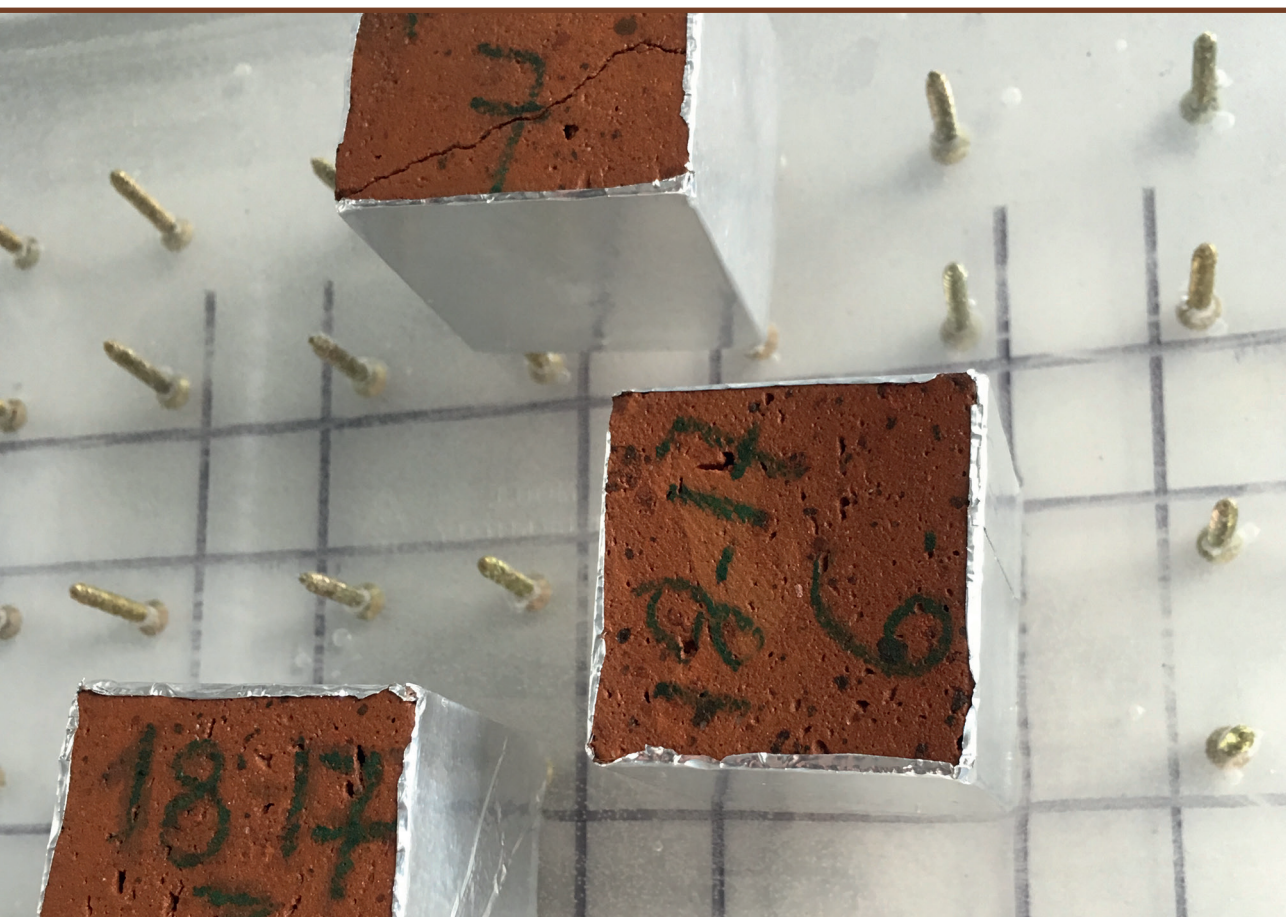


Ritvars Freimanis

HIGROTERMĀLIE PROCESI PORAINOS MATERIĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Ritvars Freimanis

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorants

HIGROTERMĀLIE PROCESI PORAINOS MATERIĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Freimanis, R. Higrotermālie procesi porainos materiālos. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. – 49 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU-P19” 2023. gada 30. augusta lēmumu, protokols Nr. 177

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 8.2.2.0/20/1/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu.

Paldies darba vadītājam Andrai Blumbergai!

Vāka attēla autors – Ritvars Freimanis

<https://doi.org/10.7250/9789934370090>
ISBN 978-9934-37-009-0 (pdf)

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 21. decembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Ph. D. Pål Ingebrigt Davidsen,
Bergenā Universitāte, Norvēģija

Dr. sc. (tech.) Peter D. Lund,
Ālto Universitāte, Somija

Dr. sc. ing. Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis 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.

Ritvars Freimanis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 36 attēli, četras tabulas, 10 pielikumu, kopā 213 lappuses. Literatūras sarakstā ir 59 nosaukumi.

Saturs

IEVADS.....	5
Aktualitāte.....	5
Izpētes jautājumi.....	5
Darba mērķis un uzdevumi.....	6
Izvirzītās hipotēzes.....	6
Darba zinātniskā novitāte.....	10
Darba praktiskais lietojums.....	10
Darba rezultātu aprobācija.....	10
Darba struktūra un apjoms.....	12
1. IZMANTOTĀ METODIKA.....	13
1.1. Vēsturisko ēku materiāli un konstrukcijas.....	13
1.2. Siltumizolācijas materiāli un sistēmas.....	15
1.3. Iekšējās siltināšanas lietojums vēsturiskās ēkās.....	18
1.4. Pozitīvas enerģijas bilances kvartāls vēsturiskā pilsētvidē.....	22
2. REZULTĀTI.....	25
2.1. Vēsturisko ēku materiāli un konstrukcijas.....	25
2.2. Siltumizolācijas materiāli un sistēmas.....	28
2.3. Iekšējās siltināšanas lietojums vēsturiskās ēkās.....	37
2.4. Pozitīvas enerģijas bilances kvartāls vēsturiskā pilsētvidē.....	41
SECINĀJUMI.....	45
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	48

IEVADS

Aktualitāte

Viens no lielākajiem enerģijas patērētājiem Eiropā ir ēku sektors. Tas rada aptuveni 40 % no kopējā enerģijas patēriņa un aptuveni 36 % no kopējam CO₂ emisijām Eiropas Savienībā. Turklāt tikai 25 % no Eiropas Savienības ēku fonda tiek klasificētas kā energoefektīvas, un prognozes rāda, ka 2050. gadā 85–95 % esošo ēku joprojām būs ekspluatācijā [1]. Iedzīvotāju pieprasījums pēc paaugstināta komforta un pieaugoša elektroiekārtu izmantošanas tendence, kā arī citi faktori veicina enerģijas patēriņa pieaugumu, kas ir viens no klimata pārmaiņu iemesliem. Ir vairākas jomas, kurās būtu iespējams izmantot enerģiju efektīvāk, samazinot patēriņu un tādējādi arī siltumnīcefekta gāzu emisijas. Tāpēc, lai sasniegtu oglekļa neitralitāti līdz 2050. gadam, Eiropas Savienība ir definējusi ambiciozus mērķus, kas ietver ēku energoefektivitātes paaugstināšanu, atjaunojamo energoresursu lietošanu un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu [2].

Ēku siltināšana ir efektīvs pasākums ēku energoefektivitātes uzlabošanai, taču, lai sasniegtu šos mērķus, būtiski ir rast risinājumu dilemmai starp kultūrvēsturisko mantojumu un energoefektivitāti, jo apbūvētā vide ir būtiska kultūras vērtība, kas veido nepieciešamo dzīves vidi un ietekmē dzīves kvalitāti [3]. Viens šīs dilemmas risinājums varētu būt vēsturisko ēku siltināšana no iekšpuses, saglabājot fasādes izskatu un vienlaikus paaugstinot energoefektivitāti. Tomēr šāds risinājums var izraisīt nevēlamas, neparedzētas izmaiņas ēkas higratermālajos procesos, kas potenciāli var radīt problēmas, piemēram, pelējumu, ķieģeļu drupšanu, sāls pleķus u. c.

Apsverot iekšējo siltināšanu, ir svarīgi veikt higratermisko novērtējumu. Detalizēta plānošana samazina risku, kas saistīts ar izmaiņām higratermiskajā uzvedībā. Plānojot jāņem vērā dažādi faktori, piemēram, ķieģeļu īpašības oriģinālajā mūrī, siltumizolācijas materiāli, āra un iekštelpu robežapstākļi. Kvantitatīvā saistība starp dažādiem faktoriem un to kopējo ietekmi uz mitruma risku joprojām nav skaidra, un faktoru sarežģītās mijiedarbības ietekmē mitruma riska izvērtēšana ir sarežģīta. Tā rezultātā vēsturisko ēku un vēsturisko ēku pilsētas kvartālu energoefektivitātēs pasākumu risinājumu plānošana un izvēle ir sarežģīts process, kas ietver nepieciešamību ēku īpašniekiem un apsaimniekotājiem novērtēt riskus un ieguvumus, siltinot ēkas no iekšpuses.

Izpētes jautājumi

1. Vai ir iespējams sasniegt pozitīvu energobilances kvartālu vēsturiskā pilsētas apbūvē.
2. Kādas ir mitruma drošas iekšējās siltumizolācijas sistēmas, ko var iekļaut energoefektivitātes renovācijas projektos, lai palīdzētu sasniegt pozitīvas energobilances vēsturiskās apbūves pilsētas kvartālu.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir novērtēt iespējas izveidot pozitīvas energobilances kvartālu kultūrvēsturiskā pilsētvidē, izmantojot mitruma drošu ēku siltināšanu no iekšpuses.

Lai sasniegtu mērķi, definēti vairāki uzdevumi.

1. Veikt vēsturisko mūra un akmens ārsienu materiālu higrotermisko parametru novērtējumu.
2. Novērtēt vēsturisko ārsienu materiālu higrotermisko parametru ietekmi uz higrotermālajiem procesiem sienā, kas siltināta no iekšpuses.
3. Veikt siltumizolācijas materiālu un sistēmu lietojuma novērtēšanu izmantošanai siltināšanai no iekšpuses.
4. Veikt novērtējumu par siltināšanas no iekšpuses ietekmi uz higrotermiskajiem procesiem un potenciālo enerģijas ietaupījumu dabīgā akmens mūra sienā un ķieģeļu sienā, kas siltinātas ar tvaika necaurļaidīgu siltumizolāciju.
5. Novērtēt pozitīva energobilances kvartāla izveidi vēsturiskā pilsētvides apbūvē.
6. Novērtēt energoefektivitātes risinājumu potenciālu vēsturiskā pilsētas kvartālā.

Izvirzītās hipotēzes

1. **hipotēze.** Vēsturiskiem ķieģeļiem ir atšķirīgas higrotermālās īpašības, un tās ietekmē higrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās.
2. **hipotēze.** Klimatiskie āra apstākļi ietekmē higrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās.
3. **hipotēze.** Vēsturiskās mūra un akmens sienu siltināšana no iekšpuses ar tvaika necaurļaidīgu siltumizolāciju aukstā klimatā ir drošs energoefektivitātes paaugstināšanas pasākums.
4. **hipotēze.** Vēsturiskās apbūves saglabāšana neļauj sasniegt pozitīvu energobalanci vēsturiskajos pilsētas kvartālos.

Iepriekšminētās hipotēzes tika pētītas ar dažādām zinātniskās izpētes metodēm, kas sīkāk atspoguļotas zinātniskajās publikācijās.

1. hipotēze. Vēsturiskiem ķieģeļiem ir atšķirīgas higrotermālās īpašības, un tās ietekmē higrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās.

1. Zinātniskās literatūras analīze.
2. 40 vēsturisko ķieģeļu paraugu savākšana un higrotermālo īpašību testēšana.
3. Datorsimulācijas rīka *Delphin* failu izveidošana.
4. Testēto ķieģeļu klasteru veidošana.
5. Datorsimulācija ar mūra ār sienām no testētajiem ķieģeļiem un siltināšanu no iekšpuses ar kapilāri aktīvu siltumizolācijas materiālu.

Izmantotās izpētes metodes un iegūtie rezultāti ir aprakstīti šādās publikācijās.

- A publikācija (Freimanis R., Zundans Z., Balins R., Blumberga A. un Vanaga R. (2021). *Hygrothermal Properties of Historic Bricks From Various Sites of Latvia*

[Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5575101>) Publikācija ir datu kopa, kurā ir iekļauti 40 dažādu Latvijas vēsturisko ķieģeļu (no 17. līdz 20. gadsimtam) paraugu higrotermiskos parametru testēšanas rezultāti. Ķieģeļu paraugu higrotermisko parametru noteikšanai tika izmantotas standarta mērījumu metodes ar dažiem pielāgojumiem. Iegūtie parametri izmantoti, lai izveidotu materiālu failus simulācijas rīkā *Delphin*.

- B publikācija (Freimanis R., Blumberga A., Vanaga R., Zundāns Z., Evaluation of the Impact of Bricks of Various Characteristics on Internally Insulated Masonry Walls in Cold Climate, *Buildings* 2023, 13 (10), 2529, <https://doi.org/10.3390/buildings13102529>). Šī pētījuma galvenais mērķis bija klasterēt Latvijā atrastos 40 vēsturiskos ķieģeļus, kas tika testēti iepriekšējā publikācijā. Tas tika veikts, izmantojot ķieģeļu higrotermiskās īpašības un *Delphin* simulācijas rezultātus. Higrotermisko īpašību klasterizācijas rezultāti tika savstarpēji pārbaudīti ar *Delphin* simulācijas datu klasterizācijas rezultātiem. Divas no deviņām kopām ietver 67,5 % no visiem paraugiem, četros klasteros bija tikai viens paraugs, citās kopās – divi, trīs un četri paraugi.
- C publikācija (Freimanis, R., Zundans, Z., Balins, R., Vanaga, R., Blumberga, A., Finding the Generic Hygrothermal Properties of Historical Bricks by Supervised Agglomerative Clustering, *Environmental and Climate Technologies*, 2022, 26 (1), pp. 1234–1243. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0093>). Šī pētījuma mērķis bija novērtēt tvaika caurlaidīgas kapilāri aktīvās kalcija silikāta siltumizolācijas sistēmas ietekmi uz dažādu vēsturisku ķieģeļu mūra higrotermisko uzvedību aukstā klimatā ar līmi un bez tās, ja siltināšana tiek veikta no telpas puses. Skaitliskajos eksperimentos tika izmantoti A un B publikācijās aprakstīto testu rezultāti par 40 vēsturisko ķieģeļu higrotermālajām īpašībām. Pētījumā tika novērtēta ķieģeļu veida, kalcija silikāta lietošanas kvalitātes un aukstā klimata ietekme uz higrotermisko uzvedību. Rezultāti rāda, ka temperatūras uzvedība ir līdzīga visiem sienu tiptiem, turpretim mitruma uzvedībā ir vērojama liela atšķirība.

2. hipotēze. Klimatiskie āra apstākļi ietekmē higrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās.

1. Zinātniskās literatūras analīze.
2. Siltināšanas sistēmu laboratorijas testi un datorsimulācijas konstantos apstākļos.
3. Siltināšanas sistēmu laboratorijas testi un datorsimulācijas dinamiskos apstākļos.
4. Jauna siltumizolācijas materiāla testēšana izmantošanai siltināšanai no iekšpuses.

Izmantotās metodes un iegūtie rezultāti ir publicēti šādās publikācijās.

- D publikācija (Biseniece, E., Freimanis, R., Purvins, R., Pumpurs, A., Blumberga, A., Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation, *Environmental and Climate Technologies*, 2018, 22 (1), pp. 22–41. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2018-0002>). Šajā pētījumā tika veikta higrotermālās simulācijas rezultātu salīdzināšana ar eksperimentālajiem rezultātiem, kas iegūti

no iekšpuses siltināta vēsturisko ķieģeļu mūra testēšanā. Pētījums veikts ar četriem siltumizolācijas materiāliem (minerālvate, EPS, kokšķiedra un granulēts aerogēls) aukstā klimatā (vidēji 4000 apkures grādu dienu). Rezultāti rāda, ka ir atšķirības starp izmērītajiem un simulētajiem pētīto konstrukciju higrotermiskajiem rādītājiem, un to cēlonis ir atšķirības starp izmantoto materiālu parametriem un sākotnējiem apstākļiem.

- E publikācija (R. Freimanis, R. Vanaga, V. Balodis, Z. Zundans, A. Blumberga, Hygrothermal assessment of insulation systems for internal insulation of solid masonry walls under various conditions, *Buildings* 2023, 13 (10), 2511; <https://doi.org/10.3390/buildings13102511>). Šajā pētījumā novērtēta masīvu mūra sienu higrotermiskā veiktspēja ar 17 siltumizolācijas sistēmām, kas pakļautas dažādiem ārējiem robežapstākļiem, ieskaitot līdzsvara stāvokļa ciklu, dinamisku sausuma ciklu, vēja virzītu ciklu un žāvēšanas ciklu. Eksperimentu laikā tika mērīts relatīvais mitrums un temperatūra zem izolācijas. Papildus tika mērītas relatīvās mitruma izmaiņas mūrī. Rezultāti liecina, ka testētajām siltumizolācijas sistēmām ir līdzīga siltuma veiktspēja, vienlaikus atšķirīga mitruma veiktspēja. Tvaika necaurlaidīgām un tvaiku necaurlaidīgām izolācijas sistēmām dažādos testa ciklos ir atšķirīga higrotermiskā uzvedība atkarībā no materiāla tvaika difūzijas pretestības. Skaitliskās simulācijas ir jutīgas pret materiālu higrotermālajām īpašībām.
- F publikācija (Blumberga A., Freimanis R., Muizniece I., Spalvins K., Blumberga D., Trilemma of historic buildings: Smart district heating systems, bioeconomy and energy efficiency, *Energy* 2019, 186, art. no. 115741. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.071>). Šajā pētījumā ir novērtēta inovatīva priežu skuju siltumizolācijas materiāla kā iekšējās siltumizolācijas materiāla lietojamība vēsturiskām masīvām sienām. Rezultāti rāda, ka pētītais materiāls ir ļoti porains, tam ir augsta mitruma pārnese, mitruma akumulācijas spēja.

3. hipotēze. Vēsturiskās mūra un akmens sienu siltināšana no iekšpuses ar tvaika necaurlaidīgu siltumizolāciju aukstā klimatā ir drošs energoefektīviātes paaugstināšanas pasākums.

1. Zinātniskās literatūras analīze.
2. Mērījumu veikšana divās ēkās, kas siltinātas no iekšpuses ar tvaika necaurlaidīgu barjeru.
3. Higrotermālo procesu datorsimulācija divu ēku ārsnienās, kas siltinātas no iekšpuses ar tvaika necaurlaidīgu barjeru.
4. Enerģijas patēriņa analīze divās ēkās, kas siltinātas no iekšpuses ar tvaika necaurlaidīgu barjeru.

Izmantotās izpētes metodes un iegūtie rezultāti ir aprakstīti šādās publikācijās.

- G publikācija (Blumberga, A., Freimanis, R., Biseniece, E., Kamenders, A., Hygrothermal Performance Evaluation of Internally Insulated Historic Stone Building in a Cold Climate, *Energies*, 2023, 16 (2), 866. <https://doi.org/10.3390/en16020866>). Šī pētījuma mērķis bija veikt higrotermālās uzvedības ilgtermiņa monitoringu no iekšpuses siltinātas vēsturiskai dolomīta akmens sienai. Monitoringa rezultāti salīdzināti ar 1D higrotermiskām simulācijām un ēkas

enerģijas patēriņa simulāciju. Mērījumu rezultāti un higrotermiskais novērtējums liecina, ka enerģijas patēriņš ir samazinājies par 55 %, relatīvajam mitrumam zem izolācijas lielāko daļu laika saglabājoties 60 %, bet īslaicīgi pieaugot par 80 %. Enerģijas patēriņa simulācija parāda enerģijas ietaupījuma potenciālu līdz pat 72 % pareizas enerģijas pārvaldības gadījumā.

- H publikācija (Freimanis, R., Vaiskunaite, R., Bezrucko, T., Blumberga, A., In-situ moisture assessment in external walls of historic building using non-destructive methods, *Environmental and Climate Technologies*, 2019, 23 (1), pp. 122–134. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0009>). Šajā pētījumā ir veikti *in situ* mitruma un temperatūras mērījumi no iekšpuses siltinātā ķieģeļu mūrī vēsturiskā ēkā Vecrīgā. Rezultāti liecina, ka gada aukstajos mēnešos mitruma problēmas nepalielinās – zem iekšējās siltumizolācijas neveidojas kondensāts un nepastāv pelējuma veidošanās risks. Tomēr ēkas fasādi būtiski ietekmē klimatiskie laikapstākļi, un lietus laikā palielinās mūra mitrums.

