



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Edīte Biseniece

ILGTSPĒJĪGA VĒSTURISKO ĒKU ATTĪSTĪBA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Edīte Biseniece

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

ILGTSPĒJĪGA VĒSTURISKO ĒKU ATTĪSTĪBA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Biseniece, E. Ilgtspējīga vēsturisko ēku attīstība. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes "P-19" 2021. gada 7. maija lēmumu, protokols Nr. 139.

<https://doi.org/10.7250/9789934226526>

ISBN 978-9934-22-652-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 30. augustā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 212. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Aigars Laizāns,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors *Dr. ing.* Uli Jakob,
Štutgartes Tehniskā augstskola, Vācija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Edīte Biseniece (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 44 attēli, 17 tabulu, kopā 162 lappuses. Literatūras sarakstā ir 77 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
Darba aktualitāte un hipotēze	6
Darba mērķis un uzdevumi	6
Darba zinātniskā novitāte un nozīme	7
Praktiskā nozīme	8
Zinātniskā darba aprobācija	8
Darba struktūra un apjoms	10
1. PĒTĪJUMA METODIKA	11
1.1. Priekšizpēte	11
1.2. Enerģijas patēriņš	13
1.3. No iekšpusēs siltinātu konstrukciju higrotermiskā uzvedība	14
2. REZULTĀTI	18
2.1. Priekšizpēte	18
2.2. Enerģijas patēriņš	24
2.3. No iekšpusēs siltinātu konstrukciju higrotermiskā uzvedība	25
SECINĀJUMI	36

IEVADS

Lai sasniegtu Eiropa Savienības (ES) zaļā kursa mērķus un panāktu tautsaimniecības transformāciju uz modernu, resursu ziņā efektīvu un konkurētspējīgu ekonomiku, ir jāpanāk ēku sektora dekarbonizācija. Tāpēc ēku energoefektivitātei un resursu patēriņam tiek pievērsta pastiprināta uzmanība. Ēkas ir ne tikai lielas enerģijas un resursu patērētājas, bet tās būtiski ietekmē arī cilvēku veselību, darbaspējas un nosaka dzīves kvalitāti, jo cilvēks pavada telpās līdz pat 80 % sava dzīves laika.

Nozīmīga ES ēku sektora daļa būvēta pirms 1945. gada. Tas ir laiks, kad energoefektivitātes standarti nebija spēkā. Šīm ēkām vairumā gadījumu ir liela infiltrācija, augsts enerģijas patēriņš, un bieži vien tajās ir grūti nodrošināt komfortablus apstākļus. Ēku sektors ir viens no lielākajiem enerģijas patērētājiem ES, veidojot 40 % no visa ES enerģijas patēriņa un 36 % no visām SEG emisijām. Saskaņā ar Eiropas Komisijas sniegto informāciju ēku sektora ikgadējais atjaunošanas rādītājs dalībvalstīs svārstās no 0,4 % līdz 1,2 %, taču, lai sasniegtu Eiropas Komisijas noteiktos klimata un enerģijas mērķus, šim rādītājam jādivkāršojas, īstenojot ekonomiski pamatotus ēku atjaunošanas projektus.

Vislielākie izaicinājumi ēku atjaunošanas jomā skar vēsturiskās ēkas, kuru fasādes nedrīkst mainīt, lai saglabātu to kultūrvēsturisko un arhitektonisko vērtību. Tomēr ļoti daudzās ES valstīs, tostarp Latvijā, kur vēsturisko ēku īpatsvars dzīvojamajā sektorā veido 22 % no visām ēkām, vēsturisko ēku atjaunošana norit lēni.

Vēsturisko ēku kultūras vērtību saglabāšanu un energoefektivitātes uzlabošanu var uzskatīt par pretrunīgiem mērķiem, jo energoefektivitātes saglabāšana parasti nozīmē ēkas norobežojošo konstrukciju siltināšana, jaunu materiālu un būvniecības metožu izmantošanu. Vēsturiskajām ēkām nav iespējama sienu siltināšana no ārpuses, tāpēc atliek siltināt sienas no iekšpuses. Tomēr sienu siltināšana no iekšpuses, it īpaši ēkām aukstā klimatā, kāds ir Latvijā, ļoti būtiski maina sienas higrotermiskos procesus un līdz ar to var izraisīt mitruma kondensāciju, pastiprinātu sāļu izdalīšanos, sala izraisītus bojājumus, pelējuma augšanu un citus bojājumus. Tāpēc pirms vēsturisko ēku atjaunošanas un sienu siltināšanas no iekšpuses ir jānovērtē riski, kas saistīti ar iespējamo mitruma akumulāciju konstrukcijās un sienas temperatūras samazināšanos. Ir jāizstrādā jaunas metodes, kas šāda tipa ēkas ļautu atjaunot drošā un ilgtspējīgā veidā.

No telpas puses siltinātu sienu higrotermiskā procesa izmaiņas ir ļoti atkarīgas no sienās izmantotajiem būvmateriāliem un tos raksturojošajiem tehniskajiem rādītājiem. Vēsturiski izmantoto celtniecības materiālu daudzveidība dažādos reģionos un valstīs rada nepieciešamību pēc materiālu īpašību datubāzes izveides, ko var izmantot, analizējot un aprakstot mitruma pārnesi konstrukcijās.

Lielākā daļa vēsturisko ēku, īpaši Baltijas jūras reģiona valstīs, ir ķieģeļu mūra ēkas. Kopumā ķieģeļi neaizsargātos mūros ir pakļauti pastiprinātai mitruma klātbūtnei un lielām temperatūras svārstībām. Zinātnieki ir pierādījuši, ka mitrums ne tikai ievērojami samazina iekštelpu komforta līmeni, bet var izraisīt arī ievērojamu būvizstrādājumu bojāšanos, radot mehāniskās pretestības un stabilitātes zudumu. Šobrīd ēku īpašniekiem un inženieriem trūkst vadlīniju un aprēķina rīku, lai plānotu drošu vēsturisko ēku atjaunošanu. Tāpēc šis promocijas

darbs apskata jautājumus, kas saistīti ar vēsturisko ēku ilgtspējīgu atjaunošanu un vēsturisko sienu siltināšanu no iekšpuses. Darba izstrādes laikā analizēts panāktais komforts telpās un sasniegtais enerģijas patēriņa samazinājums pēc vēsturisko ēku atjaunošanas, kā arī piedāvāti risinājumi, kas ļauj aprakstīt sienu higrotermiskos procesus un tā izmaiņas ilgā laika posmā. Darba gaitā veikti arī ilgtermiņa vēsturisko ēku mērījumi pēc sienu siltināšanas no iekšpuses, būvizstrādājumu testēšana laboratorijā un to raksturojošo parametru noteikšana, kas nepieciešama, lai modelētu higrotermiskos procesus. Aprēķini validēti, izmantojot ilglaicīgus siltuma plūsmas un temperatūru sadalījuma mērījumus konstrukcijās.

Darba rezultāti var palīdzēt pieņemt lēmumus un plānot drošu vēsturisko ēku atjaunošanu, izmantojot sienu siltināšanu no iekšpuses un novēršot ar to saistītos riskus.

Darba aktualitāte un hipotēze

Pētījums izstrādāts, balstoties uz divām izvirzītajām hipotēzēm.

Pirmā hipotēze: dinamisks mitruma pārnese apraksts spēj novērtēt ilgtermiņa higrotermiskos procesus būvkonstrukcijās pēc to siltināšanas no iekšpuses, tādējādi ļaujot novērtēt un novērst riskus, kas saistīti ar vēsturisko ēku atjaunošanu.

Otrā hipotēze: vēsturisko ēku enerģijas patēriņu iespējams samazināt, siltinot ēkas sienas no iekšpuses, saglabājot ēku kultūrvēsturisko un arhitektonisko vērtību un neradot konstrukciju bojājumu riskus.

Mūsdienās vēsturisko ēku energoefektivitātes paaugstināšana un ilgtspējīga attīstība saskaras ar vairākiem izaicinājumiem, kas saistīti ar ārsienu siltināšanu no iekšpuses un mitruma pārnese procesiem būvkonstrukcijās. Siltinot sienu no iekšpuses, esošā siena paliek konstrukcijas aukstajā pusē, kas ne tikai samazina tās žūšanas potenciālu, bet arī rada mitruma kondensācijas risku. Paaugstināts mitrums konstrukcijās rada labus priekšnosacījumus būvizstrādājumu bioloģiskajai degradācijai, var veicināt sienas šķelšanos caursalšanas gadījumā, kondensāta veidošanos starp auksto mūri un siltumizolāciju, pelējuma veidošanos, kā arī koka siju satrudēšanu. Līdz ar to ārsienas no iekšpuses siltināt nedrīkst, pirms nav rūpīgi izvērtēts, kā tas ietekmēs esošās būvkonstrukcijas higrotermiskās īpašības un ar to maiņu saistītos riskus.

Darba mērķis un uzdevumi

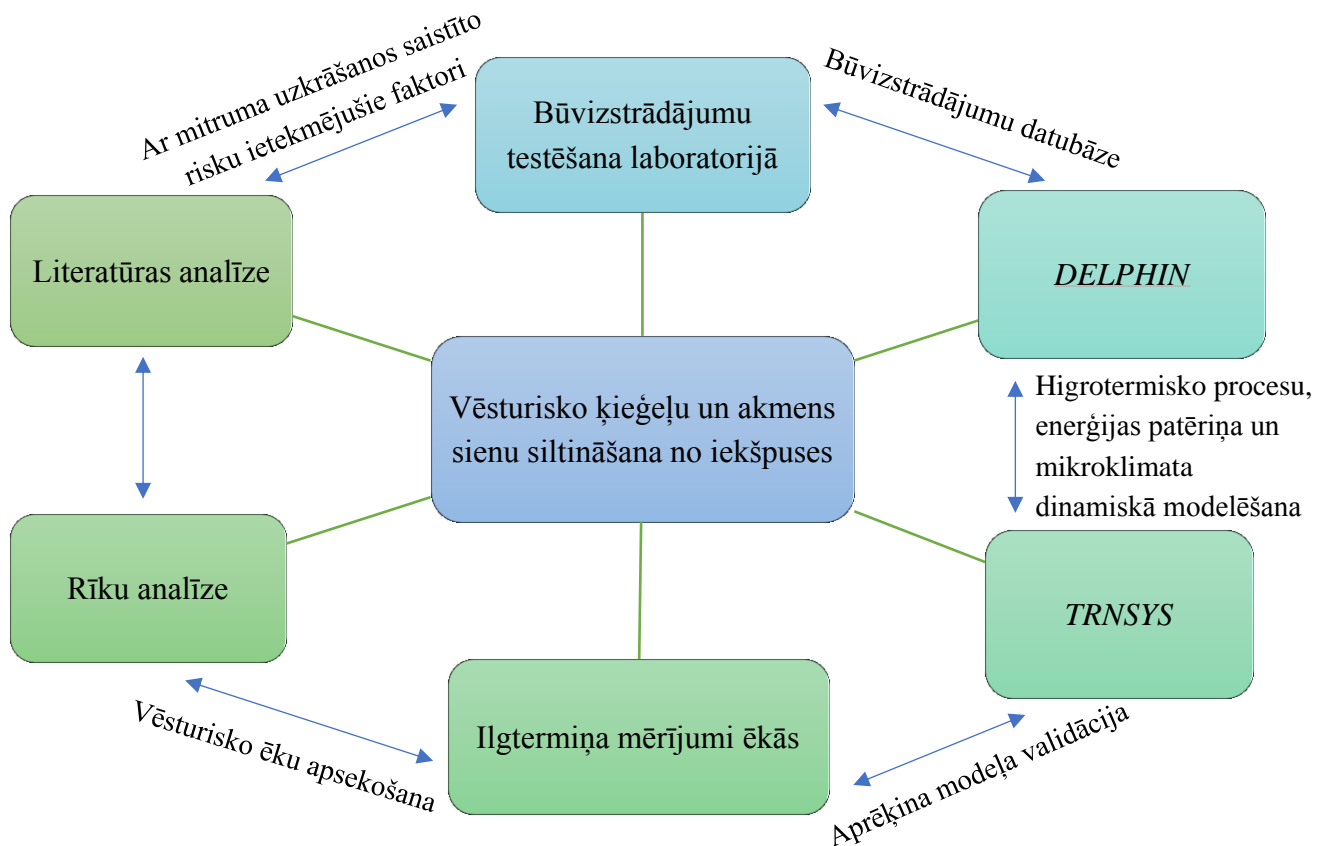
Darba mērķis ir piedāvāt drošus un efektīvus risinājumus vēsturisko ķieģeļu un akmens sienu siltināšanai no iekšpuses.

Mērķa sasniegšanai pakārtotie uzdevumi:

- 1) veikt būvmateriālu testēšanu laboratorijā, lai noteiktu mitruma pārnese procesu konstrukcijā un ar to saistīto risku ietekmējošos faktorus;
- 2) veikt dinamisko datormodelēšanu un izpēti reālās ēkās, lai aprakstītu vēsturisko mūra sienu dinamiskos higrotermiskos procesus ilgtermiņā un validētu šos modeļus, ar ilgtermiņa mērījumu palīdzību analizējot higrotermiskos procesus reālās ēkās;

- 3) veikt dinamisko datormodelēšanu, lai noteiktu ieguvumus (enerģijas patēriņa samazinājumu un telpu mikroklimatu) pēc sienu siltināšanas no iekšpuses;
- 4) sniegt atbalstu lēmuma pieņemējiem par vēsturisko ēku ārsienu siltināšanu no iekšpuses un ar to saistīto risku novērtējumu.

Uzdevumi izpildīti, veicot literatūras analīzi un vairākus savstarpēji saistītus pētījumus gan laboratorijas apstākļos, gan reālās ēkās, gan ar izveidoto dinamisko aprēķina modeļu palīdzību. 1. attēlā redzams promocijas darba gaitā paveiktais un dažādo pētījumu savstarpējā sasaiste.



1. att. Pētījuma gaitā veiktie uzdevumi.

Darba zinātniskā novitāte un nozīme

Līdz šim Latvijā vēsturisko ēku siltināšana no iekšpuses un siltināto ārsienu higrotermiskā uzvedība nav plaši pētīta. Tas pats attiecas arī uz vēsturiski izmantotajiem būvizstrādājumiem. Pieejami atsevišķi pētījumi par konkrētu ēku, piemēram, Rīgas Fondu biržas, Rīgas domes ēkas, konstrukciju elementiem, taču tie veikti galvenokārt restaurācijas darbu vajadzībām un nesniedz padziļinātu ieskatu par konstrukciju higrotermisko uzvedību vai izmantotajiem materiāliem.

Izveidotie dinamiskie aprēķina modeļi validēti, salīdzinot mērījumu datus ar aprēķina datiem, izmantojot verifikācijas testus un salīdzinot iegūtos aprēķina datus ar dinamisko modelēšanas programmu rezultātiem.

Datormodeļi aprobēti, apsekojot vēsturiskās mūra sienas, veicot ilgtermiņa mitruma un temperatūru mērījumus sienās un telpās. Veikta būvmateriālu testēšana laboratorijā, un testēšanas rezultāti izmantoti dinamisko mitruma pārnese procesu modelēšanai.

Praktiskā nozīme

Promocijas darba laikā izstrādāti paņēmieni un testētas aprēķina modeļu iespējas, kas ļauj plānot vēsturisko ēku atjaunošanu, siltinot to ārsienas no iekšpuses, tādējādi pasargājot to kultūrvēsturisko un arhitektonisko vērtību, vienlaikus samazinot siltuma zudumus caur ārsienu konstrukcijām. Iekšējās siltināšanas sekas novērtētas ar ilgtermiņa mērījumiem reālās ēkās un laboratorijā, analīzi papildinot ar dinamiskajiem aprēķina modeļiem.

Pētījums var tikt izmantots drošu, efektīvu un visaptverošu vadlīniju izstrādei lēmumu pieņēmējiem, lai uzlabotu vēsturisko ēku energoefektivitāti, siltinot tās no iekšpuses.

