



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut
Liginullenergiahoonete uurimisrühm

Lisasoojustuselementidega rekonstrueerimise analüüs ja tootearendus

The analysis and development of prefabricated reconstruction elements

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:	Maarja Linda Ojarand
Üliõpilaskood:	131933 EAEI
Juhendaja:	Targo Kalamees, ehitusfüüsika professor

Tallinn 2018

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut
Liginullenergiahoonete uurimisrühm

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Maarja Linda Ojarand, 131933

Õppekava, peeriala: EAEI02/09 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitustehnika
Juhendaja: Ehitusfüüsika professor, Targo Kalamees, 620 2403

Lõputöö teema: (eesti keeles) Lisasoojustuselementidega rekonstrueerimise analüüs ja tootearendus, (inglise keeles) The analysis and development of prefabricated reconstruction elements

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Akadeemia tee 5a suurpaneelelamu rekonstrueerimisel kasutatud tehases eeltoodetud lisasoojustuselementide valmistamise, paigaldamise ja kasutatud lahenduste selgitamine, probleemide leidmine ning analüüsimine.
2. Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lisasoojustuselementide edasi arendamise suundade leidmine majanduslikkuse, energiatõhususe, ajakulu ning ehitusfüüsika seisukohalt.
3. Lisasoojustuselementide ristlõigete ja umbkaudsete maksumuste toomine, millega soojustades vastaks suurpaneelelamu pärast rekonstrueerimist C energiatõhususklassi nõuetele.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Rekonstrueerimisvajaduse, -nõuete ja -eesmärkide kirjeldus.	16.03.18
2.	Mujal maailmas läbiviidud tervikrenoveerimisprojektide ja Eesti pilootprojekti sisu tutvustamine.	23.03.18
3.	Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide paigalduskvaliteedi hindamise katse läbiviimine ja tulemuste koondamine.	30.03.18
4.	Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide lahenduste kirjeldus ja probleemide leidmine.	30.03.18
5.	Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide arenguideede koondamine.	06.04.18
6.	Lisasoojustuselementide paigaldus- ja valmistusprotsessi analüüs.	13.04.18

7.	Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lisasoojustuselementide arendusideede välja töötamine.	13.04.18
8.	C energiatõhususklassile vastava hoone lisasoojustuselementide ristlõigete väljatöötamine tulenevalt C energiatõhususklassile vastava Akadeemia tee 5a maksimaalsele lubatud küttekulule.	20.04.18
9.	Hinnapakumiste tulemuste koondamine ja analüüsimine.	27.04.18
10.	C klassi elementide soojusläbivuste, joonkülmasildade, hoone õhulekke ja välispiirete summaarse soojuserikao leidmine köetava pinna kohta.	04.05.18
11.	Katse seina lisasoojustuselementide vaheliste horisontaalvuukide täitmiseks PUR-vahuga ning järeltööstuste tegemine.	11.05.18
12.	Töö metoodika kirjeldus.	18.05.18
13.	Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide arenguideede järeltööstuste tegemine.	25.05.18
14.	C energiatõhususklassile vastavate elementide ja hoone energiatarbimise järeltööstused.	28.05.18
15.	Töö vormistamine ja koondamine, kokkuvõtted.	28.05.18

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 31. mai 2018 a

Üliõpilane: Maarja Linda Ojarand

“.....”201....a /allkiri/

Juhendaja: Targo Kalamees

“.....”201....a /allkiri/

Sisukord

Kokkuvõte	8
Summary.....	11
Eessõna.....	13
Mõisted, lühendid ja tähised	14
1. Sissejuhatus.....	17
1.1. Eesti elamufondi olukord ja rekonstrueerimisvajadus	17
1.1.1. Eesti elamufondi näitajad	17
1.1.2. Rekonstrueerimisvajadus.....	20
1.1.3. Rekonstrueerimispõhjendus.....	22
1.1.4. Tavapärane korterelamute soojustamise viis	24
1.1.5. Energiatõhususe nõuded korterelamutele	25
1.1.6. KredExi roll korterelamute rekonstrueerimises	27
1.2. Tervikrenoveerimine tehases valmistatud lisasoojustuselementidega	28
1.2.1. Tehases eeltoodetud lisasoojustuselement ja selle eelised.....	28
1.2.2. Mujal maailmas läbi viidud tervikrenoveerimise projektid lisa- soojustuselementidega.....	29
1.3. Akadeemia tee 5a tervikrenoveerimine liginullenergiahooneks.....	35
1.3.1. Akadeemia tee 5a korterelamu osalemine H2020 projektis More- Connect.....	35
1.3.2. Akadeemia tee 5a korterelamu olukord enne rekonstrueerimist.....	36
1.3.3. Rekonstrueerimiseks kasutatud lahendused	38
1.3.4. Rekonstrueeritud hoone tulemused.....	39
1.4. Uurimistöö eesmärk	40
2. Meetodid	41
2.1. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide lahendused, probleemid, analüüs ning arengusuundade leidmine.....	41
2.2. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide paigalduse analüüs.....	42
2.3. Akadeemia tee 5a seina lisasoojustuselementide õhulekke katse	43
2.4. Katse seina lisasoojustuselementide horisontaalvuukide täitmiseks PUR- vahuga	44
2.5. C energiatõhususklassile vastava hoone lubatud soojuserikao leidmine	45
2.6. C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide ristlõigete valik	47
2.7. Soojusläbivuste, joonsoojusläbivuste ja õhulekke soojus-kadude leidmine...	48
2.8. Hoone energiatõhususklassi leidmine	51
2.9. C energiatõhususklassile vastavate elementide sobivuse hindamine	52

2.10. Lisasoojustuselementide maksumuste leidmine	52
3. Tulemused	54
3.1. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide valmistamise protsessi analüüs .	54
3.2. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide paigaldusprotsessi analüüs ning ehitustööde kestuste leidmine	55
3.3. Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisprojekti hindamine.....	59
3.3.1. Geomeetria	59
3.3.2. Välisseinaelement.....	62
3.3.3. Välisseinaelemendi paigaldus, toetus, kinnitus	71
3.3.4. Välisseinaelementide liitekohtade lahendus	78
3.3.5. Katuseelement ja toetus.....	84
3.3.6. Katuseelemendi paigaldus, kinnitus, liitekohtade tihendus	90
3.4. Katsed	96
3.4.1. Seinaelementide õhuleke	96
3.4.2. Seinaelementide horisontaalvuukide täitmine PUR-vahuga	98
3.5. C energiatõhususklassile vastavate katuse ja seina lisasoojustuselementide leidmine.....	99
3.5.1. Lisasoojustuselementide ristlõigete valik ja soojusläbivuste leidmine .	99
3.5.2. Lisasoojustuselementide maksuste leidmine.....	104
3.6. Akadeemia tee 5a korterelamu näitel C energiatõhususklassile vastavate välispiirete soojuserikadude väärtused	109
3.6.1. Soojuskaod läbi piirdetarindite	109
3.6.2. Soojuskaod läbi külasedade ja sisepinna temperatuurindeksid.....	111
3.6.3. Soojuskadude leidmine läbi õhulekete	112
3.6.4. Välispiirete summaarse soojuserikao leidmine köetava pinna kohta ja energiatõhususklassi määramine	112
3.1.1. Valitud lisasoojustuselementide energiatõhususklassile vastavus....	113
4. Järeldused.....	116
4.1. Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lahendus, tekkinud probleemid ja arengusuunad	116
4.2. Akadeemia tee 5a seinaelementide õhulekke katse	119
4.3. Seinaelementide horisontaalvuukide täitmine PUR-vahuga.....	119
4.4. C energiatõhususklassi saavutamine lisasoojustuselementidega	120
4.5. C energiatõhususklassile vastava lahenduse maksumus	121
Kasutatud kirjandus.....	123
Lisad	129

Lisa 1. Geomeetria klapitamisel tekkinud probleemide lahendamise ideed.....	129
Lisa 2. Puitraamidel lisasoojutuselementide edasi arendamise lähtepunktid	130
Lisa 3. Puitraamidel lisasoojutuselementide kinnitamise, paigaldamise ja toetamise parandamise võimalikud viisid	131
Lisa 4. Välisseina lisasoojutuselementide horisontaalvuugi olemasoleva lahenduse võimalikud parandamise ettepanekud	132
Lisa 5. Katuse lisasoojustuselementide ja toetamise parandamise ettepanekud ..	133
Lisa 6. Katuseelemendi paigalduse, kinnituste ja liitekohtade arendamise ettepanekud	134

Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli Akadeemia tee 5a suurpaneelilamu rekonstrueerimisel kasutatud tehases eeltoodetud lisasoojustuselementide paigaldamise, kasutatud lahenduste ja rekonstrueerimise käigus tekkinud probleemide selgitamine, leidmine ning analüüsimine. Samuti püüti leida arengusuundasid kasutatud lisasoojustuselementide probleemituimaks paigaldamiseks ja valmistamiseks ning soodsamaks muutmiseks. Teise suurema eesmärgina otsiti võimalikult odavaid katuse ja seina lisasoojustuselementide ristlõigete variante, millega soojustades hoone saavutaks C energiatõhususklassi.

Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lisasoojustuselementide ja nende probleemide kirjeldamiseks kasutati rekonstrueerimisprojekti, ehitusaegseid fotosid, ehitusprotsessis osalenute meenutusi ning projekti käsitletud koolitusel toodut. Arengusuundade leidmise protsessis kohtuti spetsialistidega puitlementmajasid tootvatest ettevõtetes, küsiti ehitusmaterjalidele hinnapakkumisi ning tutvuti erialakirjandusega, mille põhjal oli võimalik hinnata lahendusideede positiivset ja negatiivset mõju. Arenguideede välja töötamise etapis viidi läbi kaks katset, millest esimese sisuks oli hinnata Akadeemia tee 5a rekonstrueerimise käigus paigaldatud seina lisasoojustuselementide paigalduskvaliteeti ning teise katsega otsiti võimalust seinelementide vahelise horisontaalliite lahenduse lihtsustamiseks.

C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide ristlõigete arendamise aluseks võeti Akadeemia tee 5a suurpaneelilamu energiatarbimine. Energiatarbimisest tulenevalt leiti C energiatõhususklassile vastava hoone kütteenigiatarbimine, mille põhjal oli võimalik määrata maksimaalseid lubatud piirdetarindite soojusläbivusi. Soojusläbivuste piirangute määramisel lähtuti ka kortermajade rekonstrueerimist toetava sihtasutuse KredEx toetuse saamise nõuetest. Samuti kohandati KredExi nõuandel Akadeemia tee 5a korterelamu osasid parameetreid vastavalt sellele, milline on ühe keskmise rekonstrueerimist vajava suurpaneelilamu rekonstrueerimisjärgsed ootused. Kõikidele lisasoojustuselementide variantide terviklahendustele küsiti puitkonstruktsioone tootvatelt ettevõtetelt hinnapakkumised, lahenduse maksumuse hindamiseks ning tavapärase korterelamute soojustuslahenduse hinna kõrvutamiseks.

Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisprojekti läbiviimist analüüsisides leiti mitmeid elementidega seonduvaid probleeme, neist olulisemad olid järgnevad: lisasoojustuselementide paigaldamise suur ajakulu, elementide vaheliste vuukide täitmise ja katmise keerukusest tulenev ajakulu, kasutatud lahenduse suur maksumus, ilmastiku puudulik

kaitse, seinaelementide kinnitusedetailide keeruline paigaldus, hoone 3D mudeli mitte üheselt mõistetavus jne. Arengusuundadena leiti, et Akadeemia tee 5a projektis esinenud probleemide vältimiseks tuleks rakendada järgnevat. 3D mudeli vormistamine ja käsitlemine on üks olulisim viis protsessi lihtsustamiseks. Maksumuse vähendamise kõige lihtsamad ideed on kasutatud fassaadikatte plaatmaterjali asendamine 2-3 korda odavama laudisega ning platsil ehitatud katusekandekonstruktsiooni asendamine tehases eeltoodetud puitfermidega. Laiade sein lisasoojustuselementide horisontaalvuukide tõttu tekkinud probleemide lahenduseks on seinaelementide toetuskeemi muutmine alt toetatu vastu, kus ülemised elemendid toetuvad alumiste peale ning elementide ülemised kinnitused olemasoleva fassaadiküljes võtavad vastu vaid tuulekoormust. Katuse lisasoojustuselementide katusekalde suunaliste elementide liitekohtade tõttu tekkinud probleeme aitab lahendada suuremate, võimalusel hoone laiuste, elementide kasutamine, mis paiknevad põikihoonet. Samuti on ainuõige otsus kasutada katuseelemente, mis paigaldatakse tihedalt üksteise kõrvale, jätmata laiasid liitekohtasid, seejuures tuleb elementide liitekohad koheselt pärast paigaldamist katta veekindla katusekattega.

Lisasoojustuselementide paigaldust hindavas katses leiti, et seinaelementide puhvervill ei olnud paigalduse käigus kardetult liikunud ning õhulekked tulenevalt elementide liitekohtadest ei ületanud kriitilisi väärtusi.

Katses, kus täideti sein lisasoojustuselemendi lai horisontaalvuuk alternatiivselt PUR-vahuga järel dati, et kahjuks antud kontekstis vaht vuukide täiteks ei sobinud, sest määris tehases eelnevalt paigaldatud fassaadikatte.

C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide ristlõigete otsimise käigus, leiti viis sein- ja kuus katuseelemendi varianti, millega saavutati hoone energiatarbimine 139,1 – 141,7 kWh/(m²·a). Seinaelementide ja olemasoleva tarindi soojuslähivused jäid vahemikku 0,104 – 0,170 W/(m²·K) ning hinnad koos paigalduse ja laudisest fassaadikattega jäid vahemikku 147 – 158,5 eur/m². Katuseelementide ja olemasoleva tarindi soojuslähivused jäid vahemikku 0,114 – 0,120 W/(m²·K) ning hinnad koos paigalduse ja kandekonstruktsiooniga 155 – 193 eur/m² piiridesse. Saadud tulemuste põhjal leiti, et seinte soojustamiseks sobib leitud variantidest enim tulenevalt maksumusest ja ehitusfüüsikalistest omadustest 145 mm paksune mineraalvillaga täidetud element, mis on kaetud 30 mm paksuse Isover RKL tuuletõkkevilla kihiga. Kirjeldatud seinaelemendi hind on u 151 eur/m² ja omab soojuslähivuse väärtust 0,146 W/(m²·K). Katuse soojustamiseks sobib kõige paremini element, mis koosneb 195 mm ja 120 mm paksustest mineraalvillakihtidest ning maksab 155 eur/m² ja on soojuslähivusega 0,117 W/(m²·K).

Saadud tulemuste põhjal järeldati, et Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisprotsessi käigus tekkinud probleemidele leiduvad paljutöötavad lahendused ning ainuüksi tehases eeltoodetud puitraamidel lisasoojustuselementide kasutamine suurpaneelelamu soojustamiseks on 2-3 korda kallim, kui tavapärane korterelamute soojustamislahendus. Lisasoojustuselementide kasutamine rekonstrueerimiseks põhjendab end juhul, kui kasutatakse lisasoojustuselementide täiendavaid eeliseid, nagu tehases elementidesse paigaldatavad uued aknad ning elementidesse integreeritud tehnosüsteemid.

Summary

The purpose of this thesis was to find, explain and analyse problems which occurred during the installation of the prefabricated reconstruction elements on the reconstruction work of Akadeemia st 5a concrete large panel apartment building. Used solutions were developed to make the installation and production more efficient. Another purpose of this thesis was to find less expensive roof and wall additional reconstruction elements, which satisfy the demands of C energy efficient class.

The reconstruction project, photos during the construction site, information of construction site stuff and the information about the reconstruction project training-course was used to describe the prefabricated reconstruction elements and its problems during the Akadeemia st 5a project. Specialist were met from the factory of wood element houses, construction materials offer prices were asked and special thesis were examined to determine the development processes, which helped to assess the advantages and disadvantages of the solutions. During the stage of development ideas, two studies were conducted: the purpose of the first study was to assess the quality of the installation of the wall additional reconstruction elements, the second study was conducted to find a way to simplify the solution of the wall element horizontal seam.

The energy consumption of the house in Akadeemia st 5a was taken as the basis to develop new C energy efficient class cross-sections of the additional reconstruction elements. They were used to mark the maximum thermal transmittance, which were developed by KredEx Foundation who co-finances the renovations of apartment buildings. KredEx also advised to modify some parameters to meet their expectations in after-reconstructed buildings. Price offers were asked from wooden construction factories to compare the usual insulation solution with additional prefabricated reconstruction insulation elements, the last ones were compared to each other as well.

Many problems in additional heat insulation elements were found during the analysis, the most important ones were the following: the great time consuming in installation, time consuming seam covering and filling, expensive cost of the used solution, inadequate weather protection, complicated installation of wall element fasteners, confusing 3D model, etc. To ignore the problems which occurred in the project, new development directions were found: to simplify the process, a 3D model has to be formed, facade cover plate material should be replaced with 2-3 times less expensive wooden deck, replace the roof element's supporting construction built on the construction area with the one constructed in the factory. To avoid the large seam caps between wall elements, the upper elements should support on the lower elements and their upper fastenings take

into account only wind load. Joins of the additional reconstruction elements can be fixed by using elements as long as is the width of the building, which are placed across the building. It is also the only reasonable solution to use the roofing elements that are tightly laid apart, without leaving wide joints, as well as the joints must be covered immediately with watertight roofing after installation.

In an assessment of the installation of additional prefabricated reconstruction elements, it was found that the adaption layer of the wall elements had not moved during the installation process and the leakages due to the element joints did not exceed the critical values.

In the test, where the broader horizontal joint of the wall reinforcement element was alternatively filled with PUR-foam, it was found that, unfortunately, in this context, the foam did not suit to the joints, because the facade material was stained.

In the course of the search for the cross-sections of additional thermal elements corresponding to the energy efficiency class C, five walls and six roof element elements were found that achieved the building's energy consumption of 139,1– 141,7 kWh / (m²·a). The thermal transmittance of the wall elements and the existing structure was between 0,104 and 0,170 W/(m²·K), and prices with installation and ceiling coverings ranged from 147 to 158,5 EUR/m². The thermal transmittance of the roof elements and the existing structure was in the range of 0,114 – 0,120 W/(m²·K) and the prices with the installation and the bracket structure of 155 - 193 eur/m². Based on the results obtained, it was found that the most 145 mm thick mineral wool filled with a 30 mm thick Isover RKL windproof wool and its price is about 151 eur/m² and its thermal transmittance is 0,146 W/(m²·K). Insulating roof element, consisting of 195 mm and 120 mm thick mineral wool layers, is suited for the insulation of walls due to its cost and structural-physical properties. Its price is about 155 eur/m² and its thermal transmittance is 0,117 W/(m²·K).

Based on the results obtained, it was concluded that the problems arising in the reconstruction process of Akadeemia st 5a are promising, and the use of additional prefabricated reconstruction elements for the large-panel insulated glass is 2-3 times more expensive than the usual insulation solution for apartment buildings. The use of additional heating elements for reconstruction is justified by additional advantages of additional elements, such as new windows installed in the factory elements, and integrated systems in the elements.

Eessõna

Käesolev lõputöö käsitleb Akadeemia tee 5a hoone rekonstrueerimisel kasutatud lisasoojustuselementide lahendusi, lahendab ehitustöö käigus tekkinud küsimusi ning pakub välja viise, kuidas muuta hoonete soojustamine puitraamidel lisasoojustuselementidega kiiremaks, efektiivsemaks ning soodsamaks. Teise eesmärgina otsib käesolev töö võimalusi suurpaneelalamu rekonstrueerimiseks C-energiatõhususklassile vastavalt ning toob välja variantide maksumused. Samuti annab töö ülevaate rekonstrueerimise olulisusest ning rekonstrueerimisele esitatavatest nõuetest ning normidest, millest tuleb ehitustöö käigus lähtuda.

Töö algandmeteks on kasutatud Akadeemia tee 5a hoone projekti, ehituse käigus jäädvustatud fotosid ning 2018. aasta veebruaris ja märtsis Tallinna Tehnikaülikoolis läbiviidud kursusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ käsitletut. Lisasoojustuselementide arendamisel olid abiks spetsialistid järgnevatest ettevõtetest: Matek AS, Timbeco Woodhouse OÜ, Welement AS, Kredex SA, Icy Getec OÜ ja ES Grupp OÜ. Lahenduste maksumuste määramisel osalesid osad eelpool nimetatud ettevõtted kui ka mõned anonüümseks jääda soovivad firmad.

Lõputöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli professor Targo Kalamees. Teema valiku ajendiks oli see, et Eestis on palju aastatel 1960 – 1990 ehitatud suurpaneelilamuid, mille kasutusiga lõppeb peagi. Seega on tegemist aktuaalse teemaga, mis vajab kiiret ja tõhusat lahendust.

Käesolevas magistritöös kasutatud viitamata fotod on pildistatud Akadeemia tee 5a rekonstrueerimistöode tellija poolt.

Võtmesõnad: rekonstrueerimine, lisasoojustamine, puitraamidel elemendid, C-energiatõhususklass, magistritöö.

Mõisted, lühendid ja tähised

Mõisted

Energiakandjate kaalumistegurid – tegurid, millega võetakse arvesse tarnitud energia tootmiseks vajalik primaarenergia kasutus ja selle keskkonnamõju. (MTMm nr 55 2015, § 2)

Energiatõhususarv - väljendab arvutuslikku summaarset tarnitud energiatega hoone tavapärasel kasutusel, millest arvatakse maha summaarne eksporditud energiatega kaalutud erikasutus. Energiatõhususarv kajastab hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks kui ka tarbevee soojendamiseks ning see arvutatakse hoone kütava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpilisel kasutamisel kWh/(m².a). (MTMm nr 55 2015, § 2 lg 11)

Kaalutud energiakasutus – energiakandjate kaalumisteguritega korrutatud aastane energiakasutus kilovatt-tundides, mida arvestatakse hoone kütava pinna ruutmeetri kohta kWh/(m².a). (MTMm nr 36 2015, § 2 lg 4)

Madalenergiakorterelamu - parima võimaliku ehituspraktika kohaselt ehitatud energiatõhususe- ja taastuvenegiatehnoloogia lahendusega tehniliselt mõistlik hoone, mille puhul ei eeldata lokaalset elektri tootmist taastuvast energiaallikast. Madalenergiakorterelamu energiatõhususarv peab olema väiksem kui 120 kWh/(m².a). (MTMm nr 55 2015, § 6)

Liginullenergiakorterelamu – parima võimaliku ehituspraktika kohaselt ehitatud energiatõhususe- ja taastuvenegiatehnoloogia lahendusega tehniliselt mõistlik hoone, mille energiatõhususarv on suurem kui 0 kWh/(m².a), kuid mitte suurem kui 100 kWh/(m².a). (MTMm nr 55 2015, § 7)

Oluline rekonstrueerimine - ehitamine, mille puhul on hoone piirdekonstruktsioonide, kande- või jäigastavate konstruktsioonide, välispiirete, tehnosüsteemide asendamise või muutmisega seotud kulud suuremad, kui üks neljandik rekonstrueeritava hoonega samaväärse hoone keskmine ehitusmaksumus. (Rs nr 1 2015, § 63 lg 4)

Rekonstrueerimine – ehk ehitise ümberehitamine on ehitamine, mille käigus olemasoleva ehitise omadused muutuvad oluliselt. Rekonstrueerimise käigus muudetakse, asendatakse või lammutatakse üks või mitu järgnevast

loetelust: piirdekonstruktsioonid, kandekonstruktsioonid, tehnosüsteemid, kasutusotstarve, kasutatud tehnoloogia või taastatakse osaliselt või täielikult hävinenud ehitis. (Rs nr 1 2015, § 4 lg 3)

Lühendid

CNC-tööpink -	antud kontekstis puidutöötlemise seade, mida juhitakse arvutiprogrammidega.
EPS –	ehk vahtpolüstüreen on jäik väikese tihedusega poorne soojustusmaterjal, mis on valmistatud polüstüreeni graanulitest, milles on 98% ulatuses õhku.
ETA –	energiatõhususarv (MTMm nr 36, 2015, Lisa 3).
F -	koormus.
IPN -	ehk polüuretaanvaht on soojustusmaterjal, mis erineb PIR- ja PUR-vahtudest selle poolest, et seal on rohkem polüisotsüanuraati. (Kingspan OÜ)
KEK –	kaalutud energiakasutus (MTMm nr 36 2015, Lisa 3).
OSB-plaat –	ehk suunatud laastudega plaatmaterjal. Materjal sobib kasutamiseks konstruktsioonimaterjalina niisketes tingimustes. OSB-plaati valmistatakse 60% ulatuses kuuse ja männi puidust ning 40% on haava puit.
PIR –	polüisotsüanuraatvaht on jäik soojustusmaterjal, mis erineb PUR-vahust keemilise valemi poolest.
PUR –	polüuretaanvaht, mida kasutatakse soojustusmaterjalina. Saadaval on nii suletud kui ka avatud pooridega polüuretaan-pritsvahtu. Materjalidel on soojapidavuslikud, veeauru läbilaskvad ja tugevuslikud omadused.
PF –	ehk fenovaht on soojusisolatsioonimaterjal.
Sandwich-paneel –	on ehitusmaterjal, millel on isekandvad omadused ja see koosneb enamasti kolmest kihist. Välimised kihid on moodustatud paralleelselt paiknevatest metall-lehtedest, mille vahel asub soojustusekiht. Soojustusena kasutatakse tavapäraselt ehitusvilla, PUR-vahtu, PIR-vahtu või EPSi.
SBS-kate –	bituumenrullmaterjal, millega kaetakse katuseid.
TEP-plaat –	tsement-fibroliidplaat ehk lühendatult fibroliidplaat on ehitusmaterjal, mida valmistatakse puitvillast, portlandtsemendist ja mineraali-

seerujast. Materjalil on nii tugevuslikud kui ka soojusisolatsioonilised omadused ning tal on kõrge tulepüsivus.

Tähised

$\frac{\Sigma H}{A_{k\ddot{o}etav}}$ –	välispiirete summaarne soojuserikadu k\ddot{o}etava pinna kohta, $W/(m^2 \cdot K)$;
A –	pindala, m^2 ;
$A_{k\ddot{o}etav}$ –	k\ddot{o}etav hoone pind, m^2 ;
c –	\ddot{o}hu erisoojus, $J/(kg \cdot K)$;
c_p –	\ddot{o}hu erisoojus konstantsel r\ddot{o}hul, $Wh/(kg \cdot K)$;
f_{Rsi} –	temperatuuriindeks sisepinnal punktis, -;
H –	hoone soojuserikadu kokku l\dd{a}bi piirdetarindite, W/K ;
h –	keldriseinte k\dd{o}rgus maapinnast k\dd{o}rgemale, m ;
H_{inf} –	hoone \ddot{o}hulekkest tulenev soojuserikadu, W/K ;
H_l –	piirdetarindite k\dd{u}lmasildade soojuserikaod, W/K ;
H_t –	piirdetarindite juhtivuslikud soojuserikaod, W/K ;
l –	liitekoha pikkus, m ;
n –	keldri \ddot{o}huvahetuskordsus tunnis, $1/h$;
n_{50} –	\ddot{o}huvahetusarv, $1/h$;
q_{50} –	hoone v\dd{a}lisperiiride keskmine \ddot{o}hulekkearv, $m^3/(h \cdot m^3)$;
q_i –	infiltratsiooni \ddot{o}huhulk, l/s ;
R –	materjalikihi arvutuslik soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$;
z –	keldri s\dd{u}gavus maapinnast keldri p\dd{o}randani, m ;
U –	tarindi arvutuslik soojusl\dd{a}bivus, $W/(m^2 \cdot K)$;
x –	tegur, mis v\dd{o}tab arvesse hoone korruselisust, -;
$\Delta U''$ –	\ddot{o}hupiludest tingitud parandustegur, $W/(m^2 \cdot K)$;
$\Delta U_a''$ –	\ddot{o}hul\dd{a}bivusest tingitud parandustegur, $W/(m^2 \cdot K)$;
θ_e –	v\dd{a}listemperatuur, $^{\circ}C$.
θ_{int} –	sisetemperatuur, $^{\circ}C$;
$\theta_{si}(x,y,z)$ –	temperatuur sisepinnal punktis (x,y,z) , $^{\circ}C$;
Λ_g –	pinnase soojuserijuhtivus, $W/(m \cdot K)$;
λ –	materjali soojuserijuhtivus, $W/(m \cdot K)$;
ψ –	tarindite liitekoha joonsoojusl\dd{a}bivus, $W/(m \cdot K)$;
χ –	l\dd{a}biviikude punktsoojusl\dd{a}bivus, W/K .

1. Sissejuhatus

Käesoleva lõputöö objektiks on 2017. aastal tehases eeltoodetud puitraamidel lisasoojustuselementidega rekonstrueeritud Akadeemia tee 5a Tallinna Tehnikaülikooli ühiselamu. Ühiselamu näitel leitakse põhjendusi ja lahendusi üleüldiselt suurpaneel elamute rekonstrueerimiseks.

Uurimistöö on jagatud neljaks osaks: sissejuhatuseks, meetodikaks, tulemusteks ja järeldusteks. Lõputöö esimene peatükk selgitab Eesti elamufondi olukorda, hoonete rekonstrueerimisvajadust, olulisi rekonstrueerimist mõjutavaid nõudeid ning Euroopas sarnaselt läbiviidud rekonstrueerimisprojektide tulemusi. Teine peatükk toob välja lõputöö koostamiseks kasutatud meetodid. Kolmas peatükk annab ülevaate Akadeemia tee 5a korterelamu lisasoojustamisel kasutatud lahendustest ja probleemidest ning leiab elementide arengusuundasid, millega rekonstrueerimine oleks odavam, kiirem ja vähemate probleemidega. Arengusuundade leidmine on jagatud kuueks alateemaks: hoone geomeetria, seina elemendi ristlõige, seina elemendi toetamine, seina elementide liitekohad, katuse elemendi ristlõige ning katuse elemendi paigaldamine ja liitmine. Samuti toob peatükk välja lõputöö osana läbiviidud kahe katse tulemused. Kolmas peatükk leiab ka lisasoojustuselemente ja nende maksumusi, millega soojustades vastaks hoone energiatõhususklassi C nõuetele. Neljandas peatükis tuuakse välja tehtud töö põhjal järeldused. Töö lõpus on lisadena 2018. aasta veebruaris ja märtsis aset leidnud koolituse „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ osalejate süstematiseeritud ideed lisasoojustuselementide arendamiseks.

1.1. Eesti elamufondi olukord ja rekonstrueerimisvajadus

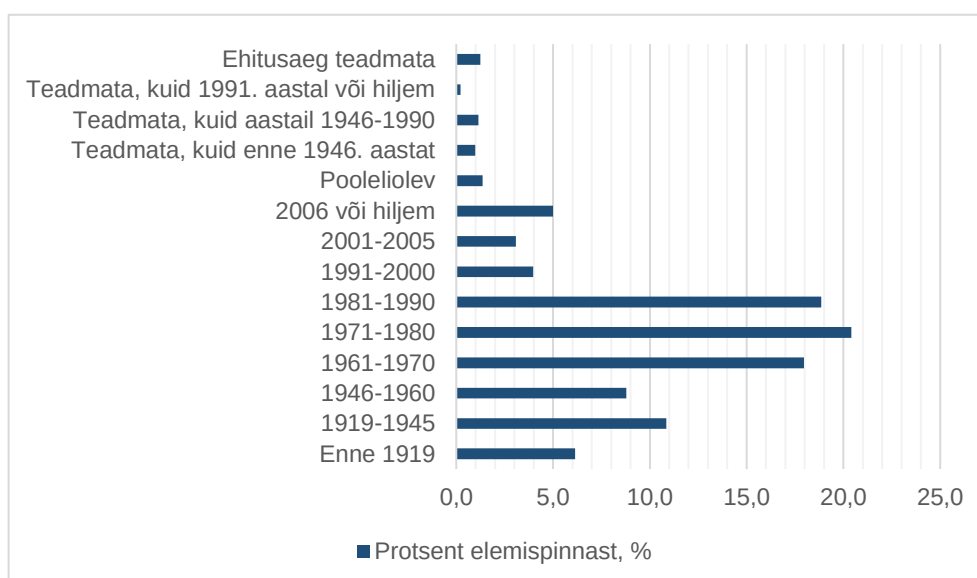
1.1.1. Eesti elamufondi näitajad

Euroopa Liidu liikmesriikide eluasemestatistikast selgub, et 2017. aastal elab 62,6% Eesti elanikest korterelamutes. Korterelamutes elavate inimeste osakaalult on Eesti kolmandal kohal Euroopas, esimesel ja teisel kohal on vastavalt Hispaania 65,9 ja Läti 65,0 protsendiga. (Eurostat 2017)

Varasemas, 2011. aastal läbi viidud Statistikaameti uuringus toodi välja, et Eestis moodustavad 68,8% kõikidest elamufondi ruumidest korterid ning seejuures moodustavad korterid 57% kogu eluruumide pindalast. Analüüsis selgus, et keskmise korteri suurus on

51 m² ning keskmiselt asub ühes kortermajas 18,9 korterit. (Lauri 2014, 4) Statistika põhjal võib väita, et Eestis enim kasutust leidvad elamispinnad korterid.

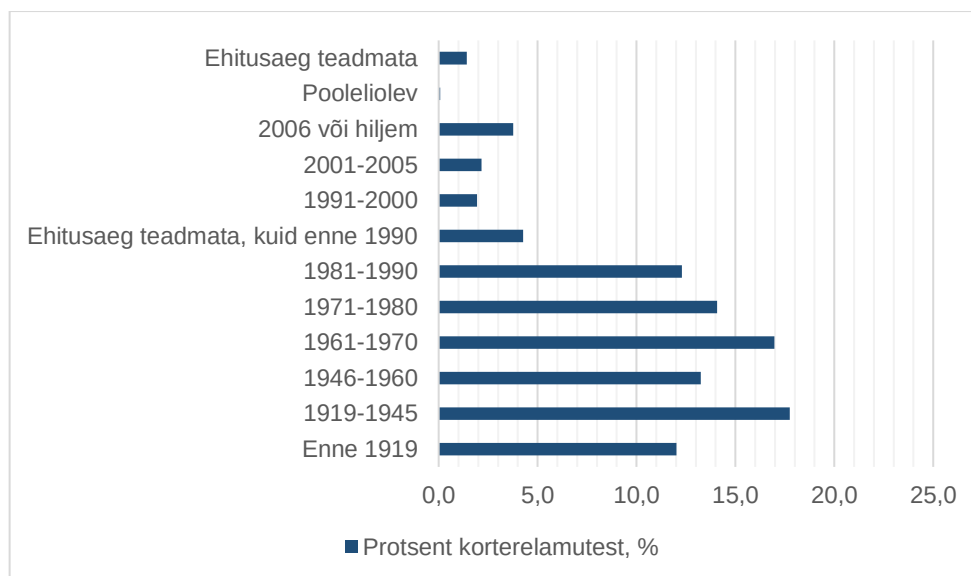
Eesti elamufondist suurim osa eluruume on ehitatud aastatel 1961-1990. Nimetatud kolme aastakümne jooksul ehitati peaaegu 60% elamufondi mahust. (Statistikaamet 2011) Joonis 1 kujutab protsentuaalselt tavaeluruumide jaotumist ehitamise aasta järgi.



Joonis 1. Eluhoonete protsentuaalne osakaal ehitusaasta järgi (Statistikaamet 2011).

Uurides korterelamute ehitusaastaid selgub, et 2011. aasta seisuga oli kogu Eesti korterelamute mahust suurim arvuline osakaal korteritel, mis oli ehitatud vahemikus 1946-1990, ulatuslikud 61%.

Joonis 2 toob välja korterite osakaalu kogu korterelamute mahust, võttes arvesse ehitamisaastaid. Samuti selgub samast uuringust, et 23 616 korterelamust 21 401, ehk 91% korterelamuid on ehitatud enne 1991 aastat. (Lauri 2014, 4)



Joonis 2. Korterelamute protsentuaalne osakaal ehitusaasta järgi (Lauri 2014, 4).

Võrreldes elamispindade ja korterite arvu selgub, et aastail 1946-1990 ehitatud elamispindades moodustavad korterid 82%. Enne 1946. aastat moodustasid korterid vaid 36% kogu elamispindade mahust. Pärast nõukogude aja lõppu moodustavad korterid poole kogu ehitavate elamispindade arvust. Tabel 1 toob välja kuni aastani 2011 ehitatud eluruumide arvu ning samal perioodil valminud korterite arvu.

Tabel 1. Elupindade ja korterite osakaalude võrdlus ehitusaasta järgi (Lauri 2014, 3-4).

Näitaja	Elamupindade arv 2011. aasta seisuga	Korterite arv 2011. aasta seisuga	Korterite osakaal kõikidest elamupindadest 2011. aasta seisuga
Enne 1946. aastat	116 770	42 295	36,2%
Aastail 1946-1990	436 331	359 657	82,4%
Pärast 1991. aastat	88 561	43 921	49,6%
Ehitusaeg teadmata	8 084	1 263	15,6%
Kõik kokku	649 746	447 136	68,8%

Suurpaneelelamute tootmine algas Eestis 1960. aastal ning osutus ka koheselt populaarseks (Kalamees et al. 2009, 9). Neil aastail valminud raudbetoonist suurpaneel-elamud moodustavad 72% kõikidest korteritest ja 88% korterelamute eluruumide pinnast. Enne suurpaneelhoonete rajamise tehnoloogia kasutusele võttu ehitati korterelamud tellistest või puidust. (Lauri 2014, 3)

Suurpaneelelamuks nimetatakse hoonet, mille kandekonstruksioon koosneb vundamendist, raudbetoonist põik- ja keskmistest pikivaheseintest, raudbetoon-vahelagedest ning kolmekihilistest raudbetoon-välisseintest. Välisseinte paksus varieerub enamasti vahemikus 230-300 mm, millest 50 või 60 mm moodustab välimine

raudbetoonplaat, keskel on 110 või 125 mm soojustust ja sisemise kihina kandev raudbetoonplaat paksusega 75, 80, 125 või 130 mm. Kandva raudbetoonplaadi paksus olenes hoone kõrgusest. Kuna tollal oli suurim rõhk just tüüpsusel, siis enim ehitati 5-, 9- ja 16-korruseliseid elamuid. Suurpaneelidel välisseintes kasutati soojustusena kas mineraalvilla, fibrolitplaati, fenoplastplaati või vahtpolüstüreenplaati. (Kalamees et al. 2009, 9) Suurpaneelidel tunnuseks on välisseinaelementid, mille suurus oleneb paljuski seina taga paiknevast ruumist.

1.1.2. Rekonstrueerimisvajadus

Elamute projekteeritavaks kasutuseaks on tavaliselt 50-70 aastat, mis viitab sellele, et väga suur maht Eesti elamufondist on amortiseerunud või jõuab selleni peagi. Hoone vananedes halveneb nii kandekonstruktsioonide kui ka tehnosüsteemide olukord, mille tulemusel võib oluliselt kehveneda eluruumide sisekliima või muutuda hoone eluohtlikuks. Eluea lõppemise ärahoidmiseks tuleb pidevalt teostada hoones hooldustöid. Eluea pikendamise efektiivseim võimalus on tervikrekonstrueerimine. (Kalamees et al. 2009)

1960. aastatel algusesaanud suurpaneelidel ehitamisel lähtuti Nõukogude ehitusstandardidest GOST, kus nähti ette, et hoonete kavandatava eluea pikkuseks on 50 aastat. Ka tänapäeval projekteeritakse eluhoonete elueapikkuseks 50 aastat (EVS-EN 1990:2002). Kaks peamist põhjust, miks nüüdseks 50 aastat kasutusel olnud hoonete kasutusega ei tohiks lõplikult lõppenuks pidada on järgnevad: projekteerimisstaadiumis ei osatud ette näha, millised sise- ja väliskliima tingimused hoonet mõjutama hakkavad ning ehitise kasutusea pikkus on leitud tagavarategureid arvestades (Ilomets 2017).

Suurimad ehitustehnilised probleemid ajavahemikus 1960-1990 ehitatud ja kasutusele võetud suurpaneelidel puhul on järgnevad (Kalamees et al. 2009):

- Suur piirdetarindite soojusläbivus (U). Seinaelementides on kasutatud võrreldes tänapäeva võimalustega palju suurema soojusläbivusega soojustusmaterjale. Lisaks esineb ka juhtumeid, kus suurpaneelide soojustuse paksus varieerub suurel määral nii elemendi kui ka hoone ulatuses.
- Suur piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivus (ψ) ning suured soojuskatkestuste ja läbiviikude punktsoojusläbivused (χ). Külmasillad on suupaneelhoonetesse projekteeritud, sest tollal puudusid lahendused külmasildade vältimiseks. Näiteks on elementide liitekohad on täidetud väikse soojustakistusega jäikade segudega. Samuti ei ole piisavalt

tihendatud tehnosüsteemide läbiviigud piirdetarindites. Suured külmasillad paiknevad katuse ja välisseina liitekohtades ning kohtades, kus konsoolsed rõdud kinnituvad välisseinale.