4. hipotēze. Vēsturiskās apbūves saglabāšana neļauj sasniegt pozitīvu energobilanci vēsturiskajos pilsētas kvartālos.

1. Zinātniskās literatūras analīze.
2. Daudzkritēriju analīze par vēsturiskā kvartāla pāreju uz pozitīvu enerģijas kvartālu no arhitektūras un ēku energoefektivitātes aspektiem.
3. Enerģijas bilances vērtējums vēsturiskā kvartāla pārejai uz pozitīvu enerģijas kvartālu.

Izmantotās metodes un rezultāti ir atspoguļoti šajā publikācijā.

- I publikācija (Blumberga, A., Vanaga, R., Antuzs, J., Bondars, E., Treija, S., Is the High Quality Baukultur a Monkey Wrench in the Global Climate Challenges? *Environmental and Climate Technologies*, 2019, 23 (3), pp. 230–244. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0092>). Šajā rakstā ir aprakstīta dubultā daudzkritēriju analīze, novērtējot pilsētu kvartālus gan no energoefektivitātes, gan kultūras mantojuma perspektīvas. Piedāvātie daudzkritēriju analīzes kritēriji, lai novērtētu kultūras mantojumu, dzīvotspēju un energoefektivitātes potenciālu, raksturo pilsētas kvartāla specifiskās īpašības. Iegūtie rezultāti liecina, ka kvartāliem ar augstāku kultūrvērtību ir mazāks energoefektivitātes potenciāls, un otrādi.
- J publikācija (Blumberga, A., Vanaga, R., Freimanis, R., Bondars, E., Treija, S., Transition from traditional historic urban block to positive energy block, *Energy*, 2020, 202, 117485. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117485>). Pētījums ir vērsts uz pāreju no tradicionālā pilsētas kvartāla uz pozitīvās enerģijas kvartālu pilsētas vēsturiskā centra vidē. Tajā analizēti enerģijas patēriņa dati un izstrādāta koncepcija par iespējam samazināt enerģijas patēriņu, kā arī kvartālā ražot atjaunojamo enerģiju un atgūt siltumenerģiju no datu centriem un dzesēšanas blokiem. Rezultāti liecina, ka, lai sasniegtu pozitīvu enerģijas kvartālu, nepieciešami ļoti ambiciozi energoefektivitātes uzlabošanas mērķi.

Darba zinātniskā novitāte

- Veikta Latvijas vēsturisko ēku ķieģeļu higrrotermisko parametru testēšana un klasteru veidošana.
- Veikta dažādu siltumizolācijas materiālu un sistēmu testēšana laboratorijas apstākļos par izmantošanu siltināšanai no iekšpuses vēsturiskās mūra ēkās aukstā klimatā
- Veikti ilgtermiņa *in-situ* mērījumi par vēsturisko akmens ārsienu siltināšanu reālā ēkā aukstā klimatā.
- Izstrādāta dubultā daudzkritēriju analīze, ar kuru veikta vēsturiska pilsētas kvartāla atlasīšana pēc kultūrvēsturiskajiem un energoefektivitātes kritērijiem
- Veikts novērtējums par pozitīvas enerģijas bilances kvartāla izveidi kultūrvēsturiskā pilsētvides apbūvē.

Darba praktiskais lietojums

Darbā iegūtie rezultāti ir būtiski būvzinātniekiem, arhitektiem un citiem speciālistiem, kas saistīti ar ēku renovāciju un siltināšanu. Darbā iegūtie mērījumu un dati atvieglo vēsturisko ēku un vēsturisko ēku pilsētas kvartālu energoefektivitātes pasākumu risinājumu plānošanu un izvēli. Darbā izveidotie Latvijā iegūto vēsturisko ķieģeļu higrrotermālo parametru faili ir pieejami ikvienam speciālistam, kas plāno veikt siltināmās konstrukcijas matemātisko modelēšanu. Pētījumā iegūtie secinājumi un atziņas var palīdzēt ēku īpašniekiem un apsaimniekotājiem novērtēt riskus un ieguvumus, siltinot ēkas no iekšpuses. Darbā iegūtie rezultāti ir būtiski arī politikas veidotājiem ne tikai valsts, bet arī pašvaldību līmenī, jo ļaus veidot ar ēku renovāciju saistītus normatīvos dokumentus, kas ir zinātnē balstīti. Tie var būt saistīti gan ar dažādiem konstruktīviem ēku siltināšanas risinājumiem, gan arī ar pilsētu kvartālu pārveidošanu par pozitīvas energobilances kvartāliem.

Darba rezultātu aprobācija

Zinātniskās publikācijas par tēmu

1. Freimains R., Zundans Z., Balins R., Blumberga A., un Vanaga R. (2021). Hygrothermal Properties of Historic Bricks From Various Sites of Latvia [Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5575101>.
2. Freimanis R., Blumberga A., Vanaga R., Zundāns Z., Evaluation of the Impact of Bricks of Various Characteristics on Internally Insulated Masonry Walls in Cold Climate, *Buildings* 2023, 13 (10), 2529, <https://doi.org/10.3390/buildings13102529>
3. Freimanis, R., Zundans, Z., Balins, R., Vanaga, R., Blumberga, A., Finding the Generic Hygrothermal Properties of Historical Bricks by Supervised Agglomerative Clustering, *Environmental and Climate Technologies*, 2022, 26 (1), pp. 1234–1243. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0093>.

4. Biseniece, E., Freimanis, R., Purvins, R., Pumpurs, A., Blumberga, A. Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation, *Environmental and Climate Technologies*, 2018, 22 (1), pp. 22–41. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2018-0002>.
5. Freimanis R., Vanaga R., Balodis V., Zundans Z., Blumberga A. Hygrothermal assessment of insulation systems for internal insulation of solid masonry walls under various conditions, *Buildings* 2023, 13 (10), 2511; <https://doi.org/10.3390/buildings13102511>.
6. Blumberga A., Freimanis R., Muizniece I., Spalvins K., Blumberga D. Tri-lemma of historic buildings: Smart district heating systems, bioeconomy and energy efficiency, *Energy* 2019, 186, art. no. 115741. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.071>.
7. Blumberga, A., Freimanis, R., Biseniece, E., Kamenders, A. Hygrothermal Performance Evaluation of Internally Insulated Historic Stone Building in a Cold Climate, *Energies*, 2023, 16 (2), 866. <https://doi.org/10.3390/en16020866>.
8. Freimanis, R., Vaiskunaite, R., Bezrucko, T., Blumberga, A. In-situ moisture assessment in external walls of historic building using non-destructive methods, *Environmental and Climate Technologies*, 2019, 23 (1), pp. 122–134. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0009>.
9. Blumberga, A., Vanaga, R., Antuzs, J., Bondars, E., Treija, S. Is the High Quality Baukultur a Monkey Wrench in the Global Climate Challenges? *Environmental and Climate Technologies*, 2019, 23 (3), pp. 230–244. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0092>.
10. Blumberga, A., Vanaga, R., Freimanis, R., ...Bondars, E., Treija, S. Transition from traditional historic urban block to positive energy block, *Energy*, 2020, 202, 117485. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117485>.

Promocijas darba rezultāti prezentēti trīs starptautiskajās zinātniskajās konferencēs.

1. Starptautiskā zinātniskā konference “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2022, Rīga, Latvija.
2. Starptautiskā zinātniskā konference “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2020, Rīga, Latvija.
3. Starptautiskā zinātniskā konference “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2019, Rīga, Latvija.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā ir 10 tematiski vienotas zinātniskās publikācijas. Šīs publikācijas ir prezentētas un pētījumu rezultāti aprobēti vairākās starptautiskās konferencēs, kā arī tās ir pieejams zinātniskajās informācijas krātuvēs un ietvertas starptautiskajās datubāzēs. Promocijas darbs rakstīts latviešu valodā, tā struktūra ir balstīta izpētē par vēsturisko ēku energoefektivitāti, ko veido četras galvenās tēmas (1. att.).

1. Vēsturisko ēku būvmateriāli un konstrukcijas.
2. Siltumizolācijas materiāli un sistēmas.
3. Iekšējās siltināšanas lietojums vēsturiskās ēkās.
4. Pozitīvas enerģijas bilances kvartāls vēsturiskā pilsētvidē.

Energoefektīvas vēsturiskās ēkas	Vēsturisko ēku materiāli un konstrukcijas	Datu kopa ar 40 ķieģeļu higratermālo parametru testu rezultātiem	A publikācija
		Testēto ķieģeļu klasteru veidošana	B publikācija
		Datorsimulācija mūra sienām no 40 ķieģeļu veidiem ar siltināšanu no iekšpuses	C publikācija
	Siltumizolācijas materiāli un sistēmas	4 siltumizolācijas sistēmu testi	D publikācija
		17 siltumizolācijas sistēmu testi	E publikācija
		Inovatīva siltumizolācijas materiāla vērtēšana	F publikācija
	Iekšējās siltināšanas lietojums vēsturiskās ēkās	Dolomīta mūra ēkas siltināšana no iekšpuses	G publikācija
		Ķieģeļu ēkas siltināšana no iekšpuses	H publikācija
	Pozitīvas enerģijas bilances kvartāls vēsturiskā pilsētvidē	Energoefektivitātes un vēsturiskās vērtības ietekmes novērtējums	I publikācija
		Energoefektivitātes potenciāla noteikšana kvartālā	J publikācija

1. att. Promocijas darba tematiskā struktūra.

Promocijas darbā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, izmantotās literatūras saraksts. Promocijas darba ievadā definēts darba mērķis un tā īstenošanai veicamie uzdevumi, aprakstīta pētījuma zinātniskā un praktiskā nozīme. Pirmajā nodaļā sniegts literatūras apskats par pētāmajām tēmām. Otrajā nodaļā izklāstītas pētījumu metodes, kas saistītas ar vēsturisko ēku energoefektivitāti un četrām izpētes apakštēmām (1. att.). Trešajā nodaļā apskatīti pētījumu rezultāti. Promocijas darba noslēgumā apkopoti gūtie secinājumi atbilstoši definētajām hipotēzēm. Promocijas darba literatūras sarakstā ir 59 nosaukumi.

1. IZMANTOTĀ METODIKA

Šajā nodaļā aprakstītas darbā izmantotās zinātniskās izpētes metodes. Tās detalizēti ir atspoguļotas zinātnisko žurnālu publikācijās un prezentētas starptautiskās konferencēs, un atsauces uz šīm publikācijām (skat. publikāciju sarakstu ievada nodaļā) ir izmantotas visā nodaļā. Darbā izmantotas dažādas zinātniskās izpētes metodes, t. sk. matemātiskā modelēšana, materiālu un konstrukciju testēšana laboratorijā un mērījumu veikšana reālās ēkās, kā arī daudzkritēriju analīzes metode.

1.1. Vēsturisko ēku materiāli un konstrukcijas

Lai varētu veikt datorsimulācijas ārsienu siltināšanai no iekšpuses, nepieciešami izejas parametri par katra simulācijā izmantotā materiāla higrotermālajām īpašībām. Simulācijas rezultātu precizitāte ir atkarīga no ievades datu atbilstības konkrētajai sienai, tāpēc materiālu parametru vērtībām jābūt pēc iespējas tuvākiem pētāmās sienas parametru vērtībām. Šajā pētījumā izmantota datorprogramma *Delphin*, kas izstrādāta Drēzdenes Tehniskajā universitātē.

Pētījuma gaitā tika veikta 40 vēsturisko ķieģeļu paraugu vākšana no dažādiem Latvijas reģioniem. Paraugi tika vākti, meklējot ēkas, kas tiek renovētas vai nojauktas, vai arī ir sabrukušas. Paraugu maksimālo skaitu noteica laboratorijas testēšanas kapacitāte.

Pētījuma pirmajā posmā tika veikta savākto paraugu higrotermālo īpašību testēšana. 1.1. tabulā apkopotas savākto ķieģeļu paraugu standartizētās testēšanas metodes, kas izmantotas pētījumā [4].

1.1. tabula

Ķieģeļu paraugu testēšanas metodes, kas izmantotas pētījumā

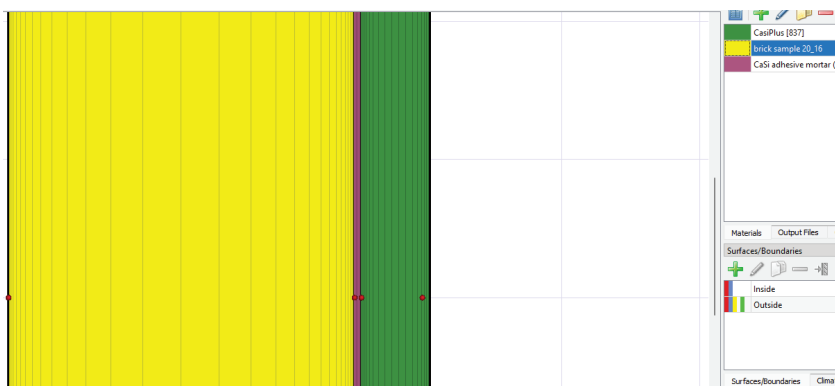
Blīvums	<i>EN 772-13:2000</i> . Mūra elementu testēšanas metodes. Mūra elementu (izņemot dabīgā akmens) neto un bruto sausā blīvuma noteikšana
Porainība	<i>EN 772-3:1998</i> . Mūra elementu testēšanas metodes. Māla mūra elementu neto tilpuma un procentuālo tukšumu īpatsvara noteikšana, veicot higrostatisko svēršanu
Tvaika caurlaidība	<i>CUP</i> testi (μ vērtības). <i>EN ISO 12572:2001</i> – Būvmateriālu un izstrādājumu higrotermiskās īpašības – Ūdens tvaika caurlaidības īpašību noteikšana
Ūdens uzsūce	<i>ISO 15148:2002, 2002</i> . Būvmateriālu un izstrādājumu higrotermiskā veiktspēja – ūdens absorbcijas koeficienta noteikšana ar daļēju iegremdēšanu

Lai varētu izveidot nepieciešamos failus datorprogrammai *Delphin*, tika veiktas dažas novirzes no testēšanas standartiem saskaņā ar Drēzdenes Tehnoloģiju universitātes izstrādātajiem testēšanas aprakstiem. Izmantotās metodes aprakstītas 1.2. tabulā.

Testēšanas metodes saskaņā ar Drēzdenes Tehniskās universitātes testēšanas aprakstiem

Mitruma akumulācija	Higroskopiskās sorbcijas un ūdens akumulācijas īpašības tiek testētas pēc Drēzdenes Tehnoloģiju universitātē izstrādātās metodes, tās pamatā ir <i>DS/EN ISO 12571:2013</i> Būvmateriālu un izstrādājumu higrotermiskās īpašības – Higroskopisko sorbcijas īpašību noteikšana un <i>DS/EN ISO 11274</i> Augsnes kvalitāte – Ūdens aizturēšanas īpašību noteikšana – Laboratorijas metodes
Žūšanas likne	Drēzdenes Tehnoloģiju universitātē izstrādāta neizotermiskā kombinētā tvaika un šķidrums pārnese testēšanas metode
Siltumietilpība un siltumcaurlaidība	Siltuma impulsu tehnoloģija ar <i>ISOMET</i> iekārtu

Nākamajā solī iegūtie testēšanas rezultāti tika izmantoti klasteru veidošanā, izveidojot hierarhijas klasterizācijas dendrogrammu, kas veidota ar aglomeratīvās klasterizācijas metodi. Paraugu klasterēšanai tika izmantota mašīnmācības (*ML*) klasterizācijas analīze ar *Jupyter Lab* [5]. Klasterizācijas veikšanai tika izmantotas *Python* bibliotēkas no *SciKit Learn*. Izmantotas *Python* bibliotēkas, tostarp *Sklearn* un *Matplotlib*. *Sklearn* pamatā ir *NumPy* un *Scipy*, un to izmanto klasterizācijas procesa aprēķiniem [6]. *Matplotlib* tiek izmantots rezultātu vizualizācijai, ieskaitot dendrogrammu. Pirms klasterizācijas visi datu ieraksti tiek normalizēti ar *StandardScaler* funkciju, kas iebūvēta *Sklearn* bibliotēkā. Datu normalizēšana ir nepieciešama, lai dažiem datiem nebūtu lielāks svars nekā citiem rezultātiem. Veicot klasterizācijas analīzi, tiek ģenerēti visi iespējamie klasteru skaitīšanas risinājumi, kas nozīmē, ka spektra vienā galā visi paraugi atrodas vienā lielā klasterī, bet spektra otrā pusē katrs paraugs veido atsevišķu klasteru [7].



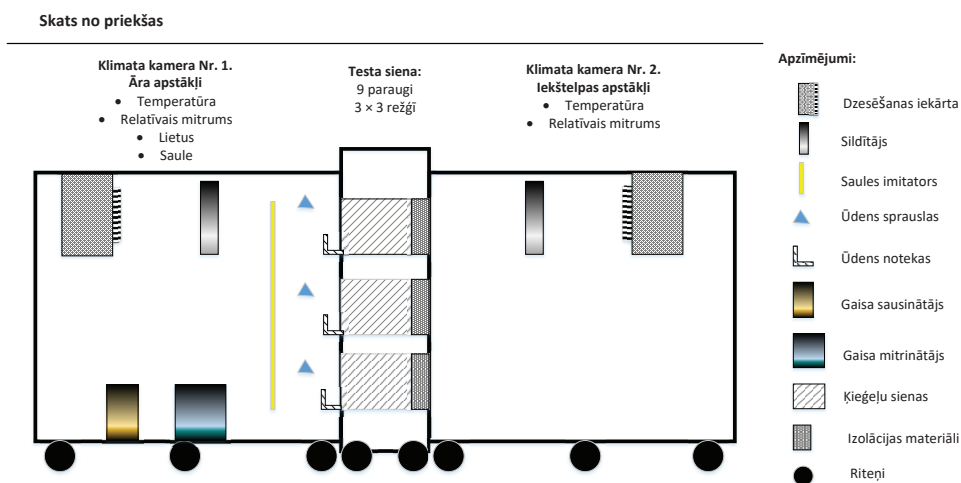
1.1. att. Simulācijas modelis, kas izmantots 40 sienu veidu salīdzinājumam.

Izveidotie *Delphin* faili tika izmantoti nākamajā pētījuma solī, lai varētu veikt datorsimulāciju programmatūrā *Delphin* ar 40 testētajiem ķieģeļiem, no kuriem veidots mūris, kas no iekšpuses siltināts ar kalcija silikātu. 1.1. attēlā redzama modelētā ārējās struktūra ar ķieģeļu mūri (0,25 m) un kalcija silikāta siltumizolāciju (0,05 m). Tika veiktas divas simulācijas katram no 40 mūra veidiem ar un bez līmes zem izolācijas materiāla [8].

Āra klimatam izmantoti Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra apkopotie dati par 2022. gadu, kas iegūti no Latvijas Universitātes meteoroloģiskās stacijas [9]. Iekštelpu klimata apstākļi tiek iestatīti kā āra temperatūras funkcija. Simulācijas periods ir trīs gadi.

1.2. Siltumizolācijas materiāli un sistēmas

Šajā pētījuma apakšnodaļā veiktie laboratorijas testi veikti klimata kamerās (āra klimata kamera un telpas klimata kamera), kas atrodas laboratorijā [10], [11]. Testa paraugi ir iebūvēti testa sienā, kas testēšanas laikā tiek novietota starp abām kamerām, lai kontrolētos apstākļos varētu veikt testus (1.2. att.). Āra klimata kamera simulē āra apstākļus, dinamiski kontrolējot kameras temperatūru, relatīvo mitrumu, vēja dzītu lietu un saules starojumu. Telpas klimata kamera simulē iekštelpu apstākļus, šajā kamerā tiek nodrošināts nepieciešamais mikroklimats, mainot relatīvo mitrumu un temperatūru. Āra klimata kamera ir aprīkota ar ūdens izsmeļšanas un savākšanas sistēmu konstrukcijas ārējā pusē, lai simulētu vēja dzīta lietus ietekmi (kad lietu dzen vējš, liels ūdens daudzums iedarbojas uz vertikālām virsmām). Sistēmā ir deviņas sprauslas, pa vienai katram sienas paraugam, sūknis, plastmasas caurules ūdens sadales sistēmai un ūdens savākšanas sistēmas. Saules starojuma simulācijas lampas imitēja saules iedarbību.