Zinātniskā darba aprobācija

Zinātniskās publikācijas par tēmu

1. Biseniece E., Freimanis R., Kamenders A., Blumberga A. Historic single-family home made of dolomite stone with internal insulation – Long term case study in a cold climate (prepared for submission).
2. Kamenders A., Kašs, K., Biseniece E., Lupkina L., Bažbauers J., Quality management in energy performance contracting projects. (2018) *Energy Procedia*, 147, 2018, 636–640.
3. Biseniece E., Freimanis R., Purviņš R., Grāvelsiņš A., Pumpurs A., Blumberga A., Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation. (2018) *Environmental and Climate Technologies*, 22, 22–41.
4. Biseniece E., Žogla G., Kamenders A., Purviņš R., Kašs K., Vanaga R., Blumberga A., Thermal performance of internally insulated historical brick building in cold climate: A long term case study. (2017) *Energy and Buildings*, 152, 577–586.
5. Purviņš R., Kamendere E., Blumberga A., Laboratory investigation of Latvian historic brick and measurements of water movement in historic masonry walls. (2017) *Energy Procedia*, 113, 327–332.
6. Kašs K., Blumberga A., Blumberga D., Žogla G., Kamenders A., Kamendere E. Pre-assessment method for historical building stock renovation evaluation. (2017) *Energy Procedia*, 113, 346–353.
7. Kamendere E., Grava L., Zvaigznitis K., Kamenders A., Blumberga A. Properties of bricks and masonry of historical buildings as a background for safe renovation measures. (2016) *Energy Procedia*, 95, 119–123.
8. Blumberga A., Kašs K., Kamendere E. A review on Latvian Historical Building Stock with Heavy Walls. (2016) *Energy Procedia*, 95, 17–21.

9. Kamenders A., Vanaga R., Kamendere E., Blumberga A., Cost-optimal energy performance level for apartment buildings in Latvia. (2014) Proceedings of the 27th International Conference on Efficiency, Cost, , Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2014.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Kamendere E., Žogla G., Kamenders A., Ikaunieks J., Rochas C. Analysis of mechanical ventilation system with heat recovery in renovated apartment buildings. (2014) Energy Procedia, 72, 27–33.
2. Kamendere E., Zandeckis A., Kamenders A., Ikaunieks J., Rochas C., Mechanical ventilation with heat recovery system in renovated apartment buildings. (2014) Agronomy Research, 12, 491–498.

Zinātniskās konferences

1. Biseniece E., Freimanis R., Purviņš R., Grāvelsiņš A., Pumpurs A., Blumberga A., Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation. (2018) *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2017*, Latvia, Riga, May 10–12, 2017.
2. Purviņš R., Kamendere E., Blumberga A., Laboratory investigation of Latvian historic brick and measurements of water movement in historic masonry walls. (2017) *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2016*, Latvia, Riga, October 12–14, 2016.
3. Kašs K., Blumberga A., Blumberga D., Žogla G., Kamenders A., Kamendere E. Pre-assessment method for historical building stock renovation evaluation. (2017) *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2016*, Latvia, Riga, October 12–14, 2016.
4. Kamendere E., Grava L., Zvaigznītis K., Kamenders A., Blumberga A. Properties of bricks and masonry of historical buildings as a background for safe renovation measures. (2016) *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2015*, Latvia, Riga, October 14–16, 2015.
5. Blumberga A., Kašs K., Kamendere E. A review on Latvian Historical Building Stock with Heavy Walls. (2016) *international Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2015*, Latvia, Riga, October 14–16, 2015.
6. Kamendere E., Žogla G., Kamenders A., Ikaunieks J., Rochas C. Analysis of mechanical ventilation system with heat recovery in renovated apartment buildings. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2014*, Latvia, Riga, October 14–16, 2014.
7. Kamendere E., Zandeckis A., Kamenders A., Ikaunieks J., Rochas C., Mechanical ventilation with heat recovery system in renovated apartment buildings. *5th International Conference “Biosystems Engineering 2014”* Tartu, Estonia, May 08–09, 2014.

8. Kamenders A., Vanaga R., Kamendere E., Blumberga A., Cost-optimal energy performance level for apartment buildings in Latvia. 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2014, Abo Akademi UniversityTurku, Finland. June 15–19, 2014.

Monogrāfijas

1. Blumberga, A., Blumberga, D., Biseniece, E., Kamenders, A., Kašs, K., Vanaga, R., Žogla, G. Ēku energoefektivitāte: vakar, šodien un rīt. Rīga: RTU Izdevniecība, 2017. 352 lpp. ISBN 978-9934-10938-6.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā ir deviņas tematiski vienotas zinātniskās publikācijas. Publikācijas ir prezentētas vairākās starptautiskās zinātniskajās konferencēs. Tās pieejamas zinātniskajās informācijas datubāzēs un starptautiski indeksētās datubāzēs.

Promocijas darbā ir trīs daļas: literatūras apskats; pētījumu metodika; rezultātu un secinājumu nodaļa. Darbs ietver trīs galvenās tēmas: 1) ēku energoefektivitāte, vēsturisko ēku saglabāšana un to enerģijas patēriņa samazināšana; 2) ēkās izmantotie būvizstrādājumi un to ietekme uz higrotermiskajiem procesiem konstrukcijās; 3) no iekšpuses siltinātu konstrukciju higrotermiskā uzvedība reālās ēkās.

Promocijas darba ievadā norādīts tā mērķis un galvenie uzdevumi mērķa sasniegšanai, zinātniskā un praktiskā nozīme, kā arī pārskats par publicēto rezultātu aprobāciju dažādās zinātniskajās konferencēs. Darba ievaddaļā uzskaitītas arī citas publikācijas un monogrāfija, kas attiecas uz darba autores veikumu ēku energoefektivitātes jomā.

Darba pirmajā nodaļā iekļauts literatūras apskats par promocijas darbā izklāstītajām tēmām, iezīmējot galvenās problēmas un tēmas nozīmīgumu. Otrajā nodaļā aprakstītas pētījumu metodes. Trešajā nodaļā prezentēti pētījumu rezultāti par ilgtermiņa mērījumiem no iekšpuses siltinātās vēsturiskajās ēkās, dinamiskajiem aprēķina modeļiem un savstarpējo rezultātu korelāciju. Darba noslēgumā doti secinājumi, atbildot izvirzītajām hipotēzēm.

Promocijas darba literatūras sarakstā ir 77 nosaukumi.

1. PĒTĪJUMA METODIKA

1.1. Priekšizpēte

Sākotnējā ēku apskate jeb priekšizpēte iekļauj ēku konstrukciju tehnisko novērtējumu, esošo bojājumu novērtējumu, mitruma satura analīzi būvkonstrukcijās, sāļu klātbūtnes un būvizstrādājumu īpašību, kas nepieciešamas būvkonstrukcijās notiekošo higrotermisko procesu aprakstam, noteikšanu.

Papildus šajā nodaļā iekļauts laboratorijas apstākļos veikts eksperiments, analizējot higrotermiskos procesus no iekšpuses siltinātā vēsturisko ķieģeļu mūrī.

Tehniskais ēku novērtējums un būvizstrādājumu īpašības

Lai pilnībā novērtētu ēkas tehnisko stāvokli, var izmantot novērtējuma skalu no 0 līdz 6, kas redzama 1.1. tabulā. Tā ir metode, kas adaptēta tieši vēsturisko ēku tehniskajai apsekošanai. Apskatot ēkas dabā, ir iespējams novērtēt katra konstatētā konstrukciju bojājuma nozīmīgumu, piešķirot tam noteiktu punktu skaitu jeb vērtējumu, kā norādīts 1.1. tabulā. Ņemot vērā kopējo iegūto punktu skaitu, iespējams salīdzināt dažādas ēkas attiecībā uz būvēm izvirzītajām pamatprasībām, it īpaši mehānisko stiprību un stabilitāti.

1.1. tabula

Būvkonstrukciju tehniskā stāvokļa sešu punktu novērtējuma skala

Vērtējums	Stāvoklis	Apraksts
6	Ļoti slikts	Nopietni konstrukciju bojājumi, nepieciešama pilnīga vai daļēja to nomaiņa
5	Slikts	Nepieciešama apjomīga konstrukciju atjaunošana, lai nodrošinātu to nestspēju un funkciju pildīšanu
4	Vidējs	Nepieciešami daži atjaunošanas darbi
3	Apmierinošs	Nelieli bojājumi, kuriem nepieciešama mērķēta apkope
2	Labs	Nelieli bojājumi, kuriem pietiek ar preventīvu ikdienas apkopi
1	Ļoti labs	Nolietojuma pazīmes
0	Ideāls	Nav bojājumu, nav nolietojuma pazīmju

Lai iegūtu padziļinātu priekšstatu par ēkas būvkonstrukciju tehnisko stāvokli, it īpaši par bojājumiem, kas saistīti ar paaugstinātu mitruma saturu būvkonstrukcijās, iespējams veikt ēkas būvkonstrukciju nesagraujošos mitruma satura mērījumus. Šim mērķim var izmantot dielektriskos mitruma satura mērītājus *Trotec T600* un *Trotec T650*, ar kuru palīdzību var provizoriski noteikt paaugstinātu mitruma saturu būvkonstrukcijā 40 mm (*T600*) un 300 mm (*T650*) dziļumā. Iekārtu darbības pamatā ir mikroviļņu metode, kas ir viena no dielektriskā mitruma satura noteikšanas metodēm. Iegūtie rādījumi nav kvantitatīvi, bet indikatīvi, kas sniedz uzskatāmu priekšstatu par mitruma pārnesei procesiem būvkonstrukcijās. Mēriekārtas parāda, kad konstrukcija ir uzskatāma par sausu (skaitliskais rādītājs mazāks par 40), mitru (40–80) un slapju (vairāk nekā 80). Mērījumus var veikt gan no iekšpuses, gan no ārpuses.

Pirmajiem mērījumiem tika izvēlētas 10 vēsturiskās ēkas, kas celtas no 1890. līdz 1940. gadam. Tās būvētas no māla ķieģeļiem un atrodas Rīgā. Šīm ēkām nesagraujošie mitruma satura mērījumi tika veikti divas reizes – ziemā (februārī) un pavasarī (maijā). Vēlāk padziļinātākai mitruma satura pārneses procesu analīzei tika izvēlētas vēl trīs vēsturiskās ēkas, kuru ārsienu mērījumi tika veikti ar divu nedēļu intervālu piecu mēnešu garumā.

Lai pilnībā novērtētu nesagraujošo mitruma mērījumu rezultātus vienā no trijām pilotprojekta ēkām, tie tika salīdzināti ar rezultātiem, kas iegūti, izmantojot sagraujošo mitruma mērījumu metodi. Sagraujošā metode ietver parauga – ķieģeļu pulvera – iegūšanu, to izurbjot, un mitruma satura noteikšanu, pulveri sverot pirms un pēc žāvēšanas.

Lai noteiktu vēsturisko būvizstrādājumu īpašības, apjomīgs paraugu skaits tika testēts laboratorijā. Testēšanas metode un galvenās noteiktās īpašības apkopotas 1.2. tabulā. Papildus Eiropas un Latvijas nacionālajos standartos aprakstītajām metodēm tika izmantotas arī citas metodes. Galvenokārt tās ir pielāgotas Eiropas standartu metodes, ko ir izstrādājuši Drēzdenes Tehniskās universitātes pētnieki. Paraugi ņemti no dažādām vēsturiskajām ēkām. Atkarībā no konkrētās testa metodes katras īpašības noteikšanai sagatavotas viena parauga 3–22 vienības. Tādā veidā var iegūt pilnvērtīgu informāciju par konkrēto izstrādājumu, tā īpašību izkliedi un nevienmērīgumu, kas īpaši raksturīgs vēsturiskajās ēkās izmantotajiem būvizstrādājumiem.

1.2. tabula

Vēsturisko būvizstrādājumu raksturlielumi un testēšanas metodes

Raksturlielums	Apzīmējums (mērvienība)	Testēšanas metode
Īpašības ēkas tehniskā stāvokļa novērtējumam:		
Spiedes stiprība	N/mm ²	EN 772-1+A1:2015 (sagraujošā) CKБ СТРОИПРИБО ИИПС МГ 4.03 mēriekārta (nesagraujošā)
Blīvums	m ³	EN 772-13:2000
Ūdens absorbcija	%	EN 772-21:2011
Salizturība	cikli	LVS 405:2002
Šķīstošo sāļu saturs		Papīra indikatoru tests
Īpašības higrtermiskās uzvedības novērtējumam		
Tilpuma blīvums	ρ_b (kg/m ³)	Nosakot izmēru un svaru
Atvērtā porainība	Θ_{por} (m ³ /m ³)	Aprēķins, ņemot vērā blīvumu
Siltumvadītspēja	λ_{dry} (W/(m K))	Siltumplūsmas mērījumi
Īpatnējā siltumietilpība	c (J/(kg K))	Kalorimetra eksperiments
Tvaika difūzijas koef. (<i>dry-cup</i>)	μ_{dry} (–)	<i>Dry-cup</i> mērījumu metode (EN 12572)
Tvaika difūzijas koef. (<i>wet-cup</i>)	μ_{wet} (–)	<i>Wet-cup</i> mērījumu metode (EN 12572)
Ūdens uzsūces koef.	A_w (kg/m ² √s)	Ūdens uzsūces eksperiments (EN 15148)
Kapilārais piesātinājums	Θ_{cap} (m ³ /m ³)	Pēdējā iegūtā vērtība no ūdens uzsūces eksperimenta (EN 15148)
Sorbcijas izotermas	$\Theta_l(\varphi)$ (m ³ /m ³)	Eksikators/desikators (EN 12571)

Laboratorijas apstākļos siltināta mūra siena

Laboratorijā tika uzbūvēts mūris (25 cm × 28 cm × 51 cm) no māla ķieģeļiem, kas ņemti no nojauktas vēsturiskās ēkas O. Vācieša ielā 6, Rīgā. Ēka būvēta ap 1900. gadu. Mūris nosiltināts ar četriem dažādiem siltumizolācijas materiāliem: ekstrudēto putupolistirolu (EPS), kokšķiedras plātni, minerālvati un granulēto aerogelu. Mērījumi veikti sienas konstrukcijai gan ar tvaika barjeru, gan bez tās. Pavisam izmantotas divas dažādas tvaika barjeras (tvaika pretestība 4,5 m un 12 m), iekšpuses apdarē izmantots ģipškartons. Siltinātais mūris novietots starp divām klimata kamerām, no kurām viena simulēja iekštelpu klimatu, savukārt otra – āra klimatu. Siltumizolācijas materiālu biezums izvēlēts tāds, lai sienas siltumcaurlaidības koeficients būtu 0,35 W/(m²K). Eksperiments veikts divas reizes dažādos apstākļos (1.3. tab.). Temperatūra un relatīvais mitrums mērīts starp siltumizolācijas slāni un mūri (ķieģeļa viduspunktā), kā arī abās klimata kamerās. Kopumā izmantoti astoņi temperatūras sensori un pieci relatīvā mitruma sensori. Mērījumu laika solis – 1 minūte.

1.3. tabula

	Eksperimenta apstākļi	
	1. tests	2. tests
Pirmapstrādes laiks, dienas	10	8
Pirmapstrādes temperatūra, relatīvais mitrums	+23 °C / 25 %	Iekštelpu apstākļi
Testa ilgums, dienās	22	23
Iekštelpu temperatūra, relatīvais mitrums	No +19,5 °C līdz +20,5 °C / 53–56 %	No +19,5 °C līdz +20,5 °C / 53–56 %
Āra temperatūra, relatīvais mitrums	No –0,5 °C līdz +0,5 °C / 80–90 %	No +2,5 °C līdz +3,5 °C / 80–90 %

Izmantojot dinamisko modelēšanas programmu *DELPHIN*, izveidots divdimensiāls modelis, ar kura palīdzību analizēta siltinātās sienas higrotermiskā uzvedība. Dinamiskie modeļi izveidoti trīs siltināšanas sistēmām, jo granulētais aerogels nav atrodamas *DELPHIN* būvizstrādājumu datubāzē. Pirms eksperimenta ķieģeļiem noteikts blīvums un atvērtā porainība. Šie divi parametri izmantoti kā indikatīvas vērtības, lai *DELPHIN* datubāzē izvēlētos aprēķina modelim piemērotus ķieģeļus.

1.2. Enerģijas patēriņš

Enerģijas patēriņu ēkā var noteikt aprēķinu ceļā, balstoties Eiropas standartos noteiktajā aprēķina metodikā un nacionālajā regulējumā vai izmantojot kādu no pieejamajiem dinamiskajiem modelēšanas rīkiem.

Priekšizpētes laikā desmit dažādām vēsturiskajām ēkām veikts energoaudits, lai noteiktu, kāda ir korelācija starp ēkas enerģijas patēriņu un tās tehnisko stāvokli, kas novērtēts ar 1.1. apakšnodalā aprakstīto metodi. Savukārt dinamiskā modelēšanas programma *TRNSYS*

izmantota, lai noteiktu potenciālo enerģijas patēriņa ietaupījumu divās vēsturiskajās ēkās, kurās arī veikti ilgtermiņa mērījumi, lai analizētu būvkonstrukcijas higrotermisko uzvedību.