- Kehv kande- ja piirdetarindite olukord. Betoonelementide kaitsekihi paksus on liiga väike ja seetõttu võib kohata nii fassaadi kui ka soojustuse poolel korrodeerunud armatuuri.
- Kasin fassaadi olukord. Fassaadi betoon võib olla karboniseerunud 2-3 cm sügavuseni, kohati isegi kuni 7 cm sügavuseni. Olukord on hullem värvkattega fassaadide puhul ning parem kivipuistega kaetud fassaadide korral. Betooni karboniseerumine on eelduseks armatuuri korrodeerumisele. Läbi korrodeerunud armatuur viib selleni, et elemendi välimine betoonikoorik on nõrgalt kinnitatud kandva konstruktsiooni külge, mille tulemusel võib see ära kukkuda.
- Hallitus eluruumides. Külmasildade olemasolu viib hallituse ja pinnakondensaadi tekkeni. Hallitus hakkab tekkima siis, kui suhteline niiskus on 75-80 %. Hallitusseente tekkimise risk on suurem kõrgematel korrustel.
- Vee kondenseerumine elementide sisepindadele ning ebapiisav tuulutus. Difusiooni ja konvektsiooni teel satub veeaur siseruumidest katusekatte või betoonpaneeli sisepinnale. Piirdetarinditesse vee kondenseerumise oht tekib olenevalt ruumide niiskuskooormusest, mida saab leevendada toimiva ventilatsioonisüsteemi ja asustustiheduse vähendamisega.
- Hoonete õhupidavus. Suurpaneelalamute õhulekkearv (q_{50}) ja sellest tulenevalt õhuvahetus arv (n_{50}) on tavapäraselt kordi suurem, kui tänapäeval ehitatavatele hoonetele esitatavad nõuded välja toovad. Õhu lekkimine annab võimaluse soojal pääseda hoonest välja. Tähele tuleb panna, et hoone täielik õhupidavus ei ole eesmärk, sest ruumid peavad saama ventileeritavad. Hoone õhupidavus, kütte- ja ventilatsioonisüsteem on ette nähtud toimima tervikuna, vastasel juhul kannatab sisekliima. Õhu- ja soojatihedal hoonel peab olema toimiv ventilatsioonisüsteem. Samal ajal ei piisa ka vaid töötavast kütte- ja ventilatsioonisüsteemist, kui hoone ei ole õhutihe.
- Ebapiisav ventilatsioon. Jättes ventilatsioonisüsteemi uuendamata, aga vahetades välja aknad, halveneb korteri õhuvahetus. Suurpaneelalamutes on ventilatsioonisüsteemi toimimisel suur roll just akende ebatihedustel, sest just sealt kaudu toimub õhuvahetus. Ventilatsiooni puudumisel ei ole võimalik saavutada ruumi optimaalset õhuniiskust.

- Süsihappegaasi (CO₂) lubatust suurem kontsentratsioon õhus. Süsihappegaasi hulka õhus saab vähendada toimiva ventilatsiooni ning õhuvahetuskorduse suurendamisega.
- Küttesüsteemi amortiseerumine.
- Tuleohutusnõuete mitte täitmine. Madalast õhupidavusest tulenevalt ei tööta tuletõkkepiirded tuld ja suitsu takistavatena. Küttesüsteemitorude vahetusega on eiratud läbiviikude tihendamisel tuletõkkepiirete tulepüsivusnõudeid.

Üldiselt võib renoveerimisvajadusele läheneda väga lihtsalt – ehitis vajab renoveerimist kui ta on kulunud. Hoone kulumisel on neli näitajat: füüsiline (vananemine, kulumine), majanduslik, moraalne (ehitis on aegunud) ning sotsiaalne (ehitis ei vasta ootustele). (Männistu 2016)

Renoveerimisvajadusest eluruumide kasutajale võib märku anda ka kehv sisekliima. Sisekliima mõjutab inimese enesetunnet, tervist, produktiivsust ja heaolutunnet. Olulisemateks sisekliimat mõjutavateks teguriteks on õhutemperatuur, õhu suhteline niiskus ja süsihappegaasi sisaldus õhus. Samuti ei tohi ära unustada sisekliima kujundamisel kiirguspindade temperatuuride, õhu liikumise kiiruse, õhu puhtuse, mürataseme ja valgustatuse tähtsust. Selleks, et sisekliimat reguleeriva standardi EVS-EN 15251:2007 nõuded saaksid täidetud peavad hoone välispiirded sooja pidama ning hoones peab olema ajakohane küttesüsteem ja ventilatsioon. (Mägi 2017)

1.1.3. Rekonstrueerimispõhjendus

Üks tähtis argument hoonete rekonstrueerimiseks on see, et Ehitusseadustik esitab ehitistele nõuded, millele hoone peab vastama. Olulisem neist on, et ehitis peab kogu oma eluea vältel olema ohutu. Samuti on reguleeritud nõuded, millele peab ehitis vastama kogu oma kasutusea vältel. Hoone kasutamisel pööratakse tähelepanu järgnevatele asjaoludele (Rs nr 1 2015, § 11):

- mehaaniline vastupidavus ja stabiilsus;
- tuleohutus;
- hügieen, tervis ja keskkond;
- kasutamise ohutus ja juurdepääs, sealhulgas evakuatsioon, pääste vajadused, operatiivkaart;
- kaitsmine müra eest;
- energiasäästlikkus ja -tõhusus;
- loodusvarade säästev kasutamine;

- puuetega inimeste erivajadused;
- ehitiste toimivus ja koostoimimisvõime ning ühilduvus;
- kasutusotstarve, seisundi- ja korrashoiunõuded;
- ehitise ja selle asukoha märgistamine.

On oht, et kõik ajavahemikus 1961-1990 ehitatud suurpaneel eramud ei vasta nimetatud nõuetele. Ei ole oluline, kas hoone ei vasta nimetatud nõuetele aja jooksul karmistunud ettekirjutuste pärast või siis amortiseerumisest, ühtemoodi tuleb probleemiga tegeleda sellegipoolest.

Põhjalike ja läbi mõeldud rekonstrueerimistööde tulemusena pikeneb hoone kavandatud eluiga – põhitarindite ja tehnosüsteemide eluiga 25-40 aastat. Lisaks eluea pikenemisele on tõenäoline, et seoses hoone välisilme paranemisega kasvab korteri turuväärtus. Ühes eluea pikenemisega paraneb ka eluruumide sisekliima. (Kalamees et al. 2009)

Võrreldes tervikrenoveerimist hoone lammutamise või uuesti ehitamisega selgub, et keskkonnasäästlikkuse ja tehtavate kulutuste seisukohalt on tervikrenoveerimine ainuõige otsus (Kalamees et al. 2015). Ehitise mõju keskkonnale hinnatakse läbi kahe näitaja: energiakuluna hoone normaalkasutamisel (kWh) ja keskkonda eritatava süsihappegaasi (CO₂) koguse järgi. Energia kui ka süsihappegaasi koguste leidmisel arvestatakse ka ehitusmaterjalide tootmisel ja transportimisel tehtud kulutused. (Männistu 2016)

Uuringus, kus analüüsiti aastatel 1962-1992 ehitatud suurpaneelhoonete energiasauditeid leiti, et rekonstrueerimine võrreldes vana hoone lammutamise ja uue rajamisega on säästlikum energiakasutuse, majanduslikkuse ning keskkonnamõju seisukohalt. Võrreldavate tulemuste saamiseks kasutati uuringus rekonstrueeritava korterelamuna hoonet, mis rekonstrueeriti vastavalt madalaenergiahoone nõuetele. Suurpaneelramu energiakasutuseks pärast rekonstrueerimist saadi 118 kWh/(m²·a) ning lammutatud ja uuesti ehitatud hoone puhul 112 kWh/(m²·a). Kõrvutades atmosfääri paisatavate süsihappegaaside koguselt rekonstrueeritud hoonet lammutatud ning uuesti ehitatud korterelamuga selgub, et uue hoone ehitamisega atmosfääri eritatavad CO₂ kogused on suuremad. Renoveeritava hoone süsihappegaasi kogus on 2920 tonni ja uuesti ehitatud hoone puhul 3240 tonni. Majanduslikkuse seisukohalt on vahed veelgi suuremad, nimelt kulub keskmiselt suurpaneelramu rekonstrueerimiseks madalenergiatasemele 220 eur/m², vana hoone lammutamise ja uue madalenergia korterelamuga ehitamise kuluks on 1348 eur/m². Jättes hoone täiesti rekonstrueerimata on suurpaneelramu keskmine energiakasutus 225 kWh/(m²·a) ning ta eritab 4610 tonni CO₂ emissiooni aastas. Seega selgub ka sellest uurimistööst, et keskkonnamõju mõistes kui ka majandusliku analüüsi seisukohalt mõistlikum rekonstrueerimine. (Kuusk et al. 2014)

1.1.4. Tavapärane korterelamute soojustamise viis

Suurpaneel korterelamute rekonstrueerimise oluline osa on välisseinte soojustamine küttekulude vähendamise eesmärgil. Soojustamise lahenduse valikul mängib olulist rolli töö maksumus. Tallinna tänavapildis on näha suurpaneelhooneid, kus on tõenäoliselt korteriühistu eelarvest tulenevalt võetud vastu järgnevaid otsuseid: soojustatud on kõik hoone seinad; soojustatud on kõik seinad, v.a rõdude seinad; soojustatud on vaid korterelamu otsaseinad.

Tavapäraselt soojustatakse seinad EPSi või villa kihiga ning kaetakse krohviga. Tulenevalt sellest, et EPSi tuleundlikkuse klass on E, tuleb lahenduses arvestada ka tuletõkketsoonide loomisega fassaadil. Eelpoolkirjeldatud tööde hinnad ja soojustatud sinabetonpaneelide soojusläbivused (soojusläbivuste arvutamisel on lähtutud põhimõttest peatükis 2.7.) on toodud alljärgnevas tabelis (vaata Tabel 2). Leitud hinnad on toodud fassaadide soojustamise tegeleva ettevõtte juhi kogumuse põhjal ning kajastavad soojustamise materjalide ja paigalduse hetkehindasid arvestamata konkreetsete toodetega, samuti ei ole tabelis arvestatud käibemaksuga. Olenevalt krohvisüsteemist võib lahenduse maksumus, kas odavneda või kallineda u 3 euro võrra m² kohta. Täiendavalt lisandub hindadele tellingute maksumus, mis on u 6 eurot/m². Hindade määramisel on eeldatud, et tegemist on traditsioonilise 5-korruselise paneelkorterelamuga, kus soojustamine ja viimistlemine toimub sooja ajal. (Põldma 2018)

Kütmata pööningu põranda soojustamisel on hetkel enim kasutusel puistevillaga soojustamise lahendus. Käesolevas töös ei ole seda varianti kaalutud seetõttu, et hoonele sooviti pööningut, kuhu oleks võimalik paigaldada ventilatsioonitorusid, mis omakorda vajavad teenindamiseks ligipääsu (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018).

Tabel 2. Paneelelamute EPSi või villaga soojustamise soojuslähivused ja maksumused (Põldma 2018).

Lahenduse jrk nr	EPSiga soojustamine			Villaga soojustamine		
	Lahenduse kirjeldus	Soojuslähivus U, W/(m ² ·K)	Hind, eur/m ²	Lahenduse kirjeldus	Soojuslähivus U, W/(m ² ·K)	Hind, eur/m ²
1	Olemaolev seinapaneel 250 mm, R = 1,0 m ² ·K/W	0,257	53	Olemaolev seinapaneel 250 mm, R = 1,0 m ² ·K/W	0,257	57
	EPS 100 mm, λ = 0,037 W/(m·K)			Kivivill 100 mm, λ = 0,037 W/(m·K)		
	Krohv 10 mm, λ = 0,8 W/(m·K)			Krohv 10 mm, λ = 0,8 W/(m·K)		
2	Olemaolev seinapaneel 250 mm, R = 1,0 m ² ·K/W	0,191	55	Olemaolev seinapaneel 250 mm, R = 1,0 m ² ·K/W	0,191	60
	EPS 150 mm, λ = 0,037 W/(m·K)			Kivivill 150 mm, λ = 0,037 W/(m·K)		
	Krohv 10 mm, λ = 0,8 W/(m·K)			Krohv 10 mm, λ = 0,8 W/(m·K)		
3	Olemaolev seinapaneel 250 mm, R = 1,0 m ² ·K/W	0,152	57	Olemaolev seinapaneel 250 mm, R = 1,0 m ² ·K/W	0,152	63
	EPS 200 mm, λ = 0,037 W/(m·K)			Kivivill 200 mm, λ = 0,037 W/(m·K)		
	Krohv 10 mm, λ = 0,8 W/(m·K)			Krohv 10 mm, λ = 0,8 W/(m·K)		

1.1.5. Energiatõhususe nõuded korterelamutele

Hoonete energiatõhususe miinimumnõuded kehtivad nii elamutele kui ka mitteelamutele. Oluliselt rekonstrueeritavate korterelamute energiatõhususarv ei tohi olla suurem kui 180 kWh/(m²·a). Võrdlusena on uue korterelamu energiatõhususarvu lubatud maksimaalne väärtus olla 2018. aastal 150 kWh/(m²·a). Kusjuures esitab sama määrus ka nõuded elamute välispiiretele soojuslähivusele. Ettekirjutatud soojuslähivuste piirväärtused on järgnevad: väliseintel 0,12-0,22 W/(m²·K); katusel ja põrandal 0,1-0,15 W/(m²·K); akendel ja ustel 0,6-1,1 W/(m²·K). (MTMm nr 55 2015)

Olenevalt hoone kasutamise otstarbest saab jagada hooned vastavalt energiatõhususearvule (ETA) või kaalutud energiakasutusele (KEK) klassidesse. Klassid tähistatakse tähtedega A-H, kus A tähistab kõige energiatõhusamat klassi. Korterelamute energiatõhususe klassid vastavalt energiatõhususe arvule on välja toodud alljärgnevas tabelis (vaata Tabel 3). (MTMm nr 36, 2015, Lisa 3)

Tabel 3. Uute korterelamute energiatõhususklassid vastavalt energiatõhususe arvule või kaalutud energiakasutusele (MTMm nr 36, 2015, Lisa 3).

ETA või KEK, kWh/(m ² ·a)	Klass
ET või KEK ≤ 100	A
101 ≤ ET või KEK ≤ 120	B
121 ≤ ET või KEK ≤ 150	C
151 ≤ ET või KEK ≤ 180	D
181 ≤ ET või KEK ≤ 220	E
221 ≤ ET või KEK ≤ 280	F
281 ≤ ET või KEK ≤ 340	G
341 ≤ ET või KEK	H

Tabelist selgub, et oluliselt rekonstrueeritavad korterelamud peavad tulenevalt hoonete energiatõhususe miinimumnõuetele minimaalselt vastama energiatõhusarvult D klassi nõuetele. Kuid KredExi 40% toetuse saamiseks on vaja rekonstrueerida hoone C energiatõhususklassile nõuetele vastavalt.

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiivi 2010/31/EL mõjutustest tulenevalt peavad kõik sisekliima tagamisega hooned, mille ehitusluba väljastatakse või ehitusteatis esitatakse ja hoone püstitatakse hiljem kui 31.12.2020 vastama liginullenergiahoonele kehtestatud tingimustele. Sama direktiivi alusel peavad kõik avalikud hooned pärast 31.12.2018 vastama liginullenergiahoone nõuetele. (MTMm nr 55 2015, § 19) Selleks et korterelamu, mis rekonstrueeritakse pärast 31.12.2020, oleks energiatõhus, peab hoone koguennergianõudlus (kütmine, ventileerimine, jahutamine, vee soojendamine, valgustamine) tüüpilisel kasutamisel vastama A klassi energiatõhususarvule (Rs nr 1 2015, § 63). See tähendab ka seda, et kasutusele tuleb võtta vähemalt üks järgnevatest taastuenergia allikatest: päike, tuul, vesi, maa, prügimäegaas (MTMm nr 52, 2010).

EL hoonete energiatõhususe direktiiv on koostatud selleks, et vähendada energiatarbimist ja kasvuhooneheitegaase. Olulisemad eesmärgid, mida energiatõhususe direktiiv püüab täita 2020. aastaks on: viia Euroopa Liidu energiatarbimine 20% väiksemaks kasutades seejuures taastuvaid energiaallikaid; kasvuhoonegaaside heitekoguste vähendamine 20% alla 1990. aasta taseme ning hoida üleilmne temperatuuri tõus alla 2°C. Hoonete energiakulud moodustavad ulatuslikud 40% kogu liidu energiatarbimisest. Ehitussektori energiatarbimise üks võimalike lahendusi on energia tarbimine taastuenergiaallikatest. (Euroopa parlament ... 2010) CO₂ gaasi tekkimise põhjuseid otsides selgub, et 36% kogu Euroopa Liidus toodetava süsihappegaasi algallikas on hooned (Lattke et al. 2011).

Eelmises peatükis toodi välja kulutuste suurused, mida tuleb keskmiselt ruutmeetri kohta teha korterelamu rekonstrueerimisel madalenergiahooneks ning võrdlusena hind,

mida tuleb maksta vana korterelamu lammutamisel ja uue madalenergia korterelamu ehitamisel. Tulenevalt sellest, et alates aastast 2021 peavad kõik uued korterelamud vastama liginullenergiahoone nõuetele ja oluliselt rekonstrueeritavad korterelamud energiatõhususe D või KredExi 40% toetuse saamiseks C klassi piirväärtustele, suureneb tehtavate kulutuste vahe veelgi.

1.1.6. KredExi roll korterelamute rekonstrueerimises

KredEx SAlt on võimalik taotleda korterelamu rekonstrueerimiseks toetust. Toetuse suuruseks saab olla kas 15 %, 25 % või 40 % (Ida-Viru maakonnas 25 %, 35 % või 50%) kogu projekti maksumusest. Toetuse protsendiline suurus oleneb rekonstrueerimistöödele seatud eesmärkidest, olulisim neist on energiatõhususarv. 15% toetuse saamiseks peab rekonstrueeritud hoone energiatõhususarv vastama E klassi nõuetele, 25% toetuse saamiseks D klassi nõuetele ja 40% toetuse saamiseks C klassi nõuetele. Veel esitab KredEx nõuded rekonstrueeritava hoone ventilatsiooni õhuvahetuskordsusele, sisse- ja väljapuhke õhuvooluhulkadele, müratasemele, küttesüsteemile, välispiirete soojuslabilaskvusele, ventilatsiooniseadmetele ja sisekliimaklassile. (MTMm nr 23, § 13; KredEx SA)

KredExi majandusaasta aruannetest selgub, et rahuldatud rekonstrueerimise taotluste hulgas on kõige rohkem 40% toetuse saajaid. Toetustega püütakse rõhuda tervikrekonstrueerimise olulisusele, sest seeläbi väheneb energiatarbimine ning kasvuhoonegaaside kogus. Positiivse mõju avaldamine elukeskkonnale ja majandusele on KredExile oluline. (KredEx SA 2016; KredEx SA 2017)

KredExi hoonete energiatõhususe projektijuhi Kalle Kuuse sõnul on olulisim argument rekonstrueeritava korterelamu toetuse protsendi määramisel projekteeritud piirdetarindite soojuslähivuse väärtus (Kuusk 2018). Rekonstrueeritava hoone 40% toetuse saamiseks peab välisseinte soojuslähivus olema $U \leq 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, akendel $U \leq 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (kolmekordne klaaspakett) ja katusel $U \leq 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. (MTMm nr 23, § 13)

Tavapäraselt on enne korterelamute välistarindite soojustamist osade korterite aknad juba vahetatud. Kortерelamute rekonstrueerimise toetuse andmise tingimuste määruks on välja toodud, et KredExi 40% või 25% toetuse saamiseks ei pea neid aknaid asendama, mis on hiljuti tänapäevasemate vastu välja vahetatud. Seega eelnevalt kirjeldatu põhjal on leitud, et rekonstrueeritud korterelamu akende keskmine soojuslähivus jääb päriselt vahemikku $1,3\text{-}1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (Kuusk, Kalamees 2018).

1.2. Tervikrenoveerimine tehases valmistatud lisasoojustuselementidega

1.2.1. Tehases eeltoodetud lisasoojustuselement ja selle eelised

Tehases eeltoodetud lisasoojustuselementide kasutamine on innovaatiline rekonstrueerimislahendus, millega parandatakse hoone energiatõhusust, õhutihedust ja välisilmet. Lisasoojustuselement toodetakse sisemisest kuni välimise kihini tehases ning paigaldatakse valmistoote rekonstrueeritava hoone olemasolevale fassaadile. Sein lisasoojustuselement koosneb tavapäraselt paigaldamiseks vajaminevast puhverkihist, aurutõkkekihist, soojustusega karkassikihist, tuuletõkkekihist ning tuulutavast välisfassaadist. (Sandberg et al. 2016)

Puitraamidel lisasoojustuselemendid täiendavalt soojuslikele omadustele pakuvad lisavõimalusi. Näiteks on võimalik elementidesse integreerida järgnevaid tehnosüsteeme: ventilatsioonitorustikku, veetorustikku, soojus- ja niiskustagastiga ventilatsiooniseadmeid ning päikesepaneele (Borodinecs et al. 2017; Coydon et al. 2016). Samuti saab lisasoojustuselementidesse paigaldada tehases aknaid, mis lihtsustavad veelgi rekonstrueerimisprotsessi (Sandberg et al. 2016).

Lisasoojustuselementide fassaadikatte materjal valikul on hoone omanikul või arhitektil võimalik kaasa rääkida. Valikuvariante võivad mõjutada järgnevad asjaolud: tuleohutus, elementide maksimaalmõõt, elemendi kaal, hoone keerukus. (Gronhjort et al. 2009)

Järgnevalt on välja toodud puitraamidel tehases eeltoodetud seinaelementidega rekonstrueerimislahenduse valiku põhjendused:

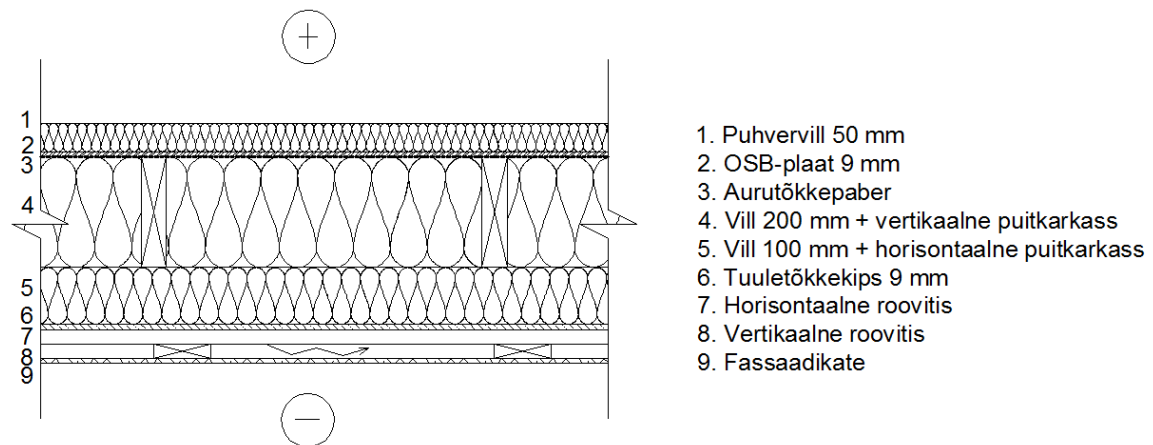
- Puitraamidel fassaadi lisasoojustuselemente on võimalik kinnitada nii puit-, betoon- kui ka telliskivifassaadide külge. (Sandberg et al. 2016)
- Kogu fassaadi rekonstrueerimine on objektile teostatav vaid mõne päevaga. (Veld 2015)
- Puidupõhiste elementide kasutamine on keskkonnasõbralik, sest on kasutatud taastuvaid ja CO₂ naturaalseid materjale. (Sandberg et al. 2016)
- Soojustuselementide tootmine tehases väheneb ehitusaegset ilmastikuriski ehitusobjektile. (Sandberg et al. 2016)
- Rekonstrueerimistöde käigus ei pea elanikud oma kodudest lahkuma. (Mjörnell 2016)

- Seinä lisasoojustuselemente kasutades on võimalik viimistleda hooneid erinevatest materjalidest plaatide, puidu, klaasi ja tellistega. (Mjörnell 2016)
- Rekonstrueerimise tulemusena väheneb hoone energiakulu talvel kütte ja suvel jahutuse arvelt. Samuti paraneb hoone õhupidavus. (Sandberg et al. 2016)
- Lisasoojustuselementidega on võimalik täielikult muuta hoone välisilmet ja mõõtmeid. (Sandberg et al. 2016)
- Tehases eeltoodetud elementidega on võimalik vähendada rekonstrueerimise käigus tekkivaid jäätmeid. (Vivian et al. 2006)
- Tehases eeltoodetud elemendid on kõrgekvaliteedilised. (Larsen et al. 2011)

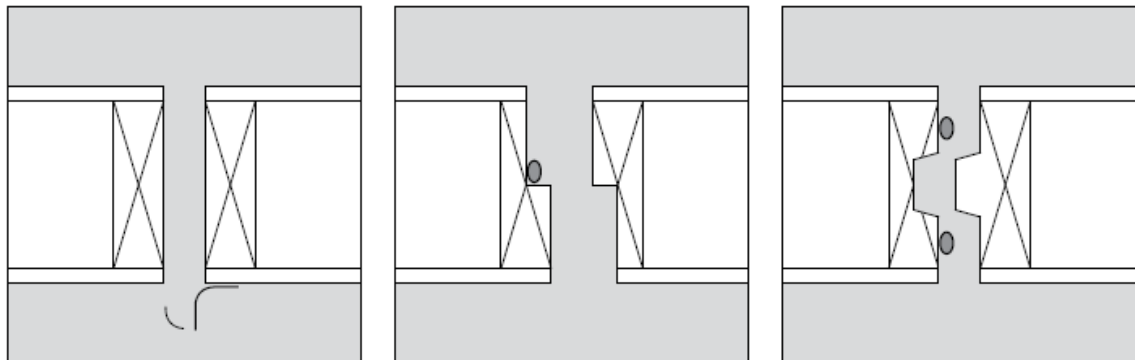
1.2.2. Mujal maailmas läbi viidud tervikrenoveerimise projektid lisasoojustuselementidega

Euroopas on aastate jooksul läbi viidud ja alustatud üsna mitmete tervikrekonstrueerimise uuringutega, mille kõigi eesmärk on olnud leida optimaalne ja kulutõhus viis peagi amortiseeruvate hoonete seisukorra parandamiseks. Projektide ühine joon on olud see, et on püütud leida lisasoojustuselemente, millega rekonstrueerides ei kannataks elanike mugavus ka ehitustöö ajal. Uuringute ühe tulemusena on jõutud järelduseni, et ei ole võimalik välja töötada ühtset lahendust, mis võiks toimida üle Euroopa, sest eri paikades on hoonete ehitamiseks kasutatud erinevaid materjale ning tehnoloogiaid, kliima on erinev, hoonete kultuuriline ja ajalooline taust on erinev ning ka ehituseeskirjad ja -meetodid erinevad riigiti. (Sandberg et al. 2016) Edasiselt on välja toodud projekte, mis on olnud seotud tervikrenoveerimislahenduste välja töötamisega ning nende tulemusi.

TES Energy Facade projektiga pandi rõhku fassaadielementide välja töötamisele, mis parandaksid piirdetarindite soojuserikadu, õhutihedust ja omaksid kõrget ehituskvaliteeti. Projektis kasutatud seinä lisasoojustuselemendi ristlõige on toodud järgneval joonisel (vaata Joonis 3). TES Energy Facade projektis kasutanud elemendi jäigastamiseks seespool paiknevat puitplaati. Joonis 4 toob välja projekti seinäelementide liitekohtade variandid. (Gronhjort et al. 2009)



Joonis 3. TES Energy Facade projekti seina lisasoojutuselemendi ristlõige (Gronhjort et al. 2009).

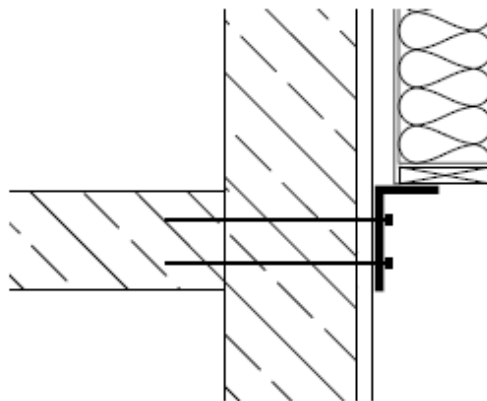


Joonis 4. TES Energy Facade projekti seinaelementide võimalikud liitekohad (Gronhjort et al. 2009).

TES Energy facade projekti põhjal on kirjutatud veel artikkel näiteks olemasoleva hoone andmete kogumisest. Artiklis tuuakse välja, et rekonstrueerimist tuleb alustada hoone hetkeolukorra ülesmõõdistamisest, sest see on ainus võimalus hästi istuvate elementide loomiseks. Üheselt mõistetava 3D mudeliga, mis täielikult sisaldab rekonstrueerimisele eelnevalt olukorda, on võimalik säästa 2% – 5% kogu projekti maksumusest. (Larsen et al. 2011)

TES Energy Facade põhjal kirjutatud kolmandas artiklis on välja toodud, et lisasoojustuselementide suuruse juures on oluline lähtuda objekti eripärast. Liiga suuri elemente kasutades võib tekkida oht, et elementide paigaldusaeg pikeneb sõlmliidete keerulisuse tõttu. Samuti toob artikkel välja, et lisasoojustuselemente tuleks valida sellepärast, et sinna saab integreerida elektri-, kütte- ja ventilatsioonisüsteeme. (Ott et al. 2010)

TES Energy Facade projekti kirjelduses on välja toodud kasutatud viis elementide toetamiseks, mis on toodud järgneval joonisel (vaata Joonis 5). (Lattke et al. 2011).



Joonis 5. TES Energy Facade seinaelementide toetamise viis (Lattke et al. 2011).

ECBCS Annex 50 projekti eesmärk oli välja töötada kõrgekvaliteetne ja kulutõhus rekonstrueerimislahendus. Tehases eeltoodetud lisasoojustuselementidega rekonstrueerimislahenduse eeliseks peeti järgnevat: terviklik lahendus, ei pea tegema tehnilisi kompromisse, vähe seotud ettevõtteid, hästi koordineeritud moodulid, lihtsam kvaliteedi tagamine ja kiire ehitusprotsess. (Zimmermann 2012; Zimmermann 2010) Pärast projekti lõppemist tehti mõningad järeldused (Zimmermann 2010):

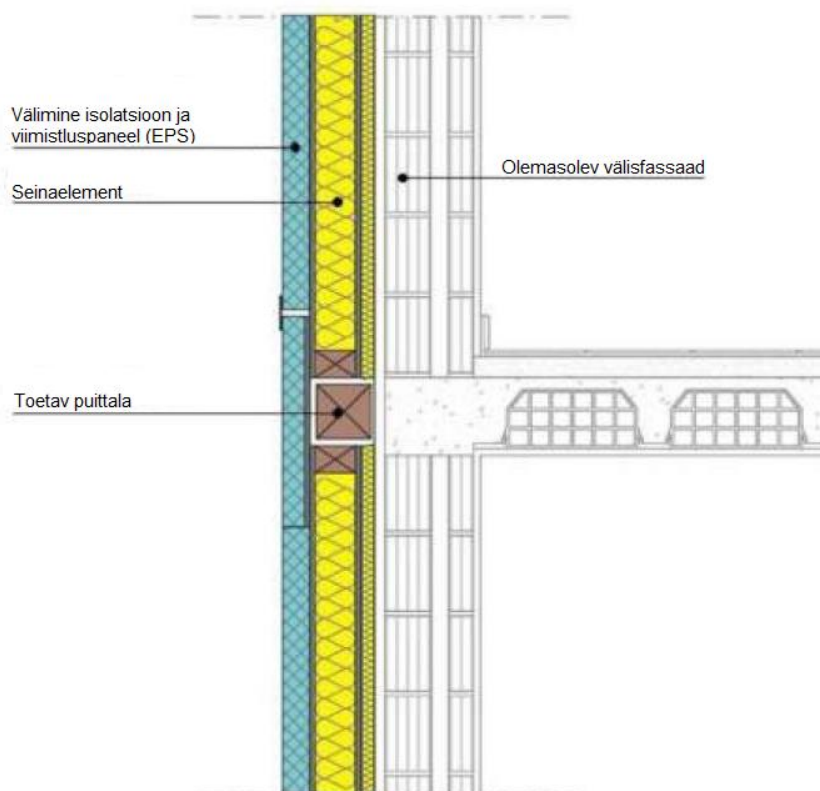
- Tehases eeltoodetud lisasoojustuselementid on sobilikud juhul, kui soovitakse uut arhitektuurset lahendust välispiiretele.
- Kui rekonstrueerimise käigus soovitakse vaid hoonet soojustada, siis ei ole tehases eeltoodetud lisasoojustuselementide kasutamine ökonoomne valik.
- Täielik tervikrenoveerimine maksab umbes 50-70% uue hoone maksumusest.
- Elementide tootmine ja tööde planeerimine on ajakulukad tööd, kuid see-eest lüheneb töö objektil tunduvalt lühemaks ja efektiivsemaks.
- Lisasoojustuselementidega on kõige parem rekonstrueerida lamedakatusega 3-5 korruselisi lihtsa planeeringuga hooneid.
- Suuremate elementide kasutamine on mõistlikum seetõttu, et selle võrra väheneb töö objektil. Kuid samal ajal muutub keerulisemaks elementide transport. Rekonstrueerimisel kasutati kohati väga suuri horisontaalseid elemente, mis katsid täies pikkuses nelja korruselise hoone otsaseina ühe korruse osa (vaata Joonis 6).
- Olemasolev hoone laserskaneerimise järel tuleb mudel puhastada üleliigsest infost.



Joonis 6. ECBCS Annex 50 Austria projekti seinaelemendid (Zimmermann 2010).

Artiklis, mis oli kirjutatud Rootsis läbi viidud tervikrenoveerimisprojektidest selgus, et suurim probleem on lisasoojustuselemente kasutades nende liitekohtades ning aekende ümbruses. Samuti tuuakse välja, et ka olemasoleva ülesmõõtmisega ja mudeli koostamisega on tekkinud sageli probleeme. Elementide kuju kohta öeldakse, et elemendid võivad olla kas vertikaalsed, horisontaalsed või vaid akna ümber. Samuti selgitab artikkel kaht võimalikku viisi elementide toetamiseks: igaüks eraldi välisseina külge või alumine maapinnale ning ülejäänud esimesepeale ning kinnitusega sein külge, mis võtab vastu vaid tuulekoormust. Kokkuvõtlikult tuuakse välja, et lisasoojustuselementidega rekonstrueerimine tuleb muuta majanduslikult konkurentsivõimeliseks enne kui nad suudavad võistelda tavapärase rekonstrueerimise viisiga. (Mjörnell 2016)

Itaalia elamute rekonstrueerimisvajadustele vastavalt on tegeletud Ri.Fa.Re. projekti arendamisega. Ka nemad eelistavad tehases eeltoodetud lisasoojustuselemente järgnevatel põhjustel: kergekaal ja võimalik kohandada Itaalia kliimale, odav ja massiliselt toodetav, kiiresti paigaldatav ning optimaalne tootmis- ja ehitusprotsess. Lahenduseks on valitud horisontaalsed kahekihilised elemendid, mille laius jääb vahemikku 1,2 - 12,0 m ja kõrgus 1,2 - 3,3 m, piirid seab transport. Elementide toetamiseks olemasolevale fassaadile on ette nähtud puittalad. Sein elemendi ristlõiget ja toetumist illustreerib järgnev joonis (vaata Joonis 7). Itaallaste lahenduse põhjal läbi viidud simulatsioonist selgub, et põhiline võit tehase toodangu kasutamises seisneb ajas ja ajakokkuhoiu kaudu ka rahas. Nimelt on välja toodud, et kirjeldatud ja tavapärase soojustamise ajakulu, olenevalt objekti suurusest, on 56 - 70% väiksem ning rahaline kokkuhoid on 12 - 28%. Väiksema objektiga võidetakse rohkem aega, kuid vähem raha ja suurema objektiga rohkem raha, kuid vähem aega. (Malacare et al. 2016)



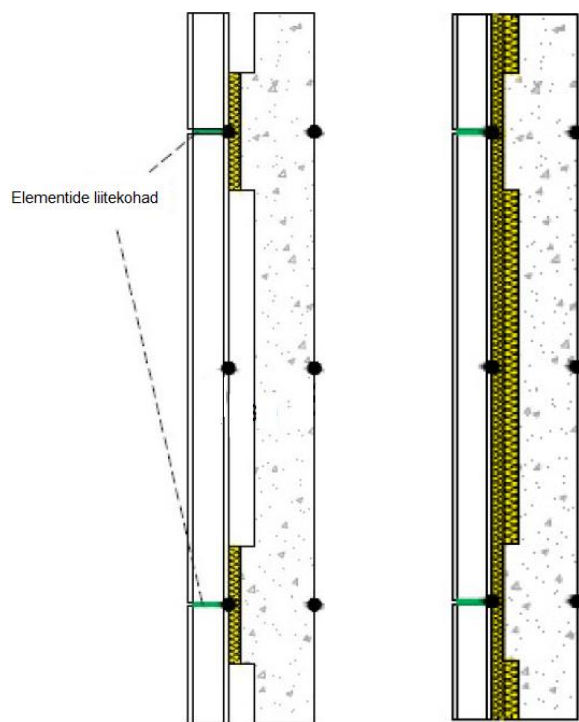
Joonis 7. Ri.Fa.Re. projekti seinalahendus (Malacare et al. 2016).

Lisasoojustuselementidega opereerides tuleb tähelepanu pöörata mõnele reeglile. Niiskuse mõju tuleb vältida kõigil kolmel töö etapil: tootmises, transportimise ajal ning paigalduse käigus. (Gronhjort et al. 2009)

Lisasoojustuselementide kasutamisel tervikrekonstrueerimisel on teinigi mõte, mida tuleks tähele panna. Lisasoojustuselementidega rekonstrueerimislahenduse välja töötamise ideeks on leida kuluoptimaalne lahendus. Üheks säästmise viisiks on maksimaalselt automatiseeritud tootmise kasutamine. (Sandberg et al. 2016, 10-11)

Uuritud on ka lisasoojustuselementidega rekonstrueeritud hoonete energiatõhususe paranemise peamisi põhjuseid ning leiti, et korterelamute suurim energiasääst on saavutatud akende välja vahetamisega tänapäevasemata vastu. Teisel kohal oli ventilatsioonisüsteemi asendamine soojustagastiga verisooni vastu ja alles kolmandal ja neljandal kohal olid vastavalt välisseinte ning pööningu/katuslae soojustamine. Viienda mõjutajana toodi välja õhutiheduse saavutamine ja kuuendana välisuste vahetamine. Kuigi oli öeldud, et piisava õhutiheduse saavutamise ja soojustagastiga ventilatsioonisüsteemi koostöötamisel on tulemus kaks korda efektiivsem. Samuti toodi välja, et kui soovitakse parimat lahendust, siis tuleb piirded igaljuhul soojustada ning õhutihedaks muuta. (Ruud et al. 2016)

Samuti on uuritud puhvervill paigutamise võimalusi. Ühe võimalusena kaaluti olukorda, kus puhvervill asub vaid elementide servas (vaata Joonis 8 vasak) ja teise võimalusena olukorda, kus element on tervenisti kaetud puhvervillaga (vaata Joonis 8 parem). Tulemustena leiti, et võimalust a võib kasutada vaid juhul kui elementide liited on täiesti õhukindlad. Kindlam on kasutada lahendust, kus terve element on kaetud puhvervillaga, mis raskendaks õhu liikumist puhvervilla kihis. (Maroy et al. 2017)



Joonis 8. Puhvervilla paigaldamise võimalused (Maroy et al. 2017).

Järgnevalt on välja toodud nimekiri projektidest ja nende eesmärkidest, mis on tegelenud tehases eeltoodetud elementidega tervikrekonstrueerimislahenduste kontseptsiooni välja töötamisega:

- E2ReBuild oli üleeuroopaline projekt, mis tegeles industrialiseeritud rekonstrueerimislahenduste välja töötamisega ning peamislikult keskendus hoonetele külma kliimaga paikades. (E2ReBuild; Sandberg et al. 2016)
- Retrokit projekti eesmärgiks oli arendada välja tehases eeltoodetud elemente, mis oleksid multifunktsionaalsed, odavad ning lihtsasti paigaldatavad. (RetroKit Projekt)
- MeeFs projekti suund oli arendada multifunktsionaalne ja energiatõhus fassaadisüsteem komposiitmaterjalist. (Sandberg et al. 2016; Multifunktional energy ...)

- EASEE projekti eesmärk oli tutvustada tehases eeltoodetud lisasoojustuselemente korterelamute elanikele hoonete jätkusuutlikumaks ja energiatõhusamaks muutmiseks. (Sandberg et al. 2016; EASEE Project)
- Susref projekt arendas üldiselt välispiirete renoveerimise kontseptsiooni ja tehnoloogiat. (Sandberg et al. 2016)
- Renobuild projekt töötas välja metoodika aitamaks kinnisvaraomanikel valida optimaalseim lahendus hoone rekonstrueerimiseks. Valiku tegemisel on abiks keskkondlike, majanduslike ja sotsiaalsete võimalused. (Sandberg et al. 2016)
- SQUARE töötas välja rekonstrueerimise kvaliteedi tagamise süsteemi. (Sandberg et al. 2016)
- BEEM-UP projekti eesmärk oli arendada ja tutvustada rekonstrueerimislahendust, mis on kulutõhus, vähendab energiatarbimist ja on kiiresti teostatav. (Sandberg et al. 2016)

1.3. Akadeemia tee 5a tervikrenoveerimine liginullenergiahooneks

1.3.1. Akadeemia tee 5a korterelamu osalemine H2020 projektis More-Connect

Akadeemia tee 5a korterelamu on üheks piloothooneks More-Connecti uurimisprojektis. More-Connect on omakorda üks osa Euroopa Liidu teadus- ja uuendustegevuse raamprojektist Horizon 2020, mis tegutseb aastatel 2014-2020. (European Commission; More-Connect)

More-Connecti uurimisprojekti täispikk inglise keelne nimi on „MORE-CONNECT: Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for modular retrofitting and smart connections“, mis eesti keeles tähendab: tehases eeltoodetud hoonete seinte ja katuste lisasoojustuselementide arendamist, multifunktsionaalseks muutmist, moderniseerimist ning läbimõeldud elementide tehnovõrkude ühenduslahenduste leidmist. Projekti olulisemad suunitlused elementide arendamisel on avaldada positiivset mõju kliimasoojenemise takistamisele, energiasäästule, esteetikale, unustamata seejuures ehitusfüüsika olulisust. Uurimisprojekti algatamise põhjuseks võib pidada seda, et Euroopa ehitussektor ei ole ühtne ning ei suudeta pakkuda terviklikke ning mõistliku hinna ja kvaliteedisuhtega

rekonstrueerimislahendusi, mis vastaksid liginullenergiahoone nõuetele. Samuti peetakse projektis oluliseks seda, et elamute omanikud leiaksid lahenduse oma hirmule rekonstrueerimisplaanist loobuda seetõttu, et rekonstrueerimine seni tuntud viisil kestab kaua ning tulemus ei pruugi vastata oodatustele. (Veld 2015)

More-Connecti projekti peamised eesmärgid on järgnevad (Veld 2015):

- Arendada välja kuluoptimaalne tervikrenoveerimise lahendus, mis vastaks liginullenergiahoone nõuetele. Leides seejuures parima tasakaalu energiatõhususe ja taastuvenergia lahenduste vahel.
- Töötada välja masstoodetavad elemendid nii katuste kui ka seinte rekonstrueerimiseks, mille valmistamise käigus on võimalus tarbijal oma soove esitada.
- Leida viis multifunktsionaalsete elementide mehhaniseeritud tootmiseks tehases.
- Teha hoone rekonstrueerimine tarnijale võimalikult mugavaks, kestes olenemata objekti omapärast vaid mõne päeva.

