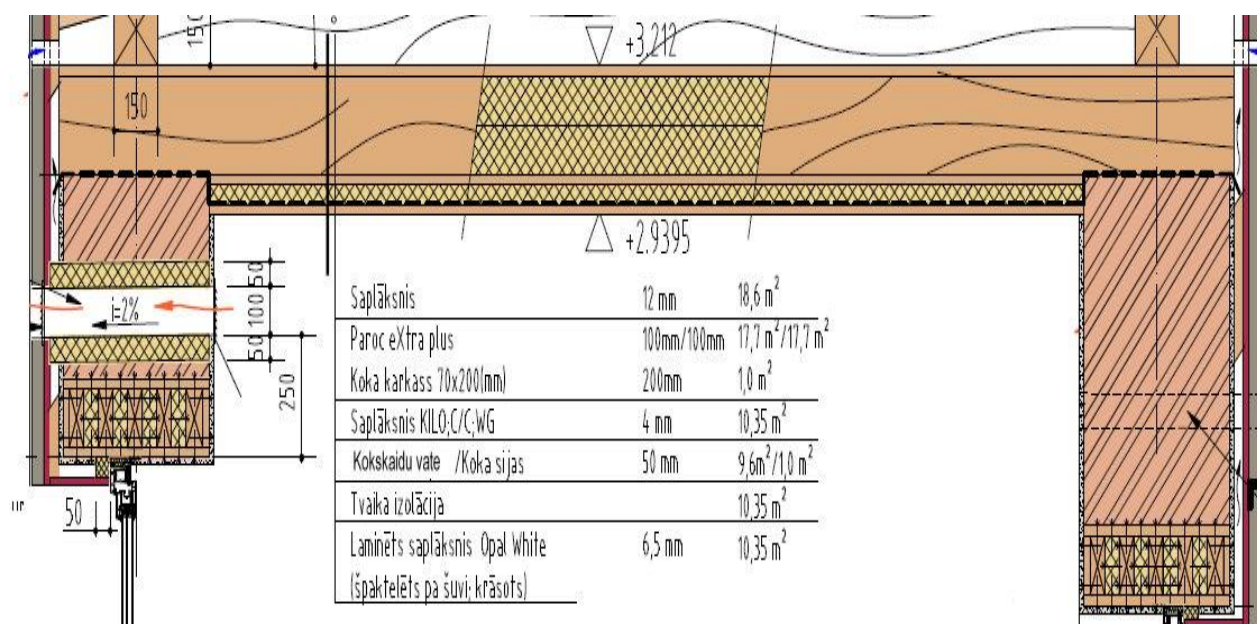
Keramiskā bloku siena
(eksperimentālais)

Materiāls	Mater.biezums	Apjoms
Antiseptēta un tonēta koka vert. apšuvums, tonis -RAL 090 60 10	40 mm	50,7 m ²
Saplākšņa sedzošā plāksne WG/BB/WG, krāsota, tonis -RAL 010 40 50	6,5 mm	83,5 m ²
Gaisa šķirkārtā /koka vertikāls iatojums 50x30(mm)	30 mm	8,5 m ²
Kalka-cementa fasādes iztīrinošais apmetums SAKRET	15 mm	50,3 m ²
Keramiskie sienu bloki; eksperimentālais KERATERM		
ar aizpildītiem dobumiem	500 mm	50,3 m ²
Kalka-cementa iekšējais apmetums SAKRET	15 mm	40,0 m ²