Visām trīs pilotprojekta ēkām noteikts enerģijas patēriņš trīs scenārijiem:

- 1) ēka pirms renovācijas, bez iekšējā siltumizolācijas slāņa;
- 2) ēka ar iekšējo siltumizolācijas slāni;
- 3) ēka ar pilnu renovāciju (sienu un pārsegumu siltināšana, logu nomaiņa).

Gan veicot ēkas energoauditu, gan veidojot aprēķina modeli, ir daudz nezināmu parametru, kas ir būtiski aprēķinos, tāpēc jāizdara dažādi pieņēmumi gan par iekštelpu klimatu (temperatūra, relatīvais mitrums), gan ventilāciju, gan siltuma ieguvumiem un būvkonstrukciju īpašībām u. c.

1.3. No iekšpuses siltinātu konstrukciju higrotermiskā uzvedība

Promocijas darbā apskatītas trīs vēsturiskās ēkas (1.1. att.). Izvēlētās ēkas atšķiras gan pēc paredzētā lietojuma, gan būvapjoma, gan ārsienu materiāla. Pārskats par ēkām apkopots 1.4. tabulā.



1.1. att. a) 1. ēka; b) 2. ēka; c) 3. ēka.

Pirmā un otrā ēka ir pilnībā renovētas – ār sienām uzklāta siltumizolācija no iekšpuses, nomainīti logi, siltināti pārsegumi, mainīta apkures sistēma. Trešās ēkas renovācijas pabeigšana finansiālo grūtību dēļ pētījuma laikā tika nepārtraukti atlikta, un īpašnieki paspēja nosiltināt tikai virszemes stāvu ār sienas no iekšpuses un pagraba sienas no ārpuses.

1.4. tabula

Pilotprojekta ēku pārskats						
	Atrašanās vieta	Ēkas veids	Būvniecības gads	Apkurināmā platība, m ²	Tilpums, m ³	Renovācijas gads
1. ēka	Maskavas iela 8, Rīga	Cits	1930	64,8	252,7	2013
2. ēka	Seces pagasts, Aizkraukles novads	Privātmāja	1893	339	870,34	2006 un 2015
3. ēka	O. Vācieša iela 6, Rīga	Izglītības iestāde	1910	2410	9142	2018 (daļēji)

Visās trīs ēkās mērījumi veikti divām ārsienu konstrukcijām, iespēju robežās izvēloties ziemeļu pusi. Uzklātās iekšējās siltumizolācijas sistēmas ār sienām, kurās veikti mērījumi, detalizētāk aprakstītas 1.5. tabulā.

1.5. tabula

Pilotprojekta ēku iekšējās siltināšanas sistēmas

Ēka	Sistēma	Materiāli	Biezums, mm	Siltumvadītspējas koef. λ , W/(m K)	Aprēķinātais siltumcaurlaidības koef. U , W/(m ² K)
1. ēka	1. sistēma	Pašattīrošā krāsa <i>Lotusan</i>	–	–	0,13
		Silikātķieģelis	510	0,8	
		Vakuumizolācijas panelis	50	0,008	
		Tvaika barjera	–	–	
		Ģipškartons	25	0,21	
		Iekšējā apdare	–	–	
	2. sistēma	Pašattīrošā krāsa <i>Lotusan</i>	–	–	0,27
		Silikātķieģelis	510	0,8	
		Aerogels	50	0,018	
		Tvaika barjera	–	–	
		Ģipškartons	25	0,21	
		Iekšējā apdare	–	–	
2. ēka	1. sistēma	Dolomīts	600	2,2	0,208
		Esošais apmetums	20	0,87	
		Minerālvate	200	0,035	
		Tvaika barjera	–	–	
		Ģipškartons	12,5	0,21	
		Iekšējā apdare	–	–	
	2. sistēma	Dolomīts	600	2,2	0,211
		Esošais apmetums	20	0,87	
		Minerālvate	150	0,035	
		Tvaika barjera	–	–	
		Ģipškartons	12,5	0,21	
		Iekšējā apdare	–	–	
3. ēka	1. sistēma	Māla ķieģeļu mūris	660	0,64	0,375
		un Izlīdzinošais apmetums	10	0,87	
	2. sistēma	Minerālvate koka karkasā	50	0,035	
		Tvaika barjera	–	–	
		Ģipškartons	25	0,21	
		Iekšējā apdare	–	–	

Savukārt katrā ēkā veiktie mērījumi apkopoti 1.6. tabulā, un kā piemērs 1.2. attēlā parādīts mēriekārtu uzstādījums otrajā ēkā.

Siltumplūsmas mērījumi kopā ar temperatūras mērījumu rezultātiem izmantoti, lai noteiktu kopējo ār sienas konstrukcijas siltumcaurlaidības koeficientu (W/(m²K)). Pirmajā ēkā

siltumplūsmas mērījumi veikti sienām ar vakuumizolācijas paneli (VIP) un aerogelu, otrajā – sienām, kas siltinātas ar minerālvati (150 mm un 200 mm).

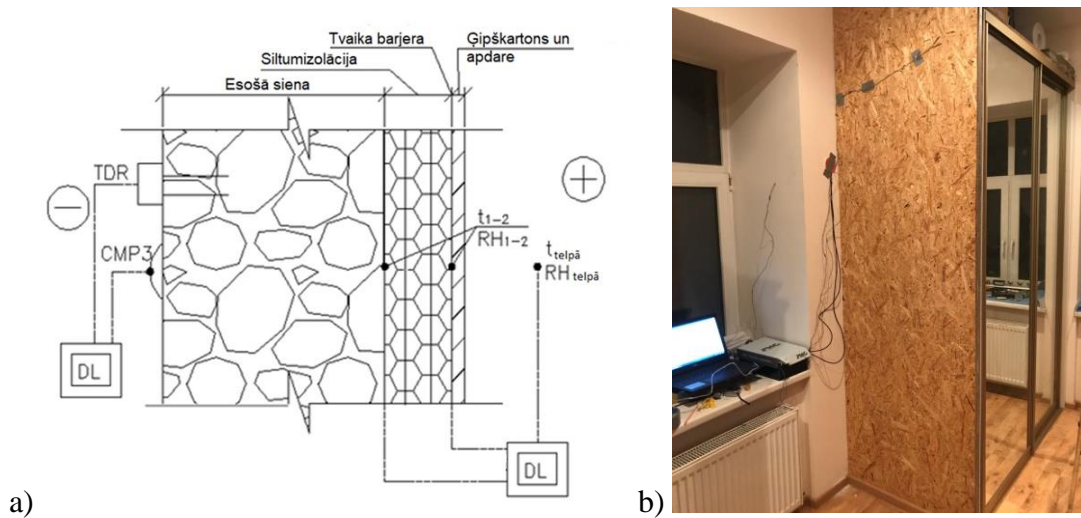
Mitruma saturs noteikts tikai otrajā ēkā, respektīvi, dolomīta mūrī 300 mm dziļumā, mērot no ārpuses.

1.6. tabula

Ilgtermiņa mērījumi pilotprojekta ēkās

	1. ēka	2. ēka	3. ēka
Temperatūra starp slāņiem	Jā	Jā	Jā
Relatīvais mitrums starp slāņiem	–	Jā	Jā
Iekštelpu temperatūra	Jā	Jā	Jā
Iekštelpu relatīvais mitrums	Jā	Jā	Jā
Ūdens saturs materiālā	–	Jā	–
Siltumplūsma	Jā	Jā	–

Mērījumu periods pirmajā ēkā bija no 2014. gada janvāra līdz novembrim, otrajā ēkā – no 2017. gada decembra līdz 2019. gada janvārim, savukārt trešajā ēkā – no 2018. gada februāra līdz novembrim.



1.2. att. a) Mēriekārtu uzstādījums otrajā ēkā (t – temperatūra; RH – relatīvais mitrums; $CMP3$ – saules radiācija, DL – datu logeris, TDR – ūdens saturs.);
b) mēriekārtu uzstādījums dzīvojamajā istabā.

Lai pilnvērtīgi novērtētu un analizētu būvkonstrukcijā notiekošos higrotermiskos procesus, pirmās un otrās ēkas sienām, kurās veikti mērījumi, programmā *DELPHIN* izstrādāts dinamisks divdimensiāls modelis.

Visos modeļos izmantoti klimata stacijas, ko uztur un apkalpo Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, klimata dati. Stacijas atrodas 4–20 km attālumā no pilotprojekta ēkām. Pirmās ēkas datormodelī iekštelpu klimatu raksturo konstanta temperatūra 20 °C un relatīvais mitrums 50 %, savukārt otrās ēkas iekštelpu klimats definēts kā mainīgs, izmantojot mērījumu

laikā iegūtās vērtības. Modeļa izejas dati ir temperatūra un relatīvais mitrums starp konstrukcijas slāņiem, kā arī uz virsmām no iekšpusēs un ārpuses.

Izmantojot korelācijas analīzi, mērījumu rezultāti salīdzināti ar datormodeļa rezultātiem, validējot izveidoto dinamisko aprēķina modeli, kas apraksta higrtermiskos procesus no iekšpusēs siltinātā sienā.

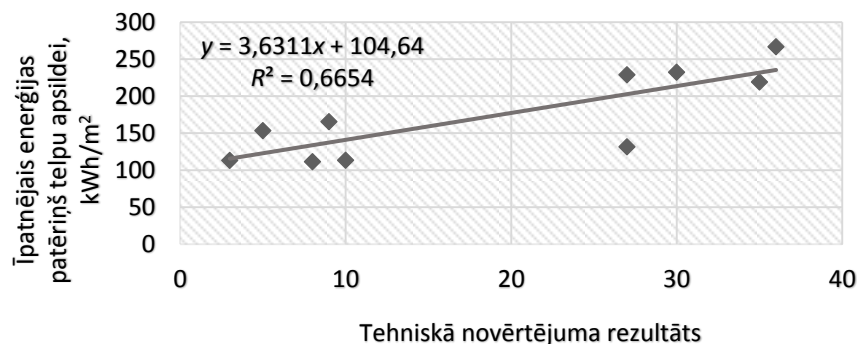
2. REZULTĀTI

2.1. Priekšizpēte

Tehniskais novērtējums un mitruma mērījumi

Dažādās Latvijas vietās apsekotas 10 ēkas, lai novērtētu to tehnisko stāvokli, un veikts energoaudits, lai noteiktu to īpatnējo enerģijas patēriņu telpu apsildei. Sešas no tām ir dzīvojamās ēkas, trīs – sabiedriskās ēkas, viena – izglītības iestāde, viena – pils. Visas ēkas ir klasificētas kā vēsturiskas ēkas, līdz ar to aizsargātas, bez iespējām mainīt fasāžu vai atsevišķu to elementu izskatu.

Lai noteiktu sakarību starp ēkas tehnisko stāvokli un enerģijas patēriņu, izmantota regresijas analīze. Iegūtais grafiks redzams 2.1. attēlā.



2.1. att. Īpatnējā enerģijas patēriņa atkarība no ēkas tehniskā stāvokļa.

Izmantojot piedāvāto tehniskā stāvokļa novērtējuma metodi, ir iespējams identificēt un novērtēt galvenās problēmas. Primāri jārenovē tās ēkas, kurām ir augstāks skaitliskais novērtējums un lielāks īpatnējais enerģijas patēriņš. Šīs ēkas ir sliktā tehniskā stāvoklī, kas turpina pasliktināties. Ņemot vērā lielo siltumenerģijas ietaupījuma potenciālu, renovāciju ir iespējams padarīt rentablāku.

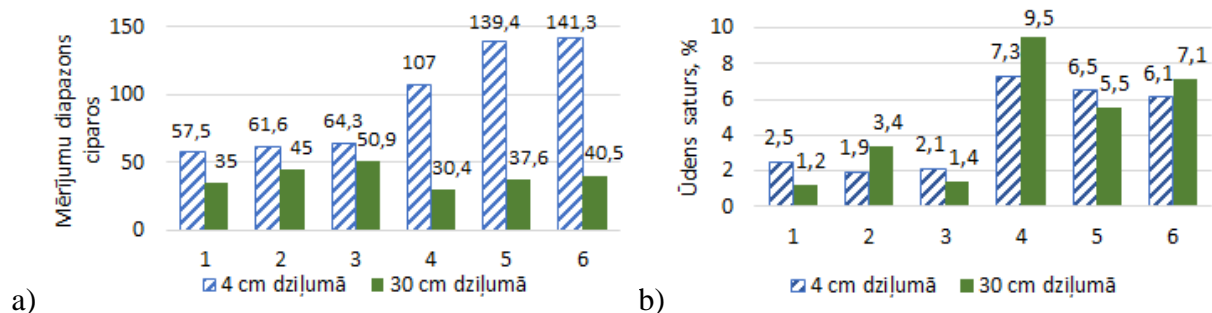
Visām apsekotajām ēkām konstatēti paaugstināta mitruma izraisīti bojājumi. Piemēri bojājumiem, ko izraisa paaugstināts mitrums ēku būvkonstrukcijās, redzami 2.2. attēlā. Starp tiem ir gruntsūdens iekļūšana konstrukcijā, daļējs mūra sabrukums, bioloģiskā degradācija un sāļu eflorescence.



2.2. att. Paaugstināta mitruma izraisīti bojājumi vēsturisko ēku mūros.

Nesagraujošo mitruma mērijumu rezultāti mūrī ļoti labi atspoguļo mitruma migrāciju no iekšpuses uz āru, virzienā no apakšas uz augšu. Parasti mitrums samazinās pa diagonāli, uz augšu, uz mūra stūri. Vērtējot rezultātus ēkas mērogā, ēkas stūros mitruma līmenis parasti ir zemāks nekā centrālajā daļā, un atvērtajos stūros novērojamas lielākas svārstības nekā malās, kas savienotas ar citām ēkām.

Pirmajā pilotprojekta ēkā nesagraujošo mitruma mērijumu rezultāti rāda, ka dziļākie sienas slāņi (40 mm no iekšējās virsmas) bija mitri un netālu no zemes pat slapji, savukārt siena 300 mm dziļumā (no iekšpuses) – sausa, izņemot divus mitrus punktus (2.3. a att.).

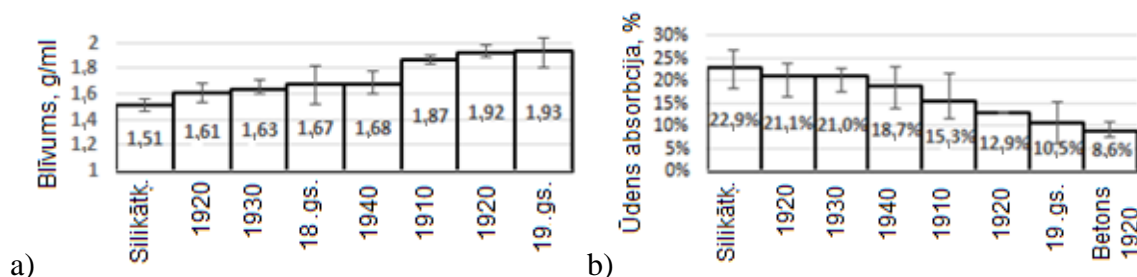


2.3. att. Mitruma mērijumi 1. ēkā: a) nesagraujošie mērijumi ar *Trotec T600* un *Trotec T650*; b) sagraujošo mitruma mērijumu rezultāti.

Salīdzinot nesagraujošo mērijumu rezultātus ar sagraujošo mērijumu rezultātiem, 40 mm dziļumā tendence paliek nemainīga – mitruma saturs pirmajos trīs punktos ir divas, trīs reizes mazāks nekā sienas apakšā (4., 5. un 6. mērijuma punkts). Analizējot mērijumus 300 mm dziļumā, nav vērojama nekāda sakarība starp nesagraujošo un sagraujošo metožu rezultātiem. Tas skaidrojams ar paraugu ņemšanai izmantoto metodi – urbšanu. Urbja temperatūra urbšanas laikā pārsniedz 150 °C, kas ir pietiekami, lai daļu no ķieģeļu putekļu mitruma izžāvētu pat pirms žāvēšanas krāsnī.

