

**MUINSUSKODUDE ENERGIATÕHUSUSE
PARANDAMISE PRAKTIKA JA POTENTIAAL**

**PRACTICE AND POTENTIAL FOR IMPROVING ENERGY
PERFORMANCE OF HERITAGE RESIDENTIAL BUILDINGS**
MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Alice Merkulova

Üliõpilaskood 192783EAEI

Juhendaja: Targo Kalamees,
täisprofessor tenuuris

Tallinn 2024

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.

19. detsember 2024

Autor: Alice Merkulova

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

19. detsember 2024

Juhendaja: Targo Kalamees

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, **Alice Merkulova**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Muinsuskodude energiatõhususe parandamise praktika ja potentsiaal
Practice and potential for improving energy performance of heritage residential buildings

mille juhendaja on **Targo Kalamees**

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja

Ehituse ja arhitektuuri insituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Alice Merkulova, 192783EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI02/17 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitusjuhtimine

Juhendaja: täisprofessor tenuuris Targo Kalamees, +37256284007

Lõputöö teema:

Muinsuskodude energiatõhususe parandamise praktika ja potentsiaal
Practice and potential for improving energy performance of heritage residential buildings

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Saada ülevaade muinsuskodude tervikrenoveerimise praktikate kogemustest (õnnestumised ja ebaõnnestumised);
2. Hinnata muinsuskodu energiatõhususe täiendava parandamise võimalusi;
3. Analüüsida tulemused ja arendada seni kasutatud renoveerimislahendusi edasi, et parandada energiatõhusust ja sisekliimat, säilitades muinsusväärtusi.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade ja metoodika lühikirjeldus	27.09.24
2.	75% ülevaatus	06.11.24
3.	Kaitsmistaotluse esitamine	16.12.24

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 19. detsember 2024a

Üliõpilane: Alice Merkulova ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Targo Kalamees ".....".....20.....a

/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a/allkiri/

avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
Lühendid	7
Terminid	7
Tähistused	7
SISSEJUHATUS	8
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1 Muinsuskaitse alal asuvad hooned	10
1.1.1 Muinsuskaitse alal asuvate hoonete klassifitseerimine	10
1.1.2 Muinsuskaitse eritingimused	11
1.2 Teiste riikide kogemus ja parim praktika mälestiste ja muinsuskaitse alal olevate elamute energiakasutuse vähendamisest	13
1.3 Renoveerimisel probleemsemad kohad	15
2 MEETODID	18
2.1 Analüüsitud hooned	18
2.1.1 Analüüsitud hoonete tehnilised näitajad	21
2.2 Töö andmetega ja allikatega	22
2.3 Välimõõtmised	23
2.3.1 Külmasildade leidmine termograafiliste mõõtmiste abil	23
2.3.2 Külmasildade kriitilisuse hindamine	24
2.3.3 Õhulekke mõõtmine	25
2.3.4 Õhulekke hindamise meetodid	25
2.3.5 Lühiajalise sisekliima mõõtmine	26
2.4 Energiatõhususe arvutus	26
2.4.1 Energiatõhususarvutuste tulemuste hindamise meetodid	27
2.5 Analüüsitud hoonete arvutuste lähteandmed	29
2.5.1 Piirdetarindid	29
2.5.2 Tehnosüsteemid	32
2.5.3 Muinsuskaitse eritingimuste piirangud	34
2.6 Saavutamata energiatõhusus ja projekteeritud renoveerimislahendused	35
3 TULEMUSED	36
3.1 Renoveerimistegevuste analüüs	36
3.1.1 Eeluringud, projekteerimine	36
3.1.2 Renoveerimise õnnestumised	36

3.1.3 Riskantsed renoveerimislahendused	37
3.2 Piirdetarindite õhulekke mõõtmistulemused	38
3.3 Külmasildade mõõtmistulemused	41
3.4 Energiatõhusus enne ja pärast renoveerimist	42
3.5 Saavutama jäänud energiatõhusus	46
3.6 Renoveerimislahendused parema energiatõhususe saavutamiseks	51
3.6.1 Puithoone renoveerimislahendused	51
3.6.2 Kivihoone renoveerimislahendused	52
4 TULEMUSTE HINDAMINE	54
4.1 Piirdetarindite külmasillad ja õhulekked	54
4.2 Energiatõhusus	55
5 JÄRELDUSED	57
KOKKUVÕTE	59
SUMMARY IN ENGLISH	60
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	62
LISAD	65

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Lühendid

EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) - hoonete energiatõhususe direktiiv

Terminid

Muinsuskodu – ehitismälestis või muinsuskaitsealal asuv elamu

Energiatõhususarv (ETA)- arvutuslik summaarne tarnitud energiatega kaalutud erikasutus hoone tüüpilisel kasutusel kajastades hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks ning see arvutatakse hoone köetava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpilisel kasutamisel.