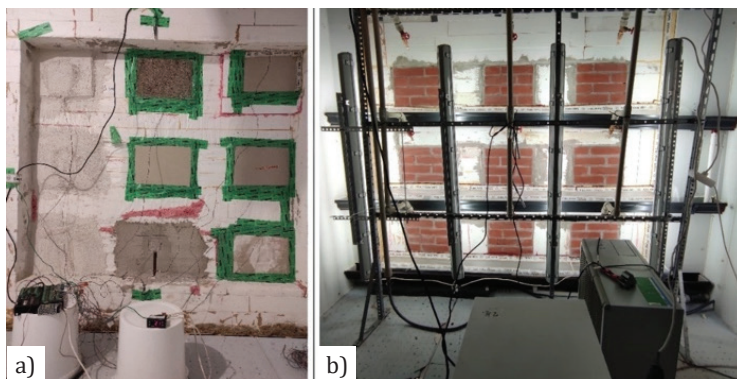


1.2. att. Klimata kameru shematiskais attēlojums.

Relatīvais mitrums starp izolācijas slāni un mūri tika mērīts, izmantojot *Honeywell HIH 4000* sērijas mitruma sensorus. Zem izolācijas slāņa tika uzstādīti mitruma sensori kopā ar K tipa termopāriem. Katra parauga sensori mēra apstākļus starp izolācijas slāni un mūra sienu, kur pastāv ievērojams kondensācijas risks. *Campbell Scientific CR1000* datu reģistrētājs ieraksta datus datorā. Mērījumu laika intervāls ir 1 min.

Vienā no pētījuma posmiem tika testētas 18 siltumizolācijas sistēmas. Katra sistēma sastāv no siltumizolācijas materiāla ar tvaika barjeru vai bez tās, līmes un ārējās apdares (dažām sistēmām tās nav). Dažas sistēmas tika uzbūvētas pēc ražotāja norādījumiem (minerālvate ar tvaika barjeru, *EPS* (divi veidi), *XPS*, *PIR* ar *Sika* cementa kārtu un stikla šķiedras tīklu, korķis, aerogela sega). Citas sistēmas ar nolūku tika veidotas atšķirīgi no instrukcijām, lai pārbaudītu materiālu higrtermisko uzvedību, piemēram, tvaika caurlaidīgi materiāli tika uzstādīti bez tvaika barjeras: akmens vate, keramzīts, celuloze, trīs veidu kokšķiedras plāksnes ar dažādu blīvumu un ēvelskaidu plāksne bez ārējās apdares. Siltumizolācijas materiāliem ir dažāda izcelsme, un tie ietver gan tvaika necaurlaidīgus, gan tvaiku necaurlaidīgus materiālus. Ģipša apmetums tika izslēgts no rezultātiem, jo relatīvā mitruma sensors testu laikā nedarbojās. Testos izmantotās siltumizolācijas sistēmas ir no neorganiskiem minerāliem iegūti materiāli: minerālvate ar tvaika barjeru, akmens vate, keramzīts, ģipša apmetums un aerogela sega. Materiāli, kas ir atvasināti no organiska fosilā kurināmā, ir *EPS* (divi veidi), *XPS*, *PIR* ar *Sika* cementa slāni un stikla šķiedras tīklu (no ārpusē), *PIR* ar alumīnija segumu un *VIP*. Bioloģiskie augu/dzīvnieku izcelsmes materiāli ir celuloze, trīs veidu kokšķiedras plātnes ar dažādu blīvumu: korķa, keramzīta un ēvelēšanas skaidu plāksne. Materiālu īpašības tika iegūtas no ražotāja tehniskajām datu lapām vai tieši sazinoties ar ražotājiem. Pieejamā informācija bija par materiāla siltuma īpašībām, piemēram, siltumvadītspēju λ , citu parametru, piemēram, īpatnējo siltumu vai tvaika pretestību, dažu izstrādājumu tehniskajās datu lapās trūka.

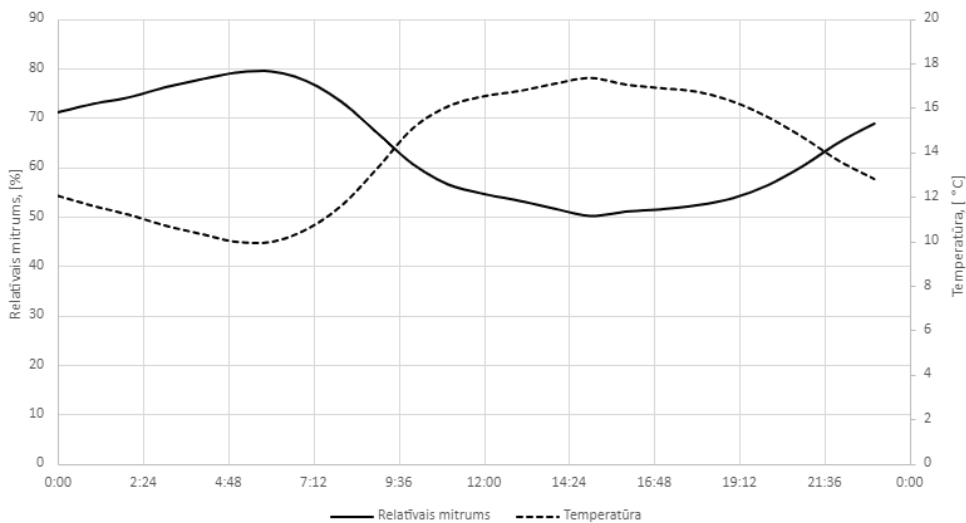
Katra siltināšanas sistēma tika piestiprināta pie mūra parauga, kas būvēts no rūpnieciski ražotiem jauniem ķieģeļiem (1.3. att.). Lai samazinātu materiāla īpašību nenoteiktības ietekmi, tika izmantoti jauni ķieģeļi. Pirms mērījumu sākšanas tika veikta ķieģeļu nostādīšana telpas apstākļos, lai sienu paraugi izžūtu.



1.3. att. Testa siena ar deviņiem mūra sienas paraugiem: a) no siltās puses; b) no aukstās puses.

Āra klimata kameras parametru vērtības visiem cikliem tika balstītas 2014.–2018. gada laikapstākļu datos, lai atdarinātu āra vides apstākļus. Tie iegūti no publisko novērojumu datubāzes. Kritērijs mēneša izvēlei temperatūras svārstību cikla modelēšanai bija dienas temperatūras svārstību lielākā amplitūda, tāpēc āra gaisa parametri atbilst maijam (1.4. att.). Eksperimentālā plāna pamatā bija šādi apstākļi kamerās:

- telpas klimata kameras temperatūra +20 °C, relatīvais mitrums 50 %;
- āra klimata kameras temperatūra līdzsvara apstākļos +10 °C, relatīvais mitrums 50 %; dinamiskajiem cikliem temperatūra un relatīvais mitrums atbilst āra ikdienas svārstībām maijā (1.4. att.); vēja virzīts lietus 0,278 l/m²·s (piecas minūtes katru dienu), saules starojums 300 W/m² (astoņas stundas dienā).

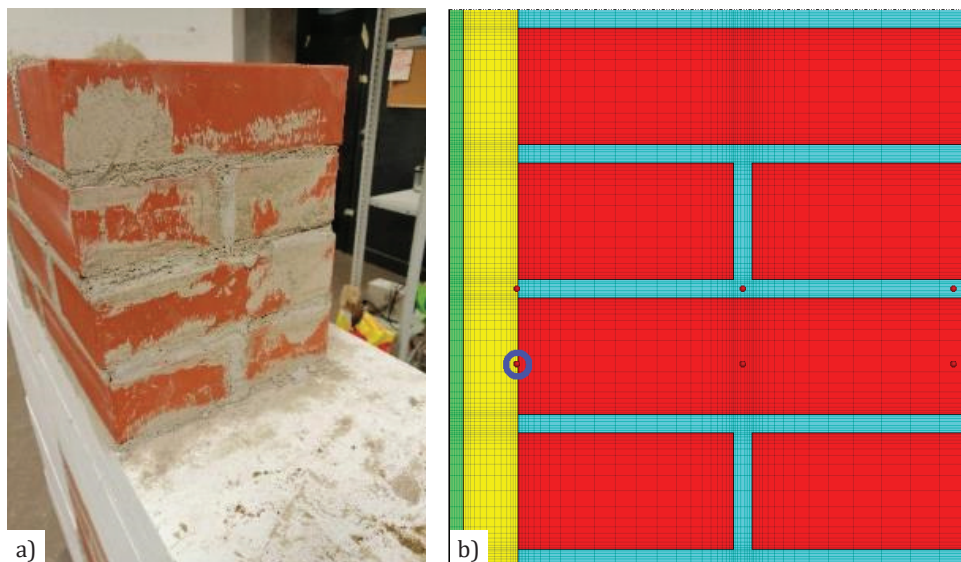


1.4. att. Diennakts klimata svārstības maijā, kas izvēlētas par pamatu dinamiskajam testēšanas ciklam.

Šajā pētījuma posmā papildus relatīvā mitruma un temperatūras mērījumiem zem izolācijas tika veikti mūra mitruma mērījumi ar neinvazīvām mērīšanas metodēm (dielektrisko un mikroviļņu zondi). Neinvazīvi mitruma mērījumi testa laikā tika veikti piecas reizes pirms un pēc katra testa cikla. Mērījumiem tika izmantots *Trotect T3000*. Mitruma mērīšanai 20 cm dziļumā tika izmantota mikroviļņu zonde, 2 cm dziļumā – ar dielektriskā zonde.

Pirmās deviņas laboratorijā testētās sistēmas tika simulētas programmā *Delphin* līdzsvara stāvokļa apstākļos, izmantojot līdzīgus materiālus no esošās materiālu datubāzes. Materiāli tika izvēlēti, pamatojoties uz norādījumiem specifiskajās, ko ražotāji nodrošina laboratorijas eksperimentā izmantotajiem oriģinālajiem materiāliem. Šīs simulācijas tika veiktas gan atbilstoši mainīgiem āra klimata apstākļiem, gan nemainīgiem apstākļiem, lai iegūtu datus un salīdzinātu tos ar mērījumu datiem, kas iegūti laboratorijas eksperimentā. Simulāciju sākotnējie

temperatūras un relatīvā mitruma apstākļi tika iestatīti tā, lai tie atbilstu eksperimenta sākumā izmērītajiem, un āra relatīvais mitrums tika palielināts līdz 93 %, lai tas atbilstu apstākļiem, kas tiek uzturēti klimata kamerā. Simulāciju laika posms tika iestatīts uz vienu stundu. Katra izolācijas sistēma tika modelēta arī programmatūrā *Delphin* (1.5. att.). *Delphin* fails tika izveidots testa sienās izmantoto ķieģeļu higratermiskajām īpašībām.



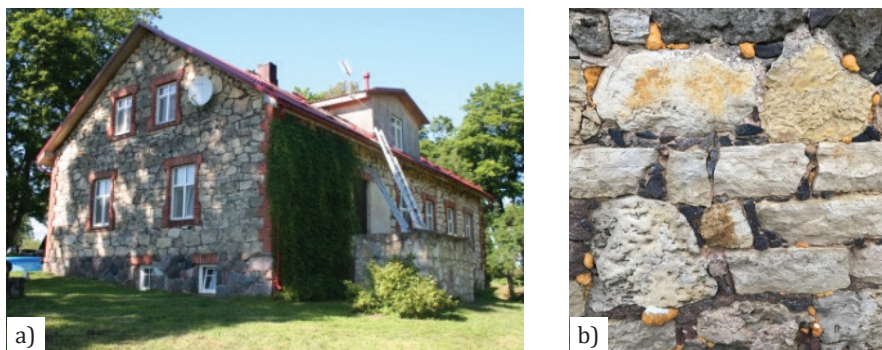
1.5. att. Testa sienas paraugs: a) laboratorijā; b) *Delphin* modelī.

1.3. Iekšējās siltināšanas lietojums vēsturiskās ēkās

Pirmais pētījums veikts viengīmeņu ēkā Seces pagastā, Aizkraukles novadā, Latvijā [12]. Tā celta 1893. gadā kā lauku māja. Pēc Otrā pasaules kara līdz 21. gadsimtam ēka bija slikti uzturēta; pagrabs tika izmantots kā lopu novietne, un tā rezultātā tika nopietni bojātas koka sijas un pirmā stāva segums. 1992. gadā ēka tika denacionalizēta, un īpašumtiesības uz ēku atguva ēkas sākotnējā īpašnieka ģimene.

Ēkai ir divi stāvi ar kopējo apsildāmo platību 339 m² un tilpumu 870 m³. Pagrabstāvs (stāva platība 68 m², tilpums 130 m³) aizņem pusi no ēkas platības dienvidaustrumu fasādē un netiek apsildīts. Fasādes kopējā platība ir 274 m², ieskaitot logus un durvis, bet neskaitot pagraba daļu.

Ārsienas ir būvētas no vietējas izcelsmes dolomīta akmens, kas iestrādāts javā. Pagraba sienām izmantoti arī granīta akmeņi. Granīta šķembas izmantotas arī javas šuvju pārklāšanai starp dolomīta akmeņiem (1.6. att.).



1.6. att. Dolomīta akmeņu vēsturiskā ēka Seces pagastā: a) ēkas galvenā fasāde; b) akmens sienas ārējā virsma.

Dolomīta paraugi no ēkas tika iegūti un pārbaudīti laboratorijā, lai noteiktu to galvenās īpašības – blīvumu, īpatnējo siltumietilpību, siltumvadītspēju, kopējo porainību, kapilāru piesātinājumu, ūdens tvaika pretestības koeficientu, ūdens uzņemšanas koeficientu un mitruma uzglabāšanu. Šīs vērtības tika tālāk izmantotas kā ievades dati, lai raksturotu materiāla īpašības simulācijas programmā *Delphin*.

Laboratorijas dati tika noteikti, izmantojot virkni testu. Atkarībā no testa tika sagatavoti 3–22 paraugi. Papildus standarta pārbaudes metodēm tika izmantotas arī citas metodes.

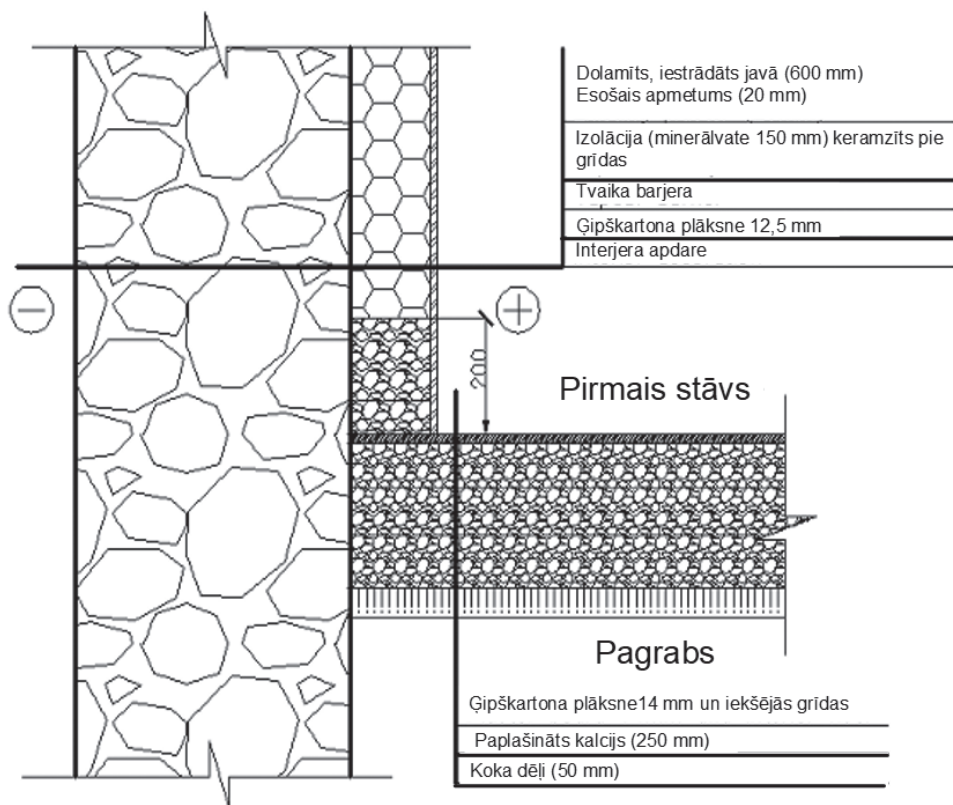
Ēkas energobilances aprēķināšanai tika izmantots dinamiskās simulācijas rīks *TRNSYS Type 56* (2016). Tika simulēti trīs scenāriji.

- Bāzes līnija. Ēka pirms abām renovācijām.
- Ēka ar iekšējo izolāciju uz zemes un pirmā stāva sienām.
- Ēka ar papildu energotaupības pasākumiem (pagraba griestu un jumta siltināšana, logu nomaiņa).

Visu scenāriju simulācijas balstījās šādos pieņēmumos:

- tika izmantoti Latvijas klimatiskie dati;
- iekštelpu temperatūra +20 °C, kad ēka tiek izmantota, piemēram, darba dienās no rīta (no plkst. 6 līdz plkst. 8) un vakarā (no plkst. 16 līdz plkst. 23) un pilnas dienas brīvdienās, un +18 °C pārējā laikā;
- iekštelpu relatīvais mitrums 50 %; infiltrācija 0,05 h⁻¹, ar papildu dabisko ventilāciju logu atvēršanas laikā 0,5 h⁻¹; siltuma ieguvumi ir balstīti vērtībās, kas noteiktas standartā *EN ISO 13790:2008*, visi siltuma ieguvumi ir plānoti.

2017. gada decembrī ziemeļaustrumu fasādes ārsienās tika uzstādīti temperatūras, relatīvā mitruma, tilpuma ūdens satura un siltuma plūsmas sensori. Viens sensoru komplekts tika uzstādīts dzīvojamās istabas sienā, otrs – vannasistabas sienā. Abas sienas tika modernizētas 2015. gadā (1.7. att.).

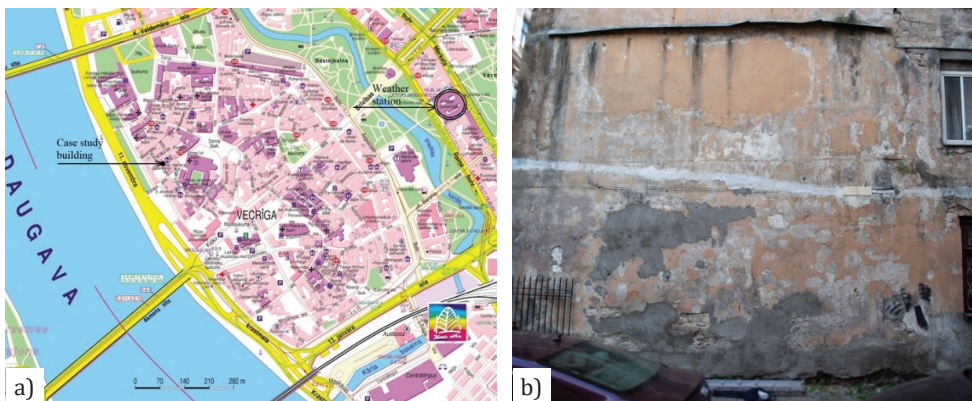


1.7. att. Dzīvojamās istabas ār sienas un grīdas šķērs griezumus pēc 2015. gada renovācijas.

Papildus uz ziemeļaustrumu fasādes tika uzstādīts piranometrs *Campbell CMP3 060271* ar jutību $11,72 \cdot 10^{-6}$ [V/(W·m⁻²)]. Sensoru uzstādīšana viesistabai un vannasistabai ir vienāda, izņemot saules starojuma sensoru. Viens saules starojuma sensors tika uzstādīts 5 m no zemes līmeņa. Iekštelpu temperatūras mērījumi tika veikti ar vītā pāra T veida termopāriem – *Labfacility XE-2342*. Temperatūras sensors t1 mēra temperatūru starp dolomīta sienu un izolācijas slāni, t2 mēra temperatūru starp izolācijas slāni un tvaika barjeru. Šie sensori tika uzstādīti 1,8 m augstumā no grīdas, kas atbilst 4 m no zemes līmeņa. *RH1-2* mēra relatīvo mitrumu tajās pašās vietās, kur temperatūras sensori. *Honeywell HIH-4000-002* mērījumu *RH* precizitāte bija $\pm 3,5$ %. Siltuma plūsmas sienās tika mērīta ar *Hukseflux* siltuma plūsmas sensoriem. Tilpuma ūdens saturs tiek mērīts, izmantojot laika domēna (*TDR*) reflektometru *Campbell CR616*, ar precizitāti $\pm 2,5$ % no tilpuma ūdens satura (*VWC*) un darba temperatūru no 0 °C līdz 70 °C. *CR616* ir uzstādīts 3,5 m no zemes līmeņa. Datu reģistrēšanai tika izmantoti trīs datu reģistrētāji: divi *Campbell Scientific CR1000* datu reģistrētāji (viens viesistabā, viens vannasistabā); viens *Campbell Scientific CR800* datu reģistrētājs (ārpusē). Visiem mērījumiem tika veikts 30 minūšu laika posms. Dati no datu reģistrētājiem tika periodiski savākti.