Vēsturisko būvizstrādājumu īpašības

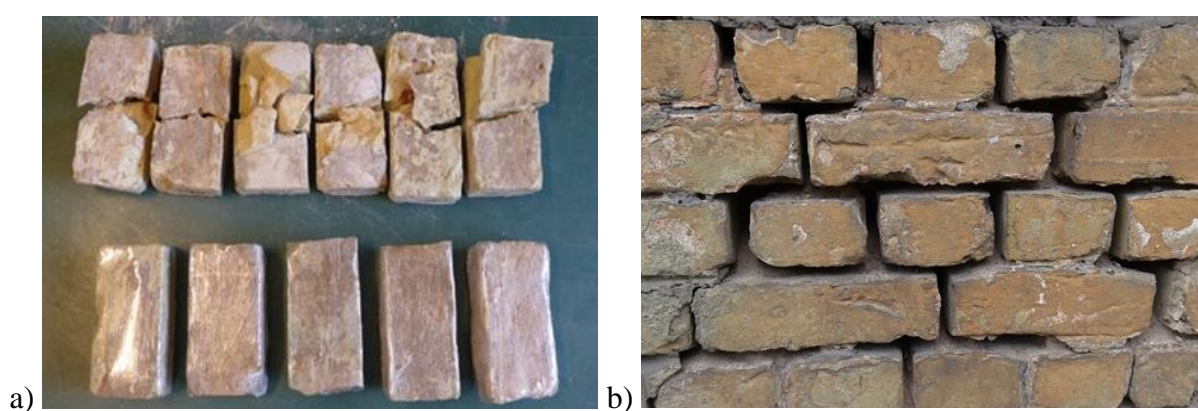
Vēsturiskajās ēkās izmantoto būvizstrādājumu (ķieģeļu, akmeņu) testu rezultāti uzrāda lielu īpašību izkliedi. Piemēram, blīvums grupai ķieģeļu svārstās no 1,51 g/mL līdz 1,93 g/mL, savukārt ūdens absorbcija – no 8,6 % līdz 22,9 %. Ūdens absorbcijas rezultātu tendence ir pretēja blīvuma rezultātiem (2.4. att.), kas skaidrojams ar ciešo sakarību starp ūdens uzsūci un atvērtu porainību, kas savukārt ietekmē blīvumu.



2.4. att. Testu rezultāti: a) blīvums; b) ūdens absorbcija.

Viena laika posma būvizstrādājumiem ir dažādas īpašības, un arī paraugi, kas izņemti no vienas ēkas, uzskatāmi parāda vēsturisko materiālu neviendabīgumu. Piemēram, spiedes stiprība četriem no vienas ēkas mūra izņemtiem paraugiem bija robežās no 10,4 MPa līdz 23,4 MPa.

Veicot salizturības testus, ķieģeļi, kuru ūdens piesātinājumu bija 20 % un mazāk, pat pēc 15 sasaldēšanas un atkausēšanas cikliem neuzrādīja nekādus bojājumus. Savukārt ķieģeļiem, kuru ūdens piesātinājums bija 36 %, plaisas sāka parādīties, sākot no otrā cikla, un līdz sestajam ciklam plaisas konstatētas visiem paraugiem. Apstiprinājās arī citos pētījumos konstatētais, ka silikātķieģeļi ir īpaši jutīgi pret sala iedarbību, jo plaisas parādījās jau pirmajā sasaldēšanas un atkausēšanas ciklā, un pēc astotā cikla visi silikātķieģeļu paraugi bija sadalījušies. 2.5. a attēlā redzami ķieģeļi pēc 15 sasaldēšanas un atkausēšanas cikliem: augšējā rindā ir ķieģeļi ar ūdens piesātinājumu 36 %, apakšējā – ar piesātinājumu 20 %, kuriem nav nekādu acīmredzamu bojājumu.



2.5. att. a) Ķieģeļi pēc 15 sasaldēšanas un atkausēšanas cikliem: augšējā rindā piesātināti ķieģeļi (36 %), apakšējā ķieģeļi ar ūdens piesātinājumu 20 % un mazāk;
b) sulfātu klātbūtnes radīts kritisks mūrjavas zudums mūrī.

Trīs šķīstošo sāļu (nitrātu, hlorīdu un sulfātu) klātbūtne konstatēta vairāk nekā pusei pārbaudīto paraugu. Nitrātu klātbūtne parasti ir saistīta ar notekūdeņu infiltrāciju vai apbedījumu vietu tuvumu, savukārt sulfāti bieži sastopami, pateicoties atmosfēras piesārņojumam, kas īpaši raksturīgi pilsētu teritorijās. Visas ēkas, no kurām ņemti konkrētie ķieģeļu paraugi, atrodas Rīgas vecajā daļā, netālu no tirgus vai Daugavas, tātad – vietās ar augstu gruntsūdens un piesārņojuma līmeni. Lielākā sulfātu koncentrācija konstatēta paraugā, kas ņemts no ēkas, kurai nesagraujošie mitruma mērījumi uzrādīja augstāku mitrumu, salīdzinot ar citām pārbaudītajām ēkām. Paraugā arī konstatēta gan nitrātu, gan hlorīdu klātbūtne. Šie sāļu testu rezultāti kopā ar ēkas apskati apstiprina citos pētījumos minēto, ka sulfāti mūrī visvairāk ietekmē mūrjavu. 2.5. b attēlā redzams konkrētās ēkas, no kuras ņemts paraugs, mūris, kurā konstatēts kritisks mūrjavas zudums. Vēl lielāki mūrjavas zudumi izraisīs mūra sabrukumu.

Dolomīta paraugi no otrās pilotprojekta ēkas testēti laboratorijā, lai noteiktu tā galvenās īpašības, kas nepieciešamas higrotermisko procesu dinamiskā modeļa izveidei. Šīs īpašības ir blīvums, īpatnējā siltumietilpība, porainība, kapilārais piesātinājums, ūdens tvaika pretestības koeficients, ūdens uzsūces koeficients un mitruma akumulācija. Testēšanas rezultāti apkopoti

2.1. un 2.2. tabulā. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, sagatavots papildinājums *DELPHIN* modelēšanas programmas būvizstrādājumu datubāzei, kas vēlāk izmantots aprēķina modelī.

2.1. tabula

Dolomīta īpašības

Raksturlielums	Apzīmējums (mērvienība)	Vidējā vērtība	Standarta novirze	Zemākā vērtība	Augstākā vērtība
Blīvums	ρ_b (kg/m ³)	2346,5	447,8	1696,8	2949,5
Atvērtā porainība	Θ_{por} (m ³ /m ³)	0,1602	0,0224	0,1299	0,2008
Siltumvadītspēja	λ_{dry} (W/(m K))	2,0478	0,0108	2,0362	2,0574
Siltumietilpība	c (J/(kg K))	779,2842	5,1457	774,3023	784,5794
Tvaika difūzijas koef. (<i>dry-cup</i>)	μ_{dry} (-)	44,14	29,18	26,67	77,83
Tvaika difūzijas koef. (<i>wet-cup</i>)	μ_{wet} (-)	2113,88	943,36	1192,82	3078,06
Ūdens uzsūces koef.	A_w (kg/m ² √s)	0,0599	0,0110	0,0477	0,0691
Kapilārais piesātinājums	Θ_{cap} (m ³ /m ³)	0,1079			

2.2. tabula

Dolomīta sorbcijas izoterma

φ , %	t , °C	$\Theta_l(\varphi)$, m ³ /m ³			
		Vidējā vērtība	Standarta novirze	Zemākā vērtība	Augstākā vērtība
84,7	23	0,009 524	0,000 570	0,008 907	0,010 26
53,5	23	0,004 830	0,000 284	0,004 553	0,005 14
32,9	23	0,001 787	0,003 670	0,000 000	0,009 26

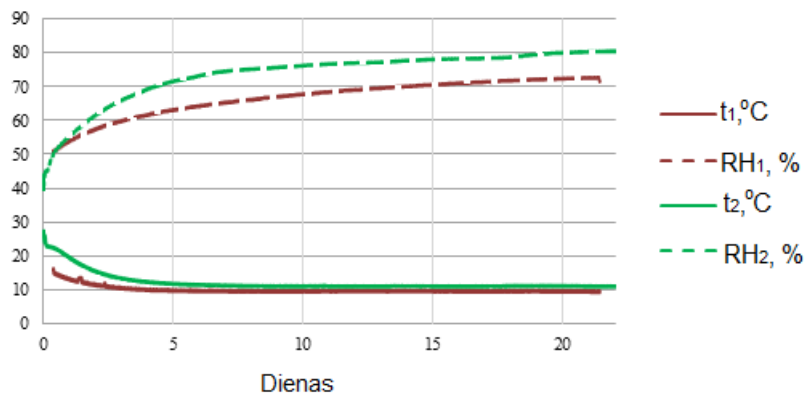
Laboratorijas apstākļos siltināta mūra siena

Pirmā testa rezultāti parādīja, ka neatkarīgi no izmantotā siltumizolācijas materiāla veida visstraujākais relatīvā mitruma pieaugums notiek pirmajās piecās dienās, un tas lēnām samazinās ap desmito dienu, sasniedzot līdzsvara mitrumu. Temperatūra nostabilizējas piektajā dienā neatkarīgi no siltumizolācijas veida.

Testi veikti gan sienas konstrukcijai ar tvaika barjeru, gan bez tās. Relatīvais mitrums starp mūri un kokšķiedras plātni ir augstāks konstrukcijā bez tvaika barjeras, sasniedzot 80 %, savukārt ar tvaika barjeru – 74 % (2.6. att. līkne RH_1). Novērojams arī tas, ka konstrukcijā bez tvaika barjeras relatīvā mitruma pieaugums notiek straujāk nekā ar tvaika barjeru. Sākotnējā abu testu temperatūra ir atšķirīga, taču abos gadījumos tā nostabilizējas piecu dienu laikā.

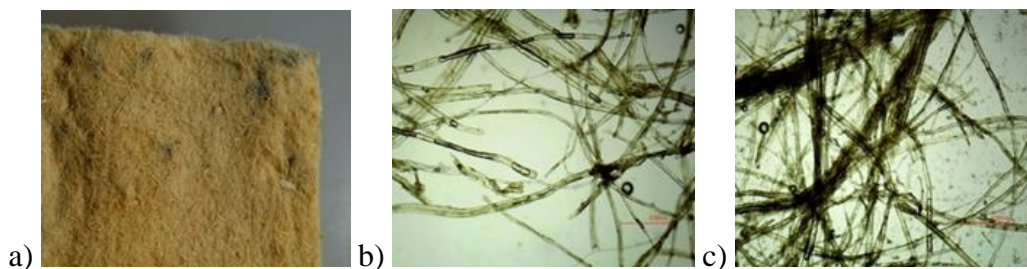
Abos testos (ar divām dažādām tvaika barjerām) minerālvate un ekstrudētais putupolistirols (EPS) uzrāda tādu pašu uzvedību attiecībā uz relatīvā mitruma pieaugumu kā kokšķiedru siltumizolācija. Izteikti straujš pieaugums vērojams pirmajās divās dienās, pēc tam pieaugums lēnām stabilizējas, sasniedzot 83,5 % minerālvates gadījumā (abos testos) un 80 % EPS gadījumā (abos testos). Ar aerogelu siltinātā konstrukcijā straujš relatīvā mitruma

pieaugums vērojams pirmajās divās dienās, nākamo 20 dienu laikā pieaugot līdz 79%, ja ir tvaika barjera, un līdz 74%, ja tvaika barjeras nav.



2.6. att. Izmērītā temperatūra un relatīvais mitrums starp mūri un kokšķiedras plātņi: t_1 , RH_1 – konstrukcijā ar tvaika barjeru; t_2 , RH_2 – bez tvaika barjeras.

Pelējuma veidošanās ir viena no visbiežāk sastopamajām problēmām, kas saistīta ar sienu siltināšanu no iekšpuses, jo veidojas labvēlīgi higrotermiskie procesi. Pelējuma attīstībai labvēlīgi apstākļi ir jau no +10 °C temperatūras un 76 % relatīvā mitruma, ja šie apstākļi saglabājas pietiekami ilgu laiku. Abos testos visiem siltumizolācijas materiālu veidiem temperatūra stabilizējās ap +10 °C, un relatīvais mitrums sasniedza 76 % un vairāk. Pēc pirmā testa beigām, tas ir, pēc 22 dienām, atverot konstrukciju, uz kokšķiedras plātnes stūra konstatēts acīmredzams pelējums (2.7. a att.). 2.7. b un c attēlā redzama pietuvināta kokšķiedra attiecīgi ar pelējumu un bez tā. Pēc otrā testa pelējums konstatēts arī kokšķiedru plātnes vidū. Pārējiem izolācijas materiāliem pelējums netika konstatēts.



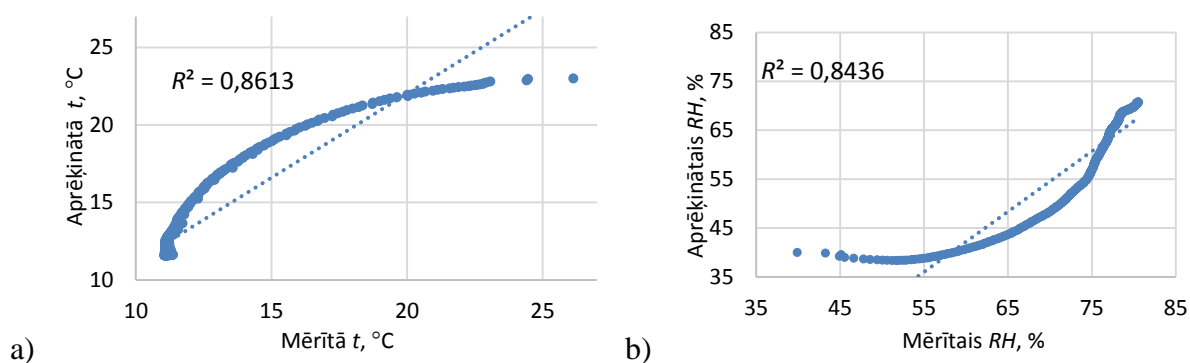
2.7. att. a) Pelējums uz kokšķiedru plātnes pēc pirmā testa; b) pietuvināta kokšķiedra bez pelējuma; c) kokšķiedra ar pelējumu.

DELPHIN modelī gan relatīvais mitrums, gan temperatūra pieaug lēni un savu līdzsvara stāvokli sasniedz tikai 14. dienā minerālvates, 17. dienā – EPS, 21. dienā – kokšķiedru plātnes gadījumā. Konstrukciju paraugi nostabilizējas dažādā temperatūrā: 10,37 °C – minerālvate, 10,44 °C – EPS, 11,55 °C – kokšķiedru plātne. Atšķiras arī līdzsvara relatīvais mitrums: 39,1 % – minerālvatei, 43,9 % – EPS, 71,4 % – kokšķiedru plātnei. Līknes kokšķiedru plātnes gadījumā redzamas 2.9. attēlā (t aprēķins (pirms), RH aprēķins (pirms)).

Korelācijas analīze parāda apmierinošus rezultātus temperatūras gadījumā, ņemot vērā, ka korelācijas koeficients R^2 svārstās no 0,81 (EPS) līdz 0,86 (kokšķiedras plātne). Relatīvā mitruma gadījumā kokšķiedru plātnes arī uzrāda apmierinošu korelāciju starp izmērīto un

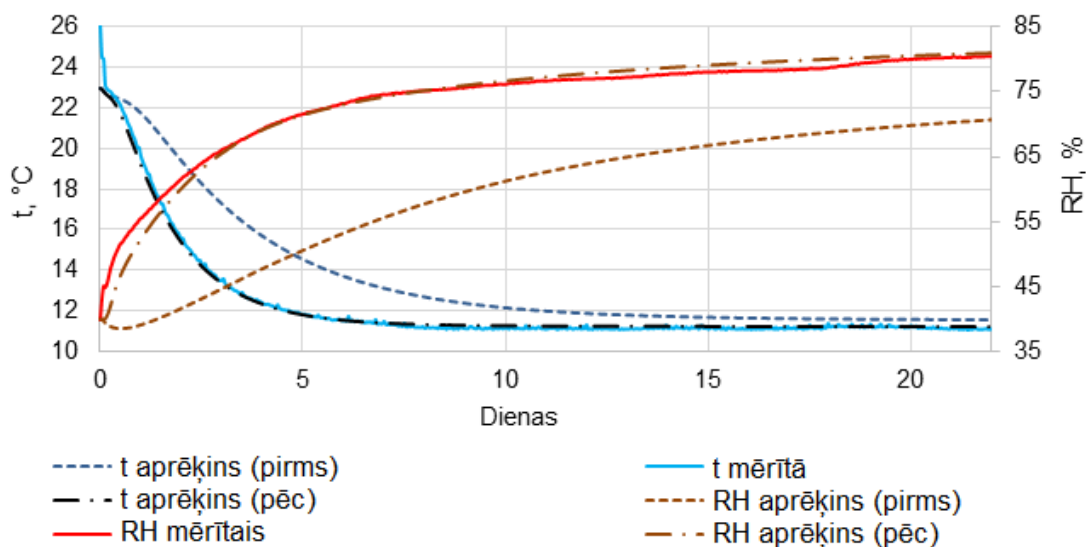
DELPHIN modelī aprēķināto relatīvo mitrumu ($R^2 = 0,84$), taču labu korelāciju nesasniedz EPS ($R^2 = 0,59$) un minerālvate ($R^2 = 0,54$). Korelācijas analīzes piemērs redzams 2.8. attēlā.