Tähistused

n_{50} - õhuvahetuskordsus 50 Pa rõhkude erinevuse juures [1/h]

q_{E50} - õhulekkearv 50 Pa rõhkude erinevuse juures [$m^3/(h \cdot m^2)$]

f_{Rsi} – temperatuuriindeks, -

ETA - energiatõhususarv [$kWh/(m^2 \cdot a)$]

t_i – sisetemperatuur, °C

t_e – välistemperatuur, °C

t_{si} - sisepinnatemperatuur, °C

Δt_s - pinnatemperatuuri suhteline alanemine, %

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu (EL) keskkonnapoliitikas on hoonete energiatõhususe parandamisel olnud pikka aega keskne roll kliimamuutuste leevendamisel, sest hooned moodustavad 40% EL-i lõppenergia tarbimisest ja 36% energiaga seotud kasvuhoonegaaside heitkogustest. Hoolimata kasvavast tähelepanust energiatõhususe küsimustele, on 75% EL-i hoonetest endiselt energiatõhususe nõuetele mittevastavad [1]. Kusjuures on eriti oluline keskenduda elamutele, mis moodustavad keskmiselt 75% EL-i hoonefondist [2]. Märkimisväärne osa Euroopa kodudest on ajaloolise väärtusega, mis toob kaasa täiendavaid väljakutseid energiatõhususe saavutamisel.

Euroopa Liidu renoveerimislaine [3], EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) [1] ning Ehitusseadustik [4] vabastavad muinsuskaitsealal asuvad ja UNESCO maailmapärandi nimekirja kuuluvad hooned energiatõhususe miinimumnõuetest [5]. Selle tulemusel ei ole riiklikul tasandil sageli nõudlust selliste hoonete energiatõhususe parandamiseks, kuigi nende algne seisukord võib olla energiasäästu seisukohalt väga kehv [6]. See jätab nendele hoonete elanikele suure koormuse, kes soovivad oma eluasemete energiatarbimist ja kulusid vähendada ning parendada hoone sisekliimat.

Elamute energiatõhususe parandamist peetakse majaomanikele väljakutseks nii tehnilisest kui ka majanduslikust vaatenurgast [7];[8]. Ajalooliste hoonete omanikud seisavad silmitsi veel suuremate väljakutsetega energiatõhususe parandamisel. Tavapäraseid renoveerimislahendusi ei saa sageli kasutada, sest nende hoonete puhul on prioriteet välisilme ja arhitektuurilise väärtuse säilitamine [9]. See nõuab erilahenduste otsimist ning võib viia ebatoimivate sõlmedeni või ebaõnnestunud projektideni, kui varem ei ole valitud lahendust sellistes tingimustes rakendatud. Samuti on selliste tööde maksumus sageli kõrgem, mis raskendab rahastuse ja toetuste taotlemist, kuna neid hinnatakse tavaliselt võrdsetel alustel teiste hoonetüüpidega [10].

Lidelöw jt [11] teaduskirjandusülevaates on esile toodud, et kultuuripärandi väärtuste analüüs on teaduskirjanduses sageli pealiskaudne ning kus hoone säilitamise põhimõtteid ja meetodeid mainitakse üldiselt ja soovitatakse kergeid, mitteinvasiivseid lahendusi, sest süvitsi minev renoveerimine ei sobi sageli pärandhoonetele nende kultuurilise ja ajaloolise väärtuse tõttu. Lidelöw jt. rõhutavad, et on vajadus selgemate parimate praktikate juhendite järele, mis aitaks spetsialistidel integreerida nii energiatõhusust, kui ka kultuuripärandi säilitamist [11].

Enne uute renoveerimismeetmete ja nende teostamisjuhendite välja töötamist on oluline kaardistada hetkeolukord, tuua välja õnnestumised ja peamised takistused nende saavutamisel. See magistritöö on osa uurimisprojektist LIFEHeritageHome, mis on otseselt suunatud umbes 7000 kodule (netopindala 2593000 m²), mis asuvad muinsuskaitsealal või on kaitstud arhitektuurimälestisena, ning sealsetele koduomanikele (u 20000). Nende hoonete energiasäästupotentsiaal sõltub muinsusväärtusest ehk kaitseseisundi hinnangust – arhitektuurimälestiste ja A-kaitsekategooria hoonete puhul jääb energiasäästupotentsiaal hinnanguliselt vahemikku 20-30%, B-kaitsekategooria hoonete puhul on see umbes 50% ja C-kaitsekategooria hoonete puhul 60%.