Lai novērtētu ēkas ārsienu higrrotermisko uzvedību ar iekšējo izolāciju, tika izmantota simulācijas rīka *Delphin* 6.1. versija un Glāzera metode. *Delphin* programmatūra ir simulācijas programma viendabīgiem slāņiem, lai modelētu siltuma un mitruma masas transportēšanu un uzglabāšanu materiālos. Glāzera metodi izmanto, lai noteiktu apstākļus dažādos sienas slāņos konkrētos iekštelpu un āra apstākļos. Simulācijā tika izmantoti programmatūras lietotāja ievadītie klimatiskie dati. Iekštelpu robežapstākļiem (temperatūra un relatīvais mitrums) tika izmantoti dati, kas iegūti no *in-situ* mērījumiem. Laikapstākļu dati, piemēram, āra temperatūra, relatīvais mitrums, vēja ātrums un virziens, stundas lietus summa un gaisa spiediens, tika ņemti no meteoroloģiskās stacijas "Skrīveri", kas atrodas 20 km attālumā no gadījuma izpētes ēkas, savukārt saules starojuma dati tika ņemti no meteoroloģiskās stacijas "Rīga-Universitāte", kas atrodas 100 km no gadījuma izpētes ēkas. Abas meteoroloģiskās stacijas apkalpo valsts SIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs". Ģipškartona un minerālvates materiālu īpašības tika importētas no *Delphin* materiālu datubāzes. Kā pretestība starp materiāla slāņiem tika pievienota tvaika barjera ($S_d = 2,3$ m). Dolomīta īpašības tika importētas modelī kā jauna materiāla fails, izmantojot laboratorisko pārbaužu laikā iegūtās vērtības. Taču jāņem vērā tas, ka sienu nesošā daļa ir veidota no neviendabīgiem dabas materiāliem. Par to šī pētījuma laikā liecina arī laboratorisko pārbaužu rezultāti.

Otrais pētījums tika veikts trīsstāvu dzīvojamā ēkā ar papildu bēniņu stāvu un vienu pazemes stāvu [13]. Ēka celta 1880. gadā un atrodas Rīgas vēsturiskajā centrā, aptuveni 150 m no Daugavas (1.8. att.). Ēkas platība ir 120,9 m², būves tilpums – 1511 m³. Ēkai ir divas blakus esošās ēkas, viena – ēkas ziemeļrietumu (ZA), otra – ēkas ziemeļaustrumu (ZA) pusē. Abas blakus esošās ēkas ir par vienu stāvu augstākas nekā gadījuma izpētes ēka. Ēkas dienvidrietumu (DR) pusē ir galvenā fasāde ar ieeju no ielas. Uz DA vērstā fasāde ir lielākā atvērtā zona āra laikapstākļiem, piemēram, vēja izraisītam lietus, saules starojumam un vējam. Brīvā telpa starp DA fasādi un nākamo ēku šajā virzienā ir 15 m, šai blakus ēkai ir vienāds augstums ar gadījuma izpētes ēku. Apmēram pirms 10 gadiem pirmā stāva dzīvokļa īpašnieks uz DA sienas ir ierīkojis iekšējo izolāciju no stikla vates (0,05 m).



1.8. att. Vēsturiskā ķieģeļu ēka Vecrīgā: a) atrašanās vieta; b) dienvidaustrumu fasāde.

Iespējamo mitruma avotu noteikšanai ārsienu mūrī izmantotas kvalitatīvās un kvantitatīvās metodes. Kvalitatīvā analīze ietver tiešu ēkas novērošanu, lai identificētu esošās sabrukšanas pazīmes un mitruma radītos bojājumus. Kvantitatīvā metode ietver mitruma sadalījuma novērtēšanu ēkas ārsienu relatīvajās skalās. Sienas mitrums tika mērīts no ārpuses. Sienu mitruma mērījumi no iekšpuses bija ierobežoti iekšējās izolācijas dēļ. Mitruma novērtējums tika veikts divos dziļumos – 2 cm un 20 cm dziļumā mūrī (ieskaitot apmetumu). Šiem mērījumiem tika izmantota daudzfunkcionāla mērierīce *Trotec T3000*. *Trotec T3000* tika izmantots ar divu veidu mērīšanas zondēm dažādiem mērījumu dziļumiem: dielektrisko zondi *TS 660 SDI* – 2 cm dziļumam; mikroviļņu zondi *TS 610 SDI* – 20 cm dziļumam. Gan dielektrisko, gan mikroviļņu zondi izmanto mitruma sadalījuma mērījumiem relatīvā mērogā un nevar tieši salīdzināt viens ar otru. Monitoringa nolūkos izmērītā dienviadaustrumu virziena siena tika sadalīta mazākos kvadrātos, veidojot režģi, katrs no tiem – aptuveni 0,4 m līdz 0,4 m. Tas pats režģis tika izmantots atkārtoti mitruma mērījumiem noteiktā laika periodā.

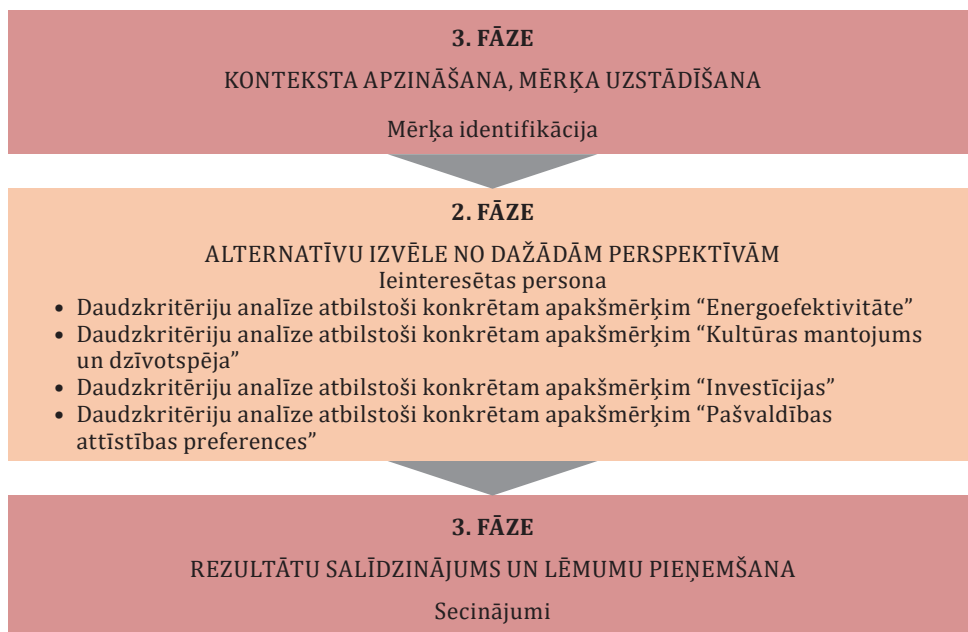
Sienu mitruma mērījumi tika iesākti rudenī (2018. gada 21. septembrī) un turpinājās līdz pavasarim (2019. gada 5. martam). Monitoringa periodā sienu mitrums tika mērīts piecas reizes. Monitoringa sistēma sāka vākt datus 2018. gada 20. novembrī. Monitoringa sistēma ietvēra relatīvā mitruma un temperatūras monitoringu starp ār sienas izolācijas slāņiem. Relatīvā mitruma un temperatūras monitoringu starp izolācijas slāņiem tika veikts, izmantojot *Honeywell HIH 4000-002* un T tipa PFA izolētu dubulto vītā pāra termopāra kabeli. Šo sensoru datu reģistrēšanai tika izmantots datu reģistrētājs *Campbell CR1000*. Monitoringa sistēmas ieviešanai iekšēji izolētajā sienā tika izurbts neliels caurums 27 mm diametrā. Kopumā izolācijas slāņos tika uzstādīti divi relatīvā mitruma un divi temperatūras sensori. Sensori tika uzstādīti pa pāriem (relatīvā mitruma sensors kopā ar temperatūras sensoru). Sensoru pāri tika uzstādīti 20 cm zem cauruma, viens pāris – starp sienu un izolāciju, otrs pāris – starp izolāciju un ģipškartona plāksni. Papildus tika mērīta temperatūra un relatīvais mitrums pie izolētās sienas iekšējās virsmas. Pēc relatīvā mitruma un temperatūras sensoru ieviešanas caurums tika atkārtoti aizpildīts ar minerālvati un ģipškartona plāksni. Lai izvairītos no papildu mitruma pievienošanas izolācijas sistēmai caur griezumam un saglabātu piekļuvi sensoriem, cauruma aizklāšanai netika izmantots apmetums. Tā vietā ģipškartona plāksne tika noslēgta ar maskēšanas lenti un papildus pārklāta ar tvaiku necaurlaidīgu alumīnija līmlenti. Tika izmantoti tuvākās meteoroloģiskās stacijas laikapstākļu dati. Meteoroloģiskā stacija atrodas Latvijas Universitātē, un datus pārvalda Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs.

1.4. Pozitīvas enerģijas bilances kvartāls vēsturiskā pilsētvidē

Vēsturiski celtām būvēm ir daudzi nacionāli un globāli nozīmīgi kultūras vērtību slāņi un dimensijas. Līdz ar to uzdevums pārveidot vēsturisko pilsētas kvartālu par pozitīvas energobilances kvartālu ir tikpat sarežģīts kā pats pilsētas būvprojoms. Šī pētījuma metodoloģija ir sakārtota sešos secīgos posmos: kvartāla izvēle; energoefektivitātes potenciāla novērtēšana; datu analīze; plānoto

pasākumu apzināšana un izvēle; novērtēšana; secinājumi [14]. Vēsturiskā centra pilsētas kvartāla dekarbonizācijas stratēģija pozitīvas energobilances kvartāla koncepcijā izstrādāta, ņemot vērā divus aspektus – energoefektivitāti un kultūras mantojumu. Katrā pētījuma metodoloģijas posmā ņemta vērā abu pušu perspektīva. Parasti energoefektivitātes scenāriji tiek svērti, izmantojot izmaksu un ieguvumu analīzi un CO₂ dzīves cikla analīzi. Šajā pētījumā izvērtējums papildināts ar energoefektivitātes pasākumu ietekmes uz kultūras mantojumu novērtējumu. Komforta paaugstināšana vēsturiskajās ēkās un jaunu elementu pievienošana tiek uzskatīta par ielaušanos vēsturiskajā celtnē. Tālākai diskusijai svarīgi izvērtēt, vai piedāvātais projekts paaugstina dzīves kvalitāti pilsētas kvartālā un kāda ir tā ietekme uz vēsturiskā mantojuma vērtībām. Trīs dažādas vērtēšanas analīzes metodes ilustrē dažādas iespējamās perspektīvas un kalpo par pamatu diskusijai starp profesionāļiem – vides inženieriem, arhitektiem, vietējiem pilsētplānotājiem un varas iestādēm, kā arī plašākai sabiedrībai par to, kā atrast līdzsvaru starp klimata pārmaiņu seku mazināšanas pasākumiem un kultūras mantojuma saglabāšanu, ceļā uz zemu oglekļa emisiju sabiedrību.

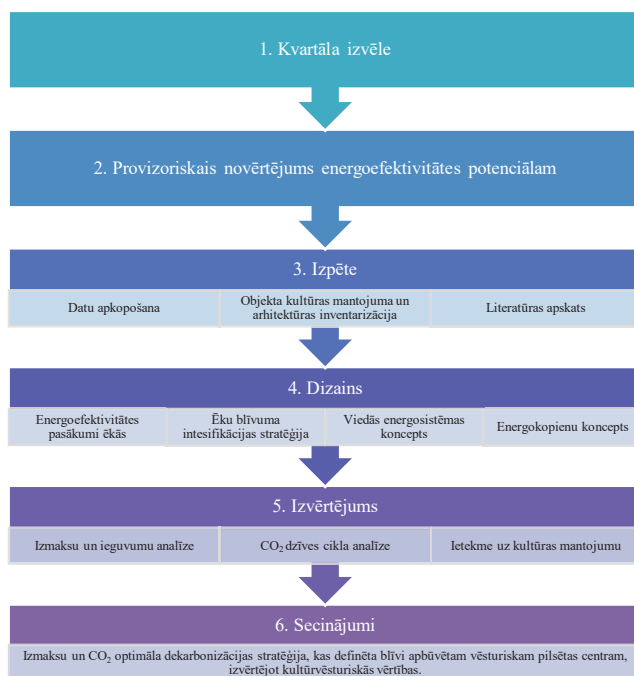
Pētījumā ir izstrādāta un lietota pilsētas kvartāla atlases metodika ar vislielāko potenciālu sasniegt pozitīvu gada energobilanci. Tā ir piemērojama jebkurai blīvi apbūvētai pilsētvidei. Pētījuma pirmā soļa mērķis ir izvēlēties kvartālu viedai pilsētvides atjaunošanai. Pētījumam ir divi vienlīdz svarīgi mērķi, tāpēc kvartāla izvēle tiek izskatīta no divām perspektīvām – tā energoefektivitātes potenciāla un augstas celtniecības kultūras kvalitātes un apdzīvojamības pilsētas kvartālos. Kvartāla izvēle tika balstīta daudzkritēriju analīzē, kur iespējamās alternatīvas tiek izvērtētas atbilstoši mērķim svarīgu kritēriju kopai [15], [16]. Pētījums tika veikts trīs posmos (1.9. att.).



1.9. att. Pētījuma metodika.

Vispirms tiek apzināts lēmumu pieņemšanas konteksts, definēti mērķi un izveidota lēmumu pieņemšanas hierarhija. Pēc tam atbilstoši iesaistīto ieinteresēto personu skaitam tiek izstrādātas vairākas daudzkritēriju analīzes metodes kopas. Šajā pētījumā tiek aplūkota “Energoefektivitāte” un “Kultūras mantojums un dzīvotspēja”. Alternatīvas tiek sarindotas atbilstoši katras analīzes apakšmērķiem, katrai ieinteresētajai pusei nosakot labāko alternatīvu. Noslēgumā rezultāti tiek salīdzināti un pieņemti galīgie lēmumi, pamatojoties uz otrā soļa rezultātiem, un apkopoti secinājumos.

Vienam no sarežģītākajiem pētījuma posmiem – pasākumu izvēles fāzei – tika izveidota metodoloģija [17]. Metodoloģija ietver trīs galvenos posmus – sākotnējo izpēti, konceptuālo izstrādi un kopējās enerģijas bilances aprēķinu (1.10. att.). Šajā darbā ir aprakstīts 2. solis – izvēlētajā pilsētas kvartāla dekarbonizācijas potenciāla sākotnējais novērtējums, tajā skaitā provizoriskā enerģijas patēriņa datu analīze un iespējamo atjaunojamās enerģijas koncepciju izvērtēšana.



1.10. att. Pētījumā izmantotā metodika.

Dati par esošo situāciju tiek iegūti no enerģijas patēriņiem vai publiski pieejamām datubāzēm. Lai novērtētu provizorisko enerģijas ietaupījuma potenciālu izvēlētajā pilsētas kvartālā, ir veikts vienkāršots aprēķins, novērtējot: 1) ēkas dziļās renovācijas enerģijas ietaupījumu; 2) AER ražošanu ar tradicionālajām tehnoloģijām – PV un saules siltumenerģiju; 3) nelietderīgā siltuma reģenerācijas tehnoloģiju.

2. REZULTĀTI

2.1. Vēsturisko ēku materiāli un konstrukcijas

No *Delphin* rezultātiem tika iegūti 3 klasteri, kur lielākā daļa (87,5 %) paraugu atrodas vienā klasterī (B). No ķieģeļu parametriem tika iegūti 6 klasteri, kur divos no tiem (3 un 5) atrodas 70 % no visiem paraugiem (37,5 % un 32,5 %). Pēc abu klastera grupu apvienošanas šie trīs ķieģeļu skaita ziņā lielākie klasteri (B, 3 un 5) izveidoja divus jaunus klasterus (B3 un B5). Kopumā 67,5 % no visiem paraugiem atrodas šajos divos klasteros, 30 % B3 un 37,5 % B5 klasterī. Paraugš (18-4) tika atzīts par vienīgo paraugu divās klasteru grupās (grupā A un grupā 2). Salīdzinot ar pārējiem ķieģeļu paraugiem pēc to apraksta, ir vēl trīs ķieģeļi ar tādu pašu aprakstu (dzeltenais māla ķieģelis, ražots 20. gs. 1. pusē). Trīs citi ķieģeļi pieder grupai B4, un šajā grupā ir tikai viens ķieģelis – sarkanais māla ķieģelis, ražots 20. gadsimta 2. pusē.

Lielākā daļa B5 apvienoto klasteru grupas paraugu ir sarkanā māla ķieģeļi (86,7 %), un lielākā daļa no tiem ir ražoti laika posmā no 19. gadsimta 2. puses (30,8 %) līdz 20. gadsimta 1. pusei (38,5 %). Otrajā lielākajā klasteru grupā B3 gandrīz visi ķieģeļi ir sarkanie māla ķieģeļi, izņemot vienu ķieģeli, kas ir no betona, un šajā grupā lielākā daļa ķieģeļu ir ražoti laika posmā no 19. gs. (27,3 %) līdz 20. gadsimta 1. pusei (36,4 %).

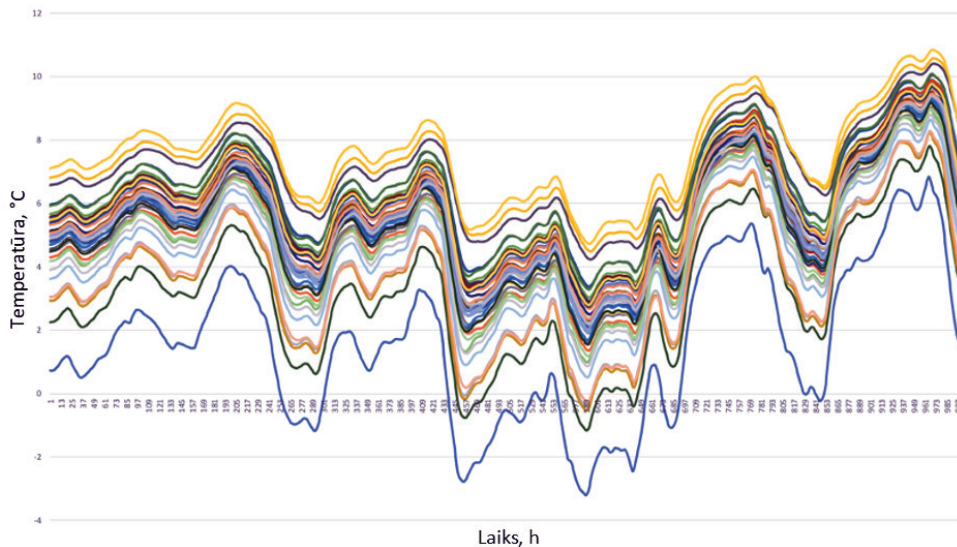
Taču jāatzīmē, ka lielākā daļa ķieģeļu paraugu ir sarkanais māls (75 %) un 60 % ir ražoti laika posmā no 19. gadsimta 2. puses (22,5 %) līdz 20. gadsimta 1. pusei (37,5 %).

Aplūkojot klasterus, kas iegūti no *Delphin* rezultātiem, kur 35 no 40 ķieģeļiem atrodas vienā klasterī, var secināt, ka dažādi parametru klasteri ģenerē līdzīgus rezultātus, šajā gadījumā 5. un 4. parametru kopas 100 % pārklājas ar rezultātu B kopu, kam seko parametru 3. kopa (92,3 % pārklāšanās) un 1. kopa (25 % pārklāšanās). Taču jāatzīmē, ka zemais klasteru skaits, šajā gadījumā – trīs, no *Delphin* rezultātu datiem ir saistīts ar lielo attālumu starp pirmo divu klasteru kombināciju ar 1. un 2. klasteri, attiecīgi 494,17 un 378,56, kam seko attālums 168 no kombinācijā ar trīs kopām. Ja pirmās divas klasteru kombinācijas tiek izslēgtas no optimālās klasteru kombinācijas aprēķiniem, tad optimālais klasteru skaits pret attālumu būtu kombinācija ar 15 klasteriem un attālumu 37,5.