Izmantojot parametru analīzi, uzlabota *DELPHIN* aprēķina modeļa atbilstība mērījumiem datiem. Tas izdarīts, modificējot modelī ievadītos ķieģeļu, javas un siltumizolācijas materiālu parametrus. No *DELPHIN* pieejamās būvizstrādājumu datubāzes izvēlēto siltumizolācijas materiālu siltumvadītspēja, sausā materiāla blīvums un ūdens tvaika difūzijas koeficienta vērtības nomainītas uz tādām, kādas deklarējis šo materiālu ražotājs. Ķieģeļiem un javai izmainītas šādu īpašību vērtības: siltumvadītspēja, īpatnējā siltumietilpība, ūdens uzsūces koeficients un sākotnējais relatīvais mitrums. Tās ir īpašības, kas ķieģeļu paraugiem iepriekš netika noteiktas.



2.8. att. Korelācija starp mērījumu un modeļa rezultātiem: a) temperatūra; b) relatīvais mitrums (RH).

2.9. attēlā redzami izmērītie un *DELPHIN* aprēķinos iegūtie rezultāti sienas konstrukcijai ar kokšķiedras siltumizolāciju un bez tvaika barjeras pirms un pēc būvizstrādājumu īpašību maiņas aprēķina modelī. Pēc būvizstrādājumu īpašību maiņas rezultāti sakrīt ar mērījumiem datiem gan temperatūras, gan relatīvā mitruma gadījumā.



2.9. att. Temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas starp mūri un kokšķiedras siltumizolāciju bez tvaika barjeras: izmērītie un aprēķinātie dati pirms un pēc būvizstrādājumu īpašību maiņas.

Veiktie mērījumi laboratorijas apstākļos un modelēšanas rezultāti uzskatāmi parādīja, ka sākotnējais konstrukciju mitruma līmenis un sienās izmantoto būvizstrādājumu precīzs īpašību raksturojums ir ļoti būtisks, veicot higrtermisko procesus modelēšanu.

2.2. Enerģijas patēriņš

Pirms padziļinātas ēku izpētes un mērījumu veikšanas visām trīs pilotprojekta ēkām aprēķināts to īpatnējais enerģijas patēriņš, lai prognozētu potenciālo ietaupījumu. Rezultāti apkopoti 2.3.–2.5. tabulā. Otrais un trešais scenārijs salīdzināts ar pirmo, tātad ar ēku, kāda tā sākotnēji uzbūvēta, bez jebkādiem uzlabojumiem.

2.3. tabula

Aprēķinātais enerģijas patēriņš 1. ēkā

	Kopējais, kWh	Uz apkurināmo platību, kWh/m ²	Uz fasādes platību, kWh/m ²	Ietaupījumi, %
1. scenārijs	36 569,73	564,35	239,64	–
2. scenārijs	24 867,57	383,76	162,96	32
3. scenārijs	8030,08	123,92	52,62	78

Pirmajā ēkā enerģiju izmanto telpu apsildei, apgaismojumam, ventilācijai un siltumsūkņa darbības nodrošināšanai. Izanalizējot ēkas īpašnieka uzrādītos rēķinus, redzams, ka enerģijas patēriņš gadu no gada ir ļoti atšķirīgs. Īpatnējais gada enerģijas patēriņš 2015. gadā bija 160 kWh/m², savukārt 2017. gadā – 235 kWh/m². Atšķirībām ir vairāki iespējamie iemesli, tostarp mainīgi klimatiskie apstākļi, karstā ūdens patēriņa izmaiņas publiskajā tualetē, siltumsūkņa efektivitāte un ventilācijas iekārtas gaisa padeve. Šie iemesli ir tieši atkarīgi no pareizas un pārdomātas enerģijas pārvaldības sistēmas uzturēšanas.

2.4. tabula

Modelētais enerģijas patēriņš 2. ēkā

	Kopējais, kWh	Uz apkurināmo platību, kWh/m ²	Uz fasādes platību, kWh/m ²	Ietaupījumi, %
1. scenārijs	66 071	194,42	240,48	–
2. scenārijs	42 753	125,80	155,61	35
3. scenārijs	18 334	53,95	66,73	72

Otrajā ēkā telpu apsildi un karstā ūdens sagatavošanu nodrošina ar cieto kurināmo. Pēc īpašnieku aprēķiniem, 2017./2018. gada apkures sezonā izmantots ap 30 m³ malkas, kas žāvēta divus gadus. Pieņemot, ka 40 kW apkures katla efektivitāte ir $\eta = 75\%$ un izmantotās malkas mitruma saturs ir 20%, aprēķinātais īpatnējais enerģijas patēriņš apkurei ir 86,50 kWh/m², neieskaitot enerģiju, kas izmantota karstā ūdens sagatavošanai. Tas ir ievērojami vairāk, nekā aprēķināts trešajā scenārijā (53,95 kWh/m²). Atšķirībai var būt vairāki iemesli: 1) slikta būvdarbu kvalitāte, aukstuma tilti; 2) izmērītā iekštelpu temperatūra (+20 °C

... +22 °C) ir augstāka nekā modelī pieņemtā (+18 °C ... +20 °C); 3) siltuma ieguvumi neatbilst modelī ievadītajiem; 4) telpu relatīvais mitrums ir zemāks (vidēji 35–40 %) nekā modelī pieņemtais (50 %); 5) modelī ievadītie klimata dati neatbilst attiecīgajiem klimatiskajiem apstākļiem; 6) kurināmā mitruma līmenis ir augstāks, nekā pieņemts aprēķinā; 7) apkures katla efektivitāte ir zemāka, nekā pieņemts aprēķinā.

Jāatzīmē gan, ka konkrētajā gadījumā siltumplūsmas mērījumu laikā iegūtais sienas konstrukcijas siltumcaurlaidības koeficients [0,19 W/(m²K) un 0,21 W/(m²K)] atbilst *TRANSYS* modelī ievadītajam [0,208–0,2115 W/(m²K)].

2.5. tabula

Modelētais enerģijas patēriņš 3. ēkā

	Kopējais, kWh	Uz apkurināmo platību, kWh/m ²	Uz fasādes platību, kWh/m ²	Ietaupījumi, %
1. scenārijs	413 660	171,6	175,4	–
2. scenārijs	377 490	156,61	160,1	8,7
3. scenārijs	232 490	96,5	98,6	43,8

Diemžēl pētījuma laikā trešā ēka netika apsildīta, līdz ar to nav pieejami salīdzināšanai nepieciešamie dati.

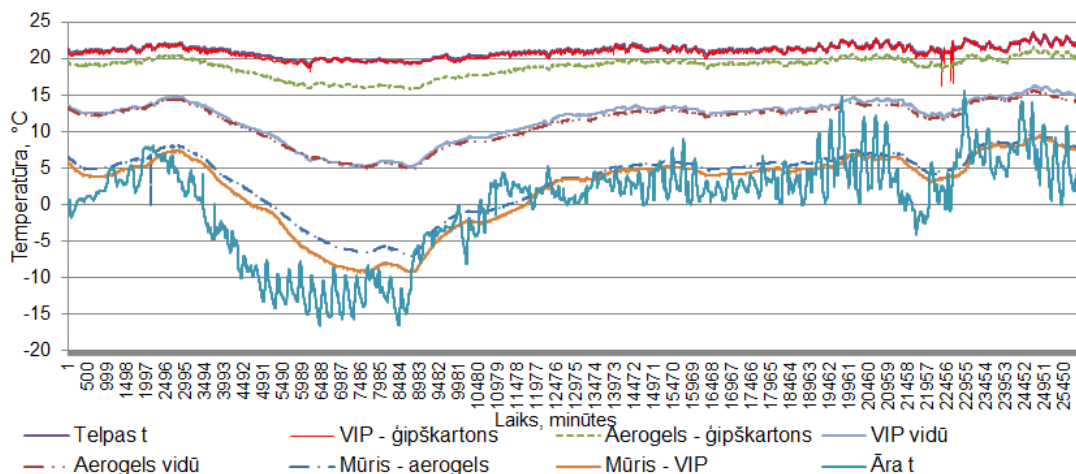
2.3. No iekšpuses siltinātu konstrukciju higrotermiskā uzvedība

Higrotermiskie procesi visu trīs ēku ārsienās analizēti, veicot mērījumus, kā arī izveidojot higrotermisko procesu dinamisko aprēķina modeli. Izveidotie dinamiskie aprēķina modeļi validēti, salīdzinot mērījumu datus ar aprēķina datiem, izmantojot verifikācijas testus un salīdzinot iegūtos datus ar dinamisko modelēšanas programmu rezultātiem.

Mērījumi ēkās

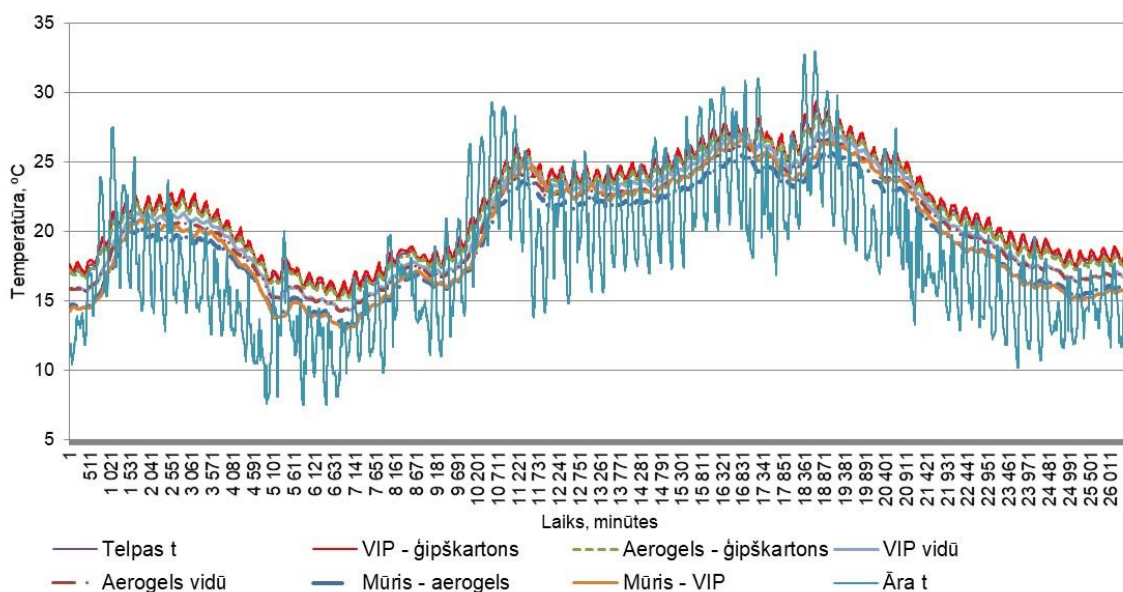
2.10.–2.11. attēlā redzami pirmās pilotprojekta ēkas ārsienās, kas siltinātas ar vakuumizolācijas paneli (VIP) un aerogelu, iegūtie temperatūras mērījumu dati. Temperatūras mērījumi ziemā (2.10. att.) parāda iekštelpu temperatūras stabilitāti neatkarīgi no āra temperatūras svārstībām. Temperatūra starp mūri un siltumizolāciju pazeminās zem 0 °C, kad āra gaisa temperatūra sasniedz –9 °C (VIP gadījumā) un –11 °C (aerogela gadījumā). Viszemākā starp mūri un VIP reģistrētā temperatūra ir –9,32 °C, starp mūri un aerogelu – –7,08 °C.

Grafikos (2.10.–2.11. att.) redzams, ka gan VIP, gan aerogela gadījumā temperatūras siltumizolācijas slāņa vidū gandrīz sakrīt, taču abās siltumizolācijas slāņa pusēs mērītās temperatūras ievērojami atšķiras izmantotā siltumizolācijas veida (VIP vai aerogels) dēļ. Abi materiāli ir 50 mm biezi, taču tiem ir atšķirīga siltumvadītspēja, tādējādi aukstākajās dienās starp mūri un aerogelu temperatūra ir vidēji par 2,2 °C augstāka, salīdzinot ar temperatūru starp mūri un VIP. Temperatūra starp ģipškartonu un izolācijas materiālu VIP gadījumā ir līdz 3 °C augstāka nekā aerogela gadījumā.



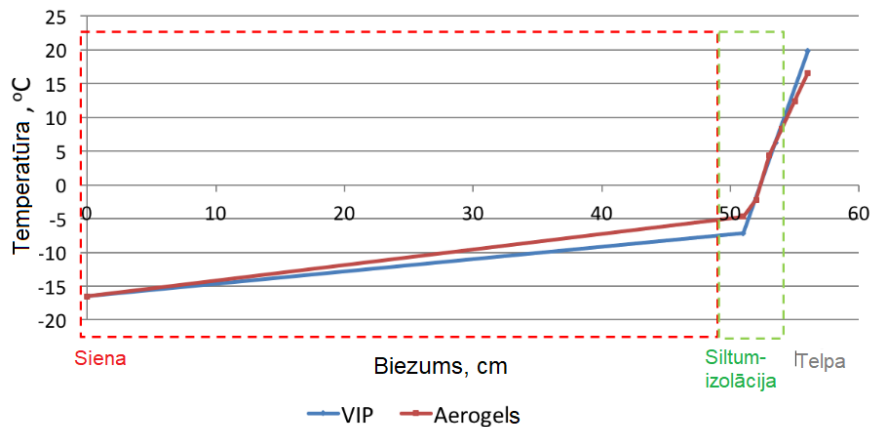
2.10. att. Pilotprojekta 1. ēka. Temperatūras izmaiņas ziemā (no 1. janvāra līdz 31. martam). Uz x ass attēlots laika solis (5 min).

Temperatūras mērījumu rezultāti vasarā (2.11. att.) norāda, ka iespējama iekštelpu pārkaršana. Iekštelpu temperatūra un arī temperatūra starp mūri un siltumizolāciju ir vidēji par 6 °C augstāka nekā ārā gaisa temperatūra. Mērījumu rezultāti rāda, ka ķieģeļu sienas siltuma inerci nevar efektīvi izmantot iekštelpu gaisa temperatūras regulēšanai vasarā.



2.11. att. Pilotprojekta 1. ēka. Temperatūras izmaiņas vasarā (no 1. jūnija līdz 31. augustam). Uz x ass attēlots laika solis (5 min).

2.12. att. shematiski parāda temperatūras sadalījumu sienas konstrukcijas šķērsgrīzumā viszemākās mērījumu periodā reģistrētās temperatūras (-16,5 °C) gadījumā. Redzams, ka visā mūra sienā un arī daļā no siltumizolācijas slāņa temperatūra ir zem 0 °C. Tas nozīmē, ka jau ir sasniegts sasalšanas robežpunkts. Sasalšanas temperatūra līdz pat ārsienas konstrukcijas 30 cm dziļumam tika sasniegta apmēram 100 h 11 mēnešu laikā, kamēr tika veikti temperatūras mērījumi.