More-Connecti projekti piloothooned asuvad kuues riigis: Eestis, Lätis, Taanis, Hollandis, Tšehhis ja Portugalis. Kõikides nendes hoonetes leiti vastavalt riiklikele energiatõhususe arvutamise meetoditele energiatõhususearvutused ning tehti sisekliima uuringud. Seda tehti seepärast, et kliima, ehitustehnoloogia ja ligipääs taastuvatele energiaallikatele erineb riigiti. See on ka põhjuseks, miks valiti uurimisprojektis osalema objektid Euroopa eri paikadest. Eesti koos Lätiga esindab hooneid Balti- ja Ida-Euroopa riikides ning töötab just selle nimel, et nimetatud piirkondade vajadustele saaks arendatud parim võimalik lahendus hoonete tervikrenoveerimiseks liginullenergiahooneteks. (Kalamees et al. 2016)

1.3.2. Akadeemia tee 5a korterelamu olukord enne rekonstrueerimist

Tegemist on keldriga 5-korruselise suurpaneelilamuga, mis on ehitatud 1986. aastal ning hoone on analoogne teiste Nõukogude Liidus aastatel 1960-1990 ehitatud tüüpsete korterelamutega. Kogu oma kasutusoleku aja on hoone olnud Tallinna Tehnikaülikooli ühiselamu. (Kalamees et al. 2017)

Korterelamu välisseinteks oli 250 mm paksused raudbetoonpaneelid. Välisseina paneeli moodustasid väljast poolt sisse 60 mm paksune välisplaat, 70 mm TEP-plaat, 50 mm fenoplastplaat ja 70 mm kandev raudbetoonpaneel. Parapetiga lamekatus oli soojustatud TEP-plaadiga ning kaetud bituumenikihiga. Korterelamu välispiirete soojustäbivus jäi vahemikku 0,9-1,1 W/(m²·K). (Kalamees et al. 2017)

Hoones oli probleeme suurte külmasildadega. Kõige tõsisem oli olukord välisseina ja katuslae liitumiskohas, kus konstruktsiooni sisepinnal oli hallitus. Hallitus kasvas pinnal seetõttu, et sisepinna temperatuuri indeksi väärtus oli alla lubatu, $f_{Rsi} < 0,80$. Alljärgnevatel fotodel on näha külmasildasid ja hallituse tekkimist (vaata Joonis 9). (Kalamees et al. 2017)



Joonis 9. Ülemised fotod illustreerivad hallitust ning külmasilda lae ja välisseina kohtumiskohas. Alumistel fotodel on kujutatud seinapaneelide soojusläbivusi. (Kalamees et al. 2017)

Akadeemia tee 5a hoone murekohad oli sarnased teiste samal ajaperioodil ehitatud suurpaneelilamutega: suur energiakulu, ebapiisav ventilatsioon, talvine ülekütmine, kehv soojusmugavus ja termostaatideta ühetoruküttesüsteem. Elamu energiatarbimine oli 214 kWh/(m²·a), millest kütmiseks ja ventilatsiooniks kulus 149 kWh/(m²·a), vee soojendamiseks 30 kWh/(m²·a), seadmetele ja valgustusele 30 kWh/(m²·a) ning ventilaatoritele ja pumpadele 5 kWh/(m²·a). Selline tarbimine vastas III sisekliima kategooriale. (Kalamees et al. 2017)

1.3.3. Rekonstrueerimiseks kasutatud lahendused

Akadeemia tee 5a suurpaneelilamu rekonstrueerimisel liginullenergiahooneks kasutati järgnevaid lahendusi (Kalamees et al. 2017; Sirkel ja Mall OÜ 2016):

- Välisseinad soojustati tehases eeltoodetud puitraamidel lisasoojustus-elementidega, mille lõppviimistluseks on tsementkiud fassaadiplaadid. Elementide paksus jäi vahemikku 305-345 mm. Seinaelementide soojusläbivuseks saadi $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.
- Katuslagi soojustati tehases eeltoodetud puitraamidel lisasoojustus-elementidega. Katuseelementide paksus on 340 mm ning soojusläbivus $U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Katusekattematerjaliks on SBS.
- Sokkel soojustati 320 mm paksuse vahtpolüstüreeni kihiga $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ja maapinnas paiknevad keldri seinad 200 mm paksuse vahtpolüstüreeni kihiga $U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;
- Keldri põrand soojustati osaliselt 150 mm paksuse vahtpolüstüreeni kihiga $U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, soojustamata põranda $U = 0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.
- Keder muudeti köetavaks ruumiks.
- Seinaelementide vuugid tihendati villa ja vahuga, et saavutada võimalikult suurt õhutihedust.
- Vanad aknad vahetati välja uute vastu $U \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, keldriakendel $U \leq 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ning kõik aknad paigutati soojustusekihti.
- Ventilatsioonitööde vähendamiseks platsil paigaldati vertikaalsed ventilatsioonitorud tehases lisasoojustuselementidesse. Täiendavaks eeliseks antud lahenduse puhul oli see, et nii on võimalik ruumidesse puhuda eelsoojendatud õhku.
- Vana ühetoru küttesüsteem asendati kahetoru küttesüsteemiga ning vahetati välja radiaatorid ja lisati termostaadid.
- Võeti kasutusele soojustagastiga sissepuhke/väljatõmbe mehaaniline ventilatsioonisüsteem. Eksperimendi huvides teenindab poolt hoonet tsentraalne ventilatsiooniseade ja teisel pool hoones on igas korteris eraldi boksipõhine ventilatsiooniseade.
- Katusele paigaldati päikesekollektorid tarbevee soojendamiseks.
- Katusele paigaldati päikesepaneelid elektri tootmiseks.
- Kasutusele võeti reovee soojustagastusega lahendus. Seega soojusvahetis eraldatakse jääksoojust hallveest (köök, vann, dušš, pesumasin), millega omakorda soojendatakse tarbevett.

- Rekonstrueeriti veevarustuse ja kanalisatsiooni süsteemid.
- Külmasildade vähendamiseks ehitati kinni lodžad ning lisati pinnad eluruumide mahtu. Lodžade sugemisel kasutati samuti tehases valmistatud puitkarkassil elemente, millele lisati platsil kipsi aluskarkass ja 2 kihti kipsi.

Pärast kõikide eelpool nimetatud tööde lõppu vastavalt Akadeemia tee 5a rekonstrueerimise tööprojektile pikeneb suurpaneelelamu kasutusiga tunduvalt. Kandekonstruksioonidele garanteeritakse vastupidavust veel täiendavaks 50 aastaks ning katuse- ja fassaadikatte minimaalseks elueaks lubatakse 30 aastat. Lubatud kasutusea eelduseks on, et ehitusmaterjalide paigaldamisel on kasutatud õigeid võtteid ning pindasid ja süsteeme hooldatakse vastavalt juhenditele ning graafikutele terve ettenähtud kasutusea vältel. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

1.3.4. Rekonstrueeritud hoone tulemused

Rekonstrueerimise eesmärgiks oli ehitada tehniliselt mõistlik energiatõhus- ja taastuvenergiatehnoloogia lahendustega liginullenergiakorterelamu, mille sisekliima vastaks klassile II vastavalt standardile EVS-EN 15251:2007. Energiatarbimine pidi jääma alla 100 kWh/(m²·a). (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Tabelis on ära toodud rekonstrueeritud Akadeemia tee 5a korterelamu energiavajadused ja energiaallikad (vaata Tabel 4).

Tabel 4. Akadeemia tee 5a hoone energiavajadus ja energiaallikad (Kalamees et al. 2017, 5).

Tarbija	Energiavajadus		Hoones toodetav energia	
	küte, kWh/(m ² ·a)	elekter, kWh/(m ² ·a)	küte, kWh/(m ² ·a)	elekter, kWh/(m ² ·a)
Kütmine, ventilatsiooniõhu soojendamine koos soojustagastusega	16			
Vee soojendamine (tootmine: päikesekollektorid, hallveest soojuse tagastamine)	30		8+6	
Seadmed ja valgustus (tootmine: päikesepaneelid)		26		2
Ventilaatorid ja pumbad		8		
Kogu tarbitav energia	46	34	14	2
Kogu primaarenergia tarbimine (arvestatud kaalumisteguritega, elekter 2,0 ja kaugküte 0,9)	109		17	

Korterelamu kogu energiatarbimine arvutuste kohaselt on 109 kWh/(m²·a), kuid kui arvestada seda, et 17 kWh/(m²·a) energias toodetakse hoones lokaalselt, on tegemist liginullenergiakorterelamuga.

Akadeemia tee 5a korterelamule väljastati ka pärast rekonstrueerimist energiatõhususarvu arvutuste põhjal energiamärgis. Dokumendis on välja toodud, et hoone energiatarbimine on alla 100 kWh/(m²·a) ning, et hoone vastab liginullenergiahoone nõuetele. (Nordic Energy Solutions OÜ 2016)

Pärast tööde lõppu anti protsessile ja lõpptulemusele hinnang. Akadeemia tee 5a rekonstrueerimine liginullenergiahooneks tehases eelvalmistatud lisasoojustus-elementidega täitis oma eesmärgi olles pilootprojektiks oma valdkonnas. Kasutatud lahendustega saavutati liginullenergia hoone energiatõhususe arv. Kuid ka tõdeti, et protsessi käigus ilmnis ka mitmeid probleeme, mille tuvastamine oli omaette eesmärgiks. (Kalamees et al. 2017, 8)

1.4. Uurimistöö eesmärk

Uurimistöö eesmärk on analüüsida Akadeemia tee 5a tervikrenoveerimise käigus kasutatud lahendusi hoone soojustamiseks. Lähtudes sellest, et soojustamine pidi toimuma tehases eelvalmistatud puitraamidil lisasoojustuselementidega.

Uurimistöö toob välja elementide tootmise ja paigaldamise käigus ilmnenu takistusi ning probleeme ning püüab neid lahendada pakkudes välja uusi võimalusi ja lähenemise viise. Pöörates lisaks ehitusfüüsikalistele ja konstruktiivsetele küsimustele ka tähelepanu majanduslikkusele, ajafaktorile ja töökindlusele.

Lahenduste analüüsimise ja arengusuundade välja töötamise aluseks on 2017. aastal rekonstrueeritud Akadeemia tee 5a suurpaneelelamu, kuid eesmärgiks on leida soojustamise lahendus tehases eeltoodetud elementidega, mis sobib väikeste mööndustega kõigile rekonstrueerimist vajavatele paneelelamutele.

Näidisprojekt Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueeriti energiatõhususe klassi A ehk liginullenergiahoone vääriliselt. Sellest tulenevalt on uurimistöö teiseks eesmärgiks töötada välja lisasoojustuselementide ristlõiked hoone rekonstrueerimiseks energiatõhususe C klassi vääriliselt. Energiatõhususe C klassile vastava lahenduse välja töötamine on oluline seepärast, et enim KredExilt toetuse saanud korterelamuid rekonstrueeritakse vastavalt C klassi energiatõhususe nõuetele. Eesmärgiks on ka välja tuua C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide umbkaudsed maksumused.

2. Meetodid

2.1. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide lahendused, probleemid, analüüs ning arengusuundade leidmine

Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisel kasutatud lisasoojustuselementide kirjeldamiseks töötati läbi Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimisprojekt, rekonstrueerimise tellija jäädvustatud ehitusaegsed fotod ning osaleti Tallinna Tehnikaülikooli korraldatud koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“.

Rekonstrueerimise käigus tekkinud probleemide tuvastamiseks kohtuti Akadeemia tee 5a lisasoojustuselemente tootnud ja paigaldanud ettevõttega Matek AS ning tehti üleskirjutusi koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ teemadest, mis käsitlesid valminud Akadeemia tee 5a projekti. Samuti olid probleemide tuvastamisel abiks rekonstrueerimistöö tellija fotod ning kogu rekonstrueerimisprotsessi jäädvustanud *Time-lapse* fotod.

Lisasoojustuselementide arengusuundade leidmiseks ja analüüsimiseks koguti ideid koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ osalenud 60 ehitusspetsialistil või üldiselt ehitusega tegeleval inimesel. Osalenute ideede kogumiseks püstitati üldine küsimus – kuidas lahendada eelnevalt kursusel välja toodud Akadeemia tee 5a projekti käigus tekkinud probleeme. Mõtete kogumisele järgnes pakutud lahenduste süstematiseerimine ning korduvate ideede välja otsimine ja ebatõenäoliste lahenduste välja praakimine. Seejärel kohtuti ja vahetati elektronkirju võimalike ning tõenäolisemate lahenduste arendamissuundade leidmiseks projekteerijate ja juhtidega Welement ASist, Matek ASist ja Timbeco Woodhouse OÜst. Eelnevalt nimetatud spetsialistidel oli võimalus ka ise täiendavaid mõtteid pakkuda ning juba pakutud ideid välistada.

Arengusuundade välja töötamisel lähtuti ka tarindite ja tarinditeliitkohtade soojuslähivuste arvutustulemustest. Samuti uuriti interneti ja hinnapäringute abil arendusideede maksumusi, et saada aimu lahenduse kallinemise või odavnemise suundadest. Täiendavalt otsiti lisa arendamisideede toimivuse hindamiseks erialakirjandusest ning teadustöödest.

2.2. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide paigalduse analüüs

Lisasoojustuselementide paigaldusprotsessi analüüsimiseks ning ehitusetappide ajakulude määramiseks kasutati ehitusaegseid *Time-lapse* fotosid ja Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimisprojekti. Time-lapse fotode põhjal toodi välja häid otsuseid, mis tehti elementide paigaldamisel kui ka probleeme, mis ilmnesisid paigalduse käigus.

Paigaldusprotsess pildistati kahe kaameraga, mis paiknesid hoone kagu ja edela nurkades, jäädvustades seega elementide paigaldamist hoone tagumisel fassaadil ja kahel otsafassaadil (vaata Joonis 10). Hoonest tehti ajavahemikus 19.01.2017 – 20.10.2017 peaaegu 19 000 fotot, mille jäädvustamise intervall oli viis minutit. Tulenevalt sellest, et lõputöö teemaks on rekonstrueerimine lisasoojustuselementidega analüüsiti fotode põhjal vaid lisasoojustuselementide paigaldamisele eelnevaid töid ja elementide paigaldamist ajavahemikus 23.02.2017 – 21.08.2017. Töö kestuste leidmisel arvestati, et tööpäeva pikkuseks 9 tundi ning töönalal kestab 5 päeva. (*Time-lapse* fotod)



Joonis 10. Time-lapse fotod Akadeemia tee 5a korterelamust enne rekonstrueerimist edelasuunas (vasakul) ja kagusuunas (paremal) (*Time-lapse* fotod).

Elementide paigaldusaegade võrdlusel on lähtutud puitelemente tootva ettevõtte toodud paigaldusaegadest, mida nad ise arvestavad elementide paigalduseks. Eeldusel, et paigalduseks kasutatakse autokraanat arvestatakse seina lisasoojustuselementide paigalduse keskmiseks ajaks 45 minutit element ja katuse lisasoojustuselementide paigaldusel, et kulub ühe elemendi paigalduseks 25 minutit. (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

2.3. Akadeemia tee 5a seinä lisasoojustuselementide õhulekke katse

Seinä lisasoojustuselementide õhulekke mõõdistamise katse sisuks oli kontrollida elementide puhervilla seisukorda ja paigalduskvaliteeti. Katse tulemusena taheti teada, kas Akadeemia tee 5a lisasoojustuselemendid on olemasoleva betoonelemendi külge õhutihedalt kinnitatud. Katse ajendiks oli paigaldusprobleemide analüüsimisel ilmnenu oht, et puhervill võis elemendi paigaldamise ajal nihkuda soovimatult, või ei ole puhervill ühtlaselt vastu olemasolevat seinaelementi.

Katse läbiviimiseks valiti juhuslikult kuus korterit Akadeemia tee 5a ühiselamus. Katse esimese osana mõõdeti korterites temperatuur digitaalse termomeetri Greisner GTH 1170ga ning tehti väliseintest fotod, nii tavalise kaamera kui ka Flir infrapuna termomeeter kaameraga. Eelnevalt alarõhu tekitamisele kontrolliti üle, kas kõik aknad on suletud ning, kas õhk pääseb ruumidesse vaid talle mitteettenähtud kohtadest. Vajadusel suleti avad. Seejärel tekitati korteris Minneapolis BlowerDoor Model 4 seadmega ja rõhumõõduri DG-700 Pressure & Flow Gauge abil alarõhk (vaata Joonis 11). Alarõhu suurus oli 50 Pa. Pärast alarõhu tekkimist tehti välispiiretest uued pildid Flir infrapuna termomeeter kaameraga ning mõõdeti siseõhu temperatuur. Välitemperatuuride andmed saadi termomeetrilt Flir E320, mis paikneb statsionaarselt Akadeemia tee 5a korterelamus.

Katse tulemusi väljendasid Flir infrapuna kaameraga tehtud termograafilised fotod, millelt on võimalik pinnatemperatuuride järgi välja lugeda tavapärast suurema õhulekkega kohti.



Joonis 11. BlowerDoor seade korteri ukseavas (autori foto).

Termograafiliste fotode põhjal määrati ka sisepinna temperatuurindeksid olukorra kriitilisuse hindamiseks. Sisepindade temperatuurid määrati termograafiliste fotode servas asuvate temperatuuriskaalade abil visuaalsel vaatusel. Sisepinnatemperatuuri indeksite määramiseks valiti välja fotod, mis väljendasid tüüpseid kohti ning seejuures tõid välja kõige kehvemaid olukordi.

Juhuslikkuse põhjal valitud korterite numbrid, katse läbiviimise kuupäevad, siseruumide ja välisõhu temperatuurid on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 5).

Tabel 5. Korterite andmed, kus vaadeldi õhuleket.

Korteri nr	Katse läbiviimise kuupäev	Siseruumi temperatuur enne alarõhku, °C	Siseruumi temperatuur peale alarõhku θ_{int} , °C	Välisõhu temperatuur θ_e , °C
64	09.03.2018	23,4	23,3	0,3
69	09.03.2018	22,7	22,7	0,3
75	09.03.2018	22,2	22,2	0,6
14	22.03.2018	22,7	22,9	-1,6
20	22.03.2018	23,7	23,5	-1,6
29	22.03.2018	22,9	23,2	-1,8

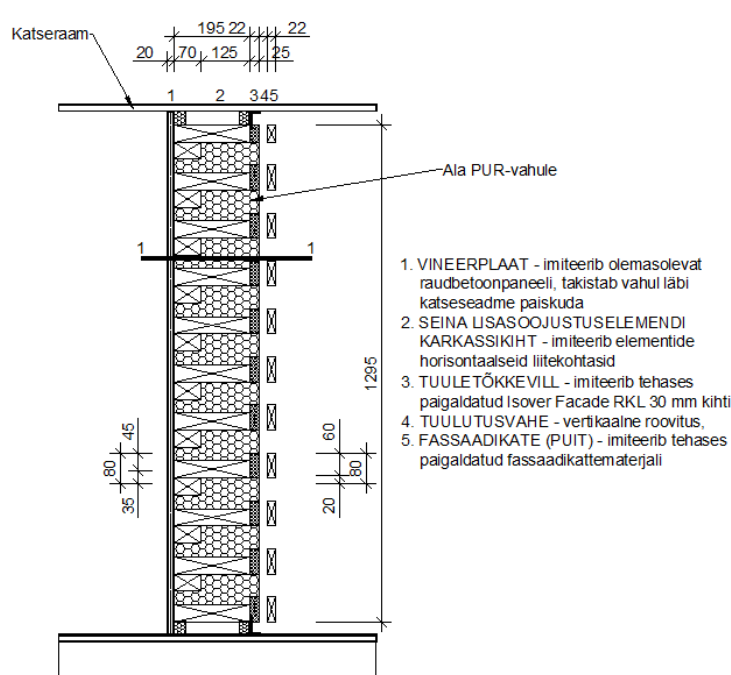
2.4. Katse seinä lisasoojustuselementide horisontaalvuukide täitmiseks PUR-vahuga

Ühe osana lõputööst viidi läbi katse, millega püüti leida alternatiivset viisi seinä elementide vaheliste vuukide täitmiseks. Katsetamiseks valiti avatud pooridega polüuretaanvaht H2Foam LITE PLUS, mille soojusjuhtivus on $\lambda = 0,0355 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Katse eesmärgiks oli teada saada, kas PUR vahtu on võimalik paigaldada seinä lisasoojustuselementide horisontaalsetesse vuukidesse raskendatud olukorras, kus fassaadikate on juba tehases eelnevalt maksimaalses ulatuses paigaldatud. Paigaldamise võimalikkuse hindamiseks vaadeldi seda, kas vuugid täituvad ühtlaselt, kas vaht pressib tuulutusvahesse, kas vaht määrib ära juba paigaldatud fassaadikatte ja lendudes lähiümbruskonna.

Katse läbiviimiseks ehitati katseseade, mis imiteeris Akadeemia tee 5a projektis kasutatud seinäelementide horisontaalvuuke (vaata Joonis 32). Võrreldavate tulemuste saamiseks paigaldati ka fassaadikate vuukide ümbruses ära viisil, et vuugi katmiseks oleks vaja Akadeemia tee näitel vaid vihmaveeplekk või üks puuduv fassaadilaud objektile paigaldada. Skeem katseseadmest ja foto on toodud järgneval joonisel (vaata Joonis 12).

Kohati kasutati katseseadme ehitamisel käepäraseid materjale, mis ei vasta üks-ühele Akadeemia tee 5a projektis toodule.



Joonis 12. Katseseadme skeem (vasakul) ja foto katseraamist (paremal) (autori foto).

Vahu paigaldamine katseseadmesse toimus kümne minuti jooksul, mille järel oli võimalik leida vastuseid uurimisküsimustele. H2Foam LITE PLUS vahtu paigaldasid katseseadmele asjatundjad, kelle igapäevase töö osaks on hoonete soojustamine PUR-vahtudega. Vuukide täitmine toimus kihiliselt ning kiirete vahtu pritsivate liigutuste abil. Tulenevalt horisontaalvuukide kõrgusest lasti vahtu vaid 5-10 cm kauguselt. Vahtu paigaldades pritsiti seda surve ja kiire joana.

2.5. C energiatõhususklassile vastava hoone lubatud soojuserikao leidmine

C energiatõhususklassile vastava hoone maksimaalse lubatud soojuserikao leidmise aluseks võeti Akadeemia tee 5a ühiselamu. Akadeemia tee 5a korterelamu energiatarbimine oli rekonstrueerimise järgselt $109 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, millest $17 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ energiat toodetakse hoones (vaata Tabel 4). Energiatarbimise leidmisel võeti arvesse kütmiseks, tarbevee soojendamiseks, seadmete töötamiseks, valgustamiseks, ruumide ventileerimiseks ja pumpade tööks kuluvat energiat. Eeldusel, et vaid küttekulu on

energiatõhususklassist ning kõik ülejäänud nimetatud tarbijad on võrdelised muuosas võrdväärtsetes hoones, leiti arvutustehete abil Akadeemia tee 5a korterelamu C energiatõhususklassile vastav kütteenergiavajadus (vaata Tabel 6).

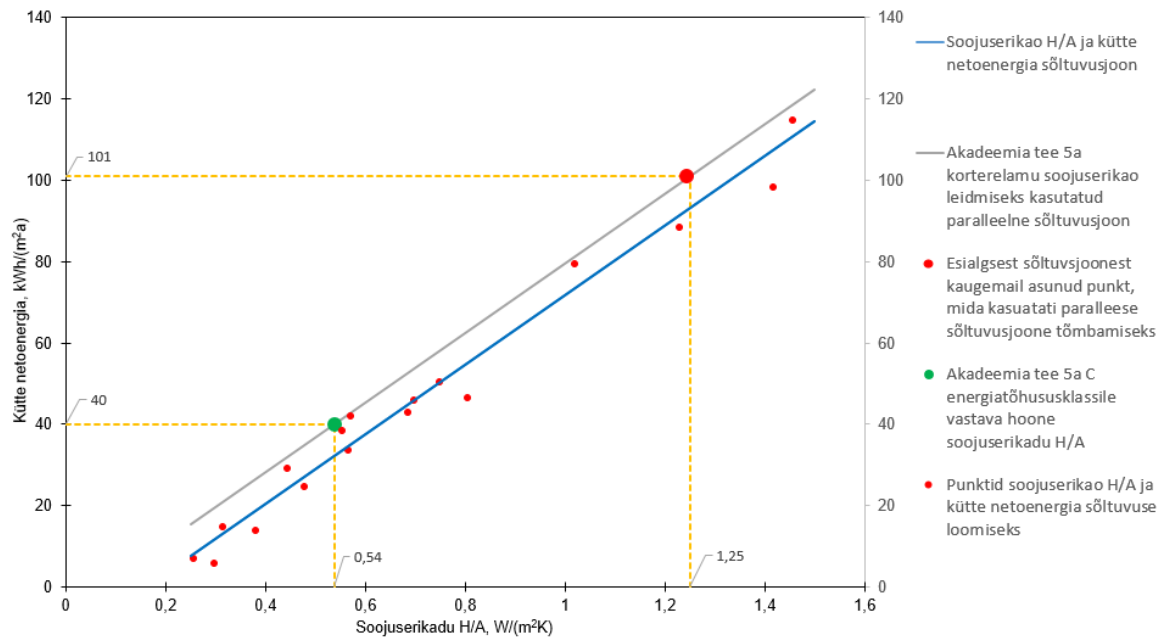
Järgneva tabeli esimeses osas on välja toodud A energiatõhususklassile (Kalamees et al. 2017, 5) vastava hoone energiatarbimine juhul, kui kõik hoones tarbitav energia oleks hoonesse tarnitud ning tabeli teises pooles on suurendatud kütteenergia tarbimist nii palju, et hoone energiatarbimine vastaks energiatõhususklassile C.

Tabel 6. Hoonesse tarnitava energia kogus.

Tarbija	Energiatõhususklass A				Energiatõhususklass C			
	energia vajadus, kWh/(m ² ·a)		kaalumis-tegur	tarnitava energia kogus, kWh/(m ² ·a)	energia vajadus, kWh/(m ² ·a)		kaalumis-tegur	tarnitava energia kogus, kWh/(m ² ·a)
	küte	elekter			küte	elekter		
Küte	16		0,9	14,4	40		0,9	36
Tarbevee soojendamine	44		0,9	39,6	44		0,9	39,6
Seadmed, valgustus		28	2	56		28	2	56
Ventileerimine, pumbad		8	2	16		8	2	16
	Kogu hoones tarnitav energia			126	Kogu hoones tarnitav energia			147,6

C energiatõhususklassile vastava hoone kütteenergia vajaduse väärtus valiti 40 kWh/(m²·a), sest sellisel juhul jääb kogu hoonesse tarnitava energia väärtus minimaalse varuga C energiatõhususklassi energiatarbimisele esitatud nõuete piiridesse.

Kütte netoenergiavajadus määrati selleks, et oleks võimalik leida hoone summaarset soojuserikadu H/A. Soojuserikao H/A leidmiseks kasutati kütte netoenergia ja soojuserikao sõltuvusgraafikut. Antud juhul on kasutatud Akadeemia tee 5a C energiatõhususklassile vastava soojuserikao määramisel kohandatud sõltuvust. Graafiku sõltuvust korrigeeriti seetõttu, et reaalne kogemus kortermajade rekonstrueerimise ja mõõtetulemuste analüüsimisega on näidanud, et hoone kütmiseks vajalik netoenergia kogus tulenevalt soojuserikaoast on olnud suurem, kui sõltuvus on lasknud uskuda (Hamburg 2018). Kütte netoenergia ja soojuserikao graafiku kohandamist väljendab uus hall lineaarne sõltuvusjoon, mis tõmmati sõltuvusjoonega paralleelselt läbi punkti, mis asus esialgsest trendjoonest kõige kaugemal. Järgnev graafik kujutab esialgset kui ka kohandatud sõltuvust ning kütte netoenergia järgi leitud soojuserikadu H/A (vaata Joonis 13).



Joonis 13. Soojuserikao H/A ja kütte netoenergia sõltuvus (Zelenski 2017).

Graafikul leiti, et C energiatõhususklassile vastava Akadeemia tee 5a korterelamu soojuserikadu koetava pinna kohta peab olema alla $0,54 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Pärast hoone lubatud soojuserikao leidmist oli võimalik valida tarindite ja soojuslähivused ning ristlõiked vastavalt sellele, et hoone summaarne soojuserikadu oli ette antud.

2.6. C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide ristlõigete valik

Lisasoojustuselementide ristlõigete valikul lähtuti Akadeemia tee 5a suurpaneelilamu lisasoojustuselementide ristlõigetest ning projektijärgsetest soojuslähivusest. Tulenevalt sellest, et Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide hoonet soojustades saavutati A energiatõhususklass usuti põhimõtet, et soojustuskihtide arvu ja paksuse vähendamisega muutub lisasoojustuselemendi soojuslähivuse väärtus suuremaks ning seega on võimalik saavutada kehvema soojuslähivusega elementidega C energiatõhususklass. Ühtlasi eeldati, et elemendi maksumus muutub soodsamaks kirjeldatud meetodil.

Ristlõigete valikult tuli tähele panna asjaolu, et tarindite rekonstrueeritud soojuslähivustele olid seatud 40% rekonstrueerimistoetuse saamiseks KredExi asi poolt

piirangud. Samuti jälgiti soojustuselementide valikul hoonele määratud maksimaalset soojuserikadu.

2.7. Soojuslähivuste, joonsoojuslähivuste ja õhulekke soojuskadude leidmine

Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide arengusuundade leidmisel kontrolliti võimalikke variante tarindilahenduste soojuslähivuste ja joonkülmasildade leidmisega.

C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselemente hinnati hoone summaarsele soojuserikaole H/A seatud piirangu kaudu. Summaarse soojuserikao leidmiseks oli vaja arvutada soojuskaod läbi hoone piirdetarindite, joonkülmasildade ja õhulekke.

Seina ja katuse lisasoojustuselementide soojuslähivuste leidmine

Tarindite soojuslähivuste arvutamisel lähtuti standardist EVS 908-1:2016. Lisasoojustuselementidega kaetud tarindite soojuslähivuste arvutamisel võeti arvesse kaht parandustegurit – õhupiludest tingitud parandust ja õhulähivusest tingitud parandust. Õhupiludest tingitud parandustegurina arvestati väärtust $\Delta U_g'' = 0,01 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ja õhulähivusest tingitud parandustegurina $\Delta U_a'' = 0,01 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Soojuslähivuste arvutamiseks kasutatud soojuserijuhtivused on toodud alljärgnevas tabelis (vaata Tabel 7).

Tabel 7. Kasutatud materjalide soojuseri juhtivused.

Materjal	Soojusjuhtivus λ , W/(m·K)	Soojustakistus R, (m ² ·K)/W
Avatäited	1,100	
Ehitusplaat	0,130	
EPS-plaat	0,037	
Krohvi	0,800	
Liivpinna	2,000	
Montaaži vaht Pudeeli Poroloon	0,034	
Olemasolev välispiire		1,0
OSB-plaat	0,130	
PIR-plaat	0,022	
Puhvervill Isover KT 37	0,037	
Puitmaterjal	0,130	
Raudbetoon	2,300	
Sammumüraplaat	0,037	
Soojustusvill Isover KL 35	0,035	
Tavaline kipsplaat	0,250	
TEP-plaat	0,130	
Tihendusvill Isover SK-C	0,039	
Tuuletõke Isover RKL 31 Facade	0,031	
Tuuletõkkekips	0,250	

C energiatõhususklassile vastava hoone piirdetarindite soojuslähivuse arvutamine

C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide välja töötamisel arvutati välja terve hoone summaarne soojuskadu, mille eelduseks oli kõikide piirdetarindite soojuslähivuste leidmine ja tarindite pindalade mõõtmine. Tarindite pindalade leidmiseks kasutati Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimise ehitusprojekti.

Avatäidete soojuslähivusena kasutati väärtust 1,1 W/(m²·K), sest KredExi 40% toetuse saamise nõuetes on välja toodud, et kõikide rekonstrueerimise käigus välja vahetatavate avatäidete soojuslähivus ei tohi ületada toodud väärtust. Tulenevalt sellest, et aknad on seinaelementidesse integreeritud vahetatakse lisasoojustuselementidega rekonstrueerides kõik aknad välja.

Seina ja katuse soojuslähivuste leidmisel kasutati eelpool nimetatud standardit ja parandustegureid. Pööningu puhul arvestati ruumi seinapiirete pindala arvestusega, et ruum on köetav. Katuse soojuslähivuse arvutamisel liideti olemasoleva katuse ja lisasoojustuselementide soojuslähivused. Soojuslähivuste arvutamisel lähtuti samuti tabelist 7.

Hoone põranda soojuslähivuse arvutamine teostati vastavalt standardile EVS-EN ISO 13370:2017 ja tabelis 7 toodud soojuseri juhtivustest. Hoone kelder arvestati kütmata

pinnana seepärast, et tänapäeval ei rekonstrueerita Eestis KredExi toetusel suurpaneel lamuid nii, et keldrist saaks köetav pind (Kuusk 2018). Kütmata keldrilae soojustlabilivus leiti jrgnevatel eeldustel. Pinnaspõrandal on 100 mm paksune raudbetoonplaat, mis asub liivapinnasel. Keldri kõrgus on 2,50 m, millest 0,95 m asub maapinnast kõrgemal ja 1,55 m maapinnast madalamal. Keldriseinad moodustab seest välja 200 mm paksune betoonelement, vööphüdroisolatsioon, 20 mm paksune liimi ja tolerantssikiht, millele on kinnitatud 150 mm EPS200 soojustuhtivusega ning 10 mm paksune krohvikihht. Keldri ja köetud ruumide vahelise põranda moodustab 100 mm paksune raudbetoonpaneel, 30 mm sammumüra isolatsioon ja 25 mm ehitusplaat, millel asub põrandaviimistlus. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Piirdetarindite liitekohtade joonsoojustlabilivuste arväärtuste leidmine

Piirdetarindite liitekohtade joonsoojustlabilivuste leidmine toimus vatsavalt standardis EVS-EN ISO 10211:2017 esitatud põhimõtetele. Joonsoojustlabilivuste arvutamiseks kasutati temperatuurivälja tarkvara THERM 7.3. Joonsoojustlabilivuste leidmiseks arvestati liituvate tarindite materjalide omadusi ning omavahelist paiknemist ning mõõdeti Akadeemia tee 5a ehitusprojekstist tarindite liitekohtade pikkused. Arvutuste eelduseks oli ka see, et programmis määrati materjalidele soojustlabilivused vastavalt tabelile 7. Samuti määrati tarindite sise- ja välispindadele temperatuurid ning soojustakistused. Pindade soojustakistused määrati vastavalt standardile EVS 908-1:2016. Sisepinna temperatuurina kasutati väärtust 15°C ja välispinna temperatuurina väärtust -21°C.

C energiatõhususklassile vastava hoone külmasildade leidmisel valiti välja üks seina lisasoostuselementide ja üks katuse lisasoostuselementide lahendus, mille abil arvutati välja terve hoone külmasillad. Arvutamiseks valiti elementide ristlõiked, mille soojustlabilivused olid kõige kehvemad, sest eesmärk oli leida elementide ristlõigete variante, mille kasutamisel hoone energiatõhususarvu klass ei ole igal juhul suurem kui C.

Sisepinna temperatuuriindeksite leidmine

Üheselt joonsoojustlabilivuste arvutamisega leiti arvutustarkvara THERM 7.3 abil sisepinna temperatuuriindeksid (f_{Rsi}). Sisepinna temperatuuriindeksite leidmine toimus standardi EVS-EN ISO 10211:2017 abil. Temperatuuriindeksite määramise eesmärk oli teha kindlaks, kas tarindite liitekohast on hallituse tekkerisk. Selleks, et hallituse tekkimine oleks välistatud lähtuti lubatud minimaalsetest sisepinna temperatuuriindeksitest. Aknaklaaside ja -raamide puhul ei tohi f_{Rsi} ületada väärtust 0,7 ning ülejäänud külmasildade puhul, nagu nt läbiviikude ja nurkade puhul väärtust 0,8 (Hoonete sisekliima ... 2015).

Soojuskadude leidmine läbi õhulekete

Õhulekke leidmisel lähtuti standarditest EVS-EN ISO 13789:2017 ja ISO-EN 13370:2017 ning määrusest „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“. Samuti kasutati õhulekke arvutamisel algandmeid Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimisprojektist. Õhulekete leidmisel arvestati korruselisuse teguriga 15, õhulekke baasväärtusega $3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$, õhu soojuserimahtuvusega $c_p = 1\,008 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ning õhu tihedusega $\rho = 1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Hoone välispiirete summaarse soojuserikao leidmine köetava pinna kohta

Hoone välispiirete summaarse soojuserikao leidmiseks köetava pinna kohta liideti piirdetarindite, külmasildade ja hoone õhulekke soojuskadu ning jagati see köetavapinna ruutmeetritega. Viie korruse köetav pind leiti Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisprojektist.

Tarindite soojuserikadude leidmisel lähtuti A. Hamburgi (s.a.) koostatud õppematerjalist „Eluhoonete lihtsustatud energiatõhususe tõestamine ja kütte netoenergiakulu leidmine kraadpäeva järgi“. Hoone välispiirete summaarse soojuserikao leidmisel köetava pinna kohta lähtuti põhimõtetest G. Eisbergi (2016) koostatud lõputööst „Üksikelamu projekteerimine ja eelarvestamine energiaklassi A või C valikuks“.

2.8. Hoone energiatõhususklassi leidmine

Hoone energiatõhususklassi määramisele eelnes kütte netoenergiakulu ja kogu hoonesse tarnitava energia leidmine.

Akadeemia tee 5a korterelamu kütte netoenergiakulu leiti vastavalt hoone summaarsele soojuserikaole. Kütte netoenergiakulu määramiseks kasutati soojuserikao H/A ja kütte netoenergia sõltuvusgraafikut (vaata Joonis 13). Kogu hoonesse tarnitava energiakulu leidmiseks liideti graafiku abil leitud kütte netoenergiakulu ning Akadeemia tee 5a energiatarbimine, mis ei olenenud hoone energiatõhususklassist (vaata Tabel 6). Tulemuste leidmisel võeti arvesse kaalumistegureid. Hoone energiatõhususklass piiritleti vastavalt hoonesse tarnitava energiakulule energiatõhususklassidele seatud piirangute järgi (vaata Tabel 3).

2.9. C energiatõhususklassile vastavate elementide sobivuse hindamine

C energiatõhususklassile vastavate lisasoojustuselementide sobilikkust Akadeemia tee 5a objekti rekonstrueerimiseks hinnati kogu hoone energiatarbimise leidmisega.

Kogu hoone energiatarbimine arvutati välja eelmistes peatükis selgitatud põhimõttel – kütte netoenergia tarbimine leiti kasutades kõige kehvema soojuslähivusega katuse ja sein lisasoojustuselementide ristlõikeid. Tulenevalt sellest, et joonsoojuslähivustest tingitud soojuskadu mõjutab tunduvalt vähem hoone energiatõhususklassi kui piirdetarind, arvutati Akadeemia tee 5a korterelamusse tarnitava energia kogused välja kõikidele lisasoojustuselementide variantidele jättes joonkülmasildade väärtused üle arvutamata. Seega kõikide lisasoojustuselementide variantide koguenergiatarbimistes on arvestatud iga variandi individuaalset piirdetarindite soojuserikadu, õiget õhulekkest tingitud soojuserikadu ning kõige kehvamate soojuslähivustega elementide järgi leitud külmasildadest põhjustatud soojuserikadu.

2.10. Lisasoojustuselementide maksumuste leidmine

Hinnapäringute küsimine

Lisasoojustuselementide maksumuste määramiseks pöörduti puitelemente tootvate ja ehitusmaterjalide hulgimüügiga tegelevate ettevõtete poole. Pöördumise sisuna sooviti saada hinnainfot elementide valmistamise, elementide paigaldamise, ehitusmaterjalide, elementide kinnitustetailide ja nende paigalduse ning elementide vaheliste vuukide täitmise kohta. Teise eesmärgina uuriti hinnapäringus võimalusi küsitud lahenduste lihtsustamiseks ning soodsamaks muutmiseks.

Hinnapäringu küsimusel toodi välja sein ja katuse lisasoojustuselementide ristlõiked koos lubatud maksimaalsete soojuslähivustega. Lisasoojustuselementide ristlõiked on toodud peatükkides (vaata 3.5.). Hinnapäringus oli välja toodud ehitusmaterjalid, kuid hinnapakumise koostamisel oli ettevõtetal vaba voli asendada materjale samaväärsete vastu. Hinnapakumise koostamisel ei pidanud arvestama maksumusse ventilatsioonitorusid ega ka aknad, kuid tuli arvestada sellega, et nimetatud paigaldamine on elementi võimalik.

