



# BŪVKONSTRUKCIJU ENERGOEFEKTIVITĀTE UN ILGTSPĒJA LATVIJAS KLIMATĀ

pētījumu rezultātu apkopojums



2011-2013

## Projekts

Nr. 2011/0003/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/041

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



EIROPAS REĢIONĀLĀS  
ATTĪSTĪBAS FONDS



EIROPAS SAVIENĪBA

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



EIROPAS REĢIONĀLĀS  
ATTĪSTĪBAS FONDS



EIROPAS SAVIENĪBA

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

# BŪVKONSTRUKCIJU ENERGOEFEKTĪVITĀTE UN ILGTSPĒJA LATVIJAS KLIMATĀ

Pētījumu rezultātu apkopojums

A. Jakoviča redakcijā

Rīga, 2013

UDK 69(474.3):551.5

# **BŪVKONSTRUKCIJU ENERGOEFEKTIVITĀTE UN ILGTSPĒJA LATVIJAS KLIMATĀ**

Pētījumu rezultātu apkopojums

ERAF līdzfinansēts pētnieciskais projekts „ES energoefektivitātes un optimāla telpu mikroklimata prasībām atbilstoša kompozīta ēkas ārsienas konstruktīvā risinājuma no vietējām izejvielām izstrāde, izmantojot multifizikālās modelēšanas metodes“ (2011 – 2013)

Nr. 2011/0003/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/041

Zinātniskais redaktors: Dr. fiz. Andris Jakovičs

Autori: Andris Jakovičs, Staņislavs Gendelis, Ansis Ozoliņš, Jānis Ratnieks, Jevgeņijs Džeriņš, Jānis Kļaviņš, Sergejs Čertoks

Tehniskā redaktore: Liene Bandeniece

Kontaktadrese:

Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija

Latvijas Universitāte

Zeļļu iela 8,

Rīga, LV-1002

Tel.: 67033780

Fax: 67033781

E-mails: [Andris.Jakovics@lu.lv](mailto:Andris.Jakovics@lu.lv)

[www.modlab.lv](http://www.modlab.lv); [www.eem.lv](http://www.eem.lv); [www.heatmod.lv](http://www.heatmod.lv)

ISBN 978-9934-517-15-0

© Latvijas Universitāte, Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija, 2013

© Autori, publikācijas saturs, 2013

© Staņislavs Gendelis, mākslinieciskais noformējums, 2013

## Priekšvārds

Pētījumiem ēku siltumfizikā Latvijas Universitātes Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorijā nu jau ir gandrīz 20 gadu vēsture. Radikāli pieaugot energoņesēju izmaksām pēc neatkarīgas Latvijas valsts atjaunošanas, siltuma zudumi no ēkām un lieli apkures rēķini kļuva par aktuālu problēmu ļoti daudziem. Vienlaicīgi laboratorijas, kas dibināta 1994.g., pētnieki meklēja iespējas pielietot savas zināšanas nepārtrauktas vides procesu – siltuma un vielas apmaiņas izpētē ne tikai sniedzot zinātņu ietilpīgus pakalpojumus un veicot pētījumus pasūtītājiem ārzemēs (pirms 1990. g. pasūtītājiem Maskavā, Kijevā u.c. PSRS, pēc tam – Vācijā un Zviedrijā), bet risinot arī Latvijā aktuālas problēmas.

Viens perspektīvs virziens tika atrasts, veidojot sadarbību ar Latvijas ostām un AS “Latvenergo” - tas saistīts ar pārnese procesu pazemes un virszemes ūdeņos (upēs, jūrā) matemātisko modelēšanu. Šos pētījumus šodien laboratorijā ļoti sekmīgi vada un attīsta Dr. fiz. Uldis Bethers, paplašinot pētījumu jomu gan ar atmosfēras procesu, gan klimata izmaiņu modelēšanu.

Pētījumu ievirzi būvju siltumfizikā sekmēja nepieciešamība attīstīt mūsdienīgas mērījumu un aprēķinu metodes ēku norobežojošo konstrukciju inženierfizikā un tuvināties Eiropas Savienības pieejām un nostādņēm ēku energoefektivitātes jomā. Būtisks impulss šajā virzienā bija 90-to gadu otrajā pusē realizētais, Vācijas finansētais sadarbības projekts ar Hannoveres universitātes Elektrotermijas institūtu (tagad Elektrotehnoloģiju institūts), kas deva iespēju Latvijā uzsākt ēku hermetizācijas un termogrāfiskos, kā arī būvkonstrukciju siltuma caurlaidības mērījumus. Laboratorijā tika izstrādāta arī Latvijā pirmā, uz Vācijas DIN standartiem bāzētā ēku energopatēriņa aprēķina metodika un programma – Latvijā tajā laikā vēl normatīvu šajā jomā nebija. Līdztekus tam laboratorijā saviem spēkiem tika izveidota termiskā kamera standartizētai gatavo būvkonstrukciju siltuma caurlaidības testēšanai un datorizēta karstās plātes iekārta standartizētiem materiālu siltuma vadītspējas mērījumiem – šīs iekārtas sekmīgi tiek izmantotas joprojām, tai skaitā arī mācību procesā Fizikas nodaļā.

Līdztekus pētījumiem būvju siltumfizikā un praktiskiem pakalpojumiem šajā jomā ne mazāk svarīgi bija veidot arī sabiedrības izpratni par siltumfizikālajiem procesiem, metodēm siltuma zudumu noteikšanai, to prognozēšanai un arī pareiziem paņēmieniem zudumu ilgtspējīgai samazināšanai. Šim mērķim kalpoja daudzi organizētie praktiskie semināri, populārzinātniskās publikācijas Latvijas presē un līdzdalība starptautiskās izstādēs.

Būtisku intereses pieaugumu par ēku energopatēriņa aprēķiniem sekmēja 2001. gadā pieņemtais Latvijas Būvnormatīvs LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika”, kas reglamentēja ēku siltuma zudumu koeficientu un noteica normatīvās un maksimālās pieļaujamās siltuma caurlaidības vērtības dažādām būvkonstrukcijām. Nākamie soļi šajā jomā bija saistīti ar Latvijas iestāšanos Eiropas Savienībā un atbilstošu Latvijas normatīvo dokumentu harmonizāciju ar Eiropas Standartiem (EN) – šis process turpinās. Pagrieziena punkts ēku energoefektivitātes analīzē bija 2009. gadā pieņemtais energoefektivitātes likums un ar to saistītie normatīvie regulējumi, it īpaši MK noteikumi „Ēku energoefektivitātes aprēķina metode”, kuri pilnveidoti 2013.g., lai nodrošinātu to atbilstību Eiropas Parlamenta jaunajai direktīvai 2010/31/ES

„Par ēku energoefektivitāti”, kas nosaka virzību uz gandrīz nulles enerģijas ēku būvi sākot no 2021.g.

Pētījumu intensifikāciju šajā jomā laboratorijā pēdējos gados nodrošināja iekļaušanās ERAF līdzfinansētā Valsts nozīmes pētnieciska centra Nr. 1 „Enerģijas un vides resursu ieguves un ilgtspējīgas izmantošanas tehnoloģiju valsts nozīmes pētniecības centrs” sastāvā, dodot iespēju iegādāties modernu aparāturu mērījumiem un daudzveidīgam termoklimatisko parametru monitoringam - tai skaitā pirmo reizi Latvijā sekmīgi tiek lietota iekārta faktiskās gaisa apmaiņas mērījumiem, izmantojot iezīmētās gāzes metodes. Laboratorijā uzsākta profesionāli veidotas termiskās kameras būvkonstrukciju siltuma caurlaidības noteikšanai un stenda stikloto konstrukciju solārā starojuma caurlaidības noteikšanai montāža, ko plānots pabeigt 2014.g. aprīlī. Savukārt pētījumu saturisko kodolu laboratorijā veidoja laika posma no 2011. – 2013.g. realizētais ERAF līdzfinansētais projekts „ES energoefektivitātes un optimāla telpu mikroklimata prasībām atbilstoša kompozīta ēkas ārsienas konstruktīvā risinājuma no vietējām izejvielām izstrāde, izmantojot multifizikālās modelēšanas metodes”, kura svarīgākie rezultāti atspoguļoti šajā izdevumā. Pētījumos tika kombinēta matemātiskas modelēšanas pieeja ar konstrukciju pārbaudēm Latvijas klimatā, izmantojot īpaši šim mērķim izbūvētus testēšanas standus.

Īpašs prieks par to, ka ir izdevies nodrošināt šo pētījumu turpinājumu arī nākamajiem 2 gadiem, jo ar šī gada novembri Latvijas Universitātē sadarbībā ar Rīgas tehnisko universitāti ir uzsākta jauna ESF līdzfinansēta projekta „Latvijas klimatam un kvalitatīvas dzīves vides nodrošināšanai piemērotu ilgtspējīgu un sistemātisku risinājumu izstrāde gandrīz nulles patēriņa ēkām” realizācija, kas turpina un padziļina iepriekšējā pētījuma tematiku – ja esošais ERAF projekts galvenokārt ir vērsts uz energoefektīvu un ilgtspējīgu būvkonstruktīvo risinājumu izstrādi un pārbaudi Latvijas klimatā, vienlaicīgi nodrošinot cilvēkam piemērotus termoklimatiskos apstākļus telpās, tad jaunuzsāktais ESF projekts ir orientēts uz sistēmisku risinājumu izstrādi gandrīz nulles patēriņa ēkām, kuras Eiropas būvniecības praksē jāievieš līdz 2020. g. Te jāmeklē iespējas izmantot jaunus materiālus, ražot enerģiju ēkā vai tās tuvumā no atjaunojamiem resursiem (gaisa, ūdens un zemes siltuma, solārā starojuma un vēja), maksimāli izmantot tā saucamās pasīvās metodes dzesēšanai un sildīšanai, kā arī rūpēties par cilvēkam un būvkonstrukciju ilgtspējai labvēlīgu vidi, analizējot ne tikai mitruma, bet arī ķīmisko un mikrobioloģisko faktoru ilgtermiņa iedarbību.

Liels ieguvums ir šo pētījumu gaitā izveidojusies sadarbība ar daudziem Latvijas būvindustrijas uzņēmumiem, jo šādas praktiski orientētas izstrādnes grūti iedomājamas bez intensīvas nozares profesionāļu un zinātnieku mijiedarbības.

Atskatoties un apkopojot paveikto, tādējādi veidojam drošu pamatu jauniem izaicinājumiem enerģijas taupīšanas un cilvēku dzīves vides kvalitātes uzlabošanas pētījumu jomā. Esmu pārliecināts, ka kopā mums izdosies ieceres realizēt!

Dr. fiz. Andris Jakovičs

# Satura rādītājs

1. Ievads	6
1.1 Kompleksās pieejas metodoloģija	6
1.2 Pētījuma mērķis un pamatnostādnes	10
1.3 Pētnieciskās pieejas raksturojums	12
1.4 Testējamo konstrukciju raksturojums	15
1.5 Rezultātu publicitāte un izmantošana	18
1.6 Pētījumu komanda un sadarbības partneri	18
2. Mērījumu metodes	20
2.1. Mērmetodes norobežojošo konstrukciju siltumtehniskā stāvokļa noteikšanai	20
2.1.1. Termogrāfiskā diagnostika	21
2.1.1.1. Termogrāfijas metode	22
2.1.1.2. Raksturīgie piemēri	26
2.1.2. Siltuma vadīšanas zudumi	33
2.1.2.1. Mērījumi stacionāros apstākļos ar karstās plāksnes metodi	40
2.1.2.1.1. Metodes apraksts	41
2.1.2.1.2. Raksturīgie mērījumu piemēri	46
2.1.2.1.3. Karstās plāksnes iekārtas izmantošana materiālu siltuma ietilpības noteikšanai	50
2.1.2.2. Siltuma caurlaidības mērījumi termiskajā kamerā	56
2.1.2.2.1. Diferenciālā metode	68
2.1.2.2.2. Integrālā metode	71
2.1.2.2.3. Raksturīgie mērījumu piemēri	73
2.1.2.3. Mērījumi nestacionāros apstākļos ekspluatācijā esošās ēkās	78
2.1.2.3.1. Metodes apraksts	79
2.1.2.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri	87
2.1.2.4. Secinājumi	96
2.1.3. Konvekcijas siltuma zudumi	97
2.1.3.1. Ēkas gaisa apmaiņas mērījumi	100
2.1.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri	105
2.1.3.3. Secinājumi	109
2.1.4. Iezīmētās gāzes mērījumi	110
2.1.4.1. Ventilācija un infiltrācija	110
2.1.4.2. Mērījumi ar iezīmētās gāzes metodi	111
2.1.4.3. Gaisa apmaiņas raksturlielumi mērmetodes izvēle	113
2.1.4.4. Īstermiņa gaisa apmaiņas mērījumi, izmantojot koncentrācijas samazināšanas metodi	114
2.1.4.5. Ilgtermiņa gaisa apmaiņas mērījumi vienā zonā, izmantojot konstantas koncentrācijas metodi	115
2.1.4.6. Norobežots mērījums gaisa apmaiņas noteikšanai, izmantojot konstantas koncentrācijas metodi	117
2.1.4.7. Gaisa apmaiņas mērījumi pie mainīgiem gaisa apstākļiem	118
2.1.4.8. Secinājumi	118
2.1.5. Saules enerģijas caurlaidība	119
2.2. Secinājumi	127
3. Materiālu un būvkonstrukciju raksturlielumi	129
3.1. Materiālu siltuma vadītspēja	129
3.2. Gatavu būvkonstrukciju siltuma caurlaidība	132
3.3. Ārējo norobežojošo konstrukciju ar lielformāta elementiem konstruktīvo	

risinājumu raksturlielumi	135
3.4. Eksperimentos izmantoto keramikas mūra elementu apraksts	142
3.5. Optimizēti lielformāta mūra elementi	143
4. Būvkonstruktīvie risinājumi pārbaudei Latvijas klimatā	147
4.1. Optimizētas norobežojošās konstrukcijas	147
4.2. Konstruktīvie risinājumi	149
4.2.1. Dobie keramiskie bloki ar akmens vates siltumizolācijas slāni ārpusē (CER)	149
4.2.2. Gāzbetona bloki ar minerālvates siltumizolācijas slāni ārpusē (AER)	149
4.2.3. Moduļveida saplākšņa paneļi ar elastīgās akmens vates pildījumu (PLY)	149
4.2.4. Frēzbalņi ar akmens vates siltumizolācijas slāni iekšpusē un koka iekšējo apdari (LOG)	149
4.2.5. Dobie keramiskie bloki ar speciālu siltumizolācijas granulu pildījumu (EXP)	150
5. Testēšanas stendu izveide un pārbaudes	158
5.1. Grīda	158
5.2. Griestu pārsegums	158
5.3. Piecas ārsienu konstrukcijas	159
5.4. Norobežojošo konstrukciju standartizētas pārbaudes ekspluatācijas apstākļos Latvijas klimatā	164
5.4.1. Termogrāfiskās pārbaudes dažādās stendu gatavības stadijās	164
5.4.2. Stendu hermetizācijas pārbaudes	173
5.4.3. Faktiskās gaisa apmaiņas mērījumi	175
5.4.4. Norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības noteikšana	176
6. Energoefektivitātes un fizikālo lauku matemātiskā modelēšana	180
6.1. Energoapatēriņa aprēķina pieeju un programmatūras iespēju vispārīgs raksturojums	180
6.2. Īss energopatēriņa un energoefektivitātes aprēķinu programmu raksturojums	184
6.2.1. EFA 2	184
6.2.2. HeatMod6	185
6.2.3. PHPP 7.1.	186
6.2.4. Piemēri	187
6.2.5. Energoapatēriņa aprēķina ar <i>HeatMod6</i> , izmantojot mēnešu metodi, raksturojums	189
6.3. Ēku energoefektivitātes aprēķina programmas <i>HeatMod6</i> apraksts	190
6.3.1. Ievads	190
6.3.2. Pamatinformācija	190
6.3.3. Darbs ar projektiem	193
6.3.4. Pamatdati	193
6.3.5. Projekta dati	195
6.3.6. Izmērītie (projektējamie) dati	202
6.3.7. Aprēķinātie dati	203
6.3.8. Modeļa validēšana	203
6.3.9. Izdrukas	205
6.4. Eksperimentālo stendu energopatēriņa modelēšana	207
6.4.1. Norobežojošo konstrukciju un apstākļu īss apraksts	207
6.4.2. Dinamisko efektu ietekme uz energopatēriņu apkurei	208
6.4.3. Būvkonstrukciju termiskās inerces ietekme uz telpu pārkarsumu vasaras periodā	211

6.5. Mitruma dinamika slāņainās būvkonstrukcijās modelēšana Latvijas klimatiskajos apstākļos	213
6.5.1. Klimatisko apstākļu un apstākļu telpās uzdošana	213
6.5.2. Temperatūras un relatīvā mitruma sadalījumu izmaiņas stendu būvkonstrukcijās gada ciklā	214
6.5.3. Sēnīšu augšanas risku būvkonstrukcijās analīze	224
6.5.4. Mitruma dinamikas skaitlisko modeļu verifikācija	227
6.5.5. Dažādo stendu pārkaršanas risku analīze	229
6.5.6. Kompozītu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības modelēšana	232
6.6. Termiskā komforta apstākļu modelēšana telpās	233
6.6.1. Matemātiskā modeļa pamatnostādnes	233
6.6.2. Stacionāra atrisinājuma iegūšana	235
6.6.3. Stacionāro aprēķinu rezultāti dažādām gaisa apmaiņas intensitātēm	237
6.6.4. Stacionāro aprēķinu rezultāti apkures periodā	242
6.6.5. Stacionāro aprēķinu rezultāti dzesēšanas periodā	246
6.6.6. Nestacionāro aprēķinu rezultāti	248
7. Monitoringa rezultāti	252
7.1. Monitoringa periodu raksturojums	252
7.2. Būvkonstrukciju siltuma caurlaidība un mitrums	254
7.3. Telpu pārkaršana un dzesēšana vasaras periodā	261
7.4. Energoapatēriņš telpu apsildei rudenī un ziemā	266
7.5. Gaisa plūsmu dinamika telpā, izmantojot gaiss – gaiss siltumsūkni	271
8. Ilgtspēja un pilnā dzīves cikla analīze	277
8.1. Ilgtspējas jēdziens	277
8.2. Būvizstrādājumu tirdzniecības regula un būtiskās prasības būvēm	278
8.3. Situācija celtniecības ilgtspējīgas kvalitātes novērtēšanā Latvijā salīdzinājumā ar Vāciju un Lielbritāniju	281
8.4. Ilgtspējas analīzes argumenti - energo efektivitāte un telpu mikroklimats	285
8.5. Stendu ilgtspējas un dzīves cikla ekonomiskās analīzes piemērs	287
9. Noslēguma piezīmes	295
9.1. Vai masivitāte ļaus ietaupīt?	295
9.2. Latvijā nav mūžamežu!	295
9.3. Sliktais ūdens	296
9.4. Cik maksāsim un ko elposim...	296
9.5. Kurp iesim?	298
10. Literatūra	300
11. Publikācijas	305
12. Pielikums 1.	311
13. Pielikums 2.	315
14. Pielikums 3.	319
15. Pielikums 4.	323

# 1. Ievads

Viens no būtiskākajiem enerģijas patērētājiem Eiropas Savienībā un Latvijā ir ēkas. Šī sektora daļa sastāda ap 40% no kopējā enerģijas patēriņa (EU, 2010), lielāka daļa no tā tiek izmantota apkures vajadzībām. Pateicoties mūsdienīgu būvmateriālu un sistēmisku risinājumu lietošanai, var panākt, ka jauncelāmajām ēkām siltuma zudumi sastāda mazāk nekā 50% no siltuma patēriņ pirms 50 gadiem celtajās ēkās.

Pēdējās desmitgadēs Latvijā radikāli ir augusi nepieciešamība pēc iespējas pilnīgāk un objektīvāk novērtēt ēku siltuma zudumus gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi. Optimizējot siltuma apmaiņas procesus un tādējādi samazinot zudumus no ēkām, var panākt ne tikai enerģijas patēriņa (t.sk. arī CO<sub>2</sub> izmešu daudzuma) un izdevumu ekonomiju, bet arī nodrošināt vai pat uzlabot termiskā komforta apstākļus telpās. Šo šķietami pretrunīgo aspektu sabalansēšanas aktualitāte pieaug vēl jo ātrāk, plaši izplatoties zema energopatēriņa ēku koncepcijai un Latvijā ieviešot Eiropas Parlamenta jauno Direktīvu 2010/31/ES „Par ēku energoefektivitāti”, kas nosaka tā saucamo gandrīz nulles enerģijas ēku būvniecību. Komforta apstākļi šādās ēkās (piem., samazinātas gaisa apmaiņas intensitātes dēļ) var būtiski atšķirties un pat pasliktināties, bet pagaidām Latvijas klimatā ir relatīvi maz izpētīti.

Pēdējos gados celtās ēkas pārsvarā atbilst Latvijas Būvnormatīvam „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” (LBN 002-01, 2001) nosacījumiem, taču apsekojot virkni agrāk celto ēku pirms to renovācijas un arī pēc tās, kā arī atsevišķas jaunceltnes (it īpaši nekustāmo īpašumu „buma” laikā), konstatēti būtiski defekti un nepilnības, ko varēja novērst jau projektēšanas un būvniecības posmos, veicot rūpīgāku analīzi un atbilstošus inženieraprēķinus, modelējot fizikālos procesus un kontrolējot darbu izpildes kvalitāti un atbilstību būvtehnoloģijām.

Veicot dažādu ēkas būvkonstrukciju stāvokli raksturojošo parametru mērījumus, pirms renovācijas darbu uzsākšanas un pēc to pabeigšanas, var ne tikai gūt priekšstatu par to būtisko raksturlielumu (piem., siltuma caurlaidības, gaisa apmaiņas koeficienta) izmaiņām, bet arī uz ēkas siltuma bilances matemātiskā modeļa bāzes noteikt kopējos siltuma zudumus un to sadalījuma pa zudumu un būvelementu veidiem izmaiņas dažādos laika periodos. Veicot modelēšanu atbilstoši dažādiem iespējamiem ēkas izbūves vai pārbūves projektu variantiem, iespējams izvēlēties piemērotāko risinājumu atkarībā no izvirzītajām prioritātēm vai kompleksiem kritērijiem, kas ietver apkures un dzesēšanas siltuma daudzuma samazināšanu, termiskā komforta nosacījumu uzlabošanu, ekonomisko izdevīgumu u.c. parametrus.

## 1.1. Kompleksās pieejas metodoloģija

Lai detalizēti analizētu ēku enerģijas patēriņa samazināšanas iespējas, nepieciešams lietot kompleksu pieeju, kurā ietilpst gan kvalitatīvais novērtējums un kvantitatīvie siltuma apmaiņu raksturojošo fizikālo parametru mērījumi, gan arī ēku siltuma bilances (integrālie) matemātiskie modeļi un atsevišķu telpu termiskā komforta apstākļu diferenciālie modeļi. Šāda kompleksa pieeja un tai atbilstoša metodika LU Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorijā (VTPMML) tika izveidota balstoties uz daudzu veikto eksperimentālo mērījumu un modeļaprēķinu datiem, kas atspoguļoti noslēgumā pievienotajā publikāciju sarakstā. Izveidotās

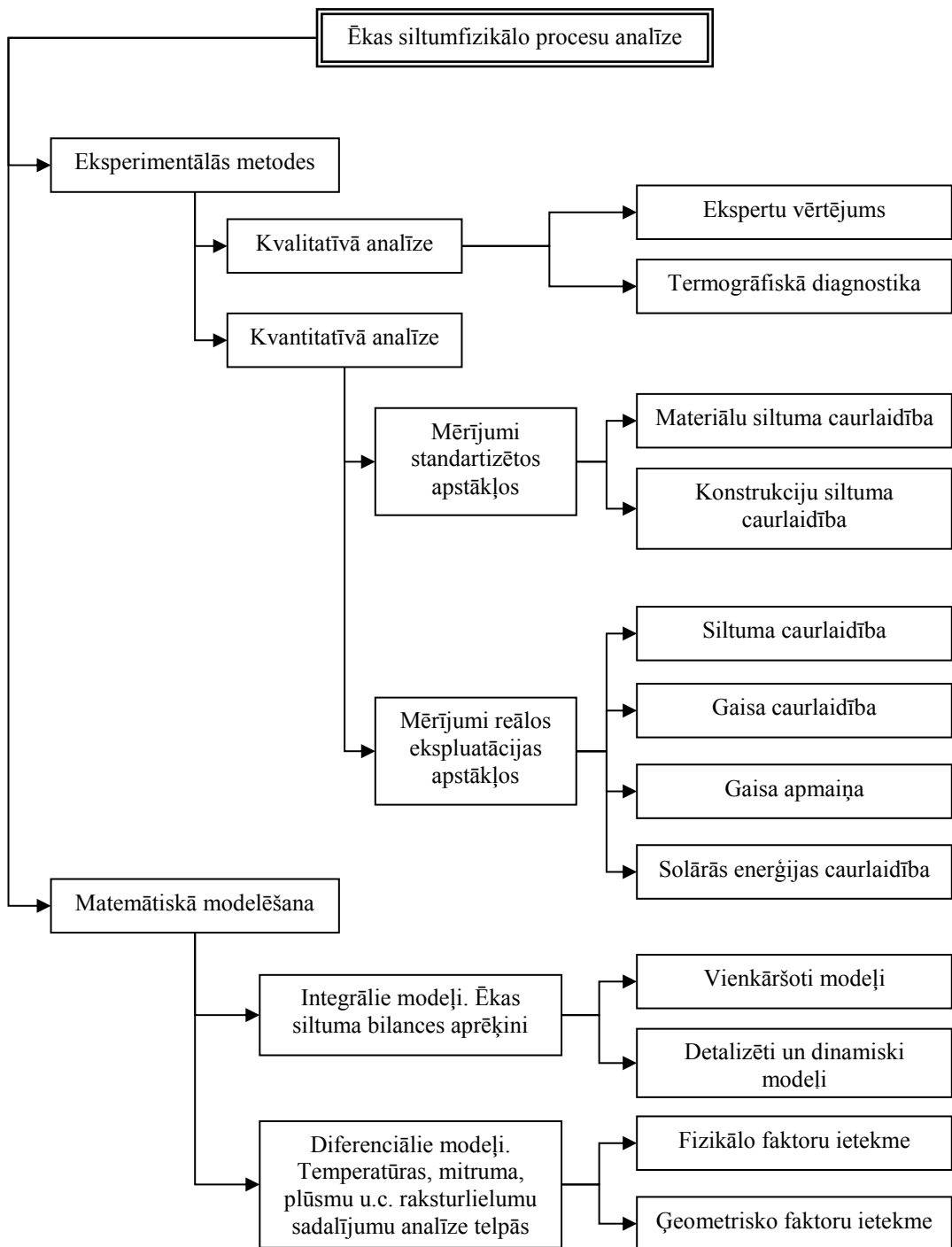
metodikas daudzveidīgie lietojumi un veiktās analīzes rezultāti gan dažādām ēkām, gan LU Botāniskajā dārzā izveidotajiem dažādo būvkonstruktīvo risinājumu testēšanas stendiem Latvijas klimatā tiek detalizēti izklāstīti šajā publikācijā.

Izstrādātās pieejas ietvaros ēkas energoefektivitātes stāvokļa analīzei lietderīgi izmantot shēmu, kas parādīta attēlā 1.1. Saskaņā ar to, novērtējot ēkas energoefektivitāti, ir nepieciešams izmantot gan kvalitatīvās un kvantitatīvās eksperimentālās metodes, gan arī matemātiskās modelēšanas un skaitļošanas metodes.

Sākotnējo informāciju par ēkas stāvokli eksperts var iegūt jau vizuālās apskates laikā, bez papildus eksperimentiem atklājot būtiskus siltuma izolācijas defektus un gaisa apmaiņas problēmas. Precīzāku informāciju par ēkas būvkonstrukciju un sistēmu stāvokli sniedz virsmu temperatūras noteikšana no attāluma, t.s. termogrāfija (Vollmer *et.al.*, 2010), kas ļauj atklāt arī slēptus defektus, piem., aukstuma tiltus un gaisa noplūdes zonas. Ar tās palīdzību var identificēt arī būvelementus ar atšķirīgu uzbūvi vai mitruma saturu, kuriem nepieciešama detalizētāka izpēte.

Nākamajā solī ēkas siltuma zudumu analīzei jālieto kvantitatīvie mērījumi – visu veidu enerģopātēriņa, siltuma vadīšanas, konvekcijas un starojuma siltuma pārnese procesus raksturojošo lielumu noteikšana. Tā kā mērījumiem reālos ēku ekspluatācijas apstākļos ir noteiktas īpatnības un ierobežojumi un kopumā tie ir komplicēti, tad plaši tiek lietoti arī standartizēti mērījumi stacionāros laboratorijas apstākļos (LVS ISO 8302, 2001; LVS EN ISO 8990, 2007). Ar šādu standartizētu mērījumu palīdzību var noteikt būvkonstrukciju siltuma caurlaidību raksturojošos parametrus un to atbilstību gan normatīvajiem dokumentiem (piem., LBN 002-01, 2001), gan to projektētajām un aprēķinu vērtībām. Savukārt mērījumus reālos ēku ekspluatācijas apstākļos, kam parasti ir izteikti nestacionārs raksturs, Latvijā 90-jos gados uzsāka LU VTPMML, jo pirms tam tie Latvijā praktiski netika lietoti un to iespējas bija maz pētītas.

Situācijās, kad ēkas celtniecībā tiek pielietoti viena veida būvelementi (piem., logi, durvis, paneļi), var veikt to paraugu īpašību testēšanu laboratorijas jeb standartizētos apstākļos speciālā gatavo būvizstrādājumu siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  noteikšanas iekārtā (DIN EN 674, 2011), t.i., neatkarīgi no klimatiskajiem apstākļiem. Šādos apstākļos ir iespējams veikt standartizētus mērījumus arī homogēniem vai slāņainiem materiāliem ar nelielu biezumu, izmantojot speciālu siltuma vadītspējas noteikšanas iekārtu un atbilstošu metodi (LVS ISO 8302, 2001; LVS EN ISO 8990, 2007; ASTM C 518, 2004). Tādējādi iespējams kontrolēt būvkonstrukciju siltuma caurlaidību raksturojošos parametrus un to atbilstību dažādiem normatīvajiem dokumentiem un standartiem (LBN 002-01, 2001; DIN EN 832, 2003; DIN V 18599, 2007), to atbilstību inženiertehnisko aprēķinu rezultātiem, kā arī noteikt siltuma caurlaidību būvkonstrukcijām ar nezināmu uzbūvi.



Attēls 1.1. Ēkas siltumfizikālo procesu un energoefektivitātes stāvokļa analīzes vispārīgā shēma.

Bez siltuma vadīšanas jeb pārvades zudumiem caur norobežojošām konstrukcijām ir jānosaka arī ar gaisa apmaiņu saistītie jeb tā saucamie konvektīvie siltuma zudumi caur atverēm ēkas ārējā čaulā, kas, atkarībā no ēkas stāvokļa, var būt pat noteicošie gan termiskā komforta, gan energopatēriņa aspektos. To standartizētai mērīšanai izmanto speciālu mēriekārtu *BlowerDoor* (The Energy Conservatory, 2012), kuras darbības pamatā ir spiedienu starpības radīšana starp telpas un āra gaisu. Tiek noteikts iepļūstošā vai izplūstošā gaisa daudzums laika vienībā, kas ir gaisa apmaiņas kvantitatīvs rādītājs pie uzdotās spiedienu starpības un tādējādi ļauj noteikt arī ar gaisa plūsmu pārnesto siltuma daudzumu. Konvektīvos siltuma zudumus raksturojošie lielumi arī noteikti nacionālajos normatīvos un dažādos standartos (LBN 002-01, 2001; ANSI/ASHRAE Standard 62, 2001; LVS EN 13829, 2013).

Kvalitatīvie novērtējumi un iepriekš minēto mērījumu rezultātā iegūtie kvantitatīvie rādītāji veido pamatu ēkas siltuma zudumu struktūras analīzei un apkures/dzesēšanas siltuma patēriņa modelēšanai, kā arī telpu termiskā komforta apstākļu optimizācijai, kas līdz šim parasti netika pētīta kopsakarā ar ēku energopatēriņu. Ēkas enerģijas patēriņa matemātiskais modelis tiek veidots, ņemot vērā visus siltuma apmaiņas veidus un tas var tikt bāzēts vai nu uz stipri vienkāršotiem vidējiem gada (apkures sezonas) vai mēneša aprēķiniem, vai arī veidojot detalizētākus dinamiskus ēkas siltuma apmaiņas modeļus (piem., LVS EN ISO 13790, 2009; DIN V 18599, 2007; SIA 380/1, 2007). Šādi modeļi parāda siltuma zudumu sadalījumu pa to veidiem, būvelementu tipiem, mēnešiem vai īsākiem laika periodiem, kā arī ļauj izvēlēties projekta variantu, kas atbilst kādām konkrētām prasībām un ir realizējams ar iespējami minimāliem ieguldījumiem. Līdztekus detalizētam siltuma bilances aprēķinam atsevišķos gadījumos var tikt lietoti vienkāršotie modeļi, kas dod iespēju ātri novērtēt ēkas atbilstību kādai energoefektivitātes klasei vai vienkāršotu normatīvu prasībām (Poussard *et.al.*, 2003; LBN 002-01, 2001). Piemēram LBN-002-01 nosaka tikai ēkas pārvades siltuma zudumu aprēķinu un to salīdzināšanu ar normatīvo vērtību, turpretim ēku energoefektivitātes aprēķina metode (MK, 2013) nosaka precīzāku aprēķinu, kur nepieciešamā detalizācijas pakāpe ir atkarīga no ēkas energopatēriņa. Balstoties uz to ēka tiek energosertificēta un atkarībā no īpatnēja patēriņa vērtības tai tiek piekārtota noteikta energoefektivitātes klase no A līdz F (MK, 2013).

Svarīga siltumfizikālo procesu analīzes komponente ir termiskā komforta apstākļi – cilvēkam atrodoties telpā, virknei fizikālo parametru ir jābūt noteiktās robežās, lai indivīds nejustu diskomfortu. Šādu faktoru kopu, kas ietver temperatūru, temperatūru starpības, gaisa kustības ātrumu, mitrumu u.c. lielumus, nosaka standarti (LVS EN ISO 7730, 2006; ASHRAE, 2004). Minētie lielumi parasti tiek kontrolēti eksperimentāli vai noteikti, izmantojot empīriskas sakarības, bet to atkarība no dažādiem telpas fizikālajiem un ģeometriskajiem parametriem Latvijā praktiski līdz šim bija maz pētīta. Lietojot matemātisko modelēšanu, var veikt aprēķinus atsevišķām telpām, iegūstot gaisa plūsmu, temperatūras un mitruma sadalījumus to iekšienē, un skaitliski noteikt arī citus parametrus (piem., siltuma atdevi no virsmām), kas ietekmē siltuma zudumus no telpas. Tādā veidā ir iespējams sabalansēt dažādus siltumfizikālos un ģeometriskos faktorus, kas ietekmē gan termiskā komforta apstākļus telpā, gan siltuma apmaiņu caur būvkonstrukcijām un atverēm tajās. Piemēram, gaisa plūsmas telpā un tās intensitātes ir būtiski atkarīgas gan no apkures sistēmas elementu izvietojuma tajā, gan arī no dažādo norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām

īpašībām. Noslēgtā telpā gaisa cirkulāciju galvenokārt nosaka virsmu temperatūras, kas savukārt ir atkarīgas no sildvirsmām pievadītās jaudas un konstrukciju siltuma caurlaidības. Termiskie apstākļi šajā gadījumā var būt kardināli atšķirīgi no tādas pašas telpas, kurai ir atveres uz blakus esošām telpām vai ārū. Gadījumā, ja starp atverēm telpas norobežojošajās konstrukcijas pastāv arī spiedienu starpība, kā tas reālos apstākļos parasti ir, tad situācija atkal var būtiski atšķirties no abām iepriekšējām.

## 1.2. Pētījuma mērķis un pamatnostādnes

Šī pētījuma konkrētais saturs ir saistīts ar galvenokārt no vietējām izejvielām veidotu kompozītu būvkonstrukciju un, atjaunojamos resursus izmantojošu, telpu mikroklimata uzturēšanas sistēmu energoefektivitātes un ilgtspējas izpēti Latvijas klimatiskajos apstākļos.

Pētījuma mērķis ir, veicot kompleksu ilgtermiņa monitoringu 5 testēšanas standos, kuru iekšpusē tiek nodrošināti vienādi apkures/dzesēšanas un ventilācijas apstākļi, analizēt faktisko termisko komfortu un energopatēriņu, praktiski pārbaudot dažādus izstrādātos atšķirīgos ārējo norobežojošo konstrukciju risinājumus un to piemērotību Latvijas klimatam. Analizējot iegūtos datus tiks novērtēta dažādu klimatisko faktoru ietekme (gan īstermiņā, gan vairāku gadu periodā) uz atšķirīgo būvkonstrukciju stāvokli, siltuma zudumiem caur tām un tiks izvērtēta siltumsūkņa efektivitāte apkures, dzesēšanas un ventilācijas nodrošināšanai, samazinot fosilo enerģijas avotu patēriņu.

Šāda, Latvijā pirmo reizi veiktā pētījuma zinātnisko novitāti nosaka iespējas izvērtēt faktisko energoefektivitāti mainīgos, Latvijai tipiskos meteoroloģiskajos apstākļos, salīdzinot to ar vērtībām, kas iegūtas aprēķinos, izmantojot dažādus modeļtuvinājumus, tai skaitā atbilstoši Latvijā spēkā esošajai energoefektivitātes aprēķina metodei (MK, 2013), kā arī detalizētāk ievērojot EN standartu nosacījumus (LVS EN ISO 13790, 2009). Liela praktiska nozīme pētījuma rezultātiem ir būvkonstruktīvo risinājumu pilnveidošanai, jaunu energoefektīvu konstrukciju izstrādāšanai un popularizēšanai, kā arī rekomendāciju izstrādei Latvijas normatīvo aktu pilnveidošanai un harmonizēšanai Eiropas Padomes Direktīvu 2010/31/ES par ēku energoefektivitāti.

Šī Direktīva nosaka pāreju uz gandrīz nulles patēriņa ēku būvniecību līdz 2020.g. un atjaunojamo energoresursu, kas saražoti pašā ēkā vai tiešā tās tuvumā, izmantošanas īpatsvara būtisku palielināšanu. Ieviešot šo Direktīvu Latvijas normatīvajos dokumentos vēl jāprecizē izpratne par nosacījumiem šādām ēkām, tomēr ir skaidrs, ka šo uzstādījumu nevar sasniegt tikai palielinot norobežojošo konstrukciju siltuma pretestību (siltumizolācijas biežumu) un nemeklējot jaunus risinājumus ēku tehniskajām sistēmām, t.sk., ventilācijai, apkurei un dzesēšanai. Maza energopatēriņa ēkās ( $\leq 50 \text{ kWh/m}^2$ ) būtiski pieaug:

- būvkonstrukciju siltuma tiltu,
- telpiskās orientācijas un noēnojuma,
- solārā starojuma,
- apkures, dzesēšanas un ventilācijas automatiskās regulēšanas,
- būvkonstrukciju mitruma stāvokļa,
- ar būvkonstrukciju termisko inerci saistīto pārejas procesu
- un citu laikā mainīgu faktoru loma.

Ir nepieciešama atjaunojamo resursu izmantošanas iekārtu (t. sk. siltumsūkņu, saules paneļu, u.c.) elastīga integrēšana ēku apkures/dzesēšanas un ventilācijas sistēmās. No otras puses – energoefektivitāte nedrīkst tikt sasniegta pasliktinot cilvēku dzīves kvalitāti telpās, t. sk. telpās ir jānodrošina A kategorijas termiskā komforta apstākļi.

Faktiskais energopatēriņš efektīvās ēkās var atšķirties no atbilstoši normatīvajiem dokumentiem prognozētā un energoefektivitātes sertifikātā uzdotā, ja vienkāršotā aprēķinā nepietiekami tiek ievērtēti iepriekš minētie specifiskie faktori un Latvijas faktisko klimatisko apstākļu ietekme - Latvijā līdz šim nebija veikti kompleksi dažādu būvkonstrukciju energoefektivitātes un ilgtspējas pētījumi vienādos ekspluatācijas apstākļos vairāku gadu ilgā laika periodā.

Tādējādi šajā pētījumā sadarbībā ar būvniecības nozares partneriem tiek praktiski pārbaudīti dažādi izstrādātie ārējo norobežojošo konstrukciju risinājumi, kas galvenokārt veidoti no vietējām izejvielām (keramiskie bloki, gāzbetons, koks, finieris, fibrolīts, kokskaidu vate u.c.), bet iekļauj arī tādas ilgtermiņā pārbaudītus siltuma izolācijas materiālus kā elastīgā akmens vate u.c. Neraugoties uz vienādu testēšanas standarta projektēto energopatēriņu sagaidāms, ka, ievērojot

- konstrukciju siltuma tiltus,
- būvkonstrukciju mitruma izmaiņas,
- termiskās inerces efektus,
- solārās enerģijas absorbciju,
- atšķirīgo konstrukcijas īpatnības

energoefektivitātes atšķirsies gan sezonāli, gan pārejas periodā (gada laikā pēc standarta izbūves), gan arī ilgtermiņā – turpmākās ekspluatācijas gadu laikā.

Energoopatēriņa uzskaitē, temperatūru, mitruma, gaisa kustības ātrumu un citu būvfizikālo raksturlielumu monitorings gan stenda iekšpusē, gan būvkonstrukcijās, šo datu uzkrāšana un analīze veido pētījuma „mugurkaulu”. Šāda veida salīdzinoši ilgtermiņa pētījumi dažādām būvkonstrukcijām Latvijas klimatiskajos apstākļos līdz šim nav veikti – šādā aspektā pētījums ir unikāls.

Būvkonstrukciju siltuma caurlaidības un siltuma zudumu caur tām aprēķinam tiek izmantotas ražotāju deklarētās siltuma vadītspējas vērtības, ievērojot noteiktos labojuma koeficientus, vai arī tiek izmantoti standartizētu laboratorijas mērījumu rezultāti stacionāros apstākļos (piem., termiskajā kamerā vai ar karstās plātes iekārtu). Reālos ēku ekspluatācijas apstākļos, it īpaši, mainoties āra gaisa mitrumam, svārstoties temperatūrām, iedarbojoties saules starojumam un nokrišņiem, būvkonstrukciju faktiskā siltuma caurlaidība atšķiras no aprēķinā vai laboratorijā noteiktajām vērtībām. Bez tam to īpašības mainās laikā - īpaši strauji tās mainās pirmā gada laikā pēc ēkas uzcelšanas, bet arī vēlāk sagaidāmas būtiskas sezonālas svārstības. Var prognozēt, ka dažādiem būvju konstruktīvajiem risinājumiem šīs izmaiņas laikā un atšķirības no projektētajām vērtībām arī būtiski atšķirsies. Veidojot mūsdienīgas daudzslāņainas un kompozītas (piem., dobi keramiskie bloki ar pildvielu vai koka statņu konstrukcija) norobežojošās konstrukcijas no dažādiem materiāliem būtiski var atšķirties arī termiskie tilti, kas veidojas dažādo būvkonstrukciju salaidumu vietās.

Lai nodrošinātu optimālus darba un dzīves apstākļus cilvēkiem, telpās pēc iespējas būtu jāuztur A kategorijas termiskā komforta apstākļi (LVS EN 15251, 2007; LVS EN ISO 7730, 2006; LBN 231-03, 2003), tai skaitā ierobežojot temperatūras un mitruma svārstības ap vēlamo līmeni, novēršot starojuma temperatūras asimetriju, intensīvas gaisa plūsmas u.c. nelabvēlīgus faktorus. Lai to veiktu „ideāli”, ir nepieciešamas lielas kondicionēšanas (apkures un dzesēšanas) sistēmu jaudas rezerves, kas ir neracionāli no sistēmu izmantošanas efektivitātes viedokļa, un ātrdarbīgas regulēšanas iespējas. Šo rezerves jaudu nepieciešamību būtiski var palielināt izvēlētais norobežojošo konstrukciju risinājums, it īpaši caurspīdīgi elementi (logi, stiklotas virsmas) ēkas ārējā čaulā, bet arī maza konstrukciju termiskā inerce, ko nosaka to laukuma masa. Tādējādi, izmantojot dažādus būvkonstruktīvos risinājumus, enerģijas patēriņš A kategorijas termiskā komforta nodrošināšanai var būtiski atšķirties un mainīties ekspluatācijas gaitā Latvijas klimatā pat tad, ja konstrukciju sākotnēji projektētās siltuma caurlaidības vērtības un ekspluatācijā uzstādītās gaisa apmaiņas intensitātes ir vienādas.

Sagaidāms, ka mērķtiecīgi kombinējot dažādus materiālus ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām (siltuma vadītspēju, mitruma un gaisa caurlaidību, siltumietilpību u.c.), variējot to slāņu biezumu un izvietojuma secību vai veidojot no tiem kompozītas struktūras (piem., aizpildot makroskopiskos dobumus keramiskā blokā ar siltuma izolācijas materiālu vai veidojot noteiktu materiāla mikroporozitātes sadalījumu) iepriekš minētās problēmas var sekmīgi atrisināt, t.i., sabalansēt maksimāli iespējamo termiskā komforta nosacījumu izpildi ar ierobežotu energopatēriņu, kas nepārsniedz atbilstoši standartam (LVS EN ISO 13790, 2009) aprēķinātās (prognozētās) vērtības.

### **1.3. Pētnieciskās pieejas raksturojums**

Šī pētījuma realizācijai Latvijā, kur poligona apstākļos pirmo reizi ir izveidoti un ar pilnu monitoringa sistēmu datu savākšanai, uzkrāšanai, pārsūtīšanai un apstrādei aprīkoti 5 testēšanas stendi, nedaudz līdzīgi pētījumi poligona apstākļos pagājušajā desmitgadē tika veikti Tamperes tehniskajā universitātē Somijā (attēls 1.2). Tomēr tur izmantoto stendu būvkonstrukcijas izvēlētas pēc atšķirīgiem apsvērumiem, tie ir mazāki, bez logiem, kas būtiski atvieglo uzdoto apstākļu nodrošināšanu to iekšpusē. Atšķirībā no šajā pētījumā izmantotajiem gaiss – gaiss tipa siltumsūkņiem, kas samazina fosilās enerģijas patēriņu, tur tika izmantota elektriskā apkure. Bez tam šo pētījumu pirm dati nav pieejami padziļinātai mērķtiecīgai analīzei – pieejama tikai zinātniskajās publikācijās atspoguļotā partikulārā un pārskata informācija. Jānorāda, ka šo pētījumu rezultātu nozīmību Latvijā mazina arī tur atšķirīgie klimatiskie apstākļi.

Cits piemērs - Leidas tehniskajā universitātē Spānijā ir izveidots poligons ar daudziem testēšanas stendiem fāzu maiņas materiālu izmantošanas salīdzinošās efektivitātes pētījumiem. Šis uzstādījums būtiski atšķiras no Latvijā veiktā pētījuma, jo tā mērķis ir minimizēt dzesēšanai nepieciešamās jaudas karsta klimata apstākļos, bet arī tajā netiek ievērota tiešās solārās radiācijas caur stiklojumu būtiskā ietekme (attēls 1.2). Arī Perudžas universitātē Itālijā izveidoti 2 testēšanas stendi, kur pētnieciskā nostādne visvairāk līdzinās šim Latvijas pētījumam, tomēr tā nozīmību mazina mazais stendu skaits un no Latvijas ļoti būtiski atšķirīgais klimats (attēls 1.2).



*Attēls. 1.2. Testēšanas stendi Tamperē (Somija), Perudžā (Itālija) un Lleidā (Spānija).*

Tādējādi esošajā pētījumā netika dublēti līdzšinējie pētījumi un veiktā provizoriskā analīze parādīja šāda ilgtermiņa monitoringa lietderību, tā zinātnisko un praktisko vērtību Latvijas apstākļos. Piedāvāto pētniecisko pieeju īsi raksturo sekojošais:

1. Būvkonstruktīvo risinājumu kvalitātes salīdzinošai raksturošanai tiek izmantots komplekss kritērijs, kas sevī ietver:

- faktiskā energopatēriņa reālos ekspluatācijas apstākļos novirzi no atbilstoši standartiem (LVS EN ISO 13790, 2009 u.c. saistītie standarti) aprēķinātā energopatēriņa;
- integrālo novirzi no A kategorijas termiskā komforta apstākļiem telpā atbilstoši izstrādātajai mērķa funkcijai.

2. Izmantojot būtiski atšķirīgus būvmateriālus (gāzbetona bloki, dažādi keramiskie termobloki, koks, fibrolīts, saplāksnis, akmens un kokskaidu vate, u.c. materiāli) ir izveidoti 7 dažādi ārējo norobežojošo konstrukciju (ārsienu un pārsegumu) varianti, kuru aprēķinātā siltuma caurlaidība ir vienāda –  $U=0,15 - 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Prioritāri ir izvēlēti tādi būvmateriāli,

- kas ir izgatavoti no vietējām izejvielām,
- un/vai tiek ražoti Latvijā,
- un/vai tiek Latvijā plaši lietoti būvniecībā,
- vai ir ilgstoši pārbaudīti un atbilst augstām kvalitātes prasībām.

3. Šie atšķirīgie konstruktīvie risinājumi ir izstrādāti sadarbojoties ar atbilstošu būvmateriālu ražotājiem un/vai izplatītājiem, minimizējot iespējamus termiskos tiltus būvkonstrukciju salaidumos un mitruma uzkrāšanās riskus būvkonstrukcijās, tādējādi nodrošinot atzītu mūsdienīgu būvtechnoloģiju ieviešanu mezglu risinājumos, t.sk., iebūvējot logus un durvis.

4. No izvēlētajām būvkonstrukcijām ir izveidoti 5 testēšanas stendi (modeļekas) ar iekšējiem izmēriem  $3 \times 3 \times 3 \text{ m}$ , visiem stendiem ir vienādi logi, durvis, pārsegumi un

apkures/dzesēšanas/ventilācijas sistēmas – gaiss-gaiss tipa siltumsūkņi, kā arī vienāda uzstādītā gaisa apmaiņas intensitāte (orientējoši  $n=0,5$  1/h).

5. Visi stendi ir novietoti ārā vienādos apstākļos, t.sk., ar vienādu noēnojumu un telpisko orientāciju, LU Botāniskā dārza teritorijā.

6. Pēc stendu montāžas pabeigšanas un arī vairākkārtīgi ekspluatācijas gaitā dažādos apstākļos ir veiktas standartizētas to hermetizācijas, faktiskās gaisa apmaiņas intensitātes un termogrāfiskās pārbaudes būvkonstruktīvo risinājumu kvalitātes pārbaudei.

7. Visi stendi ir aprīkoti ar vienādām monitoringa sistēmām vienlaicīgu ilgtermiņa mērījumu veikšanai automātiskā režīmā, kas nodrošina šādu raksturlielumu noteikšanu:

- energopatēriņš apsildei, dzesēšanai un ventilācijai,
- gaisa temperatūras un mitrumi dažādās zonās,
- gaisa plūsmu ātrumi,
- temperatūras un mitrumi dažādās vietās būvkonstrukcijās,
- siltuma plūsmas blīvumi caur būvkonstrukcijām,
- solāra starojuma enerģijas plūsmas blīvumi,
- spiedienu starpības,
- u.c. raksturlielumi.

8. Ārējā meteostacija automātiskā režīmā veic lokālo meteoroloģisko apstākļu mērījumus.

9. Testēšanas laikā apkures/dzesēšanas sistēma (sākotnēji gaiss-gaiss siltumsūkņis) automātiski cenšas telpā uzturēt noteikto mikroklimatu. Tā kā ierobežotu jaudas resursu apstākļos to ne vienmēr varēs nodrošināt (piem., iespīdot saulei caur logu), tad tiek reģistrētas novirzes no uzdotā režīma. Pētījuma turpināšanai un energopatēriņa salīdzinošai analīzei jau 2014.g. sākumā tiks uzstādīti arī 2 cita veida gaiss-ūdens tipa siltumsūkņi un dažādi elektriskā apkures risinājumi. Perspektīvā 2014. – 2016. Gados, ja tiks rastas finansēšanas iespējas, paredzēta arī solāro elementu un mazjaudas vēja ģeneratora integrācija stendu energoapgādei.

10. Monitoringu kopumā paredzēts veikt vismaz 4 gadus. Pirmais gads, kuru var uzskatīt par pārejas periodu un kurā konstrukciju īpašības stabilizējas, pašlaik tuvojas noslēgumam. Savāktie un serverī uzkrātie dati tiek regulāri apstrādāti, analizēti un publiskoti.

11. Gan savā starpā, gan ar vērtībām, kas iegūtas izmantojot dažādus izstrādātos un aprobētos matemātiskos modeļus, tiek salīdzināti:

- termoklimatiskie apstākļi (temperatūra, mitrums, gaisa plūsmas ātrumi, solārā starojuma intensitāte un asimetrija u.c. raksturlielumi) dažādos testēšanas standos,
- dienas, nedēļas, mēneša, sezonas un gada enerģijas patēriņi,
- siltumsūkņu darbības efektivitāte,
- mitruma stāvokļa dinamika būvkonstrukcijās un tā ietekme uz temperatūras sadalījumu un siltuma plūsmu caur tām, t.i., ietekme uz būvkonstrukciju siltuma caurlaidību un siltuma tiltiem,
- ar būvkonstrukciju termisko inerci saistīto pārejas procesu loma,
- pārejas procesi būvkonstrukcijās gada laikā pēc to izbūves un būvkonstrukciju novecošanās turpmāko gadu periodā, kā arī sezonālās un īstermiņa stāvokļa izmaiņas.

12. Pēc minētā 4 gadu perioda pētījumus iespējams turpināt, izvirzot jaunus mērķus un formulējot tiem atbilstošus, atšķirīgus uzdevumus (piem., nomainot dažus konstruktīvos risinājumus ar citiem, mainot apkures/dzesēšanas sistēmu, pievienojot solāros elementus, integrējot konstrukcijā fāzu maiņas materiālus, demontējot izvēlētos standus un izpētot faktiskās mitruma, materiālu stāvokļa un mikrobioloģiskas izmaiņas tajos un tml.), jo standu pamatstruktūru elementi un monitoringa sistēma ir izmantojami ilgtermiņā. Sadarbībā ar ieinteresētiem partneriem poligonā iespējama arī papildus standu izbūve.

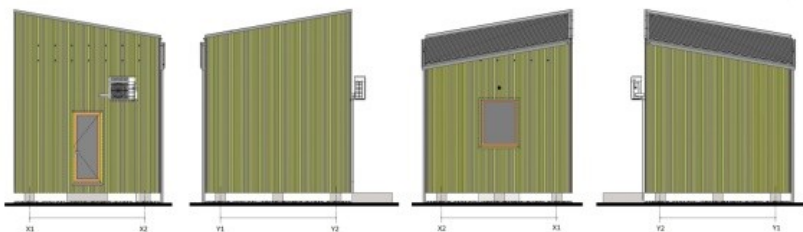
#### 1.4. Testējamo konstrukciju raksturojums

Pašreiz ir izbūvēti 5 testēšanas standi, kuru ār sienas ir veidotas no būtiski atšķirīgām konstrukcijām, bet ar aptuveni vienādu aprēķināto siltuma caurlaidību ( $U=0,15 - 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ):

- frēzbaļķi ar akmens vates siltinājuma slāni un baļķu imitācijas iekšējo apdari (LOG);
- finiera paneļi ar akmens vates siltumizolācijas materiāla pildījumu un fibrolītu (PLY);
- keramiskie termobloki ar siltinājuma slāni ārpusē (CER);
- gāzbetona bloki ar siltinājuma slāni ārpusē (AER);
- eksperimentāli keramiskie bloki ar siltumizolācijas granulu pildījumu to dobumos (EXP).

Visiem standiem ir vienādas konstrukcijas ventilējama pagrīde ( grīdai  $U=0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) un bēniņi (griestu pārsegumam  $U=0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), kā arī vienādi logi ( $U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0,5$ ) un durvis ( $U=0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0$ , jo stiklotā daļa segta ar starojuma necaurlaidīgu plēvi). Tādējādi energopatēriņa atšķirības šajos standos, nodrošinot vienādus termiskā komforta apstākļus, var veidoties, atšķiroties vai mainoties:

- būvkonstrukciju mitrumam;
- termiskajiem tiltiem salaidumu vietās;
- termiskajai inercei mainīgos āra apstākļos (temperatūra, mitrums, saules starojums);
- hermetizācijai;
- novecošanās procesam.



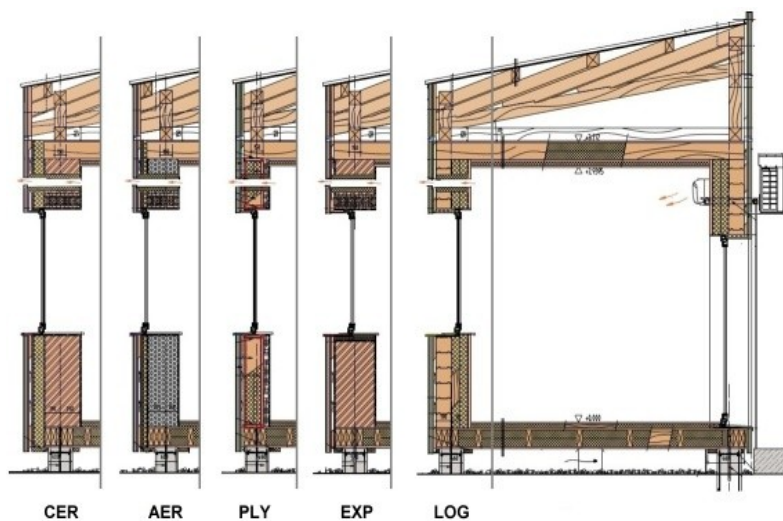
Attēls 1.3. Testēšanas standu plānotais ārskats.



Attēls 1.4. Testēšanas standu izbūvē izmantotie vietējie būvmateriāli.



*Attēls 1.5. Testēšanas stendu ar vienādu ārējo apdari, telpisko orientāciju un noēnojumu izvietojuma projekts.*



*Attēls 1.6. Testēšanas stendu vertikālie šķērsgriezumi (projekts).*



*Attēls 1.7. Testēšanas stendi pēc izbūves.*

Tabula 1.1. 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
Koka karkass + akmens vate (neventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm						50	50
	W/m*K						0.044	0.041
Fibrolīts	mm			75				
	W/m*K			0.068				
labojums $\Delta\lambda$ (neventilēts)	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		
Gāzbetons	mm		375					
	W/m*K		0.072					
Labojums $\Delta\lambda$ (neventilēts)	W/m*K		0.02					
Koka karkass + akmens vate (neventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm			200	200		200	
	W/m*K			0.041	0.044		0.049	
Koka karkass + bērza koksnes šķiedras vate (neventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm							200
	W/m*K							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		
Koka karkass + akmens vate (ventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm	125	50					
	W/m*K	0.043	0.039					
Akmens vate	mm	30	30					
	W/m*K	0.033	0.033					
labojums $\Delta\lambda$ (ventilēts)	W/m*K	0.001	0.001					
Pretvēja plēve							ir	
Saplāksnis	mm			20			21	12
	W/m*K			0.17			0.17	0.17
Robežslāņu termiskā pretestība	(m <sup>2</sup> K)/W	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.17
U vērtība ar robežslāņiem	W/(m <sup>2</sup> K)	0.151	0.153	0.154	0.150	0.159	0.173	0.160

## 1.5. Rezultātu publicitāte un izmantošana

Iegūtie rezultāti ļauj novērtēt mitruma, termiskās inerces un citu iepriekš minēto faktoru patieso lomu vieglu, vidēji smagu un smagu būvju energoefektivitātē tipiskos Latvijas izteiktu diennakts temperatūras svārstību un augsta gaisa relatīvā mitruma apstākļos. Tie dod iespēju uzlabot esošos un izstrādāt jaunus būvkonstruktīvos risinājumus, kā arī rekomendēt tos plašai izmantošanai būvniecības praksē Latvijā. Rezultātu praktisko nozīmību nosaka arī to izmantošanas iespējas pilnā dzīves cikla izmaksu aspektā optimālu, energoefektīvu ēku no vietējām izejvielām plašākas būvniecības veicināšanai Latvijā.

Lai sekmētu izpratni par pētījumu metodēm (skat. arī att. 1.1), energoefektivitāti un mūsdienīgiem konstruktīvajiem risinājumiem iegūtās atziņas tiek nodotas interesentiem visos pieejamajos veidos:

- publicējot interneta vietnēs [www.eem.lv](http://www.eem.lv); [www.heatmod.lv](http://www.heatmod.lv), [www.lu.lv/kompozits](http://www.lu.lv/kompozits);
- izklāstot populāros rakstos un intervijās (skat. arī pielikumu);
- atspoguļojot zinātniskos referātos un publikācijās (skat. publikāciju sarakstu);
- regulāri piedaloties starptautiskās izstādēs „Vide un enerģija”;
- organizējot zinātniski praktiskus seminārus – tādi notika 2013.g. jūnijā un oktobrī un plānoti 2014.g. janvārī un maijā, kad varēs apkopot pilnas 2013./14. g. apkures sezonas rezultātus;
- ar šo pētījumu rezultātu apkopojuma publikāciju.

## 1.6. Pētījumu komanda un sadarbības partneri

Šo pētījumu darbu pamatgrupu veidoja 4 zinātnju doktori (A. Jakovičs, S. Gendelis, J. Kļaviņš, S. Čertoks), kā arī vairāki doktoranti un maģistranti, t.sk. A. Ozoliņš, J. Ratnieks un I. Dimdiņa. Jānorāda, ka darba grupā tādējādi optimāli apvienoti speciālisti gan būvniecības un būvmateriālu nozarē, gan fizikā un matemātikā ar pētījumu pieredzi gan būvizstrādājumu tehnoloģijās, gan būvju siltumfizikālo procesu eksperimentālā izpētē un matemātiskajā modelēšanā. Projekta darba grupā bija arī sertificēti energoauditori – S. Gendelis un I. Dimdiņa. A. Jakovičs un S. Gendelis pēc LR Ekonomikas ministrijas pasūtījuma 2010. - 2011.g. izstrādāja arī ēku energoefektivitātes aprēķina programmas (*EfA* un *EfA2*) un metodikas aprakstu atbilstoši Latvijas normatīvo dokumentu (MK noteikumi Nr. 39 no 2009.g.) nosacījumiem, nodrošinot arī automātisku datu ievadu formā, kas nepieciešama sagatavojot pieteikumus ESF līdzfinansējuma saņemšanai dzīvojamo ēku siltināšanai. Ļoti nozīmīgs bija programmēšanas speciālista J. Džeriņa ieguldījums jaunas paaudzes internetā bāzētas ēku energoefektivitātes aprēķina programmas *HeatMod6* izstrādei atbilstoši 2013. g MK noteikumiem Nr. 348. Kvalitatīvs rezultāts nebūtu iedomājams arī bez ikdienas rutīnas darbiem sistēmu ekspluatācijas uzraudzībā, daudzveidīgo datu apstrādē un vizualizācijā, ko ar īpašu rūpību veica L. Bandeniece un I. Suija.

Šo pētījumu tehnisko iespēju nodrošināšanā, konstruktīvo risinājumu izvērtēšanā, iegūto rezultātu vispusīgā analizē un to izmantošanas sekmēšanā praksē neatsverama loma ir arī sadarbībai ar partneriem no būvindustrijas un zinātnju ietilpīgo pakalpojumu jomas Latvijā: SIA "Lode", AS "Latvijas finieris", SIA "Mārupes logi", SIA "Rehau", SIA "Indutek LV", SIA "Dores", SIA "Paroc Latvija", SIA "Re&Re", SIA "Jelgavas būvniecības sistēmas", SIA

"Jāņrāmis", SIA „Siga”, SIA „Sakret”, SIA „Burtnieks R”, SIA „Rikon AC”, SIA „Irbest”, Elektronikas un datorzinātņu institūts u.c. Nozīmīgu finansiālo atbalstu testēšanas stendu izbūvē sniedza Latvijas Universitātes fonds un SIA „Procesu analīzes un izpētes centrs”.

## 2. Mērījumu metodes

### 2.1. Mērmetodes norobežojošo konstrukciju siltumtehnikā stāvokļa noteikšanai

Veicot ēku energoefektivitātes komplekso analīzi, jāizmanto gan kvalitatīvas, gan arī kvantitatīvas pētījumu metodes. Procesu sāk ar būvkonstrukciju vizuālo siltumtehnikā stāvokļa novērtējumu, kuru veic eksperts (energoauditors) un kura laikā bieži vien atklājas dažādi mehāniskie un citi bez speciālā aprīkojuma saskatāmie defekti, piem., elementu salaidumu nepietiekams noblīvējums un spraugas, mitruma uzkrāšanās vietas vai mehāniskie defekti būvelementu konstrukcijās, kā arī pelējums. Šāda ēkas norobežojošo konstrukciju apsekošana un izpēte kā no ārpusē, tā arī no iekšpusē dod vispārīgu priekšstatu par būves un tās atsevišķu konstrukciju stāvokli.

Ekspertu slēdzienam seko pirmie mērījumi – būvkonstrukciju virsmas temperatūras noteikšana jeb termogrāfiskā diagnostika, kuras rezultātā var tikt atklāti tādi defekti, kas izraisa anomāli pazeminātu vai paaugstinātu virsmas temperatūru atsevišķās ēkas vai tās būvelementu zonās, un ko nevar atklāt eksperti vizuālajā apsekošanā. Termogrāfisko metodi ir mērķtiecīgi izmantot vienlaicīgi radot spiedienu starpību starp iekšējām un ārējām gaisma, kas pastiprina gaisa caurplūdi nepietiekami noblīvētās vietās un tādējādi atklāj ēkas ārējās čaulas blīvējuma problemātiskās zonas. Ekspertu novērtējuma un termogrāfiskās diagnostikas rezultātā ēkām ar nezināmu vai nepilnīgu tehnisko specifikāciju var noteikt raksturīgos un atšķirīgos elementus norobežojošās konstrukcijās, kuriem jāveic kvantitatīvie mērījumi, piem., dažāda tipa paneļi vienā fasādē, mūru veidi un tml.

Ēkas energoefektivitāti kvantitatīvi ietekmējošos parametrus iedalīsim trijās grupās pēc siltuma apmaiņas procesa veida:

- Siltuma vadīšana jeb pārvade. Tie ir enerģijas zudumi caur ēkas norobežojošām konstrukcijām – ārsienām, jumtu, pārsegumiem u.c. elementiem molekulārās siltuma vadīšanas ceļā. Homogēnus materiālus raksturo ar siltuma vadītspēju jeb siltuma vadīšanas koeficientu  $\lambda$  (W/m K), šī parametra mērījumi parasti notiek laboratorijas apstākļos, piem., standartizētā „karstās plātes” iekārtā (sadaļa 2.1.2.1). Gatavas būvkonstrukcijas ar komplicētu vai nezināmu uzbūvi raksturo ar siltuma caurlaidības koeficientu  $U$  (W/m<sup>2</sup>K) vai arī ar tā apgriezto lielumu – siltuma vadītspējas pretestību  $R$  (m<sup>2</sup> K/W), kuru nosaka gan jau uzbūvētu ēku konstrukcijām reālos ekspluatācijas apstākļos (sadaļa 2.1.2.2), gan arī speciālā standartizētā termiskajā kamerā (sadaļa 2.1.2.2). Koeficientā  $U$  būvkonstrukciju raksturošanai parasti tiek iekļauti arī citi siltuma pārnese veidi (piem., konvekcija un starojums stikla paketēm) caur būvkonstrukciju.
- Konvektīvā siltuma pārnese. Tie ir zudumi, kas rodas gaisa masām pārvietojoties starp ēkas iekšējām un ārējām. Tos raksturo ēkas vai tās atsevišķu bloku gaisa apmaiņas koeficients  $n$  jeb blīvējuma pakāpe  $n$  (1/h) pie noteiktas spiedienu starpības, kas parāda, cik ilgā laikā telpā vai visā ēkā esošā gaisa masa nomainās ar ārējā gaisma. Uzbūvētām ēkām gaisa apmaiņas koeficients tiek noteikts standartizēti (parasti pie 50 Pa spiedienu starpības), izmantojot speciālu *BlowerDoor* iekārtu (sadaļa 2.1.3). Faktisko gaisa apmaiņu nosaka mērījumos dabīgas spiedienu starpības apstākļos, izmantojot iezīmētās gāzes metodi.

- Siltuma starojums ir ar elektromagnētiskajiem viļņiem pārnestais enerģijas daudzums, kam var būt gan negatīva, gan pozitīva loma termiskā komforta apstākļu nodrošināšanā. Ziemu tas var sekmēt energoekonomiju apsildei, bet vasaru var radīt papildus telpu pārkarsumu. Saules starojuma enerģija tiek intensīvi pievadīta caur caurspīdīgiem elementiem (piem., logiem) un tos raksturo ar solārās enerģijas caurlaidību  $g < 1$ . Starojuma uz necaurspīdīgiem elementiem ieguldījums kopējā siltuma bilancē ir daudz mazāks. Zemas temperatūras starotāju (dažādu sildvirsmu) starojuma siltuma pārnese caur stiklotiem elementiem savukārt parasti tiek iekļauta to siltuma caurlaidības koeficientā  $U$ . Izmantojot dažādus starojuma selektīvās emisijas pārklājumus un palielinot stiklu skaitu paketē, šāda tipa zudumus var būtiski samazināt (sadaļa 2.1.4).

Līdzīgi kā kvalitatīvās analīzes metodēs, informācija par kvantitatīviem ēkas siltuma zudumus raksturojošiem parametriem var tikt iegūta, veicot mērījumus pašā objektā. To sekmīgai izpildei ir jānodrošina dažu nosacījumu izpilde, piem., veicot siltuma caurlaidības mērījumus, precizitātes palielināšanai ir nepieciešams nodrošināt pietiekami lielu temperatūras starpību būvkonstrukcijas pretējās pusēs. Konvektīvos zudumus no ēkas raksturojošo gaisa apmaiņas koeficientu  $n$  pēc būtības nevar noteikt laboratorijas apstākļos. Tomēr atsevišķus raksturlielumus ( $U$ ,  $\lambda$ ) var mērīt arī laboratorijā un specializētās iekārtās, kas ļauj uzlabot mērījumu precizitāti un samazināt to noteikšanai nepieciešamo laiku, kā arī salīdzināt iegūtās vērtības ar mērījumu rezultātiem reālajos ekspluatācijas apstākļos. Viens no iespējamo atšķirību iemesliem ir materiālu mitrums – laboratorijas apstākļos tas parasti ir mazāks. Atšķirībā no mērījumiem dabā, kur to pielietojumu iespējas pārsvarā nosaka laika apstākļi, mērījumiem laboratorijā būtiski faktori ir pētāmā objekta izmēri un svars, kas nosaka tā ievietošanas iespējas mēriekārtā  $U$  noteikšanai, vai blīvums, mitrums un virsmas gludums, veicot  $\lambda$  mērījumus ar karstās plātes iekārtu.

### 2.1.1. Termogrāfiskā diagnostika

Ēku norobežojošo konstrukciju defektus, kurus nespēj pamanīt „neapbruņota” cilvēka acs un kuri ir saistīti ar palielinātu siltuma vadīšanu vai ievērojamu gaisa ieplūdi/izplūdi, var konstatēt un kvalitatīvi novērtēt tikai lietojot speciālas metodes un ierīces, ar kuru palīdzību ir iespējams reģistrēt un cilvēkam saprotamā veidā attēlot siltuma zudumus raksturojošos lielumus. Ja pieņem, ka iekštelpu temperatūra  $T_{\text{iekšā}}$  visā ēkā ir vienāda, tad pie vienādas āra gaisa temperatūras ( $T_{\text{ārā}} < T_{\text{iekšā}}$ ), elementiem ar lielāku siltuma caurlaidību  $U$  ārējās virsmas temperatūra būs augstāka. Tādējādi, analizējot būvkonstrukcijas no siltuma zudumu viedokļa, šādā idealizētā situācijā pietiek reģistrēt un salīdzināt tās ārējo konstrukciju virsmu temperatūras. Vienkāršākajā gadījumā var izmantot starojuma mērierīces, kas ļauj noteikt vidējo temperatūru tikai viena virsmas punkta apkārtnē (attēls 2.1). Lai iegūtu pilnu objekta virsmas temperatūras sadalījumu cilvēkam ērti analizējamā veidā, nepieciešams izmantot speciāli šim nolūkam paredzētu ierīci – termogrāfu jeb termovizoru (attēls 2.2), kas uztver un reģistrē objektu virsmas infrasarkanā starojumu, ļauj vizuāli attēlot temperatūru sadalījumu, izmantojot krāsu skalu, un informāciju noglabāt turpmākai pēcapstrādei, piem., temperatūras profīlu konstruēšanai (attēls 2.3) vai tās vidējās, minimālās vai maksimālās vērtības noteikšanas izvēlētai attēla apgabalā (attēls 2.4). Termogrāfiskā metode ēku un

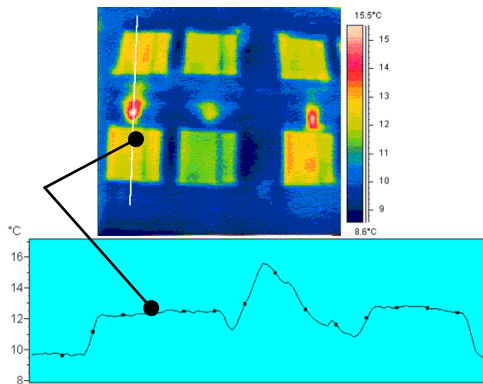
tās norobežojošo konstrukciju defektu atklāšanai atbilstoši standarta (ISO 6781, 1983) prasībām mūsdienās tiek plaši lietota.



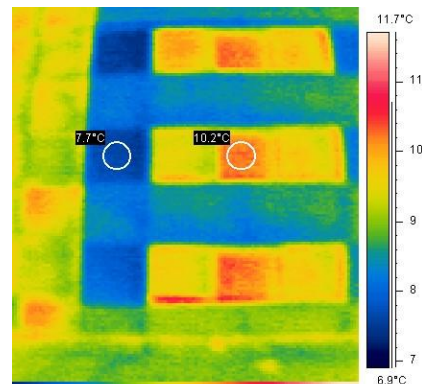
Attēls 2.1. Distances temperatūras noteikšanas ierīce.



Attēls 2.2. Mūsdienīgā rokas termogrāfa kopskats.



Attēls 2.3. Temperatūras profila piemērs.



Attēls 2.4. Vidējās temperatūras apgabālā piemērs.

### 2.1.1.1. Termogrāfijas metode

Objektu virsmas temperatūras distances noteikšanas metodes pamatā ir Stefana-Bolcmaņa likums (Incropera, DeWitt, 2002), saskaņā ar kuru visi ķermeņi izstaro elektromagnētisko starojumu, kas ir viennozīmīgi saistīts ar to virsmas temperatūru un kura reģistrētais jaudas blīvums  $E_b$  ( $W/m^2$ ) ir proporcionāls temperatūras 4. pakāpei:

$$E_b \sim T^4 \quad (2.1)$$

„Absolūti melnam” ķermenim, kas visu garumu viļņus pilnībā absorbē un neko neatstaro, proporcionalitātes koeficients ir  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$  un to sauc par Stefana-Bolcmaņa konstanti.

Reāliem objektiem virsmas īpašības atšķiras no „absolūti melnā” ķermeņa īpašībām un, lai temperatūru noteiktu korekti, ir jāņem vērā virsmas emisijas koeficients (jeb nomelnojuma pakāpe)  $\varepsilon$ , kas ir bezdimensionāls lielums un raksturo objekta spēju absorbēt vai atstarot elektromagnētiskos viļņus. “Absolūti melnai” virsmai, tas ir 1, bet virsmai, no kuras visi viļņi tiek atstaroti un nekas netiek absorbēts, tas ir 0. Reālos mērījumos tiek lietots t.s. „pelēka ķermeņa”

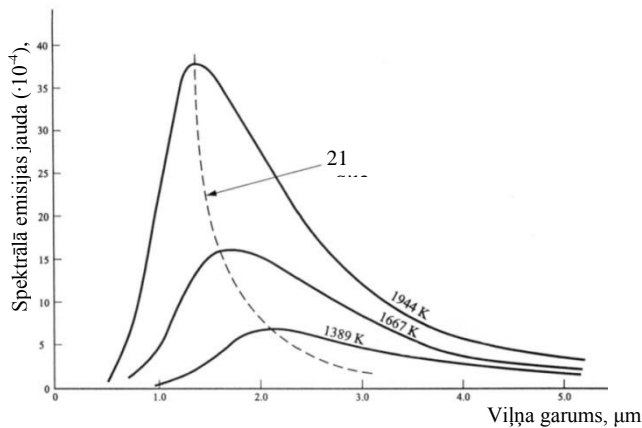
tuvinājums, t.i. tiek pieņemtas emisijas koeficienta vērtības intervālā no 0 līdz 1, kas ir atkarīgas no materiāla virsmas īpašībām un viļņa garuma (piem., metāliem  $\varepsilon \approx 0,3 \dots 0,8$ , bet stikliem, kokam, krāsām, ūdenim un lielākai daļai no celtniecības materiāliem  $\varepsilon > 0,9$ ). Prakse rāda, ka lielākai daļai no ķermeņiem šo koeficientu tuvināti var pieņemt vienādu ar 0,95, kas, lietojot termogrāfisko metodi bieži tiek darīts. Ievērojot teikto, likumu (2.1) var pārrakstīt sekojošā formā:

$$E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (2.2)$$

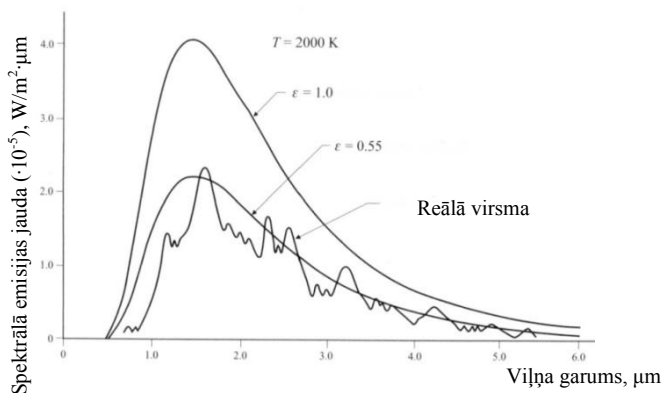
Termogrāfijas metodē skaitliskajai temperatūras vērtības noteikšanai tiek izmantots Vīna nobīdes likums, kas izriet no „absolūti melnā” ķermeņa starojuma Planka sadalījuma (Incropera, DeWitt, 2002) un nosaka, ka maksimālā starojuma jauda pie uzdotās temperatūras tiek sasniegta pie konkrēta viļņa garuma  $\lambda_{\max}$  ( $\mu\text{m}$ ). Temperatūrai palielinoties, starojuma maksimums pārbīdās īsāko viļņu virzienā:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897,6 [\mu\text{m} \cdot \text{K}]. \quad (2.3)$$

(a)



(b)



Attēls 2.5. Spektrālais emisijas jaudas sadalījums „absolūti melnam” ķermenim pie dažādām temperatūrām (a) un sadalījuma piemēri reālam ķermenim (b).

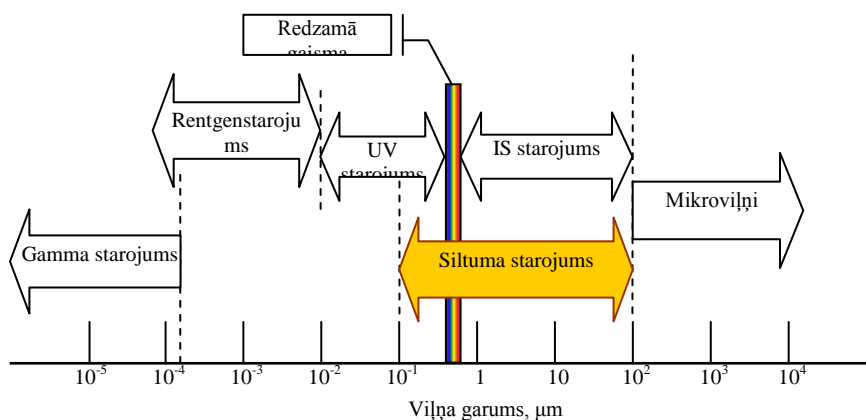
Izstarotās jaudas spektrālais sadalījums atkarībā no temperatūras „absolūti melnam” ķermenim un reālām virsmām parādīts attēlā 2.5.

Sakarību (2.3) var izmantot, lai aprēķinātu redzamās gaismas spektra minimālajai un maksimālajai viļņa garuma vērtībām (attiecīgi 0,4 un 0,7  $\mu\text{m}$ ) atbilstošās starotāja līdzsvara temperatūras: 7244 K un 4139 K, tādējādi vidējā temperatūra 5700 K aptuveni atbilst Saules virsmas temperatūras novērtējumiem. „Absolūti melnam” ķermenim ar virsmas temperatūru 1000 K starojuma maksimums ir pie 2,9  $\mu\text{m}$  ar nelielu izstarotu sarkanās gaismas daļu, ko iespējams novērot arī eksperimentāli, uzkaršējot kādu metālisku objektu, piem., naglu.

Ēku norobežojošo konstrukciju pētījumos reģistrētā elektromagnētiskā starojuma maksimums parasti atrodas infrasarkanajā diapazonā ar viļņa garumiem 3...13  $\mu\text{m}$ , kas atbilst starotāja temperatūrai 20...100  $^{\circ}\text{C}$  un nav redzams ar „neapbruņotu” aci. Tas kļūst redzams tikai gadījumā, ja temperatūra pārsniedz 530  $^{\circ}\text{C}$ . Minēto viļņa garumu diapazons ietilpst t.s. siltuma (termiskā) starojumu spektra daļā, kurā notiek siltuma pārnese starojuma ceļā. Tas ietver daļu no ultravioleto viļņu spektra (sākot ar 0,1  $\mu\text{m}$ ), kā arī visu redzamās un infrasarkanās gaismas spektru līdz 100  $\mu\text{m}$  (attēls 2.6).

Kā piemērs tabulā 2.1 sniegts vecāka tipa termovizora *AGEMA Thermovision 487* (attēls 2.7.) un mūsdienīgu modeļu *FLIR ThermoCAM P65* un *FLIR P620* (attēls 2.8.) svarīgāko parametru salīdzinājums.

Veicot termogrāfiskos apsekojumus, galvenais nosacījums labu rezultātu iegūšanai ir pietiekama temperatūru starpība starp iekštelpu un āra gaisu – tad tiek nodrošināta lielāka siltuma plūsma un ir labāk saskatāmas defektu vietas. Mērījumu laikā ir ieteicams papildus izmantot arī pārspiedienu iekārtu, kas sekmē siltā gaisa izplūšanu no telpām, vai, gadījumā, ja termogrāfiskā apskate notiek no iekšpuses, pazemināts spiediens (zemspiediens) iekšējās pastiprina aukstā āra gaisa ieplūdi caur atverēm ēkas ārējā čaulā. Parasti šim nolūkam tiek izmantota ēkas gaisa apmaiņas noteikšanas iekārta *Blower Door* (sadaļā 2.1.3), ar kuras palīdzību var nodrošināt dažādas spiedienu starpības.



Attēls 2.6. Siltuma starojuma diapazons elektromagnētisko viļņu spektrā.



Attēls 2.7. Termogrāfs AGEMA Thermovision 487.



Attēls 2.8. Termogrāfi FLIR P620 un FLIR T650sc.

Tabula 2.1. Izmantoto termogrāfu svarīgāko parametru salīdzinājums.

Parametrs	AGEMA Thermovision 487	FLIR P620	FLIR T650sc
Temperatūru diapazons	-20...2000 °C (ar filtriem)	-40... 2000 °C (ar filtriem)	-40... 2000 °C (ar filtriem)
Izšķirtspēja, punkti	140×140	640×480	640×480
Jutība pie 30 °C	0,1 °C	0,04 °C	0,03 °C
Objektīvi	Silīcija, maināmi	Germānija, maināmi	Germānija, maināmi
Datu nesējs	3,5" diskete	RAM vai SD karte	RAM vai SD karte
Detektora darbības diapazons	2...5 μm, IR spektra īso viļņu daļa (SWB)	8...13 μm, IR spektra garo viļņu daļa (LWB)	7,5...13 μm, IR spektra garo viļņu daļa (LWB)
Detektora tips	HgCdTe vienelementa ar dzesēšanu	mirobolometru tipa bez dzesēšanas	mirobolometru tipa bez dzesēšanas
Svars, kg	8	1,8	1,3
Papildus iespējas	-	Fotoaparāts, MPEG-4, FireWire, USB, IrDA	Fotoaparāts, HDMI, WiFi, USB, GPS, skārienjutīgs ekrāns,

Arī meteoroloģiskajiem apstākļiem ir liela nozīme rezultātu korektībai – pastiprināts vējš, lietus, migla vai tiešs Saules starojums var radīt neprecizitātes mērījumu rezultātos un to interpretācijā. Tā, no mitras virsmas notiek ūdens iztvaikošana, kas pazemina virsmas temperatūru salīdzinājumā ar sausu virsmu. Savukārt, Saules apspīdētām virsmām noteiktā virsmas temperatūra ir lielāka pateicoties to uzsīlšanai, nevis to mazākai siltuma vadītspējai. Kopumā apstākļus un nosacījumus ēku siltuma izolācijas defektu atklāšanai, izmantojot infrasarkanu starojumu, definē standarts (ISO 6781, 1983), bet detalizētāka informācija par šādu mērījumu teorētiskiem aspektiem ir atrodamā darbā (Jakovičs *et.al.*, 1998). Lietojumu pieredze dažādu valstu klimatiskajos apstākļos atspoguļota arī darbos (Jakovičs, Banga, 1997), (Svaic *et.al.*, 2005) un (Leonachescu *et.al.*, 2005).

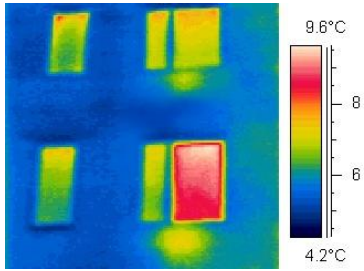
### **2.1.1.2. Raksturīgie piemēri**

Termogrāfiskās diagnostikas metode LU VTPMML lietota vairāku simtu dzīvojamo, biroja un rūpniecisko ēku apsekojumos vairāk nekā 15 gadus ilgā periodā, kā rezultātā uzkrāta ievērojama biežāk sastopamo defektu un raksturīgāko situāciju datu bāze. Turpinājumā kā piemēru nedaudz detalizētāk raksturosim tikai dažas tipiskas situācijas.

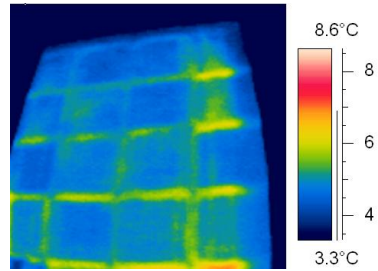
Daļa termogrāfiskās diagnostikas rezultātā atklāto defektu ir saistīta ar ēku norobežojošo konstrukciju palielinātu siltuma caurlaidību. Attēlā 2.9. ir redzams ār sienām ar lielu siltuma caurlaidību raksturīgs defekts – paaugstināta virsmas temperatūra zonā pie pārāk tuvu sienai novietotā apkures sistēmas sildķermeņa, kas būtiski palielina siltuma patēriņu. Tāpat šajā attēlā ir redzams arī vienkāršs logs ar lielāku virsmas temperatūru salīdzinājumā ar divstiklu logu, kas nozīmē lielāku siltuma plūsmu un ievērojamus siltuma zudumus. Šī termogramma uzņemta ar *AGEMA Thermovision 487* kameru, kuras detektora darbības diapazons (Tabula 2.1.) ļauj noteikt arī stikloto virsmu temperatūru, ko nevar izdarīt ar jaunākās paaudzes kamerām, kuru detektors ir jūtīgs garo infrasarkanu viļņu daļā, kur dominē refleksija no stiklotajām virsmām. Termogrāfiskās apskates laikā detektēto paaugstinātu vienkārša loga virsmas temperatūru varēja paredzēt jau pēc vienkāršas vizuālās apskates, savukārt, sildķermeņu izraisīto ār sienas temperatūras pieaugumu ar „neapbruņoti” aci konstatēt ir praktiski neiespējami.

Attēlos 2.10. un 2.11. ir parādītas divas termogrammas ar paaugstinātu ēku ār sienas temperatūru. Ja daudzstāvu mājas gala sienas paneļu savienojumu vietas atšķiras arī vizuāli un šuvju lielāku siltuma caurlaidību var paredzēt (attēls 2.10.), tad termiskos tiltus stāvu pārsegumu konstrukciju savienojuma vietās var noteikt tikai mērījumos (attēls 2.11.).

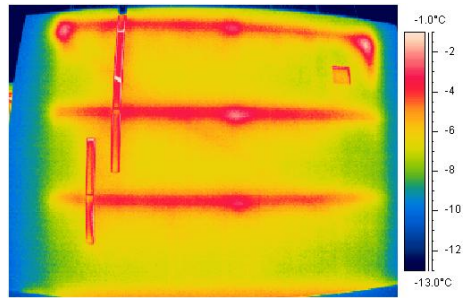
Attēlā 2.12. redzams raksturīgs uzņēmums no ēkas iekšpuses, kur norobežojošās būvkonstrukcijas temperatūra metāla karkasam ir līdz pat 7°C zemāka kā izolējošā pildījuma virsmai un ir izveidojies būtisks termiskais tilts, šādā situācijā pie zemām āra gaisa temperatūrām uz virsmas var veidoties kondensāts. Līdzīga pazeminātas temperatūras aina karkasam salīdzinājumā ar pildījumu (tikai zem apdares esošo un tāpēc neredzamu) parādīta attēlā 2.13.



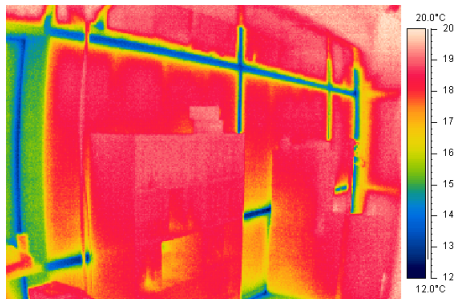
Attēls 2.9. Paaugstināta ār sienas temperatūra iepretīm radiatoriem (LU Fizikas un matemātikas fakultātes laboratoriju korpuss pirms rekonstrukcijas).



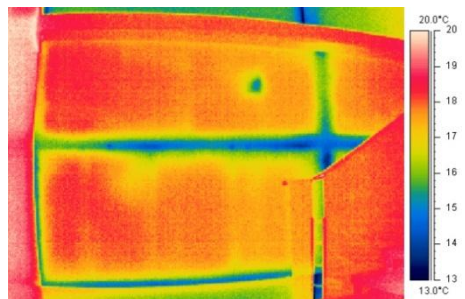
Attēls 2.10. Paaugstināta paneļu ēkas gala sienas šuvju temperatūra.



Attēls 2.11. Paaugstināta ēkas sienas temperatūra stāvu pārsegumu salaiduma vietās.



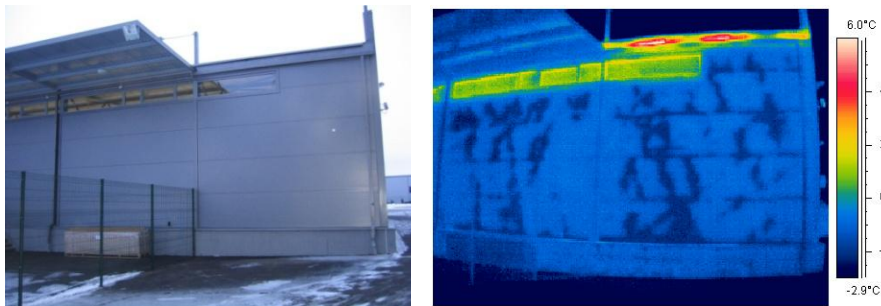
Attēls 2.12. Metāla karkasa konstrukciju un izolējošā pildījuma temperatūru atšķirība.



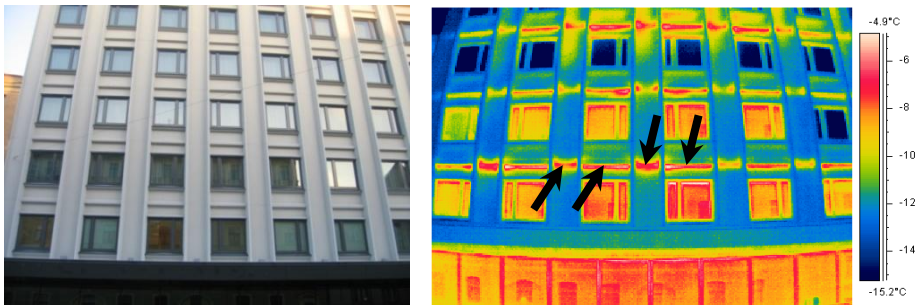
Attēls 2.13. Pazemināta zem apmetuma neredzamā karkasa konstrukcijas temperatūra.

Rūpnieciski izgatavotu būvkonstrukciju defekta piemērs ir parādīts attēlā 2.14., kur ir redzamas neregulāras pazeminātās temperatūras zonas uz relatīvi jaunu ārējo bloku virsmām, kas ir saistītas ar ārējā metāla apšuvuma atslāņošanos no siltuma izolācijas pildījuma. Šajā attēlā vērojamas arī iekštelpu siltā gaisa izplūdes hermetizācijas defektu dēļ.

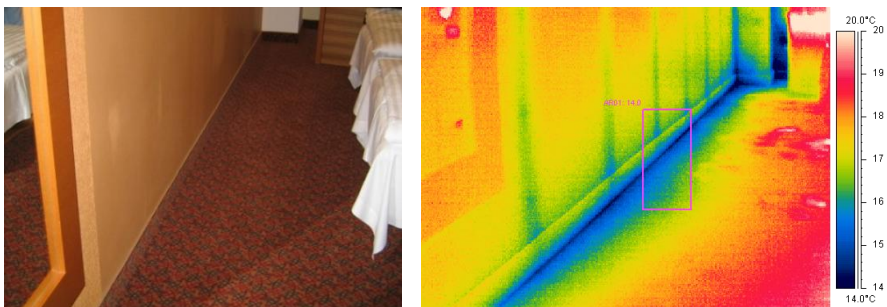
Pareizas siltināšanas tehnoloģijas ēkas renovācijā neievērošanas rezultāts ir parādīts attēlā 2.15. Šajā gadījumā visu telpu ārējas sienas ir siltinātas no iekšpuses, bet pārsegumu betona konstrukciju un fasāžu salaiduma vietām nav izveidota papildus siltuma izolācija, kā rezultātā veidojas siltuma tilti. Tie nosaka ne tikai palielinātus siltuma zudumus, bet arī ievērojami pazemina iekštelpu temperatūras nenosiltināto salaiduma vietu tuvumā (attēls 2.16.), kas pie zemas ārā gaisa temperatūras var būt par iemeslu ūdens tvaiku kondensācijai šajās zonās.



Attēls 2.14. Nehomogenitātes ārējo paneļu virsmas temperatūras sadalījumā.

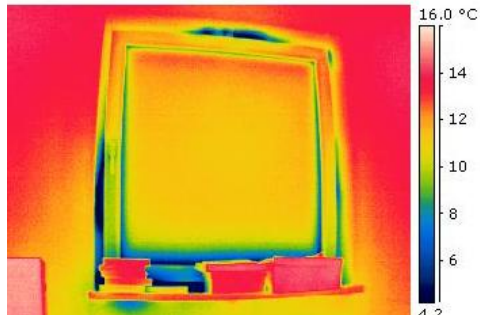


Attēls 2.15. Izteikti termiskie tilti nenosiltinātās starpstāvu pārsegumu zonās.

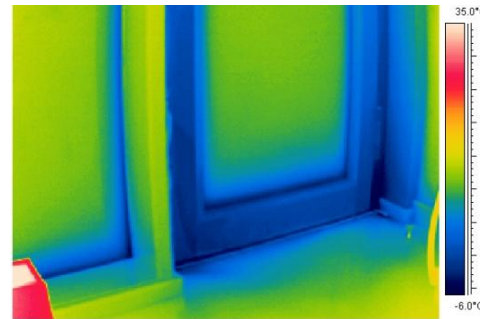


Attēls 2.16. Pazemināta temperatūra no iekšpuses nosiltinātās ārējas sienas un grīdas salaiduma vietā.

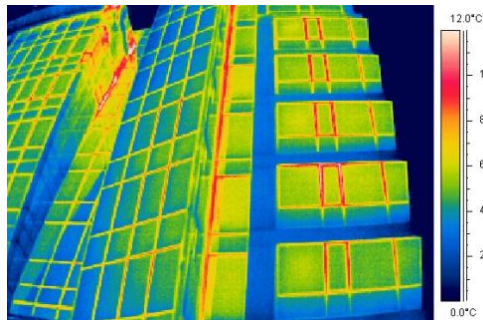
Raksturīgs termogrāfiskās diagnostikas rezultātā atklāto siltuma zudumu veids ir saistīts ar gaisa apmaiņu caur ēkas ārējo čaulu, jeb tā saucamo konvektīvo siltuma apmaiņu. Visbiežāk tas ir logu un durvju nepietiekamais blīvējums un ar to saistītie siltuma zudumi un kondensāta veidošanās iespēja. Attēlā 2.17. ir redzams ievērojams temperatūras kritums pie loga veramās daļas, kas pēc absolūtās vērtības sasniedz tikai 4°C. Vēl kritiskāka situācija ir vērojama attēlā 2.18. parādītajā konstrukcijā, kad sildītāja tuvumā ārdurvju apakšējā daļā nepietiekama blīvējuma un palielinātas siltuma caurlaidības dēļ veidojas kondensāts, kas zonās ar īpaši zemu temperatūru (līdz -6°C, skat. attēla skalu) sasilst. Tādējādi izveidojas situācija, ka pusmetra attālumā no sildītāja uz vienas no telpas iekšējām virsām redzama ledus kārtā.



Attēls 2.17. Aukstā āra gaisa ieplūde pa neblīvām vietām loga konstrukcijā.

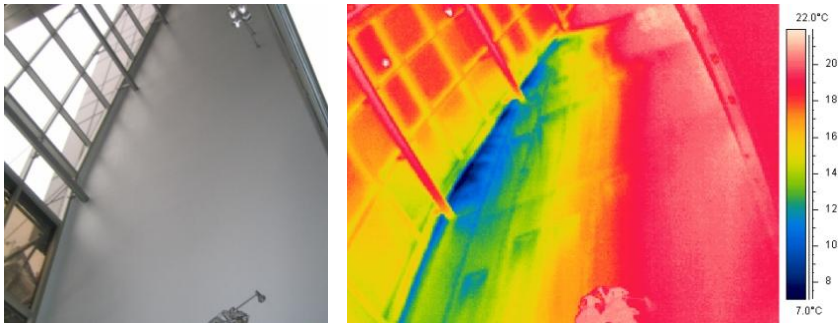


Attēls 2.18. Negatīva temperatūra uz iekšējām ārdurvju konstrukcijas virsmas.



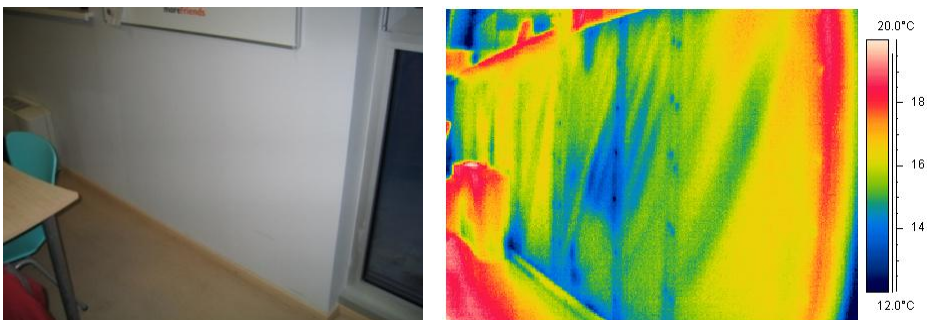
Attēls 2.19. Siltā gaisa izplūdes rezultātā paaugstināta temperatūra daudzstāvu ēkas augšējo stāvu būvkonstrukciju salaidumu zonās.

Daudzstāvu ēkās sienās bez pietiekamas pretvēja izolācijas vai telpās, kas aizņem vairākus stāvus, konvekcijas radītos siltuma zudumus pastiprina t.s. termogravitācijas jeb skursteņa efekts, kura rezultātā vieglākās siltā gaisa masas ceļas augšup un, ja augstākos stāvos ir arī ievērojami blīvējuma defekti vai tiek lietotas konstrukcijas ar lielu siltuma caurlaidību, notiek pastiprināta siltuma apmaiņa vai gaisa izplūde (attēls 2.19). Gaisa ieplūdes zonās vērojama pazemināta temperatūra uz norobežojošo konstrukciju iekšējām virsmām (attēls 2.20).

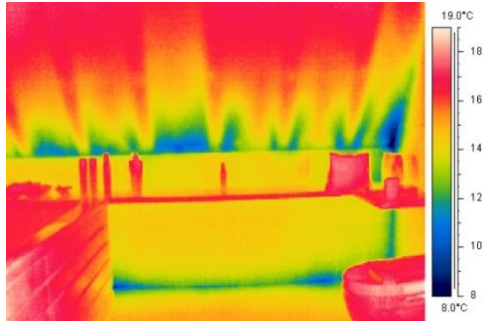


*Attēls 2.20. Ārsienas temperatūras pazeminājums par 15°C daudzstāvu ēkas hallē.*

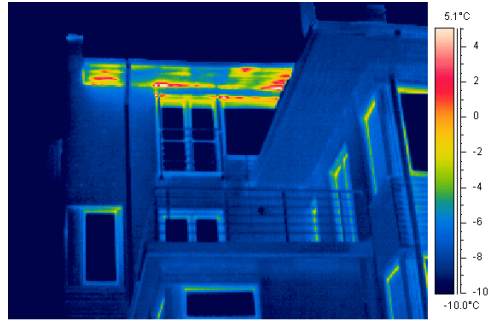
Ar gaisa masu pārvietošanos ir izskaidrojama vēl viena termogrāfiskās diagnostikas laikā atklāto defektu grupa, kas vērojama mūsdienās plaši izplatītajām vieglajām konstrukcijām, kurām, tehnoloģiski nepilnīga izpildījuma gadījumā, var būt liela gaisa caurlaidība. Daļu šāda tipa defektus ir iespējams pamanīt arī reālos ēku ekspluatācijas apstākļos, tomēr ir lietderīgi radīt spiedienu starpību starp iekštelpu un āra gaisu, tādējādi palielinot gaisa caurplūdi un vienkāršojot defektu atrašanu. Attēlos 2.21 un 2.22 parādīti aukstā āra gaisa ieplūdes piemēri vieglo būvkonstrukciju ēkās pie pazemināta spiediena telpās - notiek pastiprināta āra gaisa infiltrācija pa dažādām nenoblīvētām vietām, kurai raksturīgs neregulārs pazemināto temperatūras zonu izvietojums. Savukārt, radot telpās pārspiedienu, no ārpuses ar termogrāfiskās metodes palīdzību var redzēt siltā iekštelpu gaisa izplūdes zonas, kas parasti veidojas nepietiekami hermetizētās būvkonstrukciju salaiduma vietās (attēls 2.23).



*Attēls 2.21. Aukstā āra gaisa ieplūde sienas konstrukcijā pie pazemināta spiediena telpā.*



*Attēls 2.22. Aukstā āra gaisa ieplūde jumta un ār sienas salaiduma konstrukcijā pie pazemināta spiediena telpā.*



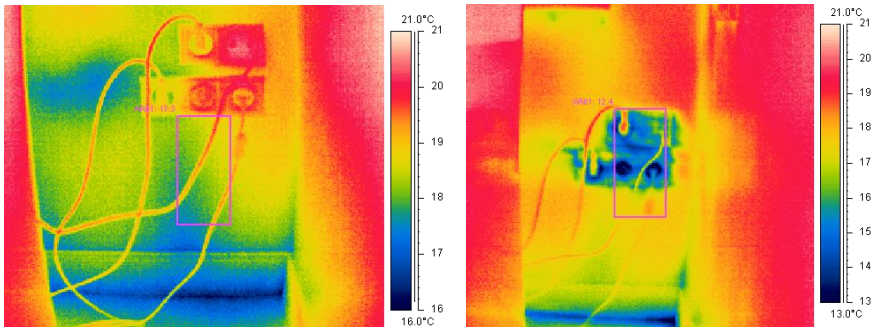
*Attēls 2.23. Siltā gaisa izplūde caur neblīvām būvkonstrukciju salaiduma vietām pie pārspiediena telpās.*

Ja termogrāfiskais apsekojums nenotiek vējainā laikā, tad defekti norobežojošās konstrukcijās, kas ir saistīti ar nepietiekamu hermetizāciju, nevar tikt korekti novērtēti un bieži vien pat atklāti bez mākslīgi radīta zemspiediena vai pārspiediena. Rezultātus, kas ir iegūti šādos mērījumos, ir lietderīgi salīdzināt ar ēkas stāvokļa bez spiedienu starpības apsekojumu, tādējādi novērtējot tieši konvektīvās gaisa apmaiņas ietekmi uz temperatūras sadalījumu. Vieglo konstrukciju ēkās ļoti plaši izplatīts defekts ir saistīts ar elektrības un citu kontaktvietu iestrādi ģipškartona sienās, kad tās netiek attiecīgi noblīvētas, novēršot gaisa caurplūdi. Šādu vietu tuvumā bieži var ne tikai konstatēt pazeminātu konstrukciju virsmas temperatūru, bet arī intensīvu aukstā gaisa ieplūdi, kuras ātrums pie lielākas spiedienu starpības var sasniegt pat vairākus metrus sekundē.

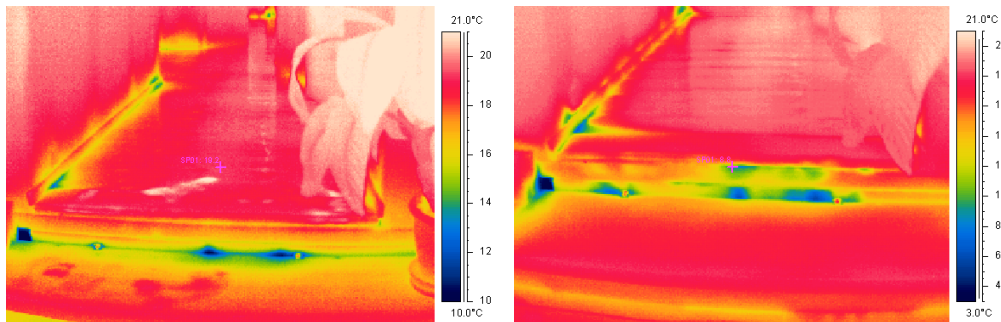
Attēlā 2.24 ir parādīts šāds rozešu bloks bez un ar 50 Pa zemspiedienu telpā – kā redzams, pie spiedienu starpības temperatūra samazinās par vairākiem grādiem, kas liecina par aukstā āra gaisa ieplūdi pa sienas iekšpusē esošajiem gaisa ceļiem. Tomēr pat tad, ja pazeminātas temperatūras zonas kādā telpas vietā ir konstatējamas arī dabiskos apstākļos, mākslīgi radītā spiedienu starpība ļauj noteikt visas ieplūdes vietas un novērtēt situāciju stipra vēja apstākļos.

Tā, attēlā 2.25 salīdzinājumam parādītas divas termogrammas pie dažādām spiedienu starpībām starp iekštelpu un āra gaisu – kvalitatīvi temperatūras sadalījumi atšķiras maz, tomēr kvantitatīvi atšķirības ir būtiskas. Kā redzams no temperatūru krāsu skalām, pie 50 Pa liela

spiediena pazeminājuma telpā, aukstā āra gaisa ieplūdes intensitāte ir būtiski lielāka, kā rezultātā minimālā virsmas temperatūra pazeminās no 10°C līdz 3 C.



Attēls 2.24. Ģipškartona plāksnē iemontētās rozetes bez (pa kreisi) un ar (pa labi) 50 Pa zemspiedienu telpā.

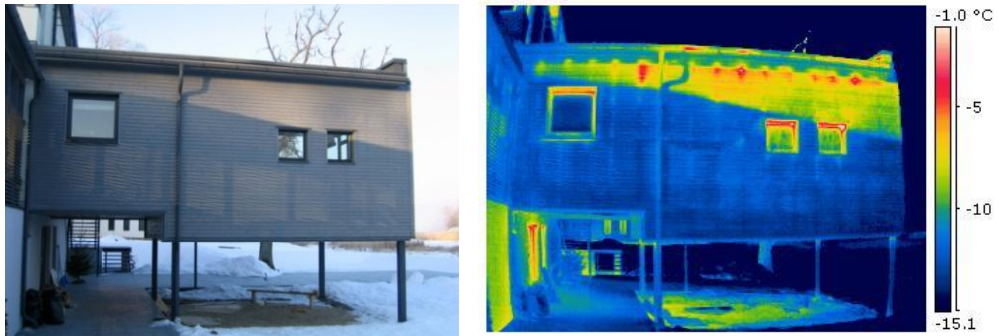


Attēls 2.25. Gaisa ieplūde caur grīdas konstrukciju bez (pa kreisi) un ar (pa labi) 50 Pa zemspiedienu telpā.

Raksturīgs piemērs termogrāfiskās apskates laikā reģistrētam efektam, kas nav saistīts ar ēkas norobežojošo būvkonstrukciju stāvokli, ir parādīts attēlā 2.26. Tur redzams Saules starojuma iedarbības rezultātā radies ārsienas temperatūras palielinājums tās augšējā daļā. Šādus efektus ir viegli identificēt, ja arī vizuāli ir redzami Saules apspīdētie laukumi, tajā pat laikā problēmas var sagādāt tādu eksperimentu rezultātu analīze, kas veikti neilgu laiku pēc Saules starojuma iedarbības un attiecīgo virsmu temperatūra vēl ir paaugstināta. Tādēļ standarts (LVS EN 13187, 2002) strikti nosaka ierobežojumus apstākļiem, kuros iespējams kvalitatīvi veikt būvkonstrukciju termogrāfiju.

Grūtības precīzai virsmas temperatūras noteikšanai var būt arī gadījumos, kad virsmas emisijas koeficients  $\varepsilon$  materiālam ir daudz mazāks par 1 vai nav pietiekami precīzi zināms, kā arī situācijās, kad vienā termogrāfijā ir redzamas materiālu virsmas ar būtiski atšķirīgām emisijas īpašībām. Šo faktoru fizikālās ietekmes izpratne un novērtējums tādējādi ir svarīgi kvalitatīvam iegūto termogrammu izvērtējumam. Relatīvi plaši izplatīts ir mīts, ka ar termogrāfiju var tieši izmērīt siltuma plūsmu caur būvkonstrukcijām, te jānorāda, ka pat veicot papildus gaisa un virsmas temperatūras mērījumus ar termogrāfijas metodi ticamu siltuma caurlaidības vērtību nevar iegūt. Teorētiski tas būtu iespējams, ja process būtu stacionārs un būtu precīzi zināmi siltuma

atdeves koeficienti no virsmas, kurus galvenokārt nosaka gaisa plūsmas intensitāte virsmas tuvumā. Praksē tas neizpildās, tādēļ siltuma caurlaidības noteikšanai jāizmanto principiāli cita mērtehnika (skat. p. 2.1.2).



Attēls 2.26. Palielināta ēkas sienas virsmas temperatūra, ko nosaka tās uzsilšana Saules starojuma ietekmē.

Kopumā virsmu temperatūras noteikšana ar termogrāfiskās diagnostikas palīdzību ir viena no efektīvām instrumentālām metodēm ēku kompleksai siltuma zudumu analīzei un dod vispārīgu priekšstatu par ēkas būvkonstrukciju siltumtehniko stāvokli kopumā, kā arī ļauj atklāt ar neapbruņoti aci nepamanāmus defektus un izvēlēties vietas un objektus turpmāko kvantitatīvo mērījumu veikšanai. Lietojot to kopā ar zemspiediena un pārspiediena radīšanas iekārtu, var tikt atklāti arī tādi defekti un novērtētas norobežojošo konstrukciju kritiskās vietas no gaisa konvekcijas viedokļa, kas pie dabīgiem gaisa apmaiņas apstākļiem nevar tikt atklātas. Ilgstošā laika periodā LU VTPMML veiktie praktiskie mērījumi parāda, ka bez palielinātās siltuma vadīšanas atsevišķos ēkas mezglos, liels siltuma daudzums tiek zaudēts arī konvektīvās gaisa apmaiņas rezultātā, it sevišķi raksturīgi tas ir nekvalitatīvi izbūvētām vieglajām konstrukcijām.

Kad ēkas siltumfizikālajam stāvoklim ir dots ekspertu novērtējums un ir veikta termogrāfiskā diagnostika, kā rezultātā parasti tiek atklātas lielāko siltuma zudumu zonas, nākošais solis ir siltuma zudumus kvantitatīvi raksturojošo parametru mērījumi gan ēkas reālajos ekspluatācijas, gan laboratorijas apstākļos. Kā jau norādīts iepriekš, termogrāfija nedod kvantitatīvu priekšstatu par siltuma zudumu daudzumu, jo tiek reģistrētas tikai virsmas temperatūras, kas ir nepietiekami, lai kvantificētu, piem., siltuma caurlaidības vērtības. Tā kā dabiskos apstākļos siltuma apmaiņas process un siltuma atdeve no virsmām ir nestacionāra, tad arī papildus mērot gaisa temperatūru pētāmās konstrukcijas abās pusēs, tās siltuma caurlaidību ar apmierinošu precizitāti noteikt nevar – tās noteikšanai jāizmanto principiāli cita mērījumu tehnika.

### 2.1.2. Siltuma vadīšanas zudumi

Kad ēkas norobežojošo konstrukciju raksturīgie elementi un kritiskie defekti ir noteikti, nākamais solis tās energoefektivitātes kompleksās analīzes pieejas ietvaros ir mērījumi siltuma zudumus raksturojošo lielumu noteikšanai. Latvijas klimatiskajos apstākļos lielākā daļa no siltuma apmaiņas starp ēku un apkārtējo vidi notiek siltuma vadīšanas un konvekcijas ceļā. Starojuma

siltuma pārnesei loma parasti ir mazāka un var būt nozīmīga tikai ēkām ar būtisku caurspīdīgo norobežojošo konstrukciju daļu tās ārējā čaulā, kā arī saulainās dienās. Kā pirmo no minētajiem procesiem apskatīsim siltuma vadīšanu, to raksturojošos parametrus un to noteikšanas metodes.

Siltuma pārvades procesa pamatsakarības var atrast daudzās siltumfizikas mācību grāmatās un rokasgrāmatās, piem., (Incropera, DeWitt, 2002). Siltuma vadīšanas teorijas pamatsakarība jeb Furjē likums balstās uz fenomenoloģisko likumu, saskaņā ar kuru siltuma plūsma  $q$  nekustīgā homogēnā vidē ir proporcionāla temperatūras gradientam:

$$q = -\lambda \text{ grad } T, \quad (2.4)$$

kur  $\lambda$  – siltuma vadīšanas koeficients.

Lai iegūtu siltumvadīšanas vienādojumu, enerģijas saglabāšanās likumu pieraksta izskatā

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div } q + \dot{q}, \quad (2.5)$$

kur  $\dot{q}$  nosaka iekšējo siltuma avotu jaudas blīvumu, piem., elektrovadošā materiāla uzsilšana strāvas plūšanas laikā,  $c$  ir siltuma ietilpība un  $\rho$  – vides blīvums. Ievietojot šajā vienādojumā siltuma plūsmas izteiksmi, iegūstam siltuma vadīšanas pamatvienādojumu diferenciālā formā nekustīgai videi:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + \dot{q}, \quad (2.6)$$

ko Dekarta ortogonālajā koordinātu sistēmā var uzrakstīt šādi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.7)$$

Vispārīgā veidā nehomogēnā vidē siltumfizikālās īpašības un vienādojuma labā puse var būt atkarīgi gan no telpas punkta, gan arī no temperatūras, t.i.

$$c = c(x, y, z, T), \quad \rho = \rho(x, y, z, T), \quad \lambda = \lambda(x, y, z, T), \quad \dot{q} = \dot{q}(x, y, z, T).$$

Piem., daudziem siltuma izolācijas materiāliem siltuma vadītspēja līdz ar temperatūru nedaudz pieaug. Gadījumā, ja vides īpašības ir konstantas, vienādojums vienkāršojas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.8)$$

kur  $a = \lambda/c\rho$  ir temperatūras vadītspējas koeficients, kas parāda, cik ātri temperatūras izmaiņas izplatās materiālā. Atsevišķi var izdalīt šī vienādojuma trīs speciālus gadījumus:

- nestacionārs process bez iekšējiem siltuma avotiem (Furjē vienādojums):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.9)$$

- stacionārs process ar iekšējiem siltuma avotiem (Puasona vienādojums):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = 0, \quad (2.10)$$

- stacionārs process bez iekšējiem siltuma avotiem (Laplasa vienādojums):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2.11)$$

Dažu tipisko būvniecībā izmantojamo materiālu siltumtehniekie parametri, kas ieiet siltuma vadīšanas vienādojumos, apkopotā tabulā 2.2.

Tabula 2.2. Dažu būvniecībā izmantojamo materiālu raksturīgās siltumfizikālās īpašības.

Materiāls	Siltuma vadītspēja $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Īpatnējā siltumietilpība $c$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Blīvums $\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )
Ķieģelis	0,6	800	1500
Betons	1,7	900	2300
Ģipsis	0,22	800	900
Tērauds	84	500	7800
Minerālvate	0,04	800	15...150
Koks	0,14	1500	500
Gaiss (sausš un nekustīgs)	0,025	1000	1,2

Apskatot siltuma pārnesi kustīgā vidē, siltuma vadīšanas vienādojums (2.6) transformējas, jo parciālais atvasinājums  $\partial/\partial t$  jāaizvieto ar pilno:  $d/dt = \partial/\partial t + \vec{v}\text{grad}$ , kur  $\vec{v}$  ir vides lokālais kustības ātrums. Tad iegūstam vienādojumu:

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \text{grad } T \right) = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + \dot{q}, \quad (2.12)$$

kur loceklis  $\vec{v} \text{grad } T$  nosaka temperatūras izmaiņas konvektīvās pārneses rezultātā.

Nestacionāra siltuma vadīšanas vienādojuma viennozīmīgi atrisināšanai nepieciešami sākuma un robežnosacījumi - pirmā, otrā vai trešā veida. Apskatīsim tos uz virsmas  $x=0$  viendimensionālas nekustīgas sistēmas gadījumā (attēls 2.27). Visvienkāršākajā gadījumā uzdod konstantu temperatūru uz pētāmā apgabala robežas, jeb t.s. Dirihlē nosacījums (attēls 2.27a):

$$T(0, t) = T. \quad (2.13)$$

Otrā veida jeb Neimaņa nosacījums atbilst siltuma plūsmas uzdošanai uz robežas (attēls 2.27 b):

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q, \quad (2.14)$$

kas pie  $q=0$  raksturo termiski izolētu robežu (adiabatiskais nosacījums), caur kuru siltuma apmaiņa nenotiek (attēls 2.27c):

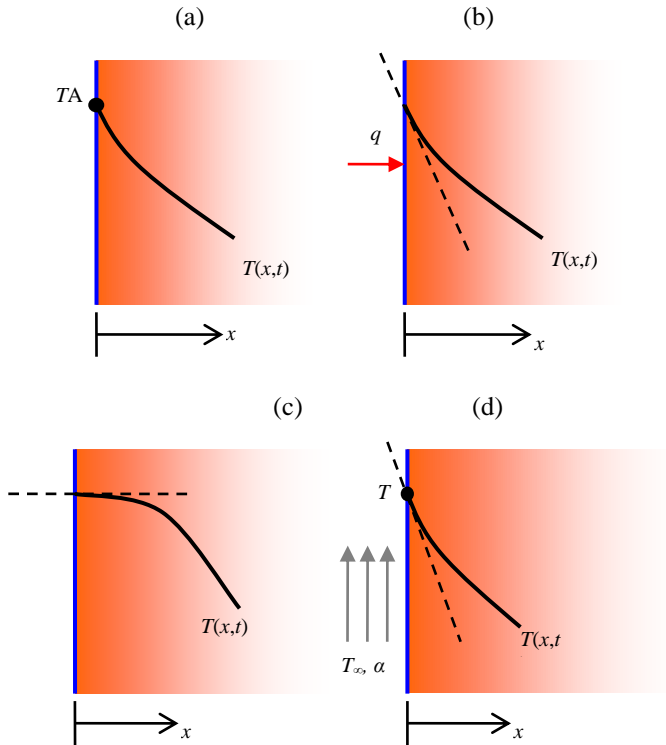
$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (2.15)$$

Jānorāda, ka, uzdodot 2. veida nosacījumus uz visām apgabala robežām, temperatūras sadalījums nav viennozīmīgi aprēķināms – vismaz uz kādas no pētāmā apgabala virsmām jāuzdod cita veida nosacījumi.

Visbeidzot, trešā veida robežnosacījums modelē konvektīvo siltuma apmaiņu starp cietā ķermeņa virsmu un apkārtējo kustīgo gāzveida vai šķidrumsa vidi ar temperatūru  $T_\infty$ , pieņemot, ka siltuma plūsma ir proporcionāla temperatūru starpībai starp virsmu un apkārtējo vidi (attēls 2.27d):

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -q = \alpha(T_\infty - T), \quad (2.16)$$

kur  $\alpha$  ir siltuma atdeves koeficients (termiskā robežslāņa siltuma pretestības apgrieztais lielums), kas atkarīgs no plūsmas rakstura, intensitātes un tajā bieži iekļauj arī starojuma siltuma atdevi.



Attēls 2.27. Siltuma vadīšanas vienādojuma robežnosacījumi uz virsmas  $x=0$ : (a) – virsmas temperatūra, (b) – siltuma plūsma, (c) – adiabatīks (siltuma izolācijas) nosacījums, (d) – konvekcijas nosacījums.

Viendimensionālā stacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem vienādojums (2.7) vienkāršojas:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0, \quad (2.17)$$

Ievērojot vienādojumu (2.4), seko, ka siltuma plūsma šādā gadījumā ir nemainīga visiem  $x$ . Ja nemainīga ir arī materiāla siltuma vadītspēja, tad var iegūt šī vienādojuma vispārīgo vienādojuma (2.17) atrisinājumu:

$$T(x) = C_1 x + C_2. \quad (2.18)$$

Integrācijas konstantes  $C_1$  un  $C_2$  var atrast no robežnosacījumiem, piem., uzdodot temperatūras  $T_1$  un  $T_2$  uz materiāla ar biezumu  $d$  abām robežām, iegūstam lineāru temperatūras sadalījumu (attēls 2.28a):

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{d} + T_1, \quad (2.19)$$

Tālāk, izmantojot iegūto temperatūras sadalījumu (2.19), no Furjē likuma (2.4) iegūstam siltuma plūsmas blīvuma izteiksmi:

$$q = \frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2). \quad (2.20)$$

Starp siltuma vadīšanu un elektrovadītspēju pastāv analogija – līdzīgi, kā elektriskā pretestība ir saistīta ar elektrovadītspēju, arī t.s. siltuma pretestība var tikt saistīta ar siltuma vadītspēju. Tā, siltuma pretestību  $R$  materiāla slānim ar biezumu  $d$  definē sekojoši:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{d}{\lambda}, \quad (2.21)$$

Savukārt, siltuma pretestību konvekcijas siltuma atdevei no virsmas nosaka atbilstoši (2.16):

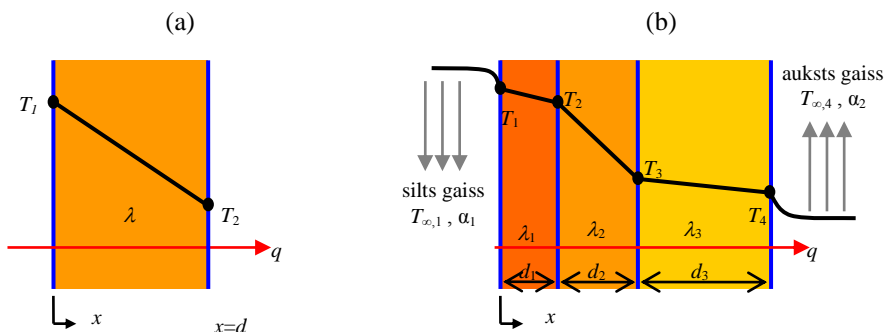
$$q = \alpha (T - T_\infty), \quad (2.22)$$

un sauc par robežslāņa termisko pretestību:

$$R = \frac{T - T_\infty}{q} = \frac{1}{\alpha}. \quad (2.23)$$

Ievērojot termisko robežslāņu siltuma pretestības uz abām plakanparalēlas konstrukcijas ārējām virsmām, var noteikt tās rezultējošo siltuma vadītspējas pretestību vairāku homogēnu materiālu slāņu gadījumā. Līdzīgi kā elektriskajās ķēdēs ar virknes slēgumu, kopējo siltuma vadītspējas pretestību aprēķina, summējot atsevišķo slāņu pretestības, piem., trīs dažādu homogēnu materiālu slāņiem, ievērojot papildus siltuma pretestības uz virsmām (attēls 2.28b):

$$R = R_{\text{virsmā},1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{virsmā},2} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.24)$$



Attēls 2.28. Temperatūras sadalījums viendimensionālā stacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem: (a) – viendabīgā materiāla slānī, (b) – trīs slāņu dažādu materiālu konstrukcijā ar termiskiem robežslāņiem.

Stacionārā gadījumā, zinot siltuma plūsmas blīvumu un temperatūru konstrukcijas abās pusēs ārpus termiskajiem robežslāņiem starpību, var aprēķināt saliktas konstrukcijas rezultējošo siltuma vadītspējas pretestību:

$$R = \sum R_i = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{q} = \frac{\Delta T}{q}. \quad (2.25)$$

Sarežģītākas konfigurācijas konstrukcijās, kuru slāņi var sastāvēt no atšķirīgu materiālu daļām (attēls 2.29), siltuma plūsma vairs nav viendimensionālā un apskatīto pieeju vairs nav iespējams izmantot. Speciālā metode, kas ļauj tuvināti noteikt šādu saliktu konstrukciju rezultējošo siltuma pretestību, ir definēta standartā (LVS EN ISO 6946, 2009) un tās lietojumi detalizēti apraksti publikācijā (Belindževa-Korkla, 2002). Heterogēnu konstrukciju rezultējošās siltuma pretestības  $R$  aprēķinu pamatā ir t.s. lielākās un mazākās siltuma zudumu pretestības ( $R_T'$  un  $R_T''$  attiecīgi) aprēķins (skat. attēlu 2.29):

$$R = \frac{R_T'' + R_T'}{2}, \quad (2.26)$$

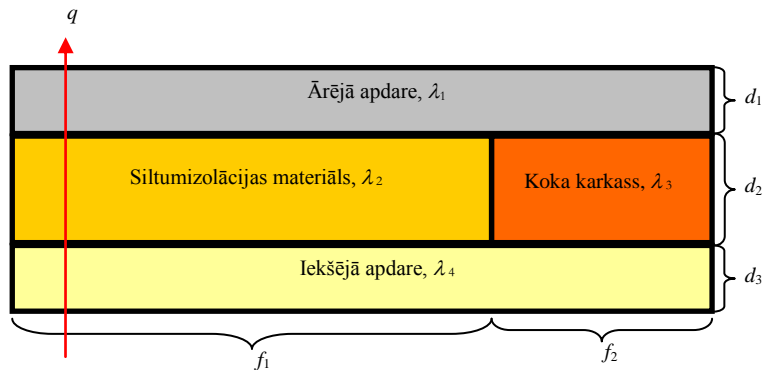
$$R_T'' = \sum_{i=1}^n R_i = R_{SI} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{SE}, \quad (2.27)$$

$$R_T' = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{f_j}{R_j}} = \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \dots + \frac{f_n}{R_n}}, \quad (2.28)$$

kur  $f_i$  ir laukumu relatīvās daļas. Materiālu siltuma pretestības  $R_i$  un  $R_j$  tiek aprēķinātas saskaņā ar formulām:

$$R_j = \sum_{i=1}^n R_i = R_{SI} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{SE}, \quad (2.29)$$

$$R_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{f_j}{R_j}} = \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \dots + \frac{f_n}{R_n}}. \quad (2.30)$$



Attēls 2.29. Heterogēnās konstrukcijas piemērs.

Papildus labojumi siltuma pretestības aprēķinam ir nepieciešami, ja norobežojošo konstrukciju risinājumos tiek lietoti mehāniskie stiprinājumi vai ir gaisa starpslāņi un spraugas

konstrukcijā. Ar to aprēķinu metodēm arī var iepazīties standartā (LVS EN ISO 6946, 2009). Nehomogēno konstrukciju aprēķinu metodes ar stiprinājumu un gaisa starpslāņu labojumiem tiek realizētas arī kā atsevišķs modulis visas ēkas siltuma bilances aprēķina programmā *HeatMod* (Džeriņš, *et. al.*, 2013).

Būvkonstrukciju aprēķinos liela nozīme ir termiskajiem robežslāņiem, kas galvenokārt ir atkarīgi no gaisa kustības intensitātes gar virsmām un raksturo siltuma atdevi no tām (2.22). Šo robežslāņu termiskās pretestības var noteikt eksperimentāli, vai arī izmantot to standartizētās vērtības. Dažādu valstu normatīvos var atrast nedaudz atšķirīgas siltuma pretestības skaitliskās vērtības, tāpēc turpmāk, ja nav norādīts citādi, izmantosim standartā (LVS EN ISO 6946, 2009) definētās vērtības, kas atkarībā no virsmas un siltuma plūsmas virziena ir apkopotas tabulā 2.3. Ēkas elementu, kas atrodas saskarē nevis ar gaisu, bet ar zemi (grīdas uz grunts, grīdas virs neapkurinātas zemgrīdas telpas, apkurināmie un neapkurināmie pagrabi), siltuma pretestības aprēķinus veic saskaņā ar standartu (LVS EN ISO 13370, 2013), kura lietojumu dažādu piemēru aprēķinos var atrast metodiskajos materiālos (Belindževa-Korkla, 2002).

Tabula 2.3. Norobežojošo konstrukciju virsmu termiskā pretestība  $R$ ,  $m^2 K W^{-1}$ .

Virsmas	Siltuma plūsmas virziens		
	uz augšu	horizontāls*	uz leju
Iekšējā	0,10	0,13	0,17
Ārējā	0,04	0,04	0,04

\* siltuma plūsmas virziens tiek uzskatīts par horizontālu, ja tas orientēts intervālā  $\pm 30^\circ$  no horizontālās virsmas

Praksē siltumtehnikajos aprēķinos bieži tiek lietots siltuma pretestības apgrieztais lielums – siltuma caurlaidības koeficients  $U$  ( $W m^{-2} K^{-1}$ ) (vecajā literatūrā sastopams arī apzīmējums  $k$ ):

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\sum R_i}, \quad (2.31)$$

kas cietā, necaurspīdīgā materiālā raksturo vadīšanas siltuma pārnesei vielā ar siltuma vadītspēju  $\lambda$  un biezumu  $d$ :

$$U_i = \frac{\lambda}{d}. \quad (2.32)$$

Sienai, kas sastāv no trīs dažādu homogēnu materiālu slāņiem, ievērojot termiskos robežslāņus (attēls 2.28b), sakarību (2.24) var pārrakstīt sekojoši:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{virsmas},1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{virsmas},2}} = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (2.33)$$

Porainiem materiāliem ar gāzes vai šķidrums ieslēgumiem, materiāliem ar gāzes starpslāņiem, kā arī daļēji vai pilnīgi caurspīdīgiem materiāliem bieži lieto t.s. efektīvās siltuma vadītspējas jēdzienu un vērtību  $\lambda_{\text{ef}}$ , jo siltuma apmaiņu tajos nosaka ne tikai molekulārā siltuma vadīšana, bet arī to sastāvā esošo šķidrums konvekcija un siltuma starojums. Līdz ar to šī efektīvā siltuma vadītspēja var būt ļoti stipri atkarīga no siltuma apmaiņas apstākļiem, it īpaši temperatūras. Zinot materiāla slāņa biezumu un siltuma caurlaidību, šo efektīvo siltuma vadītspēju var aprēķināt:

$$\lambda_{\text{ef}} = d \frac{q}{T_1 - T_2} = \frac{d}{R} = d \cdot U, \quad (2.34)$$

kur  $T_1$  un  $T_2$  ir temperatūras uz materiāla pretējām virsmām.

Ja kādā materiāla slānī (piem., gaisa spraugā) vienlaicīgi darbojas dažādi siltuma apmaiņas mehānismi (vadīšana, konvekcija un starojums), tad šī slāņa rezultējošās termiskās pretestības aprēķinam, līdzīgi kā elektrisko ķēžu aprēķinos, ļoti tuvināti var lietot paralēlā slēguma formulu:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{vad}}} + \frac{1}{R_{\text{konv}}} + \frac{1}{R_{\text{star}}} = U_{\text{vad}} + U_{\text{konv}} + U_{\text{star}}, \quad (2.35)$$

kur indeksi *vad*, *konv* un *star* norāda uz vadīšanas, konvekcijas un starojuma siltuma apmaiņas procesiem.

Attīstītās kompleksās ēku energoefektivitātes analīzes pieejas ietvaros tika veikti daudzi desmiti eksperimentālo materiālu siltuma vadīšanu un konstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu mērījumi gan stacionāros laboratorijas apstākļos karstās plāksnes iekārtās, gan arī reālos esošu ēku ekspluatācijas apstākļos. Mērījumu metodikas un to īpatnības, kā arī dažādi raksturīgie mērījumu piemēri apskatīti turpmākajās sadaļās.

### 2.1.2.1. Mērījumi stacionāros apstākļos ar karstās plāksnes metodi

Kvantitatīvi siltuma zudumus caur ēkas norobežojošajām konstrukcijām raksturo siltuma caurlaidības koeficients  $U$  ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ), kuru var aprēķināt izmantojot inženierformulas vai arī noteikt mērījumos. Gadījumā, ja konstrukcijas materiāls vai tās uzbūve nav zināma, ir nepieciešami mērījumi, kurus var veikt reālos ēku ekspluatācijas vai laboratorijas apstākļos. Kā speciālu gadījumu izdala homogēnus materiālus, kuriem ir iespējams izmantot principiāli citu siltuma caurlaidības noteikšanas metodi (2.31), zinot materiāla biezumu un nosakot tā siltuma vadītspējas pretestību stacionārā režīmā specializētās iekārtās. Viena no šādām standartizētām pieejām, kas nodrošina augstu precizitāti, realizē viendimensionālu siltuma plūsmas caur homogēnu materiālu ar noteiktu biezumu un virsmas laukumu un nodrošināšana jaudas un temperatūru reģistrēšanu stacionārā režīmā speciālajā t.s. karstās plāksnes iekārtā (angļu lit. – *guarded hot plate*).

Šī metode ir iekļauta daudzu valstu nacionālajos un starptautiskajos standartos (LVS ISO 8302, 2001; LVS EN 674, 2011; ASTM C 518, 2004) un tiek plaši pielietota plākšņveida materiālu ar siltuma pretestību  $R \geq 0,1 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$  siltuma vadītspējas noteikšanai. Izmantojot minēto metodi un atbilstošu eksperimentālo iekārtu, mērījumu kļūdu ir iespējams samazināt līdz 2%, kas ir svarīgi materiālu ar mazu siltuma vadītspēju mērījumos. Tāpat minētajos standartos ir aprakstīti arī nosacījumi eksperimentu norisei un telpām, kur notiek mērījumi. Tā, minimālās, maksimālās un vidējās (references) temperatūras, pie kurām tiek rekomendēts veikt mērījumus, ir iespējams izvēlēties saskaņā ar standartu (ASTM C 1058, 2003), bet rekomendācijas eksperimentālās iekārtas projektēšanai un izveidei, piem., dzesēšanas bloka konstrukcijai, ir dotas standartos (ASTM C 518, 2004; LVS ISO 8302, 2001).

Karstās plāksnes tipa iekārtas (piem., *Taurus*, *Holometrix*, *Hukseflux*) plaši tiek izmantotas arī dažādiem zinātniskiem eksperimentiem. Bieži tiek pētīta kāda materiāla siltuma vadītspējas atkarība no dažādiem faktoriem - references temperatūras, temperatūru starpības, mitruma ietekme

un materiālu blīvuma un sastāva. Ir konstatēts, ka ļoti liela ietekme uz siltuma izolācijas materiālu vadītspēju ir mitrumam un materiālu vadītspēja pieaug līdz ar blīvumu, bet temperatūras atkarība ir relatīvi mazāk izteikta.

LU VTPMM laboratorijā 90-to gadu beigās tika izgatavota, papildināta specifiskiem mērījumu mērķiem un aprobēta karstās plāksnes mēriekārta, kā arī izveidota atbilstoša programmatūra, ar kuru var standartizēti noteikt materiālu siltuma vadītspēju un mērīt arī materiālu siltuma ietilpību.

### 2.1.2.1.1. Metodes apraksts

Karstās plāksnes metodē materiāla siltuma vadītspējas  $\lambda$  noteikšanai tiek reģistrēts siltuma daudzums, kas izplūst no elektriski sildītas centrālās plāksnes caur simetriski tās abās pusēs novietoto pētāmā materiāla paraugu plāksnēm ar noteiktu biezumu un virsmas laukumu. Šis siltums tiek aizvadīts no plāksņu pretējām virsmām, kuras tiek dzesētas (attēls 2.30). Tāpat tiek reģistrētas arī paraugu abu virsmu temperatūras, šim nolūkam izmantojot 5 termopārus katrai no virsmām, dati no kuriem tiek vidējoji.