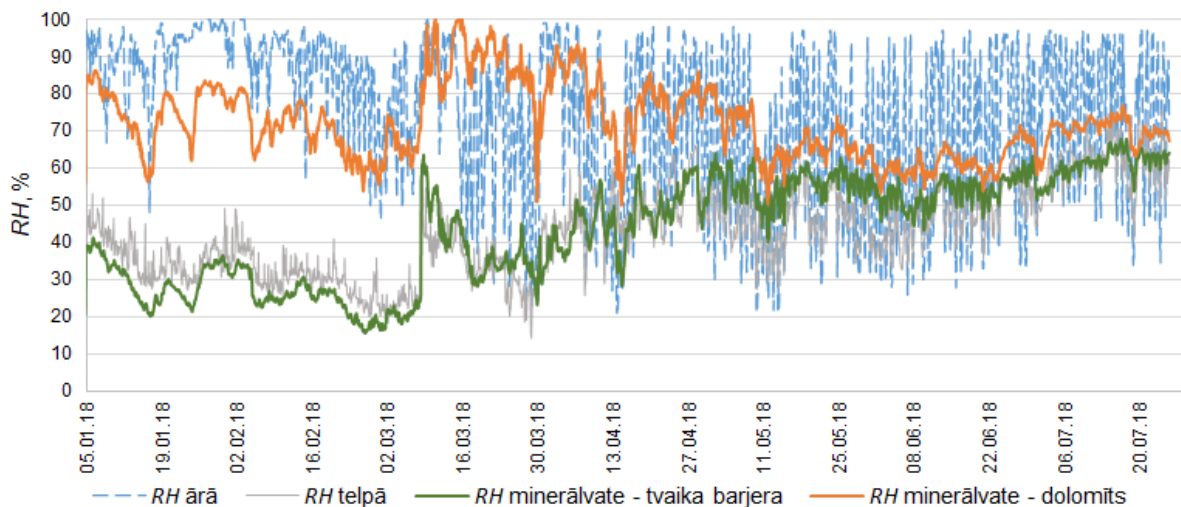


2.12. att. Izmērītās temperatūras sadalījums sienas konstrukcijā viszemākās reģistrētās āra gaisa temperatūras ($-16,5\text{ °C}$) gadījumā.

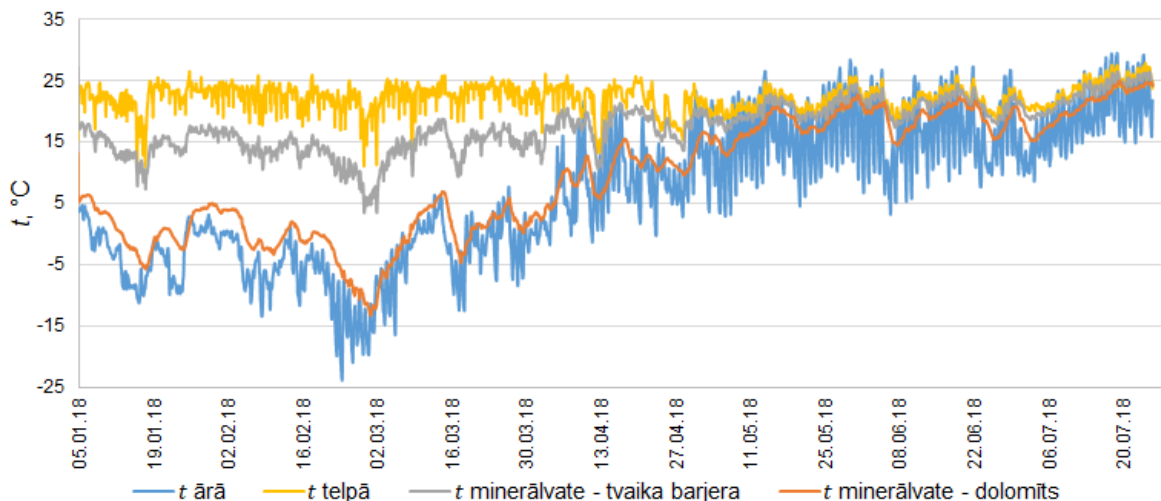
Analizējot mērījumu rezultātus, redzams, ka, ja āra gaisa temperatūra ir zem -5 °C , viss silikātkieģeļu mūris tiek pakļauts sala negatīvajai iedarbībai. Tomēr fakts, ka visas sienas temperatūra ir zemāka par ūdens sasalšanas temperatūru, automātiski nenozīmē, ka radīsies bojājumi. Riski, kas saistīti ar sala negatīvo iedarbību, var īstenoties tikai tad, ja mitrums sienā izmantotajos būvizstrādājumos ir lielāks par to kapilāro piesātinājumu.

Otrajā pilotprojekta ēkā bez temperatūras mērījumiem veikti arī relatīvā mitruma mērījumi starp ārsienas konstrukcijas slāņiem. Mērījumu rezultāti rāda, ka relatīvais mitrums starp slāņiem reti sasniedz kritiskos 80 %. Izņēmums ir 2018. gada 8. marts, kad otrajā stāvā plīsa ūdens cauruļvads, daļēji appludinot pirmā stāva sienu. Šajā laikā relatīvais mitrums starp siltumizolāciju un tvaika barjeru strauji pieauga no 25 % līdz 60 %, un tad turpmāko divu nedēļu laikā lēnām samazinājās. Tajā pašā laikā novērojamas izmaiņas arī starp mūri un siltumizolācijas slāni, kad relatīvais mitrums strauji pieauga līdz pat 100 %, pavasara un vasaras laikā lēnām izzūstot.

Izmērītās temperatūras (2.14. att.) starp dzīvojamās istabas sienas konstrukcijas slāņiem seko ārējās temperatūras svārstībām.

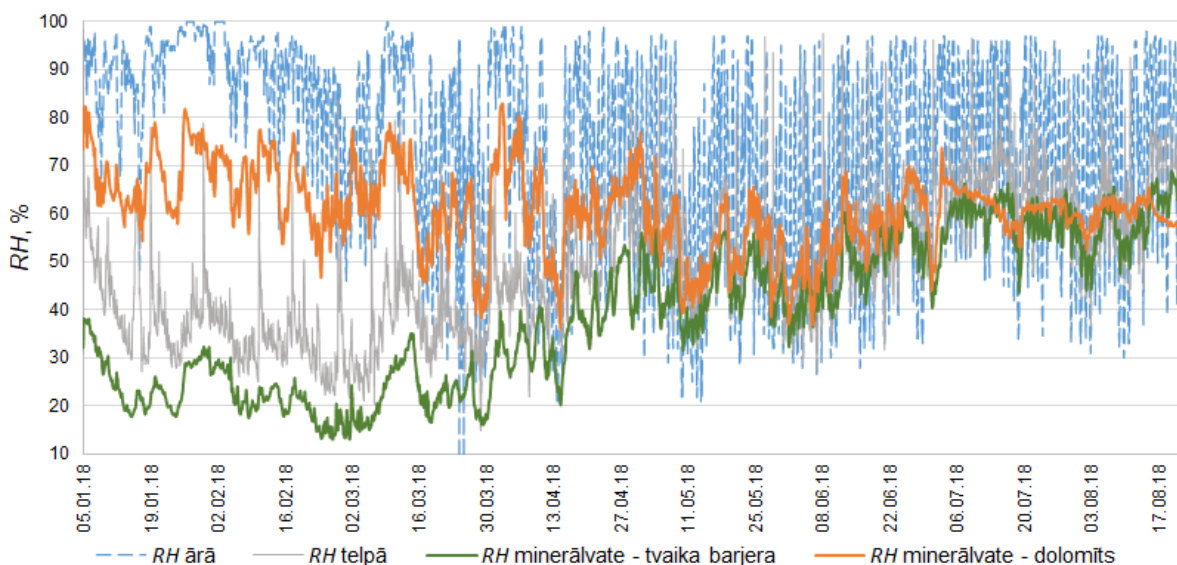


2.13. att. Pilotprojekta 2. ēka. Izmērītais relatīvais mitrums starp dzīvojamās istabas ārsienas konstrukcijas slāņiem un uz sienas virsmām.

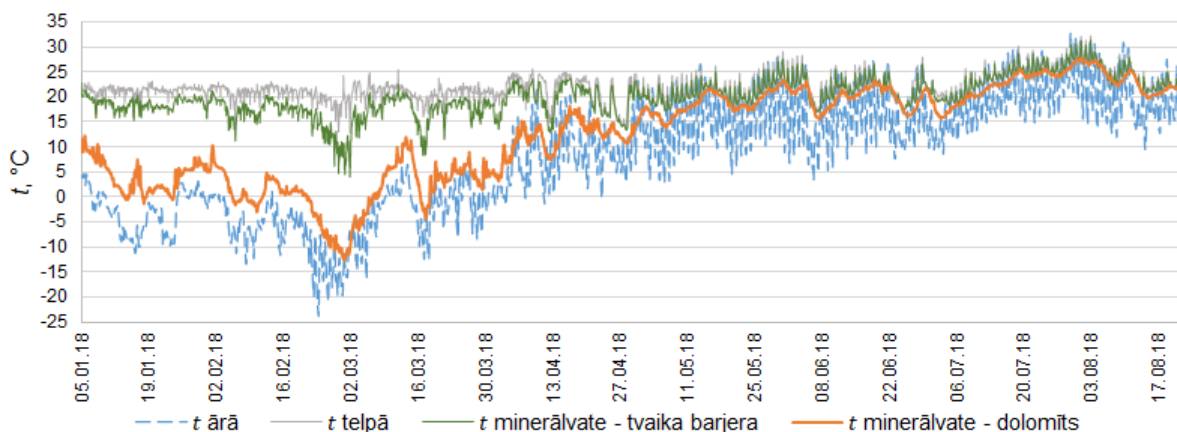


2.14. att. Pilotprojekta 2. ēka. Izmērītā temperatūra starp dzīvojamās istabas ārsienas konstrukcijas slāņiem un uz sienas virsmām.

Izmērītais relatīvais mitrums starp vannasistabas sienas slāņiem redzams 2.15. attēlā. Vidējais relatīvā mitruma līmenis starp dolomītu un izolāciju (ar dažiem izņēmumiem) paliek zem 80 % robežas rudenī un ziemā un zem 70 % robežas vasarā. Temperatūras mērījumu rezultāti (2.16. att.) rāda, kā āra gaisa temperatūras svārstības ietekmē temperatūru starp dolomītu un siltumizolāciju ziemā.

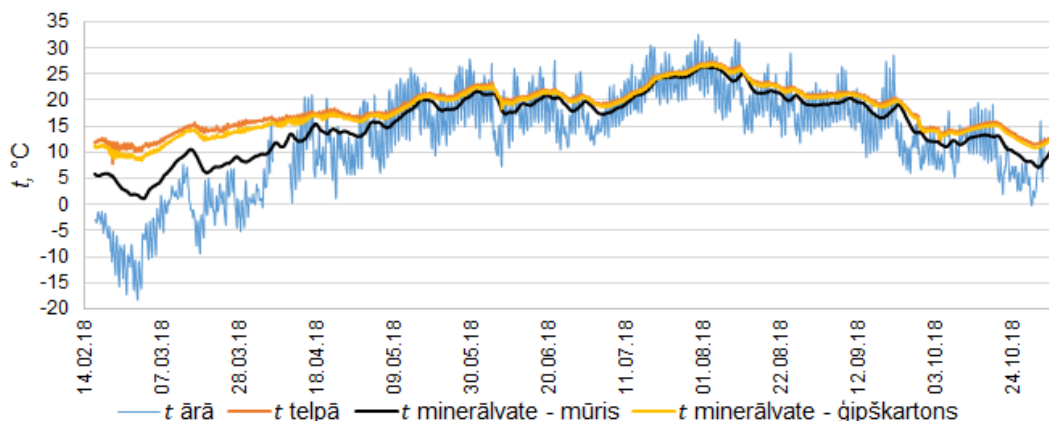


2.15. att. Pilotprojekta 2. ēka. Izmērītais relatīvais mitrums starp vannasistabas ārsienas konstrukcijas slāņiem.

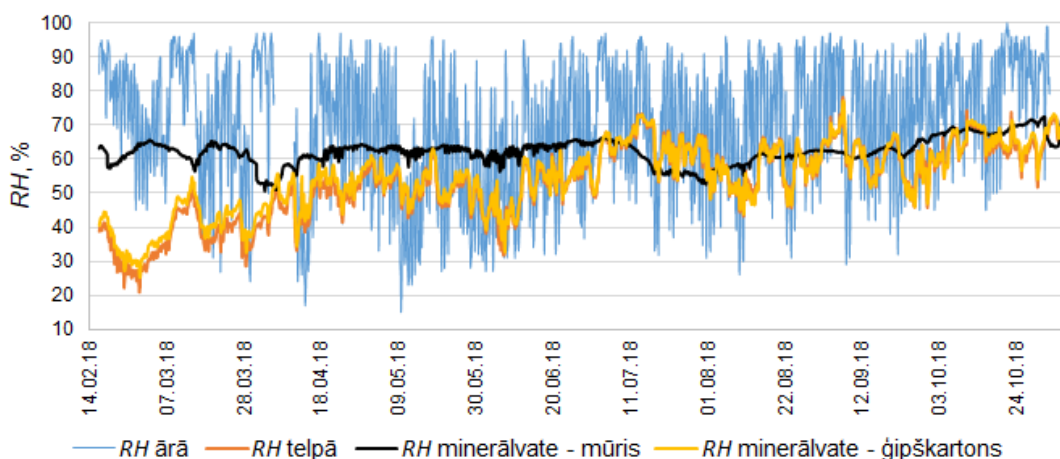


2.16. att. Pilotprojekta 2. ēka. Izmērītā temperatūra starp vannasistabas ārsienas konstrukcijas slāņiem.

Trešās pilotprojekta ēkas otrā stāva sienas mērījumu rezultāti redzami 2.17. un 2.18. attēlā. Temperatūras starpība abpus izolācijas slānim ziemā ir vidēji 5 °C. Temperatūras mērījumu rezultāti seko āra gaisa temperatūras svārstībām. Pavasara un vasaras mērījumi liecina, ka pievienotais izolācijas slānis nepasargā telpas no pārkaršanas. Relatīvais mitrums starp izolācijas slāni un mūri paliek zem 80 %, starp izolācijas slāni un ģipškartonu – zem 60 %. Līdzīgi mērījumu rezultāti iegūti arī par trešā stāva sienu.



2.17. att. Pilotprojekta 3. ēka. Temperatūras mērījumi otrā stāva sienā.

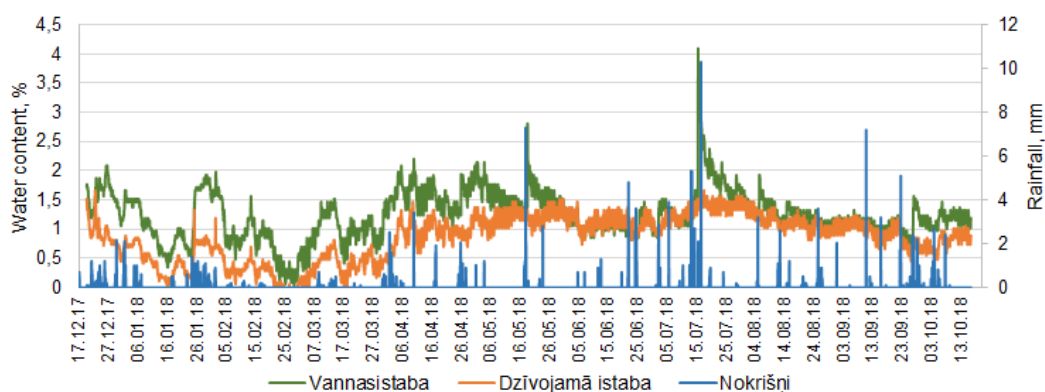


2.18. att. Pilotprojekta 3. ēka. Relatīvā mitruma mērījumi otrā stāva sienā.

Pirmajā un otrajā ēkā veikto siltumplūsmas mērījumu dati kopā ar izmērīto temperatūru izmantoti, lai noteiktu kopējo sienas siltumcaurlaidības koeficientu. Ņemot vērā sienā izmantoto būvizstrādājumu siltumvadītspējas koeficientus, teorētiski aprēķinātais siltumcaurlaidības koeficients sienai, kas izolēta ar aerogelu, ir $0,267 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, sienai ar VIP – $0,093 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, savukārt izmērītais un aprēķinātais siltumcaurlaidības koeficients ir $0,273 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sienai ar aerogelu un $0,060 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sienai ar VIP. Tātad izmērītais siltumcaurlaidības koeficients ir ļoti tuvs teorētiski aprēķinātajam, VIP gadījumā – pat ievērojami zemāks. Citi pētījumi pierādījuši, ka VIP paneļa siltumvadītspēja paneļa vidū ir zemāka nekā paneļa malās, kā arī VIP siltumvadītspēju ietekmē apkārtējās vides temperatūra. Jo tā ir zemāka, jo zemāks ir siltumvadītspējas koeficients [0°C temperatūrā – ap $0,0042 \text{ W}/(\text{m K})$].

Otrajā ēkā izmērītais siltumcaurlaidības koeficients ir $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ dzīvojamās istabas sienai (150 mm minerālvates) un $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vannasistabas sienai (200 mm minerālvates).