Elementide paigaldamise kohta oli hinnapäringus toodud, et seinaelementide kaks toestamise võimalust, millele mõlemale sooviti umbkaudset maksumust. Katuse

elementide toestamise juures oli ära kirjeldatud elementide tulevane asukoht ning madala pööning tekkimise soov.

Soodsaima fassaadikatte otsingul paluti ettevõttele välja tuua võimalik variante, millega on võimalik tuulutatavat fassaadi luua.

Hinnapäringute – ja pakkuste edastamine toimus e-kirjade abil, mida toetasid kohtumised ja telefonikõned. Esmastele pakkumistele järgnes täpsustamine ning lisaküsimuste küsimine, sooviga jõuda üheselt mõistetavate maksumuste ning tulemusteni, mida oleks võimalik erifirmade puhul kõrvutada.

Samuti uuriti hinnapäringutele järgnevate vestlustega ettevõtete nägemusi ja soovitusi elementide arendamiseks.

Lisasoojustuselementide maksumus määramine

Lisasoojustuselementide maksumuse määramisel sooviti välja tuua lahenduste maksumusi, mis sisaldaks võimalikult palju – elemente, paigaldust, toetust, liitekohtasid ja viimistlust. Seetõttu kasutati mõningasel juhul terviklahenduste maksumuste määramisel hindasid, mis ei pruukinud olla vaid ühe ettevõtte koostatud.

3. Tulemused

3.1. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide valmistamise protsessi analüüs

Akadeemia tee 5a suurpaneel korterelamu rekonstrueerimine toimus Matek ASi tehases toodetud lisasoojustuselementidega. Seinaelemendi kõik kihid (k.a fassaadikate) paigaldati elemendile tehases, katuseelemendi puhul jäeti objektile paigaldada vaid teine kiht SBS-katet. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Seina lisasoojustuselementide kihtide kirjeldus on toodud peatükis 3.3.2.1. ja katuse kihtide kirjeldus peatükis 3.3.5.1. Esimese tööna lõigati elemendi puitmaterjal mootorseaga õigesse mõõtu. Mõningatel juhtudel kasutatakse üldiselt puitelemente tootvates ettevõtetes puidu lõikamiseks CNC-puidutöötlemiskeskusi, mis küll nõuavad puidu töötlemiseks täpseid digifaile, kuid see-eest on materjali lõiketäpsus suurem ning elementide omavaheline ideaalne sobivus suurema tõenäosusega tagatud (Welement AS projekteerija 2018).

Elementide valmistamine toimus spetsiaalsetel montaažilaudadel, mis võimaldasid elemente horisontaalasendist vertikaalsesse pöörata. Sarnast lahendust kasutavad ka teised Eesti puitelemente tootvad ettevõtted (Welement AS projekteerija 2018).

Villakihtide, tuuletõkke, aurutõkke, roovituse, fassaadikatte kihtide paika tõstmine kui ka kinnitamine toimus käsitsi (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018). Tootmise hinda ja ajakulu on võimalik vähendada automatiseeritud kihtide kinnitamislahenduste kasutamisel. Näiteks on võimalik tootmises kasutada masinaid, mis naelutavad vastavalt programmile. (Welement AS projekteerija 2018)

Elementide transportimiseks pakendati iga lisasoojustuselement eraldi kilesse, mis eemaldati vahetult enne elemendi paika tõstmist objektile. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

3.2. Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide paigaldusprotsessi analüüs ning ehitustööde kestuste leidmine

Esimeseks lisasoojustuselementide paigaldamisele eelnevaks tööks platsil oli olemasoleva fassaadi välimise kihi kinnitamine kandva konstruktsiooni külge. Kinnitamiseks kasutati diagonaalsi paigaldatavaid ankruid (vaata lähemalt peatükist 3.3.3.1.). Fotode põhjal selgus, et üks tööline suudab paigaldada tunni aja jooksul keskmiselt 12 fassaadiankrut. Arvestades seda, et kokku oli vaja paigalda 320 ankrut siis selle töö tegemiseks pausideta kulus 3 tööpäeva. (*Time-lapse* fotod; Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Teine oluline töö enne lisasoojustuselementide saabumist oli katuse lisasoojustuselementide toetuskarkassi ehitamine. Lisasoojustuselemente kandva puidust toolvärgi ehitus toimus täies mahus kohapeal platsile saabunud saematerjalist. Kandva konstruktsiooni süsteemi ehitus võttis aega peaaegu ühe kuu ning selle ehitusega tegeles korraga 4 – 7 töölisi. Fotodelt võib täheldada, et puitkonstruktsiooni katmine kiledega toimus alles pärast kõikide puitfermide paigaldamist. Ehitustööd toimusid märtsis-aprillis, mis on küll ühed sademete vaesemad kuud Eestis, kuid sellegi poolest on igapäevane oht lumele, vihmale (Sepp 2015). Fotodel ei ole jäädvustunud ühtegi toolvärgi paigaldusaegset lume- ega ka vihmasadu, kuid toolvärgi ehitusperioodi vältel on näha, et hoone katusele on sadanud lund või on maapind ümber korterelamu märg. Täiendavalt on jäädvustusel näha seda, et puittalastikku kaitsma pidanud kiled ei ole parimal võimalikul viisil paigaldatud, ülekatete puudumise ja mitte servani ulatuva kile tõttu märgus olemasolev katus ning seetõttu ka tõenäoliselt uus paigaldatud puitkonstruktsioon. Vihma kätte jäänud puitmaterjali niiskussisaldus muutub, mille tulemusel võib puit hakata mädanema või hallitama (Kull 2014). (*Time-lapse* fotod)

Fassaadielementide kinnitamiseks ja toestamiseks kasutati kinnituskronsteine. Kinnituskronsteinide kohad olid määratud olemasolevate seinapaneelide nurkadesse. Raudbetoon seinapaneelide nurkades oli rohkem armatuuri kui ülejäänus seinapaneeli pinnas (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018). Tulenevalt suurest armatuurisisaldusest oli kinnituskronsteinide kinnitamine elementide nurka raskendatud. Esimeste kinnitusdetailide kinnitamine võttis aega 20 – 30 minutit. Pärast mõningase kogemuse saamist kulus ühe kinnituskronsteini paigaldamiseks u 10 minutit. Päev pärast kinnitusdetailide paigaldamist tugevdati ühendused üle, sest pärast pingete hajumist oli võimalik kinnitusmutreid kõvemini kinni keerata. Selle töö põhiline ajakulu seisnes selles,

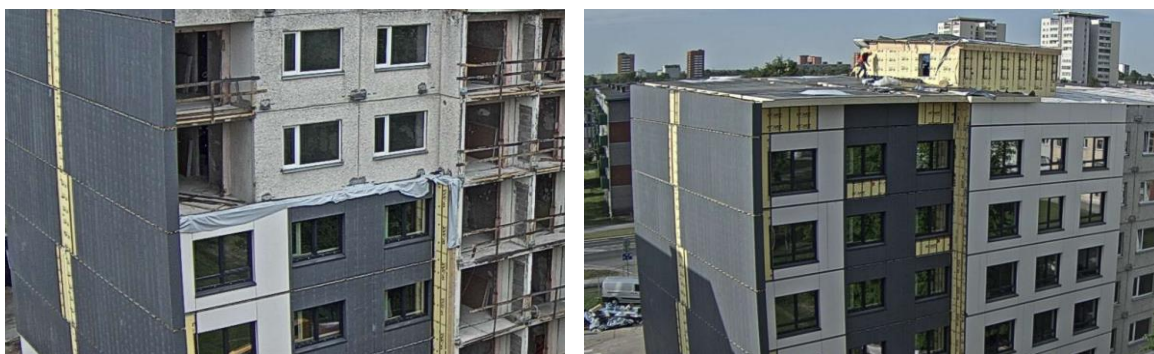
et iga kinnituskronsteini juurde oli vaja eraldi korvtõstukiga läheneda. Kui arvestada, et fassaadile kinnitati kokku 366 kinnituskronsteini (Sirkel ja Mall OÜ 2016), siis ainuüksi kronsteinide kinnitamiseks kulus u 75 tundi tööd, millele lisandus üle kontrollimisele kuluv aeg ning aeg tõstukiga iga kronsteini juurde jõudmiseks. (*Time-lapse* fotod)

Akadeemia tee 5a lisasoojustuselementide paika tõstmine toimus ajavahemikul 25.05.2017 – 21.06.2017. Töö teostati kahe paigaldustiimiga, kes töötasid objektile paralleelselt. (*Time-lapse* fotod)

Seinaelementide paigaldamiseks oli vaja autokraanat ja kaht korvtõstukit. Autokraana ülesandeks oli fassaadielementide transportimine platsile ja paika tõstmine. Korvtõstukite abil kinnitasid töömehed elemendid fassaadile. Ühe tööpäeva jooksul suudeti maksimaalselt ühe brigaadiga paika tõsta 10 fassaadielementi, kuid mõnel päeval vaid 2. Fotode põhjal võib väita, et keskmiselt paigaldati 5 seinasoojustuselementi päeva jooksul ühe paigaldustiimiga. Ühe seinaelemendi kinnitamiseks kuluv keskmine aeg oli 50 minutit (arvestatud on aega elemendi õhku tõstmisest kuni elemendi lahti haakimiseni kraana küljest ning puhvervilla vabastamiseks kuluvat aega). Kohati oli juhuseid, kus paigaldusaeg võis olla 2 tundi. Pikema ajakulu põhjuseks oli see et, kui esimese korraga elemendi rihtimine ei õnnestunud ja seinaelement oli vaja uuesti õhku tõsta. Eelnevalt seinaelementide paika tõstmisele lasti alumise elemendi ülemise olemasoleva seinatarindi poolsesse serva montaaživahtu, mille ülesandeks oli täita puhvervilla puudujääke (vaata Joonis 32) (Sirkel ja Mall OÜ 2016). (*Time-lapse* fotod)

Põhjuseks, miks suudeti elemente päeva jooksul nii vähe paigaldada hoolimata kiiremast kinnitamise ajast oli, see et tihti seisis autokraana tegevuseta. Peamist tegevusetaoleku aja põhjust ei olnud jäädvustatud fotode põhjal võimalik tuvastada. Kuid saab tuua välja asjaolu, mille taha paigaldusetempo kindlasti ei jäänud. Nimelt ei põhjustanud seisakuid lisasoojustuselementide ebapiisav objektile saabumisgraafik. Ajal kui paigaldust ei toimunud seisis kiletatud lisasoojustuselemendid kraana kõrval tõstevalmis. (*Time-lapse* fotod)

Seinaelementide paigaldamise käigus oli näha, et vihma eest kaitsemisele oli nüüd pööratud rohkem tähelepanu. Tööpäeva lõpus kaeti elementide pealsed kiledega (vaata Joonis 14 vasak). Lisaks lähtuti paigaldamisel sellest, et pärast ühe püstaku seinaelementide paigaldamist on oluline võimalusel paika tõsta ka katuseelement (vaata Joonis 14 parem). Kolmanda positiivse asjaoluna on võimalik fotodest välja tuua, et pärast olemasoleva fassaadi märgumist ei kaetud seda koheselt lisasoojustuselementidega, vaid anti aega vihmavee väljakuivamiseks (vaata Joonis 15). Väljakuivamise ajaks jäeti peaaegu 5 päeva, ehitusprojekti järgselt tuli oodata vähemalt 3 päeva (Sirkel ja Mall OÜ 2016). (*Time-lapse* fotod)



Joonis 14. Fassaadielementide katmine tööpäevalõpus (vasakul) ja katuseelementide paigaldamine pärast seinaelemente (paremal) (*Time-lapse* fotod).



Joonis 15. Fassaadi märgumine vihmaveega (*Time-lapse* fotod).

Katuseelementide paigaldamiseks piisas autokraanast ja kolmest katusel seisvast töömehest. Katuseelementide paika tõstmine oli tunduvalt kiirem töö. Katuse lisasoojustuselementide keskmiseks paika tõstmiseks kuluvaks ajaks oli 15 – 20 minutit ning ühe päeva jooksul tõsteti paika kuni 10 elementi. Fotodelt võib märgata, et katuse elementide omavahelised vuugid ei viimistleta kohe pärast elementide paika panemist ning samuti jäetakse vuugid katmata ajutiste kiledega. (*Time-lapse* fotod)

Pärast lisasoojustuselementide kinnitamist jäi fassaadi täieliku valmimise eel teha veel mõned tööd: elementidele puuduvate fassaadiplaatide kinnitamine ning katuseelementide ja seinaelementide vaheliste vuukide täitmine ning katmine. (*Time-lapse* fotod)

Katusevuukide täitmine toimus enne seinaelementide vaheliste vuukide viimistlemist. Tulenevalt fotode jäädvustamise nurgast ei ole piltide järgi võimalik kindlaks teha eelpool nimetatud katusega seonduvate tööde ajakulu. (*Time-lapse* fotod)

Seinaelementide vaheliste liitekohtade täitmine ja katmine oli kahe etapiline töö. Esimene töömees lasi montaaživahtu elementide vahelisse horisontaalpilusse, täitis

ülejäanud osa mineraalvilla ribadega ning viimaks teipis kinni tuuletõkkevilla vahelised vuugid. Teise töömehe ülesandeks oli vihmapleki kinnitamine fassaadiplaadi taha. Vihmapleki kinnitamise eeltööks oli see, et tehases käsitsi paigaldatud fassaadikatte alumised kruvid oli vaja lahti kruvida ja siis pärast pleki vahele lükkamist uuesti kinni keerata (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018). Vertikaalsetesse elementide liitekohtadesse lasti selles töö staadiumis täies ulatuses vaid montaaživahtu. Fotodelt selgus, et ühe otsaseina horisontaal vuukide täitmiseks kulus u 13 töötundi. Otsaseina horisontaalsete liitekohtade kogupikkuseks on 82,2 m, mis teeb isoleerimise kiiruseks 6,3 m/h. Vihmapleki paigaldamiseks kulus peaaegu neli tundi, mis teeb paigaldamise kiiruseks 20,6 m plekki minutis. Vertikaalvuukide isoleerimiseks montaaživahuga kulus ühel inimesel 1,5 tundi. Vertikaalvuugi pikkuseks oli 15,1 m. Hoone välisseina lisasoojustuselementide liitekohtade täitmise ja viimistlemisega tegeles korraga kuni 6 töölist, kuuelt korvtõstukilt. (*Time-lapse* fotod; Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Viimase seina lisasoojustuselementidega seonduva tööna kaeti objektil fassaadiplaadiga tehases katmata jäetud alad (vaata Joonis 16). Puuduolevate fassaadi tsementkiudplaatide paigaldamine teostati kahe nädala jooksul ning sellega tegeles paralleelselt keskmiselt kaks kaheliikmelist brigaadi. (*Time-lapse* fotod)



Joonis 16. Kohati paigaldati fassaadiplaadid objektil (*Time-lapse* fotod).

Kõige viimase hoonet veekindlaks muutva tööna kaeti katus teise kihi SBS-kattega. Katusekatte teise kihi paigaldustöö teostati 3 päeva jooksul ning sellega oli hõivatud üks tööline. (*Time-lapse* fotod).

Alljärgnevas tabelis on välja toodud Akadeemia tee 5a objektil teostatud lisasoojustuselementide seostuvate rekonstrueerimistööde ajakulud (vaata Tabel 8). Leitud on ajakulu, mis kulus kirjeldatud tööde tegemiseks arvestamata pause ning ajakulu, mis kulus keskmiselt ühe mahuühiku kirjeldatud töö tegemiseks. Ajakulude leidmisel on arvestatud sellega, et tööd teostatakse eelpool kirjeldatud meetoditel ja tööjõukuluga.

Keskmise ajakulu leidmisel ühiku kohta on arvestatud sellega, et tööde sooritamise tempo tõuseb vilumuse tekkimisega.

Tabel 8. Lisasoojustuselementidega seotud paigaldustööde ajakulu.

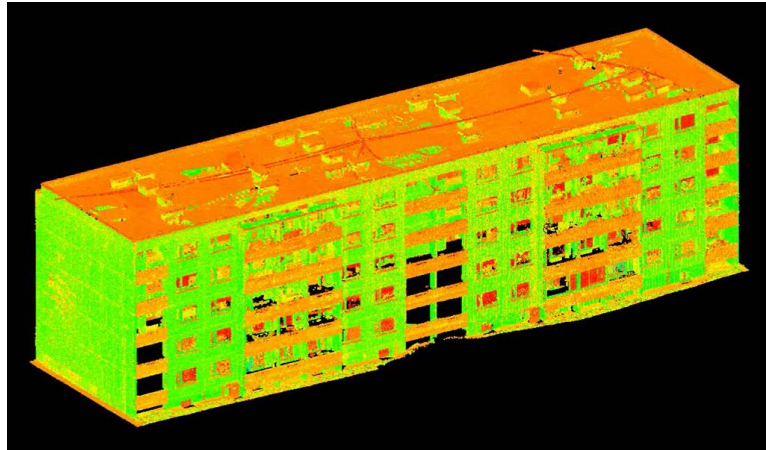
Töö kirjeldus, etapp	Kogus	Ajakulu Akadeemia tee 5a hoone rekonstrueerimisel	Keskmine ajakulu ühiku kohta
Fassaadiankrute paigaldamine	320 tk	3 tööpäeva	5 min/tk
Katuse lisasoojustuselementide kandekarkassi ehitamine	750 m ²	1 kuu	35 m ² /päev
Seinaelementide kinnituskronsteinide paigaldamine	366 tk	8 tööpäeva	12 min/tk
Seina lisasoojustuselementide paigaldamine	150 tk	14 tööpäeva	50 min/tk
Katuse lisasoojustuselementide paigaldamine	63 tk	2 tööpäeva	18 min/tk
Seina lisasoojustuselementide vaheliste vuukide täitmine (montaaživaht, vill, tuuletõkketeip)	810 m	15 tööpäeva	6,3 m/h
Vihmaveepleki paigaldamine horisontaalvuukidesse	810 m	4 tööpäeva	20,6 m/h
Otsaseina seinaelementide vahelise vertikaalvuugi täitmine (montaaživaht, vill, tuuletõkketeip)	30 m	3 tundi	10 m/h
Puuduvate fassaadiplaatide paigaldamine	-	10 tööpäeva	-

3.3. Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisprojekti hindamine

3.3.1. Geomeetria

2.3.1.1. Kasutatud lahendus

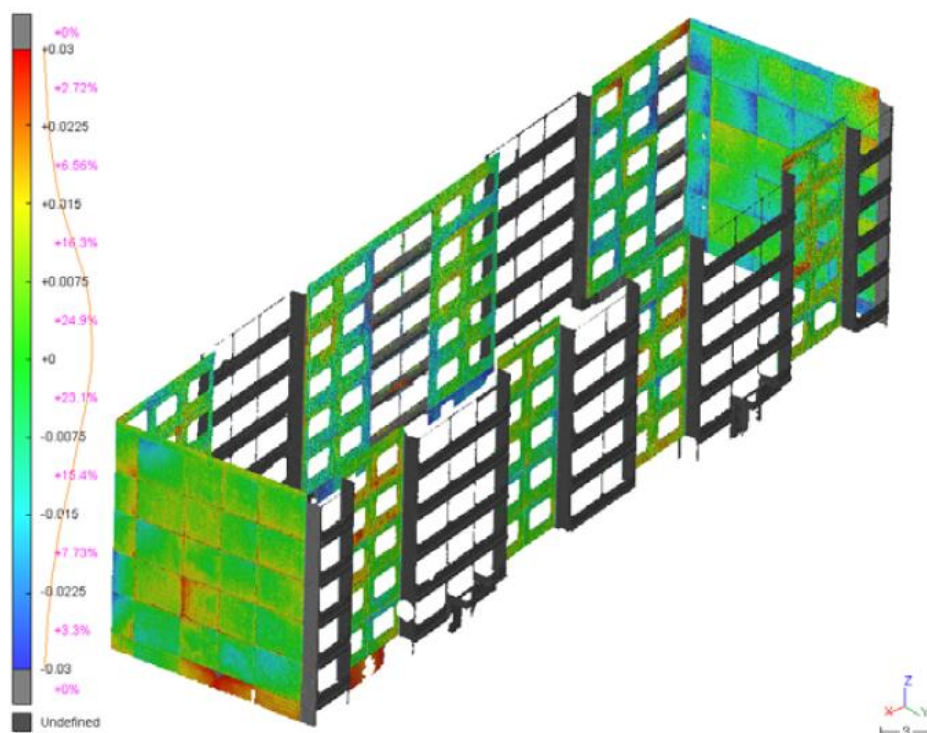
Akadeemia tee 5a suurpaneelilamust 3D mudeli saamiseks kasutati laserskaneerimist. Skaneerimiseks kasutati Leica ScanStation C10 mõõteseadet, mis mõõdistas hoonet 10 skaneerimisjaamast kasutades kokku 7 koordinaatidega seotud punkti. Mõõtmiste tulemusena salvestati u 22 000 000 punkti, mis teeb 8300 punkti/m². Joonis 17 kujutab laserskaneerimise tulemusena tekkinud hoonet kujutavat punktipilve. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)



Joonis 17. Akadeemia tee 5a punktipilv (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018).

Laserskaneering teostati seetõttu, et hoone olemasolevad seinad ei olnud ei vertikaalselt ega horisontaalselt loodis, seega üheks olulisemaks eesmärgiks oli leida olemasolevate seinaelementide tasapinnast keskmisel kaugusel asuvad punktid, et nende järgi panna paika vähimruutude meetodil uute soojustuselementide tasapinnad. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Joonis 18 toob välja olemasolevate seinapaneelide kõrvalekalde loodud uuest keskmisest tasapinnast.



Joonis 18. Hoone välisseinte kõrvalekalde välispinna keskmise punkti tasapinnast meetrites ja protsentides (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018).

Järgnevate ülesannetena kaardistati olemasolevate aknaavade ja tulevaste lisasoojustuselementide kinnituskronsteinide asukohti. Tulenevalt sellest, et kõik olemasolevad aknad ei asunud horisontaalselt ega ka vertikaalselt ühel joonel, siis punktipilve alusel sai lisasoojustuselementidega see viga parandatud. Täpne kinnituskronsteinide rihtimine mudelis pidi ära hoidma võimalike probleemide tekkimise elementide paigaldamisel. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

2.3.1.2. Tekkinud probleemid

Hoolimata põhjalikust eeltööst selgusid punktipilvest mudelit koostades ja sellega töötades järgnevad probleemid (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018):

- Geodeetilise mõõdistuse käigus loodi punktipilve olemasolevate seinaelementide keskmisel kaugusel olevatest punktides sellised tasapinnad, mis ei pruukinud olla täpselt vertikaalsed ega ka horisontaalsed. Sein loodimisel lähtuti tulevaste lisasoojustuselementide suuruselt ning ei vaadeldud tervet seina tervikuna. Selle tulemusena muutus keerulisemaks elementide paigaldamine objektil, elemendid ei tahtnud omavahel sobida ning terviklikult tasapinnalise seina loomine oli raskendatud.
- Infovahetus elementide tootja ja punktipilve koostaja vahel ei olnud üheselt mõistetav. Nimelt toodeti välisseinaelemendid uskumusega, et seinapind on horisontaalne ja vertikaalne ning kõrvalekaldeid mõõdetakse seina üldisest tasapinnast, mitte iga element eraldi. Seega oluline möödarääkimine selgus alles elemente paigaldades.
- Punktipilve tihedus oli liiga suur ning see raskendas mudeliga töötamist. Tekitatud punktipilvega töötamiseks oli vaja eriprogramme ja tavapärasest suurema võimsusega arvuteid.
- Lisasoojustuselementide valmistajal puudus pädevus punktipilvest vajaliku info kättesaamiseks.
- Tehases eeltoodetud elemendid ei mahtunud oma kohtadele fassaadil. Taoline probleem esines esimese korruse fassaadielementide kinnitamisel, kus ei oldud lähtunud projektist ning kinnituskronsteinide kõrgust oli korrigeeritud platsil paigaldatud sokli vahtpolüstüreeni kõrguse järgi.
- Mõningate sõlmilahenduste puhul ei sobinud elemendid omavahel ideaalselt kokku. Fassaadi elementide liitmisel nurkades tuli olukord materjalide lõikamisega platsil lahendada.
- Elementide paigaldamine oli raskendatud väikeste lubatud tolerantside tõttu.

- Ebatäpsuste varjamiseks objektil puudus lahendus. Horisontaalvuukide katteplekk võimaldas minimaalset seinä lisasoojustuselementide reguleeritavust.
- Ventilatsiooni läbiviigid läbi olemasoleva välisseina sattusid kohati siseseinte asukohtadele.

2.3.1.3. Arendusideed

Üleüldiseks lahenduseks on parem osapoolte vaheline kommunikatsioon, mille tulemus on üheselt mõistetav lähteülesanne ja teostus.

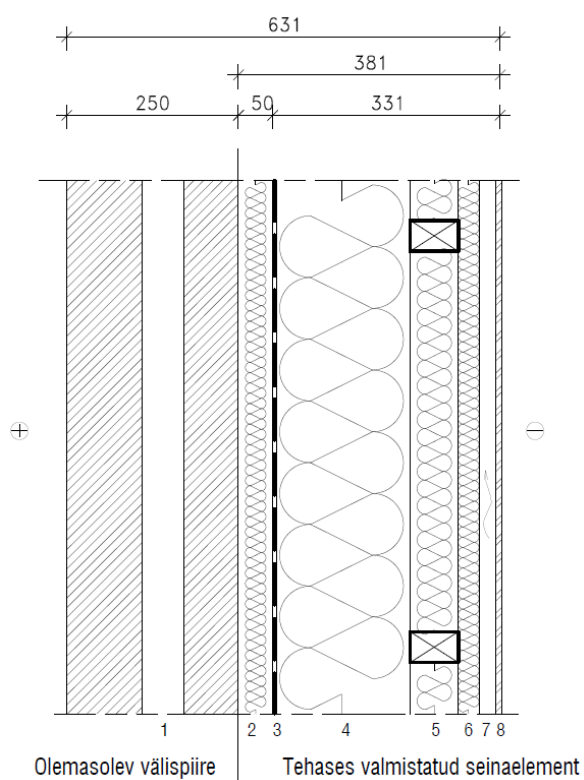
2018. aasta veebruaris-märtsis toimus TTÜs koolitus nimega „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“, kus osalejatel paluti pakkuda välja ideid nimetatud probleemide lahendamiseks. Lisa 1 toob välja koolitused pakutud mõtted.

3.3.2. Välisseinaelement

3.3.2.1. Kasutatud lahendus

Lahendus

Akadeemia tee 5a korterelamu soojustamiseks kasutatud välisseina lahenduse ristlõige on toodud alljärgneval joonisel (vaata Joonis 19). Lisasoojustuselementide soojusläbivus on projekteeritult $U = 0,11 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ (Sirkel ja Mall OÜ 2016). Fotodel on välja toodud välisseinaelementide etapiline valmistamine tehases (vaata: Joonis 20, Joonis 21, Joonis 22).



1. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE – raudbetoonist monteeritav seinaelement, $R = 1,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

PUITELEMENT

2. VAHE PAIGALDUSEKS – 50 mm Isover KT 37 mineraalvillamatt, $\lambda = 0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
3. AURUTÕKE – Isover Vario KM Duplex UV ning vuukide jaoks tihendusteip Isover Vario MultiTape SL.
4. SOOJUSTUS – 200 mm Isover KL 35 mineraalvilla, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ + puitroovid (195-45) sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
5. SOOJUSTUS – 70 mm Isover KL 35 mineraalvilla, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ + puitroovid (70-45) sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
6. TUULETÕKE – 30 mm Isover RKL 31 Facade jäik isolatsiooniplaat, $\lambda = 0,031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ning ühenduskohtadele teip Isover Vario Facade KB 3 teip.
7. ÕHKVAHE – 25 mm + vertikaalne puitroov (25-100) sammuga 400 mm.
8. FASSAADIPLAAT - 8 mm Cembrit Patina tsementkiudplaat.

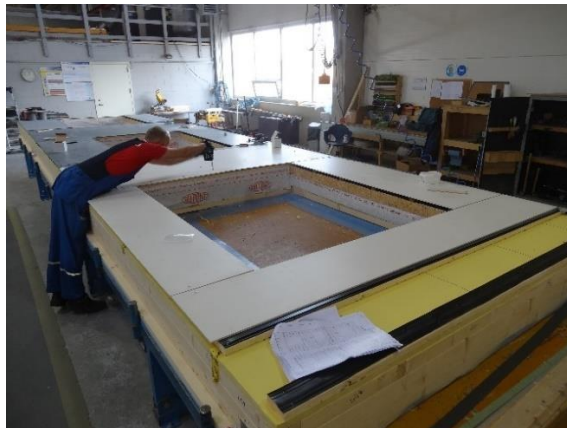
Joonis 19. Välisseinaelemendi ristlõige (Sirkel ja Mall OÜ 2016).



Joonis 20. Aurutõkketile paigaldamine (vasakul) ja elemendi täitmine kahe kihi villaga (paremal).

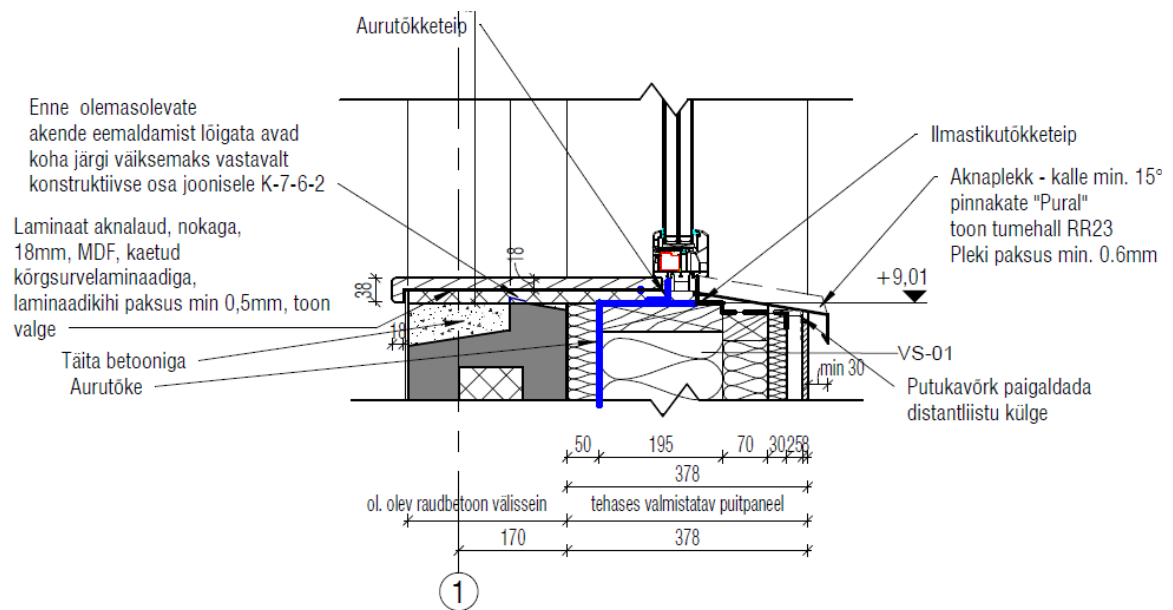


Joonis 21. Tuuletõkkevilla kinnitamine distantspuksidega (vasakul) ja tuuletõkkevilla vuukide teipimine ning tuulutusroovi paigaldamine (paremal).



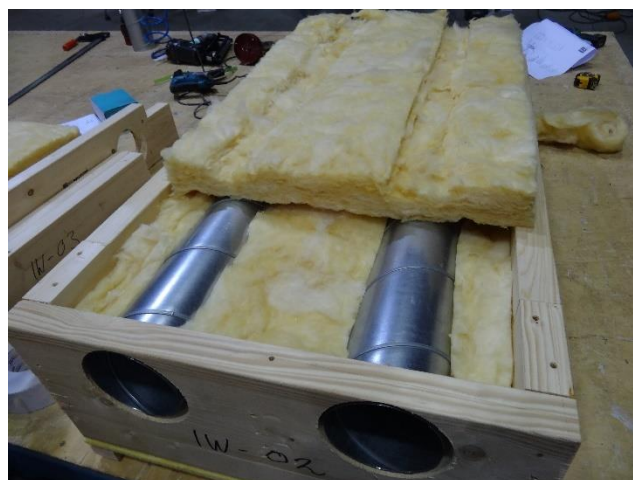
Joonis 22. Elemendi katmine fassaadikatteplaadiga (vasakul) ja puhvervilla kinnitamine nõöridega (paremal).

Välisseinaelementidesse monteeriti aknad tehases. Akendena kasutati 3 kordse klaaspaketiga plastaknaid, mille $U \leq 0,8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ning keldrikorruse akende puhul $U \leq 0,84 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ (Sirkel ja Mall OÜ 2016). Tehases elementidesse paigaldatud akende puhul oli lisaks väiksele soojusjuhtivusele oluline ka aurutiheda sõlmlahenduse kasutamine. Tehases kleebiti aknaleng seestpoolt aurutõkketeibi kasutades üheks kihiks puhvervilla taga paikneva aurutõkketega ning väljast ühendati leng ilmastikutõkketeibiga tuuletõkkevilla välimise pinnaga. Järgneval joonisel on esitatud akna paigaldamise sõlmlahendus (vaata Joonis 23). (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)



Joonis 23. Aknasõlm, aurutõkke- ja ilmastikutõkketeibi kasutamine (Sirkel ja Mall OÜ 2016).

Ühe osana tervikrekonstrueerimise lahendusest paigaldati tehases lisasoojustuselementide 195 mm paksuse soojustuse kihti sisepuhke ventilatsioonitorustik. Sisepuhke õhk on ventilatsiooniseadmes eelsoojendatud. Ventilatsioonitorustikuna oli kasutusel ümararistlõikega kuumtsingitud terasplekk torud, mille maksimaalne diameeter välisseinaelemendi sees oli 125 mm (Sirkel ja Mall OÜ 2016). Ventilatsioonitorustiku olemasolu on vajalik selles Akadeemia tee 5a korterelamu pooles, mida teenindab katusel asuv lokaalne ventilatsiooniseade. Ventilatsioonitorustiku paiknemine elemendis on näidatud alljärgneval fotol (vaata Joonis 24).



Joonis 24. Ventilatsioonitorustiku paiknemine välisseinaelemendis.

Lisasoojustuselementides paiknevad ventilatsioonitorud isoleeriti mineraalvilla ribadega ning kaeti pehme mineraalvilla kihiga. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Välisseina elemendis paikneva vertikaalse sissepuhke ventilatsioonitorustiku ühendamine hoones paikneva ventilatsioonitorustikuga toimus järgnevalt. Vertikaalne torustik koos ruumi keerava põlvega oli elemendis juba olemas ning ehitusplatsil ühendati läbiviik. Selleks lõigati pärast lisasoojustuselemendi paigaldamist olemasolevasse välissein ventilatsioonitorust suurema diameetriga ava ning jätkati sealt elemendis paiknevast põlvest torustiku rajamist hoones. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Ventilatsioonitorustike sisaldavate elementide ühendamisel omavahel tõsteti elemendid üksteise peale nii, et ülemisest elemendist ulatus välja u 14 cm pikkune tihendiga toru, mis sobis ideaalselt alumise elemendi ventilatsioonitoru sisse, kasutati siseliidet. Ülemisest elemendist välja ulatuva ventilatsioonitoru läbiviik lisasoojustuselemendi puitraamis oli isoleeritud teibiga. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Maksumus

Kasutatud tehases eeltoodetud seina lisasoojustuselemendi maksumus on 2018. aasta aprilli seisuga u 127 eur/m², millest fassaadikate Cembrit Patina 8 mm paigaldamine moodustab u 60 eur/m². Toodud hinnas pole arvestatud lisasoojustuselementide paigaldamist objektil, kinnitusedetaile ega ka transportimist ning toodud hinnale lisanduvad projekteerimise kulud, akende ja ventilatsioonitorude maksumused, elementide liitekohtade lahenduste materjalide maksumused ning kõik väiksemad detailid nagu plekid ja putukavõrgud. Lisasoojustuselementide hind oli kõrge seetõttu, et kasutusel olid kallid materjalid, nt fassaadikate, tuuletõkkevill. Lisasoojustuselemendi hinna moodustamise võis jagada kolme ebavõrdsesse ossa. Nimetatud hinnast u 50% moodustavad materjalid, 30% tööjõukulud ja 20 % üldkulud. (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018; Matek AS 2018)

3.3.2.2. Tekkinud probleemid

Rekonstrueerimine kirjeldatud lisasoojustuselementidega oli esimene taoline projekt Eestis. Nagu kõigi uute asjadega ilmnes ka lisasoojustuselementidel töökäigus mõningaid puudujääke. Põhilised probleemid antud elemendiga olid (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018):

- Lisasoojustamine tehases valmisatud puitraamidel elementidega on kallim lahendus kui rekonstrueeritava hoone soojustamine vahtpolüstereen + krohv või vill + krohv lahendusega.
- Fassaadikate oli kallis, moodustades suureosa elemendi kogumaksumusest.

- Oht, et puhvervill ei ole kõikjalt ühtlaselt elemendi ja vana raudbetoonfassaadi vahel. Elementide paigaldamisega võis 50 mm paksune villakiht soovimatult liikuda.
- Kahekihilise villakihiga lisasoojustamiselemendi valmistamine oli aeganõudev. Küsimus on, et kas oleks võimalik toota kiiremini valmistatav soojustuselement sama soojuslähivusega.
- Elementide vähene jäikus ja läbipaindumise oht.
- Tuuletõkkevilla distantspukside paigaldamine oli ebamugav, aeganõudev ja kallis töö, mis hilisemalt nõudis tuulutusröövide täpset rihtimist.
- Elemendi kihtide rohkus tõstis elemendi hinda ja selle valmistamiseks kuluvat aega.
- Isolatsioonmaterjali paigaldamine ventilatsioonitorude ümber oli raskendatud ning võis tekkida kohti, kus on vill ebaühtlaselt või liiga tihedalt paigaldatud.

3.3.2.3. Arengusuunad

Tootmise ajakulu

Vertikaalse ja horisontaalse puitkarkassi ning villakihtide kasutamine on aeganõudvam töö, kui vaid ühe kihiga piirdudes. Arvutused näitavad, et horisontaalsest roovitusest loobudes ja vertikaalse soojustuse kihi paksust muutmata (195 mm) ning kasutades seejuures tuuletõkkevilla Isover RKL-31 Facade paksusega 75 mm on võimalik saavutada samuti soojuslähivus $U = 0,11 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Isoveri materjalide hulgihindade tabelist selgub, et lahenduses kasutatud villade koondruutmeetri maksumus suureneb tunduvalt (Saint-Gobain Ehitustooted AS). Kirjeldatud lahenduse puhul on ka oht, et elemendi jäikus väheneb.

Horisontaal karkassist loobumisel elemendi ehitusajas kokkuhoiu eesmärgil on ka võimalik asendada vill PUR vahuga. Oluline erinevus seisneb materjalide paigalduskiirusest. Seinaelemendi soojustamisel kasutatud Isover KL 35 villa soojuserijuhtivusega $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Isover) asemel on võiks kaaluda avatud pooridega polüüsretaanvahtu H2Foam Liite Plus kasutamist, mille soojusjuhtivus on $\lambda = 0,0355 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. PUR-vahu peale kandmine toimub tunduvalt kiiremini villa paigaldamisest ning täiendava eelisena ei vaja vaht tuuletõkke ega ka aurutõkkekihti. Samuti on nimetatud vahu kaal palju väiksem villa omast, olles vaid 12 kg/m^3 . (Soeson 2018)

Tuuletõkkevilla Facade RKL 31 paigaldamisel lisasoojustuselemendi külge selgus, et tuuletõkkevilla kinnitamiseks vajalike distantspukside paigaldamine on küllalt

aeganõudev töö. Tootmine toimub tunduvalt kiiremini, kui tuuletõkkematerjali on võimalik paigaldada naelpüssiga. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018) Distantspuksidest loobumiseks tuleb asendada ka tuuletõkke materjal näiteks tuuletõkkekipsi ja tuuletõkkekanga kasutamisega. Võrreldes 30 mm paksuse Facade RKL 31 materjali ja paigalduse hindu tuuletõkkekipsi Norgips GU9 ja Monier Divowind kanga omadega selgub, et kipsi ja kanga lahendus on odavam 5 - 7 Euro võrra ruutmeetri kohta (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018). Samal ajal tuleb tähele panna, et nimetatud tuuletõkke villa kasutades on võimalik tarindi soojustakistust suurendada, 30 mm tuuletõkkevilla $R = 0,97 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ ning seevastu tuuletõkkekipsi soojustakistus on tiheda ja õhukese materjalina peaaegu olematu.

Jäikus

Suuremõõtmeliste elementide jäikus on üks oluline asjaolu, mida valikute tegemisel tule arvesse võtta. Probleemi tõsisust on näha elementide transportimisel, paika tõstmisel ning samuti ka vajalike toetuspunktide projekteerimisel. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Üks lihtsaim viis elementide jäikuse suurendamiseks on ühe kihina tuuletõkkekipsi kasutamine tuuletõkkevilla asemel. Eriti oluline jäiga plaadi kasutamine tarindite puhul, milles on kasutatud ühekihilist soojutust ja karkassi. Tuuletõkkekipsi ja -kanga kasutamisega kaasnev täiendavboonus on see, et liitekohtade teipimine on oluliselt lihtsam. Selle arvelt, et kanga äärte kokku kleepimine on kiirelt teostatav töö ning kangast on võimalik fassaadikatte serva alla voltida. (Welement AS projekteerija 2018)

Samuti on võimalik elemendi jäikust suurendada diagonaalelementide kasutamisega karkassi kihis. Puidust karkassi ja diagonaalelementide kasutamise eelduseks tänapäeval on see, et puitmaterjal töödeldakse CNC-masinaga, mille tulemusel elemendi osad ideaalselt kokku sobivad. (Welement AS projekteerija 2018)

Ühe võimalusena võib kaaluda ka elemendi jäigastamist plaadiga, mis asub elemendi põhikarkassist hoone pool. Kuid selle kihi plaadi valikul tuleb arvestada, et materjali lasuv niiskuskooormus on väga suur ning risk hallituse tekkeks on kõrge. (Matek AS 2018)

Fassaadikate

Cembrit välisvoodri hind tehases paigaldatuna ühe ettevõtte hinnangul 2018. aasta kevade seisuga on koos kinnitustvahenditega on u 49 eur/m², millest materjali enda maksumus on 19 eur/m². (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018)

Fassaadikatte valikul on lisaks hinnale ka oluline visuaalne pool ja kliendi soov ning seepärast on oluline, et oleks võimalik variantide vahelt valida. Järgnevas tabelis (vaata Tabel 9) on väljatoodud tuulutatavana kasutatavate fassaadikatete hinnad koos paigaldusega (ei sisalda käibemaksu), mis alternatiivselt sobivad lisasoojustuselementide väliskatteks.