Augstas mērījumu precizitātes sasniegšanai temperatūrām uz parauga virsmām jābūt nemainīgām laikā. Lai nodrošinātu viendimensionālu siltuma vadīšanu, jānodrošina siltuma plūsmas perpendikularitāte pret paraugu virsmām un jānovērš siltuma zudumi caur paraugu sānu malām. Šim nolūkam izmanto kompensācijas sildītāju, kurš pa perimetru iekļauj centrālā sildītāja plāksni un nodrošina temperatūru, kas ir vienāda ar centrālās daļas temperatūru. Šos nosacījumus mērījumu praksē var nodrošināt tikai tuvināti, tādēļ aprēķinu veikšanai izmērīto temperatūru vērtības tiek vidējojas gan laikā, gan arī pa materiāla paraugu virsmām. Mērījuma norisi var sadalīt divos etapos (attēls 2.31):

- Sagatavošanas fāze. Sākumā, izmantojot jaudas regulēšanu ar atgriezeniskās saites shēmu, sasniedz uzdoto temperatūru līmeni un panāk, lai novirzes no mērījumā nepieciešamajām virsmu temperatūras vērtībām nepārsniegtu uzdotus lielumus (parasti  $\pm 0,1$  °C);
- Mērījumu fāze. Pēc kvazistacionāra stāvokļa sasniegšanas pietiekami ilgā laika periodā (parasti vairāk nekā 10 stundas) tiek uzskaitīts elektroenerģijas patēriņš centrālajā sildītājā.

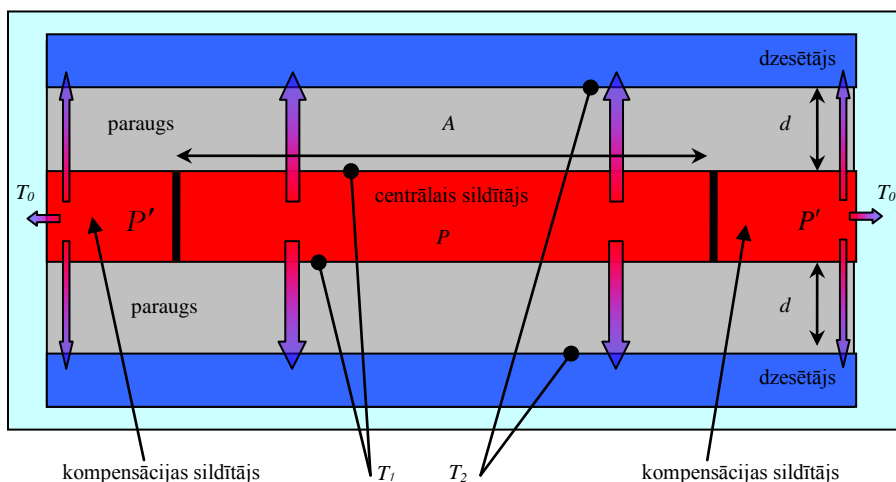
Materiāla paraugu termisko pretestību  $R$  šādā kvazistacionārā stāvoklī nosaka, sakarībā (2.20) siltuma plūsmas blīvumu izsakot caur siltuma daudzumu, laukumu un laiku, kā arī ievērojot, ka siltuma pārnese notiek uz divām pusēm:

$$R = 2S \frac{(\bar{T}_1 - \bar{T}_2)t}{N}, \quad (2.36)$$

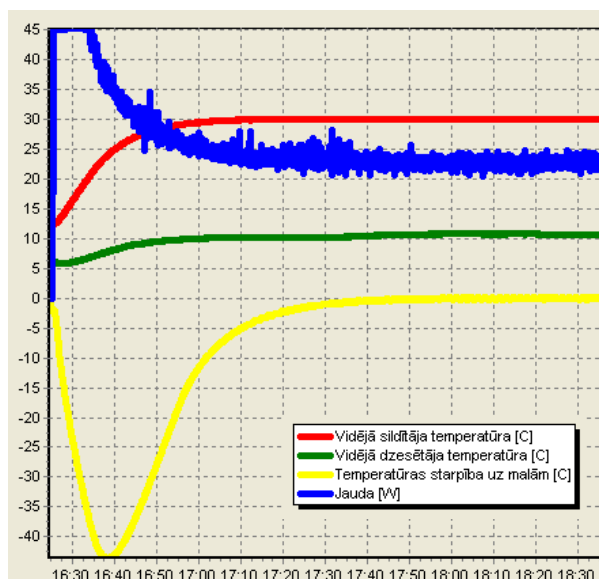
kur  $\bar{T}_1$  un  $\bar{T}_2$  – paraugu vidējošanās sildīto un dzesēto virsmu temperatūras (°C),  $N$  – kopējais centrālajam sildītājam pievadītais siltuma daudzums (J),  $S$  – sildplates virsmas laukums ( $m^2$ ) un  $t$  – mērījumu ilgums (s). Ja paraugu materiāls ir viendabīgs, tad no (2.36) siltuma vadīšanas koeficientam  $\lambda$  seko:

$$\lambda = \frac{Nd}{2S(\bar{T}_1 - \bar{T}_2)t}, \quad (2.37)$$

kur  $d$  – paraugu biezums (m). Formulās (2.36 un 2.37) izmantotās vidējās temperatūras tiek iegūtas sekojošā veidā: vispirms vidējo katra atsevišķa temperatūras sensora mērvērtības uzdotajā laika periodā, bet pēc tam aprēķina vidējās vērtības no šādi noteiktajām temperatūrām katrai parauga virsmai, t.i., divām siltajām un divām aukstajām virsmām. Pēc tam tiek aprēķinātas attiecīgi silto un auksto virsmu vidējās temperatūras.



Attēls 2.30. Karstās plāksnes iekārtas šķērsriezuma shēma ar raksturīgo parametru norādēm.



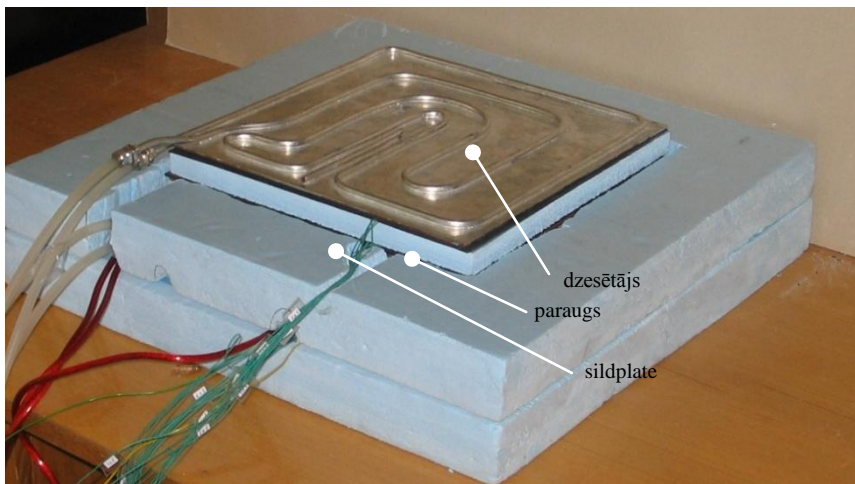
Attēls 2.31. Temperatūru un jaudas stabilizācija mērījumos ar karstās plāksnes metodi.

Šīs metodes priekšrocība ir iekārtas kompakts un iespēja strādāt ar relatīvi nelielām temperatūru starpībām, bet tajā siltuma pretestību var noteikt tikai plakanparalēliem paraugiem, kuru nevienbūtību (piem., poru un piemaisījumu) raksturīgie izmēri ir daudz mazāki par paraugu biezumu  $d$ .

Kā redzams attēlā 2.32, iekārta ir līdzīga „sendvičam” un sastāv no vairākām kārtām. Vidējā slānī ir sildplate, kurai tiek pievadīta jauda  $P$  (W):

$$P = N/t. \quad (2.38)$$

Tā uztur konstantu temperatūru  $T_1$  uz abu paraugu iekšējām virsmām. Savukārt, uz parauga ārējām virsmām stabilu temperatūru  $T_2$  uztur dzesētājs, caur kuru izvītas dzesējošā šķidruma – ūdens caurules.



Attēls 2.32. Karstās plāksnes iekārtas mērīšanas bloka augšējā puse atsegtā veidā.

Siltuma izplatīšanos tikai vienā virzienā jeb viendimensionālu siltuma plūsmu panāk ap centrālo sildītāju izvietojot kompensācijas sildītāju, kas, pieskaņojot jaudu  $P'$  (attēls 2.33), uztur uz tam pieguļošajām paraugu virsmām tādu pašu temperatūru kā centrālais sildītājs. Līdz ar to temperatūras gradients šķērsvirzienā parauga centrālajā daļā ir 0. Parasti iekārtu no ārpuses arī izolē, lai samazinātu siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi, kuras temperatūra  $T_0$ , jo kompensācijas sildītājā izdalītajai jaudai  $P'$  ir jākompensē siltuma zudumi šķērsvirzienā.

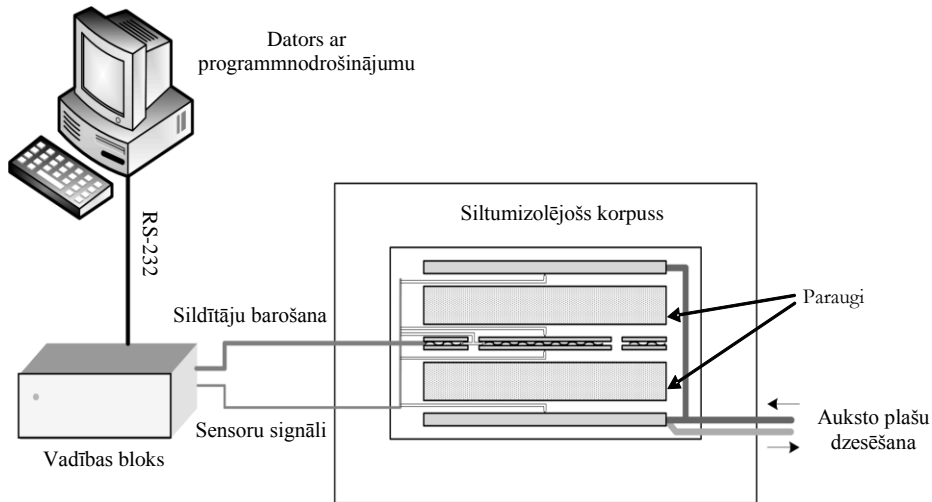
Izveidotās mērsistēmas galvenās komponentes parādītas attēlā 2.33. Tā sastāv no:

- datora ar vadības un datu apstrādes programmu;
- elektroniskā vadības bloka mērsensoru signālu nolasīšanai un apstrādei, kā arī sildplāksnes jaudas automātiskai regulēšanai, uzturot nepieciešamo temperatūru;
- mērīšanas bloka ar karstās plāksnes iekārtu (attēls 2.33).

Mērāmie paraugi ir ievietoti starp sildītāju un dzesētāja plāksnēm (attēls 2.32), savukārt, šī konstrukcija, siltuma zudumu minimizēšanai, ir ievietota siltumizolējoša materiāla korpusā.

Materiālu paraugu, ko ievieto karstās plāksnes iekārtā, izmēri ir  $30 \times 30$  cm (sildplāksnes centrālās daļas izmēri ir  $15 \times 15$  cm) un tiem ir jābūt ar plakanparalēlām virsmām, jo biezuma nevienmērība var būtiski ietekmēt temperatūras uz to virsmas un tieši iespaidot siltuma vadītspējas

aprēķina precizitāti atbilstoši formulai (2.37). Paraugu pieļaujamais maksimālais biezums ir atkarīgs no to materiāla siltuma vadītspējas. Ja parauga siltuma vadītspēja ir liela, tad, ņemot pārāk plānus paraugus sildītāja jauda var izrādīties nepietiekama, lai nodrošinātu uzdotu temperatūru starpību. Savukārt temperatūras starpības samazinājums palielina nosakāmo lielumu kļūdu. Veicot mērījumus bieziem materiālu paraugiem ar lielu siltuma pretestību, var pieaugt siltuma plūsmas nevienādība paraugu malu zonās, kā rezultātā palielinās jaudas mērījuma un tādējādi arī gala rezultātu relatīvā kļūda.



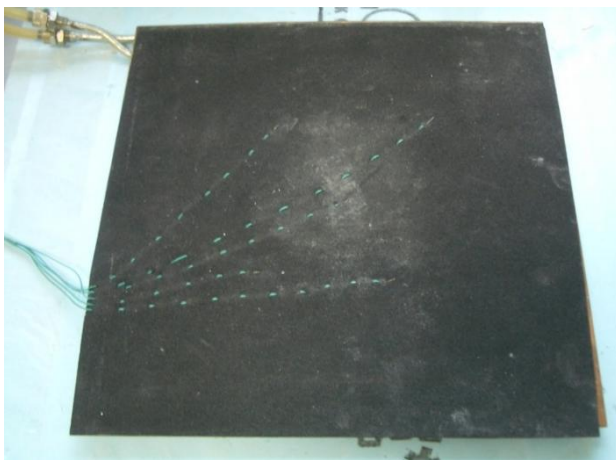
Attēls 2.33. Karstās plāksnes mērsistēmas galvenās komponentes.

Temperatūru izkliedes samazināšanai izšķiroša nozīme ir termopāru kontaktam ar parauga virsmām un termiskajam kontaktam starp virsmām – gaisa spraugas būtiski palielina siltuma pretestību. Kā redzams attēlā 2.34, termopāru vadi šķērso paraugu virsmas, tādēļ to šķērsgriezums jāizvēlas pēc iespējas mazāks (veiktajos eksperimentos <0,8 mm). Viens no paņēmieniem, kā šādos apstākļos nodrošināt vienmērīgu kontaktu starp parauga un plašu virsmām ir elastīgu starpliku no porģumijas lietošana ar tajā iestrādātiem termopāru vadiem, kas ir ieteikts standartā (LVS EN ISO 8302, 2001) un realizēts izveidotajā eksperimentālajā iekārtā (attēls 2.34). Tas būtiski atvieglo arī praktisko eksperimenta veikšanu, jo visi termopāri kopā ar starplikām tiek vienlaicīgi uzlikti uz virsmām, nodrošinot mērījumus vienās un tajās pašās vietās. Ja temperatūru mērījumi tiek veikti uz paraugu virsmām, tad starplikas klātbūtne tieši neietekmē parauga siltuma pretestības aprēķinu, tomēr tā palielina kopējo sistēmas termisko pretestību.

Karstās plāksnes mēriekārtas darbību regulē vadības bloks (attēls 2.33), kas arī veic datu saņemšanu un mērījumu rezultātu nosūtīšanu uz datoru, izmantojot protokolu RS-232. Speciāli izveidotā datorprogramma *Isis* ļauj vadīt procesu, mainot dažādus iestādījumus, kā arī attēlot eksperimentālos datus grafiski vai tabulas veidā, saglabāt tos tālākai pēcapstrādei un veikt nepieciešamo lielumu aprēķinus. Detalizētāka informācija par vadības bloka uzbūvi un tā darbības

principiem sniegta (Javaitis *et.al.*, 2005). Apskatīsim tikai dažas būtiskās vadības bloka un vadības datorprogrammas iespējas un īpatnības.

Vadības bloka galvenā sastāvdaļa ir mikrokontrolieris, kas veic termopāru multipleksēšanu, analogu-ciparu un ciparu-analogu pārveidotāja vadību, izmērīto datu apstrādi, sildītāja jaudas regulēšanu un nodrošina komunikācijas ar datoru. Temperatūru un citu aprēķiniem nepieciešamo lielumu mērīšanu nodrošina analogu-ciparu pārveidotājs, saņemot signālus no sensoriem, kas iepriekš tiek pastiprināti vai pavājināti, kā arī filtrēti. Centrālajam sildītājam regulācija tiek veikta, pieskaņojot tā jaudu tā, lai vidējā temperatūra uz parauga siltajām pusēm maksimāli tuvinātos mērsistēmas vadības programmā uzdotajai temperatūras vērtībai. Patērētā jauda tiek noteikta, mērot spriegumu uz centrālā sildītāja un caur to plūstošo strāvu. Malu (kompensācijas) sildītāja regulācijai tiek izmantoti termopāru dati, pieskaņojot jaudu tā, lai temperatūru starpība uz centrālā un malu sildītāju malām tiektos uz nulli. Vienā mērījumu ciklā vadības bloks nolasa visu 24 termopāru mērījumus, centrālā sildītāja sprieguma un strāvas vērtības, mitruma vērtību un nosūta tos datoram, kā arī pārreķina jaunas sildītājiem uzdodamās jaudas vērtības. Viens šāds mērīšanas/regulēšanas cikls ilgst aptuveni vienu sekundi.



*Attēls 2.34. Porgumijas slānis ar iestrādātiem termopāriem un izvadītiem termoelementiem.*

Lai vadītu un kontrolētu karstās plāksnes iekārtas darbību un noteiktu paraugu siltuma caurlaidības pretestību, attiecīgā materiāla siltuma vadītspēju, kā arī citus mērījumus eksperimentāli nosakāmos lielumus, tiek izmantota speciālā datorprogramma, kas nodrošina komunikācijas ar vadības bloku. Ar programmas palīdzību iespējams uzstādīt sildītāja un mērījuma režīma kontroles parametrus – vidējošanas un ieraksta laika soli, mērījumu ilgumu, kā arī sildītāja temperatūru vai sildītāja jaudu un tās izmaiņu amplitūdu. Atsevišķi jānorāda ekstremāli pieļaujamas sildītāja un dzesētāja temperatūras. Ja izmērītās temperatūras ir ārpus norādītā diapazona, tad mērījums tiek pārtraukts un sildītājs izslēgts. Šie uzstādījumi ir būtiski darba drošības apsvērumu dēļ. Mērījuma izdarīšanas laikā tiek apkopoti temperatūru, spriegumu, jaudas, siltuma pretestības, kā arī siltuma vadītspējas dati, kas var tikt atspoguļoti reālajā laikā tabulās vai grafikos un arī saglabāti.

### 2.1.2.1.2. Raksturīgie mērījumu piemēri

Karstās plāksnes iekārtā ir veikti daudzi standartizēti būvniecībā izmantojamo materiālu siltuma pretestības  $R$  un siltuma vadīšanas koeficienta  $\lambda$  mērījumi. Pateicoties ērtai uzbūvei un plašām papildus iespējām, iekārta tika lietota arī dažādiem nestandarta materiālu siltuma ietilpības pētījumiem.

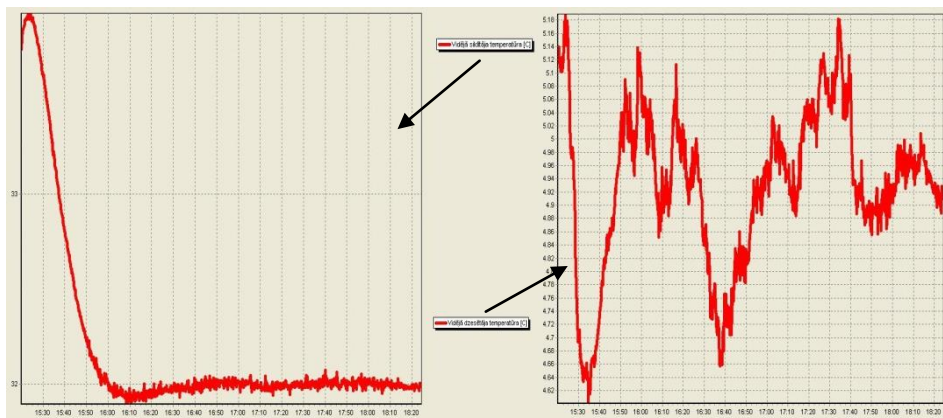
Mēriekārtas un programmatūras darbības, kā arī precizitātes pārbaudes nolūkos sākotnēji tika veikta eksperimentu sērija un iegūtie siltuma vadītspējas dati salīdzināti ar zināmo parauga siltuma vadīšanas koeficientu. Par paraugmateriālu tika izvēlēts būvniecībā plaši izmantojamais putuplasts, kura siltumfizikālie parametri ir atrodami tā ražotāja tehniskajā specifikācijā. Siltuma vadītspēja tādiem materiāliem atkarībā no blīvuma un ražošanas tehnoloģijas ir robežās no 0,030 līdz 0,040  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

Veiktajiem verifikācijas eksperimentiem tika izmantots putu polistirola *Styrodur* paraugs ar ražotāja definēto siltuma vadītspēju 0,030  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Parauga siltuma pretestība saskaņā ar formulām (2.31 un 2.32) ir  $R = d/\lambda = 0,02/0,03 = 0,67 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ . Siltās virsmas temperatūra tika uzstādīta konstanta un pievadītā jauda attiecīgi regulēta, savukārt, dzesētāja temperatūra ir atkarīga no svārstībām pilsētas ūdens apgādes tīkla, pie kā dzesēšanas iekārta ir pievienota. Abu virsmu temperatūru izmaiņas laikā ir parādītas attēlā 2.35. Kā redzams, siltās puses temperatūra pēc noteikta laika kļūst kvazistacionāra un ir lietojama aprēķinu veikšanai, bet aukstajā pusē ir vērojamas neregulāras temperatūras svārstības, kas konkrētajā gadījumā nebija būtiskas ( $\pm 0,4^\circ\text{C}$ ), precizitāti var uzlabot stabilizējot dzesēšanas šķidruma temperatūru.

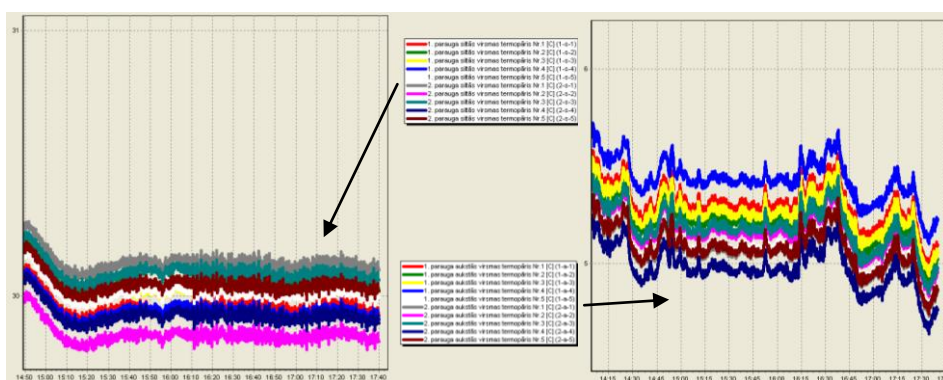
Virsmu temperatūras tiek iegūtas, vidējojot visu 10 termopāru rādījumus uz abām siltajām un attiecīgi 10 termopāru rādījumus uz abām aukstajām virsmām. Kā redzams no attēla 2.31, termopāru rādījumu izkliede ir mazāka par  $0,4^\circ\text{C}$ , bet sākotnējos eksperimentos, nelietojot porgumijas starpslāņus ar tajos ievītajiem termopāriem, izkliede sasniedza pat  $1^\circ\text{C}$ . Ar porgumijas starplikas palīdzību (attēls 2.34) tika būtiski samazināta papildus gaisa spraugas siltuma pretestība, kas iepriekš veidojās starp paraugu un sildītāju vai dzesētāju virsmām.

Ir svarīgi novērtēt temperatūras gradientus, kas izraisa siltuma plūsmu (2.4) centrālā sildītāja tuvumā un pārlicināties, ka zudumi uz tā malām ir maznozīmīgi. Šim nolūkam izmanto iekārtā speciāli iestrādāto termopāru temperatūru rādījumu starpību starp centrālo un kompensācijas sildītāju, un visos eksperimentos šī starpība bija tuva nullei (attēls 2.35). Ja ņem vērā, ka attēlotā starpība starp abiem sildītājiem ir summa no astoņām starpībām (katrā sildītājā ir ievietoti 8 termopāri), tad var apgalvot, ka kompensācijas sildītāja regulēšana notiek ļoti precīzi.

Raksturīgs eksperimentu gaitā iegūto sildītāja jaudas, vidējo sildītāja un dzesētāja temperatūru, kā arī temperatūras starpības starp centrālo un kompensācijas sildītājiem datu piemērs (ar sildītāja iestādīto temperatūru  $30^\circ\text{C}$ ) parādīts attēlā 2.37. Kā redzams, jau pēc nepilnām 2 stundām process kļūst kvazistacionārs un var tikt noteikta materiāla siltuma vadītspēja (attēls 2.38), kas šajā mērījumā tika noteikta  $\lambda = 0,034 \pm 0,005 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ , kura kļūdas robežās sakrīt ar ražotāja sniegtajiem datiem.



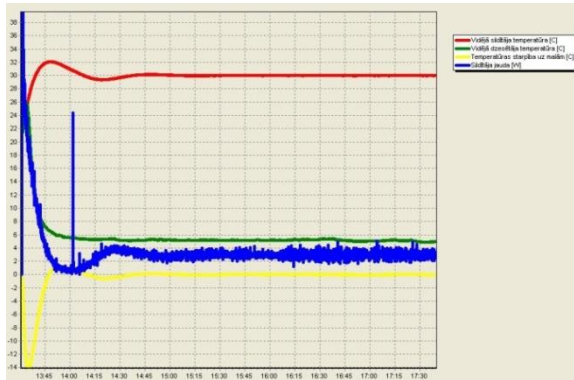
Attēls 2.35. Siltās un aukstās virsmas vidējās temperatūras atkarībā no laika.



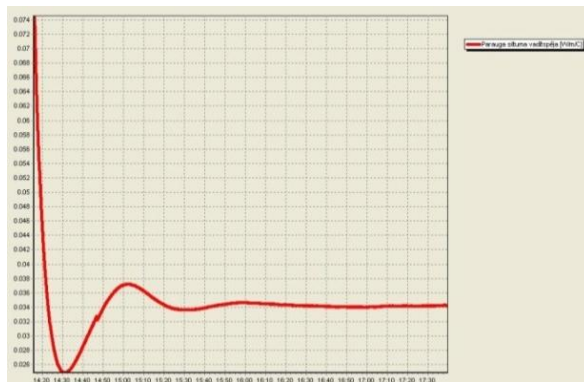
Attēls 2.36. Temperatūras rādījumu izkļiede parauga siltajā un aukstajā pusē.

Vispārīgā gadījumā materiālu siltuma vadītspēja ir atkarīga no daudziem faktoriem, t.sk. no temperatūras (attēls 2.38). Bet lielākajai daļai cietu materiālu šī atkarība nav būtiska un pie temperatūrām 18...25 C ar karstās plāksnes iekārtu to nav iespējams novērot. Līdz ar to, atkārtojot eksperimentus ar putuplasta paraugiem pie dažādām temperatūru starpībām, vidējām parauga temperatūrām, kā arī parauga biezumiem, rezultātiem kļūdas robežās ir jāsakrīt. Rezultāti, kas iegūti atšķirīgā biezuma putu polistirola *Styrodur* paraugiem pie atšķirīgiem temperatūru iestādījumiem, ir apkopoti tabulā 2.4. Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka eksperimentu rezultāti labi sakrīt ar ražotāja deklarēto siltuma vadīšana koeficienta vērtību un iekārta nodrošina mērījumu rezultātus ar praktiskiem lietojumiem pietiekamu precizitāti.

Kā vēl vienu piemēru var minēt mērījumus būvniecībā plaši izmantojamā ģipškartona plāksnēm. No materiāla *Knauf Mini* ar standarta biezumu 1.25 cm tika izgriezti četri karstās plāksnes” iekārtas izmēriem atbilstoši paraugi ar laukumu 0.09 m<sup>2</sup> (attēls 2.39), kas tika ievietoti pa divi katrā no dzesētāja pusēm, tādējādi kopējais biezums testējamā materiāla paraugam katrā pusē sasniedza 2.5 cm. Starp ģipškartona slāņiem tika ievietoti papildus termopāri temperatūras kontrolei, to rādījumi tika izmantoti abu slāņu siltuma caurlaidības koeficienta vērtības salīdzināšanai. Labāka termiskā kontakta nodrošināšanai un iespējamā gaisa starpslāņa novēršanai plāksnes tika pietiekami slogotas (attēls 2.40).



Attēls 2.37. Sildītāja jauda, vidējās siltās un aukstās puses temperatūras un temperatūru starpība starp centrālo un kompensācijas sildītāju malām vienā no eksperimentiem atkarībā no laika.



Attēls 2.38. Parauga siltuma vadītspējas aprēķinātā vērtība vienā no eksperimentiem atkarībā no laika.

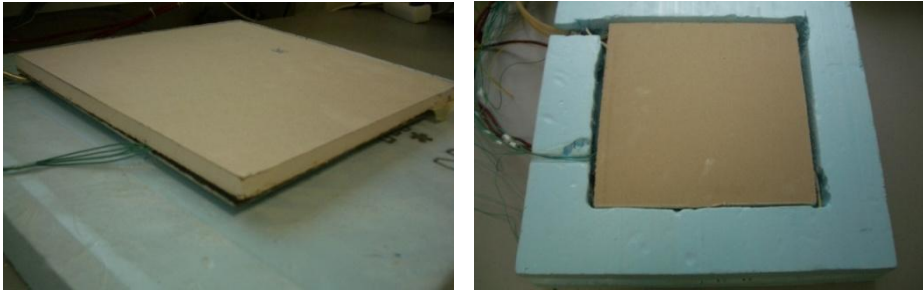
Tabula 2.4. Mērījumu rezultāti putuplasta paraugam.

Nr	Parauga biezums $d$ , m	Temperatūru starpība $\Delta T$ , °C	Vidējā temperatūra $T$ , °C	Siltuma vadītspēja $\lambda$ , $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Siltuma pretestība $R$ , $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$
1	0,0262±0,0001	30,1±0,24	19,9±0,24	0,034±0,006	0,78±0,14
2	0,0262±0,0001	35,0±0,24	22,5±0,24	0,034±0,005	0,77±0,12
3	0,0262±0,0001	40,2±0,24	25,2±0,24	0,031±0,005	0,84±0,14
4	0,0183±0,0001	22,3±0,24	21,8±0,24	0,034±0,006	0,54±0,09
5	0,0104±0,0001	23,2±0,24	23,4±0,24	0,034±0,003	0,31±0,03

Veicot temperatūras mērījumus ne tikai uz materiāla siltās un aukstās puses, bet arī pa vidu starp diviem ģipskartona slāņiem, katra slāņa noteiktā siltuma vadītspēja nepārsniedza visam paraugam kopumā noteikto kļūdas robežas, kas norāda uz labu termisko kontaktu starp materiāla slāņiem. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā parauga siltuma vadītspēja ir ievērojami lielāka par putu polistirola vadītspēju, kas nozīmē arī lielāku sildītājam pievadīto jaudu (2.37), tas atspoguļots arī

temperatūru un jaudas stacionārajos mērījumos (attēls 2.41). Ģipškartona parauga mērījumā tika noteikts siltuma caurlaidības koeficients  $\lambda = 0,21 \pm 0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , kas labi sakrīt ar ražotāja uzdoto vērtību  $\lambda = 0,22 \dots 0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

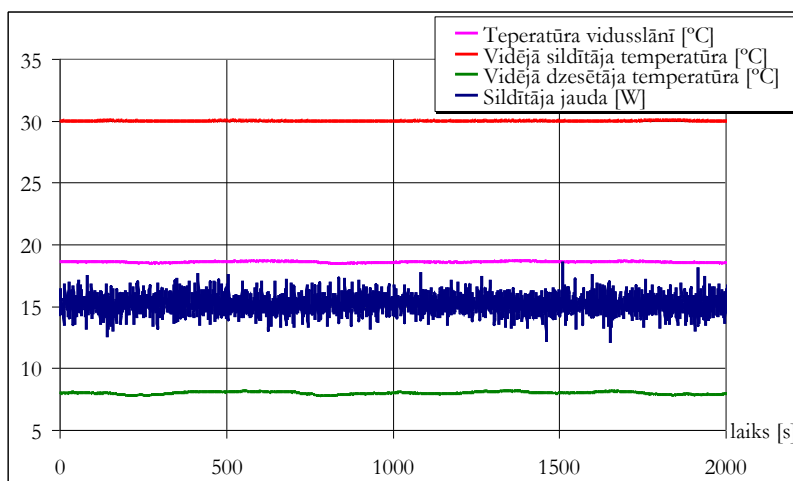
Iekārta tika izmantota, lai noteiktu arī citu siltuma izolācijas materiālu (piem., inovatīvs ar silīcija aerogēlu pildīts vatelīna materiāls vai presētas kaņepju plāksnes) un dažādu celtniecības materiālu (piem., keramikas plāksnes) siltuma vadītspēju. Dažādo materiālu mērījumu rezultāti apkopoti 3. nodaļā.



Attēls 2.39. Karstās plāksnes iekārtā ievietoti ģipškartona paraugi.



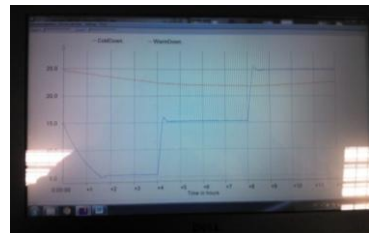
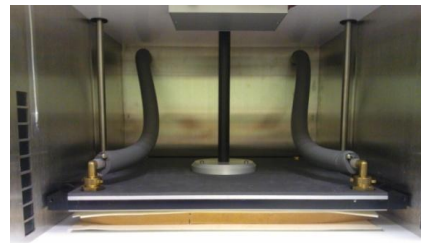
Attēls 2.40. Papildus svars nodrošina nepieciešamo termisko kontaktu starp materiāla slāņiem.



Attēls 2.41. Sildītāja jaudas un temperatūru mērījumi stacionārā režīmā divslāņu paraugam.

Regulējot karstās plāksnes iekārtas sildītāju tādā veidā, lai uzturētu konstantu temperatūru parauga siltajā pusē, tiek nodrošināta tuvināti stacionāra siltuma apmaiņa, analītiskajos aprēķinos tiek izmantots atbilstošs matemātisks modelis (skat. iepriekš), tomēr tas nav vienīgais veids, kā pielietot izveidoto iekārtu. Nākamajā sadaļā apskatīsim principiālu citu pieeju nestacionāra procesa gadījumā, ko var izmantot materiālu siltuma ietilpības  $c$  un temperatūras vadītspējas  $a$  noteikšanai.

Otra plaši izplatīta metode standartizētai materiālu siltuma vadītspējas noteikšanai ir līdzīga – uz plakanparalēla parauga pretējām virsmām tiek nodrošināta uzdots temperatūru starpība (parasti  $10^{\circ}\text{C}$ ), bet, atšķirība no iepriekš aprakstītās pieejas, ar siltuma plūsmas mērītāju tiek tieši noteikts plūsmas blīvums caur paraugu. Arī šīs iekārtas uzbūve ir standartizēta atbilstoši LVS ISO 8301, 2001. LU VTPMM laboratorijā 2013.g. tika uzstādīta un mērījumos intensīvi tiek izmantota firmas *Armgate* uz *Taurus TCA 500-PX* pamatbloka bāzes izgatavota iekārta (attēls 2.42). Nepieciešamo dzesēšanu nodrošina Peltjē elementi. Arī šajā iekārtā programmatūra nodrošina automātisku mērījumu vadību, datu uzkrāšanu un testēšanas pārskata sagatavošanu. Ierobežojums pētījumos ir tas, ka nav iespējams uzdot nestandarta jaudas maiņas režīmus, kas ir iespējami pašu izgatavotajā karstās plāksnes iekārtā, bet priekšrocība ir iespēja sasniegt augstāku mērījumu precizitāti un automātiski realizēt mērījumu sērijas pie dažādām vidējām paraugu temperatūrām.



Attēls 2.42. Materiālu siltuma vadītspējas mēriekārta *Taurus TCA 500-PX*.

### 2.1.2.1.3. Karstās plāksnes iekārtas izmantošana materiālu siltuma ietilpības noteikšanai

Kaut arī karstās plāksnes iekārta ir veidota saskaņā ar standartu (LVS ISO 8302, 2001) un tā pamatā ir paredzēta siltuma vadītspējas mērījumu veikšanai, tās daudzfunkcionālā uzbūve un programmējams vadības bloka kontrolieris ļauj izmantot iekārtu arī citiem pētnieciskiem mērķiem, t.sk. arī nestacionāra siltuma vadīšanas procesa realizācijai.

Pilnīgākai materiāla siltumfizikālo īpašību raksturošanai nestacionāros apstākļos ir nepieciešams zināt arī tā temperatūras vadītspēju  $a = \lambda/c\rho$  (2.8), ko var noteikt, izmantojot harmoniskās (sinusoidālās) temperatūras svārstības uz vienas no parauga virsmām - tā nodrošināšanai kalpo periodisks sildīšanas režīms.

Ņemot vērā karstās plāksnes iekārtas uzbūvi, siltuma apmaiņas procesu var uzskatīt par viendimensionālu. Nestacionārā gadījumā bez iekšējiem siltuma avotiem to apraksta Furjē vienādojums (2.9). Gadījumā, ja materiāla parametri ir konstanti un sildītāja jauda laikā mainās sinusoidāli, tad atrisinājumu var meklēt kompleksā formā  $T = T_C(x) + T(x)e^{i\omega t}$ , kur  $i = \sqrt{-1}$  un  $\omega$  ir cikliskā frekvence. Tad no siltuma vadīšanas vienādojuma iegūstam:

$$\left( i\omega T - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) e^{i\omega t} = a \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2}, \quad (2.39)$$

ko var sadalīt divos neatkarīgos vienādojumos:

$$i\omega T - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2} = 0. \quad (2.40)$$

Pirmais vienādojums ietver tikai temperatūras svārstību amplitūdu un fāzi, bet otrais apraksta stacionāru siltuma vadīšanu. Tādējādi sinusoidāls iekārtas darbības režīms var tikt izmantots materiāla temperatūras vadītspējas noteikšanai.

Ievēdot apzīmējumu:  $\tilde{a}^2 = i\omega/a$ , siltuma vadīšanas vienādojuma (2.39) atrisinājums ir šāds:

$$T(x) = C_1 e^{\tilde{a}x} + C_2 e^{-\tilde{a}x}. \quad (2.41)$$

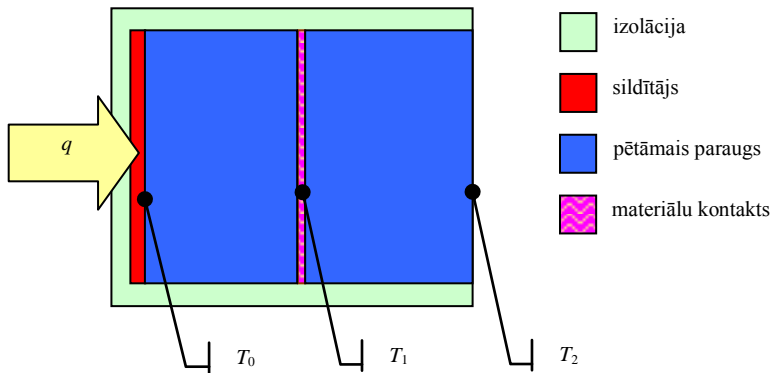
Viena materiāla gadījumā ir nepieciešami trīs vienādojumi nezināmo  $C_1, C_2, \tilde{a}$  atrašanai, t.i. ir nepieciešams noformulēt trīs robežnosacījumus.

Ir iespējams izmantot dažādas pieejas  $\tilde{a}$  noteikšanai, piem., pārejas procesa parametru mērījumus pēc sildītāja izslēgšanas vai mērījumus vienam materiāla slānim. Pirmajā gadījumā ir nepieciešama iekārtas pilnīgā siltuma izolācija, kas praksē ir ļoti grūti realizējama, bet otrajā – siltuma plūsmas blīvuma mērījumi. Abas metodes ir lietojamas materiālu temperatūras vadītspējas un siltumietilpības noteikšanai un to matemātiskais aparāts, kā arī precizitātes novērtējumi ir detalizēti apskatīti publikācijā (Timuhins *et.al.*, 2006).

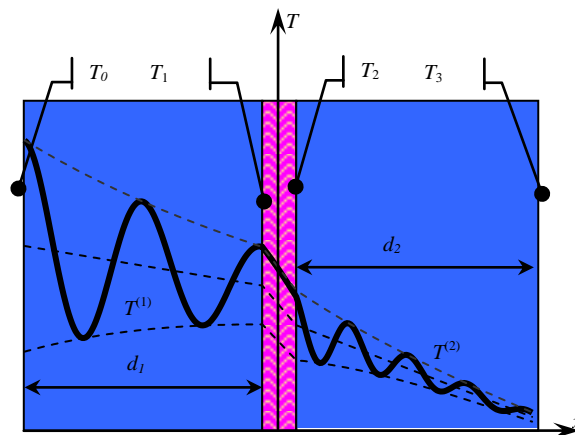
Vēl viena no iespējamām karstās plāksnes iekārtas konfigurācijām parametra  $\tilde{a}$  noteikšanai ir shematiski parādīta attēlā 2.43. Tā sastāv no diviem pētāmā materiāla slāņiem, kas ievietoti starp sildītāju un dzesētāju, uz paraugu virsmām un starp tiem periodiskā procesā tiek mērītas temperatūras  $T_0, T_1$  un  $T_2$ . Šī metode tika izvēlēta eksperimentu sēriju veikšanai, jo ļauj noteikt materiāla temperatūras vadītspēju tikai uz viena parametra – temperatūras mērījumu datu bāzes.

Aprakstot eksperimentu ar diviem vienādiem materiāla slāņiem (attēls 2.44), temperatūru sildītājam tuvākajā paraugā apzīmēsīm ar  $T^{(1)}(x)$ , bet nākamajā, pie dzesētāja novietotajā materiālā, ar  $T^{(2)}(x)$  - skat. attēlu 2.44. Pie nosacījumiem, ka koordinātu sistēmas sākums ir izvēlēts starp materiālu slāņiem, uz robežām temperatūras ir zināmas un temperatūras sadalījums tiek meklētas šādā izskatā:  $T^{(1)}(x) = C_1 e^{\tilde{a}_1 x} + C_2 e^{-\tilde{a}_1 x}$ ,  $T^{(2)}(x) = C_3 e^{\tilde{a}_2 x} + C_4 e^{-\tilde{a}_2 x}$ , periodisko procesu apraksta šāda vienādojumu sistēma:

$$\begin{cases} T^{(1)}(-d_1) = T_0, & T^{(2)}(d_2) = T_3 \\ \lambda_1 \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda_2 \frac{\partial T^{(2)}}{\partial x} \Big|_{x=0}, & R \lambda_1 \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=0} = T^{(1)}(0) - T^{(2)}(0) \end{cases} \quad (2.42)$$



Attēls 2.43. Shēma materiālu temperatūras vadītspējas noteikšanai, izmantojot divus paraugus.



Attēls 2.44. Temperatūras sadalījuma divos paraugos ar kontaktzonas starpslāni shematisks attēlojums.

Šajos eksperimentos ir svarīga nezināmā termiskā kontakta zonas, kas veidojas starp negludām virsmām, pretestības noteikšana. Novērtējumi parāda, ka kontakta pretestība starp betona virsmām ir  $R \approx 0,04 \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$  un tās ietekme uz periodisku režīmu ir nenozīmīga ja  $\rho_g c_g < \rho_m c_m$ ;  $\lambda_g > \lambda_m$ , kur indekss  $g$  norāda uz gaisu, bet  $m$  – uz pētāmo materiālu. Literatūrā (Lienhardt, Lienhardt, 2003) minēta vēl mazāka kontakta pretestība starp keramiskām virsmām atkarībā no to raupjuma:  $R = 3 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$ , kas praktiski neietekmē temperatūras lēcieni.

Neievērojot kontaktpretestību un pieņemot, ka vidējā temperatūra starpslānī ir vienāda ar eksperimentāli noteikto  $T_2$ :  $T^{(1)}(0)+T^{(2)}(0)=2T_2$ , iegūstam vienādojumu  $\tilde{a}_2$  noteikšanai:

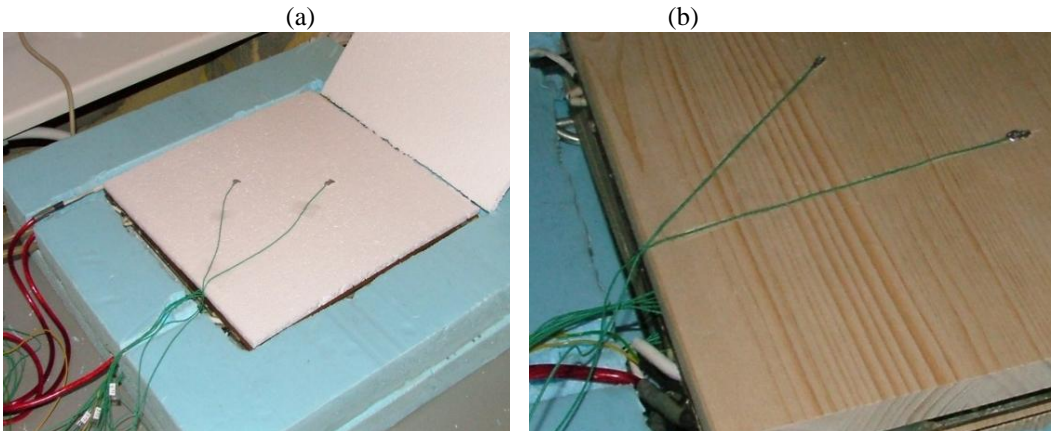
$$Q_1 = -\frac{\lambda_2 \tilde{a}_2 (T_3 - T_2 \cosh(\tilde{a}_2 d_2))}{\sinh(\tilde{a}_2 d_2)}, \quad (2.43)$$

kur siltuma plūsma starp slāņiem ir  $Q_1 = -\lambda_1 \tilde{a}_1 (T_2 \cosh(\tilde{a}_1 d_1) - T_0) / \sinh(\tilde{a}_1 d_1)$ . Vienādu materiālu gadījumā  $\tilde{a}_1 d_1 = \tilde{a}_2 d_2 = \tilde{a} d$  un vienādojums (2.43) būtiski vienkāršojas:

$$2T_2 \cosh(\tilde{a} d) = T_0 + T_3. \quad (2.44)$$

Tādējādi parametra  $\tilde{a}$  noteikšanai ir nepieciešami tikai temperatūru mērījumi uz materiālu robežām un starpslānī. Apskatītās pieejas matemātiskā modeļa detalizētāks apraksts, jūtīgums pret dažādiem parametriem un precizitāte, kā arī lietojumi eksperimentāliem pētījumiem ir apskatīti darbā (Timuhins *et.al.*, 2006).

Praksē nodrošināt labu termisko kontaktu un samazināt kontaktpretestību divu paraugu kontaktzonā ir iespējams, izvēloties materiālus ar iespējami gludākām virsmām un tos mehāniski saspiežot (attēls 2.45). Mīkstu materiālu, piem., putuplasta, gadījumā termopāri, kas paredzēti mērījumiem starp diviem paraugiem, un to vadi var tikt ievietoti bez papildus apstrādes, tos iespiežot materiālā (attēls 2.45 a). Savukārt, temperatūras mērījumiem starp diviem cietāka materiāla paraugiem jāizveido kanāli vienā no slāņiem, kur tiek ievietoti termopāru vadi, tādējādi izslēdzot gaisa spraugas rašanos (attēls 2.45 b).



Attēls 2.45. Termopāru un to vadu ievietošana starp diviem materiāla slāņiem uz putuplasta virsmas (a) un izgrieztajos kanālos koka plāksnē (b).

Cits svarīgs nosacījums mērījumiem ar diviem paraugu slāņiem periodiskā sildītāja darbināšanas režīmā ir pareizi novērtēt un izvēlēties to biežumus atkarībā no materiāla siltuma vadītspējas, lai nodrošinātu pietiekamu periodiskā signāla svārstību amplitūdu paraugu aukstajā pusē. Attēlā 2.46 parādīti 4 dažādu materiālu paraugu mērījumi ar atšķirīgiem biežumiem un  $\lambda$  vērtībām.

Kā redzams, vislielākās temperatūras svārstības ar amplitūdu  $1,2^{\circ}\text{C}$  uz aukstās virsmas tika reģistrētas ģipškartona plāksnēm ar kopējo biezumu 25 mm (attēls 2.46 a), kurām ir lielāka siltuma vadītspēja –  $0,22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Pie sildītāja vidējās jaudas 17 W pateicoties lielai siltuma plūsmi caur materiālu maksimālā siltās virsmas temperatūra pieaug tikai līdz  $\sim 40^{\circ}\text{C}$ .

Savukārt, sausa egles koka paraugam (attēls 2.46 b) ar kopējo biezumu 34 mm un ievērojami mazāku siltuma vadītspēju  $0,12 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  pie sildītāja vidējās jaudas tikai 12 W reģistrēta maksimālā temperatūra uz siltās virsmas sasniedza  $68^{\circ}\text{C}$  ar svārstību amplitūdu  $7^{\circ}\text{C}$ , bet jau starpslānī temperatūra samazinājās līdz  $33^{\circ}\text{C}$  un tās svārstību amplitūda līdz  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Uz aukstās virsmas koka paraugam periodiskas temperatūras izmaiņas praktiski nav novērojamas un ir atkarīgas tikai no dzesēšanas sistēmas. Tāpēc mērījumu veikšanai šajā gadījumā ir nepieciešams mazāks materiāla biezums, bet sildītāja jaudu būtiski palielināt nevar, jo būtiski paaugstināsies parauga temperatūra.

14 mm bieza putuplasta parauga mērījumos (attēls 2.46 c) periodiskais signāls aukstajā pusē tika reģistrēts, bet tas ir nepietiekams precīzu aprēķinu veikšanai – izmaiņu amplitūda kopā ar dzesēšanas sistēmas radītiem „trokšņiem” nepārsniedza  $1^{\circ}\text{C}$ . Jāatzīmē, ka, neskatoties uz visai nelielu materiāla biezumu, pateicoties mazai siltuma vadītspējai  $0,04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  maksimālā temperatūra uz siltās virsmas sasniedza  $68^{\circ}\text{C}$ , bet sildītāja jauda – 20 W.

Attēlā 2.46 d parādīti 40 mm bieza putu polistirola ar siltuma vadītspēju  $0,05 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  divu slāņu parauga mērījuma dati. Ir redzams, ka siltās virsmas temperatūra sasniedz  $60^{\circ}\text{C}$  jau pie sildītāja vidējās jaudas ap 5 W un minimālās ap 0, kas rada problēmas skaitliskajā periodiskās signāla veidošanas algoritmā „karstās plātes” iekārtas vadības blokā – funkcijas izskats vairs nav sinusoidāls. Mēģinot palielināt sildītāja jaudu eksperimentos ar šiem paraugiem, strauji pieauga materiāla temperatūra un tas ir sāka kust un deformēties sildītāja tuvumā (attēls 2.47).

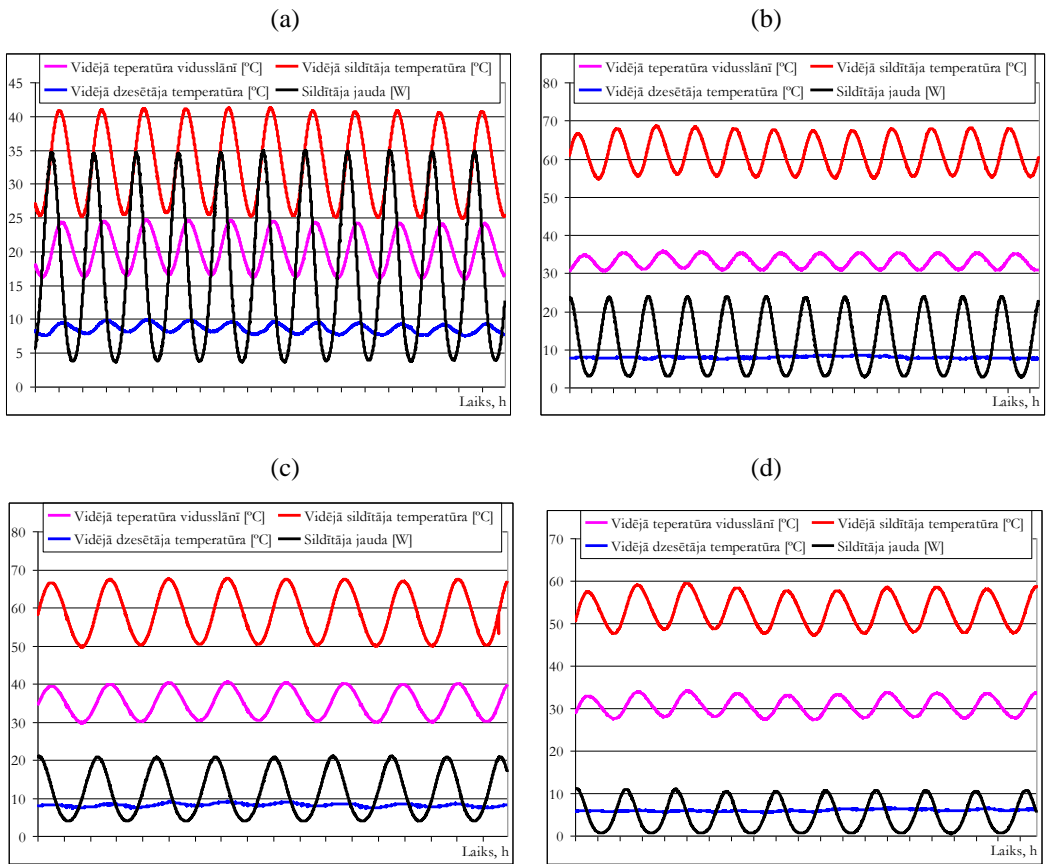
No apskatītajiem mērījumu piemēriem izriet, ka izolācijas materiālu gadījumā temperatūras svārstības uz parauga aukstās virsmas nav pietiekamas, bet siltās virsmas temperatūras savukārt var sasniegt materiālam kritiskās vērtības, kā rezultātā šī periodisko temperatūras svārstību metodi praktiski nevar izmantot. Izņēmums ir eksperimenti ar ļoti plāniem materiāla paraugiem, bet šajā gadījumā var rasties problēmas ar korektiem biezuma un temperatūras mērījumiem starp materiāliem, kā arī ar termopāru ievietošanu.

Eksperimentos ar diviem paraugu slāņiem tika noteikta vairāku būvmateriālu īpatnējā siltuma ietilpība uz masas vai uz tilpuma vienību:

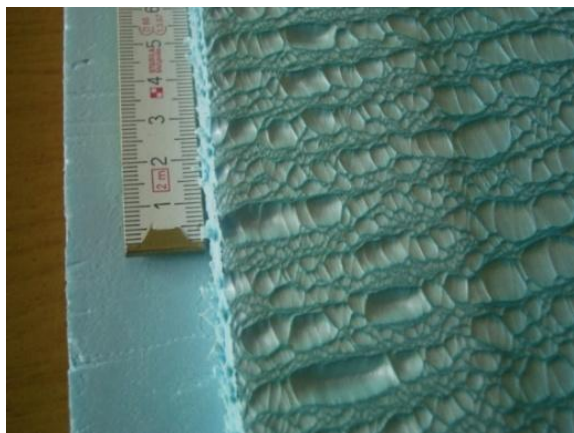
$$c = \frac{\lambda}{a \cdot \rho} \left( \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \right), \quad c' = \frac{\lambda}{a} \left( \text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1} \right). \quad (2.45)$$

Aprēķinam nepieciešamo materiāla siltuma vadītspēju  $\lambda$  ir iespējams noteikt standartizētos mērījumos (skat. iepriekš), bet temperatūras vadītspēju  $a$  nosaka, izmantojot temperatūras mērījumus karstās plāksnes iekārtā ar periodisku jaudas maiņu un reģistrējot temperatūras svārstības uz divu materiāla slāņu ārējām virsmām un starp tiem.

Mērījumu, kas tika veikti betona paraugam, parametri, kā arī eksperimentāli noteiktie un aprēķinātie lielumi ir apkopoti tabulā 2.5. Tam iegūtā temperatūras vadītspējas vērtība  $7,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  atbilst literatūras datiem (Hohmann *et.al.*, 2004).



Attēls 2.46. Sildītāja jaudas un temperatūras svārstības paraugu siltajā, aukstajā pusē un starpslānī dažādu materiālu gadījumā: (a) – ģipskartons (25 mm), (b) – koks (34 mm), (c) – putuplasts (14 mm), (d) – polistirols (40 mm).



Attēls 2.47. Paaugstinātās sildītāja temperatūras rezultātā izraisītās polistirola parauga deformācijas.

Tabula 2.5. Parametri siltuma ietilpības noteikšanai betona paraugam.

Parametrs	Mērvienība	Lielums
Temperatūru svārstību periods	s	8124
Nobīde starp temperatūrām uz karstās/aukstās virsmas	s	564
Karstās virsmas temperatūras svārstību amplitūda	°C	±4,8
Aukstās virsmas temperatūras svārstību amplitūda	°C	±1,7
Paraugu blīvums $\rho$	kg m <sup>-3</sup>	2712
Paraugu biezums $d$	m	0,0201
Paraugu siltumvadītspēja $\lambda$	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,72
Materiāla temperatūras vadītspēja $a$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	7,1·10 <sup>-7</sup>
Uz tilpuma vienību normēta materiāla siltuma ietilpība $c'$	J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	1,0·10 <sup>6</sup>
Uz masas vienību normēta materiāla siltuma ietilpība $c$	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	374

Mērījumi karstās plāksnes iekārtā laboratorijas apstākļos ļauj pietiekami ātri un precīzi noteikt siltuma vadīšanas koeficientu dažādiem homogēniem būvniecībā izmantojamiem materiāliem ar noteiktu izmēru, taču pastāv virkne faktoru, kas ierobežo iekārtas lietojumus:

- būvkonstrukcijām ar heterogēnu uzbūvi nevar tikt nodrošināta viendimensionāla siltuma plūsma un apskatītā metode nav lietojama (piem., keramiskie bloki ar makroskopiskiem dobumiem);
- daži gatavi konstrukciju paraugi un mezglī savu izmēru dēļ fiziski nevar tikt ievietoti eksperimentālajā iekārtā (piem., paneli, logi);
- mērījumus nevar veikt mitriem paraugiem, jo sildot ūdens iztvaiko un mainās arī materiāla siltuma vadītspēja.

Mērījumus lielām un heterogēnām būvkonstrukcijām var veikt, izmantojot termisko kameru, kas aprakstīta nākamajā sadaļā.

### 2.1.2.2. Siltuma caurlaidības mērījumi termiskajā kamerā

Atšķirībā no karstās plāksnes iekārtas un atbilstošās metodikas, kas pamatā ir paredzēta standartizētai homogēnu materiālu siltuma vadītspējas  $\lambda$  (vai  $\lambda_{ef}$ ) noteikšanai, siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  mērījumiem ir nepieciešama principiāli cita pieeja un iekārta. Koeficients  $U$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) ir apgriezts lielums siltuma pretestībai  $R$  (2.31) un raksturo siltuma plūsmu caur 1 m<sup>2</sup> lielu laukumu pie temperatūru starpības 1 °C.

Siltuma caurlaidības koeficients raksturo visu siltuma pārnese veidu ietekmi – vadīšanu, konvekciju (ar šķidruma vai gāzes plūsmu) un siltuma starojumu (caur caurspīdīgām daļām). Koeficients  $U$  cietiem, necaurspīdīgiem materiāliem ir tieši proporcionāls to siltuma vadītspējai un apgriezti proporcionāls parauga biezumam (2.32), bet citos gadījumos tā vērtības analītiskais aprēķins ir iespējams uz matemātisko modeļu bāzes, bet ir sarežģīts un var būt neprecīzs, tādēļ ir nepieciešami mērījumi.

Ar pieredzi eksperimentālajā siltuma caurlaidības noteikšanā specializētā kamerā un rezultātu salīdzinājumu ar teorētiskajiem aprēķiniem, ņemot vērā termiskos tiltus un nehomogenitātes, var iepazīties darbos (Rose, Svedsen, 2004), (Pavlik *et al.*, 2002) un (Curcija, 2000). Kā alternatīvu mērījumiem var lietot būvelementu siltuma pārnese procesu skaitlisko modelēšanu, piem., (Krievāns, 2000). Bet tas prasa skaitliskos resursus katra tāda objekta aprēķiniem un modeļa ieejas datu precizitāti, ko bieži vien nevar nodrošināt.

Siltuma caurlaidības koeficienta mērījumiem paredzētā iekārta – termiskā kamera (angļu lit. – *hot box*) pēc darbības principiem ir līdzīga iepriekšējā sadaļā apskatītai iekārtai ar dažādu temperatūras režīmu uzturēšanas iespējām un enerģijas patēriņa uzskaiti. Viena no būtiskākajām atšķirībām ir iekārtas tās izmēri, kas ļauj ievietot dažāda izmēra gatavos būvizstrādājumus, piem., logus. Līdzīgi kā karstās plāksnes mērījumos, šāda veida mērījumi tiek veikti kvazistacionāros apstākļos, kas nodrošina mazāku mērījumu ilgumu un precīzākus rezultātus nekā tas iespējams ēku ekspluatācijas apstākļos - svarīga ir arī apkārtējās vides un klimatisko apstākļu faktoru ietekmes izslēgšanas iespēja, kas nozīmē arī mērījumu iespējas neatkarīgi no gadalaikiem.

Raksturīgs heterogēnas būvkonstrukcijas, kuras siltuma caurlaidības koeficients nevar precīzi noteikt ar aprēķinu, piemērs ir logs. Termiskā kamera logu mērījumiem praksē tiek lietoti pietiekami sen un tos nosaka standarti - DIN 52619-1, 1982; LVS EN ISO 12567-1, 2010. Detalizētāk apskatīsim siltuma pārnese loga konstrukcijā teorētiskos aspektus. Attēlā 2.48 a parādīti siltuma pārnese veidi caur loga konstrukciju (siltuma vadīšanas caur rāmi, konvekcija, starojums un siltuma vadīšana caur caurspīdīgo stikla paketei), kuru kopējo ieguldījumu raksturo ar siltuma caurlaidības koeficientu  $U$ . Tas ir atkarīgs no vairākiem faktoriem - stiklojuma tipa un skaita, paketē iepildītās gāzes un stiklu pārklājuma, rāmja materiāla u.c. faktoriem.

Tā kā logs ir kritiskākais elements ēkas norobežojošās konstrukcijās, tā siltuma caurlaidība ir būtisks faktors ēkas kopējā energoefektivitātei. Ar stikla pakešu siltuma pretestību saistīts arī kondensāta rašanās risks uz tā iekšējās virsmas – vienkāršam stiklam ar  $U=5,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  pie ārgaisa temperatūras  $-10^\circ\text{C}$  un iekštelpu temperatūras  $20^\circ\text{C}$  iekšējās virsmas temperatūra samazinās līdz  $-1,0^\circ\text{C}$ , bet trīsstiklu paketei ar speciāliem pārklājumiem tā ir tikai par  $3-4^\circ\text{C}$  mazāka nekā telpas gaisam. Siltuma vadīšanas process un tā raksturlielumi tika detalizēti aprakstīti iepriekšējā sadaļā. Starojuma siltuma pārnese caur stikla paketi ar speciāliem atstarojošiem pārklājumiem (attēls 2.48 b) un tās mērījumu tiks apskatīti vēlāk. Šeit plašāk apskatīsim konvekcijas siltuma apmaiņu ar gāzi pildītā spraugā starp stikliem paketē.

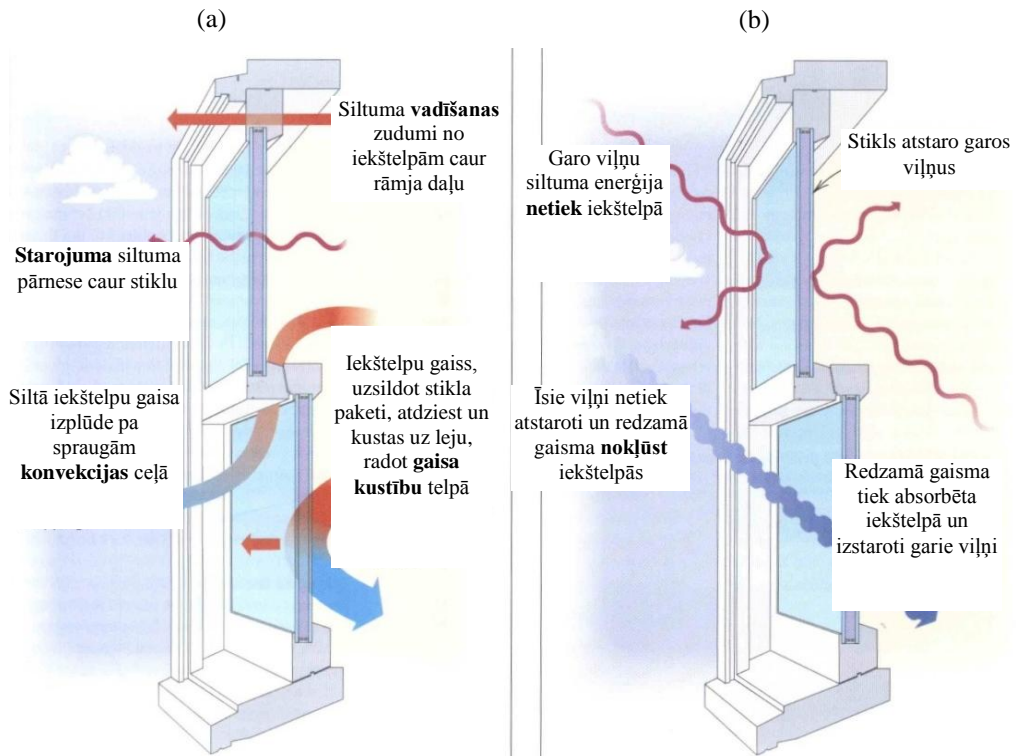
Šajā gadījumā siltuma pārnese notiek pārvietojoties gāzveida vielai. Gāzei, nonākot kontaktā ar cieta ķermeņa virsmu, kuras temperatūra ir atšķirīga no šķidrums temperatūras, notiek konvektīvā siltuma apmaiņa (piem., gāzes plūsma gar ēkas sienu vai stikla virsmu). Vispārīgā gadījumā nesaspiežama šķidrums kustību laminārās plūsmas režīmā virsmas tuvumā apraksta ar Navjē-Stoksa vienādojumu un nesaspiežamības nosacījumu (Landau, Lifshic, 1986; Batchelor, 2000):

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \text{ grad } \vec{v} \right) = -\text{grad } p + \eta \Delta \vec{v} + \vec{\rho} \vec{f}, \quad \text{div } \vec{v} = 0, \quad (2.46)$$

kur  $p$  – spiediens,  $\vec{f}$  – masas spēku blīvuma vektors un  $\eta$  – dinamiskā viskozitāte. Businesska tuvinājumā, cēlējspēku, kas veidojas smaguma spēka laukā līdz ar temperatūru mainoties materiāla blīvumam, izsaka formula

$$\vec{f} = \vec{g}\beta\Delta T, \quad \beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p, \quad (2.47)$$

kur  $\beta$  ir termiskās izplešanās koeficients. Ideālām gāzēm  $\beta = 1/T$ . Savukārt siltuma pārnese šķidrumā apraksta iepriekš apskatītais vienādojums (2.12), kas kreisajā pusē ietver konvektīvo pārnesei raksturojošo locekli.



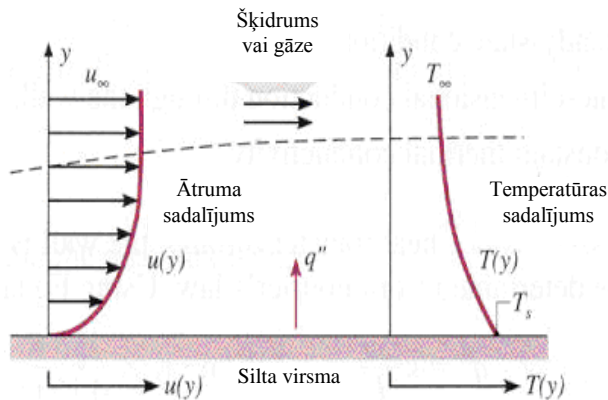
Attēls 2.48. Siltuma pārnese caur logu veidi (a) un stikla paketes selektīvā pārklājuma darbības princips (b) (Fine Homebuilding, 1999).

Lielākajā daļā praksē sastopamo gadījumu gaisa plūsmas raksturs ir turbulents un siltuma apmaiņu aprakstīt ir vēl sarežģītāk, jo inženierfizikālos aprēķinos nākas lietot papildus pusempīriskus pieņēmumus un efektīvās parametru vērtības (piem., turbulento viskozitāti un siltuma vadītspēju), kas neraksturo pašu materiālu īpašības, bet ir atkarīgas no procesu apstākļiem un to priekšvēstures kopumā.

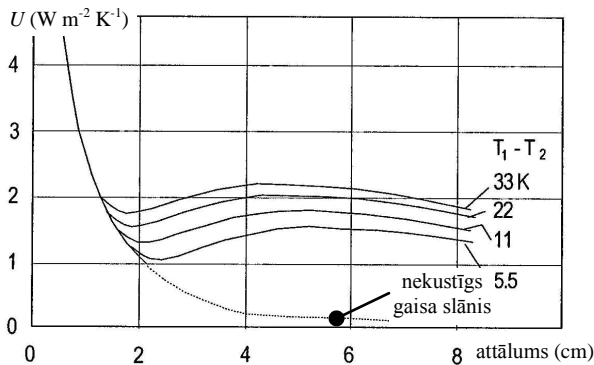
Nosacīti mēdz šķirot divus konvekcijas veidus – piespiedu vai dabīgo (jeb brīvo). Piespiedu konvekcijas gadījumā šķidrums kustību gar virsmu nosaka kādi ārējie spēki  $\vec{f}$  (attēls 2.49), piem., vēja izraisīta spiedieni starpība, un kustības ātrumi var būt daudz lielāki nekā brīvai

konvekcijai. Dabīgās konvekcijas gadījumā šķidrums, nonākot kontaktā ar citas temperatūras virsmu, mainās tā blīvums un rodas cēlējspēks, kas sekmē kustību. Šādas konvekcijas tipiski piemēri ir gaisa plūsmas pie ēkas sienas bezvēja laikā vai stikla paketes iekšpusē.

Schematiski konvektīvās siltuma apmaiņas robežslānis pie horizontālās virsmas, kuras temperatūra ir augstāka nekā šķidrums, ir parādīta attēlā 2.49. Attēlā 2.50 parādīta konvekcijas ietekme uz konstrukcijas, kas sastāv no divām vertikālām paralēlām virsmām, starp kurām atrodas gāze (piem., stikla paketes), siltuma caurlaidību. Pie nelieliem attālumiem starp virsmām konvekcijas efekts nav būtisks, bet attālumam un temperatūru starpībai palielinoties, konvekcija rezultējošajā siltuma caurlaidībā kļūst par noteicošo faktoru. Kā redzams no grafika, pie noteikta attāluma koeficienta  $U$  vērtībai ir minimums, tātad siltuma zudumi ir vismazākie. Šis fakts tiek izmantots arī stikla pakešu ražošanas tehnoloģijā, izvēloties optimālo attālumu starp stikliem.



Attēls 2.49. Konvektīvās siltuma apmaiņas robežslāni pie cietas virsmas (Incropera, DeWitt, 2002).



Attēls 2.50. Gaisa slāņa starp divām vertikālām plāksnēm siltuma caurlaidības atkarība no attāluma starp plāksnēm un plāksņu virsmu temperatūru starpības (Hagentoft, 2003).

Siltuma apmaiņas intensitāte ir būtiski atkarīga no spraugas platuma, temperatūru starpības, šķidruma vai gāzes īpašībām un plūsmas laminārā vai turbulentā režīmā. Šo iemeslu dēļ inženierfizikālos lietojumos siltuma apmaiņas starp šķidrumu un cietu virsmu raksturošanai bieži

izmanto vienkāršotas empīriskā rakstura sakarības, piem., Ņūtona siltuma atdeves sakarību (2.22). Dažādām vielām raksturīgās brīvās konvekcijas siltuma atdeves koeficientu  $\alpha$  vērtību intervāli ir atšķirīgi, piem., gaisam – 5...25, bet ūdenim – 20...100 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>. Pieaugot plūsmas intensitātei virsmas tuvumā, siltuma atdeves koeficients proporcionāli pieaug, savukārt termiskā robežslāņa biezums un tā siltuma pretestība samazinās – skat. arī (Curcija, 2000). Plūsmas intensitāte brīvās termiskās konvekcijas gadījumā būtiski pieaug līdz ar šķidrums un virsmas temperatūru starpības pieaugumu.

Ja termiskā konvekcija attīstās spraugā ar platumu  $d$  starp divām virsmām ar konstantu temperatūru starpību  $\Delta T$ , tad siltuma apmaiņu starp virsmām tuvināti var novērtēt, izmantojot empīriskās sakarības starp termisko konvekciju raksturojošajiem bezdimensionālajiem parametriem – Nuselta skaitli Nu, Prandtla skaitli Pr un Releja skaitli Ra:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (2.48)$$

$$\text{Pr} = \frac{\eta}{\rho a} = \frac{c_p \eta}{\lambda}, \quad (2.49)$$

$$\text{Ra} = \frac{g \beta \rho \Delta T d^3}{a \eta}, \quad (2.50)$$

kur visi šķidrums raksturojošie lielumi tiek aprēķināti vidējai temperatūrai. Ja brīvā konvekcija veidojas pie vienas vertikālās izotermiskas virsmas ar augstumu  $l$ , tad cēlējspēka un viskozo spēku attiecības raksturošanai Releja skaitļa vietā var lietot Grasofo skaitli Gr:

$$\text{Gr} = \frac{g \beta \rho^2 (T - T_\infty) l^3}{\eta^2}. \quad (2.51)$$

Minētie parametri savā starpā ir cieši saistīti:

$$\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}. \quad (2.52)$$

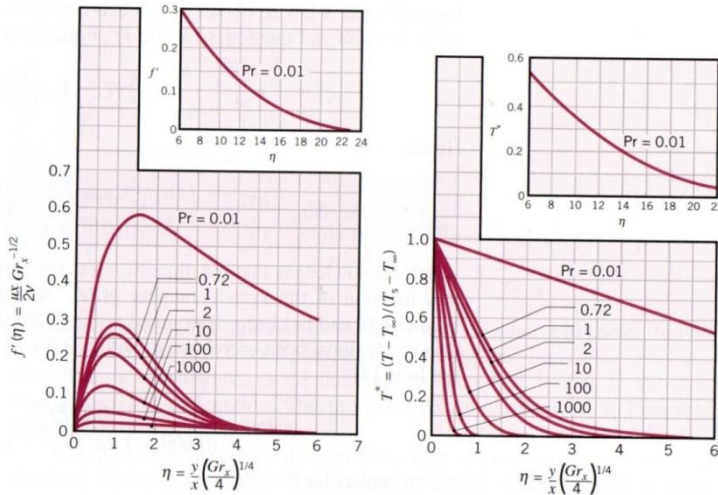
Virsmas paralēlās ātruma komponentes un temperatūras sadalījumi virsmas tuvumā dažādām Prandtla skaitļa vērtībām bezdimensionālā formā parādīti (attēlā 2.51), kur redzams, ka šie sadalījumi ir būtiski atkarīgi no šķidrums īpašībām. Piem., pie lielas viskozitātes un mazas šķidrums siltuma vadītspējas termiskā robežslāņa biezums samazinās. Pie  $\text{Pr} \sim 1$  virsmas tuvumā veidojas izteikts virsmas paralēlās ātruma komponentes maksimums. Šie sadalījumi ļauj tuvināti noteikt arī vidējo siltuma atdeves koeficientu no virsmas (Incropera, DeWitt, 2002):

$$\text{Nu} = \frac{4}{3} \left( \frac{\text{Gr}}{4} \right)^{1/4} \cdot \varphi(\text{Pr}) \quad \varphi(\text{Pr}) = \frac{0,75 \text{Pr}^{1/2}}{(0,609 + 1,221 \text{Pr}^{1/2} + 1,38 \text{Pr})^{1/4}}. \quad (2.53)$$

Pusempīriskās formulas atšķiras dažādiem tuvinājumiem un bezdimensionālo parametru diapazoniem, piem., gadījumā, ja  $l/d=1 \dots 40$ ,  $\text{Pr}=1 \dots 20$  un  $\text{Ra}=10^6 \dots 10^9$ , tad  $\text{Nu} = 0,046 \text{Ra}^{1/3}$ , bet, ja  $l/d=10 \dots 40$ ,  $\text{Pr}=1 \dots 2 \cdot 10^4$  un  $\text{Ra}=10^4 \dots 10^7$ , tad  $\text{Nu} = 0,42 \text{Ra}^{1/4} \cdot \text{Pr}^{0,012} (l/d)^{-0,3}$ .

LU VTPMM laboratorijā izveidotais mērstends gatavo būvizstrādājuma siltuma pretestības un siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai (termiskā kamera) ir parādīts attēlā 2.52, bet tās vertikālais šķērsgriezums pa vidusplaknē – attēlā 2.53. Eksperimentālās iekārtas pamatsastāvdaļas

ir sildkamera, kompensācijas un dzesēšanas kameras, kurās iespējams regulēt gaisa temperatūru. Kameru norobežojošās virsmas ir izveidotas no siltuma izolācijas materiāla -  $\lambda \leq 0,035 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

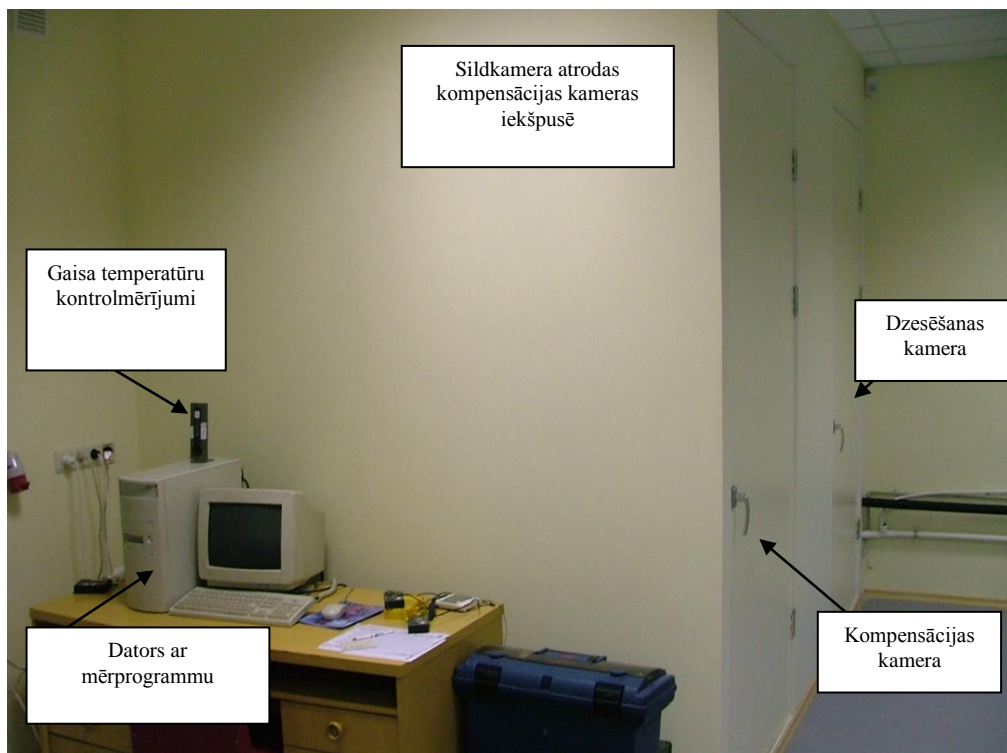


Attēls 2.51. Ātrumi (kreisajā pusē) un temperatūras (labajā pusē) pie izotermiskas, vertikālas virsmas laminārās brīvās konvekcijas robežslāņa gadījumā (Incropera, DeWitt, 2002).  
 Apzīmējumi:  $u_x$  – ātruma komponente gar virsmu,  $y$  – attālums no virsmas,  $x$  – koordināte garenvirzienā.

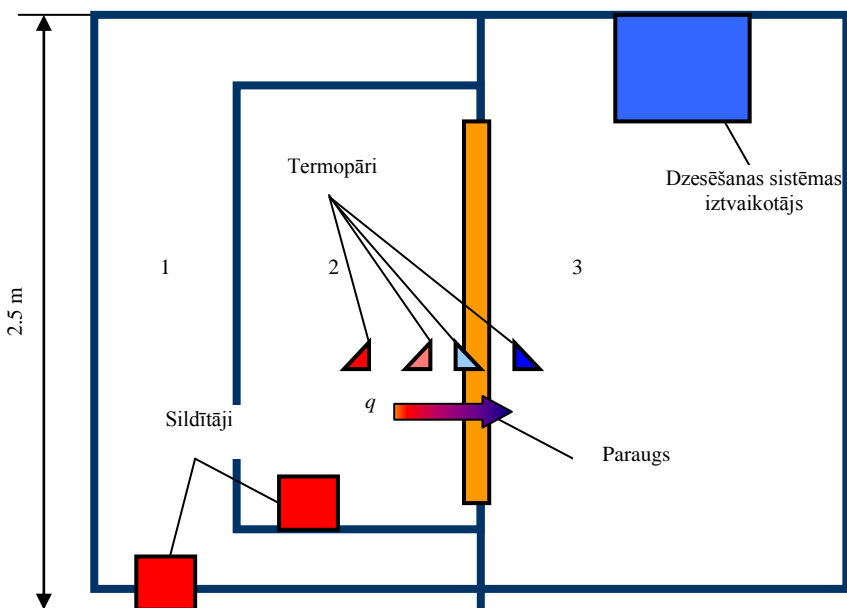
Sildkamerā, automātiski ieslēdzoties un izslēdzoties elektriskam sildītājam ar ventilatoru, ir iespējams uzturēt temperatūru diapazonā 25...45°C. Kompensācijas kameras uzdevums ir samazināt siltuma zudumus no sildkamaras caur tās sienām – kompensācijas kamerā tiek uzturēta temperatūra, kas ir maksimāli tuva temperatūrai sildkamerā. Temperatūras režīmu stabilitāte tiek kontrolēta, mērot gaisa temperatūras dažādās kameru vietās. Īpaši nozīmīga loma kompensācijas kamerai ir tad, ja pētāmā parauga siltuma caurlaidību nosaka, mērot kopējo siltuma daudzumu, kas pievadīts sildkamerai, t.i., izmantojot integrālo metodi.

Dzesēšanas kamerā, izmantojot kompresoru ar ūdens dzesēšanu (attēls 2.54a), iespējams nodrošināt temperatūru diapazonā no -10...15 °C diapazonā. Iztvaikotājs novietots pie dzesēšanas kameras griestiem (attēls 2.54b) un gaisa plūsma caur to orientēta prom no pētāma parauga tā, lai pēc iespējas mazāk iespaidotu dabisko gaisa konvekciju gar parauga auksto virsmu. Šādā režīmā termokameru iespējams darbināt ilgstoši – vairākas dienas, kā arī mērījumu gaitā mainīt temperatūru uzstādījumus sildkamerā un dzesēšanas kamerā uzstādījumus.

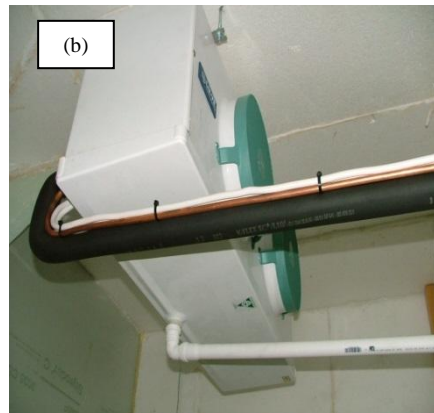
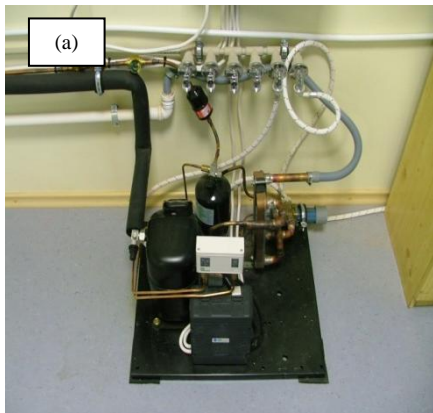
Testējamais būvizstrādājums tiek iestiprināts kameru starpsienas (maskas) izgriezumā (attēli 2.55), īpaši rūpējoties par blīvējuma nodrošināšanu un lineāro siltuma tiltu novēršanu pa izstrādājuma perimetru, lai tādējādi novērstu nekontrolējamus papildus siltuma zudumus vadīšanas un konvekcijas dēļ.



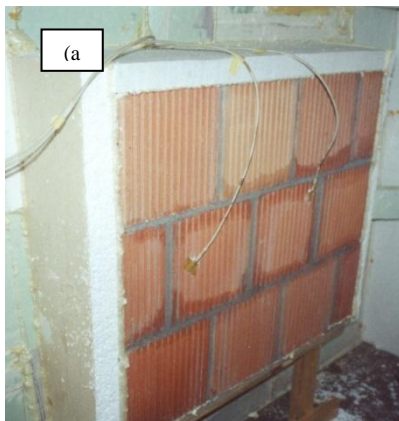
Attēls 2.52. Termiskās kameras ar mērdatoru kopskats.



Attēls 2.53. Shematiskais vertikālais termokameras šķērsriezums.  
(1 – kompensācijas kamera, 2 – sildkamera, 3 – dzesēšanas kamera.)



Attēls 2.54. Termokameras dzesēšanas sistēmas kompresors ar ūdens dzesēšanu (a) un iztvaikotājs dzesēšanas kamerā (b).



Attēls 2.55. Termokamerā mērījumiem ievietotie objekti – keramiskie bloki (a) un koka durvis (b).

Testējamās būvkonstrukcijas tiešo siltuma caurlaidības koeficientu  $U_t$  nosaka saskaņā ar formulu (2.25):

$$U_t = q / \Delta T, \quad (2.54)$$

kur  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) – vidējais siltuma plūsmas blīvums caur būvizstrādājumu, bet  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ir temperatūru starpība starp vidējām temperatūrām uz testējamā izstrādājuma siltās un aukstās virsmas. Gadījumā, ja testējamais būvizstrādājums sastāv no vairākiem elementiem ar atšķirīgu uzbūvi (piem., stikla pakete un rāmis) un dažādu siltuma caurlaidības pretestību, tad vidējās temperatūras uz attiecīgo elementu virsmām parasti atšķiras. Tādējādi vidējo temperatūru noteikšanai uz būvizstrādājuma virsmām ar vairākiem sensoriem nosaka temperatūru uz katra no atšķirīgajiem elementiem.

Siltuma plūsmas blīvums var tikt izmērīts (diferenciālā metode) vai arī noteikts saskaņā ar formulu (integrālā metode):

$$q = \frac{N - Q_{\text{maska}} - Q_{\text{komp}}}{S}, \quad (2.55)$$

kur  $S$  ( $\text{m}^2$ ) – testējamā parauga laukums,  $N$  (J) – kopējais sildkamerai pievadītais siltuma daudzums,  $Q_{\text{maska}}$  un  $Q_{\text{komp}}$  (W) – attiecīgi siltuma plūsmas no sildkamas caur masku un uz kompensācijas kameru,  $t$ (s) – mērperioda ilgums. Lielumus  $Q_{\text{komp}}$  un  $Q_{\text{maska}}$  var aprēķināt, izmantojot maskas un kompensācijas kameras materiālu siltuma vadītspēju, biežumu un laukumu, kā arī mērījumos reģistrēto temperatūru starpību:

$$Q = \frac{\lambda}{d} S \Delta T. \quad (2.56)$$

Tā kā gaisa cirkulācijas apstākļi mērījumu laikā var atšķirties no dabiskajiem un temperatūras mērījumi notiek uz virsmām, tad rezultējošā siltuma caurlaidības koeficienta  $U_{\text{rez}}$  aprēķinam ir nepieciešams ievērot arī gaisa robežslāņu objekta abās pusēs ietekmi. Šim nolūkam izmanto standartizētās siltuma atdeves koeficientu vērtības no virsmām (tabula 2.3) un noteikto tiešo siltuma caurlaidības koeficientu (skat. arī 2.23):

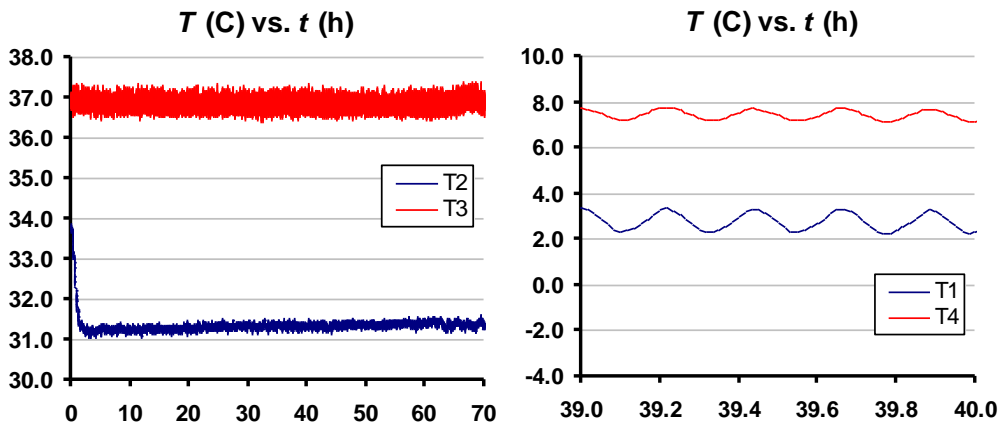
$$U_{\text{rez}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{tiešais}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{iekšā}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ārā}}}}. \quad (2.57)$$

Veicot temperatūras mērījumus gan uz mēroobjekta virsmām, gan arī vairāku centimetru attālumā no tām, var novērtēt faktiskos siltuma atdeves koeficientus uz katras no virsmām, saskaņā ar formulu (2.23) siltuma plūsmas blīvuma vērtību izdalot ar temperatūru starpību uz virsmas un gaisā.

Uzsākot mērījumu, ar speciāliem termoregulatoriem (attēls 2.52) izvēlas sildkamas, kompensācijas un dzesēšanas kameru temperatūras uzstādījumus. Katru reizi, uzsākot jaunu mērījumu, ir nepieciešama sildkamas un kompensācijas kameras temperatūru saskaņošana. To temperatūru starpībai ir jābūt pēc iespējas mazākai.

Visās kamerās esošo temperatūru sensoru mērījumu nolasīšanai tiek izmantotas vairākas pieejas. Vidējās gaisa temperatūras kontrolei tiek izmantoti bezvadu termodevēji ar lielu termisko inerci, ko rādījumus neietekmē periodiskas temperatūras svārstības. Sildīšanas un dzesēšanas sistēmu regulēšanai tiek izmantoti devēji ar mazu termisko inerci, kas ļauj pietiekami ātri ieslēgt atbilstošās sistēmas, temperatūrai sasniedzot iestādīto kritisko vērtību.

Savukārt temperatūras sensori uz objekta virsmām un pie tām, kuru rādījumi tiek izmantoti siltuma caurlaidības koeficienta aprēķinos, kā arī siltuma plūsmas sensors caur signālu kondicionēšanas bloku ar nepieciešamo nulles punkta kompensācijas slēgumu, izmantojot augstjūtīgu mērplati *National Instruments AT-MIO-16XE-50* ir pieslēgti datoram. Faktiski gaisa temperatūra visās kamerās mainās periodiski ar īsāku vai garāku periodu un amplitūdu atkarībā no sildītāja vai dzesētāja darbības principa un īpatnībām. Tipisku gaisa un mēroobjekta virsmas temperatūru svārstību piemēri dažādos laika mērogos parādīti attēlā 2.56. Kā redzams, temperatūras svārstības uz virsmas ir mazākas nekā gaisā un aukstajā pusē lielākas nekā siltajā - tāpēc siltuma plūsmas blīvums parasti tiek mērīts sildkamas pusē.



Attēls 2.56. Tipiskas temperatūras svārstības uz materiāla virsmas un gaisā sildkambars pusē (T2, T3) un dzesēšanas kameras pusē (T1, T4).

Četrus temperatūras sensoru un divu siltuma plūsmas sensoru mērījumu procesa kontrolei, mērdatu automātiskai reģistrācijai, kā arī to attēlošanai tiek izmantota speciāli izstrādātā programmatūra *UMeas* (PAIC, 2003). Ar tās palīdzību ir iespējams:

- iestatīt datu ierakstu biežumu (laika intervālu sekundēs, kura vidējā mērvērtība tiek attēlota vizuāli ierakstīta rezultātu failā);
- labot siltuma plūsmas sensoru kalibrācijas un temperatūras sensoru korekcijas konstantes;
- kontrolēt eksperimenta norisi, attēlojot temperatūru, siltuma plūsmas blīvuma sensoru rādījumus un  $U$  vērtību (2.25, 2.57) teksta un grafiskā (attēli 2.57 un 2.58) veidā;
- mērījuma datus saglabāt teksta failā iespējamās pēcapstrādes veikšanai.

UMeas - C:\MEAS\Stends\Rezultati\PAKETES\VP06pas01b\meas.mst

File Measure

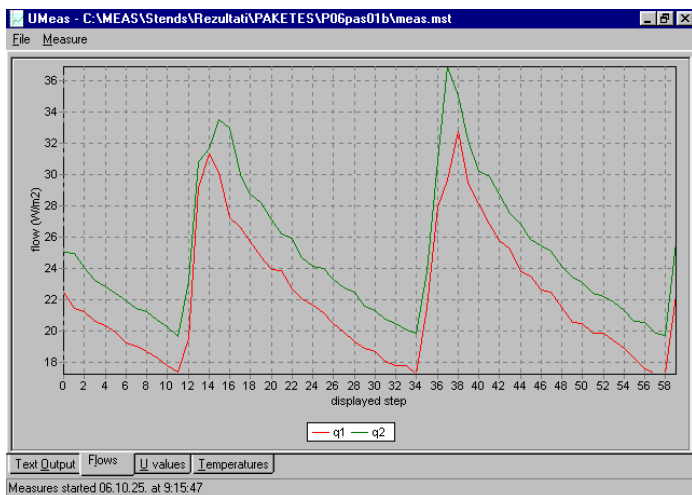
Count of subiterations: 762      Count of global iteration: 627

q1	T1	T2	T3	T4	q2	U1	U2	date	time
26,833	-5,222	36,239	37,595	-4,540	29,861	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
25,795	-5,096	36,254	37,616	-4,493	28,796	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
25,273	-4,989	36,263	37,622	-4,445	27,504	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
23,802	-4,935	36,265	37,631	-4,420	26,819	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
23,531	-4,944	36,268	37,630	-4,412	25,876	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
22,650	-4,989	36,273	37,625	-4,412	25,432	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
22,476	-5,023	36,277	37,588	-4,417	25,115	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
21,510	-5,089	36,261	37,572	-4,419	24,183	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
20,583	-5,172	36,258	37,541	-4,444	23,445	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
20,478	-5,271	36,256	37,526	-4,466	23,132	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
19,895	-5,374	36,242	37,492	-4,494	22,460	0,593	0,663	06.10.25.	10:58
19,897	-5,493	36,228	37,457	-4,520	22,244	0,592	0,662	06.10.25.	11:00
19,405	-5,615	36,218	37,419	-4,555	21,888	0,592	0,662	06.10.25.	11:00
18,873	-5,750	36,205	37,380	-4,587	21,302	0,592	0,662	06.10.25.	11:00

Text Output   Fjows   U values   Temperatures

Measures started 06.10.25. at 9:15:47

Attēls 2.57. No termodevējiem un siltuma plūsmas sensoriem nolasītie dati UMeas programmatūrā.



Attēls 2.58. Izmērīto siltumu plūsmu blīvumu attēlojums grafiskajā logā UMeas programmatūrā.

Sildītājam un dzesēšanas sistēmai darbojoties periodiskā režīmā (skat. attēlu 2.56), ar datora palīdzību reģistrētās siltuma plūsmas blīvuma  $q$  vērtības un temperatūru starpības abās parauga pusēs  $\Delta T$  laikā svārstās. Tādēļ vidējo lielumu vērtību noteikšanai tiek izmantota kumulatīvā metode – aktuālās vidējās vērtības  $\bar{q}_n$ ,  $\Delta\bar{T}_n$  un  $\bar{U}_n$  tiek noteiktas no visām līdz tam brīdim reģistrētajām  $n$  mērvērtībām:

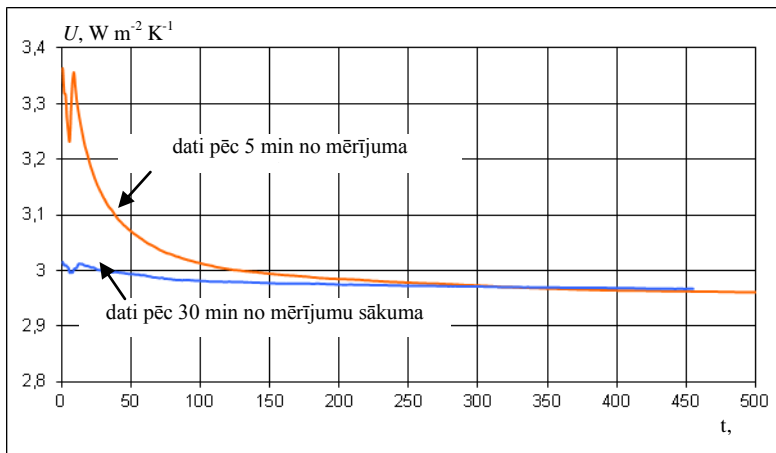
$$\bar{q}_n = \frac{(n-1)q_{n-1} + q_n}{n}, \quad \Delta\bar{T}_n = \frac{(n-1)\Delta\bar{T}_{n-1} + \Delta\bar{T}_n}{n}, \quad \bar{U}_n = \frac{\bar{q}_n}{\Delta\bar{T}_n}. \quad (2.58)$$

Mērījumus ir ieteicams sākt vairākas stundas pēc tam, kad pētāmā būvkonstrukcija ievietota termiskajā kamerā un temperatūras uzturēšanas sistēma iedarbināta. To nosaka divi faktori – blīvēšanas materiālu žūšanas periods (paraugu nostiprināšanai un spraugu blīvēšanai izmantojamās poliuretāna putas sacietē vairāku stundu periodā) un temperatūru režīma stabilizācijas laiks, kas ir atkarīgs no mērāmā paraugs siltuma pretestības un iestādītās temperatūru starpības. Attēlā 2.59 parādīti divi mērījumu piemēri pēc 5 un 30 minūtēm no mērījumu sākuma – kā redzams, sākot reģistrēt datus gandrīz uzreiz pēc režīmu uzstādīšanas, process vēl nav stabilizējies un kumulatīvās vērtības aprēķinam ir nepieciešams ilgāks laiks. Tā, stabilizētā (kvazistacionārā) režīmā jau pēc 1 stundas kumulatīvi noteiktās  $U$  vērtības izmaiņas nepārsniedz 2%. Ja mērdatos iekļauts arī sākotnējās siltuma režīma stabilizācijas posms, tad attiecīgais stabilizācijas periods pagarinās.

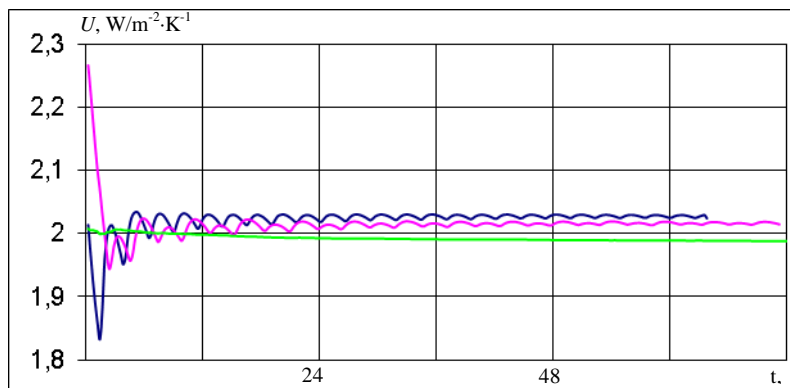
Būtiski atšķiras arī periodi, kuros kumulatīvi aprēķinātā  $U$  vērtība stabilizējas, ja siltuma plūsmas sensors tiek novietots dažādās mēroobjekta pusēs. Tā, novietojot mērsensu dzesēšanas kamerā tam nepieciešamas 10-12 stundas, bet mērot siltuma plūsmu sildkamerā – tikai 1-2 stundas. Minēto iemeslu dēļ siltuma plūsmas sensori vienmēr tiek novietoti uz testējamā izstrādājuma virsmas sildīšanas kamerā.

Darbinot dzesēšanas sistēmu nepārtrauktā režīmā (attēls 2.60) ar maksimāli iespējamo tās jaudu, t.i. iestādot nesasniedzami zemu dzesēšanas kameras temperatūru, iespējams nodrošināt ievērojami lielāku temperatūru starpību starp sildkameru un dzesēšanas kameru nekā tas

nepieciešams standartizētiem eksperimentiem, kur  $\Delta T \approx 10 - 20^\circ\text{C}$ . Tādējādi termiskajā kamerā iespējams veikt būvizrādājumu pārbaudi arī ekstremālos apstākļos ( $\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$ ).



Attēls 2.59. Kumulatīvās siltuma caurlaidības vērtības stabilizācija laikā.



Attēls 2.60. Piemēri kumulatīvās  $U$  vērtības aprēķinam, dzesēšanas sistēmai darbojoties nepārtrauktā un periodiskā režīmā.

Kā vienu no lielākām grūtībām mērījumu gaitā var minēt testējamā objekta ievietošanu tam paredzētajā vietā maskā, palielinot vai samazinot izgriezumu tajā, kā arī tā kvalitatīvu noblīvēšanu. Pēc katras objekta nomaiņas ir jāpārbauda gan maskas, gan būvkonstrukcijas instalācijas hermētiskums, tādējādi izslēdzot konvekcijas siltuma zudumus caur iespējamiem hermetizācijas defektiem pa konstrukcijas perimetru. To saistībā ar mērījumiem termiskajā kamerā uzsver arī citi autori, piem., (Rose, Svendsen, 2004), veicot eksperimentus mazāka izmēra iekārtā. Pašlaik LU VTPMM laboratorijā uzsākta jaunas profesionāli izgatavotas termiskās kameras ar inovatīvu vakuuma paneļu siltuma izolāciju un ērti maināmu maskas atveres izmēru montāža, ko plānots nodot ekspluatācijā 2014. g. un akreditēt standartizētai  $U$  vērtību testēšanai.

Kā minēts iepriekš, siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  noteikšanu atbilstoši (2.54-2.58) var veikt divējādi – mērot siltuma plūsmu blīvumus caur būvizstrādājuma elementiem ar atšķirīgām īpašībām (diferenciālā metode) vai arī mērot kopējo sildkamerai pievadīto siltuma daudzumu (integrālā metode). Bieži vien abu metožu kombinācija tiek lietota rezultātu pārbaudei un precizitātes uzlabošanai, piem., (Curcija, 2000). Mērījumi tā tiek veikti arī LU VTPMM laboratorijā izveidotajā kamerā, piem., termiskās kameras kalibrēšanai veicot mērījumus paraugiem, kuru siltuma caurlaidības pretestības ir zināmas un to vērtības pārklāj testējamo būvizstrādājumu  $U$  vērtību diapazonu ( $0,4 \dots 3,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ). Katru no šīm pieejām raksturosim detalizētāk un raksturosim attiecīgo mērījumu rezultātus.

### 2.1.2.2.1. Diferenciālā metode

Viena no metodēm, kas tiek lietota mērījumos termiskajā kamerā, ir t.s. diferenciālā metode, kad siltuma plūsma caur objektu tiek noteikta tieši, ar siltuma plūsmas sensora palīdzību. Pētāmām konstrukcijām ar heterogēnu uzbūvi rezultējošo  $U$  aprēķina, mērot siltuma plūsmas blīvumu caur katru no atšķirīgajiem būvizstrādājuma elementiem ar laukumu  $S_i$ , tādējādi nosakot to siltuma pretestības  $R_i$  (2.21), kā arī ievērojot to laukumu proporcijas (Belindževa-Korkla, 2002):

$$U = \frac{1}{R} = \frac{S}{\sum_i S_i R_i}, \quad (2.59)$$

kur  $S$  – ir konstrukcijas kopējais laukums.

Elementiem, kuru uzbūvē ir gaisa spraugas vai porainiem materiāliem ar diferenciālās metodes palīdzību iespējams noteikt arī t.s. efektīvo siltuma vadītspējas koeficientu  $\lambda_{\text{ef}}$ , kas ir analogs materiāla siltuma vadītspējas koeficientam  $\lambda$  un tiek aprēķināts pēc formulas (2.34). Piem., blokus ar dobumiem (attēls 2.61), kuru mērījumi tiks apskatīti nākamajā nodaļā, raksturo tieši ar šo efektīvo siltuma vadītspējas koeficientu (LVS EN 1745, 2012). Taču gadījumā, ja ir jānosaka  $\lambda$  pašam materiālam (piem., mālam), ir jāveic mērījumi ar iepriekš aprakstītās karstās plāksnes metodi.



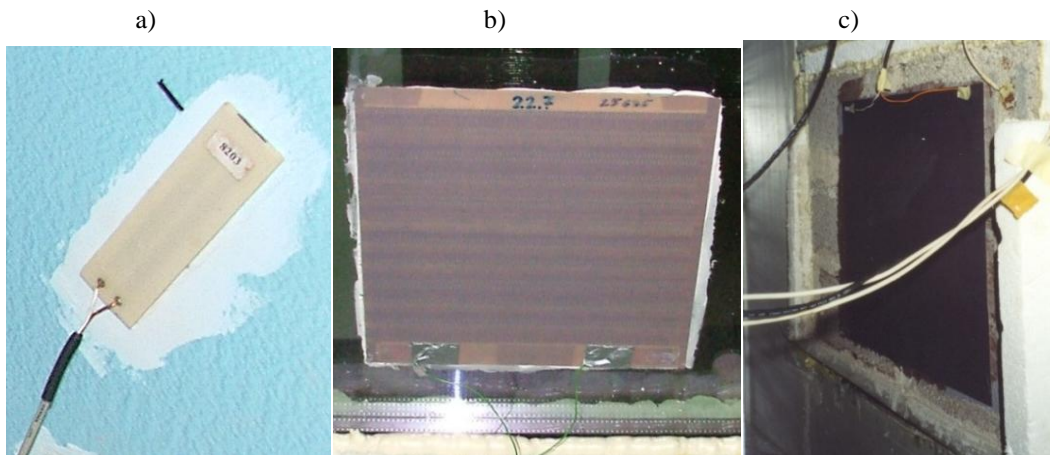
Attēls 2.61. Bloku ar dobumiem raksturošanai lieto efektīvās siltumvadītspējas koeficientu  $\lambda_{\text{ef}}$

Viena no diferenciālās metodes priekšrocībām ir tā, ka nav nepieciešama siltuma apmaiņas ar kompensācijas kameru un zudumu caur masku analīze - nepieciešams tikai stabils temperatūras režīms. Pastāv arī daži ierobežojumi siltuma plūsmu mērmetodes lietojumiem termokamerā un tie galvenokārt ir saistīti ar pētāmās konstrukciju īpatnībām:

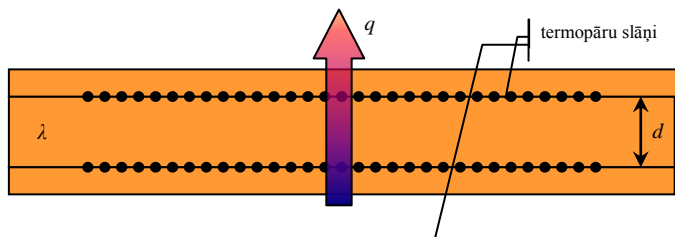
- siltuma caurlaidības ziņā atšķirīgo konstruktīvo elementu skaits ir neliels, piem., pakešu logs ar rāmja veramo un fiksēto daļām;
- atšķirīgo elementu izmēri nav ļoti mazi, kā tas, piem., var būt logam ar spraišļiem;
- elementu  $U$  vērtību atšķirības nav ļoti lielas, jo pretējā gadījumā siltuma plūsmas kļūst izteikti telpiskas.

Mērījumos tiek izmantoti dažādu izmēru siltuma plūsmas blīvuma sensori. Piem., loga rāmim izmanto mazu garensku sensoru ar izmēriem  $2 \times 8$  cm (attēls 2.62 a), bet lielu būvizstrādājumu ar dobumiem pētījumos – kvadrātveida sensoru ar izmēriem  $0,5 \times 0,5$  m (attēls 2.62 c). Visbiežāk veiktajos mērījumos tika lietoti vidējā izmēra ( $25 \times 25$  cm) termoelektriskie sensori ar izmēru (attēls 2.62 b).

Termoelektriskā tipa plāksņveida plūsmas sensora darbība ir balstīta uz temperatūras mērīšanu ar NiCr-Ni tipa termoelementiem plāna materiāla slāņa ar noteiktu biezumu un siltuma vadītspēju abās pusēs. No šiem datiem, izmantojot sakarību (2.20), var aprēķināt siltuma plūsmas blīvumu  $q$ . Temperatūru starpība ir proporcionāla siltuma plūsmas blīvumam, bet, mazā attāluma starp sensoriem dēļ, katra atsevišķa termoelementu pāra spriegumu starpība ir ļoti maza. Tādēļ, lai iegūtu signālu mV diapazonā, šāda plūsmas sensora plāksnītē ievieto vairākus simtus termoelementu pāru (attēlā 2.63). Ievērojot iespējamās neprecizitātes izgatavošanā, katrs no sensoriem tiek individuāli kalibrēts.



Attēls 2.62. Termoelektriskā tipa siltuma plūsmas mērsensori:  $2 \times 8$  cm (a),  $25 \times 25$  cm (b),  $50 \times 50$  cm (c).



Attēls 2.63. Termoelektriskā siltuma plūsmas sensora shematiskais šķērsgriezums.

Veiktajos mērījumos visbiežāk tiek lietoti Leibnica Hannoveres Universitātes Elektrotehnoloģiju institūtā izveidotie un kalibrētie termoelektriskā tipa sensori *W-150 S* (Jakovičs *et.al.*, 1997). To kalibrācijas konstante  $c_T$  ( $\text{W m}^{-2} \text{V}^{-1}$ ) ir uzdots ar sakarību

$$q = c_T \cdot \tilde{U}, \quad (2.60)$$

kur  $\tilde{U}$  (V) ir mērāmais spriegums. Atkarībā no izpildījuma sensoru ar laukumu  $25 \times 25$  cm kalibrācijas konstantes vērtības mainās intervālā  $0,02 - 0,03 \text{ W m}^{-2} \text{V}^{-1}$ . Tādējādi pie praksē raksturīga siltuma plūsmas blīvuma  $25 \text{ W m}^{-2}$  izejas signāls sasniedz 1 mV.

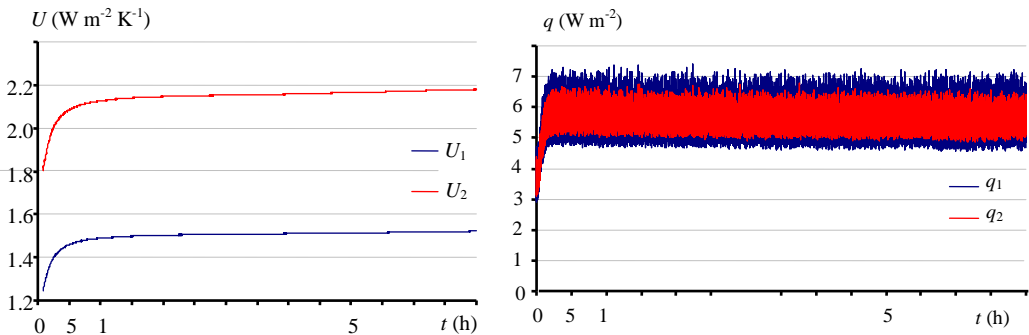
Lai praktiskajos siltuma plūsmas mērījumos tuvotos kalibrēšanā uzdotajai 5% mērprecizitātei, ir jānodrošina labs sensora termiskais kontakts ar materiāla, no kura izgatavots paraugs (mūris, betons, stikls), virsmu. Praktiski izmēģinot parādīts, ka, līmējot sensoru ar plānu akrila masas slāni uz notīrītas virsmas, tas ir iespējams. Svarīgi, lai starp sensoru un materiāla virsmu nebūtu gaisa ieslēgumu (burbuļi), jo tie var būtiski palielināt kopējo termisko pretestību un tādējādi samazināt mērījumu precizitāti. Šādu plāksnes tipa sensoru priekšrocība ir to mazais biezums, elastība un iespēja iegūt vidējotās plūsmas vērtības arī neviendabīgām konstrukcijām, bet trūkums ir to relatīvi mazā jutība.

Temperatūras mērījumiem gan uz materiāla virsmām, gan gaisā ārpus termiskajiem robežslāņiem tiek izmantoti kalibrēti temperatūras mērsensori - NiCr-Ni tipa termoelementi, kuri piestiprināti uz  $2 \text{ cm}^2$  lielām vara plāksnītēm un kuru nulles punkta kompensācijai izveidots atbilstošs slēgums elektronikas blokā. Arī temperatūras sensori, kas tiek novietoti uz eksperimentālā objekta virsmām, tiek piestiprināti ar akrila vai siltumvadošās pastas palīdzību.

Dati no temperatūras un siltuma plūsmas sensoriem tiek apstrādāti, izmantojot programmatūru *UMeas* (PAIC, 2003), un attēloti teksta un grafiskā režīmā. Tā kā apstākļi termokamerā tiek uzturēti kvazistacionāri, tad jau dažu stundu laikā pēc objekta ievietošanas un akrila masas izžūšanas temperatūras režīms stabilizējas un var tikt noteikts siltuma caurlaidības koeficients  $U$  (vai arī efektīvā siltuma vadītspēja  $\lambda_{\text{ef}}$ ). Periodisku temperatūras režīmu izraisītās siltuma plūsmas blīvumu svārstības un siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  kumulatīvo vērtību stabilizācija laikā vairāku dienu ilgā eksperimentā parādīta attēlā 2.64. Mērsistēmas uzbūve ļauj vienlaicīgi lietot vairākus siltuma plūsmas sensorus.

Sarežģītākās ģeometrijas būvkonstrukcijām ar telpisku siltuma plūsmas raksturu vai sīkiem elementiem, kuru siltuma caurlaidību atsevišķi noteikt nav iespējams, diferenciālās metodes lietojumi ir ierobežoti. Ir nepieciešami  $U$  vērtības mērījumi ar principiāli citas – integrālās metodes

palīdzību, t.i. neņemot vērā atsevišķu detaļu ietekmi, bet pētot siltuma zudumus caur visu objektu kopumā.



Attēls 2.64. Tipiskās siltuma plūsmas blīvuma svārstības un ar kumulatīvo metodi aprēķināto siltuma caurlaidību piemēri.

### 2.1.2.2.2. Integrālā metode

Cita metode gatavo būvizrādājumu siltuma caurlaidības noteikšanai laboratorijas apstākļos balstās uz konstantas temperatūru starpības uzturēšanai patērētā siltuma daudzuma reģistrēšanu, kas tiek pievadīts mērījumu laikā un daļa no kura iziet caur pētāmo objektu ar zināmu laukumu. Tā kā metodes pamatā ir kopējā siltuma daudzuma uzskaitē, tad to nosacīti sauc par integrālo metodi. LU VTPMM laboratorijā izveidotā termokamera pamatā atbilst standartu DIN EN 1098, 1993; LVS EN ISO 8990, 2007 nosacījumiem un tajā ir iespējams veikt atbilstošos būvkonstrukciju un logu mērījumus (LVS EN 12412-2, 2003; LVS EN ISO 12567-1, 2010).

Līdzīgas standartizētās mērījumu iekārtas tiek būvētas un lietotas būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  noteikšanai dažādās testēšanas laboratorijās. Kaut arī pieeja ir detalizēti aprakstīta attiecīgos standartos, bieži iekārtu izmanto arī pētnieciskos nolūkos, t.sk. izmantojamo eksperimentālo un aprēķina pieeju uzlabošanai. Piem., metāla rāmju radīto siltuma tiltu ietekmes un kopējo siltuma caurlaidību mērījumiem un skaitliskai modelēšanai (Rose, Svendsen, 2004), mitruma un sāluma režīmu kontrolei (Pavlik *et.al.*, 2002) vai gaisa plūsmas stagnācijas zonu novēršanai kamerās (Curcija, 2000).

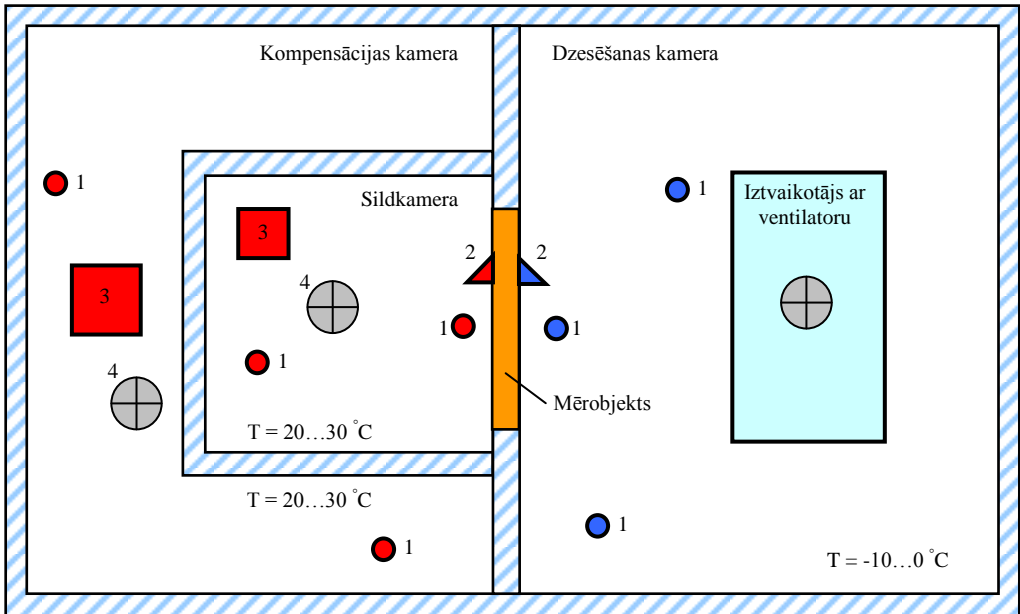
Apskatīsim integrālās mērījumu metodes termiskajā kamerā pamatnostādnes un aprēķinu metodiku. Kā minēts iepriekš, sildkambars maskā tiek iestiprināts mērobjekts (attēls 2.65) un visās kamerās tiek iestādīta konstanta temperatūra, kas tuvināti arī tiek uzturēta (attēls 2.56) – pirms mērījumu uzsākšanas, vairākas stundas darbinot sildīšanas un dzesēšanas sistēmas, panāk kvazistacionāra temperatūras režīma iestāšanos. Temperatūras abās būvizrādājuma pusēs stabilizācijai nepieciešamais laiks ir lielāks par objekta termiskās laika konstantas  $\tau$  vērtību, t.i. minimālais laika periods ir tāds, lai siltuma impulss izietu caur būvelementu. Tā kā logiem un citām līdzīgām konstrukcijām termiskā inerce ir neliela, tad arī režīms tuvināti iestājas dažu stundu laikā.

Sasniedzot kvazistacionāro stāvokli, tiek reģistrēts summārais siltuma enerģijas daudzums  $N$ , kas izdalās sildkamerā visā mērījumu periodā  $t$ . Atkarībā no objekta siltuma caurlaidības

raksturīgais tā ilgums sastāda 2 – 4 dienas. Tiešo siltuma caurlaidības koeficientu aprēķina, izmantojot sakarības (2.21), (2.31) un (2.55):

$$U_t = \frac{1}{S \cdot \Delta T} \left( \frac{N}{t} - Q_{\text{komp}} - Q_{\text{maska}} \right), \quad (2.60)$$

kur  $S$  ir pētāmā objekta laukums ( $\text{m}^2$ ), bet  $\Delta T$  – vidējā temperatūru starpība uz tā pretējām virsmām (K). Uzskaitot siltuma daudzumu patēriņu  $N$  (kWh) pieņemam, ka viss sildkamerai pievadītais elektroenerģijas daudzums tiek pārvērsts siltuma enerģijā, kuras patēriņa uzskaitē tiek izmantots elektriskais skaitītājs.



Attēls 2.65. Shematiskais termokameras attēlojums. Horizontāls šķēlums. Skats no augšas. (1 – gaisa temperatūru sensori; 2 – temperatūru sensori uz virsmām, 3 – sildītāji; 4 – ventilatori).

Lai iegūtu rezultējošo siltuma caurlaidības koeficienta vērtību  $U_{rez}$ , iekļaujot termiskos robežslāņus, izmanto formulu (2.60) un siltuma atdeves pretestības saskaņā ar tabulu 2.3. Siltuma apmaiņa ar kompensācijas kameru  $Q_{\text{komp}}$  un zudumi uz dzesēšanas kameru caur masku  $Q_{\text{maska}}$  tiek aprēķināti, izmantojot starpsienu materiāla ar biezumu  $d$  siltuma vadītspēju  $\lambda$ , ko deklarē ražotājs un kuru var arī izmērīt, kā arī ievērojot attiecīgos laukumus un temperatūru starpību:

$$Q = \frac{\lambda}{d} \cdot S \cdot \Delta T. \quad (2.61)$$

Tā kā temperatūras režīms tiek uzturēts, lai temperatūras starpība starp sildkameru un dzesēšanas kameru būtu minimāla (parasti  $\Delta T < 1^\circ\text{C}$ ), tad siltuma zudumi starp šīm kamerām ir mazi, bet tie tomēr tiek ņemti vērā. Ievērojami lielāka temperatūru starpība ( $\Delta T = 30\text{...}40^\circ\text{C}$ ) tiek uzturēta starp sildkameru un dzesēšanas kameru un mērījumu precizitātes nodrošināšanai īpaši svarīgi kontrolēt zudumus tieši caur masku.

Cits svarīgs faktors precīzai  $U$  vērtības noteikšanai ir temperatūru starpība  $\Delta T$ . Ja testējamais būvizstrādājums sastāv no diviem vai vairākiem elementiem ar atšķirīgu uzbūvi (piem., stikla pakete un rāmis loga konstrukcijas gadījumā) un dažādu siltuma caurlaidības pretestību, tad vidējās temperatūras uz attiecīgo elementu virsmām parasti atšķiras. Tādējādi vidējo virsmu temperatūru noteikšanai uz būvizstrādājuma virsmām:

- ar pietiekamu sensoru skaitu jānosaka vidējā temperatūra  $\bar{T}_i$  uz katra no atšķirīgajiem konstrukcijas elementiem,
- jāveic aprēķins, ievērojot šo  $i$ -to elementu laukumu proporcijas:

$$T = \frac{1}{S} \sum_i (\bar{T}_i \cdot S_i).$$

Sensoru rādījumu vidējo vērtības uzdotos laika intervālos, izmantojot multifunkcionālu augstjūtīgu mērplati un iepriekš minēto programmatūru *UMeas*, tiek attēlotas vizuāli reālajā laikā (attēli 2.57 un 2.58) un noglabātas teksta formāta failā.

Atšķirībā no iepriekšējā sadaļā apskatītās siltuma plūsmas sensoru metodes, kad gan temperatūras, gan siltuma plūsmas blīvuma sensori ir kalibrēti, lietojot integrālo mērījumu metodiku, ir nepieciešama papildus ēteriskās kameras kalibrācija. Šim nolūkam tiek veikti mērījumi materiāliem ar zināmu siltuma caurlaidību, papildus tiek kontrolēta arī materiāla, kas tiek lietots kameru starpsienās, siltuma vadītspēja, lietojot siltuma plūsmas sensorus.

### 2.1.2.2.3. Raksturīgie mērījumu piemēri

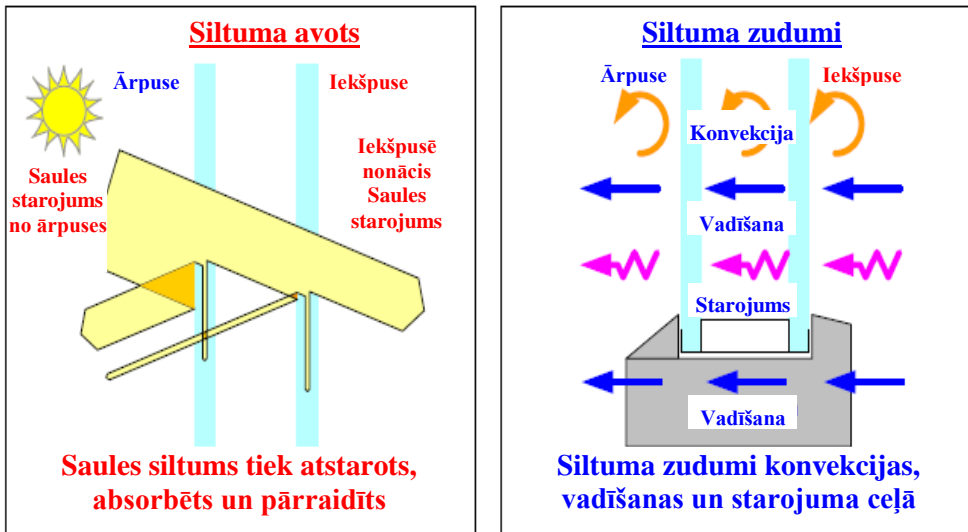
LU VTPMM laboratorijā izveidotajā eksperimentālajā iekārtā kopš tās ekspluatācijas uzsākšanas 90-to gadu otrajā pusē un pēc tās modernizācijas 2004. gadā galvenokārt ir pētīta heterogēnu konstrukciju – logu un stikla pakešu siltuma pamatā lietojot integrālo pieeju. Siltuma pārnese veidi, kuru rezultējošā ietekme uz caurspīdīgo būvelementu kopējo siltuma caurlaidību tiek noteikta ar šo metodi, shematiski parādīti attēlā 2.66.

Praktiski visos veiktajos eksperimentos paralēli tiek lietota arī diferenciālā siltuma plūsmu sensoru metode rezultātu kontrolei. Stiklotās durvis, pakešlogs ar plastmasas (PVC) rāmi un vienkāršs koka dubultlogs, kas ir sagatavoti mērījumiem termiskajā kamerā ar piestiprinātiem siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras sensoriem parādīti attēlā 2.67.

Pēdējos gadu desmitos Latvijā lietojamo stikla pakešu siltumizolējošās īpašības būtiski samazinājušās - no 3,0 līdz 0,5 W m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> atkarībā no attāluma starp stikliem, to skaita, paketes gāzes pildījuma un selektīviem stikla virsmas pārklājumiem. Attālums starp rūtīm stikla paketē parasti tiek izvēlēts tāds, lai rezultējošā konvekcijas un siltuma vadīšanas procesu ietekme būtu minimālā (attēlā 2.66), inertās gāzes pildījums nodrošina mazāku siltuma vadītspēju un mazāk intensīvu gāzes plūsmu starp stikliem un tādējādi mazāku siltuma pārnese konvekcijas ceļā. Dažāda veida zemas emisijas stikla virsmu pārklājumi savukārt samazina garo viļņu starojuma ceļā pārnests enerģijas daudzumu.

Lietojot trīs stiklu konstrukcijas ar parasto stiklu var panākt līdzīgu siltuma caurlaidības samazinājumu kā divstiklu paketēs ar selektīvo pārklājumu. Savukārt, trīs stiklu pakešu trūkums ir relatīvi lielāks svars. Kombinējot stiklus ar speciāliem mazas emisijas pārklājumiem (piem., ar

atomāra mēroga sudraba slāni) trīs stiklu paketē ar kriptonu pildījumu iespējams sasniegt  $U$  vērtības mazākas par  $0,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (Interpane Glas Industrie AG, 2002). Veikt stikla paketes optimizāciju, nosakot labāko risinājuma no siluma caurlaidības viedokļa var arī veidojot un analizējot to matemātiskos modeļus (Krievāns, 2000) vai izmantojot specializētās šim mērķim paredzētās programmas, kas ļauj lietotājam detalizēti uzdot ne tikai loga ģeometriju, bet arī izvēlēties dažādu veidu rāmjus, stikla paketes, to pildījumus un pārklājumus (Berkeley lab., 2001).



Attēls 2.66. Siltuma pārnese veidi caur stikla paketi.



Attēls 2.67. Termiskajā kamerā ievietotas stiklotās durvis (a), logs ar stikla paketi un PVC rāmi (b) un vienkāršs dubultlogs ar koka rāmi (c).

Rezultējošā siltuma pretestība ir atkarīga arī no rāmja materiāla, tā uzbūves un konstruktīvām īpatnībām, un tā siltuma vadītspējas pretestība parasti ir mazāka nekā ar inerto gāzi pildītai stikla paketei ar selektīvo pārklājumu. Kaut arī inertās gāzes (argons, kripton, ksenons)

koncentrācija stikla paketē saskaņā ar standartu (LVS EN 1279-3, 2003) var būt robežās no 90%-5% līdz 90%+10%, tā laika gaitā var samazināties un sekmēt siltuma zudumu pieaugumu. Tāpēc pakešu siltuma izolējošo īpašību mērījumus var būt nepieciešams veikt ne tikai pirms to montāžas, bet arī hermētiskuma un gāzes satura tajā pārbaudei loga ekspluatācijas gaitā – efektīva metode ir būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi eksistējošās ēkās, kas ir apskatīta sadaļā 2.1.2.2.

Kā alternatīvu pieeju tiešiem siltuma caurlaidības mērījumiem var lietot arī tehniku ultraskaņas ātruma noteikšanai stikla paketēs, kas ļauj noteikt koeficientu  $U$ , analizējot gāzes koncentrāciju (Butkus *et al.*, 2004). Tomēr šīs metodes lietojumiem ir būtiski ierobežojumi daudzu precizitāti ietekmējošo faktoru dēļ, piem., argona/gaisa maisījumam skaņas ātruma atkarība no koncentrācijas ir neliela, kas palielina mērījumu kļūdu.

Atbilstoši LBN 002-01 prasībām logu, durvju un stikloto sienu (dzīvojamām mājām pie 19°C lielas temperatūru starpības) normatīvā siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir  $1,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , bet maksimāli pieļaujamā sastāda  $2,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Ar esošajām ražošanas tehnoloģijām ir viegli sasniedzamas būtiski mazākas vērtības, ko apliecina arī vairāki desmiti veikto mērījumu Latvijas tirgū piedāvāto logu konstrukciju paraugiem. 2014. g., precizējot minēto Būvnormatīvu, normatīvās vērtības paredzēts būtiski samazināt (skat. arī 4. pielikumu), jo citās Eiropas valstīs ar līdzīgiem un pat maigākiem klimatiskiem apstākļiem prasības logu siltuma caurlaidībai ir stingrākas. Tā, maksimālā pieļaujamā  $U$  koeficienta vērtība logiem jauncelāmās ēkās (BPIE, 2011) Ungārijā, Norvēģijā, Slovēnijā un Lietuvā ir noteikta  $1,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , Austrijā un Igaunijā -  $1,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , Rumānijā un Šveicē –,  $1,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , bet Somijā tā nevar pārsniegt  $1,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

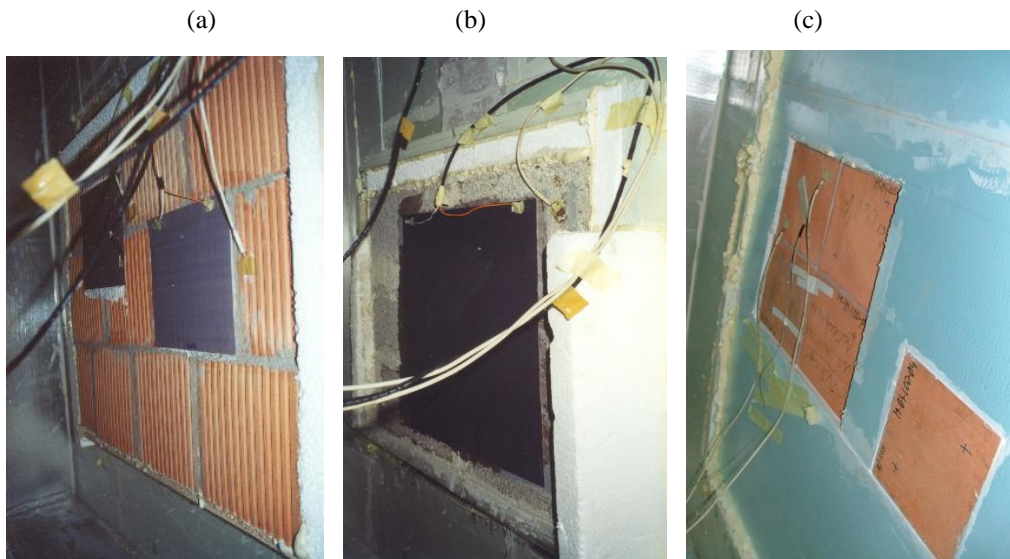
Tā kā logs ir heterogēna konstrukcija, kas sastāv no daļām ar atšķirīgām siltuma caurlaidības īpašībām, siltuma plūsma caur konstrukciju ir izteikti telpiska un mērījumos pārsvarā tiek lietota integrālā pieeja. Paraleli integrālajai metodei, lietojot siltuma plūsmas sensorus, tie dod atšķirīgus siltuma caurlaidības koeficienta mērījumu rezultātus atkarībā no sensoru novietojuma uz stikla paketes un rāmja un ir lietojama tikai atsevišķu loga daļu lokālās siltuma plūsmas vērtības noteikšanai un integrālās metodes rezultātu kontrolei. Tā, siltuma plūsmu mērījumi tipiska trīs kameru loga PVC vērtnei un rāmim, kā bija sagaidāms, parādīja, ka vērtnei siltuma caurlaidība vidusdaļā par 4%, bet stūrī pat par 8% pārsniedza rāmja (fiksētās daļas) vidējo siltuma caurlaidību. Savukārt,  $U$  vērtība rāmja stūrī ir par 6% lielāka nekā tā vidusdaļā - to nosaka rāmja salaiduma vietas konstruktīvās īpatnības. Tika salīdzināti arī rezultāti, kas vienam un tam pašam būvelementam iegūti, lietojot dažāda tipa (biezuma) siltuma plūsmu mērsensorus, bet tie kļūdas robežās neatšķirās.

Termiskajā kamerā tika veikti mērījumi arī dažādu veidu gataviem ārsienu būvelementiem. Piem., dažāda sastāva dobiem keramzītbetona un gāzbetona blokiem, ievērojot arī šuvju starp tiem aizdares atšķirīgo siltuma pretestību, kas, tādējādi, ļāva noteikt siltuma caurlaidības koeficientu  $U$  un atbilstošo efektīvo siltuma vadītspēju  $\lambda_{\text{ef}}$  (2.34) no tiem mūrētajai sienai. Tā kā siltuma vadītspēja, šuvju aizdares ar javu dēļ, šādai sienai ir izteikti nehomogēna, tad tika lietota integrālā mērēšanas metode, līdztekus kurai tika izmantoti arī dažādu izmēru plūsmas sensori (attēls 2.68). Bloku un ķieģeļu nelīdzenā virsma apgrūtināja sensoru nostiprināšanu un labāka termiskā kontakta nodrošināšanu uz sienas virsmas tika uzklāta akrila masas kārtā, kas kalpoja kā

izlīdzinošs un vienlaicīgi adhezīvs slānis, bet tā nelielais biežums un relatīvi maza siltuma pretestība manāmi neietekmēja rezultātu precizitāti.

Svarīgs rezultāts, kas tika iegūts keramzītbetona un keramisko bloku mērījumos, ir atšķirīgas siltuma izolējošo īpašību vērtības atkarībā no laika perioda pēc to izgatavošanas un iemūrēšanas standā. Tā, veicot mērījumus dažas dienas pēc keramzītbetona bloku izgatavošanas, rezultējošā siltuma caurlaidības koeficienta vērtība sasniedza  $2,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , bet pēc vairākām nedēļām – tikai  $1,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Tas ir izskaidrojams ar mitruma satura samazināšanos būvkonstrukcijā un mūrjavas izžūšanu. Savukārt dobiem *KERATERM* blokiem (attēls 2.61), kuru mitrums pēc izgatavošanas ir relatīvi mazs, siltuma izolējošās īpašības ir ievērojami labākas un siltuma caurlaidība jāvai žūstot mainās maz, pēc izžūšanas sasniedzot  $0,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

Siltuma caurlaidības un efektīvās siltuma vadīšanas koeficientu vērtības laboratorijā testētiem *KERATERM* blokiem (attēls 2.68 a), keramzītbetona blokiem (attēls 2.68 b) un mikroporainām keramiskā materiāla  $\sim 2$  cm biežām plāksnēm (attēls 2.68 c) apkopotas tabulā 2.6. Siltuma vadīšanas koeficienta aprēķina precizitāti 2 cm plāksņu gadījumā būtiski samazināja paraugu nevienmērīgais biežums – maksimālā biežumu starpība dažādos parauga stūros sasniedza pat 20%, tāpēc tika veikti vairāki atkāroti eksperimenti gan vienai plāksnei, gan arī no tām mūrētai sienai (attēls 2.68c). Paralēli veiktie mērījumi ar siltuma plūsmas sensoriem visos eksperimentos notika paraugu vidusdaļā, ja tie ir homogēni, vai arī dažādās vietās, ja tika pētīta no tiem veidotā siena, kā gadījumā ar *KERATERM* blokiem (attēls 2.68a) – pašam būvelementam un sienas fragmentam iekļaujot šuvju vietas.



Attēls 2.68. Dobo *KERATERM* bloku (a), keramzītbetona bloku (b) un keramikas plāksņu (SIA Lode) (c) siltuma caurlaidības mērījumi ar  $25 \times 25$ ,  $50 \times 50$  un  $2 \times 8$  cm siltuma plūsmas sensoriem attiecīgi.