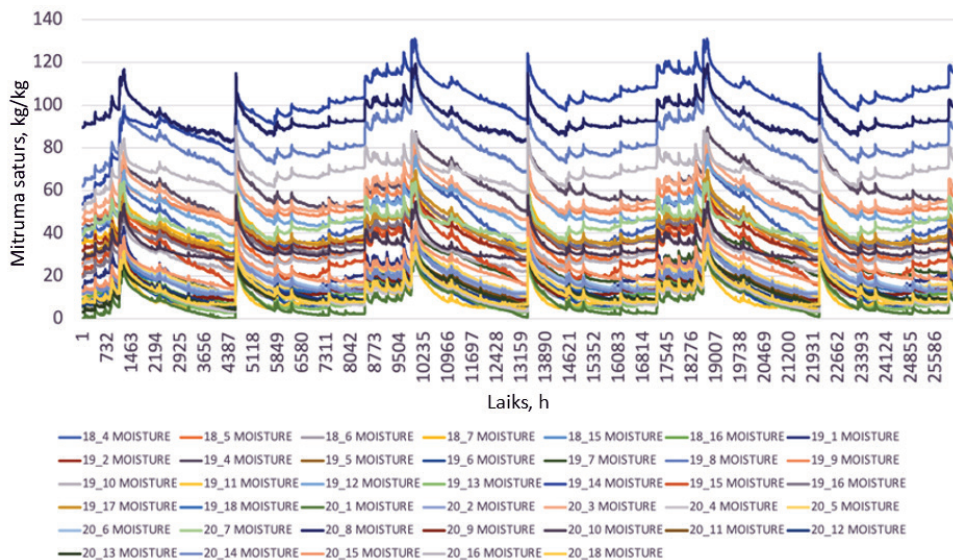
P klasteru ievades dati ir balstīti skaitliskās simulācijas izvadē, tāpēc šos rezultātus lielā mērā ietekmē izvēlētā skaitliskā aprēķinu programma (*Delphin*) un veiktās simulācijas ievades dati (materiāla īpašības, izvēlētā ģeometrija, klimatiskie apstākļi, robežnosacījumi utt.), tāpēc rezultātu interpretācija aprobežojas ar konkrētajiem klimatiskajiem apstākļiem un šajā pētījumā izmantoto ķieģeļu paraugu kopumu [7].

Skaitliskie eksperimenti par 40 dažādu ķieģeļu veidu masīvu mūra sienu, visas siltinātas no iekšpuses ar kalcija silikātu (kapilāri aktīva izolācija), liecina, ka visu sienu veidiem ir ļoti līdzīgas temperatūras tendences, savukārt mitruma uzvedībā ir vērojama liela atšķirība. Tas atbilst (*Zhou et al.*, 2018) [18] secinājumiem, ka ķieģeļu veida ietekme uz relatīvo mitrumu un temperatūru zem siltumizolācijas ir

sarežģīta. Iegūtie rezultāti rāda, ka temperatūras svārstības starp dažādiem sienu veidiem ir atkarīgas no ķieģeļu termiskās pretestības – jo augstāka ir termiskā pretestība, jo zemāka ir temperatūra zem siltumizolācijas materiāla (2.1. att.).



2.1. att. Temperatūra zem siltumizolācijas laika posmā starp 7800. un 8800. stundu.

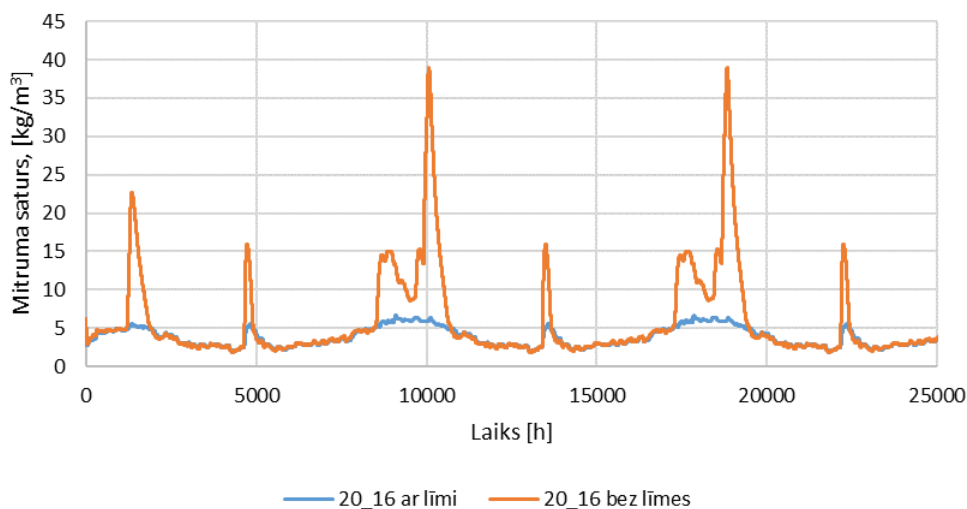


2.2. att. Mitruma saturs mūrī visiem simulētajiem sienu veidiem.

2.2 attēlā redzams, ka mitruma satura līmeņi dažādiem sienu veidiem atšķiras četras reizes. Arī mitruma satura sadalījums mūrī būtiski atšķiras. Tas ir novērojams gan kā nemainīgs mitruma līmenis visā mūrī, gan arī kā nemainīgs mitruma līmenis sienas ārējā daļā, kam seko straujš samazinājums mūra dziļākajos slāņos. Datu analīze liecina, ka šajā pētījumā nav konstatēta korelācija starp mitruma saturu, relatīvā mitruma līmeni un citiem parametriem (ūdens absorbcijas koeficients, šķidrums ūdens vadītspēja, porainība, blīvums).

No iegūtajiem rezultātiem nevar gūt apstiprinājumu citiem pētījumos izdarītajiem secinājumiem, ka masīvas mūra sienas, kas siltinātas no iekšpuses ar tvaika caurlaidīgiem kapilāri aktīviem materiāliem, higrotermiskā veiktspēja ir atkarīga no poru izmēra sadalījuma, kas nosaka ķieģeļu šķidrums ūdens vadītspēju (jo augstāks šis parametrs, jo dziļāk mūrī iekļūst lietus) [19]. Tas neatbilst arī (Zhou et al., 2018) [18] secinājumam, ka mūra sienām ar augstu kapilaritāti ir lielāki relatīvā mitruma un temperatūras rādītāji. Pētījumā nav noteikti materiāla poru izmēri, lai varētu rezultātus salīdzināt ar (Feng et al., 2021) [19] pētījumu, ka tie būtiski ietekmē tā higriskās īpašības – mazas poras galvenokārt palielina higroskopiskumu (piemēram, sorbcijas izoterms), savukārt lielas poras galvenokārt uzlabo kapilaritāti (piemēram, kapilārās absorbcijas koeficientu).

Ja būvniecības kvalitāte ir zema un līme nenodrošina pilnu saskari starp mūri un siltumizolācijas materiālu, lietus mitrums var iekļūt siltumizolācijas materiālā. 2.3. attēlā redzams piemērs ar 20_18 ķieģeļa mūri ar līmi un bez tās. Ja līme nodrošina pilnu saskari starp mūri un siltumizolācijas materiālu, nav vērojams vēja dzītā lietus ietekme uz siltumizolācijas materiālu. Šie atklājumi atbilst cita pētījuma [20] secinājumiem. Līmei ir augsta mitruma buferespēja, ja tā tiek pareizi uzklāta. Līdzīgi secinājumi publicēti arī citā pētījumā [21].

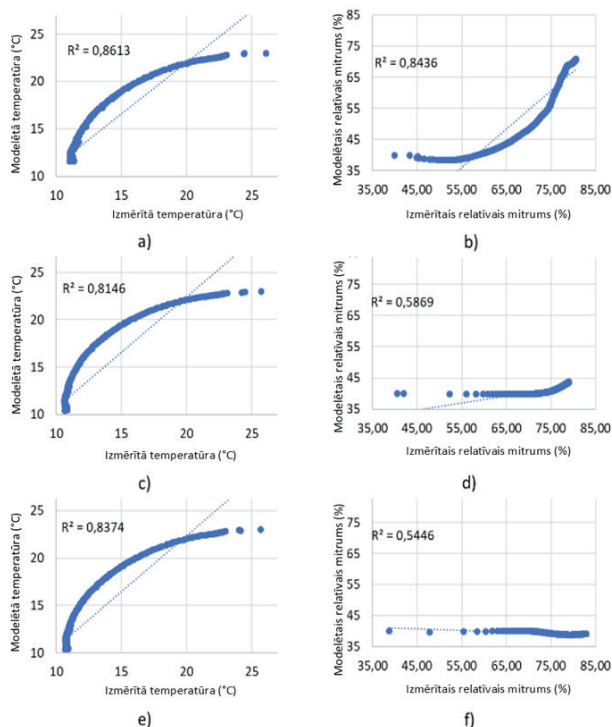


2.3. att. Mitruma saturs siltumizolācijas materiālā 20_16 ķieģeļa mūrī ar līmi un bez tās.

Simulācijas rezultāti liecina, ka, ja iekšējā siltumizolācija ar kapilāri aktīvo kalcijsilikātu tiek izmantota aukstā klimatā ar normālu iekštelpu mitruma slodzi, relatīvais mitrums nepārsniedz 96 % un tiek uzskatīts par drošu [22]. Šis secinājums attiecas gan uz siltumizolāciju ar līmi, gan bez tās.

2.2. Siltumizolācijas materiāli un sistēmas

Iegūtie rezultāti liecina, ka pastāv nesakritība starp izmērīto un simulēto higrotermisko uzvedību. Testa rezultāti rāda, ka relatīvā mitruma pieauguma temps starp mūri un siltumizolācijas materiālu ir augsts pirmajās testa dienās visiem materiāliem un palēninās, tuvojoties līdzsvara apstākļiem. Temperatūra pazeminās nedaudz mazākā tempā nekā relatīvais mitrums un sasniedz līdzsvaru aptuveni piecu dienu laikā. Pirms eksperimentālā testa veiktā simulācija parādīja daudz zemāku relatīvā mitruma pieauguma un temperatūras pazemināšanās tempu, salīdzinot ar izmērīto uzvedību. 2.4. attēlā redzamā korelācijas analīze starp mērījumu un simulāciju rezultātiem parāda, ka ir cieša sakarība starp temperatūrām – korelācijas koeficients R^2 ir 0,81–0,86 diapazonā. Cieša korelācija ir koksnes šķiedras relatīvajam mitrumam ($R^2 = 0,84$), savukārt daudz vājāka tā ir EPS ($R^2 = 0,59$) un minerālvatei ($R^2 = 0,54$).



2.4. att. Korelācija starp modelēto un izmērīto temperatūru starp mūri un izolācijas slāni (a) kokšķiedra; c) EPS; e) minerālvate) un relatīvo mitrumu (b) kokšķiedra; d) EPS; f) minerālvate).

Modeļa pielāgošana izmērītajiem datiem tika uzlabota, izmantojot parametru analīzi. Tas tika veikts, mainot mūra, javas un izolācijas materiālu parametrus. Siltumvadītspēja, sausā materiāla blīvums un ūdens tvaiku difūzijas pretestības koeficients izolācijas materiāliem tika mainīti uz materiālu ražotāju norādītajām vērtībām (2.1. tab.). Ķieģeļiem un javas siltumvadītspējai tika koriģēta īpatnējā siltumietilpība, ūdens vadītspēja pie piesātinājuma, ūdens uzsūces koeficients un sākotnējais relatīvais mitrums. Koriģētās vērtības apkopotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Parametriskai analīzei izmantoto materiālu īpašības

	Ķieģelis	Javas	Mine-rālvate	Koksnes šķiedra	EPS	
Materiāla nosaukums <i>Delp-hin</i> datubāzē	Vecs celtniecības ķieģelis <i>Dresden ZD</i>	Kaļķu cementa java	Mine-rālvate	Kokšķiedras izolācijas plāksne	Polistirola plāksne – paplašināta	
Sausā materiāla blīvums, kg/m ³	1619,51	1878,47	28 (-24 %)	50 (-67 %)	13,5 (-41 %)	
Siltumvadītspēja, W/(m·K)	0,482 (+20 %)	0,5 (-38 %)	0,036 (-10 %)	0,038 (-10 %)	0,039 (+8 %)	
Sausā materiāla īpatnējā siltumietilpība, J/kg	430 (-55 %)	470 (-38 %)	840	2000. gads	1500	
Ūdens tvaiku difūzijas pretestības koeficients	10,4726	36,9113	1	2,1 (-30 %)	30 (-69 %)	
Ūdens uzņemšanas koeficients, kg/(m ² ·s ^{0,5})	0,423587 (+11 %)	0,211622 (+486 %)	0	0,07	0,00001	
Efektīvs piesātinājums (ilgtermiņa process), m ³ /m ³	0,761043 (+111 %)	0,1 (-55 %)	0,9	0,6	0,92	
Šķidrā ūdens vadītspēja pie efektīva piesātinājuma, s	0,2059E-10 (+24 %)	3,52E-10 (+3339%)	0	0,0216E-10	0	
Sorbcijas izoterma	Mitruma saturs, RH 0 % m ³ /m ³	0,004030	2,83E-08		0,0000683	0,0000528
	RH 30 %	0,007003	0,004542		0,0048476	0,000455
	RH 50 %	0,007261	0,015729		0,0080606	0,000617
	RH 80 %	0,007720	0,027090		0,0176992	0,001078
	RH 95 %	0,023461	0,037559		0,0328964	0,009227
	RH 100 %	0,761043	0,1		0,6	0,92
Sākotnējais relatīvais mitrums materiālā,%	65 (+62 %)*	85 (+112 %)*	40	40	40	
Materiāla sākotnējā temperatūra, °C	23	23	23	23	23	

* Materiāla iekšienē, sākot no 2,5...3,5 cm dziļumā no materiāla ārējām virsmām.

Pētījumā [11] secināts, ka simulācijā liela nozīme ir materiāla parametru vērtību precizitātei, kā arī materiālu sākotnējām vērtībām, taču sākotnējām vērtībām ir daudz lielāka ietekme.

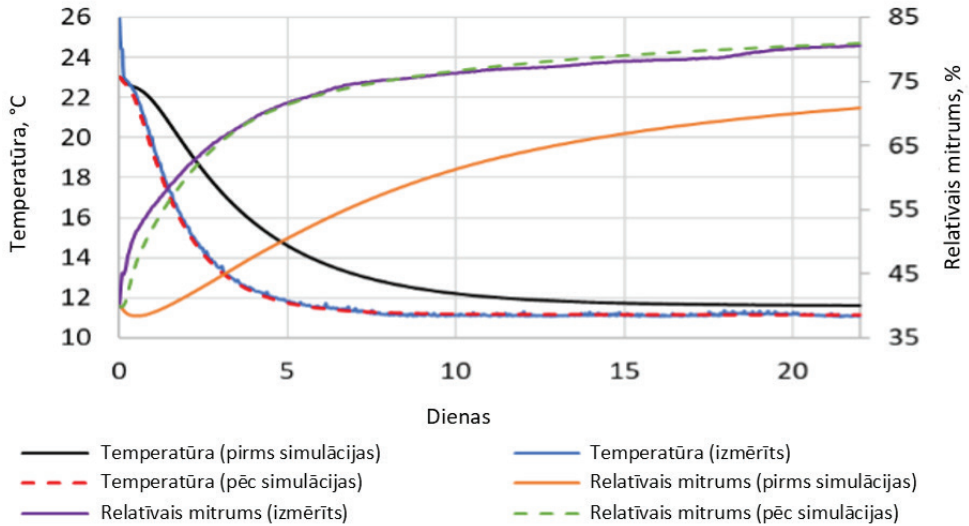
Veiktā parametru analīze parādīja parametrus, kas visbūtiskāk ietekmē konstrukcijas higratermālo uzvedību. Visu trīs testā izmantoto siltumizolācijas materiālu parametri tika pielāgoti materiālu ražotāju sniegtajām vērtībām – siltumvadītspēja *EPS* palielināta par 8 %, minerālvatei samazināta par 10 %, kokšķiedrai – par 10 %. Blīvums tika samazināts visiem trim izolācijas materiāliem: minerālvatei – līdz 24 %, kokšķiedrai – līdz 67 %, *EPS* – līdz 41 %, savukārt ūdens tvaiku difūzijas pretestības koeficients tika samazināts kokšķiedrai par 30 %, *EPS* – par 69 %.

Lai simulācijas rezultātus tuvinātu mērījumu rezultātiem, tika mainīta termiskā uzvedība, palielinot ķieģeļu siltumvadītspēju par 20 %, javai samazinot par 38 %. Īpatnējā siltumietilpība tika ievērojami samazināta gan ķieģeļiem (55 %), gan javai (38 %).

Vislielākā ietekme uz mitruma pārnese pieauguma tempu ir materiālu sākotnējam relatīvajam mitrumam – tas tika palielināts par 62 % ķieģeļiem un par 112 % javai, salīdzinot ar simulācijas vērtībām pirms testa. Pirms testiem mūris tika žāvēts 10 dienas, un tas bija pārāk īss laika posms, lai mūris izžūtu, tāpēc mitruma līmenis testu sākumā joprojām bija augstāks, nekā tika prognozēts simulācijas laikā pirms testa. Citi parametri, kas ietekmē mitruma pārnesi, ir ūdens vadītspēja pie efektīvā piesātinājuma, kas ķieģeļiem un javai tika palielināta par 24 %, līdz ar to ūdens uzsūces koeficients ķieģeļiem palielinājās par 11 %, javai – par 486 %. Efektīvais piesātinājums tika palielināts par aptuveni 111 % ķieģeļiem un samazināts par 55 % javai.

2.5. attēlā redzamas temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas simulācijas laikā pirms un pēc eksperimenta un mērījumu rezultāti sienai ar kokšķiedru bez tvaika barjeras. Galvenā atšķirība starp mērīto temperatūru un simulācijas temperatūru pirms testa tiek novērota pirmajās 10 dienās, kad simulācijas temperatūra pirms testa pazeminās lēnāk nekā izmērītā temperatūra. Savukārt pēc testa simulācijas rezultāti atbilst izmērītajai temperatūrai. Temperatūra līdzsvara stāvoklī atšķiras tikai par 0,6 °C. Lai sasniegtu pieņemamus rezultātus simulācijas atbilstībai pēc testa, ir mainīta siltumvadītspēja, sausā materiāla blīvuma un īpatnējās siltumietilpības vērtības. Tāda pati tendence vērojama arī relatīvajam mitrumam – simulācijai pirms testa sākumā ir daudz mazāks pieauguma temps, tāpēc simulācijas periodā tā nav sasniegusi līdzsvaru. Simulācija pēc testa un izmērītais relatīvais mitrums labi korelē, un abi stabilizējas pie aptuveni 80 %. Lai sasniegtu līdzīgus rezultātus simulācijā pēc testa, ir mainīts ūdens tvaiku difūzijas pretestības koeficients, ūdens vadītspēja pie efektīva piesātinājuma, ūdens uzsūces koeficients un sākotnējais ķieģeļu un javas relatīvais mitrums.

Testu rezultāti rāda, ka līdzsvara apstākļos augstāko relatīvo mitrumu starp mūri un siltumizolāciju sasniedz minerālvate (82,9 %), kam seko kokšķiedra bez tvaika barjeras (80,5 %), *EPS* (79 %), aerogels ar tvaika barjeru (78,2 %), aerogels bez tvaika barjeras (73,3 %) un kokšķiedra ar tvaika barjeru (72,7 %). Temperatūra starp mūra sienu un visiem izolācijas materiāliem ir nostabilizējusies vidēji pie +10 °C.



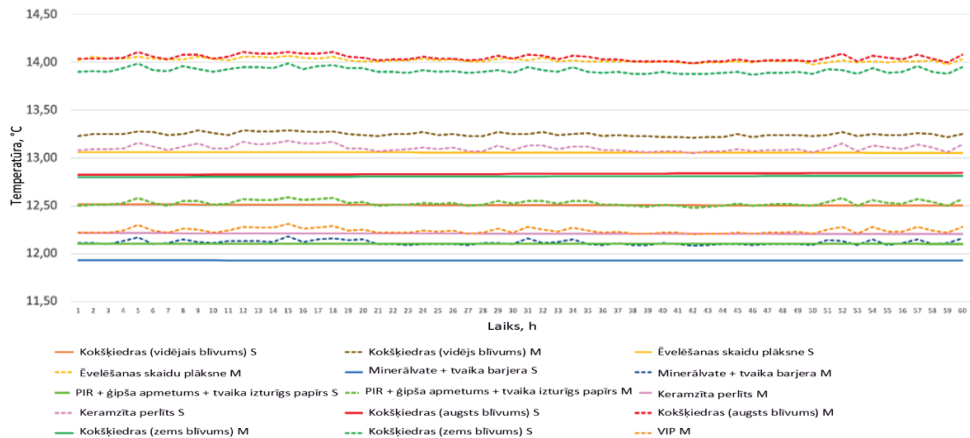
2.5. att. Temperatūras un relatīvā mitruma uzvedība starp mūri un kokšķiedru bez tvaika barjeras: simulācija pirms un pēc eksperimenta, mērījumu rezultāti.