Tabel 9. Võimalike fassaadikatete orienteeruvad hinnad (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018; Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018)

Viimistlusmaterjali liik	Materjali näited	Orienteeruv hind koos paigaldusega, eur/m ²
Krunditud ja 2x värvitud puitlaudis	UYV 21x120 mm	20-21
Tsementkiudplaat	Kivex Color 8 mm	51
Madalad disainprofiilid	Venice S10, Tokyo S18	36
Kõrgemad disainprofiilid	Rome S34, Paris S55	40
Presspingi disainprofiilid	Cor-Ten S7, Oulu T10	49
Fassaadilamellid	-	56-51
Fassaadikassetid	Liberta väiksemad mõõdud (u 600x900 mm) täiendava villaplaadiga	61
Fassaadikassetid	Liberta suuremad mõõdud (u 8000x3000 mm) täiendava villaplaadiga	76

Puhvervill

Puhvervill paigalduse juures oli olulisim tähele panna, et villaplaatide vuugid ei jääks asetsema vertikaalselt. Vuukide horisontaalne sättimine vähendab õhu liikumise võimalusi olemasoleva seinatarindi ja lisasoojustuselemendi vahel (Welement AS projekteerija 2018). Õhu liikumine tarindi kihtide vahel on tingitud sellest, et hoonest lekkiv soe õhk tahab külmemas keskkonnas ülesse tõusta.

Matek AS pakub välja ka, et puhvervill paigutamisel võiks kaaluda varianti, kus vill paigaldatakse vaid perimeetrile ja akende ümber, luues nii elemendi keskele õhutiheda piirkonna (Matek AS 2018). Õhutiheda piirkonna loomise tõenäosus on suurem siledade betoelementide puhul ning vajab täiendavat katsetamist pestud betoonist elementide puhul.

Tuule- ja aurutõkkematerjali valik

Aurutõkkekihi materjali valikul on oluline valida materjal, mis talvel takistab niiske õhu liikumist ruumist konstruktsiooni ning seejuures võimaldab aastaringselt vastavalt vajadusel konstruktsioonil nii sisse kui ka välja kuivada. Aurutõkkekiht tuleb paigutada

pigem sisepinna poole, sest vaid juhul kui suurema aurutakistusega kiht asub seespool on võimalik vähendada niiskusvoogu läbi tarindi. Auru- ja õhutõkkekihi materjalist oleneb tuuletõkkekihi niiskustase, mida väiksem on aurtõkkekihi aurutakistus, seda suurem on tuuletõkkematerjali sisepinna niiskustase. Tulenevalt tarindi veeaurujuhtivusest on tuuletõkkematerjali valiku puhul oluline silmas pidada niiskus- ja soojustakistust. Madalam niiskustakistus võimaldab niiskusel tarindist hõlpsamini välja kuivada. Samal ajal, kui tuuletõkkekihi suurem soojustakistus vähendab piirdetarindi külmasildade mõju ning vähendab tuuletõkkekihi sisepinna suhtelist niiskust. (Kalamees 2002)

Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimisprojekti eelistati tuuletõkkekihina Isover RKL 31 tema soojustakistuslike ja niiskustjuhtivate omaduste tõttu (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018). Samal ajal tuleb tähele panna, et nt Eestis elementmajasid tootvate ettevõtete esmane ja vaikiv valik on tuuletõkkekihina kasutada tuuletõkkekipsi ja -kangast (Matek AS 2018; Welement AS projekteerija 2018).

Edasi uurimist vajavad ka variandid, kus tuuletõkkena on kasutatud vaid tuuletõkkekipsi või -kangast. Üldjuhul vajab tuuletõkkekips sellisel juhul tavapärasest laiemat õhuvahet, sest vaid nii saab sealt niiskus välja kuivada (Welement AS projekteerija 2018). Ka Eestis on katsetatud tuuletõkkekipsi kasutamist ilma tuuletõkkekangata. Kirjeldatud lahenduse eluiga ei ületanud mõnda aastat just seetõttu, et kips märgus ja ei niiskus ei kuivanud enam välja (Kuusk 2018).

Alternatiivina võib kaaluda ka Farmacell kipskiudplaadi kasutamist tuuletõkkekihina, mille hind on tavalisest tuuletõkkekipsist u 4 korda kallim, kuid see-eest kihi paigaldamise hind on võrdväärne tuuletõkkekipsi omaga ning seoses sellega võib tekkida rahaline võit Isover Facade RKL plaadi lahenduse ees. (Matek AS 2018).

Vill ventilatsioonitorude ümber

Soojustusvilla on võimalik paigutada ühtlasemalt kui Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimisel. Näiteks kasutati More-Connecti Tšehhi pilootprojekti objektil spetsiaalseid ventilatsioonitorudele mõeldud villaelemente (vaata Joonis 25). (CTU Team s.a.)



Joonis 25. Võimalikud villaelemendid ventilatsioonitorude ümber (CTU Team s.a.).

Ventilatsioonitorude paigutamisel võiks lähtuda põhimõttest, et torudest hoone ja väliskeskkonna poole jääb vähemalt 50 cm soojustusvilla. (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Soojustuse kihid

Villa kihi paksus elemendis ei tohiks olla suurem kui 125 mm, sest nimetatust paksemat villa on keeruline paigalda. Paksema villaplaadi jäikusest tulenevalt ei pruugi soojustusvill alati täiuslikult vastu puitkarkassi sattuda. (Welement AS projekteerija 2018)

Lõputöö lisas on välja toodud 2018. aasta alguses aset leidnud puidust lisasoojustuselementide koolitusel osalejate mõtted käsitletud teemal (vaata Lisa 2).

3.3.3. Välisseinaelemendi paigaldus, toetus, kinnitus

3.3.3.1. Kasutatud lahendus

Lahendus

Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimisel kasutati fassaadielemente, mis olid ühekorruse kõrgused (2,7 m) ja kuni 9,0 m laiused, erandina olid 3 ja 2 korruse kõrgused kitsad elemendid, milles paiknesid ventilatsioonitorud. Iga element kinnitati ja toetati eraldi olemasoleva fassaadi külge kinnituskronsteinide abil. Kinnituskronsteinid paiknesid 2,6 kuni 3,2 m vahedega. Kinnituskronsteinide paiknemist iseloomustab Joonis 26. (Sirkel ja Mall OÜ 2016) Elementide kinnitamisel tuli arvestada sellega, et akendega sein lisasoojustuselement kaalub ligikaudu 80 kg/m² (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018).

Elementide montaaž toimus alt ülesse (vaata Joonis 26). Enne katuseelementide paigaldamist paigaldati välisseinaelementid. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018).



Joonis 26. Kinnituskronsteinide paiknemine fassaadil ning fassaadielementide paigaldamine alt ülesse.

Seinaelementide paika tõstmine toimus autokraanaga, element oli kinnitatud kahest tõstepunktist. Samaaegselt toimus kahe korvtõstuki abil fassaadielementide sättimine oma õigele kohale, reguleerimine ja kinnitamine. Joonis 27 illustreerib lisasoojustuselementide paigaldamist. Akadeemia tee 5a korterelamu lisasoojustuselementide paigalduse protsess on lahti seletatud peatükis 3.2.



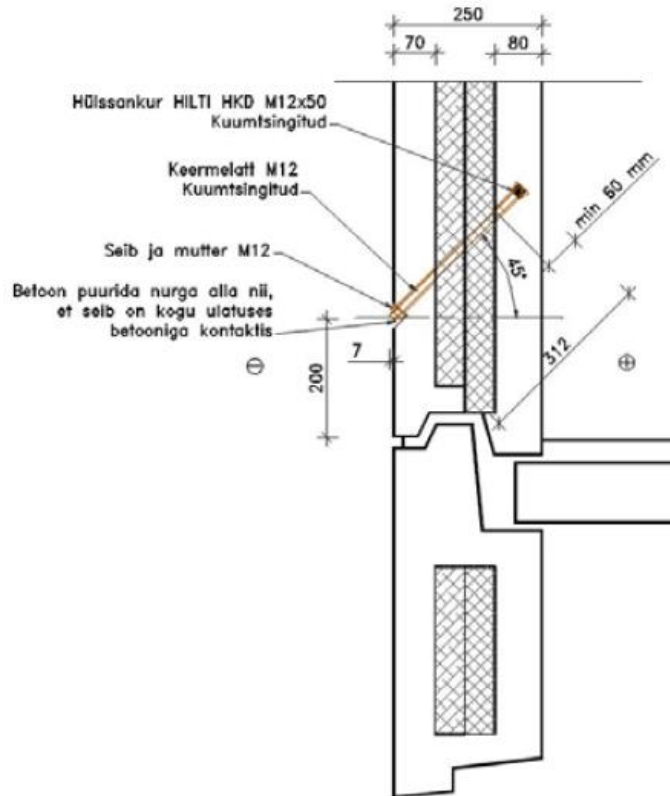
Joonis 27. Fassaadi lisasoojustuselemendi paigaldamine.

Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimisel kasutati kolmes suunas reguleeritavaid keemiliselt kuumtsingitud kinnituskronsteine, mis on kujutatud alljärgneval fotol (vaata Joonis 28 vasak). Kinnituskronsteinid kinnitati olemasoleva raudbetoonpaneeli sisemise raudbetooni kihi külge. Fassaadielementides asuv tugevdatud toetumisavaus on samuti toodud järgneval fotol (vaata Joonis 28 parem). Iga element kinnitati eraldi olemasoleva ankurdatud fassaadi külge. (Sirkel ja Mall OÜ)



Joonis 28. Vasakul fotol on kinnituskronstein ja olemasoleva raudbetoonkooriku ankur ning paremal fotol sein lisasoojustuselementide metallplaadiga tugevdatud toetuspunktid.

Olemasoleva seinapaneeli välimise betoonkooriku lagunemise vältimiseks kinnitati see ankrutega Hilti Hit Hy200 D=16 mm kandvakonstruksiooni külge. Selle tööga välditi riski, et betoonelemendi väliskoorik võiks karboniseerimise tulemusel korrodeerunud ühenduste tõttu fassaadi küljest ära kukkuda. Eriti riskantseks teeb olukorra see, et täiendavalt kinnitati välisseina paneeli külge massiivseid lisasoojustuselemente. Kinnitusankru seib ja mutter on näidatud eelneval fotol (vaata Joonis 28 vasak). Joonis 29 selgitab ankru paigaldamist. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)



Joonis 29. Olemasoleva fassaadi ankurdamine kandvakonstruksiooni külge (Sirkel ja Mall OÜ 2016).

Akendega fassaadielementide paigalduse järel oli oluline, et aknaava, vana ja uue elemendi kokkupuutekoht oleks õhutihe. Selleks kleebiti lisasoojustuselemendi aurutõkkekiht ja olemasoleva konstruktsiooni aknapale aurutõkke teibiga. Õhutiheda aurutõkkekihi eesmärgiks on ruumi niiskuse liikumise takistamine konstruktsiooni. Fotol on näidatud aknaavas paikneva aurutõkketeibi asukoht (vaata Joonis 30).



Joonis 30. Aknaavasse paigaldatud aurutõkketeip.

Maksumus

Akadeemia tee 5a seinä lisasoojustuselementide paigaldushinnaks koos tõstetehnika ja liitekohtades tegemisega on 2018. aasta aprilli seisuga u 46 eur/m², millest umbes 60 % on paigaldamiseks tehtavad kulutused. (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

Keemiliselt kuumtsingitud kinnituskronsteinide hind koos tõstetehnika, ehitusgeodeediga, mudeldamise ja puurimiseks tehtud kulutustega oli u 120 eurot tüki kohta. Kinnituskronsteinide enda hind moodustas ligikaudu ühe kolmandiku kogu kinnitamisele tehtud kulutustest. (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018)

3.3.3.2. Probleemid

Lisasoojustuselementide paigaldamise, kinnitamise ja toetamisega seotud suurimad probleemid Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimisprojekti olid järgnevad (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018):

- Kinnituskronsteinide seinä puurimine oli väga rakse, tülikas ja aeganõudev töö. Kinnituskronsteinide asukohtade taga, olemasolevas raudbetoonpaneelis, paiknes suur kogus armatuuri.
- Kasutatud seinä lisasoojustuselementide kinnituslahendus oli kallis.
- Olenemata sellest, et kasutatud kinnituskronsteinid võimaldasid kolmesuunalist reguleerimist, siis alati sellest ei piisanud.
- Kinnituskronsteinide suur arvukus ja sellest tulenev ajakulu.
- Seinäelementide paigaldamine enne katuseelemente tõstis ilmastikuriski. Oli oht, et olemasolev fassaad märgub enne katmist ning niiskus ei jõua välja kuivada, põhjustades hiljem puitelementide hallitamist.
- Aknalengide teipimisel olemasoleva raudbetoonkonstruktsiooni külge, ei saavutatud aurutihedat kihti.

3.3.3.3. Arengusuunad

Elemendi mõõtmed

Paigalduseaega on võimalik lühendada suuremate lisasoojustuselementide kasutamisega. Lisaks on elementide mõõtude suurendamisel teinegi positiivne mõju. Tulenevalt sellest, et suuremad elemendid katavad korraga rohkem fassaadi pinda on võimalik hoone katta väiksema arvu elementidega. Väiksem arv tõsteid kraanaga vähendab tõstemehhaanikale tehtavaid kulutusi ja seega muutub lahendus soodsamaks.

Muidugi ei tohi tähelepanuta jätta seda, et suurematel elementidel on suurem tõenäosus läbipaindumiseks ning samuti võib suuremate elementide paigaldamine muutuda keerulistest kohtades, nt nurkades, ajakulukamaks. Seepärast tuleb iga objekti puhul läheneda elemendi mõõtmete valikusse individuaalselt. Elementide mõõtmetele seab piirangud transport. (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Elementide mõõtmete kasvatamisel tekkivat puudulikku jäikust saab kompenseerida traaversiga tõstmisega. Lisasoojustuselementide jäikus on kõige olulisem tõstmise hetkel. Lisa tõstepunktide lisamisega on võimalik vähendada läbivajumise ohtu. (Matek AS 2018)

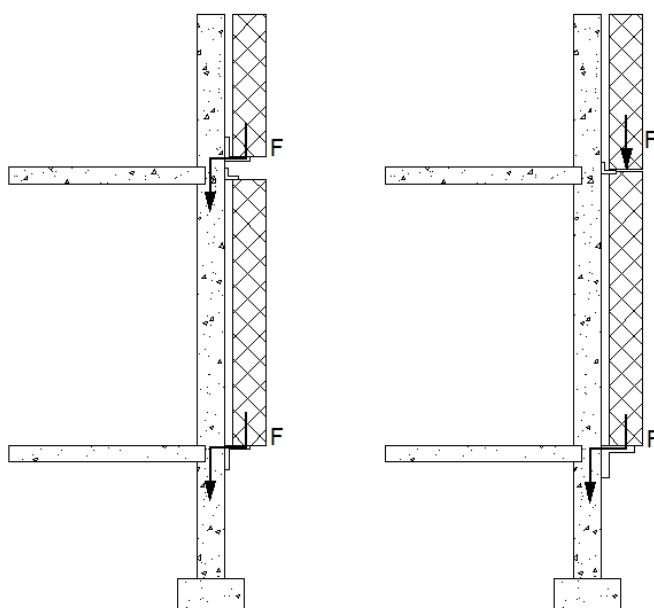
Olemasoleva konstruktsiooni ja aknaava ühendus

Liitumiskohal tekkinud mitteõhutiheda lahenduse tekkimist on võimalik vältida lihtsal põhimõttel. Enne teipmist tuleb olemasolevad pinnad prahist ja tolmust vastavalt vajadusele harja või tolmuimejaga puhastada, sest vaid puhta pinna külge saab teip ideaalselt nakkuda. Olemasoleva konstruktsiooni külge teibi surumisel on soovitatav kasutada rulliku abi. (Siga)

Toestamine

Seina lisasoojustuselemente on võimalik kinnitada ja toetada hoone külge kahel põhimõttel:

- Iga element kinnitatakse ja toestatakse eraldi olemasoleva välisseina külge (vaata Joonis 31 vasak).
 - Suurema tõenäosusega satuvad elemendid nii oma õigetele koordinaatidele. Puudub võimalus, et elemendid nihkuksid või vajuksid tulenevalt puidu kahanemisest kuivamisel. (Matek AS 2018)
 - Kõik elementide liitekohad on võimalik objektile üle vaadata ja kohendada.
 - Lahendus nõuab keerulisemaid kinnitus- ja toetus detaile.
- Fassaadi alt esimesed elemendid toetatakse olemasoleva konstruktsiooni külge ning ülemised toetatakse alumiste lisasoojustuselementide peale (vaata Joonis 31 parem).
 - Ei teki laiasid horisontaalseid seinaelementide liitumiskohtasid.
 - Kandvate kinnitusdetailide arv väheneb. Täiendavalt on vaja kasutada elementide kinnitamisel ülemisest servast detaile, mille ülesandeks on vaid tuulekoormuse vastu võtmine (Matek AS 2018).



Joonis 31. Vasakul põhimõtteline skeem elementide toetumisest eraldi olemasolevale välispiirdele. Paremal põhimõtteline skeem elementide toetumisest üksteise peale.

Paigaldus

Elementide paigaldushind, mis sisaldab elementide paigaldamise tööd, tõstetehnikat ja liitekohtade materjal oleneb toestamise viisist väikesel määral. Iga elemendi eraldi toestamise ja alt üksteise peale toestatud elementide paigalduse hinnavahe on u 4 eur/m². (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

Kinnitamine

Seina lisasoojustuselementide toestamisel alt tekib kinnitusdetailide vajadus, mille ülesandeks on vaid elementide asukohtade fikseerimine ja tuulekoormuse vastu võtmine. Kinnitusdetailide nt nurgikute projekteerimisel tuleb tähele panna asjaolu, et liiga tugevate kinnitite puhul võivad nad elementi kandma jääda. Seda olukorras, kus alumine element ära alt ära vajub ning kinnitusnurgik järele ei anna. (Matek AS 2018)

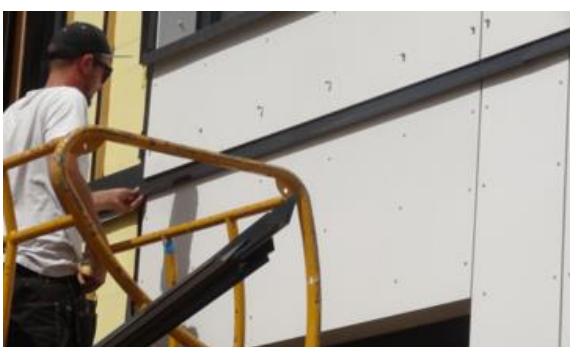
Kinnitused olemasoleva välisseina konstruktsioonikülge

Kinnituskronsteinide kinnitamine olemasoleva sisemise raudbetooniplaadi külge oli kulukas ja aeganõudev töö, seevastu fassaadi ankurdamisega nimetatud probleeme ei tekkinud. Sellest tulenevalt võiks kaaluda võimalust, kus alttoetatud elemendid kinnitatakse ülalt vaid ankurdatud välise raudbetooniplaadi külge. Kirjeldatud lahendus võimaldaks betooninaelte kasutamist, mille paigaldamine on odavam ja kiirem. Lahenduse valimise võimalust on vaja eelnevat arutada eriala konstruktoriga. (Matek AS 2018)

Seinaelementide horisontaalvuukide täitmine oli Akadeemia tee 5a objektil tehtavatest rekonstrueerimistöödest üks aeganõudvaim ning rohkema etapilisem töö. Esmalt täideti enne ülemise seinaelemendi paigaldamist montaaživahuga alumise seinaelemendi puitraami taha jääv tühimik. Pärast vahu kuivamist ja ülemise lisasoojustuselemendi lisamist täideti montaaživahuga pooles ulatuses kahe elemendi vaheline vahe, mille kõrgus oli 80 mm. Seejärel täideti ülejäänud elementide vaheline piirkond mitme kihi ehitusvillaga, kusjuures osa alast oli 80 mm ja osa 60 mm kõrgune. Eelviimase tööna kleebiti villavuuk üle tuuletõkketeibiga, mis oli eelnevalt tehases alumise lisasoojustuselemendi külge paigaldatud. Lõpetuseks lisati horisontaalsetesse vuukidesse veeplekid, mille kinnitamine eeldas tehases paigaldatud fassaadiplaadi osalist lahti kruvimist ja uuesti kinnitamist. Tööde käiku iseloomustavad alljärgnevad fotod (vaata Joonis 33, Joonis 34). (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)



Joonis 33. Seinaelementide horisontaalvuukide täitmine montaaživahuga (vasakul) ja mineraalvillaga (paremal).



Joonis 34. Seinaelementide horisontaalvuukide katmine tuuletõkketeibiga (vasakul) ja veepleki paigaldamine (paremal).

3.3.4.2. Probleemid

Rekonstrueeritud Akadeemia tee 5a korterelamu seina lisasoojustuselementide horisontaalvuukide isoleerimisel ja viimistlemisel tekkisid üks väga suur üldine probleem,

nimelt oli lahendus väga aeganõudev, tulenevalt oma mitmeetapilisusele. Lisaks sellele, et villade, vahtude ja veepleki paigaldamine tülikad tööd. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Montaaživahu ja villa paigaldamine oli raskendatud seoses horisontaalvuugi laienemisega olemasoleva seinakonstruktsioonipoolt. Teise takistava asjaoluna asusid osaliselt lisasoojustuselementide horisontaalvuukide ees 600 mm sammuga fassaadi tuulutusrööpvõrk (vaata Joonis 33 parem, Joonis 34 vasak). (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Täiendavalt ajakulu ja ligipääsetavuse probleemile ilmneb kasutatud lahenduse juures ka majanduslik argument. Ehitusplatsil teostava käsitöö suur maht tõstis teostatava töö ühikhinda. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

3.3.4.3. Arengusuunad

Horisontaalvuukide arv

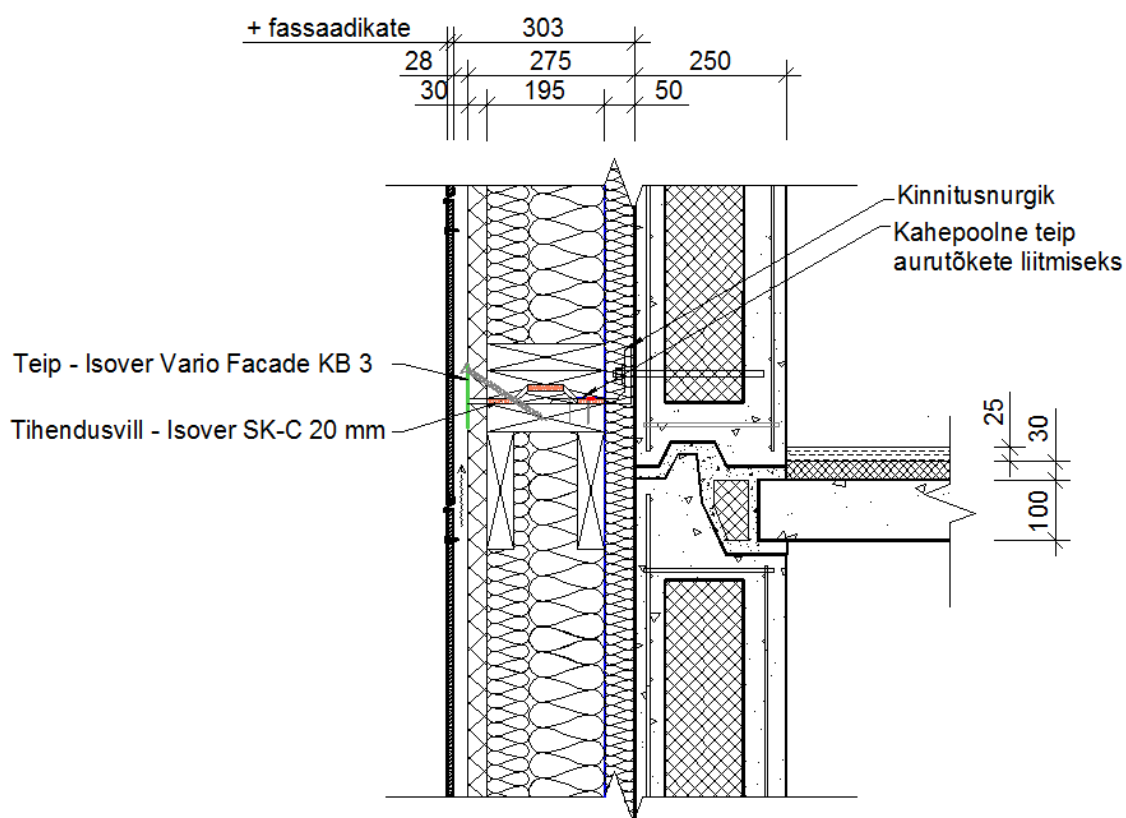
Probleemsete horisontaalvuukide arvu on võimalik vähendada vertikaalselt paiknevate lisasoojustuselementide kasutamisega. Tulenevalt transpordipiiridest on võimalik toota elemente, mis kataksid korraga välisseina kolme korruse ulatuses. Kuid lahenduse negatiivne mõju on see, et fassaadile tekib palju vertikaalvuuke, mis ei pruugi sobida arhitektuurselt. (Matek AS 2018) Samal ajal on võimalik vertikaalvuuke varjata nt vertikaalse laudise kasutamisega või plaatkattega, mis paigaldatakse vuukide ulatuses objektile.

Elementide mõõtmete valikut mõjutab maksumus. Suuremate elementide kasutamine vähendab nende koguarvu ning muudab kogumaksumuse soodamaks (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018). Kuid akende paiknemisega seoses võib juhtuda, et vertikaalsete elementide laius on väga väike ning selle tõttu on elementide koguarv suurem kui horisontaalsete lisasoojustuselementide kasutamisega, seda eeldusel, et aknad on juba tehases paigaldatud. Nt Akadeemia tee 5a korterelamus ei oleks vertikaalsete lisasoojustuselementide kasutamine ajalist ja rahalist võitu toonud. (Matek AS 2018)

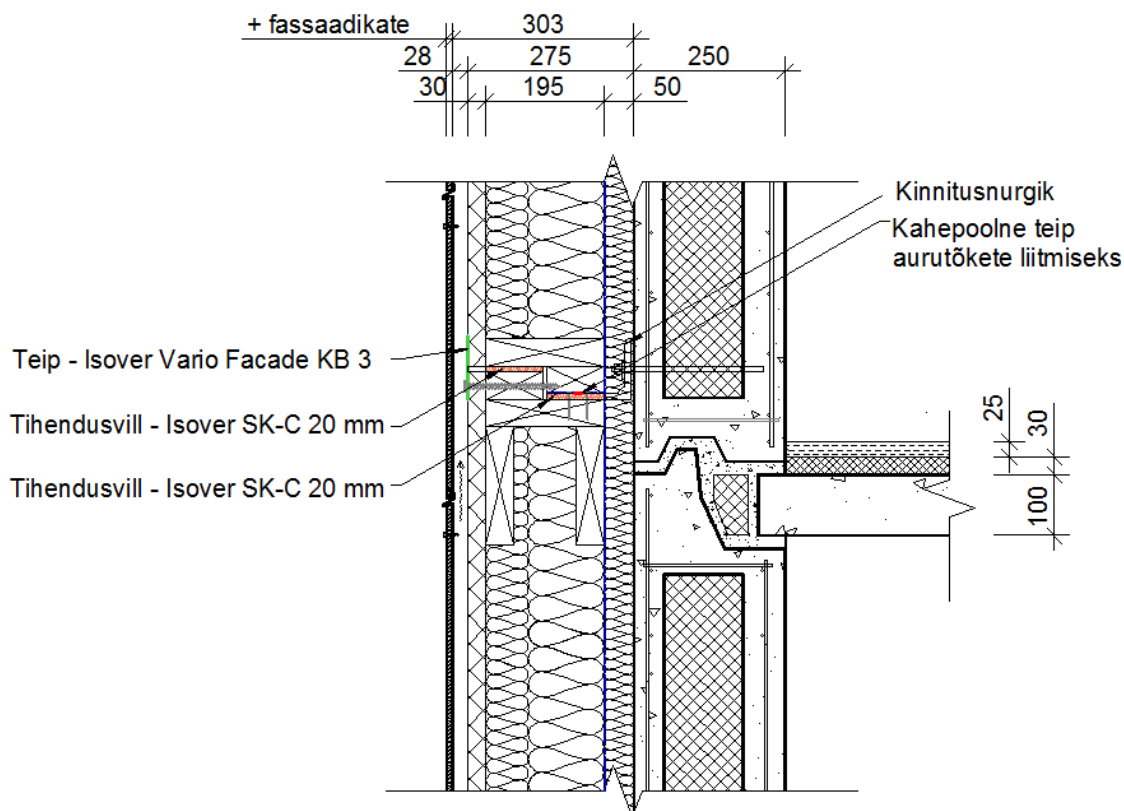
Horisontaalvuukide lahendus

Horisontaalsete vuukide lahendus oleneb kasutatud elementide toetamise viisist. Alt toetatud viisi korral on võimalik elemendid liita tiheda üksteise peale toetuva lahendusega. Elementide toetamisel iga üks eraldi tekivad elementide vahele vahed, mis vajavad platsil täitmist ja viimistlemist.

Üksteise peale toetatud elementide horisontaalse liitekoha kaks võimalikku lahendust on välja toodud järgnevalt. Esimesel joonisel (vaata Joonis 35) on kujutatud sõlmelahendust, kus on kasutatud trapetsikujulist liidet. Lahenduse eeliseks on see, et elemendi rihtimine objektil on lihtsasti teostav (Matek AS 2018). Teisel joonisel (vaata Joonis 36) on kasutatud lahendust, kus kohtuvad kaks kõrvuti olevat puittla. Teise lahendusega välditakse olukorda, kus liide võiks puruneda puidu väikse paksuse või liiga tihedalt asetsevate kinnitusdetailide tõttu (Welement AS projekteerija 2018). Mõlema lahenduse puhul on kasutatud liites villasukka, kuigi Welement AS projekteerija (2018) sõnul, uute elementmajade horisontaalvuukides tihendi kasutamine pole vajalik, sest elementide enda raskusest piisab tiheda lahenduse saamiseks. Seejuures Matek AS spetsialistid (2018) väidavad, et elementide vuukide tihendamiseks ei ole sobiv valik isepaisuva tihendi kasutamine, sest talvel lahendus ei tööta. Aurutõkkekilede omavaheliseks ühendamiseks sobib nt kahepoolne teip või liimiv mastiks. Kinnitusdetailid on lisasoojustuselemendi vöödesse sisse freesitud.



Joonis 35. Üksteise peale toetuvate seina lisasoojustuselementide horisontaalne trapetsiliide.



Joonis 36. Üksteise peale toetuvate seina lisasoojustuselementide horisontaalne hambaga liide.

Joonistel kujutatud kinnitusedetailide ja -tarvikute arvul, mõõdul on illustreerivad.

Horisontaalvuugi laius ja täitmine

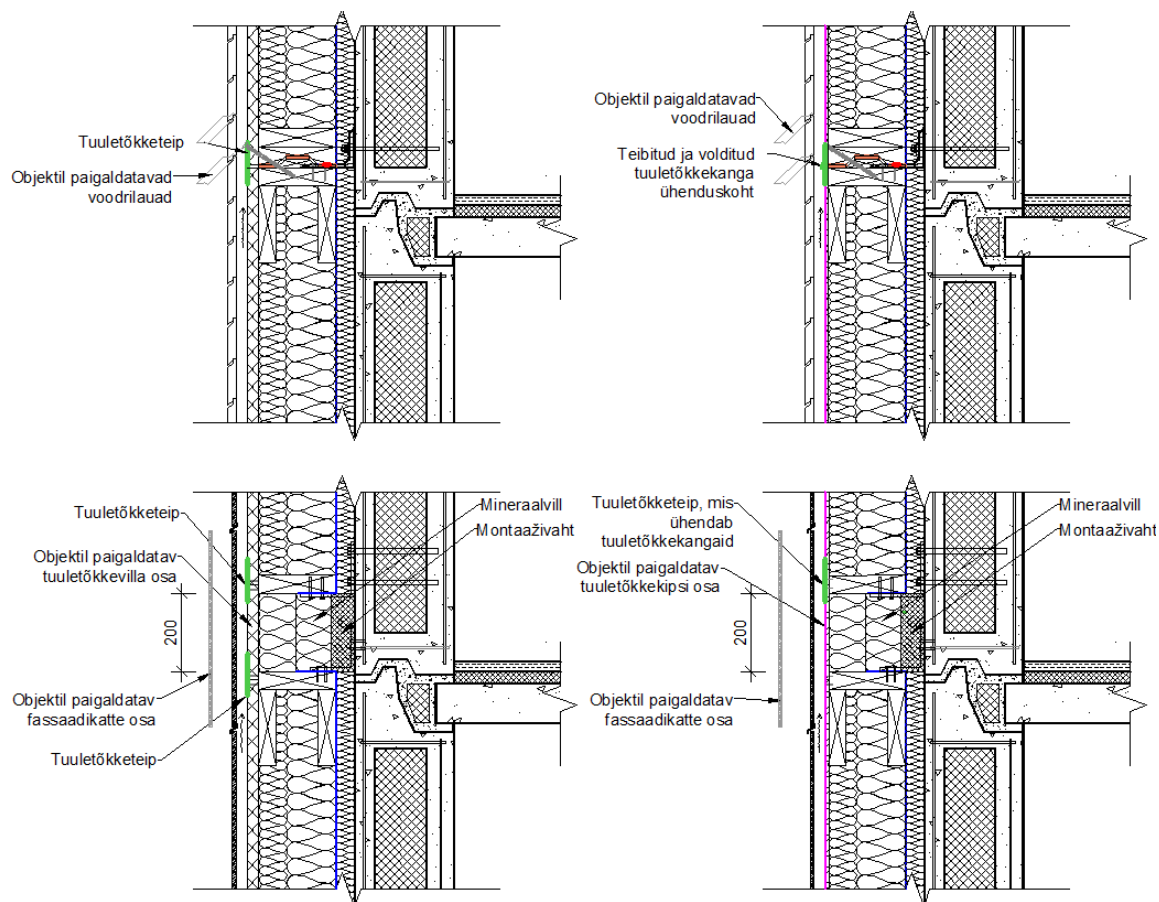
Horisontaalvuugi laius mängib rolli lahenduse puhul, kus iga element on eraldi toetatud. Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimise käigus tõdeti, et elementide horisontaalne liitekoht oli liiga kitsas. Selleks, et liide oleks hästi ligipääsetav isoleerimiseks ja aurutõkkekile ühendamiseks peaks horisontaalvuugi laius olema u 20 cm. Juhul kui aurutõkkekile on teibitud on võimalik ülejäänud vuuk täita vaid villaga. (Matek AS 2018)

Laiade horisontaalvuukide üks arengusuund on ka nt PUR-vahuga täitmine. PUR-vahu eeliseks on see, et ta ei vaja tuule- ega aurutõkkekile (Season 2018). PUR-vahuga vuukide täitmise võimalust on uuritud katsega peatükis 3.4.2.

Horisontaalvuugi katmine ja tuuletõkke ühendamine

Akadeemia tee 5a objektil kasutatud vihmaveeplekk ei olnud andestav muutuvate tolerantside suhtes. Tuuletõketeibi kleepimine oli ebamugav. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Mõlemad probleemid on kõrvaldatavad objektil liitekohale paigaldatava fassaadikattega. Fassaadikattena sobib nii plaatmaterjal kui ka horisontaalne laudis. Tuuletõkkematerjali ühendamist ja fassaadikatte paigaldamist illustreerivad järgnevad joonised. Esimesel joonisel on kujutatud horisontaalsõlme lahendust, kus elemendid on üksteise peale toetatud, tuuletõkkena on kasutatud tuuletõkkevilla ning fassaadikattena on kasutatud laudist (vaata Joonis 37 – vasak ülemine). Teisel joonisel on elemendid samuti üksteise peale toetatud ja fassaadikattena on kasutatud laudist, kuid tuuletõkkena on asendatud tuuletõkkekipsi ja -kangaga (vaata Joonis 37 – parem ülemine). Kolmandal joonisel on kujutatud elemendid, mis on igaüks eraldi toetatud ja tuuletõkkena on kasutatud tuuletõkkevilla ning kaetud on nad plaatmaterjaliga (vaata Joonis 37 – vasak alumine). Neljandal joonisel on kujutatud eraldi toetatud elemente, kus tuuletõkkena on kasutatud tuuletõkkekipsi ja -kangast ning fassaadikattena plaatmaterjali (vaata Joonis 37 – parem alumine).



Joonis 37. Seina lisasoojustuselementide horisontaalsed liitumised. Variandid erinevad üksteisest toetamise, tuuletõkkematerjali ja fassaadikatte valiku poolest.

Horisontaalvuukidest tulenev joonsoojuslähivuse mõju

Seina lisasoojustuselementide liitumisel tekib paratamatult külmasild, mis suurendab hoone soojuskadu. Külmasild tekib tulenevalt sellest, et kohtuvad materjalid, mille soojusjuhtivus on suur. Liitekohtade joonsoojuslähivused ψ on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 10).

Tabel 10. Joonsoojuslähivused olenevalt sein lisasoojustuselementide horisontaalsest liitumisest.

Joonise nr	Sõlme iseloomustus	Tarindi liitekohta joonsoojuslähivus ψ , W/(m·K)
Joonis 27	Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lahendus. Võrreldavate tulemuste saamiseks pole sõlmes arvestatud 70 mm paksust karkasi ja soojustuse kihti.	0,026
Joonis 30	Trapetsliide	0,031
Joonis 31	Hambaga liide	0,031

2018. aasta talvel aset leidnud koolituse „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ osalejatel paluti seinte lisasoojustuselementide horisontaalvuukides tekkinud probleemidele leida lahendusi. Pakutud viisid on toodud lisa (vaata Lisa 4).

3.3.5. Katuseelement ja toetus

3.3.5.1. Kasutatud lahendus

Lahendus

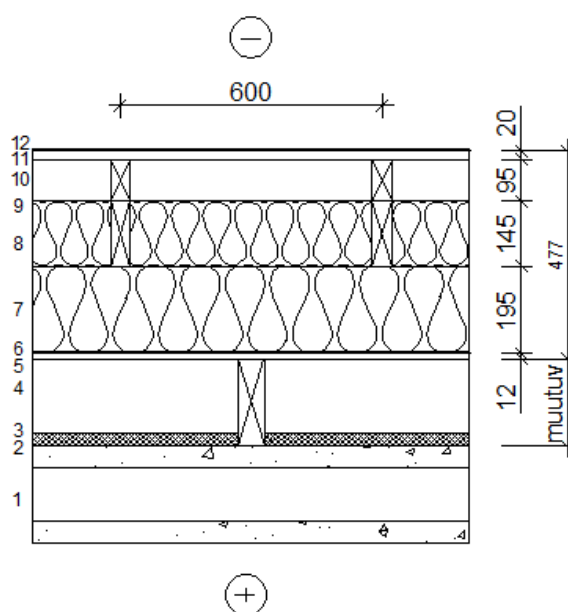
Katuselemendid tootis ja paigaldas samuti Akadeemia tee 5a ehitusobjektile Eesti puitkarkasselemente tootev firma Matek AS.

Hoone olemasoleva katuse moodustasid raudbetoonpaneelid, mis olid kaetud SBS-kattega. Väikese kaldega lamekatusel oli olemas parapett. Olemasolevaid katuse komponente ei eemaldatud ega lammutatud. Kuid tulenevalt tuleohutusnõuetest kaeti olemasolev katusekate 30 mm paksuse villakihiga, et vähendada põõningu põrandakatte süttivustundlikkust. Kattevilla vuugid täideti montaaživahuga (vaata Joonis 39 vasak). Vastuoluliselt selgub hoone rekonstrueerimisprojektist, et olemasolevast ja juurde ehitatavast koosnevale katusekonstruktsiooni tulepüsivusele nõudeid ei seatud. Samal ajal, aga on esitatud nõuded uuele katuse lisasoojustuselemendile – R60. (Sirkel ja Mall OÜ 2016; Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Katuse soojustamise lahenduse valiku juures oli oluline arvestada sellega, et poole hoone ulatuses vajasid katusel ruumi ventilatsioonitorud. Seepärast valitigi lahendus, kus parapettidele toetuvate katuseelementide abil tekib katusele madal ruum kõrgusega vahemikus 0,6-1,2 m (vaata Joonis 39 parem) (Sirkel ja Mall OÜ 2016). Sellise ruumi puhul on olulisim, et sinna ei pääseks külm välisõhk, sest vastasel juhul oleksid pidanud ventilatsioonitorud olema kaetud fooliumkattega mineraalvillakihi ja ning pidama vastu kõikidele ilmastikutingimustele (Kliimakonsult OÜ 2016).