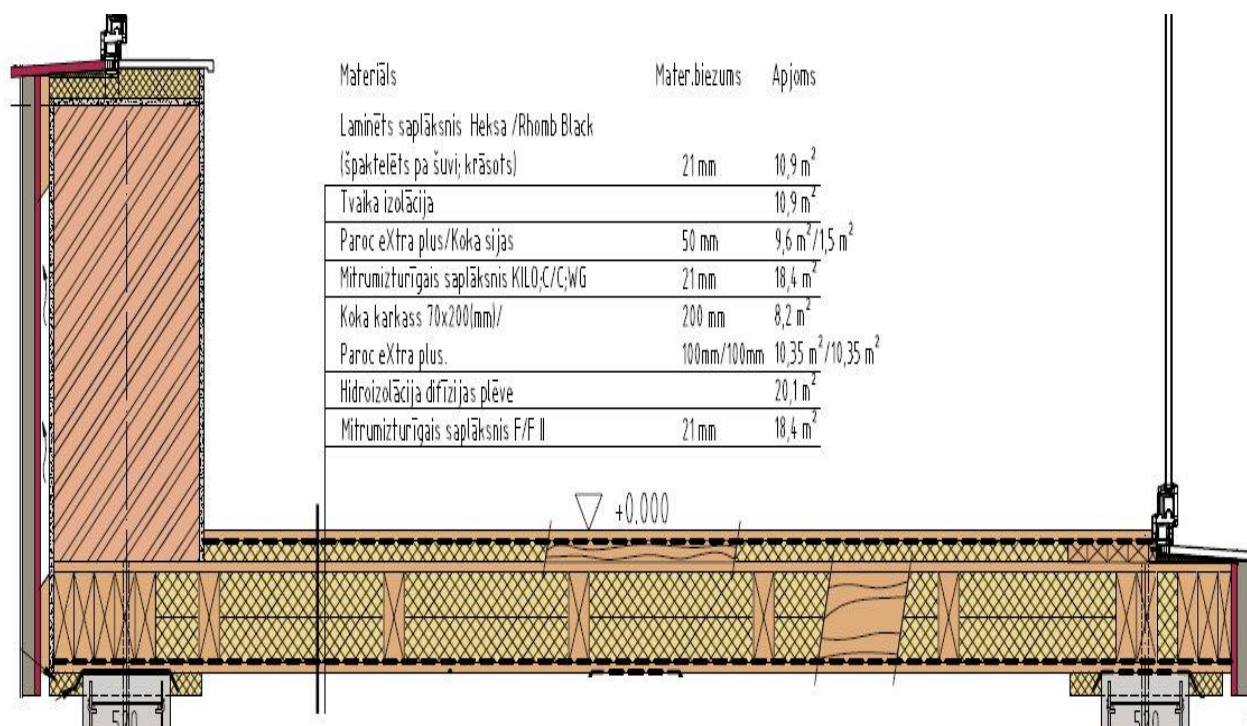
- × Kalka-cementa apmetumam izmantot SAKRET CLP Plus
- × Zem apmetumiem virsma gruntēta ar grunti SAKRET UG
- × Mūrēts ar speciālo SAKRET javu, šuves biezums 12 mm
- × Materiāla apjoms ierēķināti papildus 15%



Att. 2.1.13. - EXP sienas konstruktīvais risinājums



Att. 2.1.14. - EXP griestu konstruktīvais risinājums



Att. 2.1.15. - EXP grīdas konstruktīvais risinājums

Visām apskatītajām būvkonstrukcijām tika veikti detalizēti siltuma caurlaidības aprēķini, ievērojot

- normatīvos siltuma vadītspējas labojuma koeficientus;
- būvkonstrukciju daudzslāņainību un heterogenitāti;

- standartizētās siltuma atdeves koeficientu vērtības (ventilējama pagrīde, bēniņi un fasāde ārpusē).

Šo aprēķinu rezultāti atspoguļoti sekojošajā tabulā 2.1.

Tabula 2.1. Aprēķinātās būvkonstrukciju siltuma caurlaidības U vērtības

Slāņi		CER	AER	PLY	LOG	EXP	Grīda	Griesti
Iekšējais apmetums	mm	15	15	15		15		
	W/m·K	0,7	0,7	0,7		0,7		
Mitrumizturīgs grīdas saplāksnis	mm						21	
	W/m·K						0,17	
Saplāksnis	mm							4
	W/m·K							0,17
Plēve (tvaika barjera)								ir
<i>koka karkass + minerālvates siltumizolācija (neventilēts)</i> $\lambda = d/R = d \cdot U$	mm						50	50
	W/m·K						0,044	0,041
Fibrolīts <i>labojums $\Delta\lambda$ (neventilēts)</i>	mm			75				
	W/m·K			0,068				
	W/m·K			0,003				
Saplāksnis	mm			20			21	4
	W/m·K			0,17			0,17	0,17
Tvaika barjera							ir	
Frēzbaļķu imitācija	mm				40			
	W/m·K				0,13			
Tvaika barjera					ir			
Keramikas bloki	mm	440				510		
	W/m·K	0,175				0,085		
Mitrumizturīgs grīdas saplāksnis <i>labojums $\Delta\lambda$ (neventilēts)</i>	mm		375					
	W/m·K		0,072					
	W/m·K		0,02					
<i>koka karkass + minerālvates siltumizolācija (neventilēts)</i> $\lambda = d/R = d \cdot U$	mm			200	200		200	200
	W/m·K			0,041	0,044		0,049	0,044
Frēzbaļķis	mm				200			
	W/m·K				0,13			
Izlīdzinošais apmetums	mm	15	15			15		
	W/m·K	0,7	0,7			0,7		
<i>koka karkass + minerālvates siltumizolācija (ventilēts)</i> $\lambda = d/R = d \cdot U$	mm	125	50					
	W/m·K	0,043	0,039					
Minerālvates siltumizolācija <i>labojums $\Delta\lambda$ (ventilēts)</i>	mm	30	30					
	W/m·K	0,033	0,033					
	W/m·K	0,001	0,001					
Pretvēja plēve							ir	
Saplāksnis	mm			20			21	12
	W/m·K			0,17			0,17	0,17
<i>Robežslāņu termiskā pretestība</i>	(m ² K)/W	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,21	0,17
U vērtība ar robežslāņiem	W/(m²K)	0,151	0,153	0,154	0,150	0,159	0,173	0,160