Relatīvais mitrums nav palielinājies virs 95 % (stāvoklis, kad sākas kapilāru piesātinājums) nevienā no materiāliem, tāpēc sasalšanas risks nepastāv. Tas var mainīties, ja tiek mainīti āra robežapstākļi, piemēram, vēja dzīts lietus un saules starojums uz virsmas. Tomēr pastāv pelējuma veidošanās risks bioloģiskas izcelsmes izolācijas materiāliem, piemēram, kokšķiedrām, kā tas tika novērots testu laikā.

Šajā pētījumā tika veikts arī tests ar 18 siltumizolācijas sistēmām, taču sistēmai ar ģipša apmetumu testa sākumā tika bojāti temperatūras un relatīvā mitruma sensori, tāpēc rezultātu analīzē tiek izmantoti mērījuma dati par 17 siltumizolācijas sistēmām.

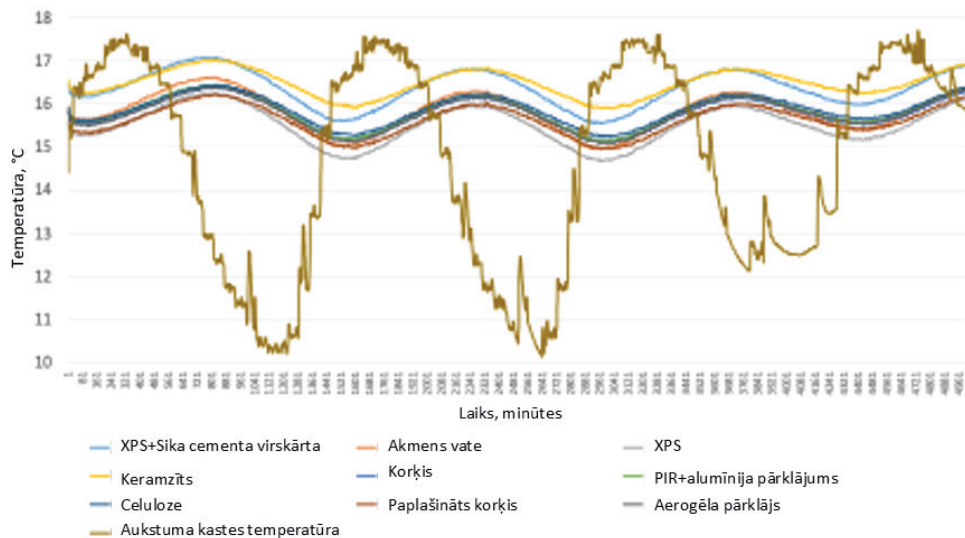
Iegūtie rezultāti rāda, ka siltināšanai no iekšpuses ir liela ietekme uz sienas higrotermisko uzvedību, jo pieaug relatīvais mitrumu starp siltumizolāciju un mūra sienu, kas savukārt palielina pelējuma rašanās, sala bojājumu un koka siju sabrukšanas risku.

Testētajām siltumizolācijas sistēmām ir līdzīga termālā uzvedība, bet atšķirīga mitruma uzvedība. 2.6. attēlā redzama simulētā un mērītā temperatūra starp siltumizolācijas materiālu un mūra sienu līdzsvara ciklā astoņām siltumizolācijas sistēmām.



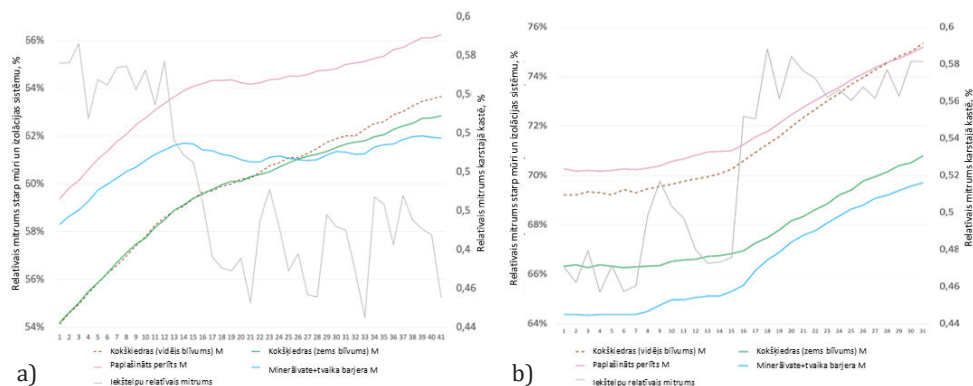
2.6. att. Simulētā (S) un mērītā (M) temperatūra starp siltumizolācijas materiālu un mūra sienu līdzsvara ciklā (laika posms starp 245. minūti un 305. minūti).

Kavējums, kas rodas no siltuma plūsmas starp konstrukcijas iekšējo virsmu un ārējo virsmu, ir novērojams visās siltumizolācijas sistēmās (2.7. att.). Vidējā laika nobīde līdzsvara stāvoklī ir atkarīga no robežnosacījumiem. Jo lielāka ir atšķirība starp iekšstelpu un āra temperatūru, jo lielāka ir laika nobīde. Temperatūras samazinājuma koeficients, kas atspoguļo siltuma plūsmas viļņu amplitūdu attiecību, dažādām siltumizolācijas sistēmām atšķiras un pozitīvi korelē ar tvaika difūzijas pretestību.



2.7. att. Temperatūras izmaiņas starp mūri un siltumizolācijas materiālu dinamiskajā testā.

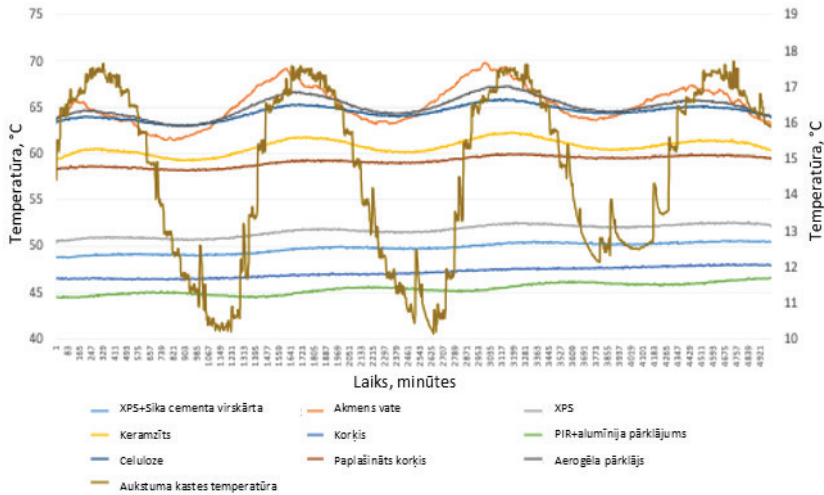
Relatīvo mitrumu zem izolācijas materiāla ietekmē āra gaisa temperatūras un iekštelpu relatīvā mitruma izmaiņas. Ja āra temperatūra ir nemainīga un iekštelpu relatīvais mitrums vides apstākļos svārstās, relatīvais mitrums zem izolācijas tvaika caurlaidīgās siltumizolācijas sistēmās ar zemu tvaika difūzijas pretestību uzvedas kā iekštelpu relatīvais mitrums (2.8. att.). Kavējums ir atkarīgs no S_d vērtībām. Jo mazāka ir tvaika pretestība, jo mazāka ir laika nobīde relatīvā mitruma viļņa izplatībai no sienas ārējās virsmas uz tās iekšējo virsmu, un jo lielāka ir relatīvā mitruma viļņu amplitūdu attiecība abās sienas virsmās. Tvaika necaurlaidīgās sistēmas ar augstu tvaika difūzijas pretestību neietekmē iekštelpu relatīvais mitrums, un relatīvais mitrums starp mūri un siltumizolāciju ir atkarīgs tikai no āra gaisa temperatūras.



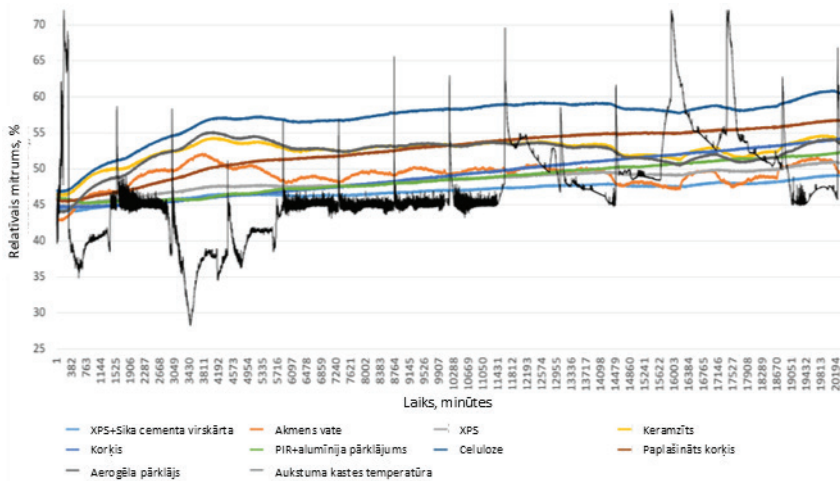
2.8. att. Relatīvā mitruma izmaiņas starp mūri un tvaika caurlaidīgu siltumizolācijas materiālu, kad telpas relatīvais mitrums: a) samazinās; b) pieaug.

Ja iekštelpu relatīvais mitrums ir stabils un āra temperatūra svārstās, tvaika caurlaidīgās siltumizolācijas sistēmās ar zemu tvaika difūzijas pretestību relatīvais mitrums zem izolācijas seko temperatūras profilam. Jo zemāka ir tvaika difūzija, jo tuvāk relatīvā mitruma viļņi zem izolācijas seko temperatūras profilam. Tvaika necaurlaidīgām sistēmām relatīvā mitruma vērtību amplitūda samazinās, kad tvaika difūzijas pretestība samazinās. 2.9. attēlā redzams, kā mainās relatīvais mitrums starp siltumizolāciju un mūri, ja iekštelpu relatīvais mitrums ir stabils un āra temperatūra svārstās.

Kad svārstās gan iekštelpu relatīvais mitrums, gan āra gaisa temperatūra, tvaika caurlaidīgās sistēmas ar zemu tvaika difūzijas pretestību vairāk seko iekštelpu relatīvā mitruma profilam.



2.9. att. Relatīvais mitrums starp siltumizolāciju un mūri, ja iekštelpu relatīvais mitrums ir stabils un āra temperatūra svārstās (dinamiskais cikls).



2.10. att. Vēja dzīta lietus testa rezultāti deviņām siltumizolācijas sistēmām.

2.10. attēlā redzami vēja dzīta lietus testa rezultāti deviņām siltumizolācijas sistēmām. Rezultāti liecina, ka vēja dzītā lietus apstākļos relatīvā mitruma palielināšanās zem siltumizolācijas sistēmām ir saistīta ar materiāla tvaiku difūzijas pretestību. Jo lielāka pretestība, jo lielāka ir vēja dzītā lietus ietekme, jo samazinās žūšanas iespēja uz telpas pusi.

Tvaika caurlaidīgi materiāli, piemēram, korķis, uzpūsts korķis un augsta blīvuma kokšķiedru plātnes bez tvaika barjerām, darbojas līdzīgi kā tvaika necaurlaidīgās sistēmas. Relatīvais mitrums zem izolācijas ir mazāk jutīgs pret iekštelpu

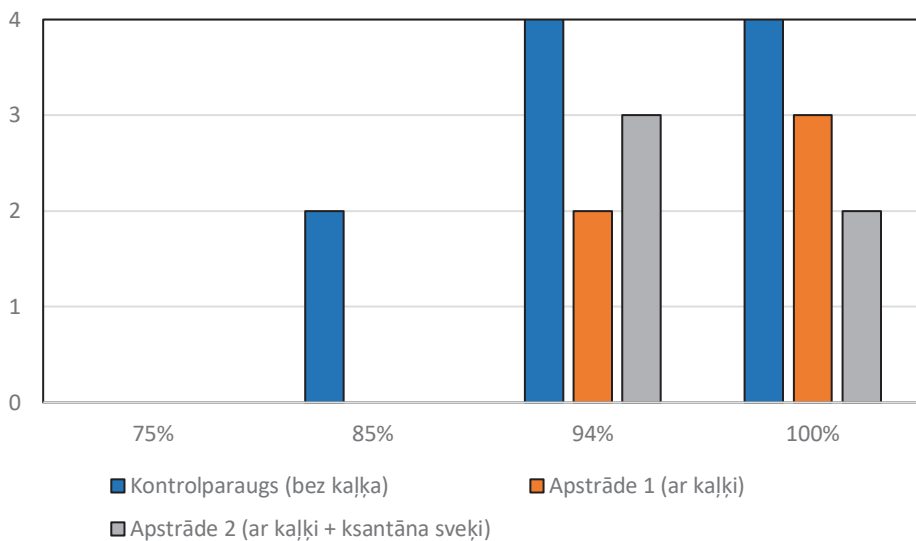
relatīvā mitruma izmaiņām un jutīgāks pret āra temperatūras svārstībām. Korķis ir mazāk jutīgs pret mitrumu nekā koks un koksnes materiāli.

Pētījums rāda, ka testēšanas periodam jābūt ilgākam, lai noteiktu mitruma uzkrāšanos mūra paraugos un tā ietekmi uz temperatūru un relatīvo mitrumu zem siltumizolācijas materiāla. Lai noteiktu mitruma uzkrāšanās ilgtermiņa ietekmi, nepieciešams veikt vai nu garākus testa ciklus, vai arī matemātiskā modeļa simulāciju, validējot modeli ar jau iegūtiem īstermiņa datiem.

Skaitliskie eksperimenti simulācijas rīkā *Delphin* parādīja, ka simulācijas kvalitāte ir atkarīga no ievades datiem. Lai simulācija nodrošinātu visprecīzākos ievades datus, visiem materiāliem, ieskaitot siltumizolāciju un javu, jābūt pēc iespējas tuvākam faktiskajām vērtībām. Materiāli ir jātestē pirms simulācijas, un katram jāizveido pielāgots materiāla fails, lai simulācija būtu pēc iespējas tuvāka realitātei. Citos pētījumos ir līdzīgi secinājumi [20], ilustrējot to ar ķieģeļu parametru nozīmību – diviem ķieģeļiem ar līdzīgu ūdens uzsūces koeficientu ir atšķirīga ūdens vadītspēja, arī higrrotermālā uzvedība ir atšķirīga. (*Kloseiko et al.*, 2022) [23] secināja, ka iekšējās siltināšanas projektos katram gadījumam joprojām ir nepieciešama specifiska pieeja. Cits pētījums atklāj, ka daudzus materiālu parametrus, kas nepieciešami higrrotermiskām simulācijām, ir grūti noteikt, jo īpaši tvaika vadītspēju un kapilāro vadītspēju kā mitruma satura funkciju [24]. Savukārt (*Leone et al.*, 2019) [25] iesaka veikt detalizētu plānošanu, lai iegūtu visas parametru vērtības, kas nepieciešamas katram iekšējās siltināšanas projektam.

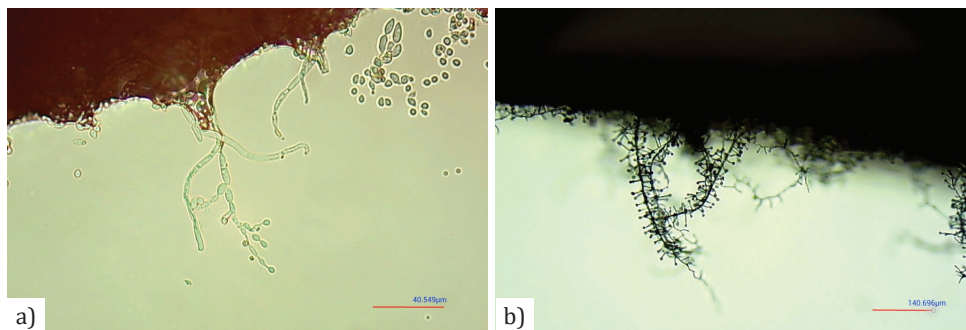
Šī pētījuma gaitā tika apskatīts arī inovatīvs bioloģiskas izcelsmes siltināšanas materiāls no priedes (*Pinus Sylvestris*) skujām, kas ražots pēc bioekonomikas principiem, un tā lietojums siltināšanai no iekšpuses vēsturiskām masīvām sienām [26]. Pētījums tika veikts, lai noteiktu materiāla higrrotermālās īpašības un novērtētu temperatūras un relatīvā mitruma ietekmi uz mitruma transportu un uzkrāšanos, kā arī kritiskos apstākļus pelējuma augšanai. Skuju siltumizolācijas materiāls tika apstrādāts ar kaļķi, lai novērstu pelējuma veidošanos, un tika salīdzināts ar neapstrādātu materiālu. Inovatīvais bioloģiski ražotais materiāls tika sagatavots, pamatojoties uz bioekonomikas principiem un ar samazinātu dzīves cikla ietekmi. Šis augstas pievienotās vērtības produkts tika radīts no priežu skujām no meža atliekām. Skujas tika sajauktas ar kaļķi un ksantāna sveķiem, lai izvairītos no tādu produktu izmantošanas, kuru pamatā ir fosilie produkti ar lielu ietekmi uz vidi.

Iegūtie rezultāti liecina, ka pētītais materiāls ir ļoti porains un kaļķa pievienošana palielina materiāla mitruma absorbcijas ātrumu, jo palielinās poru laukums. Skuju siltumizolācijas materiālam ir lielāka mitruma pārneses un uzglabāšanas spēja, un tas ir labs higriskais regulators. Šī ir svarīga vēsturisko ēku iekšējai siltināšanai lietojama siltumizolācijas materiāla īpašība, jo, samazinoties apkārtējā gaisa relatīvajam mitrumam, tas spēj ātri izžūt. Siltumizolācijas materiāla apstrādei ar kaļķi ir neliela ietekme uz siltumvadītspēju, bet ir ietekme uz pelējuma augšanas samazināšanos (2.11. att.).



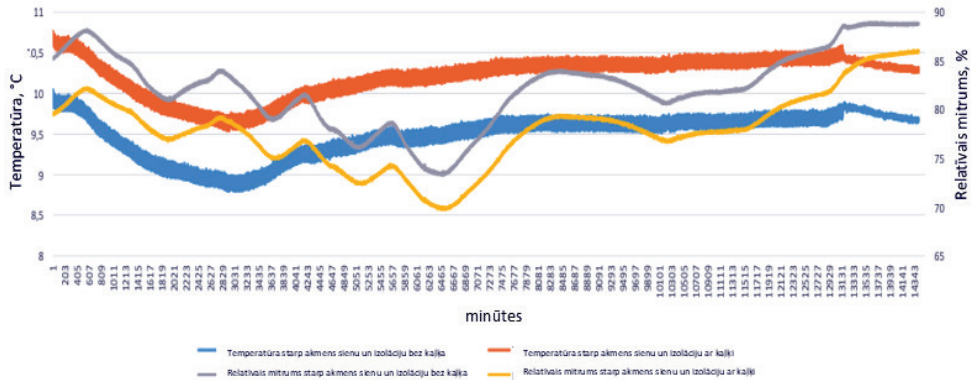
2.11. att. Pelējuma augšana uz materiālu paraugiem dažādos relatīvā mitruma apstākļos.

Ar kaļķi apstrādātam paraugam netika novērota pelējuma veidošanās 85 % relatīvajā mitrumā, savukārt pie relatīvā mitruma 94 % un 100 % pelējums tika atrasts visos paraugos (2.12. att.).



2.12. att. Pelējuma veidošanās uz paraugiem pie 100 % relatīvā mitruma: a) *Cladosporium* uz parauga virsmas bez kaļķa; b) *Trihodermija viride* uz apstrādātā parauga virsmas.

Līdzsvara apstākļos zemāka temperatūra rada augstāku relatīvā mitruma līmeni starp akmens sienu un skuju siltumizolācijas materiālu un sasniedz kritisko vērtību pelējuma augšanai. Dinamisku apstākļu testa rezultāti (2.13. att.) liecina, ka galvenais relatīvā mitruma izmaiņu virzītājspēks ir iekštelpu gaisa relatīvais mitrums, nevis temperatūras izmaiņas sienā. Pat tad, ja siltumizolācijas materiāls tiek apstrādāts ar kaļķi, ir jāpurē siltuma ietaupījumi, lai samazinātu kritiskos apstākļus pelējuma augšanai.