Katuselementide mõõtmed olid kuni 2,4 korda 6,5 meetrit, elemendid asetati pikihoonet (vaata Joonis 40 parem). Katuse lisasoojustuselementide toetamiseks rajati olemasolevale katusele põikihoonet 2,6 või 3,2 meetrise sammuga puidust aluskarkass-sõrestik (vaata Joonis 40 vasak). Seega katuseelemendid toetati kahele kitsamale servale. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Lisasoojustuselemente kasutades saavutati katuse soojuslähivuseks $U = 0,10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Katuse ristlõige on toodud järgneval joonisel (vaata Joonis 38). (Sirkel ja Mall OÜ 2016)



1. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE – raudbetoonist katuselement, $R = 2,3 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.
 2. OLEMASOLEV SBS-KATE
 3. SOOJUSTUS – 30 mm Isover KT 37 mineraalvilla, $\lambda = 0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
 4. PUIDUST KANDEKONSTRUKTSIOON – muutuv kõrgus.
- PUITELEMENT
5. OSB-PLAAT – 12 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
 6. AURUTÕKKEKILE - kile + vuukidele teip Siga Sicrall 60.
 7. SOOJUSTUS – 200 mm Isover KL 35 mineraalvilla, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ + puitroovid (195-45) sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
 8. SOOJUSTUS – 150 mm Isover KL 35 mineraalvilla, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ + puitroovid (145-45) sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
 9. ALUSKATE-TUULETÕKE - Eurosystem Premium Private Label 160 W4/ + teip
 10. ÕHKVAHE – 95 mm + puitroov (95-45) sammuga 600 mm.
 11. OSB-PLAAT – 20 mm.
 12. 2x SBS-KATE

Joonis 38. Soojustatud katuse ristlõige (Sirkel ja Mall OÜ 2016).

Katuse lisasoojustuselementide paksema villakihi puitroovid asusid pikki elementi ja õhema villakihi roovid põiki elementi. Katuseelemendile paigaldati teine kiht SBS-katet

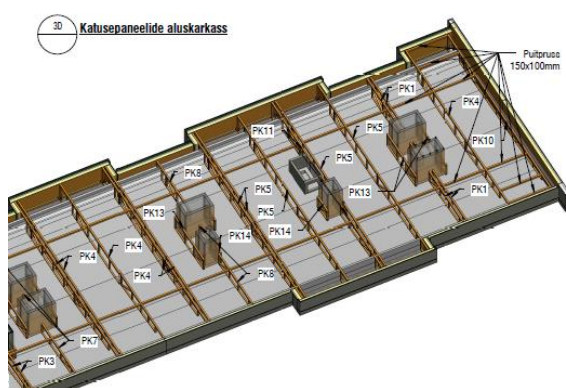
platsil. Samuti toimus objektil elementide ühenduskohtade veekindlaks muutmise. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Katuseelementide valmistamisel pöörati tähelepanu õhukindlatele lahendustele. Ühe tööna kleebiti kinni katuse räästaelementide sarikate ja aluskatte liitumiskohad (vaata Joonis 41 vasak).

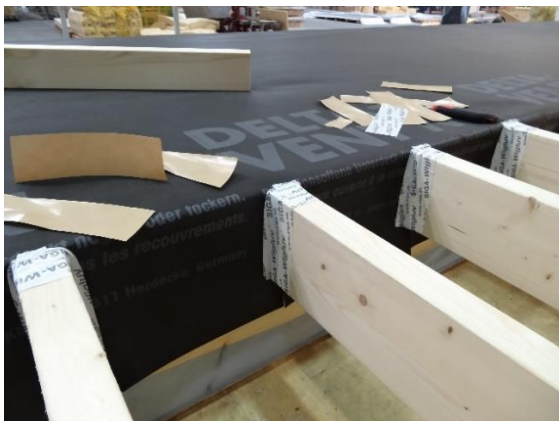
Katuse räästaelementide puhul oli teinegi asjaolu, millele tuli täiendavalt tähelepanu pöörata. Nimelt kaeti viimistlusplaadiga üle parapeti ulatuva katuse lisasoojustuselemendi alumine külg alles objektis (vaata Joonis 41 parem). (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)



Joonis 39. Olemasoleva SBS-katte katmine mineraalvillaga (vasakul), katuse lisasoojustuselementide alune õhkruum (paremal).



Joonis 40. Katuse lisasoojustuselemente kandev tolvärk (vasakul) (Sirkel ja Mall OÜ 2016). Katuseelementide paigaldamine (paremal).



Joonis 41. Räästasarikate teipimine (vasakul) ja räästa katmine fassaadiplaadiga objektile (paremal).

Maksumus

Katuse lisasoojustuselemendi hind on u 78,0 eur/m². Välja toodud hind ei sisalda läbiviike, räästa katmist, elementide omavahelist liitmist, paigaldamist, transportimist jne, ega ka käibemaksu. (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

3.3.5.2. Probleemid

Akadeemia tee 5a rekonstrueerimistööde käigus ei ilmnenud suuri probleeme tehases eeltoodetud katuse lisasoojustuselementidega. Katuse elementide kasutamise suurim miinus on see, et tegemist on suhtelise kalli lahendusega. Lahenduse hinda mõjutavad järgmised tegurid (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018):

- Katuse elementide tootmine ei ole maksimaalselt mehhaniseeritud ning on seetõttu ajakulukas ning kallis.
- Elemendi valmistamine oli väga mitme etapiline töö. Teistsuguse soojuslähivusega soojustusvilla kasutamisega oleks ehk võimalik elemendis erinevaid kihte vähendada ja tootmisaja pealt kokku hoida.
- Katuse lisasoojustuselemente arv oli suur, mille tõttu pikenes ka paigaldusaeg. 946 m² suuruse ala katteks kasutati 63 katuseelementi (Sirkel ja Mall OÜ 2016).
- Räästa katmine platsil tõstis kogu töö hinda.
- Puit toolvärgi ehitamine objektile kestis kaua ning vajab palju tööjõudu.

3.3.5.3. Arengusuunad

Katuse lisasoojutuselementide mõõtmised

Paigaldusaja lühendamise üks võimalusi on katuseelementide pindala kasvatamine (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018). Ajakokkuhoiu ilmne mõju avaldub elementide tõstmiseks ja paigaldamiseks kuluvas ajas. Nii on võimalik väiksema vaevaga katta sama suur pindala ning ka elementide valmistamisel tehases tuleb summaarselt teha vähem aegavõtvaid liigutusi.

Elementide mõõtmiste valikule seavad piirid elemente tootvad tehased, kes on omakorda pidanud piirama mõõtmeid elementide transportimise keerukusest tulenevate võimaluste tõttu. Näiteks suudab Eestis resideeriv ettevõtte Welement AS toota elemente, mille mõõtmised on maksimaalselt 3,2 x 12,0 meetrit (Welement AS projekteerija 2018). Mõõtmistes tulenevate probleemide tõttu eelistatakse, et elemendi mõõtmised jääks 2,8 x 8,0 m piiridesse (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018).

Majanduslikkuse seisukohalt selgub, et ka suuremate elementide kasutamine aitab ka tehtavates kulutustes kokku hoida. Rahaline võit tuleb kraanaga teostatud tõstekordade arvelt. (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Toetus

Tulenevalt katuse lisasoojustuselementide mõõtmiste kasvatamise võimalusest on võimalik vähendada elemente toetavate puidust konstruktsioonide arvukust. Arvukuse vähendamisega on võimalik kokku hoida järgnevate kulutuste arvelt: materjal, tootmine, paigaldamisaeg. Toetus konstruktsioonide arvukuse vähendamine tähendab ka ühtlasi suuremate katuse lisasoojustuselementide kasutamist, mille võõde ja seinte sillide pikkused seega kasvavad. Puidu tugevuse üle arvutamisele pole käesolevas töös keskendutud.

Kandekonstruktsioonide arvukuse vähendamise üks võimalik viis on katuseelementide pööramine põikihoone suunaliseks. Mille tulemusel suurenevad elementide mõõtmised. Kuid sellest hoolimata on tõenäoliselt tegemist lahendusega, millel on rohkem positiivseid kui negatiivseid mõjusid. (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Puidust kandekonstruktsiooni ehitamisega objektil kaotati nii aega kui raha (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018). Õigem oleks toota kandekonstruktsioon fermide näol tehases ning vahetult enne lisasoojustuselementide saabumist paika tõsta (Matek OÜ 2018).

Villa toestuskihi lihtsustamine

Katuse lisasoojustuselemendi lihtsustamise ühe variandina kaaluti soojustusvilla hoidva OSB-plaadi asendamist (vaata Joonis 38 kiht 5) puit roovitisega. Pakutud asenduse puhul suudavad soojustusvilla suure tõenäosusega paigal hoida roovid ja aurutõke, kuid lahendusel on teine negatiivne mõju. Nimelt väheneb lisasoojustuselemendi tulepüsivus. Tulekahju korral sulab aurutõkkekile kiirel ning seeläbi vajub soojustusvill oma asukohalt ära, mille tulemusel pääseb konstruktsioonile õhk praemini ligi, mis on omakorda tulelevikut soodustav asjaolu. (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Elemendi karkass

Katuse lisasoojustuselemendi soojustusvilla kihi paksus peab olema suurem kui 245 mm, et saavutada elemendi soojuslähivuseks $U \geq 0,10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Arvestades seda, et Eestis müüdava hõövelmaterjali kõrgus on tavapäraselt maksimaalselt 245 mm ning laius seejuures 45 mm või 70 mm, tuleb kasutusele võtta nt üks järgnevatest variantidest: hõövelpuidust liitkarkass, liimpuittalad või liimikihtpuit Kerto talad. (Tuuliku Puit OÜ)

Käesolevas lõigus on välja toodud tavatarbijatele mõeldud puitmaterjalide käibemaksuta hinnad selleks, et saada ülevaadet eri materjalide maksumuste suurusjärgudest.

- Hõövelpuidu tavapäraseks tala pikkuseks on 6,0 meetrit. Hõövelpuidu tugevusklassiga C24 ristlõike 45x195 mm jooksva meetri maksumus on u 3,3 eurot ja ristlõike 45x145 mm hind on u 2,5 eur/m. Võrdlusena välja toodud tala paindetugevus on 24 N/mm². (Jürgensohn Production OÜ 2018)
- Liimpuittala eeliseks on see, et lisaks suurematele ristlõigetele on võimalik toota ka pikemaid kui 6,0 meetrиси talasid. Liimpuittala tugevusklassiga GL 24h ristlõikega 80x360 mm hind olenemata tala sellest, et ta on kas 6,0 või 10,0 meetri pikkune on u 15,0 eur/m. Välja toodud liimpuittala paindetugevus on 24 N/mm². (Jürgensohn Production OÜ 2018)
- Kerto-S talad on mõeldud suurtele sildeavadele, toodetav maksimaalne pikkus on 25,0 m. Kerto-S liimkihtpuit tala ristlõikega 51x360 mm ja pikkusega 8,0 m hind on u 17 eur/m (MKJ Baltic OÜ). Kirjeldatud tala paindetugevus on 36 N/mm². (Metsawööd)

Toodud kolme karkassimaterjali kirjelduse põhjal selgub, et väikeste mõõtmetega lisasoojustuselementide tootmisel on soodsaim valida hõövelpuidust karkass. Seejuures kui valitud elementide mõõtmed ületavad üheski suunas kuut meetrit on mõistlik valida,

kas liimpuittalade või liimkihtpuit taladega lahendus. Lõpliku valik on soovitatav teha juba projekti eriärasuste ja konkreetsema hinnapakumise järgi.

2018. aasta talvel aset leidnud koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ osalenute välja pakud lahendused eelmises peatükis nimetatud probleemidel on toodud välja lisas (vaata Lisa 5).

3.3.6. Katuseelemendi paigaldus, kinnitus, liitekohtade tihendus

3.3.6.1. Kasutatud lahendus

Lahendus

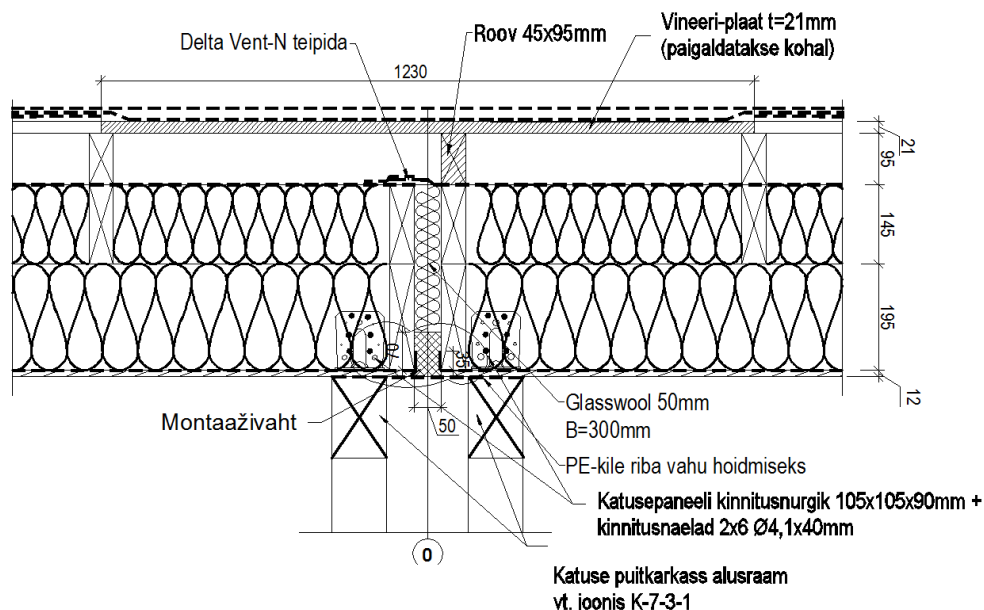
Katuseelementide paigaldamine toimus pärast seinaelementide monteerimist. Katuseelementide abiga kaeti parapeti sein lisasoojustuselementide pealmised pinnad. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

Katuseelemendid toetati põiki hoonet paiknevatele puitkonstruktsioonidele. Elemendid kinnitati puidust toolvärgi külge kinnitusnurgikute abil, kinnitused paiknesid elementide kõigis neljas küljes. Nurgikute kinnitamine toimus vahetult pärast elementide katusele tõstmist ja eelnevalt järgneva elemendi toetamisele toolvärgile. Hoone serva lähedased lisasoojustuselemendid toetati osaliselt olemasolevale parapetile. Täiendav toetus asus läbivalt põiksuunas elementide keskel. (Sirkel ja Mall OÜ 2016)

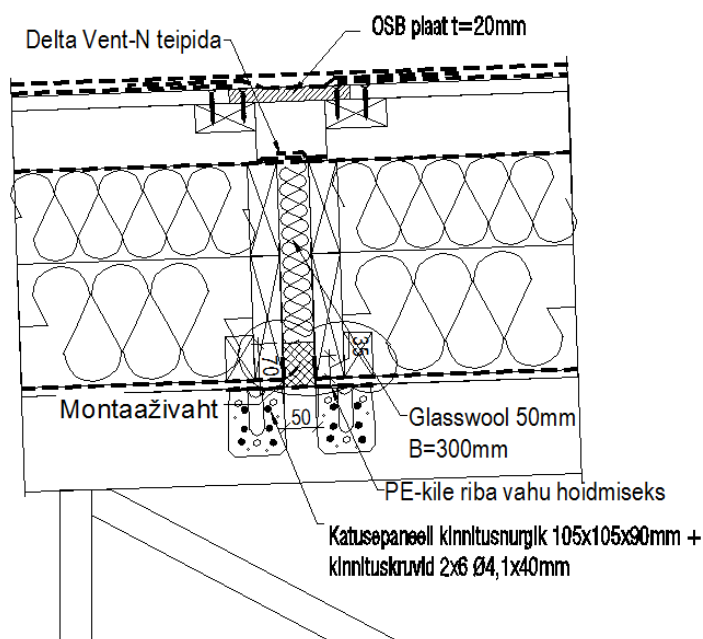
Kasutaud katuse lisasoojustuselemendid olid mõõtmetel suhteliselt väikesed tekitades olukorra, kus elementide vahelised vuugid paiknesid nii katusekaldega piki- kui ka põikisuunas. Katuse kaldega samas suunas paiknev katuseelementide liitekoht on välja toodud alljärgneval joonisel (vaata

Joonis 42) ning ristisuunas paiknev liitekoht on kujutatud ülejärgmisel joonisel (vaata

Joonis 43).



Joonis 42. Katuselementide liitumine, katusekalgega samas suunas (Mateki OÜ 2017).



Joonis 43. Katuseelementide liitumine, katusekaldega risti (Mateki OÜ 2017).

Lisasoojustuselementide paigalduse analüüsis (vaata peatükk 3.2.) selgus, et katuseelementide paigaldamine ise ei olnud probleemne töö ning kulges suhteliselt muretult. Katuseelementide vuukide täitmine ja veekindlaks muutmine oli see-eest põhjustas mitmeid probleeme. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Katuse elementide vuugid täideti ja kaeti järgnevalt. Esmalt teibiti kinni Siga Sicrall aurutõkke teibiga elementide liitekohtadel paiknevate aurutõkkekile ribade servad. Töö

teostati lähenedes elemendile altpoolt kütmata u meetri kõrguselt pööningult. Teise tööna täideti katusel seistes liitumiskohtade alumised kohad montaaživahuga. Pärast montaaživahu kuivamist täideti vuugid käsitsi mineraalvillaga. Seejärel teibiti kinni katuse tuuletõkkekangas. Eelviimase tööna paigaldati vuugi kohale OSB plaat. Lõpuks kaeti vuugi koht SBS kattega (ülejäänud elemendile paigaldati 1 kiht SBSi eelnevalt tehases) ning viimase käiguna kaeti terve katus veelkord üle tervikliku SBS kattega. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Katuseelementide toetamiseks mõeldud toolvärk kinnitati olemasoleva katusekonstruktsiooni peale. Tulenevalt vana katuse ebatasasustest kasutati toolvärgi aluspinna loodi ajamiseks montaaživahtu ja puidust toetustalasid (vaata Joonis 44). (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)



Joonis 44. Toolvärgi toetamine puidust klotsidele.

Maksumus

Katuseelementide paigaldamise maksumus arvestades paigaldust ennast, tõstekraanasid ning liitekohtade tegemist ja katmist on u 42 eur/m² (ei sisalda käibemaksu). Paigaldushinnast umbes pool moodustas liitekohtade täitmine ja katmine ning teise poole moodustas elementide paika tõstmine. (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

Elementide karkassi maksumus on u 36 eur/m², kui arvestada, et elemendid toetuvad tehases toodetud puitfermidele, mille samm on 600 mm. (Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

3.3.6.2. Probleemid

Katuseelementide liitekohtade suurim probleem oli ajakulu. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018). Lisasoojustuselementidega soojustamise üheks ideeks on tavapärastest soojustamisvõimalustest kiirem lahendus, kasutatud katuselahenduse arendamise eesmärgiks on ajakulu vähendamine.

Akadeemia tee 5a objektil tekkis katuselahenduse juures teinegi ning suurem ja mõjutamatu probleem – ilmastik, vihm. Vihma negatiivne mõju avaldus nii toolvärgi ehitamise perioodil kui ka pärast seda kui katuse lisasoojustuselemendid olid paika tõstetud. Tulenevalt sellest, et toolvärk ei olnud enne katuseelementidega katmist korralikult vihma eest kaitstud, sai puit tõsiseid niiskuskahjustusi. Kohati mõõdeti toolvärgi toetusprussi puidu niiskuseks 56% (Tellija fotod 2017), lubatud hoone karkassimaterjali niiskus ei tohtinud olla suurem kui 15% (Sirkel ja Mall OÜ 2016). Üks toolvärgi niiskumise põhjuseid oli see, et see oli toetatud vett imava montaaživahu peale puitmaterjali koore poolega (vaata Joonis 44). Sellisel juhul muutus puiduniiskuse välja kuivamine keeruliseks. Koos märgunud puiduga vettis ka olemasoleva katuse pinnale laotatud mineraalvilla kiht kaotades seega oma soojuslikud omadused. Täiendavalt raskendas olukorda see, et katuseelemendid tõsteti toolvärgile enne kui niiskus jõudis välja kuivada. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Olemasolevate liigsete katuseavade sulgemisel betooniga betoneeriti otse toolvärgi puidust toe vastu (vaata Joonis 45). Taolise teguviisi tulemuseks on veelgi tõusnud puidu suhtelise niiskuse tase.



Joonis 45. Märgunud toolvärgi tugi.

Katuseelementide paigaldamisel tehti teinegi otsus, mille negatiivne mõju avaldus peagi. Kõik katuse lisasoojustuselemendid paigaldati ära ja alles seejärel asuti elementide

vaheliste vuukide tihendamise ning katmise juurde. Tulenevalt väga madalast pööningu ruumist oli töökäik raskendatud. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

Ootamatute vihmasadude tõttu pääses vihm elementide vahele ning jäi pidama juba teibitud aurutõkkekihile. Sellest tulenevalt tekkis kaht laadi probleeme. Kas aurutõkketihedele tekkisid veekogumid või tekkis aurutõkkekihi peal paikneval OSB-plaadile hallitus (vaata Joonis 46).



Joonis 46. Vee kogunemine aurutõkketihedele (vasakul) ja märgunud OSB-plaadi hallitamine (paremal).

Fotode põhjal võib järeldada, et teipimistööd olid hästi tehtud ning lahendus oli õhutihe.

Oluline on välja tuua, et tulenevalt tehtud otsustest suurenes hoone rekonstrueerimiseks tehtud kulutuste maht. Kogu kannatada saanud puit tuli välja vahetada. (Hoonete tervikrenoveerimine ... 2018)

3.3.6.3. Arengusuunad

Tööde teostamise järjekord

Saadudu kogemuse põhjal tõdeb Matek AS, et katuseelementide vuukide tihendamine ja katmine peab toimuma koheselt pärast elementide paigaldamist. Esmalt võimaldab kirjeldatud tööde järjekord teostada elementide aurutõkketihendamist parema ligipääsetavusega, ei pea lähenema madala pööningu kaudu. Teise hüvena saavutavad vuugid õigeaegselt veepidavuse ning kaob risk vihmasadudele. (Matek AS 2018)

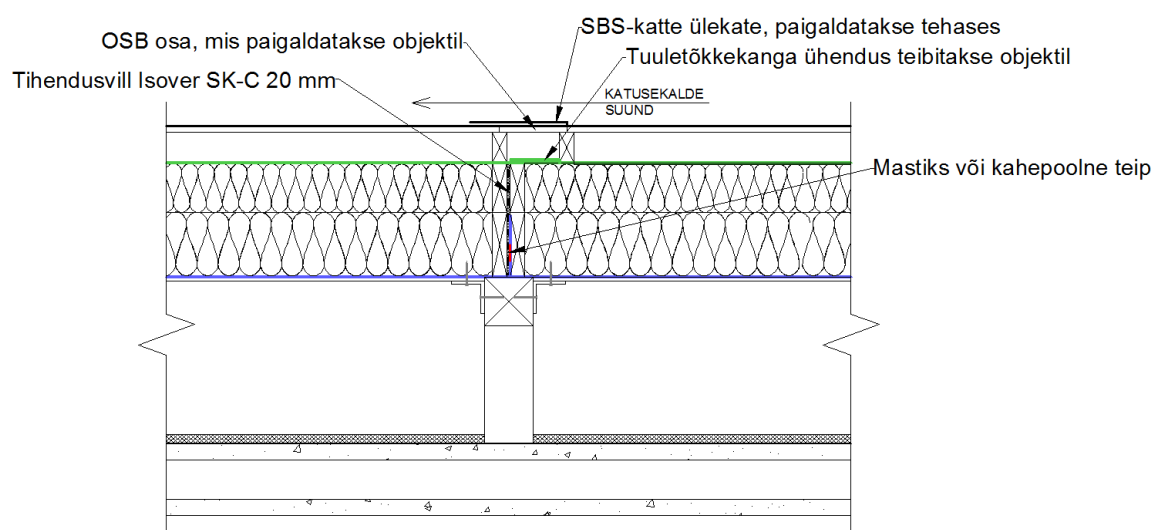
Liitekohtade arv ja lisasoojustuselementide paiknemise suund

Liitekohtade arvu on võimalik vähendada suuremate katuseelementide kasutamisega. Esmane eesmärk on katusekaldega risti paiknevate liitekohtade

vähendamine. Katusekaldega ristiolevatest vuukidest imbub suurema tõenäosusega katusel paiknev vihmavesi sisse. Arvestades võimalike elementide tootmise mõõtmeid, siis õigem oleks elementide asetamine põikihoonet, sellisel juhul tekib vaid üks liide pikihoonet. Väiksema hoonete puhul oleks võimalik hoone katta ka ilma pikivuukideta. (Welement AS projekteerija 2018; Matek AS 2018; Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Liitekohade lahendus

Katuseelemente on võimalik paigaldada tihedalt üksteise kõrvale nii, et platsil täitmist vajavaid vuuke ei teki. Erinevalt seina elementidest vajavad katuseelemendid lisaks vertikaalvuukide ja tihendit horisontaalvuukidesse. Kiirema vihmapidavuse tekitamiseks on võimalik elementidele kinnitada katusekatte külge lahtine ülekate, mis paika tõstes katab ära liitekoha. Liitekoha lahendus on mõeldud nii piki- kui ka põikihoonet paiknevatele vuukidele. Kirjeldatud lahendust iseloomustab alljärgnev joonis (vaata Joonis 47). (Welement AS projekteerija 2018)



Joonis 47. Katuseelementide liitumine.

Elementide toetamine

Elementide toetuskarkassina tasub kasutada eeltoodetud puitferme. Tehases toodetud kandekonstruktsiooni kasutamine on odavam objektis toolvärgi ehitamisest (Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist 2018)

Teise lahendusena tasub kaaluda ruumkarkasside kasutamist. Ruumelemendid koosneksid toetuskarkassi osadest ja juba tehases sinna peale paigaldatud katuse lisasoojustuselemendist. (Matek AS 2018)

Toolvärgi niiskumine

Toolvärgi kaitsmise võimalusi otsese vee eest on mitmeid. Puitkonstruktsiooni vastu otsest betoneerimist tuleks vältida. Samuti on võimalik olukorda vältida kasutades toolvärgi toetusena immutatud puitu või veekindlat vineeri, mis ei reageeri veele.

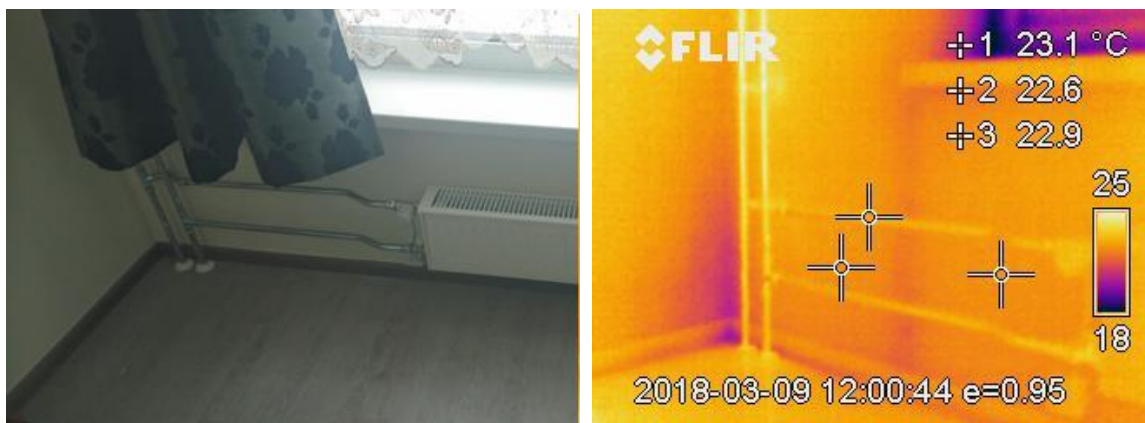
Ühe võimalusena võiks kaaluda toolvärgi toetustalade jätkamist vahedega, mis kaudu koguneb olemasoleva katuse kaldest tulenevalt vihmavesi ühte kohta, kust selle ära juhtimine on lihtsam.

Lõputöö lisas (vaata Lisa 6) on välja toodud koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ osalenute ideed lahenduste edasiarendamiseks.

3.4. Katsed

3.4.1. Seinaelementide õhuleke

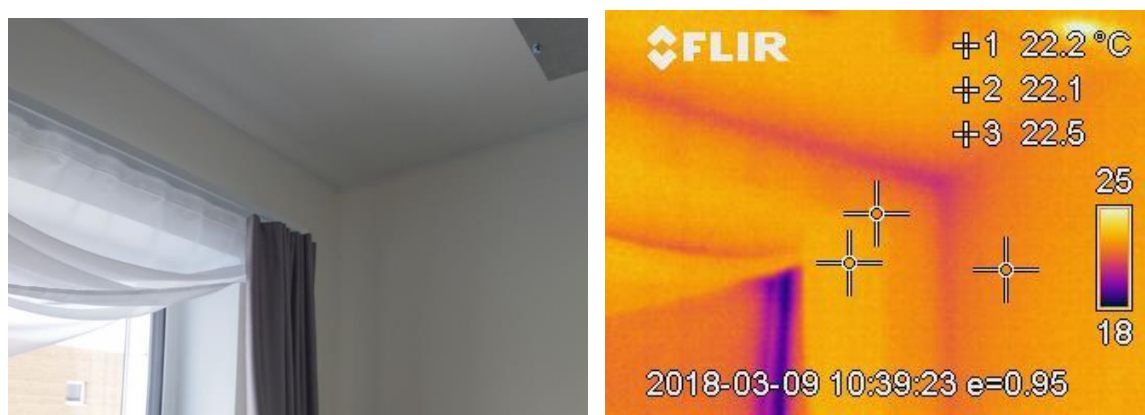
Katse käigus selgus, et välisseina sisepinnatemperatuurist madalamate temperatuuridega kohad ilmnesis järgnevates kohtades: akna liitumine seinaga (vaata Joonis 48, Joonis 49), sein ja lae liitumiskohas (vaata Joonis 50), sein ja põranda liitumiskohas (vaata Joonis 51), ventilatsioonitorude ümber (vaata Joonis 49) ning välisseinte omavahelises liitumiskohas (vaata Joonis 48). Mõõdetud ruumides jäid pindade temperatuuride erinevused vaid mõne kraadi ulatusesse. Teise tulemusena täheldati katse käigus mõnda kohta, kus seinasisepinna temperatuur oli ülejäänud pinnast madalam seetõttu, et seal taga paiknesid lisasoojustuselementide vertikaalsed karkassipostid (vaata Joonis 48).



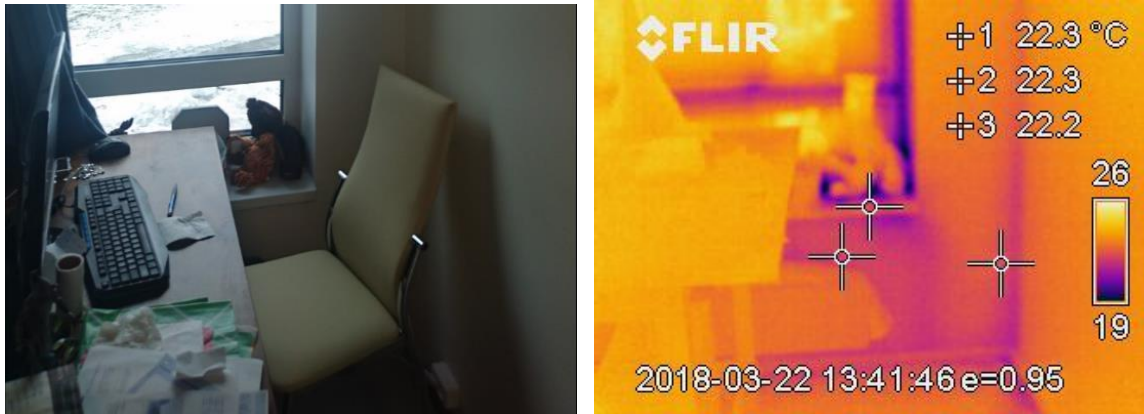
Joonis 48. Korter 64 - välisseina liitumine siseseinaga, aknanurga liitumine seinaga, vertikaalne puitkarkass elemendis. Vasakul on foto reaaset olukorrast, paremal on toodud pindade temperatuurid 50 Pa alarõhu juures (autori fotod).



Joonis 49. Korter 14 - ventilatsiooni läbiviik läbi välisseina. Vasakul on foto reaaset olukorrast, paremal on pindade temperatuurid 50 Pa alarõhu juures (autori fotod).



Joonis 50. Korter 75 – välisseina ja lae liitumine. Vasakul on foto reaaset olukorrast, paremal on pindade temperatuurid 50 Pa alarõhu juures (autori fotod).



Joonis 51. Korter 14 - välisseina ja põranda liitumine. Vasakul on foto reaaset olukorrast, paremal on pindade temperatuurid 50 Pa alarõhujuures (autori fotod).

Sisepindade temperatuuriindeksid on välja toodud järgnevas tabelis (vaata Joonis 16).

Tabel 11. Sisepinna temperatuuriindeksid.

Vaadeldav koht	Joonise nr	Korteri nr	Sisepinna temperatuur θ_{si} , °C	Sisepinna temperatuuri-indeks f_{rsi}
Välis- ja siseseina liitumiskoht	44	64	20	0,86
Lisasoojustuselemendi karkassipost	44	64	22	0,94
Ventilatsioonitoru läbiviik välisseinast	45	14	20	0,88
Aknaraami ja välisseina ühendus	45	14	19	0,84
Välisseina ja lae liitumiskoht	46	75	21	0,94
Välisseina ja põranda liitumiskoht	47	14	22	0,96

3.4.2. Seinaelementide horisontaalvuukide täitmine PUR-vahuga

Pärast vahu laskmist ja selle paisumist oli võimalik kokku võtta katse tulemusi ning hinnata seda, kas PUR vahuga on võimalik täita seina lisasoojustuselementide vahelisi horisontaalvuuke.

Katsega selgus, et survega pihustav vaht paisus sedavõrd palju, et täitis kohati tuulutuseks mõeldud õhkvahe. Samal ajal jäi kohti, kuhu sai vähem vahtu ning tuultõkkevilla serv jäi vahuga katmata. Katmata tuuletõkkevilla serva kohad võimaldavad tuulel pääseda tuuletõkkevilla sisse, mis vähendab tarindi soojapidavust. Tuulutusvahe sulgemine see-eest raskendab tarindist niiskuse väljakuivamist. Kirjeldatud olukorrad on toodud alljärgneval joonisel (vaata Joonis 52).

Vuukide täitmisel esines kohti, kus tulenevalt külaltki kiiresti laienevast vahujaost maandus vaht imiteeritavale fassaadikattele. Samuti lendus kerge vaht lähedal asetsevatele pindadele ilma, et vahujuga oleks sinna suunas keeratud. Nii fassaadikatte kui ka ümbruskondsete pindade kattumine vahuga on toodud järgneval fotol (vaata Joonis 52). Vahutu eemaldades fassaadikattelt jääb sinna heledam kahjustatud koht. Ka juhul kui määrdunud pindasid on võimalik puhastada, pikeneb töö teostamiseks kuluv aeg ning antud juhul otsiti lahendust, millega ei kaasneks täiendavaid tööetappe.



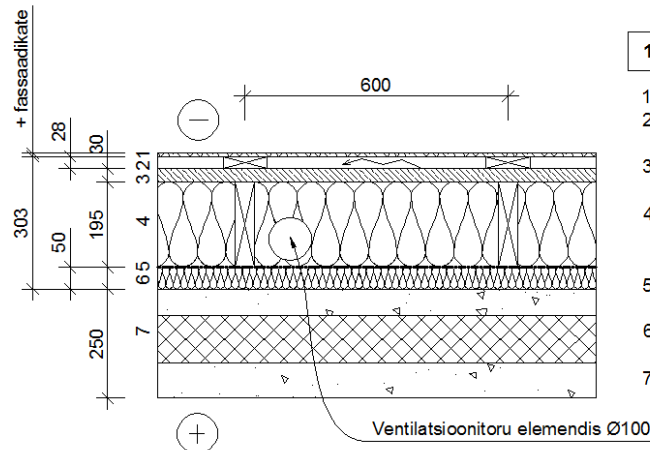
Joonis 52. PUR-vahuga seinaelementide horisontaalvuukide täitmine (autori foto).

3.5. C energiatõhususklassile vastavate katuse ja seina lisasoojustuselementide leidmine

3.5.1. Lisasoojustuselementide ristlõigete valik ja soojusläbivuste leidmine

Seina lisasoojustuselement

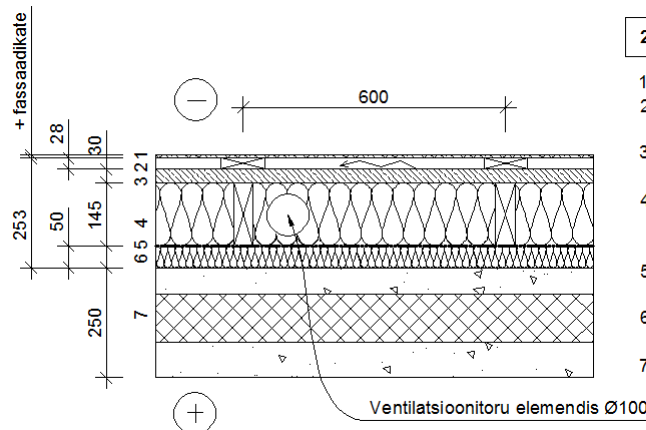
Sobiva seina lisasoojustuselemendi otsingul kaaluti nelja võimalikku ristlõiget. Ristlõigete pealt vaated on ära toodud alljärgnevatel joonistel (vaata Joonis 53, Joonis 54, Joonis 55, Joonis 56).



1. 195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL

1. FASSAADIKATE - nt tsementkiudplaat või laudis
2. ÕHKVAHE - 28 mm + vertikaalsed puitroovid 28x70 mm sammuga 600 mm
3. TUULETÕKE - 30 mm Isover Facade RKL 31, $\lambda = 0,031$ W/(m·K) ning ühendusteip vuukidele
4. SOOJUSTUS - 195 mm Isover KL 35 mineraalvill, $\lambda = 0,035$ W/(m·K) + vertikaalne puitkarkass 45x195 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13$ W/(m·K)
5. AURUTÕKE - Isover Vario KM Duplex UV ning ühendusteip vuukidele
6. PUHVERVILL - 50 mm Isover KT 37 mineraalvill, $\lambda = 0,037$ W/(m·K)
7. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 250 mm raudbetoon seinaelement, $R = 1,0$ W/(m²·K)

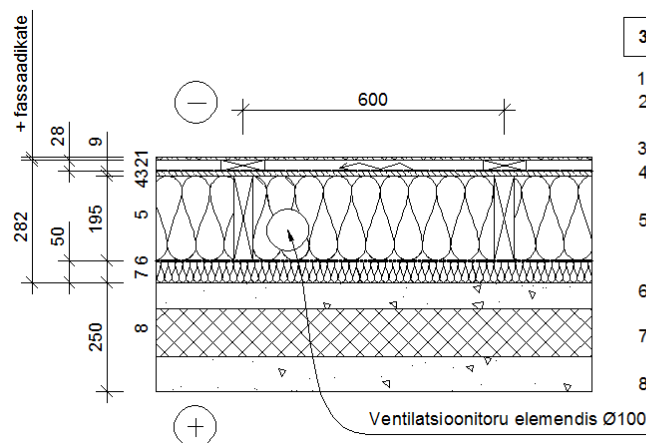
Joonis 53. Seinaelement – variant 1. 195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL.



2. 145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL

1. FASSAADIKATE - nt tsementkiudplaat või laudis
2. ÕHKVAHE - 28 mm + vertikaalsed puitroovid 28x70 mm sammuga 600 mm
3. TUULETÕKE - 30 mm Isover Facade RKL 31, $\lambda = 0,031$ W/(m·K) ning ühendusteip vuukidele
4. SOOJUSTUS - 145 mm Isover KL 35 mineraalvill, $\lambda = 0,035$ W/(m·K) + vertikaalne puitkarkass 45x195 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13$ W/(m·K)
5. AURUTÕKE - Isover Vario KM Duplex UV ning ühendusteip vuukidele
6. PUHVERVILL - 50 mm Isover KT 37 mineraalvill, $\lambda = 0,037$ W/(m·K)
7. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 250 mm raudbetoon seinaelement, $R = 1,0$ W/(m²·K)

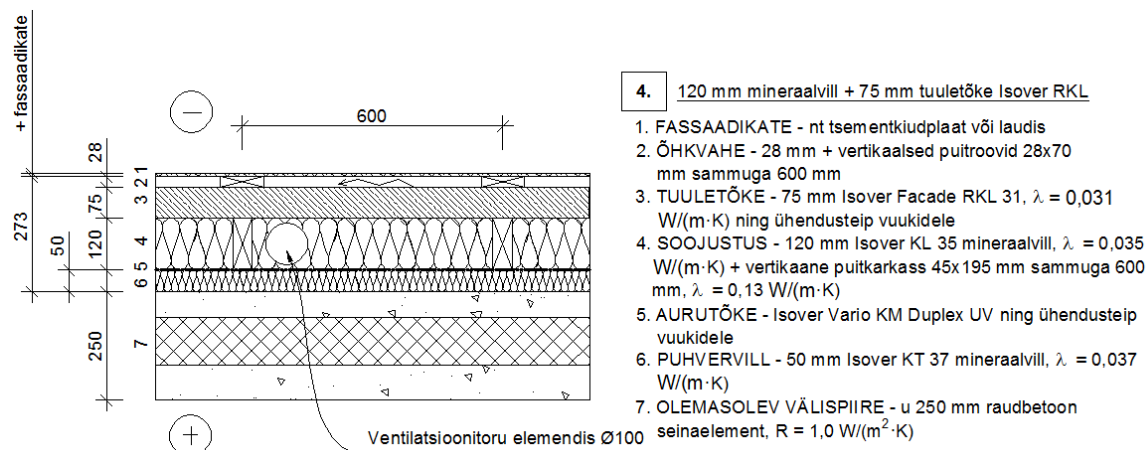
Joonis 54. Seinaelement – variant 2. 145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL.