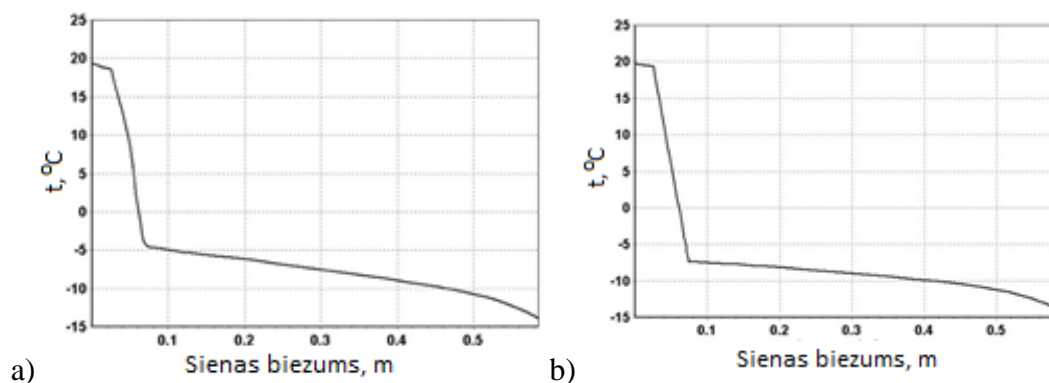
Sienas mūrī esošā ūdens satura mērījumi, kas veikti otrajā pilotprojekta ēkā, redzami 2.19. attēlā. Kā iepriekš aprakstīts, no ēkas paņemto dolomīta akmeņu blīvums ir robežās no $1696,8 \text{ kg}/\text{m}^3$ līdz $2949,5 \text{ kg}/\text{m}^3$, laboratorijā noteiktais dolomīta piesātinājums ir vidēji 13 % (10–17 %). Ūdens satura mērījumi dolomīta mūrī rāda, ka ūdens saturs pārsvarā paliek zem 2 % abos mērījuma punktos, nesasniedzot piesātinājumu. Līdz ar to var izslēgt riskus, kas saistīti ar sienas caursalšanu. 2.19. attēlā kā mitruma satura svārstību reference papildus uzrādīts nokrišņu daudzums (mm).



2.19. att. Pilotprojekta 2. ēka. Ūdens satura mērījumi dolomīta mūrī.

Higrotermisko procesu dinamiskā modelēšana

2.20. attēlā redzami dinamiskā aprēķina modeļa (programmā *DELPHIN*) iegūtie rezultāti temperatūras sadalījumam pirmās pilotprojekta ēkas ārējās konstrukcijas šķērsgriezumā – sienai, kas siltināta ar aerogelu un ar VIP. Izmērītā ārējā gaisa temperatūra ir $-16,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (23. janvāris plkst. 9), modelī izmantota temperatūra $-15,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, kas ņemta no 4 km attālās meteoroloģiskās stacijas. Aprēķina modelī iegūtie rezultāti sakrīt ar izmērītajiem rezultātiem (2.12. att.), un vakuumizolācijas panelis uzrāda labākas siltumizolācijas īpašības.



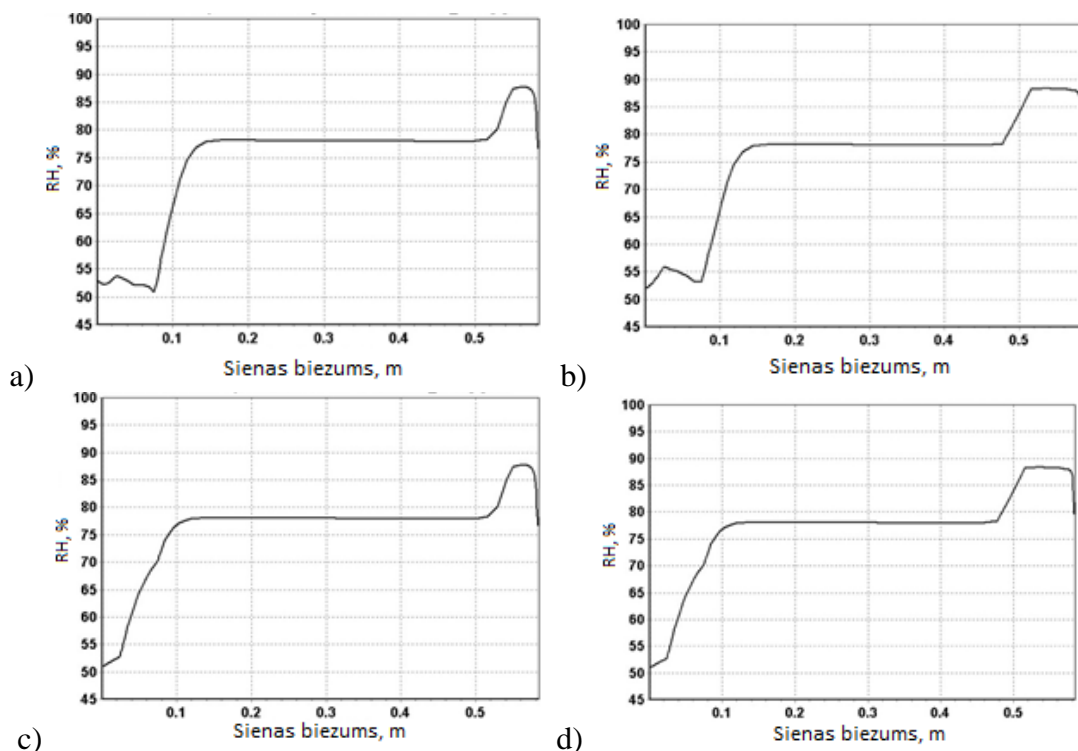
2.20. att. Pilotprojekta 1. ēka. Aprēķinātais temperatūras sadalījums sienā (ārpuse – pa labi, iekšpuse – pa kreisi), kas siltināta ar a) aerogelu, b) VIP.

Dabā ēkas ārējais ir pārklāts ar ūdeni atgrūdošu krāsu, tāpēc aprēķina modelī pieņemts, ka siena lietūs ietekmē nesamirkst un ūdens tvaiku kustība nav traucēta. 2.21. attēlā redzami iegūtie rezultāti – mitruma sadalījumu sienā gada aukstākajā dienā (23. janvāris plkst. 9) gan sienai, kas pārklāta ar hidrofobisku krāsu, gan bez tās.

Abās sienās bez krāsas (2.21. b un 2.21. d att.) intensīvas relatīvā mitruma izmaiņas notiek sienas ārējos 10–12 cm, un pavasarī (no marta līdz maijam) relatīvais mitrums pārsniedz 90 %, vasarā samazinās un turas ap 90 %, savukārt rudenī un ziemā atkal pieaug virs 90 %. Aktīva sienas samirkšana, sasniedzot 100 % relatīvo mitrumu, un žūšana notiek sienas ārējos 2–4 cm. Tas var izraisīt nopietnus sala radītus bojājumus, it īpaši ņemot vērā silikātkieģeļu jutību pret sala iedarbību. Sienai, kas no ārpuses pārklāta ar ūdeni atgrūdošu krāsu, relatīvais

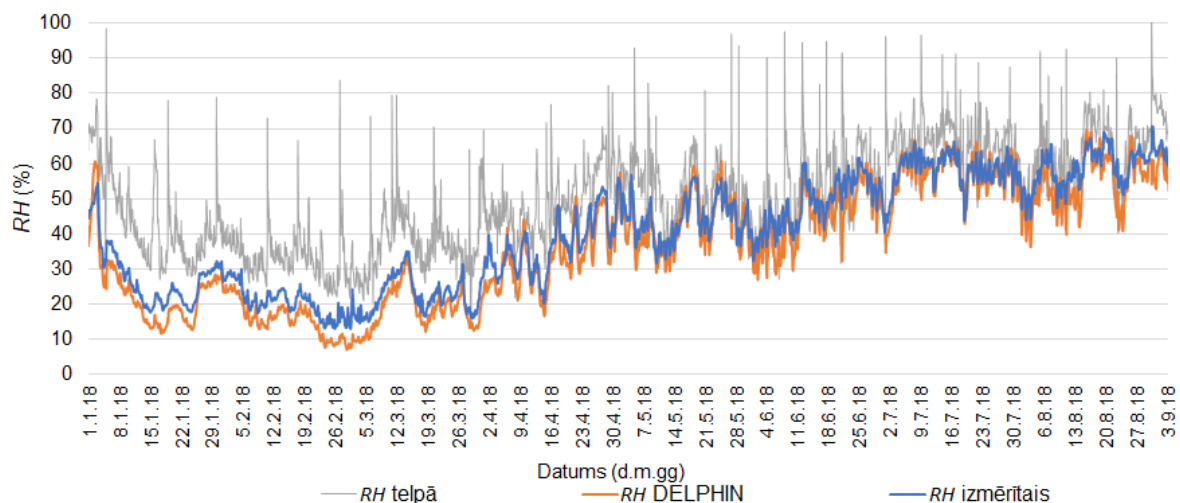
mitrums pavasarī un vasarā pieaug līdz 90 % tikai sienas ārējos 6 cm, rudenī un ziemā – līdz 95 % sienas ārējos 2 cm.

Iegūtie rezultāti liecina par riskiem, kas saistīti ar silikātķieģeļu mūra, kas siltināts no iekšpuses, caursalšanu gadījumā, ja mitruma līmenis ķieģeļos sasniegs to kapilāro piesātinājumu, kas tieši atkarīgs no nelabvēlīgu ārējo apstākļu iedarbības. Iegūtie rezultāti par caursalšanas riskiem ir īpaši būtiski, ņemot vērā būvizstrādājumu testēšanas rezultātus, kur silikātķieģeļi uzrādīja viszemāko salizturību, sākot plaisāt pirmajā sasaldēšanas un atkausēšanas ciklā. Kā rāda dinamiskā aprēķina modeļa rezultāti, ūdeni atgrūdošā krāsa ārējas vides nelabvēlīgo iedarbību spēj samazināt, taču ne pilnībā novērst.



2.21. att. Pilotprojekta 1. ēka. Aprēķinātais relatīvais mitrums sienā (ārpuse – pa labi, iekšpuse – pa kreisi): a) aerogels un ūdeni atgrūdoša krāsa; b) aerogels bez krāsas; c) VIP un krāsa; d) VIP bez krāsas.

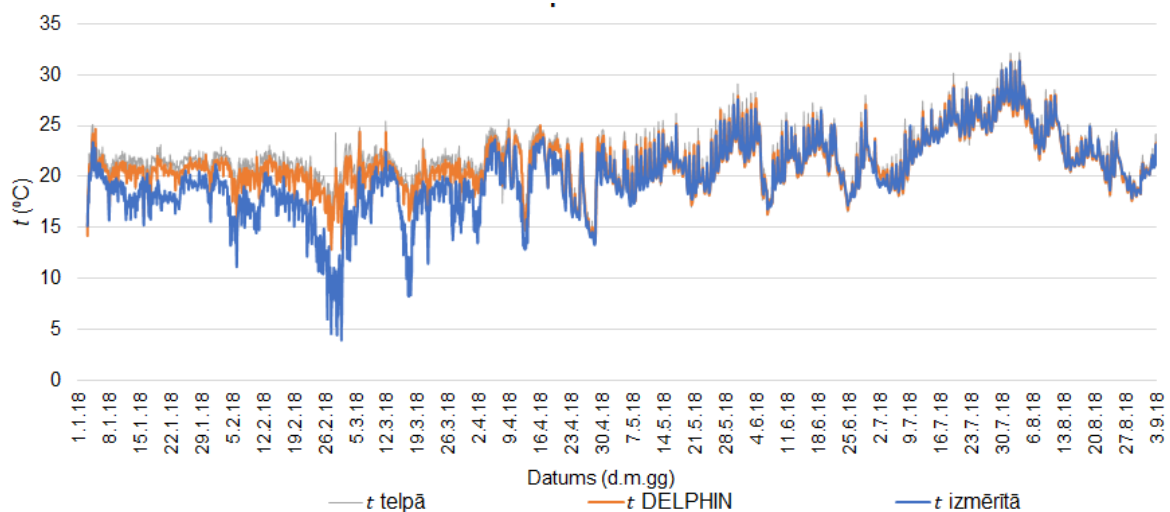
Otrās ēkas dinamiskā aprēķina modeļa rezultāti kopā ar mērījumu laikā iegūtajiem datiem redzami 2.22.–2.25. attēlā. Mērījumi veikti ziemeļu puses dzīvojamās istabas un vannasistabas sienām, tātad – visnelabvēlīgākajos apstākļos.



2.22. att. Pilotprojekta 2. ēka. Aprēķinātais (*RH DELPHIN*) un mērītais (*RH izmērītais*) relatīvais mitrums starp siltumizolāciju un tvaika barjeru vannasistabas sienā.

Aprēķinātais relatīvais mitrums starp minerālvati un tvaika barjeru (2.22. att.) seko mērīto datu līknei, apkures sezonā būdams par 5 % līdz 10 % zemāks nekā izmērītais relatīvais mitrums. Grafikā nav ņemta vērā mērījumu precizitāte, kas konkrētajam sensoram ir $\pm 3,5$ %.

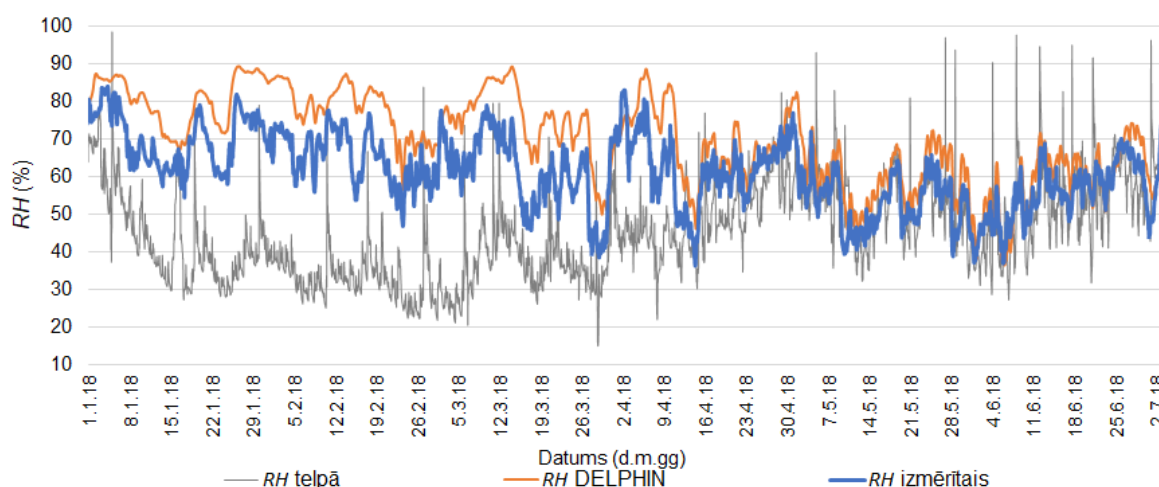
Aprēķina modelī iegūtā temperatūra un izmērītā temperatūra starp siltumizolāciju un tvaika barjeru (2.23. att.) un starp siltumizolāciju un dolomīta mūri (2.25. att.) cieši seko attiecīgi telpas un āra gaisa temperatūras izmaiņām. Starpība starp aprēķina un mērīto temperatūru starp siltumizolāciju un tvaika barjeru skaidrojama ar telpas temperatūras sensora novietojumu. Tas atradās nost no sienas, vietā, kur temperatūra ir augstāka nekā uz sienas virsmas.