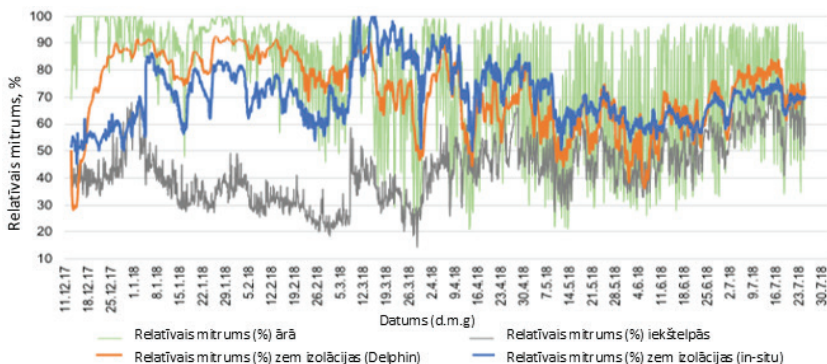


2.13. att. Relatīvais mitrums un temperatūra mainīgos apstākļos starp akmens sienu un adatas izolāciju ar kaļķi un bez tā.

Pētījumā secināts, ka turpmākajos pētījumos galvenā uzmanība jāpievērš kaļķa un izolācijas materiāla svara attiecības optimizācijai, lai uzlabotu higrotermisko uzvedību un kritiskos apstākļus riska režīmiem. Ir jāveic arī papildu testi, lai samazinātu izolācijas materiāla sablīvēšanos sienā. Jāpārbauda arī citi materiāli kaļķu putekļošanas samazināšanai.

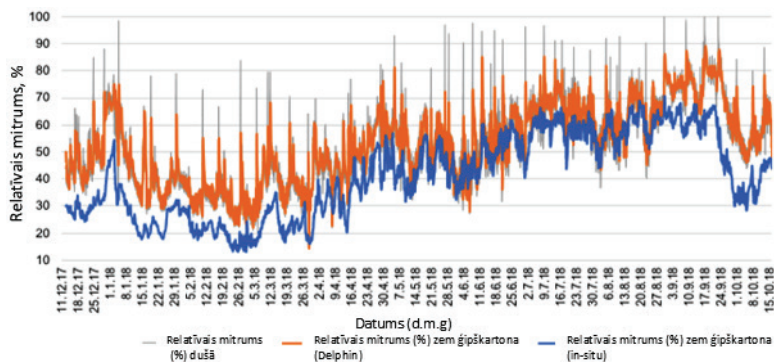
2.3. Iekšējās siltināšanas lietojums vēsturiskās ēkās

Gan *in-situ* mērījumi, gan higrotermiskā simulācija viengimeņu mājas (Secē) abās telpās uzrādīja apmierinošus higrotermiskos apstākļus sienā [12]. Ārsienas higrotermiskā uzvedība liecina, ka pelējuma augšanas riska nav, jo normālos ēkas ekspluatācijas apstākļos (izņemot ūdens noplūdes negadījumu) relatīvais mitrums starp siltumizolācijas slāni un ģipškartona plāksnēm ir salīdzinoši zems (zem 60 %). 2.14. attēlā redzamas mērītās relatīvā mitruma izmaiņas telpā, āra gaisā un zem siltumizolācijas, kā arī simulētās relatīvā mitruma vērtības dzīvojamā istabā.



2.14. att. Mērītās relatīvā mitruma izmaiņas telpā un zem siltumizolācijas, kā arī simulētās relatīvā mitruma vērtības dzīvojamā istabā.

2.15. attēlā redzamas mērītās relatīvā mitruma izmaiņas telpā un zem siltumizolācijas, kā arī simulētās relatīvā mitruma vērtības vannasistabā.



2.15. att. Mērītās relatīvā mitruma izmaiņas telpā un zem siltumizolācijas, kā arī simulētās relatīvā mitruma vērtības vannasistabā.

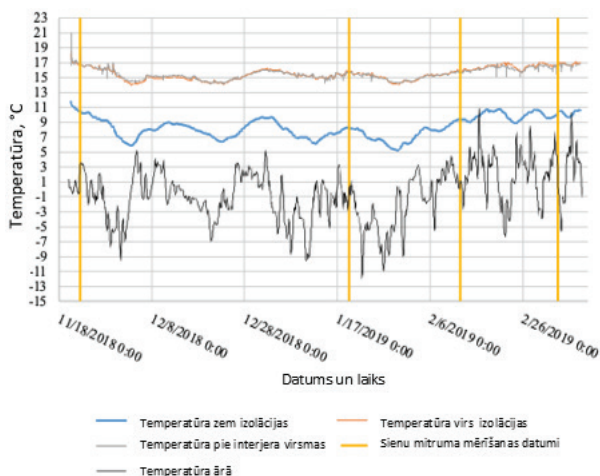
Relatīvais mitrums virs kritiskajiem 80 % starp dolomīta sienu un izolācijas slāni sasniedz tikai īsu laiku. Bet šajos brīžos un šajā vietā temperatūra ir zemāka nekā nepieciešama sporu dīgšanai (sākotnējai pelējuma augšanai). Pelējuma veidošanās var notikt pie 80 % augsta relatīvā mitruma, ja porainiem materiāliem temperatūra ir vismaz 20 °C. Taču, ņemot vērā to, ka 2015. gada renovācijas laikā īrnieki uz vannasistabas sienām konstatēja pelējumu, pastāv pelējuma augšanas potenciāls, ja izveidojas atbilstoši apstākļi (augsts relatīvais mitrums un temperatūra) un tie saglabājas pietiekami ilgi, jo sienu materiāli satur pelējuma sporas.

Temperatūras mērījumi liecina, ka dolomīta sienas ārējā daļa piedzīvo atkārtotus sasalšanas un atkuššanas ciklus, taču sabrukšanas risks no sasalšanas un atkuššanas cikliem ir ārkārtīgi mazs, jo dolomīts nesasniedz piesātinājumu.

Simulācijas rezultāti rāda, ka gada siltuma patēriņu telpu apkurei bāzes scenārijā var samazināt par 35 %, ja pirmā un otrā stāva sienas tiek siltinātas no iekšpuses. Ja tiek veikta būtiska energoefektivitātes paaugstināšana (iekšējo sienu siltināšana, pagraba griestu, jumta siltināšana, logu nomaiņa), bāzes enerģijas patēriņš var samazināties par 72 %. Faktiskais enerģijas patēriņš tiek aprēķināts, pamatojoties uz iedzīvotāju sniegtajiem datiem, kuri rēķina primāros energoresursus – malku, kas daļēji tiek piegādāta tieši no meža un žāvēta uz vietas. Ja koksnes baļķu patēriņu pārvērš gala enerģijā, enerģijas patēriņam gadā uz apsildāmo platību jābūt 87 kWh/m². Enerģijas ietaupījums ir par 17 % mazāks, nekā aprēķināts simulācijas modelī. Šo atšķirību var radīt vairāki iemesli, piemēram, nenoteiktība par būvdarbu kvalitāti un atlikušajiem siltuma tiltiem, modeļa ievades dati, tostarp faktori, kas saistīti ar noslogojuma biežumu (siltuma pieaugums, telpas temperatūra un ventilācijas biežums). Simulācijas rezultāti ir jutīgi pret ievades datu kvalitāti, piemēram, telpas temperatūru, relatīvo mitrumu, ventilāciju un materiāla īpašībām. Vēsturiskajās ēkās trūkst detalizētas informācijas par sienu dobumiem, akmeņu un javas attiecību un tipoloģiju, būvniecības defektiem, materiālu

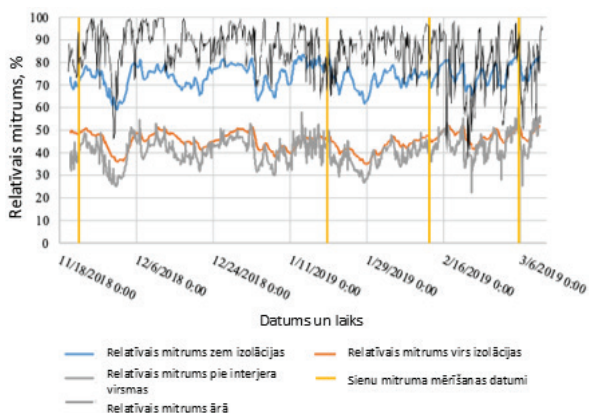
specifiskajām īpašībām. Savukārt faktiskā primārās enerģijas patēriņa nenoteiktība, tai skaitā enerģijas pārveidošanas tehnoloģiju malkas efektivitātes apjoms un kvalitāte, būtiski ietekmē galaenerģijas patēriņa vērtības.

Vēsturiskajai ēkai Bīskapa gatē Rīgā tika konstatēti būtiski bojājumi fasādes apmetumā, un ēkai uz fasādes ir daudz plaisu un spraugu. Šīs atvērtās zonas nodrošina āra mitruma, tai skaitā vēja dzīta lietus, iekļūšanu ārsienās. Balstoties laikapstākļu datu analīzē, pētījumā tiek secināts, ka fasādi spēcīgi ietekmē āra relatīvais mitrums un lietus. Uz fasādes augošās aļģes liecina, ka uz sienu virsmas ir bijis lietusūdens. Laika apstākļu dati rāda, ka valdošais vējš monitoringa periodā ir no dienvidaustrumiem un ēkas lielākā fasāde ir pakļauta vēja dzītam lietus. 2.16. attēlā redzami temperatūras mērījumi monitoringa periodā. Telpas temperatūra un temperatūra starp mūri un siltumizolāciju seko āra gaisa temperatūras profilam, jo telpā ir nepietiekama apkures radiatora jauda.



2.16. att. Temperatūras mērījumi monitoringa periodā.

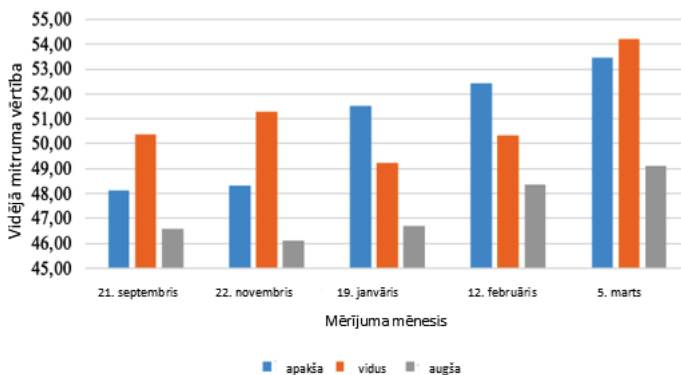
Āra laikapstākļi ietekmē arī apstākļus starp siltumizolāciju un mūri, taču monitoringa periodā intersticiāla kondensācija nav novērota. Relatīvā mitrums svārstības starp mūri un siltumizolācijas materiālu (2.17. att.) ir saistītas ar temperatūras izmaiņām. Augstākais relatīvais mitrums zem izolācijas materiāla monitoringa periodā sasniedz 84 %, un lielāko daļu laika relatīvais mitrums saglabājas zem 80 %. Šādi mitruma apstākļi nerada lielu pelējuma veidošanās risku.



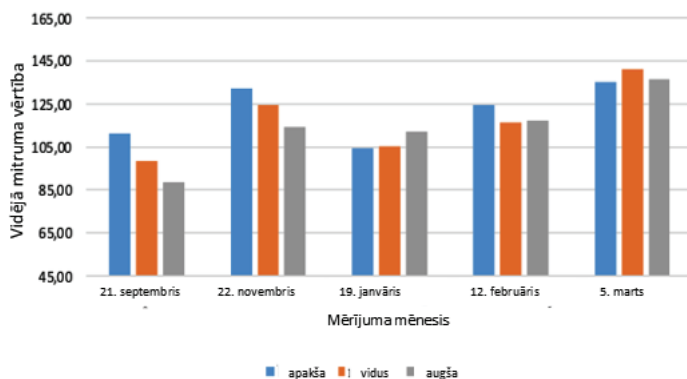
2.17. att. Relatīvā mitruma izmaiņas monitoringa periodā.

Neinvazīvie mitruma mērījumi veikti ar mikroviļņu mērījumu metodi 20 cm dziļumā un dielektrisko metodi 2 cm dziļumā. Iegūtās vērtības norāda mitrumu relatīvā mērogā – no sausākas līdz mitrai zonai, kur 0 ir sausākā, 250 – mitrākā vērtība. Sienas apakšējā mērījumu zona ir līdz 0,8 m virs zemes, vidējā daļa – no 0,8 m līdz 1,6 m virs zemes, augšējā daļa – no 1,6 m līdz 2 m virs zemes. 2.18. attēlā redzamas vidējo vērtību izmaiņas augšējā, vidējā un apakšējā daļā mikroviļņu mērījumiem 20 cm dziļumā. Mērījumu periodā ir vērojama augšupejoša tendence sienas apakšējā daļā. Arī augšējā daļa seko augšupejošai tendencei ar nelielu samazinājumu no 1. uz 2. mērījumu. Vidējā posma mitruma mērījumos janvārī bija vērojams vidējā mitruma līmeņa kritums, bet pēc tam tas sāk sekot augšupejošai tendencei.

2.19. attēlā redzamas vidējo vērtību izmaiņas augšējā, vidējā un apakšējā daļā dielektriskajiem mērījumiem 2 cm dziļumā.



2.18. att. Vidējo vērtību izmaiņas augšējā, vidējā un apakšējā sienas daļā, mikroviļņu mērījumiem 20 cm dziļumā.



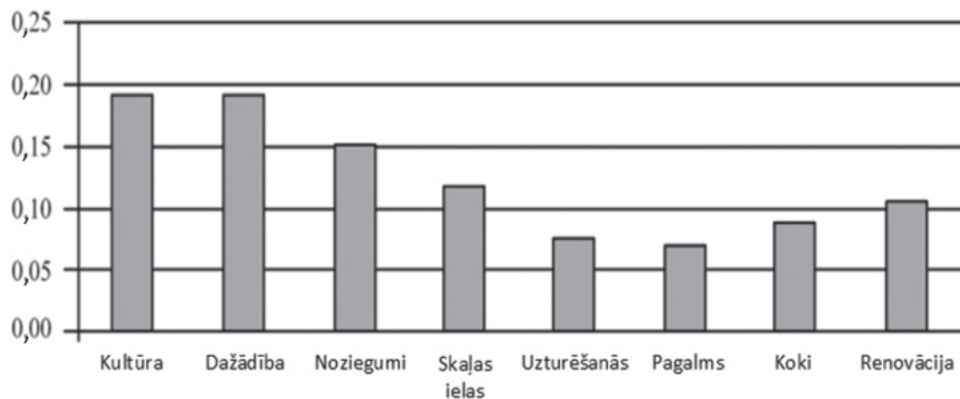
2.19. att. Vidējo vērtību izmaiņas augšējā, vidējā un apakšējā daļā, dielektriskajiem mērījumiem 2 cm dziļumā.

Pētījuma [13] veikšanas laikā netika novērotas skaidras mitruma problēmu pieauguma pazīmes, taču jāņem vērā, ka monitoringa periods bija tikai septiņus mēnešus gada aukstajā periodā, palielināta mitruma problēma varētu rasties gada siltajos mēnešos. Fasādes neviendabīgums varētu būt cēlonis mērījumu svārstībām, īpaši dielektriskajiem mērījumiem, kas veikti tuvu virsmai. Lai iegūtu pārlicinošākus rezultātus, uzraudzība jāturpina vismaz vienu pilnu gadu. Jāveic vēja lietus mērījumi uz fasādes un nepārtraukta mitruma uzraudzība dažādos mūra augstumos.

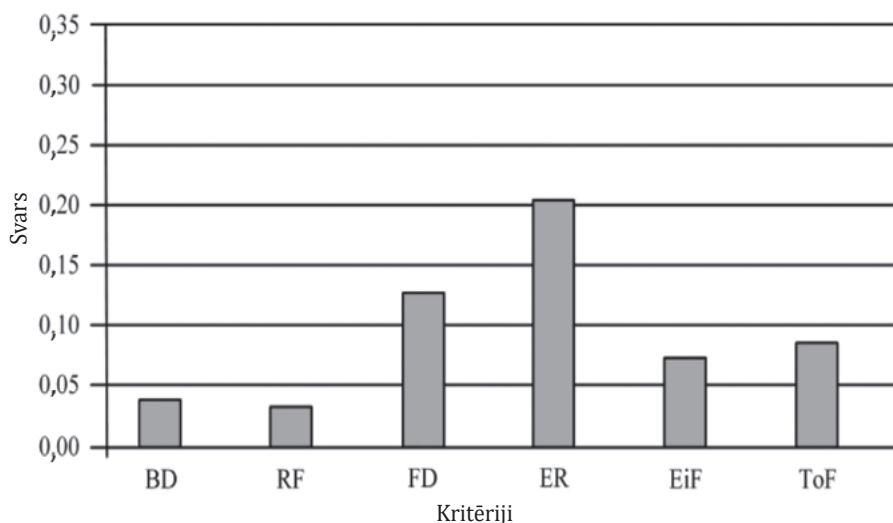
2.4. Pozitīvas enerģijas bilances kvartāls vēsturiskā pilsētvidē

Kvartāli ar energoefektivitātes potenciālu atrodas RVC ārējā perimetrā, savukārt kvartāli ar augstāku kultūrvērtību koncentrējas RVC centrālajās daļās, tāpēc lēmumu pieņemšanas hierarhijā tika noteikti divi apakšmērķi: 1) atrast RVC pilsētas kvartālu ar augstāko energoefektivitātes potenciālu; 2) atrast RVC pilsētas kvartālu, kas pārstāv kultūras mantojuma un pilsētvides dzīvotspējas augstākās kvalitātes.

Izmantojot daudzkritēriju analīzi, tika veikta “Kultūras mantojuma kvartāla” izvēle. Kritēriju svāri tiek iegūti pāru salīdzināšanas matricā pēc analītiskās hierarhijas procesa metodoloģijas. 2.20. attēlā redzams kritēriju svārs. Kā svarīgākie kritēriji ir noteikti kultūras nozīme un būvniecības periodu dažādība. No dzīvošanas kvalitātes viedokļa vissvarīgākā ir aizsardzība pret noziedzību, laba maņu pieredze un ēku renovācija.



2.20. att. Kultūras mantojuma un dzīvošanas kvalitātes kritēriju svars.



2.21. att. Enerģētikas kvartāla kritēriju īpatsvari. (BD – Apbūves blīvums; RF – Dzīvojamo ēku blīvums; FD – Nākotnes attīstības iespējas; ER – Ēku atjaunošanas iespējas; EiF – Energoietilpīgs uzņēmums; ToF – Energoietilpīgā uzņēmuma veids)

Pētījuma gaitā tika identificēti divi atšķirīgi kvartāli, kas ieguva visaugstāko vērtējumu kā “Kultūras mantojuma kvartāls”. Pirmais kvartāls atrodas pie RVC robežas, ietver izcilas kultūras mantojuma vērtības – ievērojamākos jūgendstila paraugus Rīgas vēsturiskajā pilsētā. Pārsvaru nodrošina gan kultūras mantojums, gan dzīvošanas kvalitātes kritēriji (noziedzība, nepatīkami sajūtu pārdzīvojumi un ēku renovācija). Otrais kvartāls, kas ieņem augstāko vērtējumu no kultūras mantojuma un apdzīvojamības viedokļa, ir neliels pilsētvides kvartāls RVC iekšējā daļā.

Izmantojot daudzkritēriju analīzi, tika noteikti visatbilstošākie “Enerģētikas kvartāli”. Galvenais mērķis ir noteikt kvartālus ar lielāko potenciālu pārtapšanai

par pozitīvas energobilances kvartālu. Sākotnēji kvartāli tika atlasīti, balstoties šādos izvēles kritērijos: 1) kvartālā atrodas energoietilpīgs uzņēmums; 2) kvartālam ir vismaz 10 % dzīvojamā funkcija; 3) pilsētas kvartālā ir neapbūvēts zemesgabals augsti efektīvai attīstībai. Balstoties šajos kritērijos, tika atlasīti 12 kvartāli detalizētai izpētei un daudzkritēriju analīzei ar *TOPSIS* metodi. 2.21. attēlā redzami vērtēšanas kritēriju īpatsvari.