Kā redzams tabulā 2.6, dobie un porainie materiāli nodrošina mazāku siltuma caurlaidību, ko pamatā nosaka gaisa ieslēgumi ar palielinātu siltuma pretestību. Dobo bloku rezultējošo  $\lambda_{ef}$  ietekmē vairāki faktori, kas nosaka siltuma pārnesi (Čertoks, 1999):

- drumstalas siltuma vadītspēja, kas ir atkarīga no blīvuma (porainības) un tiek uzlabota ar speciāliem piejaukumiem vai poru veidotājiem, bet tas, savukārt, samazina bloku stiprību;
- siltuma vadītspējas samazināšana, optimizējot siltuma izplatīšanas ceļus blokā (palielinot kopējo makroskopisko dobumu daļu, samazinot starpsienu biezumus starp dobumiem, optimizējot dobumu formu un savstarpējo izvietojumu);
- mūrjavas siltuma vadītspējas samazināšana un šuves forma.

Mūrjavas ietekme uz rezultējošo siltuma caurlaidību apkopota tabulā 2.7 (Čertoks, 1999). Kā viegli redzēt, vienāda biezuma materiālam atsevišķos gadījumos starpība var sasniegt 50%, tāpēc javas izvēle var izrādīties ļoti būtiska.

Tabula 2.6. Dažādu materiālu eksperimentāli noteikto siltumizolācijas īpašību salīdzinājums.

Paraugs	Biezums, cm	$U, W m^{-2} K^{-1}$	$\lambda_{ef}, W m^{-1} K^{-1}$
KERATERM bloki	51	0,7	0,36
Keramzītbetona bloki (mitri)	45	2,0	0,90
Keramzītbetona bloki (sausī)	45	1,6	0,72
Porainā keramiskā materiāla plāksnes	2	8,5	0,17

Tabula 2.7. Javas nozīme sienas siltumizolācijai.

Ārsienas veids	Līvānu celtniecības ķieģelis		Keramzītbetona bloki	
	Sienas biezums, cm	$U, W m^{-2} K^{-1}$	Sienas biezums, cm	$U, W m^{-2} K^{-1}$
Ar cementa javu	38	0,96	20	1,16
Ar vieglo javu	38	0,58	20	0,76
Ar cementa javu	51	0,79	40	0,64
Ar vieglo javu	51	0,43	40	0,41

Integrālā un diferenciālā metodes termiskajā kamerā ļauj veikt dažāda veida siltuma caurlaidības pētījumus gan gatavām būvkonstrukcijām, gan atsevišķiem materiāliem neatkarīgi no klimatiskajiem (piem., temperatūru starpības un to izmaiņas laikā) un citiem blakus faktoriem (cilvēku klātbūtne), kas ierobežo reālos apstākļos veicamo mērījumu pielietojšanas iespējas. Tomēr, ja ir jāveic mērījumi jau uzceltās ēkās un tās būvkonstrukciju siltuma izolējošās īpašības nevar noteikt laboratorijas apstākļos, ir nepieciešami t.s. „lauka mērījumi” (angļu literatūrā – *field measurements* vai *in-situ*), kas tiek raksturoti nākamajā sadaļā.

### 2.1.2.3. Mērījumi nestacionāros apstākļos ekspluatācijā esošās ēkās

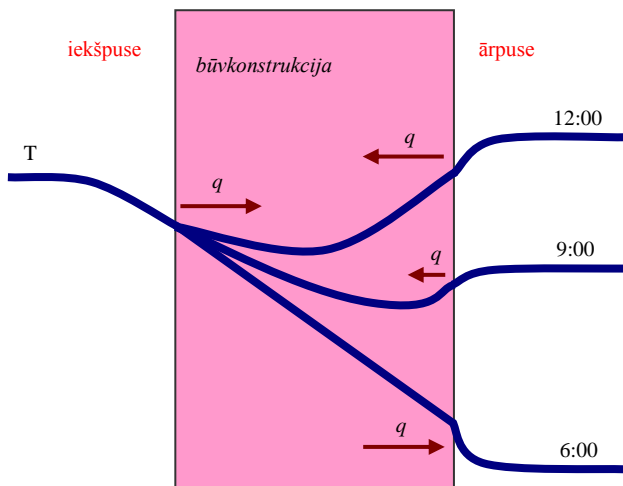
Eksperimentālos pētījumos ir pārbaudīts, ka ēku būvkonstrukciju izmērītās siltuma caurlaidības koeficienta vērtības var būtiski atšķirties no analītiski aprēķinātajām, izmantojot uzdotās materiālu siltuma vadītspējas un normētos siltuma atdeves koeficientus saskaņā ar (2.24). Bieži vien šādi aprēķini vispār nav iespējami, jo nav zināma būvkonstrukciju uzbūve vai to sastāvs. Papildus tam, laikā mainoties būvkonstrukciju materiālu īpašībām (piem., iesūcoties mitrumam vai gluži pretēji - žūstot), mainās arī to rezultējošā siltuma caurlaidība. Tāpēc ir nepieciešami norobežojošo konstrukciju mērījumi reālos ēku ekspluatācijas apstākļos, ko veic, lietojot speciālu pieeju iegūto datu pēcapstrādei un siltuma caurlaidības koeficienta aprēķinam. Šāda ir nestacionāros apstākļos veikto mērījumu minimizācijas metodika, kas ir izstrādāta LU VTPMM laboratorijā un kura ļauj aprēķināt būvkonstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu  $U$ , veicot eksperimentā noteiktās un uz matemātiskās modelēšanas bāzes skaitliski aprēķinātās siltuma plūsmu starpības minimizāciju.

Iemesls, kāpēc tika attīstīta speciālā pieeja datu apstrādei, ir procesa nestacionāra daba un eksperimenta laika ierobežojumi (sevišķi veicot mērījumus dzīvojamās telpās), kas samazina vienkāršās vidējošanas pieejas precizitāti. Ja gaisa temperatūra pie būvkonstrukcijas virsmas ir laikā mainīga, tad laikā mainās arī siltuma plūsmas caur konstrukciju. Pieaugot temperatūrai vienā pusē pakāpeniski pieaug arī materiāla temperatūra un pēc zināma laika šīs temperatūras izmaiņas iespaidu varēs konstatēt arī uz pretējās virsmas - mainīsies arī siltuma plūsma caur šo virsmu. Līdz ar to nestacionārā procesā ir iespējamās situācijas, kad siltuma plūsmas uz materiāla vai konstrukcijas virsmām ir atšķirīgas un pat pretēji vērstas materiālam sasilstot vai atdziestot (attēls 2.69). Šī procesa ātrums ir būtiski atkarīgs no materiāla temperatūras vadītspējas  $a$  (2.8) un to raksturo ar termiskās inerces laiku  $\tau$  (h). Tādējādi, lai tuvināti noteiktu  $U$  vērtību nestacionāros temperatūras apstākļos, mērījumu kopējam periodam  $t \gg \tau$ , bet laika intervālam starp atsevišķiem mērījumiem  $\Delta t \ll \tau$ . Līdz ar to mērījumiem konstrukcijās ar mazu temperatūras vadītspēju dabiskos temperatūru maiņas apstākļos var būt nepieciešams vairāku dienu un pat nedēļu ilgs periods. Tomēr, ja objekts var tikt transportēts un pētīts laboratorijas apstākļos pie stacionāras temperatūru starpības, mērījumiem nepieciešamo laiku var ievērojami samazināt, izmantojot iepriekšējās sadaļās aprakstītās karstās plātes iekārtu vai termisko kameru.

Siltuma caurlaidības mērījumi ekspluatācijā esošās ēkās LU VTPMM laboratorijā tika aizsākti kā pirmie pētījumi energoefektivitātes jomā 90-to gadu otrajā pusē. Sākotnēji mērījumi nestacionāros apstākļos tika veikti ilgāku laiku ekspluatācijā esošās ēkās veco norobežojošo konstrukciju stāvokļa novērtējumam, kas ļāva uzkrāt ievērojamu pieredzi šāda veida mērījumos un, kas ir būtiski, izveidot ievērojamu tipveida dzīvojamo māju konstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu datu bāzi. Pēdējos gados eksperimenti tika veikti arī no jauna uzceltās ēkās. Laika gaitā lietotā mēraparatūra un programmatūra tika attīstīta un uzlabota (Jakovičs *et.al.*, 1997, Gendelis, Jakovičs, 2005).

Patlaban laboratorijā ir izveidotas un plaši tiek lietotas divas mobilas siltuma caurlaidības pētījumiem paredzētas mērsistēmas, vēl trīs analogiskās mērsistēmas tika izgatavotas un nodotas Latvijas Lauksaimniecības universitātes un Lietuvas Lauksaimniecības universitātes pētnieciskām vajadzībām. Jaunākās paaudzes mērsistēmā realizēts distances (bezvadu) sensoru pieslēgums un

autonoma datu uzkrāšanas iekārta, t.i., mērījumiem objektā nav nepieciešams dators. Tāpat paralēli tiek lietota arī rūpnieciski izgatavota autonoma universālā ierīce uz *Almemo* datu uzkrājēja bāzes. Datu pēcapstrādei datorā un siltuma caurlaidības koeficienta aprēķinam tiek izmantota oriģinālā metodika un atbilstošs programnodrošinājums.



Attēls 2.69. Nestacionāra siltuma apmaiņas procesa shematisks attēlojums, mainoties temperatūrai vienā konstrukcijas pusē.

### 2.1.2.3.1. Metodes apraksts

Saskaņā ar (2.25) un (2.31), stacionārā viendimensionālā siltumapmaiņas procesā būvkonstrukcijas rezultējošo siltuma caurlaidības koeficienta vērtību  $U$  ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ) var aprēķināt, lietojot siltuma plūsmas blīvuma  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) un gaisa temperatūru starpību  $\Delta T$  (K) tās abās pusēs ārpus termiskajiem robežslāņiem:  $U = q/\Delta T$ . Kaut arī daudzos gadījumos lokālais siltumapmaiņas process pietiekama izmēra necaurspīdīgās būvkonstrukcijās var tikt uzskatīts var viendimensionālu, dabiskos apstākļos tā raksturs parasti ir nestacionārs mainīgo ārējo meteoroloģisko apstākļu dēļ un tāpēc  $U$  aprēķinam momentānās siltuma plūsmas un temperatūru vērtības nevar izmantot.

Vienu no vienkāršotām pieejām  $U$  aprēķinam ir t.s. kumulatīvā metode (2.59), kas tiek izmantota arī iepriekš aprakstītajos kvazistacionāros mērījumos termiskajā kamerā. Lietojot šo pieeju, siltuma caurlaidības koeficienta aktuālā vērtība pēc noteikta mērperioda tiek aprēķināta no visām līdz šim brīdim reģistrētajām  $n$  vērtībām un tās rezultāti ir pietiekami precīzi relatīvi nelielu temperatūras izmaiņu vai pietiekami ilgu mērījumu periodu gadījumā (Doran, 2000; ISO 9869,1994).

Kumulatīvās metodes pielietojums reālos klimatiskos apstākļos parādīja, ka mērījumiem nepieciešams pat vairāk nekā nedēļu ilgs laiks un  $U$  vērtības konverģence ievērojami pasliktinās, samazinoties būvkonstrukcijas siltuma caurlaidībai un pieaugot tās siltuma ietilpībai. Gadījumā, ja mērījumos temperatūru starpība ir maza vai siltuma plūsma maina zīmi, vidējošanas metodes lietojumi pat ilgākā laika periodā var nedod korektu rezultātu. LU VTPMM laboratorijā tika

izstrādāta principiāli cita iegūto siltuma plūsmas blīvuma un temperatūru eksperimentālo datu apstrādes un  $U$  aprēķina metodika, kas ļauj to eksperimentāli noteikt pietiekami īsā laika periodā arī reālos ēku ekspluatācijas apstākļos (Jakovičs *et.al.*, 1997; Krievāns, 2000).

Attīstītās metodes pamatā ir pieņēmums, ka pētāmās būvkonstrukcijas biežums ir daudz mazāks par pārējām divām dimensijām. Tāpēc temperatūras izmaiņas perpendikulāri virsmai ir daudz lielākas nekā citos virzienos un tuvināti var pieņemt, ka citos virzienos temperatūra nemainās. Tādējādi tiek risināta viendimensionāla siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanas problēma un kā izejas dati kalpo siltuma plūsmas blīvums uz būvkonstrukcijas siltākās virsmas un temperatūru starpība starp virsmām. Problēmas risinājumus ir siltuma plūsmas kā funkcijas no laikā mainīgās temperatūru starpības atrašana, kur kā parametri ietilpst arī termisko inerci un siltuma caurlaidību raksturojošie lielumi. Tādējādi, minimizējot teorētiski aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās siltuma plūsmas starpību pēc šiem parametriem, var tuvināti atrast šo parametru faktiskās vērtības.

Apskatīsim nestacionāru viendimensijas siltumvadīšanas vienādojumu homogēnā vidē:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.62)$$

kur  $t \in [0, +\infty)$  – laiks,  $x \in [0, l]$  – koordināte,  $T = T(x, t)$  – temperatūra pētāmā apgabala iekšienē. Robežnosacījumus uzdod, izmantojot temperatūru mērījumu eksperimentālos datus abās sienas pusēs mērījumu laika intervālā:

$$T(0, t) = T_1(t) \text{ un } T(l, t) = T_2(t). \quad (2.63)$$

Sākuma nosacījumus uzdod vispārīgā veidā, neprecizējot funkcijas  $f(x)$  izskatu:

$$T(x, 0) = f(x). \quad (2.64)$$

Apzīmēsim  $T(0, 0) = T_1(0)$  un  $T(l, 0) = T_2(0)$ .

Lai atrisinātu formulēto problēmu, vienādojumam (2.62) tiek pielietota Laplasa transformāciju metode. Tad transformēto siltumvadīšanas vienādojumu ar temperatūras sākuma nosacījumu (2.64) var pierakstīt šādā formā:

$$a^2 \frac{d^2 \bar{T}(x, t)}{dx^2} - p \bar{T}(x, t) = -f(x). \quad (2.65)$$

Lai atrastu šī otrās kārtas nehomogēnā diferenciālvienādojuma vispārīgo atrisinājumu vispirms atrod atbilstošā homogēnā diferenciālvienādojuma

$$\frac{d^2 \bar{T}}{dx^2} - \frac{p}{a^2} \bar{T} = 0$$

vispārīgo atrisinājumu:

$$\bar{T}_h(x, p) = C_1 \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a} x\right) + C_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a} x\right) = C_1 \bar{T}_{1k} + C_2 \bar{T}_{2k}, \quad (2.66)$$

kur  $C_1$  un  $C_2$  pagaidām nenoteiktas konstantes. Tad nehomogēnā vienādojuma (2.65) vispārīgo atrisinājumu

$$\bar{T}(x, p) = \bar{T}_h(x, p) + \bar{T}^*(x, p), \quad (2.67)$$

iegūst, izmantojot nehomogēnā vienādojuma partikulāro atrisinājumu  $\bar{T}^*(x, p)$ .

Tālāk, pēc algebriskiem pārveidojumiem, no (2.62) iegūstam šādu temperatūras attēla izteiksmi:

$$\bar{T}_h(x, p) = C_1 e^{\frac{\sqrt{p}}{a}x} + C_2 e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^x e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(x-\zeta)} f(\zeta) d\zeta + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_x^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(\zeta-x)} f(\zeta) d\zeta \quad (2.68)$$

un konstanšu  $C_1, C_2$  vērtības:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \frac{\bar{T}_1 e^{-\frac{\sqrt{p}l}{a}} - \bar{T}_2 - \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(l-\zeta)} f(\zeta) d\zeta + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(l+\zeta)} f(\zeta) d\zeta}{\exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a}l\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a}l\right)} \\ C_2 = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1 e^{\frac{\sqrt{p}l}{a}} + \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{\frac{\sqrt{p}}{a}(l-\zeta)} f(\zeta) d\zeta - \frac{1}{2a\sqrt{p}} \int_0^l e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(l-\zeta)} f(\zeta) d\zeta}{\exp\left(-\frac{\sqrt{p}}{a}l\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{p}}{a}l\right)} \end{array} \right. \quad (2.69)$$

Sākuma nosacījumu ietekmes uz temperatūru sadalījumu pētāmajā apgabalā pēc kāda laika  $t$  novērtējums parāda, ka sākotnējā sadalījuma ietekme uz temperatūru sadalījumu sistēmā laikā eksponenciāli dilst, un laika momentos, kas daudz lielāki par sistēmas raksturīgo laika konstanti  $\tau_0 = l^2/a^2 = l^2\rho c/\lambda$ , sākuma nosacījumu ietekme kļūst nenozīmīga. Tomēr, lai tie būtu pēc iespējas vienkāršāki, var izvēlēties sākotnēji lineāru temperatūru sadalījumu starp izmēritajām temperatūrām uz virsmām  $T_1(0)$  un  $T_2(0)$ :

$$f(x) = \frac{T_2(0) - T_1(0)}{l} x + T_1(0), \quad (2.70)$$

kas atbilst stacionāram stāvoklim homogēnā materiālā.

Pēc inversās transformācijas siltuma plūsmas blīvuma  $q$  izteiksmi iegūst sekojošā formā:

$$q_1(t) = \int_0^l [T_1'(\tau) a_1(t-\tau) - T_2'(\tau) a_2(t-\tau)] d\tau - \frac{\lambda}{l} [T_2(0) - T_1(0)]. \quad (2.71)$$

kur  $a_1(t) = L^{-1} \left[ \frac{A}{B} \right] = \frac{\lambda}{l} + \frac{2\lambda}{l} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{t}{\tau_k}}$ ,  $a_2(t) = L^{-1} \left[ \frac{1}{B} \right] = \frac{\lambda}{l} + \frac{2\lambda}{l} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k e^{-\frac{t}{\tau_k}}$ ,

$$A = ch \left( \frac{\sqrt{p}}{a} l \right) \text{ un } B = \frac{a\sqrt{p}}{\lambda} sh \left( \frac{\sqrt{p}}{a} l \right).$$

Iegūtais integrālis saista temperatūru vērtības apgabala galapunktos laika intervālā līdz dotajam laika momentam un siltuma plūsmas blīvumu apgabala sākumpunktā (uz virsmas). Bez tam, izteiksme (2.65) papildus satur vēl tikai divus lineāri neatkarīgus lielumus – pirmo raksturīgo

laika konstanti:  $\tau_1 = \left( \frac{l}{a\pi} \right)^2$  un būvkonstrukcijas tiešo siltuma caurlaidības koeficientu  $U = \lambda/l$ .

Tādējādi integrālvienādojums (2.65) ar koeficientu izteiksmēm veido noslēgtu sistēmu minēto lielumu noteikšanai.

Tālākam siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  skaitliskam aprēķinam tiek izmantota uzlabotā datu apstrādes metode (Jakovičs *et.al.*, 1997; Krievāns, 2000), kuras pamatā ir no temperatūras mērījumu datiem saskaņā ar iepriekš aprakstīto analītisko pieeju aprēķinātā siltuma plūsmas blīvuma un mērījumos eksperimentāli noteiktā siltuma plūsmas blīvuma starpības minimizēšana. Aprakstītā aprēķinu metode un skaitliskie algoritmi tika realizēti programmatūrā *DataProc* (PAIC, 2002), kas arī tiek izmantota visu pēdējos gados iegūto eksperimentālo datu pēcapstrādei un  $U$  koeficienta vērtības aprēķiniem. Atsevišķus metodes soļus ilustrē attēli no minētās programmatūras.

Skaitliskās minimizācijas pieejā vispirms tiek sastādīts funkcionālis

$$F(U, \tau_1) = \sum_{i=1}^N (q_{\text{num}}[U, \tau_1, i] - q_{\text{exp}}[i])^2, \quad (2.72)$$

kur  $q_{\text{exp}}[i]$  ir eksperimentāli izmērītais siltuma plūsmas blīvums laika momentā  $t_i$ , bet  $q_{\text{num}}[U, \tau_1, i]$  – skaitliski aprēķinātais siltuma plūsmas blīvums šajā laika momentā, kas ir atkarīga tikai no diviem iepriekšminētajiem parametriem - pirmās raksturīgā laika konstantes  $\tau_1$  un siltuma caurlaidības koeficienta  $U$ . Summēšana notiek pa visiem laika momentiem, kuros ir veikta temperatūru vērtību uz virsmas un siltuma plūsmas blīvuma vērtību caur vienu no virsmām. Plūsmas blīvumu  $q_{\text{num}}[U, \tau_1, i]$  iegūst, skaitliski integrējot izteiksmi (2.65) laikā:

$$q_{\text{num}}[U, \tau_1, i] = \sum_{j=1}^i \{(T_1(j) - T_1(j-1))a_1(i-j) - (T_2(j) - T_2(j-1))a_2(i-j)\} - U(T_2(0) - T_1(0)), \quad (2.73)$$

$$a_1(i) = 2U \sum_{j=1}^i e^{-\frac{\Delta t \cdot j^2}{\tau_1}} + U, \quad a_2(i) = 2U \sum_{j=1}^i (-1)^j e^{-\frac{\Delta t \cdot j^2}{\tau_1}} + U. \quad (2.74)$$

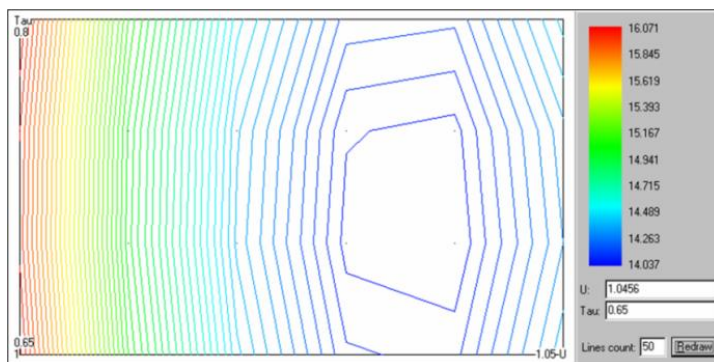
Šī funkcionāļa minimizācija tiek realizēta divos etapos. Vispirms tiek uzdots taisnstūrveida apgabals diskrētajā  $\{U, \tau_1\}$  plaknē, kurā atrodas meklējamās šo lielumu vērtības - vērtību diapazons tiek uzdots pēc pieredzes vai aptuveni aprēķiniem konstrukcijām ar zināmu uzbūvi. Praktiski jebkura pētāmā būvelementa  $U$  vērtība parasti ir intervālā  $0,1 \dots 3,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , bet  $\tau_1$  – intervālā  $0,01 \dots 2$  diennaktis, ko var pieņemt kā pirmo tuvinājumu nezināmiem objektiem. Aprēķinu algoritmā funkcionāļa (2.72) minimālās vērtības uzdotajā apgabalā tiek meklētas uz fiksēta diskrēta režģa ar uzdotu soli pa katru no  $U$  un  $\tau_1$  asīm. Tiek noteiktas funkcionāļa vērtības punktu kopā, kas pieder sākumā uzdotajam apgabalam, un atrasts punkts, kurā funkcionāļa vērtība ir minimāla (attēls 2.70).

Otrajā etapā rezultāta precizēšanai pirmajā solī atrastā punkta ar minimālu funkcionāļa  $F(U, \tau_1)$  vērtību apkārtņē tiek veikta turpmāka izteiksmes (2.72) minimizācija, izmantojot gradienta nolaišanās metodi, ar pakāpenisku soļa samazināšanu (Bahvalov *et.al.*, 1975). Šī operācija tiek turpināta, līdz solis vai kļūda kļūst mazāki par to uzdotajām minimālajām vērtībām, ko ir iespējams mainīt. Minētās gradientās minimizācijas procesā tālākie funkcijas  $F(\vec{x}) = F(U, \tau_1)$  tuvinājumi  $F(\vec{x}_{n+1})$ , kur  $n > 0$ , tiek iegūti no iepriekšējiem, pārvietojoties funkcijas  $F(\vec{x})$  gradientam pretējā virzienā. Tādējādi katru nākamo tuvinājumu var uzrakstīt formā:

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n - \delta_n \text{grad } F(\vec{x}_n). \quad (2.75)$$

Parametru  $\delta_n$  izvēlas no šāda minimuma nosacījuma:  

$$F(\bar{x}_n - \delta_n \text{grad } F(\bar{x}_n)) = \min \quad . \quad (2.76)$$

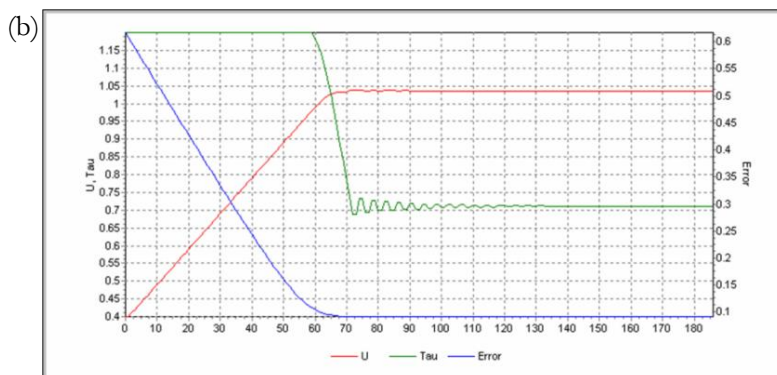


Attēls 2.70. Programmatūras DataProc logs ar funkcionāļa F vērtībām plaknes (U,  $\tau_1$ ) diskrētajos punktos – pirmais aprēķinu posms.

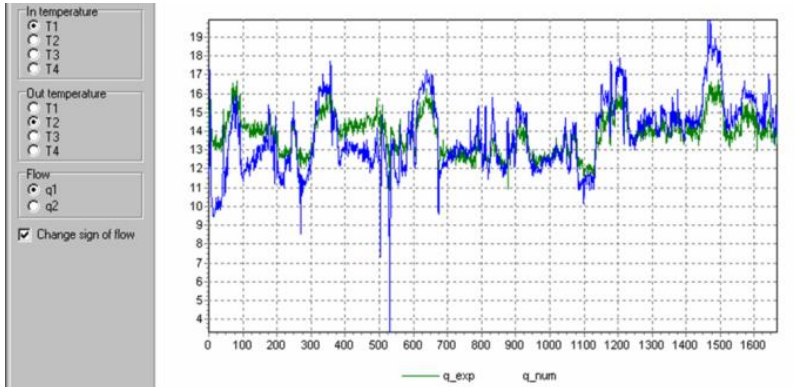
Ja tādu virzienu, kurā funkcija samazinās, nevar atrast, tad solis tiek samazināts un virziena meklēšana tiek atkārtota. Šis aprēķinu process tiek iteratīvi atkārtots, līdz starpība starp funkcijas vērtībām divos sekojošos punktos kļūst mazāka par uzdoto vērtību (attēls 2.71). Vizuāli izmērītā un skaitliski aprēķinātā siltuma plūsmas blīvuma salīdzinājums vienā grafikā parādīts attēlā 2.72.

(a)

Iter	U	Tau	dU	dTau	F(i-1)	F(i)	error:0.01 (%)
121	1.0358E+00	7.0941E-01	7.1790E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4008E+01	9.1696E-02
122	1.0358E+00	7.0941E-01	0.0000E+00	3.2305E-03	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
123	1.0358E+00	7.1264E-01	6.4611E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4008E+01	9.1696E-02
124	1.0358E+00	7.1264E-01	0.0000E+00	-2.9075E-03	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
125	1.0358E+00	7.0974E-01	5.8150E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4008E+01	9.1695E-02
126	1.0358E+00	7.0974E-01	-2.0028E-04	2.4176E-03	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
127	1.0356E+00	7.1215E-01	5.2335E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1694E-02
128	1.0356E+00	7.1215E-01	1.8025E-04	-2.1758E-03	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
129	1.0358E+00	7.0998E-01	4.7101E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1694E-02
130	1.0358E+00	7.0998E-01	-1.6222E-04	1.9582E-03	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
131	1.0357E+00	7.1194E-01	4.2391E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
132	1.0357E+00	7.1194E-01	1.4600E-04	-1.7624E-03	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1693E-02
133	1.0358E+00	7.1017E-01	3.8152E-04	0.0000E+00	1.4007E+01	1.4007E+01	9.1694E-02



Attēls 2.71. Programmatūras DataProc logs ar gradientās minimizācijas procesa aprēķiniem (a) un tā parametru vizualizāciju (b) – otrs aprēķinu posms.



Attēls 2.72. Programmatūras DataProc logs ar skaitliskās un eksperimentālās siltuma plūsmas vizualizāciju.

Aprakstītās analītiskās pieejas skaitliskais algoritms tiek realizēts programmatūrā, kas paredz iespēju pirms aprēķiniem kontrolēt un mainīt sekojošus skaitliskos parametrus:

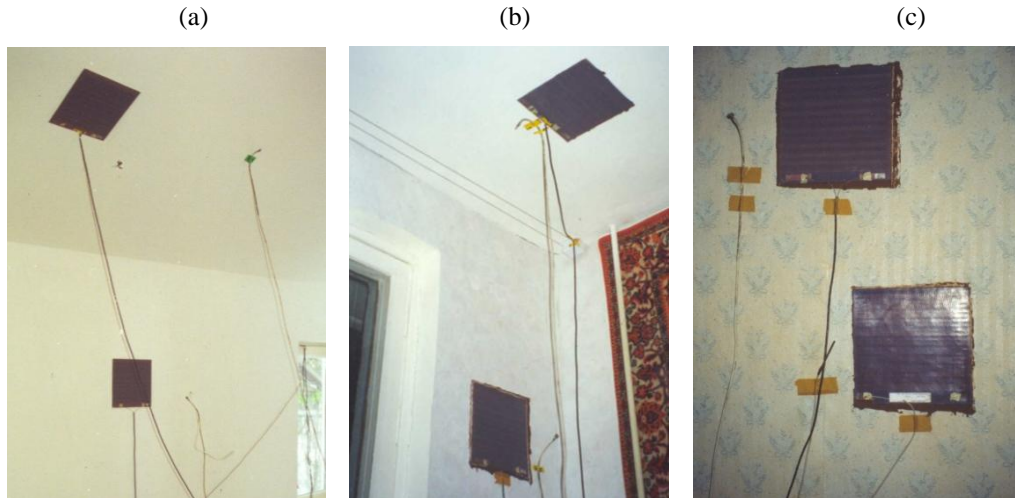
- locekļu skaitu rindās (2.75) un virzienu, kuros punkta apkārtnē tiek noteiktas minimizācijas funkcionāļa  $F(U, \tau_1)$  vērtības, skaits;
- $U$  un  $\tau_1$  soļu garumi un to vērtību intervāls, kurā tiks meklētas šo lielumu vērtības,
- standarta kvadrātiskā novirze starp  $q_{\text{exp}}[i]$  un  $q_{\text{num}}[U, \tau_1, i]$ , pie kuras aprēķini tiks pārtraukti.

Aprakstītā skaitliskā datu apstrādes metodika ir paredzēta eksperimentālo siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras mērījumu datu, kas iegūti ēku ekspluatācijas apstākļos, apstrādei. Principiāli tā tika izstrādāta 90-to gadu otrajā pusē un vēlāk tajā tika uzlabta algoritma ātrdarbība un lietojuma ērtums. Savukārt eksperimentālās iekārtas, kas tiek izmantotas mērījumos datu iegūšanai un uzkrāšanai, tiek izmantotas dažādas. Neatkarīgi no tā, vai tiek izmantota rūpnieciski izgatavota mēriekārta vai arī ir oriģinālais izstrādājums, pamatprincipi un to funkcionalitāte pamatā ir nemainīgi – veikt fizikālo lielumu mērījumus un iegūto datu uzkrāšanu tālākai to pēcapstrādei. Apskatīsim šādu mērsistēmu darbības pamatprincipus un lietojumu īpatnības.

$U$  noteikšanai ir nepieciešams reģistrēt siltuma plūsmas blīvumu  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) caur pētāmo būvkonstrukciju un temperatūru starpību tās abās pusēs  $\Delta T = T_{\text{iekšā}} - T_{\text{ārā}}$  ārpus termiskajiem robežslāņiem. Siltuma plūsmas blīvuma reģistrācijai tiek izmantoti iepriekš aprakstītie dažādu izmēru sensori (attēlos 2.62 un 2.63) ar zināmām kalibrācijas konstantēm. Laba termiskā kontakta nodrošināšanai ar virsmu, uz kuras sensori tiek nostiprināti, tāpat kā mērījumos termiskajā kamerā, tiek lietots plāns akrila slānis. Dažas virsmas (piem., papīra tapetes) akrila masa sabojā, tāpēc gludām virsmām var izmantot arī piespiešanas paņēmienu (King, 2000). Praktiskajos mērījumos pētāmās konstrukcijas parasti ir pietiekami liela izmēra un tāpēc visbiežāk tiek lietoti sensori ar izmēriem  $25 \times 25$  cm (attēls 2.73), retāk tiek izmantoti citu izmēru sensori. Temperatūras mērījumiem tiek izmantoti kalibrētie  $k$ -tipa  $\text{NiCr-Ni}$  termopāri, kas tiek nostiprināti siltuma plūsmas sensora tuvumā dažu centimetru attālumā no virsmām (attēls 2.73).

Parasti, ja to atļauj mērsistēmas pieslēguma veids, paralēli tiek veikti 2 mērījumi dažādām norobežojošām būvkonstrukcijām (piem., ārsienai un jumta/bēniņu konstrukcijai - attēls 2.73 a,b),

tādējādi samazinot ēkas apsekojumam nepieciešamo laiku. Situācijās, kad ārējais temperatūras mērījumi nav iespējami divām konstrukcijām, abu siltuma plūsmas sensoru mērījumus ir lietderīgi veikt vienam objektam papildus rezultātu kontrolei (attēli 2.73 c).



Attēls 2.73. Siltuma plūsmas sensori un temperatūras sensori eksperimentālos mērījumos ārīsenai un savietotam jumtam (a), ārīsenai un bēniņu pārsegumam (b) un ārīsenai (c).

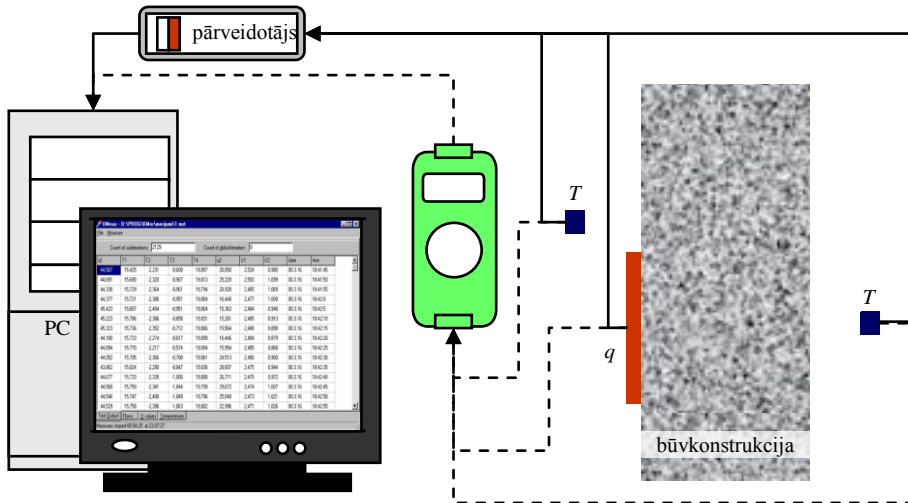
Parasti eksperimentus veic, izmantojot speciāli izgatavotu mērsistēmu. Kā alternatīvu datu reģistrēšanas un uzkrāšanas ierīci mērījumos var izmantot *Almemo* tipa datu uzkrājēju (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, 2003, 2004), kas pie nelielām un mainīgām siltuma plūsmām nenodrošina augstu siltuma plūsmas blīvuma mērījumu precizitāti, bet arī ir kompakts var tikt izmantota arī bez elektrotīkla pieslēguma. Visos gadījumos iegūto datu pēcāpstrādei un siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  aprēķinam ar datora tiek izmantota programmatūra *DataProc*. Shematiskis abu mērsistēmu kopskats parādīts attēlā 2.74, to svarīgākās komponentes apkopotas tabulā 2.8, bet fotogrāfijas mērījumu laikā – attēlā 2.75

Tabula 2.8. Siltuma plūsmu un temperatūru mēriekārtu svarīgākās komponentes.

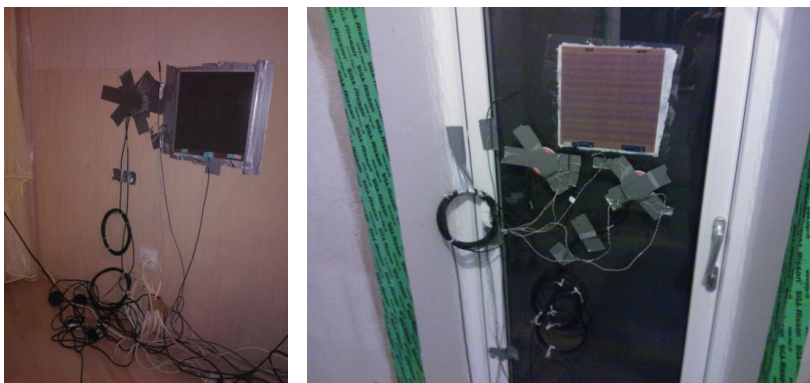
Komponente	Tips	Skaitis
Dators vai datu uzkrāšanas iekārta	PC, autonoms datu uzkrājē vai <i>Almemo</i> 2290-8	1
Mērplate, autonoms elektroniskais bloks vai programmēts spraudnis	NI AT MIO-16XE-50 vai <i>Alememo</i> tipa	1
Integrējošs siltuma plūsmas sensors	W-150 S (25×25 vai 50×50 cm <sup>2</sup> )	2 - 4
Temperatūras mērsensori	Termopretestības Pt100 vai <i>NiCr-Ni</i>	4-10

Eksperimentālo datu reģistrācijai, mērījumu parametru iestādīšanai un procesa kontrolei mērījumos ar datorsistēmu tiek izmantota iepriekš jau apskatītā *UMeas* programmatūra (PAIC, 2003). Ar minētās programmatūras palīdzību ir iespējams iestādīt pievienoto siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras sensoru kalibrācijas konstantes, laika intervālu starp mērījumiem un uz

ekrāna attēlojamo pēdējo iegūto datu punktu skaitu vizuālai mērījuma kontrolei (attēls 2.76). Temperatūru un plūsmu mērījumi tiek veikti vairākas reizes sekundē, bet, lai samazinātu uzkrājamo datu daudzumu un atvieglotu to tālāko apstrādi, šie dati tiek vidējoti pa uzdotiem laika intervāliem - parasti tiek izvēlēti intervāli no 1 līdz 5 minūtēm.



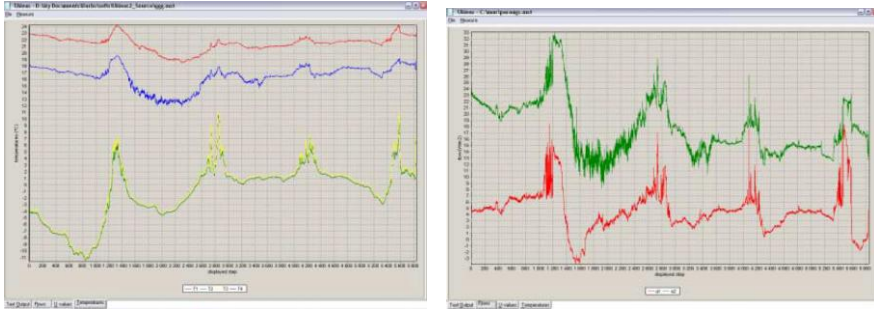
Attēls 2.74. Siltuma plūsmas un temperatūru mērīstēmu svarīgākās komponentes.



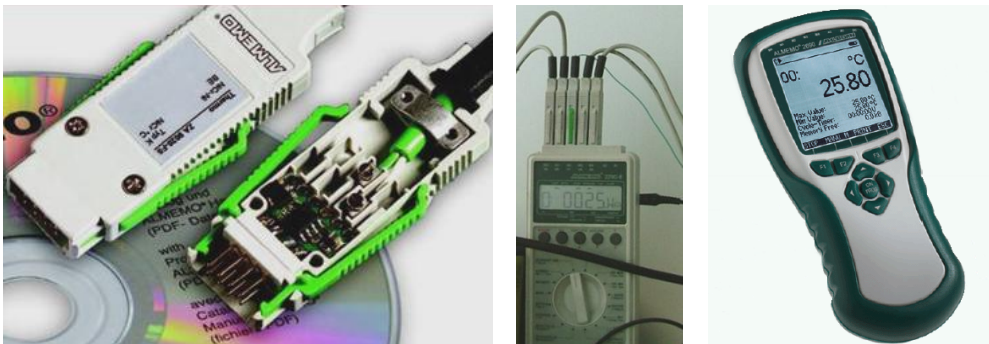
Attēls 2.75. Siltuma plūsmas blīvuma un temperatūras mērījumi. Eksperimentālo datu reģistrēšanai tiek izmantota datorsistēma (pa kreisi) un autonoma iekārta Almemo (pa labi).

Gadījumā, ja mērdatu reģistrēšana notiek ar *Almemo* tipa autonomo datu uzkrāšanas iekārtu, visu sensoru kalibrācijas konstantes jau rūpnieciski ir ieprogrammētas attiecīgajos savienojuma spraudņos (attēls 2.77), ko nepieciešamības gadījumā var arī viegli pārprogrammēt. Ierakstu intervāls parasti tiek uzdots līdzīgi kā mērīstēmas gadījumā – no 1 līdz 5 minūtēm, bet tas ir ierobežots ar pieejamās atmiņas daudzumu. Veicot vienas siltuma plūsmas un divu temperatūras sensoru paralēlos mērījumus ar 1 minūtes intervālu, kopējais eksperimenta ilgums pārsniedz 5 dienas, kas lielākoties ir pietiekami. Ierīces atmiņā ierakstītie mērījumu dati tiek

eksportēti uz datoru ar termināla palīdzību tālākai to apstrādei un siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  aprēķinam.



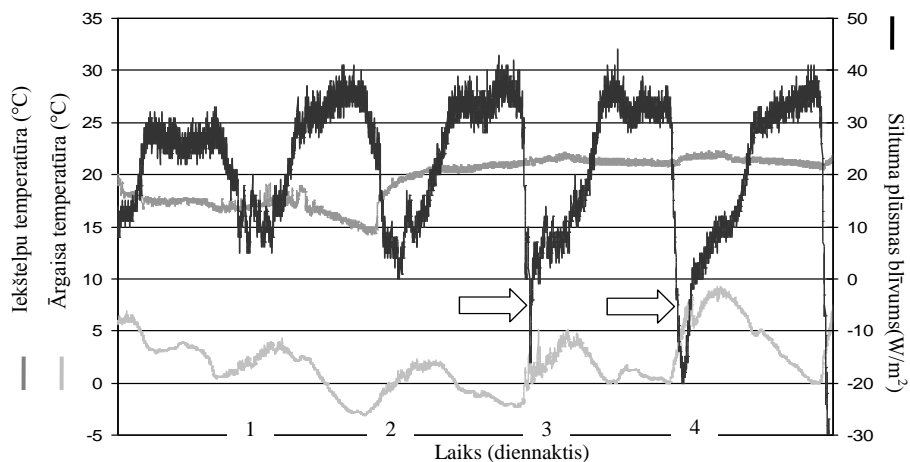
Attēls 2.76. Temperatūru (pa kreisi) un siltuma plūsmas blīvuma (pa labi) mērījumi reālajā laikā UMeas programmatūrā.



Attēls 2.77. Programmējamie sensoru savienojuma spraudņi un Almemo datu uzkrāšanas ierīces.

#### 2.1.2.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri

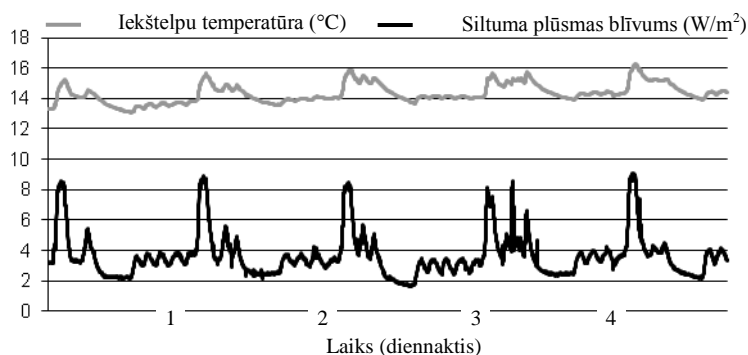
Veicot mērījumus ekspluatācijā esošās ēkās, jārēķinās ar specifiskām problēmām un blakus faktoriem, kas var negatīvi ietekmēt mērījumu norisi vai pat sabojāt tos. Te var minēt siltuma plūsmas sensoru jutību - jebkuru siltu ķermeņu atrašanās to tuvumā ienes savu korekciju siltuma starojuma dēļ (piem., cilvēks, kas atrodas blakus sensoram), jo papildus silda sensora virsmu. Līdzīgas siltuma plūsmas svārstības izraisa mainīga gaisa plūsmas intensitāte tā tuvumā. Ļoti stipri plūsmu ietekmē tiešs Saules starojums – tādos apstākļos mērījumus veikt nevar. Gadījumā, ja siltuma plūsmas sensors atrodas uz caurspīdīgās virsmas, tādas kā logs, tiešais Saules starojums var izmainīt pat siltuma plūsmas virzienu (attēls 2.78). Tas neatbilst mērījumu mērķim, jo tādā veidā tiek mērīts nevis no iekšējām izejotais, bet radiācijas ceļā virsmai pievadītais siltuma daudzums. Tādēļ gan mērāmās virsmas, gan plūsmu un temperatūras sensori jāaizsargā no tieša Saules starojuma. Caurspīdīgu būvelementu mērījumiem ir ieteicams izvēlēties ēkas ēnas pusi un apmākušās dienas, bet, ja iespējams, vislabāk ir veikt standartizētus mērījumus iepriekš apskatītajā termiskajā kamerā (sadaļa 2.1.2.2), lai pilnībā izslēgtu nevēlamo faktoru ietekmi uz mērījumu precizitāti.



Attēls 2.78. Saules starojuma izraisītās siltuma plūsmas izmaiņas.

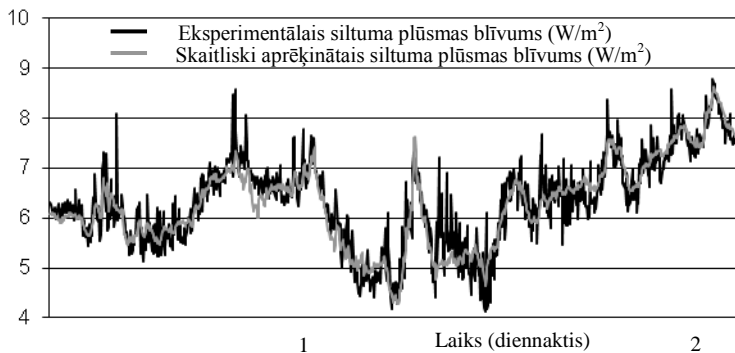
Veicot iegūto datu pēcapstrādi, acīmredzami kļūdainus datu posmus ar tiešā Saules starojuma vai cilvēku klātbūtnes izraisītiem plūsmas izmaiņām var „izgriezt” datu apstrādes programmatūrā *DataProc* un neiekļaut  $U$  aprēķinā. Bet tādā gadījumā no mērdatiem vairs nav korekti nosakāma termiskā laika konstantas  $\tau$  vērtība un  $U$  vērtības aprēķinam nevar izmantot iepriekš aprakstīto minimizācijas pieeju.

Tā kā siltuma plūsmas sensori parasti tiek novietoti pētāmo norobežojošo konstrukciju iekšpusē, tad to rādījumi ir cieši saistīti ar iekštelpu gaisa temperatūras svārstībām un pat mazākās tās izmaiņas praktiski uzreiz, bez laika nobīdes, tiek reģistrētas arī kā siltuma plūsmas svārstības (attēls 2.79). Savukārt, ievērojams laika periods ir nepieciešams, lai izmaiņas ārējā temperatūrā ietekmētu siltuma plūsmas vērtību, kas ir izskaidrojams ar būvkonstrukciju termisko inerci. Nelielas temperatūras izmaiņas pētāmās konstrukcijas ārpusē ar periodu, kas nepārsniedz laika konstantes vērtību, ar iekštelpā novietoto siltuma plūsmas blīvuma sensoru praktiski netiek reģistrētas.



Attēls 2.79. Iekštelpu gaisa svārstību izraisītās siltuma plūsmas blīvuma izmaiņas.

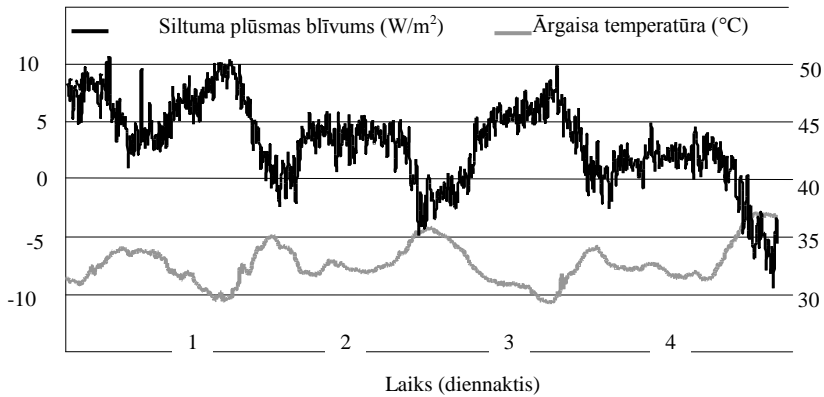
Virkne veikto mērijumu parādīja, ka pat dati situācijās ar nelielu un pat īslaicīgi pretēji vērstu temperatūru starpību var tikt izmantoti korektai siltuma caurlaidības koeficienta  $U$  vērtības noteikšanai ar iepriekš aprakstīto minimizācijas skaitlisko pieeju un tam nepieciešamais mērijumu ilgums var būt ievērojami īsāks nekā lietojot kumulatīvo pieeju. Tā, mērijumu perioda ilguma ķieģeļu ārsienai nelielas temperatūru starpības gadījumā samazinājums no 30 līdz 7 dienām izmainīja iegūto rezultātu no 1,59 uz 1,58  $W m^{-2} K^{-1}$  - šī izmaiņa ir daudz mazāka par mērsistēmas precizitāti. Piemērs eksperimentāli izmērītam un skaitliski aprēķinātam siltuma plūsmas blīvumam ārsienas būvkonstrukcijai nelielu temperatūru starpību gadījumā parādīts attēlā 2.80. Kā redzams, mazu siltuma plūsmas blīvuma vērtības gadījumā skaitliskā aprēķinu pieeja ļauj atrast atrisinājumu, kas labi sakrīt ar eksperimentu. Tomēr jāatzīmē, ka pietiekami lielam  $\Delta T$  ir liela nozīme būvkonstrukciju ar mazu siltuma caurlaidību mērijumos – pietiekami precīzu rezultātu iegūšanai ir jāsapaida vai jānodrošina lielāka temperatūru starpība, vismaz 10...15°C.



Attēls 2.80. Siltuma plūsmu salīdzinājums nelielas temperatūru starpības gadījumā.

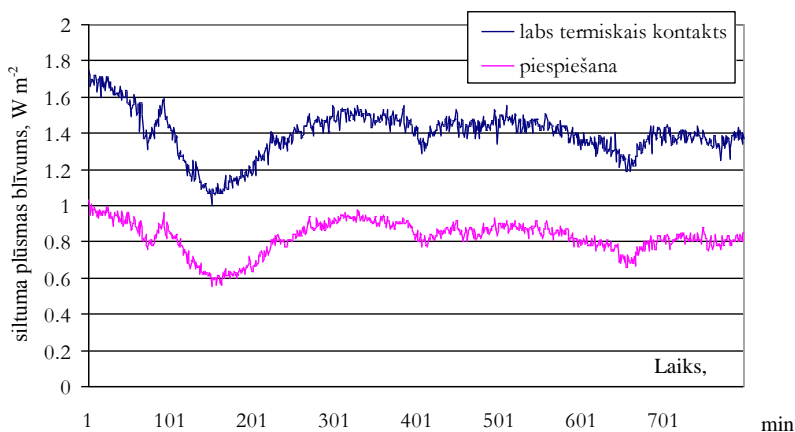
Ļoti neliela termiskā inerce ir raksturīga praktiski visām t.s. vieglajām konstrukcijām, kas sastāv no metāla vai koka statņiem un siltuma izolācijas materiāla, piem., akmens vates pildījuma. Šādas konstrukcijas ir relatīvi lētas un to siltuma izolējošās īpašības atbilst Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām, tādēļ tās veido nozīmīgu daļu no pēdējās desmitgadēs masveidā ceļamajām ražošanas un tirdzniecības būvēm. Ēkā ar tāda veida norobežojošām konstrukcijām fāzu nobīde starp siltuma plūsmu iekšpusē un ārējās temperatūras svārstībām laikā ir maza. Tāpat maza termiskā inerce ir raksturīga arī visu veidu stiklotajām konstrukcijām. Attēlā 2.81 parādīts mērijuma piemērs būvkonstrukcijai ar mazu termisko inerci, iekšējās noteiktās siltuma plūsmas blīvums šajā gadījumā mainās praktiski reizē ar ārējās temperatūras izmaiņām. Šādās ēkās būtiska ir automātisku nepārtrauktas darbības iekšējās gaisa temperatūras regulēšanas sistēmu uzstādīšana. To atslēgšanas vai bojājumu gadījumā iespējamas straujas un nokontrolējamas iekšējās temperatūras izmaiņas. Tajā pat laikā konstrukcijas ar lielu termisko inerci stabilizē iekšējās temperatūru pat relatīvu lielu ārējās gaisa temperatūras svārstību gadījumā gan ziemā, gan vasarā. Kā piemēru var minēt mūsdienīgās slāņainās būvkonstrukcijas no betona, blokiem vai citiem siltumietilpīgiem materiāliem kombinācijā ar minerālvates siltinājumu ārpusē – šim

konstrukcijām vienlaicīgi piemīt gan labas siltuma izolējošās īpašības, gan arī ievērojama termiskā inerence.



Attēls 2.81. Āra gaisa temperatūras un iekštelpā mērītā siltuma plūsmas svārstības mazas būvkonstrukcijas termiskās inerces gadījumā.

Lai demonstrētu laba termiskā kontakta starp siltuma plūsmas sensoru un pētāmā objekta virsmu nozīmīgumu, apskatīsim grīdas pārseguma uz vedināmu pagrabu mērījumu rezultātus. Veiktajos eksperimentos paralēli tika izmantoti divi 25×25 cm sensori, viens no tiem ir pielīmēts pie grīdas parketa virsmas ar akrila masas palīdzību, bet otrs – vienkārši piespiests, kas nenodrošina labu tā termisko kontaktu ar virsmu. Pētījumiem tika izvēlēts grīdas pārsegums ar mazu siltuma caurlaidību, lai uzskatāmi parādītu izmaiņas, ko ienes kontaktvirsmas papildus termiskā pretestība – būvelementiem ar lielāku  $U$  vērtību efekts būtu vēl izteiktāks. Vairāku dienu eksperimentos iegūtās siltuma plūsmas vērtības ir parādītas attēlā 2.82, kā redzams, atšķirības starp divu sensoru rādījumiem sasniedz 40%, kas pie vienādām temperatūras starpībām nozīmē arī proporcionālu atšķirību starp siltuma caurlaidības vērtībām.



Attēls 2.82. Siltuma plūsmas blīvuma atšķirības sensoram ar labu un nepietiekamu termisko kontaktu ar mērāmo konstrukciju.

Pirmie ēku norobežojošo būvkonstrukciju siltuma caurlaidības mērījumi tika aizsākti vairāk ne kā pirms 15 gadiem un regulāri tiek veikti katru apkures sezonu. Sākumā tie bija mērījumi vecās ēkās ar mērķi noskaidrot to stāvokli un novērtēt dažādu faktoru ietekmi uz siltumfizikālā stāvokļa izmaiņām, pēdējos gados eksperimenti pārsvarā tiek veikti jaunuzceltām vai renovētām ēkām. Detalizētāk apskatīsim dažus raksturīgu mērījumu piemērus.

Vairāki desmiti siltuma caurlaidības koeficienta mērījumu tika veikti Rīgas un Liepājas 20. gs. otrajā pusē celtos daudzdzīvokļu namos, tādējādi izveidojot sava veida padomju dzīvojamā fonda norobežojošo konstrukciju datu bāzi (Jakovičs *et.al.*, 2003-2004). Pamatā tika testētas ārsienu konstrukcijas, iespēju robežās arī bēniņu un pagraba pārsegumi. Lielāka daļa no tiem parādīja, ka saskaņā ar standarta (LVS EN ISO 6946, 2009) prasībām aprēķinātā siltuma caurlaidība un ēku dokumentācijā minētās vērtības ir būtiski mazākas par izmēritajām. Arī citi līdzīgu pētījumu autori konstatējuši eksperimentālo un teorētisko  $U$  vērtību nesakrītību, tā, (King, 2000) norāda uz lielākām atšķirībām tieši saliktām un dobtām ārsienu konstrukcijām un mazāku izkliedi koka konstrukcijām.

Raksturīgākie veikto mērījumu rezultātu piemēri un atbilstošie LBN 002-01 nosacījumi (gan 2013. gadā aktuālās prasības, gan 2014. g. paredzētās) apkopoti tabulā 2.9. Kā redzams, visi mērījumu rezultātā iegūtie dati standartelementiem atšķiras no būvnormatīva prasībām pat vairākkārtīgi un ir nepieciešama šo konstrukciju siltināšana, lai novērstu virsnormatīvos siltuma zudumus. Dažām ārsienu konstrukcijām vēlāk celtās ēkās ir iestrādāts izolācijas slānis, tomēr, kā rāda eksperimenti, tā kvalitāte ir bijusi neapmierinoša un ar laiku tas zaudējis savu funkcionālo nozīmi – materiāls ir sablīvējies slāņa apakšējā daļā, kā rezultātā augšējā daļā veidojas gaisa dobumi, kas samazina siltuma pretestību konvekcijas dēļ.

Pēdējā desmitgadē, veicot ēku siltināšanas darbus, parādās jauni defekti, kuri agrāk netika konstatēti. Spilgts piemērs ir tehnoloģiski nepareiza siltuma izolējošā materiāla ieklāšana – netiek noblīvētas spraugas to salaiduma vietās, kā rezultātā siltuma caurlaidības koeficienta vērtības var atšķirties vienai un tai pašai konstrukcijai atkarībā no vēja stipruma un virziena. Kā piemērus šāda tipa defektiem var minēt mērījumu rezultātus daudzstāvu pētnieciskās iestādes ēkai un viesnīcas augstceltnes daļai. Pirmā ēka atradās no vēja neaizsargātā vietā upes krastā un tāpēc ār sienai, kura tika vērsta uz valdošo vēju pusi, atšķirības bija izteiktas: bezvēja laikā  $U \approx 0,55 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , bet stipra vēja laikā  $U$  sasniedza pat  $1,1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , kas liecina par to, ka vēja izolācijas materiāls nav pareizi ielikts vai noblīvēts. Tādām ēkām ir lietderīgi veikt arī gaisa apmaiņas mērījumus, kuri detalizētāk raksturoti nākošajā sadaļā.

Gadījumā, ja norobežojošā konstrukcija siltināta no iekšpuses, arī var parādīties dažāda rakstura siltuma izolācijas defekti – piem., tāda tipa ēkai veiktajos mērījumos ār sienai rezultātu izkliede bija no 0,25 līdz pat  $0,35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , kas ir izskaidrojams ar izteiktām nehomogenitātēm akmens vates siltinājuma slānī un līdz ar to arī visas konstrukcijas siltuma caurlaidībā. Bet visbiežāk sastopamais defekts, siltinot daudzstāvu ēkas no iekšpuses, ir siltuma jeb termiskie tilti, kas veidojas starpstāvu pārsegumu vietās, ja tās nav pareizi papildus siltinātas – rezultātā temperatūra pie griestiem vai grīdas ir pazemināta un pastāv kondensāta rašanās risks. Šāda veida defektus var viegli atklāt ar termogrāfiskā apsekojums palīdzību no ārpusē (attēls 2.15.). Jāatzīmē, ka sērijveida ēku dzīvokļu siltināšana no iekšpuses 90-jos gados tika izmantota kā

relatīvi lēts pasākums siltuma zudumu samazināšanai, bet tas ļoti būtiski paaugstina iespējamo mitruma uzkrāšanās risku, jo izveidot kvalitatīvu tvaika barjeru iekšpusē nav vienkārši.

Tabula 2.9. Raksturīgās Rīgas un Liepājas daudzdzīvokļu namos eksperimentāli noteiktās  $U_{eks}$  un LBN 002-01 normatīvās  $U_{RN}$  vērtības dzīvojamām mājām 2013. un 2014. gados\*.

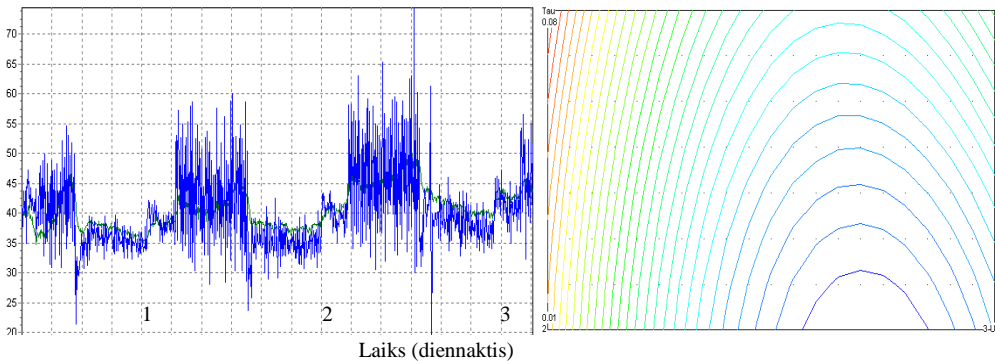
Būvkonstrukcijas raksturojums	Siltuma caurlaidība $U$ ( $W m^{-2} K^{-1}$ )		
	Eksperimentāli noteiktā	$U_{RN}$ (2013)	$U_{RN}$ (2014)
Betona/keramzīta ārsienas panelis (30 cm)	2,0	0,3	0,3
Silikāta ķieģeļu ārsiena (45 cm)	1,8	0,3	0,3
Panelis zem loga (464. sērija)	1,6	0,3	0,3
Dzelzsbetona ārsienas panelis (464. sērijas ēka)	1,4	0,3	0,3
Pagraba pārsegums ķieģeļu ēkā (467. sērijas ēka)	1,4	0,25	0,25
Pagraba pārsegums (104. sērijas ēka)	1,3	0,25	0,25
Ārsienas panelis (464. sērijas projekta ēka)	1,3	0,3	0,3
Balto silikāta ķieģeļu mūris (104. sērijas ēka)	1,3	0,3	0,3
Ķieģeļu ārsiena (318. sērijas ēka)	1,3	0,3	0,3
Gala ķieģeļu siena paneļu ēkā (103. sērijas ēka)	1,2	0,3	0,3
Ārsienas panelis (104. sērijas ēka)	1,2	0,3	0,3
Apmesta ķieģeļu ārsiena (316. sērijas ēka)	1,1	0,3	0,3
Gala sienas panelis (467. sērijas ēka)	1,1	0,3	0,3
Augšstāva/bēniņu pārsegums (464. sērijas projekta ēka)	1,1	0,2	0,2
Bēniņu pārsegums (103. un 104. sērijas ēkas)	1,1	0,2	0,2
Pagraba pārsegums (103. un 104. sērijas ēka)	1,1	0,25	0,25
Starplogu pildījums (104. sērijas ēka)	1,0	0,3	0,3
Sarkano māla ķieģeļu mūris (104. sērijas ēka)	0,9	0,3	0,3
Bēniņu pārsegums (316. un 318. sērijas ēkas)	0,8	0,2	0,2
Ārsienas dzelzsbetona panelis (103. sērijas ēka)	0,8	0,3	0,3
Bēniņu pārsegums ar betona slāni ķieģeļu ēkā (467. sērijas ēka)	0,6	0,2	0,2
Uzlabotais ārsienas panelis ar iekšēju siltuma izolāciju (119. sērija)	0,6	0,3	0,3
Ar 5cm akmens vati siltināts ārsienas panelis (104. sērijas ēka)	0,3	0,3	0,3

\*- LBN 002-01 jaunās versijas projekts, ko plānots pieņemt 2014.g. (skat. arī 4. pielikumu)

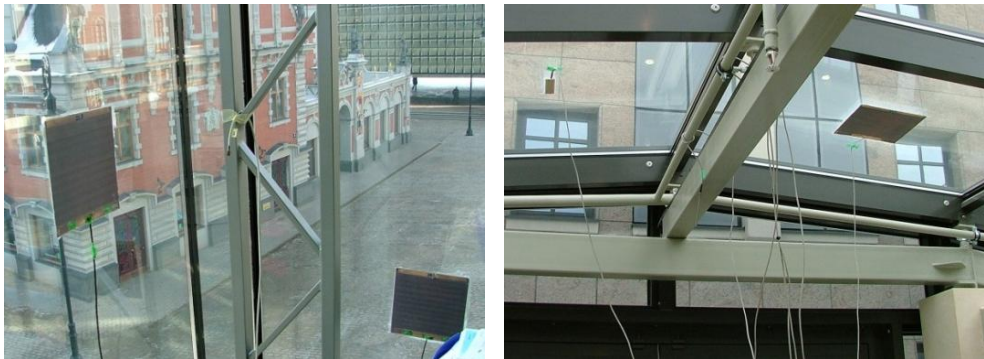
Kaut arī visa loga kā būvkonstrukcijas siltuma caurlaidības koeficienta mērījumus ēkas ekspluatācijas apstākļos praktiski nevar veikt, tad stiklotās daļas (attēls 2.83) un arī atsevišķu rāmja elementu  $U$  vērtības mērījumi ir iespējami. Šajā gadījumā korekti rezultāti iegūstami tikai tad, ja lielāko mērījuma laiku nav Saules starojuma uz virsmas – naktīs, laikā, kad debesis ir apmākušās vai eksistē nojume, kas aizsargā sensorus no tieša starojuma. Lai iegūtu tuvinātu novērtējumu, pietiek ar siltuma plūsmas mērījumiem stiklojuma centrālajā daļā. Parasti stiklotām virsmām siltuma caurlaidība ir relatīvi lielāka nekā citām norobežojošajām konstrukcijām, kas

nozīmē arī lielu siltuma plūsmas blīvumu un īsāku nepieciešamo mērperiodu – pieredze rāda, ka tas ir robežās no dažām stundām līdz dažām diennaktīm.

Attēlā 2.83 parādīts stikla paketei eksperimentāli iegūtās un ar minimizācijas metodi skaitliski aprēķinātās siltuma plūsmas salīdzinājums un atbilstošā minimizējamā funkcionāļa  $F(U, \tau_1)$  vērtības. Gan kumulatīvā pieeja, gan skaitliskās plūsmu minimizācijas algoritms dod sakrītošus rezultātus –  $2,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Piemērs parāda, ka lielas siltuma plūsmas gadījumā kumulatīvā vidējošanas metode parasti dod kvalitatīvi pareizus rezultātus. Kā redzams no funkcionāļa vērtību apgabala, vislabākā plūsmu sakrītība (minimāla starpība) ir novērojama pie  $U \approx 2,6; \tau_1 \approx 0,01$ . Termiskās laika konstantas mērvienība grafikā ir diennakts un tās vērtība 0,01 ir mazāka par aprēķinu diskretizācijas soli, tāpēc varam pieņemt, ka  $\tau_1$  skaitliski ir mazāks par 15 minūtēm, kas atbilst fizikālajiem priekšstatiem.



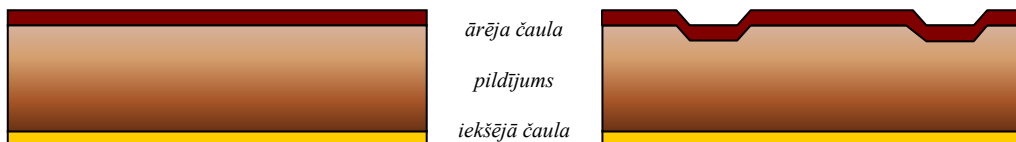
Attēls 2.83. Eksperimentāli izmērītie (zaļā līkne) un skaitliski aprēķinātie (zilā līkne) siltuma plūsmas blīvumi  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) pēc to minimizācijas (pa kreisi) un attiecīgā funkcionāļa  $F(U, \tau_1)$  vērtības stikla paketes mērījumā.



Attēls 2.84. Neveramo stikla pakešu (pa kreisi) un stiklotās jumta konstrukcijas (pa labi) mērījumi.

Bez tādiem izolācijas materiāliem kā putuplasts, putu polistirols vai akmens vate, kas tiek izmantoti kā papildus siltuma izolējošs slānis, Latvijā industriālo un tirdzniecības ēku norobežojošo konstrukciju risinājumos izmanto dažādu veidu ārēnu un jumta paneļus, kas sastāv no siltuma izolējošās pildījuma daļas un dažādu materiālu slāņiem abās pusēs, kas var tikt veidoti

ar dažādām virsmas formām (attēls 2.85). Parasti tie nepilda nesošo konstrukciju funkciju, bet tiek stiprināti pie tām – attēls 2.86. Šāda veida paneļu ražotāji deklarē siltuma caurlaidības koeficientu, kas praktiski vienmēr atbilst Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 prasībām. Tomēr, kā parādīja termogrāfiskais apsekojums (attēls 2.14), defekti paneļu konstrukcijās ir iespējami, tāpēc tika veikti arī vairāki to siltuma caurlaidības koeficienta mērījumi.



Attēls 2.85. Celtniecības paneļu raksturīgā uzbūve.



Attēls 2.86. Celtniecības paneļu piestiprināšana pie ārsienas nesošā karkasa.

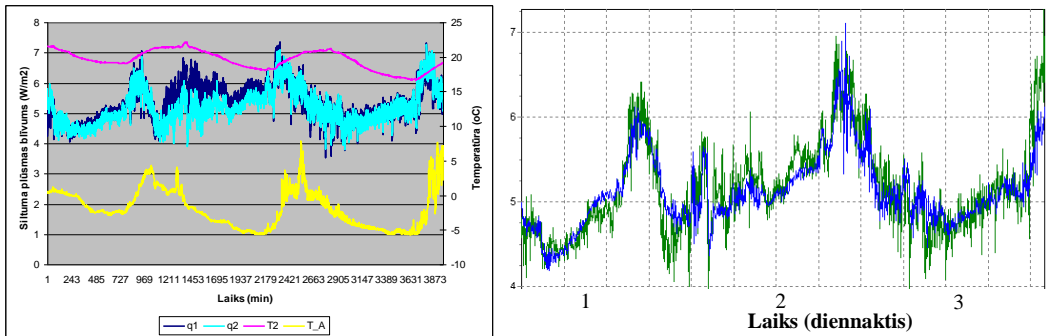
Vairāku mērījumu sēriju rezultātā tika iegūti siltuma caurlaidības koeficienti jumta paneļu vidusdaļā un salaiduma vietu zonās. Kā jau varēja sagaidīt, savienojuma vietā siltuma plūsmas vērtības bija nedaudz lielākas nekā vidū (tabula 2.10) un šāda tendence ir novērota arī citu būvkonstrukciju salaiduma vietās šuvju palielinātās siltuma caurlaidības dēļ. Vidējotais siltuma caurlaidības aprēķins un minimizācijas algoritma lietojumi dod praktiski vienādus rezultātus šajā nepilnu 3 diennakšu garajā mērperiodā, ko uzskatāmi parāda arī ar attēls 2.87. Jāatzīmē, ka  $U$  vērtību starpība ir tuva mērsistēmas precizitātei un to noteikšanu ietekmē arī neliels siltuma plūsmas blīvums caur paneli, kas pat pie pietiekami lielas temperatūru starpības –  $25\text{ °C}$  tika reģistrēts tikai  $4...7\text{ W m}^{-2}$  robežās (attēls 2.87).

Tabula 2.10. Iegūto  $U$  vērtību salīdzinājums dažādām jumta paneļa daļām.

Mērījuma vieta	$U$ kumulatīvi (vidēji) ( $\text{W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ )	$U$ skaitliski (plūsmu minimizācija) ( $\text{W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ )
Jumta panelis šuves tuvumā	0,24...0,28	0,24...0,28
Jumta panelis tā vidusdaļā	0,23...0,25	0,23...0,24

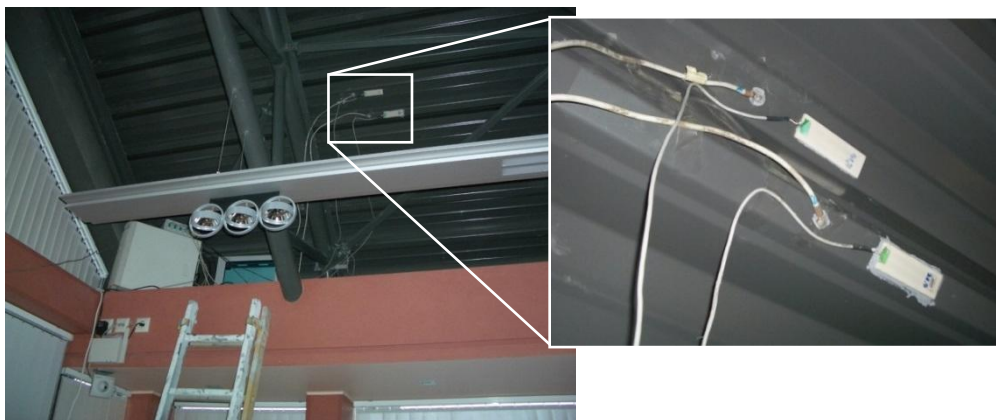
Līdzīgu jumta paneļu mērījumi tika veikti arī jaunuzceltas administratīvās ēkā jumta stāvā, telpā ar slīpo savietoto jumtu, kura biezums ir atšķirīgs dažādās vietās (attēls 2.88). Vadoties no jumta konstrukcijas projekta dokumentācijas, kur paredzēta *PAROC* jumta siltumizolācijas

plākšņu ar kopējo biezumu 17 cm izmantošana, aprēķinā tika noteikta tuvināta konstrukcijas siltuma caurlaidības vērtība  $U_{aprēķina}=0,22 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . LBN 002-01 publiskajām ēkām noteikta jumta konstrukciju siltuma caurlaidības normatīvā vērtība  $U_{RN}=0,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  un maksimāli pieļaujamā vērtība, kuru nedrīkst pārsniegt -  $U_{RM}=0,35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Mērījumos atšķirīga biezuma jumta konstrukcijas daļās tika iegūts rezultāts  $U=0,18...0,21 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , kas ir nedaudz labāks par aprēķināto vērtību.



Attēls 2.87. Piemēri jumta paneļa mērījumu datiem (augšā). Izmērītā (zaļā līkne) un skaitliski aprēķinātā (zilā līkne) siltuma plūsmas blīvuma  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) atbilstība pēc minimizācijas (apakšā).

Veiktie eksperimenti un praktiskā testēšanas pieredze parāda, ka izgatavotās mērsistēmas kopā ar siltuma plūsmu minimizācijas algoritma programmatūru, nodrošina praktiskajām vajadzībām pietiekami labu mērījumu precizitāti. Metode efektīvi lietojama gan nevienādīgiem un daudzslāņu būvelementiem, gan nelielu temperatūras starpību un pat mainīga siltuma plūsmas virziena gadījumā. Atšķirībā no termogrāfijas, kura gan ļauj operatīvi kvalitatīvi salīdzināt siltuma zudumus dažādās ēkas zonās un elementos, bet kura neļauj noteikt  $U$  vērtību un kurai nepieciešama dārga aparatūra, izveidotās metodikas realizēšanai lietojamās aparatūras izmaksas ir vismaz par kārtu mazākas. Tas arī nosaka plašas šīs sistēmas lietojumu iespējas, plānojot ēku siltināšanu un kontrolējot šo darbu izpildes rezultātu.



Attēls 2.88. Jumta paneļa mērījumi vietās ar dažādu tā biezumu.

Norobežojošo konstrukciju nepietiekamo siltuma pretestību var palielināt, papildinot tās ar siltuma izolācijas materiāla slāni. To principā var veikt trijos veidos – aizpildot ārsienās esošo gaisa starpslāni, vai arī siltinot konstrukciju no iekšpuses vai ārpusē. Gaisa starpslāņa pildīšana bieži ir grūti realizējama un nevar tikt lietota visām konstrukcijām, bet tās priekšrocība ir nemainīgs norobežojošās konstrukcijas ārējais un iekšējais izskats un arī tās biežums. Iekšējā siltināšana parasti izmaksā mazāk nekā ārējā un var tikt veikta arī tikai atsevišķām telpām, bet tā ievērojami samazina nelielu iekštelpu izmērus, kā arī prasa rūpīgu tvaika barjeras iestrādi un pārsegumu daļēju papildus siltināšanu, lai novērstu iespējamus siltuma tiltus. Ēkas papildus siltuma izolācija no ārpusē var tikt veikta netraucējot iemītnieku darbu un dzīves režīmu, var tikt veikta visai būvei un parasti neprasa lielas papildus izmaksas (piem., tvaika barjeras lietošanu), tomēr to nevar izmantot, ja ir jāsaglabā ēkas fasādes izskats (piem., vēsturiskās ēkās). Gadījumā, ja ir zināma būvkonstrukcijai nepieciešamā papildus siltuma pretestība  $R$  ( $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ ), izolācijas slāņa biežumu  $d$  ar zināmu siltuma vadītspējas koeficientu  $\lambda$  ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) tuvināti var noteikt pēc sakarības:  $d = R \cdot \lambda$ , precīzām aprēķinām jāievēro arī šajā slānī esošie stiprinājumi un siltuma tilti. Daži piemēri ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta samazināšanai apkopoti tabulā 2.11.

*Tabula 2.11. Tipiski piemēri esošo konstrukciju siltuma caurlaidības samazināšanai.*

Konstrukcija	Tipiskais $U$ ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )	Uzlaboējuma veids	Iegūtais $U$ ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
25+12 cm bieža dobo ķieģeļu ārsiena ar 5 cm gaisa šķirtkārtu	1,1	Šķirtkārtas aizpildīšana ar beramo siltumizolācijas vati	0,5
25 cm bieža silikātķieģeļu ārsiena	2,2	Ārējā siltināšana ar 10 cm biezu akmens vates slāni	0,30
1. stāva betona grīda uz neapkurinātu pagrabu	1,2	Pagraba griestu siltināšana ar 8 cm polistirola plāksnēm vai poliuretānu	0,35
Darvots neizolēts jumts (dzelzsbetona paneļi)	1,9	2 akmens vates slāņu (10+5 cm) ievietošana starp sijām un zem tām	0,25
Viena stikla koka logs (ievērojot rāmja daļu)	4,8	Nomaiņa pret 2 stiklu pakešu logu ar selektīvo pārklājumu (ievērojot rāmja daļu)	$\leq 1,5$

#### 2.1.2.4. Secinājumi

Būtisku daļu no ēku siltuma zudumiem veido vadīšanas ceļā pārņests siltuma daudzums caur tās norobežojošām konstrukcijām un tā daudzuma raksturošanai izmantoto divus lielumus – siltuma vadīšanas koeficientu  $\lambda$  un siltuma caurlaidības koeficientu  $U$ . Pirmais raksturo homogēnu materiālu siltuma izolējošās īpašības un tā noteikšanai ir izveidota un tiek lietota standartizēta eksperimentālā karstās plāksnes iekārta. Ir izveidota arī metodika, kas ar šīs iekārtas palīdzību ļauj noteikt materiālu siltuma ietilpību. Koeficients  $U$  raksturo nehomogēnas uzbūves būvkonstrukcijas

kopumā, kas var sastāvēt no vairākiem atšķirīgiem objektiem iekļaujot caurspīdīgās daļas, tāpēc tas ietver sevī siltuma pārnēsi ne tikai vadīšanas ceļā, bet arī konvekcijas un siltuma starojuma daļas. Šo koeficientu var noteikt laboratorijas apstākļos – izveidotajā termiskajā kamerā, vai arī ekspluatējamās ēkās, lietojot speciālas pārvietojamas mērsistēmas. Vairāku simtu mērījumu rezultātā ir izveidota plaša  $U$  koeficientu datu bāze lielākajai daļai no sērijveida dzīvojamo ēku norobežojošām konstrukcijām.

Mērījumi parādīja ļoti plašu ēkās izmantojamo būvkonstrukciju siltuma pārvades zudumu raksturojošo koeficientu diapazonu, kas pamatā ir atkarīgs no būves celtniecības gada un tās izmantošanas mērķa. Praktiski visām vecajām ēkām ir nepieciešama norobežojošo konstrukciju papildus siltuma izolācija un logu nomaīņa, lai nodrošinātu atbilstību LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” prasībām un samazinātu kopējo siltuma zudumu daudzumu. Lai atrastu optimālu uzlabojumu veidu, ir nepieciešams novērtēt ēkas pašreizējo stāvokli, ko var izdarīt veicot aprakstītos mērījumus. Tomēr, bez siltuma pārvades zudumiem caur ēkas ārējo čaulu, tās siltuma zudumi un kopējā energoefektivitāte ir būtiski atkarīga arī no citu veidu siltuma pārnēses. Kā rāda pieredze un veiktie mērījumi, agrāk būvētām ēkām lieli enerģijas zudumi ir saistīti arī ar gaisa apmaiņu caur neblīvām vietām un atverēm norobežojošās konstrukcijās. Arī tos ir iespējams novērtēt mērījumu ceļā.

### 2.1.3. Konvekcijas siltuma zudumi

Jebkurai dzīvojamai ēkai ir nepieciešama gaisa apmaiņa, jo cilvēks savas darbības rezultātā patērē skābekli un izdala ogļskābo gāzi, ūdeni un siltumu. Gaisa apmaiņu nodrošina telpas kontrolēti ventilējot. Minimālā nepieciešamā gaisa apmaiņas intensitāte ir atkarīga no daudziem faktoriem, piem., cilvēku skaita telpā un to aktivitātes. Gaisa apmaiņas apjoms dzīvojamo namu telpās ir noteikts LBN 211-08 (LBN 211-08, 2008), bet apmaiņas intensitāte uz vienu cilvēku atkarībā no telpas tipa un tās izmantošanas veida ir detalizēti aprakstīta standartā (ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, 2004), prasības dažiem izplatītiem telpu veidiem apkopotas tabulā 2.12.

No otras puses, gaisa apmaiņa ar āra gaisu aukstajā gadalaikā lielas temperatūru starpības gadījumā ir saistīta ar ievērojamiem siltuma zudumiem, kas var tikt kontrolēti regulējamās piespiedu ventilācijas un rekuperācijas sistēmās, bet nav kontrolējamā brīvās ventilācijas gadījumā caur neblīvām vietām un atverēm ēkas čaulā – tad gaisa apmaiņa ir atkarīga no vēja radītās spiediena starpības un t.s. skursteņa efekta kā arī citiem faktoriem.

Attēlā 2.89 parādītas tipiska privātmājas skice ar vēja rezultātā izraisītām dažāda spiediena zonām. Spiedienu  $p$  (Pa) uz ēkas ārējās čaulas un spiedienu starpību  $\Delta p$  (Pa) starp ēkas ārējo čaulu un iekštelpu ir iespējams noteikt pēc sakarībām (Hagentoft, 2003):

$$p = C_p \frac{\rho v^2}{2}, \quad \Delta p = (C_p - C_{pi}) \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2.77)$$

kur  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ir gaisa blīvums,  $v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) – vēja ātrums norādītajā references augstumā, bet  $C_p$  (-) un  $C_{pi}$  (-) ir attiecīgi empīriskie vēja spiediena un iekšgaisa spiediena koeficienti. Atkarībā no fasādes novietojuma pret vēja virzienu, koeficients  $C_p$  būvēm ar stāvu skaitu līdz 3 mainās robežās no -0,5 līdz 0,4, savukārt koeficienta  $C_{pi}$  vērtība ēkās ar vienmērīgi sadalītu gaisa noplūžu vietām ir aptuveni vienāda ar -0,3, tādējādi tas ļauj tuvināti novērtēt spiedienu starpību.

Tabula 2.12. Raksturīgo dzīvojamo telpu prasības (ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, 2004).

Telpas veids	Cilvēku skaits uz 100m <sup>2</sup>	Gaisa apmaiņa m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> uz 1 cilvēku
Bibliotēka	22	10,5
Mācību klase	54	10,5
Birojs	8	14
Sporta zāle	32	14
Konferenču zāle	54	14
Kafejnīca, restorāns	108	14
Teātris	161	14
Smēķētāju istaba	75	42

Otrs process, kas izsauc intensīvu gaisa apmaiņu, ir t.s. skursteņa efekts, kurš veidojas pateicoties temperatūras starpībai (blīvuma atšķirībām) starp iekštelpu gaisu un ārējo gaisu, kas, savukārt, izsauc vertikālu spiedienu diferenci. Šī parādība ir ilustrēta attēlā 2.90 – spiediens iekšējā un ārējā ir vienādi uz „neitrālā spiediena plaknes”, siltajam gaisam ar mazāku blīvumu ceļoties uz augšu veidojas vilkme, kas sekmē gaisa izplūšanu augšdaļā un ārējā gaisa ieplūdi apakšdaļā. Analītiski spiedienu starpība  $\Delta p$  attālumā  $z$  no „neitrālā spiediena plaknes” var tikt atrasta pēc sakarības (Hagentoft, 2003):

$$\Delta p = z \cdot \Delta \rho \cdot g = z \cdot 3456 \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{ārā}}} - \frac{1}{T_{\text{iekšā}}} \right), \quad (2.78)$$

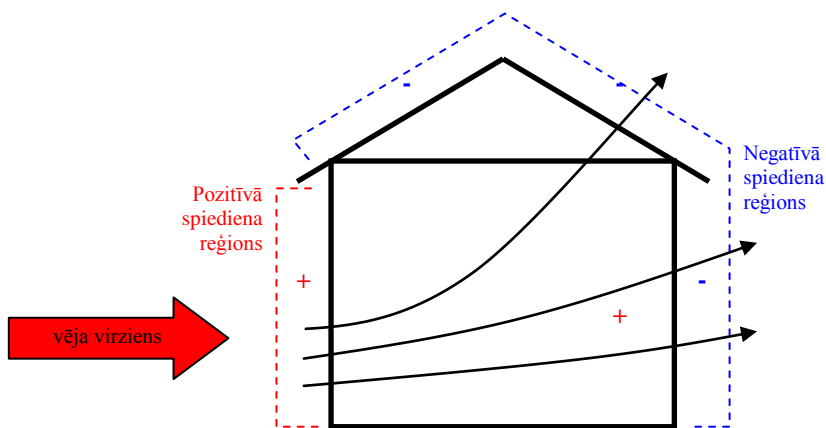
kur  $\Delta \rho$  (kg m<sup>-3</sup>) ir ārējā un iekšējā gaisa blīvumu starpība, bet temperatūras ir dotas Kelvina grādos (K). Augstās ēkās, kur iespējama gaisa pieplūde starp stāviem, šī efekta ietekme uz konvektīvo gaisa apmaiņu un siltuma zudumiem var būt ļoti nozīmīga.

Kustīgā gaisa pārnesto siltumu  $Q$  (W) var aprēķināt šādi:

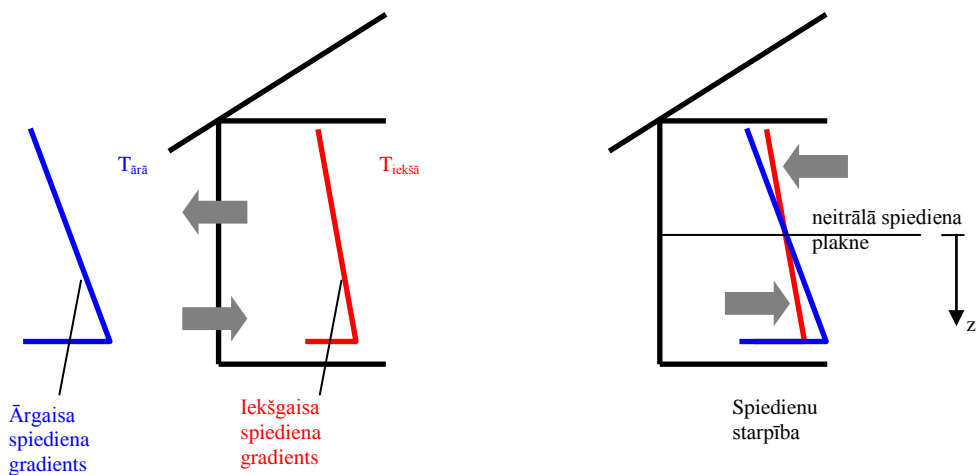
$$Q = c \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot v \cdot S, \quad (2.79)$$

kur  $c$  (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) ir gaisa siltuma ietilpība,  $\Delta T$  (K) – temperatūru starpība starp gaisa pārvietošanās punktiem telpas iekšpusē,  $v$  (m s<sup>-1</sup>) – gaisa plūsmas raksturīgais ātrums un  $S$  (m<sup>2</sup>) – atveru un spraugu ēkas ārējā čaulā kopējais laukums. Ja pieņem, ka gaisa īpašības mainās maz, tad siltuma zudumus konvekcijas ceļā pamatā nosaka tā pārvietošanās ātrums (jeb spiedienu starpība), ārējā temperatūra (pieņemot, ka iekšējā temperatūra ir nemainīga) un nehermētisko zonu izmēri. Tieši daudzas neblīvās vietas logu un durvju ailēs nosaka konvekcijas siltuma zudumu dominējošo lomu vecu ēku kopējā siltuma bilancē. Vietas, pa kurām notiek pastiprināta ārējā gaisa ieplūde iekšējā vai siltā gaisa izplūde, visefektīvāk ir iespējams atklāt, lietojot termogrāfisko metodi (sadaļā 2.1.1.).

Gaisa apmaiņas intensitātei ēkās tādējādi ir jāatrodas noteiktās robežās, kas no vienas puses nodrošina nepieciešamo gaisa apmaiņu, bet no otras puses nerada nekontrolējamus siltuma zudumus. Gaisa apmaiņas intensitāti telpā raksturo ar atbilstošu koeficientu, kas dažādos standartos var tikt normēts uz dažādiem lielumiem, bet tas parasti ietver gaisa tilpumu, kas noteiktā laikā tiek infiltrēts caur ēkas ārējo čaulu, ar šo pašu koeficientu raksturo arī kādas atsevišķas telpas gaisa apmaiņas intensitāti (piem., tabula 2.13). Atsevišķu telpu gaisa apmaiņas intensificēšanu var nodrošināt tikai ar piespiedu ventilācijas sistēmas palīdzību.



Attēls 2.89. Vēja ietekmē izveidojušies atšķirīgu spiedienu apgabali ap ēku.

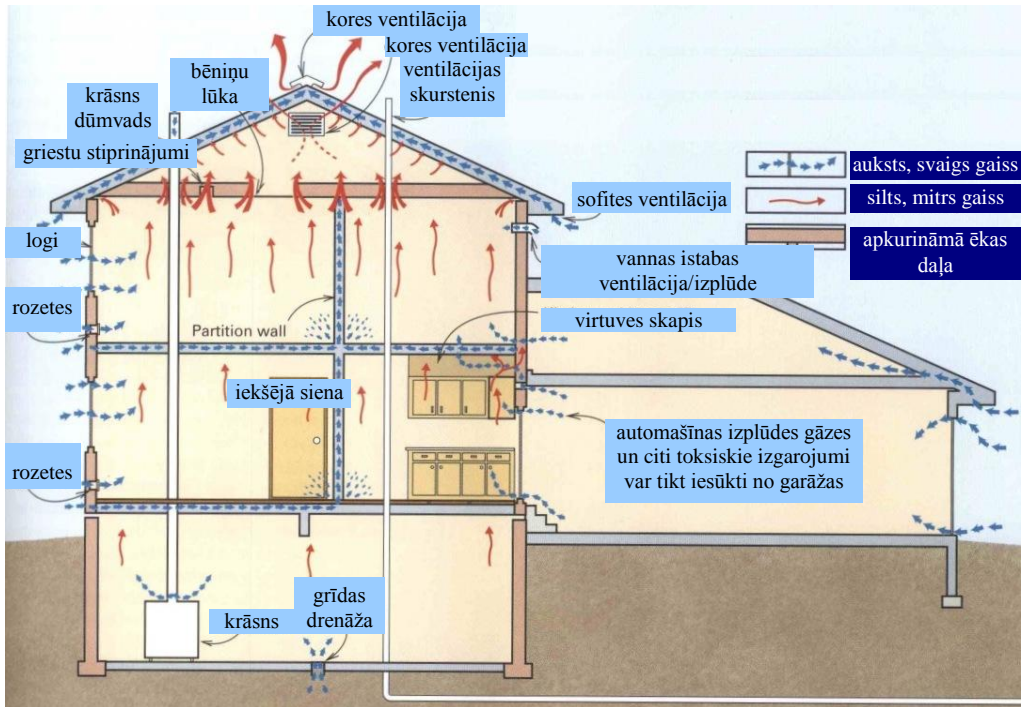


Attēls 2.90. Skursteņa efekta rašanās shēma: spiedienu sadalījumi un rezultējošā diference.

Tabula 2.13. Raksturīgās dažādu telpu gaisa apmaiņas intensitātes (McMullan, 2002).

Telpa	Gaisa apmaiņas intensitāte
Restorāns, kafējnīca	10-15 reizes stundā
Mācību klases	3-4 reizes stundā
Biroja telpas	2-3 reizes stundā
Dzīvojamās telpas	1 reize stundā
Citas telpas	8 litri sekundē uz vienu cilvēku

Apskatot kādu ēku, tās gaisa apmaiņu raksturojošais koeficients ir integrāls lielums visai būvei (attēls 2.91), tāpēc tā analītiskā noteikšana ir apgrūtināta un to var novērtēt tikai tuvināti. Kvantitatīvai gaisa apmaiņas ēkā vai tās blokā (telpā) noteikšanai tiek izmantota standartizēta mērījumu metodika un atbilstoša iekārta.



Attēls 2.91. Ēkas gaisa apmaiņas vispārējā shēma bezvēja gadījumā.

### 2.1.3.1. Ēkas gaisa apmaiņas mērījumi

Gaisa apmaiņas intensitāti pie noteiktas spiedienu starpības 50 Pa starp iekštelpu gaisu un ārējais raksturo ar gaisa apmaiņas koeficientu  $n_{50}$  (angl. *air exchange rate*). Tā apgrieztais lielums raksturo laiku, kurā viss gaisa tilpums, kas atrodas telpā, nomainās ar āra gaisu, tā mērvienība ir ( $\text{h}^{-1}$ ) un tas ir normēts uz gaisa tilpumu (LVS EN 13829, 2013; ISO 9972, 2006). LBN 002-01 tiek definēts analogisks lielums, ko sauc par ēkas gaisa caurlaidību, tas tiek normēts nevis uz ēkas gaisa tilpumu, bet gan uz tās norobežojošo konstrukciju kopplatību, turpmāk apzīmēsim šo lielumu ar  $q_{50}$  ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ). Abus minētos standartizētos koeficientus iegūst, eksperimentāli pie spiedienu starpības starp iekšējo gaisu un ārējais  $\Delta p = 50$  Pa mērot gaisa plūsmu  $V'$  ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ), kas ieplūst vai izplūst no objekta (tādā gadījumā lieto indeksu 50):

$$n_{50} = \frac{V'}{V}, \quad q_{50} = \frac{V'}{S}, \quad (2.80)$$

kur  $V$  – gaisa tilpums ēkā vai telpā ( $\text{m}^3$ ), bet  $S$  – ēkas ārējās čaulas laukums ( $\text{m}^2$ ). Šie standartizētie lielumi raksturo gaisa apmaiņu pie ievērojamas spiedienu starpības 50 Pa, kas dabiskos apstākļos nekad netiek sasniegta. Tāpēc siltuma zudumu novērtēšanai ēkas reālos ekspluatācijas apstākļos nepieciešamo koeficientu  $n_{50}$  pareizinot ar empīrisko t.s. ēkas vēja aizsargātības koeficientu  $e$  (-), kas brīvi stāvošām ēkām tiek pieņemts vienāds ar 0,1, bet aizvējā esošām – ar 0,04. Tādējādi faktiski tiek pieņemts, ka vidējā spiedienu starpība  $\Delta p$  dabiskos apstākļos mainās no 2 līdz ar 5 Pa. Šāda pieeja atspoguļo reālu gaisa apmaiņu bez mākslīgi radītās spiedienu starpības tuvināti,

precīzākai to noteikšanai var izmantot iezīmētās gāzes (angl. *tracer gas*) ilgtermiņa monitoringa metodi (LVS EN ISO 12569, 2013), kas raksturota nākamajā nodaļā

Saskaņā ar standartu (DIN V 4108-7, 2001) maksimāli pieļaujamā  $n_{50}$  vērtība ēkām bez piespiedu ventilācijas ir  $3 \text{ h}^{-1}$ , bet ēku ar uzstādītu ventilācijas sistēmu blīvējums var būt ievērojami augstāks un gaisa apmaiņas intensitāte mazāka  $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$ . Savukārt, pasīvo dzīvojamo māju sertifikācijas kritēriji (Passivhaus Institut, 2012) maksimālo  $n_{50}$  rādītāju ierobežo ar  $0,6 \text{ h}^{-1}$ . Turpretim daudzie veiktie mērījumi dažādās sabiedriskajās un dzīvojamajās ēkās Latvijā pirms to rekonstrukcijas parāda ievērojami lielākas gaisa apmaiņas koeficienta vērtības  $n_{50} = 10 \dots 14 \text{ h}^{-1}$ , bet atsevišķos gadījumos (piem., kāpņu telpās) tās var būt vēl lielākas. Tādās ēkās ir būtiski palielināti virsnormatīvie siltuma zudumi, kas negatīvi ietekmē arī ēkas kopējo siltuma bilanci.

LBN 002-01 nosaka, ka gaisa caurlaidība visai ēkai vai tās daļai, izteikta kā gaisa noplūde uz ēkas ārējās čaulas virsmas laukumu  $\frac{m^3}{h} \frac{1}{m^2}$  pie 50 Pa spiedienu starpības telpās un ārā nedrīkst pārsniegt noteiktas maksimālās vērtības  $q_{50}$ , kas atšķiras dažādām ēku kategorijām:

- dzīvojamām mājām, pansionātiem, slimnīcām un bērnudārziem  $q_{50} = 3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ;
- publiskām ēkām izņemot pansionātus un slimnīcas  $q_{50} = 4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ;
- ražošanas ēkām  $q_{50} = 6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

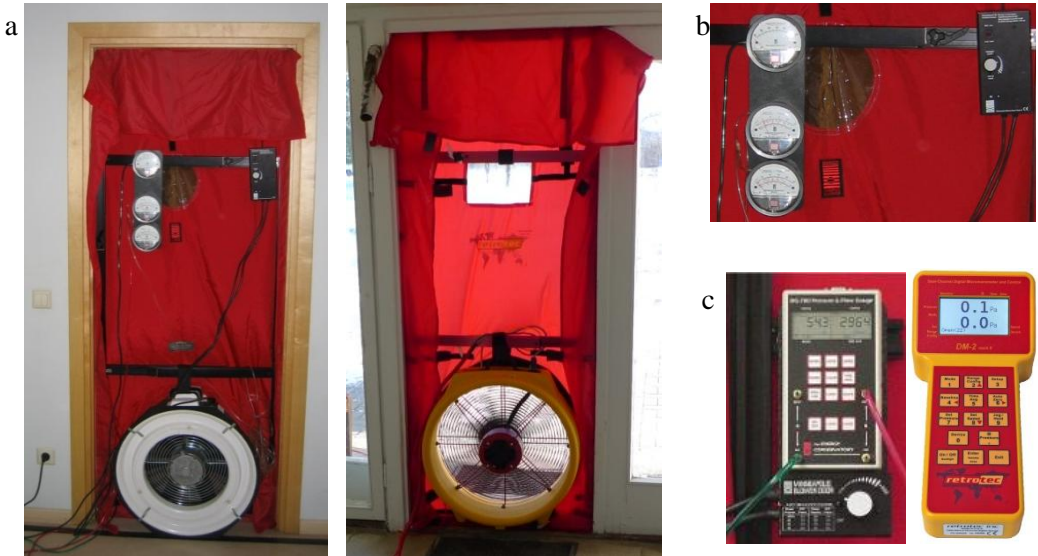
Minēto prasību var nepiemērot ražošanas ēkām, ja pierāda, ka konkrētajai ēkai šī prasība nav būtiska.

Ēkas vai tās daļas gaisa apmaiņas koeficientu var noteikt veicot mērījumus atbilstoši standartu (LVS EN 13829, 2013; ISO 9972, 2006) prasībām un izmantojot speciālu iekārtu *BlowerDoor* (The Energy Conservatory, 2012), kas ir paredzēta standartizētās spiedienu starpības 50 Pa radīšanai un gaisa plūsmas  $V'$  mērīšanai. Mērījumiem sagatavotās iekārtas kopskats parādīts attēlā 2.92a, tās galvenās sastāvdaļas ir spiedienus starpības  $\Delta p$  un ventilatora ražības (jeb gaisa plūsmas)  $V'$  mērierīces, kā arī speciāls ventilators ar nepārtraukti regulējamu apgriezīgu skaitu, kas ar rāmja un auduma palīdzību tiek iestiprināts kādā no pētāmās ēkas atverēm – logā vai durvīs. *BlowerDoor* iekārta tiek ražota ar analogām, bet pēdējā desmitgadē ar digitālām lielumu  $\Delta p$  un  $V'$  noteikšanas ierīcēm (attēli 2.92b,c).

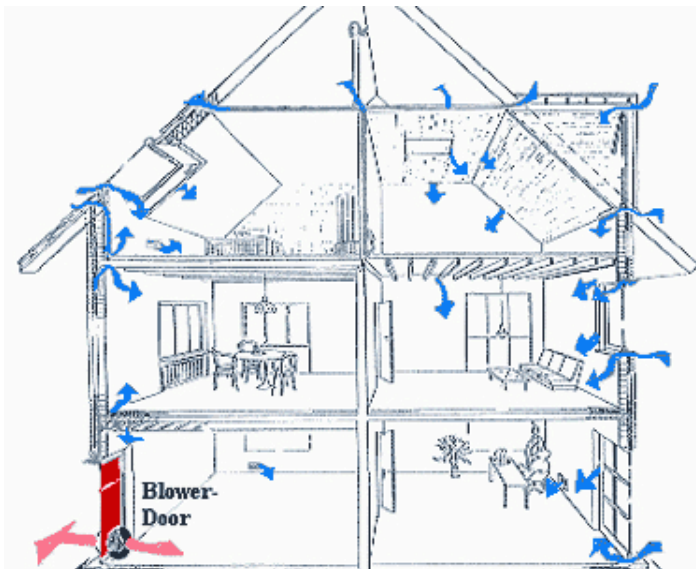
Mērījumu laikā ar iestiprinātās iekārtas palīdzību tiek nodrošināta kontrolējamā gaisa plūsma  $V'$  no vai uz ēkas iekšpusi, kas stacionārā gadījumā ir vienāda ar gaisa izplūdi vai ieplūdi caur ēkas norobežojošām konstrukcijām. Tāpat ar lokanu cauruļu palīdzību tiek mērīta arī spiedienu starpība  $\Delta p$  telpas iekšpusē un ārā. Zinot šos lielumus un ēkas ģeometriju, izmantojot sakarības (2.80) var aprēķināt gaisa apmaiņas koeficientu. Gaisa cirkulācijas shēma gaisa apmaiņas koeficienta noteikšanas mērījumu laikā nelielai ēkai ar tajā radītu zemspiedienu parādīta attēlā 2.93.

Tā kā ēkas norobežojošajās konstrukcijās var būt konstruktīvie elementi, kuru gaisa caurlaidība ir atkarīga no spiedienu starpības (piem., attēlā 2.94), tad arī mērījumu rezultātā aprēķinātā gaisa apmaiņas intensitāte būs atkarīga no *BlowerDoor* iekārtas radītās spiedienu starpības virziena. Arī gadījumā, ja mērījumu laikā uz ēkas vienu fasādi pūš vējš, rodas papildus spiediens, kas ietekmē rezultātu. Tādos gadījumos ir ieteicams veikt divus mērījumus – radot

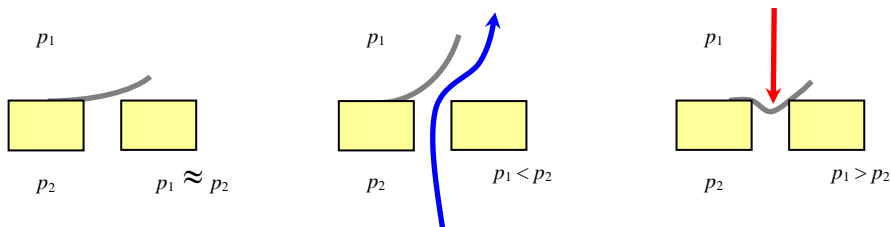
iekštelpās 50 Pa lielu pārspiedienu un zemspiedienu, tas ļauj izslēgt no rezultātiem sistemātisko vēja radīto papildus spiediena ietekmi un atklāt dažādus no spiedienu starpības virziena atkarīgus efektus. Arī lielas temperatūras starpības starp iekšpusi un ārpusi, kas rada papildus konvektīvo gaisa kustību, ietekmi uz rezultātu, iespējams mazināt, veicot gan pārspiediena, gan arī zemspiediena testus.



Attēls 2.92. Iekārtu BlowerDoor kopskats (a) un tajā lietotās analogās (b) vai digitālās (c) mērierīces.



Attēls 2.93. Gaisa cirkulācija ēkā BlowerDoor mērījumu laikā ar pazeminātu spiedienu telpās.



Attēls 2.94. Konstruktīvā elementa piemērs, kura gaisa caurlaidība ir atkarīga no spiedienu starpības.

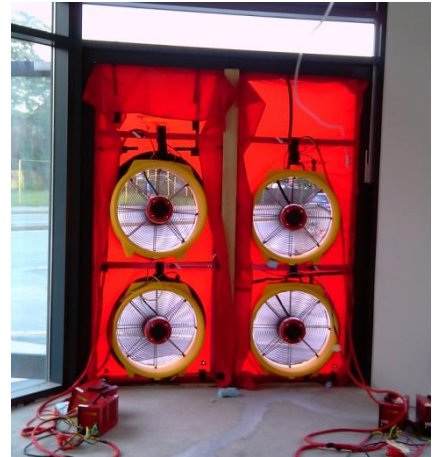


Attēls 2.94. Dažādi ventilatora uzliktņi dažādiem BlowerDoor modeļiem.

*BlowerDoor* mēriekārtas komplektā ietilpst arī dažādi ventilatora uzliktņi, kas ir paredzēti gaisa plūsmas samazināšanai gadījumā, ja mērījumu objekts ir pietiekami blīvs un pie spiedienu starpības 50 Pa ir jānodrošina ļoti neliela gaisa plūsma. Vienas skalas gadījumā tas nozīmētu gaisa plūsmas lieluma nolasišānu skalas sākumā, kas palielinātu kļūdu, tāpēc tiek lietotas mehāniskās barjeras – uzliktņi, kas samazina gaisa plūsmu pie pietiekami liela apgriezīgu skaita (attēls 2.94).

Savukārt ēkām ar lielu gaisa tilpumu vai ļoti vāji noblīvētām ēkām (piem., ar lielām spraugām logos) vienas *BlowerDoor* iekārtas ražība var izrādīties nepietiekama, lai radītu standartizētu 50 Pa spiedienu starpību. Tad praksē sinhroni var lietot vairākas iekārtas, vienlaicīgi īpašā veidā saskaņojot to darbināšanu (attēls 2.95), vai arī mērījumus veikt gaisa apmaiņas ziņā atdalītiem šīs ēkas blokiem. Šajā gadījumā standarti (LVS EN 13829, 2013; ISO 9972, 2006) pieļauj veikt mērījumus arī pie 2 reizes mazākas spiedienu starpības (25 Pa) un rezultātus pārreķināt, ievērojot, ka tuvināti  $V' \sim \Delta p$  (skat. arī nākamo sadaļu).

Lai nodrošinātu mērījumu precizitāti, jāievēro virkne papildus nosacījumu. Būtiskākais no tiem ir prasība, ka atmosfēras parādību (temperatūru starpību izraisīto konvektīvo gaisa plūsmu un vēja) izraisītās spiedienu starpības starp telpu un āru nedrīkst pārsniegt 5 Pa. Dažādo ēkas gaisa apmaiņu ietekmējošo faktoru eksperimentālie pētījumi (Schmidt *et.al.*, 1999) rāda, ka visvairāk tā ir atkarīga no temperatūru starpības ( $n \sim \sqrt{\Delta T}$ ), tāpēc no šī viedokļa gaisa apmaiņas pārbaudēm piemērotāks ir siltais gada laiks, kad temperatūru atšķirības starp telpām un āru ir nelielas.



Attēls 2.95. Vairākas BlowerDoor iekārtas dažādās (pa kreisi) vai vienā (pa labi) atverē ēkas čaulā.

Ēkas telpu sagatavošana eksperimentam ir atkarīga no mērījumu mērķa un būves stāvokļa:

- ja mērījumu veic pirms ēkas nodošanas ekspluatācijā, tad kļūdainu rezultātu novēršanai jāpārbauda, vai ēkas ārējā čaula ir noslēgta un jānoblīvē arī sanitāro mezglu atveres, ja tās vēl nav piepildītas ar ūdeni;
- lai noteiktu tieši ēkas ārējās čaulas blīvējumu, jāizslēdz piespiedu ventilācija un jānoblīvē ventilācijas sistēmas atveres. Savukārt lai pētītu pieplūdes un noplūdes ventilācijas sistēmu efektivitāti, tās jādarbina uzdotā režīmā;
- lai veiktu mērījumus ēkas daļā, jāpārbauda un jānoblīvē iespējamās atveres uz pārējo ēkas daļu. Šādi veicot mērījumus vienā vai vairākās atsevišķās telpās principā var noteikt arī logu un durvju iebūvēšanas blīvējuma kvalitāti.

Lai lokalizētu neblīvo vietu (atveru un spraugu) novietojumu ēkas ārējā čaulā, īpaši ieteicams pārspiediena un zemspiediena mērījumus veikt vienlaicīgi pielietojot

- īpašu dūmu “mašīnu” vai kompakto dūmu iekārtu (attēls 2.96), kas ļauj saskatīt vietas ēkas čaulā caur kurām izplūst gaiss;
- termogrāfisko diagnostiku (sadaļā 2.1.1).



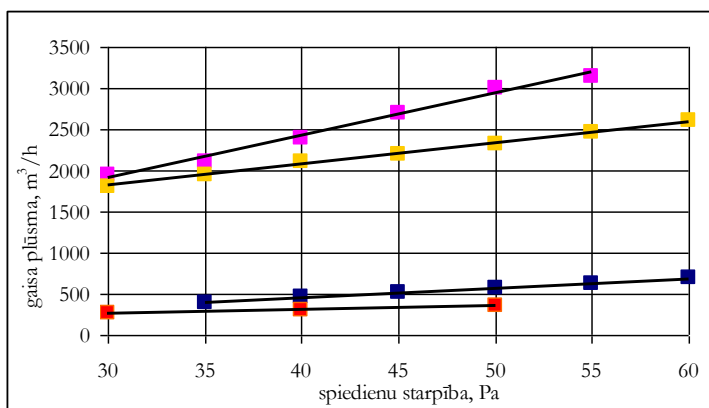
Attēls 2.96. Stacionārā (pa kreisi) un kompakta (pa labi) dūmu mašīnas gaisa plūsmu vizualizēšanai.

Zemspiediena apstākļos telpā ieplūst aukstais ārējais, kas attiecīgajās vietās pazemina būvkonstrukciju iekšējo virsmu temperatūru, ko termogrāfiski var ērti konstatēt. Savukārt, ja telpā radīts pārspiediens, siltā gaisa izplūžu vietas termogrāfiski būs ērti diagnosticējamās apsekojot ēku no ārpusēs. Visbeidzot, salīdzinot ēkas vienu un to pašu ārējo norobežojošo virsmu termogrāfijās, kas iegūtas bez spiedienu starpības un spiedienu starpības apstākļos, var nošķirt tās vietas, kur lielus siltuma zudumus nosaka pašu būvkonstrukciju liela siltuma caurlaidība un tādas, kur ir siltā gaisa noplūdes vai aukstā gaisa ieplūdes (attēls 2.16).

### 2.1.3.2. Raksturīgie mērījumu piemēri

LU VTPMM laboratorijas iekārta ir bijusi pirmā Latvijā un vairākus gadus arī vienīgā šāda tipa iekārta, tāpēc 90-to gadu beigās un šī gadsimta sākumā veiktie pētījumi ir vienīgi eksperimentālie rezultāti, kas tika iegūti Latvijā šajā laika periodā. Ar minēto mēriekārtu kopumā ir veikti vairāki desmiti ēku un telpu gaisa apmaiņas koeficienta un gaisa caurlaidības mērījumi, kā arī tā tika izmantota ēku termogrāfisko apsekojuma laikā (sadaļa 2.1.1.). Lielākajā daļā padomju laikā uzcelto daudzdzīvokļu namu telpu gaisa apmaiņas rādītāji neatbilst LBN 002-01 prasībām, bet atsevišķos gadījumos pat nebija iespējams sasniegt noteikto 50 Pa spiedienu starpību. Jaunuzceltajām ēkām un mājām pēc renovācijas gaisa apmaiņas koeficients  $n_{50}$  vairākos eksperimentos tika noteikts robežās no 1 līdz 5 h<sup>-1</sup>. Jāatzīmē, ka dažās telpās ar pakešu logiem, bet bez ventilācijas sistēmas, gaisa apmaiņas intensitāte ir tik neliela, ka nodrošināt nepieciešamo svaigā gaisa pieplūdi var tikai atverot logus. Tas savukārt izsauc papildus siltuma zudumus, kuru samazināšanai logu maiņa tika veikta. Tādējādi mērķtiecīgi logu nomaiņu būtu jāveic vienlaicīgi ar individuālu vai kopēju ventilācijas/rekuperācijas sistēmas izbūvi.

Visu gaisa apmaiņas koeficienta mērījumi tiek veikti pakāpeniski palielinot spiedienu starpību starp iekštelpu gaisu un ārējais no 0 līdz 50 Pa (ja šādu lielumu ar vienu iekārtu varēja sasniegt). Visos mērījumos tika konstatēta lineāra gaisa plūsmas  $V'$  atkarība no spiedienu starpības  $\Delta p$ , kas ir parādīta arī attēlā 2.97. Tas nepieciešamības gadījumā Tas nepieciešamības gadījumā ļauj veikt mērījumu datu ekstrapolāciju, ja standartizētā 50 Pa liela spiedienu starpība nevar tikt sasniegta telpās ar lielu platību vai sliktu blīvējumu.



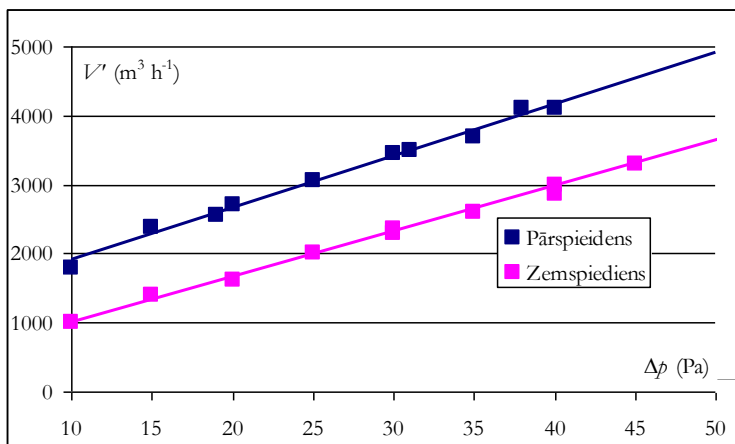
Attēls 2.97. Gaisa plūsmas lineāra atkarība no spiedienu starpības dažādām ēkām vai telpām.

Tā, veicot mērījumu deviņstāvu daudzdzīvokļu lielpaneļu mājas kāpņu telpā ar vienu *BlowerDoor* iekārtu, maksimālā spiedienu starpība, ko izdevās iegūt, bija tikai 10 Pa, kas izskaidrojams ar nepietiekoši noblīvētiem vienstikla logiem visos stāvos, durvīm ļoti sliktā stāvoklī gan uz āru, gan uz bēniņiem un atkritumu vada esamību, kā arī dažu dzīvokļu durvju nepietiekamu blīvējumu. Šajā gadījumā ļoti efektīvi darbojas arī t.s. skursteņa efekts. Tā kā mērījums pie 50 Pa spiedienu starpības nebija iespējams, gaisa apmaiņas koeficients  $n_{50}$  tika tuvināti noteikts ekstrapolācijas ceļā un tas pārsniedza  $10 \text{ h}^{-1}$ . Šajā gadījumā konvektīvie siltuma zudumi no šīs ēkas daļas ir būtiski lielāki par siltuma vadīšanas zudumiem un sekmē arī zemu temperatūru kāpņu telpā ziemā, tajā ieplūstot aukstajam āra gaisam. Līdzīga situācija ir raksturīga lielai daļai no daudzstāvu ēku kāpņu telpu *BlowerDoor* iekārtas rāmja risinājums ļauj ievietot to gan telpas durvīs, gan arī logā, kas tika darīts minētajā eksperimentā (attēls 2.98).

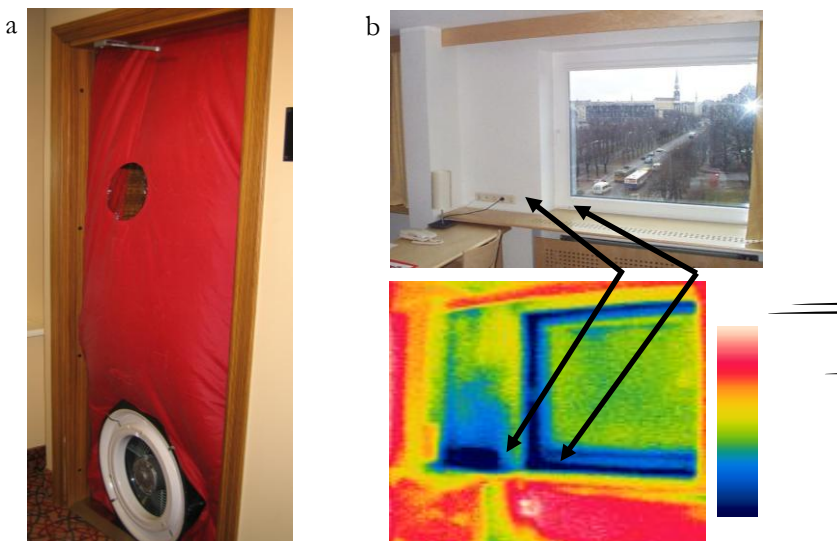


Attēls 2.98. Logā ievietotās *BlowerDoor* iekārtu kopskats mērījumu laikā.

Ēku gaisa apmaiņas mērījumiem ir gaisa plūsmas  $V'$  atkarība no spiedienu starpības virziena. Attēlā 2.99. parādīti mērījumu rezultāti telpai viesnīcas augstceltnes daļā, kurā tika veikti gan pārspiediena, gan zemspiediena testi. Šai ēkai ir raksturīga siltuma zudumu strauja palielināšanās vēja ietekmē. Kā redzams attēlā, līknes  $V'(\Delta p)$  zemspiediena un pārspiediena gadījumos atšķiras. Iemesls tam ir dažādu spraugu atvēršanās atkarībā no gaisa plūsmas virziena. Zemspiediena gadījumā, pie 50 Pa lielas spiedienu starpības, telpā rodas retinājums, ko var redzēt arī pēc durvīs iestiprinātā *BlowerDoor* iekārtas auduma deformācijas (attēls 2.100a) un telpā intensīvi ieplūst auksts gaiss pa dažādām atverēm (spraugas pie loga, elektrības kontakti) ieplūst auksts gaiss ar ātrumu līdz  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Ilgstoši darbinot mēriekārtu, ieplūstošais āra gaiss ievērojami pazemina virsmu temperatūru, ko uzskatāmi parāda arī termogramma - attēls 2.100b. Konkrētā gadījumā tika noteiktas šādas gaisa apmaiņas koeficienta vērtības: normējot uz tilpumu, saskaņā ar (LVS EN 13829, 2013; ISO 9972, 2006) –  $n_{50}=1,0 \text{ h}^{-1}$ , bet normējot uz čaulas laukumu, saskaņā ar (LBN 002-01, 2001) –  $q_{50}=8,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , kas pārsniedz maksimāli pieļaujamās prasības.



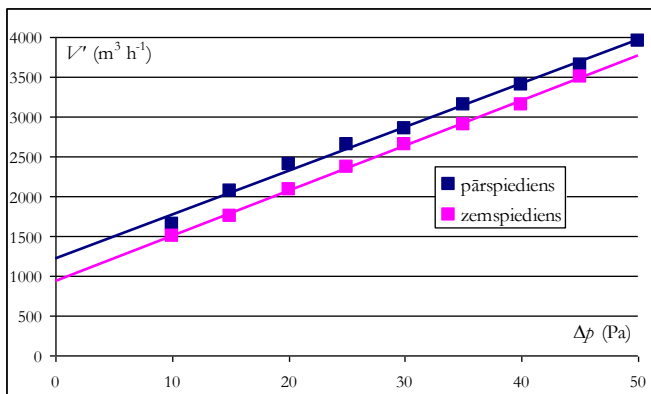
Attēls 2.99. Zemspiediena un pārspiediena mērījumu piemērs.



Attēls 2.100. Pazeminātā spiediena viesnīcas numurā (a) izraisītā aukstā gaisa ieplūde (b).

Cita parādība, kas ir raksturīga liela tilpuma ēkām ar nenoslēgtām telpām, kas var aizņemt vairākus stāvus, ir skursteņa efekta izraisītā nekontrolējamā gaisa ieplūde un izplūde bez papildus spiedienu starpības radīšanas. Šādām ēkām raksturīga palielināta termiskās konvekcijas izraisīta gaisa cirkulācijas intensitāte, ko var konstatēt arī ar *BlowerDoor* iekārtu. Veicot gaisa apmaiņas mērījumus jaunceļamajā privātmājā, kurā ir liela halle visas būves jeb 2.5 stāvu augstumā, pārspiediena un zemspiediena testi parādīja relatīvi labu tās blīvējumu. Tajā pat laikā ekstrapolējot pie dažādām spiedienu starpībām iegūtos gaisa plūsmas rezultātus, abas  $V'(\Delta p)$  līknes krusto  $\Delta p$  asi pie gaisa plūsmas  $V'$  vērtībām, kas ir lielākas par 0 (attēls 2.101). Uz pastāvošo gaisa cirkulāciju norādīja arī mēriekārtas ventilatora griešanās pie izslēgta motora pastāvošo plūsmu dēļ. Tas ir vēl viens aspekts, kāpēc ēkām ir ļoti būtiski nodrošināt labu blīvējuma kvalitāti, lai minimizētu nekontrolējamus konvektīvos siltuma enerģijas zudumus.

Kā tika minēts, *BlowerDoor* iekārtu ir lietderīgi lietot kopā ar dūmu mašīnu, kas rada viegli vizualizējamus baltus dūmus. Tas palīdz lokalizēt atveres ēkas vai telpas norobežojošās konstrukcijās caur kurām pastāv lielāka gaiss. Dūmu izmantošana ir neaizstājama arī gadījumos, kad ir nepieciešams noskaidrot gaisa plūsmas ceļus konstrukciju salaidumos, pie logiem un durvīm, caur dažādām saliktām vai slēptām konstrukcijām (piem., piekaramie griesti). Tā, vienā neliela izmēra jaunbūves telpā tika konstatēta nepamatoti liela gaisa apmaiņas intensitāte, ko izdevās izskaidrot, telpu piepildot ar dūmiem un tajā nodrošinot pārspiedienu, tādējādi radot gaisa izplūdi no tās. Rezultātā blakus esošajā telpā ap apgaismes ķermeņu instalācijas vietām tika reģistrēti izplūstošie dūmi (attēls 2.102), kas norādīja uz telpu savienojumiem aiz piekārtajiem griestiem. Attēls 2.103 līdzīgā veidā ilustrē gaisa apmaiņu caur nepietiekami noblīvētu loga konstrukciju.



Attēls 2.101. Zemspiediena/pārspiediena mērījumu rezultāti (pa kreisi) ēkai ar liela augstuma halli (pa labi).



Attēls 2.102. Dūmi no testējamās telpas nonāk blakus telpas griestos un norāda uz to savienojumu.



*Attēls 2.103 Logu konstrukciju un montāžas vietu hermetizācijas pārbaude ar dūmu ģeneratora palīdzību.*

### **2.1.3.3. Secinājumi**

Gaisa apmaiņas koeficients vai ēkas blīvējuma pakāpe parāda iekštelpu gaisa apmaiņas intensitāti un raksturo ar to saistīto siltuma daudzumu. No vienas puses gaisa apmaiņai ir jābūt pietiekamai, lai nodrošinātu nepieciešamos nosacījumus cilvēka darbībai, no otrās puses tā ir jāierobežo, lai mazinātu siltuma enerģijas zudumus, ko nosaka gaisa plūsma caur ēkas ārējo čaulu.

Pagājušā gadsimta otrajā pusē celtām daudzstāvu dzīvojamām ēkām veiktie mērījumi parāda neadekvāti lielus siltuma enerģijas zudumus tieši konvekcijas ceļā, kam pamatā ir neblīvas vietas vecajos logos un durvīs ar koka rāmjiem. Praktiski neviens mērījuma rezultāts, kas tika veikts šāda tipa ēkām, neapmierināja LBN 002-01 nosacījumus, bet atsevišķos gadījumos (piem., kāpņu telpās) tas pārsniedza noteiktās vērtības pat par kārtu. Salīdzinot ar siltuma pārvades zudumiem caur tādu ēku norobežojošām konstrukcijām, praktiski visos gadījumos konvektīvā siltuma enerģijas pārnese daļa ir lielāka. Tāpēc visefektīvākais veids, kā ievērojami samazināt apkures siltuma vajadzību, ir logu un durvju nomaiņa vai kvalitatīva to blīvēšana, kam ir arī visīsākais atmaksāšanās periods. Ērti novērtēt kādu noteiktu uzlabojumu ietekmi uz energoefektivitāti var, izmantojot kopējo ēkas siltuma bilanci un atbilstošu programmatūru, piem., *HeatMod* (skat. 6. nodaļu).

Veiktie mērījumi ēkām pēc to renovācijas parāda lielu rezultātu izkliedi atkarībā no darbu izpildījuma kvalitātes un lietotiem konstruktīviem risinājumiem, kas ne vienmēr nodrošina vēlamo efektu. Par defektu uzskatāms gan nepietiekami uzlabots ēkas blīvējums, kas pamatā ir dažādo detaļu savienojumi (būvkonstrukciju salaiduma vietas, elektrības rozetes, piekārtu griestu konstrukcijas u.c.), gan arī pārlietu blīva ārējā čaulu, bez dabīgās vai piespiedu ventilācijas iespējām, kas nodrošinātu cilvēkam vajadzīgo gaisa apmaiņu (vecu logu nomaiņa pret pakešu logiem telpās bez ventilācijas sistēmas). Otrajā gadījumā gaisa cirkulācijas nodrošināšanai parasti pietiek ar logu atvēršanu, kas plaši arī tiek novērots renovētās ēkās, bet šādu darbību rezultātā ievērojami pieaug siltuma zudumi no telpām un, tādējādi, arī no visas ēkas. Līdzīgi defekti tiek atklāti arī dažām jaunceltnēm.

Dažādu tipu ēkām Latvijas klimatiskajos apstākļos lielākā daļa siltuma apmaiņas starp ēku un apkārtējo vidi notiek siltuma vadīšanas un konvekcijas ceļā. Parasti starojuma siltuma pārnese

loma ir mazāk, bet tā var kļūt dominējoša ēkās ar būtisku caurspīdīgo norobežojošo konstrukciju daļu tās ārējā čaulā, kā arī saulainās dienās, kad komforta iekštelpu temperatūras nodrošināšanai var būt nepieciešama dzesēšana.

#### **2.1.4. Iezīmētās gāzes mērījumi**

Pētījumi ir parādījuši sakarību starp iekštelpu vides kvalitāti un iedzīvotāju produktivitāti. Tāpēc ir ļoti svarīgi nodrošināt ērtu un veselīgu iekštelpu vidi ēkas iemītniekiem. Komforts un iekštelpu gaisa kvalitāte ir atkarīga no daudziem faktoriem, tostarp temperatūras regulēšanas, iekšējo un ārējo piesārņojumu avotu kontroles, svaigā gaisa padeves (iekštelpu gaisa nomaiņas), kā arī pašu iedzīvotāju darbībām un vēlmēm. Ventilācija un infiltrācija ir tikai daļa no iekštelpu gaisa kvalitāti noteicošajiem procesiem. Citi būtiski aspekti ir:

- mitrums;
- bioizdalījumi un bioaerosoli (ķermeņa smarža, u.c.);
- degšanas produkti, dūmi;
- radons;
- gaistošie organiskie savienojumi;
- cietās daļiņas (ieskaitot šķiedras).

Vislabākais veids, kā samazināt daudzās telpu gaisu piesārņojošās vielas (ieskaitot arī gaistošus organiskos savienojumus, tabakas dūmus, cietās daļiņu u.c.), ir kontrolēt to avotus, izslēdzot vai ierobežojot vielu izdalīšanās. Tomēr, laba iekštelpu gaisa kvalitāte un energoefektivitāte bieži ir pretēji aspekti būvprojektā – bez atbilstošiem aprēķiniem, apkures enerģijas samazināšanas paņēmieni bieži var pasliktināt gaisa kvalitāti telpās.

##### **2.1.4.1. Ventilācija un infiltrācija**

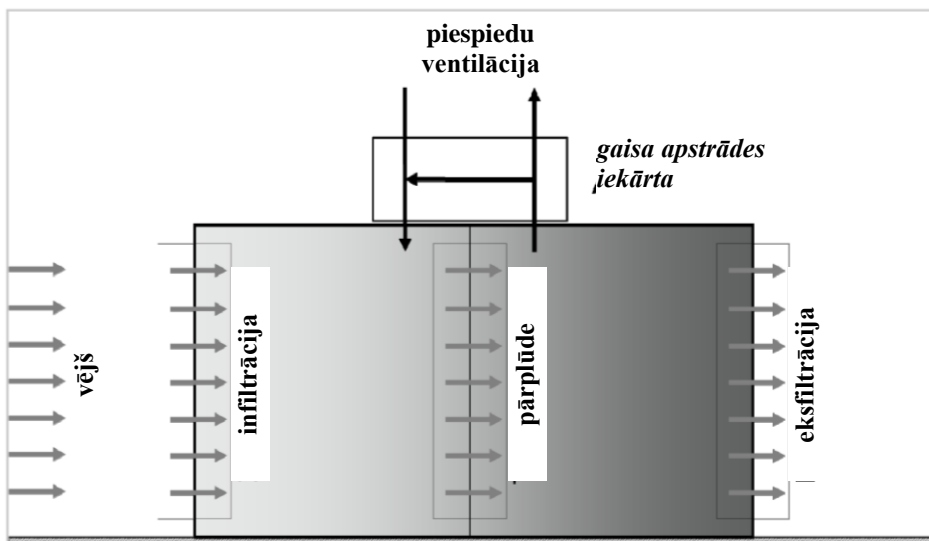
Pareiza ventilācija ēkās ir svarīga, lai nodrošinātu komfortu tās iemītniekiem un izvadītu no iekšējām telpām gaisu piesārņojošās vielas. Tomēr enerģija, kas nepieciešama, lai uzsildītu ieplūstošo āra gaisu, veido nozīmīgu daļu kopējā siltuma bilancē un, lai to noteiktu, ir nepieciešams zināt gaisa apmaiņas intensitāti un iekštelpu gaisa tilpumu. Gaisa apmaiņu starp āru un iekšējām telpām – ventilācijā un infiltrācijā.

Ventilācija ir paredzēta, lai nodrošinātu pieņemamu iekštelpu gaisa kvalitāti. Tā var būt piespiedu vai dabiskās ventilācijas, kā arī infiltrācijas un atkārtoti izmantotā gaisa sajaukums, bet ventilācija nozīmē apzinātu ārējais pievadīšanu ēkai. Par dabisko ventilāciju uzskata gaisa plūsmu caur atvērtiem logiem, durvīm un citām tam paredzētām atverēm bez papildus enerģijas pievadīšanas šim nolūkam. Piespiedu ventilācija (attēls 2.104 savukārt ir apzināta gaisa kustības nodrošināšana ēkā, izmantojot speciālās ventilācijas sistēmas.

Infiltrācija (attēls 2.104) ir ārējais ieplūde telpās caur spraugām un neblīvām vietām norobežojošās konstrukcijās un citām šim nolūkam neparedzētām vietām, kā arī caur ārdurvīm to normālās ekspluatācijas gadījumā. Infiltrāciju dažreiz sauc par gaisa ieplūdi telpā (*air leakage*). Eksfiltrācija (attēls 2.104) ir iekštelpu gaisa noplūde no ēkas pa tāda paša veida atverēm. Tieši tāpat kā dabiskā ventilācija, arī infiltrācija un eksfiltrācija rodas dabīgi vai mākslīgi radītas

spiediena starpības rezultātā (piem., vēja ietekmē). Gaisa pārvietošanās notiek arī (attēls 2.104) starp telpām vienas ēkas ietvaros - tādus procesus sauc par pārplūdēm.

Visi minētie gaisa apmaiņas veidi būtiski atšķiras pēc to ietekmes uz ēkas konvektīvajiem siltuma zudumiem, iekštelpu gaisa kvalitāti un termisko komfortu, to loma var mainīties atkarībā no laika apstākļiem, ēku ekspluatācijas rādītājiem un lietošanas īpatnībām. Kaut arī kāds no gaisa apmaiņas veidiem var būt noteicošs konkrētā ēkā, tomēr visi pārējie arī ir jāanalizē, lai noteiktu ar apkures un ventilācijas sistēmu darbību saistītos parametrus.



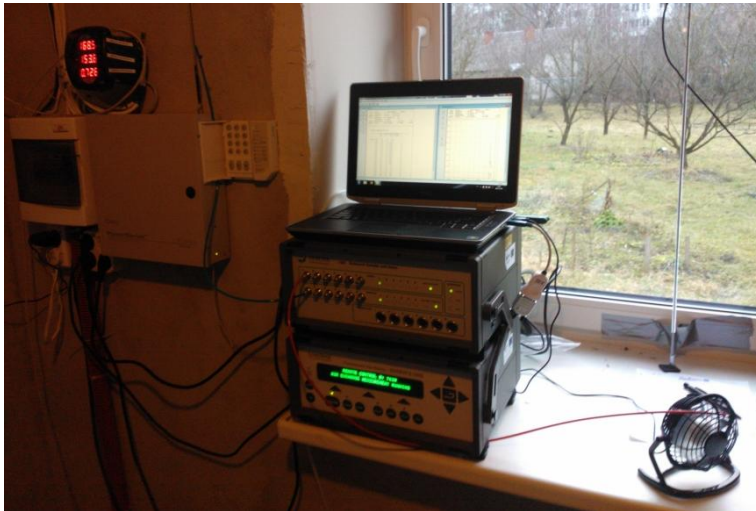
Attēls. 2.104. Ēka ar piespiedu (mehānisko) ventilāciju, infiltrāciju un eksfiltrāciju.

#### 2.1.4.2. Mērījumi ar iezīmētās gāzes metodi

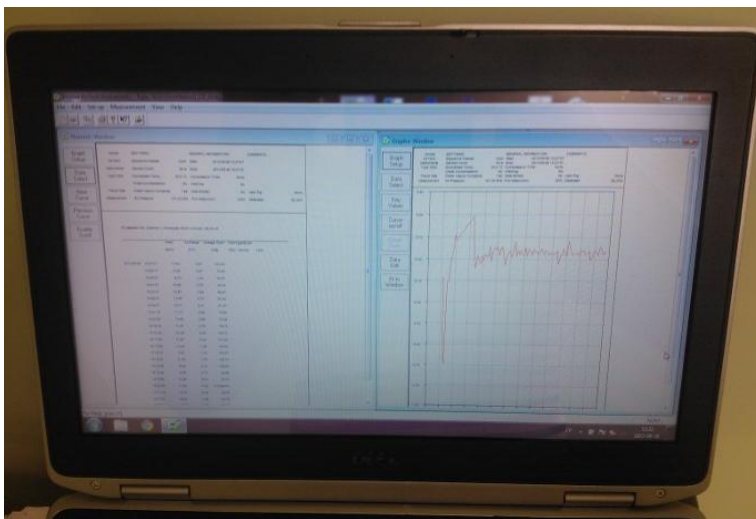
Mērījumu veikšanai ar iezīmētās gāzes metodi tiek izmantotas divas iekārtas (attēls 2.105):

- speciāla iekārta gāzes dozēšanai un paraugu ņemšanai vairākos punktos, kas nodrošina gāzes nogādāšanu nepieciešamā daudzumā 6 dažādās vietās (katras sprauslas maksimālā caurplūde var atšķirties), kā arī gāzes paraugu ņaņemšanu no 6 vietām (izmantotais modelis *LumaSense INNOVA 1301*);
- gāzu analizators, ar kura palīdzību ņaņemtajos paraugos nosaka iezīmētās gāzes koncentrāciju/daudzumu, vienlaicīgi ir iespējams noteikt vairāku gāzu saturu vienlaicīgi. Gāzes daudzuma noteikšanai gaisā tiek izmantots fotoakustiskais gāzu analizators (izmantotais modelis *LumaSense INNOVA 1412i*).

Iegūto datu analīzei, skaitliskiem aprēķiniem un vizuālai rezultātu attēlošanai tiek lietota speciālā programmatūra *LumaSense INNOVA 7620* (attēls 2.106), ar kuras palīdzību ir iespējams norādīt izvēlēto mērījumu veikšanas metodiku (kas ir aprakstītas zemāk), kontrolēt procesu un veikt iegūstamo parametru aprēķinus.



Attēls 2.105. Mērījumi ar iezīmēto gāzi: iekārtu kopskats (apakšā – gāzu analizators, vidū – iekārta gāzes dozēšanai un paraugu ņemšanai, augšā – vadības dators, pa labi – neliels ventilators, kas paātrina gāzes sajaukšanos).