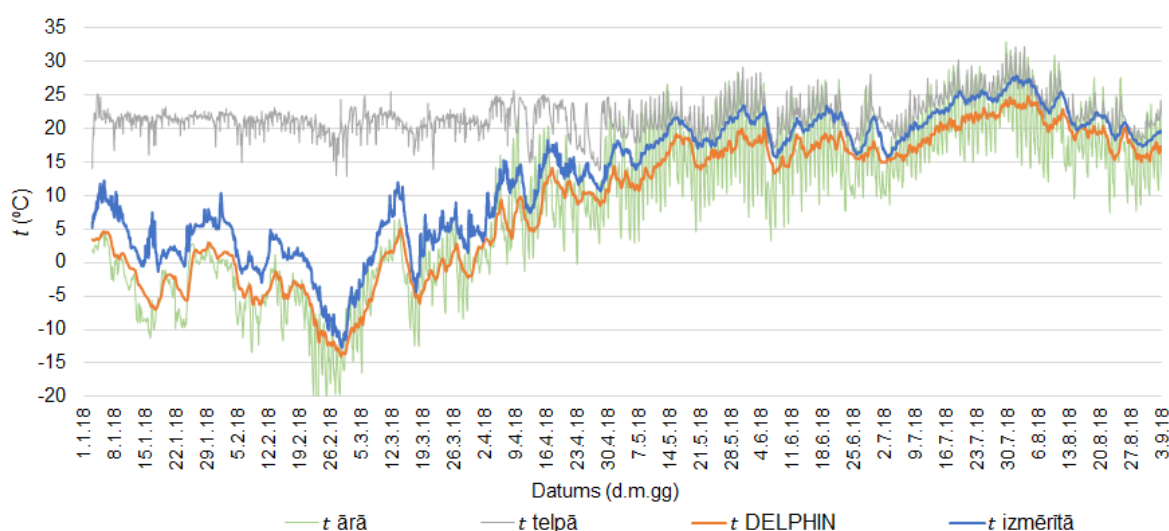
2.23. att. Pilotprojekta 2. ēka. Aprēķinātā (*t DELPHIN*) un izmērītā (*t izmērītā*) temperatūra starp siltumizolāciju un tvaika barjeru vannasistabas sienā.

Aprēķinātais un izmērītais relatīvais mitrums starp siltumizolāciju un dolomītu vannasistabas sienai redzams 2.24. attēlā. Apkures sezonā modelis aprēķina 5–7 % augstāku relatīvā mitruma līmeni nekā mērījumu laikā iegūtais, brīžiem pat sasniedzot 90 % atzīmi.

Savukārt dzīvojamās istabas sienā veiktie mērījumi apkures sezonā sakrīta ar aprēķina modeļa rezultātiem.



2.24. att. Pilotprojekta 2. ēka. Aprēķinātais (*RH DELPHIN*) un mērītais (*RH izmērītais*) relatīvais mitrums starp dolomīta mūri un siltumizolāciju vannasistabas sienā.



2.25. att. Pilotprojekta 2. ēka. Aprēķinātā (*t DELPHIN*) un izmērītā (*t izmērītā*) temperatūra starp dolomīta mūri un siltumizolāciju vannasistabas sienā.

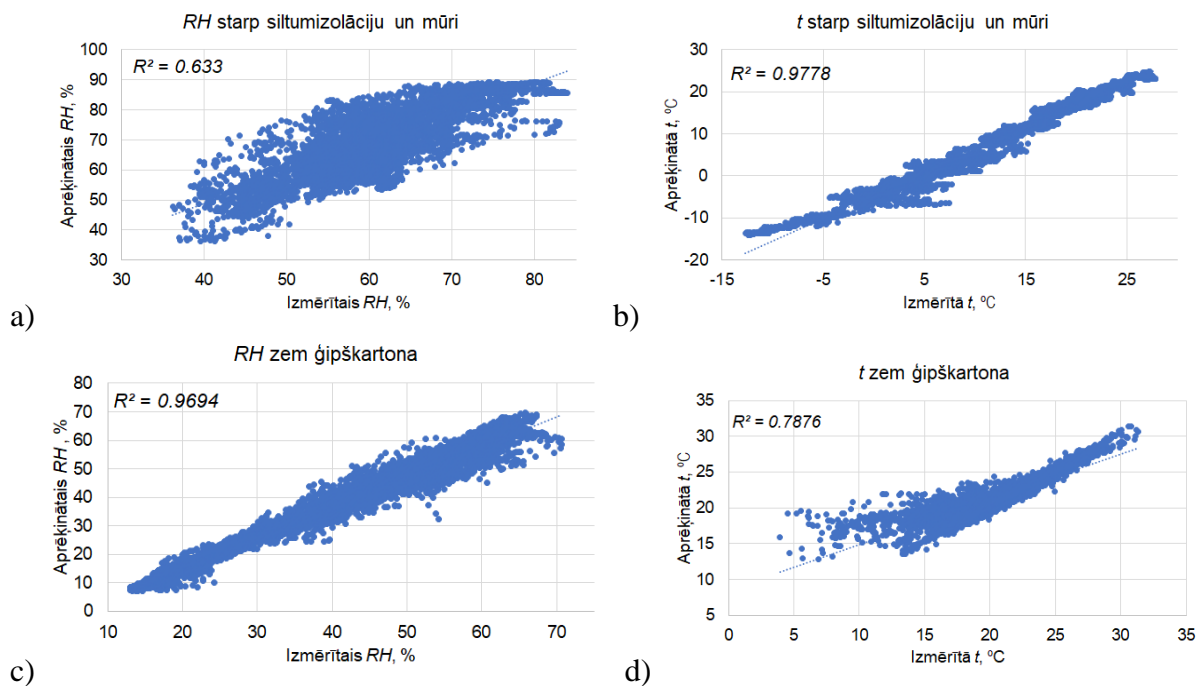
Viens no iespējamajiem iemesliem ir dolomīta īpašību neviendabīgums, ko pierāda laboratorijā veiktie dolomīta paraugu testi, piemēram, blīvums robežās no 1696,8 kg/m³ līdz 2949,5 kg/m³, tvaika difūzijas koeficients robežās no 26,67 līdz 77,83. Modelis pieņem, ka katrs no tajā ievadītajiem būvizstrādājumiem darbojas kā bezgalīgi mazu reprezentatīvu elementu kopa, datormodelī izveidotā konstrukcija ir ideāla, bez jebkādam novirzēm. Līdz ar to, analizējot dinamisko modeļu rezultātus, vienmēr jāpatur prātā, ka būvizstrādājumiem, it īpaši tiem, kas izmantoti vēsturiskajās ēkās, ir dažādas īpašības un neviendabīga struktūra, kas ir ļoti būtiski, vērtējot būvkonstrukcijā notiekošos higrotermiskos procesus. Dabā būvkonstrukcijās var būt nezināmas plaisas, tukšumi un termiskie tilti, kas var ietekmēt mitruma pārneši.

Kopumā otrās ēkas mērījumu un dinamiskā aprēķina modeļa rezultāti uzrāda labu korelāciju. Temperatūra starp dolomīta mūri un siltumizolācijas slāni uzrāda ļoti labu korelāciju: $R^2 = 0,9789$ dzīvojamās istabas sienā, $R^2 = 0,9778$ vannasistabas sienā (2.26. b att.). Starp tvaika izolāciju un siltumizolāciju izmērītās un aprēķinātās temperatūras korelācija ir krietni zemāka: $R^2 = 0,4003$ dzīvojamās istabas sienā, $R^2 = 0,7876$ vannasistabas sienā (2.26. d att.). Šī zemā korelācija skaidrojama ar telpas temperatūras sensora novietojumu – nost no sienas.

Aprēķinātā un izmērītā relatīvā mitruma korelācija starp dolomītu un siltumizolāciju ir zema: $R^2 = 0,4775$ dzīvojamās istabas sienā, $R^2 = 0,633$ vannasistabas sienā (2.26. a att.). Savukārt starp siltumizolāciju un tvaika izolāciju rezultātu korelācija ir ļoti izteikta: $R^2 = 0,9047$ dzīvojamās istabas sienā, $R^2 = 0,9694$ vannasistabas sienā (2.26. c att.).

Jāatzīmē, ka korelācijas analīze neietver iespējamo mērījumu kļūdu un aprēķina modeli izmantoti āra gaisa klimata dati, kas iegūti no 20 km attālās meteoroloģiskās stacijas.

Kopumā vērtējot, higrotermisko procesu dinamiskā modelēšana apstiprina higrotermisko apstākļu prognozēšanas iespējamību un ticamību.



2.26. att. Korelācija starp mērītajiem un aprēķinātajiem datiem vannasistabas sienai:

- a) relatīvais mitrums starp dolomīta mūri un siltumizolāciju; b) temperatūra starp dolomīta mūri un siltumizolāciju; c) relatīvais mitrums starp siltumizolāciju un tvaika barjeru; d) temperatūra starp siltumizolāciju un tvaika barjeru.

SECINĀJUMI

Eiropas Savienības noteikto enerģētikas un klimata mērķu sasniegšana nav iespējama bez apjomīgas esošo ēku renovācijas. Vislielākie izaicinājumi ēku atjaunošanas jomā skar vēsturiskās ēkas, kuru fasādes nedrīkst mainīt, lai saglabātu to kultūrvēsturisko un arhitektonisko vērtību. Līdz ar to sienu siltināšana parasti pieļaujama tikai no iekšpuses. Tomēr tā var radīt vairākas būtiskas problēmas, kas saistītas ar mitruma akumulāciju konstrukcijās, kondensāciju, pelējumu, pastiprinātu sāļu izdalīšanos un citiem iespējamajiem bojājumiem. Ēku īpašniekiem un politikas veidotājiem trūkst skaidru vadlīniju vēsturisko ēku atjaunošanai, savukārt inženieriem trūkst aprēķinu rīku, kas ļautu plānot drošu konstrukciju siltināšanu no iekšpuses, panākot ievērojamu enerģijas patēriņa samazinājumu. Tāpēc promocijas darbā testēti un piedāvāti risinājumi vēsturisko ķieģeļu un akmens sienu siltināšanai no iekšpuses. Šajā pētījumā parādīti risinājumi un metodes, ko var izmantot, plānojot drošu un ilgtspējīgu vēsturisko ēku atjaunošanu, novēršot iespējamās problēmas, kas var rasties pēc sienu siltināšanas no iekšpuses.

Darbā analizēts Latvijas ēku sektors, novērtēts esošais renovācijas ātrums, galvenie šķēršļi ēku atjaunošanai un piedāvāti risinājumi šo šķēršļu pārvarēšanai. Padziļināti veikta vēsturisko ēku sektora analīze, un aprakstīti visbiežāk piedāvātie ēku atjaunošanas risinājumi. Analizējot literatūru, mērījumus laboratorijā un reālās ēkās, noteikti un aprakstīti galvenie riski, kas saistīti ar mitruma uzkrāšanos konstrukcijās, pelējuma veidošanos, sāls izdalīšanos un iespējamo bojājumu rašanos. Pirms ēkas atjaunošanas ir jānovērtē ēkas tehniskais stāvoklis kopumā. Tāpēc darbā izstrādāta un piedāvāta novērtēšanas metode, ar kuras palīdzību ir iespējams novērtēt katra konstatētā konstrukciju bojājuma nozīmīgumu, piešķirot tam noteiktu vērtējumu, kas pēc tam dod iespēju salīdzināt dažādas ēkas, vērtējot arī to energoefektivitāti un potenciālo enerģijas ietaupījumu. Aplūkotas arī nedestruktīvo mērījumu metožu izmantošanas iespējas un ierobežojumi projektu priekšizpētes posmā. Tāpat apskatīts, kā mitruma saturs konstrukcijās ietekmē ēkas enerģijas patēriņu, ilgmūžību un mehānisko izturību.

Lai būtu iespējams veikt dinamisko higrtermisko procesu modelēšanu vēsturiskajās mūra sienās, laboratorijas apstākļos testēti Latvijā izmantoto vēsturisko ēku ķieģeļu un dabisko akmens sienu paraugi, nosakot materiāla blīvumu, porainību, ūdens tvaiku caurlaidību, ūdens absorbciju, siltumvadītspēju, īpatnējo siltumietilpību, tvaika difūzijas koeficientu, kā arī sāls sastāvu, spiedes stiprību un salizturību. Kopumā veiktas vairāk nekā 60 Latvijas vēsturiskajās ēkās izmantoto ķieģeļu un akmens paraugu īpašību pārbaudes. Paraugi ņemti no 24 ēkām Latvijā. Laboratoriskie testi uzrāda, ka vēsturiskie māla ķieģeļi ir ļoti nehomogēni un ir vērojama liela rezultātu izkliede pat vienas ēkas ietvaros. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, sagatavoti modelēšanas programmas *DELPHIN* būvmateriālu datubāzes papildinājumi, kas dod iespēju modelēt higrtermiskos procesus Latvijā sastopamajās vēsturiskajās mūra sienās.

Darba laikā laboratorijā izveidota vēsturisko ķieģeļu mūra siena, lai pārbaudītu sienu siltināšanas iespējas ar šobrīd visbiežāk izmantotajiem siltumizolācijas materiāliem, piemēram, minerālvate un ekstrudētais putupolistirols, kā arī ar tādiem jauniem siltumizolācijas materiāliem kā aerogels un kokšķiedras plātnes. Papildus laboratorijas testiem

dažādi siltumizolācijas materiāli pārbaudīti arī reālās ēkās, testējot minerālvates, vakuumizolācijas paneļus un aerogela siltināšanas sistēmas. Veiktie mērījumi laboratorijas apstākļos un modelēšanas rezultāti uzskatāmi parādīja, ka sākotnējais konstrukciju mitruma līmenis un sienās izmantoto būvizstrādājumu precīzs īpašību raksturojums ir ļoti būtisks, veicot higrotermisko procesu modelēšanu.

Lai novērtētu higrotermiskā procesa izmaiņas ilgākā laika posmā, gada laikā veikti no iekšpuses siltinātu sienu mērījumi reālās ēkās, kas atšķiras gan pēc būvprojoma, gan būvniecības gada, gan paredzētā izmantojuma, mērot siltuma plūsmu, relatīvā mitruma un temperatūru sadalījumu, kā arī temperatūru un relatīvo mitrumu telpās un ārā. Mērījumi ļāva validēt programmā *DELPHIN* izstrādātos aprēķina modeļus un aprakstīt dinamisko higrotermisko procesu konstrukcijās.

Darbā piedāvātā pieeja ļauj skaidrot, kā un cik ātri sienu siltināšana no iekšpuses var izraisīt mitruma akumulāciju konstrukcijās, kurās iepriekš šādas problēmas nav bijušas. Testējot būvmateriālus laboratorijā, ar modelēšanas palīdzību programmās *TRNSYS* un *DELPHIN* izstrādāti dinamiskie aprēķina modeļi higrotermisko procesu modelēšanai vēsturiskajās mūra sienās. Izstrādātie aprēķina modeļi validēti, salīdzinot iegūtos aprēķina datus ar ilgtermiņa mērījumiem ēkās un testēšanas rezultātiem laboratorijā. Kopumā veiktas astoņas siltināšanas sistēmu analīzes laboratorijas apstākļos un piecas siltumizolācijas sistēmu analīzes reālās ēkās. Iegūtie rezultāti apstiprina pirmo hipotēzi, ka dinamisks mitruma pārnese apraksts spēj novērtēt ilgtermiņa higrotermiskos procesus būvkonstrukcijās pēc to siltināšanas no iekšpuses, tādējādi ļaujot novērtēt un novērst riskus, kas saistīti ar vēsturisko ēku atjaunošanu. Modelēšanas rezultāti pierāda, ka, ievadot precīzus izejas datus par materiāla īpašībām un ārējiem apstākļiem, ir iespējams labi raksturot higrotermiskos procesus konstrukcijās.

Mērījumi reālās ēkās un dinamiskie aprēķina modeļi parāda, ka, siltinot vēsturiskās ēkas sienas no iekšpuses, iespējams samazināt siltumcaurlaidības koeficientu līdz $0,273 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vai pat līdz $0,060 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ atkarībā no izmantotā siltumizolācijas veida un slāņa biezuma. Sasniegtie rezultāti rāda, ka, siltinot vēsturiskās ēkas sienas no iekšpuses, iespējams sasniegt 30 % līdz 75 % siltumenerģijas patēriņa samazinājumu apkurei, vienlaikus nodrošinot labu mikroklimatu telpās (vidējā iekštelpu temperatūra apkures sezonā $+21 \text{ }^\circ\text{C}$, relatīvais mitrums 30 % līdz 50 %). Tātad arī otrā hipotēze tiek apstiprināta, proti, vēsturisko ēku enerģijas patēriņu iespējams samazināt, siltinot ēkas sienas no iekšpuses, saglabājot ēku kultūrvēsturisko un arhitektonisko vērtību un neradot konstrukciju bojājumu riskus.

Vēsturisko ēku atjaunošana aukstā klimatā, siltinot sienas no iekšpuses, var radīt bojājuma riskus, kas saistīti ar mitruma uzkrāšanos konstrukcijās, ūdens tvaika kondensāciju, pelējuma rašanos, konstrukciju caursalšanu un plaisāšanu. Taču šos riskus iespējams novērtēt, prognozēt un novērst, izmantojot promocijas darbā aprakstītās konstrukciju novērtēšanas un modelēšanas metodes, tādējādi ļaujot plānot vēsturisko ēku ilgtspējīgu atjaunošanu.