3. 195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas

1. FASSAADIKATE - nt tsementkiudplaat või laudis
2. ÕHKVAHE - 28 mm + vertikaalsed puitroovid 28x70 mm sammuga 600 mm
3. TUULETÕKKEKANGAS - Monier Divowind
4. TUULETÕKKEKIPS - 9 mm GU-Norgips, $\lambda = 0,25$ W/(m·K) vuugid teibitud
5. SOOJUSTUS - 195 mm Isover KL 35 mineraalvill, $\lambda = 0,035$ W/(m·K) + vertikaalne puitkarkass 45x195 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13$ W/(m·K)
6. AURUTÕKE - Isover Vario KM Duplex UV ning ühendusteip vuukidele
7. PUHVERVILL - 50 mm Isover KT 37 mineraalvill, $\lambda = 0,037$ W/(m·K)
8. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 250 mm raudbetoon seinaelement, $R = 1,0$ W/(m²·K)

Joonis 55. Seinaelement – variant 3. 195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips- ja kangas.



Joonis 56. Seinaelement – variant 4. 120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL.

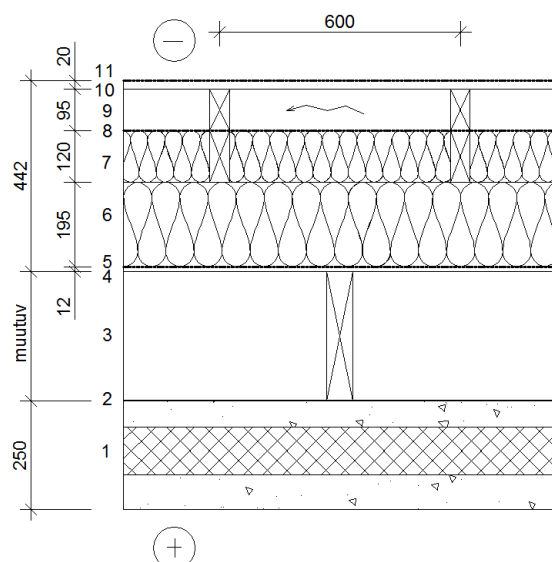
Leitud seina lisasoojustuselementide soojusläbivused koos olemasoleva välispiirdetarindiga on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 12). Samuti on võrdlusena välja toodud üle arvutatud rekonstrueerimisjärgne Akadeemia tee 5a suurpaneel korterelamu välisseina soojusläbivus, mis on tähistatud lühendiga A5a.

Tabel 12. Seina lisasoojustuselementide variantide soojusläbivused.

Variandi nr	Elemendi lühikirjeldus	Soojusläbivus U, W/(m ² ·K)
1	195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	0,127
2	145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	0,146
3	195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas	0,170
4	120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL	0,132
A5a	195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	0,104

Katuse lisasoojustuselement

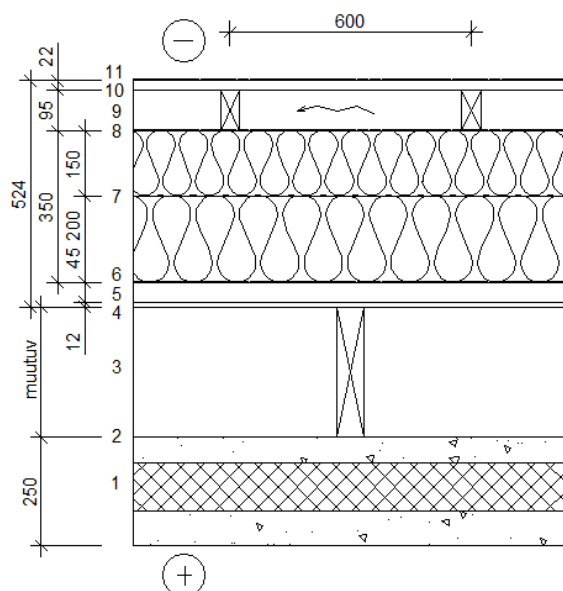
Sobiva katuse lisasoojustuselemendi valikul kaaluti viit lahendust, mis on toodud alljärgnevatel joonistel (vaata Joonis 57, Joonis 58, Joonis 59, Joonis 60, Joonis 61).



1 195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill

- OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 220 mm raudbetoonelement, $R = 1,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- OLEMASOLEV SBS-KATE
- PUITKONSTRUKTSIOON - muutuv kõrgus
- OSB-PLAAT - 12 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- AURUTÕKKEKILE - vuugid teibitud
- SOOJUSTUS - 200 mm mineraalvill Isover KL 35
 $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ + puitkarkass 45x195 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- SOOJUSTUS - 125 mm mineraalvill Isover KL 35
 $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ + puitkarkass 45x120 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- TUULETÕKE - tuuletõkkekangas teibitud vuukidega
- ÕHKVAHE - puitroovid 45x95 mm sammuga 600 mm
- OSB-PLAAT - 20 mm
- SBS-KATE - 2 kihti

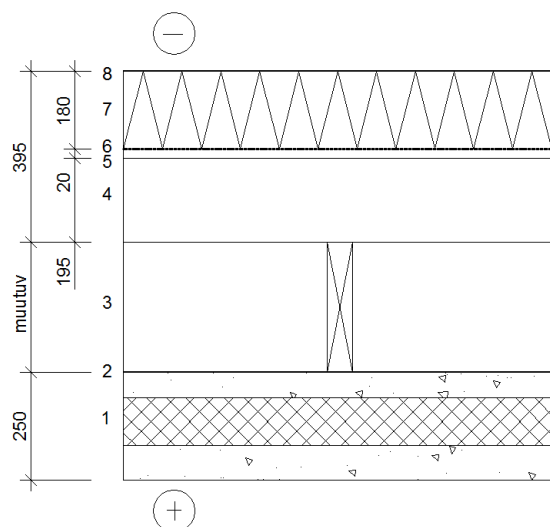
Joonis 57. Katuseelement – variant 1. 195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill.



2 350 mm liimpuit/mineraalvill

- OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 220 mm raudbetoonelement, $R = 1,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- OLEMASOLEV SBS-KATE
- PUITKONSTRUKTSIOON - muutuv kõrgus
- OSB-PLAAT - 12 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- INSTALATSIOONI- JA KINNITUSLATT - 45x20 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- AURUTÕKKEKILE - teibitud vuukidega
- SOOJUSTUS - 200+150 mm mineraalvill Isover KL 35
 $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ + liimpuit 42x350 sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- TUULETÕKE - tuuletõkkekangas teibitud vuukidega
- ÕHKVAHE - puitroovid 45x95 mm sammuga 600 mm
- PUITLAASTPLAAT - 22 mm
- SBS-KATE - 2 kihti

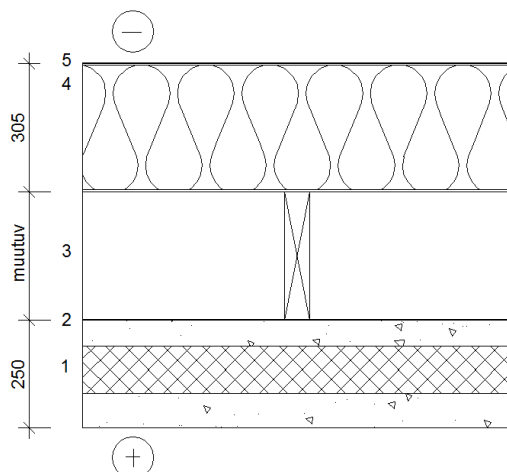
Joonis 58. Katuseelement – variant 2. 350 mm liimpuit/mineraalvill.



3 195 mm karkass + 180 PIR-plaat

1. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 220 mm raudbetoonelement, $R = 1,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
2. OLEMASOLEV SBS-KATE
3. PUITKONSTRUKTSIOON - muutuv kõrgus
4. ELEMENDI KARKASS - 45x195 mm sammuga 600 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
5. OSB-PLAAT - 20 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
6. AURUTÕKE - IKO Shield ALU/SA või IKO Shield PRO ALU/SA
7. SOOJUSTUS - PIR IKO Enertherm ALU 180mm, $\lambda = 0,022 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
8. KATE - aluskate IKO base Quadra + pealiskate IKO Carrara F

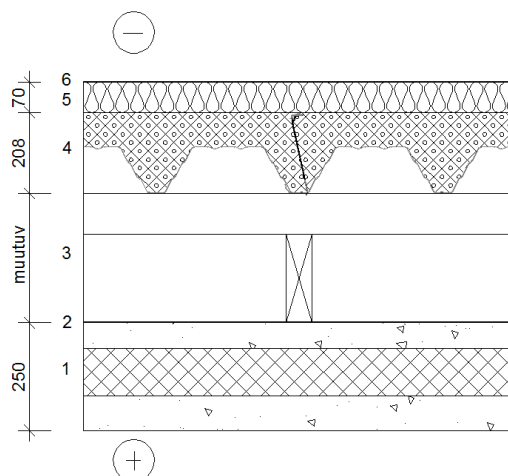
Joonis 59. Katuseelement – variant 3. 195 mm karkass + 180 PIR-plaat.



4 Sandwich-paneel

1. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 220 mm raudbetoonelement, $R = 1,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
2. OLEMASOLEV SBS-KATE
3. PUITKONSTRUKTSIOON - muutuv kõrgus
4. SANDWICH-PANEEL - 300 mm Paroc AST-L, $U = 0,12 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
5. SBS-KATE - 2 kihti

Joonis 60. Katuseelement – variant 4. Sandwich-paneel.



5 Sandwich paneel + PIR-plaat

1. OLEMASOLEV VÄLISPIIRE - u 220 mm raudbetoonelement, $R = 1,0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
2. OLEMASOLEV SBS-KATE
3. PUITKONSTRUKTSIOON - muutuv kõrgus
4. SANDWICH-PANEEL - 100 mm IPN südamikuga, $R = 5,61 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
5. LISASOOJUSTUS - 70 mm PIR isolatsiooniplaat, $\lambda = 0,022 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, mis on kinnitatud mehaaniliste kinnititega
6. SBS-KATE - 2 kihti

Joonis 61. Katuseelement – variant 5. Sandwich paneel + PIR-plaat.

Leitud katuse lisasoojustuselementide soojuslähivused koos olemasoleva välispiirdetarindiga on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 13). Samuti on võrdlusena välja toodud üle arvutatud rekonstrueerimisjärgne Akadeemia tee 5a suurpaneel korterelamu katuse soojuslähivus, mis on tähistatud lühendiga A5a.

Tabel 13. Katuse lisasoojustuselementide variantide soojuslähivused.

Variandi nr	Elemendi lühikirjeldus	Soojuslähivus U, W/(m ² ·K)
1	195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill	0,117
2	350 mm liimpuit/mineraalvill	0,116
3	195 mm mineraalvill + 180 mm PIR-plaat	0,120
4	Sandwich-paneel	0,120
5	Sandwich-paneel + PIR-plaat	0,103
A5a	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill	0,114

3.5.2. Lisasoojustuselementide maksuste leidmine

Seina lisasoojustuselement

Seine lisasoojustuselementide ristlõigete hindade määramisel saadi hinnapakumised kahelt puitelementmajasid tootvalt ettevõtelt. Hinnapakumistes toodi välja, et sein lisasoojustuselementide hinnad on käibemaksuta ning sisaldavad vaid ristlõigete joonistel kirjeldatud konstruktsioonikihte ning kihtide õhukindlaks muutmiseks vajalikke teipe. Seega pakutud hinnad ei sisalda, elementide transportimist, ventilatsioonitorusid, avatäiteid, lisatarvikuid nagu nt aknaplekke, aknapalesid, vihmaveesüsteem, rotivõrke ega ka aknapalede viimistlemist seest poolt. Elementide paigaldamine on arvestatud autokraanaga. (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

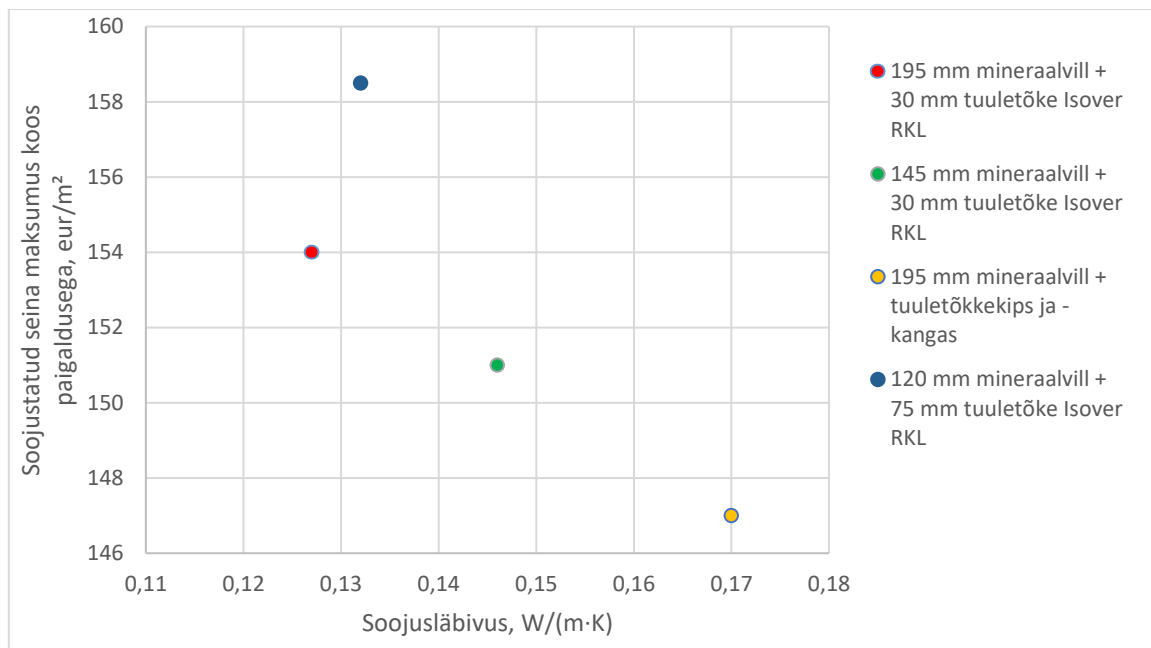
Kahe ettevõtte määratletud elementide, nende paigalduse ja kinnituse orienteeruvad hinnad on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 14). Üks suur erinevus ettevõtete pakumiste vahel on see, et firma nr 1 on arvestanud puhvervilla paigaldusega objektil ja firma nr 2 tehases. Samuti ka see, et firma nr 1 on arvestanud hindade koostamisel objekti seinamahuga 1 000 m² ja firma nr 2 pole mahtu välja toonud. (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

Tabel 14. Seinä lisasoojustuselementide variantide maksumused (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018).

Variandi nr			1		2		3		4		A5a	
Elemendi variandi kirjeldus			195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL		145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL		195 mm mineraal-vill + tuule- tõkkekips ja -kangas		120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL		195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	
Soojuslähivus U, W/(m²·K)			0,127		0,146		0,170		0,132		0,104	
Hinnapakumise koostanud ettevõtte nr			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Seina- elemendi maksumus, eur/m²	Koos elementide liitekohtade lahendusega		80		78		73		85			
	Vaid elemendi hind			56		52		49		60		67
Seina- elemendi paigaldus- hind, eur/m²	Paigaldus koos tõste- tehnika ja liitekohtade viimistle- misega	Paigaldus koos tõste- tehnikaga		28		28		28		28		28
		Liitekohtade täitmine ja katmine		18		18		18		18		18
	Ilma tõste-tehnikata		20		20		20		20			
	Kinnitus- kronsteinide hind, eur/m²	Detailide hind		10	11	10	11	10	11	10	11	
Paigalduse hind koos tõste- tehnika ja geodeediga		18		18		18		18		18		
Krunditud ja 2 korda värvitud laudise maksumus koos paigaldusega, eur/m²			21	20	21	20	21	20	21	20		20
Lahendusemaksumus kokku, eur/m²			157	151	155	147	150	144	162	155		162
Keskmine maksumus, eur/m²			154		151		147		158,5			

Hinnapäringute abil ei õnnestunud mõlemalt firmalt saada kõiki soovitud maksumusi ning seetõttu on ettevõtte 1 lahendusmaksumuste summas kasutatud osaliselt teise ettevõtte määratud seinaelementide paigaldamiseks kuluvat tõstetehnika hinda. Teise ettevõtte lahendusmaksumuste koondhinnas on seevastu arvestatud esimese ettevõtte määratud kinnituskronsteinide paigaldamise kulu. Elementide maksumustes on fassaadikattena arvestatud mõlema firma puhul nende endi pakutut odavaimat lahendust – krunditud ja värvitud puitlaudist (vaata 3.3.2.3.). (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018).

Järgneval graafikul on välja toodud nelja küsitud seinä lisasoojustuselementide soojuslähivused ja kahe pakkumise koondhinna keskmise järgi leitud maksumused (vaata Joonis 62).



Joonis 62. Seina lisasoojustuselementide maksumused koos paigaldusega ning soojustatud tarindi soojuslähivus.

Katuse lisasoojustuselement

Katuseelementide hinnad on töötud alljärgnevas tabelis (vaata Tabel 15). Katuseelementide hinnas on arvestatud vaid elementide konstruktsioonikihte ja kihtide õhukindlaks muutmiseks mõeldud teipe, hinnad ei sisalda käibemaksu. Toodud hinnad ei sisalda transportimist, räästa lahendust ja läbiviike. Paigaldushinnad on toodud arvestusega, et tööd teostatakse autokraana abil. (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018)

Esimese ettevõtte pakkumises on arvestatud katuse mahuga 1 000 m² ning teise ettevõtte pakkumises ei ole objekti mahuga arvestatud. Veelgi olulisema erinevusena tuleb tähele panna, et esimene ettevõtte pole arvestanud teise SBS-katte kihi paigaldamisega ning teine ettevõtte on arvestanud, et kaks kihti SBS-katet paigaldatakse tehases ning liitekohad lahendatakse objektil. (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajade tootev ettevõtte 2018)

Tabel 15. Katuse lisasoojustuselementide variantide maksumused (Puitkonstruktsioone tootev ettevõtte 2018; Puitelementmajasid tootev ettevõtte 2018).

Variandi nr			1	2	3	4	A5a
Elemendi variandi kirjeldus			195 mm mineraalvil I + 120 mm mineraalvil I	350 mm liimpuit/ mineraal- vill	195 mm mineraalvil I + 180 mm PIR- plaat	Sandwich- paneel	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill
Soojus-läbivus U, W/(m²·K)			0,117	0,116	0,120	0,120	0,114
Hinnapakumise koostanud ettevõtte nr			2	1	2	2	2
Katuseelemendi maksumus, eur/m²			77	115	115	110	79
Katuse- elemendi paigaldus- hind, eur/m²	Paigaldus koos tõstetehnika ja liitekohtade viimistlemisega	Paigaldus koos tõste- tehnikaga	21		21	21	21
		Liitekohtade täitmine ja katmine	21		21	21	21
	Ilma tõstetehnikata			14			
Katuseelementide kandekarkassi maksumus, eur/m²			36		36	36	36
Maksumus kokku, eur/m²			155	193	193	188	157

Tabelis toodud esimese ettevõtte koondhindade määramisel kasutati vaid ettevõtte nr kaks hinnapakumises välja toodud hindu. Ettevõtte 1 koondhinnamääramisel kasutati esimese ettevõtte poolt leitud elemendi hinda ning paigalduse, toolvärgi ja vuukide hinnana ettevõtte kaks määratud hindasid.

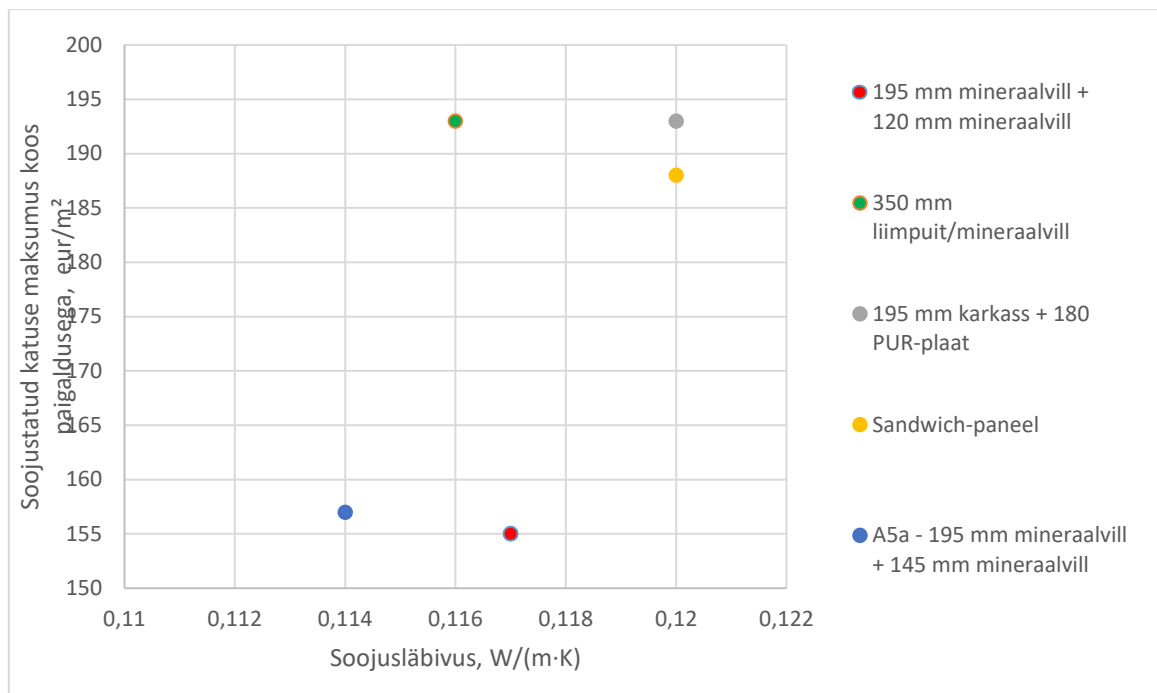
Kolmanda katuse lisasoojustuselementi variandi hindade määramisel saadi hinnad ka kolmanda ettevõtte poole, kelle põhitööks on materjalide müümine. Sellest tulenevalt pakuti hinda katuse soojustamise ja katmise materjalide, jättes välja kandvakonstruktsiooni osa (Joonis 59 kihid 3-5). Kihtide täpsustused ja maksumused on välja toodud järgveas tabelis (vaata Tabel 16). Antud juhul on valitud katusekate, mille pealispinna värv on valge. Valge värvi asendamisel mustaga on võimalik lahenduse hinda veel u 1,0 euro võrra odavamaks muuta. (Ehitusmaterjalide edasimüüja 2018)

Tabel 16. Katuse lisasoojustuselemendi variandi 3 materjalid (Ehitusmaterjalide edasimüüja 2018).

Variant	Kiht	Materjal	Materjalide hind, eur/m ²	Paigalduse hind, eur/m ²	Hind kokku, eur/m ²
1	Katusekate - keevitav gaasiga	IKO Carrara F 8m	39	8	47
	Katusekatte aluskate	IKO Base Quadra 6m			
	Soojustus	PIR IKO Enertherm ALU 180 mm			
	Aurutõkke liim	IKO Pro PU-liim			
	Aurutõkke liimimisega	IKO Shield PRO ALU			
2	Katusekate - keevitav gaasiga	IKO Carrara F 8m	37	8	45
	Katusekatte aluskate	IKO Base Quadra 6m			
	Soojustus	PIR IKO Enertherm ALU 180 mm			
	Aurutõkke mehaaniliselt kinnitatud	IKO Shield ALU/SA			

Viienda katuse lisasoojustuselemendi variandi maksumuse määras ettevõtte, mis tegeleb materjalide müügiga ning põhimahus paigaldamisega ei tegele. Seega on viienda lahenduse soojustusmaterjalide maksumus toodud koos transpordiga objektile ning ilma paigalduse ja paigaldustarvikuteta. Trapetsprofiiliga Sandwich-paneeli ja 70 mm paksuse PIR-soojustusplaadi maksumus kokku u 60 eur/m². Ligikaudse hinna määramisel on arvestatud, et katuse pindala on 1000 m². (Ehitusmaterjalide ettevõtte 2018)

Järgneval graafikul on välja toodud nelja küsitud ja Akadeemia tee 5a katuse lisasoojustuselementide soojusläbivused ja leitud lahenduste maksumused (vaata Joonis 63).



Joonis 63. Katuse lisasoojustuselementide maksumused koos paigaldusega ning soojustatud tarindi soojuslähivus.

Peatükis välja toodud hinnad on orienteeruvad ning reaalse objekti maksumuse määramisel tuleb eraldi pöörduda mõne puitkonstruktsioone tootva ettevõtte poole konkreetsete soovidega.

3.6. Akadeemia tee 5a korterelamu näitel C energiatõhususklassile vastavate välispiirete soojuserikadude väärtused

3.6.1. Soojuskaod läbi piirdetarindite

Peatükis 3.5.1. väljatoodud seinasoojustuselementide ja alusseina soojuslähivused on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 17). Tabeli viimases osas on välja toodud üle arvutatud Akadeemia tee 5a paneelramu rekonstrueerimisel kasutatud elementide ja olemasoleva seinasoojustuse ühised soojuslähivused. Samuti on tabelis välja toodud Akadeemia tee 5a korterelamu välisseina sisepindala ning hoone soojuserikadu läbi välisseinte, mis piiravad köetud ruume ja kütmata pööningut.

Hoones ehitati lodžad kinni ja lisasoojustuselemendid tõsteti tühja ava ette, nendes kohtades jäi asendama olemasolevat seinasipssein. Alljärgnevas tabelis on

kirjeldatud lahendus tähistatud tulbas „Alus sein“ kirjaga „kips“ ning vana raudbetoonpaneeliga lahendus on tähistatud sõnaga „rb paneel“.

Tabel 17. Seinä soojuserikadu tulenevalt lisasoojustuselemendi variandist.

Soojuslähivuskaod läbi seinä olenevalt seinä lisasoojustuselemendi valikust						
Variant	Kirjeldus	Alus sein	Soojuslähivus U_i , W/(m ² *K)	Välispiirde pindala A_i , m ²	Vaadeldava piirdetarindi soojuserikadu H_{tarind} , W/K	Piirdetarindi soojuserikadu kokku H_{tarind} , W/K
1	195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	rb paneel	0,127	1 068,8	135,7	204,1
		kips	0,134	510,3	68,4	
2	145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	rb paneel	0,146	1 068,8	156,0	235,6
		kips	0,156	510,3	79,6	
3	195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas	rb paneel	0,170	1 068,8	181,7	274,6
		kips	0,182	510,3	92,9	
4	120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL	rb paneel	0,132	1 068,8	141,1	212,0
		kips	0,139	510,3	70,9	
A5a	195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	rb paneel	0,104	1 068,8	111,6	167,2
		kips	0,109	510,3	55,6	

Peatükis 3.5.1. esitatud katuse variantide ja rekonstrueerimisprotsessis (A5a) realselt kasutatud katuse lisasoojustuselementide soojuslähivused ja sellest tulenevad katusetarindi soojuserikad on leitavad järgnevalt tabelist (vaata Tabel 18).

Tabel 18. Katuse soojuserikadu tulenevalt lisasoojustuselemendi variandist.

Soojuslähivuskaod läbi katuse olenevalt katuse lisasoojustuselemendi valikust				
Variant	Kirjeldus	Soojuslähivus U , W/(m ² *K)	Välispiirde pindala A , m ²	Piirdetarindi soojuserikadu kokku H_{tarind} , W/K
1	195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill	0,117	784,0	91,7
2	350 mm liimpuitkarkass/ mineraalvill	0,116	784,0	90,9
3	195 mm karkass + 180 PIR-plaat	0,120	784,0	94,1
4	Sandwich-paneel	0,120	784,0	94,1
5	Sandwich-paneel + PIR-plaat	0,103	784,0	80,8
A5a	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill	0,114	784,0	89,4

Kogu hoone piirdetarindite soojuserikao leidmiseks tuleb arvutada ka järgnevate tarindite soojuslähivused ja pindalad: pörand, välisüksed ning aknad. Avatäidete ja pörandi soojuslähivuskaod on välja toodud tabelis (vaata Tabel 19).

Tabel 19. Ülejäänud piirdetarindite soojuslähivuskaod.

Soojuslähivuskaod läbi hoone tarindite				
Piirdetarind	Kirjeldus	Soojuslähivus $U_i, W/(m^2 \cdot K)$	Välispiirde pindala A_i, m^2	Vaadeldava piirdetarindi soojuserikadu $H_{tarind}, W/K$
Põrand	põrand kütmata keldri kohal	0,335	712,7	238,8
Välisüksed	vabalt valitav	1,100	9,9	10,9
Aknad	kolmekordne klaaspakett	1,100	487,9	536,7

3.6.2. Soojuskaod läbi külāsildade ja sisepinna temperatuuriindeksid

Joonkülāsildadest tuleneva soojuskaod leidmiseks valiti seina lisasoojustuselemendina variant 3 (195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas). Variant 3 valiti seetõttu, et selle elemendi soojuslähivuse näitajad on kõige kehvemad (vaata Tabel 12) ning eesmärk on leida lahendus, mis igal juhul annab välja tervikuna C energiatõhususe klassile esitatud nõuded. Katuse lisasoojustuselemendina valiti variant 3 (195 karkass + 180 mm PIR-plaat) seepärast, et soojuslähivuse väärtus vastav täpselt KredExi poolt esiatatud nõuetele.

Kirjeldatud tarindilahenduste sõlmilahenduste soojuslähivuskaod ning Akadeemia tee 5a korterelamu järgi leitud külāsildade pikkused on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 20).

Tabel 20. Liitekohtade soojuslähivuskaod ja sisepinna temperatuuriindeksid.

Külāsillad	Soojuslähivuskaod läbi liitekohtade			Sisepinna temperatuuriindeks
	$\psi, W/(m \cdot K)$	l, m	$H_{liitekoht}, W/K$	
Välissein - välissein (vn) ol.ol+kips	0,081	222,08	18,2	0,95
Välissein - välissein (sn) ol.ol+ol.ol	-0,036	166,56	-6,0	0,99
Välissein ol.ol - sisesein ol.ol	0,025	357,84	8,9	0,96
Välissein kips - sisesein kipsol.ol	0,029	127,80	3,7	0,96
Välissein ol.ol - vahelagi ol.ol	0,048	550,35	26,4	0,96
Välissein kips - vahelagi ol.ol	0,074	353,76	26,2	0,96
Aken välisseinas ol.ol	0,106	515,20	54,6	0,98
Aken välisseinas kips	0,089	688,40	61,3	0,98
Uks välisseinas kips	0,089	22,22	2,0	0,98
Põranda sõlm kips	0,296	150,69	44,6	0,96
Katus ol.ol	0,023	150,69	3,5	0,98
Kokku $H_{liitekohad}, W/K$			243,4	

3.6.3. Soojuskadude leidmine läbi õhulekete

Akadeemia tee 5a suurpaneel korterelamu soojuserikadu läbi õhulekete on toodud järgnevas tabelis (vaata Tabel 21). Samuti on tabelis toodud Akadeemia tee 5a välispiirete pindala arvestusega, et kelder on kütmata ruum. Pööningu seinad on arvestatud välispiirete mahtu.

Tabel 21. Akadeemia tee 5a korterelamu soojuserikadu läbi õhulekete.

Õhulekkest tulenev piirdetarindite soojuserikadu			
Nimetus	Tähistus	Suurus	Mõõtühik
Hoone välispiirete sisepindala	A	3 561,7	m ²
Infiltratsiooni õhuhulk	q _i	197,9	l/s
Kokku H _{õhuleke}		245,3	W/K

3.6.4. Välispiirete summaarse soojuserikao leidmine köetava pinna kohta ja energiatõhususklassi määramine

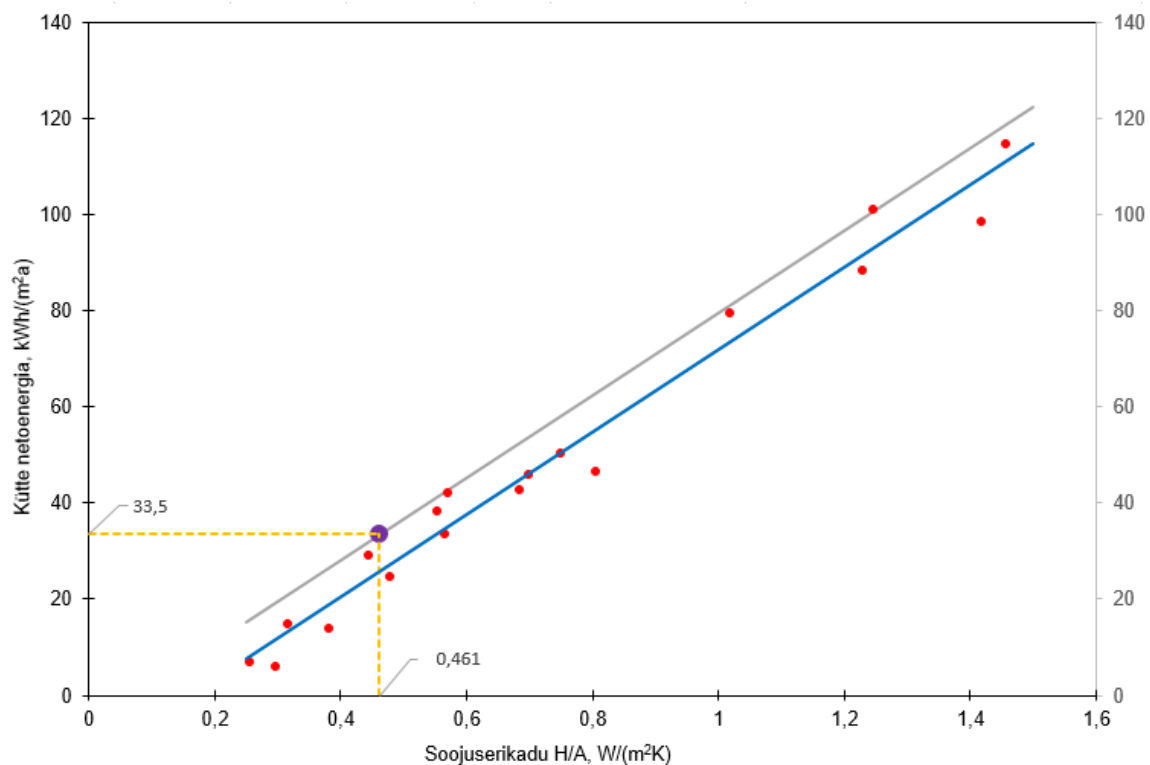
C energiaklassi saavutamiseks tehtavate arvutuste tegemisega käigus leiti, et viie köetava korruse pindala on 3 562,3 m². Soojuserikad leiti eelnevas peatükis.

Arvutustest tulenev C energiatõhususklassile vastava Akadeemia tee 5a korterelamu soojuserikadu köetava pinna kohta on toodud alljärgnevas tabelis (vaata Tabel 22).

Tabel 22. Korteralamu välispiirete summaarne soojuskadu köetava pinna kohta.

Soojuslähivuskao põhjus	Soojuslähivuskad, W/K	Välispiirete summaarne soojuskadu H, W/K	Hoone köetav pindala, m ²	Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta H/A, W/(m ² ·K)
Läbi piirdetarindite U	1 155,1	1 643,8	3 562,30	0,461
Läbi liitekohtade ψ	243,4			
Läbi õhulekete	245,3			

Arvutuste tulemusena saame välispiirete summaarseks soojuserikaks köetava pinna kohta 0,461 W/(m²·K). Soojuserikao H/A ja neto kütteenergia graafikult saame, et vastavalt leitud summaarsele soojuskaole on hoone netokütteenergia 33,5 kWh/(m²·a). (vaata Joonis 64).



Joonis 64. Kütte netoenergia tulenevalt soojuserikaost H/A (Zelenski 2017 põhjal, vaata Joonis 13).

Hoonesse tarnitava energia kogus arvestamata küttele kuluvat energia oli 111,6 kWh/(m²·a) (vaata Tabel 6), lisades sellele arvestades kaalumistegurit kütte tarbeks tarnitava energia 30,2 kWh/(m²·a) saame, et hoone energiakulu on 141,8 kWh/(m²·a).

3.1.1. Valitud lisasoojustuselementide energiatõhususklassile vastavus

Kõikide valitud lisasoojustuselementide omavahelise sobivuse hindamiseks arvutati kõik variandid lihtsustatult läbi. Lihtsus seisnes selles, et külmasildade väärtusi ei arvutatud läbi. Kasutati väärtust 243,4 W/K. Ka köetava pinna, õhulekke soojuserikao ja muude tarindite soojuserikao väärtused võeti võrdeliseks eelnevalt leituga.

Järgnevas tabelis on toodud kõikide lisasoojustuselementide variantide omavahelise koos paigaldamise soojuserikadu (vaata Tabel 23).

Tabel 23. Hoone välispiirete summaarne soojuskadu H, W/K.

Katus Sein		1	2	3	4	5	A5a
		195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill	350 mm liimpuit- karkass/ mineraalvill	195 mm karkass + 180 PUR- plaat	Sandwich- paneel	Sandwich- paneel + PIR-plaat	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill
1	195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	1 570,9	1570,1	1573,3	1573,3	1560	1568,6
2	145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	1 602,4	1 601,6	1 604,8	1 604,8	1 591,5	1 600,1
3	195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas	1 641,4	1 640,6	1 643,8	1 643,8	1 630,5	1 639,1
4	120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL	1 578,8	1 578	1 581,2	1 581,2	1 567,9	1 576,5
A5a	195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	1 534	1 533,2	1 536,4	1 536,4	1 523,1	1 531,7

Järgnevas tabelis on leitud hoone soojuserikadu köetava pinna kohta (vaata Tabel 24).

Tabel 24. Hoone välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta H/A, W/(m²·K).

Katus Sein		1	2	3	4	5	A5a
		195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill	350 mm liimpuit- karkass/ mineraalvill	195 mm karkass + 180 PUR- plaat	Sandwich- paneel	Sandwich- paneel + PIR-plaat	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill
1	195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	0,411	0,441	0,442	0,442	0,438	0,440
2	145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	0,450	0,450	0,450	0,450	0,447	0,449
3	195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas	0,461	0,461	0,461	0,461	0,458	0,460
4	120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL	0,443	0,433	0,444	0,444	0,440	0,443
A5a	195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	0,431	0,430	0,431	0,431	0,428	0,430

Hoone kütte netoenergiad on leitud järgnevas tabelis (vaata Tabel 25).

Tabel 25. Hoone kütte netoenergia, kWh/(m²·a).

Katus Sein		1	2	3	4	5	A5a
		195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill	350 mm liimpuit- karkass/ mineraalvill	195 mm karkass + 180 PUR- plaat	Sandwich- paneel	Sandwich- paneel + PIR-plaat	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill
1	195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	31,7	31,7	31,8	31,8	31,5	31,7
2	145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	32,5	32,5	32,6	32,6	32,2	32,4
3	195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas	33,4	33,4	33,5	33,5	33,2	33,4
4	120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL	31,9	31,9	32,0	32,0	31,7	31,9
A5a	195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	30,9	30,8	30,9	30,9	30,6	30,8

Kogu hoone energiakulu, mis on kaalumisteguritega läbi korrutatud on leitud järgnevas tabelis (vaata Tabel 26).

Tabel 26. Hoone energiakulu, kWh/(m²·a).

Katus Sein		1	2	3	4	5	A5a
		195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill	350 mm liimpuit- karkass/ mineraalvill	195 mm karkass + 180 PUR- plaat	Sandwich- paneel	Sandwich- paneel + PIR-plaat	195 mm mineraalvill + 145 mm mineraalvill
1	195 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	140,2	140,2	140,2	140,2	139,9	140,1
2	145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	140,9	140,8	140,9	140,9	140,6	140,8
3	195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas	141,7	141,7	141,7	141,7	141,5	141,6
4	120 mm mineraalvill + 75 mm tuuletõke Isover RKL	140,3	140,3	140,4	140,4	140,1	140,3
A5a	195 mm mineraalvill + 70 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL	139,4	139,4	139,4	139,4	139,1	139,3

4. Järeldused

4.1. Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lahendus, tekkinud probleemid ja arengusuunad

Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisprojekti võib pidada üheks tervikrekonstrueerimise projekti pilootprojektiks, sest kasutati innovatiivseid tehases eeltoodetud lisasoojustuselemente, millesse oli integreeritud tehnosüsteeme. Kasutatud lahendused ja saavutatud tulemused olid kooskõlast Sandbergi et al. (2016) kirjeldatud tervikrekonstrueerimise programmi kirjeldusega.

Rekonstrueerimise käigus tõstatunud probleeme oli küllaltki palju, kuid tänu õigeaegsele sekkumisele said kõik mured ehitustööde käigus lahendatud ning lõpptulemus kannatama ei pidanud. Osasid Akadeemia tee 5a rekonstrueerimise käigus ilmnunud lisasoojustuselemente puudutanud probleeme on esinenud ka varasemates Euroopas läbi viidud projektides. Näiteks on vaevelnud elementide liitekohtade keerulise vormistamise, akende õhutiheduse saavutamise ning hoone skaneerimise tulemusel koostatud mudeliga (Mjörnell 2016; Larsen et al. 2011). Ühene lahendus ehitusprotsessi lihtsustamiseks ja soodsamaks muutmiseks seisneb üheselt mõistetava ja piisava, kuid mitte üleliigse infosisaldusega mudel, mille käsitlemine on kõigile osapooltele jõukohane. Ka Larsen et al. (2011) ja Zimmermann (2010) järeldasid, et lihtsaim viis projekti maksumuses võitmiseks on hea 3D mudeli loomine.

Akadeemia tee 5a suurpaneelilamu lisasoojustuselementidega katmiseks kulunud aega võib vaadelda kaheldi. Elementide enda paigaldusaeg oli hea. Seinaelementide paigaldamiseks autokraanaga kulus keskmiselt 50 minutit ning katuseelementide paigaldamiseks 20 minutit, kui võrdusena puitelementmajasid tootev ettevõtte arvestas elementide paigaldusajaks vastavalt 45 ja 25 minutit. Samal ajal näiteks katusekandekarkassi ehitamine, elementide ühenduskohtade katmine ja täitmine ning elementide kinnitusdetailide paigaldamine olid ootamatult ajakulukad.