Attēls 2.106. Mērījumi ar iezīmēto gāzi: vadības, aprēķinu un attēlošana programmatūra.

Kā iezīmēto gāzi var izmantot gāzi, kas atbilst vismaz sekojošiem kritērijiem:

- tās blīvums pēc iespējas mazāk atšķiras no gaisa blīvuma;
- tā nav toksiska un kaitīga cilvēkiem un telpās esošiem priekšmetiem;
- to var viegli detektēt pat nelielos daudzumos;
- tā ir ugunsdroša.

Veiktajos mērījumos kā iezīmētā gāze tika izmantots freons *R134a* (attēls 2.107), kas atbilst visiem minētajiem kritērijiem un tā neliela koncentrācija (praktiski visos eksperimentos daži līdz daži desmiti ppm) ļauj ilgstoši izmantot vienu balonu.



Attēls 2.107. Balons ar iezīmēto gāzi (freons R134a) ir pieslēgts pie dozatora.

#### 2.1.4.3. Gaisa apmaiņas raksturlielumi un mērmetodes izvēle

Mērmetodes izvēli nosaka mērījumu mērķis un apstākļi – tabulā 2.14 ir apkopoti dažādu veidu ventilācijas mērījumiem atbilstošās metodes apstākļi. Ventilatoru skaits, ko izmanto iezīmētās gāzes sajaukšanai ar gaisu un piedāvāto mērķa koncentrāciju lielums ir tikai orientējošs, jo tas ir atkarīgs no iekārta atrašanās vietas, to skaita, fona koncentrācijas un citu interferējošo (traucējošo) gāzu klātbūtnes.

Nominālā gaisa apmaiņa ir gaisa maiņa visai ēkai kopumā vai atsevišķai tās zonai, ko apkalpo gaisa apstrādes iekārta. To nosaka attiecinošā piegādāto ārējais daudzums pret kopējo iekštelpu gaisa tilpumu un tā ietver gan ventilāciju, gan infiltrāciju. Tā neapņemas recirkulāciju vai ventilācijas sadalījumu starp telpām visā ēkā vai kādā zonā. Nominālo gaisa apmaiņu var noteikt, uzturot visās telpās (zonās) nemainīgu iezīmētās gāzes koncentrāciju (konstantas koncentrācijas metode).

Savukārt gaisa apmaiņai apgrieztu lielumu sauc par laika konstanti tas ir laiks, kas ir nepieciešams, lai apmainītos viss ēkā vai tās kādā zonā (telpā) esošais iekštelpu gaiss. Līdzīgi nominālajai gaisa apmaiņai, nominālā laika konstante neapņemas recirkulāciju ēkas vai zonas iekšpusē, kā arī gaisa pārplūdes starp telpām ēkā vai zonā.

Būtisks raksturlielums ir arī t.s. gaisa „vecums”, tas ir laika periods, cik ilgi ārējais gaiss ir bijis ēkā, zonā vai telpā. "Jaunākais" gaiss atrodas vietās, kur ārējais ieplūst ēkā piespiedu vai dabīgās ventilācijas vai arī infiltrācijas ceļā. "Vecākais" gaiss savukārt var uzkrāties kādā telpas vietā ar mazāku gaisa kustības intensitāti vai arī vietā, kur tas izplūst no ēkas. Gaisa „vecuma” mērvienība ir laiks (parasti sekundes vai minūtes), tāpēc tas neraksturo faktisko gaisa apmaiņas efektivitāti, bet dod kvalitatīvu priekšstatu par iespējamām problēmām telpā.

Gaisa apmaiņas efektivitāte ir gaisa sadales sistēmas spēja nodrošināt nepieciešamo ventilāciju ēkā, tās zonā vai telpās. Gaisa apmaiņas efektivitāti var raksturot arī ar attiecību starp laika konstanti un gaisa „vecumu”. Lokālā gaisa apmaiņas efektivitāte raksturo ārējais piegādi uz kādu noteiktu vietu telpā. Gaisa apmaiņas efektivitātes vērtība 1.0 parāda, ka gaisa sadales sistēma

nodrošina pilnīgi sajauktu gaisu noteiktā telpā. Ja šī vērtība ir mazāka par 1.0, tad sajaukšanās nav ideāla un tas norāda uz zināmu gaisa stagnāciju.

#### 2.1.4.4. Īstermiņa gaisa apmaiņas mērījumi, izmantojot koncentrācijas samazināšanās metodi

Koncentrācijas samazināšanās metode ir piemērota mazām un vidējām telpām, kurās nav ventilācijas režīma izmaiņu mērījumu laikā, t.sk. arī netiek atvērtas durvis vai logi. Noteikts daudzums iezīmētās gāzes tiek ielaists telpā manuāli un tam ir pilnībā jāsajaucas ar telpas gaisu, šim nolūkam izmanto vairākus ventilatorus, kam jādarbojas visā mērījumu periodā. Pirms mērījumu sākuma jāpārlicinās, ka iezīmētā gāze ir labi sajaukusies ar gaisu. To var viegli pārbaudīt, izmērot koncentrāciju 2 - 3 dažādās telpas vietās. Ja mērījumu laikā iezīmētā gāze netiek papildus piegādāta un gaisa plūsma caur telpu ir nemainīga, gāzes koncentrācija  $C$  samazinās eksponenciāli:

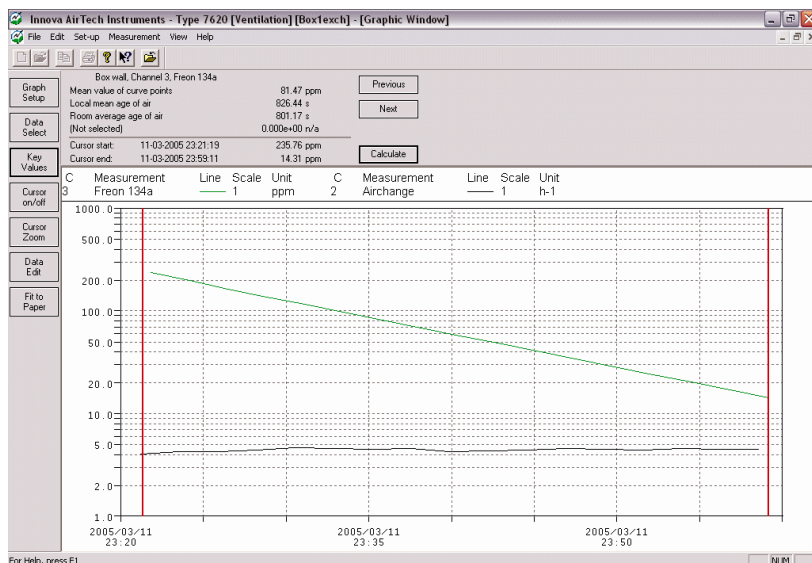
$$C(\tau) = C_{start} \cdot e^{-n\tau}, \quad (2.81)$$

Attēlojot gāzes koncentrācijas naturālo logaritmu atkarībā no laika, iegūstam taisni, kuras slīpums ir gaisa apmaiņas intensitāte telpā  $n$  ( $h^{-1}$ ) (attēls 2.108)

$$n = \frac{\ln(C_0 - C_\tau)}{\tau}, \quad (2.82)$$

kur  $C_0$  - sākuma koncentrācija,  $C_\tau$  - koncentrācija laika momentā  $\tau$ ,  $\tau$  - mērījuma laiks.

Ja mērījumu rezultātā logaritmam tuvināti netiek iegūta taisne, tad gaisu telpā nevar uzskatīt par labi sajauktu un rezultāti nebūs korekti. Ja gaiss ir pilnīgi sajaukts, vidējais lokālais gaisa „vecums” būs vienāds ar telpas vidējo gaisa „vecumu” un gaisa apmaiņas intensitātes  $n$  apgriezto lielumu.



Attēls 2.108. Gaisa apmaiņas aprēķins, pamatojoties uz koncentrācijas samazināšanās mērījumiem.

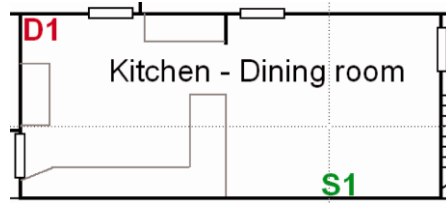
Tabula 2.14. Mērījumu ar iezīmēto gāzi metožu apkopojums.

Paredzētā mērījuma veids	Gaisa apmaiņa	Zonu skaits	Metode	Iezīmētās gāzes sajaukšanās	Mērķa koncentrācija/Sprausla/Sākuma koncentrācija	Punktu skaits
Īslaicīgs gaisa apmaiņas mērījums	Konstanta	1	koncentrācijas samazinājuma	2-4 ventilatori telpā	Sākuma koncentrācija 50-100 ppm	1 mērpunkts un 1/2 kontrolpunkti
Ilglaicīgs gaisa apmaiņas mērījums	Konstanta	1	Konstanta koncentrācija	1 neliels ventilators pie padeves	2—5 ppm	1 mērpunkts
Norobežots mērījums ārgaisa apmaiņas noteikšanai	Mainīgā	2+	Konstanta koncentrācija	1 neliels ventilators pie katras padeves	2—5 ppm	1 mērpunkts katrā zonā
Piesārņojuma izplatīšanās	Mainīgā	2+	Konstanta koncentrācija, lietojot divas gāzes	1 neliels ventilators pie katras padeves	2—5 ppm	1 mērpunkts katrā zonā
Gaisa „vecums”	Konstanta	1	Konstanta emisija	Gāzes padeve ventilācijas cauruļvadā	Atkarīga no telpas un gaisa plūsmas. Parasti sprauslas 1 vai 2-5	1 mērpunkts ventilācijas izejā un 1 mērpunkts telpā
Plūsma cauruļvados (kanālos)	Konstanta	-	Konstanta emisija	Sajaukts ar gaisu paraugu ņemšanas vietā	Atkarīga no plūsmas. Parasti sprauslas 2-5	1 mērpunkts un 1/2 kontrolpunkti

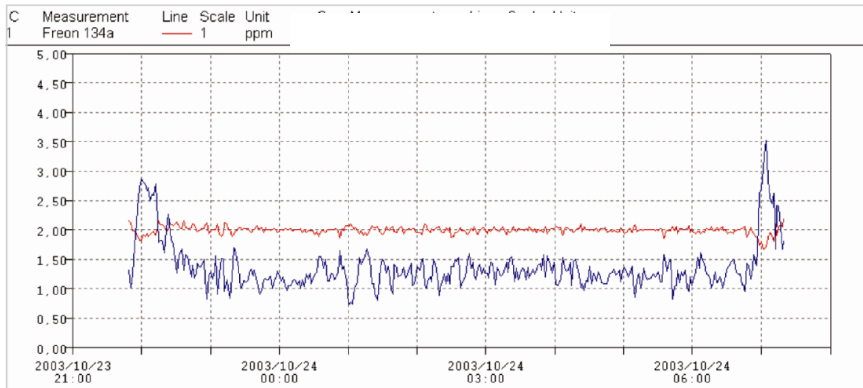
#### 2.1.4.5. Ilgtermiņa gaisa apmaiņas mērījumi vienā zonā, izmantojot konstantas koncentrācijas metodi

Lai pētītu gaisa apmaiņu telpā ilgtermiņā, tiek lietota iezīmētās gāzes konstantas koncentrācijas metode. Dozēšanas punkts (D1, attēls 2.109.) jānovieto istabās stūrī, ar nelielu ventilatoru sajaucot iezīmēto gāzi ar telpas gaisu. Ilgākā laika periodā gāze labi sajauksies ar gaisu un nav nepieciešami lieli ventilatori, kas varētu ietekmēt arī gaisa plūsmas, īpaši logu un durvju atvēršanas gadījumā. Parauga ņemšanas vietai (S1, attēls 2.109.) jāatrodas iespējami tālu no dozēšanas punkta, lai izvairītos no histerēzes efekta.

Piemērā, kas parādīts attēlā 2.110, mērījumi tika veikti telpā ar tilpums 74 m<sup>3</sup> un nelielu gaisa apmaiņu, uzstādītais līmenis iezīmētās gāzes R134a koncentrācijai bija 2 ppm. Redzams, ka visstabilākie ir mērījuma rezultāti naktī, kad durvis ir aizvērtas. Pārējā laikā, kad tiek ieslēgta tvaika nosūce un atvērtas durvis/logi, aprēķinātā gaisa apmaiņa ir mainīga.

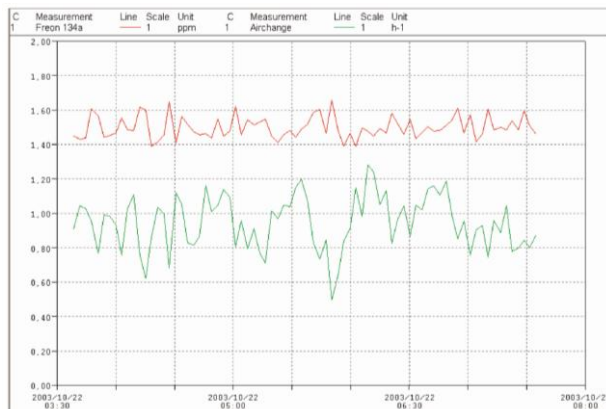


Attēls 2.109. Dozēšanas punkta (D1) un parauga ņemšanas punkta (S1) novietojums.



Attēls 2.110. Gaisa apmaiņas aprēķins, izmantojot konstantas koncentrācijas metodi.

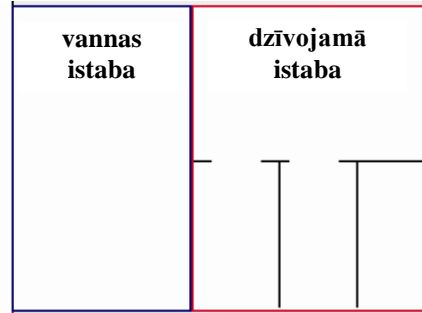
Izmantojot konstantas koncentrācijas metodi, ir svarīgi atbilstoši paredzētai koncentrācijai izvēlēties pareizo dozēšanas sprauslu, jo tās ir paredzētas dažādām plūsmām. Ja tiek lietota pārāk liela dozēšanas sprausla (attēls 2.111), aprēķinātā gaisa apmaiņa svārstīsies vairāk, bet, ja tiek izmantota pārāk maza sprausla, vēlamā gāzes koncentrācija varētu netikt sasniegta, vai arī tās sasniegšanai būs nepieciešams ilgs laiks.



Attēls 2.111. Būtiskas aprēķinātās gaisa apmaiņas svārstības, lietojot pārāk lielu dozēšanas sprauslu.

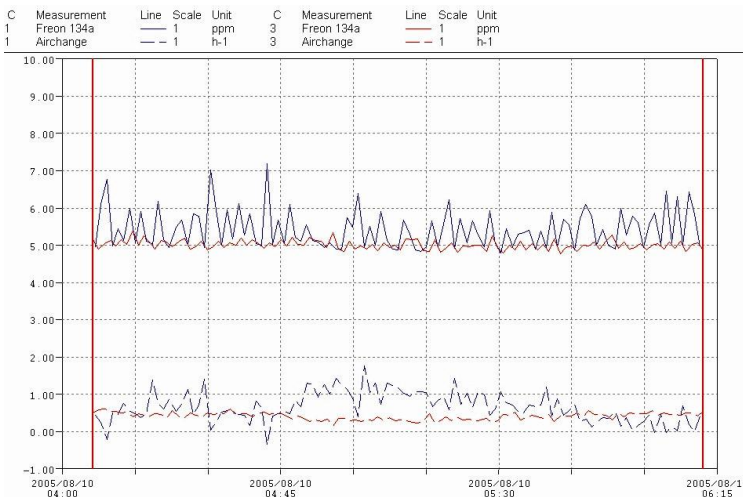
### 2.1.4.6. Norobežots mērījums gaisa apmaiņas noteikšanai, izmantojot konstantas koncentrācijas metodi

Norobežotus mērījumus var izmantot, lai mērītu gaisa apmaiņu starp divām ēkas daļām vai lai noteiktu tikai āra gaisa apmaiņu. Piemērs norobežotiem gaisa apmaiņu mērījumiem ir parādīts 2.112.attēlā – ir jānosaka āra gaisa padeves līmenis tikai vienā vēdināmā vannas istabā, kas ir daļa no ēkas. Vannas istabu šajā gadījumā sauc par mērzonu, bet telpu blakus – par norobežozošo zonu. Nav iespējams izmērīt tikai ārējais gaisa apmaiņu vannas istabā, veicot gaisa apmaiņas mērījumus vienīgi vannas istabā, jo daļa no gaisa tiks infiltrēta arī no blakus esošās dzīvojamās istabas. Tāpēc, iezīmētās gāzes koncentrācija norobežojošajā zonā tiek uzturēta tāda pati kā mērzonā, tad gaisa infiltrācija no blakus telpas neietekmēs mērījumus. Šādā veidā noteiktā gaisa apmaiņa vannas istabai raksturo tikai gaisa apmaiņu ar āra gaisu.

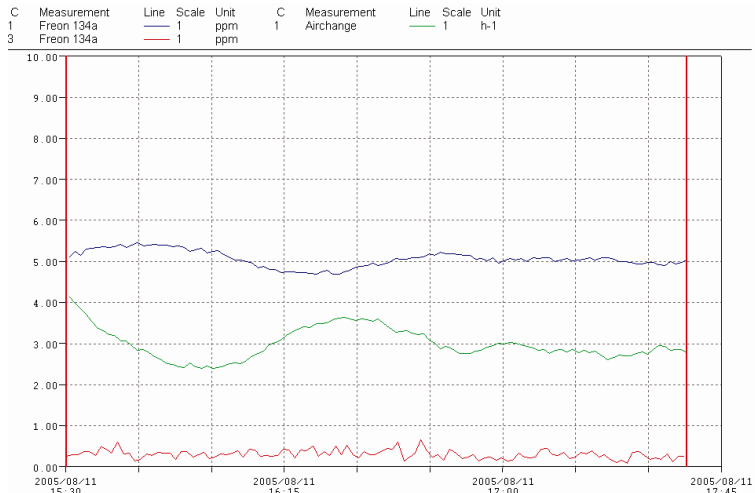


Attēls 2.112. Vannas istabas un dzīvojamās istabas plāns norobežotam gaisa apmaiņas mērījumam.

Attēlā 2.113 parādīts šādu mērījumu rezultātu piemērs, kad iezīmētās gāzes koncentrācija tiek uzturēta 5 ppm līmenī gan dzīvojamā istabā (sarkanā līnija), gan vannas istabā (zilā līnija). Aprēķinātā gaisa apmaiņa vannas istabā raksturo tikai gaisa apmaiņu ar ārējais. Attēlā.2.114 parādīti mērījumu tajās pašās telpās, bet ar iezīmētās gāzes dozēšanu tikai vannas istabā, rezultāti – aprēķinātā gaisa apmaiņa šajā gadījumā ir lielāka (aptuveni  $3 \text{ h}^{-1}$ ) un ietver arī gaisa apmaiņu ar blakus esošu istabu.



Attēls 2.113. Gaisa apmaiņas mērījumi, izmantojot norobežoto zonu (sarkanā līkne) – attēls 2.112.



Attēls 2.114. Gaisa apmaiņas mērījumi bez norobežotās zonas – attēls 2.112.

Pamatojoties uz šiem mērījumu rezultātiem, var secināt, ka lielākā daļa gaisa apmaiņas vannas istabā saistīta ar gaisa apmaiņu tieši ar dzīvojamo istabu, nevis ar ārējo. Tas nerada problēmas, ja vien mitrais gaiss no vannas istabas tiek izvadīts uz āru, nevis uz dzīvojamo istabu. Bet, tā kā iezīmētās gāzes koncentrācija dzīvojamā istabā (sarkanā līkne attēlā 2.114) ir (0,25-0,5 ppm), tad lielākā daļa no gaisa no vannas istabas tiek eksfiltrēts uz ārpusi un nerada mitruma problēmas pārējā mājā.

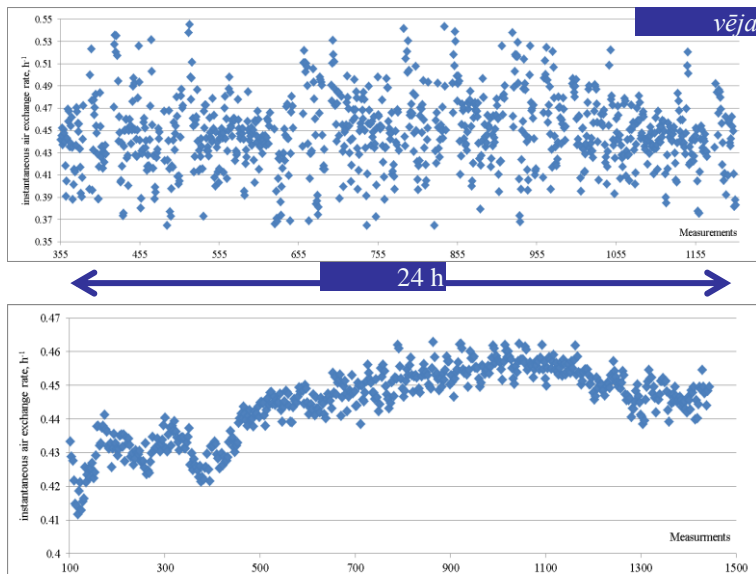
#### 2.1.4.7. Gaisa apmaiņas mērījumi pie mainīgiem laika apstākļiem

Kaut arī lielākoties gaisa apmaiņas intensitāti nosaka ēkas, tās zonas vai kādas noteiktas telpas norobežojošo konstrukciju stāvoklis un ventilācijas sistēmas darbība, būtisku iespaidu uz gaisa apmaiņu pie tās nelielas intensitātes var atstāt laika apstākļi. Tā, vēja virziens un stiprums izmaina spiedienu sadalījumu ēkas ārpusē, tādējādi ietekmējot gaisa apmaiņas intensitāti. Attēlā 2.115 ir parādīti divu dažādu mērījumu vienā telpā ar vienu nelielu ventilācijas atveri rezultāti dažādos vēja apstākļos – stipra vēja laikā iegūto rezultātu izkliede (fluktuācijas) ir lielāka, bet bezvēja apstākļos aprēķinātā gaisa apmaiņa ir praktiski nemainīga. Tajā pat laikā vidējā vērtība abos mērījumos ir iegūta ļoti tuva –  $0,45 \text{ h}^{-1}$ . Tāpēc mainīgos laika apstākļos ir ieteicams veikt ilgstošus gaisa apmaiņas mērījumus arī lietojot konstantas emisijas vai koncentrācijas metodes.

#### 2.1.4.8. Secinājumi

Ēkas blīvējuma pārbaudei un tās atbilstības noteikšanai standartiem un normatīvajiem aktiem ir iespējams izmantot standartizētos gaisa apmaiņas testus, mākslīgi nodrošinot 50 Pa spiedienu starpību pretējos virzienos, tādējādi nodrošinot vienādus testa apstākļus dažādām ēkām. Bet tas neraksturo reālo gaisa apmaiņu dabiskos apstākļos, kas ir svarīgs parametrs, lai novērtētu konvektīvos siltuma zudumus. Iezīmētās gāzes mērmetode ļauj precīzi izmērīt gaisa apmaiņu ēkas ekspluatācijas apstākļos – kā momentāno, tā arī tās dinamiku dažādos ēkas un ventilācijas sistēmu režīmos. Specializētu sistēmas konfigurāciju lietošana ļauj arī korekti noteikt kādas konkrētas

telpas vai zonas gaisa apmaiņas raksturlielumus, kas var būt noteicošais faktors, lai pētītu ēkas un/vai tās ventilācijas sistēmu darbību un efektivitāti, bet gaisa „vecuma” noteikšana ir būtisks parametrs telpas gaisa kvalitātes pētījumos.



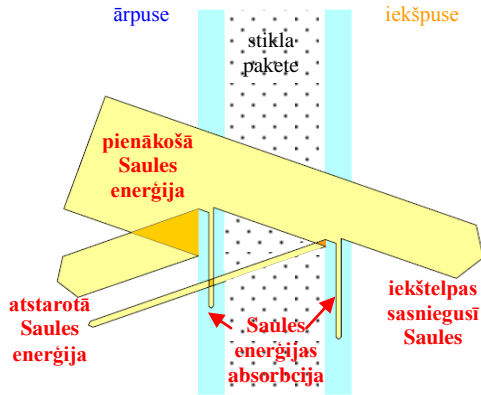
Attēls 2.115. Momentānai gaisa apmaiņai vējinātā laikā fluktuācijas ir lielākas (augšā), bet bezvēja apstākļos tās vērtības mainās ievērojami mazāk.

### 2.1.5. Saules enerģijas caurlaidība

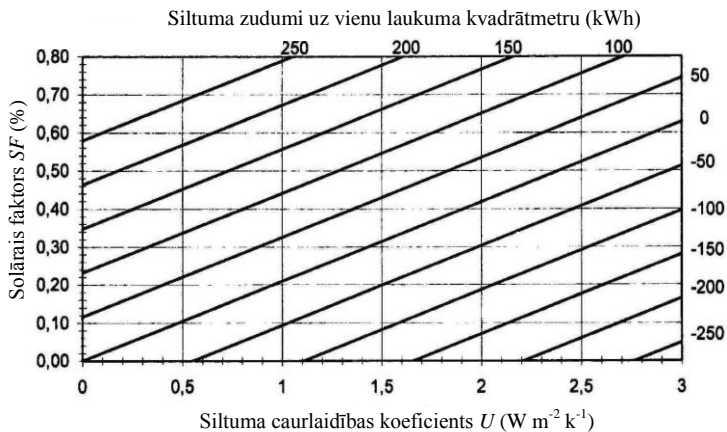
Kā norādīts iepriekš, arī logu un citu caurspīdīgo objektu siltuma caurlaidību raksturo ar koeficientu  $U$ , kurā tiek iekļauta arī starojuma pārnese. Bet tikai Saules starojuma enerģijas caurlaidību viļņu garumu diapazonā no 300...2500 nm raksturo arī ar t.s. solāro faktoru  $g$  (-), jeb solāro caurlaidību  $SF$  (%). To nosaka tiešais Saules starojums, kas caur būvkonstrukciju nonāk telpas iekšienē, gan arī siltuma pārnese uz telpu starojuma un konvekcijas ceļā no caurspīdīgajā ārējās elementā absorbētās Saules starojuma enerģijas. Jo mazāka solārā faktora vērtība, jo mazāka enerģijas daļa nonāk telpas iekšpusē: maksimālā iespējamā šī faktora vērtība  $SF=100\%$ . Raksturīga šī parametra vērtība divstiklu paketei ar gaisa pildījumu ir 80%, bet paketei ar argona pildījumu un zemas emisijas stikla virsmas pārklājumu – 65%. Vizuāli Saules enerģijas ceļš caur divstiklu paketi parādīts attēlā 2.116.

Lielākai daļai no mūsdienu stiklotām konstrukcijām ir ievērojami (atsevišķos gadījumos līdz 50%) samazināts solārās enerģijas daudzums, kas nonāk telpā. Ja vasaras periodā samazināta  $SF$  vērtība nodrošina attiecīgu kondicionēšanas jaudu samazinājumu un labākus termiskā komforta apstākļus telpās, tad ziemas periodā tas attiecīgi samazina solārās enerģijas izmantošanas efektivitāti un var palielināt apkurei nepieciešamo siltuma daudzumu. Lai to kompensētu, ir nepieciešams samazināt izmantotā stiklojuma siltuma caurlaidību  $U$ , kuru savukārt būtiski nosaka starojums garo infrasarkanā viļņu diapazonā no 3...50  $\mu\text{m}$ . Optimizējot stikloto virsmu koeficientu  $SF$  un  $U$  vērtības, ir iespējams izveidot siltuma zudumu atkarības grafiku no šiem parametriem, ko

analizējot var izvēlēties finansiāli un fizikāli piemērotāko variantu. Piemērs šāda veida atkarībai parādīts attēlā 2.117 (Nielsen *et.al.*, 2000), tas ir izveidots vertikāli novietotam stiklojumam ēkas dienvidu fasādē un parāda siltuma enerģijas zudumus caur to apkures sezonas laikā.



Attēls 2.116. Atstarotā, absorbētā un pārnestā Saules starojuma enerģija divstiklu paketes gadījumā.



Attēls 2.117. Siltuma enerģijas zudumu caur vertikālu dienvidu fasādes stiklojumu apkures sezonas laikā (Nielsen *et.al.*, 2000).

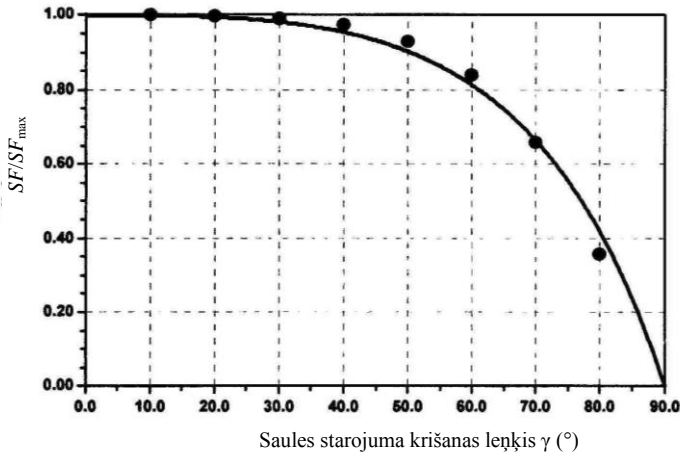
Ir publicēti daudzi ēku ar lielu stikloto konstrukciju laukumu apkures un it sevišķi kondicionēšanas problēmām veiktī eksperimentālie darbi, kur analizējot būvkonstrukciju fizikālo un klimatisko parametru ietekmi un kopējo siltuma bilanci un telpu komforta apstākļiem. Piem., publikācijā (Li *et.al.*, 2004) tiek detalizēti analizēti Honkongas augstceltnes biroja telpu enerģijas patēriņš, jo tieši kondicionēšanas ierīces un apgaismojums ir lielākie elektroenerģijas patērētāji vasaras periodā. Tika eksperimentāli konstatēts, ka speciālu plēvju lietojumi stiklotām konstrukcijām ļāva samazināt dzesēšanas sistēmas jaudu un apgaismojuma enerģijas patēriņu līdz pat 15 kWh uz vienu biroja kvadrātmetru mēnesī. Jāatzīmē, ka palielinātu apgaismojumam nepieciešamās elektroenerģijas daudzumu noteica fakts, ka maksimālā Saules starojuma periodos

(Saules krišanas leņķis perpendikulārs loga virsmai) žalūzijas telpās bija aizvērtas, kas prasīja papildus apgaismojumu diennakts gaišajā laikā.

Palielinoties Saules krišanas leņķim  $\gamma$ , samazinās arī solārās enerģijas daudzums, kas nokļūst telpā, faktiskās  $SF$  vērtības attiecību pret maksimālo  $SF_{\max}$  perpendikulārā starojuma gadījumā var aprakstīt ar sakarību (Nielsen *et.al.*, 2000)

$$\frac{SF}{SF_{\max}} = \left(1 - \tan^3\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right), \quad (2.83)$$

kas grafiski kopā ar eksperimentāliem datiem parādīta attēlā 2.118.



Attēls 2.118. Analītiskā Saules enerģijas caurlaidības faktora atkarība no Saules starojuma krišanas leņķa un eksperimentālie mērījumu dati (Nielsen *et.al.*, 2000).

Arī Latvijas klimatiskajos apstākļos Saules starojums ēkās ar lielu stikloto fasāžu laukumu var radīt problēmas. Vienā no šāda tipa daudzstāvu ēkām, kuras praktiski visas norobežojošās konstrukcijas ir veidotas no stikla, 2006. gadā tika veikti vairāki eksperimentālie pētījumi, kurus apskatīsim detalizēti.

Lai kompensētu Saules starojuma caur ēkas stiklotajām ārējās konstrukcijām termisko jaudu saulainā laikā, kas būtiski paaugstina temperatūru telpās, ir nepieciešamas ļoti lielas kondicionēšanas sistēmu maksimālās jaudas. Bet, ievērojot ēkas ārējo stikloto konstrukciju mazo termisko inerci, kondicionēšanas režīmus var būt nepieciešams strauji mainīt, ko var izsaukt dažādi faktori, piem., nepastāvīga mākoņainība. Eksistējošo iekšējo žalūziju lietojums nedod efektīvu ieguldījumu problēmas risinājumā, jo lielākā siltuma daudzuma daļa joprojām tiek absorbēta telpas iekšpusē un žalūzijas darbojas kā sekundārais siltuma avots (sildķermenis). Ārējo žalūziju, kas varētu būt efektīvs problēmas risinājums, uzstādīšana ļoti būtiski izmainītu ēkas vizuālo tēlu un būtu arī ļoti dārgs pasākums, tāpēc vienīgais veids problēmas atrisināšanai ir izvērtēt speciālu starojumu reflektējošu plēvju lietojumu iespējas.

Eksperimentāliem pētījumiem un salīdzinošai analīzei tika izvēlētas vairāku ražotāju un tipu no iekšpuses līmējamās plēves, jo ārējo plēvju izmantošanu arī ierobežo vairāki faktori

(sarežģīta uzklāšana esošā ēkā, augstākas izmaksas, mazāka ilgtspēja). Lai raksturotu kādas plēves lomu solārās caurlaidības  $SF$  samazināšanā, kombinējot to ar stikla paketi, tiek lietots solārā starojuma redukcijas koeficients  $RC$ :

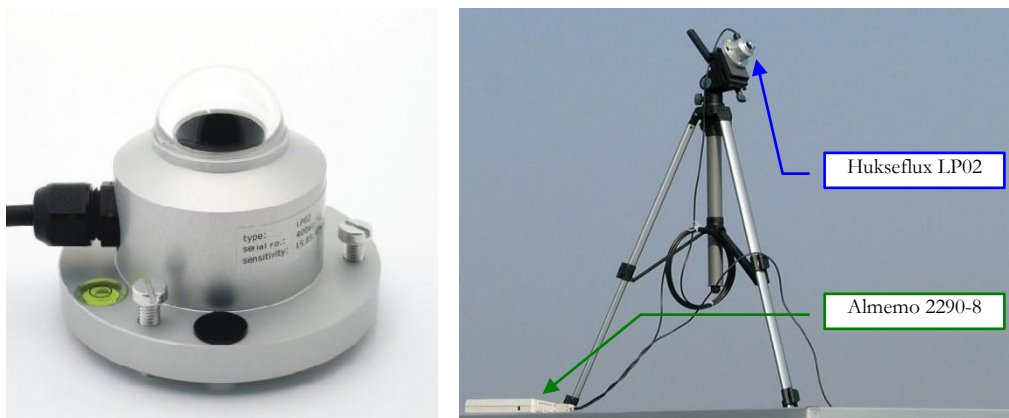
$$RC = \frac{(SF_{\text{pakete}} - SF_{\text{pakete+plēve}})}{SF_{\text{pakete}}}, \quad (2.84)$$

kur  $SF_{\text{pakete}}$  un  $SF_{\text{pakete+plēve}}$  ir solārie faktori stikla paketei bez un ar plēvi. Dati par eksperimentāli pētāmām plēvēm, to izvietojumu pētījumiem kādā augstceltnē un atbilstošo ražotāja sniegto informāciju par to redukcijas faktoru ir apkopotas tabulā 2.15.

Tabula 2.15. Dažu speciālo plēvju solārā starojuma redukcijas faktoru vērtības.

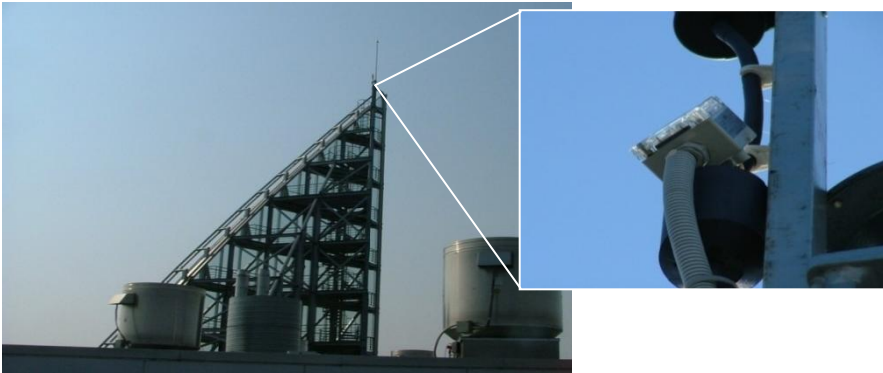
Plēves apzīmējums	Stāvs, kurā plēve uzlīmēta	Solārā starojuma redukcijas faktors $RC$ % ar 3 mm stiklu (ražotāja informācija)
R SILVER 50 (M 50)	12.	37
SS 35	15.	58
SUDRABS 35 (RLW150S35)	17.	65
SS 20	3.	74
RE 20 SIARL	21.	77

Lai nodrošinātu vienādus mērījumu apstākļus, visas apskatītās plēves tika uzlīmētas telpās ar līdzīgu telpisko orientāciju, bet dažādos ēkas stāvos. Saules starojuma intensitātes mērījumi ārā un aiz stiklotajām konstrukcijām tika veikti ar kalibrētu solārās radiācijas sensoru *Hukseflux LP02*, kura jutīgums ir praktiski nemainīgs viļņu garumu diapazonā 300 – 2000 nm, bet reģistrējams siltuma plūsmas blīvums ir līdz  $2000 \text{ W m}^{-2}$  (*Hukseflux Thermal Sensors, 2012*). Sensora signāla apstrādei un reģistrēto datu uzkrāšanai tiek izmantota iepriekš aprakstītā autonomā *Almemo 2290-8* ierīce (*Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, 2003*). *Hukseflux LP02* sensora kopskats un tas kopā ar datu uzkrāšanas ierīci darba stāvoklī uzstādīts uz statīva parādīts attēlā 2.119.



Attēls 2.119. Saules siltuma plūsmas blīvuma sensora Hukseflux LP02 kopskats (pa kreisi) un tā instalācija eksperimentālos mērījumos kopā ar Almemo 2290-8 datu uzkrāšanas ierīci (pa labi).

Mērījumu kontrolei, ārā iegūtie Saules starojuma intensitātes dati tika salīdzināti ar rādījumiem no cita uz ēkas jumta stacionāri uzstādītā sensora *Siemens QLS60*, kas kalpo ēkas kondicionēšanas sistēmas darbības kontrolei (attēls 2.120). Vairākkārtējos mērījumos tika konstatēts, ka abu sensoru rādījumu atšķirības nepārsniedz 10%, kas ļāva stacionārā sensora rādījumus izmantot turpmākos aprēķinos, eksperimentāli mērot saules starojuma intensitāti iekštelpās un sinhronizējot abu mērierīču laikus. Tā kā ārējā sensora orientācija telpā bija fiksēta, tad, veicot mērījumus telpās, pārvietojamais mērsensors *Hukseflux LP02* tika orientēts telpā tāpat kā ārā sensors (attēls 2.121). Lai nodrošinātu maksimālo iespējamo mērījumu precizitāti, tie tika veikti saulainā laikā bez mākoņiem, kad Saules starojuma intensitāte ir maksimāla un sasniedz  $800\text{...}900\text{ W m}^{-2}$ . Katra mērījumu sērija ilga no 15 līdz 25 minūtēm, ierakstot momentānos mērījumu datus autonomā uzkrāšanas iekārtā. Vienas dienas laikā tika veikta viena mērījumu sērija dažādās telpās ar un bez plēvēm, šādi eksperimenti tika atkārtoti vairākkārt ar vairāku dienu intervālu, mainot pētāmo objektu secību.

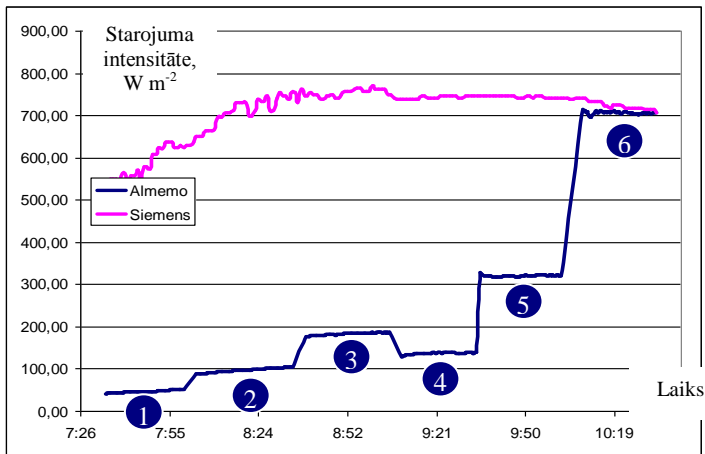


Attēls 2.120. Stacionāri uzstādīts Saules starojuma intensitātes mērsensors *Siemens QLS60*.

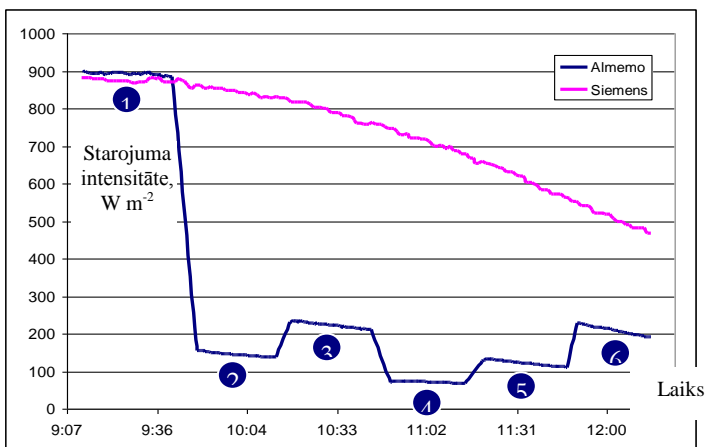


Attēls 2.121. Mērsistēma ar sensoru *Hukseflux LP02* un datu uzkrāšanas ierīci *Almemo 2290-8* mērījumu laikā.

Iegūtās tipiskās Saules starojuma intensitātes mērījumu datu sērijas parādītas attēlos 2.122 – 2.124, ārā izmērītā intensitāte ir apzīmēta ar violetas krāsas līkni (Siemens), bet iekštelpās noteiktā – ar zilās krāsas līkni (Almemo). Ir redzams, ka starojuma krišanas leņķis, kas eksperimenta veikšanas laikā mainās, ļoti būtiski ietekmē reģistrētā signāla vērtību, pie fiksētas sensora orientācijas reģistrētā starojuma intensitāte plkst. 9:00 no rīta ir  $900 \text{ W m}^{-2}$ , bet pusdienlaikā, plkst. 12:30, tā ir tikai  $450 \text{ W m}^{-2}$  (attēls 2.123), t.i., 2 reizes mazāka. Saules starojuma intensitātes maksimums ir novērots laika periodā no plkst. 8 līdz 10, tieši šajā laikā arī ir veikti visi eksperimenti.



Attēls 2.122. Starojuma intensitātes ārā (līkne Siemens) un intensitātes, kas izmērītas dažādās telpās aiz stiklotajām ārsienām 3. stāvā (1), 17. stāvā (2), 12. stāvā (3), 15. stāvā ar (4) un bez (5) plēves un uz ēkas jumta (6) ar pārvietojamo Hukseflux sensoru (līkne Almemo).

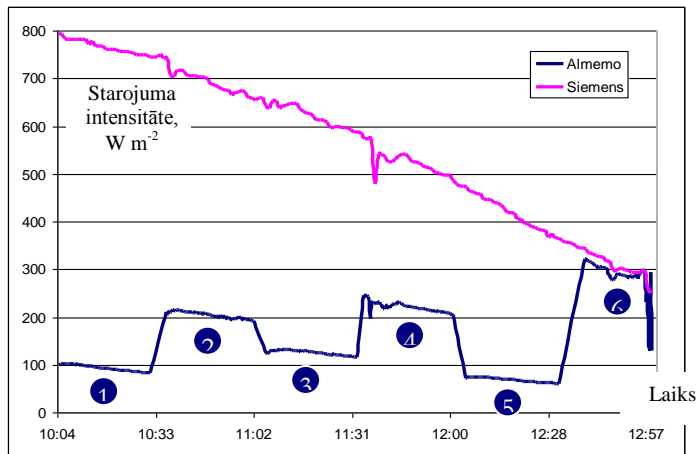


Attēls 2.123. Starojuma intensitātes ārā (līkne Siemens) un intensitātes, kas izmērītas uz ēkas jumta (1) un dažādās telpās aiz stiklotajām ārsienām 17. stāvā (2), 12. stāvā (3), 3. stāvā (4), 15. stāvā ar (5) un bez (6) plēves ar pārvietojamo Hukseflux sensoru (līkne Almemo).

Ja sensori visu laiku būtu orientēti pret Sauli (tie mainītu savu orientāciju tā, lai atrastos perpendikulāri krītošiem stariem), tad šīs izmaiņas dienas gaitā saulainā laikā būtu daudz mazākas. Tas parāda arī uz ēkas stacionāri instalētā, pret austrumiem vērstā sensora sniegtās informācijas trūkumus –faktiski to nevar efektīvi izmantot kondicionēšanas jaudu regulēšanai ēkā dažādās dienas stundās. Attēlā 2.124 ir labi redzama arī mainīgās mākoņainības ietekme uz reģistrētā Saules starojuma intensitāti (ap plkst. 11:40 un pēc 12:55).

Solārais faktors  $SF$  stikla paketēm ar dažādām plēvēm un bez tām tika noteikts, izmantojot divas sekojošas aprēķinu pieejas, kuru iegūtie rezultāti sakrita 5% kļūdas robežās:

- starojuma plūsmas blīvums, ko iegūst vidējojojot *Hukseflux* pārvietojamā sensora mērījumu rezultātus aiz attiecīgās paketes un plēves, tiek dalīts ar atbilstoši orientētā stacionārā sensora *Siemens* vidējotajiem plūsmas blīvuma datiem attiecīgajā laika intervālā;
- starojuma plūsmas blīvums, ko iegūst vidējojojot *Hukseflux* pārvietojamā sensora mērījumu rezultātus aiz attiecīgās paketes un plēves, tiek dalīts ar tā paša sensora mērījumu datiem, kas attiecīgajam laika intervālam iegūti, veicot dažādos laika intervālos vairākkārtīgi veikto mērījumu ārpus ēkas datu interpolāciju.



Attēls 2.124. Starojuma intensitātes ārā (līkne Siemens) un intensitātes, kas izmērītas dažādās telpās aiz stiklotajām ārsienām 3. stāvā (1), 12. stāvā (2), 15. stāvā ar (3) un bez (4) plēves, 17. stāvā (5) un uz ēkas jumta (6) ar pārvietojamo *Hukseflux* sensoru (līkne Almemo).

Visas eksperimentāli testētās plēves bija uzlīmētas uz viena veida stikla paketēm, kuru solārā starojuma caurlaidība  $SF=43\%$  arī tika noteikta šajos eksperimentos. Šī caurlaidības vērtība ir nedaudz mazāka nekā ražotāja specificētā ( $SF=50\dots52\%$ ). Atšķirības galvenais iemesls ir saistīts ar stiklojuma ārējās virsmas tīrību, jo tā būtiski ietekmē gan redzamās gaismas, gan arī kopējā solārā starojuma caurlaidību. Šo faktu apstiprina solārā faktora mērījums stikla paketēm nevis iekštelpās, bet uz ēkas jumta (attēls 2.125), kuras bija ļoti netīras – šeit tika noteikta vēl būtiski mazāka  $SF$  vērtība - tikai 25%.



Attēls 2.125. Starojuma intensitātes mērījumi netīrām stikla paketēm uz ēkas jumta.

Ēkā veikto stikla pakešu ar dažādām plēvēm solārā faktora  $SF$  mērījumu rezultātu kopsavilkums atspoguļots tabulā 2.15. Kā redzams, lietojot efektīvākās no plēvēm (*RE 20SIARL* un *SS 20*) telpā nonāk mazāk par 10% no Saules siltuma enerģijas, jeb aptuveni 5 reizes mazāk enerģijas nekā caur stikla paketi bez plēves: ja tipiska enerģijas plūsma saulainā laikā ārā bija  $800 \dots 900 \text{ W m}^{-2}$ , tad telpā, lietojot šīs plēves, nonāk mazāk nekā  $90 \text{ W m}^{-2}$  enerģijas. Savukārt, lietojot vismazāk efektīvo no plēvēm *M 50*, telpā nonāk siltuma plūsma ar blīvumu līdz  $250 \text{ W m}^{-2}$ , t.i., gandrīz 3 reizes vairāk. Koeficienta  $RC$  aprēķinos pēc sakarības (2.84) stikla paketes bez plēves solārā starojuma caurlaidības ir pieņemta ar eksperimentos noteikto 43%.

Tabula 2.15. Stikla pakešu ar speciālām plēvēm un pašu plēvju  $SF$  un  $RC$  koeficientu eksperimentālo mērījumu ekspluatācijas apstākļos rezultātu kopsavilkums.

Plēves apzīmējums (tips)	Stikla paketes ar plēvi solārā starojuma caurlaidība $SF$ (%)	Plēves solārā starojuma redukcijas koeficients $RC$ (%)	
		mērījums	ražotāja informācija
SS 20	9	79	74
SS 35	20	53	58
RLW150S35 (Sudrabs 35)	17	60	65
M 50 (R silver 50)	27	37	74
RE20SIARL	9	79	77
Pakete bez plēves	43	-	-

Veiktie dažādu speciālo plēvju solārās enerģijas caurlaidības eksperimentālie pētījumi parāda, ka vismazākā solārā starojuma caurlaidība (solārais faktors  $SF$ ) no salīdzināšanai izvēlētajām plēvēm ir *RE 20 SIARL* un *SS 20*, kas kombinācijā ar ēkā esošajām stikla paketēm sākotnējo starojuma plūsmas blīvumu samazina vairāk nekā 10 reizes. Savukārt, plēvju ar lielu solārā starojuma caurlaidību izmantošana nav lietderīga, jo mazāk aizsargā telpu pret Saules starojumu (telpā nonāk vairāk nekā  $\frac{1}{4}$  daļa no pienākošās siltuma plūsmas), bet to instalēšanas izmaksas būtiski neatšķiras. Salīdzinot iegūtos rezultātus ar ražotāju vai piegādātāju sniegto

specifikāciju, dati pārsvarā saskaņojas ar eksperimentāli noteiktajām  $SF$  vērtībām, tomēr dažām plēvēm tika konstatētas arī nelielas novirzes.

Kaut arī plēvju ietekme uz stikla pakešu rezultējošo siltuma caurlaidību  $U$  ir neliela, tomēr plēves būtiski samazina telpas iekšienē nonākošo Saules starojuma plūsmu un tādējādi ēkai pievadīto siltuma daudzumu, t.i. vasaras periodā samazina kondicionēšanai nepieciešamās jaudas, bet apkures sezonas laikā palielina apkurei nepieciešamo siltuma daudzumu.

## 2.2. Secinājumi

Atbilstoši ēku energoefektivitātes analīzes koncepcijai, vispirms ir jāveic ēkas esošā stāvokļa novērtēšanu. Sākotnējais vizuālais siltumtehnikā stāvokļa kvalitatīvais novērtējums atsedz būtiskus ar „neapbruņotu” aci pamanāmus defektus, kas pamatā ir raksturīgi vecajām dzīvojamām mājām –būvelementu nepietiekams blīvējums, mitruma uzkrāšanās vietas vai mehāniskie defekti būvkonstrukcijās. Šāds norobežojošo konstrukciju apsekojums gan no ārpusē, gan no iekšpuses dod vispārīgu priekšstatu par būves kopumā un tās atsevišķu būvkonstrukciju siltumtehniko stāvokli. Pēc tāda veida vizuāliem apsekojumiem var ieteikt uzlabojumus, kas ievērojami samazina ēkas siltuma patēriņu bez būtisku remontdarbu veikšanas un turpmākiem mērījumiem – piem., vienstikla logu nomaina pret dubultstikliem, logu un durvju rāmjos noblīvēšana un apkures cauruļu izolācija pagrabos utml.

Nākošā pētījumu daļa ir kvalitatīvie ēkas norobežojošo konstrukciju virsmas temperatūras mērījumi jeb termogrāfiskā diagnostika. Šādu apsekojumu rezultātā tiek atklātas īpaši pazeminātās vai paaugstinātās virsmas temperatūras zonas un ar tām saistītie defekti ēkās, ko nav iespējams atklāt vizuālās apskates gaitā. Vecajām ēkām raksturīgi ir logi ar mazu siltuma pretestību un ar to saistītiem lieliem siltuma zudumiem. Bet vēl lielākus siltuma zudumus ēkās ar veciem logiem nosaka gaisa cirkulācija caur neblīvām vietām to rāmjos, ko parāda arī daudzās uzņemtās termogrammas. Lietojot šo metodi, tiek atklāti arī palielināti siltuma zudumi caur būvelementu zonām ar paaugstinātu siltuma caurlaidību, kas ir saistīti ar siltuma tiltiem (piem., materiālu ar krasi atšķirīgām siltuma izolējošām īpašībām – metāla karkass un akmens vates pildījums vai caurejošie metāla savienojumi). Ēkām pēc to renovācijas un jaunuzceltām būvēm ar termogrāfiskās metodes palīdzību visbiežāk atklātie defekti ir saistīti ar nekvalitatīvi veiktiem siltināšanas darbiem vai nepietiekami noblīvētām konstrukciju salaidumu vietām, kas nosaka aukstā gaisa ieplūdi iekštelpās pa dažādiem ceļiem norobežojošās konstrukcijās. To lokalizēt palīdz arī papildus spiedienu starpības radīšana starp telpām un āra gaisu un dūmu iekārtu izmantošana. Bieži vien mākslīgi paaugstināts vai pazemināts iekšgaisa spiediens termogrāfiskās apskates laikā palīdz atklāt pie nelielas (dabīgas) spiedienu starpības nepamanāmus defektus.

Ēku būvelementu un konstrukciju siltumfizikālo īpašību noteikšanai savukārt tiek veikti kvantitatīvie mērījumi. Karstās plates iekārta ļauj ātri veikt dažādu būvniecībā izmantojamo homogēno vai sīkas struktūras materiālu paraugu ar noteiktu izmēru siltuma vadītspējas standartizētus mērījumus ar augstu precizitāti, kā arī noteikt materiālu siltuma ietilpību. Nehomogēnu un lielu izmēru objektu siltuma caurlaidības koeficienta noteikšanai savukārt tiek izmantota termiskā kamera. Ja standartizētos eksperimentos iegūtās logu siltuma caurlaidības vērtības parasti atbilst LBN 002-01 vēl spēkā esošajām vajajām prasībām, tad to nevar teikt par

esošo ēku ārsienām, bēniņu un jumtu pārsegumiem, kas tika eksperimentāli pētīti reālos ekspluatācijas apstākļos. Mērījumi minētajām būvkonstrukcijām tiek veikti, izmantojot pārvietojamas mērsistēmas un iegūto nestacionāro datu īpašu matemātiskās apstrādes algoritmu. Lielākajā daļā pagājušajā pagājušajā gadsimtā celto ēku norobežojošo konstrukciju  $U$  vērtības pārsniedza normatīvās prasības vairākkārtīgi, kas nozīmē būtiski paaugstinātu ēkai nepieciešamā apkures siltuma daudzumu. To samazināšanai ir nepieciešama papildus izolācija un atsevišķos gadījumos būvelementu nomaiņa.

Cita veida siltuma zudumus nosaka gaisa plūsmas caur ēku ārējo čaulu. Šāda tipa zudumus raksturojoša gaisa apmaiņas koeficienta standartizēti mērījumi ar speciālu *BlowerDoor* iekārtu ļauj novērtēt gan atbilstību BN 002-01, gan arī ar gaisa apmaiņu saistītos siltuma zudumus. Praktiski visām padomju laikā celtām ēkām, ievērojot neblīvās vietas norobežojošās konstrukcijās (pārsvarā logu un durvju rāmjos), gaisa apmaiņas intensitāte ir vairākkārt lielāka par maksimāli pieļaujamo. Tas ne tikai palielina apkures siltuma daudzumu, bet arī pasliktina komforta apstākļus telpās, samazinoties temperatūrai un palielinoties nekontrolējamai gaisa kustības intensitātei. Savukārt, renovētām ēkām un jaunbūvēm bieži ir konstatēta nepietiekama gaisa apmaiņa, „pateicoties” hermētiskajiem pakešu logiem, kas reducē siltuma zudumus, bet būtiski samazina cilvēkam nepieciešamā skābekļa piegādi un var negatīvi ietekmēt gaisa mitrumu telpās. Savukārt, lai novērtētu faktisko gaisa apmaiņas intensitāti, neaizstājama ir iezīmētās gāzes metode.

Siltuma starojuma enerģijas pārnesei Latvijas klimatiskajos apstākļos ir mazāk svarīga loma ēku kopējā siltuma bilancē, tomēr gadījumā, ja būves ārējā čaula ietver ievērojamus caurspīdīgo elementu laukumus, tā kļūst svarīga. Mērījumos konstatēts, ka starojuma siltuma enerģijas izraisītās iekštelpu temperatūras palielināšanos efektīvi var samazināt, lietojot speciālus selektīvos pārklājumus vai plēves, kas būtiski reducē Saules enerģijas ieplūdi. Vasaras periodā tas ļauj būtiski samazināt kondicionēšanai nepieciešamo enerģijas patēriņu, bet ziemā efektam var būt arī negatīvs rezultāts – lai kompensētu atstaroto solāro starojumu, ir jāpaaugstina apkures sistēmas jauda. Tomēr tā kā solārā starojuma daļa ēkas siltuma bilancē parasti ir mazāka par 15 - 20%, tad samazinātas starojuma caurlaidības dēļ kompensējamā enerģijas daļa parasti ir relatīvi maza.

### 3. Materiālu un būvkonstrukciju raksturlielumi

#### 3.1. Materiālu siltuma vadītspēja

LU VTPMML, izmantojot karstās plāksnes metodi (skat. iepriekšējo nodaļu), standartizētos apstākļos testēta ļoti daudzu materiālu, kuri var tikt izmantoti būvkonstruktīvajos risinājumos, siltuma vadītspēja. Galvenokārt tie ir dažādi siltuma izolācijas materiāli, kuri pašreiz nav plaši pārstāvēti tirgū - mērījumu rezultāti atspoguļoti sekojošajā tabulā 3.1.

Tabula 3.1. Noteiktās materiālu siltuma vadītspējas vērtības.

Nr.	Parauga apraksts	Vidējā temperatūra (°C)	Vidējā temperatūru starpība (°C)	Parauga biezums (mm)	Siltuma vadītspēja $\lambda$ (W/m·K)
A	B	C	D	E	F
1.	Putu poliuretāns	-			
	NEOPUR-116	16,4	17,2	-	0,0248
	NEOPUR-133	15,8	18,9	-	0,0274
	NEOPUR-138	16,5	17,1	-	0,0235
	NEOPUR-254	16,0	18,1	-	0,0354
2.	Elastīgs zilpelēks šķiedrveida materiāls ruļļos ar baltu pulverveida nanopildījumu	17,7	24,5	9,0	0,0145
3.	Poraina (ar gaisa mikro ieslēgumiem) keramiskā materiāla plāksne	17,0	19,0	22,0	0,19
4.	Putuplasta paraugs Nr. 83a	10,4	9,2	30,2	0,0321
		20,1	9,4	30,2	0,0331
		29,9	9,5	30,2	0,0344
5.	Putuplasta paraugs Nr. 77a	15,3	9,4	39,6	0,0327
		20,2	9,5	39,6	0,0332
		25,0	9,5	39,6	0,0338
		30,0	9,6	39,6	0,0344
6.	Vakuumpanelis ar metāliskas folijas pārklājumu Nr.1	10,36	9,36	19,4	0,0053
		15,23	9,49	19,4	0,0053
		20,15	9,59	19,4	0,0053
		25,19	9,62	19,4	0,0054
7.	Vakuumpanelis ar metāliskas folijas pārklājumu Nr.2	10,5	9,3	19,4	0,0065
		15,3	9,5	19,4	0,0065
		20,3	9,5	19,4	0,0067
		25,1	9,6	19,4	0,0068
		30,0	9,8	19,4	0,0067

A	B	C	D	E	F
8.	Putu polistirols	10,5	8,9	18,9	0,0314
		20,1	9,1	18,9	0,0323
		29,9	9,3	18,9	0,0331
9.	Putu poliuretāna paraugs Nr. 186	10,4	9,2	38,8	0,0284
		15,2	9,3	38,8	0,0289
		20,1	9,4	38,8	0,0294
		25,0	9,5	38,8	0,0299
		29,9	9,6	38,8	0,0304
10.	Putu poliuretāna paraugs Nr. 189	10,5	9,0	24,7	0,0320
		15,3	9,1	24,7	0,0324
		20,1	9,2	24,7	0,0329
		25,0	9,3	24,7	0,0334
		30,0	9,4	24,7	0,0339

Mērījumu rezultāti parāda, ka no siltuma izolācijas viedokļa kā potenciāli perspektīvi materiāli izmantošanai to labo siltuma izolācijas īpašību dēļ ir (siltuma vadītspējas pieaugšanas secībā):

- vakuumpaneļi (Nr. 6 un 7).
- šķiedrveida materiāls ar nanodaļiņu pildījumu (Nr. 2);
- putu poliuretāns (Nr.1).

Vispusīga analīze tomēr parāda, ka šo materiālu masveidīgus lietojumus praksē vēl būtiski ierobežo vairāki faktori:

- dārdzība (Nr.2, 6 un 7);
- problēmas apstrādē un ekspluatācijā (Nr. 6. un 7.)
- specifiskas iestrādes tehnoloģijas (Nr. 1, Nr.9 un 10.).

Tā minētie putu poliuretāna izstrādājumi līdz šim nebija pieejami siltuma izolācijas plākšņu veidā. Šo problēmu atrisina, piem., SPU INSULATION piedāvātie poliuretāna paneļi, kuru deklarētā siltuma vadītspēja  $\lambda_D=0,023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

Detalizēti dažādu Koksnes Ķīmijas institūtā izgatavotu putu poliuretāna kompozīciju pētījumi (tabula 3.2) parādīja, ka šo materiālu siltuma vadītspēja

- interesējošajā diapazonā pavisam nedaudz pieaug ar temperatūru, kas no praktisko lietojumu viedokļa ir nebūtiski;
- ļoti maz mainās variējot piedevas;
- būtiski pieaug dažu nedēļu vai mēnešu laikā pēc to izgatavošanas – tā iemesls ir materiāla porās esošo gāzu difūzija un pakāpenisks gaisa daļas pieaugums tajās.

Cits būtisks aspekts ir tas, ka nevienu no šiem siltuma izolācijas materiāliem nevar uzskatīt par ekoloģisku un tie nav izgatavoti no vietējām izejvielām. Šajā kontekstā īpaša vieta ir kokskaidu vates paneļiem ar dažādu blīvumu, kuru mērījumu rezultāti apkopoti tabulā 3.3. Temperatūru starpība visos mērījumos tuvināti sastāda 10 °C, saspiešanas spēks - 200 N. Uzskatāmi redzams (attēls 3.1), ka šo paneļu siltuma vadītspēja praktiski lineāri pieaug līdz ar blīvumu un arī nedaudz pieaug līdz ar temperatūru (skat. tabulu 3.2 un attēlu 3.2). Kaut arī šo paneļu siltuma vadītspēja ir

nedaudz lielāka nekā daudziem tabulā 3.1 uzskaitītajiem materiāliem, to priekšrocība ir ekoloģiskums, ilgtspēja un iespējas izgatavot Latvijā no vietējām izejvielām.

Jānorāda arī, ka apskatītie materiāli ļoti krasi atšķiras pēc to ūdens tvaiku difūzijas īpašībām – ja putupoliuretāna, putuplasta un polistirola paraugiem tvaiku caurlaidība ir ļoti maza un vakumpaneļiem, kas iekļauti folijas apvalkā, tā praktiski ir nulle, tad šķiedrveida materiāliem, tai skaitā kokskaidu vates materiāliem, tā ir liela un var tuvioties gaisa tvaiku difūzijas vērtībai. Tas jāņem vērā, projektējot ilgtspējīgas būvkonstrukcijas no šiem materiāliem.

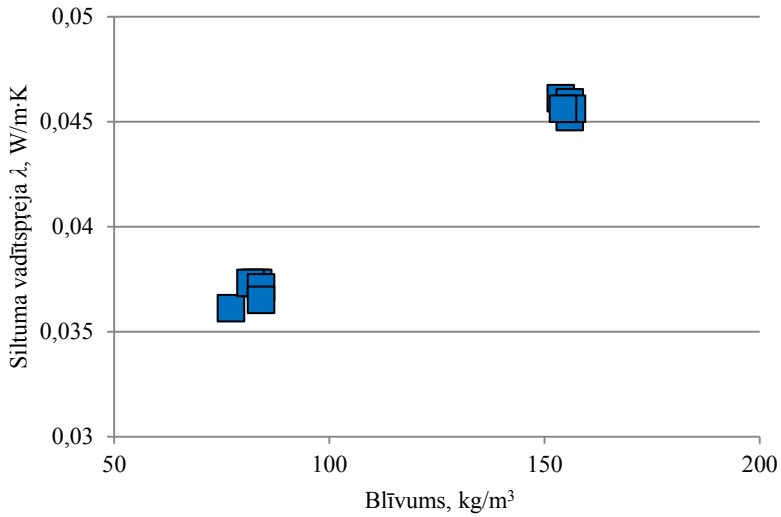
*Tabula 3.2. Putu poliuretāna materiālu ar dažādām piedevām siltuma vadītspēja.*

Parauga apzīmējums	Parauga biezums, mm	$\lambda_{t,10}$ (W/m K)	$\lambda_{t,20}$ (W/m K)	$\lambda_{t,30}$ (W/m K)	$\lambda_{10}$ (W/m K)
17.0	34,8	0,0232	0,0242	0,0260	0,0230
17.0	34,8	0,0267	0,0278	0,0290	0,0266
17.0	34,8	0,0262	0,0273	0,0285	0,0267
17.0	34,8	0,0278	0,0289	0,0303	0,0277
17.0	34,9	0,0280	0,0293	0,0305	0,0280
17.1	34,9	0,0226	0,0236	0,0246	0,0226
17.2	34,4	0,0253	0,0264	0,0275	0,0253
17.3	34,6	0,0257	0,0267	0,0278	0,0256
A383 1%	35,6	0,0274	0,0284	0,0294	0,0274
A383 2%	35,8	0,0279	0,0286	0,0296	0,0278
A383 3%	35,8	0,0281	0,0291	0,0304	0,0280
1:1	36,0	0,0269	0,0279	0,0290	0,0268
2:2	36,0	0,0275	0,0286	0,0296	0,0275
3:3	36,0	0,0279	0,0290	0,0300	0,0278

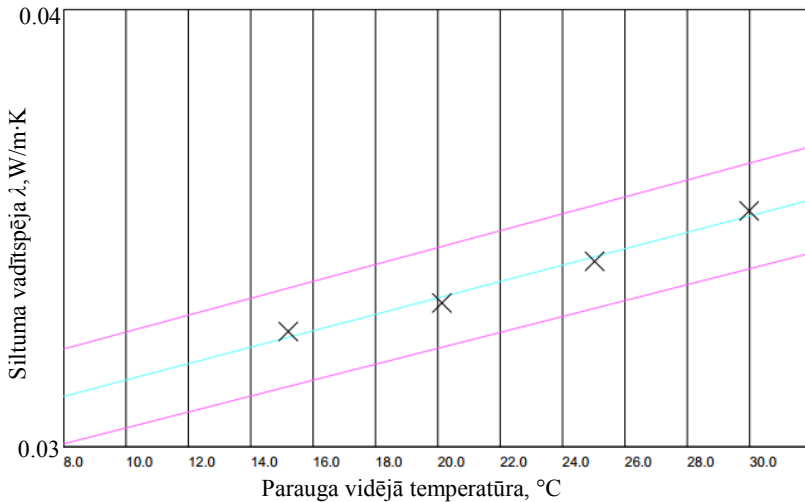
*Tabula 3.3. Kokskaidu vates paneļu ar dažādu blīvumu siltuma vadītspēja.*

Parauga apzīmējums	Biezums, mm	Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	$\lambda_{10}$ (W/m K)
# 14005/2	94	77	0,0361
# 14006/2	85	83	0,0373
# 14007/2	83	83	0,0373
# 14008/2	83	82	0,0373
# 14009/2	84	84	0,0371
# 14009/2 (atkārtots)	84	84	0,0365
# 14011/2	78	154	0,0461
# 14012/2	78	156	0,0452
# 14012/2 (atkārtots)	78	156	0,0459
# 14013/2	78	156	0,0456
# 14014/2	78	154	0,0456

Siltuma vadītspējas pieaugums līdz ar blīvuma un temperatūras pieaugumu vērojams arī minerālvatei un putu poliuretānam.



Attēls 3.1. Kokskaidu vates paneļu siltuma vadītspējas un blīvuma kopsakars.



Attēls 3.2. Kokskaidu vates paneļu siltuma vadītspējas atkarība no vidējās temperatūras.

### 3.2. Gatavu būvkonstrukciju siltuma caurlaidība

Lai noteiktu dažādu kompozītu un daudzslāņainu būvkonstrukciju siltuma caurlaidību  $U$  un novērtētu to piemērotību izmantošanai ārējās norobežojošās būvkonstrukcijās, tika veikta daudzu paraugu standartizēta testēšana termiskajā kamerā (mērījumu metodika aprakstīta iepriekšējā nodaļā), kuras rezultāti atspoguļoti sekojošajā tabulā 3.4.

Tabula 3.4. Noteiktās dažādo būvkonstrukciju siltuma caurlaidības  $U$ .

Nr.	Parauga apraksts	Parauga platums (mm)	Parauga augstums (mm)	Parauga biezums (mm)	Siltuma caurlaidība $U$ ( $W/m^2 \cdot K$ )	Piezīmes
A	B	C	D	E	F	G
1.	Frēzbaļķu panelis ar minerālvates siltinājumu, kas sastāv no frēzbaļķa iekšpusē (80 mm), minerālvates slāņa (150 mm), prettvaiku plāksnes (10 mm), ventilētas gaisa spraugas (30 mm), koka dēlīšu ārējās apdares (20 mm).	1200	1200	290	0,22	Siltinājuma slānis ārpusē
2.	Frēzbaļķu panelis ar minerālvates siltinājumu, kas sastāv no frēzbaļķa iekšpusē (120 mm), minerālvates slāņa (150 mm), prettvaiku plāksnes (10 mm), ventilētas gaisa spraugas (30 mm), koka dēlīšu ārējās apdares (20 mm).	1200	1200	330	0,21	Siltinājuma slānis ārpusē
3.	Frēzbaļķu panelis ar minerālvates siltinājumu, kas sastāv no frēzbaļķa iekšpusē (160 mm), minerālvates slāņa (150 mm), prettvaiku plāksnes (10 mm), ventilētas gaisa spraugas (30 mm), koka dēlīšu ārējās apdares (20 mm).	1200	1200	370	0,20	Siltinājuma slānis ārpusē
4.	Koka panelis ar minerālvates pildījumu (koks – 40 mm; minerālvate -100 mm; koks – 40 mm)	1200	1200	180	0,30	Bez ventilācijas šķirkārtas
5.	Ribots sendviča tipa celtniecības panelis ar siltuma izolācijas materiāla pildījumu un abpusēju tērauda skārda segumu.	1000	1000	80	0,25	Vieglā konstrukcija
6.	Norobežojošā konstrukcija (ārsienas elements) no <i>KERATERM</i> blokiem, kas sastiprināti ar javu.	1220	750	440	0,40	
7.	Ārsienas elements no trīs slāņu paneļiem „ <i>Paneltech</i> ” ar putupolistirola siltumizolāciju.	1000	1000	150	0,25	
8.	Ārsienas elements no trīs slāņu paneļiem „ <i>Paneltech</i> ” ar putupolistirola siltumizolāciju.	1000	960	50	0,66	

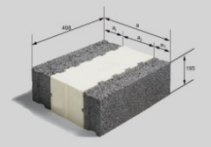

A	B	C	D	E	F	G
10.	No 7 slāņiem sastāvošs būvelements ar kopējo biezumu 79 mm: ģipškartons – 12 mm, gaisa starpslānis – 15 mm, siltumizolācijas materiāls – 5 mm, gaisa starpslānis – 15 mm, siltumizolācijas materiāls – 5 mm, gaisa starpslānis – 15 mm, ģipškartons – 12 mm.	1000	1000	79	0,60	Elements ir hermetizēts, virsma pret gaisa spraugu pārklāta ar zemas emisijas plēvi
11.	No 5 slāņiem sastāvošs būvelements ar kopējo biezumu 59 mm: ģipškartons – 12 mm, gaisa starpslānis – 15 mm, siltumizolācijas materiāls – 5 mm, gaisa starpslānis – 15 mm, ģipškartons – 12 mm.	1000	1000	59	0,90	Elements ir hermetizēts, virsma pret gaisa spraugu pārklāta ar zemas emisijas plēvi
12.	Ģipškartona plāksne ar biezumu 12,5 mm no vienas puses nokrāsota ar speciālo „siltumizolējošo” krāsu (1 mm).	990	990	12,5	3,4	Akrila krāsviela ar vakuuma mikrokapsulām
13.	5,2 cm bieza koka kompozīta plāksne „Dendrolite” ar dobumiem, kas no abām pusēm segta ar 4 mm biezu presētas papes slāni –	985	985	56	1,70	

Veiktie mērījumi parādīja, ka konstrukciju izmērītās siltuma caurlaidības kopumā labi saskaņojas ar prognozētajām un aprēķinātajām vērtībām. Redzams, ka LBN 002-01 noteikto normatīvo siltuma caurlaidības vērtību sasniegšanai konstrukcijās nepieciešams izmantot tos vai citus siltuma izolācijas materiālus. Hermetizētie paneļi ar zemas emisijas pārklājumu - alumīnija foliju vai polimeru plēvi uz virsmas, kas vērsta pret gaisa starpslāni (Nr 7, 8, un 9), ļauj sasniegt siltuma efektīvās siltuma vadītspējas vērtības, kas tuvas tradicionālo siltuma izolācijas materiālu tipiskajām vadītspējas vērtībām. Tādējādi, kvalitatīvi un tehnoloģiski pareizi tos izbūvējot, iespējams iegūt siltuma izolācijas efektu ar samazinātu konstrukcijas svaru. Standartizētie mērījumi vēlreiz apstiprināja to, ka speciālais krāsojums ar vakuumētu mikrokapsulu piedevām (Nr. 10) nevar nodrošināt vērā ņemamu papildus siltuma izolāciju. Kaut arī paša krāsojuma slāņa siltuma vadītspēja ir ļoti maza ( $\lambda < 0,01 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), tomēr arī tā biezums ir ļoti mazs un nepārsniedz dažus milimetrus, tādējādi tieši nevar aizstāt tradicionālo siltuma izolāciju. Nenoliedzami, ka šāds zemas emisijas krāsojums būtiski izmaina (samazina) starojuma siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi, kas īpaši izpaužas noteiktos apstākļos (auksta ziemas nakts ar skaidrām debesīm, tiešs saules starojums uz virsmu). Tomēr šo materiālu izplatītāji (arī Latvijā tādi ir vairāki) pārsvarā sniedz nekorektu informāciju par to izmantošanas efektivitāti ēku ārējo konstrukciju siltuma izolācijai.



### 3.3. Ārējo norobežojošo konstrukciju ar lielformāta elementiem konstruktīvo risinājumu raksturlielumi

Lai izvēlētos Latvijas klimatiskajiem apstākļiem piemērotus ārējo norobežojošo konstrukciju risinājumus, kuros tiek izmantoti lielgabarīta elementi, tika atlasīti publiskajos informācijas avotos pieejamie risinājumi un apkopoti to pamata raksturlielumi. Mērķis bija apzināt iespējas izvēlēties tādus galvenokārt no vietējām izejvielām izgatavotus elementus, kuri ir perspektīvi ilgtspējīgu un energoefektīvu risinājumu izstrādei. Sekojošajā tabulā 3.5 tādējādi atspoguļoti tipiskie šādu lielgabarīta elementu varianti, raksturojot to īpašības (tai skaitā arī siltuma vadītspēju un siltuma caurlaidību), kā arī to potenciālās priekšrocības un trūkumus praktiskajos lietojumos.



Tabula 3.5. Ārējo norobežojošo konstrukciju lielgabarīta būvelementu raksturojums.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	Fibo www.fibo.lv	Poroton-T7-42,5-P <a href="http://www.wienerberger.de">http://www.wienerberger.de</a>
A	B	C	D
Attēli			
Augstums	m	0,195	0,249
Garums	m	0,498	0,248
Biezums	m	0,42	0,425
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{t0}$	W/m·K	0,055	0,070
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,13	0,165
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	7,69	6,07
Svars	kg	16,90	15,80
Tilpums	kg/m <sup>3</sup>	414	602
Spiedes izturība	Mpa	3	5
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,02	0,16
Komentāri		Putuplastam ļoti maza tvaiku caurlaidība - tas darbojas kā tvaika barjera (ārējais bloks 9 cm, putuplasts 20 cm, iekšējais bloks 13 cm)	Bloku dobumi pildīti ar perlītu



A	B	C	D
Priekšrocības		Mitruma un sala izturīgi, ugunsizturīgi, salīdzinoši viegli. Mūrim nav nepieciešama papildu siltināšana, nodrošina lielu siltumpretestību un novērš aukstuma tiltus.	Ekoloģisks materiāls ar minerālmateriāla pildījumu, neliels svars, lieli izmēri, iespējama izmēru dažādība un to saskaņošana, vertikāla bloku savienošana, neizmantojot javu. Efektīva siltumizolācija un akumulācija - liela siltuma inerce.
Trūkumi		Putu polistirolam ir zema tvaiku caurlaidība - mājā jāveido sarežģīta vēdināšanas sistēma. Maza mehāniskā izturība.	Zema mehāniskā izturība, apgrūtināta standarta dībeļu iestiprināšana sienā.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	Poroton-T7-42,5-MW <a href="http://www.wienerberger.de">http://www.wienerberger.de</a>	Poroton - Plan-T8-42,5 <a href="http://www.wienerberger.de">http://www.wienerberger.de</a>
A	B	C	D
Attēli			
Augstums	m	0,249	0,249
Garums	m	0,248	0,248
Biezums	m	0,425	0,425
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,070	0,080
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,165	0,188
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	6,07	5,31
Svars	kg	15,90	15,70
Tilpummasa	kg/m <sup>3</sup>	606	598
Spiedes izturība	Mpa	7	5
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,16	0,16
Komentāri		Dobumi pildīti ar akmens vati.	Nav pildīts - ļoti liela dobumu daļa un plānas keramikas sienīņas.



A	B	C	D
Priekšrocības		Ekoloģisks materiāls ar minerālo pildījumu, neliels svars, lieli izmēri, iespējama izmēru dažādība un to saskaņošana, vertikāla bloku savienošana, neizmantojot javu. Efektīva siltumizolācija un akumulācija.	Neliels svars, lieli izmēri, izmēru dažādība un to saskaņošana iespējas, vertikāla bloku savienošana, neizmantojot javu. Efektīva siltumizolācija un akumulācija.
Trūkumi		Zema mehāniskā izturība, apgrūtināta standarta dībeļu iestiprināšana sienā.	Maza mehāniskā izturība, apgrūtināta standarta dībeļu iestiprināšana sienā.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	ThermoPlan® MZ10 <a href="http://www.ziegelwerk-bellenberg.de">http://www.ziegelwerk-bellenberg.de</a>	AEROC EcoTerm Plus 500 <a href="http://www.aeroc.lv">http://www.aeroc.lv</a>
A	B	C	D
Attēli			
Augstums	m	0,249	0,2
Garums	m	0,248	0,6
Biezums	m	0,425	0,5
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,100	0,085
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,235	0,70
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	4,25	5,88
Svars	kg	19,70	19,80
Tilpums	kg/m <sup>3</sup>	751	350
Spiedes izturība	Mpa	15	1,8
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,16	0,26
Komentāri		Pildīts ar akmens vati, bet ir biezas ārējās sienas, kas palielina spiedes izturību.	Monolīts, bet ļoti porains produkts.

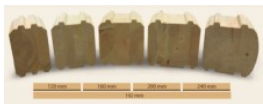

A	B	C	D
Priekšrocības		Ekoloģisks materiāls ar minerālo pildījumu, lieli izmēri, izmēru dažādība un to saskaņošanas iespējas, vertikāla bloku savienošana, neizmantojot javu. Efektīva siltumizolācija un akumulācija.	Lieli izmēri, izmēru dažādība un to saskaņošanas iespējas, efektīva siltumizolācija un akumulācija, viegli mehāniski apstrādājams materiāls.
Trūkumi		Sarežģīta mehāniskā apstrāde.	Maza mehāniskā izturība, apgrūtināta standarta dībeļu iestiprināšana sienā, liels sākotnējais un arī līdzsvara mitruma saturs.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	texoBLOCK Grand <a href="http://www.texoblock.com">http://www.texoblock.com</a>	Thermiblock - S Super 38/19 <a href="http://www.thermibloc.fr">http://www.thermibloc.fr</a>
A	B	C	D
Attēli			
Augstums	m	0,25	0,25
Garums	m	0,6	1
Biezums	m	0,4	0,38
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,104	0,068
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,260	0,180
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	3,85	5,56
Svars	kg	24,00	21,00
Tilpummasa	kg/m <sup>3</sup>	400	221
Spiedes izturība	Mpa	2,5	atkarībā no betona markas
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,26	0,02 polistirols / 0,11 fibrolīts
Komentāri		Monolīts, bet ļoti porains produkts.	Pildīts ar putu polistirolu, tukšumi tiek pildīti ar betonu (skaidu betona sienu biezums 6,4 cm + putupolistirola slānis 19,4 cm + betona tukšums 12 cm).


A	B	C	D
Priekšrocības		Lieli izmēri, iespējama izmēru dažādība un to savstarpēja saskaņošana, efektīva siltumizolācija un pietiekami liela termiskā inerce, viegli mehāniski apstrādājams materiāls.	Celtniecības ātrums, efektīva siltuma izolācija un akumulācija - liela siltuma inerce.
Trūkumi		Maza mehāniskā izturība, apgrūtināta standarta dībeļu iestiprināšana sienā, augsts sākotnējais un līdzsvara mitruma saturs.	Maza tvaiku caurlaidība, grūti veidot sarežģītas konstrukcijas.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	Celtniecības bloki <b>DURISOL - DSs</b> 37.5/12 <a href="http://www.durisolnami.lv">www.durisolnami.lv</a>	Tenapor veidņu sistēmas <a href="http://www.tenapors.com">http://www.tenapors.com</a>
A	B	C	D
Attēli			
Augstums	m	0,25	0,3
Garums	m	0,498	1,2
Biezums	m	0,375	0,45
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,073	0,072
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,194	0,160
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	5,15	6,25
Svars	kg	15,00	
Tilpummasa	kg/m <sup>3</sup>	321	0
Spiedes izturība	Mpa	Atkarībā no betona markas	Atkarībā no betona markas
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,02 polistirols / 0,11 fibrolīts	0,02

A	B	C	D
Komentāri		Karkass - 90% skujkoku skaidas, 8% minerālvielas, 2% cements. Pildīts ar putu polistirolu un tukšumi tiek piepildīti ar betonu (fibrolīta sienīņu biezums 8cm + putupolistirola slāņa biezums 17,5 cm + tukšumu biezums betonam 12cm).	Iespējams izgatavot dažāda izmēra putu polistirola veidņus, kuri objektā tiek piepildīti ar betonu (piem., ārējā putu polistirola slāņa biezums 15 cm + betona kārtā 25cm + iekšēja putu polistirola slāņa biezums 5 cm ).
Priekšrocības		Celtniecības ātrums, efektīva siltuma izolācija un akumulācija.	Elementu nelielā masa dod iespēju būvēt dzelzsbetona karkasa ēkas bez smagās tehnikas, maza darbietilpība, siltumizolācijas īpašības dod iespēju betonēšanas darbus arī negatīvā temperatūrā veikt bez betona sildīšanas, konstruktīvos elementus var izgatavot dažādas formas un garuma, līdz ar to tiek nodrošinātas plašas arhitektoniskās iespējas.
Trūkumi		Samazināta tvaiku caurlaidība, grūti veidot sarežģītas konstrukcijas.	Maza ūdens tvaiku caurlaidība, grūti veidot sarežģītas konstrukcijas, uguns nedrošs materiāls.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	Frēzbaļķi <a href="http://www.dores.lv">http://www.dores.lv</a>	Vieglās konstrukcijas (ar putu polistirolu) <a href="http://www.corners.lv">http://www.corners.lv</a>
A	B	C	D
Attēli			
Augstums	m	0,192	1,25
Garums	m	3	2,5
Biezums	m	0,24	0,227
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,090	0,040

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,375	0,176
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	2,67	5,68
Svars	kg	65,00	60,00
Tilpummasa	kg/m <sup>3</sup>	470	85
Spiedes izturība	Mpa	4,45	
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,06	0,02
Komentāri		Parasti lieto kombinācijā ar papildus siltuma izolāciju.	
Priekšrocības		Koka šūnu struktūra regulē ēku mitrumu un pozitīvi ietekmē mikroklimatu, var ātri būvēt.	Ātrums, precizitāte, efektīva siltuma pretestība, būvniecība nav ierobežota ar laika apstākļiem.
Trūkumi		Nepieciešama papildus siltināšana, lai atbilstu Latvijas Būvnormatīvam LBN 002-01, uguns nedrošs materiāls.	Uguns nedrošs materiāls, maza siltuma ietilpība, nav ūdens tvaiku caurlaidības - jāveido sarežģīta ventilācijas sistēma.

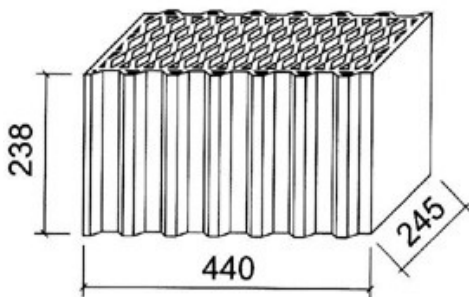
<b>Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā</b>	<b>Mērvienība</b>	<b>Vieglās konstrukcijas (ar akmens vati)</b>
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Attēli		
Augstums	m	1
Garums	m	1
Biezums	m	0,227
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,050
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,220
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	4,54
Svars	kg	
Tilpummasa	kg/m <sup>3</sup>	
Spiedes izturība	Mpa	

A	B	C
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,02
Komentāri		
Priekšrocības		Liels būvniecības ātrums un precizitāte, var sasniegt mazu siltuma caurlaidību, būvniecību neierobežo laika apstākļi.
Trūkumi		Uguns nedrošs materiāls, maza siltuma ietilpība, maza ūdens tvaiku caurlaidība, kas jāņem vērā arī veidojot ventilācijas sistēmu.

### 3.4. Eksperimentos izmantoto keramikas mūra elementu apraksts

Pētījumu rezultāti parādīja, ka keramikas mūra elementi ir būvkonstrukcijas, kuru raksturlielumus (siltuma caurlaidību, mitruma akumulāciju, spiedes izturību u.c.) ražotājam ir iespējams uzlabot bez būtiskām tehnoloģiskā procesa izmaiņām un ievērojamiem kapitālieguldījumiem ražošanas procesā un iekārtās. Tāpēc eksperimentiem tika izvēlēti šāda veida izstrādājumi, modificējot to parametrus. Dažādu konstruktīvo risinājumu salīdzinošajai energoefektivitātes izpētei Latvijas klimatā (skat. 4. nodaļu) tika izvēlēti arī 2 veidu keramikie bloki, kuru raksturojums sniegts turpinājumā.

Attēlā 3.3 parādīts rūpnieciski ražots keramikas bloks (CER) ar biezumu 44 cm, kura dobumi nav aizpildīti un, lai sasniegtu pētījuma plānoto siltuma caurlaidības vērtību  $U < 0,16$  W/m<sup>2</sup>K, tam, iemūrējot sienā, ir nepieciešams 155 mm papildus siltuma izolācijas slānis ārpusē (skat. tab. 1.1). Šāda bloka projektētie un faktiski raksturlielumi apkopoti sekojošajā tabulā 3.6.

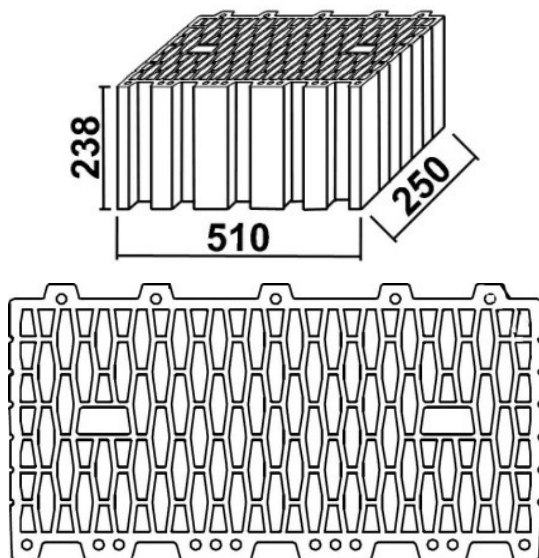


Attēls 3.3. Rūpnieciski ražots keramikas bloks (CER) ar biezumu 44 cm.

Tabula 3.6. Rūpnieciski ražotu lielgabarieta keramisko bloku (CER) raksturlielumi.

Ražotāja deklarētas īpašības (sakrīt ar faktiski izmērītajām)	Vērtība
Drumstas blīvums ( $\rho$ )	1460 kg/m <sup>3</sup>
Drumstas siltuma vadītspēja ( $\lambda$ )	0,278 W/m·K
Bloka tukšumu daļa	53 %
Bloka tilpuma masa ( $m$ )	690 kg/m <sup>3</sup>
Bloka efektīva siltuma vadītspēja ( $\lambda_{ef}$ )	0,175 W/m·K

Attēlā 3.4 savukārt parādīts eksperimentālais keramikas bloks ar biezumu 51 cm (EXP), kuru testēšanai stenda sienā iemūrēja, aizpildot dobumus tajos ar putu polistirola granulām, kas pārklātas ar grafitu starojuma emisijas samazināšanai no to virsmas. Šāds pildījums tika izvēlēts nepieciešamā siltuma caurlaidības līmeņa  $U < 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  sasniegšanai bez tradicionālā papildus siltinājuma slāņa bloku ārpusē. Šāda bloka projektētie un faktiski raksturlielumi apkopoti sekojošajā tabulā 3.7.



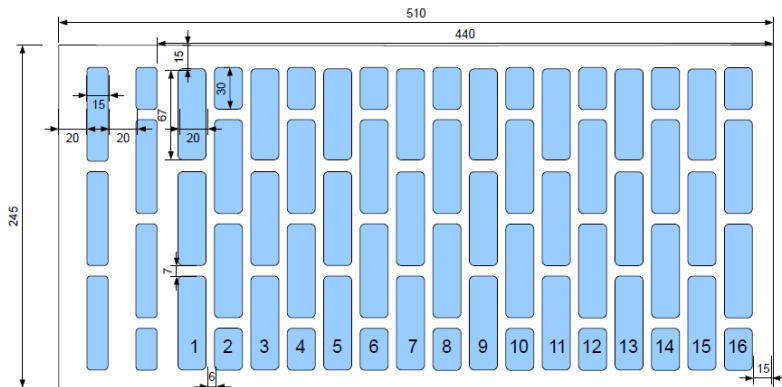
Attēls 3.4. Eksperimentālajā stendā izmantotais keramikas bloks (EXP).

Tabula 3.7. Eksperimentālā lielgabarīta keramikā bloka raksturlielumi.

Ražotāja prognozētās īpašības	Faktiski noteiktās īpašības
Drumstalas blīvums - $1460 \text{ kg/m}^3$	Drumstalas blīvums - $1460 \text{ kg/m}^3$
Drumstalas $\lambda = 0,278 \text{ W/mK}$	Drumstalas $\lambda = 0,278 \text{ W/mK}$
Bloka tukšumu daļa - 53,3%	Bloka tukšumu daļa - 46,6%
Bloka tilpuma masa - $680 \text{ kg/m}^3$	Bloka tilpuma masa - $780 \text{ kg/m}^3$
Dobumi aizpildīti ar HK35 (putupolistirola granulas) $\lambda_{ef} = 0,04 \text{ W/mK}$	Dobumi aizpildīti ar HK35 (putupolistirola granulas) $\lambda_{ef} = 0,55 \text{ W/mK}$
Bloka kopumā $\lambda_{ef} = 0,085 \text{ W/mK}$	Bloka kopumā $\lambda_{ef} = 0,135 \text{ W/mK}$
Sienas $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$	Sienas $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$

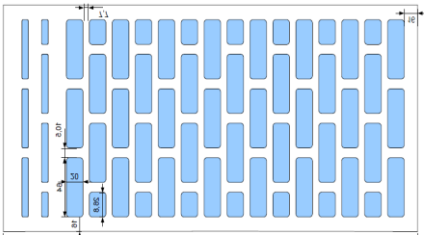
### 3.5. Optimizēti lielformāta mūra elementi

No iepriekš teiktā izriet prasības izveidojamā uzlabotā keramikā bloka konstrukcijai. Šāda bloka izmēri un dobumu izvietojuma princips ir parādīti attēlā 3.5, bet tā raksturlielumi ir apkopoti tabulā 3.8. Veiktā analīze un skaitliskās modelēšanas aprēķini parādīja, ka optimāls ir keramikā bloku ar divām atšķirīgām zonām risinājums.



Attēls 3.5. Optimizēta lielgabārta keramiskā bloka izmēri un dobumu izvietojums.

Tabula 3.8. Lielgabārta keramiskais mūra elements ar divām atšķirīgām zonām.

Produkta nosaukums/ papildus informācija internetā	Mērvienība	Keramiskais bloks ar siltuma akumulācijas slāni un siltuma izolējošo pildījumu
Attēli		
Augstums	m	0,249
Garums	m	0,245
Biezums	m	0,510
Sausā elementa ekvivalentā siltuma vadītspēja, $\lambda_{10}$	W/m·K	0,090
Siltuma caurlaidība, U	W/m <sup>2</sup> ·K	0,176
Siltumpretestība, R	m <sup>2</sup> ·K/W	5,67
Svars	kg	22,00
Tilpummasa	kg/m <sup>3</sup>	707
Spiedes izturība	Mpa	15
Ūdens tvaika caurlaidības koeficients	mg/m·Pa·h	0,16
Komentāri		
Priekšrocības		Ekoloģisks materiāls ar minerālo pildījumu, lieli izmēri, izmēru dažādība un to saskaņošanas iespējas, vertikāla bloku savienošana, neizmantojot javu, efektīva siltumizolācija un liela siltuma inerce.
Trūkumi		Sarežģīta mehāniskā apstrāde.

Projektējot optimizētu bloku tika ņemti vērā eksperimentu rezultāti, veiktas konsultācijas ar bloku ražotāju speciālistiem un tika izstrādāti risinājumi vairāku pašreiz masveidā ražoto (attēls 3.4 un 3.5) keramikas bloku nepilnību novēršanai. Kā būtiskas minamas šādas nepilnības:

- vienmērīgs sienīņu biezuma sadalījums neņem vērā siltuma enerģijas akumulācijas papildus iespējas iekštelpai tuvajā zonā, ēku ekspluatējot mainīgos temperatūras un mitruma apstākļos;
- liels relatīvi nelielu tehnoloģisko dobumu skaits, kas sadārdzina un sarežģī ražošanas procesu, bet ievērojami neuzlabo materiāla siltuma izolācijas īpašības. Aprēķini parādīja, ka daudz efektīvāk un lētāk ir rūpnieciski aizpildīt lielākus dobumus ar siltumu izolējošo materiālu – minerālvati, granulām un tml.;
- plānas ārējās un iekšējās sienīņas padara bloku relatīvi trauslu un sarežģī celtniecības darbus un sienu ekspluatāciju.

Tādēļ paredzēts, ka šāda optimizēta bloka (attēls 3.5) dobumi tiks aizpildīti ar siltuma izolējošo vielu (akmens vates pulveri, perlītu, putuplasta granulām vai līdzīgiem materiāliem). Iepildīšanu būs iespējams nodrošināt industriāli gan bloku ražošanas, gan ēkas celtniecības laikā būvlaukumā. Pateicoties bloka konstrukcijai, tas būs spējīgs nodrošināt gan izvirzītās ēkas energoefektivitātes prasības ( $U < 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), gan sekmēt optimāla mikroklimata uzturēšanu telpās, jo:

- 440 mm biezā bloka ārējā zona (attēls 3.3) ir relatīvi vieglas konstrukcijas (tukšumu saturs 55 - 60%) un nodrošina nepieciešamās siltuma izolācijas īpašības;
- 70 mm biezā iekšējā zona ir ar palielinātu keramikas saturu (dobumu daļa tikai 35%), kas nodrošinās gan siltuma enerģijas akumulācijas iespēju, gan, pateicoties keramikas poru struktūrai, arī gaisa relatīvā mitruma regulēšanu.

Blīvāks iekšējais slānis atrisina arī ēkas ekspluatācijas problēmu – slānim ar biežākām sienīņām ir augstāka mehāniskā izturība, piem., tādā sienā būs vienkāršāk iestrādāt visus nepieciešamos stiprinājumus. Iekšējā slāņa dobumos var potenciāli iestrādāt gan siltuma izolācijas materiālu, gan arī fāzu maiņas materiālu, kas, pateicoties fāzu pārejas procesiem, papildus sekmēs temperatūras stabilizāciju telpā. Bloka ārējās sienīņas (attēls 3.5) ir biežākas nekā sienīņas starp kerniem (tehnoloģiskajiem dobumiem). Tik biežas sienīņas ir vajadzīgas bloka mehāniskās stiprības (it īpaši spiedes stiprības) nodrošināšanai, bet plānākās iekšējās sienīņas starp dobumiem samazina bloka kopējo siltuma caurlaidību.

Lai samazinātu no šādiem blokiem uzmūrētas sienas kopējo siltuma caurlaidību, ko ietekmē arī šuvju biezums un mūrjavas siltuma vadītspēja, ir paredzēts, ka ražotājs bloku virsmas slīpēs, lai panāktu augstu izmēru precizitāti, kas ļaus samazināt šuvju biezumu no pašreizējiem 16 mm līdz 2-5 mm. Bez tam būvdarbos ir paredzēts izmantot mūrjavu ar pazeminātu siltuma vadītspēju. Šāda bloku izmēru precizitāte kopumā atvieglos arī celtniecības darbus un var prognozēt, ka tādējādi sekmēs to popularitāti celtniecības nozarē.

Tādējādi rekomendējamie šāda bloka parametri ir sekojoši:

- izmēri - 245x510x248 mm;
- keramikas blīvums -  $1460 \text{ kg/m}^3$ ,
- svars 21,6 kg,

- tilpummasa 707 kg/m<sup>3</sup>.

Optimizēto bloku priekšrocības kopumā ir:

- ekoloģisks materiāls ar minerāla materiāla pildījumu;
- lieli izmēri, kas samazina būvniecības darbu izmaksas;
- izmēru dažādība un to saskaņošanas iespējas;
- vertikāla bloku savienošana, neizmantojot javu;
- efektīva siltumizolācija;
- liela siltuma inerce.

Tomēr jānorāda, ka slīpēšanas nepieciešamība nosaka sarežģītāku un dārgāku mehānisko apstrādi. Uzmanība jāpievērš arī tam, lai izvairītos no celtniecības darbu veikšanas lietus laikā un negatīvās konstrukcijas nosegtu, novēršot ūdens uzkrāšanos bloku dobumos un mitruma iesūkšanos bloku dobumu pildvielā.

## 4. Būvkonstruktīvie risinājumi pārbaudei Latvijā klimatā

### 4.1. Optimizētas norobežojošās konstrukcijas

Ilgtermiņa pārbaudēm Latvijas klimatiskajos apstākļos pēc provizoriskas analīzes tika izvēlēti 5 ārsienu konstruktīvie risinājumi, kas veidoti no būtiski atšķirīgiem materiāliem, bet ar aptuveni vienādu aprēķināto siltuma caurlaidību  $U=0,15 - 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  (skat. arī tabulu 4.1). Pamatmateriālu izvēli noteica vairāki apsvērumi:

- popularitāte un izplatība Latvijā;
- vietējo izejvielu izmantošana;
- būtiski atšķirīga masivitāte;
- atšķirīgas mitruma difūzijas īpašības un gaisa caurlaidība;
- ierobežotais kopējais izmēģinājamo risinājumu skaits.

Šie apsvērumi noteica, ka testējamajās konstrukcijās tika iekļauti dažādi no koka izgatavojamie būvizstrādājumi – baļķi, finieris, kokskaidu vate, fibrolīts. Ārsienu siltuma izolācijai tika lietota kvalitatīva elastīgā akmens vate. No blokiem, kā visizplatītākie tika izvēlēti gāzbetona bloki, bet ierobežotā stendu skaita dēļ netika iekļauti citi bloki ar līdzīgām īpašībām, piem., keramzīta bloki. Kā bloki ar būtiski atšķirīgām īpašībām (mikrostruktūru un makroskopiskiem dobumiem) tika iekļauti lielgabarīta keramiskie bloki. Apzinoties, ka nebūt nav pārstāvēts viss būvmateriālu klāsts, tomēr pētījumā tika iekļauti risinājumi no dažādām raksturīgām materiālu grupām ar būtiski atšķirīgām īpašībām. Tas tika papildināts ar vienu eksperimentālu izstrādni, kas Latvijā praksē vēl netiek izmantota – ar siltuma izolāciju pildītiem lielgabarīta keramiskajiem blokiem. Tādējādi pētījumā pārstāvētie konstruktīvie risinājumi un to saīsinātie apzīmējumi angļu valodā ir šādi:

- frēzbaļķi ar elastīgās akmens vates siltinājuma slāni un baļķu imitācijas iekšējo apdari (LOG);
- saplākšņa paneļi ar akmens vates siltumizolācijas materiāla pildījumu un fibrolītu iekšpusē (PLY);
- lielgabarīta keramiskie termobloki ar elastīgās akmens vates siltinājuma slāni ārpusē (CER);
- gāzbetona bloki ar elastīgās akmens vates siltinājuma slāni ārpusē (AER);
- eksperimentāli keramiski bloki ar siltumizolācijas granulām, kas pārklātas ar grafitu, pildījumu to dobumos (EXP).

Lai nodrošinātu maksimāli vienādus, salīdzināmus apstākļus visiem konstruktīvajiem risinājumiem, ārpusē tika veidota ventilējama fasāde ar saplākšņa un koka latu ārējo dekoratīvo apdari. Tas novērš arī tiešu lietus un saules starojuma iedarbību uz pētāmajām konstrukcijām. Krāsojums tuvos pasteltoņos nodrošina to, ka solāro siltuma avotu ietekme stendu siltuma bilancēs arī ir praktiski vienāda.

Visiem stendiem ir vienādas konstrukcijas ventilējama pagrīde ( $U=0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) un bēniņu pārsegums ( $U=0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), kas veidoti no koka konstrukcijas ar elastīgās akmens vates pildījumu.

Tabula 4.1. 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
Koka karkass + akmens vate (neventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm						50	50
	W/m*K						0.044	0.041
Fibrolīts	mm			75				
	W/m*K			0.068				
labojums $\Delta\lambda$ (neventilēts)	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	mm		375					
	W/m*K		0.072					
Labojums $\Delta\lambda$ (neventilēts)	W/m*K		0.02					
Koka karkass + akmens vate (neventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm			200	200		200	
	W/m*K			0.041	0.044		0.049	
Koka karkass + bērza koksnes šķiedras vate (neventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm							200
	W/m*K							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		
Koka karkass + akmens vate (ventilēts) $\lambda = d/R = d*U$	mm	125	50					
	W/m*K	0.043	0.039					
Akmens vate	mm	30	30					
	W/m*K	0.033	0.033					
labojums $\Delta\lambda$ (ventilēts)	W/m*K	0.001	0.001					
Pretvēja plēve							ir	
Saplāksnis	mm			20			21	12
	W/m*K			0.17			0.17	0.17
Robežslāņu termiskā pretestība	(m <sup>2</sup> K)/W	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.21	0.17
$U$ vērtība ar robežslāņiem	W/(m <sup>2</sup> K)	0.151	0.153	0.154	0.150	0.159	0.173	0.160

Lai nodrošinātu salīdzināmību stendiem ir arī vienādi logi ( $U=0,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0,5$ ), kas vērsti uz dienvidu pusi un durvis ( $U=0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0$ ), kas vērstas uz ziemeļu pusi. Tādējādi atbilstoši Latvijā spēkā esošajai aprēķina metodikai noteiktais energopatēriņš šajos stendos, pie vienādām iekšējai temperatūrai un ventilācijas gaisa apmaiņas intensitātēm, ir vienāds. Tomēr, kā parādīja mērījumi gada laikā pēc stendu izbūves, faktiskais energopatēriņš var būtiski atšķirties (skat. 7. nodaļu).

## **4.2. Konstruktīvie risinājumi**

### **4.2.1. Dobie keramiskie bloki ar akmens vates siltumizolācijas slāni ārpusē (CER)**

Konstrukciju ar dobajiem lielgabarīta keramiskajiem blokiem griezumi parādīti attēlos 4.1. – 4.3. Bloki ir apmesti no abām pusēm – tas samazina gaisa ieslēgumu veidošanās iespējas siltuma izolācijas pusē un nodrošina arī to, ka nav iespējama caurejoša gaisa plūsma caur konstrukciju. Siltuma izolācijas ārējā slānī izmantota 30 mm pretvēja plāksne. Gaisa spraugas biezums ir aptuveni 30 mm. Tā pat kā visiem stendiem griestu pārseguma konstrukcija ir ar koka karkasu, akmens vates apakšējo slāni (50 mm) un kokskaidu vates siltuma izolācijas pamatslāni. Arī grīdas konstrukcija visos stendos veidota no koka karkasa, tikai šeit visur izmantota akmens vates siltuma izolācija.

### **4.2.2. Gāzbetona bloki ar minerālvates siltumizolācijas slāni ārpusē (AER)**

Arī konstrukcijā ar gāzbetona blokiem, tā pat kā keramisko bloku gadījumā, tie ir apmesti no abām pusēm (attēls 4.4) - tas samazina gaisa ieslēgumu veidošanās iespējas siltuma izolācijas pusē un nodrošina arī to, ka nav iespējama caurejoša gaisa plūsma caur konstrukciju. Grīdas un griestu pārsegumu pieslēgumi (attēli 4.5 un 4.6) ir līdzīgi kā keramisko bloku gadījumā.

### **4.2.3. Moduļveida saplākšņa paneļi ar elastīgās akmens vates pildījumu (PLY)**

Saplākšņa moduļu konstrukciju šķērsriezumi parādīti attēlos 4.7 – 4.9. Šie moduļi var tikt izgatavoti rūpnieciskos apstākļos, tādējādi samazinot montāžas laiku celtniecības objektos. Lai palielinātu ārējo laukummasu un termisko inerci iekšpusē ir izmantota 70 mm fibrolīta plāksne. Būtisks jautājums šai konstrukcijai ir tādas ūdens tvaiku difūzijas pretestības siltajā un aukstajā pusēs, kas nodrošina konstrukcijas ilgtspēju, proti, ka nenotiek ūdens uzkrāšanās siltuma izolācijas slānī ilgtermiņā. Viens no risinājumiem ir iekšējā slāņa tvaiku pretestības palielināšana, izmantojot prettvaiku plēvi. Otrs ceļš ir ārējā slāņa tvaiku pretestības samazināšana, perforējot ārējo nosedzošo paneļa saplākšni. Konkrētajā risinājumā netika izmantota ne viena, ne otra no šīm iespējām, tādēļ ar mitruma difūziju saistīto efektu analīzes rezultāti, kas raksturoti nodaļās 6 un 7 ir īpaši interesanti.

### **4.2.4. Frēzbaļķi ar akmens vates siltumizolācijas slāni iekšpusē un koka iekšējo apdari (LOG)**

Frēzbaļķu konstrukcijas risinājums no siltuma izolācijas slāņa novietojuma viedokļa ir netradicionāls (attēli 4.10 – 4.12) – siltuma izolācija atrodas iekšpusē. Šādu izvēli no vienas puses

nosaka potenciālo pasūtītāju vēlme nodrošināt būvēm no ārpusē frēzbaļķu ēkas izskatu, bet no otras puses nepieciešams nodrošināt mūsdienīgu siltuma izolāciju, ko panākt tikai ar koka lietojumu, bez siltuma izolācijas lietojumu, būtu ļoti dārgi un ārsienas biezums būtu ļoti liels. Iekšējo apdari arī veido frēzbaļķu imitācija – 40 mm bieža koka apdare. Izvēlētais risinājums tādējādi ir kompromiss starp cenu, energoefektivitāti un izskatu.

LOG ārsienas konstruktīvā risinājuma izvēle arī šīnī gadījumā nosaka nepieciešamību pastiprinātu uzmanību pievērst tvaiku difūzijai caur konstrukciju – nepieciešamo tvaika difūzijas pretestību konstrukcijas siltajā pusē nodrošina prettvaiku plēve (attēls 4.10).

#### 4.2.5. Dobie keramiskie bloki ar speciālu siltumizolācijas granulu pildījumu (EXP)

Eksperimentālo ārsienu no 51 cm bieziem keramiskajiem blokiem EXP, kuru dobumi pildīti ar putu polistirola granulām, šķērsgriezumi parādīti attēlā 4.13. šīnī gadījumā ārsienai nav papildus siltuma izolācijas slāņa, kā tas ir visos parējos apskatītajos gadījumos. No industriālās būvniecības viedokļa šāds risinājums var būt perspektīvs, ja bloki tiek pildīti rūpnieciski, to forma ir precīza un tos būvlaukumā iespējams ātri samūrēt – līdzīgi pildīti keramiskie bloki Vācijā un Austrijā tiek lietoti. Ārsienu pieslēgumi grīdai un griestiem parādīti attēlos 4.14 un 4.15.

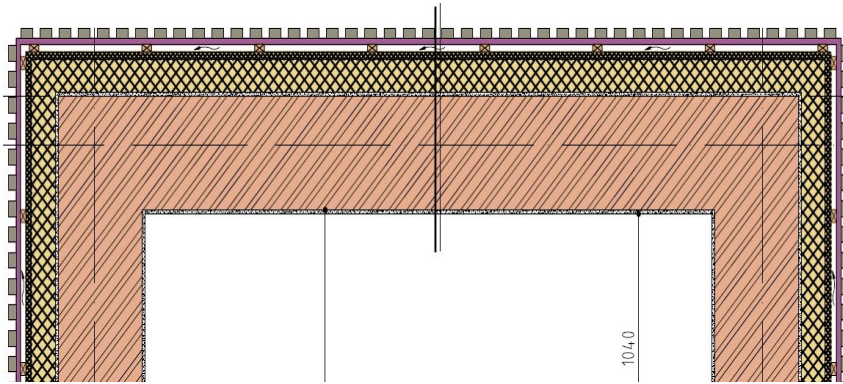
Visām apskatītajām būvkonstrukcijām tika veikti detalizēti siltuma caurlaidības aprēķini, atbilstoši standartam (LVS EN ISO 6946, 2009), ievērojot arī LBN 002-01 nosacījumus:

- normatīvos siltuma vadītspējas labojumu koeficientus;
- būvkonstrukciju daudzslāņainību un heterogenitāti (piem., koka karkass un siltuma izolācija);
- standartizētās siltuma atdeves koeficientu vērtības (ventilējama pagrīde, ventilējama bēniņu telpa un ventilējama fasāde ārpusē).

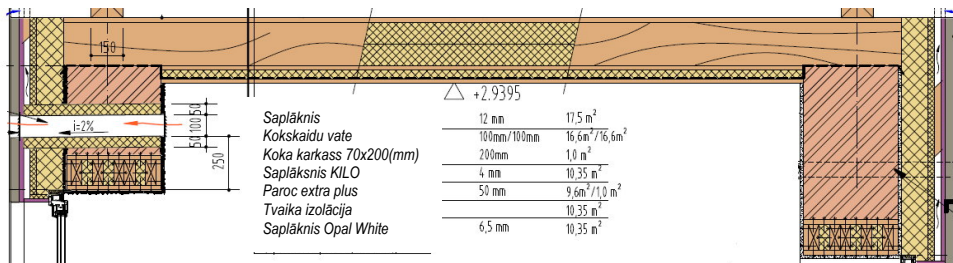
Šo aprēķinu rezultāti apkopoti tabulā 4.1, bet attiecīgo konstrukciju masivitāti raksturojošā laukuma masa uzdots tabulā 4.2.

Tabula 4.2. Izmantoto konstruktīvo risinājumu laukummasa.

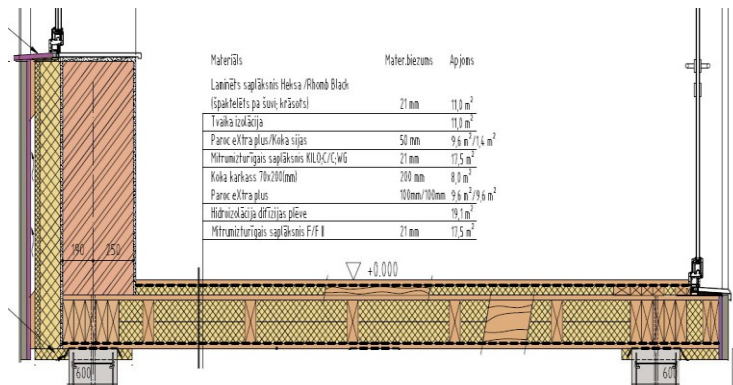
Konstruktīvie risinājumi	Konstruktīvo risinājumu laukummasas (kg/m <sup>2</sup> )
Saplākšņa paneļi ar akmens vates siltumizolācijas materiāla pildījumu un fibrolītu iekšpusē (PLY)	79
Frēzbaļķi ar elastīgās akmens vates siltinājuma slāni un baļķu imitācijas iekšējo apdari (LOG)	152
Lielgabarīta keramiskie termobloki ar elastīgās akmens vates siltinājuma slāni ārpusē (CER)	363
Gāzbetona bloki ar elastīgās akmens vates siltinājuma slāni ārpusē (AER)	165
Eksperimentāli keramiski bloki ar siltumizolācijas granulu, kas pārklātas ar grafitu, pildījumu dobumos (EXP)	426



Attēls 4.1. - CER sienas konstruktīvais risinājums.



Attēls 4.2. - CER griestu konstruktīvais risinājums.

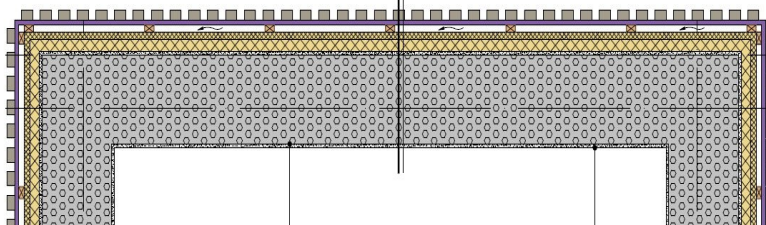


Attēls 4.3. - CER grīdas konstruktīvais risinājums.

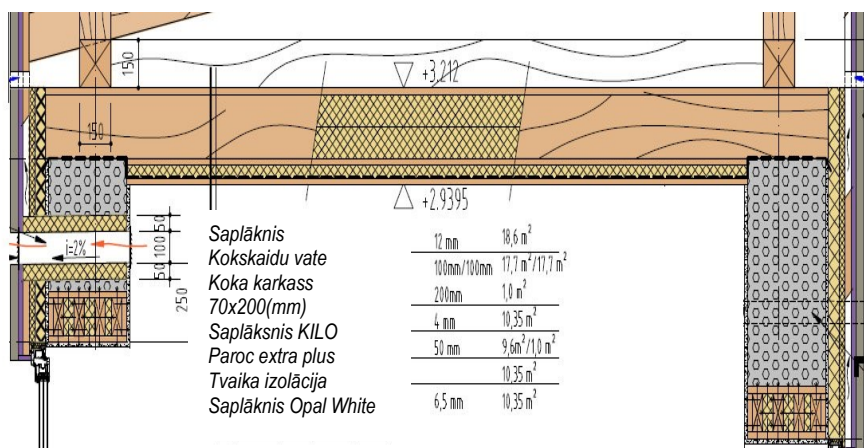
gāzbetona bloku siena

Materiali	Materiala biezums	Apjoms a/b
Antiseptiķa un tūnēta koka vert. apšuvums tonis -RAL 090 60 10	40 mm	52,7 m <sup>2</sup>
Saplāksnis sedrošā plāksne WG/BB/WG krāsota, tonis-RAL 300 50 35	6,5 mm	88,2 m <sup>2</sup>
Gaisa šķirķārta /koka vertikāls latiojums 50x30(mm)	30 mm	8,5 m <sup>2</sup>
Paroc Cortex	30 mm	60,0 m <sup>2</sup>
Paroc extra plus /koka horizontāls latiojums 50x50(mm)	50 mm	60,0 m <sup>2</sup> /5,9 m <sup>3</sup>
Kalka-cementa fasādes izolācijas apmetums SAKRET	15 mm	52,2 m <sup>2</sup>
Gāzbetona sienu bloki AEROC EcoTerm Plus	375 mm	45,2 m <sup>2</sup>
Kalka-cementa iekšējai apmetums SAKRET	15 mm	40,0 m <sup>2</sup>

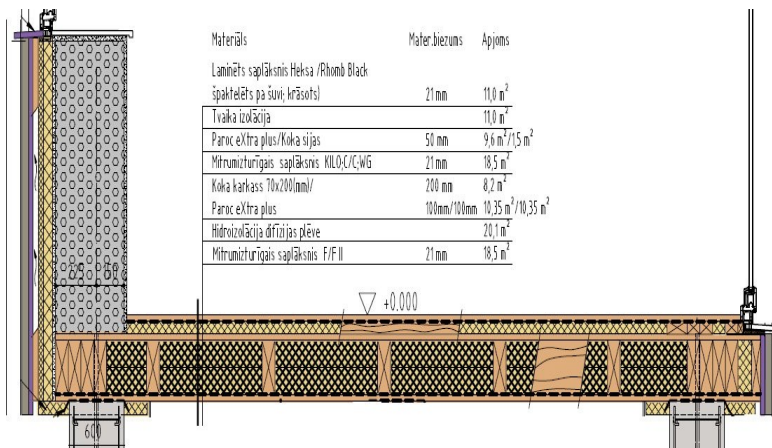
- × Kalka-cementa apmetumam izmantot SAKRET CLP Plus
- × Zem apmetumiem virsmu gruntēt ar grunti SAKRET UG
- × Mūrēts ar SAKRET (tīnījumu) šuves biezums 2 mm
- × Materiāla apjoms ieteināti papildus 15%



Attēls 4.4. - AER sienas konstruktīvais risinājums.



Attēls 4.5. - AER griestu konstruktīvais risinājums.

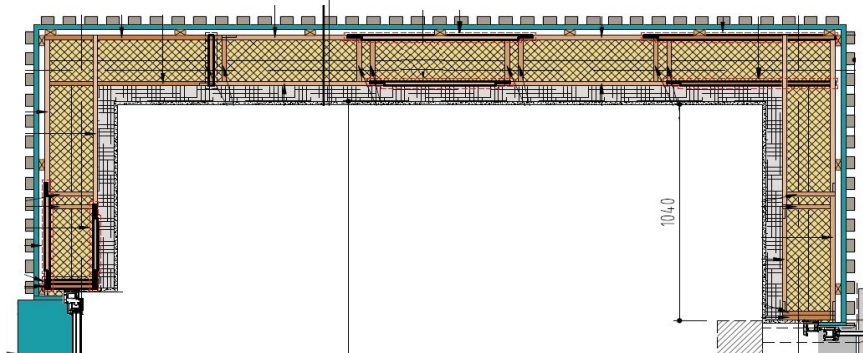


Attēls 4.6. - AER grīdas konstruktīvais risinājums.

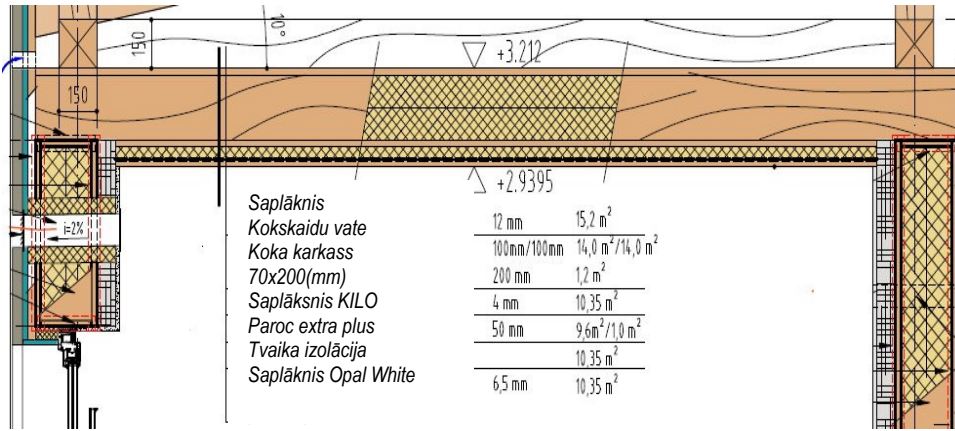
Saplākšņa moduļu siena

Materials	Material thickness	Area
Antiseptiņa un fonēta koka vert. apšuvums	40 mm	41,2 m <sup>2</sup>
Finiera sedzošā plāksne	6,5 mm	76,8 m <sup>2</sup>
Gaisa šķirkārļa /koka vertikāls lotojums	30 mm	8,5 m <sup>2</sup>
Saplākšņa karkass/Paroc eXtra plus	21 mm/100+100 mm	128,38 m <sup>2</sup> / 40,0 m <sup>2</sup> + 40,0 m <sup>2</sup>
Fibrolīta plāksne F 75	75 mm	40,3 m <sup>2</sup>
Kalka-cementa-smilšu iekšēļu apmetums	15 mm	40,3 m <sup>2</sup>

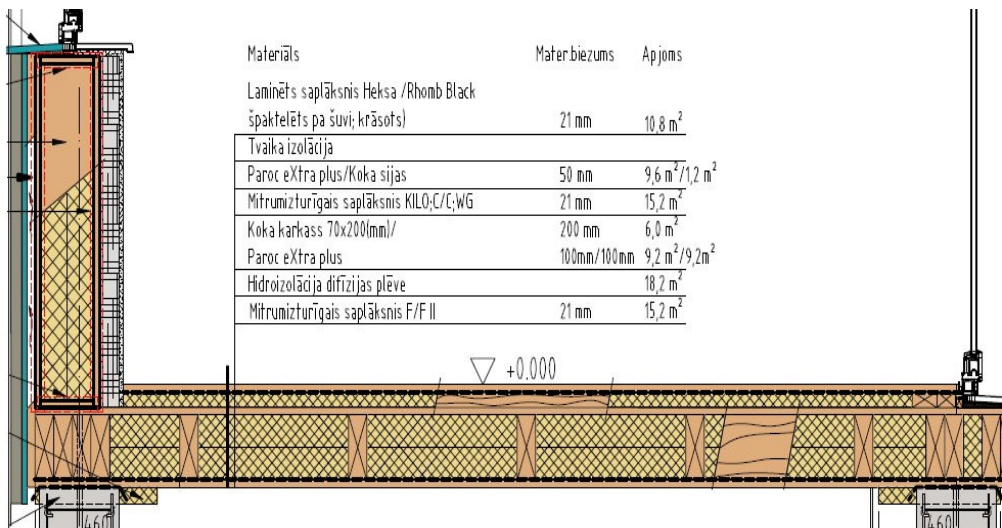
- × Kalka-cementa-smilšu apmetumam izmantot SAKRET CLP Plus
- × Zem apmetumiem virsma gruntēta ar grunti SAKRET UG
- × Materiāla apjoms ierēķināts papildus 15%



Attēls 4.7. - PLY sienas konstruktīvais risinājums.



Attēls 4.8. - PLY griestu konstruktīvais risinājums.

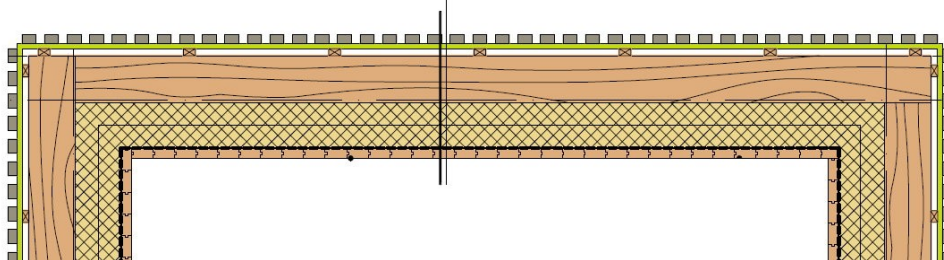


Attēls 4.9. - PLY grīdas konstruktīvais risinājums.

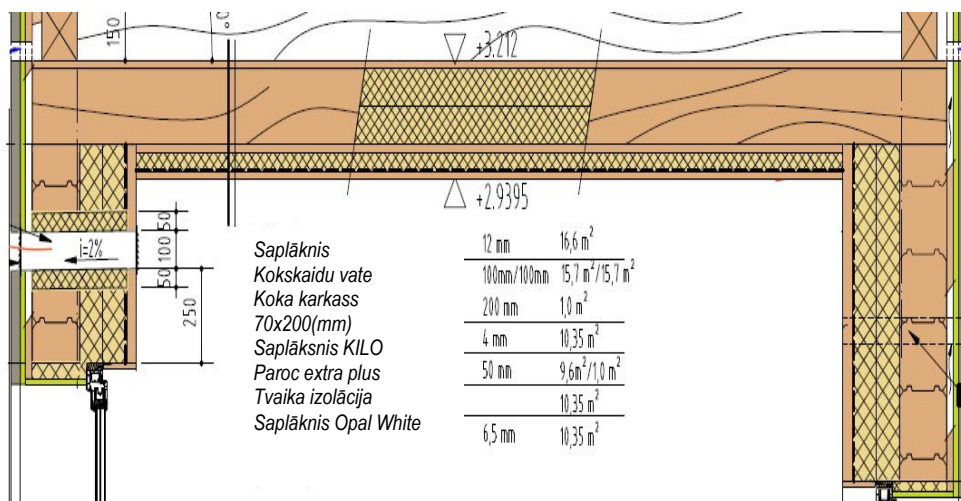
# frīzbalku siena

Materiāls	Materiāla biezums	Apjoms
Antiseptēta un tonēta koka vert. apšuvums, tonis - RAL 090 60 10	40 mm	50,7 m <sup>2</sup>
Saplāksnis sedzošā plāksne W6, BB/W6, krāsota, tonis -RAL 100 80 80	6,5 mm	83,5m <sup>2</sup>
Gaisa šķirkārtā /koka vertikāls lātojums 50x30(mm)	30 mm	8,5m <sup>2</sup>
Dares frīzbalkis	200 mm	51,2 m <sup>2</sup>
Paroc eXtra plus /koka vertikāls lātojums 50x100(mm)	100 mm	41,4 m <sup>2</sup> /4,8m <sup>2</sup>
Paroc eXtra plus /koka horizontāls lātojums 50x100(mm)	100 mm	41,4 m <sup>2</sup> /4,8m <sup>2</sup>
Tvaika izolācija		46,4 m <sup>2</sup>
Frīzbalku imitācijas koka apdare/ vertikāls apšuvums	40 mm	41,0 m <sup>2</sup>

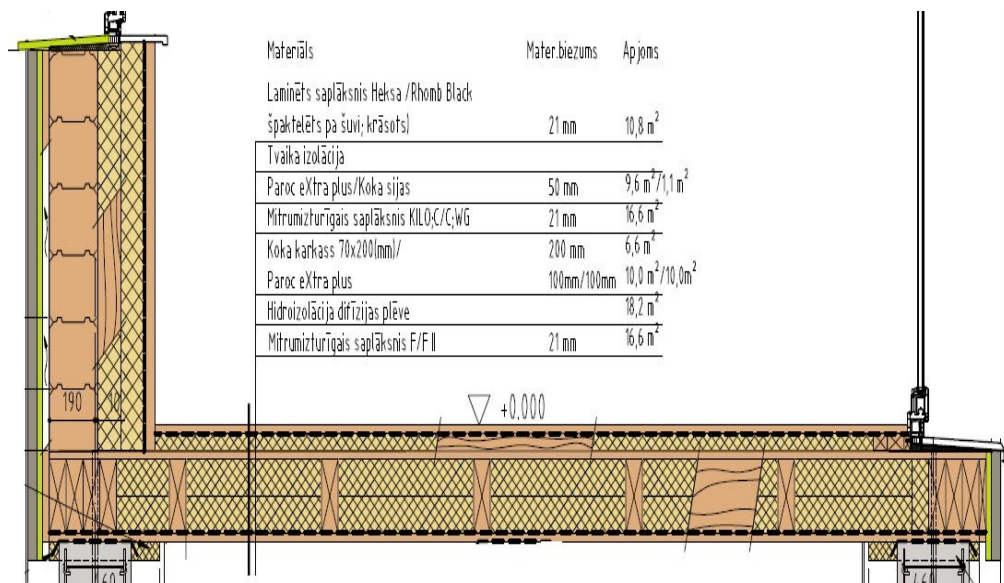
x Materiāla apjoms ierēķināti papildus 15%



Attēls 4.10. - LOG sienas konstruktīvais risinājums.



Attēls 4.11. - LOG griestu konstruktīvais risinājums.

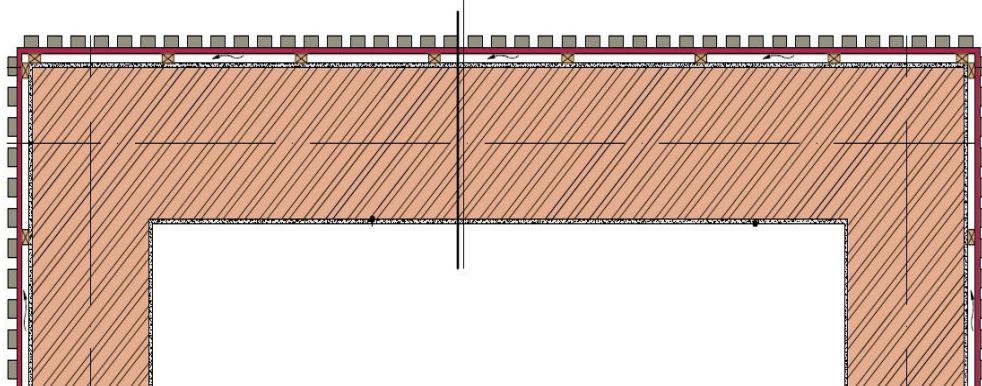


Attēls 4.12. - LOG grīdas konstruktīvais risinājums.

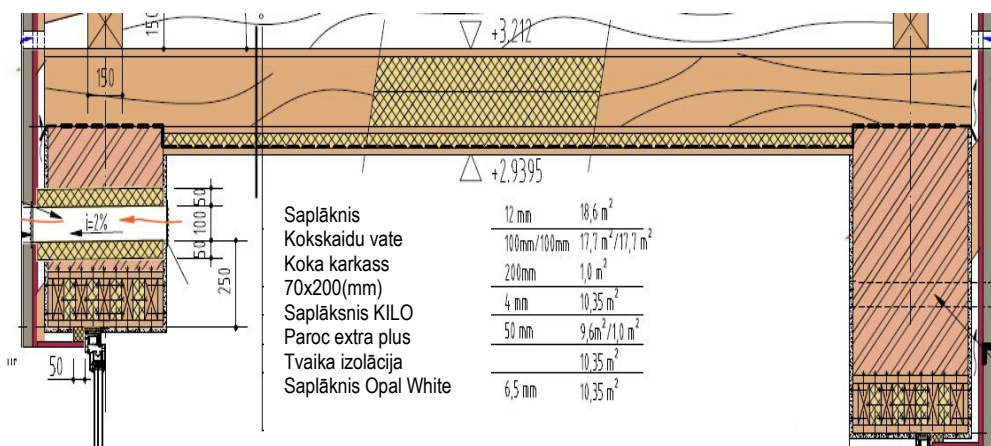
Keramiskā bloku siena  
(eksperimentālais)

Materiāls	Materiālbiezums	Apjoms
Antiseptēta un tonēta koka vert. apšuvums, tonis -RAL 090 60 10	40 mm	50,7 m <sup>2</sup>
Saplākšņa sedzošā plāksne WG, BB/WG, krāsota, tonis -RAL 010 40 50	6,5 mm	83,5m <sup>2</sup>
Gaisa šķirkāta /koka vertikāls latojums 50x30(mm)	30 mm	8,5m <sup>2</sup>
Kaļķa-cementa fasādes izlīdzinošais apmetums SAKRET	15 mm	50,3 m <sup>2</sup>
Keramiskie sienu bloki; eksperimentālais KERATERM ar aizplūdiņu dobumiem	500 mm	50,3 m <sup>2</sup>
Kaļķa-cementa iekšējais apmetums SAKRET	15 mm	40,0 m <sup>2</sup>

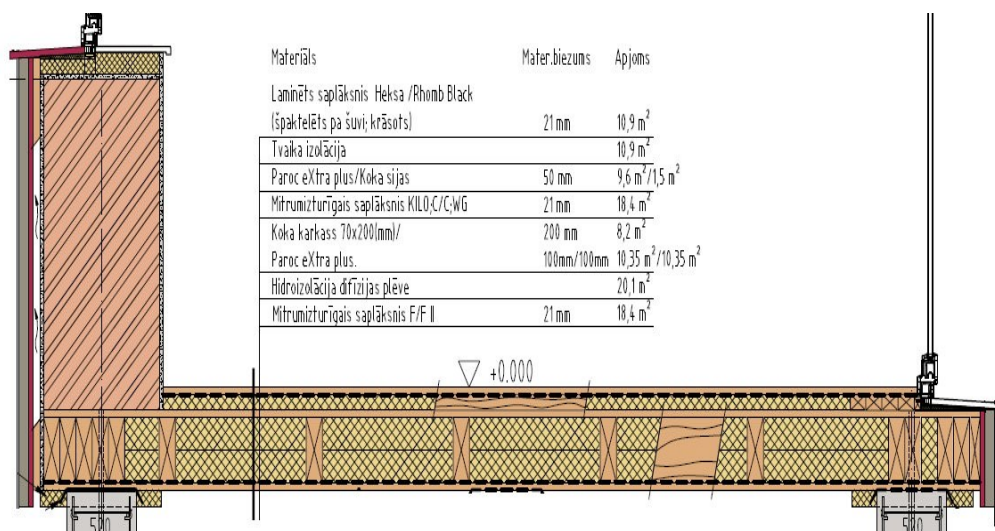
- × Kaļķa-cementa apmetumam izmantot SAKRET CLP Plus
- × Zem apmetumiem virsma gruntēta ar grunti SAKRET UG
- × Mūrēts ar speciālo SAKRET javu, šuves biežums 12 mm
- × Materiāla apjomus ierēķināti papildus 15%



Attēls 4.13. - EXP sienas konstruktīvais risinājums.



Attēls 4.14. - EXP griestu konstruktīvais risinājums.



Attēls 4.15. - EXP grīdas konstruktīvais risinājums.

## 5. Testēšanas standu izveide un pārbaudes

Lai izvēlēto būvkonstruktīvo risinājumu (skat. 4. nodaļu) energoefektivitāti un ilgtspēju pārbaudītu praksē Latvijas klimatā, Latvijas Universitātes Botāniskā dārza teritorijā 2012./2013. g. tika izbūvēti 5 testēšanas standi. Šiem stendiem tika veikta gan sākotnējā stāvokļa izpēte (termogrāfija, blīvējuma un gaisa apmaiņas pārbaudes, būvkonstrukciju siltuma caurlaidības mērījumi), gan arī uzsākts ilgtermiņa stāvokļa monitorings, kas turpinās arī pašreiz. Tika izgatavoti tādi liela izmēra pētāmo konstrukciju paraugi, lai no tiem varētu samontēt testēšanas standus ar iekšējo gaisa tilpumu  $9 \text{ m}^3$ . Šī nodaļa sniedz konspektīvu ieskatu konstrukciju un standu montāžas procesā, atspoguļojot dažādos to izgatavošanas posmus un detaļas – plašāku ilustratīvo materiālu var atrast vietnē [www.eem.lv](http://www.eem.lv) un standus gatavā veidā var apskatīt LU Botāniskajā dārzā.

### 5.1. Grīda

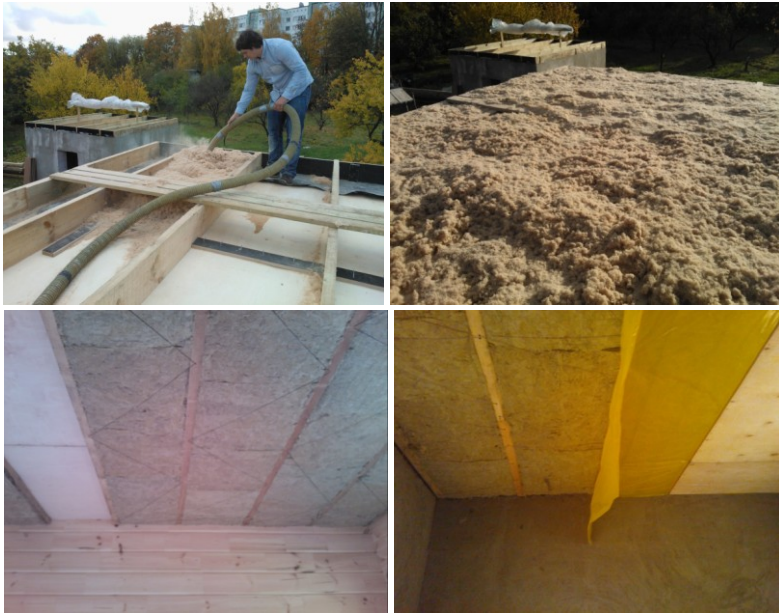
Visu standu grīdas veidotas vienādi - to pamatu veido koka karkasa konstrukcija ar akmens vates pildījumu un nosedzošajiem finiera segumiem (attēls 5.1) – detalizēts konstruktīvā risinājuma atspoguļojums sniegts 4. nodaļā. Konstrukciju balsta 6 urbtī metāla pāļi. Pēc standu izbūves pabeigšanas grīdas konstrukcija pa perimetru no apakšpuses papildus tika siltināta ar 50 mm ekstrudētā putu polistirola plāksnēm, lai mazinātu termisko tiltu ietekmi.