Pētījums liecina, ka kvalitatīvāka arhitektūra ar nozīmīgāku kultūras vērtību koncentrējas RVC centrālajos rajonos pa galvenajām trasēm, kur savulaik tai bijusi reprezentatīva funkcija – eksponēt tehnoloģiskos sasniegumus un konceptuāli jaunas idejas. Diemžēl laika gaitā galvenie maršruti ir zaudējuši savu nozīmi jaunu arhitektūras koncepciju un ideju demonstrēšanā un kļuvuši par transporta infrastruktūru. Automašīnas ņem virsroku pār cilvēkiem, un kulturāli vērtīgākās teritorijas satiksmes dēļ zaudē savu dzīvotspēju. Konstatēts, ka kvartāli ar lielāku apdzīvojamību atrodas nedaudz tālāk no galvenajām ielām, bet tomēr RVC centrālajos rajonos. Šiem kvartāliem ir zemāka kultūras vērtība, bet augstākas dzīvošanas kvalitātes īpašības. “Enerģētikas kvartāli” pārsvarā atrodas RVC malās. Lielākā daļa identificēto energoietilpīgo kvartālu ir uzbūvēti pēc Otrā pasaules kara. Pēc kara plānošanā publiskās telpas tika integrētas esošajā pilsētas struktūrā.

Pētījuma rezultāti rāda, ka abos (“Enerģētikas kvartāls” un “Kultūras mantojuma kvartāls”) sarakstos bija tikai divi kvartāli, taču neviens no tiem neieņēma augstu vietu individuālajā alternatīvu reitingā un netika apspriests turpmākai izpētei. Viens no tiem tika izvēlēts tālākai analīzei. Kvartāla ilustrācijas redzama 2.22. attēlā.



2.22. att. Pētījumā izvēlētais pilsētas kvartāls, kas ir visatbilstošākais pārejai uz pozitīvu energobilances kvartālu gan no enerģētikas, gan kultūrvēsturiskā vērtības aspekta.

Tiecoties uz oglekļa neitrālu nākotni 2050. gadā, būtiska uzmanība ir jāpievērš esošajām ēkām, jo tajās ir liels CO₂ emisiju samazināšanas potenciāls. Taču jāņem

vērā tas, ka vēsturiskās pilsētībūvniecības struktūras ir sarežģītas – apbūves blīvums ir augsts, attālums starp ēkām ir mazāks nekā jaunbūvēm un saglabājama vēsturiskā vērtība, kas ierobežo energoefektivitātes pasākumus. 2.2. tabulā apkopoti pētījuma rezultāti par energoefektivitātes potenciālu, atjaunojamo energoresursu potenciālu un CO₂ samazinājumu izvēlētajā Rīgas vēsturiskā centra kvartālā. Pētījuma aprēķini par iespējamo CO₂ ietaupījumu, pārejot no tradicionālā vēsturiskā pilsētas kvartāla uz pozitīvās enerģijas kvartālu, liecina par aptuveni 45 kg/m² CO₂ ietaupījuma potenciālu gadā, samazinot CO₂ emisijas no 50 kg/m² līdz 5 kg/m² gadā un kopumā 1627 tonnas gadā. Atbilstoši aprēķinātajiem rezultātiem siltumenerģijas pieprasījumu var pilnībā segt ar uz vietas saražoto enerģiju (izmantojot akumulāciju vai pievadot centralizētās siltumapgādes tīklu), bet elektroenerģijas pieprasījuma segšanai energoietilpīgu patērētāju gadījumā nepieciešama ārēja ražošana. Rezultāti parāda potenciālu, kā sasniegt ļoti zemu enerģijas pieprasījumu kvartālā.

2.2. tabula

Pētījuma rezultāti par energoefektivitātes potenciālu, atjaunojamo energoresursu potenciālu un CO₂ samazinājumu izvēlētajā Rīgas vēsturiskā centra kvartālā

Izmantotā tehnoloģija	Enerģijas ietaupījumi			Enerģijas ražošana		CO ₂
	Siltums	Elektrība		Elektrība	Siltumenerģija	CO ₂ ietaupījumi
	MWh	MWh	m ²	MWh	MWh	tonnas
Enerģijas ietaupījumi no ēku energoefektivitātes	2686	2400	–	–	–	970
Atlikumu siltuma izmantošana			–	–		
Datu centra atlikumu siltums	–	–	–	–	338	89
Izmanto dzesēšanas enerģijas patēriņu			–	–	83	22
Enerģijas ražošana						
Izmantojamā jumta platība						
Jumta platība pārklāta ar PV	–	–	5965	1014	–	111
Jumta platība pārklāta ar PVT	–	–	3895	425	1380	411
Fasādes	–	–				
Izmantojamā platība uz dienvidaustrumu fasādes	–	–	1307	135	–	15
Izmantojamā platība uz dienvidrietumu fasādes	–	–	835	89	–	10
				1663	1800	1627
Procentuālais īpatsvars no kopējā izvēlētajā enerģijas patēriņā				69 %	100 %	

SECINĀJUMI

1. hipotēze

Vēsturiskiem ķieģeļiem ir atšķirīgas higrrotermālās īpašības, un tās ietekmē higrrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās.

Hipotēze apstiprinājās, jo 40 vēsturisku ķieģeļu paraugu testēšanas rezultāti rāda, ka tiem ir atšķirīgas higrrotermālās īpašības. Iegūtie rezultāti rāda, ka ķieģeļu paraugu sadalījums klasteros ir līdzīgs ķieģeļu paraugu tipu sadalījumam, pamatojoties uz to aprakstu, tāpēc vispārinātus secinājumus nevar izdarīt. Tomēr pētījumā novērots, ka sarkanajiem māla ķieģeļiem, kas ražoti no 19. gadsimta beigām līdz 20. gadsimta sākumam, ir izteikta atšķirība starp diviem galvenajiem klasteriem un tikai divi no paraugiem atrodas citās kopās. Lai iegūtu detalizētākus rezultātus par iespējamiem klasteriem, nepieciešams turpināt pētījumus ar lielāku paraugu skaitu. Pētījumā par 40 testēto ķieģeļu mūra siltināšanu no iekšpuses ar tvaika caurlaidīgu kapilāri aktīvu siltumizolācijas materiālu aukstā klimatā secināts, ka visos sienu paraugos ir ļoti līdzīgas temperatūras tendences, savukārt mitruma uzvedībā ir vērojama liela atšķirība. Temperatūras svārstības starp dažādiem sienu veidiem ir atkarīgas no ķieģeļu termiskās pretestības. Mitruma satura līmeņi dažādiem sienu veidiem atšķiras četras reizes, un mitruma satura uzvedība ir ļoti atšķirīga. Simulācijas rezultāti rāda, ka mitruma saturu mūrī un siltumizolācijas materiālā, kā arī relatīvo mitrumu starp mūrī un siltumizolācijas materiālu ietekmē lietus un līmes uzklāšanas kvalitāte. Simulācijas rezultāti liecina, ka, ja siltināšana no iekšpuses notiek ar tvaika caurlaidīgu kapilāri aktīvu materiālu ēkā, kas atrodas aukstā klimatā un ir ar normālu iekštelpu mitruma slodzi, relatīvais mitrums starp mūrī un siltumizolāciju nepārsniedz 96 % un tiek uzskatīts par drošu. Šis secinājums attiecas gan uz izolāciju ar līmi, gan bez tās.

2. hipotēze

Klimatiskie āra apstākļi ietekmē higrrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās.

Hipotēze apstiprinājās daļēji, jo dažādu siltumizolācijas materiālu testēšanas rezultāti rāda, ka atkarībā no siltumizolācijas sistēmas veida (tvaika caurlaidīga vai tvaika necaurlaidīga) higrrotermālos procesus no iekšpuses siltinātās masīvās mūra sienās ietekmē ne tikai klimatiskie āra apstākļi, bet arī iekštelpas gaisa parametri. Turklāt tika secināts, ka testētajām siltumizolācijas sistēmām ir līdzīga termālā uzvedība, bet tām ir atšķirīga mitruma uzvedība. Siltināšanai no iekšpuses ir liela ietekme uz sienas higrrotermisko uzvedību, jo pieaug relatīvais mitrumu starp siltumizolāciju un mūra sienu, kas savukārt palielina pelējuma rašanās, sala bojājumu un koka siju sabrukšanas risku. Konstrucijās rodas siltuma plūsmas kavējums starp konstrukcijas iekšējo virsmu un ārējo virsmu, un tā lielums ir atkarīgs no robežnosacījumiem – jo lielāka ir atšķirība starp iekštelpu un āra temperatūru, jo lielāka ir laika nobīde. Temperatūras samazinājuma koeficients, kas atspoguļo

siltuma plūsmas viļņu amplitūdu attiecību, dažādām siltumizolācijas sistēmām atšķiras un pozitīvi korelē ar tvaika difūzijas pretestību.

Relatīvo mitrumu zem izolācijas materiāla ietekmē āra gaisa temperatūras un iekštelpu relatīvā mitruma izmaiņas. Ja āra temperatūra ir nemainīga un iekštelpu relatīvais mitrums vides apstākļos svārstās, relatīvais mitrums zem izolācijas tvaika caurlaidīgās siltumizolācijas sistēmās ar zemu tvaika difūzijas pretestību uzvedas kā iekštelpu relatīvais mitrums. Kavējums ir atkarīgs no S_d vērtībām. Jo mazāka ir tvaika pretestība, jo mazāka ir laika nobīde relatīvā mitruma viļņa izplatībai no sienas ārējās virsmas uz tās iekšējo virsmu, un jo lielāka ir relatīvā mitruma viļņu amplitūdu attiecība abās sienas virsmās. Tvaika necaurlaidīgās sistēmas ar augstu tvaika difūzijas pretestību neietekmē iekštelpu relatīvais mitrums, un relatīvais mitrums starp mūri un siltumizolāciju ir atkarīgs tikai no āra gaisa temperatūras. Ja iekštelpu relatīvais mitrums ir stabils un āra temperatūra svārstās, tvaika caurlaidīgās siltumizolācijas sistēmās ar zemu tvaika difūzijas pretestību relatīvais mitrums zem izolācijas seko temperatūras profilam. Jo zemāka ir tvaika difūzija, jo tuvāk relatīvā mitruma viļņi zem izolācijas seko temperatūras profilam. Tvaika necaurlaidīgām sistēmām relatīvā mitruma vērtību amplitūda samazinās, kad samazinās tvaika difūzijas pretestība. Kad svārstās gan iekštelpu relatīvais mitrums, gan āra gaisa temperatūra, tvaika caurlaidīgās sistēmas ar zemu tvaika difūzijas pretestību vairāk seko iekštelpu relatīvā mitruma profilam.

Rezultāti liecina, ka vēja dzītā lietus apstākļos relatīvā mitruma palielināšanās zem siltumizolācijas sistēmām ir saistīta ar materiāla tvaiku difūzijas pretestību. Jo lielāka pretestība, jo lielāka ir vēja dzītā lietus ietekme, jo samazinās žūšanas iespēja uz telpas pusi.

Tvaika caurlaidīgi materiāli, piemēram, korķis, uzpūsts korķis un augsta blīvuma kokšķiedru plātnes bez tvaika barjerām, darbojas līdzīgi kā tvaika necaurlaidīgās sistēmas. Relatīvais mitrums zem izolācijas ir mazāk jutīgs pret iekštelpu relatīvā mitruma izmaiņām un jutīgāks pret āra temperatūras svārstībām. Korķis ir mazāk jutīgs pret mitrumu nekā koks un koksnes materiāli.

Skaitliskie eksperimenti simulācijas rīkā Delphin rāda, ka simulācijas kvalitāte ir atkarīga no ievades datiem. Lai simulācija nodrošinātu visprecīzākos ievades datus, visiem materiāliem, ieskaitot siltumizolāciju un javu, jābūt pēc iespējas tuvākam faktiskajām vērtībām. Materiāli ir jātestē pirms simulācijas, un katram jāizveido pielāgots materiāla fails, lai simulācija būtu pēc iespējas tuvāka realitātei. Pētījums rāda, ka aukstā klimatā vēsturiskajam mūrim uzliekot iekšējo izolāciju, ir rūpīgi jānovērtē kombinētās vēsturiskā mūra un izolācijas materiālu sienu konstrukcijas higrotermiskās īpašības. Simulācijas rezultāti var nesakrist ar izmērītajiem datiem sienas sākotnējā mitruma satura vērtību dēļ, kā arī parametru vērtības ietekmes dēļ.

3. hipotēze

Vēsturiskās mūra un akmens sienu siltināšana no iekšpuses ar tvaika necaurlaidīgu siltumizolāciju aukstā klimatā ir drošs energoefektivitātes paaugstināšanas pasākums.

Hipotēze apstiprinājās, jo mērījumu un datorsimulāciju rezultāti rāda, ka ārsienu siltināšana no iekšpuses ar tvaika necaurlaidīgu siltumizolācijas sistēmu aukstā klimatā šajās divās ēkās ir drošs energoefektivitātes paaugstināšanas pasākums. Abos gadījumos relatīvais mitrums starp ārsienu un siltumizolācijas sistēmu pārsniedz 80 % salīdzinoši neilgu laika posmu gada aukstajos mēnešos un nepieņemas kondensāta veidošanās procesam. Pelējuma veidošanās risks ir zems, jo periodā, kad ir paaugstināts relatīvais mitrums, temperatūra ir zemāka nekā nepieciešama sporu dīģšanai un sākotnējai pelējuma augšanai. Abos gadījumos relatīvais mitrums starp sienu un siltumizolācijas materiālu seko āra gaisa temperatūras izmaiņām.

4. hipotēze

Vēsturiskās apbūves saglabāšana neļauj sasniegt pozitīvu energobilanci vēsturiskajos pilsētas kvartālos.

Hipotēze apstiprinājās, jo rezultāti liecina, ka kvartāliem ar augstāku kultūrvērtību ir mazāks energoefektivitātes potenciāls, un otrādi. Pētījumā tika izmantota dubultā daudzkritēriju analīze, kas rāda, ka pilsētu kvartālus var vērtēt gan no energoefektivitātes, gan kultūras mantojuma perspektīvas. Piedāvātie daudzkritēriju analīzes kritēriji, lai novērtētu kultūras mantojumu, dzīvotspēju un energoefektivitātes potenciālu, raksturo pilsētas kvartāla specifiskās īpašības. Turklāt rezultāti liecina, ka, lai sasniegtu pozitīvu enerģijas kvartālu, nepieciešami ļoti ambiciozi energoefektivitātes uzlabošanas mērķi. Pētījums rāda, ka šādas analīzes par pāreju no tradicionālā vēsturiskā pilsētas kvartāla uz pozitīvas energobalances kvartālu, kurā jāsaskaņo divas pretrunīgas koncepcijas – kultūras mantojuma saglabāšana un koncepcija “energoefektivitāte pirmajā vietā”, katram solim ir vajadzīgas zināšanas par konkrēto kvartālu: 1) energoefektivitātes pasākumi ir jāpielāgo vietējam klimatam; 2) atjaunojamās enerģijas tehnoloģijām jāizmanto īpašas vides un klimata apstākļu priekšrocības; 3) saglabājamām vēsturiskajām vērtībām arī ir lokāls raksturs.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] "Factsheet – Energy Performance of Buildings," European Commission – European Commission. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_21_6691.
- [2] "EUR-Lex - L:2023:231:TOC - EN - EUR-Lex." Official Journal of the European Union, Sep. 13, 2023. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=OJ%3AL%3A2023%3A231%3ATOC>.
- [3] "2022-06-27-102346--davos-declaration-2018-23-01-2018-lv.pdf." Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: <https://baukultur--production--storage.s3.amazonaws.com/baukultur/2022-06-27-102346--davos-declaration-2018-23-01-2018-lv.pdf>.
- [4] Ritvars Freimanis, "HYGROTHERMAL PROPERTIES OF HISTORIC BRICKS FROM VARIOUS SITES OF LATVIA." Mendeley, Oct. 18, 2021. doi: 10.17632/CGP2VYRTNH.3.
- [5] "Project Jupyter." Accessed: Oct. 03, 2023. [Online]. Available: <https://jupyter.org>.
- [6] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, no. 85, pp. 2825–2830, 2011.
- [7] R. Freimanis, A. Blumberga, R. Vanaga, and Z. Zundāns, "Evaluation of the Impact of Bricks of Various Characteristics on Internally Insulated Masonry Walls in Cold Climate," *Buildings*, vol. 13, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/buildings13102529.
- [8] R. Freimanis, Z. Zundans, R. Balins, R. Vanaga, and A. Blumberga, "Finding the Generic Hygrothermal Properties of Historical Bricks by Supervised Agglomerative Clustering," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 1234–1243, Jan. 2022, doi: 10.2478/rtuct-2022-0093.
- [9] "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs." Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://videscentrs.lv>.
- [10] R. Freimanis, R. Vanaga, V. Balodis, Z. Zundans, and A. Blumberga, "Hygrothermal Assessment of Insulation Systems for Internal Insulation of Solid Masonry Walls under Various Conditions," *Buildings*, vol. 13, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/buildings13102511.
- [11] E. Biseniece, R. Freimanis, R. Purvins, A. Gravelins, A. Pumpurs, and A. Blumberga, "Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 22–41, Mar. 2018, doi: 10.1515/rtuct-2018-0002.
- [12] A. Blumberga, R. Freimanis, E. Biseniece, and A. Kamenders, "Hygrothermal Performance Evaluation of Internally Insulated Historic Stone Building in a Cold Climate," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 866, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020866.
- [13] R. Freimanis, R. Vaiskunaite, T. Bezrucko, and A. Blumberga, "In-Situ Moisture Assessment in External Walls of Historic Building using Non-Destructive Methods," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 122–134, Jan. 2019, doi: 10.2478/rtuct-2019-0009.
- [14] A. Blumberga, R. Vanaga, J. Antuzs, R. Freimanis, E. Bondars, and S. Treija, "Is the High Quality a Monkey Wrench in the Global Climate Challenges?," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 230–244, Dec. 2019, doi: 10.2478/rtuct-2019-0092.
- [15] J. Malczewski, "Multicriteria Analysis," in *Comprehensive Geographic Information Systems*, Elsevier, 2018, pp. 197–217. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09698-6.
- [16] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, and J.-H. Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.

- [17] A. Blumberga *et al.*, "Transition from traditional historic urban block to positive energy block," *Energy*, vol. 202, p. 117485, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117485.
- [18] X. Zhou, J. Carmeliet, and D. Derome, "Influence of envelope properties on interior insulation solutions for masonry walls," *Build. Environ.*, vol. 135, pp. 246–256, May 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.02.047.
- [19] C. Feng and H. Janssen, "Hygric properties of porous building materials (VII): Full-range benchmark characterizations of three materials," *Build. Environ.*, vol. 195, p. 107727, May 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107727.
- [20] T. De Mets, A. Tilmans, and X. Loncour, "Hygrothermal assessment of internal insulation systems of brick walls through numerical simulation and full-scale laboratory testing," *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 753–758, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.022.
- [21] E. Vereecken and S. Roels, "Capillary Active Interior Insulation Systems for Wall Retrofitting: A More Nuanced Story," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 10, no. 5, pp. 558–569, Jul. 2016, doi: 10.1080/15583058.2015.1009575.
- [22] J. Zhao, S. Feng, J. Grunewald, F. Meissner, and J. Wang, "Drying characteristics of two capillary porous building materials: Calcium silicate and ceramic brick," *Build. Environ.*, vol. 216, p. 109006, May 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109006.
- [23] P. Klůšeiko and T. Kalamees, "Hygrothermal performance of a brick wall with interior insulation in cold climate: Vapour open versus vapour tight approach," *J. Build. Phys.*, vol. 46, no. 1, pp. 3–35, Jul. 2022, doi: 10.1177/174425912111056067.
- [24] H. Hirsch, R. Heyn, and P. Klůšeiko, "Capillary condensation experiment for inverse modelling of porous building materials," *E3S Web Conf.*, vol. 172, p. 17003, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017217003.
- [25] D. Bottino-Leone, M. Larcher, D. Herrera-Avellanosa, F. Haas, and A. Troi, "Evaluation of natural-based internal insulation systems in historic buildings through a holistic approach," *Energy*, vol. 181, pp. 521–531, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.139.
- [26] A. Blumberga, R. Freimanis, I. Muizniece, K. Spalvins, and D. Blumberga, "Trilemma of historic buildings: Smart district heating systems, bioeconomy and energy efficiency," *Energy*, vol. 186, p. 115741, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.071.



Ritvars Freimanis dzimis 1988. gadā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis maģistra grādu vides zinātnē (2019). Paralēli tam absolvējis arī Viļņas Ģedimina tehnisko universitāti, iegūstot maģistra grādu vides inženierijā. Patlaban ir RTU Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta pētnieks un lektors. Institūtā nostrādāto sešu gadu laikā ir publicējis 21 zinātnisko publikāciju, ir viena patenta līdzautors. Ieguldījumu zinātnisko projektu īstenošanā sniedzis, darbojoties Eiropas Savienības īstenotā projektā "*RIBuild*", kur asistējis Ēku energoefektivitātes laboratorijas izveidē. Turpina aktīvi darboties zinātniskajā pētniecībā, līgumdarbu īstenošanā un laboratorijas darbu praktiskās daļas vadīšanā Ēku energoefektivitātes laboratorijā.