Katusekandekarkassi ehitamiseks kulunud aja kokku hoidmiseks võiks kaaluda tehases eelvalmistatud puitfermi kasutamist. Kiirelt paigaldatav konstruktsioon on odavam ning tõenäoliselt väheneb ka ilmastikurist kandekonstruktsioonile ja juba paigaldatud seinaelementidele.

Elementide kinnitamiseks ja toetamiseks on mitmeid töötavaid variante, mida on ka leidnud teised tervikrenoveerimisprotsessi analüüsinud isikud (Mjörnell 2016; Lattke et

al. 2011). Akadeemia tee 5a projektis kasutatud seinaelementide toetamine igaüks eraldi olemasolevale fassaadile põhjustas mitmeid muresid. Seega antud juhul on mõistlikum lahendus elementide toetamine üksteise peale, millega kaob laiade horisontaalvuukide täitmise probleem ning väheneb elemente kandvate kinnitusdetailide arv. Kinnitamise võimaluste valimisel muidugi tuleb lähtuda iga objekti omapärast ning ka üksteise vastav paiknevate horisontaalvuukide lahendamisel ei tohi unustada auru- ega tuuletõkke kihi isolatsioonivõime olulisust. Maksumuse osas erinevad kahel erineval viisil toestatavate elementide paigaldushind vaid mõne euro võrra.

Akadeemia tee 5a rekonstrueerimise käigus kasutati suuri horisontaalseid seinaelemente seetõttu, et niipidi paiknevate elementide mõõtmed said olla suuremad. Üleüldiselt tuleks seina lisasoojustuselementide suuna valimisel lähtuda konkreetsest olukorrast ja hoonest. Valiku tegemisel tuleb tähele panna, et kas horisontaalseid või vertikaalseid elemente kasutades on nende mõõtmed suuremad, sest üldjuhul tähendab suuremate elementide kasutamine odavamalt lahendust. Hinnavõit seisneb nii elementide liitekohtade arvus kui ka elementide paigaldamiseks tehtavates liigutustes. Samuti on Ott et al. (2010) välja toonud, et elementide mõõtmete valikul tuleb valida võimalikult suured elemendid, mille töötu veel ei muutu paigaldus või sõlmalahendus keerulisemaks.

Akadeemia tee 5a suurpaneel korterelamu rekonstrueerimisel kasutatud lisasoojustuselementidega esines täiendav probleem – kasutatud lahendus ei ole konkurentsi võimeline tavapärasel kasutuses oleva hoonete lisasoojustamise lahendusega. Ka Mjörnell (2016) on välja toonud, et tehases eeltoodetud elementide hinna kujundamiseks konkurentsivõimelisemaks on vaja veel vaeva näha. Üks lihtsaimad viise elemendi maksumuse vähendamiseks on fassaadikatte asendamine odavamaga. Akadeemia tee 5a ehitustöödel kasutatud Cembrit tsementkiudplaat on ruutmeetri kohta laudisest 2-3 korda kallim. Fassaadikate ei mõjuta seinaelementide toimivust ega vähenda soojustakistust, seega ongi selles kihis kõige lihtsam muudatusi teha.

Üldiselt sobivad fassaadi katmiseks nii plaatmaterjalid kui ka laudis. Laudise kasutamisel tuleks seinaelementide vuukide katmine lahendada nii, et elemendid on juba peaaegu täiesulatuses tehases kaetud ning objektile lisatakse vaid paar vuukide kohalt puudu olevat lauda. Ka plaatmaterjali kasutamise korral on võimalik lahendada probleem sarnaselt – elemendid on juba osaliselt tehases kaetud ning viimane puuduolev fassaadiplaat lisatakse objektile ning see jääks osaliselt katma vuuki ning osaliselt ülemist ja osaliselt alumist elementi.

Teine võimalus seina lisasoojustuselemendi hinna vähendamiseks on kasutatud tuuletõkkevilla kihi asendamine tuuletõkkekipsi – ja kangaga. Lahenduste maksumuste vahe on 5-7 eur/m², kuid vaid tuuletõkkevillal on vastavad omadused tarindi

soojuslähivuse parandamiseks. Antud lahendusega kaasneb risk, et tarind ei pruugi ehitusfüüsiliselt sobiv ja vastupidav olla. Seepärast on soovituslik kasutada tuuletõkkevilla. Seevastu TES Energy Facade projektis kasutati tuuletõkkekihina vaid tuuletõkkekiipsi (Gronhjort et al. 2009).

TES Energy Facade projektis lahendati teinegi Akadeemia tee 5a soojustamise käigus ilmnenud probleem – jäikus. TES Energy Facade projektis kasutati elemendi jäikuse suurendamiseks OSB plaati elemendi soojustusega täidetud karkassi kihist sees pool (Gronhjort et al. 2009). Kirjeldatud lahendus ei sobi Eestis rekonstrueeritavate hoonete lahendusesse, sest on tõenäosus hallituse tekkeks. Elemendi jäikuse suurendamiseks sobivaim variant on diagonaalliidete kasutamine karkassikihis.

Elemendi soojustuse paigaldamisel tuleb tähelepanu pöörata villakihtide suunale ja paksusele. Elementide täimisel ei tohiks kasutada paksemat villa kui 125 mm, sest vastasel juhul võib muutuda villa paigaldus keeruliseks ning elementi võivad jääda villa vahele kohad õhule. Eelnevale vastupidiselt on Kalamees (2002) toonud välja, et oluline on võimalikult paksude homogeensete kihtide kasutamine, sest vaid see hoiab ära elementide sisese õhu liikumise. Villa paigutamisel on oluline, et villavuugid paikeksid horisontaalselt maapinnaga.

Akadeemia tee 5a projektis kasutatud katuse lisasoojustuselemendid olid katuse pindala suhtes liiga väiksed ning paiknesid pikema küljega pikihoonet. Katuse soojustamisel kehtib üldjuhul sama põhimõte – suuremate elementide kasutamisel on kogumaksumus väiksem. Olenevalt hoone mõõtmest tuleks valida võimalused elemendid nii suured, et nad kataksid ära põiki terve hoone. Põkipidiste elementide eeliseks on see, et ei teki katusekaldesuunalisi elementide liitumiskohti, kust eriti suure tõenäosusega vihmajärg korral vesi sisse voolab. Gronhjort et al. (2009) on samuti välja toonud, et lisasoojustuselementide kasutamisel tuleb olulist tähelepanu pöörata niiskuse ja vihma ligipääsu võimaluste vältimiseks.

Katuseelementide vuukide katmisel ja täitmisel tuleb teha teinegi muudatus kiirema lõpptulemuse saavutamiseks. Vuukides on mõistlik kasutada tihedalt üksteise kõrvale paigutatavaid lisasoojustuselemente, mille aurutihedaks muutmine toimub kahepoolse teibi või liimiva mastiksi abil. Teise muudatusena tuleb katuseelementide vuugid koheselt katta SBS-katte kihiga.

Elementide kogumaksumuse vähendamise üks täiendav võimalus on maksimaalne mehhaniseeritud tootmine. Ka Santberg et al. (2016) on pidanud seda üheks hinna vähendamise võtmeteguriks.

4.2. Akadeemia tee 5a seinaelementide õhulekke katse

Tehtud katsega ei tuvastatud õhulekkekohti, mis oleksid tingitud puhvervilla ebakvaliteetsest paigaldusest. Külla aga jäid termograafilistele fotodele kohad, kus sisepinna temperatuur oli madalam kui ümbruskonnas. Piirkonnad asusid tavapärastel külmasildade tekkimise kohtadel, mis olid ka ühtlasi enamasti kohad, mille taga liitusid välisseina lisasoojustuselemendid. Võib järeldada, et elementide liitekohtade õhupidavus ei ole sama hea, kui ülejäänud tarindil. Maroy et al. (2017) läbi viidud uuringu põhjal saab anda soovitus, et Akadeemia tee 5a projektis kasutatud seinaelementide sõlmilahenduse puhul tasub kasutada puhvervilla varianti, mis katab ära terve elemendi.

Katse käigus jäädvustatud termograafiliste fotode põhjal leitud sisepinna temperatuurindeksite arvutamise ei tuvastatud ühtki kohta, kus indeks oleks ületanud kriitilist väärtust. Seega pole põhjust karta, et Akadeemia tee 5a korterelamus pärast rekonstrueerimist võiks ruumide standardsel kasutamisel sisepindadel hallitus kasvama hakata või võiks sisekliima oluliselt kehveneda.

Eksperimendiga jäädvustati termograafilistele fotodele sise- ja välisseina liitekoht, kus külmasilla pinnatemperatuur omas ebaühtlast väärtust (vaata Joonis 48). Tasub edasi uurida, et mis võis põhjustada kirjeldatud olukorra.

4.3. Seinaelementide horisontaalvuukide täitmine PUR-vahuga

Katse järeldusena saab väita, et Akadeemia tee 5a hoone seinas lisasoojustuselementide horisontaalsete liitekohtade täiteks ei sobi sellisel kujul PUR-vaht. Vahu paisumisvõime ja pritsimise kiirus olid hetkeolukorra kohta liiga suured, mille tõttu ei täitunud seinaelementide horisontaalvuugid ühtlaselt, täitus õhutusvahe ning kohati paisus vaht ka fassaadikatet imiteerivale laudisekihile. Samuti sai saatuslikuks vahu lendumisevõime tõttu määratud kõrvalpinnad. Samal ajal saab järeldada, et olukorras, kus fassaadikate peaks paigaldatama objektile pärast liitekohtade isoleerimist, on H2Foam LITE PLUS hea valik. PUR-vahu eelised seisnevad kiires paigaldatavuses, õhkupidavuses ning selles, et ta ei vaja auru- ega ka tuuletõkkekihti.

4.4. C energiatõhususklassi saavutmine lisasoojustuselementidega

Valitud kõige kehvema soojuslähivusega seinasoojustuselemendi (195 mm mineraalvill + tuuletõkkekips ja -kangas) $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ja KredExi poolt määratletud maksimaalse soojuslähivusega $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ katuse lisasoojustuselementide (195 mm karkass + 180 mm PIR-plaat) järgi leitud hoone kütte netoenergia ning hoone ülejäänud energiakulu liitmisel selgus, et Akadeemia tee 5a hoonesse tarnitav energiakulu võiks olla $141,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$. C energiatõhususklassile vastava hoone energiatõhusus arv jääb vahemikku $120 - 150 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$. Seega saab väita, et valitud lisasoojustuselementidega soojustades vastab korterelamu C energiatõhususklassile esitatud nõuetele. Kasutatud tarindite ristlõigetega leiti, et hoone neto küttenenergia on valitud juhul $33,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, mis jäi varuga hoone summaarse soojuserikao A/H ning kütte netoenergia sõltuvusgraafikult määratletud piiri $40,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ alla. Sellest tulenevalt saab järeldada, et ka kütte energiale seatud eesmärk C energiatõhususklassi saavutamiseks oli valitud õigesti.

Samuti arvutati läbi kõigi nelja seinalelemendi ristlõike variandist, viie katuseelemendi ristlõike variandist ja Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lisasoojustuselementide ristlõigetest tingitud kogu hoone energiatarbimine. Seinale lisasoojustuselementide ristlõigete soojuslähivused jäid vahemikku $0,104 - 0,170 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ning katuse lisasoojustuselementide variantide soojuslähivused vahemikku $0,103 - 0,120 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Saadud 30 katuse- ja seinalelemendi variandi järgi leitud kogu hoone energiatarbimiste erinevus oli maksimaalselt $2,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$. Tulemustest saab järeldada, et kõik valitud ristlõiked sobivad Akadeemia tee 5a korterelamu energiatarbimise näitel paneelalaluste soojustamiseks C energiatõhususklassi vääriliselt.

30 variandi läbi arvutamisel tehti järgnev lihtsustus. Külmasildade väärtusena kasutati ühte ja sama tulemust, mis oli leitud kõige kehvema soojuslähivusega seinalelemendi ja KredExi nõuete kohaselt katuse soojuslähivuse maksimaalväärtusega katuseelemendi sõlmalahenduste järgi. Seega täpselt läbi arvutamata lisasoojustusvariantidest tulenev hoone energiatarbimine võib olla veidi väiksem toodust. Kuid kui arvestada seda, et külmasillad mõjutavad hoone energiatarbimist tunduvalt vähem kui piirdetarindite soojuskaod, võib järeldada, et hoone kuulub sellegipoolest kõikide valitud lisasoojustuselementide variantide kombinatsioonide korral C energiatõhususklassi.

Veel võib järeldada, et tulenevalt sellest, et hoone energiatarbimine jäi varuga alla $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ võib kasutada hoone rekonstrueerimisel tehases eelvalmistatud elementidega veelgi kehvema soojuslähivusega seinasoojustuselemente. KredEx seadis piirangud nii katuse kui ka seinasoojustusele. Antud juhul sai valitud katuse

puhul maksimaalne lubatu, kuid seina puhul jäi veel varu lubatud soojuslähivuse 0,22 W/(m²·K) ees. Arvutustes selgus, et seinaelementide soojuslähivuse erinevusest 0,066 W/(m²·K) tulenes vaid kogu hoone energiatarbimine 2,3 kWh/(m²·a) võrra. Seega tasub veel edasi otsida võimalusi seinaelementide ristlõigete lihtsustamiseks ning tõenäoliselt sobivad C energiatõhususklassi saavutamiseks ka valitust kehvema soojuslähivusega seina lisasoojustuselemendid.

4.5. C energiatõhususklassile vastava lahenduse maksumus

Nelja valitud seina lisasoojustuselemendi keskmised maksumused koos paigaldusega jäid hinnavahele 147 – 158,5 eur/m². Nendest kõige odavam oli seinalisasoojustus variant 3, ehk siis 195 mm paksuse mineraalvillakihiga element, mis oli kaetud tuuletõkkekanga ja -kipsiga. Sellest lahendustest vaid mõned eurod ruutmeetri kohta oli kallim lahendus, mis oli kaetud tuuletõkkevillaga. Antud olukorras peaks eelistama veidi kallimat lahendust tulenevalt tuuletõkkevilla soojuslikest ja niiskustehnilistest omadustest. Seega valitud lahendustest sobib kõige paremini C energiatõhususklassi saavutamiseks variant 2, ehk 145 mm mineraalvill + 30 mm tuuletõke Isover RKL, mille maksumuseks saadi koos paigalduse, kinnitustetailide ning laudisest fassaadikattega oli 151 eur/m².

Võrreldes leitud seina lisasoojustuselementide ruutmeetrihindasid tavapärasel viisil kivivilla või EPSiga soojustamishindadega selgub, et hinnavahe on 2-3 kordne. Seega saab siit järeldada, et seina lisasoojustuselementide hinda on vaja veel oluliselt odavamaks saada, et lahendus võiks pakkuda konkurentsi tänapäeval levinud soojustamislahendusega. Kuid lisasoojustuselementidel on ka eeliseid millega tavapärane soojustamine võistelda ei suuda – paigaldusaeg ning kõik lisavõimalused. Seega seisnebki lisasoojustuselementide võlu tehases paigaldatud avatäidetes ja integreeritud tehnosüsteemides. Ka Zimmermann (2010) on leidnud, et tehases eeltoodetud lisasoojustuselementide kasutamine vaid hoone soojustamiseks ei tasu end majanduslikult ära.

Leitud nelja ja Akadeemia tee 5a projektis kasutatud katuse lisasoojustuselementide lahenduse koos elementide, paigalduse, kandekarkassi ning liitekohtade vormistamisega maksumused jäid vahemikku 155 – 193 eur/m². Kõige odavam oli lahendus 1 ehk 195 mm mineraalvill + 120 mm mineraalvill, millele järgnes 2 eurose erinevusega Akadeemia tee 5a projektis kasutatud lahendus, mis erines esimestest variandist vaid selle poolest, et 120 mm paksuse kihi asemel oli kasutatud 145

mm paksust mineraalvillakihti. Seega on mõistlik kasutada katuse soojustamisel tehases toodetud lisasoojustuselemendiga emba-kumba eelpool nimetatud ristlõikega elementi ning esialgu tuleks loobuda variantidest, mis sisaldavad liimpuitu, sandwich-paneeli või PIR-plaate, sest toodud lahendused on palju kallimad.

Leitud lisasoojustuselementide maksumuste ja soojuslähivuste võrdlemisel võib välja tuua, et alati ei tähenda kõrgem hind paremat soojuslähivust. Võib juhtuda, et kallim ning õhem ehitusmaterjal ei kompenseeri tulemust, mis on saavutatav odavama ehitusmaterjali paksema kihi kasutamisel.

Käesoleva uurimistöö raames ei tulnud välja see, et lahenduse maksumus oleks olenenud projekti mastaabist. Kuid Malarce et al. (2016) tehtud uurimistöö annab lootust, et suurema objekti puhul muutub hinnavahe tehases eeltoodetud lisasoojustuselementidega rekonstrueerimise ja tavapärase rekonstrueerimise vahel väiksemaks.

Kasutatud kirjandus

- Borodinecs, A., Zemitis, J., Dobelis, M., Kalinka, M., Prozuments, A., Šteinerte, K. (2017). Modular Retrofitting Solution of Buildings Based on 3D Scanning. - *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 160–166.
- Coydon, F., Duran M., Dinkel, S., Herkel, S. (2016). Monitoring Results and Optimization of a Façade Integrated Ventilation Concept for Building Retrofit. - *International Journal of Ventilation*, vol. 14(4), pp. 349–362.
- Cronhjort, Y., Hirsi, H., Lylykangas, K., Kurnitski, J. (2009). TES Energy Facade, Energiategokkuden parantaminen puurunkoisilla ja esivalmisteisilla julkisivuelementeillä. Tutkimushankkeen loppuraportti.
- CTU Team (s.a.). More-Connect: Heavy installation day.
- E2ReBuild. Transforming the retrofitting construction sector! <http://www.e2rebuild.eu/en/Sidor/default.aspx> (02.05.2018).
- EASEE Project. Build up. <http://www.buildup.eu/et/node/43141> (05.05.2019).
- Ehitusmaterjalide edasimüüja (2018). Hinnapakumine. E-kiri autorile (31.03.2018).
- Ehitusmaterjalide ettevõtte (2018). Hinnapakumine. E-kiri autorile (09.05.2018).
- Eisberg, G. (2016). Üksikelamu projekteerimine ja eelarvestamine energiaklassi A või C valikuks. Tallinna Tehnikakõrgkool. Lõputöö. Tallinn.
- Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu (2010). Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta.
- European Commission . What is Horizon 2020? <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020> (20.03.2018).
- Eurostat (2017). Eluasemestatistika. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Housing_statistics/et#Eluruumi_t.C3.BC.C3.BCp (14.03.2018).
- EVS 908-1:2016. Hoone piirdetarindi soojusjuhtivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1990:2002+NA:2002. Eurokoodeks. Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN ISO 10211:2017. Külmasillad hoones, Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailsed arvutused. Tallinn: Eesti Standardikeskus.

- EVS-EN ISO 13370:2017. Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN ISO 13789:2017. Thermal performance of buildings – Transmission and ventilation heat transfer coefficients – Calculation method. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
- Hamburg, A. (2018). Tallinna Tehnikaülikooli ekspert. Autori intervjuu. Üleskirjutus (09.05.2018).
- Hamburg, A. (s.a.). Eluhoonete lihtsustatud energiatõhususe tõestamine ja kütte netoenergiakulu leidmine kraadpäevade järgi. Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool. Õppematerjal.
- Hoonete sisekliima ja õhustuse nõuded. Tööversioon 30.06.2015. http://ekvy.ee/attachments/article/17/Hoonete%20sisekliima%20ja%20%C3%B5hustuse%20n%C3%B5uded_t%C3%B6%C3%B6versioon.pdf (10.05.2018).
- Hoonete tervirenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega (2018). Koolitus. Üleskirutus (14.02.2018, 15.02.2018, 08.03.2018).
- Ilomets, S. (2017). Renovation Need and Performance of Envelopes of Concrete Apartment Buildings in Estonia. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. Doktoritöö.
- Isover. Isover KL 35. <https://www.isover.ee/tooted/isover-kl-35> (14.04.2018).
- Jürgensohn Production OÜ (2018). Hinnapakumine puitmaterjalile. E-kiri autorile (02.05.2018).
- Kalamees, T. (2002) Puitkarkass-piirete materjalivaliku kriteeriume. - *Ehitaja*, kd 5(69), lk 23-25.
- Kalamees, T., Lupitšek, A., Moreck, O. C., Borodinecs, A., Almeida, A., Rovers, R., Op 't Veld, P., Kuusk, K., Silva, S. (2016). What Kind of Heat Loss Requirements NZEB and Deep Renovation Sets for Building Envelope?" - *CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*, pp. 137–44.
- Kalamees, T., Pihelo, P., Kuusk, K. (2017) Deep energy renovation of old concrete apartment building to nZEB by using wooden modular elements – 23. International Holzbau-Forum (IHF 2017). 7-8.12.2017 Garmisch - Partenkirchen, Germany. Forum-Holzbau, pp 317–325.
- Kalamees, T., Thalfeldt, M., Meos, H., Laas, M., Zelenski, M., Kurnitski, J., Diligentov, E., Bõkova, L. (2015). Korterelamute välispiirete lisasoojustamise sõlmejoonised ja tüüp korterite ventilatsioonilahendused. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, Inseneribüroo EstKonsult.

- Kalamees, T., Õiger, K., Kõiv, T.-A., Liias, R., Kallavus, U., Mikli, L., Lehtla, A., Kodi, G., Luman, A., Arumägi, E., Miranova, J., Peetrimägi, L., Korpen, M., Männiste, L., Murman, P., Hamburg, A., Tali, M., Seinre, E. (2009). Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuringu lõppraport. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- Kingspan OÜ. Uurimis- ja arendustöö uuendused. <https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/sandwich-paneelid/meist/innovatsioon> (15.05.2018).
- Kliimakonsult OÜ (2016). Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimine.
- KredEX SA 2016. Sihtasutus KredEx 2015 aastaaruanne. https://issuu.com/sihtasutus_kredex/docs/2015_aastaaruanne?e=24879711%2F (21.03.2018).
- KredEX SA 2017. Sihtasutus KredEx 2016 aastaaruanne. https://issuu.com/sihtasutus_kredex/docs/kredex_aastaraamat_2016
- Kredex SA. Rekonstrueerimise toetus. <http://www.kredex.ee/korteriuhistu/korteriuhistu-toetused/rekonstrueerimise-toetus/> (21.03.2018).
- Kull, K. (2014). Kahjustatud puittarindite tugevdamise võimalused. Tartu: Eesti Maaülikool. Magistritöö.
- Kuusk, K. 2018. SA KredEx hoonete energiatõhususe projektijuht. Autori intervjuu. Üleskirjutus (29.03.2018).
- Kuusk, K., Ilomets, S., Kalamees, T., Tuudak, S., Luman, A. (2014). Renovation vs. demolition of an old apartment building: energy use, economic and environmental analysis. - NSB 2014 10th nordic symposium on building physics, 15-19 June 2014, Lund, Sweden. Ed. J. Arfvidsson, L.-E. Harderup, A. Kumlin, B. Rosencrantz.
- Kuusk, K., Kalamees, T. (2018). Kütte netoenergia ja soojuserikao H/A sõltuvus. E-kiri autorile (10.05.2018).
- Larsen, K. E., Lattke, F., Ott, S., Winter, S. (2011). Surveying and Digital Workflow in Energy Performance Retrofit Projects Using Prefabricated Elements. - *Automation in Construction*, vol. 20(8), pp. 999–1011.
- Lattke, F., Larsen K. E., Ott, S., Cronhjort, Y. (2009). TES EnergyFaçade – Prefabricated Timber Based Building System for Improving the Energy Efficiency of the Building Envelope. Research Project from 2008-2009.
- Lauri, M. (2014). Korterelamute renoveerimisturu ülevaade ja perioodi 2010-2014 korterelamute rekonstrueerimistoetuse mõju analüüs. Tallinn: KredEx SA.
- Malacarne, G., Monizza, G. P., Ratajczak, J., Krause, D., Benedetti, C., Matt, D. T. (2016). Prefabricated timber facade for the energy refurbishment of the Italian building stock: the Ri.Fa.Re. projekt. - *Energy Procedia*, vol. 96(2016), pp. 788-799.

- Maroy, K., Steeman, M., Van Den Bosshe, N. (2017). Air flows between prefabricated insulation modules and the existing facade: A numerical analysis of the adaption layer. - Energy Procedia, vol. 132(2017), pp. 885-890.
- Matek AS (2017). Akadeemia tee 5a muudatusjoonised.
- Matek AS (2018). Kohtumine spetsialistidega. Helisalvestis (17.04.2018).
- MetsäWood. Kerto kandetarinditooted. linfoleht. <http://puukeskus.ee/wp-content/uploads/2016/06/Kerto-talad.pdf> (01.05.2018).
- Mjörnell, K. (2016). Experience from using prefabricated elements for adding insulation and upgrading of external facades. – Case studies of building Pathology in cultural heritage, pp. 95-133.
- MKJ Baltic OÜ. Kertopuu. <http://mpe.ee/hinnakiri/cat-13.html> (01.05.2018).
- More-Connect. <http://www.more-connect.eu/> (20.03.2018).
- MTMm nr 23. Korteralamute rekonstrueerimise toetuse andmise tingimused (24.03.2015).
- MTMm nr 36, 2015. Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele (06.05.2015).
- MTMm nr 52, 2010. Rohelise investeerimisskeemi "Korteralamute rekonstrueerimise toetus" kasutamise tingimused ja kord (17.08.2010).
- MTMm nr 55, 2015. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded (05.06.2015).
- MTMm nr 58, 2015. Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika (09.06.2016).
- Multifunktional energy efficient facade system. <http://www.meefs-retrofitting.eu/project/retrofitting-facade-concept.html> (03.05.2018).
- Mägi, K. (2017) Renoveeritud kortermaja sisekliima näitajate uuring. Tartu: Eesti Maaülikool. Bakalaurusetöö.
- Männistu, M. Ehitust planeeri nagu last. <https://www.aripaev.ee/uudised/2016/08/17/ehitust-planeerides-arvesta-selle-utiliseerimisega> (15.03.2018).
- Nordic Energy Solutions OÜ (2016). Akadeemia tee 5a, Tallinn ühiselamu. Hoone energiatõhususarvu arvutus ja energiamärgise väljastamine.
- Osalejate mõtted (2018). Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega. Koolitus. Autori üleskirjutus. (08.03.2018).
- Ott, S. J., Winter, S. (2010). TES Energy Facade - Construction Principles.

Puielementmajasid tootev ettevõte (2018). Hinnapakkumine. E-kiri autorile. (04.05.2018).

Puitkonstruktsioone tootev ettevõte (2018). Konstruktsioonide hinnapakkumine - välisseina- ja katusepaneelid. E-kiri autorile (19.04.2018)

Põldma, S. (2018). Fassaadi soojustamine ja krohvimine. E-kiri autorile (30.04.2018).

RetroKit projekt. Build up. <http://www.buildup.eu/en/explore/links/retrokit-project-0> (03.05.2018).

Riigi Ilmateenistus. Kliimakaardid.
<https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/sademed/> (14.04.2018).

Rs nr 1 2015. Ehitusseadustik. (05.03.2015).

Ruud, S., Östman, L., Orädd, P. (2016). Energy savings for a wood based modular pre-fabricated facade refurbishment system compared to other measures. - *Energy Procedia*, vol. 96(2016), pp. 768-778.

Saint-Gobain Ehitustooted AS. Isover otsetarnete tingimused. Infoleht.
https://www.isover.ee/sites/isover.ee/files/assets/documents/hinnakiri_01_03_2018_isolatsioon.pdf (30.04.2018).

Sandberg, K., Orskaug, T., Andersson, A. (2016). Prefabricated Wood Elements for Sustainable Renovation of Residential Building Façades. - *Energy Procedia*, vol. 96(September 2016), pp. 756–67.

Sepp, M. (2015). Kliimamuutuste tõlgendamise tööseminar. Slaidid.
https://www.geograafia.ut.ee/sites/default/files/geograafia/kati_tooseminar_sepp.pdf (14.04.2018).

Siga. Paigaldusjuhend. Infoleht.
http://www.siga.ch/fileadmin/user_upload/Web_Englisch/42._Downloads/Gebrauchsanleitungen/Paigaldusjuhend_KM9864_SKU-2043ee.pdf (05.05.2018).

Sirkel ja Mall OÜ (2016). Akadeemia tee 5a ühiselamu rekonstrueerimine.

Soeson, K. (2018). Icy Getec OÜ juhataja. Autori intervjuu. Üleskirjutus (10.05.2018)

Stastikaamet 2011. Tavaeluruumidega hooned, eluruumid ja eluruumide pind hoone liigi, ehitusaja ja asukoha järgi, 31. detsember 2011.
<http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=RL0202> (14.03.2018).

Zelenski, M. (2017). Kortere lamute piirdetarindite lisasoojustamise tüüplahendused. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. Magistritöö.

Zimmermann (2010). Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential buildings. Prefab Retrofit of Buildings.

Zimmermann (2012). ECBCS Annex 50. Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings. Project Summary Report.

Timbeco Woodhouse OÜ spetsialist. Lisasoojustuselemendid. E-kiri autorile (23.04.2018)

Time-lapse fotod. Ehitusaegsed fotod Akadeemia tee 5a rekonstrueerimisest. Tellija erakogu.

Tuuliku Puit OÜ. Höövelprussid.
<http://www.tuulikupuit.ee/tooted/puitmaterjalid/hoovelpuit/hoovelpussid/>
(01.05.2018).

Veld, P., Op t. (2015). MORE-CONNECT: Development and Advanced Prefabrication of Innovative, Multifunctional Building Envelope Elements for Modular Retrofitting and Smart Connections. - *Energy Procedia*, vol. 78(November 2015), pp. 1057–62.

Welement AS projekteerija. Autori intervjuu. Üleskirjutus. (10.04.2018).

Vivian W. Y. Tam, C. M. Tam, John K. W. Chan & William C. Y. Ng (2006). Cutting Construction Wastes by Prefabrication. - *International Journal of Construction Management*, vol. 6(1), pp. 15-25.

Lisad

Lisa 1. Geomeetria klapitamisel tekkinud probleemide lahendamise ideed

2018. aasta veebruaris-märtsis toimunud TTÜ koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ välja pakutud lahendused tekkinud geomeetria klapitamise probleemile (Osalejate mõtted 2018):

- Punktipilve mõõdistamise eel peavad peatöövõtja, elementide projekteerija ja punktide mõõdistaja oma vahel täpselt kokku leppima vajalike punktide arvus, andmetöötlamiseks kasutatavas tarkvaras ning elementide tootjale antava mudeli sisus ja vormis, see on eelduseks üheselt mõistetavate tulemuste saamiseks.
- Punktipilve punktidest tervikpindade loomine ning loodud pindade võrdlus horisontaalse ja vertikaalse olemasoleva fassaadipinnaga.
- Lisasoojustuselementide tolerantside suurendamine ja tolerantside määramine punktipilves.
- Kinnituselementide asukohtade geodeetiline märkimine elementide paigalduse käigus ilmnevate probleemide vältimiseks.
- Välisseinaelementide tasapinnaavalikul keskmise punkti järgi on võimalik villa paksuse arvelt kokku hoida juhul, kui fassaadi keskmisest tasapinnast kõige kaugemal asuvad punktid saaksid eemaldatud.
- Välisseinaelementide referentspinna valimine kõige kaugema välispinna punkti järgi, sest seega väheneb riskide vähendamise eesmärgil.
- Punktipilve mõne punkti säilitamine 3D mudelis täpsuse kasvatamiseks.
- Kinnituselementide kandmine 3D mudelisse suurendab täpsust.
- Tehases elementide sõlmliitumiste füüsiline läbiproovimine üllatuste vältimise eesmärgil objektil.
- Elementide üle mõõõtmine tehases ning võrdlus projektiga kvaliteedi garanteerimise eesmärgil.
- Otsustada fassaadi tasapindsuse järgi, kas on mõistlik kasutada horisontaalseid või vertikaalseid elemente.

Lisa 2. Puitraamidel lisasoojustuselementide edasi arendamise lähtepunktid

2018. aasta veebruaris-märtsis toimunud TTÜ koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ välja pakutud suunad lisasoojustuselementide arendamiseks (Osalejate mõtted 2018):

- Horisontaalset puitkarkassikihist loobumine tootmiseks kuluvas ajas võitmiseks. Sama soojuslähivuse saavutamiseks on võimalik suurendada vertikaalse soojustusekihi ning tuuletõkke villa kihi paksusi suurendades.
- Kahekihilise villaosa asendamine eelsoojustatud I-taladega selleks, et kokku hoida tootmises kuluvat aega.
- Ebatäpsuste vähendamise eesmärgil paksema puhervillakihi kasutamine.
- Puhervilla kinnitamine nõõrvõrgu, laiemate kangaribade või liimiga selleks, et objektile ei peaks vaeva nägema puhervilla vabastamisega.
- Puhervilla asendamine objektile paigaldatava puistevillaga või tehases paigaldatud õhutiheda tihendiga. Mõlemal juhul soovitakse kokku hoida ajas.
- Elemendi siseste villakihtide asendamine PUR-vahuga elemendi ristlõike vähendamise eesmärgil.
- Tuuletõkkeplaadi asendamine tuuletõkkekihi ja -kangaga. Asenduse eesmärk on suurendada elemendi jäikust ning kiirendada tootmist.
- Roovituse kinnitamine naelpüssi abil, tootmisajas võitmiseks.
- Elemendi jäikuse suurendamine diagonaalkarkassi või postide ja vööde tappimisega.
- CNC töödeldud karkassi kasutamine täpsemate detailide saamiseks.
- Fassaadikattematerjali asendamine nt laudise või alumiinium-komposiitplaatidega seetõttu, et materjalid peaksid olema andestavamad ebatäpsuste suhtes.
- Fassaadikatteplaadi kinnitamine osaliselt tehases ja osaliselt platsil või fassaadiplaadi ja alusroovituse kinnitamine üldse vaid platsil, vältimaks seda, et osad katteplaadi kinnitused oleksid vaja objektile veel lahti kruvida ning pakutud lahendus välistaks topelt töö tegemist.
- Lisasoojustuselementide ja olemasoleva konstruktsiooni kohtumisel aknaavas on soovitatav enne teipimist tasandada olemasoleva konstruktsiooni aknapaale ning töödelda pinnad nakkedispersiooniga. Lahenduse suunitluseks on vältida mitte õhutihedate kohtade tekkimist.

Lisa 3. Puitraamidel lisasoojustuselementide kinnitamise, paigaldamise ja toetamise parandamise võimalikud viisid

Koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ välja toodud lahendused peatükis 3.3.2.2. nimetatud probleemidele olid järgnevad (Osalejate mõtted 2018):

- Lisasoojustuselementide vertikaalseks muutmine ja ühtlasi vertikaalvuukide laiendamine selleks, et kinnituselementidel oleks piisavalt ruumi.
- Elementide toetamine vundamendile kinnitusdetailide vähendamise eesmärgil.
- Kinnituskronsteinide asendamine nurgikute, lati, vinklitega või ümberhoone paikneva ringse lahendusega selleks, et vähendada kinnitusdetailide keerukust.
- Elementide kinnitamine esialgu kahele otspunktile ja hiljem täiendavate toetuspunktidele täpsema üldmulje saavutamise lootuses.
- Elementide riputamine kinnituslahenduse lihtsustamise eesmärgil.
- Rohkemate kinnitusavadega kinnituskronsteinide kasutamine selleks, et armatuuri puurides oleks võimalik valida uus kinnituskoht.
- Kinnitusdetailide reguleerimisvahemike suurendamine paigaldamise käigus tekkivate probleemide vähendamiseks.
- Kinnituskronsteinide suuna muutmine vertikaalseks, sest seejuures on võimalik kasutada kinnituskronsteine, mis paiknevad üle olemasolevate raudbetoelementide horisontaalvuukide.
- Vineerist rihtimisaluste kasutamine paigaldustöö lihtsustamiseks.
- Fassaadi skaneerimine armatuuride täpsete asukohtade väljaselgitamisega, sest nii on võimalik hoida kokku ajas, mis kulus kinnituskronsteinide kinnitamisele raudbetoelementide suure armatuuri sisaldusega kohtadele.
- Katuse- ja seinaelementide paigaldamine paralleelselt või enne ilmastikuriskide vähendamise lootuses.
- Paigaldamise hõlbustamine tornkraana või traaversi abil protsessi lihtsustamiseks.
- Hoone katmine eelnevalt ilmastiku eest telgiga.
- Tehases elementide läbimõeldud pakendamine nii, et kilede eemaldamine on teostav alles pärast elemendi paigaldamist. Idee vähendab vihmariiski.

Lisa 4. Välisseina lisasoojutuselementide horisontaalvuugi olemasoleva lahenduse võimalikud parandamise ettepanekud

Koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ välja toodud horisontaalvuukide probleemide pakutud võimalikud lahendused olid järgnevad (Osalejate mõtted 2018):

- Seinaelementide horisontaalvuukide laiuse suurendamine 20 – 30 cm-ni, et paraneks ligipääsetavus vuugile. Laiem vuuk võimaldab fassaadi lisasoojustuselementide aurutõkkekilid omavahel kokku teipida.
- Horisontaalvuukide täitmine täies ulatuses ehitusvillaga aja kokkuhoiu eesmärgil.
- Fassaadikattematerjali asendamine vähem nõudliku ning andestavama materjaliga.
- Ehitusplatsil lisatavate veeplekkide ära jätmine ja asendamine fassaadikattega, mille paigaldamine toimuks vuugi ulatuses platsil. Kirjeldatud lahenduse kasutamise eesmärk on lihtsustada välisseinaelementide liitekohtade teipimist tuuletõkketeibiga.
- Elementide toetamine üksteise peale nii, et mittemingisugust vuuki ei jääks. Lahendus võimaldab vähendada elementide liitekohtade viimistlemiseks kuluvat aega.
- Horisontaalvuukide asukohtade muutmine nii, et nende arv väheneks. Ühe võimalusena oleks horisontaalvuugi nihutamine aknaava alla, mille tulemusena peaks olema võimalik aknaplekiga katta ka seinaelementide vuuk.
- Vertikaalsete (mitme korruse kõrguste ning vaid mõne meetri laiuste) elementide kasutamine horisontaalvuukide vähendamise eesmärgil.
- Liidetud puitroovide kasutamine elementide jäikuse tagamiseks ja elementide soojustakistuse suurendamise eesmärgil.
- Elementide kinnitamine aknaavadest elementide liitekohtade arvu vähendamise lootuses.

Lisa 5. Katuse lisasoojustuselementide ja toetamise parandamise ettepanekud

Koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ välja pakutud lahendused katuse lisasoojustuselementide parandamiseks (Osalejate mõtted 2018):

- Suuremate katuse lisasoojustuselementide kasutamine elementide ühenduskohtade ja toetuspunktide arvukuse vähendamise eesmärgil.
- Katuseelementide paigaldamine põiki hoonet elementide piki hoonet paiknevate liitekohtade ära jätmise või vähendamise eesmärgil. Samuti väheneks sellisel juhul kandvate puitkonstruktsioonide arvukus.
- Sandwich-paneelide kasutamine raha kokkuhoiu eesmärgil.
- PIR või PUR soojustuse kasutamine paremate soojuslike omaduste saavutamiseks.
- Tehases eeltoodetud puitfermide kasutamine aja ja raha kokkuhoiu eesmärgil.
- Katuseelemendi lihtsustamine sellega, et alumist villakihti hoiab kinni OSB-plaadi asemeel puitroovitus või terasvõrk.
- Katuseelemendi tulepüsivuse suurendamine alumise OSB-plaadi asendamisel kipsplaadiga.
- Lisasoojustuselemendis asetseva soojustuse asendamine puistevillakihiiga olemasoleva katusekonstruktsiooni peal. Lahenduse eesmärgiks on lihtsustada katuseelementi.
- Steico talade kasutamine, soojustuskihi paksuse kasvatamise, jäikuse suurendamise ja külmasildade vähendamise eesmärgil.
- Elementide jäikuse kasvatamise eesmärgil soojustuse kihis põiksidemete kasutamine.
- Katuse lisasoojustuselemendi täitmine puistvillaga, tootmise kiiruse tõstmise lootuses.

Lisa 6. Katuseelemendi paigalduse, kinnituste ja liitekohtade arendamise ettepanekud

Koolitusel „Hoonete tervikrenoveerimine puidust lisasoojustuselementidega“ välja toodud lahendused peatükis 3.3.6.2. nimetatud probleemidele olid järgnevad (Osalejate mõtted 2018):

- Katuseelementide vaheliste vuukide täitmine täies ulatuses vahuga, aja kokkuhoiu eesmärgil.
- Elementide liitekohtade lahendamine tehases paigaldatud villasukaga, ühtlasi tuleb seejuures vähendada vuukide laiuseid. Lahendusega kasutamise eesmärk on vähendada paigaldusaega.
- Katuseelementide tootmine tehases paigaldatud SBS ülekattega, mis seatakse platsil paika. Lahendus loodab kiirendada veekindlaks muutmiseks kuluvat aega.
- Tuuletõkke ja aurutõkke kihtide jätmine ülekattega nii, et on võimalik servad kokku kleepida ning vuuki suruda. Eesmärgiks on sõlme lihtsustamine.
- Katuseelementide liitekohtade tihendamine koheselt pärast elementide paigaldamist, lühendades seega aega, millal katus ei ole täielikult veetihe.
- Vuukides elemendi servale keeratud aurutõkkele ühendamine kahepoolse teibi või mastiksiga sõlmilahenduse lihtsustamise lootuses.
- Reguleeritava tehases toodetava fermi kasutamine lisasoojustuselementide toetamiseks. Lahendusega loodetakse kokku hoida kandekonstruktsioonide ehitamise ajas ning ühtlasi täiustada kandekonstruktsiooni ja katuseelementide omavahelist sobivust.
- Olemasolevale katusele toetuva puitprussi asendamine immutatud puidu või veekindla vineeri kasutamisega, ohus et materjal võib vett saada.