Attēls 5.1. Grīdas konstrukcijas izbūves posmi.

### 5.2. Griestu pārsegums

Visu standu griestu pārsegumi veidoti vienādi – tam izmantotas vieglas koka karkasa konstrukcijas ar pūšamās koka skaidu vates pildījumu (attēls 5.2). No telpas puses konstrukcija papildus siltināta ar 50 mm elastīgās akmens vates slāni. Pārsegumu no abām pusēm iekļauj saplāksnis – detalizēts konstruktīvā risinājuma atspoguļojums sniegts 4. nodaļā. Virs griestu pārseguma atrodas ventilējama bēniņu telpa, ko nosedz vienslīpņu skārda profilu jumts.



*Attēls 5.2. Griestu pārseguma izbūves posmi.*

### **5.3. Picas ārsienu konstrukcijas**

Dobo lielgabariņa keramisko bloku ar elastīgās akmens vates siltumizolācijas slāni ārpusē (CER) konstrukcijas izveide parādīta attēlā 5.3.



*Attēls 5.3. Dobo keramisko bloku ār sienas (CER) izbūves posmi.*

Siltuma izolāciju no ārpuses sedz 30 mm pretvēja plāksne (attēls 5.4). Bloku dobumi nav aizpildīti, bet bloki tika apmesti gan no iekšpuses, gan no ārpuses. Mūra šuvju biežumu un arī konstrukcijas siltuma caurlaidību iespējams samazināt blokus slīpējot, tomēr tas ir izmaksu ietilpīgi. Konstruktīvā risinājuma detalizēts raksturojums atrodams 4. nodaļā.



Attēls 5.4. Stendi ar nosedzošo pretvēja plāksni ārpusē pirms dekoratīvās apdares.

Arī gāzbetona bloki attiecīgā stenda (AER) izbūvē tika apmesti gan no iekšpuses, gan no ārpuses (attēls 5.5), siltumizolēti ar elastīgo akmens vati un nosegti no ārpuses ar pretvēja plāksni – projekta šķēlumi sniegti 4. nodaļā.



Attēls 5.5. Gāzbetona bloku ārsienas (AER) izbūves posmi.

Moduļveida saplākšņa paneļu ārsienu (PLY) ar akmens vates pildījumu izbūve parādīta attēlā 5.6. Konkrētajā gadījumā paneļu pildīšana tika veikta būvlaukumā, bet perspektīvs risinājums ir to pildīšana industriālos apstākļos un ātra montāža būvlaukumā. Siltajā pusē piestiprinātās 70 mm fibrolīta plāksnes ir apmestas.



*Attēls 5.6. Saplākšņa paneļu ār sienas izbūves posmi.*

Frēzbaļķu ār siena ar minerālvates siltumizolācijas slāni iekšpusē un baļķus imitējošo koka iekšējo apdari (LOG) parādīta attēlā 5.7 Konstruktīvā risinājuma shēmas dotas 4. nodaļā. Baļķu salaidumu vietas ir hermetizētas ar īpašām gumijām. Frēzbaļķu ār sienas gadījumā siltinājuma slānis ir iestrādāts iekšpusē – starp baļķiem un iekšējo koka apdari (skat. arī projekta šķēlumus 4. nodaļā). Arī šim stendam, tāpat kā pārējiem, nobeiguma fāzē tika izveidota ventilējama fasāde.



*Attēls 5.7. Frēzbaļķu ārsienas izbūves posmi.*

No liелgabarīta keramiskajiem blokiem, kuru dobumi ir pildīti ar putipolistirola siltumizolācijas granulām, kas pārklātas ar grafitu, veidotās ārsienas (EXP) parādītas attēlā 5.8.



*Attēls 5.8. Keramisko bloku ar pildītiem dobumiem ārsienas izbūves posmi.*

Šis risinājums būtiski atšķiras no visiem pārējiem ar to, ka netiek izmantots papildus siltuma izolācijas slānis – nepieciešamā projektētā siltuma caurlaidība tiek sasniegta, izmantojot ļoti biežus blokus (510 mm) un dobumu aizpildījumu, novēršot tajos termisko konvekciju un starojuma siltuma apmaiņu. Konkrētajā realizācijā dobumi tika aizpildīti manuāli būvlaukumā, bet perspektīvs ir risinājums, kur šos dobumus aizpilda industriāli, piem., izmantojot vibrāciju, un iespējama ātra to mūra izveide būvlaukumā. Šuvju biežumu iespējams būtiski samazināt blokus slīpējot. Arī šie eksperimentālie bloki no iekšpuses un ārpuses tiek apmesti.

Visiem stendiem dienvidu pusē tika iebūvēti vienādi logi ( $1,2\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ ,  $U=0,72\text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0,5$ ) un attiecīgi ziemeļu pusē – durvis ( $0,9\text{ m} \times 2,2\text{ m}$ ,  $U=0,82\text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0,5$ ), kas parādītas attēlā 5.9. Kaut arī solārā starojuma ietekme ziemeļu pusē ir nebūtiska, tomēr durvju stiklotā daļa tika pārklāta ar starojuma necaurlaidīgu plēvi, kā rezultātā to  $g \approx 0$ .

Attēlā 5.10 parādīti stendu kopskati dažādās to izbūves stadijās laikā no 2012.g. septembra līdz 2013.g. decembrim.



*Attēls 5.9. Logu un durvju izvietojums.*



*Attēls 5.10. Stendu kopskati dažādos montāžas etapos.*

## 5.4. Norobežojošo konstrukciju standartizētas pārbaudes ekspluatācijas apstākļos Latvijas klimatā

### 5.4.1. Termogrāfiskās pārbaudes dažādās stendu gatavības stadijās

Pētāmo norobežojošo konstrukciju, to iebūves un hermetizācijas kvalitātes pārbaudes sistemātiski tika veiktas dažādās šo stendu izbūves stadijās:

- pirms logu un durvju hermetizācijas un stendu galīgās apdares no ārpuses 2013.g. janvārī;
- pēc logu un durvju hermetizācijas ar speciālajām lentām 2013.g. februārī;
- pēc logu un durvju aiņu galīgās apdares 2013.g. martā.

Stendu izbūves stāvoklis no ārpuses termogrāfiskā apsekojuma laikā parādīts attēla 5.11.



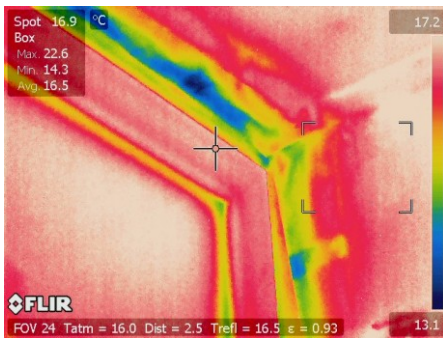
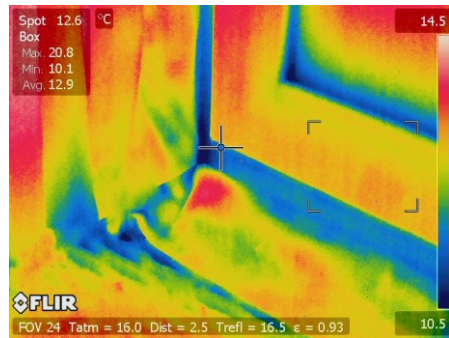
Attēls 5.11. Stendu izbūves stāvoklis pirmās termogrāfiskās pārbaudes laikā.

### Termogrāfiskās pārbaudes 23.01.2013

Attēlos 5.12 – 5.21 parādīti raksturīgie defekti stendos pirmā termogrāfiskā apsekojuma laikā 2013.g. janvārī. Visos stendos ir labi redzamas termisko tiltu vietas – būtiski pazeminātās temperatūras zonas ir apakšējās stūros (attēli 5.14 pa kreisi, 5.16 pa labi, 5.18 pa labi un 5.20 pa kreisi), kā arī ap bez apdares esošajiem logiem un durvīm (attēls 5.15 pa labi, 5.17, 5.19 un 5.20 pa labi). Nelielas temperatūru starpības tika konstatētas arī būvkonstrukcijās ar neregularitātēm – piem., att. 5.14, 5.16 un 5.18 ir redzamas griestu šuves, bet att. 5.21 pa kreisi – keramisko bloku kontūras ar nedaudz lielāku javas siltuma vadītspēju.



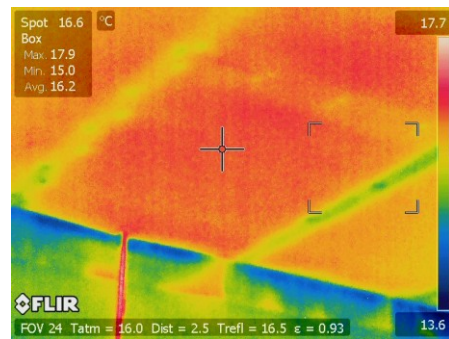
Attēls 5.12. CER stenda augšējais stūris loga pusē un loga apakšējais stūris.



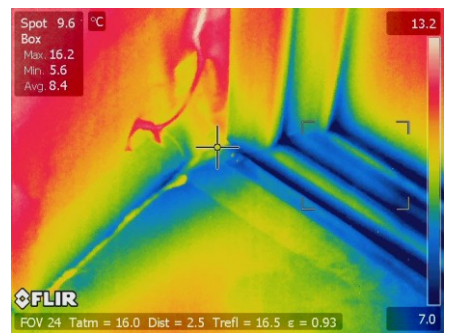
Attēls 5.13. Loga augšējais stūris un CER stenda augšējais stūris durvju pusē.

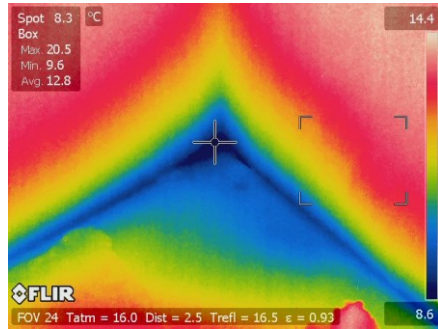
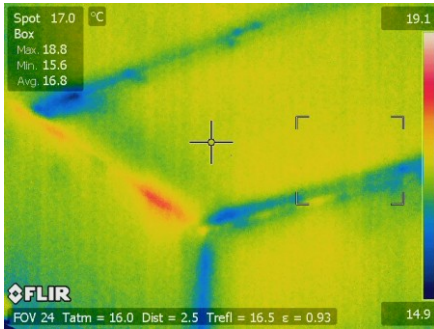


Attēls 5.14. AER stenda apakšējais stūris loga pusē un griestu šuve.

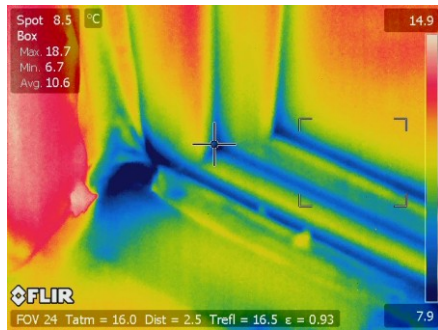
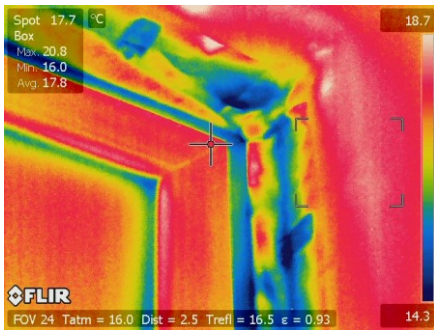


Attēls 5.15. Loga augšējais stūris un durvju apakšējais stūris AER stendā.

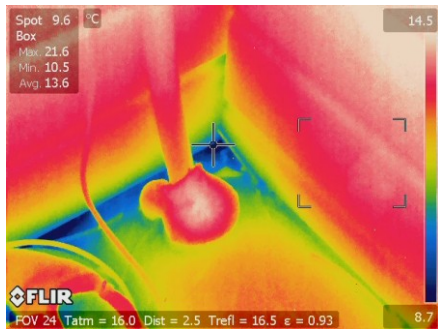




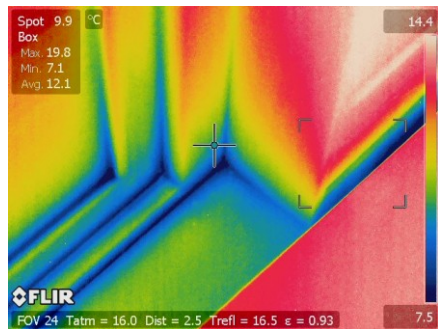
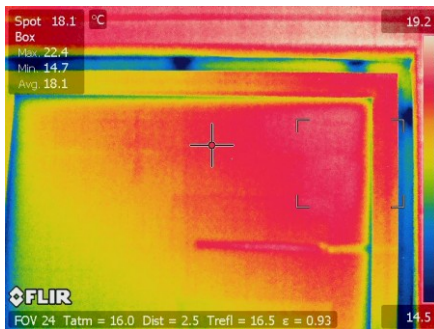
Attēls 5.16. PLY stenda augšējais stūris durvju pusē un stenda apakšējais stūris durvju pusē.



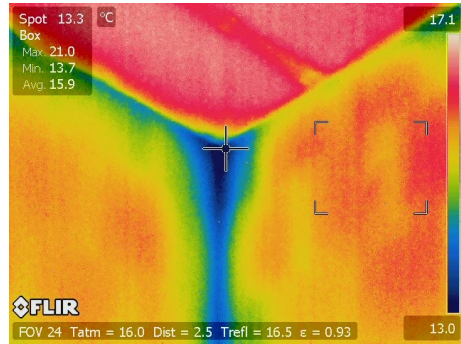
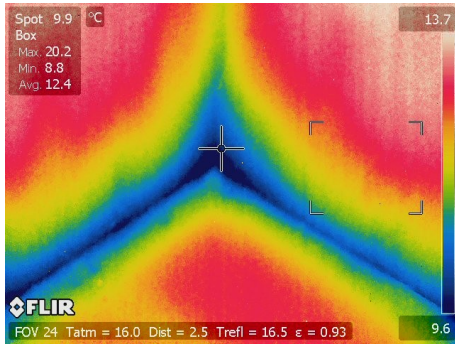
Attēls 5.17. Loga augšējais stūris un durvju apakšējais stūris PLY stendā.



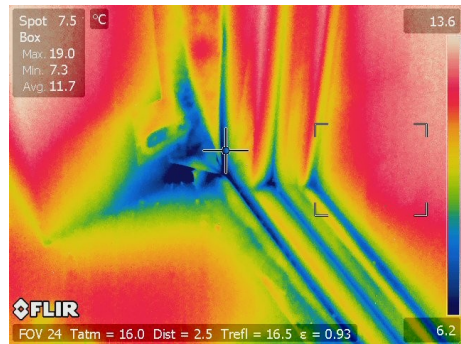
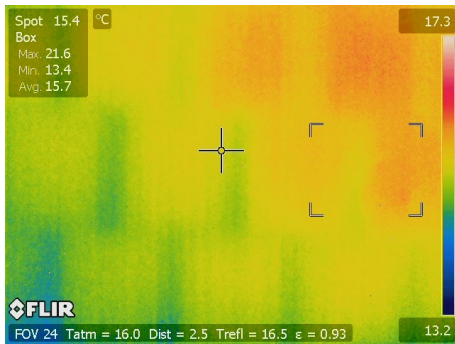
Attēls 5.18. LOG stenda augšējais stūris loga pusē un stenda apakšējais stūris durvju pusē.



Attēls 5.19. Loga augšdaļa un durvju apakšējais stūris LOG stendā.

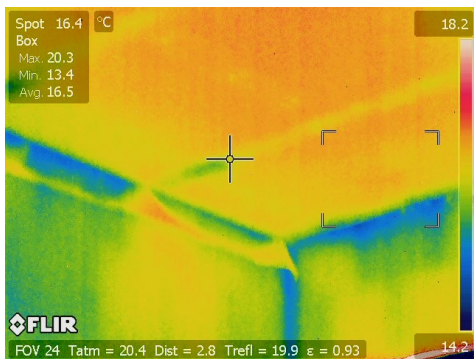


Attēls 5.20. EXP stenda apakšējais stūris durvju pusē un stenda augšējais stūris durvju pusē.

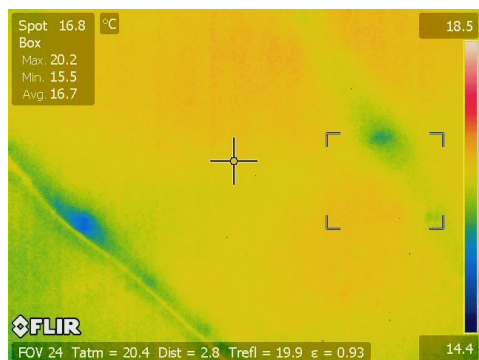


Attēls 5.21 EXP bloku ārsiena kreisā puse (16°C) un durvju apakšējais stūris.

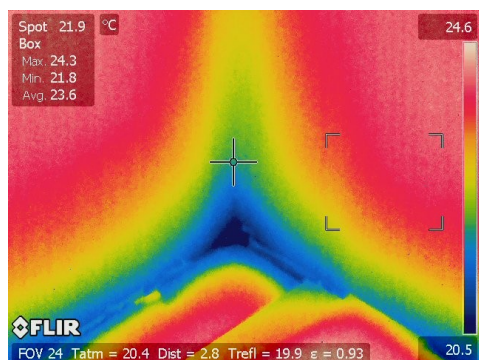
Otrā apsekojuma laikā 2013.g. februārī iegūto termogrammu piemēri parādīti attēlos 5.22 – 5.27. Pēc iekšējās apdares pabeigšanas un šuvju un salaidumu vietu hermetizācijas liela daļa no iepriekš konstatētajiem defektiem ir būtiski mazinājušies vai arī izzuduši pilnībā. Vislielākās temperatūras neregularitātes joprojām ir saistītas ar stūros esošajiem termiskajiem tiltiem (att. 5.24 pa kreisi un 5.26 pa labi).



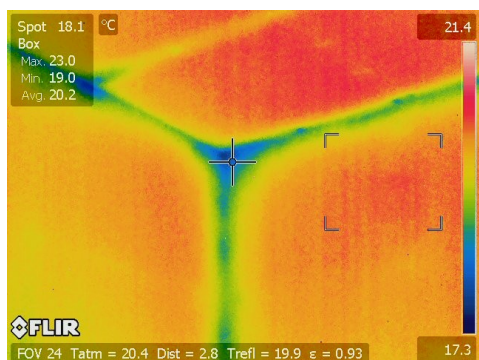
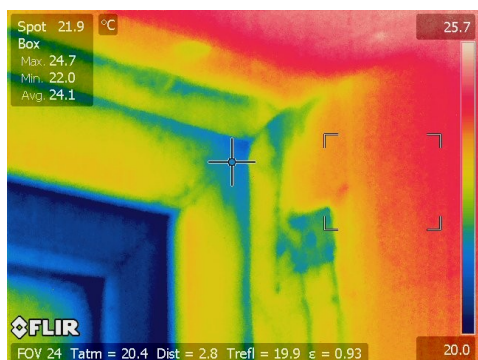
Attēls 5.22. CER stenda augšējais stūris pie durvīm un loga augšējais stūris.



Attēls 5.23. CER stenda griesti un durvju augšējais stūris.

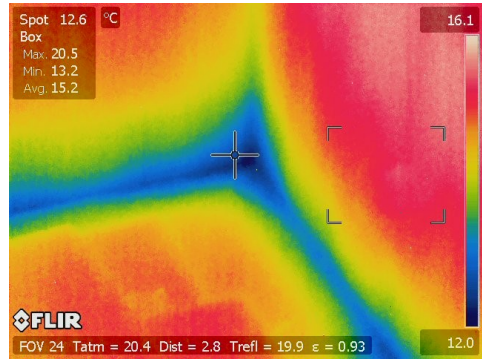
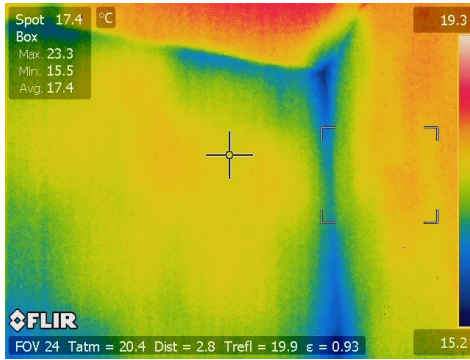


Attēls 5.24. AER stenda apakšējais stūris pie durvīm un durvju augšējais stūris.

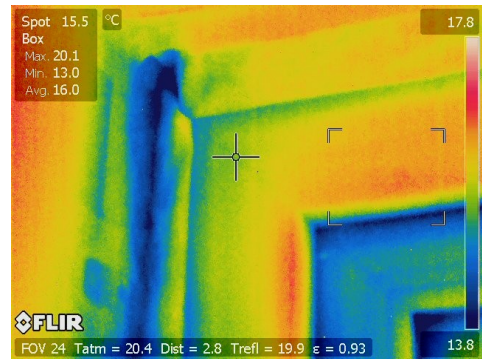


Attēls 5.25. PLY stenda augšējais stūris pie loga un loga augšējais stūris no ārpuses.



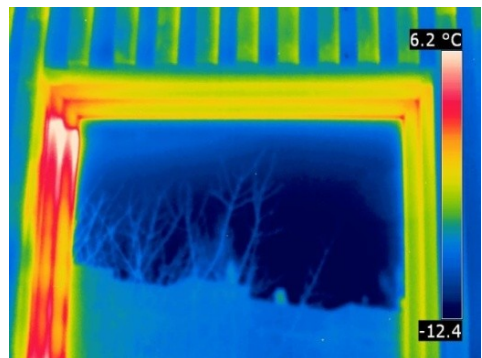
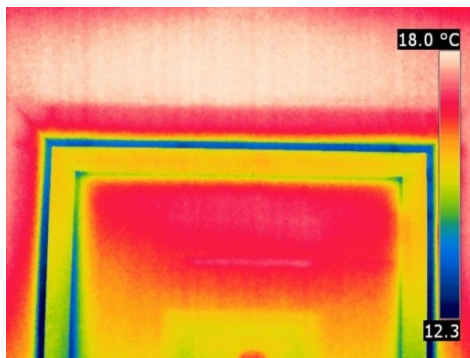


Attēls 5.26. EXP stenda augšējais stūris pie loga stenda apakšējais stūris pie loga.

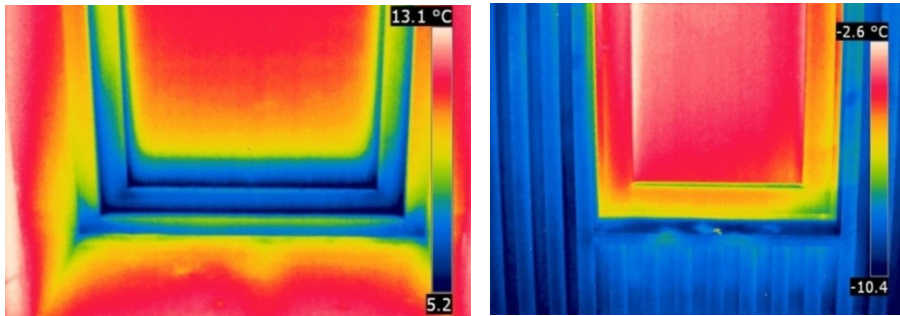


Attēls 5.27 EXP stenda stūris virs durvīm un durvju augšējais stūris.

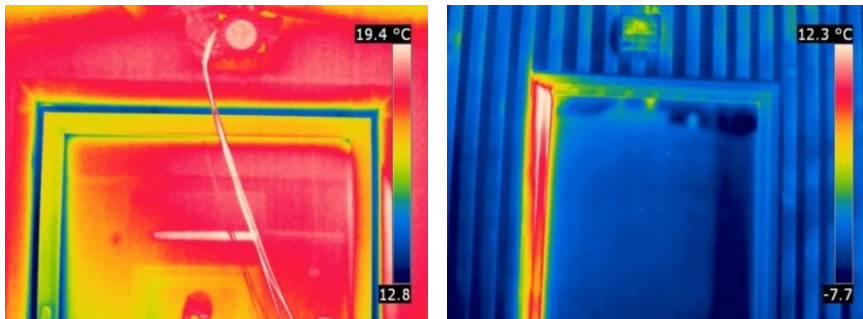
Trešā apsekojuma laikā martā iegūto termogrammu piemēri parādīti attēlos 5.28 – 5.40. Šajā laikā apsekojums tika veikts arī logiem un durvīm no ārpuses, defekti šajās konstrukcijās netika atklāti (attēli no 5.28 līdz 5.36). LOG stenda apsekojums no iekšpuses parādīja, ka bez ventilācijas atveres, pastāv arī neliela gaisa infiltrācija sienu un jumta/grīdas konstrukciju salaidumu vietās (attēli 5.38-5.40).



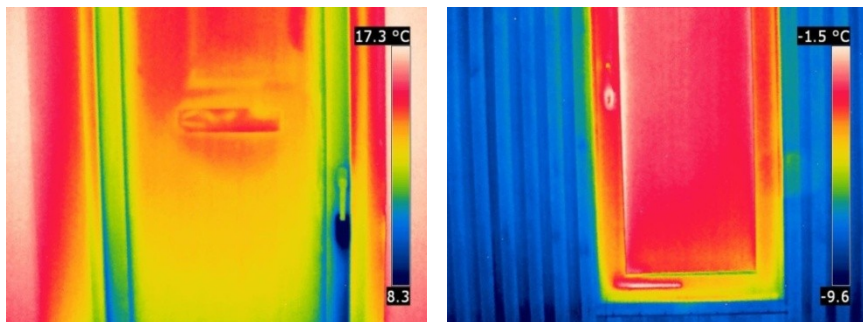
Attēls 5.28. Logs no iekšpuses un ārpuses (loga kreisajā pusē saules tiešā starojuma rezultātā paaugstināta virsmas temperatūra) CER stendam.



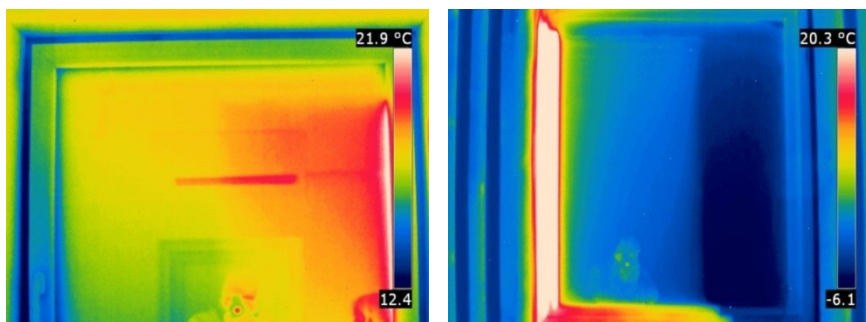
Attēls 5.29. Durvis no iekšpuses un ārpusē CER stendam.



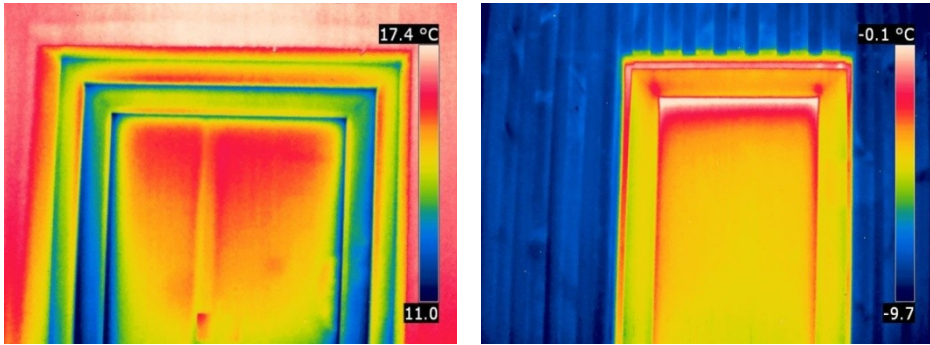
Attēls 5.30. Logs no iekšpuses un ārpusē (loga kreisajā pusē saules tiešā starojuma rezultātā paaugstināta virsmas temperatūra) AER stendā.



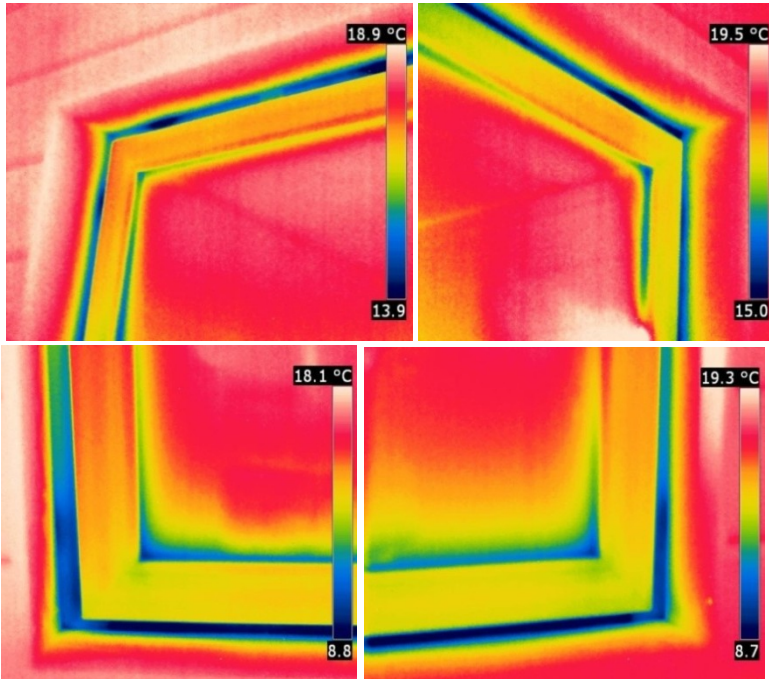
Attēls 5.31. Durvis no iekšpuses un ārpusē AER stendā.



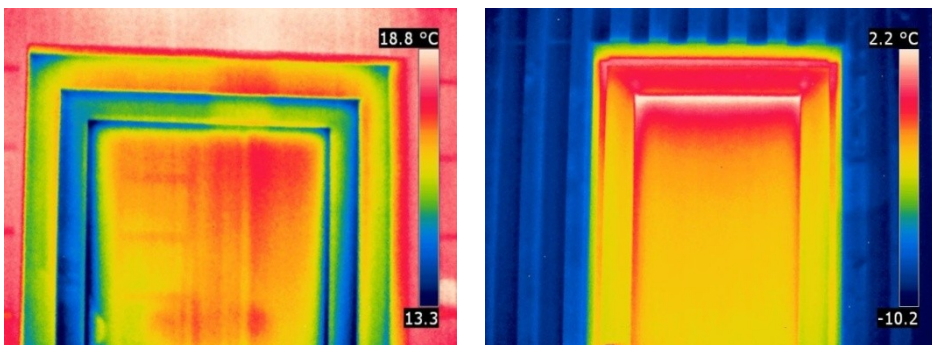
Attēls 5.32. Logs no iekšpuses un ārpusē (loga kreisajā pusē saules tiešā starojuma rezultātā paaugstināta virsmas temperatūra) PLY stendam.



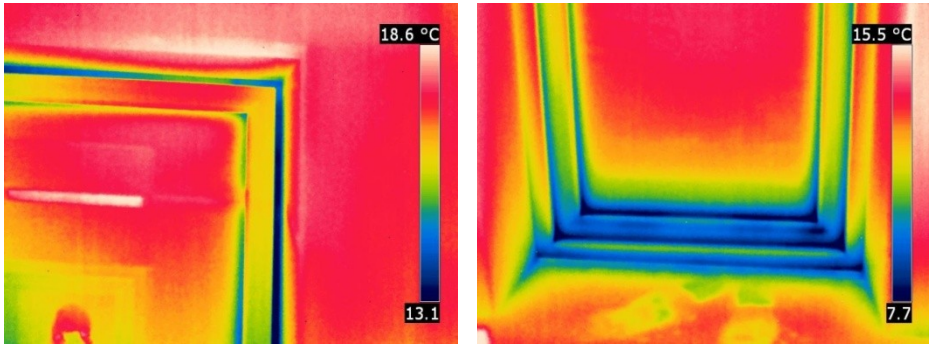
Attēls 5.33. Durvis no iekšpuses un ārpuses PLY stendam.



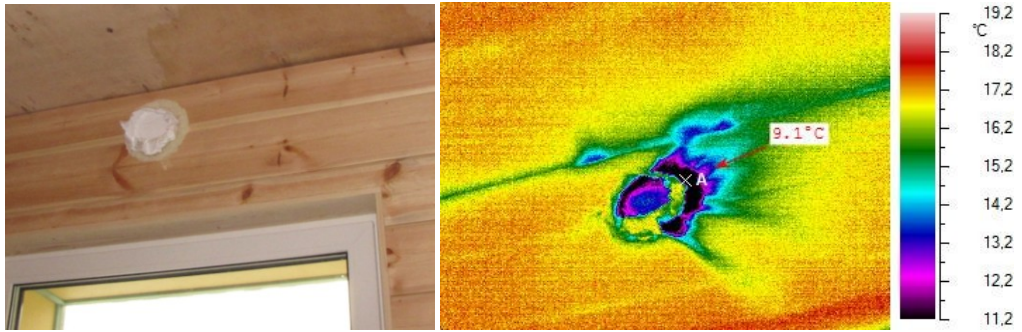
Attēls 5.34. Logs no iekšpuses LOG stendā.



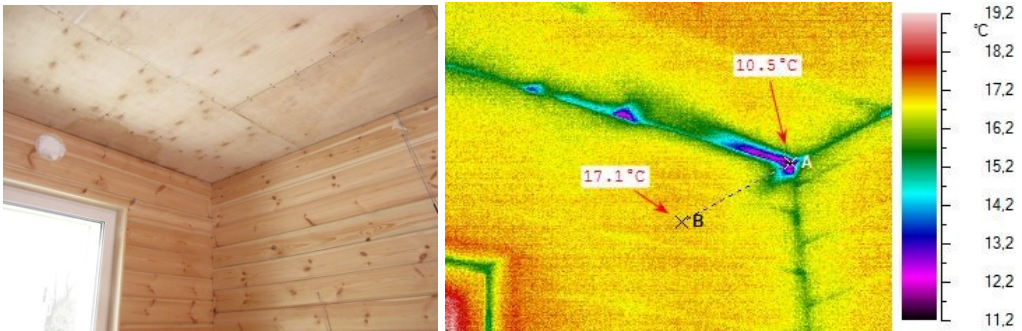
Attēls 5.35. Durvis no iekšpuses un ārpuses LOG stendā.



Attēls 5.36. Logs un durvis no iekšpuses EXP stendam.

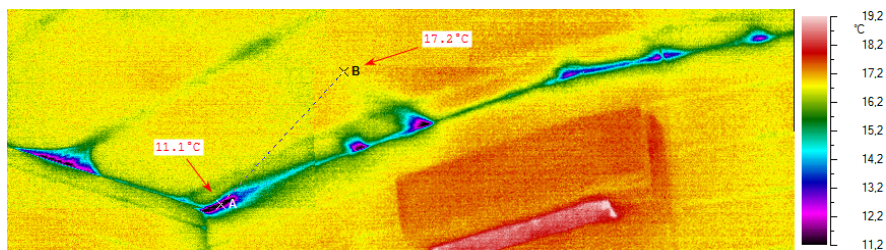


Attēls 5.37. Ventilācijas atvere LOG stendā.

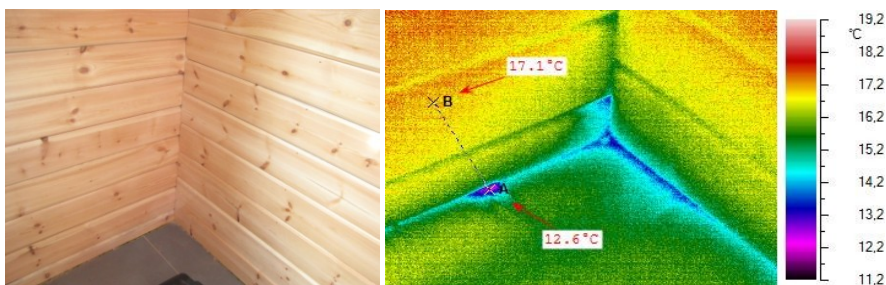


Attēls 5.38. Būvkonstrukciju salaidums stūrī LOG stendā.





Attēls 5.39. Būvkonstrukciju salaidums LOG stendā virs durvīm.



Attēls 5.40. Būvkonstrukciju salaidums apakšējā stūrī LOG stendā.

Tā kā stendu ārsienām realizēts ventilējamo fasāžu risinājums, tad pēc to izbūves pabeigšanas, termogrāfiju var veikt tikai no iekšpuses. Veiktās termogrāfijas pārbaudes kopumā parādīja, ka:

- sākotnējā stāvoklī pirms logu un durvju papildus hermetizācijas pastāv ļoti lieli ar gaisa apmaiņu saistītie siltuma zudumi pa logu un durvju perimetru;
- papildus hermetizācijas pasākumu, lietojot speciālās lentas un veicot aiļu apdari, rezultātā gaisa apmaiņa un siltuma zudumi pa logu un durvju perimetru būtiski samazinās;
- paaugstināti siltuma zudumi (siltuma tilti un atsevišķās vietās arī konvektīvā gaisa apmaiņa) pastāv griestu un ārsienas, kā arī grīdas un ārsienas sadures zonās – šo zudumu samazināšanai 2013.g. pavasarī tika veikti vēl papildus siltuma izolācijas (ventilējamās pagrīdes siltināšana ar ekstrudēto putu polistirolu pa perimetru) un hermetizācijas (salaidumu un šuvju nolīmēšana ar speciālajām lentām) pasākumi;
- ārsienās nav vērā ņemamu termisko neregularitāšu (neviendabību) un defektu – temperatūras sadalījumi uz to virsmām relatīvi vienmērīgi;
- daļas no būvkonstrukcijām siltuma caurlaidību (AER un EXP stendi) būtiski palielina tajās esošais mitrums.

Termogrāfiskās pārbaudes tiks atkārtotas pētījumu nākamajā periodā 2014.g. aukstajā gada laikā pēc tam, kad būs noslēgušies pārejas procesi pēc stendu izbūves un, izejot cauri sezonālam ciklam, žūstot, termiski deformējoties un tml. norisēs, būs stabilizējies būvkonstrukciju stāvoklis.

#### 5.4.2. Stendu hermetizācijas pārbaudes

Visiem testēšanas stendiem (daļai no tiem vairākkārtīgi) tika veiktas standartizētas blīvējuma pārbaudes pie 50 Pa spiedienu starpības pazemināta un paaugstināta spiediena apstākļos

(par mērījumu metodi skat. nodaļu 2), lai noteiktu to montāžas kvalitāti un hermetizāciju. Šo mērījumu norises ilustrācija parādīta attēlā 5.41. un rezultāti atspoguļoti sekojošajā tabulā 5.1. Šādas pārbaudes tiks periodiski atkārtotas arī turpmākajā ilgtermiņa pētījumu periodā.



Attēls 5.41. Standartizētas blīvējuma testēšanas norise stendos.

Tabula 5.1. Standartizēto hermetizācijas pārbaūžu rezultātu apkopojums.

Stenda nosaukums	Gaisa apmaiņas koeficients pie 50 Pa, $n_{50}$ (1/h)		Gaisa caurlaidība pie 50 Pa, $q_{50}$ ( $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ )		Ventilācija
	Zemspiediens	Pārspiediens	Zemspiediens	Pārspiediens	
<b>08.03.2013.</b>					
LOG (pirms aiļu apdares)	5,080	3,360	2,541	1,679	izslēgta
LOG	2,450	1,435	1,226	0,717	izslēgta
CER	3,235	3,195	1,618	1,598	ieslēgta
CER	2,920	2,875	1,460	1,437	izslēgta
AER	1,370	1,460	0,685	0,730	izslēgta
EXP	1,760	1,875	0,881	0,937	izslēgta
LOG	2,630	2,090	1,314	1,046	izslēgta
PLY	4,010	4,355	2,005	2,177	izslēgta
<b>26.11.2013.</b>					
LOG	2,695	2,300	1,322	1,128	izslēgta
CER	2,305	1,960	1,108	0,947	izslēgta
AER	1,175	1,100	0,588	0,549	izslēgta
EXP	2,720	2,265	1,334	1,112	izslēgta
PLY	1,891	1,960	0,946	0,980	izslēgta

Mērījumu rezultāti parāda, ka

- logu un durvju aiļu apdare ļoti būtiski uzlabo hermetizāciju – konkrētajā gadījumā gaisa apmaiņas intensitāte pēc apdares samazinājās aptuveni 2 reizes;
- pie noblīvētas ventilācijas atveres un 50 Pa spiedienu starpības plūsmas pieaugums nepārsniedz 10% salīdzinājuma ar noblīvētas atveres gadījumu, kurā tika veikti konstrukciju hermetizācijas mērījumi;
- blīvējuma raksturlielumu izkliede dažādos standos ir relatīvi liela – vislielākā gaisa caurlaidība konstatēta vieglajam finiera paneļu stendam PLY pirms šuvju papildus hermetizācijas, bet vismazākā gaisa apmaiņas intensitāte tika konstatēta AER stendam;
- visu stendu hermetizācijas raksturlielumi jau esošajā stāvoklī pilnībā atbilst LBN 002-01 nosacījumiem dzīvojamām mājām, proti gaisa caurlaidība pie 50 Pa spiedienu starpības ir mazāka par  $3,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ .

### 5.4.3. Faktiskās gaisa apmaiņas mērījumi

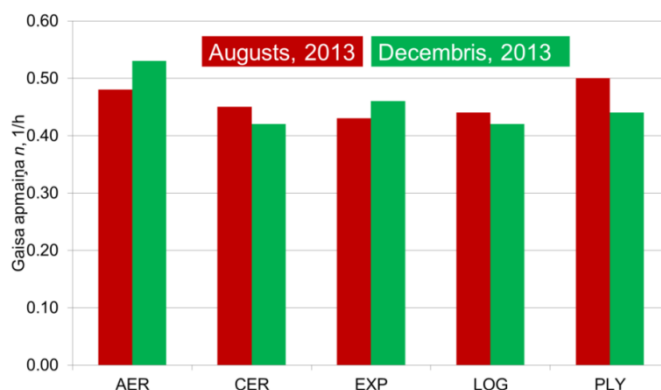
Lai novērtētu faktisko gaisa apmaiņas intensitāti  $n$ , katrā no stendiem to normālā ekspluatācijas režīmā, tika veiktas divas mērījumu sērijas, lietojot iezīmētās gāzes metodi, kas ir aprakstīta 2. nodaļā. Pirmā eksperimentu sērija tika veikta 2013.g. vasarā, bet otrā – apkures periodā 2013.g. decembrī. Iegūtie rezultāti ir apkopoti tabulā 5.2 un attēlā 5.42.

Iegūtie rezultāti parāda, ka

- pie noslēgtas ventilācijas sistēmas un ventilācijas atveres gaisa apmaiņas intensitāte nepārsniedz 7% no attiecīgās vērtības normālā ventilācijas režīmā, kas apstiprina jau iepriekš minēto, ka stendi ir labi hermetizēti;
- faktiskā gaisa apmaiņa, darbinot ventilācijas sistēmu normālā režīmā, ir intervālā no 0,4 – 0,5 l/h un atbilst reālu ēku ekspluatācijas apstākļiem, nodrošinot nepieciešamā svaigā gaisa pieplūdi;
- standos CER, EXP un LOG gaisa apmaiņas izmaiņas vasarā un ziemā ir nenozīmīgas, bet stenda AER vērojama laikā augoša tendence, turpretim stendā PLY – samazināšanās, kaut arī šajā periodā nekādi papildus hermetizācijas darbi netika veikti. Iespējamie tā iemesli ir stenda AER sākotnēji ļoti mitrā gāzbetona žūšana un līdz ar to elementu tilpuma samazināšanās un savukārt saplākšņa materiāla, kas sākotnēji bija sauss, zināma piebriešana, tuvojoties līdzsvara mitruma stāvoklim. Vai šie skaidrojumi ir pamatoti, parādīs mērījumi turpmākajā pētījumu gaitā.

Tabula 5.2. Gaisa apmaiņas mērījumu rezultāti testa stendos 2013. gada vasarā.

Testēšanas stends	Ventilācijas sistēma	Ventilācijas atvere	Gaisa apmaiņa $n$ ( $\text{h}^{-1}$ )
LOG	Iesl.	Vaļā	0,45±0,03
LOG	Izsl.	Ciet	0,03±0,01
EXP	Iesl.	Vaļā	0,48±0,02
AER	Iesl.	Vaļā	0,50±0,03
CER	Iesl.	Vaļā	0,43±0,04
PLY	Iesl.	Vaļā	0,44±0,01



Attēls 5.42. Eksperimentāli noteiktā gaisa apmaiņa  $n$  ( $h^{-1}$ ) testēšanas stendos vasarā un ziemā.

#### 5.4.4. Norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības noteikšana

Pēc stendu izbūves dažādos laika intervālos tika veiktas vairākas visu pētāmo būvkonstrukciju (5 veidu ārsienu, griestu, grīdas, logu, durvju) siltuma caurlaidības mērījumu ekspluatācijas apstākļos sērijas. Šo mērījumu metodika ir aprakstīta 2. nodaļā, bet rezultāti apkopoti tabulā 5.3 un vizualizēti attēlā 5.43.

Tā kā mērījumi veikti reālos ekspluatācijas apstākļos, tad rezultāti atspoguļo arī konstrukciju mitruma ietekmi uz materiālu siltuma vadītspēju un iespējamās neregularitātes būvkonstrukcijās izvēlētajās mērījumu vietās. Lielu mērījumu rezultātu izkliedi vienai un tai pašai konstrukcijai nosaka arī atšķirīgi izvēlētās mērījumu vietas un apstākļi mērījumu laikā:

- mainīgas āra temperatūras;
- siltuma sūknis, kas nodrošina stendu iekštelpu apsildi, darbojas režīmā ar pārtraukumiem – siltā gaisa padeve periodiski ieslēdzas un izslēdzas;
- mainīga gaisa plūsmu intensitāte iekšējo virsmu tuvumā, ko nosaka ventilācijas sistēmas darbības režīms;
- daļu mērījumu laikā būvkonstrukcijas apspīdēja un telpā iespīdēja saule.

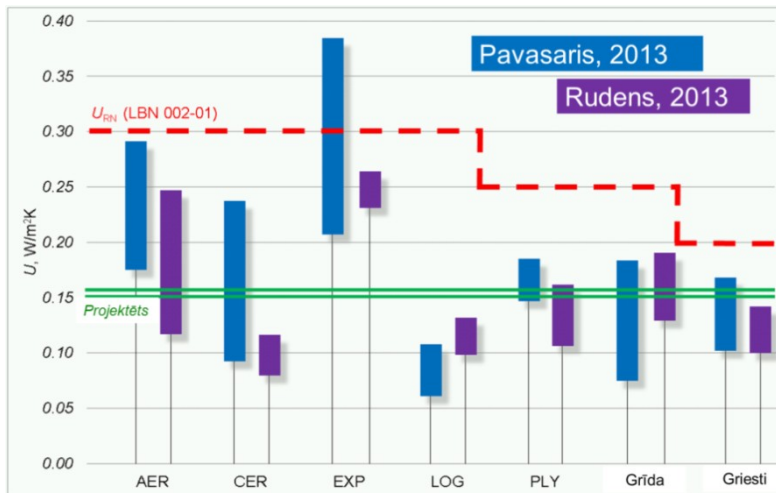
Vismazākā mērījumu rezultātu izkliede ir frēzbaļķu stenda LOG un PLY stenda sienām, arī stendu griestiem  $U$  vērtību izkliede ir mērena. Īpaši liela ir rezultātu izkliede sākotnējos pavasara mērījumos stendu AER, EXP un CER ārsienām un stendu grīdām. Tā iemesls, visticamāk, ir ļoti nevienmērīgs mitruma sadalījums mūra būvkonstrukciju dažādās vietās drīz pēc to izbūves. Arī stendu grīdas to izbūves laikā vairāk bija pakļautas meteoroloģisko apstākļu un mitruma iedarbībai, ka rezultāta mitruma daudzums tajās sākotnēji varēja vairāk atšķirties. Teikto par mitruma ietekmi netieši apstiprina tas, ka LOG un PLY sienām šī izkliede ir būtiski mazāka un arī mūra konstrukciju sienām izkliede ar laiku samazinās (skat. rudens mērījumu sēriju rezultātus). Redzams, ka vienīgi gāzbetona ārsienu (AER) siltuma caurlaidības izkliede arī nepilnu gadu pēc izbūves saglabājas ļoti liela.

Kopumā PLY ārsienu, grīdu un griestu siltuma caurlaidības atbilst aprēķina vērtībām (skat. arī tabulu 5.3.). Stenda LOG ārsienu siltuma caurlaidība savukārt ir par aptuveni 35% mazāka par aprēķināto. Tā iemesls varētu būt mazāka faktiskā kokmateriālu siltuma vadītspēja, nekā tas

pieņemts aprēķinos un mazāka gaisa plūsmas intensitāte ventilējamās fasādes spraugā. Arī keramisko bloku ārsiena (CER) 2. sezonā pēc sākotnējā celtniecības procesa mitruma samazināšanās uzrāda līdzīgas vērtības. Tas kopumā labi saskaņojas arī ar stendu energopatēriņa monitoringa rezultātiem, kas atspoguļoti 7. nodaļā, – stendi CER, PLY un LOG mērījumos uzrāda tuvas summāra energopatēriņa vērtības.

Tabula 5.3. Stendos izmērītās būvkonstrukciju siltuma caurlaidības  $U$  vērtības ( $W/m^2K$ ).

Stenda nosaukums	Konstrukcija	Periods	Izmērītā siltuma caurlaidība $U$ ( $W/m^2K$ )
CER	Ārsiena	2013.g. pavasaris	0,136/0,197/0,297
		2013.g. rudens	0,098
AER		2013.g. pavasaris	0,157/0,217/0,264/0,275
		2013.g. rudens	0,142/0,221
PLY		2013.g. pavasaris	0,163
		2013.g. rudens	0,123/0,155
LOG		2013.g. pavasaris	0,100/0,116
		2013.g. rudens	0,107/0,118
EXP		2013.g. pavasaris	0,216/0,295/0,347/0,349/0,460
		2013.g. rudens	0,224/0,271
CER	Griesti ar bēniņiem		
AER		2013.g. pavasaris	0,146
PLY			
LOG		2013.g. pavasaris	0,103/0,150
EXP		2013.g. pavasaris	0,187
Visi stendi (naktīs)		2013.g. pavasaris	0,089/0,090/0,091/0,107
Visi stendi (naktīs)		2013.g. rudens	0,097/0,105/0,120/0,127/0,146
CER	Grīda	2013.g. pavasaris	0,180
AER		2013.g. pavasaris	0,158
PLY		2013.g. pavasaris	0,172
LOG		2013.g. pavasaris	0,165/0,185
EXP		2013.g. pavasaris	0,217
Visi stendi (naktīs)		2013.g. pavasaris	0,106/0,108/0,124/0,142
Visi stendi (naktīs)		2013.g. rudens	0,131/0,136/0,152/0,165/0,190
Visi stendi (naktīs)	Loga stikla pakete	2013.g. rudens	0,555
	Loga rāmis	2013.g. rudens	0,714
	Durvju stikla pakete	2013.g. rudens	0,526
	Durvju rāmis	2013.g. rudens	1,010



Attēls 5.43. Būvkonstrukciju siltuma caurlaidības mērījumu dažādos laika periodos rezultātu apkopojums.

Eksperimentālo bloku ār sienas (EXP) siltuma caurlaidība 2. sezonā ir stabilizējusies pie  $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , kas būtiski pārsniedz aprēķina vērtību un norāda uz neprecizitātēm pieņēmumos par eksperimentālo bloku raksturlielumiem. To apstiprina arī modelēšanas (6. nodaļa) un monitoringa (7. nodaļa) rezultāti – faktiskais energopatēriņš šim stendam ir lielāks nekā iepriekš minētajiem. Tomēr rezultātu stabilizācija parāda, ka sākotnējā izbūves mitruma ietekme ir būtiski samazinājusies. Šajā kontekstā visproblemātiskākā ir gāzbetona bloku ār sienas AER, kuras siltuma caurlaidības izkliede joprojām saglabājas ļoti liela, kaut arī vērojama  $U$  vērtības samazināšanās tendence laikā. Tas, visticamāk, norāda uz intensīviem žūšanas procesiem, kas vēl nav noslēgušies, t.i., konstrukcijas mitruma stāvoklis vēl nav stabilizējies, pieskaņojoties apkārtējās vides apstākļiem. Teikto apliecina arī auksts gaisa relatīvā mitruma līmenis AER iekšstelpā, kuram arī ir tendence samazināties un summārā energopatēriņa monitoringa rezultāti (skat. 7. nodaļu).

Ārsienas siltuma caurlaidības mērījumu rezultātu izkliede ir liela. Vērtības, kas tuvas projektētajām, ir iegūtas tikai finiera paneļu konstrukcijai (PLY). Tas ir skaidrojams ar normatīvu (nelielu) mitruma daudzumu konstrukcijā. Frēzbaļķu ār sienas konstrukcijai (LOG)  $U$  vērtība ir būtiski mazāka par projektēto. Ja turpmākie mērījumi šo rezultātu apstiprinās, tad, acīm redzot, frēzbaļķu faktiskā siltuma vadītspēja ir mazāka par projektēto un tas jāpārbauda veicot siltuma vadītspējas mērījumus šim materiālam laboratorijas apstākļos. Visām pārējām ār sienas konstrukcijām no lielgabarīta mūra elementiem (AER, EXP un CER) sākotnēji pēc izbūves siltuma caurlaidība ir lielāka par projektēto. It īpaši izteikti tas konstatēts eksperimentālajiem blokiem (EXP), kur  $U$  sasniedz pat  $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ , t.i., sasniedz vērtības, kas līdz 3 reizēm lielākas par projektēto. Jānorāda, ka šai konstrukcijai vispār nav ārējā siltuma izolācijas slāņa, jo siltuma nepieciešamā siltuma pretestība tiek sasniegta piepildot bloku dobumus ar siltumu izolējošām granulām. Tādējādi būtiski paaugstinātās siltuma caurlaidības iemesls var būt:

- būtiski paaugstināts konstrukcijas mitrums, uz ko netieši norāda augsts gaisa relatīvais mitrums gaisā stenda iekšpusē;

- ar granulām pildītajos dobumos piesaistītais ūdens;
- neprecīzs šādu bloku ar granulām siltuma caurlaidības aprēķins, jo šinī gadījumā vispār nav siltumizolējošā minerālvates slāņa ārpusē.

Būtiski virs projektētās vērtības paaugstinātā gāzbetona ārsienas konstrukcijas (AER) siltuma caurlaidība viennozīmīgi ir saistāma ar stipri paaugstināto mitruma daudzumu blokos, jo arī telpas iekšpusē ir liels gaisa relatīvais mitrums.

## 6. Energoefektivitātes un fizikālo lauku matemātiskā modelēšana

### 6.1. Energopatēriņa aprēķina pieeju un programmatūras iespēju vispārīgs raksturojums

Vispārīgā nostādņē ēka ir ļoti sarežģīta termodinamiska sistēma. Analizējot siltumenerģijas patēriņu ēkā jānovērtē:

- apkārtējās vides stāvoklis, t.sk., klimatiskā josla, vidējās diennakts, mēneša, gada temperatūras, valdošo vēju virziens un ātrums, apbūves rajona un ēku ģeogrāfiskais novietojums;
- siltuma pārnese vadīšanas ceļā caur ēku norobežojošajām konstrukcijām;
- siltuma pārnese konvekcijas ceļā caur ēkas čaulu, kā arī pie norobežojošām konstrukcijām un apkures sistēmas elementiem;
- siltuma apmaiņa starojuma veidā uz ēkas norobežojošām konstrukcijām un uz apkures sistēmas elementiem;
- būvkonstrukciju mitruma dinamika un termiskā inerce, kas atkarīga no materiālu siltumietilpības;
- iekšējie siltuma avoti, to sadalījums un to jaudas izmaiņas;
- apkures, dzesēšanas un ventilācijas sistēmu īpatnības un jauda;
- citi faktori, kas ietekmē siltuma apmaiņu starp ēku un ārējo vidi.

Atkarībā no ēkas izmantošanas veida un konstruktīvajiem risinājumiem priekšplānā var izvirzīties un dominēt kāds no veidojamās siltuma bilances aspektiem. Piemēram, ēkai ar lielām stiklotām āršiemu virsmām, ļoti nozīmīga loma būs siltuma starojumam un solārajiem siltuma avotiem. Viegļai karkasa ēkai būtiski var būt dinamiskie efekti, ko nosaka konstrukciju maza termiska inerce. Savukārt publiskai ēkai ar lielu cilvēku skaitu telpās ļoti būtiska ir ar nepieciešamās ventilācijas intensitātes nodrošināšanu saistīto siltuma zudumu samazināšana.

„Ideālā” gadījumā, modelējot ēkas siltumenerģētisko stāvokli, būtu jārisina nestacionārs siltumapmaiņas vienādojums katrā no telpām un visās būvkonstrukcijās, ņemot vērā gan gaisa un mitruma plūsmas, gan siltuma pārvadi un starojumu. Tomēr fizikālo parādību matemātiskās modelēšanas pamatprincips ir tāds pētāmās fizikālās parādības apraksts, kas ietver procesa raksturīgās un būtiskās īpašības, neievērojot otršķirīgās parādības, un tajā pašā laikā procesu matemātiski aprakstošajām sakarībām jeb matemātiskajam modelim ir jābūt viennozīmīgi atrisināmam ar pieejamiem resursiem pietiekami īsā laikā. Tieši laiks un resursi ierobežo nepamatoti sarežģītu modeļu izmantošanu un stimulē racionālu, pamatotu tuvinājumu lietošanu. Tādēļ ēku energopatēriņa analīzei inženierpraksē uz sarežģītām siltuma apmaiņas diferenciālvienādojumu sistēmām balstītas aprēķinu metodikas parasti netiek izmantotas, bet to loma ir nenoliedzama dažādu šīs kompleksās sistēmas elementu vai aspektu padziļinātai un zinātniskai izpētei.

Ēkas energoresursu patēriņa analīzes mērķis ir prognozēt un kontrolēt ēkas energoefektivitāti, kā arī to optimizēt. Lai to realizētu, ir izstrādātas metodikas un programmas, kas nodrošina ēkas enerģijas bilances matemātisko modeļu izveidi dažādos tuvinājumos. Dažādām

metodikām un programmām atšķiras aprēķinu detalizācijas līmenis un pieņēmumi, kā arī papildus iegūstamie rezultāti, atkarībā no lietojumu mērķa un lietotāju kvalifikācijas. Piemēram, pavisam vienkāršai būvējamās ēkas pārvades siltuma zudumu novērtēšanai interesents praktiski bez jebkādas īpašas sagatavotības var veikt aprēķinu, izmantojot internetā pieejamu rīku <http://www.modlab.lv/PAROC/>. Tomēr, jo detalizētāks ir plānotais aprēķins, jo augstākai jābūt lietotāja kvalifikācijai un atbilstoši būtiski pieaug arī par ēku un tās sistēmām uzdodamo visa veida parametru daudzums. Tādēļ profesionāli, šādus aprēķinus Latvijā veic neatkarīgi eksperti ēku energoefektivitātes jomā – energoauditori, kuru kvalifikācija ir apstiprināta sertifikācijas procesā.

Turpinājumā īsi tiks raksturota LR normatīvos aktos noteiktā „Ēku energoefektivitātes aprēķina metode” un tās pamatā esošie standarti, kā arī izplatīti ēku enerģijas bilances aprēķina „rīki” - programmas *EFA2*, *HeatMod6* un *PHPP 7.1*.

Latvijā ēkas energoefektivitātes aprēķina metodi pašreiz nosaka 2013.g. 25. jūnija Ministru kabineta noteikumi Nr.348, kas aizstāj līdz tam spēkā esošos 2009.gada MK noteikumus Nr. 39. Šie noteikumi izdoti saskaņā ar Ēku energoefektivitātes likumu (2008) un nosaka aprēķinu kārtību, sastādot enerģijas bilanci ēkas robežās.

Saskaņā ar MK noteikumiem Nr.348, sastādot enerģijas bilanci ēkas inženiertehnisko sistēmu līmenī, kā arī, ja ēkai aprēķinātā apkurei nepieciešamā enerģija ir mazāka par 50 kWh 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). MK noteikumi Nr.348 izstrādāti saskaņā ar LVS EN ISO 13790 un tiešā vai netiešā veidā kopumā atsaucas uz aptuveni 20 Latvijas Valsts standartiem, kas izmantojami, lai aprēķinātu vai veiktu pieņēmumus par nepieciešamajām aprēķinu komponentēm. Tiešā atsauce normatīvos uz standartu nosaka tā obligātu pielietošanu, netiešā atsauce – brīvprātīgu.

MK noteikumi Nr.348 enerģijas bilances aprēķinam ēkas robežās 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 metodes detalizētāk aprakstīta LVS EN ISO 13790, kā arī ar to saistītajos standartos.

Standarts LVS EN ISO 13790 nosaka enerģijas bilances sastādīšanu ēkas vai tās sistēmu līmenī, apskatot tikai „saprātīgo” enerģijas bilanci, t.i., enerģijas daudzumu, kas nepieciešams, lai nodrošinātu noteiktu temperatūru telpā, mērītu pēc sausā termometra. Termometrs gaisa sausās temperatūras (no angļu val. - *dry-bulb temperature*) mērīšanai ir pasargāts no tiešas radiācijas un mitruma ietekmes. Ar sausā termometra temperatūru saprot gaisa temperatūru un tā ir patiesā termodinamiskā temperatūra – tā raksturo gaisa siltuma daudzuma saturu un ir tieši proporcionāla vidējai gaisa molekulu kinētiskās enerģijas vērtībai, tā nenosaka gaisa mitruma daudzuma saturu. Gaisa mitrināšanai un/vai sausināšanai nepieciešamā enerģija tiek rēķināta atsevišķi.

Energotatēriņa aprēķinu procedūras soļi saskaņā ar LVS EN ISO 13790 ir šādi:

- izvēlas aprēķinu metodi;
- definē kondicionētās un nekondicionētās zonas kopumā;
- ja nepieciešams, definē atšķirīgu aprēķinu zonas (skat. – aprēķini pa zonām);

- definē iekštelpu parametrus zonās un āra klimatiskos apstākļus;
- aprēķina katram laika periodam un ēkas zonai nepieciešamo enerģiju apkurei un dzesēšanai;
- apkopo rezultātus aprēķiniem dažādiem laika periodiem un dažādām zonām, ko apkalpo tās pašas sistēmas, un aprēķina nepieciešamo enerģiju apkurei un dzesēšanai, ņemot vērā sistēmas enerģijas zudumus;
- apvieno aprēķinu rezultātus dažādām zonām un sistēmām;
- aprēķina apkures un dzesēšanas sezonas garumu (vai arī tas var būt definēts nacionālajās normās dažādām ēkām vai saskaņā ar citiem parametriem, kā tas ir atbilstoši MK noteikumiem Nr.348).

Atkarībā no nosacījumiem, var veikt 3 dažāda veida aprēķinus pa zonām:

- vienas zonas aprēķins (ja ir atšķirīgi parametri atsevišķās zonas platībās (piemēram, temperatūra, gaisa apmaiņa u.c.), tad kā ieejas datus visām aprēķinu metodēm lieto vidējos svērtos lielumus);
- nesaistītais multizonu jeb daudzzonu aprēķins bez termālās sasaistes starp tām (ieejas dati tiek definēti katrai zonai atsevišķi, saskaņā ar vienas zonas ieejas datu noteikšanas principiem);
- saistītais multizonu aprēķins, t.i. ar termālo sasaisti starp zonām (izmanto tikai situācijās, kad atbilstoši normatīviem nevar izmantot pirmās divas metodes).

Vienmērīgo jeb kvazistacionāro aprēķinu metodi parasti lieto, ja aprēķina periods ir salīdzinoši garš - tipiski mēnesis vai visa sezona. Dinamiskos efektus šajā gadījumā tuvināti ievēro izmantojot empīriskus koeficientus, kas raksturo būvkonstrukciju termisko inerci. Vienmērīgā aprēķina metode tiek saukta arī par mēneša aprēķina metodi, ko standarts LVS EN ISO 13790 apraksta pilnībā. Mēneša aprēķina metodes speciāls gadījums ir sezonas aprēķina metode, kad parametri netiek definēti katram mēnesim atsevišķi – tas samazina uzdodamo datu daudzumu un vienkāršo aprēķinu. Vienmērīgās aprēķinu metodes trūkums ir liela relatīvā kļūda atsevišķiem mēnešiem, it īpaši tuvu apkures/dzesēšanas sezonas sākumam vai beigām.

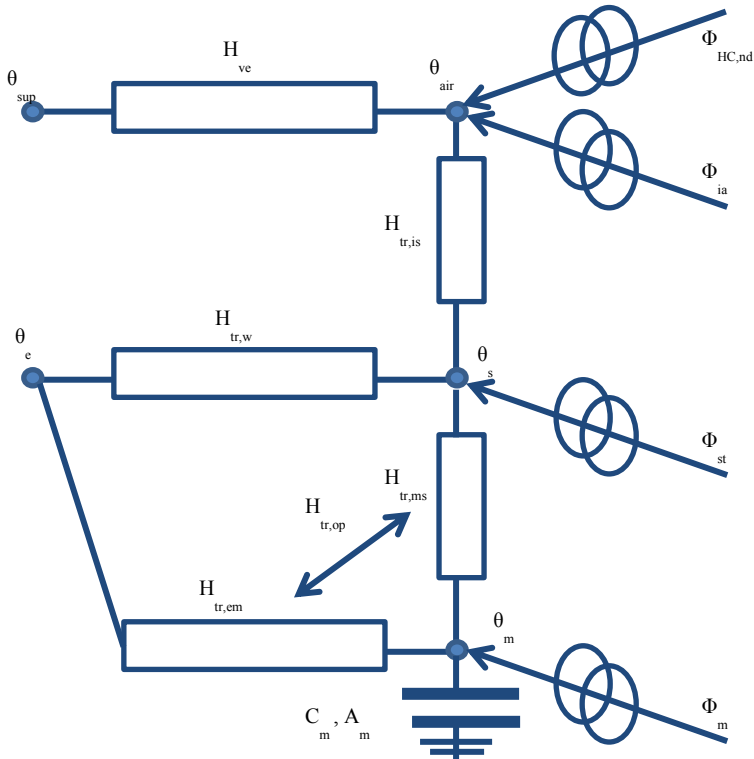
Dinamiskā aprēķina metode izmantojama, ja aprēķina siltuma bilanci īsā laika periodā (tipiski – viena stunda), ņemot vērā piegādāto siltumu, siltuma zudumus un ēkas masivitāti. Dinamiskajai aprēķinu metodei sīkāk izšķir divus variantus:

- detalizētā simulācijas jeb fizikālo lauku modelēšanas metode izmantojot atbilstošos matemātiskos modeļus - standarts LVS EN ISO 13790 to neapraksta;
- vienkāršā stundas jeb kvazidinamiskā aprēķinu metode, kas ir būtiski vienkāršots detalizētās lauka modeļēšanas metodes variants – šo pieeju standarts LVS EN ISO 13790 apraksta pilnībā.

Dinamiskās aprēķina metodes rezultāti nav validējami atsevišķai stundai lielas relatīvās kļūdas dēļ, parasti kā optimāls periods validācijai tiek izvēlēta 1 nedēļa, t.i., uzdodot datus katrai stundai 1 nedēļas garumā par klimatu, ēku un sistēmām, iekšējiem siltuma izdalījumiem u.c. parametrus.

Vienkāršajā stundas aprēķina metodē jeb “trīs krustpunktu stundas metodē”, tiek izmantots R-C (pretestības-kapacitātes) aprēķina modelis, konkrēti 5RC1 (5 pretestības un 1 kapacitāte) –

skat. attēlu. 6.1. Šī vienkāršā stundas aprēķina metode nodrošina apkures/dzesēšanas energopatēriņa aprēķinu pēc vidējās svērtās gaisa un vidējās starojuma temperatūras (katrai svara faktors 0,5), metode tuvināti ņem vērā ēkas masivitāti un siltuma inerģi.



Attēls 6.1. Vienkāršās stundas aprēķina metodes R-C modeļa shematiskais attēlojums.

Attēlā 6.1 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 jaudas [W] - iekšējā  $\Phi_{int}$  un solārā  $\Phi_{sol}$ , kas sadalītas komponentēs:  $\Phi_{ia}$ ;  $\Phi_m$  un  $\Phi_{st}$ ; siltuma pārvades koeficienti [W/K]:  $H_{ve}$  – siltuma pārnese ar ventilāciju;  $H_{tr,w}$  – logiem, durvīm, piekārtām un stiklotām sienām (termiskā masa = 0);  $H_{tr,op}$  – necaurspīdīgiem elementiem, kas sadalīts komponentēs:  $H_{tr,em}$  – emisija un  $H_{tr,ms}$  – pārnese;  $H_{tr,is} = h_{is} \cdot A_{tot}$  – siltuma pārnese koeficients, kur  $h_{is}$  – siltuma pārnese starp gaisa mezglu  $\theta_{air}$  un virsmas mezglu  $\theta_s$ , 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 apskatāmo 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 [ $^{\circ}C$ ]:  $\theta_{sup}$  – pieplūdes gaisam;  $\theta_{air}$  – gaisam telpā;  $\theta_e$  – āra gaisam;  $\theta_m$  – termiskajai masai;  $\theta_s$  – paredzētā/uzstādītā temperatūra, kur  $\theta_s = (\theta_{air} + \theta_{r,mm}) / 2$ , un  $\theta_{r,mm}$  – vidējā starojuma temperatūra.

Šeit ieskicētā aprēķinu shēma parāda, ka arī vienkāršā stundas metode dinamiskajam aprēķinam ir pietiekami sarežģīta lietojumiem un, kas īpaši svarīgi, nepieciešams uzdot arī datus katrai stundai, tai skaitā āra temperatūras un solārā starojuma raksturlielumus.

Var vērtēt mēneša (vienmērīgās) un vienkāršās stundas (dinamiskās) aprēķinu metožu pieeju atšķirības:

- mēneša (vienmērīgajā) aprēķinu metodē tiek uzdoti vidējie dati periodam, bet, lai ievērotu dinamiskos efektus, kas saistīti, piem., ar ēkas masivitāti, tiek izmantoti koeficienti, kas iegūti empīriski vai no dinamisko procesu kompleksiem modelēšanas aprēķiniem;
- vienkāršās stundas (dinamiskā) aprēķina metode savukārt jāuzdod parametri, kas mainās ik stundu, bet rezultāts tiek iegūts tiešā aprēķinā, izmantojot vienkāršotu modeli.

Tomēr jānorāda, ka līdz pat 20% atšķirīgi aprēķinu rezultāti vienam un tam pašam objektam var tikt iegūti katrā individuālā gadījumā, jo

- nacionālā līmenī var būt definēti atšķirīgi parametri;
- standarts pieļauj izvēlēties atšķirīgas aprēķinu metodes (piem., vienas vai multizonas aprēķins);
- dažādi ievadīto datu lielumi (piem., izmēri no rasējuma) un tml.

Tādēļ konkrētās aprēķina metodes izvēlei, ja to viennozīmīgi nereglamentē normatīvie dokumenti, būtisks ir aprēķina mērķis. Tā, lai noteiktu daudzdzīvokļu ēkas energopatēriņu apkures sezonā būs pamatoti lietot mēneša vai pat sezonas vienmērīgo metodi, bet, lai analizētu telpu dzesēšanu vasarā tajās iespīdot saulei, nepieciešama būs dinamiskā metode – vienkāršais stundas aprēķins vai pat detalizēta matemātiskā fizikālo lauku modelēšana.

## **6.2. Īss energopatēriņa un energoefektivitātes aprēķinu programmu raksturojums**

### **6.2.1. EFA 2**

*EFA2* (Ēkas energoEfektivitātes Aprēķins, 2.versija kopš 26.06.2012., pirmā versija 2009. g.) ir *MS Excel* vidē veidota aprēķina programma, kas nodrošina ēkas siltuma bilances matemātiskā modeļa izveidi un energoefektivitātes aprēķinu saskaņā ar 2009. g. MK noteikumiem Nr.39, atbilstoši vienmērīgajai sezonas aprēķina metodei.

Šī programma, kas tika izstrādāta pēc Latvijas EM pasūtījuma, un tās lietojumi detalizēti raksturoti metodiskajā materiālā (<http://www.em.gov.lv/images/modules/items/EnAudTerminiMetodika.pdf>). Tā paredzēta telpu kondicionēšanai (apkurei un dzesēšanai) nepieciešamā enerģijas daudzuma aprēķinam. Apkures periodu, kuram programmā tiek veikti aprēķini, nosaka LBN 003-01 „Būvklimatoloģija”, vadoties pēc ēkas novietojuma - uzdotās tuvākās ģeogrāfiskās vietas Latvijas teritorijā, kura tiek piedāvāta izvēlnē. Lietotājam iespējams uzdot arī paša izvēlētu „nenormētu” aprēķina periodu. Dzesēšanai nepieciešamā enerģija tiek aprēķināta programmā lietotāja uzdotam dzesēšanas perioda ilgumam kalendārā gada laikā, bet šis aprēķins nav detalizēts īsiem laika periodiem.

Programma paredzēta nesaistītu vairākzonu aprēķinu ar 1 - 3 apkures/dzesēšanas zonām veikšanai. Katrā no zonām iespējams aprēķināt gan apkuri un dzesēšanu, gan arī tikai vienu no tām (piem., vienā zonā - tikai dzesēšanas aprēķins, otrā - tikai apkures aprēķins, bet trešajā gan dzesēšanas, gan apkures aprēķins). Ja kādā zonā tiek veikts gan apkures, gan dzesēšanas aprēķins, tad ģeometriski (telpiski) apkures un dzesēšanas zonas 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.

Programma *EFA2* lietotājam piedāvā arī virkni papildus ērtību:

- 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 izklājloksnē (sākumlapā) dots marķējuma skaidrojums;
- izklājloksnēs tiek veikta lietotāja ievadāmo datu loģiskā kontrole;
- daudziem lielumiem piemērotas vērtības var izvēlēties no pievienotajiem sarakstiem vai tabulām;
- var veikt daudzslāņainu un saliktu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības *U* aprēķinus;
- papildus iespējams veikt energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu saimnieciskā izdevīguma aprēķinu.

Jānorāda, ka pēc jauno MK noteikumu Nr. 348 pieņemšanas šī programmas versija pašreiz vairs netiek uzturēta, jo tās vietā tiek piedāvāta mūsdienīga internetā bāzēta aprēķinu programma *HeatMod6* ar elastīgākām datu ievades un papildus aprēķinu iespējām.

### 6.2.2. HeatMod6

Programma *HeatMod6* (6.versija kopš 2011.g., pirmā versija - 2001.g.) ir tīmeklī bāzēta energoefektivitātes aprēķina programma, ēkas matemātiskā modeļa izveidei un energoefektivitātes aprēķinam - sākotnēji saskaņā ar MK noteikumiem Nr.39, pašreiz atbilstoši aktuālajiem MK noteikumiem Nr. 348. Var izmantot vienmērīgo mēneša (ar kopējo aprēķina periodu 12 mēneši) un sezonas aprēķina metodi (skat. p. 6.1). Šīs programmas izstrāde un pilnveidošana veidoja daļu no laika periodā no 2011. – 2013.g. realizētā ERAF līdzfinansētā projekta darbiem.

Programmā *HeatMod6* pašreiz nodrošina visu līdzšinējās programmas *EFA2* funkcionalitāti, bet nodrošina atbilstību MK noteikumiem Nr. 348 (skat. p. 6.2.1), kā arī sniedz virkni papildus iespēju:

- iespēju izvēlēties vienmērīgās metodes mēneša vai sezonas aprēķinu;
- piekļuvi datiem no jebkuras mūsdienīgas ierīces (dators, *Ipad*, *smartphone*, u.t.t.);
- neatkarību no operētājsistēmas (*Windows*, *Linux*, *MacOS*, *ChromeOS*, *Android*, u.c.);
- resursu nenoslogošanu, jo programma nav jāinstalē;
- datu glabāšanas drošību;
- vienmēr aktuālu aprēķina algoritmu un nosacījumus, atbilstoši aktuālajām izmaiņām normatīvajos dokumentos;
- *pdf* formāta energosertifikāta sagatavošanu un izdruku;

- individuālu datu bāzu un konstrukciju modeļu izveidi, aprēķināto projektu glabāšanu praktiski neierobežotā apjomā;
- iespēju veikt papildus aprēķinus (piemēram, siltuma caurlaidība konstrukcijām, kas atrodas saskarē ar grunti);
- iespēju iegūt aprēķina rezultātus vizuāli uzskatāmā grafiku un diagrammu formā.

Tā kā 2014.g. pirmajā pusē gaidāmas izmaiņas LBN 002-01 nosacījumos - normatīvo un maksimālo būvkonstrukciju siltuma caurlaidības vērtību samazinājums, kā arī gaisa apmaiņas nosacījumu pie 50 Pa spiedienu starptības izmaiņas, tad atbilstoši tam paredzēta šīs programmas modifikācija. Bez tam nākamā gada pirmajā pusē paredzēts programmu papildināt ar vienkāršā stundas dinamiskā aprēķina bloku, lai nodrošinātu iespēju veikt precizētus aprēķinus arī zema energopatēriņa ēkām (ar sezonas apkures patēriņu mazāku par 50 kWh/m<sup>2</sup>) un analizēt it īpaši ar saules starojuma ietekmi un dzesēšanu vasaras periodā saistītos efektus.

### 6.2.3. PHPP 7.1.

Programma *PHPP 7.1 (The Passive House Planning (Design) Package, 7.1 versija 2012.g., pirmā versija 1998.g.)* tā pat kā *EfA* ir *MS Excel* vidē veidota 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) un tās sertificēšanu atbilstoši „pasīvās ēkas standartam”. Jānorāda, ka runa te nav par Eiropas standartu, bet gan vienas organizācijas izveidotu nosacījumu sistēmu, kas pietiekami plaši ir akceptēta un tiek izmantota Eiropā. „Pasīvās ēkas” pamatnosacījums ir īpaši labi siltumizolēta ēka, kurā apkurei izmanto atjaunojamus resursus. Pirmās idejas par nosacījumiem sezonas enerģijas bilancei publicētas Šveicē 1980-to gadu vidū, to autors C. U. Brunnens. Metode pirmo reizi ieviesta 1988.gadā Šveicē. No 1989.g. nozīmīgi energoefektīvās ēkas idejas attīstību veicināja Wolfgangs Feists Vācijas institūtā „*Wohnen und Umwelt*” (vācu val. – Mājokļu un vides institūts). Gada siltumenerģijas patēriņš uz apkurināmo platību “pasīvai ēkai” Eiropā (Vācijā) nedrīkst pārsniegt 15 kWh/m<sup>2</sup>; bet ziemeļvalstīs - 25 kWh/m<sup>2</sup>. Programmas un sertifikācijas prasības izstrādātas „*Passive House Institute*” (pasīvo ēku institūts), kura dibinātājs arī ir Wolfgangs Feists (Vācija, Darmštate, 1996.g.).

*PHPP 7.1.* aprēķina pamatā ir visas ēkas kā vienas zonas aprēķins, izmantojot vienmērīgo mēneša (aprēķina periods 12 mēneši) vai sezonas aprēķina metodi. Programmā ir iespējams definēt vienu papildus zonu ar atšķirīgu temperatūru, kas paredzēta kāpņu telpas parametru definēšanai.

Veicot „pasīvās ēkas” ar ļoti lielu laika konstanti energoefektivitātes aprēķinu saskaņā ar standartu EN 13790, rezultāta precizitāte, ja salīdzina ar aprēķinu „parastai ēkai”, atšķiras nenozīmīgi – 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.

Salīdzinot programmu *EFA2* un *HeatMod6* funkcionalitāti ēku energoefektivitātes aprēķiniem, jānorāda, ka programma *PHPP 7.1.* nodrošina:

- klimatisko datu izvēli dažādu valstu pilsētām no datu bāzes un individuālu datu bāzes papildināšanas iespēju;
- papildus detalizētus aprēķinus siltuma zudumiem caur grunti (piem., ņemot vērā gruntsūdeņu ietekmi);
- detalizētu loga konstrukcijas  $U$ -vērtības noteikšanu (piem., ņemot vērā loga ģeometriju, orientāciju, rāmju garumu un platumu,  $U_g$  un  $U_f$  vērtības, kā arī termiskos tiltus, kas atkarīgi no loga konstrukcijas iebūvēšanas veida);
- 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 arī:

- aprēķinus, kas nepieciešami ēkas mikroklimata kontrolei (piem., telpu pārkaršanas biežums, detalizēts siltuma ieguvumu aprēķins atsevišķi dzīvojamām un nedzīvojamām ēkām u.c.);
- 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.);
- inženiertehnisko iekārtu datu bāzes un aprēķiniem nepieciešamos raksturlielumus.

Teiktais uzskatāmi parāda, ka šīs programmas funkcionalitāte, protams, ir daudz plašāka, nekā iepriekš minētajiem rīkiem *EfA* un *HeatMod*, tomēr jānorāda, ka *PHPP* tieši nenodrošina:

- iespēju veikt ēku energoefektivitātes aprēķinu atbilstoši Latvijā spēka esošajai ēku energoefektivitātes aprēķina metodei;

- risinājumu atbilstības pārbaudi LBN 002-01 nosacījumiem un

- energosertifikāta sagatavošanu.

To lietotāji, izmantojot *PHPP* bieži piemirst. Bez tam jāatceras, ka „pasīvo ēku standarts” nav ne Eiropas standarts (EN), ne arī kādā Latvijas normatīvajā dokumentā fiksēts nosacījumu kopums. Tādējādi *PHPP* izmantošana un ēku atbilstoša sertifikācija ir privāta rakstura pasākums, bez jebkādam Latvijas likumdošanā un normatīvajos dokumentos fiksētām konsekvencēm.

Šādu brīvprātīgu ēku energoefektivitātes un ilgtspējas izvērtēšanas sistēmu (kuras bieži sauc par standartiem) ar atšķirīgiem akcentiem pasaulē ir pietiekami daudz. Piemēram var minēt kaut vai Lielbritānijā izstrādāto sistēmu *BREEAM*, kura tika adaptēta arī Latvijas apstākļiem, bet Latvijā praktiski netiek lietota (skat. arī 8. nodaļu). Tādējādi nenoliedzami ir lietderīgi veidot aprēķinu rīkus, kas pilnībā saskaņoti gan ar Eiropas standartiem, gan Latvijas normatīviem, kā arī veikt to pārbaudes un nacionāla līmeņa licencēšanu energoefektivitātes aprēķiniem.

#### 6.2.4. Aprēķinu piemērs

Lai salīdzinātu minēto programmu funkcionalitāti un ar tām iegūtos rezultātus, tika veikti aprēķini dažāda veida ēkām. Tabulā 6.1 apkopoti ģeometriskie ieejas dati vienam no aprēķinu piemēriem – nerenovētai sērijveida (464. sērija) daudzdzīvokļu ēkai, bet tabulā 6.2 apkopoti galvenie rezultāti un atšķirības starp tiem (atšķirības % norādītas pēdējā kolonā iekavās). Iegūtie

rezultāti parāda, ka galvenās atšķirības nosaka būtiski lielāki solārās enerģijas ieguvumi programmā PHPP, izmantojot tur pieejamos Viļņas klimatiskos datus. Vienādojot solāros ieguvumus, apkures siltuma enerģijas atšķirības ir nelielas - aptuveni 3%. Kā jau bija gaidāms, salīdzinošie aprēķini apstiprina visu šo programmu principiālo piemērotību energoefektivitātes aprēķinam ēkām ar energopatēriņu apkurei virs 50 kWh/m<sup>2</sup> gadā, t.i., diapazonā, lietošanai kurā programmas *EfA* un *HeatMod* pašreiz paredzētas un pārbaudītas.

Tabula 6.1. 464. sērijas daudzdzīvokļu ēkas ģeometriskie dati.

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

Tabula 6.2. Sākuma dati un aprēķina rezultāti.

Parametrs	Programma		
	A	B	D
Nosaukums	Mērv.	EFA2, HeatMod6	PHPP 7.1. (atšķirība, %)
<b>Sākuma dati</b>			
Solārā starojuma dati	-	Rīga, Latvija	Viļņa, Lietuva
Apkures sezonas ilgums	dnn	pieņemts 224	224 (+0,0 %)
Gada vidējā ārējais temperatūra	°C	+6.2	+6.2 (+0,0 %)
<b>Aprēķina rezultāti</b>			
Kopējie siltuma zudumi ar pārvadi apkurei	kWh/m <sup>2</sup> gadā	130,0	126,2 (-3 %)

Kopējie siltuma zudumi ar ventilāciju apkures periodā	kWh/m <sup>2</sup> gadā	57,0	54,7 (-4,04 %)
Kopējie siltuma zudumi apkures daļai	kWh/m <sup>2</sup> gadā	187,0	180,8 (-3,32 %)
Kopējie iekšējie siltuma ieguvumi apkures periodā	kWh/m <sup>2</sup> gadā	76,8	76,9 (+0,13 %)
Saules siltuma ieguvumu summa apkures periodā	kWh/m <sup>2</sup> gadā	11,1	20,5 (+84,68 %)
Kopējais siltuma ieguvums apkures daļai	kWh/m <sup>2</sup> gadā	88,0	97,5 (+10,80 %)
Ieguvumu izmantošanas faktors apkurei	%	98	98 (+0,00 %)
Apkurei nepieciešamā enerģija	kWh/m <sup>2</sup> gadā	101,0	85,5 (-15,35 %)
Koriģēta apkurei nepieciešamā enerģija (pieņemot vienādus saules siltuma ieguvumus apkures periodā 20,5 kWh/m <sup>2</sup> gadā)	kWh/m <sup>2</sup> gadā	88,3	85,5 (-3,17 %)

### 6.2.5. Energoapatēriņa aprēķina ar *HeatMod6*, izmantojot mēnešu metodi, raksturojums

Sākotnēji tika izveidota energoefektivitātes aprēķina metodika un programmatūra, kas izmantoja sezonas siltuma bilanci, bet maza energoapatēriņa ēkām ir nepieciešams veikt precīzākus apsilšanas un dzesēšanas aprēķinus, tādēļ šī sezonas aprēķina metode tika pilnveidota un detalizēta, izmantojot mēneša siltuma bilances modeli, kas atbilst standarta LVS EN ISO 13790 nosacījumiem. Atšķirībā no sezonas metodes, mēnešu metode veic nevis vienu energoapatēriņa aprēķinu, bet gan energoapatēriņa 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);
- citi dati, kas var būt atšķirīgi dažādos mēnešos (ventilācijas gaisa plūsmas piegādes temperatūra, noēnojums, ieguvumu izmantošanas faktors 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.

Tā kā mēnešu metodes gadījumā tiek veikti vairāki aprēķini, nevis viens, līdz ar to arī aprēķinu rezultāti atšķiras dažādos mēnešos. Tāpēc arī *HeatMod6* ekrānformas vairs nevar būt tādas pašas, kā sezonas aprēķinā, jo katra ekrānforma var saturēt gan tādus datus, kuri nemainās pa mēnešiem un ir uzdodami vienu reizi, gan tādus datus, kur mainās atkarībā no mēneša vai ir uzdodami katram mēnesim. Ja ekrānforma satur aprēķina rezultātus, kuri ir atkarīgi no mēneša, 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 atšķirīgi katram mēnesim, tad tajā tiek attēloti ievadlauki ar iespēju šo datus ievadīt veikt.

Savukārt, veicot aprēķinus ar mēnešu metodi, vairs nav nepieciešami visi tie dati, kas ir nepieciešami sezonas aprēķina metodei. Piemēram, vairs nav nepieciešamība uzdot vidējo saņemto

saules starojumu pa debespusēm, jo šāda informācija tiek iegūta no katra mēneša klimata datiem. Arī apkurei vai dzesēšanai nepieciešamais dienu skaits vairs netiek uzdots, bet gan tiek aprēķināts, ņemot vērā to, vai attiecīgajā mēnesī ir nepieciešama apkure un/vai dzesēšana.

Datu atšķirības parādās ne tikai ievades 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 enerģijas ieguvumu sadalījumus;
- sertifikāta pielikums satur visus ievaddatus, attiecīgi arī tādus, kuri ir ievadīti pa mēnešiem.

### 6.3. Ēku energoefektivitātes aprēķina programmas *HeatMod6* apraksts

#### 6.3.1. Ievads

Ēku energoefektivitātes aprēķina programma ir veidota saskaņā ar Latvijā spēkā esošiem jaunākajiem normatīvajiem aktiem ēku energoefektivitātes jomā:

- Ēku energoefektivitātes likums (jaunā redakcija spēkā no 09.01.2013.);
- Ēkas energoefektivitātes aprēķina metode, MK noteikumi Nr.348 (spēkā no 25.06.2013.);
- Noteikumi par ēku energosertifikāciju, MK noteikumi Nr.383 (spēkā no 19.07.2013.);
- Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 003-01 "Būvklimatoloģija" (spēkā no 01.09.2001., ar 2005.g. grozījumiem);
- Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-01 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika" (spēkā no 01.01.2003., ar 2004., 2006. un 2010. gadu grozījumiem). Šiem noteikumiem plānoti grozījumi 2014.g. pirmajā pusē.

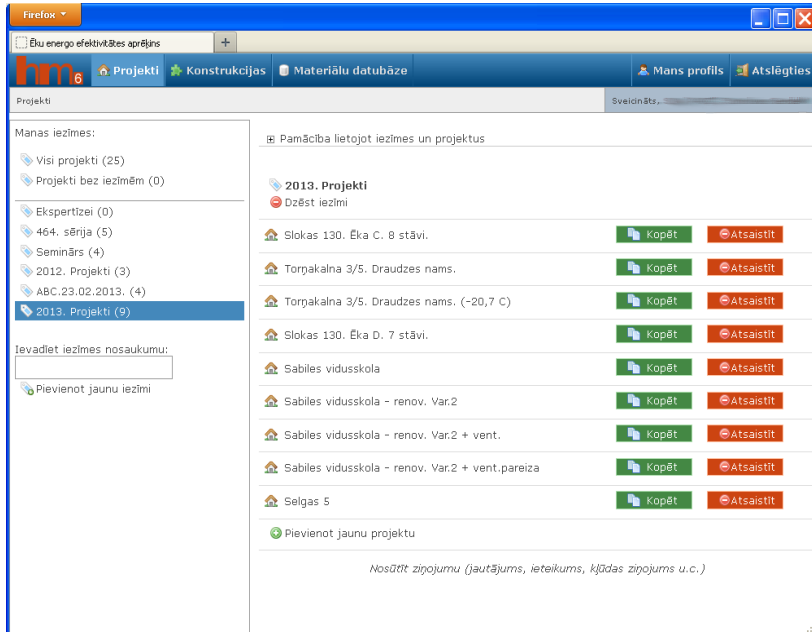
Programma nodrošina ēkas energoefektivitātes aprēķinu apkures un dzesēšanas periodiem, ņemot vērā pārvades un ventilācijas zudumus, ieguvumus no Saules un iekšējiem avotiem, pārtraukumus un brīvdienu režīmu u.c. nepieciešamos parametrus, kā arī energosertifikāta un tā pielikumu automātisku aizpildīšanu.

Tā kā vairākos iepriekš minētajos normatīvajos aktos tika atklātas neprecizitātes un kļūdas, tad neatbilstību novēršanai tika izmantoti atbilstošie oriģinālie Eiropas standarti (LVS EN), it īpaši standarts LVS EN 13790:2009 „Ēku energoefektivitāte. Telpu apsildīšanas un dzesēšanas energopatēriņa aprēķins”, uz kura galvenokārt balstīta MK noteikumu Nr. 348 „Ēkas energoefektivitātes aprēķina metode” izveide.

#### 6.3.2. Pamatinformācija

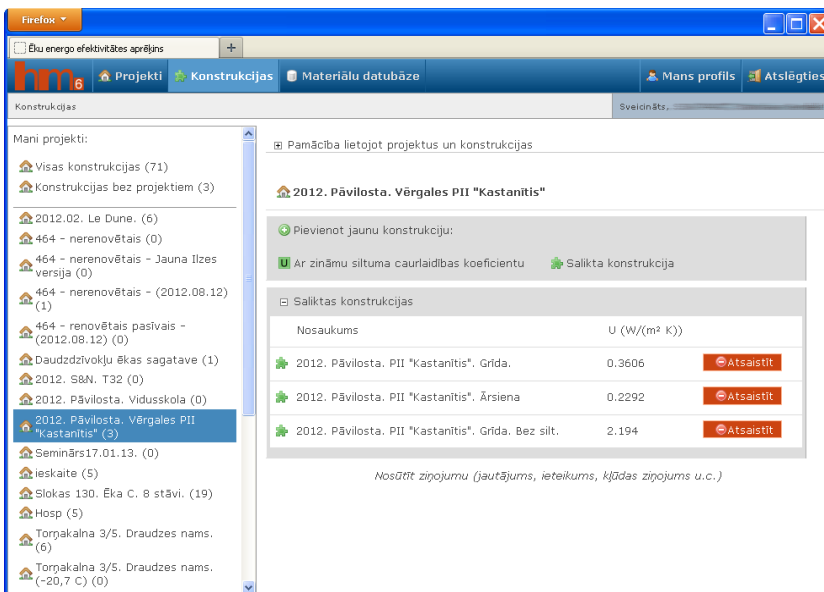
Programma sastāv no vairākām augšējā līmeņa izvēlēm:

- **Projekti** (attēls 6.2.), kur tiek glabāti visi lietotāja ģenerētie aprēķinu projekti, kā arī paraugprojekti. Šeit ir iespējams arī veidot īpašas iezīmes, pēc kurām grupēt projektus. Viens projekts var saturēt vienas ēkas ar vairākiem blokiem gan apkures, gan arī dzesēšanas aprēķinu datus.



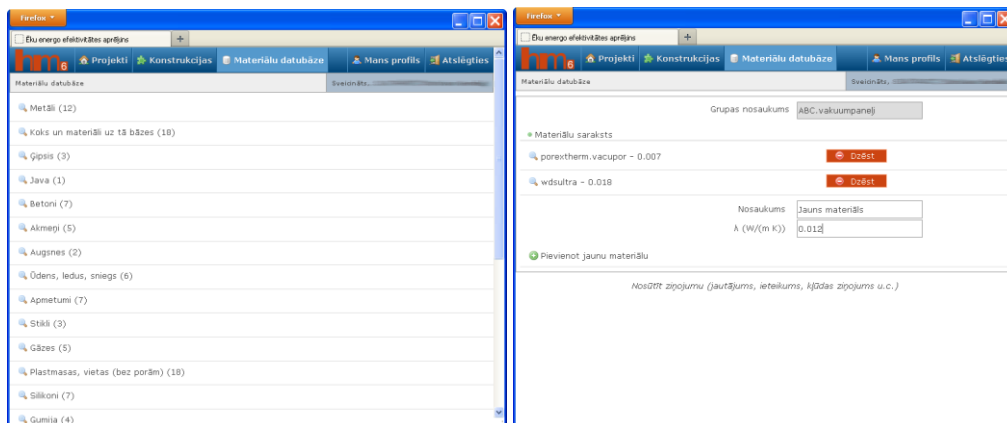
Attēls 6.2. HeatMod: projektu saraksts.

- Konstrukcijas** (attēls 6.3) ar lietotāja uzdotajām siltuma caurlaidības vērtībām  $U$  un sarežģītākām saliktajām būvkonstrukcijām, kuru siltuma caurlaidības vērtības tiek izrēķinātas, balstoties uz izmantoto materiālu parametriem. Konstrukcijas var būt kā piederošas kādam noteiktam projektam, tā arī var nebūt saistītas ar to – pēdējā gadījumā minēto konstrukciju ir iespējams lietot aprēķinos jebkurā no projektiem.



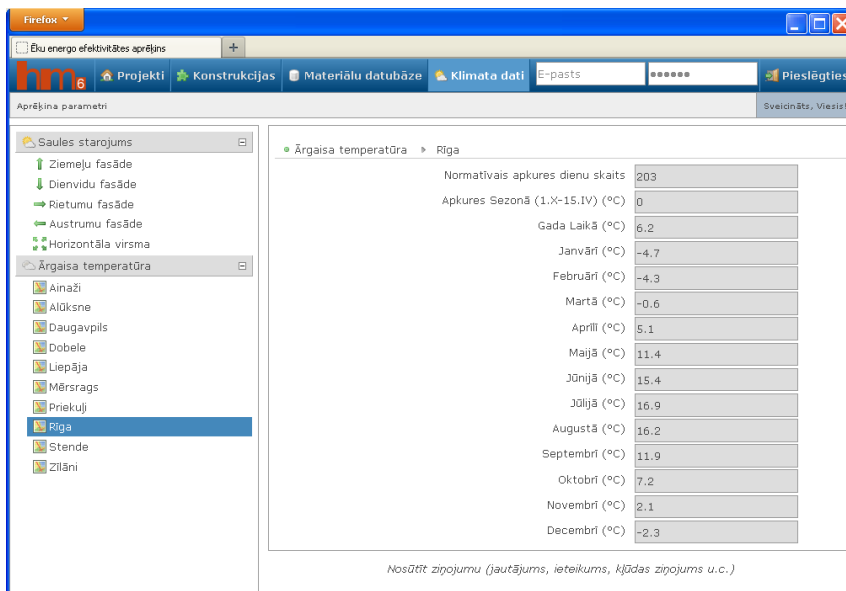
Attēls 6.3. HeatMod: konstrukciju saraksts.

- **Materiālu datubāze** (attēls 6.4), kurā grupētā veidā ir apkopoti Latvijas Būvnormatīva LBN 002-01 dati par dažāda veida materiāliem. Lietotājam ir iespēja arī uzdot savus materiālus un veikt to grupēšanu brīvā formā, uzdodot nosaukumu un siltuma vadītspējas koeficienta vērtību.



Attēls 6.4. HeatMod: materiālu saraksts un to uzdošanas logs.

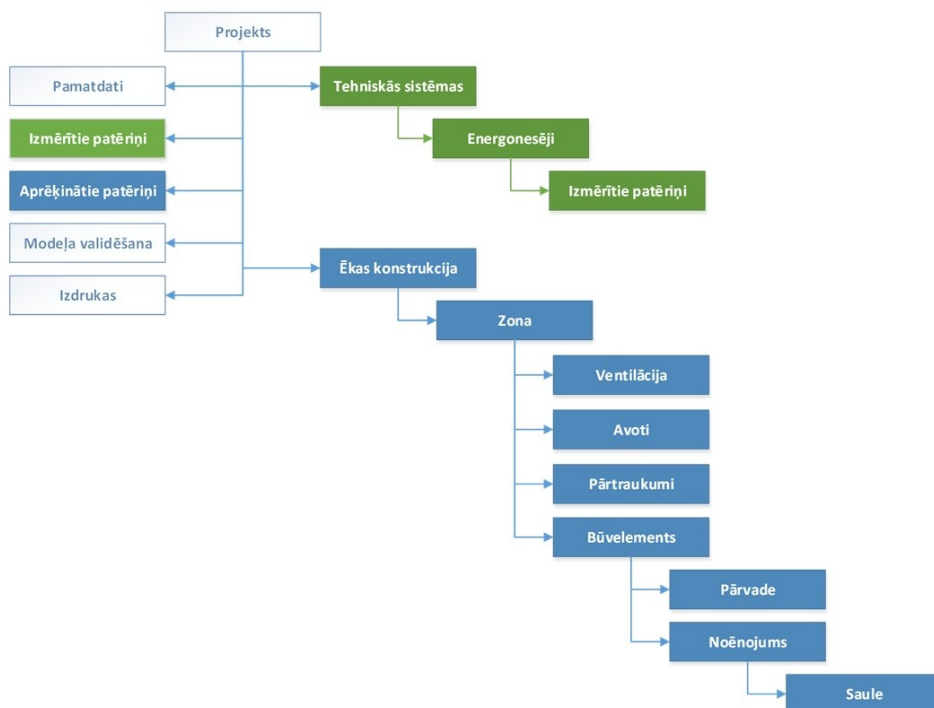
- **Klimata dati** (attēls 6.5) nodrošina iespēju apskatīt informāciju par Saules starojuma intensitāti uz dažādām ēkas fasādēm un ārējais temperatūru atsevišķās Latvijas pilsētās, to sadalījumu pa mēnešiem un apkures sezonā, kā arī apskatīt datus par normatīvo apkures dienu skaitu atsevišķās Latvijas pilsētās.



Attēls 6.5. HeatMod: izvēlētās vietas mēneša temperatūru dati.

### 6.3.3. Darbs ar projektiem

Projekts satur visu informāciju par ēku, kurai tiek veikts energoaudits. Shematiski vienā projektā ietilpstošo ievades datu bloki parādīti attēlā 6.6.



Attēls 6.6. HeatMod: projektā ietilpstošo datu bloku vispārējā shēma.

### 6.3.4. Pamatdati

Uzsākot darbu ar konkrētās ēkas projektu, lietotājs aizpilda projekta **Pamatdatus** – uzdod sākuma uzstādījumus, kā arī ievada ēkas, ēkas īpašnieka, neatkarīgā eksperta un energoaudita pasūtītāja informāciju:

- **Sākuma uzstādījumi** (attēls 6.7) – nodrošina iespēju ievadīt projekta nosaukumu, aprakstu, kā arī izvēlēties aprēķinu veidu (apkurei, dzesēšanai, apkurei un dzesēšanai, pa mēnešiem), papildus sezonas aprēķinam ļaujot norādīt Saules starojuma intensitāti pa debess pusēm, ja tā ir atšķirīga no standarta vērtībām, kas tiek piedāvātas izvēlnē „Klimata dati”;
- **Ēkas dati** (attēls 6.8) – nodrošina iespēju ievadīt tādas ēkas datus, kā ēkas stāvoklis (jauna, renovēta, esoša), ēkas tips, adrese, kadastra numurs, papildus ļaujot norādīt ēkas raksturojumu atspoguļošanai sertifikātā, kā arī ēkas atrašanās vietas datus un ārējais temperatūru sezonas aprēķinam, ja tā atšķiras no standarta vērtībām, kas tiek piedāvātas izvēlnē „Klimata dati”;
- **Ēkas īpašnieks** – nodrošina iespēju ievadīt datus par ēkas īpašnieku kā juridisku vai fizisku personu, tai skaitā tās kontaktinformāciju;

- **Neatkarīgas eksperts** – nodrošina iespēju ievadīt datus par neatkarīgo ekspertu un viņa pārstāvēto firmu;
- **Energoaudita pasūtītājs** – nodrošina iespēju ievadīt datus par energoaudita pasūtītāju, kā juridisku vai fizisku personu, tai skaitā tās kontaktinformāciju.

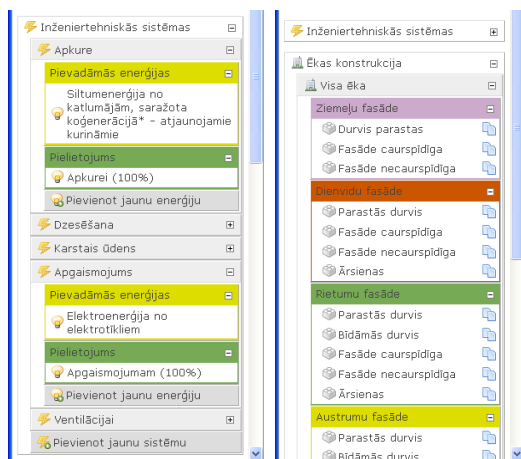
Attēls 6.7. HeatMod: projekta sākuma uzstādījumi.

Attēls 6.8. HeatMod: projekta ēkas dati.

### 6.3.5. Projekta dati

Pēc projekta pamatdatu ievadīšanas lietotājs veic detalizētu energoaudita datu aizpildīšanu, kas tiek nosacīti sadalīta 2 daļās (attēls 6.9):

- **Inženiertehniskās sistēmas** (attēls 6.9, pa kreisi) – ēkā izmantojamo inženiertehnisko sistēmu (apkure, dzesēšana, karstais ūdens, mehāniskā ventilācija, apgaismojums) apkopojums, kurā tiek ievadīti izmērītie (vai projektējamie) patēriņi, kas tālāk tiek apkopoti projekta sadaļā „Izmērītie (projektējamie) patēriņi”; šajā posmā ir integrēts arī CO<sub>2</sub> emisiju aprēķins;
- **Ēkas konstrukcija** (attēls 6.9, pa labi) – ēkā patērējamās enerģijas sadalījuma pa ieguvumiem un zudumiem apkopojums (tiek sastādīta visas ēkas siltuma bilance), kas tiek noteikts bāzējoties uz lietotāja uzdoto informāciju par zonu un būvelementu datiem, ievērojot Latvijas un Eiropas normatīvo dokumentu prasības ēku energoefektivitātes noteikšanai.



Attēls 6.9. HeatMod: divas projekta daļas – inženiertehniskās sistēmas un ēkas konstrukcija.

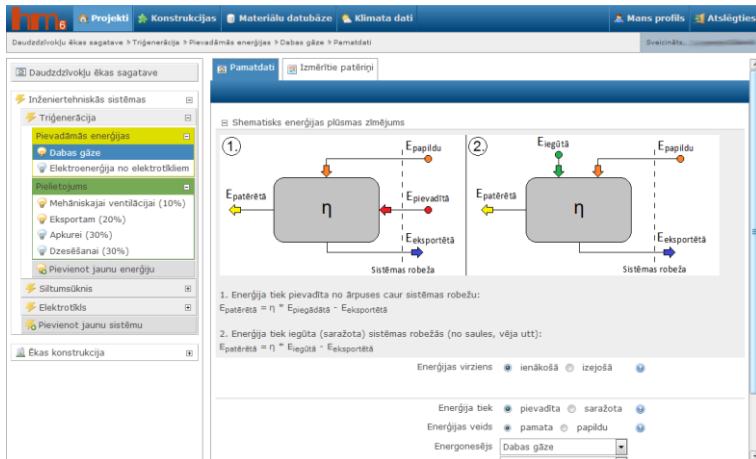
**Inženiertehniskās sistēmas dati.** Lietotājam ir iespēja pievienot vienu vai vairākas inženiertehniskās sistēmas, kas apkalpo auditējamo ēku. Katrai no inženiertehniskajām sistēmām ir iespēja pievienot tajā ieejošās un no tās izejošās enerģijas. Ieejošajām enerģijām ir iespēja norādīt mērījumu (projektējamos) datus sadalījumā pa gadiem, savukārt izejošajām enerģijām, pievienojot attiecīgos gadus. Patēriņa daudzumi tiek aprēķināti automātiski atkarībā no inženiertehniskās sistēmas parametriem (izejošajām enerģijām papildus ir iespēja norādīt klimatisko apstākļu korekciju apkurei).

Saraksts ar inženiertehniskajām sistēmām tiek attēlots kreisajā malā koka struktūrā (skat. attēlu 6.10). Tajā ietilpst katras sistēmas nosaukums un apraksts, kā arī sekojošas sadaļas:

- **Pamatdati** – konkrētās enerģijas tādi dati, kā virziens (ieejošā vai izejošā); ieejošajām enerģijām: tips (pievadītā vai saražotā), veids (pamata vai papildu), energonesējs (dabas gāze, koksne, u.c.), patēriņa noteikšanas veids (mērījumi, tvertne, baloni u.c.); izejošajām enerģijām: veids (primārā vai koģenerētā), energonesēja izmantošanas veids (apkurei,

dzesēšanai, mehāniskajai ventilācijai, karstā ūdens piegādei, apgaismojumam, eksportam), lietderības koeficients (COP u.c.).

- **Izmēritie patēriņi** (skat. attēlu 6.11) – konkrētā enerģijas veida patēriņa dati sadalījumā pa gadiem, ar iespēju katram gadam ieejošajām enerģijām pievienot enerģijas patēriņu atbilstoši norādītajam patēriņa noteikšanas veidam (mērījumi, tvertne, baloni u.c.) un izejošajām enerģijām aplūkot enerģijas lietojumu attiecīgajam mērķim ar iespēju norādīt klimatisko apstākļu korekciju apkurei.



Attēls 6.10. HeatMod: inženiertehnisko sistēmu enerģijas plūsmas skice un dati.

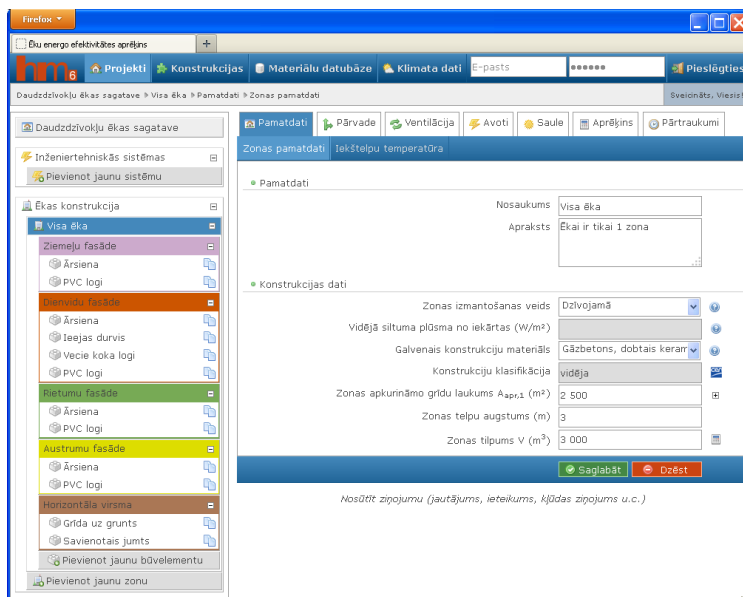
The first screenshot shows the 'Izmēritie patēriņi' (Measured consumption) data input screen. It includes fields for 'Mēģuma gads' (2013), 'Perioda sākums (Wh)' (2 500 000), 'Perioda beigas (Wh)' (6 500 000), and 'Enerģijas patēriņš Q<sub>h</sub> (Wh)' (6 500 000). The second screenshot shows the calculation results for 'Mēģuma gads' 2013. It displays 'Enerģijas patēriņš Q<sub>h</sub> (Wh)' as 6 500 000 and a table for 'klimatisko aprēķinu korekcija' (climate correction) with columns for '1. Mēģuma gads' and '2. Normatīvo dati'. The table includes rows for 'Densu stāsts Q<sub>h,sp</sub> (Wh)', 'Iekšējās temperatūra (°C)', 'Vēlās ārējās temperatūra (°C)', and 'Grādu dienu skaits HDD (h·°C)', with values 200, 18, 0, 796, and 3 887 respectively. The total 'Koriģētais enerģijas patēriņš Q<sub>h</sub> (Wh)' is 125 134.

Attēls. 6.11. HeatMod: inženiertehnisko sistēmu dati – patēriņu uzdošana.

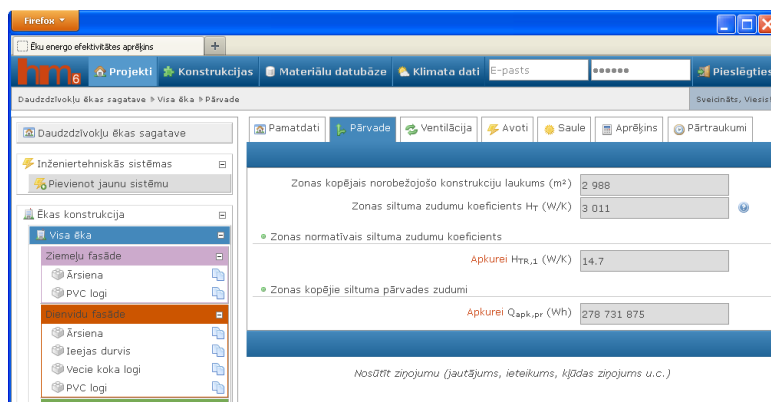
**Ēkas konstrukcijas dati.** Lietotājam ir iespēja pievienot vienu vai vairākas ēkas zonas (daļījumu nosaka saskaņā ar MK noteikumu Nr.348 „Ēkas energoefektivitātes aprēķina metode” prasībām), kuru ietvaros tiks aprēķināti siltuma zudumi un ieguvumi un citi energoefektivitāti raksturojošie lielumi, kā arī noteikti apkures un dzesēšanas pārtraukumi. Katrai no zonām ir iespējams pievienot vienu vai vairākus būvelementus ar tiem noteiktajiem parametriem pārvades zudumu noteikšanai. Katram no būvelementiem ir iespēja pievienot vienu vai vairākus noēnojumus saules starojuma ieguvumu noteikšanai.

Saraksts ar zonām un to būvelementiem sadalījumā pa debespusēm (ar iespēju kopēt būvelementus to ātrākai ievadīšanai) tiek attēlots Kreisajā malā - koka struktūrā. Katras zonas uzdošamie parametri ir šādi:

- **Pamatdati** (attēls 6.12) – nodrošina iespēju ievadīt tādus datus, kā nosaukums, apraksts, veids (dzīvojamā, biroju, u.c.), konstrukciju klasifikācija un materiāli, apkurināmo grīdu laukums, telpu augstums un tilpums, kā arī definēt zonas apkures un dzesēšanas uzstādīto iekšējās temperatūras.
- **Pārvade** (attēls 6.13) – nodrošina iespēju aplūkot ar pārvadi saistīto zudumu apkopojumu zonā (norobežojošo konstrukciju laukums, siltuma zudumu koeficients, normatīvais koeficients, kopējie siltuma zudumi), kas tiek aprēķināti no datiem par zonas būvelementiem.



Attēls 6.12. HeatMod: zonas pamatdati.

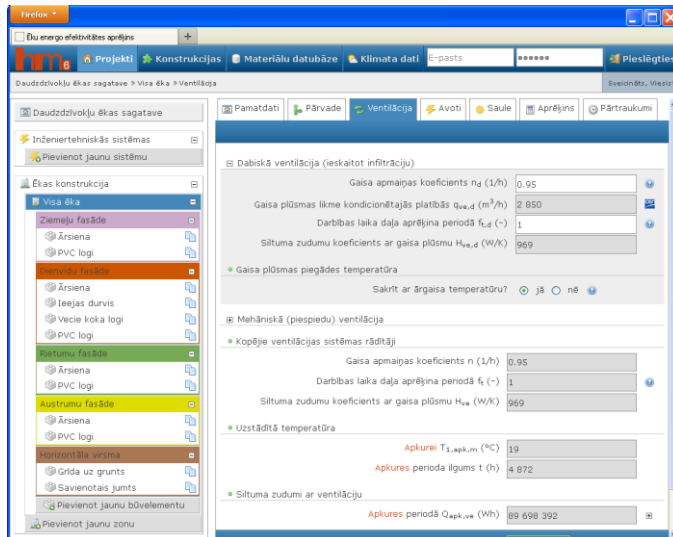


Attēls 6.13. HeatMod: zonas pārvades zudumu apkopojums.

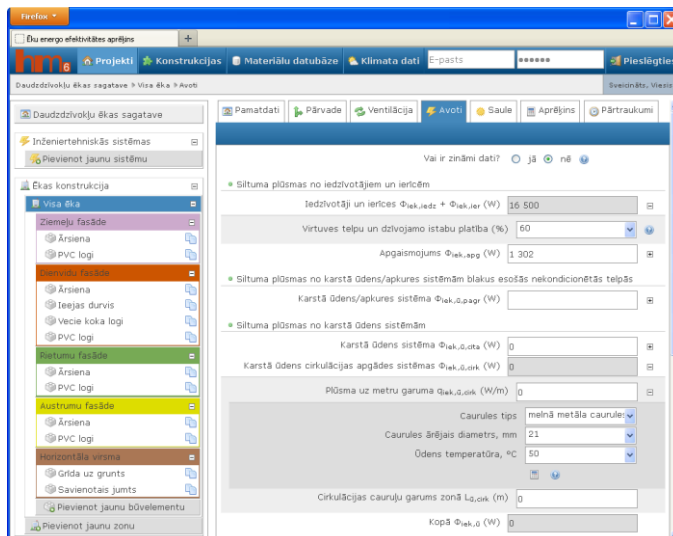
- **Ventilācija** (attēls 6.14) – nodrošina iespēju definēt ventilācijas parametrus zonā (gaisa apmaiņas koeficients, darbības laiks, siltuma zudumu koeficients, ārējais temperatūra, ja tā

ir atšķirīga no projekta līmenī definētās) un aprēķināt ar to saistītos zudumus (kopējo siltuma zudumu koeficientu un kopējos siltuma zudumus) gan dabiskajai, gan mehāniskajai ventilācijai.

- **Avoti** (attēls 6.15) – nodrošina iespēju definēt iekšējos siltuma avotus zonā un ar tiem saistītos lielumus (siltuma plūsmas no iedzīvotājiem un ierīcēm, apgaismojuma, karstā ūdens/apkures sistēmām, procesiem un priekšmetiem, apkures, gaisa kondicionēšanas un ventilācijas sistēmām), kā arī aprēķināt to kopējos siltuma ieguvumus.

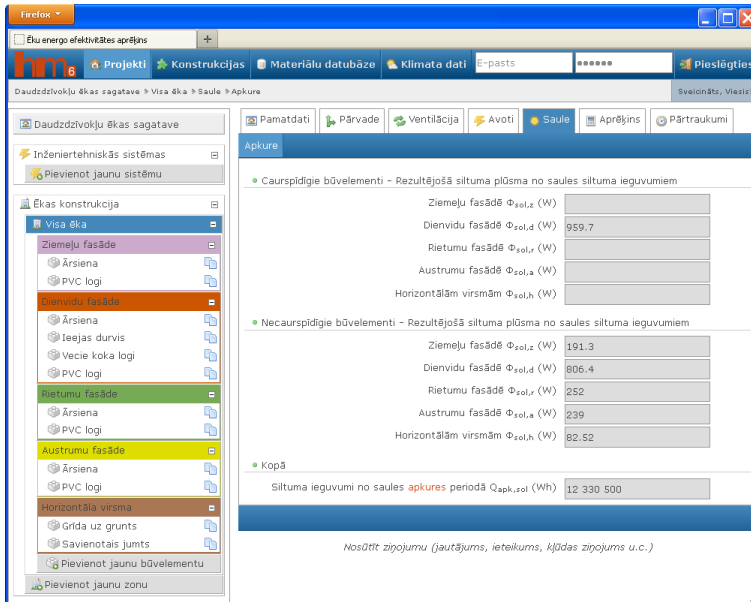


Attēls 6.14. HeatMod: zonas ventilācijas zudumu uzdošana.

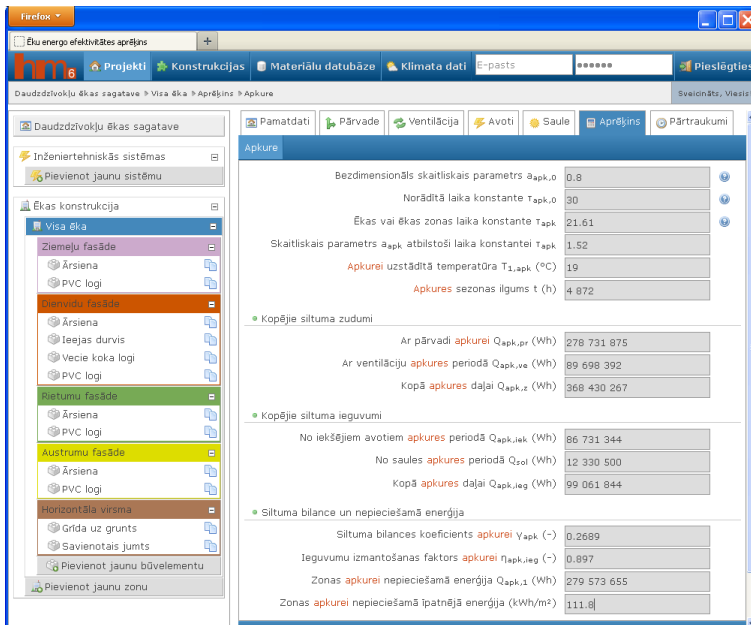


Attēls 6.15. HeatMod: zonas iekšējo avotu uzdošana.

- **Saule** (attēls 6.16) – nodrošina iespēju aplūkot ar saules starojumu saistītos ieguvumus zonā sadalījumā pa debespusēm un caurspīdīgajiem/necaurspīdīgajiem būvelementiem.
- **Aprēķins** (attēls 6.17) – nodrošina iespēju aplūkot energoaudita parametrus un aprēķina rezultātus zonai, t.sk. siltuma zudumus (pārvadei un ventilācijai), ieguvumus (no iekšējiem avotiem un saules), kā arī apkurei/dzesēšanai nepieciešamās enerģijas.

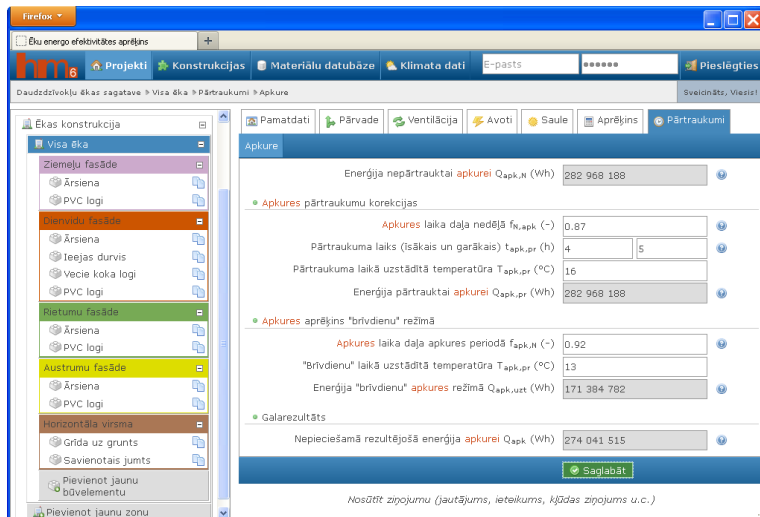


Attēls 6.16. HeatMod: zonas saules ieguvumu apkopojums.



Attēls 6.17. HeatMod: zonas kopējās siltuma bilances aprēķinu rezultāti.

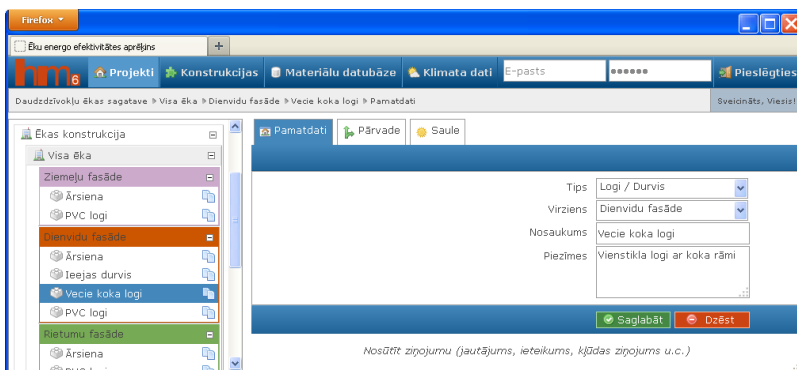
- **Pārtraukumi** (attēls 6.18) – nodrošina iesēju definēt pārtraukumus un „brīvdienas” zonā, tādējādi koriģējot kopējo nepieciešamo enerģiju apkurei un/vai dzesēšanai.



Attēls 6.18. HeatMod: zonas apkures pārtraukumu parametru uzdošana.

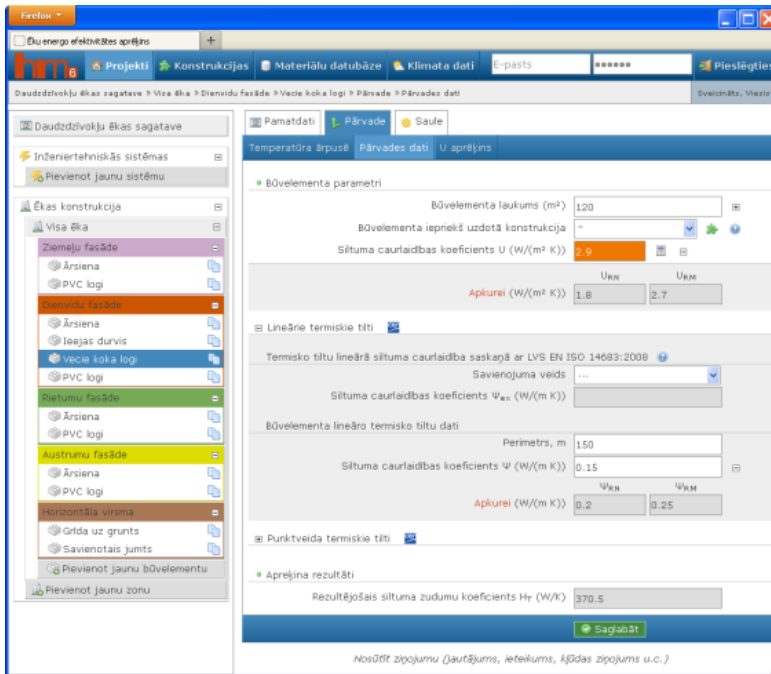
Zonas ietvaros katram no būvelementiem ir jāuzdod sekojošie parametri:

- **Pamatdati** (attēls 6.19) – nodrošina iespēju pievienot būvelementu un norādīt tā tipu (siena, logi, jumts u.c.) virzienu jeb debespusi, nosaukumu un aprakstu.

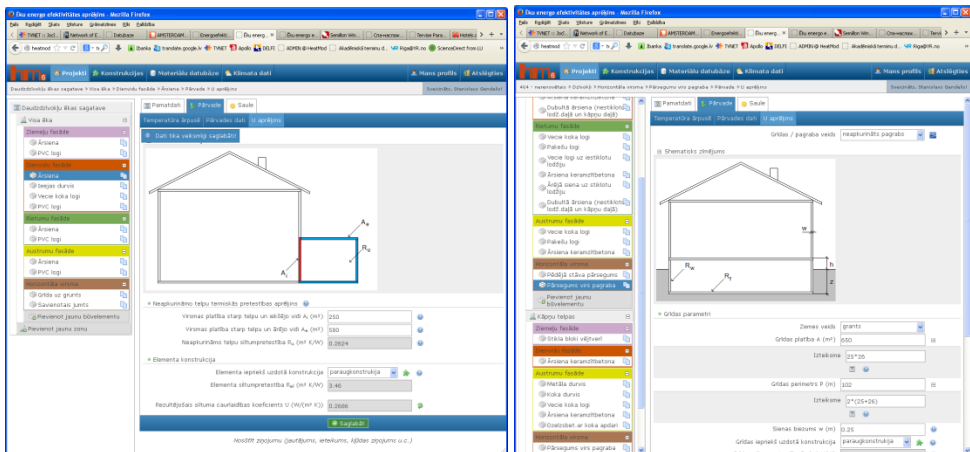


Attēls 6.19. HeatMod: būvelementa pamatdatu uzdošana.

- **Pārvade** (attēls 6.20) – nodrošina iespēju ievadīt temperatūru būvelementa ārpusē, ja tā nesakrīt ar projekta līmenī definēto, kā arī siltuma pārvades datus (būvelementa laukums, konstrukcija, siltuma caurlaidības koeficients, lineārie un punktteida termiskie tilti); ļauj aplūkot būvelementa aprēķināto kopējo siltuma zudumu koeficientu un, ja ir nepieciešams, veikt siltuma caurlaidības koeficienta detalizētāku aprēķinu (attēls 6.21), kas ir sevišķi noderīgi jumta konstrukciju, pagrabu un grīdu, kā arī blakus esošu neapkurināmo telpu gadījumos.

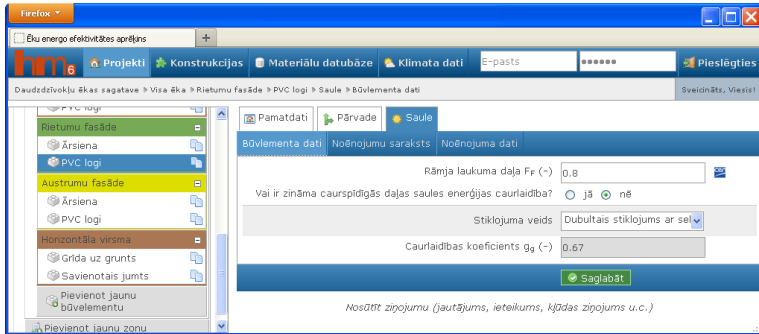


Attēls 6.20. HeatMod: būvelementa pārvades siltuma zudumu bāzes parametru uzdošana.

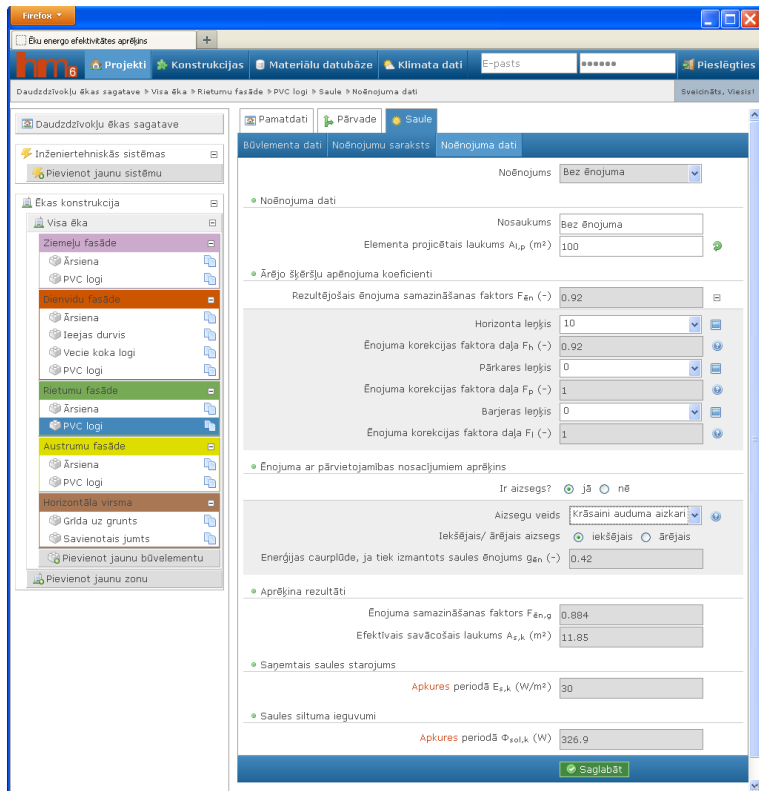


Attēls 6.21. HeatMod: būvelementa pārvades siltuma zudumu detalizētais aprēķins.

- **Saule** (attēls 6.22) – nodrošina iespēju ievadīt būvelementa parametrus, kas ļauj noteikt ar Sauli saistītos ieguvumus (caurspīdīgajiem būvelementiem: rāmja laukums, stiklojuma veids un caurlaidības koeficients; necaurspīdīgajiem būvelementiem: virsmas absorbcijas koeficients), kā arī definēt būvelementa noēnojumus (attēls 6.23), katram no tiem norādīt nepieciešamos parametrus (projicējošais laukums, ārējo šķēršļu noteiktie noēnojumi, aizsegi u.c.) un tā rezultātā noteikt no Saules saņemto starojumu un Saules siltuma ieguvumus attiecīgā noēnojuma apstākļos.



Attēls 6.22. HeatMod: būvelementa Saules siltuma ieguvumu aprēķins.



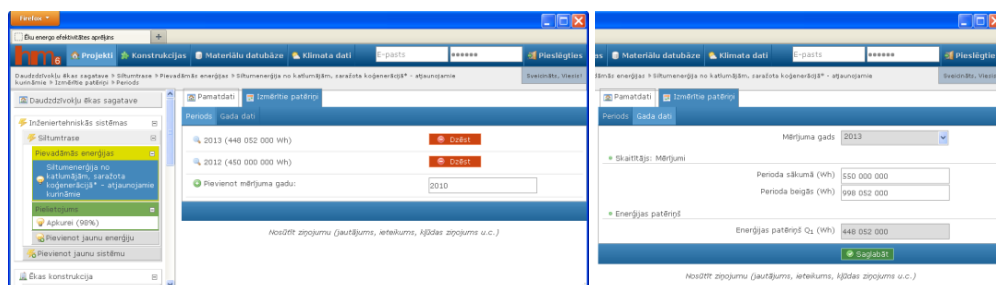
Attēls 6.23. HeatMod: būvelementa noņojuma datu uzdošana.

### 6.3.6. Izmērtie (projektējamie) dati

Visi inženiertehnisko sistēmu dati tiek apkopoti projekta sadaļā **Izmērtie (projektējamie) patēriņi** (attēls 6.24) gan griezumā pa gadiem, gan to vidējās vērtības (pievadītās un eksportētās enerģijas daudzumi, sistēmas iekšienē saražotās enerģijas daudzums, kopējais patērētais enerģijas daudzums):

- **Periods** – nodrošina iespēju apskatīt apkopotu sarakstu ar gadiem, kuros ir ievadīti izmērtie (projektējamie) dati ar iespēju apskatīt detalizētāk katra gada datus;

- **Gada dati** – nodrošina iespēju apskatīt konkrēta gada datus (pievadītās un eksportētās enerģijas daudzumi, sistēmas iekšienē saražotās enerģijas daudzums, kopējais patērētais enerģijas daudzums);
- **Vidējie dati** – nodrošina iespēju apskatīt vidējos pa gadiem datus (pievadītās un eksportētās enerģijas daudzumi, sistēmas iekšienē saražotās enerģijas daudzums, kopējais patērētais enerģijas daudzums).



Attēls 6.24. HeatMod: Izmērītie (projektējamie) dati.

### 6.3.7. Aprēķinātie dati

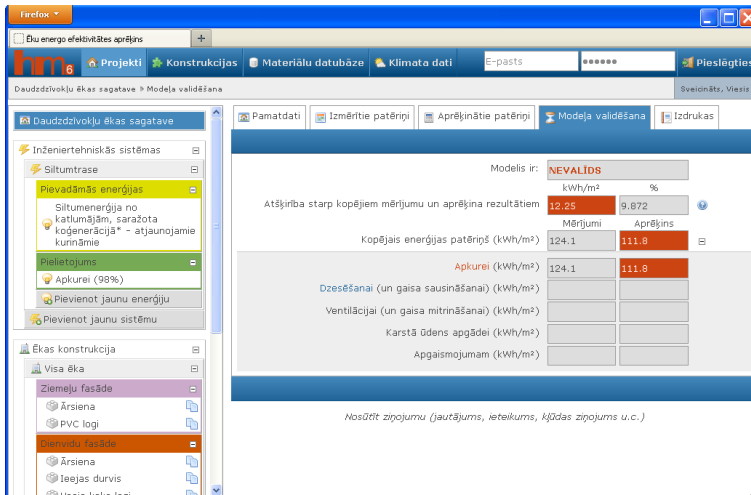
Visi ēkas konstrukcijas dati tiek apkopoti projekta sadaļā **Aprēķinātie dati**, ietverot šādas analīzes iespējas:

- Datu **apkopojums** (attēls 6.25) – nodrošina iespēju apskatīt apkopotus telpu tilpumu un apkurināmo grīdu laukumu, siltuma zudumu koeficientus, enerģijas patēriņa datus sadalījumā pa zudumiem (pārvaldes un ventilācijas) un ieguvumiem (iekšējiem un solārajiem), kā arī nepieciešamo enerģiju, ņemot vērā lietotājas uzdotos pārtraukumus un „brīvdienas”.
- **Datu vizualizācija** (attēls 6.26) – nodrošina iespēju apskatīt enerģijas patēriņa datus un to sadalījumus dažādu grafisko atskaišu formā. Tas atvieglo uzdoto datu vizuālo kontroli un palīdz atrast iespējamās kļūdas, ko viegli identificēt, savstarpēji salīdzinot būvelementu laukumu vai siltuma zudumu sadalījumu.

### 6.3.8. Modeļa validēšana

Atbilstoši energoaudita procedūrai, izmērīto (vai projektēto) un aprēķināto datu apkopojumiem jāsakrīt 10% relatīvās kļūdas robežās un 10 kWh/m<sup>2</sup> gadā absolūtās kļūdas robežās gan kopējam enerģijas patēriņam, gan tā sadalījumiem pa izmantošanas veidiem (apkure, dzesēšana, ventilācija, karstais ūdens un apgaismojums). Projekta sadaļa **Modeļa validēšana** nodrošina iespēju ērti un ātri pārliecināties, vai minētie nosacījumi ir izpildīti (attēls 6.27), lai varētu ģenerēt sertifikātu.



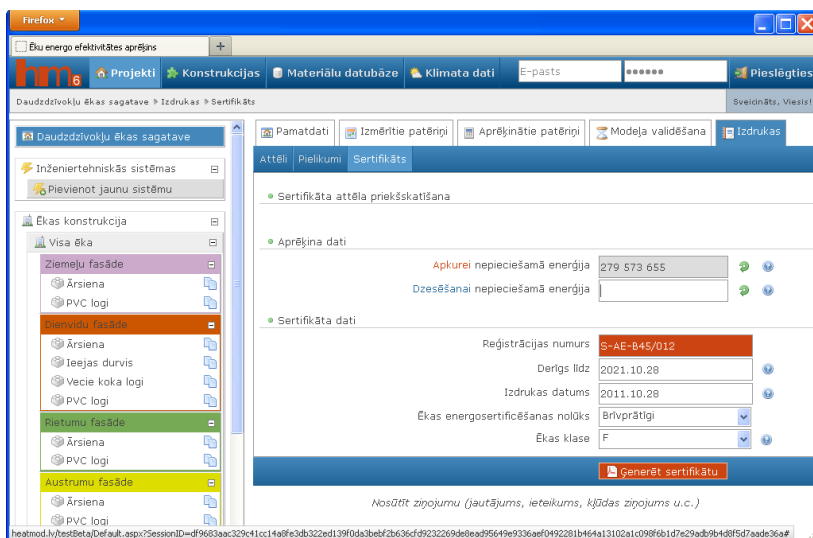


Attēls 6.27. HeatMod: modeļa validēšana no izmērītajiem (projektētajiem) un aprēķinātajiem datiem.

### 6.3.9. Izdrukas

Pēc tam, kad lietotājs ir pārliecinājies, ka visi dati ir savadīti un modelis ir validēts, ir iespēja veikt pēdējos soļus sertifikāta **Izdrukai**:

- **Attēli** – nodrošina iespēju augšupielādēt ēkas attēlus un izvēlēties kādu no tiem sertifikāta titullapai;
- **Pielikumi** – nodrošina iespēju augšupielādēt papildus pielikumus, kuri tiks pievienoti sertifikātam;
- **Sertifikāts** (attēls 6.28) – nodrošina iespēju ievadīt ar sertifikātu saistītus datus un ģenerēt sertifikātu (attēls 6.29) PDF formātā.



Attēls 6.28. HeatMod: ēkas energosertifikāta ģenerēšana.

## ĒKAS ENERGOSERTIFIKĀTS



REGISTRĀCIJAS NUMURS: ABC-123456

DERĪGS LĪDZ: 01.09.2014

1. ĒKAS TIPS	Daudzdzīvokļu ēka (12 dzīvokļi)
2. ADRESE	Brīvības 1
3. ĒKAS DAĻA	visa ēka
4. ĒKAS VAI TĀS DAĻAS KADASTRAAPZĪMĒJUMS	123456789
5. ĒKAS ENERGOSERTIFICĒŠANAS NOLŪKS	<input type="radio"/> pārdošana, <input type="radio"/> izīrēšana/iznomāšana, <input checked="" type="radio"/> brīvprātīgi, <input type="radio"/> valsts/pašvaldības publiska ēka

### 6. ĒKAS RAKSTUROJUMS

Pirmreizējais ekspluatācijā pieņemšanas gads	1978
Rekonstrukcijas/renovācijas gads	2011
Stāvu skaits	15 virszemes, 1 pazemes, <input checked="" type="checkbox"/> mansards, <input type="checkbox"/> jumta stāvs
Kopējā platība	3 000 m <sup>2</sup>
Aprēķina platība	2 500 m <sup>2</sup>

### 7. ĒKAS ENERGOEFECTIVĪTĒS NOVĒRTĒJUMS

ATSAUCES VĒRTĪBAS	ĒKAS KLASE	ĒKAS ENERGOEFECTIVĪTĒS RĀDĪTAJI
ATSAUCES VĒRTĪBAS A → B → C → D → E → F →	ĒKAS KLASE B	<b>Enerģijas patēriņa novērtējums:</b> kWh/m <sup>2</sup> gadā - apkurei 27.45 - karstā ūdens sagatavošanai 10.32 - mehāniskajai ventilācijai 1.45 - apgaismojumam 6.34 - dzesēšanai 7.08 <b>Patēriņš kopā 52.64</b> No atjaunojamiem energoresursiem ēkā saražotā vai iegūtā enerģija 7.08 Koģenerācijā saražotā enerģija 11.45 <b>Primārās enerģijas novērtējums 2.45</b> <b>Oglekļa dioksīda emisijas novērtējums</b> kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> gadā 5.34
0 50 100 150 200 250 300 350 400+ kWh/m <sup>2</sup> gadā		
<b>Atsauces vērtības:</b> A klase – gandrīz nulles enerģijas ēka; B klase – zema enerģijas patēriņa ēka; C klase – atbilst prasībām jaunām ēkām;		D klase – atbilst prasībām rekonstruējamām ēkām; E klase – atbilst ēkas tipam atbilstošam vidējam patēriņam; F klase – atbilst ēkas tipam pieļaujamam enerģijas patēriņa līmenim.

### 8. ĒKAS ENERGOSERTIFIKĀTA IZDEVĒJS

Neatkarīgais eksperts	Energoauditors
Reģistrācijas numurs	EA1-0000
Firma	SIA PAIC, UI-3827927489, Zeļļu iela 7, Rīga
Datums: 28.10.2011	Paraksts:

*Attēls 6.29. HeatMod: ēkas energosertifikāts PDF formātā.*

Tādējādi programma *HeatMod6* nodrošina pilnu energoefektivitātes aprēķina procesu un sertifikāta ģenerēšanu atbilstoši Latvija 2013. g. spēkā esošajiem normatīvajiem dokumentiem .

## 6.4. Eksperimentālo stendu energopatēriņa modelēšana

### 6.4.1. Norobežojošo konstrukciju un apstākļu īss apraksts

Kopumā tiek pētīti 5 stendi ar atšķirīgu ārsienu uzbūvi, bet vienādiem pārsegumiem (grīdu, griestiem), logiem, durvīm, kā arī vienādām apkures, dzesēšanas un ventilācijas, sistēmām, kas integrētas vienā iekārtā – siltumsūkņī (skat. arī 2. nodaļu). Visi stendi ir vienādi orientēti vidē un to norobežojošo konstrukciju aprēķina siltuma caurlaidības  $U$  ir aptuveni vienādas –  $U=0,15 - 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  (tabulas 1.1. 6.3.). Visiem stendiem ir ventilējamas ārsienu apdares, kā arī ventilējama pagrīde un bēniņi, tādējādi praktiski tiek izslēgta lietuss un solārā starojuma tieša iedarbība uz norobežojošajām konstrukcijām. Stendu grīdas laukumi –  $9 \text{ m}^2$ , iekštelpu gaisa tilpumi –  $27 \text{ m}^3$ .

Tabula 6.3. Būvkonstrukciju varianti un to slāņu raksturlielumi.

Konstrukcija	1. slānis (aukstā puse)	2. slānis	3. slānis	4. slānis	5. slānis (siltā puse)
A	B	C	D	E	F
PLY	Saplāksnis, d=2 cm, $\lambda=0,17 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , c=1500 J/(kg·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	Pretvēja plāksne, d=3, $\lambda=0,034$ , c=850	Akmens vate, d=5	Kaļķu apm., d=1,5	Gāzbetona bloki, d=37,5, $\lambda=0,072$ , c=850	Kaļķu apm., d=1,5
LOG	Frēzbalķis, d=20, $\lambda=0,13$ , c=2100	Akmens vate, d=20	Tvaiku barjera, d=0,1	Koka apdare, d=4, $\lambda=0,13$ , c=2100	
CER	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	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	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 $g=0,5$ , novietots dienvidu pusē				
Durvis	$U=0,82 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , rāmja daļa $0,44$ , laukums $2,0 \text{ m}^2$ , novietots ziemeļu pusē un segts ar starojuma necaurlaidīgu foliju – $g=0$ .				

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

Konstrukcijās ir izmantoti būvmateriāli ar:

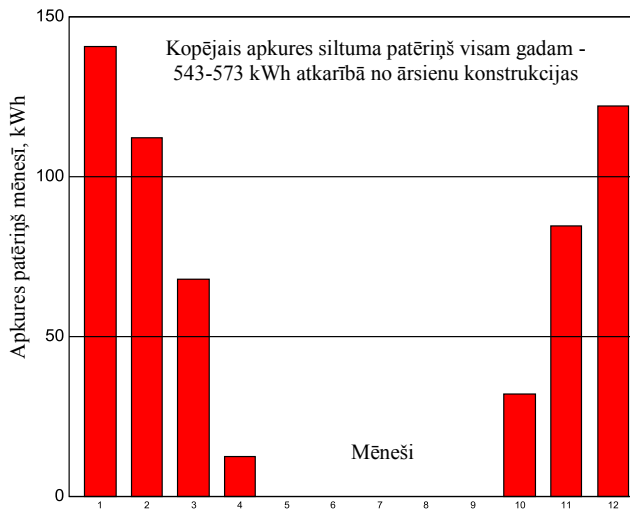
- dažādu īpatnējo siltuma ietilpību  $c_p$ , ko bieži tuvināti raksturo uzdodot būvkonstrukcijas laukuma vienības svaru ( $\text{kg/m}^2$ ). Vismazākā siltuma ietilpība ir stendam, kas izveidots no saliekamiem finiera moduļiem ar akmens vates pildījumu, vislielākā – ārsienai, kas veidota no liелgabarīta 51 cm bieziem keramiskajiem blokiem;
- dažādām ūdens tvaiku caurlaidības īpašībām, ko raksturo ar tvaiku difūzijas ekvivalentu gaisā  $\mu$  (m). Vislielākā tvaiku caurlaidība ir akmens vatei, vismazākā – prettvaiku barjerai (plēvei);
- atšķirīgu siltuma vadītspēju  $\lambda$  (W/m·K) un tās atkarību no mitruma un temperatūras. Kokskaidu un minerālvatei šīs atkarības ir visizteiktākās, būtiski siltuma vadītspēja ar mitrumu mainās arī gāzbetonam, bet relatīvi vāji šī atkarība ir izteikta blīvākiem materiāliem – apmetumam, keramikai.

Tādējādi gaidāms, ka pat pie vienādām būvkonstrukciju aprēķina siltuma caurlaidībām  $U$  un vienādiem pārējiem apstākļiem, dažādo stendu energopatēriņš mainīgos āra klimatiskajos apstākļos var savā starpā atšķirties un atšķirties arī no atbilstoši MK noteikumiem Nr. 348 (2013) ar sezonas metodi aprēķinātā energopatēriņa.

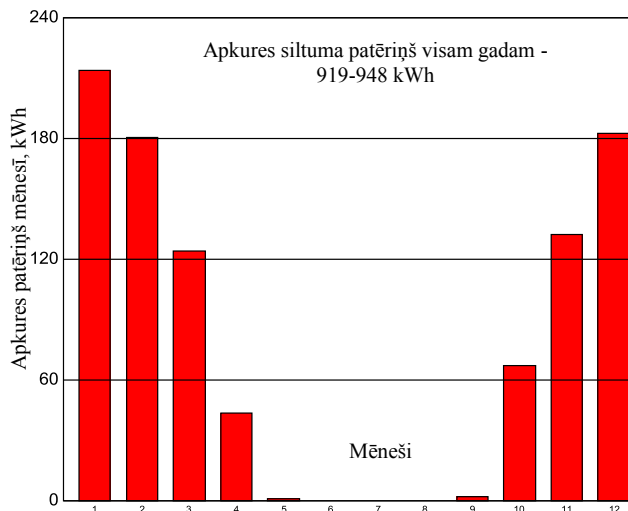
Aprēķinos pieņemts, ka visu stendu iekšpusē tiek uzturēta vienāda temperatūra un gaisa apmaiņas intensitāte. Nākamajā 7. nodaļā atspoguļotie mērījumu rezultāti parāda, ka gaisa apmaiņas intensitātes visos stendos tiešām atšķiras ļoti maz, bet pie tuvām vidējām temperatūrām, atšķirības temperatūras sadalījumos stendos ir vērojamas. Tā galvenais iemesls ir atšķirīgās faktiskās būvkonstrukciju siltuma caurlaidības (sīkāk skat. arī 7. nodaļu). Gaisa mitruma režīms telpās netiek papildus regulēts – tas veidojas āra gaisa (pie uzdotās iekšējās intensitātes) un būvkonstrukciju mitruma ietekmes rezultātā.

#### 6.4.2. Dinamisko efektu ietekme uz energopatēriņu apkurei

Attēlos 6.30 – 6.32 kā piemēri parādīti apkures siltuma patēriņi pa mēnešiem saplākšņa moduļu stendam pie 18°C iekšējās temperatūras, taču līdzīgi sadalījumi pa mēnešiem ir arī pārējiem testēšanas stendiem un kopējais apkures sezonas patēriņš stendos no dažādām būvkonstrukcijām atšķiras maz – atšķirības (atkarībā no pieņēmumiem par gaisa apmaiņas intensitāti un solāro starojumu caur logu) ir 3 – 5% robežās. Visreālistiskākajā variantā, kur ievērota gan gaisa apmaiņa, gan solārais starojums atšķirības ir aptuveni 3%. Iegūtais rezultāts parāda, ka pētāmo stendu būvkonstrukciju termiskās inerces atšķirību ietekme uz kopējo energopatēriņu apkurei norādītajos apstākļos ir relatīvi maza un lielākajā daļā gadījumu to var neņemt vērā. To apstiprina arī mērījumu rezultāti, kas parādīti 7. nodaļā. Jānorāda, ka šķietami visvieglākās konstrukcijas stenda no finiera paneļiem, kas pildīti ar akmens vates siltuma izolācijas materiālu, masivitāti un attiecīgi arī tā termisko inerci manāmi palielina iekšpusē esošais 7,5 cm fibrolīta slānis un apmetums.



Attēls 6.30. Apkures patēriņa sadalījums pa mēnešiem (kWh), bez gaisa apmaiņas ( $n=0$ ), bet ievērojot solārā starojuma caur logu ietekmi.



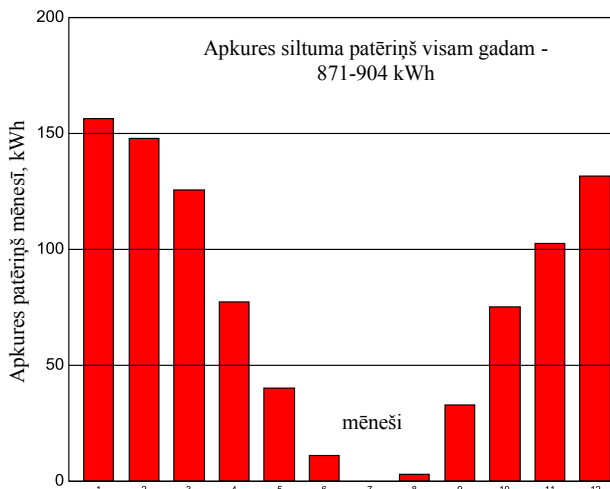
Attēls 6.31. Apkures patēriņa sadalījums pa mēnešiem (kWh) ar gaisa apmaiņu ( $n = 0,5$  1/h) un ievērojot solārā starojuma caur logu ietekmi.

Energoapatēriņa salīdzinājums pētāmajiem stendiem šajos piemēros parāda, ka

- caur loga stikloto daļu dienvienu pusē, kas veido apmēram 20 % no attiecīgās ārējas kopējā laukuma, solārā starojuma pievadītais siltuma daudzums apkures sezonā ir gandrīz tik pat liels, kā normālas 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  $g=0,5$ ). Tik liela solārā starojuma loma siltuma bilancē saistīta ar ļoti mazo gaisa tilpumu stendā – 27 m<sup>3</sup> un iegūto rezultātu, protams, nevar vispārināt;
- ventilācijas siltuma zudumi pie  $n=0,5$  1/h nosaka aptuveni 40% no apkures siltuma patēriņa, tādējādi rekuperācijai – iepļūstošā gaisa iepriekšējai uzsildīšanai, izmantojot

izplūstošā gaisa siltumu, zemes siltumu vai citus paņēmienus, ir potenciāli lielas iespējas kopējā energopatēriņa samazināšanai. Tik liela ventilācijas siltuma zudumu daļa siltuma bilancē ir saistīta ar būvkonstrukciju mazo siltuma caurlaidību ( $U=0,15 - 0,16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ );

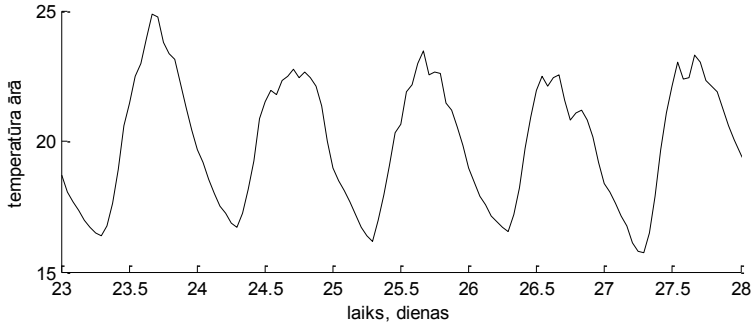
- ja telpas netiktu ventilētas un nebūtu tiešas solārā starojuma ietekmes caur logu, tad tikai vissiltākajā (jūlija) mēnesī Latvijas klimatiskajos apstākļos varētu iztikt bez apkures, lai telpās nodrošinātu vismaz  $18^\circ\text{C}$  temperatūru. Vērtējot šo šķietami paradoksālo rezultātu ir jāņem vērā, ka vasaras periodā dienas laikā gaisa temperatūra ārā lielāko tiesu pārsniedz minēto (uzdoto) iekštelpu temperatūru un, ja nav solārā starojuma ietekmes, to silda. Solārā starojuma gadījumā, kad telpā izdalās liels siltuma daudzums, ventilācija savukārt sekmē telpas pārkaruma samazināšanos – to ļoti uzskatāmi atspoguļo 7. nodaļā parādītie vasaras perioda mērījumu rezultāti;
- normētais apkures siltuma patēriņš gadījumā ar normālu gaisa apmaiņu un solārās radiācijas ietekmi (attēls 6.31), kas vislabāk no apskatītajiem atbilst reālajai situācijai, ir relatīvi liels – aptuveni  $100 \text{ kWh/m}^2$  gadā. Iegūtā vērtība pirmajā brīdī liekas negaidīti liela, bet pamatiemesls tam ir relatīvi liela standu norobežojošo konstrukciju laukuma un to gaisa tilpuma attiecība -  $S_{\text{nor. konst.}}/V_g=1,33 \text{ 1/m}$ . Salīdzināšanai - līdzīgas formas 2 stāvu viengimeņu mājai šī proporcija ir aptuveni  $0,8 \text{ 1/m}$ , bet 9 stāvu daudzdzīvokļu ēkai tikai  $0,3 \text{ 1/m}$ . Līdzīga aina veidojas salīdzinot norobežojošo virsmu laukumu ar kopējo apsildāmo telpu grīdu laukumu. Standu izmēriem  $S_{\text{nor. konst.}}/S_{\text{gr}}=6$ , viengimeņu mājai –  $2,4$ , bet deviņstāvu dzīvojamajai ēkai tikai  $0,7$ . Tādējādi, protams, sagaidāms, ka mazāku normēto energopatēriņu pie vienādiem pārējiem nosacījumiem varēs sasniegt vairākstāvu ēkas ar kubam pietuvinātu formu nevis garās vienstāvu būves.



Attēls 6.32 Apkures patēriņa sadalījums pa mēnešiem (kWh). Netiek ņemta vērā ne gaisa apmaiņa, ne solārā starojuma ietekme caur logu.

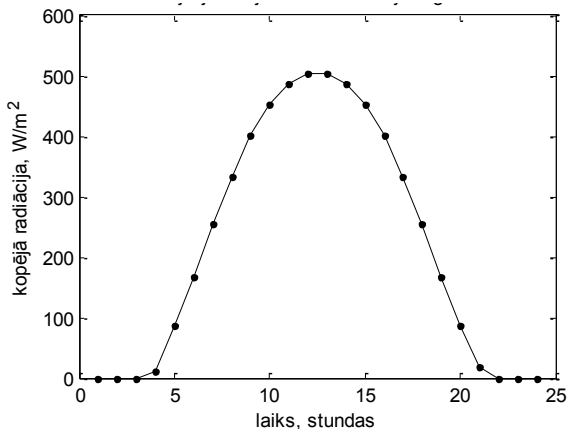
### 6.4.3. Būvkonstrukciju termiskās inerces ietekme uz telpu pārkarsumu vasaras periodā

Lai novērtētu gaisa temperatūras svārstības stendos, no vidējotajiem āra temperatūras datiem Rīgā tiek apskatītas 5 gada karstākās dienas jūlija mēnesī (attēls 6.33.), pieņemot, ka telpa netiek ne papildus dzesēta ne sildīta, bet ventilācijas intensitāte ir nemainīga gan dienu, gan nakti -  $n=0,5$  1/h. Āra gaisa temperatūra šajā periodā svārstās starp  $17^{\circ}\text{C}$  un  $25^{\circ}\text{C}$ .



Attēls 6.33. Gaisa temperatūra Rīgā ārā jūlija karstākajā periodā.

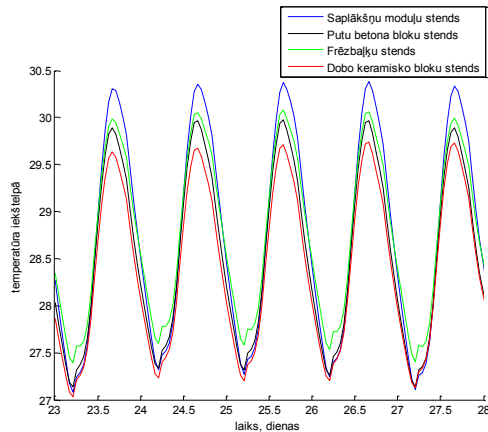
Bez tam, ievērojot arī mākoņainības ietekmi, tiek noteikts vidējā solārā starojuma enerģijas blīvums (attēls 6.34), daļa no šīs enerģijas caur logu dienviņu pusē ( $S_{\text{stiklojuma}}=1,25$  m<sup>2</sup>,  $g=0,5$ ) nonāk stenda iekštelpā un var būtiski paaugstināt gaisa temperatūru.



Attēls 6.34. Kopējais radiācijas siltuma plūsmas blīvums jūlija dienā uz horizontālas virsmas.

Salīdzinot āra gaisa (attēls 6.33) un iekštelpas gaisa temperatūras (attēls 6.35), redzams, ka iekštelpas 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 ( $V=27$  m<sup>3</sup>) dienā pat par  $7^{\circ}\text{C}$  var pārsniegt āra gaisa temperatūru. Naktī šī atšķirība var sasniegt pat  $10^{\circ}\text{C}$ , kas kopumā cilvēkiem rada būtisku termisko diskomfortu. Nelabvēlīgā situācija izskaidrojama ar to, ka saule dienā piesilda nelielu telpu un uzsilda būvkonstrukcijas, bet gaiss pa nakti nepaspēj atdzist, jo būvkonstrukcijas atdod dienā uzkrāto siltumu, ja naktī, kad āra

temperatūra samazinās līdz 17°C telpa netiek papildus ventilēta, atverot logu vai palielinot mehāniskās ventilācijas intensitāti. 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 (jūlijā un augustā) būtu nepieciešama dzesēšanas sistēmu uzstādīšana, jo papildus siltumu telpās izdala arī dažādi iekšējie avoti, tai skaitā cilvēks, kas šai aprēķinā nav ņemts vērā.



Attēls 6.35. Gaisa temperatūras svārstības iekš telpā dažādos stendos. Ievērota solārā radiācija caur logu un gaisa apmaiņa –  $n=0,5$  1/h.

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°C, tomēr pat vismasīvākajā stendā no lielgabarīta keramiskajiem blokiem šīs diennakts temperatūru svārstības ir tikai par aptuveni 1°C mazākas, t.i., konstrukciju masivitāte šajā gadījumā nenodrošina radikālu temperatūras stabilizāciju, bez tam, tikai nedaudz (<0,5°C) var samazināt vidējo temperatūras līmeni telpā, kas tā kā tā būtiski pārsniedz termiskā komforta temperatūru telpā vasaras periodā – 24 – 25°C. Teiktais parāda solārā starojuma dominējošo lomu temperatūras svārstībās telpā un intensīvu nakts ventilāciju, kā vienīgo vienkāršo iespēju mazināt vidējo pārkarsuma līmeni. Sagaidāms, ka ventilācija caur zemi varētu būt nākamais energoefektīvais solis pārkarsuma mazināšanai.

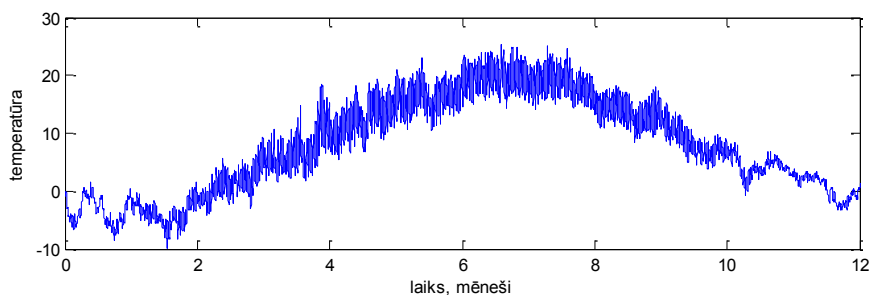
Sava veida „anomālija” vērojama frēzbalķu stendā, kur minimālā temperatūra naktī ir nedaudz (<0,5°C) augstāka kā citos stendos. Tas izskaidrojams ar siltuma izolācijas materiāla novietojumu konstrukcijas iekšpusē (skat. tabulu 6.3) un masīvākā ār sienas elementa – frēzbalķa novietojumu ārpusē.

Kopumā aprēķini tādējādi parāda, ka būvkonstrukciju masivitātei ir tikai sekundāra loma arī šādā nekondicionētā vasaras režīmā un temperatūras stabilizācijai un pārkarsuma samazināšanai jāizmanto citi paņēmieni, piem., ventilācijas režīmu vadība un fāzu maiņas materiāli ar lielu fāzu pāreju īpatnējo siltuma daudzumu.

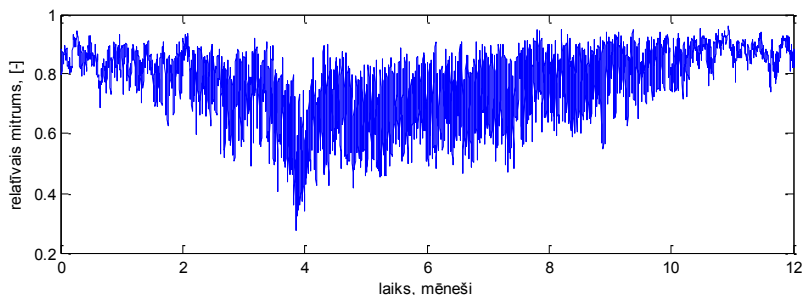
## 6.5. Mitruma dinamika slāņainās būvkonstrukcijās modelēšana Latvijas klimatiskajos apstākļos

### 6.5.1. Klimatisko apstākļu un apstākļu telpās uzdošana

Lai skaitliski analizētu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības īpašības un to izmaiņas mitruma ietekmē, kā arī, lai novērtētu 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 attiecīgās stundas vidējos datus – attēlā 6.36 un attēlā 6.37 attiecīgi parādītas šādi vidējotās āra gaisa temperatūras un tā relatīvā mitruma izmaiņas gada laikā.



Attēls 6.36. Vidējotās āra gaisa temperatūras izmaiņas gada ciklā Rīgā.



Attēls 6.37. Vidējotās relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā Rīgā.

Attēli uzskatāmi parāda, ka šādi pa stundu vidējotā maksimālā temperatūra (aptuveni 25°C) tiek sasniegta jūlijā un augustā, bet zemākā (aptuveni -9°C) – janvārī un februārī, bet katrā konkrētā 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 mitruma 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 ūdens tvaiku kondensācija. Piem., pie 80% gaisa mitruma un temperatūras -8°C absolūtais ūdens daudzums gaisā ir 2 g/m<sup>3</sup>, bet pie 25°C – 18,4 g/m<sup>3</sup>. Pie

iekštelpu temperatūras 18°C un gaisa mitruma 50% absolūtais ūdens daudzums telpas gaisā ir 7,7 g/m<sup>3</sup> - 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 plūsma var būt 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 gaisa un 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, pat tad, ja piesātinājuma līmenis ir augsts, jo tā temperatūra ir zema.

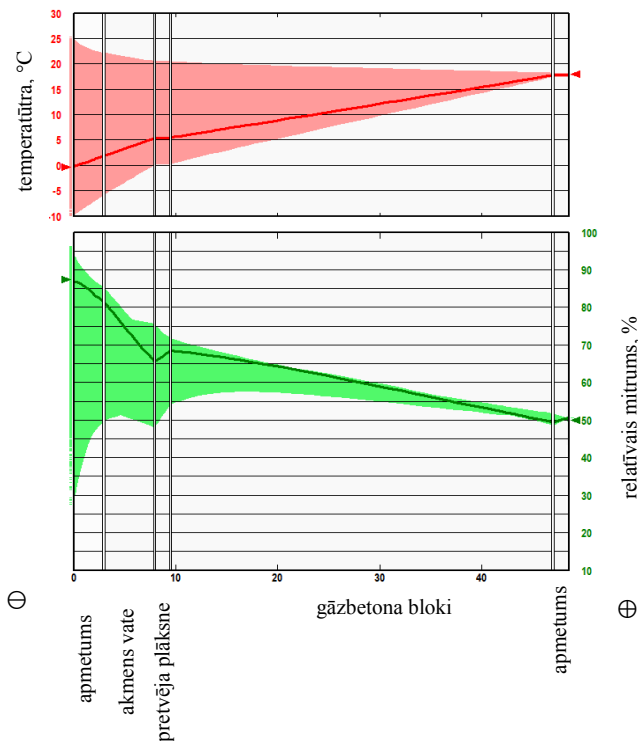
Lai dažādo būvkonstrukciju ūdens tvaiku pārneses īpašības varētu salīdzināt, aprēķinos telpās apkures periodā tika uzdota nemainīga temperatūra 18°C un nemainīgs gaisa relatīvais mitrums – 50%. Ārpus apkures perioda apstākļi telpā netiek kondicionēti, t.i., temperatūra var paaugstināties, kas tuvināti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

### **6.5.2. Temperatūras un relatīvā mitruma sadalījumu izmaiņas stendu būvkonstrukcijās gada ciklā**

Turpmākajos dinamiskajos viendimensionālajos (1D) aprēķinos ar programmu *WUFI*, izmantojot āra temperatūras un mitruma svārstību vidējotos gada ciklus Rīgā (attēls 6.36 un attēls 6.37), tiek analizēti relatīvā mitruma un temperatūras sadalījumi dažādajās testēšanas stendu būvkonstrukcijās – no dažādiem materiāliem veidotajās ārsienās un pārsegumos (tabula 6.3). Tā kā apstākļi ārā un būvkonstrukciju siltuma vadītspēja laikā to mitruma izmaiņu dēļ mainās, tad

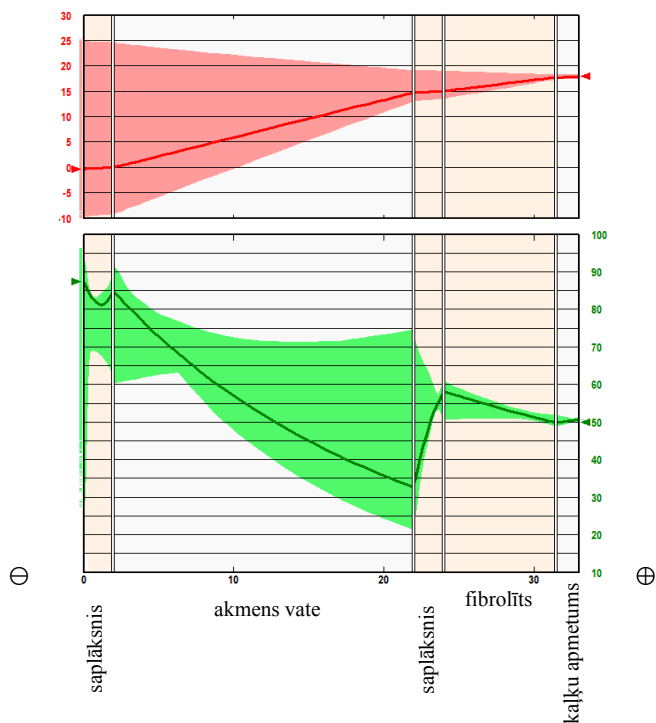
- aprēķins ir dinamisks – katrā laika momentā veidojas atšķirīgi temperatūru un mitruma sadalījumi;
- vasarā un ziemā sadalījumi atšķiras ne tikai kvantitatīvi, bet arī kvalitatīvi.  
Attēlojums grafikos ir šāds:
- norobežojošās konstrukcijas ārējā virsma ir iezīmēta ar „-„ (pa kreisi), bet iekšējā virsma ar „+„ (pa labi);
- temperatūras un relatīvā mitruma sadalījumi būvkonstrukcijās attēloti attiecīgi ar sarkanām un zaļām līnijām. Ar atsevišķu līniju 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 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;
- Maksimālais relatīvais mitrums AER stenda (attēls 6.38) ārsienā tiek sasniegts pie pretvēja plāksnes ārējās virsmas, pie akmens vates slāņa ārējās virsmas relatīvais mitrums nekad nepārsniedz 85% un kondensāta risku konstrukcijas iekšienē gada ciklā nav. 80% relatīvā mitruma sliekšnis arī tiek sasniegts ziemā konstrukcijas ārējā slānī, kur temperatūra zema, tādēļ mikroorganismu attīstības risku šajā zonā nav. Arī vasarā konstrukcijā neveidojas

mitruma aspektā kritiskas situācijas. Jānorāda, ka, neraugoties uz gāzbetona porozitāti, mitruma daudzuma atšķirības dažādās tā zonās nav tik lielas, lai manāmi izmainītu siltuma vadītspējas sadalījumu tajā – temperatūras sadalījums pie 0°C temperatūras ārā gāzbetona slānī ir praktiski lineārs (skat. sarkano līniju attēlā 6.38).



Attēls 6.38. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā gāzbetona bloku ārsienā (AER).

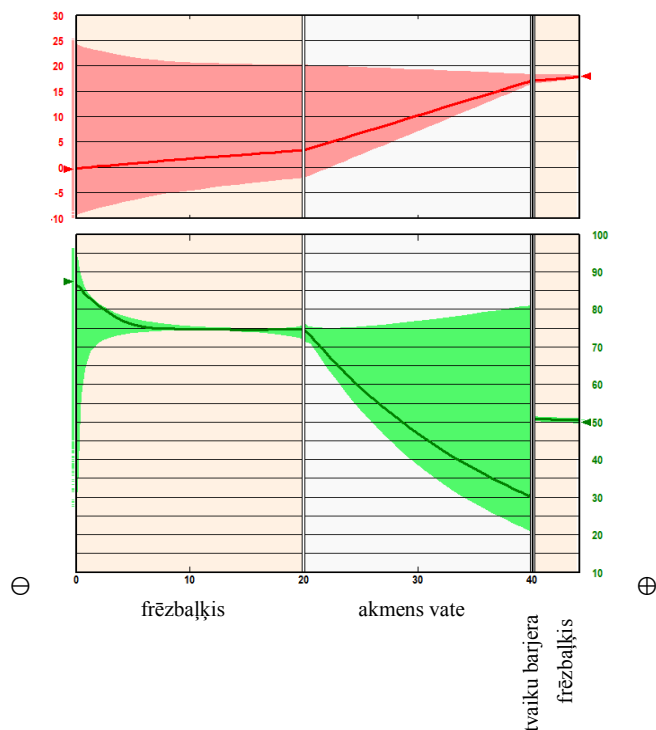
PLY stenda ārsienā (attēls 6.39) aukstajā gadalaikā maksimālais relatīvais mitrums (90%) tiek sasniegts paneļu pildījuma – akmens vates siltuma izolācijas materiāla ārējās virsmas tuvumā, kondensācijas risku šajā zonā var mazināt paneļu ārējā saplākšņa perforācija ūdens tvaiku caurlaidības palielināšanai, bet šīnī gadījumā pie ārējā saplākšņa virsmas nepieciešams izmantot pretvēja plēvi, lai novērstu tiešu āra aukstā gaisa ieplūdi siltuma izolācijas materiālā. Vasaras periodā situācija būtiski mainās, jo dominē ūdens tvaiku plūsma no ārpusē uz iekšpusi. Tādēļ augstākais relatīvais mitrums (maksimāli līdz 75%) tiek sasniegts pie paneļu siltumizolācijas materiālu iekšējās virsmas saplākšņa, kura tvaiku caurlaidība ir maza. Te jānorāda, ka paneļu ārsienas perforācija vai prettvaiku plēves iestrāde pie paneļu iekšējās virsmas vēl palielinātu relatīvo mitrumu un mikroorganismu augšanas risku šajā siltajā zonā vasaras periodā.



Attēls 6.39. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā saplākšņa moduļu stenda ār sienā (PLY).

LOG stenda ār sienā (attēls 6.40) aiz iekšējās apdares iestrādātā prettvaiku plēve aukstajā gada laikā efektīvi novērš kritisku relatīvā mitruma pieaugumu siltuma izolācijas materiāla slānī – maksimālais relatīvai mitrums (75%) tiek sasniegts akmens vates ārējā slānī, kur temperatūra ir zema ( $<5^{\circ}\text{C}$ ). Prettvaiku plēves klātbūtne nelabvēlīgi ietekmē relatīvā mitruma situāciju vasarā – pie siltuma izolācijas materiāla iekšējās virsmas mitrums var sasniegt 80% un temperatūra tur ir tuva telpas temperatūrai ( $18^{\circ}\text{C}$ ). Kaut arī kondensāta veidošanās risku nav, tomēr te pastāv nozīmīgi mikroorganismu augšanas riski, kurus jāanalizē detalizētāk (skat. nākamo punktu).

Ja tvaika barjera šādā LOG ār sienas konstrukcijā aiz iekšējās apdares netiek izmantota (attēls 6.41), tad aukstajā gadalaikā relatīvais mitrums pie frēzbaļķu un minerālvates robežvirsmas var sasniegt 90%, un pastāv kondensāta rašanās riski, kas apdraud koka konstrukcijas ilgtspēju. Toties vasarā minerālvates slānī mitruma situācija ir mazāk kritiska nekā iepriekš apskatītajā gadījumā ar prettvaiku barjeru – relatīvais mitrums akmens vates slānī nekur nesasniedz 70%. Jānorāda, ka šāds ār sienas konstruktīvais risinājums ar siltuma izolācijas slāni iekšpusē var radīt papildus riskus, ja tvaika barjeras īpašības nav izvēlētas atbilstoši ekspluatācijas klimatiskajiem apstākļiem vai tā nav iestrādāta kvalitatīvi (bez pārtraukumiem) – konstrukcijas ilgtspējai izšķiroša ir darbu izpildes kvalitāte.

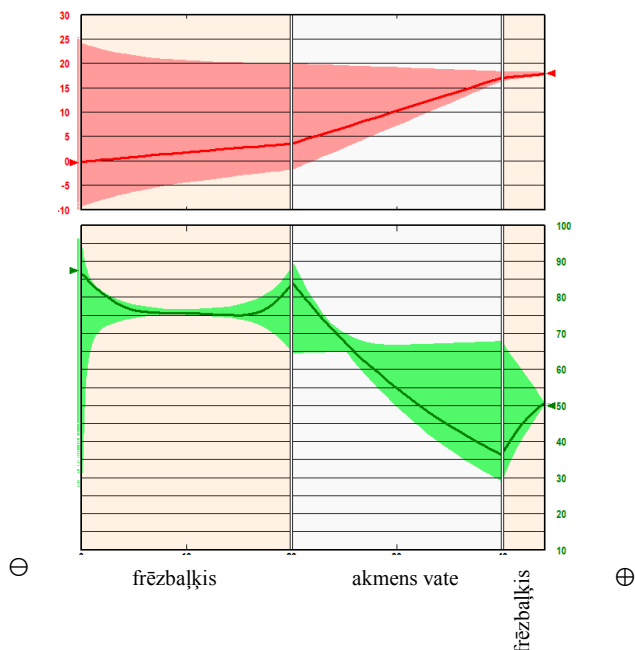


Attēls 6.40. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā frēzbaļķu stenda LOG ārsienā ar iestrādātu tvaika barjeru.

Temperatūras un mitruma izmaiņas gada ciklā lielgabarīta keramisko bloku ārsienā (CER) ar ārējo siltinājuma slāni (skat. arī tabulu 6.3) parādītas attēlā 6.42. Te liels relatīvais mitrums (līdz 85%) ziemas periodā tiek sasniegts minerālvates ārējā slānī pie pretvēja plāksnes, bet kondensācijas risku nav. Bez tam šajā zonā ir zema temperatūra un mazs absolūtais ūdens daudzums konstrukcijā, kas minimizē arī mikroorganismu augšanas riskus. Arī vasarā konstrukcijas relatīvais mitrums visās zonās (tā pat kā AER tipa ārsienā) nav kritisks. Šī skaitliskā analīze tādējādi parāda, ka no mitruma pārnese viedokļa abi šie ārsienu risinājumi ilgtermiņā ir labvēlīgi. Tomēr būtiskas atšķirības, kā tas atspoguļots 7. nodaļā vērojamas ekspluatācijas sākuma posmā, jo ražošanas tehnoloģija nosaka, ka gāzbetona blokos sākotnēji ir liels ūdens daudzums, bet keramiskie bloki ir sausi. Tas varētu būt viens no iemesliem, kādēļ keramiskie bloki, piem., ir īpaši iecienīti individuālo ēku būvniecībā Vācijā.

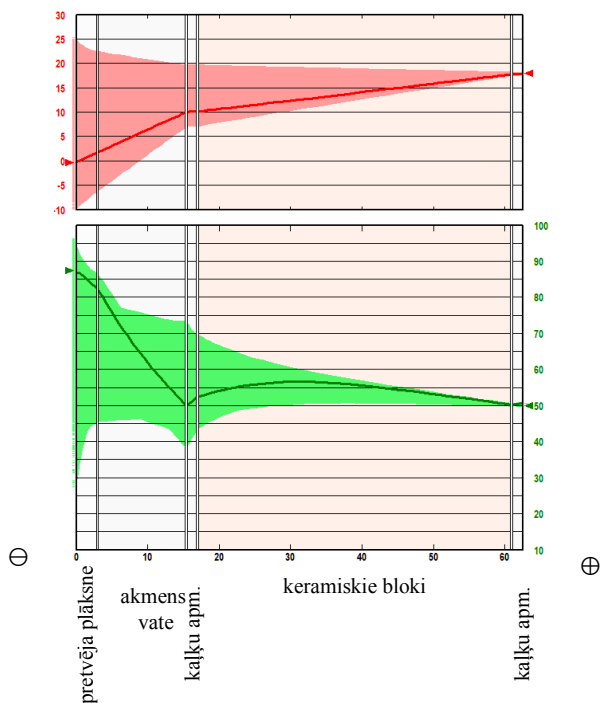
Grīdas konstrukcija (skat. arī tabulu 6.3) šinī gadījumā ir viegla un ventilējama no apakšas – temperatūras un mitruma sadalījumi gada ciklā tajā parādīti attēlā 6.43. Arī šajā konstrukcijā maksimālais mitrums siltuma izolācijas materiālā (85%) tiek sasniegts pie ārējā saplākšņa virsmas, kur temperatūra ir zema – kondensāta rašanās un mikroorganismu augšanas risku nav. Nelabvēlīga situācija mikroorganismu augšanas aspektā var veidoties siltuma izolācijas materiālā vasarā pie tvaiku barjeras, jo relatīvais mitrums te var pārsniegt 80% un temperatūras ir tuvas telpas

temperatūrai – detalizētāk šis aspekts analizēts nākamajā punktā 6.5.3. Jānorāda, ka situācija līdzīga šai ir visās vieglajās konstrukcijās.

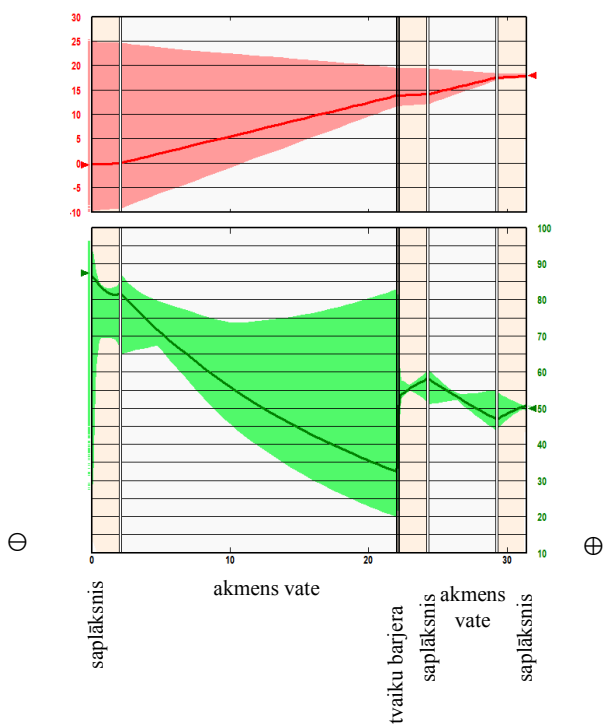


*Attēls 6.41. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā frēzbaļķu stenda LOG ārsiena, ja tvaika barjera netiek izmantota.*

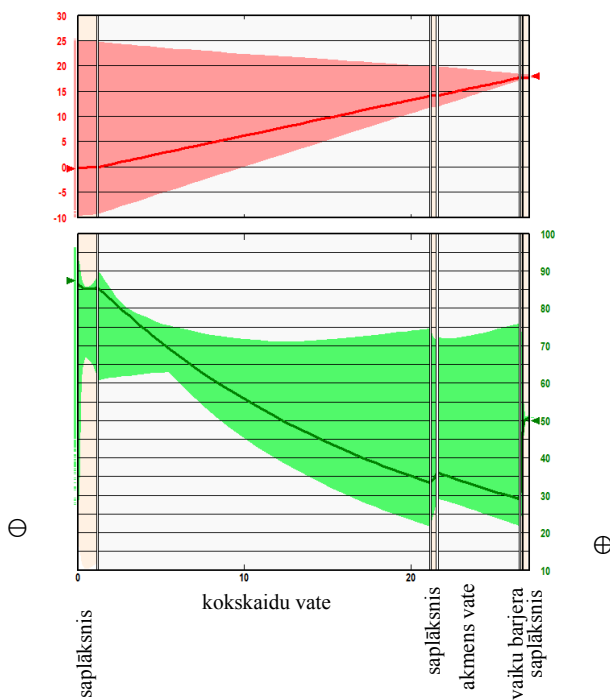
Situācija griestu konstrukcijā (attēls 6.44) ir ļoti līdzīga tai, kas tika aprakstīta grīdas gadījumā (attēls 6.43) – vienīgā atšķirība, ka šeit tvaika barjera iestrādāta tieši aiz iekšējās saplākšņa apdares virsmas, nevis aiz pirmā siltinājuma slāņa, kā tas ir grīdā. Ja pie ārējās siltuma izolācijas materiāla virsmas sadalījumi un vērtības mainās nenozīmīgi, tad iekšējā siltuma izolācijas slānī izmaiņas ir būtiskas – ziema mitrums šajā slānī griestu konstrukcijā ir vēl mazāks nekā grīdā, bet vasarā situācija ir nelabvēlīgāka – mitrums tur var sasniegt 75%, tomēr kopumā pozitīvi vērtējams tas, ka neveidojas tik izteikts relatīvā mitruma ekstrēms aiz otrā saplākšņa slāņa, kā tas ir vērojams grīdas gadījumā (skat. attēlā 6.43). Šādi nedaudz atšķirīgi konstruktīvie risinājumi grīdai un griestiem tika izvēlēti tieši tādēļ, lai varētu veikt mitruma dinamikas salīdzinošo analīzi dažādās vieglajās konstrukcijās.



Attēls 6.42. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā CER stenda ārsienā.



Attēls 6.43. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā grīdas konstrukcijā.



Attēls 6.44. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas gada ciklā griestu konstrukcijā.

Ja līdz šim aprakstītajos piemēros, izmantojot viendimensionālo modeli, analīze tika veikta katrai konstrukcijai atsevišķi, tad turpmākajos piemēros tiks apskatīts viss testēšanas stends (ārsienas, grīda, griesti, logs, durvis) kopumā un tam veikts dinamisks 3D aprēķins, izmantojot programmu WUFI PLUS. Arī šeit tiek pieņemts, ka

- temperatūra iekšējā apkures sezonā tiek uzturēta konstanta  $+18^{\circ}\text{C}$  un gaisa relatīvais mitrums telpā ir nemainīgs visu gadu (50%);
- pārējā laikā no maija līdz septembrim temperatūra iekšējā var mainīties.

Izmantotie vidējie āra apstākļi Rīgā ir aprakstīti iepriekšējā punktā 6.5.1 un atspoguļoti attēlos 6.36 un 6.37.

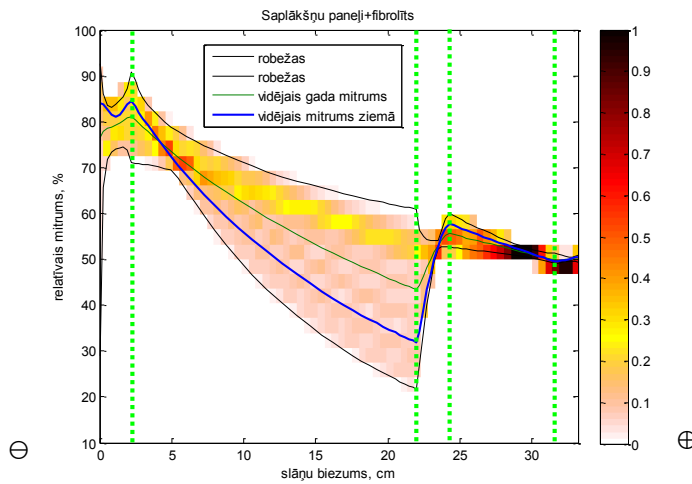
Sekojošajos grafikos ar krāsām ir parādīts arī tas, cik bieži gada laikā noteikts relatīvais mitrums realizējas kādā konkrētā būvkonstrukcijas zonā. Piemēram, ja krāsa atbilst 0.2 vienībām, tas nozīmē, ka 20% no visa gada laika relatīvā mitruma vērtība konkrētajā būvkonstrukcijas vietā būs tāda, kā redzams attēlā.

Ar zilu līniju parādīts vidējais relatīvais mitrums ziemas periodā no decembra sākuma līdz februāra beigām, bet ar zaļu līniju vidējais mitrums visa gada laikā. Vertikālās zaļās raustītās līnijas iezīmē dažādo būvkonstrukcijas slāņu robežas atbilstoši tabulai 6.3.

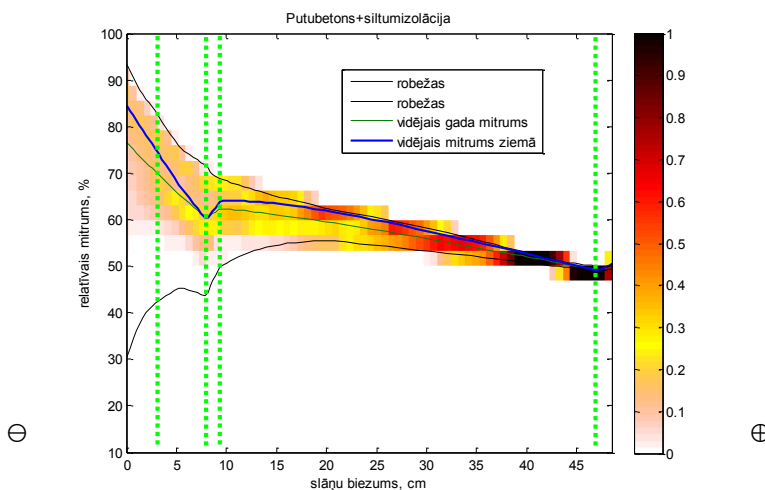
Attēls 6.45 uzskatāmi parāda, ka saplākšņa paneļu konstrukcijas ārsienā (PLY) liels relatīvais mitrums (līdz 90%) pie minerālvates ārējās virsmas tiek sasniegts tikai mazāk nekā  $\frac{1}{4}$  daļu no gada laika, bet  $\frac{1}{2}$  no gada laika maksimālais gaisa relatīvais mitrums akmens vates slānī nepārsniedz 70%. Trīdimensionālā analīze parāda, ka kopumā situācija šajā konstrukcijā ir mazāk

kritiska, nekā tas izrietēja no viendimnsionālas analīzes (skat. iepriekš attēlu 6.39). 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.

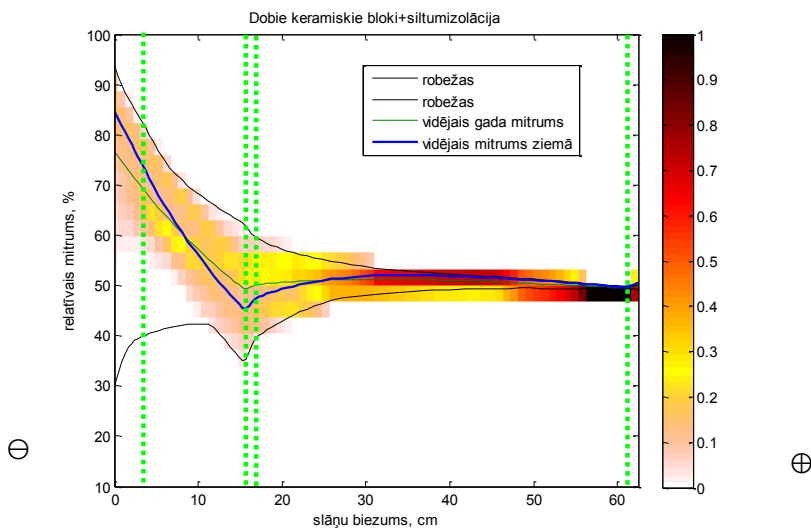
Attēli 6.46 (AER) un 6.47 (CER) tipa ārsienām arī apstiprina iepriekšējās analīzes rezultātus – augstas relatīvā mitruma vērtības pie siltinājuma slāņa ārējās virsmas veidojas tikai līdz 15% no kopējā laika, bez tam arī mitruma līmeņi konstrukciju masīvajās daļās ir nedaudz zemāki, nekā tas izrietēja no viendimensionālās analīzes rezultātiem (skat. iepriekš attēlus 6.38 un 6.42). Tomēr jānorāda, ka raksturīgais mitruma līmenis AER ārsienas gāzbetona bloku vidusdaļā kopumā ir nedaudz augstāks (60%) nekā keramisko bloku konstrukcijas vidusdaļā (50%).



Attēls 6.45. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi saplākšņa paneļu (PLY) būvkonstrukcijā.

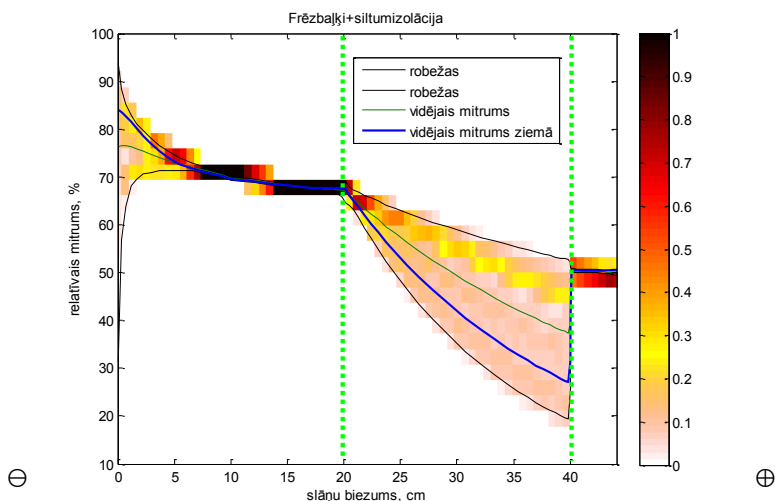


Attēls 6.46. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi gāzbetona ārsienā (AER).



Attēls 6.47. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi keramisko bloku ārsienā (CER).

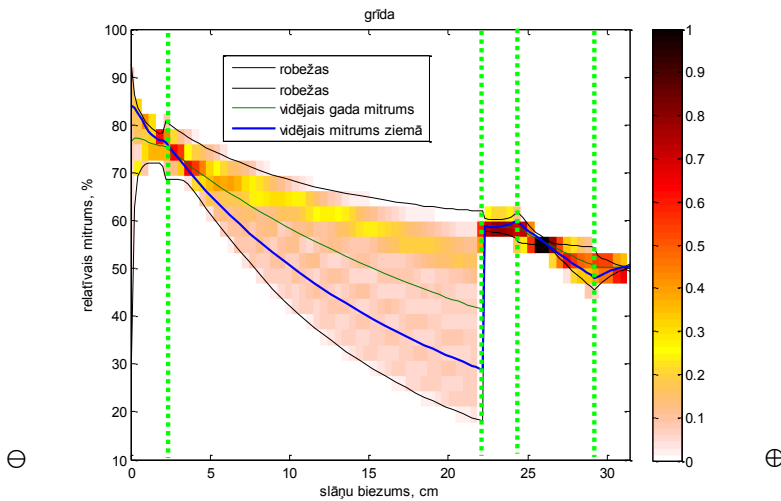
Arī frēzbaļķu ārsienas konstrukcijai (LOG) 3D analīze (attēls 6.48.) dod nedaudz zemākas maksimālas relatīvā mitruma vērtības pie koka baļķu iekšējās virsmas (70% aptuveni  $\frac{3}{4}$  gada laika) nekā iepriekš veiktā 1D analīze (skat. iepriekš attēlu 6.40). Šīs atšķirības daļēji skaidrojamas arī ar to, ka ekstremālās vērtības tiek sasniegtas tikai ļoti īsu laika periodu un tādēļ šajā attēlojuma formā praktiski neparādās.



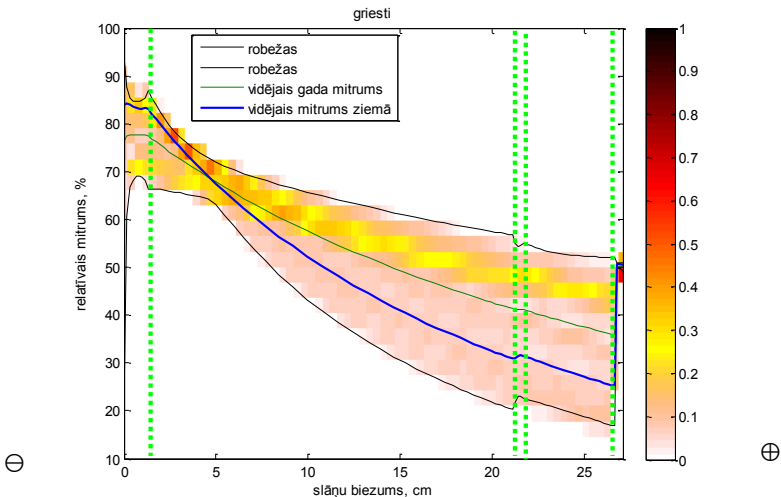
Attēls 6.48. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi frēzbaļķu ārsienas konstrukcijā (LOG).

Arī grīdas un griestu konstrukcijām, kas kopumā ir līdzīgas, bet atšķiras ar tvaiku barjeras novietojumu (griestos – tieši aiz iekšējās apdares, grīdā – aiz pirmā akmens vates slāņa), 3D (attēls

6.49 un attēls 6.50) un 1D (skat iepriekš attēlus 6.43 un 6.44) analīzes rezultāti kopumā labi saskan. Grīdās iekšējā siltinājuma slānī relatīvais mitrums gada laikā svārstās ļoti maz (starp 50 un 65%), tad griestos šajā slānī svārstības ir lielākas – starp 15 un 55%. Abos gadījumos tās nav kritiskas. Savukārt pie ārējās siltinājuma slāņa virsmas grīdā 75% gaisa mitrums tiek pārsniegts tikai aptuveni 1/5 no gada laika, bet griestu konstrukcija tai pašā vietā ¼ gada laika relatīvais mitrums ir aptuveni 85%. Tādējādi šī analīze nesniedz kategoriskus argumentus, ka kāds no šiem risinājumiem nav pieņemams.



Attēls 6.49. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi karkasa grīdas konstrukcijā.



Attēls 6.50. Relatīvā mitruma un tā realizācijas varbūtības sadalījumi griestu pārseguma konstrukcijā.

### 6.5.3. Sēnīšu augšanas risku būvkonstrukcijās analīze

Lai analizētu sēnīšu un mikroorganismu augšanas riskus stendos pētāmajās būvkonstrukcijās, tiek izmantota multifizikālās modelēšanas pieeja un atbilstošie matemātiskie modeļi siltuma un vielas pārnesi, kas plašāk raksturoti (Ozolins *et.al.*, 2012). Šie modeļi implementēti un skaitliski realizēti gan simboliskās matemātikas programmu paketes *MATLAB*, gan modelēšanas programmas *WUFI* vidē, kā arī veikta šo modeļu verifikācija, salīdzinot to sniegtos rezultātus gan savā starpā, gan ar eksperimentu datiem.

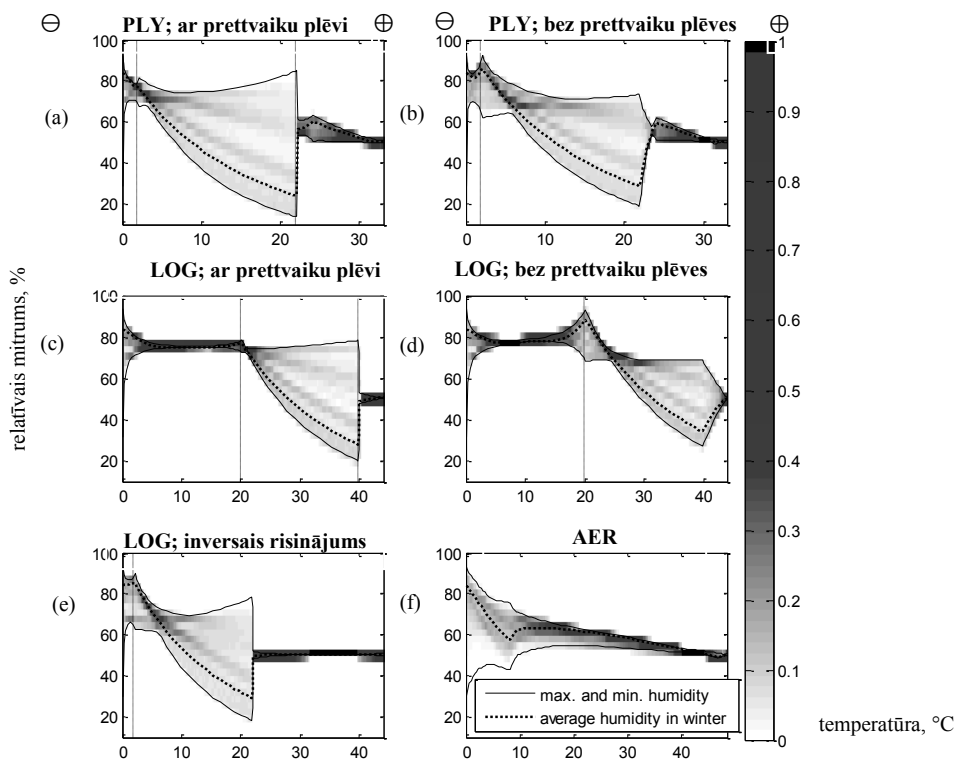
Tā pat kā iepriekš tiek izmantoti reālie Rīgas klimatiskie dati (āra gaisa temperatūras un relatīvie mitrumi) ar laika soli 1 stunda. Šie dati katru stundu ir vidējoti periodā no 2006 - 2012. gadam. Iegūtās atkarības parādītas iepriekš attēlos 6.36 un 6.37. Iekštelpu temperatūra analīzei apkures sezonā pieņemta vienāda ar 20°C un relatīvais mitrums 50%, bet gaisa apmaiņas intensitāte  $n=0,5$  1/h. Vasaras periodā temperatūra telpā mainās brīvi atbilstoši apstākļiem ārā.

Sekojošajos piemēros (attēls 6.51 a-f) parādīta mitruma risku analīze saplākšņa paneļu ar fibrolītu iekšpusē stendā (PLY), frēzbaļķu stendā ar siltinājuma slāni iekšpusē (LOG), kā arī gāzbetona stendā (AER). Salīdzināšanai papildus apskatīts arī LOG stenda variants bez tvaiku barjeras akmens vates siltajā pusē un „inversais” risinājums, kur 4 cm koka apdare un 20 cm frēzbaļķi samainīti vietām, t.i., siltinājuma slānis ir konstrukcijas ārpusē. Arī saplākšņa moduļu stendam parādīti divi risinājumi – ar un bez tvaiku barjeras akmens vates slāņa siltajā pusē.

Reāli izbūvētajā PLY stendā prettvaiku plēve netiek izmantota, bet LOG stendā tā tiek izmantota. Redzams, ka saplākšņa paneļa stendam tādējādi vislielākie mitruma riski ir ziemas periodā starpslānī starp ārējo saplāksni un akmens vati (attēls 6.51 b). Prettvaiku plēves izmantošana riskus ziemas periodā šajā zonā manāmi samazinātu (attēls 6.51 a), bet pieaugtu maksimāli sasniegtais relatīvā mitruma līmenis vasarā pie siltinājuma slāņa iekšējās virsmas. Tomēr augsts mitrums šajā iekšējā zonā vasarā būtu tikai ļoti īsu laiku, kas nevar radīt vērā ņemamus riskus mikroorganismu augšanai.

Kā rāda veiktie aprēķini, arī LOG stenda konstrukcijā mitruma uzkrāšanās risku ilgtermiņā nav (attēls 6.51 c) – to nodrošina prettvaiku plēves izmantošana. Ja prettvaiku plēves akmens vates siltajā pusē nebūtu, tad ziemā veidotos kritisks mitruma līmenis vates ārējā zonā pie kontaktvirsmas ar frēzbaļķiem (attēls 6.51 d). Īpaši riskanti tas ir mikroorganismu augšanas kontekstā, jo te temperatūras ziemā var būt pozitīvas. Inversajam LOG risinājumam (attēls 6.51 e) mikroorganismu riski ilgtermiņā tomēr būtu mazāki, jo siltumizolācijas slānis atrodas konstrukcijas ārējā daļā, kur temperatūras ziemā, kad augsts relatīvais mitruma līmenis, tur ir zemas. Arī modeļaprēķini AER stendam (attēls 6.51 f) parāda, ka mitruma uzkrāšanās risku ilgtermiņā šajā konstrukcijā nav.

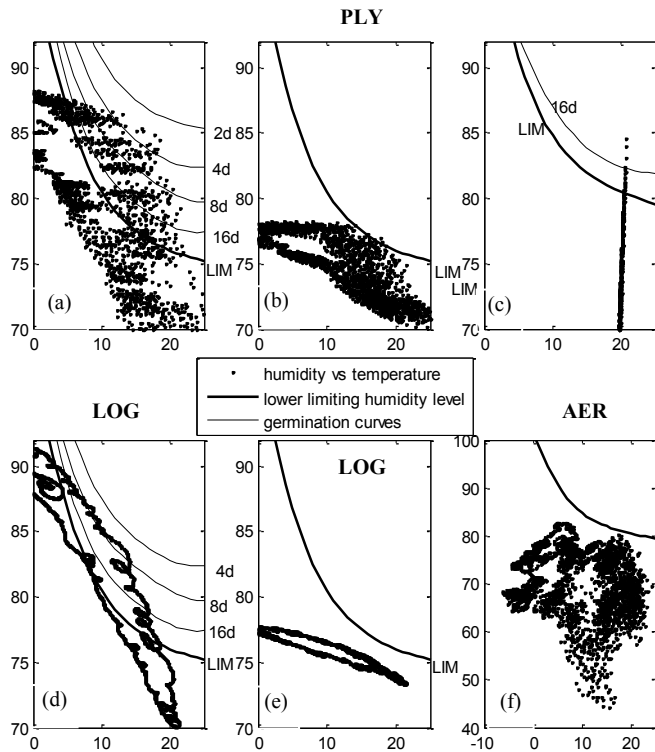
Tā kā sēnīšu augšanai svarīga ir augsta relatīvā mitruma un pietiekami augsta temperatūras kombinācija (piem., pie zemām temperatūrām sēnītes neaug pat tad, ja relatīvais mitrums ir tuvu piesātinājumam), tad kvantitatīvam izvērtējumam ir nepieciešama detalizētāka analīze. Turpmāk tiks apskatītas tās vietas iepriekšējā attēlā 6.51 parādītajās konstrukcijās, kas tur iezīmētas ar vertikālām raustītām līnijām.



Attēls 6.51. Relatīvā mitruma līknes un to realizācijas varbūtību blīvuma sadalījums trīs stendiem (PLY, LOG, AER) ar atšķirīgiem iespējamajiem konstruktīvajiem risinājumiem. Vertikālās raustītās līnijas atbilst kritiskajām vietām konstrukcijā, kas tiek turpinājumā pētītas detalizētāk, analizējot arī senīšu augšanas riskus tajās: (a), (b) saplākšņa paneļu testēšanas stends; (c), (d) frēzbaļķu testēšanas stends; (e) inversais risinājums frēzbaļķu stendam; (f) gāzbetona testēšanas stends; (a), (c), (e) – tiek izmantota tvaiku barjera.

Senīšu augšanas riski ir būtiski saplākšņa paneļu konstrukcijā (skat. attēls 6.52 a) bez tvaika barjeras siltajā pusē vai ārējā saplākšņa slāņa pietiekamas perforācijas, kas samazinātu tvaiku caurlaidības pretestību. Šinī gadījumā temperatūras mitruma diagramma pārsniedz pat 4 dienu augšanas riska robežlīkni. Skaitliskā modelēšana rāda, ka ilgtermiņā senīšu augšanas riski siltinājuma slāņa ārpusē būtu novērsti, ja prettvaiku barjera būtu iestrādāta (attēls 6.52 b), taču tad PLY stendam mitruma riski pieaugtu akmens vatē pie tvaika barjeras (attēls 6.52 c). Līdzīgi var secināt, ka prettvaiku barjeras izmantošana LOG stendam, ja tā ir kvalitatīvi iestrādāta un nav bojāta novērš jebkādus pelējuma veidošanās riskus konstrukcijā (skat. attēlu 6.52 e), bet, ja prettvaiku plēves nav, tad mikroorganismu attīstības risks ir ļoti augsts (skat. attēlu 6.52 d) – temperatūras-mitruma diagramma pārsniedz pat 8 dienu augšanas riska robežu. Kā jau bija sagaidāms AER stendam, nekādi pelējuma riski nav gaidāmi (attēls 6.52 f), ja sākotnēji ļoti mitrās gāzbetona bloku konstrukcijas tiek pietiekami intensīvi ventilētas, lai reducētu ūdens daudzumu tajās. Būtiski, ka šinī gadījumā normāla telpu ventilācija ar gaisa apmaiņas intensitāti  $n=0,5$  1/h, ir

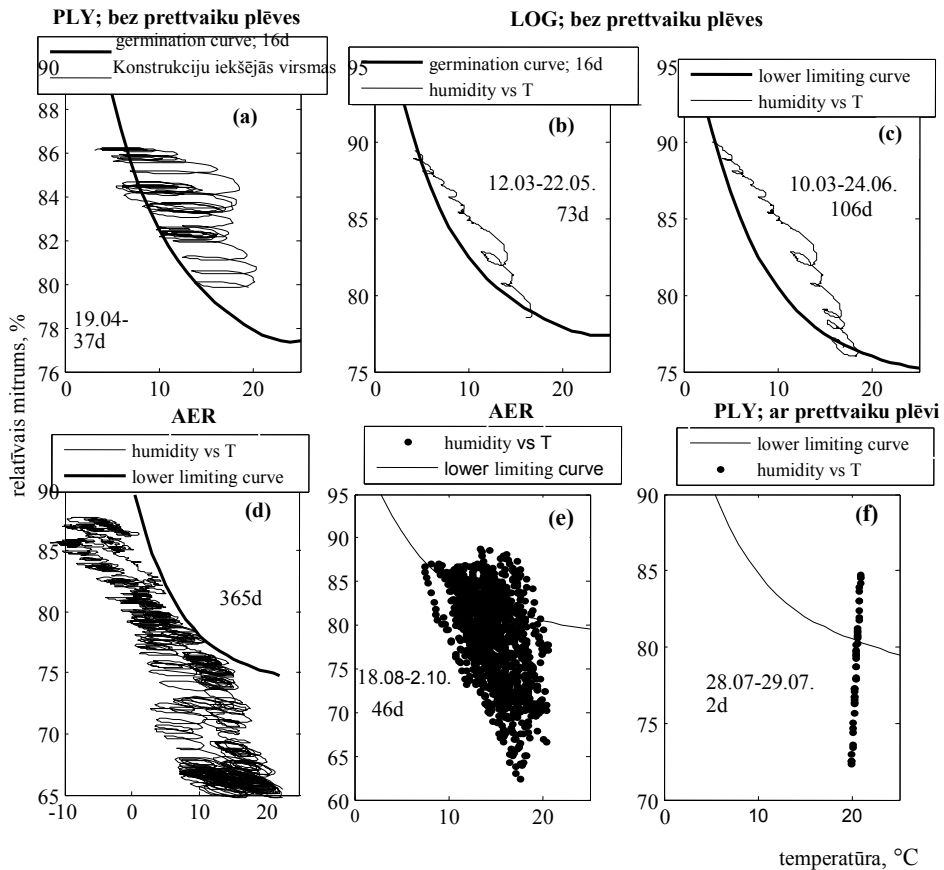
būtiski nepietiekama un, kā parādīja mērījumi stendos (skat. arī 7. nodaļu), pelējums šajos stendos veidojas arī uz būvkonstrukciju iekšējās virsmas.



*Attēls 6.52. Relatīvā mitruma – temperatūras dinamika gada laikā izvēlētās būvkonstrukciju kritiskajās zonās. Biezākā līnija ir robežlīkne, apgabālā zem kuras sēnīšu augšanas risku nav. Plānākās līnijas norāda laiku (dienās), kuru pārsniedzot iespējama sēnīšu augšana: (a), (b) atbilst kritiskajai vietai PLY stenda ār sienā, kas atzīmēta ar vertikālo raustīto līniju (skatīt attiecīgi kreisajā pusē attēls 6.51. a, b); (c) atbilst vertikālajai raustītājai līnijai attēls 6.51. a labajā pusē); (d) atbilst vertikālajai līnijai (skat. attēlu 6.51. d). (e) atbilst kreisajai vertikālajai līnijai (skat. attēls 6.51. c). (f) atbilst kritiskajai vietai (skat. attēlu 6.51. e).*

Detalizētāka analīze ar stundas soli laikā izvēlētiem īsiem kritiskajiem periodiem (attēls 6.53) parāda, ka saplākšņa moduļu (PLY) konstrukcijai ievērojami mitruma riski ir tieši pavasarī (skat. attēlu 6.53 a). Vēl izteiktāki mitruma riski pavasarī būtu LOG stenda ār sienas konstrukcijai, ja nebūtu izmantota prettvaiku plēve (attēli 6.53 b un c). Kā jau norādīts iepriekš, gāzbetona bloku, ja sākotnējais ūdens no tiem izvadīts, ār sienas siltuma izolācijas ārējā zonā sēnīšu augšanas risku nav (attēls 6.53 d). Neskatoties uz to, ka AER stenda bloku ārējās virsmas relatīvais mitrums regulāri apkures periodā atrodas arī virs sēnīšu augšanas risku robežlīknes (6.53 e), tomēr sēnīšu augšana nav sagaidāma, jo pārsniegums ir īslaicīgs un periodiski mainās diennakts ciklā. Ja PLY stenda ār sienas konstrukcijā būtu izmantota prettvaiku plēve, tad tomēr būtisku mitruma risku vasaras periodā akmens vatē pie plēves nebūtu (skat. attēlu 6.53 f), jo sēnīšu augšanas robežlīkne

arī šīnī gadījumā tiek pārsniegta īslaicīgi. Tādējādi detalizētā skaitliskā analīze pilnībā apstiprina jau iepriekš izteiktos sēnīšu augšanas riska vērtējumus dažādajiem (gan realizētajiem, gan alternatīvajiem) ārēsienu konstruktīvajiem risinājumiem.



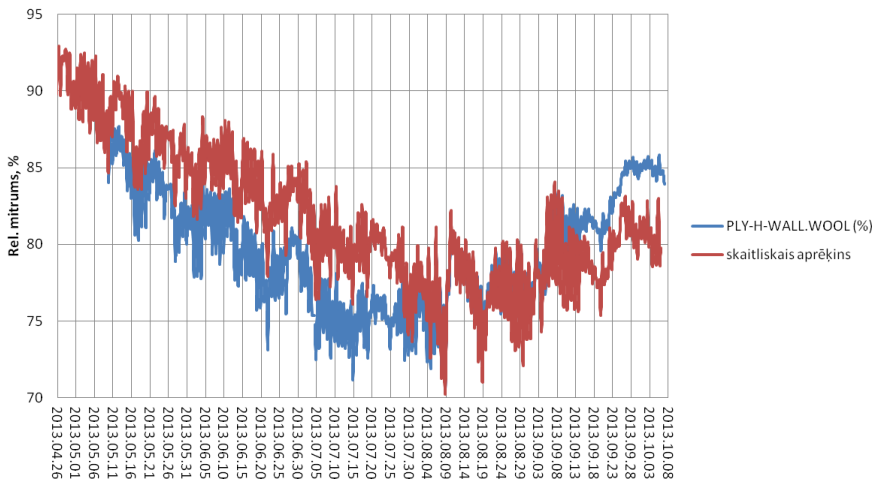
Attēls 6.53. Relatīvā mitruma – temperatūras dinamika būvkonstrukciju kritiskajās zonās izvēlētos laika periodos: (a) akmens vatē pie ārējā saplākšņa PLY ārēsienā; (b), (c) akmens vatē pie ārējā frēzbalķa LOG ārēsienā; (d) starpslānis starp pretvēja plāksni un akmens vati AER ārēsienā; (e) gāzbetona bloku ārējā virsma AER stendam; (f) akmens vatē pie pretvaiku barjeras PLY ārēsienā.

#### 6.5.4. Mitruma dinamikas skaitlisko modeļu verifikācija

Svarīgi novērtēt, cik labi multifizikālās mitruma un temperatūras dinamikas skaitliskās modelēšanas rezultāti korelē ar eksperimentālajiem, kas tika iegūti 2013.g. mērījumos dažādās būvkonstrukciju zonās. To uzskatāmi parāda relatīvā mitruma izmaiņu piemēri PLY un LOG stendu ārēsienu konstrukcijās (attēli 6.54 un 6.55). Vērtējot rezultātu jāievēro, ka faktiskais mitruma līmenis visā konstrukciju šķērsgriezumā nav zināms. Tas nozīmē, ka sākuma nosacījumus modeļaprēķinam var uzdot tikai aptuveni. Aprēķinam izvēlētajos laika periodos tiek izmantoti faktiskie (izmērītie) gaisa temperatūru un relatīvā mitruma dati. Ievērojot teikto var konstatēt, ka skaitlisko aprēķinu rezultāti kopumā labi atbilst eksperimentālajiem, tomēr atšķirības ir vērojamas.

To galvenais iemesls ir konstrukcijā izmantojamo materiālu faktisko īpašību (siltuma vadītspēja, ūdens tvaiku caurlaidība u.c.) atšķiras no tām vērtībām, kuras deklarē ražotāji, kuras ir pieejamas dažādās datu bāzēs un kuras tādējādi var izmantot aprēķinos. Īpaši svarīgi tas šinī gadījumā ir tieši attiecībā uz ūdens tvaiku caurlaidību un prettvaika barjeru (plēvju) īpašībām, kuras skaitliskajos aprēķinos variējot, būtiski mainās mitruma sadalījumu dinamika būvkonstrukcijās.

Tādējādi parādīts, ka izstrādātie matemātiskie modeļi, metodika un aprēķinu programmas var sekmīgi izmantot gan mitruma stāvokļa, ūdens dinamikas un tā akumulācijas, ja tāda būtu vērojama, gan mikroorganismu augšanas risku vispusīgai analīzei dažādās slāņainās būvkonstrukcijās.



Attēls 6.54. Eksperimentālie rezultāti (zilā līkne) salīdzinājumā ar skaitliskajiem aprēķiniem atbilstoši izstrādātajai aprēķinu metodikai (sarkanā līnija) laika periodā no 2013. gada aprīļa līdz 2013. gada oktobrim PLY stenda konstrukcijā.



Attēls 6.55. Eksperimentālie rezultāti (zilā līkne) salīdzinājumā ar skaitliskajiem aprēķiniem (sarkanā līnija) laika periodā no 2013. gada aprīļa līdz 2013. gada oktobrim LOG stenda konstrukcijā.

### 6.5.5. Dažādo stendu pārkaršanas risku analīze

Tā kā vasaras periodā Latvijā telpu kondicionēšana lielāko tiesu netiek izmantota, tad būtiski ir izvērtēt arī telpu pārkaršanas riskus dažādos tipiskos āra apstākļos, atšķirīgos telpu izmantošanas un ventilācijas režīmos, kā arī precizēt būvkonstrukciju ietekmi. Ar šādu mērķi, izmantojot nestacionāru un 3D skaitliskās modelēšanas pieeju programmā *WUFI PLUS*, detalizētāk tika analizēti pārkaršanas riski trijos no izveidotajiem testēšanas stendiem - CER, LOG un PLY. Stends ar keramisko bloku ārsienām (CER) šajā analīzē pārstāv masīvu būvkonstruktīvo risinājumu, bet stends ar saplākšņa paneļiem (PLY) – vieglāko no realizētajiem risinājumiem. Frēzbalķu stends (LOG) savukārt ir interesants ar savu specifisko ārsienu risinājumu, kur siltuma izolācijas slānis ir novietots konstrukcijas iekšpusē.

Analīze tika veikta 2013. g. periodam no 18. – 23. jūnijam, kad dienā tika sasniegtas augstas āra gaisa temperatūras - maksimāli līdz 32°C. Aprēķinā tika ņemts vērā arī faktiskais solārais starojums. Variēta tika ventilācijas intensitāte (pamatvariantā  $n=0,5$  1/h), solārā starojuma caur logu ietekme (pamatvariantā trīsstiklu paketei  $g=0,5$ ) un iekšējo siltuma avotu izdalītā siltuma jauda (pamatvariantā  $N_{iekš}=30$  W). Attēlā 6.56 redzams, ka LOG un PLY testēšanas stendiem izstrādātais skaitliskais modelis, kas implementēts un realizēts specializētās modelēšanas programmas *WUFI PLUS* vidē, uzrāda ļoti labu atbilstību faktiskajiem temperatūras mērījumu datiem izvēlētajā periodā (melnā līnija salīdzinājumā ar zilo līniju). Tai pat laikā arī redzams, ka stikla paketēm ar lielāku solārā starojuma caurlaidības koeficientu (piemērā  $g=0,7$ ) pie vienādiem pārējiem apstākļiem maksimālā temperatūra telpās siltākajās jūnija dienās varētu palielināties vēl par 2°C vairāk nekā esošajā situācijā. Tādējādi stendos izvēlētie logi arī vasaras periodā vērtējami kā izdevīgi no energopatēriņa un termiskā komforta nodrošināšanas viedokļa. Ja ziemā to nosaka samazinātā siltuma caurlaidība ( $U=0,72$  W/m<sup>2</sup>K), tad vasaru savukārt būtiska ir samazināta solāra starojuma caurlaidība. Ja logs ir segts ar ārējo žalūziju (pelēkā līnija attēlā 6.56), tad vasaras termiskā komforta temperatūra (24°C) šajos stendos netiek pārsniegta – tas parāda vienu no efektīviem pasīvajiem paņēmieniem telpu pārkarsuma novēršanai Latvijas klimatā vasaras periodā. Cita iespēja ir būtiska ventilācijas intensifikācija – tomēr vienmērīga trīskārša gaisa apmaiņas paaugstināšana līdz  $n=1,5$  1/h (dzeltenā līkne) dod mazāku efektu nekā intensīva nakts vēdināšana (violetā līkne). Tas labi saprotams, jo dienā telpā ieplūst relatīvi silts āra gaiss, bet naktī āra gaisa temperatūra ir būtiski zemāka. Tomēr šādai nakts ventilācijai ir arī negatīvs aspekts, proti, pieaug temperatūras svārstību amplitūda (it sevišķi vieglajās būvēs) diennakts ciklā. Nav pārsteidzoši arī, ka stenda iekšienē izdalītās siltuma jaudas pieaugums no 50 uz 100 W (tuvināti atbilst viena cilvēka klātbūtnēi telpā), ļoti būtiski (pat par 4-5°C) paaugstina pārkarsumu līdz temperatūru līmenim (maksimāli 34°C), kas nav pieņemams no termiska komforta viedokļa.

Sākotnēji šķiet negaidīti, ka maksimālais pārkarsuma līmenis LOG stendā ir pat nedaudz augstāks nekā PLY stendā, kura kopējā ārsienu masivitāte mazāka. Tomēr šajos gadījumos atšķiras zonu ar lielu siltuma ietilpību novietojums – PLY stendam tā ir telpas iekšpusē, kur iestrādāts fibrolīts un apmetums, bet LOG stendam tie ir frēzbalķi, kas novietoti ārpusē aiz siltuma izolācijas slāņa. Tādējādi šādos nekondicionētas iekštelpas temperatūras apstākļos pie lielām āra temperatūras svārstībām diennakts ciklā būtiska ir ne tikai kopējā būvkonstrukciju masivitāte, kas pārkarsumu var mazināt (to uzskatāmi parāda temperatūras maksimālais līmenis CER stendā –

attēls 6.56 a), bet arī termiskās masas izvietojums (iekšpusē vai ārpusē), ja kopējā būvkonstrukciju siltuma ietilpība neatšķiras ļoti stipri. Pēdējais aspekts tad arī izpaužas šķietami inversā maksimālā pārkarsuma situācijā standos PLY un LOG.

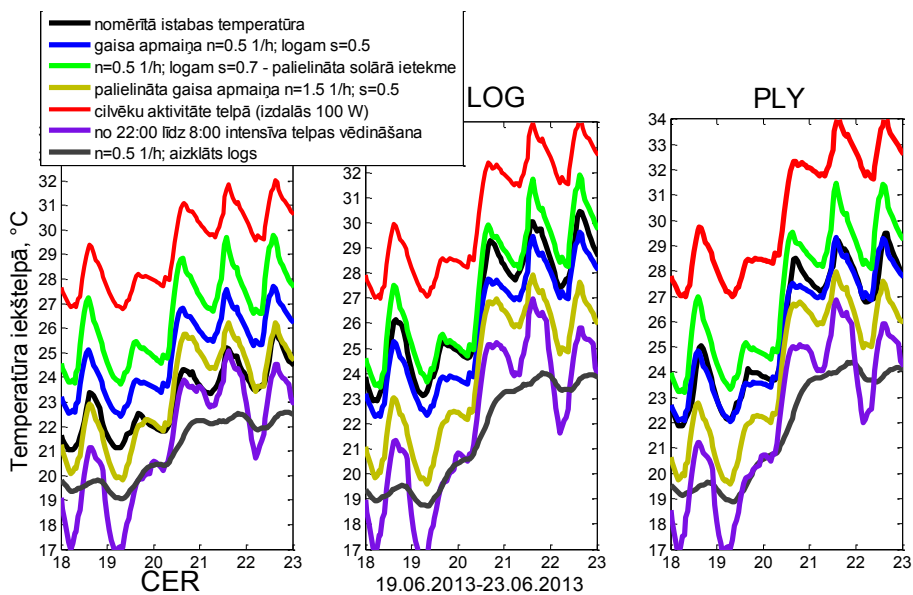
Tā kā smago ārsienas būvkonstrukciju standā CER maksimālais temperatūras līmenis ir būtiski zemāks un apskatāmajā periodā nepārsniedz  $26^{\circ}\text{C}$ , tad vienmērīgi paaugstināts ventilācijas intensitātes līmenis ( $n=1,5$  1/h), sekmē nevis temperatūras pazemināšanos telpā, bet gan var sekmēt tās pieaugumu (dzeltenā līnija attēls 6.56 a), kad ārā temperatūra pietiekami augsta. Kopumā tomēr būtiski lielāka CER konstrukciju siltuma ietilpība nosaka būtiski mazāku maksimālo pārkarsuma līmeni telpā, nekā LOG standā, kur inversā termiskās masas izvietojuma ārsienā dēļ, pārkarsums analizētajās situācijās ir vislielākais.

2013. g. augusta siltākajās dienās, kad logi visos standos bija aizklāti ar ārējām žalūzijām kā rezultātā tiešs solārais starojums standu iekšienē nonāca (attēls 6.57), maksimālā iekštelpu temperatūra vieglās konstrukcijas PLY standā pārsniedza  $+29^{\circ}\text{C}$  (attēls 6.57 c) un frēzbaļķu standā LOG sasniedza  $+28^{\circ}\text{C}$  (attēls 6.57 b). Tai pat laikā standā ar masīvu ārsienas konstrukciju (CER) tik liels temperatūras pieaugums un pārkaršana netika novērota - maksimālā iekštelpu gaisa temperatūra nepārsniedza  $+25^{\circ}\text{C}$ .

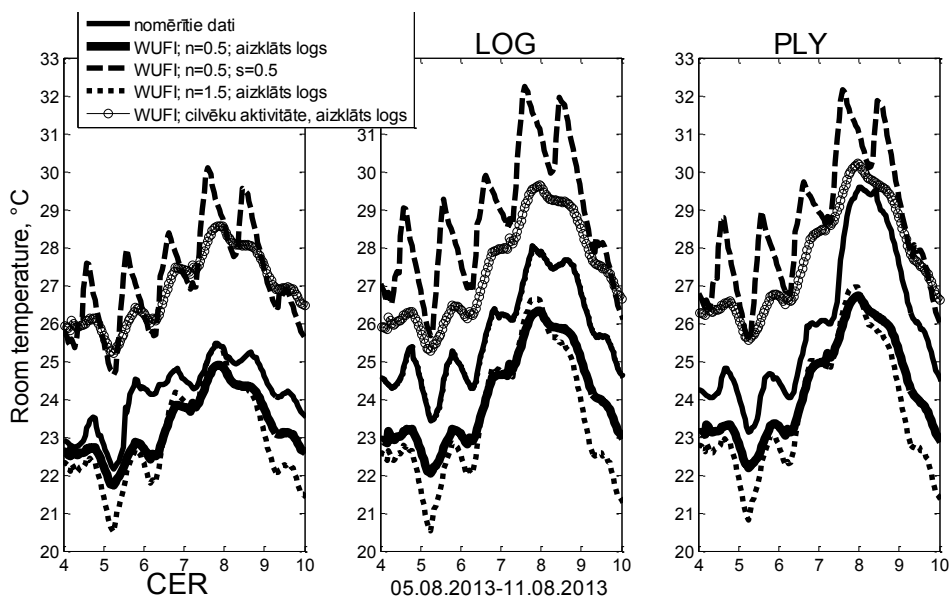
Aprēķinos augusta mēnesim, izmantojot multifizikālās modelēšanas pieeju, iegūto rezultātu tik laba sakritība ar eksperimentālajiem rezultātiem kā jūnijā (skat. attēlu 6.56) nav novērojama (attēls 6.57, abas nepārtrauktās līnijas), taču dažādo faktoru ietekmes tendences ir tādas pašas kā tika aprakstīts iepriekš attēlu 6.56 kontekstā. Piem., intensīvāka ventilācija ( $n=1.5$  1/h) vienmērīgā režīmā pārkaršanas riskus iekšelpās vieglo konstrukciju PLY standā būtiski samazina, bet CER standā ietekme ir maza, jo ārā temperatūras dienā ir tuvas iekštelpu temperatūrai. Arī paaugstināta cilvēku aktivitāte telpā ( $N_{ieks}=100$  W), bet it īpaši solārais starojums ( $g=0,5$ ) telpas maksimālo pārkarsumu var būtiski paaugstināt pat līdz  $+32^{\circ}\text{C}$ , radot izteikta termiskā diskomforta apstākļus telpā.

Augstāks izmērīto temperatūru līmenis PLY un LOG standos salīdzinājumā ar modelēšanā iegūto augsta mēnesī skaidrojamas ar to, ka aprēķinu modelī netika ņemta vērā bēniņu telpas pārkaršana. Jūnija mēneša aprēķinā tam bija mazāka loma, jo telpā ar solāro starojumu dienā nonāca liels siltuma daudzums, turpretim augustā logi bija segti ar ārējām žalūzijām un pieauga citu siltuma bilances komponentu, tai skaitā siltuma apmaiņas ar bēniņu telpu loma.

Tādējādi izstrādātā modelēšanas metodika (Ozolins *et.al.*, 2012; Ozolins *et.al.*, 2013) kopumā ļauj efektīvi izvērtēt un atrast vislabākos risinājumus arī telpu pārkarsuma reducēšanai Latvijas klimatā vasaras periodā, neizmantojot aktīvās kondicionēšanas sistēmas, bet gan dažādas pasīvās metodes – vadāmu ventilāciju, ventilāciju caur zemi, vadāmas ārējās žalūzijas u.c. paņēmienus. Protams, lai iegūtu ne tikai kvalitatīvu dažādo parametru ietekmes tendenču novērtējumu, bet noteiktu arī kvantitatīvos izmaiņu rādītājus, vispirms ir jāveic izmantojamā modeļa parametru validēšana, izmantojot mērījumu datus.



Attēls 6.56. Faktiskā un aprēķinātās iekštelpu gaisa temperatūras dažādu konstrukciju (CER, LOG, PLY) stendos dažās siltākajās jūnija dienās.



Attēls 6.57. Faktiskā un aprēķinātās iekštelpu temperatūras CER, LOG un PLY stendos dažās siltākajās 2013.g. augusta dienās, kad logus sedz ārējas žalūzijas (nav tiešā solārā starojuma ietekmes telpā).

### 6.5.6. Kompozītu būvkonstrukciju siltuma caurlaidības modelēšana

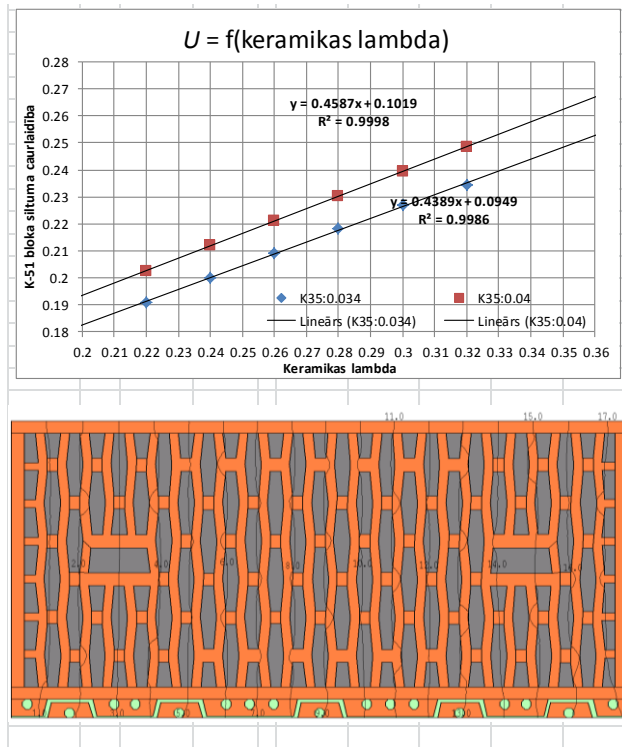
Būvniecībā bieži tiek lietotas kompozītas būvkonstrukcijas, kuru atsevišķo komponentu (daļu) siltuma caurlaidības īpašības un siltuma apmaiņas fizikālo mehānismu (siltuma vadīšana, siltuma starojums un termiskā konvekcija) loma tajās būtiski atšķiras. Ja konstrukcijas ir slāņainas vai ar tipiskiem karkasa elementiem, tad šādu saliktu konstrukciju siltuma caurlaidību relatīvi vienkārši var aprēķināt izmantojot inženierformulas un standartus (LVS NE ISO 6946, 2009). Tomēr ļoti daudzām kompozītām konstrukcijām tas nav tik vienkārši izdarāms. Kā piemērus var minēt lielgabarīta būvniecības blokus ar makroskopiskiem dobumiem, vai arī stikla paketes un logu rāmja profilus. Gan dobumos, gan spraugā starp stikliem temperatūras starpību ietekmē veidojas gaisa konvektīvās plūsmas, kuru intensitāte būtiski atkarīga gan no plūsmas apgabala ģeometrijas, gan temperatūru starpības un gāzes īpašībām. Bez tam šādās caurspīdīgās vidēs (gāzēs, stiklā) ļoti būtiska, pat dominējoša loma var būt starojuma siltuma apmaiņai.

Tādēļ šādu kompozītu konstrukciju efektīvo siltuma vadītspēju un siltuma caurlaidību pietiekami precīzi ar inženierformulām aprēķināt nevar pat tad, ja atsevišķo materiālu (keramika, vate, u.c.) siltuma vadītspējas ir zināmas. Šajos gadījumos ir nepieciešams izmantot siltuma apmaiņas procesu un gāzes plūsmu matemātiskās modelēšanas metodi un specializētu modelēšanas programmatūru (piem., *ANSYS*). Šī pieeja un tās lietojumu rezultāti detalizēti aprakstīti publikācijās [42], [47], [48].

Šeit parādīsim tikai vienu piemēru – keramiskā bloka ar dobumiem, kuri pildīti ar siltuma izolācijas materiālu,  $U$  vērtības aprēķinu (attēls 6.58). Šāda veida bloki tika izmantoti izbūvējot viena no eksperimentālajiem stendiem (EXP) ār sienas, neizmantojot papildus siltinājuma slāni, kā tas ir pārējām salīdzināmajām stendu ār sienas konstrukcijām (skat. arī 4. nodaļu). Dobumu pildījumam praksē ir izmantotas putu polistirola granulas, kas pārklātas ar grafitu virsmas emisijas samazināšanai. Šajā aprēķinā izmantotas divas pildījuma siltuma vadītspējas vērtības – 0,034 un 0,040 W/m·K. Bloka biezums ir 51 cm, keramikas tilpuma daļa ir 55% un bloka dobumu konfigurācija parādīta attēlā 6.58 apakšā. Gaisa temperatūras ārpus termiskajiem robežslāņiem bloka pretējās pusēs attiecīgi ir pieņemtas vienādas ar 0 un 18°C, bet, tā kā apskatāmo materiālu siltuma vadītspēja maz mainās interesējošajā temperatūru diapozonā, tad rezultāti praktiski neatšķirtos, izmantojot citu reālistisku gaisa temperatūru starpību. Attēla 6.58 apakšā uz bloka šķērsriezuma parādītas arī temperatūras izoterms.

Iegūtie rezultāti parāda, ka pie reālistiskam siltuma izolācijas materiāla vadītspējas vērtībām šādā dobumu konfigurācijā rezultējošā bloka siltuma vadītspēja praktiski lineāri samazinās līdz ar keramikas vadītspēju, ko savukārt nosaka mikroporu pieaugums un īpatnējā svara samazinājums. Efektīvs ceļš  $U$  samazināšanai ir keramikas daļas samazināšana blokā, piem., no 55% uz 45%, bet, protams, jāņem vērā, ka, pieaugot porozitātei un keramikas daļai blokā, samazinās arī bloku spiedes stiprība un to nestspēja. Vadoši Eiropas keramisko bloku ražotāji, optimizējot pildīto bloku parametru, 50 cm bieziem blokiem pašreiz ir sasnieguši siltuma caurlaidību  $\leq 0,12$  W/(m<sup>2</sup>K).

EXP stenda ārsienām bija plānots ar pildītiem keramiskajiem blokiem sasniegt  $U=0,16$   $W/(m^2K)$ , tomēr, kā rāda veiktie  $U$  vērtību un energopatēriņa mērījumi (skat. 5 un 7. nodaļas), praksē EXP stenda ārsienās šī vērtība netika sasniegta. Tā iemesls ir lielāka faktiskā keramikas daļa (55%) blokā, nekā bija plānots un, iespējams, arī augstāka dobumos iepildīto granulu efektīvā siltuma vadītspēja.



Attēls 6.58. Keramiskā bloka ar siltuma izolācijas materiāla pildījumu dobumos (apakšā) efektīvas siltuma caurlaidības atkarība no keramiskā un siltuma izolācijas materiālu siltuma vadītspējas (augšā).

## 6.6. Termiskā komforta apstākļu modelēšana telpās

### 6.6.1. Matemātiskā modeļa pamatnostādnes

Lai prognozētu gaisa plūsmas un temperatūras sadalījumus pētāmajos stendos, tika izveidots trīsdimensionāls (3D) multifizikāls matemātiskais modelis, ietverot turbulento plūsmu, kas veidojas termiskas konvekcijas un ventilācijas ietekmē, aprakstu. Šī plūsma ir specifiska, jo tajā dominē nestacionāra (ar mainīgu virzienu un intensitāti) gaisa ieplūde no gaisa siltumsūkņa iekšējā bloka, kas ar šo gaisa plūsmu nodrošina arī telpas sildīšanu vai dzesēšanu. Lai skaitliski realizētu aprēķinus tika lietota komerciāla programmpakete *ANSYS CFX*, kura balstīta uz galīgo tilpumu metodi. Siltuma apmaiņa vispārīgā gadījumā notiek ar siltuma starošanu, siltuma vadīšanu un vielas pārnesei - konvekciju. Ņemot vērā, ka pie mazas temperatūru starpības siltuma starojuma ietekme ir neliela, siltuma starojums šajā modelī netika ņemts vērā. Siltuma pārnese cietā

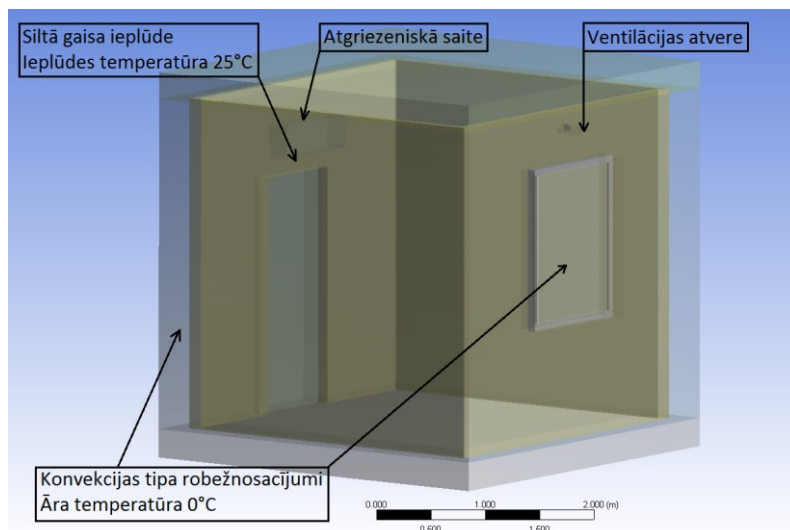
necaurspīdīgā vielā notiek vadīšanas ceļā, tāpēc būvkonstrukcijās tika risināts tikai siltuma vadīšanas vienādojums (skat. arī 2. nodaļu).

Siltuma apmaiņu gaisā savukārt galvenokārt nosaka vielas pārnese, tādēļ papildus siltuma vadīšanas vienādojumam ir nepieciešams risināt arī gaisa kustības vienādojumu. Gaisa plūsma pie maziem ātrumiem (ātrumiem, 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 pētāmajos eksperimentālajos standos nepārsniedz 2 - 3 m/s. Nesaspiežamības pieņēmums termiskās konvekcijas aprakstam ļauj pielietot tā saucamo Businesska tuvinājumu, respektīvi aprēķinā tiek pieņemts, ka gaisa blīvums ir nemainīgs, bet ar blīvuma izmaiņām, mainoties temperatūrai, saistīto iedarbību uz plūsmu ievēro uzdotot tilpuma spēku, kas ir atkarīgs no temperatūras un darbojas uz katru gaisa elementu. Tā iedarbības rezultātā siltākajiem un tādējādi vieglākajiem gaisa elementiem ir tendence celties uz augšu, bet aukstākajiem un tādējādi smagākajiem – grimt.

Tādējādi nesaspiežamas lamināras plūsmas gadījumā impulsa pārneses aprakstam izmanto Navjē-Stoksa vienādojumus, bet gaisa kustība telpās parasti ir turbulenta, jo to raksturojošo Reynoldska skaitļu vērtības pārsniedz kritiskās ( $Re \approx 10^5 > Re_{kr} \approx 2 \cdot 10^2$ ). Tādēļ aprēķinos nepieciešams izmantot kādu no turbulences modeļiem (S. Gendelis, A. Jakovics, 2003; S. Gendelis, A. Jakovics, 2005; S. Gendelis, A. Jakovics, 2010). Līdzšinējās pieredzes analīzes rezultātā kā piemērots tika izvēlēts kombinētais  $k-\omega$  SST turbulences modelis, jo tas nodrošina labus vidējās turbulētās plūsmās apraksta tuvinājumus gan cieta virsmu (sienu) tuvumā, kur tiek lietots  $k-\omega$  turbulences modelis, gan arī tilpumā, kur faktiski tiek lietots  $k-\epsilon$  turbulences modelis.

Kaut arī pētāmie stendi slīpā jumta dēļ nav ideāli simetriski attiecībā pret vidusšķēlumu, matemātiskajā modelī to iekštelpa tiek uzskatīta par simetrisku, jo neapsildāmā bēniņu daļa detalizēti netiek apskatīta (attēls 6.59), uzdotot uz ārējām virsmām konvekcijas tipa (trešā veida) robežnosacījumus, bet stenda apsildāmajai iekštelpai eksistē vertikāla simetrijas plakne. Tas nozīmē, ka fizikālajiem laukiem stacionārā gadījuma ir jābūt simetriskiem pret šo vidusplakni, ja simetriska attiecībā pret to ir arī gaisa ieplūde caur gaisa siltumsūkņa atveri virs ieejas durvīm. Tas ļauj šajā gadījumā aprēķināt lauku sadalījumus, izmantojot tikai pusi modeļa ģeometrijas un pielietojot simetrijas robežnosacījumus, kas ļauj ievērojami samazināt aprēķinu resursu ietilpību un to ilgumu.

Uz apgabala ārējām robežām – ārsienu, grīdas, griestu, loga un durvju ārējām virsmām tiek uzdoti dabiskās konvekcijas tipa robežnosacījumi, siltuma apmaiņai ar ārējo vidi, bet apkārtējā gaisa temperatūra atbilstoši raksturīgiem ziemas apstākļiem tiek uzdota vienāda ar 0°C. Siltā gaisa ieplūde tiek modelēta, siltumsūkņa iekšējā bloka atverē uzdotot nemainīgas temperatūras gaisa plūsmu, kurai katrā gadījumā ir atšķirīgs ieplūdes ātrums un virziens. Lai nodrošinātu uzdotu gaisa apmaiņas intensitāti ar āra gaisu  $n$ , tikai daļa no telpā padotās gaisa plūsmas tiek pievadīta no ārpusēs. Atlikušo gaisa daļu iekārta recirkulatīvi padod no telpas, veicot tikai gaisa papildus piesildīšanu līdz vēlamajai ieplūdes temperatūrai.



Attēls 6.59. Aprēķinu apgabalu ierobežojošo virsmu shematisks attēlojums.

### 6.6.2. Stacionāra atrisinājuma iegūšana

Hidrodinamikas problēmu skaitliskie aprēķini, ja to parametri nav rūpīgi piemeklēti, bieži vien var kļūt skaitliski nestabili. Tāpēc risinot stacionāru problēmu var iegūt atrisinājuma svārstības vai pat nefizikālus rezultātus. Tipisks piemērs tam ir iegūta nesimetriska fizikālo lauku aina, kaut arī modelis ir simetrisks. Arī simetriskas ainas gadījumā rezultātiem ir jāpieiet kritiski, jo simetrija nenodrošina to, ka atrisinājums ir kvalitatīvi nokonverģējis un izpildās, piemēram, integrālie konverģences kritēriji. Divi no nosacījumiem, kurus ir būtiski kontrolēt, ir enerģijas un masas saglabāšanās pētāmajā sistēmā. Lai izvairītos no skaitliskās nestabilitātes šajā pētījumā tika izmēģināti divi paņēmieni kā iegūt fizikāli ticamu atrisinājumu. Pirmais saistās ar laba sākuma tuvinājuma atrašanu stacionāram risinājumam un laikā mainīga (nestacionāra) aprēķina lietošanu pie nemainīgiem robežnosacījumiem. Šo pieeju sauc arī par stacionārēšanas metodi. Šādā gadījumā laikā mainīgam aprēķinam pēc pietiekami ilga laika jātiecas uz stacionāra aprēķina rezultātu.

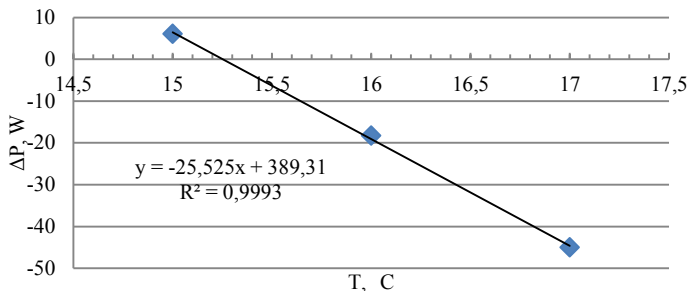
Ja stacionārā aprēķinā, variējot diskrēto režģi, tiek sasniegta noteikta, pietiekami stingru konverģences kritēriju izpildīšanās, tad var apgalvot, ka sasniegtais rezultāts ievērojami nemainīsies ilgstoši turpinot šo stacionāro aprēķinu. Šis arī ir labākais veids, kā meklēt stacionāru atrisinājumu, taču praksē pie dažādiem plūsmas uzstādījumiem stacionāru aprēķinu šādi iegūt neizdodas.

Pirms reālu eksperimentālo datu iegūšanas tika mēģināts iegūt stacionāru rezultātu, izmantojot izdomātus, taču reālai situācijai ne visai atbilstošus āra gaisa un iepļūdes temperatūras datus kā arī gaisa plūsmas ātrumus. Šādā nostādņē neizdevās sasniegt noteikto konverģences kritēriju, kuri vidējai kvadrātiskai nesaietei tika uzstādīti vienādi ar  $10^{-4}$ , izpildīšanos. Tāpat arī netika iegūta lauku simetrija, kaut arī siltuma un masas bilance izpildījās. Apskatot temperatūru un gaisa plūsmas ātrumu sadalījumus starprezultātiem bija redzams, ka simetrija saglabājas pirmajās ar kārtu 100 iterācijās, bet šajā gadījumā vēl neizpildās siltuma bilance. Tika noskaidrots, ka

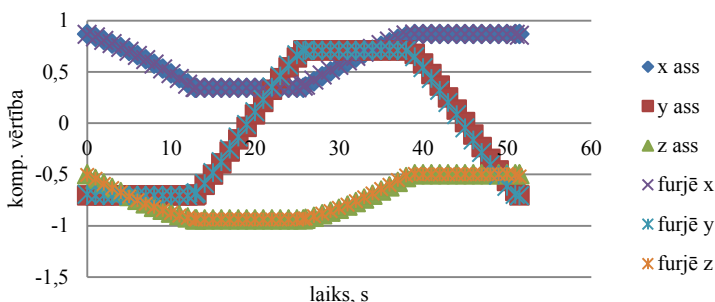
atrisinājums pirmajās iterācijās ir būtiski atkarīgs no izvēlētajā sākuma tuvinājuma un ir iespējams piemeklēt tādus sākuma nosacījumus, kuriem izpildās siltuma bilance un risinājumā saglabājas sistēmas simetrija. Ņemot vērā šos rezultātus tika izveidota pieeja rūpīgai sākuma nosacījumu piemeklēšanai.

Lai iegūtu labu sākotnējo tuvinājumu tika veikti vairāki 100 iterāciju aprēķini, katram no kuriem tiek aprēķināta siltuma bilance. Attēlojot siltuma bilances nesakritību atkarībā no sākuma temperatūras (attēls 6.60), var redzēt, ka šīs nesakritības labi apraksta lineāra funkcija, no kuras vienādojuma tika izteikta nepieciešamā aprēķina sākuma temperatūra. Pēc tam, kad tika veikts 100 iterāciju aprēķins pie šīs siltuma bilancei atbilstošās sākuma temperatūras, tika turpināts nestacionārs aprēķins, lai novērtētu, vai un cik lielā mērā rezultāts mainās. Pietiekami ilgi rēķinot nestacionāri ir iespējams nonākt pie stacionāra aprēķina, tomēr tas var prasīt ievērojamu laiku.

Nestacionāriem aprēķiniem savukārt ir citas problēmas kvalitatīva atrisinājuma iegūšanai. Pirmkārt jau laika solim jāizpilda Kuranta kritērija prasības – tas nozīmē, ka laika solis pie dotā režģa nedrīkst pārsniegt kādu noteiktu vērtību, kura atkarīga arī no gaisa kustības ātruma šajā zonā un no diskretizācijas režģa izmēriem. Nestacionārā situācija vēl jāņem vērā, ka gaisa ieplūdes virziens un intensitāte no gaisa – gaisa siltumsūkņa iekšējā bloka laikā periodiski mainās. Šādas izmaiņas laikā iespējams izvirzīt Furjē rindā un tās pirmos locekļus izmantot kā ātruma komponentu vērtības, kuras nosaka gaisa plūsmas virzienu (attēls 6.61).



Attēls 6.60. Siltuma bilances nesakritības atkarība no izvēlētajā telpas sākuma temperatūras un datu aproksimācija ar taisni; no taisnes vienādojuma tiek iegūta temperatūras sākuma vērtība, lai aprēķinam izpildītos siltuma bilance.

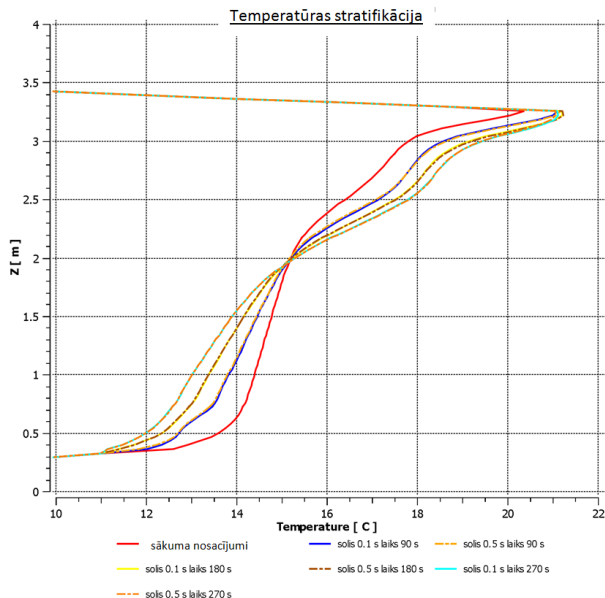


Attēls 6.61. Gaisa plūsmas virzieni pie gaisa – gaisa siltumsūkņa iekšējā bloka atveres nestacionārā gadījumā dzesēšanas ciklam un to aproksimācija.

### 6.6.3. Stacionāro aprēķinu rezultāti dažādām gaisa apmaiņas intensitātēm

Ar iepriekš aprakstīto pieeju tika veikti aprēķini dažādām gaisa plūsmas ātruma un gaisa apmaiņas koeficienta  $n$  vērtībām. Šāda tipa aprēķiniem tika noteikta arī siltuma bilance. Pie maziem gaisa ieplūdes ātrumiem gaisa apmaiņas koeficients ir izvēlēts tāds, lai viss telpai pievadītais gaiss izplūstu no telpas (aprēķinu apgabala) caur ventilācijas atveri un caur atgriezeniskās saites atveri siltumsūkņa iekšējā blokā nekas neatgrieztos.

Vispirms aprēķini tika veikti parametru vērtībām, kuras atbilst reāli sasniedzamiem ventilācijas režīmu parametriem. Par āra gaisa temperatūru aukstajā gadalaikā tika pieņemta  $0^{\circ}\text{C}$  temperatūra, kas atbilst vidējai apkures sezonas temperatūrai Rīgā, bet gaisa ieplūdes temperatūra telpā no gaiss – gaiss siltumsūkņa tika izvēlēta vienāda ar  $25^{\circ}\text{C}$ . Gaisa apmaiņas koeficients savukārt tika pieņemts  $n=0.6\text{ h}^{-1}$ , bet spraugas platums, kurš nosaka, cik daudz gaisa ieplūdis telpā, tika pieņemts vienāds ar 0.05 m. Gaisa plūsmas ātrums tika variēts, līdz ar to mainījās arī telpas vidējā temperatūra, jo pievadītais siltuma daudzums mainās līdz ar pievadīto siltā gaisa masu. Šāda tipa aprēķiniem nebija iespējams iegūt stacionāru atrisinājumu tiešā veidā – izmantojot patvaļīgus sākuma nosacījumus, tāpēc tika lietota iepriekš aprakstītā pieeja, piemēklējot sākuma tuvinājumus un risinot nestacionāru problēmu. Lai pārbaudītu, ka sasniegts stacionārs stāvoklis un atrisinājums patiešām laikā nemainās, tika salīdzināti atrisinājumi diviem atšķirīgiem laika soļiem – 0,1 s un 0,5 s. Kā rezultāta attīstības raksturlielums tika izvēlēts temperatūras sadalījuma pa augstumu apgabala vidusdaļā, t.i., uz līnijas, kas perpendikulāra grīdai (attēls 6.62).



Attēls 6.62. Temperatūras sadalījums uz vertikālas līnijas, telpas grīdas viduspunktā. Gaisa ieplūdes ātrums 0.6 m/s, gaisa apmaiņas koeficients 0.6 l/h un ieplūdes temperatūra  $25^{\circ}\text{C}$ .

Kā redzams, tad sadalījums tomēr laikā nedaudz mainās, bet izmaiņas samazinās un profils stabilizējas. Salīdzinot divus dažādus laika soļus var redzēt, ka atrisinājumi pilnībā sakrīt, kas

liecina par to, ka iegūtais atrisinājums ir korekts. Tika novērtēts, ka apmierinoša rezultāta stacionāram gadījumam sasniegšanai, bija nepieciešamas 540 s modeļa stacionārēšanas laika, kas aptuveni atbilst 9 minūtēm. Atbilstošā 3D aprēķina ilgums uz datora bija aptuveni 2 diennaktis, bet faktiskais laiks rezultāta iegūšanai bija vēl lielāks, jo bija nepieciešams iegūt arī kvalitatīvu sākuma tuvinājumu.

Aprēķini tika veikti arī robežgadījumam, kad visa ieplūstošā gaisa masa izplūst no telpas tikai caur ventilācijas atveri, tas nozīmē, ka atgriezeniskā saite šajā gadījumā nestrādā. Pie dažādām ātruma vērtībām tādējādi bija arī dažādi gaisa apmaiņas koeficienti, kuri parādīti kopā ar siltuma bilanci tabulā 6.4. Uzskatāmi redzams, ka, pieaugot gaisa apmaiņas intensitātei, ļoti strauji pieaug ventilācijas siltuma zudumi, bet manāmi pieaug arī pārvades siltuma zudumi caur būvkonstrukcijām, jo paaugstinās telpas vidējā temperatūra.

Kā redzams gadījumā bez atgriezeniskās saites (recirkulācijas), pievadītā jauda ieplūdei aug lineāri, bet atgriezeniskās saites gadījumā pie ieplūdes ātruma 0.6 m/s nepieciešamā jauda ir mazāka nekā pie ieplūdes ātruma 0.2 m/s bez recirkulācijas. Tas skaidrojams ar to, ka daļa siltā gaisa nonāk atpakaļ siltuma sūkņī ar būtiski 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 gaisa samaisīšana. Tomēr ļoti intensīva gaisa 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 6.5) var redzēt, ka recirkulācija ir būtiski svarīga, lai pie normālas gaisa apmaiņas intensitātes ( $n=0,6$  1/h) telpā nodrošinātu pieņemamu temperatūras režīmu. Šis papildus ieplūdes 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 punktus, 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 matemātiskā modelēšana to var būtiski atvieglot.

Kā viena no alternatīvām pieejām stacionāra atrisinājuma iegūšanai tik lietots modelis, kur ņemta vērā vertikālas fizikālas simetrijas plaknes esamība uz tās uzdodot simetrijas robežnosacījumus. Tādējādi, faktiski apskatot pusi no modeļa apgabala, sagaidāms, ka nebūs iepriekš minēto simetrijas izpildīšanās problēmu un atrisinājums stacionārajā gadījumā konverģēs, tomēr tā tas nav (attēls 6.63). Atrisinājums patiešām sasniedz kādu zināmu vērtību, bet sākas oscilācijas ap to ar relatīvi lielu amplitūdu. Liela šo svārstību amplitūda nozīmē, ka arī aprēķinu kļūda ir liela, tāpēc arī šajā gadījumā tika nolemts lietot jau izstrādāto pieeju ar nestacionāru aprēķinu pēc 100 sākotnējam stacionārām iterācijām. Kā bija sagaidāms, tad patiešām šādi iegūts

nestacionārs atrisinājums atrodas oscilējošā atrisinājuma robežās. Būtībā oscilācijas ap kādu noteiktu vērtību ir bieži vērojama parādība, tādēļ var uzskatīt, ka iegūtais rezultāts ir apmierinošs. Šeit gan var ievērot, ka temperatūras svārstību amplitūda ir 2°C, līdz ar to, šīs izmaiņas ir relatīvi lielas.

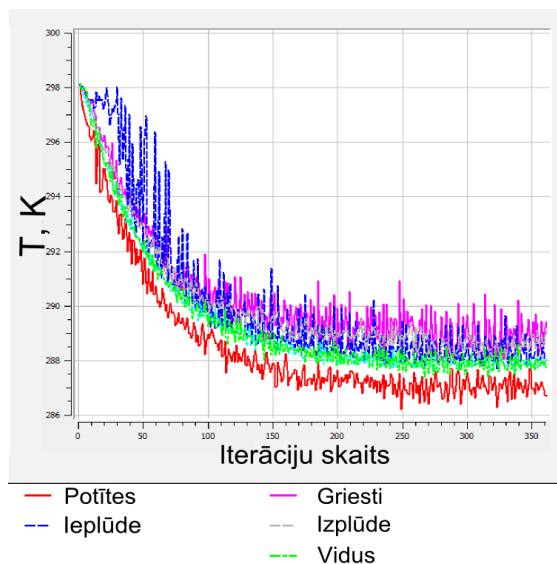
Tabula 6.4. Siltuma bilance dažādiem gaisa ieplūdes ātrumiem un gaisa apmaiņas koeficientiem  $n$  pie konstantas ieplūdes temperatūras 25°C.

	Siltuma bilances aprēķins					Mērvienība
	Ieplūdes ātrums	0.6	0.1	0.2	0.3	
	Ieplūdes ātrums	0.6	0.1	0.2	0.3	[m/s]
	Gaisa apmaiņa	0.6	0.6	1.2	1.8	[1/h]
Zudumi	Logs	-6.76	-9.09	-11.88	-13.62	[W]
	Siena	-48.07	-40.90	-54.27	-60.07	[W]
	Grīda	-10.76	-9.60	-11.82	-16.26	[W]
	Griesti	-15.64	-19.11	-24.47	-27.64	[W]
	Durvis	-8.15	-9.34	-12.96	-14.01	[W]
	Ventilācija	-43.7	-61.55	-141.18	-253.78	[W]
	Atgriezeniskā saite	-81,0	0	0	0	[W]
	Zudumi kopā	-214.08	-149.59	-256.58	-385.37	[W]
Avots	Ieplūde	214	132.19	262.29	390.91	[W]
	Starpība	-0.08	-17.40	5.71	5.54	[W]

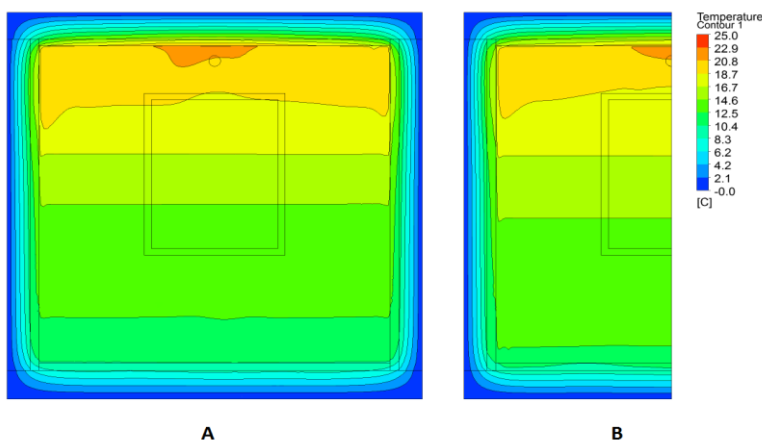
Tabula 6.5. Telpas gaisa vidējā temperatūra dažādiem apsildes režīmiem.

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

Rezultāti kvalitatīvi atbilst sagaidāmajiem, jo ir novērojama temperatūras stratifikācija un gaisa plūsma gar sienām virzās lejā, jo sienas ir aukstākas. Tāpat redzams, ka ieplūdes gaisa plūsmām būtu nepieciešami lielāki ātrumi, jo siltais gaiss strauji ceļas uz augšu un nespēj iespieties aukstajā slānī, kurš ir tuvāk grīdai (attēli 6.64 un 6.65). Tā rezultātā telpā veidojas lielas temperatūru starpības vertikālā virzienā (cilvēka augumā līdz 8°C), kas neatbilst termiska komforta prasībām telpā. Situāciju iespējams uzlabot virzot ieplūstošā gaisa plūsmu vairāk uz leju un periodiski mainot gaisa ieplūdes virzienu, lai uzlabotu gaisa sajaukšanos telpā – šī režīma modelēšanai nepieciešams nestacionārs aprēķins.

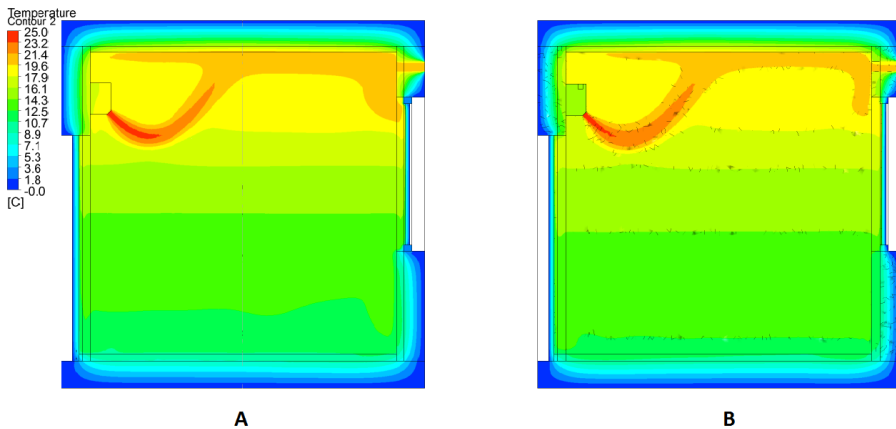


Attēls 6.63. Temperatūras vērtības dažādos apgabala punktos: potītes – 0.1 m no grīdas; griesti – 0.1 m no griestiem; vidus – gaisa apgabala vidū; ieplūde - 0.2 m no gaisa ieplūdes vietas, tās virzienā.

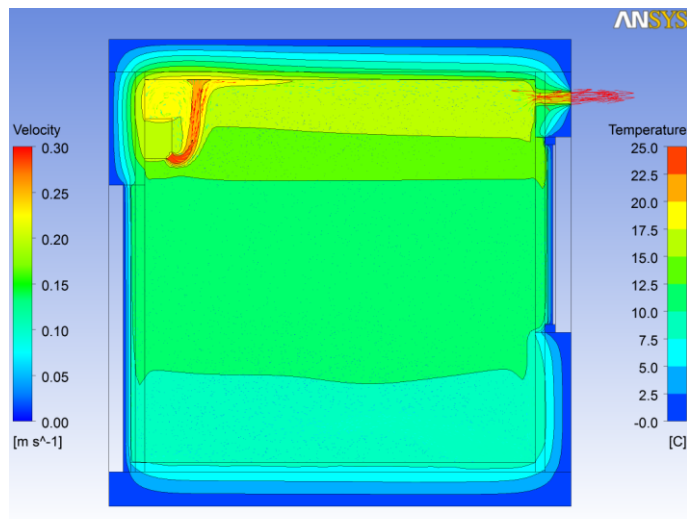


Attēls 6.64. Gaisa temperatūras salīdzinājums vertikālā šķērsgriezumā telpas vidusdaļā pilnam aprēķinu modelim un modelim, kur vidusplaknē izmantoti simetrijas nosacījumi. Nosacījumi uz stendu ārējām virsmām abos gadījumos vienādi. Ieplūdes ātrums – 0,6 m/s,  $n=0,6$  1/h.

Sākotnēji tika analizēts robežgadījums, kad nav atgriezeniskās saites - viss ieplūstošais gaiss izplūst no telpas caur ventilācijas atveri. Var redzēt, ka šajā gadījumā ļoti nozīmīga ir ventilācijas atveres novietojuma augstuma izvēle, jo siltais gaiss, kas ieplūst telpā, nespēj to sasildīt, jo izplūst ārā, nesamaisījies ar zemāk esošajiem gaisa slāņiem (attēls 6.66) - temperatūru starpība pa vertikāli telpas vidusdaļā var sasniegt pat 10°C



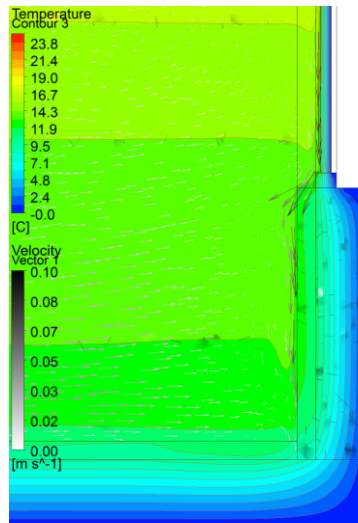
Attēls 6.65. Gaisa temperatūras sadalījums stacionārā aprēķina gadījumā pilnam modelim un modelim ar simetrijas nosacījumu vertikālā simetrijas plaknē,  $n=1$  1/h.



Attēls 6.66. Robežgadījums, kad viss gaiss, kas tiek ievadīts telpā caur siltumsūkni, izplūst caur ventilācijas atveri. Gaisa ieplūdes ātrums 0.3 m/s, bet ieplūdes temperatūra  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

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 apgabalos ar lielu gaisa masu pātrinājumu. Analizējot rezultātus redzams, ka tie kvalitatīvi atbilst sagaidāmajiem (attēls 6.67). Pirmkārt jāpiezīmē, ka izpildās praksē novērojamie stūra efekti, jo telpas stūris ir vēsāks nekā ārsienu virsmas tieši tā tieši 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 pastāv 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.



Attēls 6.67. Stenda modeļa fragments, kurā redzams ātrumu un temperatūru laukus stūrī zem un pie loga.

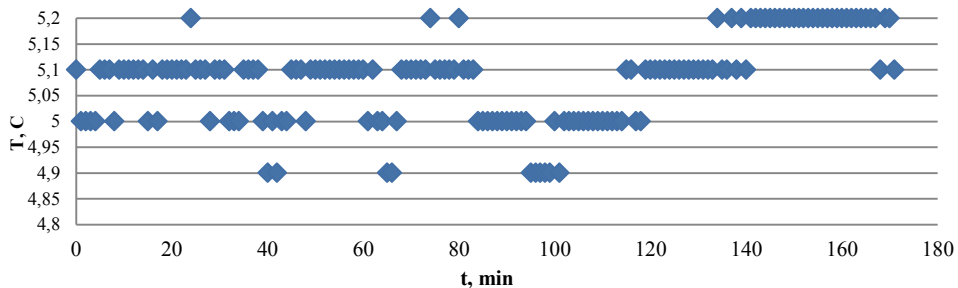
#### 6.6.4. Stacionāro aprēķinu rezultāti apkures periodā

Iepriekš parādītos aprēķinu rezultātus nevar tieši salīdzināt ar esošajiem eksperimentālajiem datiem, kas iegūti mērījumos. Viens no eksperimentālo stendu, kas aprakstīti iepriekšējās nodaļās, izveides mērķiem tieši arī bija iegūt datus skaitlisko modeļu verifikācijai. No eksperimentālajiem mērījumiem tika secināts, ka pieņemtais spraugas platums 0,05 m ir pārāk liels un, lai tas atbilstu fizikālai situācijai, un to ir nepieciešams sašaurināt. Tāpat arī iepriekš pieņemtās gaisa apmaiņas vērtība 0,6 1/h nebija precīza, mērījumi ar iezīmētās gāzes metodi parādīja, ka tā ir aptuveni 0,45 1/h (skat. arī 7. nodaļu). Šo iemeslu dēļ tika koriģēta iekšējā un izplūstošā gaisa masa.

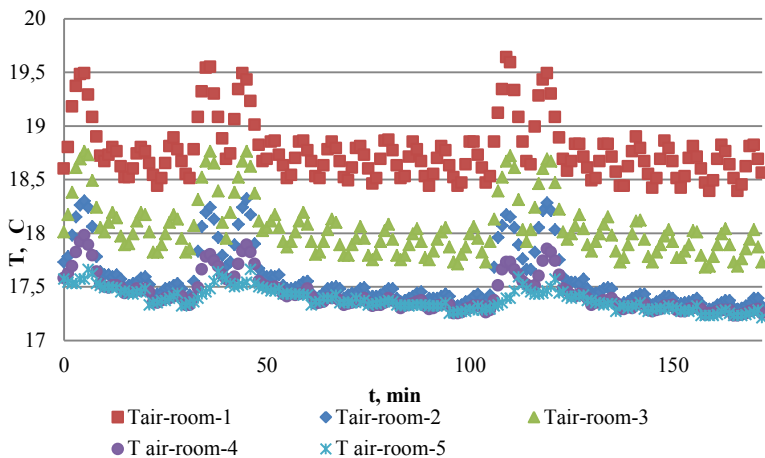
Tālāko aprēķinu mērķis jau ir precīzāk noskaidrot matemātiskā modeļa atbilstību eksperimentālajai situācijai. Šim nolūkam no mērījumu datiem tika izdalīti periodi, kuri tuvināti atbilst stacionāram stāvoklim. Pirmkārt jāņem vērā, ka saules radiācija modelī nav ņemta vērā un tādēļ ir nepieciešams izvēlēties periodus, kur tās ietekmes nav, t.i., vai nu nakti vai arī stipri apmākušos dienas laiku. Tāpat arī svarīgi atrast periodu, kurā gaisa temperatūra ārā pietiekami ilgi nemainās, lai būvkonstrukciju siltuma inerces lomu varētu ņemt vērā, jo stacionārā aprēķinā šis parametrs neietilpst. Acīm redzot šim periodam jābūt lielākam par konstrukciju raksturīgo termiskās inerces periodu.

Sildīšanas gadījumā tika izvēlēti dati no 2013. gada 20. aprīļa nakts. No temperatūras datiem attēlā 6.68 redzams, ka gaisa temperatūra ārā praktiski nemainās 3 h un šajā laika periodā var pieņemt, ka siltuma inerces ietekme ir maza. Iekštelpas gaisa temperatūrā (attēls 6.69)

redzams, ka tai ir īslaicīgi pieaugumi, kas atspoguļo siltuma sūkņa darbības režīma nevienmērību, proti, ka sildīšana faktiski notiek tikai īsos laika intervālos, nevis nepārtraukti. Tomēr aprēķinu modelī tiek pieņemts, ka sildīšana ir nepārtraukta. Šeit arī uzskatāmi redzama viena no siltuma sūkņa problēmām - tik mazu telpu šādas ražības siltumsūkņi spēj uzsildīt ātri un tāpēc darbojas tikai īslaicīgi, pārējā laikā strādājot ar nominālo jaudu un nodrošinot gaisa apmaiņu. Tas ievērojami samazina siltuma sūkņa faktisko lietderības koeficientu SPF (*seasonal performance factor*), jo būtībā daļa tā jaudas tiek izmantota nelietderīgi. Lai nodrošinātu aprēķinā telpā līdzvērtīgu temperatūru kā eksperimentālajā stendā, izmantojot izmērītos datus, tika noteikta gaisa ieplūdes temperatūra modelī aprēķinam vienāda ar 22,2 °C.



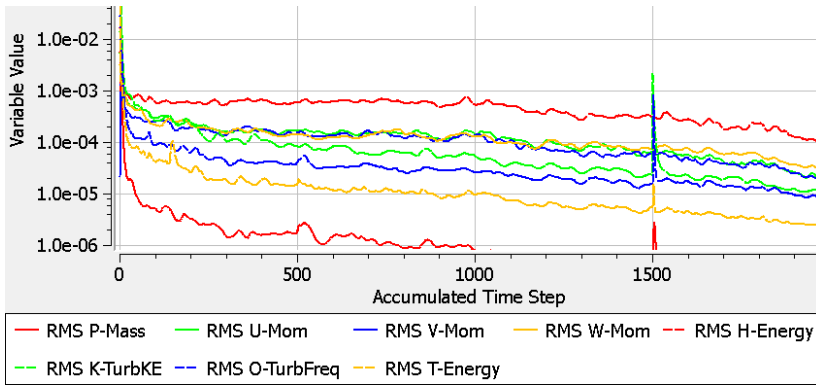
Attēls 6.68. Āra gaisa temperatūra 3 stundu periodam ar gandrīz nemainīgu temperatūru.



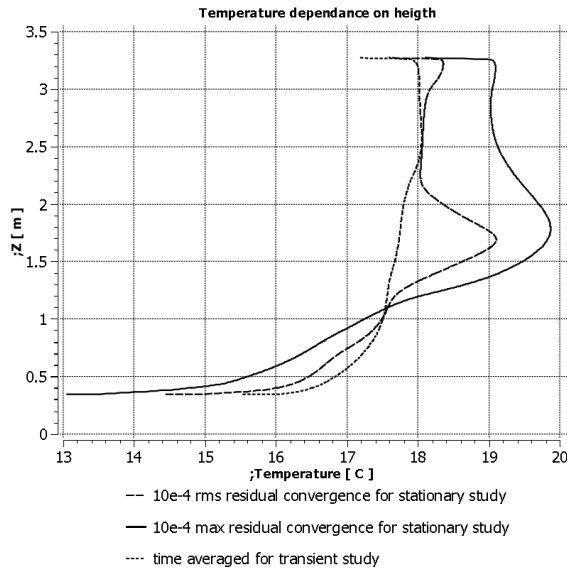
Attēls 6.69. Iekštelpas gaisa temperatūra pie nemainīgas gaisa temperatūras ārpusē.

Šajā gadījumā tika sasniegts sākotnēji uzstādītais konverģences kritērijs, kurš vidējai kvadrātiskajai nesaitei bija  $10^{-4}$  (attēls 6.70). Pēc tam aprēķini tika turpināti, lai iegūtu labāku konverģenci un pārbaudītu, vai atrisinājums nemainās. Konverģences kritērijs  $10^{-4}$  maksimālajai nesaitei netika sasniegts, bet atrisinājums bija stabils un nesaite vērtības oscilēja ap noteiktu vērtību. Redzams, ka tas ievērojami atšķiras no atrisinājuma, kas iegūts pie sākotnēji uzstādītā konverģences kritērija (attēls 6.71). Šai attēlā papildus parādīta arī laikā mainīgā aprēķina, kur

notiek ieplūdes virziena maiņa, atrisinājums, kurš sīkāk aprakstīts nākamajā punktā. Aprēķinam attīstoties ir novērojama lielāka temperatūru stratifikācija, kas parāda, ka stingrāks konverģences kritērijs, pat ja tā izpildīšanās nav sasniegta, dod ticamākus rezultātus.



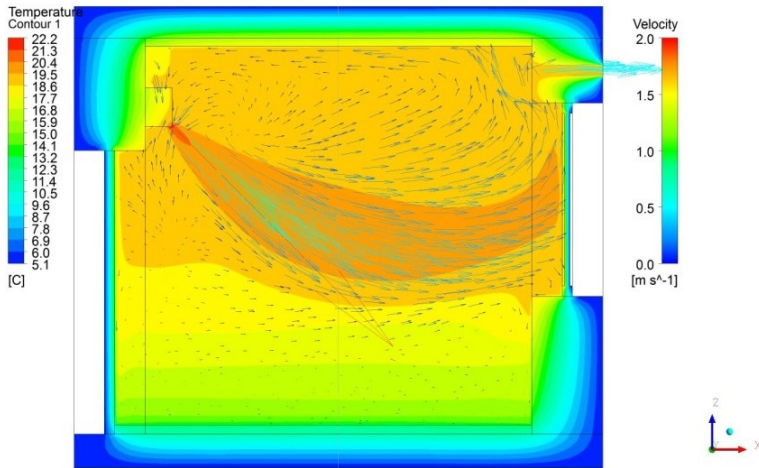
Attēls 6.70. Gaisa temperatūras iekšējā sadalījums pa līniju, kas atrodas telpas vidū, perpendikulāri grīdai.



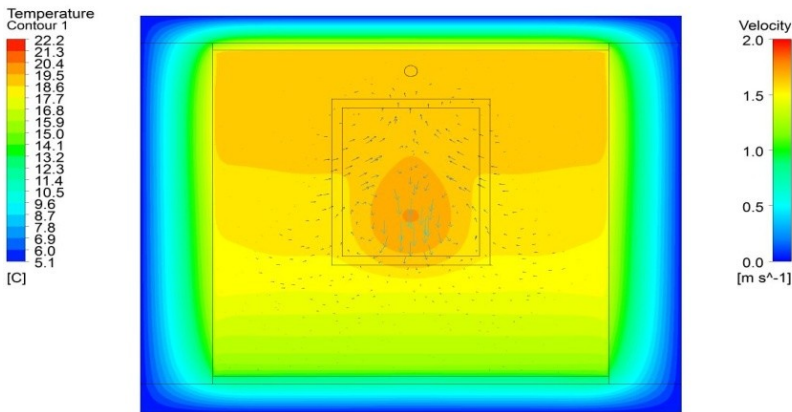
Attēls 6.71. Atrisinājuma konverģence stacionārā sildīšanas režīmā.

Aplūkojot iegūtos temperatūras un gaisa plūsmas ātrumu laukus (attēls 6.72), redzams, ka telpas vidū pa augstumu veidojas temperatūras vērtību maksimums, kas neatbilst eksperimentālajiem datiem ar mainīgu ieplūdes gaisa virzienu. Neatbilstība temperatūru sadalījumos skaidrojams ar to, ka modelis ir stacionārs, un nestacionārā gadījumā vidējā lauka aina būtu pavisam savādāka. Tādējādi mainīga gaisa ieplūdes virziena gadījumā ir nepieciešami laikā mainīgi (nestacionāri) aprēķini. Savukārt sistēmas simetrija temperatūras un ātrumu sadalījumos ir atrisinājumā atspoguļota labi (attēls 6.73). Plūsmas raksturīga virpuļa veidošanās pie griestiem, bet maza tās intensitāte grīdas tuvumā. Gaisa sajaukšanās telpā pie fiksēta ieplūdes leņķa nav optimāla

un pastāv manāma temperatūru starpība pa augstumu telpas vidusdaļā – temperatūru starpība starp cilvēka poftēm un galvu sasniedz 5 - 6°C. Arī gaisa plūsmas ātrumi šajā zonā var sasniegt 0,5 m/s, kas nav savienojams ar termisko komfortu.



Attēls 6.72 Temperatūras un gaisa plūsmas ātrumu sadalījums simetrijas plaknē (perpendikulāra loga un durvju plaknei).



Attēls 6.73. Temperatūras un gaisa plūsmas ātrumu sadalījums telpas vidusplaknē, kas paralēla logam.

Tika veikts arī siltuma bilances aprēķins, lai pārlicinātos, ka rezultāti no enerģētiskā viedokļa ir fizikāli pareizi un saprotami (tabula 6.6). No āra pievadītais gaiss tiek uzsildīts no āra temperatūras, bet no telpas caur atgriezenisko saiti padotais, tikai atbilstoši ieplūdes un izplūdes temperatūru starpībai.

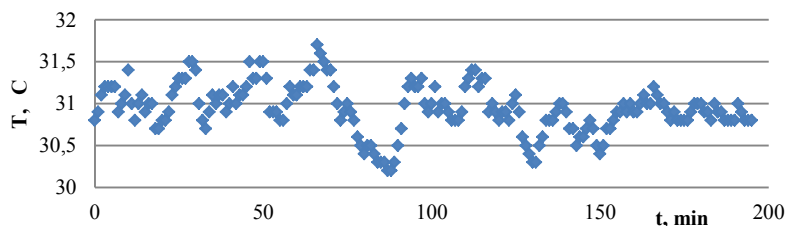
Tabula 6.6. Siltuma bilances aprēķins apkures (pa kreisi) un dzesēšanas (pa labi) režīmos.

Sildīšana		Dzesēšana	
Konvektīvā siltuma apmiņa		Konvektīvā siltuma apmiņa	
Ieplūde	697	Ieplūde	-213.1
Ventilācija	-55.6	Ventilācija	15.75
Atgriezeniskā saite	-537	Atgriezeniskā saite	158.7
Siltuma plūsma caur konstrukciju		Siltuma plūsma caur konstrukciju	
Logs	-15	Logs	3.85
Siena	-71.1	Siena	19.64
Grīda	-15.8	Grīda	7.94
Griesti	-25	Griesti	15.37
Durvis	-13.1	Durvis	4.37
Kopējie zudumi	-732.5	Kopējie zudumi	225.62
Kļūda, %	5	Kļūda, %	5.9

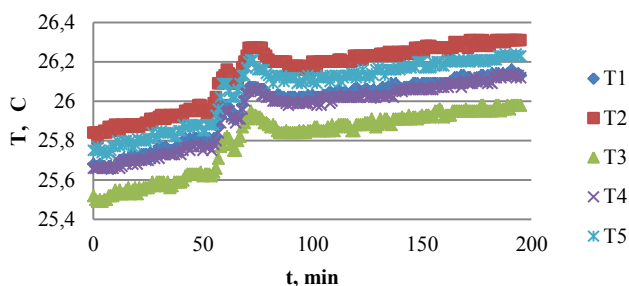
### 6.6.5. Stacionāro aprēķinu rezultāti dzesēšanas periodā

Dzesēšanas periodā bija ievērojami grūtāk atrast aprēķinam piemērotu periodu, kurā āra gaisa temperatūra ilgāku laiku nemainītos. Pirmkārt jau tāpēc, ka dienas gaišais laiks un saule virs horizonta ir lielāko diennakts daļu, bet naktī dzesēšana nav nepieciešama 24°C telpas temperatūras uzturēšanai. Tomēr 2013.g. augustā testa stendu logi tika aizklāti ar atstarojošu un necaurspīdīgu materiālu, kurš aizturēja saules starojumu un 7. nodaļā parādīts, ka tādējādi tas telpā ir nenozīmīgs. Vislabāk šiem nosacījumiem atbilda periods, kas parādīts attēlos 6.74 un 6.75. Te gaisa temperatūras iekšā un ārā ir tuvu stacionāram stāvoklim, līdz ar to var veikt salīdzināšanu starp modeļa un mērījumu rezultātiem.

Tika ievērota arī temperatūra stendu bēniņos, kur tā vidēji bija 33,7 °C, kas ir par 2,8°C vairāk nekā āra gaisa temperatūra. Šis temperatūras paaugstinājums acīmredzot ir radies skārda jumta materiāla uzsilšanas un bēniņu nepietiekamas ventilācijas dēļ.

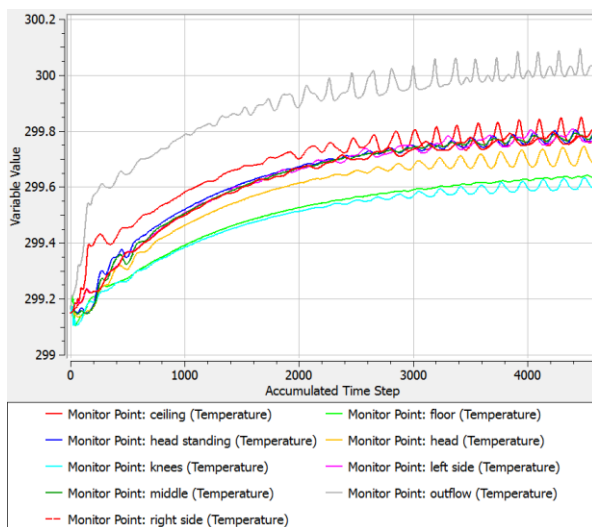


Attēls 6.74. Āra gaisa temperatūras maiņas izvēlētajā dzesēšanas periodā.



Attēls 6.75. Iekštelpas gaisa temperatūras atkarība no laika izvēlētajā dzesēšanas periodā.

Šajā gadījumā netika sasniegts konverģences kritērijs  $10^{-4}$  vidējai kvadrātiskai nesaietei, tomēr apskatot atrisinājuma attīstību, var redzēt: lai arī oscilācijas notiek, to amplitūda ir salīdzināma ar mērsensoru kļūdu, līdz ar to, doto atrisinājumu var uzskatīt par pietiekami precīzu (attēls 7.76). Kā redzams, tad temperatūru vērtības tiecas uz stacionārā stāvokļa vērtību.

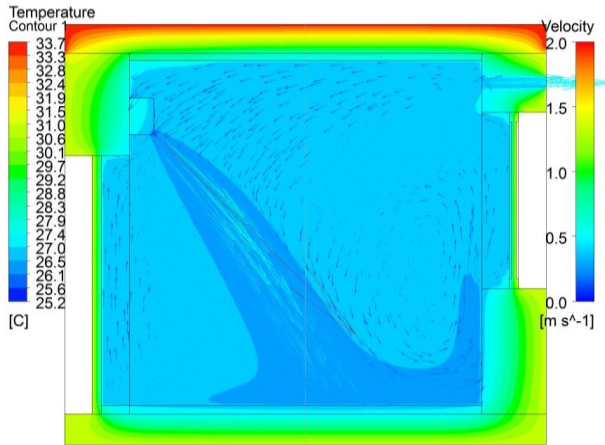


Attēls 6.76. Atrisinājuma temperatūras vērtības izmaiņas dažādos punktos līdz ar iterāciju skaita pieaugumu.

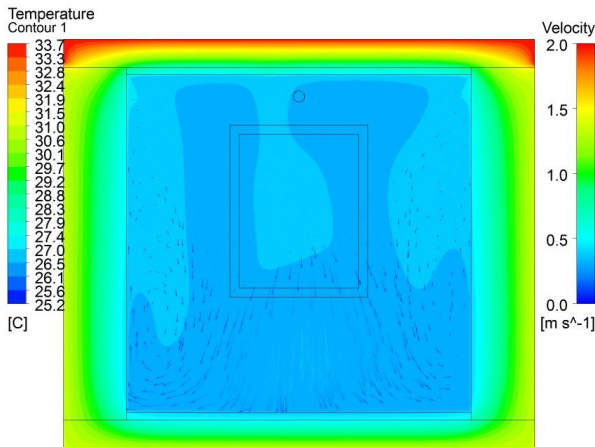
Modelēšanas rezultātā iegūtie temperatūras sadalījumi testa stendos parādīti attēlos 6.77 un 6.78. Šie rezultāti ir fizikāli saprotami, jo gaiss, kas nāk caur iepļūdi ir vēsāks un smagāks par gaisu, kas ir telpā, un tāpēc plūsma noliecas uz leju. Arī sienu tuvumā rezultāti ir fizikāli pamatoti, jo siena ir siltāka un līdz ar to, gaiss ceļas gar tām uz augšu. Uzskatāmi redzams, ka temperatūru starpība pa telpas augstumu ir daudz mazāka nekā tas bija apkures periodā. Tas izskaidrojams gan ar būtiski mazāku temperatūru starpību starp telpu un āru, gan ar būtiski atšķirīgu plūsmas raksturu. Simetrija lauku sadalījumiem neizpildās tik labi kā sildīšanas modelī, tomēr novirzes no

simetrijas ir nelielas – vertikālā šķēlumā, kas paralēls logam, veidojas divi plūsmas virpuļi ar lejupvērstu plūsmu telpas vidusdaļā.

Modelim tika aprēķināta arī siltuma balance (tabula 6.6), kura labi izpildās, līdz ar to arī enerģētiski modelis dod korektus rezultātus.



Attēls 6.77. Gaisa temperatūras un plūsmas ātrumu sadalījumi vertikālā simetrijas plaknē.

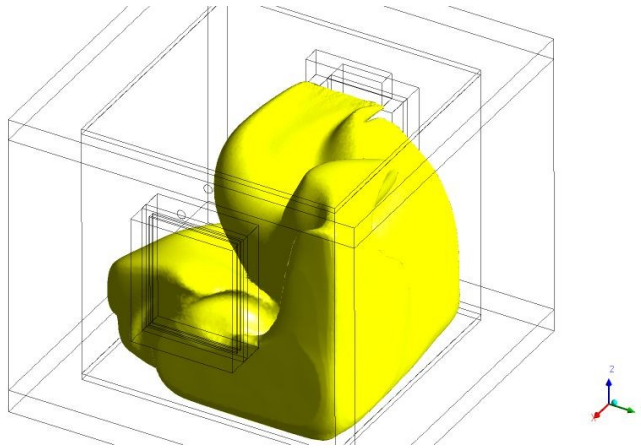


Attēls 6.78. Gaisa temperatūras un plūsmu ātrumu sadalījums vertikālā vidusplaknē, kas paralēla logam.

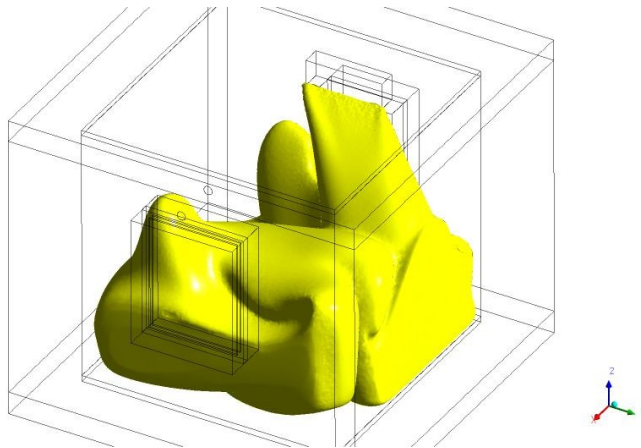
### 6.6.6. Nestacionāro aprēķinu rezultāti

Eksperimentālie temperatūras sadalījumu dati parādīja, ka stacionārā modeļa rezultāti pietiekami labi tiem neatbilst, tāpēc ir nepieciešamība pēc nestacionāriem aprēķiniem. Varētu šķist, ka nav nepieciešamības pēc stacionārā modeļa vispār, tomēr tas tā nav, jo nestacionāriem aprēķiniem ir nepieciešami labi sākuma tuvinājumi, kam izpildās arī enerģijas saglabāšanās likums, un tādus var dod stacionārais aprēķins. Arī šajos nestacionārajos aprēķinos tika izmantoti stacionāro atrisinājumu sadalījumi sākuma nosacījumu uzdošanai lauku sadalījumiem. Iegūtie

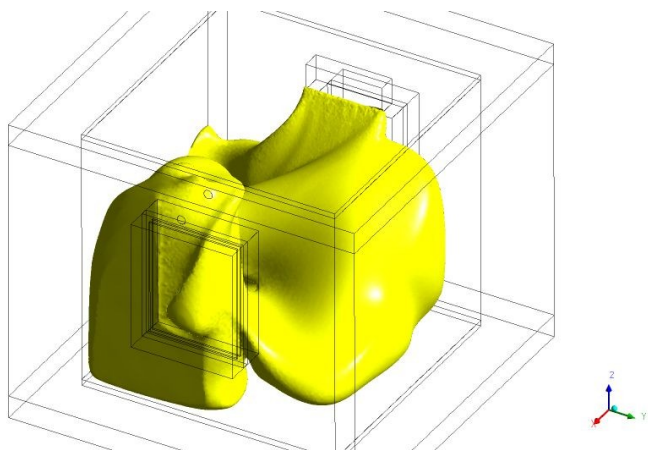
rezultāti parādīti sekojošajos attēlos 6.79 – 6.82. Uzskatāmi redzams, ka mainoties gaisa ieplūdes virzienam (leņķim pret grīdu un leņķim pret attiecībā pret simetrijas plakni) būtiski mainās temperatūras sadalījumi telpā un sagaidāms, ka tā rezultātā telpā veidojas daudz vienmērīgāks temperatūras sadalījums nekā tas būtu stacionāras ieplūdes gadījumā. It īpaši tas ir izteikts apkures sezonā, jo tad siltajam gaisam no relatīvi augstu novietotā siltumsūkņa iekšējā bloka ir tendence uzreiz celties uz augšu un izplūst caur ventilācijas atveri. Tā ir izteikta šādu gaiss – gaiss tipa siltumsūkņu specifika – tradicionālo konvektoru gadījuma temperatūras sadalījumi veidojas pavisam citādi un ir daudz labvēlīgāki termiskā komforta apstākļu nodrošināšanai [46], [34].



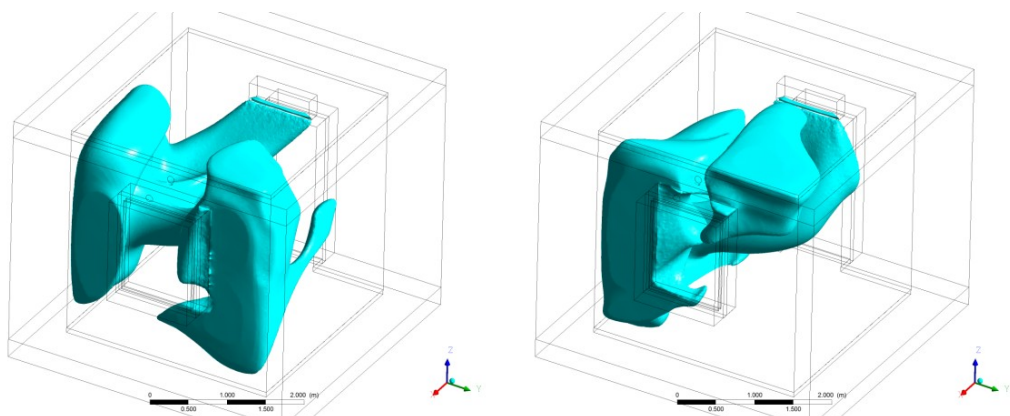
*Attēls 6.79. 26,2°C izovirsmas fiksētā laika momentā ar simetrisku ieplūdi paralēli griestiem nestacionāram aprēķinam dzesēšanas periodā.*



*Attēls 6.80. 26,2°C izovirsmas fiksētā laikā momentā ar ieplūdi, kas orientēta uz grīdu un uz kreiso telpas sānu, nestacionāram aprēķinam dzesēšanas periodā.*

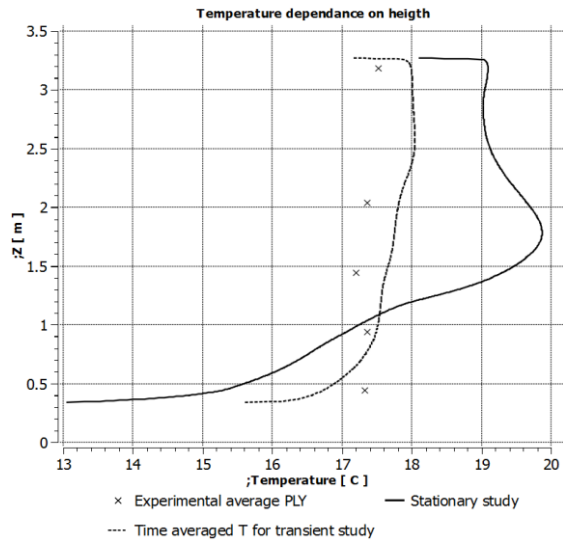


*Attēls 6.81 26,2 °C izovirsmas fiksētā laika momentā ar simetrisku ieplūdi uz leju nestacionāram aprēķinam dzesēšanas periodā.*



*Attēls 6.82. 18°C izovirsmas dažādos laika momentos nestacionāram aprēķinam sildīšanas periodā.*

Izdarot saskaņotus pieņēmumus par robežnosacījumiem, tika iegūti stacionāri un nestacionāri temperatūras un ātrumu lauku sadalījumi. Galvenās problēmas salīdzināšanā radīja siltuma sūkņa darbība, jo tā efektivitāte mainās atkarībā gan no āra temperatūras, gan no apsildāmās platības un precīzi nav zināma. Tādējādi tās noteikšana ir viens no būtiskiem turpmāko pētījumu uzdevumiem, bet pašreiz ierobežo iespējas novērtēt modelī uzdoto robežnosacījumu atbilstību reālajai situācijai. Nestacionārā aprēķinā iegūtie laikā vidējie temperatūru sadalījumi ir tuvi eksperimentāli noteiktajiem (attēls 6.83) ar mainīgu gaisa ieplūdes virzienu. Tādējādi šis modelis ir izmantojams temperatūru un plūsmu analīzei telpās. Turpretim stacionārā modeļa temperatūru sadalījumu novirzes no izmērītajiem ir gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi lielākas.



*Attēls 6.83. Temperatūras sadalījums pa augstumu telpas vidū – vidējoto eksperimentālo datu (krustiņi) salīdzinājums ar modeļa rezultātiem gan stacionārā, gan vidējotā nestacionārā gadījumā sildīšanas periodā.*

## 7. Monitoringa rezultāti

### 7.1. Monitoringa periodu raksturojums

Stendi dažādu būvkonstruktīvo risinājumu, kas galvenokārt veidoti no Latvijā ražotiem materiāliem, ilgtermiņa pārbaudēm Latvijas klimatiskajos apstākļos Latvijas Universitātes Botāniska dārza teritorijā tika uzstādīti laika periodā no 2012.g. septembra līdz 2013.g. februārim. Stendu raksturlielumi, tajos izmantotās būvkonstrukcijas, kā arī to apkures, ventilācijas un dzesēšanas sistēmas detalizēti aprakstītas 3. un 5. nodaļās. Detalizētu informāciju un izvērstu foto dokumentāciju par stendu izveides procesu var atrast arī interneta vietnē [www.eem.lv](http://www.eem.lv).

Gan stendu izbūves laikā, gan pēc tās pabeigšanas vairākkārtīgi tika veiktas gan to termogrāfiskās, gan arī to konstrukciju blīvējuma pārbaudes – šo standartizēto pārbaudžu rezultāti atspoguļoti 5. nodaļā. Monitoringa sistēmas ar datu pārsūtīšanu, izmantojot internetu, izveide un testēšana tika pabeigta 2013.g. marta sākumā, kad arī tika uzsākti regulāri mērījumi. Tādējādi dati par termoklimatiskajiem apstākļiem stendos un to energopatēriņu pieejami no 2013.g. marta, bet mērījumi automātiskā režīmā notiek kopš 2013.g. maija. Tos plānots turpināt arī 2014.g., lai vispirms iegūtu datus par pilnu 2013./14. g. apkures sezonu, un pēc šo datu analīzes lemtu par turpmākajiem pētījumu uzstādījumiem. Tomēr viens no turpmāko pētījumu virzieniem zināms jau pašlaik - tā ir uzstādīto gaiss-gaiss siltumsūkņu faktiskās efektivitātes SPF (*seasonal performance factor*) analīze un salīdzinājums ar cita veida siltumsūkņu, kurus paredzēts uzstādīt 2014.g. pirmajos mēnešos, efektivitāti.

Kopējais plānotais monitoringa periods, ekspluatējot stendus ar dažādiem termoklimatisko parametru uzstādījumiem, ir 3 – 4 gadi, lai iegūtu informāciju par to īpašībām ne tikai pārejas periodā pēc to uzcelšanas, bet arī kvazistacionārā režīmā, kad sākotnējo un ar būvniecību saistīto faktoru (piem., mitruma) ietekme ir kļuvusi nebūtiska, bet, protams, vērojamas sezonālas raksturlielumu (mitrums, siltuma caurlaidība, blīvējums u.c.) izmaiņas. Tā kā stendu konstrukcijas veidotas ilgspējīgas, tad formulējot jaunus pētījumu mērķus un piesaistot izpētei nepieciešamo finansējumu iespējama šo stendu ekspluatācija arī ilgākā laika periodā. Tā kā 2013.g. novembrī ir uzsākta ESF līdzfinansēta pētījumu projekta „Latvijas klimatam un kvalitatīvas dzīves vides nodrošināšanai piemērotu ilgspējīgu un sistēmisku risinājumu izstrāde gandrīz nulles patēriņa ēkām” realizācija, tad garantēta ir monitoringa, apkures, ventilācijas un dzesēšanas sistēmu efektivitātes un dzīves vides kvalitāti noteicošo faktoru (tai skaitā arī ķīmisko un bioloģisko) izpētes turpināšana šajos stendos līdz 2015.g. beigām.

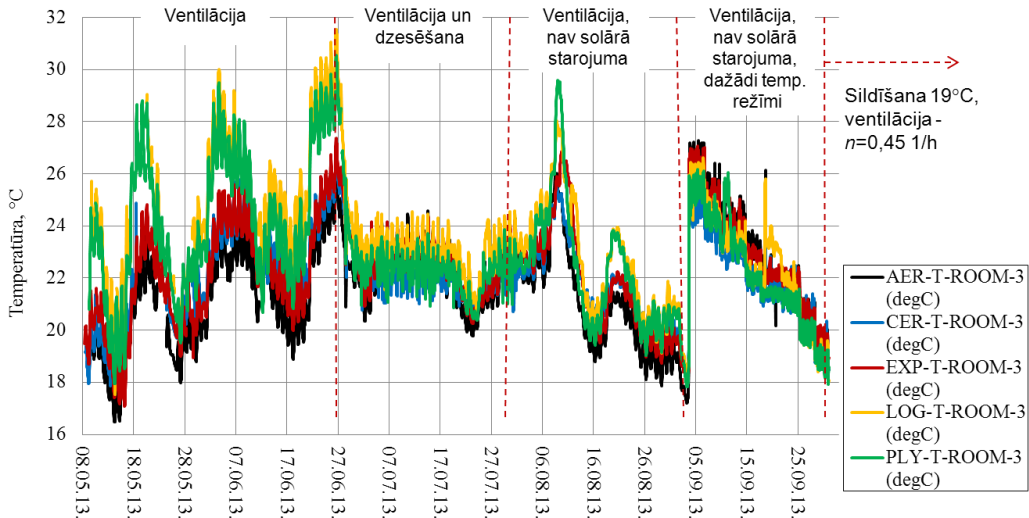
Temperatūras režīmu, gaisa apmaiņas un solārā starojuma ietekmes uzstādījumi līdzšinējā pētījumu periodā no 2013.g. 1. marta līdz 31. decembrim apkopotī tabulā 7.1. Jānorāda, ka visos stendos tika uzstādīti vienādi apkures/dzesēšanas un ventilācijas režīmi, lai uzturētu pēc iespējas vienādus apstākļus tajos un lai būtu iespējama korekta stendu energoefektivitātes salīdzināšana. Faktiskās temperatūras dažādos stendos un to vietās, protams, atšķirās no uzstādītajām vērtībām, bet gaisa apmaiņas intensitātes atšķirības, kā to parādīja mērījumi, bija nenozīmīgas.

Tabula 7.1. Temperatūras, gaisa apmaiņas un citu parametru uzstādījumi pētījumu stendos periodā no 2013.g. 1. marta līdz 31. decembrim.

Mēnesis	Uzstādītā temperatūra $T$ , °C	Gaisa apmaiņas intensitāte $n$ , 1/h	Citi faktori un komentāri
8.-20. marts	18	0,45	Apsilde.
20.-25. marts	18	0,45	Apsilde.
25.marts-10. aprīlis	18	0,45	Apsilde.
10. aprīlis-8.maijs	18	0,45	Apsilde.
8.maijs-1.jūlijs	-	0,45	-
1.jūlijs-1.augusts	24	0,45	Dzesēšana.
1.-22. augusts	-	0,45	Logi aizklāti ar plēvi.
22.augusts-3.septembris	-	0,45	Logi aizklāti ar plēvi.
3.-6. septembris	26	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
6.-9. septembris	25	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
9.-11. septembris	24	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
11.-14. septembris	23	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
14.-25. septembris	22	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
25.-28. septembris	21	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
28.septembris-1.oktobris	20	0,45	Apsilde. Logi aizklāti ar plēvi.
1. oktobris-5. novembris	19	0,45	Apsilde.
5.-6. novembris	19	-	Apsilde.
6.-7. novembris	19	0,75	Apsilde.
7. novembris-31. decembris	19	0,45	Apsilde.

Stendos uzstādītie ekspluatācijas režīmi uzskatāmi parādīti arī attēlā 7.1. Divos pēdējos 2012./2013.g. apkures sezonas mēnešos – martā un aprīlī stendos bija uzstādīta 18°C temperatūra un tie tika ventilēti normālā režīmā –  $n=0,45$  1/h. Jānorāda, ka aprīlis bija relatīvi auksts un apkure bija nepieciešama pēc būtības, it sevišķi ievērojot, ka stendi no lielgabarīta mūra elementiem (it īpaši AER, bet arī EXP un CER) bija ar paaugstinātu mitrumu konstrukcijās. Maija un jūnija mēnešos temperatūra stendos netika regulēta, bet nodrošināta tikai normāla gaisa apmaiņa, kā rezultātā stendos veidojās izteiktas temperatūru svārstības atbilstoši apstākļiem ārā un būvkonstrukciju termiskajai inercei. Jūlija mēnesī tika nodrošināta dzesēšana ar uzstādīto temperatūru 24°C, bet tā kā ārā temperatūras kādu periodu mēneša otrajā pusē bija zemākas par uzstādīto, tad dzesēšana attiecīgajā periodā nebija nepieciešama un temperatūras telpās pazeminājās. Lai pētītu solārā starojuma caur logu ietekmi uz telpu no dažādām būvkonstrukcijām pārkaršanu, augusta mēnesī logs no ārpuses tika aizklāts ar starojuma enerģiju praktiski necaurlaidīgu žalūziju. Savukārt septembra mēnesī, gatavojoties apkures sezonai, tikai izmēģināti

dažādi iekštelpu temperatūras uzstādījumi sākot no 26°C mēneša sākumā līdz 20°C mēneša beigās. Visbeidzot no 1. oktobra tika uzsākta regulāra apkures sezona ar iekštelpu temperatūras uzstādījumu 19°C un normālu gaisa apmaiņas intensitāti 0,45 1/h. Līdz projekta noslēgumam tādējādi tika iegūti un apkopoti dati par 3 2013.g. rudens apkures sezonas mēnešiem, bet turpmāko mērījumu dati un to analīzes rezultāti būs pieejami jau minētajā interneta vietne [www.eem.lv](http://www.eem.lv).



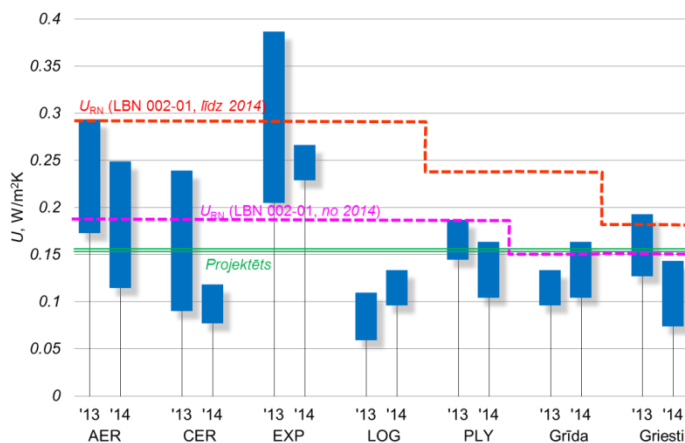
Attēls 7.1. Gaisa temperatūras izmaiņas stendos, izmēģinot dažādus ventilācijas, dzesēšanas, apsildes un solārā starojuma ietekmes režīmus.

## 7.2. Būvkonstrukciju siltuma caurlaidība un mitrums

Vispirms jau 2013.g. pavasarī tika veikti dažādo stendu būvkonstrukciju faktisko siltuma caurlaidības vērtību mērījumi, lai novērtētu to atbilstību projektētajam jeb aprēķina vērtībām (skat. tabula 5.3.), kas ār sienām bija intervālā no 0,15 – 0,16 W/m<sup>2</sup>K. Uzreiz jānorāda, ka katrai no konstrukcijām mērījumi, izmantojot punktā 2.1.2.3 aprakstīto metodi, tika veikti atkārtoti dažādos laika periodos un dažādās to vietās, kas nosaka relatīvi lielo mērījumu rezultātu izkliedi (attēli 7.2a-b), jo konstrukcijās ir šuves (piem., mūrjava starp blokiem) un karkasa elementi. Mērījumu sērijas tika atkārtotas rudenī, kad temperatūra ārā pazeminājās zem 5°C, un tika konstatēts, ka mērījumu rezultātu izkliede lielākajai daļai konstrukciju ir būtiski samazinājusies. To iespējams skaidrot ar sākotnējā būvkonstrukciju mitruma lomas samazināšanos tajās. Kopumā  $U$  mērījumu rezultāti parāda, ka:

- PLY un CER stendu ār sienām, kā arī grīdas un griestu konstrukcijām siltuma caurlaidības jau sākotnēji ir tuvas aprēķinu vērtībām un arī pēc vasaras to  $U$  vērtības stabilizējas tuvu tām;
- AER un EXP stendu ār sienas siltuma caurlaidība sākotnēji būtiski pārsniedz aprēķina vērtības, ko nosaka paaugstinātais mitruma saturs tajās. Tā ietekmē, tā pat kā CER ār sienā, tur vērojama ļoti liela mērījumu rezultātu izkliede;
- LOG stenda ār sienas sākotnējā siltuma caurlaidība ir būtiski mazāka par aprēķina vērtību. Tā iemesls, visticamāk, ir mazais sākotnējais mitrums koka izstrādājumos pēc to žāvēšanas;

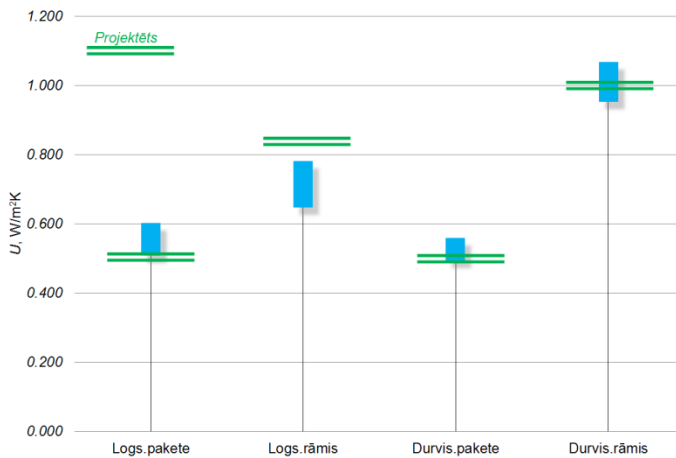
- visām mūra konstrukcijām (AER, EXP, CER) vērojama siltuma caurlaidības samazināšanās tendence laikā. To nosaka sākotnējā mitruma samazināšanās tajās. Tas izpaužas arī PLY ār sienā, kura no iekšpuses ir apmesta;
- AER ār sienas siltuma caurlaidībai ir tendence samazināties, lēni tuvojoties aprēķina vērtībai, tad sagaidāms, ka EXP stenda ār sienas  $U$  vērtība stabilizēsies pie augstākās vērtības nekā aprēķinātā. Tā iemesls mazāka ar siltuma izolācijas materiālu pildīto dobumu daļa (45% nevis plānotie 55%) eksperimentālajos keramiskajos blokos;
- LOG stenda ār sienas siltuma caurlaidībai, tā pat ka grīdas  $U$  vērtībai ir vērojama tendence laikā nedaudz pieaugt. Tā iemesli, visticamāk, ir sauso konstrukciju mitruma daudzuma pieaugums reālos Latvijas klimatiskajos apstākļos ar relatīvi augstu āra gaisa mitrumu;
- CER, LOG un PLY stendiem pēc pārejas perioda sagaidāms aptuveni vienāds siltuma enerģijas patēriņš uzdotas telpu temperatūras uzturēšanai apkures sezonā – līdzšinējie integrālā energopatēriņa mērījumi to apstiprina.



Attēls 7.2a. Dažādo ār sienu būvkonstrukciju, grīdas un griestu faktiskās siltuma caurlaidības  $U$  laika periodā drīz pēc to izbūves (2013.g. pavasaris) un pēc vasaras perioda (2013.g. rudens).

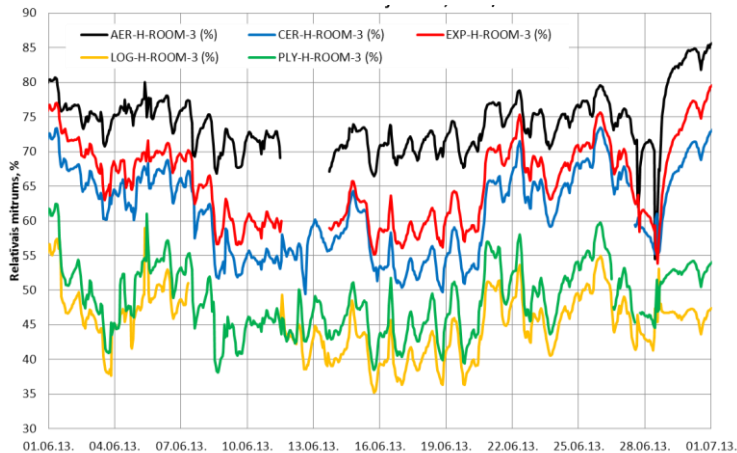
Logu un durvju siltuma caurlaidības mērījumu rezultāti parādīti attēlā 7.2b un parāda, ka iegūtās vērtības ir ļoti tuvas ražotāja specificētajām. To nodrošina 3 stiklu paketes izmantošana, kas Latvijā vēl nav kļuvusi par masveida parādību ( kaut arī būtu atbilstoša klimatiskajiem apstākļiem) un mūsdienīga daudzkameru plastmasas rāmja konstrukcija. Lai mazinātu siltuma caurlaidību atšķirību sienu konstrukcijām, kur izvēlēta mērķa vērtība bija 0,15-0,16 W/m<sup>2</sup>K un logu, tika izvēlēts šāds risinājums ar deklarēto rezultējošo loga siltuma caurlaidību 0,72 W/m<sup>2</sup>K un durvju siltuma caurlaidību 0,8, nevis logs ar  $U$  vērtību virs 1,0 W/m<sup>2</sup>K, kā bija plānots sākotnēji. Liela siltuma caurlaidību atšķirība logam vai durvīm ar tiem līdzās esošo sienu vairo risku, ka uz šīm konstrukcijām, it sevišķi to apakšējā daļā var veidoties kondensāts, jo ir būtiski pazemināta to virsmas temperatūra. Diemžēl spēkā esošais LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” nesekmē augstvērtīgu logu un durvju iebūvi ēkās, jo tur uzdotās normatīvās vērtības ir neglābjami novecojušas un atspoguļo pagājušā gadsimta 90-to gadu beigu tehnoloģiskās iespējas. Cerības vieš šī LBN jaunās versijas projekts, kur gan norobežojošām konstrukcijām, bet

it īpaši logiem un durvīm normatīvās siltuma caurlaidības vērtības ir būtiski samazinātas (skat. 4. pielikumu). Domājams, ka normatīva versija ar mūsdienīgākiem nosacījumiem gan normatīvajām, gan maksimālajām  $U$  vērtībām stāsies spēkā 2014.g. sākumā un sekmēs būvējamo un renovējamo ēku energoefektivitāti. Attēlā 7.2a salīdzināšanai iezīmētas spēkā esošā un LBN jaunajā versijā iekļauto normatīvo  $U$  vērtību līnijas. Redzams, ka jaunā vērtība ār sienām  $U_{RN}=0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$  ir tikai nedaudz lielāka par standu projektētajām vērtībām, bet pārsegumiem (griestiem un grīdai) standu projektētā vērtība sakrīt ar normatīvo. Šī projekta līdzšinējo pētījumu rezultātiem nenoliedzami bija zināma ietekme uz jaunajā LBN versijā iestrādāto  $U_{RN}$  un  $U_{RM}$  izvēli. Te gan jānorāda, ka logiem un durvīm  $U_{RN}$  un  $U_{RM}$  jaunajā LBN versijā joprojām būtiski atpaliks no tām tehniskajām iespējām, ko Latvijā iespējams realizēt par pamatotām izmaksām, t.i., normatīva prasības joprojām varēs izpildīt nelietojot Latvijas klimatam piemērotas trīs stiklu paketes.



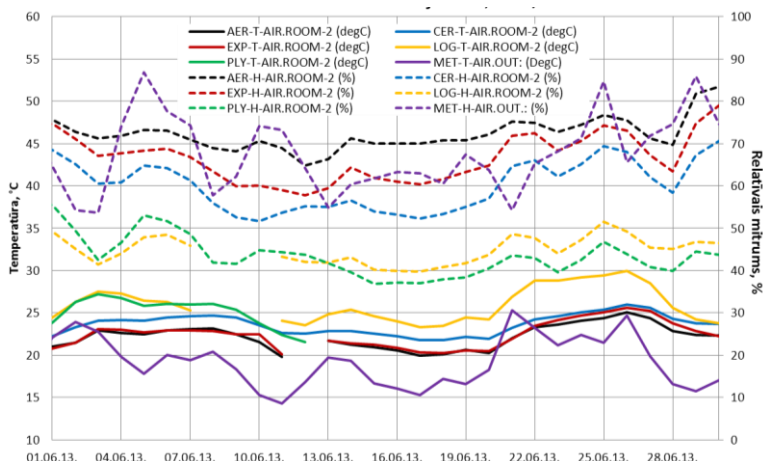
Attēls 7.2b. Logu/durvju stikla paketes un rāmja faktiskās siltuma caurlaidības  $U$ .

Uz būtiskām būvkonstrukciju mitruma atšķirībām netieši norāda arī ļoti atšķirīgs relatīvais gaisa mitrums standos pie vienādas gaisa apmaiņas intensitātes tajos. Attēlā 7.3. parādīts relatīvais gaisa mitrums standos 2013.g. jūnijā, kad tie tika ventilēti normāla režīmā. Redzams, ka visaugstākais mitruma līmenis (pat līdz 85%) vērojams AER stendā. Arī pārējos standos no mūra elementiem (EXP un CER) mitrums atsevišķos periodos pārsniedz no termiska komforta viedokļa pieļaujamo robežvērtību – 70%. Savukārt PLY un LOG standos tas galvenokārt svārstās optimālā komforta intervālā starp 40 un 60%. Acīm redzams, ka mitruma samazināšanai un apstākļu normalizēšanai AER stands būtu pastiprināti jāventilē vai jālieto gaisa sausināšana, bet tas, protams, ir saistīts ar papildus energopatēriņu un izmaksām. Tā kā pētījumu mērķis bija ekspluatēt visas konstrukcijas pie vienādas iekštelpu temperatūras un ventilācijas intensitātes ar iespējami mazāku energopatēriņu, tad šādi papildus pasākumi AER stendam netika veikti. Pēc būtības, ceļot ēkas no gāzbetona blokiem, ar šīm papildus izmaksām 2 – 3 gadu periodā klientam vajadzētu rēķināties, pievienojot tās tiešajām gāzbetona bloku būvju izmaksām.

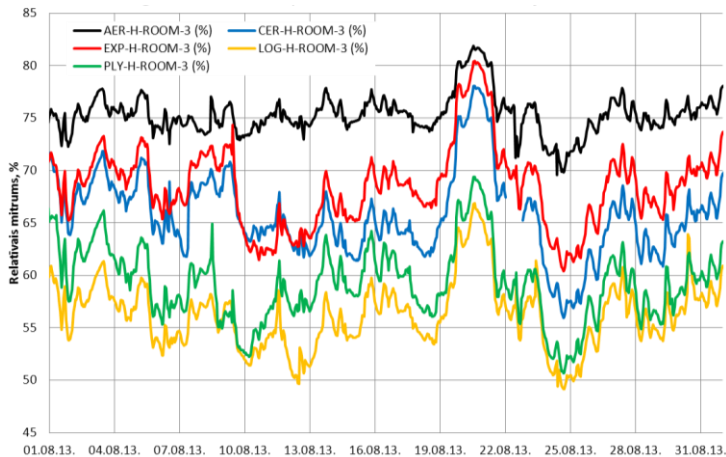


Attēls 7.3. Relatīvā gaisa mitruma izmaiņas stendos 2013.g. jūnijā.

Šo pašu ainu uzrāda arī pa dienām vidējoto relatīvā mitruma un telpu temperatūru izmaiņas jūnija mēnesī, kas parādītas attēlā 7.4. Bez tam AER un EXP stendos iekštelpu temperatūra šajā periodā ir viszemākā – to nosaka ar ūdens iztvaikošanu un attiecīgo no šīm konstrukcijām „absorbēto” siltuma daudzumu saistītā atdzišana. Kā faktoru, kas samazina AER un EXP stendu telpu pārkaršanu, to nosacīti var vērtēt pozitīvi, tomēr nevar uzskatīt par regulāru ēku ekspluatācijas režīmu ilgtermiņā. Situācija līdzīga aprakstītajai saglabājas arī augusta mēnesī (attēls 7.5) – neskatoties uz to, ka pagājuši jau 3 siltā gada laika mēneši, stipri paaugstinātais mitruma līmenis AER stendā saglabājas un atšķirības no vieglo konstrukciju stendiem samazinās ļoti lēni. Tādējādi arī apkures sezonā jārēķinās ar būtiski paaugstinātu konstrukciju mitrumu un to siltuma caurlaidību EXP un it īpaši AER stendā.

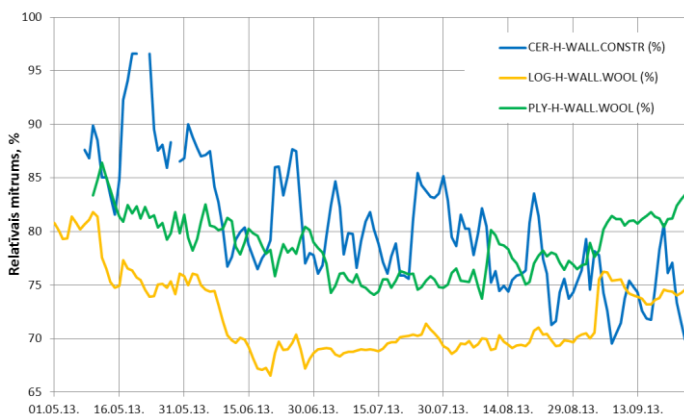


Attēls 7.4. Vidējo diennakts temperatūru un relatīvo mitrumu izmaiņas stendos jūnija mēnesī normālā telpu ventilācijas režīmā.

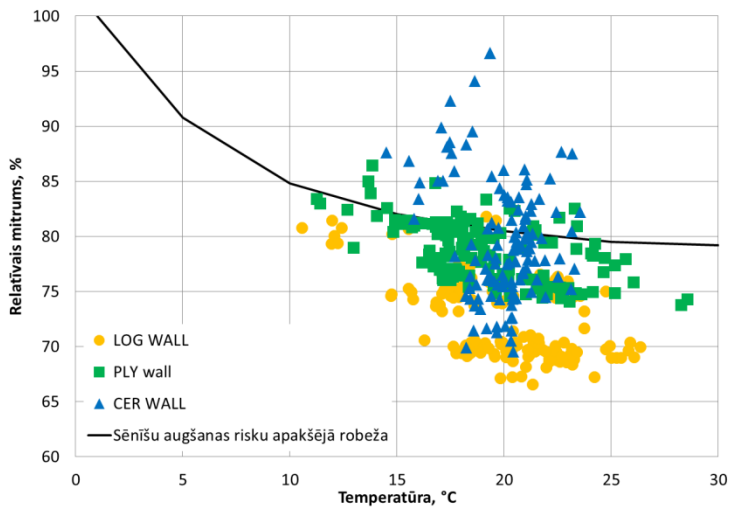


Attēls 7.5. Relatīvā gaisa mitruma izmaiņas stendos 2013.g. augustā, kad telpās nenonāk tiešs solārais starojums.

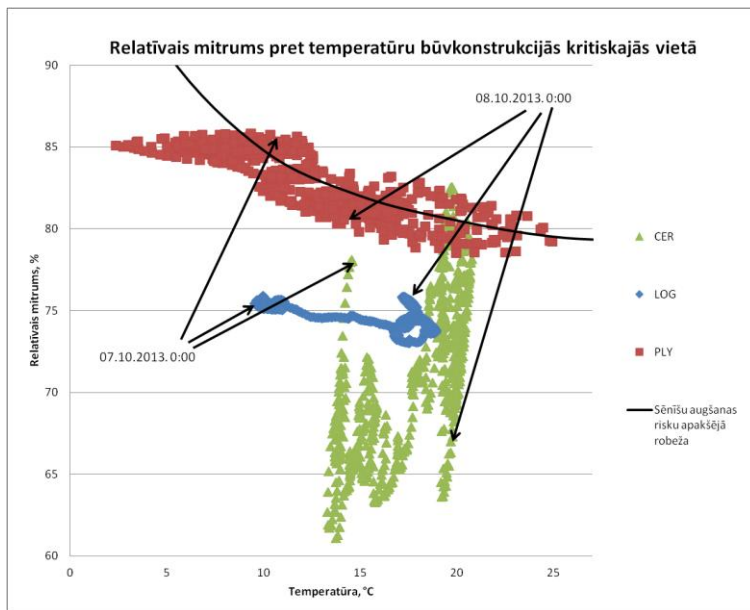
Relatīvā gaisa mitruma izmaiņas dažādo ārsienu konstrukciju mitruma aspekta kritiskajās zonās visam siltajam gadalaikam parādīts attēlā 7.6. Tā kā gāzbetona ār sienas gadījumā visu laiku saglabājas piesātināts stāvoklis (100%), tad tas attēlā nav parādīts. Redzams, ka CER konstrukcijas žūšanas procesā visu laiku vērojama mitruma pazemināšanās tendence – vidēji no 95% maijā līdz 70% septembra beigās. Šo rezultātu apstiprina arī attēlā 7.2a parādītās CER ār sienas siltuma caurlaidības izmaiņas laikā. Savukārt LOG un PLY ār sienu konstrukcijas relatīvajam mitrumam siltuma izolācijas slānī rudenī vērojams neliels pieaugums. Tā iemesls var būt gan sākotnēji zema konstrukciju mitruma līmeņa pieskaņošanās esošajiem klimatiskajiem apstākļiem, gan sezonālās mitruma plūsmu izmaiņas konstrukcijā. Relatīvi augsto mitruma līmeni PLY ār sienā pie ārējā saplākšņa slāņa nosaka tā relatīvi liela tvaiku pretestība. Iegūtie rezultāti kopumā labi saskaņojas ar iepriekšējā nodaļā aprakstītajiem mitruma dinamikas konstrukcijās modelēšanas rezultātiem.



Attēls 7.6. Viedējotā diennakts relatīvā mitruma izmaiņas CER, LOG un PLY stendu ār sienu konstrukciju mitruma aspektā kritiskajās zonās laikā no 2013.g. maija līdz septembrim. AER stenda ār sienā mitrums nav attēlots, jo visu laiku saglabājas 100%.



Attēls 7.7. Sēnīšu augšanas riska novērtējums atsevišķu ārsienu būvkonstrukciju (LOG, PLY, CER) mitruma ziņā kritiskajās zonās vasaras periodā.



Attēls 7.8. Relatīvā mitruma atkarība no temperatūras izvēlētā rudens periodā 2013.g., kad uzsākta telpu apkure.

Iegūtie mitruma un temperatūru monitoringa dati būvkonstrukciju iekšienē, ļauj novērtēt arī sēnīšu augšanas riskus tajās. Detalizēti visām izmantotajām konstrukcijām šī problēma analizēta iepriekšējā nodaļā, bet attēlā 7.7 parādīta situācija LOG, PLY un CER stendu ārsienu kritiskajās zonās vasaras periodā. Par kritisku uzskatāma zona akmens vatē pie frēzbaļķa LOG ār sienas konstrukcijā, PLY saplākšņa paneļu ār sienā akmens vatē pie ārēja saplākšņa un CER stendu ār sienu bloku dobumos. Uzskatāmi redzams, ka sēnīšu augšanas riska apakšējā robeža

praktiski netiek pārsniegta LOG stenda ār sienas konstrukcijā, epizodisks pārsniegums vērojams PLY stenda ār sienā – to nosaka relatīvi liela ārējā saplākšņa tvaiku pretestība, bet būtisks riska robežas pārsniegums konstatējams CER stenda ār sienā. Tā iemesls ir sākotnējais konstrukcijas (mūrjavas un apmetuma) mitrums un ir sagaidāms, ka turpmākajā ekspluatācijas periodā, konstrukcijai žūstot, šie riski izzudīs. Turpretim AER ār sienas ārējā siltinājuma slānī situācija saglabājas kritiska, jo iebūvētais sensors visa perioda laikā uzrāda 100% relatīvo gaisa mitrumu.

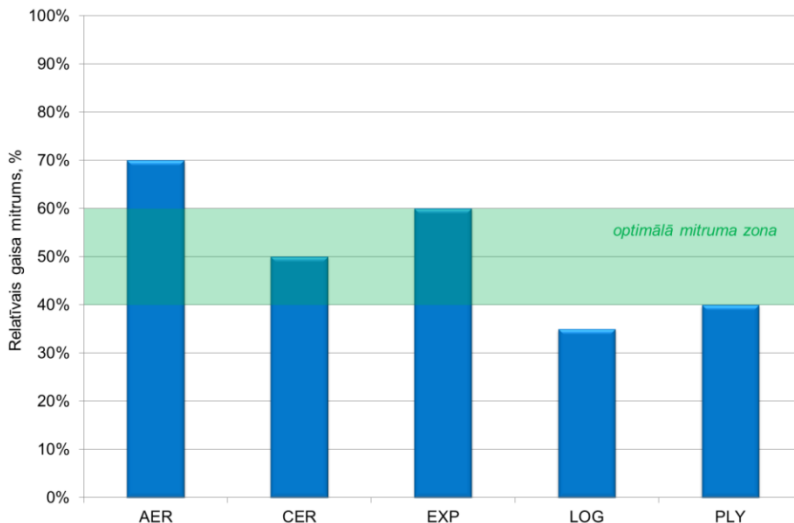
Apskatot īsu laika periodu oktobrī nedēļu pēc apkures uzsākšanas (attēls 7.8), kad uzstādītā kondicionēšanas temperatūra ir 19°C, apstiprinās jau iepriekš teiktais:

- LOG stenda ār sienā apstākļi ir zem sēnīšu augšanas riska apakšējās robežvērtības;
- CER stendā šīs robežvērtības īslaicīgi tiek sasniegtas, bet risku praktiski nav;
- PLY stendā temperatūra un mitrums ārējā siltumizolācijas slānī svārstās sēnīšu augšanas riska robežlīknes zona. Tā iemesls ir relatīvi lielā ārējā saplākšņa slāņa tvaiku pretestība, ko varētu samazināt saplākšni perforējot.

Kopējā gaisa mitruma aina stendos ir līdzīga iepriekš aprakstītajai arī pirmajos trīs jaunās 2013./14.g. apkures sezonas mēnešos no oktobra līdz decembrim (skat. attēlu 7.9):

- relatīvais mitrums AER stendā normālas ventilācijas režīmā sasniedz 70% un ir pie termiskā komforta nosacījumu pieļaujamās augšējās robežas;
- CER, EXP, PLY stendos mitrums ir optimāla komforta robežās starp 40 un 60%;
- frēzbaļķu stendā (LOG) vidējais relatīvais gaisa mitrums (35%) ir nedaudz zem optimālā termiskā komforta robežas.

Tādējādi AER stendā potenciāli varētu būt nepieciešami papildus pasākumi gaisa sausināšanai, bet LOG stendā ieteicama gaisa mitrināšana – tas, protams, būtu saistīts ar papildus energopatēriņu.



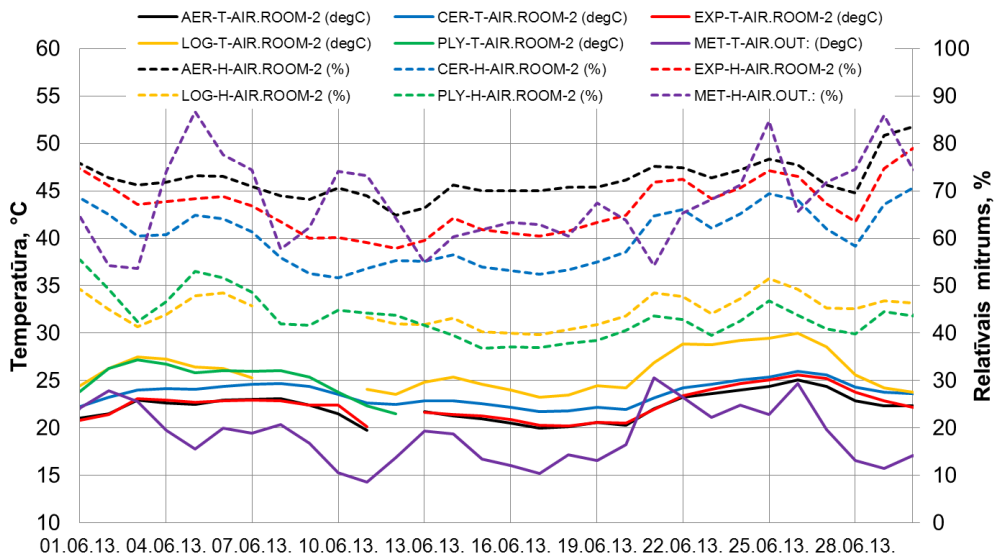
Attēls 7.9. Relatīvais gaisa mitrums apkures periodā stendos, kas izbūvēti no dažādiem materiāliem, gaisa apmaiņas intensitāte  $n=0,45$  l/h.

### 7.3. Telpu pārkaršana un dzesēšana vasaras periodā

Arī telpu pārkaršanas risku analīze ir balstīta uz ilgtermiņa temperatūru monitoringa datiem, kas iegūti no dažādām būvkonstrukcijām izveidotajos testēšanas standos, darbinot tikai mehānisko ventilāciju, bet neveicot telpu dzesēšanu vai sildīšanu. Pārkaršanas risku analīze Latvijas klimatā ir būtiska vasaras periodā, kaut arī var būt aktuāla marta un aprīļa mēnešos, kad nepieciešama apkure, bet pieaug skaidro dienu skaits un saules starojuma intensitāte. Kā piemēri detalizētāk tiks apskatīti 2013.g. jūnija un augusta mēneši, kad testēšanas stendi netika ne dzesēti, ne sildīti, ļaujot iekštelpu temperatūrai mainīties brīvi, atbilstoši apstākļiem ārā. Mehāniskās gaisa apmaiņas intensitāte bija fiksēta –  $n=0,45$  1/h. Būtiskākā atšķirība starp situācijām augusta un jūnija mēnešos bija tā, ka augustā logi testēšanas standos bija pilnībā aizklāti no ārpuses ar gaismas necaurlaidīgu žalūziju, pasargājot telpas no tieša saules starojuma. Šāds salīdzinājums bija svarīgs, jo solārie avoti saulainā laikā telpās „ienes” relatīvi lielu papildus siltuma daudzumu, kas var būtiski sekmēt telpu pārkaršanu. Jānorāda, ka solārā starojuma ietekme caur necaurspīdīgajām ārējām konstrukcijām šajos gadījumos bija nebūtiska, jo stendiem tika izmantoti ventilējamo fasāžu risinājumi, ventilējama pagrīde un ventilējami bēniņi. Tomēr jānorāda, ka brūnais skārda jumts saulē stipri uzsila un bēniņu ventilācijas atveres nevarēja nodrošināt visa šī siltuma efektīvu aizvadīšanu, kā rezultātā, kā to parādīja monitoringa dati, saulainā laikā gaisa temperatūra bēniņos manāmi paaugstinājās un caur griestu pārsegumu ietekmēja arī apstākļus telpās. Tomēr būtiskākie papildus siltuma avoti telpā saulainā laikā bija saistīti ar sienu un it īpaši tumšo grīdas virsmu uzkaršanu.

Attēlā 7.10 redzams, ka jūnijā telpu gaisa vidējās diennakts temperatūras bija būtiski (pat par 6°C) augstākas par vidējām ārā gaisa temperatūrām attiecīgajās dienās un dažos laika periodos - telpām uzkarstot, iekštelpu temperatūras būtiski pārsniedza termiskā komforta augšējās robežas. Pārkaršanu sekmē ne tikai solārais starojums caur logu, bet arī tas, ka katrā no stendiem ir iekšējie siltuma avoti ar jaudu aptuveni 30 – 40 W. Tie imitē cilvēka klātbūtni telpās.

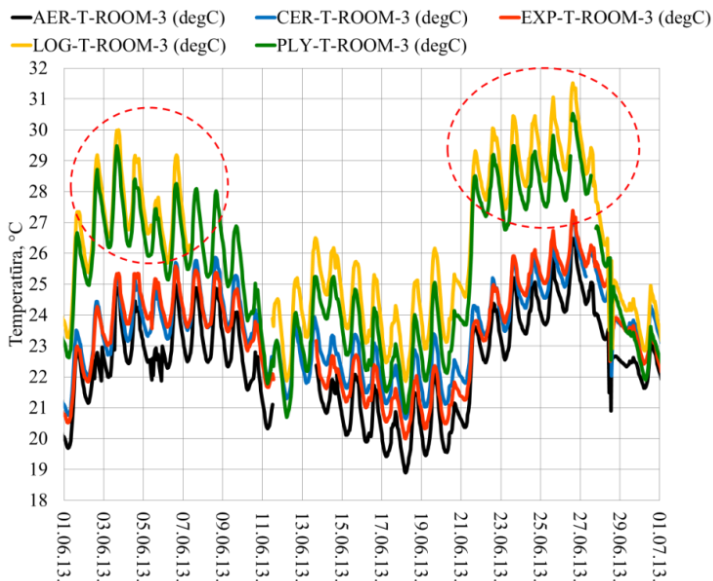
Visvairāk pārkaršana relatīvi vieglākās (ar mazāku laukuma masu) saplākšņa paneļu (PLY) un frēzbaļķu (LOG) stendu būves (attēls 7.11), kurās dažas dienas jūnijā diennakts vidējās temperatūras pārsniedza 29 - 30°C, bet maksimālās pat 31°C. Te jānorāda, ka kaut arī LOG ārsienu laukuma masa ir aptuveni 2 reizes lielāka nekā PLY paneļu ār sienai, tomēr frēzbaļķu būve pārkaršana pat nedaudz vairāk. Tā iemesls ir LOG ār sienas labāka siltuma izolācija (mazāka siltuma caurlaidība, skat. attēlu 7.2a), kā arī konstruktīvā īpatnība, ka vieglais siltuma izolācijas slānis šai stendā atrodas pie iekšējās apdares slāņa, bet baļķi ārpusē. Savukārt masīvākajos testēšanas standos (AER, CER, EXP) iekštelpu temperatūras svārstības bija mazāk izteiktas (attēls 7.11), t.i., temperatūras bija stabilākas. Tādējādi konstrukciju masivitātei un lielākai termiskajai inercei tipiskos Latvijas vasaras apstākļos ir būtiska loma pasīvai termiskā komforta apstākļu stabilizēšanai un uzlabošanai, neizmantojot aktīvas metodes, t.i., nedarbinot kondicionēšanas iekārtas. Viszemākā temperatūra bija vērojama AER stendā, bet tā iemesls bija jau iepriekš minētā konstrukciju žūšana un ar to saistītais iztvaikošanas siltums, kas nosaka konstrukciju atdzišanu. Tomēr to nevar uzskatīt par regulāru risinājumu telpu dzesēšanai ilgtermiņā.



Attēls 7.10. Vidējās diennakts temperatūras un mitrums jūnijā ārā un stendos, kad tie tiek tikai ventilēti.

Augustā (attēls 7.12), neskatoties uz to, ka logi bija aizklāti no ārpuses un novērsta tieša solārā starojuma ietekme stendu iekštelpās, tomēr tika novērota būtiska pārkaršana LOG un PLY stendos - nedēļu mēneša pirmajā pusē vidējās diennakts temperatūras šajos stendos pārsniedza termiskā komforta temperatūru vasaras periodā  $+24^{\circ}\text{C}$ , bet maksimālā vērtība visvieglāko būvkonstrukciju PLY stendā pat pārsniedza  $29^{\circ}\text{C}$ . Tas izskaidrojams ar ļoti silto laiku ārā, kā arī ar to, ka telpās ir savi iekšējie siltuma avoti, kas, kaut gan ir nelieli (30 - 40 W), tomēr veicina telpas pārkaršanu - tas tuvināti atbilst cilvēka klātesamībai telpā, kas arī saistīta ar papildus siltuma izdalīšanos. Tomēr redzams, ka atšķirībā no jūnija mērījumiem (attēli 7.10 un 7.11), kur logi nebija aizklāti, augustā temperatūras svārstības telpā praktiski nekorelē ar solārā starojuma intensitāti ārpusē un pārkaruma relatīvais līmenis attiecībā pret āra temperatūru ir mazāks. Kā piemēru var minēt periodu no 23. – 29. augustam (attēls 7.12), kas parāda, ka, neskatoties uz augsto vidējo saules starojuma intensitātes līmeni ārā ( $\sim 200 \text{ W/m}^2$ ), telpu temperatūras samazinās līdz ar āra gaisa temperatūru. Iekšējo siltuma avotu dēļ pat tad, kad diennakts vidējā āra temperatūra noslīd līdz  $15 - 17^{\circ}\text{C}$ , iekštelpu temperatūra nepazeminās zem  $19^{\circ}\text{C}$ . Ventilējamo fasāžu un to gaisā krāsojuma dēļ starojuma loma necaurspīdīgo ārējo konstrukciju uzsildīšanā ir nenozīmīga.

Tomēr arī augustā, tā pat kā jūnijā, vieglo konstrukciju stendi (PLY un LOG) pārkarst vairāk nekā stendi no smagajām būvkonstrukcijām (CER un EXP), bet stendā no gāzbetona, kur turpinās ūdens iztvaikošana no blokiem, temperatūru līmenis ir viszemākais (attēls 7.13). Tā kā saule tieši neiespīd stendos un nevar uzsildīt to sienas un grīdu no iekšpuses, tad PLY un LOG stendu pārkaršanā nav vērojamas tādas atšķirības kā jūnijā, kur LOG stends pārkarsta pat vairāk nekā PLY stends, kaut arī pēdējā sienu laukuma masa ir mazāka.

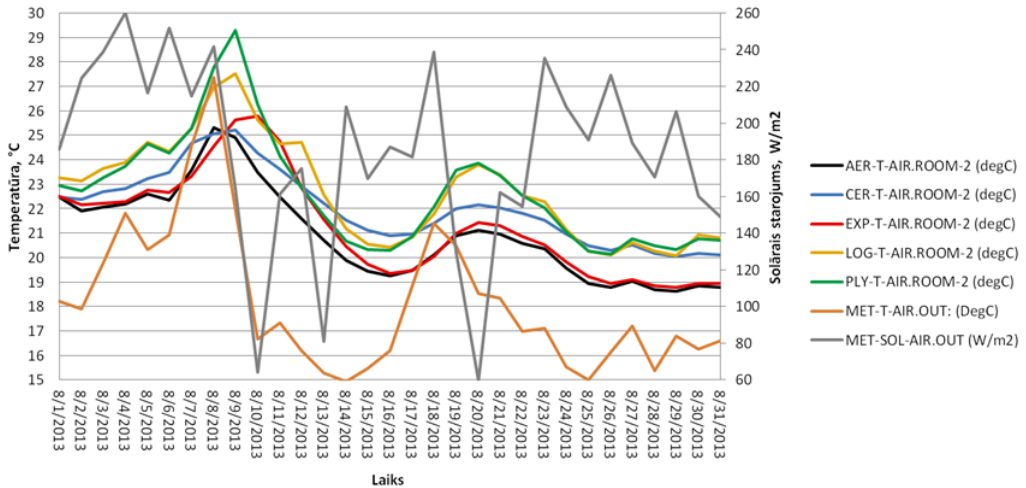


Attēls 7.11. Gaisa temperatūras svārstības stendos 2013.g. jūnijā, kad tie netiek kondicionēti, bet tikai ventilēti ( $n=0,45$  1/h): vieglo konstrukciju būves pārkarst vairāk nekā masīvo konstrukciju būves.

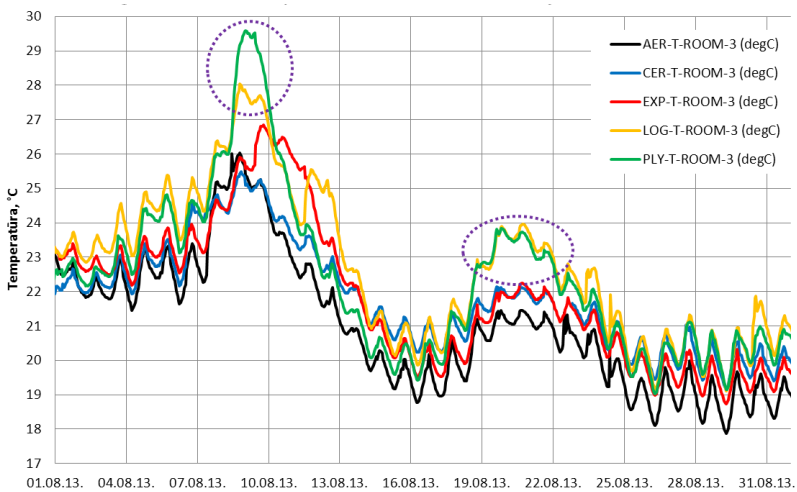
Savukārt 2013.g. jūlija mēnesī stendu iekštelpas tika dzesētas, ja temperatūra tajos pārsniedza uzstādīto termiskā komforta temperatūras vērtību  $24^{\circ}\text{C}$ , bet sildīšana, temperatūrai samazinoties zem šīs vērtības, netika nodrošināta. Arī dzesēšanai tika izmantots tas pats gaiss – gaiss siltumsūknis, kas citos periodos nodrošināja arī ventilāciju un apkuri. Temperatūru izmaiņas šajā mēnesī stendos un ārā, kā arī vidējās diennakts solārā starojuma intensitātes parādītas attēlā 7.14. Iegūtie rezultāti energopatēriņam un momentānajai dzesēšanas jaudai atspoguļoti attēlos 7.15 un 7.16. Redzams, ka dzesēšana ieslēdzas un darbojas galvenokārt pēcpusdienā no 12.00 – 18.00 – naktī āra gaisa temperatūras ir zemākas un rīta pusē noēnojuma, saules krišanas leņķa un konstrukciju pakāpeniskās uzsilšanas dēļ dzesēšana normālos ventilācijas apstākļos ( $n=0,45$  1/h) nav nepieciešama, neskatoties uz to, ka telpās (tā pat kā citos pētījumu periodos) ir arī iekšējie siltuma avoti.

Zīmīgi, ka maksimālās momentānās dzesēšanas jaudas (aptuveni 100 W) tiek sasniegtas nevis saplākšņa paneļu stendā (PLY), kura ārsienu laukuma masa ir vismazākā, bet gan masīvo keramisko bloku stendā (CER). Pat LOG stendā momentānais patēriņš atsevišķās dienās ir lielāks vai salīdzināms ar patēriņu CER stendā. Tā kā šo stendu energopatēriņš apkurei ziemas sezonā ir aptuveni vienāds (skat. nākamo punktu) un arī stendu norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības atšķiras relatīvi maz, tad šāda salīdzināšana ir pamatota un parāda, ka konstrukcijai ar lielāku termisko inerci, ja notiek kondicionēšana, arī vasaras periodā nav priekšrocību energopatēriņa ekonomijas aspektā (skat. attēlu 7.15), tā pat kā tas ir apkures periodā. Katrā ziņā šis salīdzinājums nedod tiešu pamatu apgalvot, ka masīvāku būvkonstrukciju ēkas dzesēšanas sistēmu varētu projektēt ar mazāku maksimālo ražību nekā atbilstošas ēkas no vieglajām konstrukcijām dzesēšanas sistēmu. Nav arī pamata apgalvot, ka automatizētas kondicionēšanas

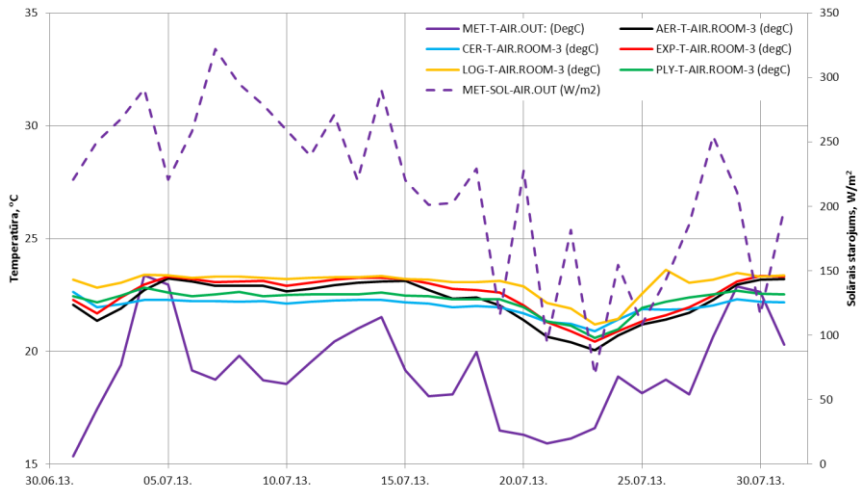
(dzesēšanas) apstākļos būvēs no smagajām konstrukcijām energopatēriņš termiskā komforta nodrošināšanai būtu mazāks nekā vieglajās būvēs, bet abos gadījumos ļoti liela loma ir solārā starojuma jaudai, kas caur stiklojumiem nonāk telpā – no tā izriet arī praktiķiem ļoti zināmais, ka ēkās ar lielu stikloto norobežojošo konstrukciju virsmu laukumiem nepieciešamas attiecīgi lielākas dzesēšanas jaudas, nekā būvēs ar samērīgu, gaismas nodrošināšanai iekštelpās nepieciešamo stiklojumu laukumu, kas parasti nepārsniedz 20% no telpu grīdu laukuma.



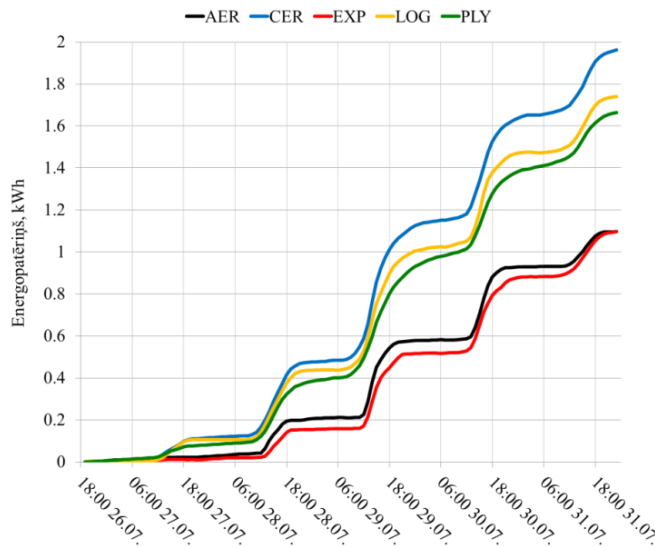
Attēls 7.12. Vidējās temperatūras stendu iekštelpu un āra gaisā un solārā starojuma intensitāte augustā, kad stendi tika tikai ventilēti.



Attēls 7.13. Gaisa temperatūras svārstības stendos 2013.g. augustā, kad tie netiek kondicionēti, bet tikai ventilēti  $n=0,45$  1/h un logs no ārpusē ir segts ar solārā starojuma praktiski neaurlaidīgu žalūziju.



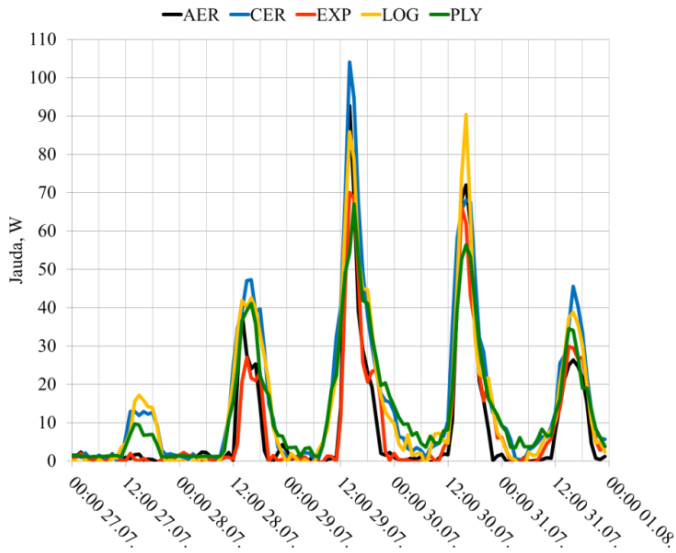
Attēls 7.14. Temperatūru izmaiņas ārā un stendos, kā arī vidējā diennakts solārā starojuma intensitāte 2013.g. jūlijā, kad stendi tika dzesēti, lai uzturētu 24°C temperatūru.



Attēls 7.15. Elektroenerģijas patēriņš telpu dzesēšanai 5 dienu periodā ( $T_{\text{gaisa}}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45\text{ l/h}$ ).

Vienlaikus maksimālās jaudas un kopējais enerģopotēriņš dzesēšanai AER un EXP stendos (attēli 7.15 un 7.16) apskatītajā mēnesī ir pat līdz 2 reizēm mazākas par attiecīgajiem raksturlielumiem CER stendā. Tomēr tas labi saprotams, jo

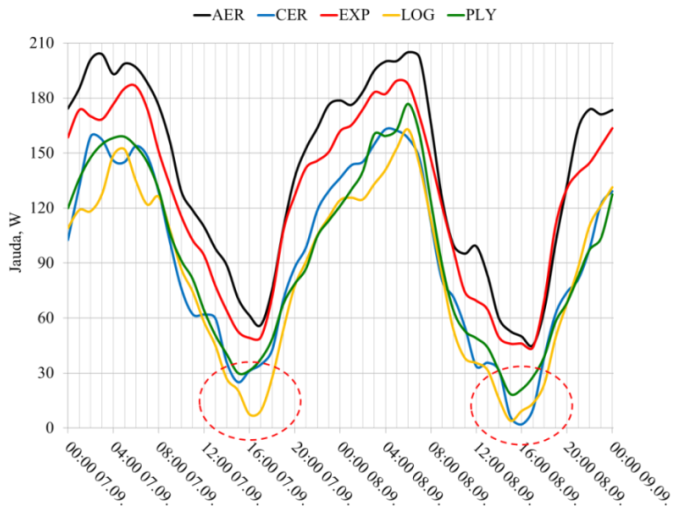
- EXP stendā un it īpaši AER stendos joprojām ir paaugstināts mitrums un notiek ūdens iztvaikošana no būvkonstrukcijām;
- šo stendu ārējo siltuma caurlaidība ir būtiski lielāka nekā CER, LOG un PLY stendiem un, tā kā ārā gaisa temperatūra ir zemāka nekā stendos (skat. attēlu 7.14), tad tie papildus dzīest arī siltuma pārvades caur ārējiem dēļ.



Attēls 7.16. Jaudas izmaiņas telpu dzesēšanai 5 dienu periodā ( $T_{\text{gaisa}}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45\text{ l/h}$ ).

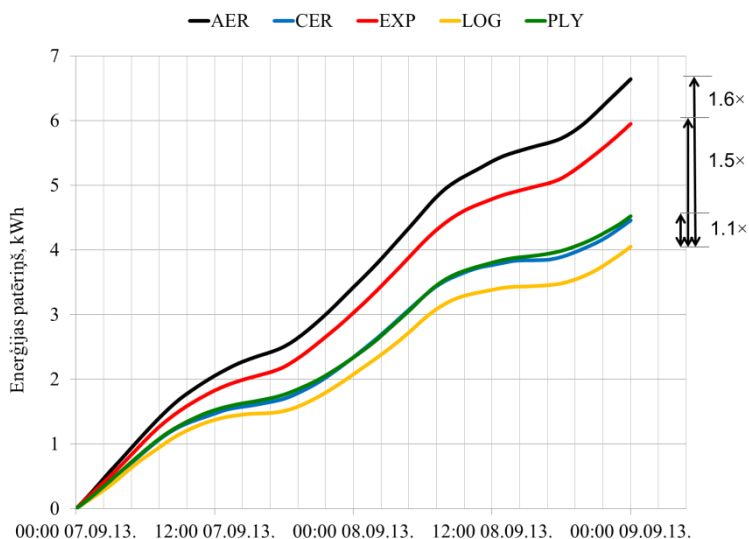
#### 7.4. Energoapatēriņš telpu apsildei rudenī un ziemā

Kā uzskatāmi parādīts attēlā 7.17. 2013.g. septembrī tika izmēģināti dažādi telpu sildīšanas režīmi, variējot uzstādīto temperatūru no  $26^{\circ}\text{C}$  mēneša sākumā līdz  $20^{\circ}\text{C}$  mēneša beigās, kad tika uzsākti regulārās apkures sezonas mērījumi. Šīm sezonu pārejas periodam raksturīgi, ka dienā āra gaisa temperatūras var pārsniegt  $19^{\circ}\text{C}$ , bet naktīs samazināties par 10 un vairāk grādiem. Tādējādi var veidoties situācija, ka termiskā komforta uzturēšanai telpās diennakts laikā var būt nepieciešama gan apsilde, gan dzesēšana.



Attēls 7.17. Jaudas izmaiņas telpu apkurei 2 dienu periodā ( $T_{\text{gaisa}}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45\text{ l/h}$ ).

Atēlos 7.17 un 7.18, piem., divu dienu periodā parādītas attiecīgi momentānās jaudas un summārais energopatēriņš apkurei, lai telpās uzturētu 24°C temperatūru. Maksimālā jauda sildīšanai nepieciešama agrās rīta stumdās, kad āra temperatūra ir minimālā, savukārt pievakarē starp 16.00 un 18.00 sildīšanai nepieciešamā jauda sasniedz savu minimumu un pat tiecas uz nulli (attēls 7.17). AER un EXP standos jau iepriekš aprakstīto iemeslu dēļ jaudu līmenis visu diennakti ir augstāks nekā pārējos standos (attēls 7.17), kas rezultējas būtiski lielākā summārā energopatēriņā pat īstermiņa (attēls 7.18): patēriņš EXP un CER standos ir 1,5 – 1,6 reizes lielāks nekā LOG standā, bet atšķirības starp CER, PLY un LOG standu energopatēriņu faktiski tikai nedaudz iziet ārpus mērījumu kļūdu intervāla, tādēļ to interpretācija nav lietderīga, bet jāatzīmē, ka līdzīgas tendences ir noturīgas – tās bija vērojamas gan ekspluatācijas sākuma periodā 2013.g. martā un aprīlī, gan arī vairākus mēnešus garā monitoringa periodā no oktobra līdz 2013. g. beigām.

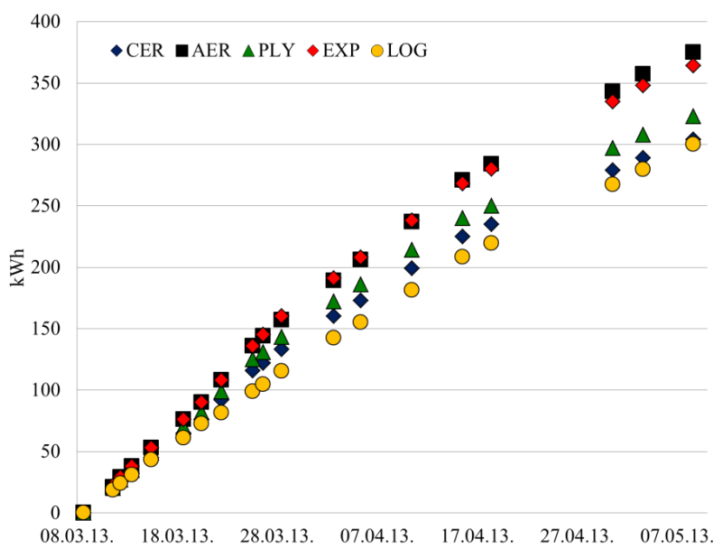


Attēls 7.18. Elektroenerģijas patēriņš telpu apkurei 2 dienu periodā ( $T_{gaisa}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45\text{ l/h}$ ).

Pirmie energopatēriņa mērījumi standos pēc to izbūves pabeigšanas 2012./13. g. ziemā tika veikti 2013.g. martā un aprīlī, kad tika nodrošināta normāla to iekštelpu ventilācija un bija uzstādīta noteikta to temperatūra ( $T=18^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45\text{ l/h}$ ). Šo mērījumu rezultātu kopsavilkums uzskatāmi parādīts attēlā 7.19. Redzams, ka standu no gāzbetona (AER) un eksperimentālajiem blokiem (EXP) siltuma zudumi par 25% pārsniedz siltuma zudumus no tradicionālo lielgabarīta keramisko bloku ar siltuma izolācijas slāni stenda CER. Tas nepārsteidz, jo kā parādīts attēlā 7.2a, pašu AER un EXP bloku ārējās faktiskās siltuma caurlaidība  $U$  būtiski pārsniedz prognozēto vērtību  $0,15\text{ W/m}^2\text{K}$  un sasniedz  $0,30\text{ W/m}^2\text{K}$ . Tas, ka siltuma patēriņš nedubultojas proporcionāli divkārtīgai sienu siltuma caurlaidībai saprotams, jo siltuma apmaiņa notiek arī caur griestiem/grīdu un logiem/durvīm, kuru  $U$  vērtības visiem stendiem aptuveni vienādas. Attiecīgi sienu laukums ir  $32,5\text{ m}^2$ , pārsegumu laukums –  $18\text{ m}^2$  un logu un durvju kopējais laukums –  $3,5\text{ m}^2$ , pie tam to

siltuma caurlaidība ir 5 – 6 reizes lielāka nekā projektētā ārsienu siltuma caurlaidība. Bez tam būtisku daļu siltuma bilancē veido konvektīvie siltuma zudumi (skat. arī 6. nodaļu), ko nosaka ventilācijas gaisa apmaiņa – tā kā gaisa apmaiņas intensitāte visos standos ir vienāda, tad arī šie zudumi visos standos ir praktiski vienādi.

Šajos eksperimentos Latvijas klimatā ir divi stendi (EXP, CER), kuru ār sienas satur keramikas blokus, bet enerģijas patēriņš šiem stendiem krasi atšķiras (attēls 7.19). Viens no faktoriem ir dobumu pildījuma ar polistirola granulām uzkrātais mitrums, kas no konstrukcijas difundē ļoti lēni, jo bloki ir apmesti no abām pusēm. Bez tam eksperimentālā bloka faktiskā siltuma caurlaidība atšķiras no aprēķinos izmantotās vērtības arī tādēļ, ka faktiskā dobumu daļa izgatavošanas tehnoloģiskā procesa atšķirību dēļ, ir mazāka nekā plānots - nevis 53,3% bet gan tikai 46,6%. Tāpēc keramikas bloku raksturlielumus Latvijas klimata apstākļos salīdzinājumā ar citiem stendu materiāliem ir jānovērtē balstoties uz (CER) stenda mērījumu rezultātiem. Savukārt AER stenda gāzbetona ār sienu lielās siltuma caurlaidības iemesls ir lielais sākotnējais ūdens daudzums tajos, kas izdalās ļoti lēni gan materiāla poru struktūras īpatnību dēļ, gan arī tādēļ, ka bloki no abām pusēm ir apmesti. Te gan jānorāda, ka visi mūra elementi (arī keramiskie CER un EXP bloki) ir abpusēji apmesti, tādējādi nodrošinot tvaika difūzijai no tiem visos gadījumos vienādus apstākļus.

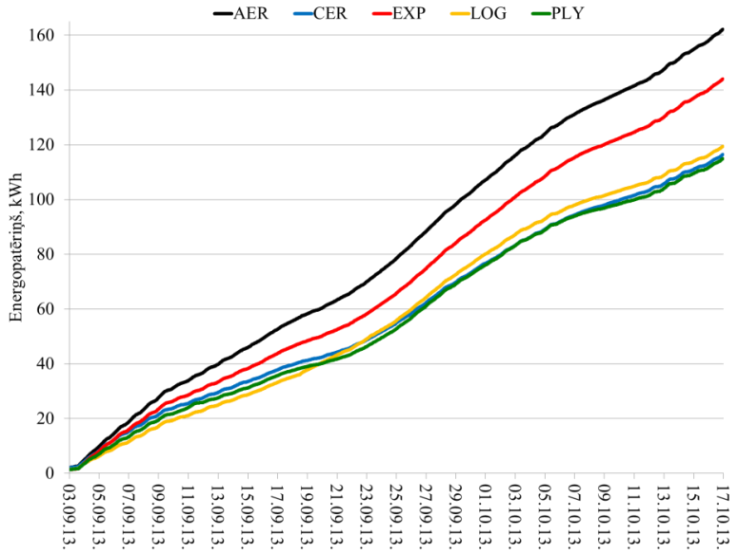


Attēls 7.19. Kopējais elektroenerģijas patēriņš apkurei un ventilācijai 2 mēnešu pavasara periodā standos, kas izbūvēti no dažādām būvkonstrukcijām ( $T_{gaisa}=18^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45$  l/h).

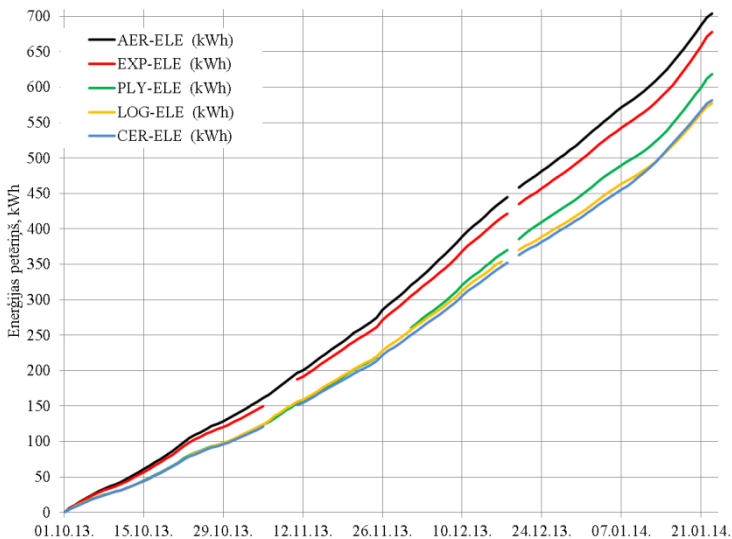
Arī rudenī, kad pagājis jau vairāk nekā pusgads pēc stendu izbūves, situācija energopatēriņa ziņā nav principiāli mainījusies, kaut arī proporcijas starp patēriņu dažādos standos atkarībā no konkrētā izvēlēta salīdzināšanas perioda nedaudz mainās. To uzskatāmi parāda summārais energopatēriņš stendu apkurei gan rudens mēnešos (attēls 7.20), gan apkures sezonā no oktobra

līdz janvārim (attēls 7.21). Relatīvi lielo patēriņu septembrī nosaka tas, ka bija uzstādītas augstākas iekštelpu temperatūras (skat. tab. 7.1).

Trijos apkures sezonas mēnešos energopatēriņš AER stendā ir kopumā par 25% lielāks nekā CER un LOG stendos, t.i., proporcija ir saglabājusies praktiski tāda pati, kāda tā bija pirmajos divos standu ekspluatācijas mēnešos pēc to izbūves – martā un aprīlī. Tas apstiprina jau iepriekš teikto, ka AER konstrukcijas žūšanas procesi ir ļoti lēni un, kā to apstiprina arī ražotāja pārstāvji, var turpināties vairākus gadus.

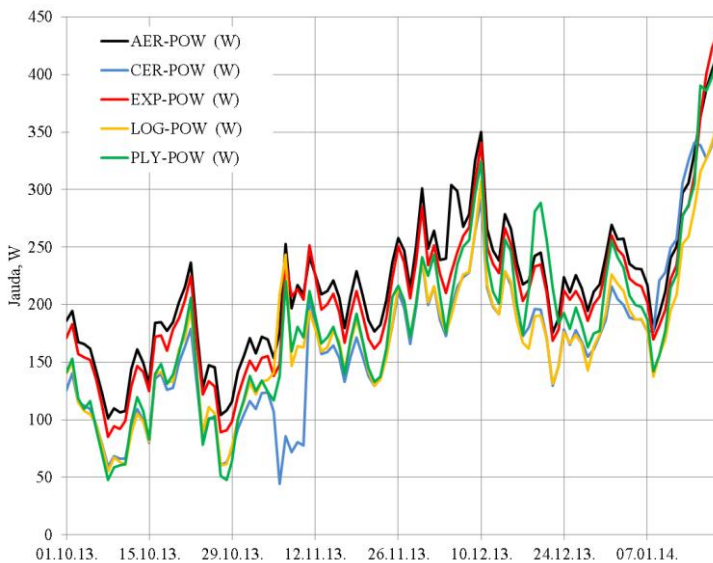


Attēls 7.20. Kopējais elektroenerģijas patēriņš sildīšanai rudens periodā septembrī un oktobrī ( $n=0,45$  1/h).



Attēls 7.21. Elektroenerģijas patēriņš telpu apkurei periodā no oktobra līdz janvārim ( $T_{\text{gaisa}}=19$  °C,  $n=0,45$  1/h).

Tas, cik strauji laikā pieaug summārais patēriņš, ir atkarīgs gan no āra gaisa temperatūras – tai pazeminoties apkures jauda praktiski lineāri pieaug, gan no uzstādītās iekštelpu temperatūras, piem., kā tika norādīts - patēriņš ir relatīvi liels septembra pirmajā pusē (skat. attēlu 7.20), kad standos tika veikti eksperimenti uzstādot paaugstinātu iekštelpu temperatūru un tādējādi sekmējot mitruma izvadīšanu no būvkonstrukcijām. Apkurei nepieciešamā jauda apkures sezonas mēnešos parādīta attēlā 7.22. Tā kā šajā periodā dominē apmācies laiks ar relatīvi mazu solārā starojuma intensitāti, tad apkures jaudu pie fiksētas uzstādītās iekštelpu temperatūras pamata nosaka āra gaisa temperatūras svārstības, piem., būtiski pazeminoties āra temperatūrai periodos decembra un janvāra vidū attiecīgi pieaug nepieciešamā apkures jauda un janvāra vidū tā CER un LOG standos sasniedz 360 W, bet EXP un AER standos pat 470 - 480 W, t.i., tā ir par 30 – 35% lielāka.



Attēls 7.22. Apkures jaudas izmaiņas apkures periodā no oktobra līdz janvārim ( $T_{gaisa}=19^{\circ}\text{C}$ ,  $n=0,45$  1/h).

Jānorāda, ka šeit uzdotā jauda un patēriņš apkurei ir gaiss – gaiss siltumsūkņu, kuri uzstādīti visos standos, jauda un elektroenerģijas patēriņš. Šajā lielumā nav iekļauts ventilācijas sistēmas motora, kura ģenerētais siltums izdalās ārā, darbināšanai nepieciešamais elektrības patēriņš un nav iekļauts arī ar iekšējiem siltuma avotiem, kas imitē cilvēka klātbūtni standos, saistītais elektroenerģijas patēriņš. Siltumsūkņu saražotā siltuma daudzuma attiecību pret to patērēto enerģijas daudzumu kādā laika periodā sauc par sezonālo efektivitātes faktoru SPF (*seasonal performance factor*). Tas parasti ir būtiski mazāks par standartizētos apstākļos noteikto efektivitāti COP (*coefficient of performance*), ko uzdod ražotāji. Jānorāda, ka lietotājam svarīgs ir tieši SPF, jo no tā būs atkarīgas faktiskās apkures vai dzesēšanas izmaksas, izmantojot tā vai cita veida siltumsūkņus, bet SPF arī vienam un tam pašam siltumsūkņim var atšķirties atkarībā no:

- āra temperatūras;
- apkures sistēmas darba temperatūras;

- enerģijas akumulācijas iespējām sistēmā;
- enerģijas pārvades zudumiem sistēmā;
- tā, cik tuvs sūkņa darbības režīms ir projektētajam (nominālajam) režīmam.

Detalizēti dažāda veida siltumsūkņu SPF pētījumi plānoti 2014. – 2015. g. periodā, uzstādot dažādos standos atšķirīgus gaiss – gaiss un gaiss – ūdens siltumsūkņus un salīdzinot to patērēto elektroenerģiju ar elektriskās apkures sistēmas patēriņu. Pašreizējie provizoriskskie vērtējumi standos esošajiem gaiss – gaiss siltumsūkņiem, salīdzinot to patērēto elektroenerģiju ar uz stendu siltuma bilances modeļaprēķina, izmantojot programmu *HetMod* (sakt. 6. nodaļu), iegūtajām vērtībām, parāda, ka esošajos ekspluatācijas apstākļos to  $SPF=1,5...1,7$ , kaut arī standartizēti noteiktā COP vērtība ir aptuveni 3 reizes lielāka –  $COP=5,0$ . Galvenie šo atšķirību iemesli ir tas, ka

- COP tiek noteikts pie  $+7^{\circ}C$  āra gaisa temperatūras, bet ekspluatācijas apstākļos Latvijas klimatā šī temperatūra vidēji aukstajā gada laikā ir zemāka - Rīgā normatīvā apkures sezonas temperatūra ir  $0^{\circ}C$ );
- sūkņa nominālā jauda ir vismaz 5 reizes lielāka nekā maksimāli nepieciešamā momentānā jauda sildīšanai pie zemas āra gaisa temperatūras un sūknis lielu laiku daļu strādā „*stand by*” režīmā;
- gaiss – gaiss siltumsūkņi nav enerģijas akumulācijas iespēju.

Tādējādi, protams, sagaidāms, ka pieskaņojot sūkņa nominālo jaudu faktiskajam patēriņam SPF pieaugs. Novērtējumi rāda, ka pie pašreizējām elektroenerģijas cenām siltumsūkņu lietošana ekonomiski atmaksājas, ja to SPF pārsniedz  $3,0...3,5$ . Izmantojot mūsdienīgas konstrukcijas siltumsūkņus ar  $COP=5...7$ , optimāli izvēloties sistēmu un to kvalitatīvi izbūvējot šādas SPF vērtības arī Latvijas klimatā ir iespējams sasniegt.

Ņemot vērā iepriekš teikto un iegūtos rezultātus var secināt, ka A kategorijas komforta līmeņa un energoefektivitātes nodrošināšanai ārējām norobežojošajām konstrukcijām vēlamās sekojošas īpašības:

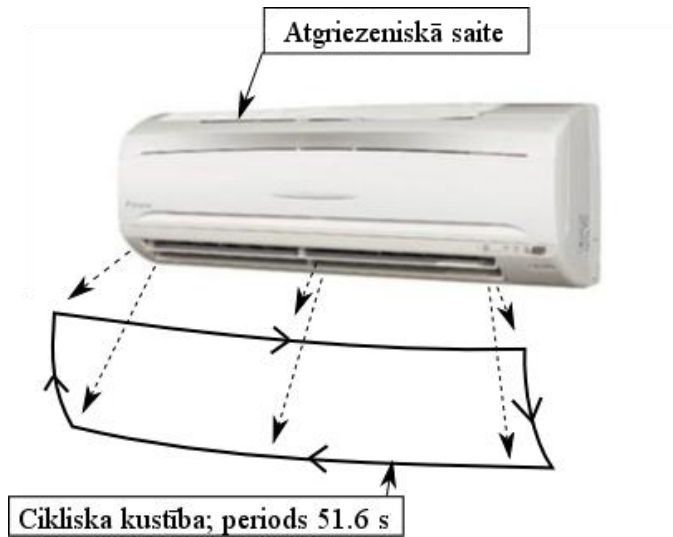
- ārējam būvkonstrukciju slānim jānodrošina nepieciešamās (atbilstoši būvnormatīvam vai stingrākam projekta uzstādījumiem energoefektivitātes aspektā) siltuma izolācijas īpašības, lai nodrošinātu konstrukcijai kopumā mazu siltuma caurlaidību  $U$  un minimizētu siltuma tiltus;
- konstrukcijas iekšējam slānim savukārt jābūt ar labām siltuma akumulācijas, mitruma akumulācijas un caurlaidības īpašībām, lai nepieciešamības gadījumā nodrošinātu gan papildus siltuma un mitruma akumulāciju, gan arī to atdevi, mainoties apstākļiem telpā.

## 7.5. Gaisa plūsmu dinamika telpā, izmantojot gaiss – gaiss siltumsūkni

Gaisa kustība telpās ar tradicionālu konvektora tipa sildķermeņu apkuri un atdalītu dabīgās vai mehāniskās ventilācijas sistēmu ir plaši pētīta gan eksperimentāli, gan skaitliski modelējot. Šādu 2D un 3D skaitlisko aprēķinu rezultāti tipiskai telpai atspoguļoti arī, piem., [34].

Izmantojot apsildei vai dzesēšanai gaiss – gaiss siltumsūkni ar savietotu ventilācijas funkciju, gaisa plūsmas un arī temperatūras sadalījumu struktūra telpā būtiski atšķiras no situācijas tradicionālo konvektoru vai grīdas apkures gadījumā. Testēšanas standos gaisa ieplūdes bloks ir

novietots virs ieejas durvīm un gaisa plūsmas virzienu un intensitāti var fiksēt vēlamā virzienā vai arī tā cikliski mainās automātiskā režīmā. Plūsmas virziens var ļoti būtiski ietekmēt temperatūru sadalījumu telpā gan sildīšanas, gan dzesēšanas režīmos, pie tam silta gaisa ieplūdes gadījumā plūsma ir vairāk vērsta uz leju, jo siltajam gaisam ir tendence celties uz augšu, bet aukstā gaisa plūsmas gadījumā tās orientācija ir tuvāka horizontālajam virzienam, jo aukstais gaiss „grimst” uz leju. Ja gaisa strūklu virziens netiek mainīts, tad it īpaši sildīšanas režīmā pie šāda ieplūdes bloka novietojuma var veidoties izteiktas temperatūras starpības pa augstumu, kas nelabvēlīgi ietekmē cilvēku pašsajūtu telpās. Tādējādi šo plūsmu eksperimentālie pētījumi un modelēšana ir nozīmīgi termisko apstākļu optimizācijai telpās, kur tiek izmantoti gaiss – gaiss siltumsūkņi.



Attēls 7.23. Siltumsūkņa iekšējā bloka gaisa plūsmas shematisks attēlojums.

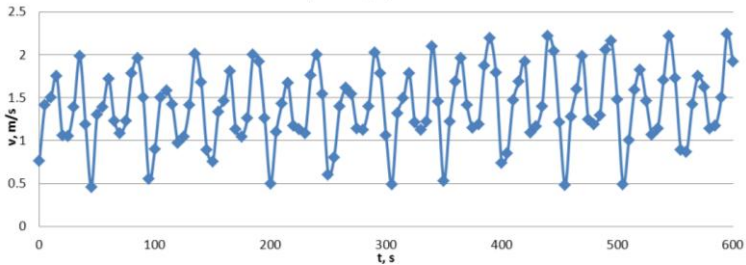
Ātruma mērījumiem stendos tika izmantots konstantas temperatūras anemometrs, līdz ar to tika noteikta ātruma absolūtā vērtība nevis tikai kāda no tā komponentēm. Tā kā šī tipa anemometram ir ļoti tieva (ar kārtu mikrometrs) vadoša stieple, kuru viegli sabojāt, tad tā tiek aizsargāta ar 4 metāla stieplu sfēru, kuras rādiuss ir aptuveni 5 cm. Mērījumos pie siltumsūkņa iekšējā bloka atveres (attēls 7.23) jāņem vērā, ka attālumu no šīs aizsargsfēras līdz bloka lāpstiņām bija aptuveni 1cm. Līdz ar to izplūdes ātrums tika mērīts aptuveni 6 cm no izplūdes lāpstiņām.

Vispirms tika veikti mērījumi, kad automātiskā režīmā vertikālās un horizontālās lāpstiņas veic pilnu ciklu, respektīvi, lāpstiņas pārmaiņus kustās visos virzienos (attēls 7.23). Šī cikla laikā ātrumi tika mērīti 3 pozīcijās – labajā malā, kreisajā malā un vidū – attiecīgi punkti 1, 2 un 3 tabulā 7.2. Šajās trīs pozīcijās mērījumi notika 5. jūlijā dienas laikā un to rezultāti atspoguļoti arī attēlā 7.24 – 7.26. Redzams, ka mērījumu ilgums būtiski pārsniedz tipisko lāpstiņu kustības cikla periodu, kas aptuveni vienāds ar 50 sekundēm. Precīzāk cikla periods tika aprēķināts ņemot vairākus maksimumus un aprēķinot vidējo laiku starp tiem, rezultātā tika iegūts, ka pilns cikls ilgst 51.6 s.

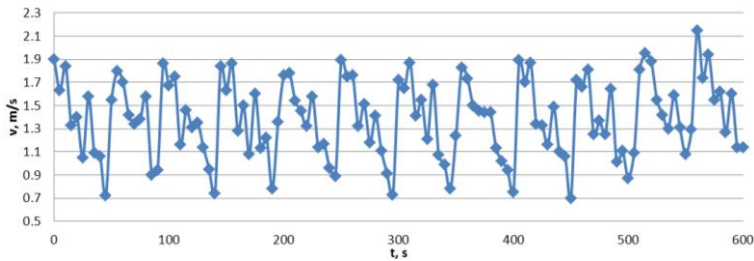
Tiešā izplūdes spraugas tuvumā maksimālie plūsmas ātrumi pie normālas gaisa apmaiņas  $n=0,45$  1/h sasniedz pat 3 m/s un izplūdes vidusdaļā ātrumi nesamazinās zem 1 m/s – cilvēks atrodoties šādas intensitātes plūsmā izjustu izteiktu diskomfortu.

Tabula 7.2. Mērījumu laiks un ātrumu ekstremālās vērtības.

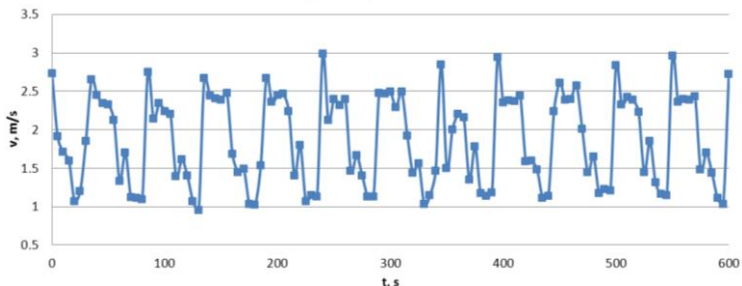
Mērījumu pozīcija	Mērījumu periods		Mērījuma ilgums		Ātruma ekstrēmi	
	Sākums	Beigas	$t, s$	$t, min$	$v_{max}, m/s$	$v_{min}, m/s$
1	11:00	12:00	2260	37.67	3.38	0.95
2	12:00	14:00	6640	110.67	2.2	0.7
3	14:00	15:30	5165	86.08	2.43	0.36



Attēls 7.24. Ātruma izmaiņas laikā 10 minūšu periodā 3. pozīcijā – ieplūdes bloka vidusdaļā.



Attēls 7.25. Ātruma izmaiņas laikā 10 minūšu periodā 2. pozīcijā – ieplūdes bloka kreisajā malā.

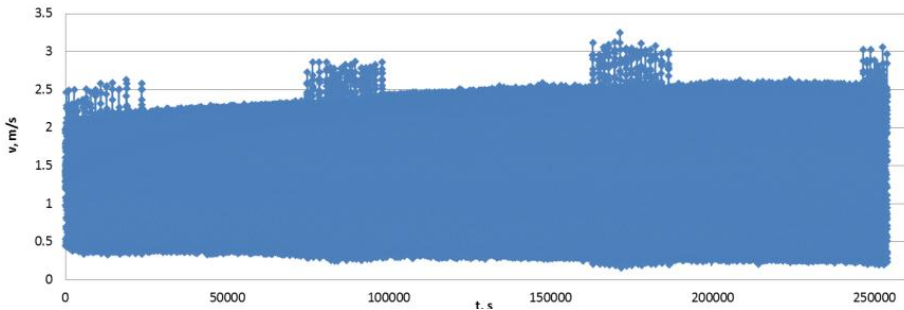


Attēls 7.26. Ātruma izmaiņas laikā 10 minūšu periodā 3. pozīcijā – ieplūdes bloka labajā malā.

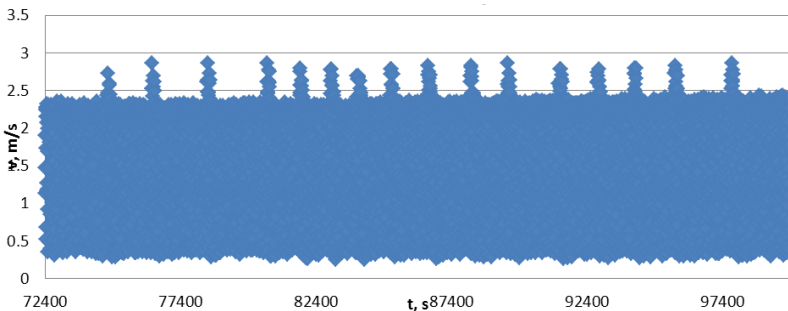
No skaitliskās modelēšanas viedokļa šāda nestacionāra turbulenta plūsma ir ļoti sarežģīta un datora resursietilpīga problēma, ja gribam iegūt nestacionārus ātruma sadalījumus telpā (3D). Savukārt vienkāršota stacionāra problēmas nostādne ar vidējotu gaisa ieplūdi no bloka nedod

mērījumu datiem atbilstošus rezultātus – tas uzskatāmi parādīts 6. nodaļā. Ievērojot teikto termiskā komforta apstākļu izpēte šādās sistēmās ir daudz sarežģītāka nekā tradicionālo konvektora tipa apkures sistēmu gadījumā, kur lielākā daļā gadījumu var aprobežoties ar stacionāru risinājumu.

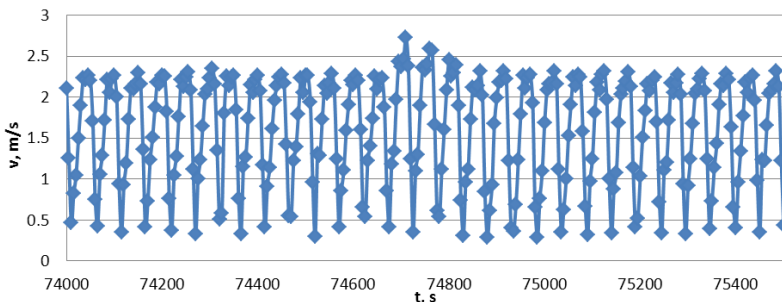
Kā redzams attēlos 7.27 un 7.28, tad katru dienu kādā laika periodā atkarībā no āra apstākļiem tiek ieslēgta aktīvāka dzesēšana, kura sadalās vairākos mazākos ciklos – tie parādīti attēlā 7.29. Redzams, ka tikai īss periods (2 - 3 cikli) tiek iziets ar paaugstinātu ātrumu un intervāls starp tiem ir 15 – 30 min. Šo ciklu starplaiku izmaiņu iemesli var būt novirze no uzstādītajiem temperatūras parametriem, kas var veidoties āra temperatūru, saules starojuma intensitātes u.c. faktoru izmaiņu rezultātā. Šajos periodos tika mērīta arī gaisa temperatūra izplūdes zonā (attēls 7.30).



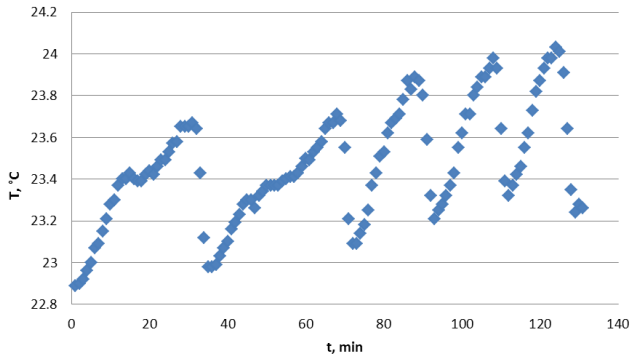
Attēls 7.27. Plūsmas ātrums 3. pozīcijā bloka vidusdaļā trīs dienu periodā.



Attēls 7.28. Plūsmas ātrumi dzesēšanas periodā.

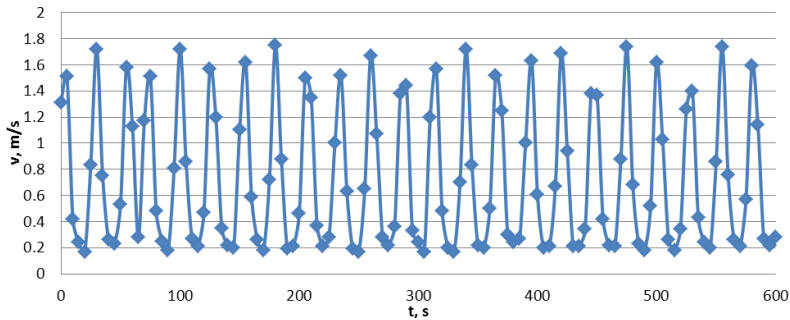


Attēls 7.29. Ātruma izmaiņas laikā intensīvās dzesēšanas periodā.

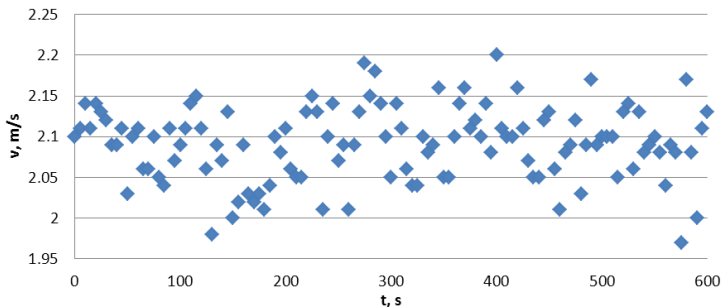


Attēls 7.30. Temperatūras izmaiņas dienas vidū - laikā no 12:00 - 14:00.

Attēlā 7.28 redzams, ka dzesēšana notiek cikliski. Parādītajam periodam atbilstošie ātruma maksimumi ir 22.; 49.; 84. un 121. minūtē, t.i., palielināto ātrumu periodi laikā nekorelē ar izplūstošā gaisa temperatūras izmaiņām pie sensoriem. Tas parāda, ka automātiska regulēšana notiek izmantojot pietiekami sarežģītu vadības programmu un šo procesu atspoguļot matemātiskajā modelī ir ļoti sarežģīti.



Attēls 7.31. Ātruma atkarība no laika pie izplūdes 10 minūšu periodā, ja plūsmas virziens mainās tikai horizontālā plaknē.



Attēls 7.32. Ātruma atkarība no laika, ja uzstādīts nemainīgs gaisa izplūdes virziens.

Ja plūsmas virziens vertikālā plaknē ir fiksēts (attēls 7.31), t.i., plūsmu virzošās plāksnes pārvietojas tikai horizontālā virzienā, tad izmērītais ātrums bloka vidusdaļā mainās intervālā no 0,2

– 1,8 m/s ar periodu aptuveni 25 sekundes. Minimālā ātruma vērtība tiek fiksēta tad, kad plūsma tiek novirzīta uz vienu vai otru atveres sānu.

Ja gaisa izplūdes virziens tiek fiksēts (plūsmu virzošās lāpstiņas tiek fiksētas centrālā pozīcijā un vispār nepārvietojas), tad ātruma vērtība svārstās nelielā intervāla vērtību starp 1,95 un 2,2 m/s (attēls 7.32), tomēr, kā jau tika norādīts, šādā režīmā telpā neizdodas nodrošināt vienmērīgu temperatūru sadalījumu pa augstumu un tuvināt apstākļus A kategorijas termiskā komforta nosacījumiem. Tādēļ šādām apkures/dzesēšanas sistēmām, lai mazinātu vertikālās temperatūras diferences cilvēka uzturēšanās zonā, gaisa ieplūdes virziena periodiska maiņa ir absolūti nepieciešams nosacījums. Tradicionālā apkure, izmantojot konvektorus, vai grīdas apkure sniedz daudz labvēlīgāku temperatūru sadalījumu telpā bez papildus piespiedu ventilācijas. Arī relatīvi lieli gaisa ieplūdes ātrumi var radīt būtisku diskomfortu cilvēku uzturēšanās zonā, tādēļ šī problēma gaisa – gaisa siltumsūkņu gadījumā jāpēta detalizēti, meklējot optimālus risinājumus, t.sk., izmantojot procesa matemātiskos modeļus.

## 8. Ilgtspēja un pilnā dzīves cikla analīze

### 8.1. Ilgtspējas jēdziens

Būvindustrijas nozarei raksturīga ļoti liela materiālu ietilpība un vislielākā jūtība pret sabiedrības ekonomiskās attīstības pacēluma un krituma periodiem. Tajā pašā laikā būvniecība vistiešākajā veidā nosaka komforta līmeni un iespējas atrāžot indivīda dzīves spēka enerģiju personīgajai attīstībai un konkurētspējai katram no mums.

Ar būvindustriju saistīta būtiska daļa no planētas vides resursiem, t. sk.:

- 40% kopējā enerģijas patēriņa;
- 30% CO<sub>2</sub> izmešu;
- 50% no materiāliem tiek transformēti par būvmateriāliem;
- 25% koksnes izejmateriālu;
- 16% kopējā ūdens patēriņa;
- 25% kopējā atkritumu daudzuma.

Pasaules ekonomikas attīstība ir spiesta rēķināties ar šiem būtiskajiem faktiem, jo resursi ir ierobežoti. Savstarpējā konkurence var novest pie tā, ka, lai uzvarētu šodienas konkurences cīņā, tiek izsmelti dabas resursi tādā mērā, ka tiek bremsēta un ierobežota nākamo paaudžu attīstība. Nācījas, kuras rūpējas par to, lai pastāvētu ilgtermiņā, ir radījušas mācību par ilgtspēju.

Ilgtspējīga rīcība ir tāda, kas spēj nodrošināt pašreizējās vajadzības, neapdraudot nākamo paaudžu iespējas

Jau kopš pagājušā gadsimta beigām attīstās zinātņu nozares, kuras var apvienot vienā jēdzienā – mācība par ilgtspēju un tās kritērijiem. Ilgtspējas kritērijus var apkopot 3 pamatgrupās: ekoloģiskajos, ekonomiskajos un sociālajos kritērijos (tabula 8.1).

Tabula 8.1. Ilgtspējas ekoloģiskie, ekonomiskie un sociālie kritēriji.

Ekoloģiskie kritēriji	Ekonomiskie kritēriji	Sociālie kritēriji
Primārās enerģijas patēriņš	Būvniecības izmaksas	Slimības, kuras izraisa kaitīgi dzīves apstākļi (slimās ēkas sindroms)
Izejvielu patēriņš	Ekspluatācijas izmaksas	Termiskais komforts
Atjaunojamo enerģētisko un materiālo resursu saturs celtnē	Remontu izmaksas	Telpu gaisa kvalitāte
Teritorija, kuru aizņem celtnē	Modernizācijas izmaksas	Aizsardzība pret trokšņiem, saules un nukleārās radiāciju, elektrosmogu
Siltumnīcas gāzu emisija	Transporta izmaksas	Ēkas noslodzes atbilstība plānotajai apdzīvotībai
Ozona slāņa resursu patēriņš	Enerģijas izmaksas	Ēkas drošība pret nesankcionētu ielaušanos

Atmosfēras piesārņojums ar skābos lietus izraisošām vielām	Telekomunikāciju izmaksas	Ēkas ugunsdrošība
Ozona veidošanās vasaras smoga laikā	Apsardzes izmaksas	Ēkas lietošanas draudzīgums un ērtums visu sabiedrības slāņu, grupu un vecumu cilvēkiem
Atkritumu apjomi un to pārstrādes iespējas	Kapitāla izmaksas (naudas cena)	Ēkas arhitektoniskā un vēsturiskā nozīmība
Ūdens neorganiskas vai organiskas izcelsmes piesārņojums	Apdrošināšanas izmaksas	Prestiža apliecinājums

## 8.2. Būvizstrādājumu tirdzniecības regula un būtiskās prasības būvēm

Lai harmonizētu būvindustrijas ilgtspējīgu kvalitātes politiku Eiropas Savienībā 2011. g. 9. martā tika izdota regula Nr. 305/2011. Šī regula nosaka saskaņotus būvizstrādājumu tirdzniecības nosacījumus un atceļ novecojušo (23 gadus veco) Eiropas Padomes Direktīvu 89/106/EEK. Regulā noteikts ka tā visās dalībvalstīs stājas spēkā 2013. gada 1. jūlijā.

Regulas Nr. 305/2011 4. punktā ir izteikts šāds būvindustrijas aktuālā stāvokļa novērtējums:

*„4. Dalībvalstis ir ieviesušas noteikumus, tostarp prasības, kas attiecas ne tikai uz ēku un citu būvju drošumu, bet arī uz veselības aizsardzību, izturīgumu, enerģijas ekonomiju, vides aizsardzību, ekonomikas aspektiem un citiem sabiedrības interesēm svarīgiem aspektiem. Savienības vai dalībvalstu līmenī pieņemti normatīvi un administratīvi akti, administratīvi pasākumi vai judikatūra var ietekmēt prasības attiecībā uz būvizstrādājumiem. Tā kā to ietekme uz iekšējā tirgus darbību, iespējams, būs ļoti līdzīga, šādi normatīvi un administratīvi akti, administratīvie pasākumi vai judikatūra šajā regulā būtu jāuzskata par “noteikumiem”.*

Ja iepriekšējā periodā ES Padomes direktīvu 89/106/EEK dalībvalstis, arī Latvija (MK noteikumi Nr. 181), izmantoja nacionālo uzņēmumu interešu aizsardzībai, tad nākotnē situācija būtiski mainīsies, jo var prognozēt, ka būvindustrijas tirgū pasliktināsies to valstu konkurētspēja, kuras nespēs adaptēt (pieskaņot) savu attīstību jaunajām prasībām.

Līdzšinējā būvizstrādājumu direktīva 89/106/EEK nodrošināja vienu Eiropas Savienības pamatbrīvībām – brīvu preču apriti būvizstrādājumu jomā. Tas tika panākts, ieviešot prasību apliecināt ar CE zīmi preču kvalitātes atbilstību standartos aprakstītajiem tehniskajiem noteikumiem. Kaut gan CE marķētu būvizstrādājumu drīkstēja piedāvāt jebkuras dalībvalsts tirgū, tas nenozīmēja, ka to drīkstēja iebūvēt jebkuras dalībvalsts būvē. Dalībvalstu būvnoteikumi būtiski atšķīrās, tādēļ katrā valstī produkti bija jāsertificē atkārtoti, tādējādi pierādot to atbilstību katras valsts būvnoteikumiem.

Jaunā regula Nr. 305/2011 nodrošinās ne tikai pārdošanas brīvību, bet, balstoties uz Eiropas Savienībā vienotiem pielietojuma noteikumiem, kuri formulēti Eirokodeksos, nodrošinās arī lietošanas brīvību. Ir vairāk nekā 60 Eiropas Komisijas lēmumu, kas izdoti Būvizstrādājumu

direktīvas izpildei. Tie galvenokārt nosaka būvizstrādājumu klasifikāciju un atbilstības novērtēšanas kārtību.

Viena no aktuālākām rekomendācijām būvniecības jomā, kas pašreiz tiek pildīta, ir Eiropas Komisijas 2003.gada 11.decembra Rekomendācija 2003/887/EK par Eirokodeksa ieviešanu un izmantošanu būvē un nesošajām konstrukcijām.

Atšķirībā no iepriekšējā perioda koncepcijas, kura noteica 6 pamatprincipus būvmateriālu fiziskajām īpašībām, Būvizstrādājumu regula Nr. 305/2011 izvirza būvē septiņas būtiskās prasības:

1. Mehāniskā stiprība un stabilitāte.
2. Ugunsdrošība.
3. Higiēna, veselība un vide.
4. Lietošanas drošība un pieejamība.
5. Aizsardzība pret trokšņiem.
6. Enerģijas ekonomija un siltumizolācija.
7. Ilgspējīga dabas resursu izmantošana.

Pirms 2011. g. spēkā bija tikai pirmās 6 prasības, uz kuru bāzes balstījās ES Padomes direktīvas 89/106/EEK prasības un attiecīgi visa ES būvindustrijas normatīvā likumdošana.

Regulā 305/2011 papildus tiek pievienota prasību Nr. 7 par dabas resursu ilgtspējīgu izmantošanu. Tā nozīmē sekojošu obligātu prasību par būvindustrijas ilgtspējīgas politikas īstenošanu:

„Būves jāprojektē, jābūvē un jānojauc tā, lai dabas resursi tiktu izmantoti ilgtspējīgi un jo īpaši nodrošinātu:

- būves, tās materiālu un tās daļu atkārtotu izmantošanu vai pārstrādi pēc nojaukšanas;
- būves izturīgumu;
- videi nekaitīgu izejvielu un otrreizējo izejvielu izmantošanu būvē.”

To kā ēkas būvēt droši un ilgtspējīgi visās ES valstīs kopš 2013. g. 1. jūlija nosaka būvnormas – Eirokodeksi. Eirokodeksu sistēmas izstrādes mērķis bija uzsākt otras būtiskās pamatbrīvības – brīvas pakalpojumu kustības ieviešanu būvniecības jomā.

Eiropas Savienības valstīs būvnormatīvi tiek pakārtoti Eirokodeksa standartu 10 saimēm ar 58 dokumentiem (iekavās norādīts attiecīgais dokumentu skaits):

- EN 1990 – Projektēšanas pamatprincipi (1);
- EN 1991 saime – Iedarbes uz konstrukcijām (10);
- EN 1992 saime – Betona konstrukcijas (4);
- EN 1993 saime – Tērauda konstrukcijas (20);
- EN 1994 saime – Kompleksās (betona-tērauda) konstrukcijas (3);
- EN 1995 saime – Koka konstrukcijas (3);
- EN 1996 saime – Mūra konstrukcijas (4);
- EN 1997 saime – Ģeotehniskā projektēšana (2);
- EN 1998 saime – Seismiskās noturības projektēšana (6);
- EN 1999 saime – Alumīnija konstrukcijas (5).

Eirokodeksu ieviešana ievērojami atvieglo brīvu pakalpojumu kustību būvprojektēšanas, būvmateriālu pielietošanas, būvju kvalitātes nodrošināšanas un resursu racionālas pielietošanas jomās. Tajā pašā laikā tas būtiski saasinās konkurenci būvindustrijas pakalpojumu un materiālu ražošanas tirgū. Latvijas nacionālā konkurentsphēja ir tieši atkarīga no tā cik tās būvindustrija ir gatava gan ražot, gan sniegt būvniecības pakalpojumus ilgtspējīgi.

Diemžēl Latvijā princips, ka uzvar lētākais risinājums, ir nobremzējis attīstību energoefektīviem un kvalitatīviem risinājumiem ar augstu ekspluatācijas īpašību kvalitāti un ilgmūžību kā arī zemu neatjaunojamo dabas resursu izlietojuma saturu. Visās ES valstīs regulas Nr. 305/2011 prasību ieviešanai ir izveidoti nacionālie koordinācijas kontaktu centri (*National CPR product contact points*, kur *CPR(construction produce regulation)* – būvizstrādājuma regula).



5 JULY 2013

COUNTRY	PCP CONSTRUCTION	ADDRESS	TELEPHONE	FAX	E-MAIL	WEBPAGE
LATVIA	Dipartimento Impresa e Internazionalizzazione Direzione Generale Mercato, Concomenza, Consumatore, Vigilanza e Normativa Tecnica Punto contatto prodotti (PCP)	00167 ROMA				
LITHUANIA	Enterprise Lithuania	Goštauto g. 40A LT-01112 Vilnius	+37052194342	+37052045808	cpr@enterpriseilthuania.com	<a href="http://www.businessgateway.lt">www.businessgateway.lt</a> <a href="http://www.versiovartai.lt">www.versiovartai.lt</a>
LUXEMBOURG						
MALTA	Technical Regulations Division, Malta Competition and Consumer Affairs,	Mizzi House, National Road, Blata l-Bajda HMR9010, Malta	+356 2395 2000	+356 2124 2406	<a href="mailto:construction-PCP@mccaa.org.mt">construction-PCP@mccaa.org.mt</a>	
NETHERLANDS	Rijksoverheid.nl (website of the National Authorities, resp. Ministry of BZK)	<a href="http://www.riksoverheid.nl/onderwerpen/bouwproducten">www.riksoverheid.nl/onderwerpen/bouwproducten</a>			<a href="https://www.contactpuntbouwproducten.nl/Contactpuntbouwproducten_VraagStellen_noiE.jsp?FAQ=Zelf_een_vraag_stellen&amp;noiE=true">https://www.contactpuntbouwproducten.nl/Contactpuntbouwproducten_VraagStellen_noiE.jsp?FAQ=Zelf_een_vraag_stellen&amp;noiE=true</a>	<a href="http://www.contactpuntbouwproducten.nl">www.contactpuntbouwproducten.nl</a>
POLAND	General Office of Building Control				<a href="mailto:Punkt-kontaktowy@cubn.gov.pl">Punkt-kontaktowy@cubn.gov.pl</a>	
PORTUGAL						
ROMANIA	Ministry of Regional Development and Public Administration – General Technical Directorate, Standards and Regulation	17, Apolodor St., North Side, Sector 5, Bucharest, ROMANIA, 050741 - RO	+40 372 114 565	+40 372 114 591	<a href="mailto:infoprod_constructii@mrdp.ro">infoprod_constructii@mrdp.ro</a>	<a href="http://www.mrdp.ro/constructii-4216">http://www.mrdp.ro/constructii-4216</a>

*Attēls 8.1. Atbildīgās institūcijas dalībvalstīs par būvizstrādājumu regulas ieviešanu.*

Diemžēl Latvijā, Grieķijā, Portugālē un Luksemburgā šobrīd vēl nav institūciju, kuras būtu tieši atbildīgas par *CPR* ieviešanu. Situācija ES valstīs parādīta interneta vietnē (attēls 8.1):

[http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/construction/declaration-of-performance/index\\_en.htm#h2-2](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/construction/declaration-of-performance/index_en.htm#h2-2)  
- Latvijas sadaļa ES valstu būvizstrādājumu regulas Nr. 305/2011 nacionālo koordinācijas kontaktu centru informācijas lapā ir tukša. Cēlonis tam ir nepietiekamā izpratne par pārmaiņu nozīmīgumu, kā arī būvindustrijas zinātnes nepietiekama gatavība pārmaiņām.

### 8.3. Situācija celtniecības ilgtspējīgas kvalitātes novērtēšanā Latvijā salīdzinājumā ar Vāciju un Lielbritāniju

Latvija ir nokavējusi izdevību būt progresīvo pārmaiņu avangardā un tai jāērķinās ar to, ka Būvizstrādājumu regulas Nr. 305/2011 ieviešanai Latvijā turpmāk būs nepieciešams veikt atbilstošas izmaiņas daudzos dokumentos.

Spēka esošais 1995. g. 10. augusta Būvniecības likums ir novecojis un ir pretrunā ar minētajām jaunajām prasībām. Plānots, ka jaunā likuma redakcijā stāsies spēkā 2014. g., ja neradīsies būtiski šķēršļi tās pieņemšanā.

Būs nepieciešamas būtiskas izmaiņas daudzos ar Būvniecības likumu saistītajos likumdošanas aktos un normatīvos, t. sk., šādos:

- Ministru kabineta 2001. g. 31. marta noteikumi Nr.142 „Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 006-00” “Būtiskās prasības būvēm”;
- MK 1997 g. 1. aprīļa noteikumi Nr. 122 „Vispārīgie būvnoteikumi”;
- 1996. g. 8. augusta likums „Par atbilstības novērtēšanu”;
- 1999. g. 18. marta likums „Par patērētāju tiesību aizsardzību”;
- MK 2001. g. 30. aprīļa noteikumi Nr.181 „Būvizstrādājumu atbilstības novērtēšanas kārtība reglamentētajā sfērā”;
- MK 2007. g. 3. jūlija noteikumi Nr. 457 „Noteikumi par Eiropas tehnisko apstiprinājumu”.

Eiropas savienībā turpinās darbs, lai koriģētu eksistējošos standartus un izstrādātu jaunus harmonizētus standartus, kuri ņem vērā vairākās valstīs uzkrāto pieredzi ilgtspējas jomā. Šo koordinācijas un harmonizācijas darbu ilgtspējas novērtējuma nozarē veic tehniskā standartizācijas komiteja Nr. 350.

Vadošā loma ilgtspējas novērtēšanas jautājumos ir Vācijai un Lielbritānijai, kur uzkrāta liela pieredze un notiek tehniskās inteligences sacensība par noteicošo lomu vadlīniju sagatavošanā.

Pamācošs ir Vācijas piemērs, kur jau kopš 2007. gada darbojas Vācijas ilgtspējīgās celtniecības sabiedrība *DGNB (Deutsche Gesellschaft fuer Nachhaltiges Bauen)*. Informāciju par to var atrast interneta vietnē - <http://www.dgnb.de/de/>. Tā izveidojusi ļoti labi sistematizētu būvindustrijas gala produkta – ēkas visu komponentu izvērtējuma sistēmu. Katrai komponentei ir savs īpatsvars, kas tiek atsevišķi vērtēts saskaņā ar šīs komponentes vērtības kritērijiem.

Sistēmā tiek atsevišķi izdalīti ekoloģiskās, ekonomiskās un sociālās kvalitātes novērtēšanas principi. Turklāt tiek paredzēta būvobjekta izbūves tehniskās kvalitātes, būvobjektā uzstādīto mehānisko konstrukciju un automātisko iekārtu darbības procesu kvalitātes, kā arī ēkas atrašanās vietas parametru atbilstības novērtēšana ilgtspējīgas kvalitātes prasībām.

Vācijas sistēma paredz virkni detalizēti aprakstītu kritēriju, katrs no kuriem apskata kādu ēkas vērtības argumentu. Kritēriju ietekme uz vērtējumu tiek sadalīta ietekmes svara procentos, kopējā kritēriju vērtējumu kopsumma ir 100%. Tādējādi tiek panākts, ka ēkas vērtība tiek definēta kā viens veselums, kurā katram argumentam tiek paredzēta sava vieta ēkas vērtību skalā. Gala rezultāts sniedz informāciju par ēkas kvalitātes ilgtspējīgumu, ņemot vērā gan ekonomiskos, gan sociālos, gan vides ietekmes faktoros (tabula 8.2).

Tabula 8.2. Vācijas ēku novērtēšanas kritēriji saskaņā ar DGNB sistēmu.

Poz.	Kritēriji DGNB ilgtspējas vērtējumam	%no100
1	Siltumnīcas gāzu potenciāls GWP	2,9
2	Ozona slāņa noārdīšanās	1
3	Ozona veidošanās	1
4	Skābo lietu veidošanās	1
5	Ūdens baseinu piesārņojums ar minerālvielām u.c. barības vielām	1
6	Risks lokālajai teritorijai	2,9
7	Citi ietekmes faktori globālajai ekoloģijai	1
8	Mikroklimats	2
9	Neatjaunojamās primārās enerģijas patēriņš	2,9
10	Atjaunojamās primārās enerģijas patēriņš	2
11	Atkritumu dalītā šķirošana	1
12	Svaigā ūdens patēriņš	2
13	Ēkas telpu noslodze	2
14	Ēkas izmaksu sadaļa dzīves cikla izmaksu analīzē	13,5
15	Vērtības stabilitāte	9
16	Termiskais komforts ziemā	1,7
17	Termiskais komforts vasarā	2,5
18	Iekštelpu gaisa kvalitāte	2,5
19	Akustiskais komforts	0,8
20	Vizuālais komforts	2,5
21	Iemītnieku ietekme	1,7
22	Āra gaisa kvalitāte ap ēku	0,8
23	Barjeras un kustību aprgrūtinājumi	1,7
24	Telpu teritorijas plānojuma efektivitāte	0,8
25	Telpu pielietojamība to mērķim	1,7
26	Telpu pieejamība lietotājiem	1,7
27	Komforts velosipēdistiem	0,8
28	Arhitektūras atbilstība pilsēt būvniecības kritērijiem	2,5
29	Mākslas īpatsvars ēkā	0,8
30	Ugunsdrošība	3,8
31	Skaņas izolācija	3,8
32	Ēkas konstrukciju siltuma izolācija un mitruma aizsardzība	3,8
33	Ēkas materiālu ilgmūžība un to dzīves ilguma atbilstība ēkas dzīves ciklam	3,8
34	Būvkonstrukciju piemērotība remontam un uzturēšanai	3,8
35	Piemērotība pārbūvei, demontāžai un atkārtotai izmantošanai	3,8
36	Projekta kvalitāte	1,3
37	Ēkas plānojuma integritāte	1,3
38	Piemērotība funkciju daudzpusīgumam	1,3
39	Finansējuma nodrošinājums projekta ilgtspējas realizācijai	0,9
40	Ēkas optimāla pielietojuma nosacījumu sagatavošana	0,9
41	Būvlaukums un būvniecības process	0,9
42	Būvfirmu kvalitātes apliecinājumi un garantijas	0,9
43	Būvdarbu kvalitātes apdrošināšana	1,3
44	Plānots process nodošanai ekspluatācijā	1,3



Attēls 8.2. Vācijas DGNB sistēmas koncepcijas shematisks attēlojums.

Līdzīgu sistēmu *BREEAM* (saīsinājums no sistēmas nosaukuma *Building research establishment environmental assessment method*) jau agrāk – 1990 – 95 gados izveidoja Lielbritānijā.

Tabula 8.3. Latvijas ēku ilgtspējīgas kvalitātēs novērtēšanas saskaņā ar *BREEAM* metodiku kategorijas.

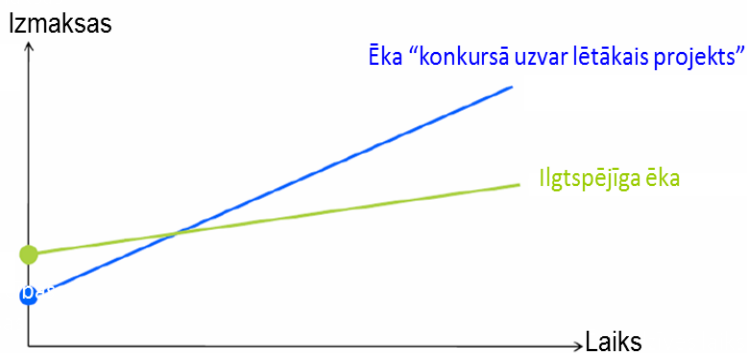
Nr.	LV - BREEAM kategorijas	Īpatsvars
1	Enerģija	19%
2	Veselība un labklājība	15%
3	Materiāli	12.5%
4	Būvniecība un apsaimniekošana	12%
5	Zeme un ekoloģija	10%
6	Piesārņojums	10%
7	Transports	8%
8	Atkritumi	7.5%
9	Ūdens	6%
	Kopā:	100%
+10	Punkti par inovācijām	+ 1 % papildus

Pašreiz *BREEAM* ir pasaulē vecākā un Eiropā arī visbiežāk lietotā ēku sertifikācijas sistēma. Šajā sistēmā ir 9 novērtējamo parametru kategorijas, kurās apkopoti vairāk kā 60 objektīvi

izmērāmi kritēriji. Lielbritānijā šī metodika tiek attiecināta uz jebkuru būvniecību, ja tajā iesaistīti sabiedriskie finansu līdzekļi vai sabiedriskie īpašumi – teritorija, ēkas, komūnikācijas. Šī sistēma ļauj veidot iepirkumu konkursus, kuros valsts un pašvaldību amatpersonām ir iespēja pieņemt ilgtspējīgus lēmumus. Šī metodika palīdz novērtēt kvalitātes kritērijus, izvēlēties tos, kurus konkrētajā projektā lēmumu pieņēmēji atzīst par būtiskiem, un pamatot savu izvēli ar sabiedrībā atzītiem un saprotamiem *BREEAM* ilgtspējas nosacījumiem.

Latvijā eksistē sabiedriskā organizācija – Latvijas ilgtspējīgās būvniecības padome - LIBP ([www.ibp.lv](http://www.ibp.lv)), kura ir adaptējusi minētos Lielbritānijas ēku kvalitātes novērtēšanas sistēmas kritērijus Latvijas apstākļiem. Saskaņā ar adaptēto *BREEAM* metodi Latvijā pašreiz ir sagatavota rokasgrāmata ēku parametru izvērtējumam dažādās kategorijās (skat. tab. 8.3).

Latvijā pagaidām šādas sistēmas valsts pārvalde nav akceptējusi un līdz ar to praksē ir negatīvi piemēri, kad, izvēloties lētāko risinājumu, tiek iegūts sliktākais rezultāts. Situāciju var ilustrēt ar vienkāršu attēlu – ja tiek izbūvēta ēka ar mazākām būvniecības izmaksām, tad ir sagaidāms, ka tās ekspluatācija būs dārgāka. Ilgtermiņā – ēkas dzīves laikā - tiks zaudēti nozīmīgi resursi ēku papildus apsildot un remontējot.



Attēls 8.3. Ilgtspējīgas ēkas priekšrocības izpaužas tās dzīves laikā.

Tādēļ Latvijā nedrīkst kavēties ar ilgtspējas principu ieviešanu būvindustrijas praksē. Ir nepieciešams savlaicīgi gatavot arī speciālistus, kuri būs spējīgi sekot tām pārmaiņām, kuras pieprasa ES regulas būvindustrijā.

Saskaņā ar ES Direktīvu 2010/31/ES visām jaunbūvēm un tādām ēku rekonstrukcijām, kur darbu apjoms pārsniedz 25% fasādes laukuma, piemērojami zema enerģijas patēriņa ēku kritēriji. Tādēļ ir saprotams, ka vislielākais īpatsvars ēkas ilgtspējas novērtējumā Latvijā tiek piešķirts ēkas energoefektivitātei (skat. tab. 8.3).

Saistībā ar ēku ilgtspēju 2011. g. Latvijā adaptēja standartu EN 15643-2:2011 „Būvniecības darbu ilgtspēja – Ēku novērtēšana – 2.daļa: Vides novērtējuma struktūra”. Tas sniedz vides novērtējuma pamatprincipus visā ēkas dzīves ciklā, ņemot vērā gan ēkas funkciju, gan tehniskos rādītājus. Ilgtspējīgās būvniecības padome ir sagatavojusi rekomendācijas un vadlīnijas projektētājiem gan balstoties uz *BREEAM* atziņām, gan aktuālajiem būvniecības kvalitātes un vides resursu izlietojuma novērtēšanas standartiem. Rekomendācijās arī atspoguļotas 9 kritēriju

grupas, kas veidotas balstoties uz Latvijas Republikas būvniecības likumdošanas un starptautisko standartu analīzi. Kategorijas grupētas pēc satura un atbilstoši enerģijas un ilgtspējas mērķiem.

Izstrādātajai vērtēšanas sistēmai ir informatīvs raksturs. Ar vienkāršu lielumu palīdzību projektētājs, pasūtītājs vai ēkas lietotājs var noteikt ēkas ilgtspējas mērķus un tos realizēt. Šīs darbības mērķis bija sagatavot plašāku auditoriju augstāku vietējo prasību praktiskai pielietošanai vistuvākajā laikā un starptautisku zema enerģijas patēriņa un ilgtspējas kritēriju ieviešanai periodā no 2012. līdz 2014. g. Minētā vērtēšanas sistēma ietver sekojošus rādītājus:

1. Primārās enerģijas patēriņš.
2. Iekštelpu klimats un lietotāja komforts.
3. Būvniecības un apdares materiālu pielietojums.
4. Ūdens resursu izmantošana.
5. Teritorijas izmantošana.
6. Piesārņojuma kontrole.
7. Transports.
8. Atkritumu saimniecība.
9. Ēkas un būvdarbu pārvaldība.

Zaļā iepirkuma (*Green label purchase*) principu īstenošana, kā Eiropas savienībā plaši rekomendēta iepirkumu metode, atļauj uzstādīt augstākus enerģijas un ilgtspējas mērķus, nekā nosaka vietējie normatīvie dokumenti. Papildus ilgtspējas prasības ir jāievēro jebkurā projekta un būvniecības posmā - tehniskās specifikācijas sastādīšanā, projektēšanā, būvniecībā, autoruzraudzībā un būvuzraudzībā.

Lai sasniegtu plānotos enerģijas un materiālo resursu ilgtspējas mērķus, pat pie nelieliem plānotiem darbu apjomiem nav pieļaujama darbu veikšana bez projekta un atbilstošiem rasējumiem, kā arī bez autoruzraudzības un būvuzraudzības. Plānojot iepirkumu, šie konsultāciju pakalpojumi jāparedz savlaicīgi un atbilstošā finansu apjomā. Atbalsta dokumentiem - iepirkumu nolikumu paraugiem un līgumu paraugiem jābūt publiski pieejamiem un ērti lietojamiem.

Enerģijas ekonomijas subsīdiju projektos par dokumentu paraugu nodrošināšanu ir atbildīgs finansējuma administrētājs. Pašvaldībās, attiecībā gan uz publiskām, komerciālai izmantošanai paredzētām, vai dzīvojamām ēkām, šādiem dokumentiem būtu jābūt pieejamiem elektroniski, ar skaidrojumiem, kā tos pareizi lietot.

Latvijā, pie esošās būvvalžu struktūras, rajonu būvvaldes speciālisti var sniegt kompetentu padomu tehnisko specifikāciju sastādīšanā, iepirkuma profesionālā organizēšanā, kā arī piedalīties vērtēšanas komisijā savas kompetences ietvaros.

#### **8.4. Ilgtspējas analīzes argumenti - energoefektivitāte un telpu mikroklimats**

Pašreizējā Latvijas valsts normatīvā bāze ir balstīta uz Latvijas Būvnormatīviem, kuru prasību līmenis vairs neatbilst ne jaunākajām ES direktīvām, ne arī ēkas energopatēriņa prasību līmenim ekonomiski attīstītās Eiropas valstīs. Tajā pašā laikā nacionālā ekonomika efektīvi var adaptēt praksē augsto prasību līmeni tikai pie nosacījuma, ja ir pieejami atbilstoši tehniski risinājumi, kā arī nepieciešamo tehnisko zināšanu un datu bāze, kas piemērojama vietējiem

klīmata apstākļiem, vietējo būvmateriālu specifikai un vietējā inženiertehniskā personāla profesionālajai sagatavotībai.

Latvijā ir augsta līmeņa konkurētspējīgs akadēmiskais zinātniskais potenciāls, kas ir spējīgs sadarbībā ar vietējiem materiālu ražotājiem un būvinženieriem radīt konkurētspējīgus risinājumus, kas ļauj nodrošināt ekonomisku efektivitāti valstij un paaugstināt konkurētspēju visām projektā iesaistītajām pusēm.

Viena no galvenajām problēmām gan patreizējā Eiropas Savienības, gan topošajā Latvijas normatīvajā bāzē ir pretrunas starp kritēriju novērtējumu mājokļa energopatēriņam un telpu mikroklimatam. Standarta LVS EN 15251 ievadā ir teikts, ka „enerģētiskajai sertifikācijai nav nozīmes... atrauti no telpas mikroklimata sertifikācijas”. Šobrīd šī sasaiste ir kļuvusi par reālu prasību Eiropas būvindustrijai. Eiropas Padomes būvniecības direktīva (EPBD) ir drauds tām valstīm kas cenšas uzlabot tikai enerģētiskos raksturlielumus, ignorējot iekšējā gaisa kvalitāti telpās. Tikai atrodot optimālu līdzsvaru starp ēkas mikroklimata rādītājiem un ēkas energoefektivitāti, tiek nodrošināta ekonomiski pamatotu ēkas kvalitātes kritēriju realizācija, būves vērtības saglabāšana nekustāmā īpašuma tirgū un atbilstība augošajām sabiedrības prasībām pēc veselīgas dzīves vides un komforta.

Pašreiz celtniecības praksē nav pietiekamu zināšanu par to kā sasniegt optimālu līdzsvaru starp pretrunīgajām kritēriju grupām :

1. No vienas puses Latvijā adaptētie standarti un esošie normatīvi būv klimatoloģijas jomā:

- LVS CR 1752:2008 „Ēku ventilācija. Iekštelpu vides projektēšanas kritēriji”;
- LVS EN ISO 7730:2006 „Siltuma vides ergonomika. Termālā komforta analītiska noteikšana un interpretācija, izmantojot paredzamā vidējā balsojuma (PMV) un paredzamā neapmierināto personu procenta (PPD) indeksu kalkulāciju un lokālā termālā komforta kritērijus”;
- LVS EN 15251:2007 „Telpu mikroklimata (gaisa kvalitātes, temperatūras režīma, apgaismojuma un akustikas) parametri ēku projektēšanai un to energoefektivitātes novērtēšanai”;
- LBN 231-03 “Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija”; u.c. MK noteikumi.

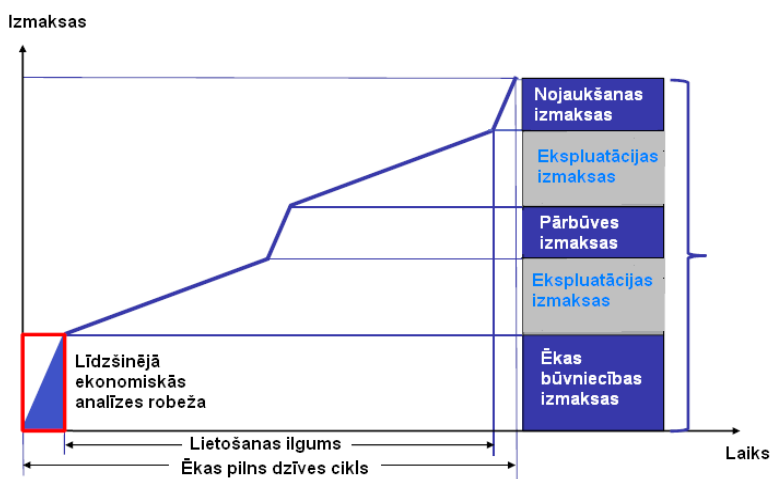
2. No otras puses uz standartiem balstītas Latvijas normatīvu un EP prasības uzlabot energoefektivitāti:

- MK noteikumi Nr. 348 „Ēkas energoefektivitātes aprēķina metode” no 25.06.2013.;
- MK noteikumi Nr. 495 „Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-01 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika”” no 27.11.2001 ;
- Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2010/31/ES par ēku energoefektivitāti no 19.05.2010.;
- LVS EN 1745:2002,
- LV EN ISO 6946:2003 u.c.

Esošā datu bāze par būvmateriālu īpašībām un to ietekmi gan uz ēku augstākās kategorijas mikroklimata nodrošināšanas iespējām, gan uz ēku energopatēriņu ir nepilnīga:

- projektētājam nav pieejama kvalitatīva, lietošanai draudzīga informācija optimālā risinājuma sasniegšanai;
- ēkas pasūtītājam – investoram vai arī gala lietotājam nav zinātniski pamatotu, matemātisku un uz pētījumiem balstītu kritēriju un instrumentu, lai novērtētu reālo ēkas kvalitatīvo vērtību;
- būvmateriālu ražotājam nav zinātniski pamatotu, matemātisku un uz pētījumiem balstītu kritēriju un instrumentu, lai pamatotu savu motivāciju radīt būvmateriālus ar optimālu īpašību kopu, kas ļautu izgatavot gala produktu – mājokli ar visaugstāko pievienoto lietošanas un ekspluatācijas vērtību ilgspējīgā perspektīvā.

Pasaulē šo problēmu sāk intensīvi risināt - notiek diskusijas un šajā jomā tiek veikti zinātniski pētījumi. Ir sagatavotas sākotnējās versijas būvniecības standartu (EN) izmaiņām. Tas liecina, ka arī Latvijas valstij ir jāveic darbības, kas ļautu nacionālajai celtniecības industrijai un attiecīgi arī Latvijas jaunceļamo mājokļu kvalitātei neatpalikt no labākajiem Eiropas paraugiem, tajā pašā laikā sasniedzot to ar pēc iespējas zemākām izmaksām. Sevišķi svarīgi tas ir pašlaik, kad jau no 2013.g. 1. jūlija ir spēkā regulas Nr. 305/2011 prasības, bet nacionālā likumdošana vēl ir tādā līmenī, kas atbilst 23 gadus vecajai iepriekšējai direktīvai 89/106/EEK.



Attēls 8.4. Ēkas pilna dzīves cikla fāzes un to izmaksu shematisks attēlojums.

### 8.5. Stendu ilgspējas un dzīves cikla ekonomiskās analīzes piemērs

Lai veiktu ilgspējas salīdzinājumu ēkām un dotu sabiedrībai motivāciju tiekties pēc praksē pārbaudītām un zinātniski pierādītām vērtībām eksistē starptautisks standarts ISO 15686-5 „Būvju un būvkonstrukciju pamatlīdzekļi – dzīves cikla plānošana: 5.daļa, Dzīves cikla izmaksas” (*Buildings and constructed assets - Service life planning: Part 5, Life-cycle costing*).

Saskaņā ar šo standartu ēkas dzīves ciklu var analizēt vērtības kritērijiem piemērojot labi saprotamus ekonomiskos izmaksu noteikšanas instrumentus.

Pētniecībai izbūvētajiem stendiem nav nozīmes analizēt visas reālā būvniecības procesa sadaļas (skat. att. 8.4), tomēr, lai novērtētu piecu dažādo risinājumu ilgspēju tika izvērtētas to

celtniecības procesu salīdzinošās izmaksas (iekļaujot celtniecības darbu un materiālu izmaksas), ekspluatācijas izmaksas (tajās iekļaujot prognozējamās enerģijas, kuras patērē vienāda tipa *Daikin* firmas gaiss - gaiss tipa siltumsūkņi, izmaksas) un, visbeidzot, paredzamās stendu demontāžas izmaksas un to materiālu perspektīvās utilizācijas, reģenerācijas iespējas vai pat otrreizējā izmantošana. Standartā un konkrētajā izvērtējumā iekļautie ēkas dzīves cikla posmi parādīti tabulā 8.4.

Tabula 8.4. Standartā un konkrētajā izvērtējumā iekļautie ēkas dzīves cikla posmi.

Fāzes	Būvniecības procesa apraksts saskaņā ar standartu	Stendu dzīves cikla izmaksu analizē iekļautie posmi
0	Lēmumu pieņemšanas posms	-
1	Projektēšanas posms	Projektēšana
2	Plānošanas posms	-
3	Būvniecības posms	Būvniecība
4	Komercializācijas posms	-
5	Iepirkums posms	-
6	Ekspluatācijas posms	Ekspluatācija
7	Konversija/atjaunošana, renovācija/modernizācija	-
8	Izvākšanās posms	-
9	Reģenerācijas /utilizācijas posms	Reģenerācija/utilizācija

Ekspluatācijas izmaksas parasti ir vislielākā daļa no ēkas dzīves cikla izmaksām (skat. arī attēls 8.4). Būtisku daļu no ekspluatācijas izmaksām veido energopatēriņš, kas atšķiras no dažādiem materiāliem uzbūvētajiem testēšanas stendiem, kaut arī sākotnēji projektētais energopatēriņš bija vienāds. Bez tam energopatēriņš tiek salīdzināts pie uzdota, vienādas kvalitātes mikroklimata telpās. Energoapatēriņš A kategorijas termiskā komforta līmeņa uzturēšanai mainās arī būvju ekspluatācijas laikā – dažādos konstruktīvos risinājumus un materiālus apkārtējās vides faktori ietekmē atšķirīgi un to noteikt var tikai ilgtermiņa monitoringā reālos Latvijas klimatiskajos apstākļos, vienādos visiem testēšanas stendiem.

Tabulā 8.5 apkopotie dati liecina ka stendu ārsienu būvkonstrukcijas ir būtiski atšķirīgās pēc to masas. Būvkeramikas ar biezumu 510 mm (EXP) sienu masa ir aptuveni 10 reizes (!) lielāka nekā vieglākās finiera būvkonstrukcijas ar fibrolīta plāksni (PLY) sienu masa. Maksimālā izolācijas materiāla tilpuma atšķirība ir starp PLY un AER stendu ār sienām - izolācijas materiāla apjoms atšķiras 3 reizes.

Visiem testēšanas stendiem norobežojošās konstrukcijas no krasi atšķirīgajiem materiāliem tika projektētas tā, lai tām būtu aptuveni vienādas siltuma caurlaidības:

$$U_{sienu} = 0,15 - 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}); U_{griestu} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}); U_{grīdas} = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}).$$

Uzstādīto gaiss - gaiss tipa siltumsūkņu „*Ururu-Sarara*” (*Daikin*, Japāna) kondicionēšanas iekārtas dzesēšanas jauda ir 2,8 kW un sildīšanas jauda – 3,6 kW. Tuvināti tas ļauj nodrošināt

vienādu mikroklimatu visos testēšanas standos. Ir iespējams izmantot divus dažādas intensitātes mehāniskās ventilācijas režīmus ar gaisa apmaiņu attiecīgi  $n = 0,45$  l/h (normālās ventilācijas režīms) un  $0,75$  l/h (paaugstinātas intensitātes ventilācijas režīms). Bez tam iekārta spēj nodrošināt arī nepieciešamo telpas gaisa mitruma režīma stabilizāciju ar jaudu  $400$  ml/h, bet līdzšinējos pētījumos šī iespēja netika izmantota.

Tabula 8.5. Testēšanas stendu izkārtojums pēc sienu masas, siltuma izolācijas materiāla tilpuma un novērtētā energopatēriņa pirmajā gadā.

Izkārtojums pēc sienu konstrukciju masas, kg		Izkārtojums pēc pielietotā siltumizolācijas materiāla tilpuma, m <sup>3</sup>		Izkārtojums pēc energopatēriņa ekspluatācijas pirmajā gadā, Kwh/m <sup>2</sup> gadā	
PLY	1 750	AER	4,8	LOG	130
LOG	4 810	LOG	8,3	PLY	143
AER	5 930	CER	9,2	CER	143
CER	13 680	EXP	10,0*	EXP	196
EXP	17 610	PLY	11,0	AER	216

\* - polistirola granulas bloku dobumos

Atbilstoši Latvijā spēkā esošajai ēku energoefektivitātes aprēķina metodei tika noteikts īpatnējais siltuma patēriņš testēšanas standam apkures sezonā  $E_{\theta}=131$  kWh/m<sup>2</sup>.

Neraugoties uz to, ka projektētās siltumcaurlaidības vērtības visu stendu ārējo konstrukcijām bija vienādas, jau pirmajā 2 mēnešu monitoringa periodā tika konstatētas nozīmīgas energopatēriņa atšķirības. Te jāņem vērā, ka pirmajā gadā notiek mitro konstrukciju žūšanas process, kurš dažādiem materiāliem noris ar atšķirīgu ātrumu, kā arī tas, ka sauso koka konstrukciju mitrums var arī pieaugt. Līdzšinējie mērījumu rezultāti parāda, ka materiālu masas un siltumizolācijas apjoma iespaids uz energopatēriņu, salīdzinājumā ar citiem faktoriem, nav ievērojams. Arī tabulas 9.5 dati uzskatāmi parāda, ka korelācija starp būvkonstrukciju masu un energopatēriņu nav konstatējama, bet ir virkne citu nozīmīgu faktoru, kas ietekmē konstrukciju siltuma caurlaidību:

1. Ražotāju deklarētās smago mūra materiālu (gāzbetona un keramikas bloku) siltumvadītspējas var atšķirties no to faktiskajām vērtībām.
2. Smago sienu materiālu mitrums, dobumu vai poru izmēri, īpatnējais svars var būt atšķirīgi no attiecīgajām laboratorijas paraugu īpašībām noteikšanas laikā.
  - 2.1. Gāzbetona blokiem (AER) būtiski atšķiras sienai izmantotā materiāla mitruma saturs (aptuveni 28- 30 masas procenti) no to paraugu mitruma satura, kurus laboratorijās izmanto siltumvadītspējas noteikšanai - pēc žāvēšanas  $105^{\circ}\text{C}$  temperatūrā un kondicionēšanas 24 stundas gāzbetona mitruma saturs sastāda aptuveni 2 - 4%. Slapiem paraugiem, izmantojot karstās plātes metodi, siltuma vadītspēju vispār nevar noteikt.
  - 2.2. Savukārt keramikas eksperimentālajiem blokiem (EXP) ir mazāks faktiskais dobumu tilpums nekā aprēķinos pieņemts un līdz ar to blokiem ir paaugstināts efektīvais

siltuma vadītspējas koeficients. Bez tam, būvniecības laikā dobumos iepildīto siltumizolācijas materiālu - polistirola granulas - samitrināja nokrišņi. Šie divi faktori būtiski palielināja EXP tipa keramikas bloku testa stenda energopatēriņu (it sevišķi pirmajā gadā).

Lai veiktu statistiski nozīmīgus secinājumus ir nepieciešams ilgāks laiks. Monitoringa termiņš pagaidām ir nepietiekams, lai izdarītu tālejošus un vispārinātus secinājumus.

Ja no apskata iepriekš minēto apstākļu dēļ izslēdz EXP konstrukciju, tad zināma korelācija ir vērojama starp siltumizolējošo materiālu (akmens vates) izmantošanas apjomu būvkonstrukcijā un siltuma zudumu samazinājumu - jo lielāka vates slāņa kubatūra, jo mazāks ir testa stenda siltuma patēriņš. Tas apstiprina zināmo, ka vates slāņa biezuma palielināšana garantēti pozitīvi ietekmē testa stendu energoefektivitāti.

Tabula 8.6. Testēšanas stendu dzīves cikla analīze, izmantojot datus no pirmajiem 9 ekspluatācijas mēnešiem.

Testēšanas stendu kopējās būvzmaksas, Ls		Sienu demontāžas izmaksas, Ls		Sienu materiālu utilizācijas izmaksas, nogādājot izgāztuves depozītā, Ls		Reciklēto sienu materiālu veidotie ieņēmumi, Ls		Stendu kumulatīvais energopatēriņš 20 gados, Ls		Stendu dzīves cikla izmaksu bilance, Ls	
PLY	11 535	LOG	228	LOG	0	LOG	3277	CER	2662	LOG	13 573
AER	12 422	PLY	277	PLY	21	EXP	101	LOG	2862	PLY	14 627
CER	13 209	AER	394	EXP	151	PLY	78	PLY	2873	AER	16 069
LOG	13 759	CER	482	AER	170	AER	0	EXP	3005	CER	16 548
EXP	13 878	EXP	573	CER	195	CER	0	AER	3084	EXP	17 506
Atšķirības*	20%		60%						8%		22%

\*- starp labāko un sliktāko rezultātu

Tabulā 8.6. sniegts testēšanas stendu dzīves cikla ekonomiskās analīzes kopsavilkums. Stendu būvzīdājumā iekļautas izmaksas par darbiem un materiāliem, kuri tika patērēti, lai izveidotu testa mājīņu sienu konstrukcijas. Lētākais un vismazāk darbietilpīgākais bija saplākšņa karkasa stenda PLY būvniecības process. Visvairāk darba un materiālu prasīja 51 cm biezo būvkeramikas sienu izbūves process un būvkeramikas dobumu papildīšana ar putupolistirola lodītēm. Atšķirības starp galējām vērtībām PLY – lētākā konstrukcija un EXP - dārgākā konstrukcija sastāda aptuveni 20%. Jānorāda, ka frēzbaļķu stenda (LOG) izbūves izmaksas ir ļoti tuvas EXP stenda izmaksām un arī stenda no tradicionālajiem 44 cm keramikas blokiem izmaksas ir tikai nedaudz mazākas.

Tabulas 8.6. kolonās „Sienu demontāžas izmaksas” un „Sienu materiālu utilizācijas izmaksas, nogādājot izgāztuves depozītā” ir ņemtas vērā darba un mehānismu izmaksas, lai

stendus demontētu un sagatavotu transportam teritorijas atbrīvošanai kā arī, ja tas nepieciešams, nogādātu atkritumu poligonā apglabāšanai. Atšķirības starp galējām izmaksu vērtībām demontāžai un utilizācijai – stends no frēzbaļķu konstrukcijas LOG un stends no eksperimentālajiem blokiem EXP - sastāda gandrīz 4 reizes. Visvieglāk ir demontēt frēzbaļķu konstrukciju, jo tās izbūves principi ir līdzīgi demontāžas principam un materiāli netiek sagrauti. Šādas mājas ir izjaucamas un saliekamas. Līdzīgi ir veidotas finiera māju stāvbūves karkasa konstrukcijas. Tomēr iekšsienas fibrolīta 70 mm biezuma klājums, kas ir apmests ar javu, būs jāsagrauj. Tas paaugstina PLY stendu demontāžas izmaksas. Visdārgāk ir nojaukt būvkeramikas mājas, jo materiāls ir visstiprākais un konstrukcija ir visnoturīgākā. Tā sagraušanai nepieciešama enerģija, mehānismi un laiks. Demontāžas laikā veidojas liels daudzums būvgružu, kurus nepieciešams utilizēt. Tas rada papildus izmaksas, kas atspoguļotas tabulas 8.6 attiecīgajā kolonā.

Kolonā „Reciklēto materiālu ieņēmumi” ir novērtētas iespējas izmantot būvkonstrukcijas vai to daļas atkārtoti. Arī te izteikts līderis pozitīvā nozīmē ir baļķu konstrukcija. Tos varēs izmantot otrreiz gan tiešā veidā, gan, ja nepieciešams, izmantot citu būvkonstrukciju izveidošanai. Tādēļ atgūstamajās izmaksās ir korekti ieskaitīt praktiski visu šo materiālu sākotnējo vērtību, jo pat potenciālos atlikumus var izmantot, piem., apkurei.

Savstarpēji salīdzinot testēšanas stendu energoizmaksas nosacītā 20 gadu periodā un būvniecības izmaksas, var secināt, ka pašreiz prognozējamais ietaupījums no kumulatīvajām energoizmaksām minētajā periodā nespēj segt dārgāko risinājumu papildus izmaksas (skat. tabulas 8.6 un 8.7). Ja salīdzinām ārsienu risinājumus CER un PLY tad, lai iegūtu 211 Ls kumulatīvo energoizmaksu ekonomiju, nākas būvizmaksās papildus patērēt 1674 Ls.

*Tabula 8.7. Kumulatīvo energoizmaksu un būvizmaksu pieaugums salīdzinājumā ar lētāko risinājuma variantu.*

<b>Testēšanas stendu risinājumu varianti</b>	<b>20 gadu perioda kumulatīvo energo- izmaksu pieaugums salīdzinājumā ar lētāko variantu</b>	<b>Būvizmaksu pieaugums salīdzinājumā ar lētāko variantu</b>
CER	0,00	1 674
AER	424	887
PLY	211	0,00
LOG	200	2 224
EXP	343	2 343

Summējot tabulas 8.6 pedējā kolonā visus faktoros ēkas konstrukciju izbūvē, demontāžā un reciklēšanā kopā ar ekspluatācijas (šinī gadījumā tikai energopatēriņa) izmaksām iegūstam dzīves cikla izmaksu novērtējumu. Šeit starpība starp labāko rezultātu frēzbaļķu stendam LOG un sliktāko rezultātu eksperimentālās būvkeramikas ar 51 cm bloku biezumu stendam EXP ir 22%. Tas nozīmē, ka gan ēkas materiālu, gan to ekspluatācijas ilgtspējas summārais rādītājs 20 gadu dzīves periodā ir par 22% sliktāks EXP būvkeramikas konstrukcijai, nekā tas ir frēzbaļķu stendam. Līdz ar to šādā vienkāršotā novērtējumā ilgtspējas sacensības līderis 20 gadu ilgā dzīves cikla

„distancē” ir frēzbalķu konstrukcija. Protams, ņemot ilgāku ekspluatācijas un salīdzināšanas periodu, kā arī iekļaujot izmaksās citus aspektus (skat. tab. 8.4) vai, piem., izvērtējot arī citas ēkas ekspluatācijas izmaksas, analīzes rezultāts var mainīties.

Pirmajā pētījumu gadā uzkrātais fakto materiāls liecina, ka norobežojošo konstrukciju fiziskās īpašības būtiski ietekmē mikroklimata parametrus telpās. Šo īpašību izmaiņas laikā spēj gan uzlabot, gan arī pasliktināt ēkas energoefektivitāti. Tādējādi laika faktoram šajā izvērtējumā ir būtiska loma un, novērtējot dzīves cikla izmaksas jau projektēšanas laikā, ir svarīgi ņemt vērā attiecīgās likumsakarības.

Standarta ISO 15686-1:2000 „Būvju un būvkonstrukciju pamatlīdzekļi – dzīves cikla plānošana: 1. Daļa, Pamatprincipi” (*Building and constructed assets – Service life planning Part 1 General Principles*) C pielikumā ir norādīti būtiskie ietekmes faktori, kuri izmaina ēkas konstrukciju īpašības laika gaitā:

1. Mehāniskā iedarbība ( sniega slodzes, transporta izraisītas vibrācijas u.c.).
2. Elektromagnētiskie viļņi (tajā skaitā ultravioletā un infrasarkanā starojuma izmaiņas).
3. Termiskā iedarbība (lokālā atdzišana vai pārkaršana).
4. Ķīmiskā iedarbība (gaisa mitrums, skābais lietus, gruntsūdens sāļi, bioloģisko vielu vai to sadalīšanās produktu substrāti, skābes, sāļi, šķīdinātāji).
5. Bioloģiskie aģenti (baktērijas, termīti, sēnītes, aļģes u.c.)

Testēšanas standu elementi ir izgatavoti no krasi atšķirīgiem materiāliem ar atšķirīgu noturību pret iepriekš uzskaitītajām ietekmēm. Piem., finiera konstrukcijas nav noturīgas pret kontaktvietu atvēršanas vibrāciju un mehānisku slodzi iedarbības dēļ. Masīvās koka konstrukcijās savienojumu vietās var rasties spraugas sakarā ar konstrukciju izmēra maiņu temperatūras un mitruma ietekmē. Tajā pašā laikā šīs konstrukcijas pirmajā monitoringa gadā nodrošināja mazus pārvades un konvektīvos siltuma zudumus. Šajās telpās gaiss bija sausāks salīdzinājumā ar telpām, kuru sienas veidotas no mūra elementiem – sevišķi gāzbetona. Savukārt mūra konstrukcijām žūstot var novērot, ka šo konstrukciju parametri pamazām uzlabojas un siltuma caurlaidība samazinās. Lai, ievērojot teikto, prognozētu testēšanas standu energopatēriņa izmaiņas tika izmantotas asimptotiskās eksponenciālas formulas, kuru koeficienti tika noteikti provizorisks un tiks precizēti vairāku gadu ilga monitoringa laikā. Sākotnējos energopatēriņa aprēķinos 20 gadu periodam, kas apkopoti tabulā 8.6, izmantotās atkarības un empīriskie koeficienti doti tabulā 8.8.

Empīriskie koeficienti tabulas 8.8 formulās tiks koriģēti saskaņā ar reālajām izmaiņām, tādējādi iegūstot matemātisku modeli konkrētas konstrukcijas energoefektivitātes parametru izmaiņām dzīves cikla laikā. Ja īpašības laikā uzlabojas, tad tiek izmantota atkarība sekojošā formā:

$$E(t) = A \cdot E_0 (Be^{-ct} + 1),$$

bet, ja īpašības pasliktinās, tad izmantotās atkarības forma ir atšķirīga:

$$E(t) = A \cdot E_0 (1 - Be^{-ct}).$$

Abos gadījumos  $A$ ,  $B$ ,  $E_0$  un  $c$  ir empīriskas konstantes.

Tabula 8.8. Testēšanas stendu energopatēriņa izmaiņu prognozes ekspluatācijas laikā.

<p style="text-align: center;"><b>AER testēšanas stends</b></p> <p>Palielinātu energopatēriņu sākumā nosaka mitrums, bet arī ilgākā laika periodā netiek sasniegta projektētā vērtība, jo ražotāja deklarētās vērtības jākoriģē.</p> $E(t) = 1,1E_0(0,7e^{-0,75t} + 1), \text{ kur } t - \text{ gados}$ <p>Sākuma patēriņš: <math>E(0) = 1,87E_0</math></p> <p>Pieņemts, ka patēriņš ar laiku iziet uz robežvērtību <math>1,1E_0</math>.</p>
<p style="text-align: center;"><b>EXP testēšanas stends</b></p> <p>Palielinātu energopatēriņu sākumā nosaka mitrums, bet arī laikā netiek sasniegta projektētā vērtība, jo faktiskās bloku īpašības neatbilst projektētajām</p> $E(t) = 1,1E_0(0,4e^{-0,75t} + 1), \text{ kur } t - \text{ gados}$ <p>Sākuma patēriņš: <math>E(0) = 1,54E_0</math></p> <p>Pieņemts, ka patēriņš ar laiku iziet uz robežvērtību <math>1,1E_0</math></p>
<p style="text-align: center;"><b>PLY un LOG testēšanas stendi</b></p> <p>Vieglo būvju hermetizācija ar laiku pasliktināsies, kas noteiks nekontrolētās gaisa apmaiņas un ar to saistīto siltuma zudumu pieaugumu.</p> $E(t) = 1,1E_0(1 - 0,09e^{-0,5t}), \text{ kur } t - \text{ gados}$ <p>Sākuma patēriņš: <math>E(0) = 0,99E_0</math></p> <p>Pieņemts, ka patēriņš ar laiku iziet uz robežvērtību <math>1,1E_0</math></p>
<p style="text-align: center;"><b>CER testēšanas stends</b></p> <p>Tiek prognozēts, ka energopatēriņš manāmi nemainīsies.</p> $E(t) = E_0 - \text{ tiek pieņemts, ka patēriņš laikā nemainās.}$

Eksperimenta tālākā norise ļaus jau pārliecinošāk spriest par dažādo pētāmo konstrukciju ilgtspējas parametriem un projekta pieņemumu atbilstību patiesībai. Tiks iegūts ļoti svarīgs faktu materiāls jau daudz precīzāku matemātisko modeļu izveidei un drošākai ēku gaidāmās energoefektivitātes un ilgtspējas parametru aprēķināšanai. Informācija par to, cik ātri palielināsies siltuma pretestības gāzbetona un eksperimentālajiem blokiem tiem laika gaitā žūstot, vai arī pasliktināsies norobežojošo koka konstrukciju noturība pret nekontrolējamu atmosfēras gaisa infiltrāciju, dos iespēju precizēt šos matemātiskos modeļus un tādējādi arī paredzēt konstrukciju īpašību izmaiņu laikā.

## 9. Noslēguma piezīmes

Labāk vienreiz redzēt, nekā desmit reiz dzirdēt! Šo teicienu gribas pārfrāzēt: labāk vienreiz izmēģināt, nekā desmit reiz pārrunāt. Šī vēlme tad arī bija pamats testēšanas standu izveidei, kur vienādos apstākļos var salīdzināt dažādu būvkonstruktīvo risinājumu un materiālu īpašības Latvijas klimatā. Īpaša vieta diskusijā vienmēr ir bijusi jautājumam, vai būvēt no smagām konstrukcijām – ķieģeļiem, blokiem, betona, vai izvēlēties vieglos materiālus – koku, saplāksni, karkasa konstrukcijas un piepildīt visu ar siltuma izolācijas materiālu. Vai un kā šī izvēle var ietekmēt ne tikai būves pilnā dzīves cikla izmaksas, tai skaitā izdevumus apkurei un dzesēšanai, bet arī kāda būs mūsu dzīves kvalitāte šajās ēkās, kuru veido gan termiskā komforta nosacījumi, gan arī mikrobioloģiskā vide ap mums un gaiss, kuru telpās ieelpojam? Kā bieži kompleksās situācijās arī te vienkāršas un universālas atbildes, kas derīga visos gadījumos: „Dari tā un tad būs ideāli!“ , nav!

### 9.1. Vai masivitāte ļaus ietaupīt?

Tēmu loku sašaurinot bieži nākas atgriezties pie jautājumiem par būvkonstrukciju termisko inerci un tās lomu energopatēriņā, jo ikdienā uzskatāmi redzam, ka sakarsēts akmens savu siltumu atdod lēni un tā siltuma ir „daudz”, mazāk „acīs krīt“, ka arī akmens sasildīšanai vajag lielu enerģijas daudzumu. Ar elektrisko ventilatora tipa sildītāju gaisu telpa var sasildīt ātri, bet, to izslēdzot, temperatūra ātri noslīdēs sākotnējā līmenī. Bet kāda ir būvkonstrukciju siltuma ietilpības loma gadījumā, kad telpā ceņšamies uzturēt uzdotu temperatūru? Daudzveidīgas apkures un dzesēšanas sistēmas ar automātisku regulēšanu šiem mērķiem plaši pieejamas un tiek iebūvētas ēkās ar dažādu lietojuma veidu. Atbilde, ko apliecina mērījumi, ir, ka šādā režīmā energopatēriņa atšķirības vieglu un smagu būvkonstrukciju ēkās pie vienādiem pārējiem nosacījumiem nepārsniedz 3 - 5% un ne vienmēr var precīzi atbildēt, cik lielā mērā to nosaka eksperimenta apstākļu novirzes no uzdotā režīma, cik lielā mērā šajās atšķirībās izpaužas mērījumu kļūdas un cik liela loma te patiesībā ir būvkonstrukciju siltuma inercei. Šī atziņa par ierobežoto termiskas inerces lomu iestrādāta arī jaunajā būvnormatīva LBN 002-01 redakcijā (2013.g. beigās projekta stadijā, skat. 4. pielikumu), kur netiek uzdotas atšķirīgas normatīvās un maksimālās pieļaujamās siltuma caurlaidības vērtības vieglām un smagām ārsienām, bet gan visām norobežojošajām konstrukcijām šīs vērtības būtiski samazinātas, ārsienām, piem., plānotajā jaunajā normatīva redakcijā dzīvojamām ēkām paredzēta siltuma caurlaidības vērtība  $U_{RN}=0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Stāstot par to, ka šī inerces ietekme noteiktos ēku ekspluatācijas apstākļos ir ļoti maza, nākas saskarties ar sašutumu: „Jūs noliedzat siltuma inerci un fizikas likumus kā tādus?” Nē, siltumfizika „strādā”! Vienīgi, nav cerību iegūt no uzsildītas norobežojošās konstrukcijas atpakaļ vairāk siltuma kā tai sākotnēji pievadīts. Pie kam daļa no šī siltuma tā kā tā tiks aizvadīta uz āru un nenonāks atpakaļ telpā. Ja telpā un ārā temperatūras nemainās, tad materiālu siltuma ietilpība (un tā saucamā masivitāte) vispār „izkrīt” no procesus aprakstošiem diferenciālvienādojumiem. Protams, temperatūra un apstākļi ārā (arī saules starojums) neatkarīgi no mūsu gribas mainās vienmēr, tomēr šīs izmaiņas laikā ir relatīvi lēnas. Par cik grādiem gaisa temperatūra mainās 5 – 10 minūtēs? Toties saules starojuma intensitāte gan var mainīties ļoti strauji – te mākonis sauli

aizsedz un pēc brīža vairs nē un intensīva starojuma enerģijas plūsma (pat līdz  $1 \text{ kW/m}^2$ ) caur logu sāk tieši sildīt grīdu, griestus un visu priekšmetus telpā. Ja to pieļaujam, tad, protams, vieglo konstrukciju būve ātri pārkaršs vai arī kondicionējot būs nepieciešamas lielas dzesēšanas iekārtu jaudas. Praksē, pēdējās desmitgadēs būvētās ēkās ar lielu stiklojuma laukumu tas vērojams bieži, arī te pat Rīgā Daugavas krastā...

Vai tādēļ ir pamats apgalvot, ka smago konstrukciju ēkām ir būtiskas priekšrocības? Drīzāk jārunā par neveiksmīgu projektēšanu, kad aizmirsts par mūsdienīgu stiklojumu ar mazu solāras enerģijas caurlaidību vai regulējamām ārējām žalūzijām, kas problēmu palīdz risināt radikāli un nav 21. gadsimta atklājums – slēgus pazina jau senie romieši un daudzveidīgi žalūzijas tipa logu aizvari tiek plaši lietoti Eiropā. Ventilējama fasāde arī pilnībā novērsīs kaut nelielu, tomēr esošo solārā starojuma ietekmi caur nekauspīdīgām konstrukcijām. Varbūt burvju vārds nav „masivitāte”, bet risinājums meklējams siltumfizikāli pamatotā projektēšanā un pārdomātos pasīvo metožu lietojumos?

## 9.2. Latvijā nav mūžamežu!

Eiropas Parlamenta direktīvas 2010/31/ES „Par ēku energoefektivitāti” iezīmētājā ceļā uz gandrīz nulles enerģijas ēkām no 2021. gadā vienlīdz svarīgs ir gan būvkonstrukciju raksturlielumu (piem., siltuma un solārā starojuma caurlaidība) aspekts, gan arī ēkas mikroklimatu nodrošinošo pasīvo un aktīvo sistēmu optimāla kombinācija. Šādām ēkām nepieciešamās norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības vērtības  $U \sim 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  praktiski nevar sasniegt ar viendabīgiem būvmateriāliem bez to vai citu siltuma izolācijas materiālu izmantošanas. Latvijā nav mežu, kur masveidā cirst baļķus ar 1 – 2 metru diametru! Māla ķieģeļu sienas biezums nebūs mazāks un, lai sasniegtu tik mazas siltuma caurlaidības vērtības, arī gāzbetona bloka biezums būs tuvs metram. Neatbildēts te vēl paliek jautājums: „Cik tas maksās?” un strupceļš tad jau ir redzams.

Izeja ir labi zināma - tie ir kompozīti būvkonstrukciju risinājumi. Vai tā ir materiālu ar dažādām īpašībām slāņu mērķtiecīga kombinācija, vai arī tie ir heterogēni materiāli ar pildījumu (piem., bloki ar dobumiem un paneļi ar to vai citu siltuma izolācijas materiālu pildījumu) – te izvēles iespējas ir plašas. Lai būtu lētāk un mazāk iespējamo kļūdu būvlaukumā, protams, gribētos, lai montāža pašā būvē ir maksimāli vienkārša un ātra, bet būvniecības elementi ir lielgabarīta un industriālos apstākļos izgatavoti. Cerīgi šādā aspektā šķiet gan lielgabarīta bloki ar siltumizolācijas materiāla pildījumu dobumos, gan ar siltuma izolācijas materiālu pildīti koka/plākšņu/saplākšņa vai uz tamlīdzīgu vietējo izejvielu bāzes izgatavoti industriālie paneļi. Ja gribam sienu izveidot no viendabīga materiāla un nodrošināt, ka tās biezums ir „saprātīgs” - nepārsniedz 0,6 m, ir jāatrod materiāls, kura siltuma vadītspēja nepārsniedz  $0,06 - 0,07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  un tai pat laikā tiek nodrošināta nepieciešamā mehāniskā nestspēja. Latvijā plaši izplatītie gāzbetona vai keramiskie bloki pašlaik šīm prasībām neatbilst un to attīstība samazinātas siltuma caurlaidības virzienā ir izaicinājums Latvijas uzņēmējiem – Eiropā (it īpaši Vācijā un Austrijā) risinājumi ir rasti un lielgabarīta mūra elementi ar  $U \leq 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$  tiek ražoti.

### 9.3. Sliktais ūdens

Zināms, ka Latvijas klimatam raksturīgs augsts relatīvais gaisa mitrums – 90% un vairāk ir tipiskas vērtības it īpaši pēdējos gada mēnešos – no oktobra līdz decembrim. Arī migla, lietus un sniegs... Telpās vēlams mitruma līmenis ir 40 – 60%, bet būtiska ir arī temperatūra. Pie viena un tā paša relatīvā mitruma un 20°C temperatūras telpas gaisā ir vairākas reizes lielāks absolūtais ūdens daudzums ( $\text{g/cm}^3$ ) nekā ārā pie -10°C temperatūras. Tādēļ aukstajā gada laikā ūdens tvaiki no telpas ļoti intensīvi cenšas „iespieties” būvkonstrukcijās, bet karstajās vasaras dienās process rit pretējā virzienā – tvaiki difundē no ārpuses uz iekšu.

Cik labi tas sekmējas ir atkarīgs no būvkonstrukciju materiālu tvaiku difūzijas caurlaidības. Tvaikiem no siltās zonas nonākot vēsākā vietā piesātinājuma līmenis aug un var veidoties kondensāts. Tādējādi mitruma līmenis būvkonstrukcijās sezonāli mainās un svarīgi, lai tas nesasniegtu konstrukciju ilgtspējai kritiskas vērtības. Nav noslēpums, ka koks šajā ziņā ir īpaši jūtīgs – šur un tur vēl laukos gadās redzēt vecās baļķu mājas, kas pret lietu no ārpuses padomju laikā nosegtas ar ruberoīdu, bet, to noņemot, atsedzas bēdīga trupējuša koka aina. Labu gribot, šoreiz, panākts negatīvs rezultāts – aizkavējot no telpas nākošo ūdens tvaiku izplūdi, tie uzkrājas un koks mitrumā pūst...

Dzelzsbetona paneļi nepūst, bet metinājuma vietas gan var rūsēt un, ūdenim sasalstot, graut betona struktūru, tomēr īpaši izteismīga aina vērojama tur, kur 90-tajos gados, lai kaut nedaudz paaugstinātu temperatūru telpās, iedzīvotāji no iekšpuses siltināja ēku gala sienas, uzliekot, piem., 5 cm siltuma izolācijas slāni un nosedzot to ar ģipškartonu. Prieki bieži izrādījās īsi un jau pēc 2 – 3 gadiem gar apdares apakšmalu sāka „līst ārā” zaļa vai pelēka „veģetācija” – mitrums aiz siltuma izolācijas slāņa radīja labvēlīgus apstākļus sēnīšu augšanai un pelējumu attīstībai un tie savukārt sekmēja alerģiskas un astmatiskas reakcijas telpu iemītniekiem.

Bet ar to mitruma „nedarbi” nebeidzas. Būvkonstrukcijas būvlaukumā no ražotnēm nonāk ar ļoti dažādu mitruma saturu. Labi izžāvētos koka izstrādājumos (baļķos, brusās, dēļos un tml.) mitruma saturs ir neliels. Māla keramikas blokos tiem izbraucot no tuneļkrāsns ūdens daudzums ir tuvs nullei. Savukārt produktos, kuri „dzimuši” autoklāvā (piem., gāzbetona bloki) ūdens daudzums ir liels. Pēc tam tos iepakoj plēvē, aizved uz būvlaukumu un uzceļ māju. Ieteikums varētu būt, pēc ēkas izbūves no gāzbetona atstāt to kādu gadu (vismaz vienu ziemu ar mazu absolūto ūdens daudzumu ārā gaisā) bez iekšējās un ārējās apdares, lai ūdens var iztvaikot un bloki izžūt, bet kurš to mūsdienās var atļauties? Attīstītājus spiež vēlme ātrāk atgūt investīcijas, celtniekiem saņemt norēķinu par pabeigtiem objektiem un, visbeidzot, cilvēki grib sākt apdzīvot ēkas pēc iespējas ātrāk. Šādu pusuzceltu gāzbetona, *fibo* un citu bloku ēku silueti Pierīgā, diemžēl, nav pārdomāta izvēle būvkonstrukciju žāvēšanai, bet gan tikai „biezajos” gados iesāktu un pēc tam izsīkušu finanšu plūsmu liecinieki...

### 9.4. Cik maksāsim un ko elposim...

Iebūvēti ēkā, ar iekšējo un ārējo apdari bloki žūst daudz lēnāk, jo ārējo slāņu tvaiku pretestība kavē ūdens izvadīšanu – līdz sezonāla līdzsvara mitruma stāvokļa sasniegšanai, kā norāda paši gāzbetona bloku ražotāji, var paiet vairāki gadi. Šai periodā iemītniekam situācija nav vienkārša:

- negaidīti izrādās, ka ēkas apsildei vajag 25 – 50% vairāk kurināmā (enerģijas) nekā sākotnēji projektēts, jo slapjo būvkonstrukciju siltuma caurlaidība ir būtiski lielāka nekā aprēķinātā. Zināms, ka ūdenim ir liela siltuma vadītspēja - 0,6 W/m·K, bet „solītā” gāzbetona bloku siltuma vadītspēja ir daudz mazāka - 0,09 W/m·K. Tātad iemītniekam naudas maks rēķinu apmaksai jāatver plātāk;
- lai žūšanu paātrinātu, vajag papildus mehāniski ventilēt. Tas nepieciešams arī, lai stūros pie grīdas un aiz mēbelēm nesāktu augt pelējuma sēnītes, jo tur ir mitrs un vēl pietiekami silts! Bet papildus ventilācija nozīmē arī papildus izmaksas un ne tikai ventilatora motora darbināšanai. Ventilējot ar silto telpas gaisu no telpas ziemeļiem tiek aizvadīts liels enerģijas daudzums, kas jākompensē, sasildot pievadīto auksto ārā gaisu - jo labāk siltumizolēta ēka, jo lielāku daļu tās siltuma bilancē veido ar gaisa apmaiņu saistītie siltuma zudumi. Šo siltuma daudzumu samazina, izmantojot rekuperāciju un pieskaņojot ventilācijas intensitāti telpu izmantošanas veidam un cilvēku skaitam tajā. Ja konstrukcijas jāžāvē, tad, iespējams; gaisa apmaiņu no 0,5 - 0,7 l/h nākas paaugstināt virs 1,0 l/h. Savukārt vasaru ventilācija vispār var nedot žūšanas efektu, jo arī ārā ir silts un mitrs;
- nav skaidri zināms, cik ilgi šāds paaugstināto izmaksu un pazeminātā komforta periods turpināsies un vai gāzbetona mitrums vispār samazināsies līdz ražotāja uzdotajām vērtībām. Iemesls tam varētu būt jau pieminētais mitrais Latvijas klimats, kurā būvkonstrukciju sezonālās mitruma satura līdzsvara vērtības higroskopiskos materiālos var izrādīties augstākas nekā prognozēts, un arī siltuma vadītspēja lielāka, nekā aprēķināts, lietojot standartos noteiktos siltuma vadītspējas labojumu koeficientus. Atbildi var sniegt ilgtermiņa mērījumi dabiskos apstākļos, ko tad arī standos LU Botāniskajā darzā veicam!

Interesants ir jautājums, kāda veida lielgabarīta bloki, ņemot vērā šīs papildus izmaksas, patērētājam beigu beigās izmaksās mazāk? Vai ražotājam nebūtu pienākums par to skaidri informēt patērētāju? Ne velti ES pamatnostādnes (tai skaitā standarts EN ISO 15686 *Buildings and constructed assets* ar daudzām daļām) vērstas uz ēku, pilnā dzīves cikla izmaksu novērtējumu no karjera līdz izgāztuvei, jeb „no dzimšanas līdz nāvei”. Protams, šī pilnā cikla izmaksu analīze ir ļoti sarežģīts daudzfaktoru aprēķins, bet skaidri prognozējamās papildus izmaksas dažādos ēkas ekspluatācijas periodos (arī sākuma periodā) katrā ziņā ir viena no būtiskām analīzes sastāvdaļām.

Ūdens būvkonstrukcijās - blokos, to dobumos un siltuma izolācijas materiālā var nonākt arī būvniecības procesā, ja materiāli netiek pareizi uzglabāti un izbūvētās konstrukcijas aizsargātas pret lietu. Ir gadījies vērot, kā novembra lietū celtnieki vaļēju minerālvati iestrādā siltināmās ārsienas konstrukcijā... Arī te jāreķinās ar ilgāku vai garāku žūšanas periodu atkarībā no ārējās apdares ūdens tvaiku caurlaidības.

Jāatceras, ka ir būvkonstrukcijas, kuru mitrums pārejas procesā pēc izbūves var mainīties arī pretējā virzienā, t.i., pieaugt. Piemērs tam ir kvalitatīvi izžāvēts balķis vai dēlis. Nonākot Latvijas klimatā un, protams, atkarībā no iebūves veida, tā mitruma saturs var pieaugt un izpausties gan izmēru izmaiņās – piebriešanā, gan arī nelielā to siltuma caurlaidības pieaugumā.

Šādus mitro būvkonstrukciju žūšanas procesus, lokālu sēnīšu augšanu un sauso konstrukciju nelielu mitruma pieaugumu, ka arī ar mitrumu saistītās konstrukciju siltuma caurlaidības izmaiņas vērojam arī pirmajā eksperimentālo testēšanas stendu ekspluatācijas gadā. Cik adekvāti ir uz sākotnējā perioda mērījumu rezultātu pamata veiktie novērtējumi un spriedumi varēsīm atbildēt pēc gadiem diviem trim.

## 9.5. Kurp iesim?

Jauns izaicinājums ir tā saucamās enerģētiski pozitīvas ēkas (*positive energy buildings*), kurās vidēji gada laikā tiek saražots vairāk enerģijas no atjaunojamiem resursiem nekā patērēts. Gan zemes, ūdens un gaisa siltums, izmantojot siltumsūkņus, gan saules un vēja enerģija var palīdzēt to sasniegt, bet arī pārvades siltuma zudumiem caur būvkonstrukcijām un zudumiem gaisa apmaiņas dēļ jābūt iespējami maziem. Tai pat laikā skābekļa pievade, CO<sub>2</sub> un mitruma izvade, kā arī termiskais komforts telpās ir jānodrošina. Tā kā aktīvās sildīšanas un it īpaši dzesēšanas metodes ir enerģētiski „rijīgas”, tad jāmeklē un jāattīsta pasīvi paņēmieni optimālu dzīves vides apstākļu nodrošināšanai. Kondicionētāja jaudas pieauguma nepieciešamību būvē, kur plaši izmantotas stiklotās konstrukcijas, piemēram, var mazināt ar automātiski regulējamām ārējām žalūzijām vai variohromiem pārklājumiem, kas ļauj regulēt saules starojuma enerģijas padevi telpā. Rekuperācijai palīdzēt var ventilācija caur zemi vai ūdeni. Dažādi dubulto fasāžu risinājumi ar regulējamu gaisa plūsmu spraugā pie āršienų virsmas var samazināt gan siltuma zudumus caur būvkonstrukcijām, gan mazināt telpai pievadāma gaisa sildīšanai vai dzesēšanai nepieciešamo enerģijas patēriņu. Efektīvs paņēmiens apstākļu stabilizēšanai telpā var būt fāzu maiņas materiālu lietojums. Šeit pieminētas tikai dažas iespējas, bet to daudzveidība ir liela un neviens no šiem risinājumiem faktiski nav „dzīvotspējīgs” bez automātiskas stāvokļa datu analīzes un sistēmu vadības.

Runājot par enerģijas ražošanu no atjaunojamiem resursiem, jāatzīst, ka vējš būs vērā ņemams resurss tikai piekrastē un atklātās vietās, bet pilsētvidē no sava privātā vēja rotora, visticamāk, nāksies atteikties vai labuma būs maz mazo vidējo vēja ātrumu dēļ. Solarā enerģija var būt nozīmīgs resurss pavasara mēnešos, kad maza mākoņainība un dienas gaišais laiks pieaug, bet gada pēdējā kvartālā tās ieguldījums gan ēkas siltuma bilancē, gan enerģijas ražošanā būs niecīgs. Nelaime tikai tā, ka vajadzība pēc enerģijas ēkā saulainajos aprīļa un maija mēnešos ir daudz mazāka nekā novembrī un decembrī, kad ārā temperatūras zemas. Tātad atklāts ir arī jautājums par enerģijas īstermiņa uzkrāšanu gan diennakts ciklā, gan ilgtermiņā – gada ciklā. Īsā termiņā tas var būt siltais ūdens, bet ilgākam periodam tā var būt elektrība ar autonomiem tā vai cita veida akumulatoriem vai arī elektroenerģijas padeve elektriskajā tīklā, ja pastāv atbilstoši valstiski regulējumi. Arī visa veida koksne kā kurināmais no savas ātraudzīgās plantācijas mājas tuvumā, visticamāk, var kļūt par realitāti tikai lauku apvidū. Acīm redzot jādomā par visu veidu enerģijas ražošanas iespēju optimālu kombināciju atbilstoši esošajiem apstākļiem un to izmantošanas automatizētu vadību.

Tā no enerģijas patēriņa un ražošanas nonākam arī pie trešā „vaļa” – viedo ēku tehnoloģijām (*smart sensors technologies*). Izmantojot daudzveidīgo sensoru sistēmas vadības centrālei (daturs, programmatūra un vadības slēgumi) piegādātos ēkas stāvokļa datus, ir

jānodrošina optimāls ēkas elementu un sistēmu vadības process. Vai tā ir ārējo žalūziju regulēšana un aizvēršana, vai pāreja no solārās enerģijas izmantošanas uz siltumsūkni, vai arī ventilācijas intensitātes piesaņošana ogļskābās gāzes un mitruma līmenim telpās - to nosaka energoefektivitātes un termiskā komforta optimālas sabalansēšanas prasības. Mūsdienīga miniatūru bezvadu sensoru sistēma, daļa no kuriem ir arī ārpus telpas vai ir iebūvēti būvkonstrukcijās ļauj vadības programmatūrai veikt ne tikai nepieciešamās regulēšanas darbības, bet var palīdzēt novērst arī novirzes no ekspluatācijas režīma „normas” un signalizēt par avārijas situācijām, kur steidzīgi nepieciešama cilvēka iejaukšanās. Šādas „gudro” sensoru sistēmas vairs nav ekskluzīvu būvju priekšrocība, jo miniaturizācija un mikroelektronikas komponentu masveida ražošana nodrošina pietiekami plašas iespējas arī „tautas klasē”. Protams bez „gudras” programmatūras, kas izmanto arī fizikālo procesu modelēšanas elementus, te neiztik.

Pašreiz šķiet, ka arī Latvijas klimatā enerģētiski pozitīvās viedās ēkas nav neaizsniedzams mērķis, tomēr veiksmīgai to attīstībai vajag gan soļus tehnoloģiju attīstībā, gan piedāvāto risinājumu praktiskos izmēģinājumus. Stendu šādu enerģētiski pozitīvo ēku būvkonstrukciju un sistēmu izmēģinājumiem un demonstrējumiem 2015.g. paredzēts izveidot arī LU Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorijā ERAF līdzfinansētā valsts nozīmes pētījumu centra projekta ietvaros. Tā ir nākotne, kura sākas šodien...

## 10. Literatūra

Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, *Data logger Almemo 2290-8. Operating instructions. V2.1.* Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany, 2003.

Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, *Data logger Almemo 2690-8. Operating instructions. VI.0.* Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany, 2004.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. *Thermal environmental conditions for human occupancy.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.

ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. *Ventilation for acceptable air quality.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.

ASTM C 1058. *Standard practice for selecting temperatures for evaluating and reporting thermal properties of thermal insulation.* ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.01, 2003.

ASTM C 518. *Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow apparatus.* ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2004.

Bahvalov, N.S., Zhidkov, N.P., Kobel'kov, G.M. *Chislennye metody [Skaitliskās metodes].* Moskva: Binom, 2003, lpp. 336-341.

Batchelor, G.K. *An introduction to fluid dynamics.* London: Cambridge University Press, 2000. 28.-36., lpp. 141-150.

Belindževa-Korkla, O. *Norobežojšo konstrukciju siltumtehnikie aprēķini. Metodiskie norādījumi LBN 002-01 izmantošanai.* Rīga: RTU, 2002.

Berkeley lab. *Window5 User manual. For analyzing window thermal performance. A PC program.* USA, Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.

BPIE. *Europe's building under the microscope. A country by country review of the energy performance of buildings.* Brussels: Building Performance Institute Europe (BPIE), 2011. 84. lpp.

Butkus, J., Vladišauskas, A., Jakevičius, L. The use of ultrasound for investigation of glazing units. *Ultragarsas*, 2004, Vol. 2, No.51, lpp. 7-12.

Curcija, D. Trends and developments in window testing methods. In: *International Workshop „Window Modernization in the Baltic Nations: Problems and Opportunities”, April 2000.* Lithuania, Vilnius, 2000. 228. lpp.

Čertoks, S. *Būvmateriāli ar zemu siltumvadāmību un to pielietošanas nosacījumi būvniecībā: Bakalaura darbs.* Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 1999.

DIN 4108-7. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie – Beispiele.* Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2001.

DIN 52619-1. *Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstands und Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern. Messung an der Gesamtkonstruktion.* Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1982.

DIN EN 1098. *Verfahren für die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Mehrfachverglasungen. Verfahren mit kalibriertem und geschütztem Heizkasten.* Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1993.

DIN EN 674. *Meßverfahren zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Mehrfachverglasungen, Verfahren mit geschützter Heizplatte.* Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2011.

DIN EN 832. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Berechnung des Heizenergiebedarfs. Wohngebäude.* Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2003.

DIN V 18599. *Energy efficiency of buildings – calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting.* Deutsche Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2007.

Doran, S.. *Field Investigations of the Thermal Performance of Construction Elements as Built: BRE Client Report No. 78132.* East Kilbride, Glasgow: BRE.

J. Džeriņš, I. Dimdiņa, S. Gendelis, A. Jakovičs. HeatMod6 – Web-Based Application for Building Heat Balance Calculation. Proceedings of the 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC - CLIMA 2013 "Energy efficient, smart and healthy buildings", Prague, Czech Republic, June 16–19, 2013.

EU Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Communities*, L 153, lpp. 13–35, 2010.

Gendelis, A. Jakovičs. Heat transfer measurements in non-stationary conditions for building structures. 14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), 22-24 June, 2005, Budapest, Hungary, p. 69 (CD – 6 p.)

Hagentoft, C.-E. *Introduction to building physics.* Lund, Sweden: Studentlitteratur AB. 2003. 44.-45., lpp. 71.-85.

Hohmann, R., Setzer, M. J., Wehling, M.. *Bauphysikalische Formeln und Tabellen: Wärmeschutz - Feuchteschutz - Schallschutz.* Germany, Bücher Werner Verlag, 2004.

Hukseflux Thermal Sensors *Hukseflux thermal sensors application and specification of heat flux sensors.* Pieejams: <http://www.hukseflux.com/heat%20flux/applic&spec.pdf> [aplūkots: 24.04.2012].

Incropera, F.P., DeWitt, D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer, 5th Edition.* New York: John Wiley & Sons. 2002, lpp. 51-72, 331-334, 355, 367, 540-542, 712-724, 746-750.

Interpane Glas Industrie AG. *Gestalten mit Glas. 6. Auflage.* Offsetdruck Hillebrand, Germany: Beverungen, 2002.

ISO 6781. *Thermal insulation. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method.* International Standard, 1983.

ISO 9869. *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.* International Organization for Standardization, 1994.

ISO 9972. *Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method.* International Standard, 2006.

Jakovičs, A., Banga, A. Kad siltums kļūst redzams. *Zvaigžņotā debess*, 1997, Nr. 2, lpp. 17-22.

Jakovičs, A., Gendelis, S., Treimanis, M. *Tipveida ēku siltuma zudumu un apkures siltuma patēriņa analīze: Projekta noslēguma atskaite*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2003-2004.

Jakovičs, A., Jēkabsons, N., Gendelis, S. *Hansabankas centrālās ēkas stikloto virsmu Saules enerģijas un siltuma caurlaidības ar un bez speciālajām plēvēm un termoklimatisko apstākļu attiecīgajās telpās izvērtējums: Atskaite un slēdziens*. Rīga: Latvijas Universitāte, 2006.

Jakovics, A., Jekabsons, N., Mühlbauer, A., Trümmann, H. Bestimmung des effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauelementen unter praxisnahen Bedingungen. *Elektrowärme international*, A2, 1997, lpp. 77-83.

Jakovics, A., Trümmann, H., Banga, A., Mühlbauer, A. Einsatz der Gebäudethermographie zur Diagnostik der Wärmedämmung an osteuropäischen Hochbauten. *Elektrowärme international*, A3, 1998, lpp. 93-100.

Javaitis, I., Ērglis, K., Jakovičs, A. Determination of heat conductivity of materials by the guarded hot plate method. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2005, Nr.4, lpp. 29-39.

King, E., N. *Field investigations of the thermal performance of construction elements as built*. BRE Client Report, No. 78132, Glasgow: Building Establishment Ltd., 2000. 93. lpp.

Krievāns, Z. *Siltuma caurlaidības koeficienta vērtības noteikšana, izmantojot eksperimenta un matemātiskās modelēšanas rezultātus: Maģistra darbs*. Rīga: Latvijas Universitāte, 2000.

Landau, L.D., Lifšic, E.M. *Gidrodinamika [Hidrodinamika]*. Moskva: Nauka, 1986. lpp. 71-77.

LBN 002-01. *Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika*. Latvijas būvnormatīvs. 2001. Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?id=56049> [aplūkots: 30.09.2012.].

LBN 231-03. *Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija*. 2003. Pieejams: <http://likumi.lv/doc.php?id=79290>.

LBN 211-08. *Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami*. Latvijas Būvnormatīvs. 2008. Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?id=187528> [aplūkots: 28.08.2012.].

Leonachescu, N., Rodan, G., Boian, F., Rodan, P. Physics of thermographical measurements in building industry. *14th International THERMO Conference, June 24-25*. Hungary: Budapest, 2005, CD.

Lienhardt IV, J. H., Lienhardt V, J. H. *A heat transfer textbook. 3<sup>rd</sup> Edition*. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2003. lpp. 64.-67.

LVS EN 13187. *Ēku termiskā efektivitāte - Kvalitatīva termisko neregularitāšu noteikšana ēkas norobežojošās konstrukcijās - Infrasarkanā starojuma metode*, 2002.

LVS EN 1279-3. *Būvniecības stikls. Stikla paketes. 3. Daļa: Ilglaicīgā testa metode un prasības gāzes zudumu koeficientam un gāzes koncentrācijas pielaidēm*. Latvijas Valsts Standarts, 2003.

LVS EN 1745. *Mūris un mūra elementi. Siltumtehnikas aprēķina vērtību noteikšanas metodes*. Latvijas Valsts Standarts, 2003.

LVS EN 12412-2. *Logu, durvju un slēgu termiskās īpašības. Siltumvadītspējas noteikšana ar karstās kastes metodi*. Latvijas Valsts standarts, 2003.

LVS EN 15251. *Telpu mikroklimata (gaisa kvalitātes, temperatūras režīma, apgaismojuma un akustikas) parametri ēku projektēšanai un to energoefektivitātes novērtēšana*. Latvijas Valsts standarts, 2007.

LVS EN 674. *Stikls būvniecībā. Siltuma caurlaidības noteikšana (U lielums). Aizsargātas karstas plāksnes metode*, 2011.

LVS EN 13829. *Ēku termiskā efektivitāte - Ēku gaisa caurlaidības noteikšana - Piespiedu ventilācijas metode*. Latvijas Valsts standarts, 2013.

LVS EN ISO 6946. *Ēku būvkomponenti un būvelementi. Siltumpretestības un siltumapmaiņas koeficients. Aprēķināšanas metodika*. Latvijas Valsts Standarts, 2009.

LVS EN ISO 7730. *Siltuma vides ergonomika. Termālā komforta analītiska noteikšana un interpretācija, izmantojot paredzamā vidējā balsojuma (PMV) un paredzamā neapmierināto personu procenta (PPD) indeksu kalkulāciju un lokālā termālā komforta kritērijus*. Latvijas Valsts standarts, 2006.

LVS EN ISO 8990. *Siltumizolācija. Stacionāru siltumpārvades raksturlielumu noteikšana. Kalibrētas un norobežotas karstās kastes metode*. Latvijas Valsts Standarts, 2007.

LVS EN ISO 12567-1. *Logu un durvju termiskā efektivitāte. Siltumcaurlaidības noteikšana ar termokameras metodi. 1. daļa: Gatavi logi un durvis*. Latvijas Valsts standarts, 2010.

LVS EN ISO 12569. *Ēku siltumizolācija. Gaisa apmaiņas noteikšana ēkās. Iezīmētās gāzes izklīdināšanas metode*. Latvijas Valsts standarts, 2013.

LVS EN ISO 13370. *Ēku siltumtehnikās īpašības. Siltuma zudumi caur zemi. Aprēķināšanas metodika*. Latvijas Valsts standarts, 2013.

LVS EN ISO 13790. *Ēku energoefektivitāte. Telpu apsildīšanas un dzesēšanas energopatēriņa rēķināšana*. Latvijas Valsts standarts, 2009.

LVS ISO 8302. *Siltuma izolācija. Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā. Norobežotās karstās plāksnes ierīce*. Latvijas Valsts Standarts, 2001.

LVS ISO 8301 *Siltuma izolācija - Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā - Siltuma plūsmas mērīšanas ierīce*, 2001

McMullan, R. *Environmental science in building*. 5th Edition. New York: Palgrave Macmillan, 2002. lpp. 94.-98.

Ministru kabineta (MK) 2013.g. noteikumi Nr.348. *Ēkas energoefektivitātes aprēķina metode*. Pieejams: <http://likumi.lv/doc.php?id=258128> [aplūkots: 10.12.2013.].

Nielsen, T. R., Duer, K., Svendsen, S. Energy performance of glazing and windows. *Solar Energy*, 2000, Vol. 69, No. 1-6, lpp. 137-143.

PAIC. *DataProc v. 2.1. Siltuma caurlaidības koeficienta aprēķins. Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2002.

PAIC. *UMeas v. 2.1. Siltuma caurlaidības noteikšana termokamerā. Lietotāja rokasgrāmata*. Rīga: Procesu analīzes un izpētes centrs, 2003.

Pavlik, Z., Pavlík, J., Jiříčková, M., Černý, R. System for testing the hygrothermal performance of multi-layered building envelopes. *Journal of Building Physics*, 2002 vol. 25 no. 3, lpp. 239-249.

Poussard, E., Peuportier, B., Grepmeier, K., Meersseman, X., Trim, M., Nagy, Z. *Guide for a building energy label*. European Actions for Renewable Energies (PREDAC), 2003. Pieejams: [www.cler.org/predac](http://www.cler.org/predac) [aplūkots: 17.09.2012].

Rose, J., Svedsen, S. Validating numerical calculations against guarded hot box measurements. *Nordic Journal of Building Physics*, 2004, Vol.4. Pieejams: [http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art\\_0204.pdf](http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art_0204.pdf) [aplūkots 27.09.2012].

Schmidt, D., Maas, A., Hauser, G. Experimental and theoretical case study on cross ventilation. *Nordic Journal of Building Physics*, 1999, Vol.2. Pieejams: [http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art\\_0199.pdf](http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art_0199.pdf) [aplūkots 27.09.2012].

SIA 380/1. *Thermal energy in buildings. Swiss Standard*. Swiss Society of Engineers and Architects, 2007.

Svaic, S., Boras, I., Susa, M. The estimation of the state of building using infrared thermography and numerical method. In: *14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry THERMO*. Hungary: Budapest, 2005, CD.

The Energy Conservatory. (2012) *Minneapolis Blower Door. Operation manual for Model 3 and Model 4 Systems*. Pieejams: [http://www.energyconservatory.com/sites/default/files/documents/mod\\_3-4\\_dg700\\_-\\_new\\_flow\\_rings\\_-\\_cr\\_-\\_tpt\\_no\\_fr\\_switch\\_manual\\_ce\\_0.pdf](http://www.energyconservatory.com/sites/default/files/documents/mod_3-4_dg700_-_new_flow_rings_-_cr_-_tpt_no_fr_switch_manual_ce_0.pdf) [aplūkots: 19.09.2012].

Timuhins, A., Gendelis, S., Jakovics, A. Experimental estimation of thermophysical properties of materials. In: *Proceedings of the 4th International Scientific Colloquium "Modelling for Material Processing"*. Rīga, 2006, lpp. 227-232.

Vollmer, M., Mollmann, K.-P., *Infrared Thermal Imaging*. Rheberrchtlich geschutztes Material, 2010.

## 11. Publikācijas

1. A. Jakovics, N. Jekabsons, A. Mühlbauer, H. Trümmann. *Bestimmung des effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauelementen unter praxisnahen Bedingungen // Elektrowärme international*. - 1997, Nr. A2, S. 77 - 83.
2. A. Jakovics, N. Jekabsons, J. Virbulis. *Determination of the effective heat transfer coefficient in the elements of existing buildings // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. - 1997, Nr. 2, pp. 71 - 83.
3. A. Jakovics, A. Banga. *When warmth becomes seen // The starry sky*. - 1997, Vol. 156, pp. 17 - 22, 40.
4. A. Jakovics, H. Trümmann, A. Banga, A. Mühlbauer. *Einsatz der Gebäude – thermographie zur Diagnostik der Wärmedämmung an osteuropäischen Hochbauten. // Elektrowärme international A*. - 1998, Nr. 3, S. 93-102.
5. A. Jakovics, S. Gendelis, H. Trümmann, J. Virbulis. *Combined applications of thermography, heat transfer measurement and heat consumption modelling in the reconstruction of buildings // Modelling of material processing*. - Rīga, 1999, pp. 158 - 167.
6. A. Jakovics, L. Šnīdere, S. Gendelis, V. Krūmiņš. *Standardised measurement of heat transfer coefficient of finished building structures in the heat chamber // Modelling of material processing*. - Rīga, 1999, pp. 168 - 173.
7. A. Jakovics, S. Gendelis, Z. Krievāns. *Determination of the heat transfer coefficient of construction elements for existing buildings // Progress in Engineering Heat Transfer*. - Gdansk, 1999, pp. 145 - 152.
8. A. Jakovics, L. Šnīdere, S. Gendelis. *Bestimmung des Wärmedurchgangs-koeffizienten von Bauelementen in existierenden Gebäuden und in der Thermokammer // Maschinenbau im Informationszeitalter*. - Ilmenau, 1999, S. 239 - 243.
9. A. Jakovičs, J. Ozoliņš, V. Melnstrazds. *Siltums mūsu mājokļos, jeb ko lāpšim, kā šūsim jaunu? // Būvēt*. - 2000, Nr. 4, lpp. 58 - 65.
10. A. Jakovičs, V. Krūmiņš, A. Banga. *Acis mūsu pilsētas sejā, jeb vai logi ir tikai skaistumam? // Būvēt*. - 2000, Nr. 5, lpp. 38 - 43.
11. A. Jakovičs, J. Ozoliņš, V. Krūmiņš. *Logi ne tikai skaistumam, jeb par ko maksāsim XXI gadsimtā? // Logi un durvis*. - 2000, Nr. 1, lpp. 41 - 49.
12. A. Jakovičs, L. Šnīdere, V. Krūmiņš, S. Gendelis. *Gatavo būvuzstrādājumu siltuma caurlaidības testēšanas iespējas Latvijā // Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika*. - Rīga, 2000, lpp. 16.1 - 16.9.
13. A. Jakovičs, S. Gendelis, Z. Krievāns. *Būvkonstrukciju siltuma caurlaidības noteikšana reālos ēku ekspluatācijas apstākļos. // Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika* - Rīga, 2000, lpp. 12.1 - 12.9.
14. A. Jakovičs, S. Gendelis, H. Trimmans. *Ēku siltuma zudumu un apkures siltuma patēriņa modelēšana // Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika* - Rīga, 2000, lpp. 24.1 - 24.15.

15. A. Jakovičs, S. Gendelis, Z. Krievāns. *Ēku siltuma zudumu un apkures vajadzības datormodelēšana* // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences - 2000, Nr 3, lpp. 3 – 18.
16. A. Jakovics, S. Gendels, H. Truemmann. *Analysis of heat losses from typical buildings in Riga* // Modelling for saving resources – Riga, 2001, pp. 190-197.
17. A. Jakovics, S. Gendels, H. Truemmann. *Modelling of air fluxes and temperature distribution in heated rooms* // Modelling for saving resources – Riga, 2001, pp. 170-176.
18. A. Jakovics, S. Gendelis. *System of inspection of heat losses in structures of existing buildings in Latvia* // Requirements to energy consumption level in buildings of the Baltic region - Kaunas, 2001, pp. 105 – 114.
19. A. Jakovičs, S. Gendelis. *Būvkonstrukciju siltuma caurlaidības noteikšana reālos ēku ekspluatācijas apstākļos* // Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika II - Rīga, 2002, lpp. 9.1 - 9.10.
20. A. Jakovičs, H. Trimmans. *Ēku siltuma zudumu koeficienta aprēķins un apkures siltuma patēriņa modelēšana* // Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika II - Rīga, 2002, lpp. 11.1 - 11.8.
21. S. Gendelis, A. Jakovičs. *Ēku blīvējuma pakāpes mērījumi - zemspiediena un pārspiediena testi* // Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika II - Rīga, 2002, lpp. 16.1 - 16.4.
22. A. Jakovičs. *Būvkonstrukciju energoefektivitāte Latvijā – laikmetu griežos* // Energētika un automatizācija – 2002, Nr. 5, lpp. 26 – 30.
23. S. Gendels, A. Jakovics. *Numerical modeling of air flow and temperature distribution in heated rooms* // Latvian Journal of physics and technical sciences – 2003, Nr. 3, pp. 3 – 20.
24. S. Gendels, A. Jakovics. *Application of mathematical models in analysis of heat losses in the buildings* // Environment, technology and resources - Rēzekne, 2003, pp. 347 – 352.
25. S. Gendelis, A. Jakovics. *Complex analysis of heat losses for buildings* // Enabling environment for society wellbeing – Rēzekne, 2004, pp. 76 – 83.
26. S. Gendelis, A. Jakovičs. *Ēku siltuma zudumu kompleksā analīze* // Energētika un automatizācija – 2004, Nr. 1, lpp. 42 – 46.
27. S. Gendelis, A. Jakovics. *Numerical modelling of hydraulic resistance in pipes of various geometry* // Latvian journal of physics and technical sciences – 2004, Nr. 4, pp. 13 – 27.
28. S. Gendelis, A. Jakovičs, I. Javaitis, K. Ērglis, K. Repsons. *Modelling of heat transfer, temperature and humidity distribution in building structures* // Proceedings of international scientific conference “Civil engineering’05” – Jelgava, 2005, pp. 156 – 164.
29. I. Javaitis, K. Ērglis, A. Jakovičs. *Determination of heat conductivity of materials by guarded hot plate method* // Proceedings of international scientific conference “Civil engineering’05” – Jelgava, 2005, p. 174 - 180.
30. S. Gendelis, A. Jakovics. *Application of mathematical models for the simulation of thermal comfort conditions in a living room* // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International scientific conference “Environment, technology, resources” – Rēzekne, 2005, pp. 11 – 18.
31. S. Gendelis, A. Jakovics. *Mathematical modelling of airflow and temperature distribution in living rooms* // 14-th International conference THERMO – Budapest, 2005, p. 68 (CD – 6 p.).

32. S. Gendelis, A. Jakovics. *Heat transfer measurements in non-stationary conditions for building structures* // 14-th International conference THERMO – Budapest, 2005, p. 69 (CD – 6 p.).
33. I. Javaitis, K. Erglis, A. Jakovics. *Determination of heat conductivity of materials by the guarded hot plate method* // Latvian Journal of physics and technical sciences – 2005, Nr. 4, pp. 29 – 39.
34. S. Gendelis, A. Jakovics. *Applications of 3D mathematical models for improvement of thermal comfort conditions in living rooms* // Latvian Journal of physics and technical sciences – 2005, Nr. 4, pp. 40 – 52.
35. A. Timuhins, S. Gendelis, A. Jakovics. *Experimental estimation of thermophysical properties of materials* // Modelling for material processing – Riga, 2006, p. 227 – 232.
36. S. Gendelis, A. Jakovics. *Mathematical modelling of living room with different types of heating* // Proceedings of the 4<sup>th</sup> WSEAS Int. conf. “Heat transfer, thermal engineering and environment” – Elounda, 2006, p. 248 - 253.
37. S. Gendelis, A. Jakovics. *Mathematical modelling of living room with different types of heating and pressure conditions* // WSEAS transactions on heat and mass transfer – Athens, Vol. 1, 2006, p. 229 – 236.
38. S. Gendelis, A. Jakovics. *Influence of solar radiation and ventilation conditions on heat balance and thermal comfort conditions in living-rooms* // Advances in heat transfer – St. Peterburg, 2007, vol. 2, pp. 634 - 643.
39. S. Gendelis, A. Jakovics. *Mathematical modelling of a living room with solar radiation source and different boundary conditions* // Proceedings of the WSEAS Int. conference – Arcachon, France, 2007, pp. 168 – 173.
40. D. Cepite, A. Jakovics. *Modelling of heat transfer through a material with the elliptic cavities* // Scientific Proceedings of RTU. Heat&Power and thermal physics – 2008, Vol. 1, pp. 75 - 84.
41. S. Gendelis, A. Jakovics. *Mathematical modelling of a living-room with a solar radiation source and different boundary conditions* // Scientific Proceedings of RTU. Heat&Power and thermal physics – 2008, Vol. 1, pp. 57 - 67.
42. D. Cepite, A. Jakovics. *Analysis of heat transfer in structure with regular arrangement of gas cavities* // Latvian Journal of physics and technical sciences – 2008, vol. 45, Nr. 4, pp. 14 - 24.
43. A. Jakovičs. *Vai energoauditoriem jābūt gaišrēģiem?* // Būvēt – 2008, Nr. 11, lpp. 50 – 53.
44. A. Jakovičs, S. Gendelis. *Energoefektīvā realitāte Latvijā* // Pārvaldnieks – 2010, Nr. 16, 20 – 23 lpp.
45. S. Gendelis, A. Jakovics. *Mathematical modeling of a living-room with a solar radiation source* // Topical issues of subsoil usage – St. Petersburg, 2010, pp. 186 – 188.
46. S. Gendelis, A. Jakovics. *Numerical modeling of airflow and temperature distribution in a living room with different heat exchange conditions* // Latvian journal of physics and technical sciences – 2010, Nr. 4, pp. 27 – 43.

47. J. Grečenkovs, A. Jakovics, S. Gendelis. *3D numerical analysis of heat exchange in building structures with cavities* // Modelling for material processing – Rīga, Latvia, 2010, pp. 163 - 168.
48. J. Grečenkovs, A. Jakovich, S. Gendelis. *3D numerical analysis of heat exchange in building structures with cavities* // Latvian Journal of physics and technical sciences – 2011, vol. 48, Nr. 1, pp. 3 - 12.
49. S. Gendelis, A. Jakovičs, J. Kļaviņš. *Mathematical modelling of heat balance and comfort conditions in a living-room with radiation source* // Baltic Heat Transfer conference – Tampere, August 24 – 26, 2011, pp. 36 – 37.
50. A. Jakovičs, S. Gendelis, I. Dimdiņa, J. Džeriņš. *Metodiskais palīgmateriāls energoaudita veikšanai* (EM pasūtījums Nr. EM 20111/47/ERAF) - Rīga, PAIC, 114 lpp.
51. J. Grečenkovs, A. Jakovičs, S. Čertoks. *Mathematical modelling for determination of heat transfer properties of building materials* // Baltic Heat Transfer conference – Tampere, August 24 – 26, 2011, pp. 34 - 35.
52. A. Jakovičs, I. Dimdiņa. *Eksperimentāla būvrisinājumu testēšana* // Latvijas būvniecība – 2012, Nr. 3, lpp. 90.
53. J. Ratnieks, A. Jakovics, J. Klavins. *A numerical model for determination of the airborne sound reduction index of porous constructions* // Latvian journal of physics and technical sciences – 2012, Nr. 3, pp. 47 – 56.
54. A. Ozolins, A. Jakovics. *Heat and moisture transfer in the multi-layer walls: interaction and influence on the heat losses in the circumstances of changeable external temperature* // Latvian journal of physics and technical sciences – 2012, Nr. 6, p. 32 – 43.
55. S. Čertoks, S. Gendelis, A. Jakovičs, J. Kļaviņš. *Mathematical modelling of ceramic block heat transfer properties* // Advanced constructions 2012 – Kaunas, 2012, p. 90 – 97.
56. T. Dzenis, S. Gendelis, A. Jakovičs. *Research of composite constructions' impact on the energy efficiency of buildings* // Advanced constructions 2012 – Kaunas, 2012, p. 183 - 191.
57. S. Gendelis. *Ēkas siltumfizikālo procesu kompleksā analīze* // Promocijas darba doktora grāda iegūšanai fizikā kopsavilkums – Rīga, 2012, 52 lpp.
58. S. Gendelis. *Complex analysis of thermophysical processes in buildings* // Summary of doctoral thesis for the doctor degree in physics – Rīga, 2012, 54 pp.
59. J. Ratnieks, A. Jakovics, S. Gendelis. *Stationary heat transfer and airflow simulation for test polygon houses* // CYSENI – Kaunas, May 2013, pp. VI 382 – 389 (CD).
60. I. Dimdiņa, S. Gendelis, A. Jakovičs. *Eksperimentālo stendu energoefektivitātes un telpu mikroklimata monitoringa projekts* // Latvijas būvniecība – 2012, Nr. 6, lpp. 84 – 86.
61. I. Dimdiņa, A. Jakovics, S. Gendelis, J. Kļaviņš. *A testing ground for measuring influence of building envelope materials on energy efficiency and indoor environment* // Clima 2013 „Energy efficient, smart and healthy buildings” - Prague, June 2013, 10 p. (CD).
62. J. Dzerins, I. Dimdiņa, S. Gendelis, A. Jakovics. *HeatMod6 – Web-based application for building heat balance calculation.* // Clima 2013 „Energy efficient, smart and healthy buildings” - Prague, June 2013, 9 p. (CD).

63. S. Certoks, S. Gendelis, A. Jakovics, J. Klavins. *Mathematical modelling of heat transfer properties for perforated ceramic blocks* // Clima 2013 „Energy efficient, smart and healthy buildings” - Prague, June 2013, 10 p. (CD).
64. A. Ozolins, A. Jakovics, J. Ratnieks, S. Gendelis. *Numerical modelling of humidity and temperature conditions in buildings with different boundary structures* // Clima 2013 „Energy efficient, smart and healthy buildings” - Prague, June 2013, 10 p. (CD).
65. I. Dimdiņa, A. Jakovičs, S. Gendelis, J. Kļaviņš. *Testing of energy efficient building envelope materials in natural conditions* // World sustainable energy days – Austria, February 2013, 5 p. (CD).
66. S. Gendelis, A. Jakovičs, A. Nitijevskis, J. Ratnieks. *Comparison of different air tightness and air Exchange rate measurements in a very small test buildings* // Energy conservation Technologies for mitigation and adaptation in the built environment – Athens, September 2013, p. 142 – 143.
67. A. Ozolinsh, A. Jakovich. *Risks of condensate formation and mould growth in buildings under Latvian climate conditions* // Latvian journal of physics and technical sciences – 2013, Nr. 5, p. 32 – 43.
68. A. Ozolins, A. Jakovics. *Risks of mould growth in different building structures* // Innovative materials, structures and technologies – Riga, November 2013, p. 38.
69. A. Jakovičs, I. Dimdiņa, S. Gendelis. *Ārējo konstrukciju materiālu ietekme uz ēkas energoefektivitāti ekspluatācijas sākuma posmā* // Latvijas būvniecība – 2013, Nr. 6, lpp. 84 – 86.
70. M. Greitans, U. Grunde, A. Jakovics, S. Gendelis. *Web-based real-time data acquisition system as tool for energy efficiency monitoring* // 21-st Telecommunications forum (TELFOR) – Belgrade, November 2013, pp. 553 – 556.
71. <http://www.em.gov.lv/images/modules/items/EnAudTerminiMetodika.pdf>.
72. A. Jakovičs. *Kā būvmateriāli uzvedās dabā? 1. daļa* // Neatkarīgās Tukuma ziņas – 2013, lpp. 4.
73. A. Jakovičs. *Kā būvmateriāli uzvedās dabā? 2. daļa* // Neatkarīgās Tukuma ziņas – 2013, lpp. 4.
74. <http://www.pasyvusnamas.lt/kur-apsigauna-statytojai/>.

## Projekta partneri



ERAF līdzfinansēts pētnieciskais projekts

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

Nr. 2011/0003/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/041

(2011. – 2013.)



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Raksts avīzē „Neatkarīgās Tukuma ziņas” 1. daļa. Publicēts 06.06.2013

## Kā būvmateriāli uzvedas dabā? I

Pērn LU Botāniskajā dārzā tika uzcelti pieci namiņi – LU Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorijas testēšanas stendi. Universitātes speciālisti apņēmušies pārbaudīt Latvijā ražoto būvmateriālu un dažādu konstruktīvo risinājumu piemērotību Latvijas klimatam. Šomēnes ielānota pirmo pētījumu prezentācija, taču pirms šī pasākuma uz sarunu aicinājām laboratorijas un projekta vadītāju Andri Jakoviču.



### Mitruma samazina siltumpretestību

**Andris Jakovičs:** – Stāsts par eksperimentu ir tāds: parasti jau visus būvmateriālus pārbauda laboratorijas apstākļos, taču situācija dabā parasti atšķiras no rādītājiem laboratorijā. Iemesli kāpēc tā notiek, ir saprotami: viens no būtiskākajiem faktoriem ir mitrums – jo īpaši izvēloties tik porozu materiālu, kā gāzbetons. Arī šeit vienai no mājām ir gāzbetona sienas, kas ir ļoti pateicīgs materiāls mitruma uzsūkšanai un uzkrāšanai. Bloki, pirmkārt, jau no rūpnīcas atnāk ar lielu mitruma saturu. Proti, gāzbetona

ēkai pirmajā ekspluatācijas gadā energopatēriņš ir pat līdz divām reizēm lielāks, nekā normālā ekspluatācijas režīmā. Tas tādēļ, ka bloku porās uzkrājies mitrums un siltumcaurlaidība ir daudz lielāka. Gadu gaitā pakāpeniski žūstot – kaut kur trešajā gadā sāk normāli funkcionēt.

*– Tagad modē ātri uzcelt bloku māju un ārsienu siltināt ar putupolistirola plāksnēm, taču tādā gadījumā tiek kavēta mitruma iztvaikošana..?*

– Tieši tā. Tagad jau paši ražotāji neoficiāli iesaka uzcelt ēku un vienu sezonu atstāt neapmestu un nenosiltinātu. Lai mitrums tiktu ārā. Bet lielākā daļa jau tā nedara, jo grib māju ātrāk pabeigt. Un tas jau ir ekstrēmi – veicot siltināšanu no ārpuses ar putupolistirolu vai līdzīgu materiālu, kam ir slēgtās poras un mitrums ļoti slikti vai ļoti lēnām tiek cauri, telpās ilgi un dikti būs jācīnās ar mitrumu. Šādā situācijā atliek tikai ļoti intensīvi ventilēt telpu, taču ziemā tas nozīmē lielus enerģijas zudumus. Gāzbetona ēku apšūšanai daudz pateicīgāks būs jebkurš šķiedrveida materiāls – minerālvates, jo caur minerālvati mitrums iet gandrīz tikpat viegli, kā caur gaisu; tvaika pretestība ir ļoti maza – pat tad, ja noslēdzošais slānis, kā jebkurai siltumizolācijai, ir pretvēja barjera (speciāla plēve vai blīvāka siltumizolācijas plāksne, kas mitrumu laiž cauri, bet vēju aiztur).

*– Bet mitra minerālvate taču lielā mērā zaudē savas siltumizolējošās īpašības? Ne velti ražotāji vati piesūcina ar sveķiem, lai mazinātu mitruma absorbciju...?*

– Tur situācija tāda – visi šķiedrveida materiāli ir relatīvi mitruma caurlaidīgi, taču hidrofobija nozīmē to, ka šķiedras nepiesaista mitrumu. Piemēram, kokvilna mitrumā saplok vienā pikuci, caur kuru siltums ļoti viegli aizplūst, bet minerālvatēm mitruma caurlaidība ir ievērojami lielāka – gandrīz kā gaisam.

### Pelējums - nepareizas siltināšanas sekas

Mitrums būvkonstrukcijai ir kaitīgs divu iemeslu pēc: pirmkārt, mitrā vidē būtiski pieaug siltuma zudumi; otrs – daudzos gadījumos apdraud konstrukcijas ilgtspēju. Piemēram, šeit viena mājiņa ir no frēzbaļķiem ar akmens vates siltumizolāciju. Koks pret mitrumu ir ļoti jūtīgs – ilgstoši atrodoties apstākļos, kad uz virsmas kondensējas ūdens vai mitruma daudzums pārsniedz noteiktas

robežas, parādīsies pelēšana un sāksies pūšana. Agrāk padomju laikā guļbūvju mājas mēdza apsist ar ruberoīda papi – bija tāda mode, lai pasargātu sienas no nokrišņiem, taču rezultāts iznāca pilnīgi pretējs, jo ruberoīda slānis neļāva telpas mitrumam (siltais gaiss vienmēr ir mitrāks) iztvaikot ārpusē. Ziemā siltais gaiss difundēja līdz baļķu ārējai virsmai, kur temperatūra krietni zemāka, bet ārā netika un turpat kondensējās, bet baļķi puva... Tas ir tipiskais koka ēku risks. Betona vai gāzbetona paneļi nesāks pūt, bet koka konstrukcijas var sabrukt. Trešais faktors ir tas, kādā vidē mēs dzīvojam jeb termiskā komforta apstākļi telpā. Šo komfortu veido gan fizikālie faktori – temperatūra, gaisa mitrums, kaut kāds gaisa plūsmu ātrums un tā saucamā temperatūras asimetrija, ko var just birojos ar lieliem logiem – vienā logā spīd saule, bet no otras puses kondicionieris pūš vēju un vidējā temperatūra var būt laba, bet cilvēks telpā jūt izteiktu diskomfortu. Vēl ir arī ķīmiskie un bioloģiskie apstākļi – ķīmiskie saistās ar izgarojumiem no būvkonstrukcijām (nereti jaunbūvē pat ar degunu jūtam kaut kādas smakas, tomēr ķīmiskas vielas var iztvaikot arī bez smakas; tur var būt formaldehīdi no līmēto kokskaidu plāksnēm, benzoli un fenoli no dažādām krāsām, lakām, šķīdinātājiem utt.) un vispēdīgi – mikrobioloģiskais aspekts: nepareizi uzturētā vai mitrā ēkā, kur gaisa mitrums sasniedz 80%, sākas pelēšanas process – veidojas dažādas sēnītes. To piedzīvojuši daudzi, kas daudzdzīvokļu mājās mēģinājuši siltināt dzīvokli no iekšpuses. Parasti uzliek 5 cm biezu siltumizolācijas slāni, ko nosedz ar rīģipsi – siltāk ir, taču pēc diviem – četriem gadiem parādās pelējuma smaka un parasti sienas apakšā parādās pelējuma pleķi. Tas nozīmē, ka telpas pusē pirms siltumizolācija slāņa nav ielikta tvaika barjera un telpas mitrais gaiss, atduroties pret betona sienu, tur arī kondensējas un veido pelējumu. Šādi cilvēks savu dzīvojamo vidi sabojā totāli.

Ar to gribēju teikt, ka komforta aspekti ir vairāki – no vienas puses gribam siltāku māju, no otras – jārēķinās ar nevēlamiem blakusefektiem.

### **Uz būvi jāraugās kopumā**

Eiropas jaunā direktīvas par ēku energoefektivitāti paredz, ka no 2020. gada Eiropā būvēs tā saucamās teju «nulles energopatēriņa» ēkas.



### **– Kam šīs normas, ja cilvēki labi jūtas arī vēl pirms brīvvalsts laikā celtajās ēkās?**

– Tas, protams, ir ļoti sarežģīts jautājums. Tāpēc arī piebilde – gandrīz nulles energopatēriņa ēkām. Ja gribam mājā siltumu, tad siltuma zudumi būs neizbēgami, tāpēc ideja ir tāda, ka katra valsts atbilstoši saviem klimatiskajiem apstākļiem pati var normatīvajos dokumentos nedefinēt, kas tiks uzskatīts par gandrīz nulles energopatēriņa ēkām. Mūsu Ekonomikas ministrijas Būvniecības departamentam jau šī gada laikā jānedefinē, ko Latvijā sauksim par gandrīz nulles energopatēriņa ēkām.

Otrs – energopatēriņa samazināšana tiek panākta ne tikai ar siltināšanu, bet arī lietojot tā saucamos atjaunojamos energoresursus – tātad ne tikai jāveido biežāks siltumizolācijas slānis, bet telpu apsildei, dzesēšanai un ventilēšanai jāizmanto atjaunojamo resursu sistēmas; tikai tā var tuvoties nulles patēriņa bilanci. Uz būvi vairs nevar raudzīties, nodalot atsevišķi siltināšanu no apkures, ventilācijas, ūdensapgādes un citām sistēmām – objektam nepieciešama sistēmiskā pieeja; jāanalizē visi plusi un mīnusi kopumā. Tas arī bija viens no iemesliem standu veidošanai

Botāniskajā dārzā – lai būvkonstrukcijas vērtētu nevis standartizētos laboratorijas apstākļos, bet, kā Latvijas klimatā reālos apstākļos veidojas šī energoefektivitātes bilance...

### **Siltumsūkņi ļauj ietaupīt**

Nulles patēriņa aspektā mēs katru māju aprīkojam ar siltumsūkni – nosacīti atjaunojamo energoresursu. Tas gan ir gaisa siltumsūknis, kura efektivitāte zemās temperatūrās samazinās, taču optimālā darba režīmā uz katru patērēto 1 kW·h elektrības varam iegūt līdz 5,0 kW·h enerģijas; vienkāršoti salīdzinot, ja mājīnā ieliktu ventilatoru un radiatoru, tad elektrības patēriņš būtu 5 reizes lielāks. Protams, medaļai ir otra puse: ja temperatūra ārā nokrītas līdz  $-10^{\circ}\text{C}$ , tad siltumsūkņa efektivitāte krītas un ražotāju instrukcijā lasāms, ka viņi neko negarantē zem  $-10^{\circ}\text{C}$ ... Taču, kā pārliecinājāties, šajā temperatūrā siltumsūkņa efektivitāte vēl ir 2. Šoziem ar interesi gaidījām, kas tad būs vēl zemākā temperatūrā (atsevišķas dienās taču bija arī  $-20^{\circ}\text{C}$ ); domājām, ieliksīm elektriskos sildītājus un bargāko salu pārdzīvosim, tomēr siltumsūkņi nepievīla. Pirmkārt, neviena no piecām iekārtām neaizsala – nepārtrauca darboties un otrkārt, pat  $-20^{\circ}\text{C}$  temperatūrā siltumsūkņa atdeve bija virs 1 – tātad, lētāk nekā sildot ar elektrību... Funkcionalitāte bija nodrošināta. Ņemot vērā, ka Rīgā tik auksts laiks nav bieži, tad šādu agregātu var normāli lietot, tomēr uzskatu, ka zemes siltumsūknis būtu vēl efektīvāks.

***– Stāsta, ka aizvadītā ziema ar augstiem elektrības rēķiniem nepatīkami pārsteigusi ne vienu vien siltumsūkņa lietotāju...?***

– Mēs reizēm veicam ekspertīzi ne vien būvēm, bet arī apkures sistēmām un, kā piemēru, varu minēt kādu draudzes namu, kam ierīkoti pat divi zemes siltumsūkņa kontūri, bet gaidītā efektivitāte nav sasniegta... Bet stāsts ir tāds: tāpat kā visās lietās, arī būvniecībā dažādas sistēmas jāierīko atbilstoši tehniskajām prasībām un tas jā dara kvalitatīvi. Kādas ir visbiežāk pieļautās kļūdas: pirmkārt, kontūra caurules neierok pietiekami dziļi; otrkārt, precīzi jāzina grunts apstākļi, jo no tā lielā mērā atkarīga siltumsūkņa efektivitāte – vieglā un sausā augsnē siltumsūknis strādā slikti. Kontūra platība jāaprēķina adekvāti apsildāmai platībai un prognozētajiem siltuma zudumiem ēkā. Nevar vienkārši „čūskas” salikt vienu otrai līdzās un cerēt uz labu rezultātu – starp caurulēm jābūt noteiktai distancē un tās jāizvieto noteiktā platībā. Kompakti saliktam kontūram, kas no mazas platības ņem ārā lielu jaudu, efektivitāte nokrītas tuvu 1 – faktiski visu sildām ar elektrību. Ar to gribēju teikt, ka problēmas ir tajos gadījumos, kad nekvalitatīvi veikti projektēšanas un izbūves darbi.

### **Mehānismi nolietojas - arī siltumsūkņi**

Tomēr jāsaprot, ka nav tā, ka kaut kas rodas no nekā – par visu mēs maksājam. Protams, elektrības cenu nevaram ietekmēt, bet papildus jāaprēķina arī tehnisko apkopju izmaksas. Neviena sistēma ar kustīgām daļām – sūkņiem un tamlīdzīgi nestrādā mūžīgi; tai nepieciešama tehniskā apkope. Tāpat, lai arī zeme šķiet milzīga, tomēr tās enerģiju nevar ņemt bezgalīgi daudz un ilgi – pēc zināma laika jebkura siltumsūkņa efektivitāte samazinās... Pastāv enerģijas nezūdamības likums – ar kolektora starpniecību jūs izvelkat enerģiju no virsējā zemes slāņa un tas pamazām atdziest. Jūs to pamanāt, kad pavasarī virs zemē ieraktā kontūra nedaudz vēlāk uzdīgst zāle; dārza kultūrām nobīde var sasniegt pat divas – trīs nedēļas; cik izteikti un strauji tas notiek, atkal atkarīgs no tā, cik korekti sistēma ierīkota.

Trešā kļūda – siltumsūkņa kontūru ierīko labu gabaliņu no ēkas, bet arī siltumtrasēs ir neizbēgami siltuma zudumi. Šķiet aizrāvos, bet ar to gribēju teikt, ka nekas nav ideāls – visam ir savi plusi un mīnusi; tomēr siltumsūkņi ir ļoti pieņemama tehnoloģija, ja vien to saprātīgi uztaisa...

***– Ar stāstu par zemes saldēšanu pārsteidzāt – zemes taču ievērojami vairāk par caurulēm?***

– Tas notiek lēni, taču pēc gadiem 10 līdz 15 pamanīsiet zināmu efektivitātes kritumu un izmaiņas vidē; slikti izbūvētam siltumsūkņim vēl ātrāk – pēc gadiem pieciem... Šīs lietas ir pētītas un nav nekas jauns.

Intervēja un pierakstīja Vents Dubrovskis

### Raksts avīzē „Neatkarīgās Tukuma ziņas” 2. daļa. Publicēts 04.07.2013

#### Kā būvmateriāli uzvedas dabā? II

Turpinājums. Sākums 6. jūnijā

Pērn LU Botāniskajā dārzā tika uzcelti pieci namiņi – LU Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorijas testēšanas stendi. Universitātes speciālisti apņēmušies pārbaudīt Latvijā ražoto būvmateriālu un dažādu konstruktīvo risinājumu piemērotību Latvijas klimatam. Šomēnes iepļānota pirmo pētījumu prezentācija, taču pirms šī pasākuma uz sarunu aicinājām laboratorijas un projekta vadītāju **Andri Jakoviču**.



#### Pieci dažādi ”pīrāgi”

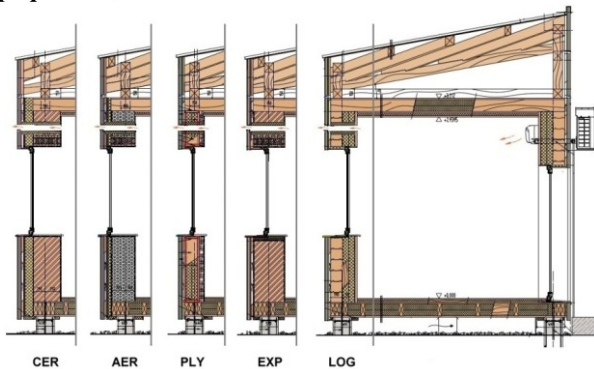
– *Pastāstiet vairāk par projektu Botāniskajā dārzā...*

**A. Jakovičs:**

– Šeit ir iecerēts pārbaudīt dažādus būvkonstruktīvos risinājumus Latvijas klimatā un, lai varētu rezultātus salīdzināt, tika izveidoti pieci vienāda izmēra testēšanas stendi – no dažādiem materiāliem būvēti namiņi. Logi tiem vienā pusē un vienādi telpu iekšējie tilpumi, bet nu klimats, kāds nu mums Latvijā ir. Namiņu sienas ir taisītas no dažādiem būvmateriāliem – atšķirīgiem

«pīrāgiem», bet ar vienu nosacījumu, ka būvmateriālu siltumcaurlaidība visos gadījumos ir vienāda. Teorētiski, ja visos stendos iekštelpās uzturam vienādu temperatūru – teiksim, +18° C, tad vajadzētu būt vienādam energopatēriņam. Bet jau pirmie mēneši, kad veicām salīdzinošos mērījumus, ļoti skaidri parādīja atšķirības būvmateriālu uzvedībā.

– *Pēc kā vadījāties, izvēloties materiālus sienu pildījumam – tie ir Latvijā vairāk pieprasītie, vai kā?*



– Bija trīs pamatdomas. Pirmā – ir tradicionāli materiāli, kas iecienīti Latvijas būvnieku vidū; piemēram, gāzbetona un liulgabarīta keramiskie bloki – «Keraterm», kā arī minerālvate; otra doma – maksimāli izmantot vietējos materiālus, lai atbalstītu vietējos ražotājus, tāpēc izvēlējamies arī koku, finieri, fibrolītu, kokskaidu vati un dažādus apmetumus. Trešais aspekts – gribējām izmēģināt arī dažus inovatīvus risinājumus; piemēram, frēzbaļķu būvi.

Lai būtu vienādi testēšanas apstākļi, visām ēkām ierīkota ventilējama fasāde (zem ārējās apdares ir ventilējama fasāde, pa kuru staigā gaiss). Ar frēzbaļķu būvi nianse bija tāda, ka frēzbaļķu sienu no iekšpuses siltinājām ar minerālvati, bet telpas pusē veidojām 40 mm biezu frēzbaļķu imitācijas apdari. Cilvēkam ir sajūta, ka viņš dzīvo koka guļbūves mājā, lai gan faktiski tā ir siltināta ar vati. Lai šādu siltumizolāciju panāktu tikai ar baļķiem vien, jāatzīst – Latvijā tādu dimensiju koki vairs

neaug... Kur šeit inovatīvais risinājums? Tas saistīts ar mitruma izvadīšanu, jo sienas «pīrāgs» jāuztaisa tāds un tvaika barjeras jāieliek tā, lai ilgstošā ekspluatācijā guļbaļķu sienas iekšējā virsma – tā, kas minerālvates pusē, nekļūtu mitra un nesāktu pūt. Tā ir viena no «rozīnītēm», ko gribam papētīt – vai šāda konstrukcija Latvijas klimatā sevi attaisnos...

Otrs jaunums – finiera paneļu sienas ar kokskaidu vates pildījumu. Tos var izgatavot rūpnieciski un, kā «Lego» klucīšu būvobjektā saklikšķināt kopā. Tai pat laikā daudzi runā, ka māja no finiera un vates ir nenopietni – kā pasakā par trim sivēntiņiem, kur bija salmu un žagaru mājas. Tieši tāpēc, lai nebūtu tikai finiera un vates māja, ņemām vērā arī siltumenerces momentu. Siltumenerci būvnieki parasti raksturo ar būvkonstrukcijas laukuma masu – cik kg sver 1m<sup>2</sup> sienas. Viegļām konstrukcijām raksturīgi tas, ka to temperatūra viegli svārstās līdz ar āra temperatūras izmaiņām, bet smagās konstrukcijas siltumu akumulē un lēnāk atdod. Ja uz akmens kroga sienas uzspīd saule, tad nedomājiet, ka iekšā kļūs silti! Ar finiera sienu otrādi – ļoti ātri sajūtīsiet āra siltumu. Tāpēc, lai palielinātu tilpuma masu, izmantojām fibrolītu, kas ir labs divējādi – ar pietiekami lielu masu un labām siltumizolācijas īpašībām. Viņš tai "pīrāgā" ļoti labi iederas, bet nu tas atkal nav Latvijā populārs risinājums.

Visbeidzot trešais jaunums – lai tuvotos gandrīz nulles energopatēriņa ēkām, mums būvkonstrukciju *U* vērtība (siltuma caurlaidība) iespējami jāsamazina. Ja pašreiz Latvijas Būvnormatīvos šis lielums noteikts starp 0,2 un 0,3, tad stendos plānojām sasniegt *U* vērtības robežas no 0,15 līdz 0,16. Šādas vērtības praktiski nevar sasniegt, neizmantojot kaut kādus siltumizolācijas materiālus. Vienā no stendiem sienām nav atsevišķa siltumizolācijas slāņa, bet ir biezs keramiskais bloks – «Keraterm», kura dobumi pildīti ar siltumizolējošām granulām – putupolistirola lodītēm, kas pārklātas ar grafitu. Šāds produkts Latvijā vēl nav izmantots. Vācijā ražo ko līdzīgu, taču mūsu tirgū nav ienākuši relatīvās dārdzības dēļ. Šos blokus ražo «Lodē», bet lodītēm, ja tās ražotu rūpnieciski, vajadzētu būt ar nelielu līmes piedevu, lai tās bloka spraugās saķep un nebirst laukā. Tehnoloģiski pareizi būtu pildīt bloku ar lodītēm jau rūpnīcā (pildīt var arī sasmalcinātu minerālvati), taču bloks ir 51 cm biezs, tāpēc izmaksas nav mazas un šo produktu nevērtējam, kā masveida produktu. Tas vairāk ir eksperimentāls izstrādājums, lai paskatītos, kā tas uzvedas.

### **Minerālvates siltinājums – vienai paaudzei**

Atgriežoties pie projekta mērķiem – tāpat, pirmkārt, izpētīt, kā mainās būvkonstrukciju īpašības pārejas periodā – tūlīt pēc uzcelšanas (par gāzbetona blokiem jau stāstīju), un pēc tam veikt regulārus novērojumus trīs gadus pēc kārtas. Ja būs jaunas idejas, darīsim vēl kaut ko.

#### **– *Bet populāra taču arī ekovate un dažādi poliuretāna materiāli – kad tos izvērtēsiet?***

– Mēs fiziski nevarējām paņemt visas iespējamās kombinācijas, tāpēc, ņemot vērā, ka ekovate līdzinās minerālvatei, priekšroku devām pēdējai.

#### **– *Par ekovati dzirdēts, ka laika gaitā tā tomēr sarūk?***

– Ja mums būtu tādas finansiālās iespējas, labprāt nosiltinātu vienu namiņu ar ekovati un pēc četriem gadiem paskatītos, kāds siltinājums izskatās. Par rezultātu varētu diskutēt... Ekovati slavē kā "elpojošu" un ekoloģisku materiālu, taču es nedaudz piebremzētu ar šādiem apgalvojumiem. Ekovati taista no malta avīžpapīra, kur arī taču dažādi krāsu un citu ķīmikāliju piemaisījumi, bet tvaika caurlaidība ir kā minerālvatei. Lai nedzīvotu grauzēji un vate nedegtu, tiek lietotas dažādas piedevas, līdz ar to tas ekoloģiskums ir nosacīts, bet funkcionalitātes aspektā nav acīmredzamu priekšrocību.

Ja runājam par elpošanu vai neelpošanu, man jāvaicā pretī – vai betona siena elpo? Tās blīvums ir tik liels, ka to nevar uzskatīt par "elpojošu" būvi un to var teikt par visām masīvajām būvēm; protams, var paņemt *fibro* bloku un teorētiski (reizēm arī praktiski) tam var izpūst gaisu cauri; gāzbetonam vairs nevarēs, jo poru struktūra ir smalkāka. Bet kāpēc par to runāju? Jūs jau

nemaz negribat, lai tam varētu izpūst cauri. Ja var izpūst cauri, tad arī viss siltums aiziet līdz; tātad, vajadzīgs apmetums gaisa plūsmu nobremzēšanai. Pareizāk būtu runāt par materiāliem, kas spēj mitrumu akumulēt un atkal atdot. Agrāk griestus mēdza balsināt ar krītu, un tad gadījās, ka mitrā virtuvē krīts palika tāds valgangs un dzeltenīgs, taču pēc tam nožuva; tas mitrumu atkal atdeva. Nokrāsojot ar eļļas krāsu vai ūdens emulsiju, tādu procesu, protams, nebūs – uz griestiem veidosies kondensāta pilieni, kas kaut kur notecēs. No šī viedokļa ekovate ir tāds materiāls, kas mitrumu piesaista, bet sausākā laikā izžūst. Ar minerālvati citādāk – tā atgrūž ūdeni un tas paliek materiālā mazu pilieņu veidā. Ja ekovate mitrumu iesūc savā struktūrā, tad minerālvatē tas krājas gaisa porās mikropilieņu veidā. Lielas atšķirības neredzu, bet, runājot par "elpošanu" vai "neelpošanu", betona vai māla ķieģeļu sienai tvaika barjera nav nepieciešama, jo šie materiāli ir gana "neelpojoši", bet, ja siltināšanai izmantojat citu materiālu ar lielāku gaisa caurlaidību, tad tvaika barjera tomēr nepieciešama, jo šī barjera pilda to pašu funkciju, ko betona siena. Protams, var rasties jautājums, kur paliek kondensāta pilieni, kas slīd pa sienu lejup? Tāpēc tvaika barjera jāliek uzreiz aiz iekšējās apdares, lai iekštelpu mitrums netiek siltinājumā.

**– Bet savi mīnusi, arī siltinot ar minerālvati – tvaika barjeras stiprināšana ar skavām vai līmlentām salaiduma vietās nešķiet ilglaicīgs risinājums... Ar laiku vates puteklīši aizvien vairāk nonāk iekštelpu gaisā...**

– Jums taisnība – jo komplicētāks siltinājuma "pīrāgs", jo vairāk "ziepju" var ievārīt būvnieks. Ar betona paneli vienkārši, bet vieglā būvē pat elektrības kontakts ir vesela tehnoloģija – jātraumē tvaika barjera, un tad jau sākas gaisa cirkulācija, mitruma plūsmas un tamlīdzīgi. Simtprocentīgi droša līdzekļa pret to nav – ir tikai labākas un sliktākas metodes risku mazināšanai. 90. gadu pirmajā pusē, kad būvēja un līmēja hermetizējošās plēves ar parasto *skoču*, tas, protams, pēc vienas sezonas bija nokritis. Tagad ir speciālas lentas ar augstu adhēzijas spēju – tās neatdalās arī pēc daudziem sasilšanas un atdzišanas cikliem; tās ir elastīgas, armētas un gadus 10 līdz 20 turēs. 20 līdz 25 gadi jau ir vidējais "vates" mājas mūžs – vienai paaudzei pietiks...

**– Kā tad tā – kur tad stāsti par skandināvu kvalitāti pusgadsimta garumā?**

– Jāsaprot, ka koks mitrumā briest, tas "staigā", un tas ir viens no iemesliem, kāpēc koka konstrukcijas grūti hermētiski noslēgt. 90. gados turīgi ļaudis cēla guļbūves no īstiem baļķiem; protams, būves pēc laika sēdās un īpašnieki bija nevis laimīgi, bet nelaimīgi. Koka konstrukcijās ar laiku veidojas spraugas – ar to jārēķinās, un var tikai censties ar elastīgiem un iespējami ilgmūžīgiem materiāliem tās hermetizēt. Mēs savos standos izmantojam speciālas Šveicē ražotas hermetizācijas lentas.

**Siltākā – uzlabotā guļbūve**

**– Ar jūsu šī brīža pieredzi, no kāda materiāla būvētu sev māju?**

– Tas, protams, ir maciņa jautājums. Lētajā variantā nevairītos no vieglās būves, tikai tad pats sekotu būvdarbiem. Manuprāt, tas variants ar finiera/koksaidu paneļiem un fibrolītu nav slikts. Labi, mājiņa kalpos gadus 30, taču vairāk varbūt nevajag. Fibrolīta slānis iekšpusē ļauj ērti izveidot arī elektroinstalāciju, netraumējot jūtīgo siltinājuma slāni.

Dārgākajā variantā izvēlētos to, ko turīgie vācieši – keramisko bloku ēku, jo viņiem ir tradīcija būvēt vismaz 100 gadiem.

**– Vēl jautājums par fasādi – kāpēc logi vairāk iesēdināti uz iekšu?**

– Logu izvietojums ir tāds, lai minimizētu termiskos tiltus, kas veidojas ap rāmi. Piemēram, uzliekot logu frēzbaļķu sienā, tas atradīsies ārsienas pusē ar lielāku siltuma caurlaidību un ap rāmi veidosies paaugstināti siltuma zudumi, tāpēc logu sēdinām vairāk uz telpas pusi – minerālvates daļā; lai mazinātu termiskos tiltus pa rāmja perimetru. Katrā gadījumā savi risinājumi, taču galvenā doma ir tāda – lieciet logus sienas siltinājuma daļā. Spraugas ap loga bloku ir aizpūstas ar poliuretāna putām un hermetizētas ar speciālām lentām.

Fasādes ārpusē izmantots mitrumizturīgais finieris un koka lats – tiem vairāk dekoratīva nozīme, lai saskanētu ar apkārtējo vidi. Ventilējamās fasādes veidojam tāpēc, lai izslēgtu tiešu lietus iedarbību uz sienas konstrukcijām.

**– Pēdējais jautājums – kādi tad šobrīd ir pētījumu rezultāti? Kura ēka uzskatāma par siltāko?**

– Vissliktākie rādītāji ir gāzbetona ēkai – tas, pateicoties sienu sākotnējam mitrumam; tāpēc arī siltuma zudumi vislielākie. Relatīvais gaisa mitrums sasniedza pat 75%, taču, iespējams, pēc vasaras šie rādītāji mainīsies.

Nedaudz mazāk energopatēriņš bijis eksperimentālajai ēkai ar granulām pildīto keramikas bloku sienām. Iestrādājot granulas būvlaukumā, bloki salija, taču reāli dzīvē arī tā notiek, tāpēc nekā ārkārtēja. Trešajā vietā standarta risinājums no keramikajiem blokiem (mitrums telpā ap 50%). Otrs labākais – ar 45% mitrumu – finiera/vates un fibrolīta māja. Fibrolīta biezums ir 75 mm, vates – 150 mm. Kokskaidu vati ražo «Latvijas finiera» meitas uzņēmums. Šajā standā augstāks mitruma daudzums telpā tāpēc, ka virs fibrolīta bija veidots apmetums, kas pakāpeniski žuva. Šobrīd jau runa tikai par pirmajiem ekspluatācijas mēnešiem. Vissausākā un siltākā izrādījās frēzbaļķu māja, taču tādu būvēt ir salīdzinoši dārgs prieks, ko vairāk izvēlas turīgie norvēģi.

Gribu atgādināt – pēc teorijas šīm būvkonstrukcijām vajadzēja nodrošināt vienādu energopatēriņu, taču praksē atšķirība bija līdz pat 30%...

Šos standus Botāniskajā dārzā var aplūkot jebkurš interesents.

Intervēja un pierakstīja Vents Dubrovskis

<http://www.pasyvusnamas.lt/kur-apsigauna-statytojai/>  
**Kur apsigaua statytojai?**

Sienų konstrukcijų efektyvumo natūriniai bandymai Latvijoje.



Rygos Botanikos sode Latvijos mokslininkai vykdo unikalų projektą. Jie pastatė penkis vienodus bandomuosius pastatus iš skirtingų konstrukcijų, taip vadinamus modelius, ir juos stebi, matuoja bei analizuoja duomenis. Tokiu būdu siekiama išsiaiškinti ir įvertinti įvairių konstrukcijų savybes bei jų „elgseną“ realybėje.

Rygos universiteto dr. Andris Jakovics yra šio projekto iniciatorius. „Paprastai statybinių medžiagų arba atskirų sistemų, statybinių konstrukcijų bandymai yra vykdomi laboratorijose. Tačiau mums knietėjo sužinoti, kaip „elgiasi“ tos konstrukcijos natūralioje aplinkoje, realiomis sąlygomis, po atviru dangumi. Nesvarbu, ar lietus, ar sniegas, ar vėjas, saulė ar mėnulis ir pan. Praktika rodo, kad realybėje statybinės konstrukcijos ir mūsų namai „jaučiasi“ kiek kitaip nei laboratorijose“, – sako dr. A.Jakovics.



Penki maži nameliai (plotas – 9 kv.m., tūris – 27 kv.m.) buvo pastatyti ant vienodų pamatų, taip pat vienodai orientuoti pagal pasaulio šalis, įstatyti tokie pat langai ir tokios pat durys, tokia pati stogo konstrukcija ir stogo danga. Šiuose nameliuose skiriasi tik sienos. Skaičiuojamasis, deklaruojamasis sienų šilumos perdavimo koeficientas, geriau žinomas kaip U vertė, nameliuose yra vienodas, tačiau sienų konstrukcijos skiriasi.



Pirmasis namelis yra pastatytas iš keraminių blokų ir iš išorės apšiltintas mineralinės vatos izoliaciniu sluoksniu (CER), antrasis – sumūrytas iš AEROC akytojo betono blokų (AER), trečias – lengva karkasinė siena, skydai iš medienos ir mineralinės vatos užpildo (PLY), ketvirtas – keraminiai blokai su polistirolu užpildu viduje (EXP) ir paskutinis namelis imituoja rąstinį namą su iš vidaus pašiltintu mineralinės vatos sluoksniu (LOG).

Dr. A.Jakovics eksperimentas, natūrinis bandymas Latvijos sostinės centre, prasidėjo visai neseniai. Pasibaigus statyboms, namelių stebėjimas ir matavimai vykdomi vos 9 mėnesius. Tačiau jau dabar dr. A.Jakovics turi keletą konkrečių pastebėjimų, kurie, vartotojams, statytojams gali būti naudingi.

„Visų pirma atkreipčiau dėmesį į tai, kad labai didelę reikšmę būstams turi jų pirminė konstrukcijų drėgmė arba taip vadinama statybinė drėgmė. Tai yra ta drėgmė, kuri liko nuo statybos procesų ir su kuria tenka susidurti naujakuriams“, – sako mokslininkas.

Matavimai parodė, kad šiuo požiūriu blogiausia sienos konstrukcija buvo iš akytojo betono blokų. Iš tokių medžiagų sumontuotoje sienų konstrukcijoje ilgai nepasišalina drėgmė. Kad ta drėgmė pasišalintų, reikia daugiau vėdinimo ir daugiau patalpų šildymo. „Nepaisant to, panašu, kad akytojo betono blokai drėgnose pajūrio zonose niekada nepasieks numatytojo drėgnumo lygio ir jų U vertė niekada nebus tokia, kaip deklaruojama. Dėl to šios konstrukcijos energinis efektyvumas bus prastesnis nei tikimasi“, – sako jis. Taigi, statantieji savo namus iš akytojo betono blokų turėtų įvertinti tai, kad akytojo betono medžiagos pasižymi gan dideliu drėgmės įgeriamumu (absorbcija).



Dr. A. Jakovics

„Antras dalykas, kurį taip pat jau galime skelbti, tai – terminė inercija sienų konstrukcijose. Čia palyginome masyvų keraminį mūrą, apšiltintą izoliaciniu sluoksniu, su karkasine lengva siena. Vasaros matavimai rodo, kad karkasiniame name patalpų perkaitimas yra didesnis už perkaitimą mūriniame“, – sako Dr. A. Jakovics. Kita vertus, mineraline akmens vata apšiltintos karkasinės sienos terminė inercija yra labai panaši į keraminio mūro terminę specifiką. Šiluminė energija sienose išsilaiko panašiai.

Trečias labai svarbus momentas yra drėgmės atsiradimas sienose pastato eksploatacijos metu. Šiame eksperimente matome, kad siena iš rąstų, su izoliaciniu sluoksniu pastato viduje, yra padidintos rizikos sprendinys. Izoliacinio sluoksnio drėgnumas didėja ir tai blogina izoliacines atitvaros savybes.



„Dar esame numatę lyginti ir šilumos siurblių efektyvumą. Šiuo metu bandome oras-oras siurblius. Vėliau sumontuosime kitokio tipo įrenginius. Bandysime palyginti skirtingo tipo

šiluminės energijos „gamybos“ būdus praktikoje. Kaip jie iš tiesų veikia“, – pasakoja Dr. A.Jakovics.

Beje, mokslininkas pastebėjo ir dar vieną labai reikšmingą dalyką. Visuose penkiuose bandomuosiuose nameliuose, šaltose ir nedidelėse jų palėpėse, ant perdangos buvo įrengti 25 cm storio šilumos izoliaciniai sluoksniai iš šiltinimo celiuliozės, dar taip vadinamos ekovatos arba celiuliozės plaušų. „Per pirmuosius devynis mėnesius visuose mūsų nameliuose celiuliozės šiltinimo sluoksnis „sukrito“, suplonėjo net 5 centimetrais“, – sako Dr. A.Jakovics. Tai reiškia, kad, perdangų šilumos izoliacija susitraukė net 20 proc.

#### 4. Pielikums

### Grozījumu priekšlikumi LR Ministru kabineta 2001.gada 27.novembra noteikumos Nr.495 „Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika””

Izteikt būvnormatīva 1.tabulu šādā redakcijā:

1. tabula. Būvelementa un lineārā termiskā tilta siltuma caurlaidības koeficientu  $U_{RN} W/(m^2 \times K)$  un  $\psi_{RN} W/(m \times K)$  normatīvās vērtības.

Nr.	„Būvelementi	Dzīvojamās mājas, pansionāti, slimnīcas un bērnodārzi	Publiskās ēkas, izņemot pansionātus, slimnīcas un bērnu dārzus	Ražošanas ēkas
1.	Jumti un pārsegumi, kas saskaras ar āra gaisu	0,15 κ	0,20 κ	0,25 κ
2.	Grīdas uz grunts	0,15 κ	0,20 κ	0,30 κ
3.	Sienas	0,18 κ	0,20 κ	0,25 κ
4.	Logi, durvis un citas stiklotās konstrukcijas			
4.1.	Logi, balkona durvis un citas stiklotās konstrukcijas	1,30 κ	1,40 κ	1,60 κ
4.2.	Ēku ārdurvis	1,80 κ	2,00 κ	2,20 κ
5.	Termiskie tilti $\psi_{RN}$	0,10 κ	0,15 κ	0,30 κ

Piezīme. κ - temperatūras faktors.”

Izteikt būvnormatīva 2.tabulu šādā redakcijā:

2. tabula. Būvelementa un lineārā termiskā tilta siltuma caurlaidības koeficientu  $U_{RM} W/(m^2 \times K)$  un  $\psi_{RM} W/(m \times K)$  maksimālās vērtības.

Nr.	Būvelementi	Dzīvojamās mājas, pansionāti, slimnīcas un bērnodārzi	Publiskās ēkas, izņemot pansionātus, slimnīcas un bērnu dārzus	Ražošanas ēkas
1.	Jumti un pārsegumi, kas saskaras ar āra gaisu	0,20 κ	0,25 κ	0,35 κ
2.	Grīdas uz grunts	0,20 κ	0,25 κ	0,40 κ
3.	Sienas:	0,23 κ	0,25 κ	0,30 κ
4.	Logi, durvis un citas stiklotās konstrukcijas			
4.1.	Logi, balkona durvis un citas stiklotās konstrukcijas	1,80 κ	1,80 κ	1,80 κ
4.2.	Ēku ārdurvis	2,30 κ	2,50 κ	2,70 κ
5.	Termiskie tilti $\psi_{RN}$	0,15 κ	0,20 κ	0,35 κ

Piezīme. κ - temperatūras faktors.

Izteikt būvnormatīva 22. punktu šādā redakcijā:

22. Būvelementu gaiscaurlaidība visai ēkai vai tās daļai, izteikta kā gaisa noplūde  $m^3/(m^2 \times h)$  un izmērīta ar spiediena starpību 50 Pa ( $q_{50}$ ), nedrīkst pārsniegt šī būvnormatīva 23.punkta noteiktās vērtības.

Izteikt būvnormatīva 23. punktu šādā redakcijā:

23. Atkarībā no attiecīgās ēkas ventilēšanas paņēmiena, dzīvojamām mājām, pansionātiem, slimnīcām, bērnu dārzkiem un publiskajām ēkām gaiscaurlaidībai ir noteiktas šādas robežvērtības:

- ēkām ar dabīgo ventilāciju (vēdināšanu)  $q_{50} \leq 3 m^3/(m^2 \times h)$ ;
- ēkām ar mehānisko ventilācijas sistēmu:  $q_{50} \leq 2 m^3/(m^2 \times h)$ ;
- ēkām ar mehānisko ventilācijas sistēmu, kas aprīkota siltuma atguves (gaisa rekuperācijas) ierīcēm:  $q_{50} \leq 1,5 m^3/(m^2 \times h)$ .”;

Papildināt būvnormatīvu ar 23<sup>1</sup>. punktu šādā redakcijā:

23<sup>1</sup>. Ražošanas ēkām gaiscaurlaidība ( $q_{50}$ )  $\leq 4 m^3/(m^2 \times h)$ .”

Izteikt būvnormatīva 24. punktu šādā redakcijā:

24. Ēku gaiscaurlaidību nosaka saskaņā ar standartu LVS EN 13829:2013 L „Ēku termiskā efektivitāte – Ēku gaisa caurlaidības noteikšana – Piespiedu ventilācijas metode”. Veicot testu, ēkai ir jābūt sagatavotai vadoties pēc LVS EN 13829:2013L standarta B metodes (norobežojošās konstrukcijas testēšana).”

Papildināt būvnormatīva pielikumu ar 3.tabulu šādā redakcijā:

3. tabula. Temperatūras faktora vērtības.

Āra gaisa vidējā temperatūra apkures sezonas laikā, $\Theta_e$ (°C)	Temperatūras faktors atkarībā no iekštelpu aprēķina temperatūras, $\Theta_i$ (°C)									
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
-2,0	1,90	1,73	1,58	1,46	1,36	1,27	1,19	1,12	1,06	1,00
-1,9	1,92	1,74	1,60	1,47	1,37	1,28	1,19	1,12	1,06	1,01
-1,8	1,94	1,76	1,61	1,48	1,38	1,28	1,20	1,13	1,07	1,01
-1,7	1,96	1,78	1,62	1,50	1,39	1,29	1,21	1,14	1,07	1,02
-1,6	1,98	1,79	1,64	1,51	1,40	1,30	1,22	1,14	1,08	1,02
-1,5	2,00	1,81	1,65	1,52	1,41	1,31	1,23	1,15	1,09	1,03
-1,4	2,02	1,83	1,67	1,53	1,42	1,32	1,23	1,16	1,09	1,03
-1,3	2,04	1,84	1,68	1,54	1,43	1,33	1,24	1,17	1,10	1,04
-1,2	2,07	1,86	1,70	1,56	1,44	1,34	1,25	1,17	1,10	1,04
-1,1	2,09	1,88	1,71	1,57	1,45	1,35	1,26	1,18	1,11	1,05
-1,0	2,11	1,90	1,73	1,58	1,46	1,36	1,27	1,19	1,12	1,06
-0,9	2,13	1,92	1,74	1,60	1,47	1,37	1,28	1,19	1,12	1,06
-0,8	2,16	1,94	1,76	1,61	1,48	1,38	1,28	1,20	1,13	1,07
-0,7	2,18	1,96	1,78	1,62	1,50	1,39	1,29	1,21	1,14	1,07
-0,6	2,21	1,98	1,79	1,64	1,51	1,40	1,30	1,22	1,14	1,08
-0,5	2,24	2,00	1,81	1,65	1,52	1,41	1,31	1,23	1,15	1,09
-0,4	2,26	2,02	1,83	1,67	1,53	1,42	1,32	1,23	1,16	1,09
-0,3	2,29	2,04	1,84	1,68	1,54	1,43	1,33	1,24	1,17	1,10
-0,2	2,32	2,07	1,86	1,70	1,56	1,44	1,34	1,25	1,17	1,10
-0,1	2,35	2,09	1,88	1,71	1,57	1,45	1,35	1,26	1,18	1,11
0,0	2,38	2,11	1,90	1,73	1,58	1,46	1,36	1,27	1,19	1,12

+0,1	2,41	2,13	1,92	1,74	1,60	1,47	1,37	1,28	1,19	1,12
+0,2	2,44	2,16	1,94	1,76	1,61	1,48	1,38	1,28	1,20	1,13
+0,3	2,47	2,18	1,96	1,78	1,62	1,50	1,39	1,29	1,21	1,14
+0,4	2,50	2,21	1,98	1,79	1,64	1,51	1,40	1,30	1,22	1,14
+0,5	2,53	2,24	2,00	1,81	1,65	1,52	1,41	1,31	1,23	1,15
+0,6	2,57	2,26	2,02	1,83	1,67	1,53	1,42	1,32	1,23	1,16
+0,7	2,60	2,29	2,04	1,84	1,68	1,54	1,43	1,33	1,24	1,17
+0,8	2,64	2,32	2,07	1,86	1,70	1,56	1,44	1,34	1,25	1,17
+0,9	2,68	2,35	2,09	1,88	1,71	1,57	1,45	1,35	1,26	1,18
+1,0	2,71	2,38	2,11	1,90	1,73	1,58	1,46	1,36	1,27	1,19

Āra gaisa vidējā temperatūra apkures sezonas laikā, $\Theta_e$ (°C)	Temperatūras faktors atkarībā no iekštelpu aprēķina temperatūras, $\Theta_i$ (°C)										
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
-2,0	0,95	0,90	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68	0,66	0,63
-1,9	0,95	0,91	0,87	0,83	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68	0,66	0,64
-1,8	0,96	0,91	0,87	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,68	0,66	0,64
-1,7	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,77	0,74	0,71	0,69	0,66	0,64
-1,6	0,97	0,92	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74	0,71	0,69	0,66	0,64
-1,5	0,97	0,93	0,88	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,67	0,64
-1,4	0,98	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,67	0,65
-1,3	0,98	0,94	0,89	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,70	0,67	0,65
-1,2	0,99	0,94	0,90	0,86	0,82	0,79	0,75	0,73	0,70	0,67	0,65
-1,1	0,99	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68	0,65
-1,0	1,00	0,95	0,90	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68	0,66
-0,9	1,01	0,95	0,91	0,87	0,83	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68	0,66
-0,8	1,01	0,96	0,91	0,87	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,68	0,66
-0,7	1,02	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,77	0,74	0,71	0,69	0,66
-0,6	1,02	0,97	0,92	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74	0,71	0,69	0,66
-0,5	1,03	0,97	0,93	0,88	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,67
-0,4	1,03	0,98	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,67
-0,3	1,04	0,98	0,94	0,89	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,70	0,67
-0,2	1,04	0,99	0,94	0,90	0,86	0,82	0,79	0,75	0,73	0,70	0,67
-0,1	1,05	0,99	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68
0,0	1,06	1,00	0,95	0,90	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68
+0,1	1,06	1,01	0,95	0,91	0,87	0,83	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68
+0,2	1,07	1,01	0,96	0,91	0,87	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,68
+0,3	1,07	1,02	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,77	0,74	0,71	0,69
+0,4	1,08	1,02	0,97	0,92	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74	0,71	0,69
+0,5	1,09	1,03	0,97	0,93	0,88	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69
+0,6	1,09	1,03	0,98	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69
+0,7	1,10	1,04	0,98	0,94	0,89	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,70
+0,8	1,10	1,04	0,99	0,94	0,90	0,86	0,82	0,79	0,75	0,73	0,70
+0,9	1,11	1,05	0,99	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70
+1,0	1,12	1,06	1,00	0,95	0,90	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,70