Magistritöös kogutakse valitud hoonete andmeid, et saada ülevaade nii renoveerimisest olukorrast ja energiakasutusest kui ka renoveerimise käigus teostatud töödest. Muuhulgas tehakse välimõõtmisi ning arvutusi, millega tuvastatakse hoonete energiatõhusus enne ja pärast renoveerimist, soojuskaod ning külmasildade kriitilisus. Tulemusi analüüsid esile valitud hoonete energiatõhususe parandamise praktikad ja potentsiaal. Lõputöö on osa HeritageHome ja LIFE IP BuildEST projektidest.

Lõputöö eesmärgid on

- Saada ülevaade muinsuskodude energiatõhususest enne ja pärast renoveerimist ning tervikrenoveerimise praktikate kogemustest (õnnestumised ja ebaõnnestumised);
- Selgitada välja renoveerimise käigus kasutamata jäänud energiasäästupotentsiaal ja pakkuda lahendusi, kuidas oli võimalik seda saavutada säilitades hoone väärtusi;
- Analüüsida tulemusi ja arendada seni kasutatud renoveerimislahendusi edasi, et parandada energiatõhusust ja sisekliimat, säilitades muinsusväärtusi.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Muinsuskaitse alal asuvad hooned

Enne Teist maailmasõda ehitatud elamud moodustavad ~18% kogu hoonefondist. Eestis on 1472 elamu funktsiooniga ehitismälestist. Korterelamutest 496 on kinnismälestisi, 792 asuvad kinnismälestise alal, 724 muinsuskaitsealal ja 3198 kinnismälestise mõjualas. Arvestades, et rekonstrueerimise pikaajalise strateegia [12] kohaselt on rekonstrueeritavaid korterelamuid ~14000, muinsuskodu elamu tüüp on eelkõige korterelamu (eramutest mälestisi on vähe) ja et mälestisi lammutatakse pigem vähe, siis võib järeldada, et muinsuskodu moodustab ~10% elamufondist.

1.1.1 Muinsuskaitse alal asuvate hoonete klassifitseerimine

Ehitismälestised ja muinsuskaitse all olevad elamud on olulised kultuuripärandi kandjad, mis kajastavad ajaloo sündmusi, arhitektuuri ja ühiskondlikke väärtusi. Nende hoonete säilitamine ja restaureerimine on kultuuriliselt tähtis, kuid samaaegselt tekitab väljakutseid. Ajaloolise ja arhitektuurilise väärtusega hoonete renoveerimisel on kehtestatud piirangud, mis mõnedel juhtudel ei võimalda soovitud energiatõhusust saavutada. Piirangud sõltuvad hoonete väärtusklassist, ent on tihti seotud ka hoone asukohaga. Näiteks võib hoone soojustamisel hakata fassaad kõrvalhoonete fassaadidest või välisilme proportsioonide säilitamise nõuetest välja astuma.

Muinsuskaitsealal asuvad ehitised jagunevad kolme väärtusklassi: A-, B- ja C-kaitsekategooriatesse. A-kaitsekategooria ehitised on muinsuskaitsealal iseloomustav ja/või ehitustraditsiooni kujundanud ja/või silmapaistva mõjuga väga väärtuslik ehitised, mis on säilinud koos ehitusaegse ja põhimahus algupärase interjööri või hilisema arhitektuuriajalooliselt silmapaistva interjööri. See tähendab, et A-kategoorias on olulisel kohal nii välisilme kui ka interjäär. B-kaitsekategoorias on olulisel kohal välisilme, kuid samuti peab see olema muinsuskaitsealal iseloomustav ja/või ehitustraditsiooni kujundanud ja/või selle arengut mõjutanud ja/või silmapaistva mõjuga ehitised. C-kaitsekategooriasse kuuluv ehitised asuvad muinsuskaitsealal, aga ei vasta üleval kirjeldatud kriteeriumitele [13].

Lisaks ehitusseadustikule kehtib muinsuskaitsealadel muinsuskaitse seadus ning muinsuskaitsealade põhimäärused, mis puudutavad konkreetseid alasid ja nende

eripärasid. Muinsuskaitseamet tegeleb detailsemate küsimustega ehk erinevate hoone osade väärtuste hindamisega ning nende restaureerimisega seotud küsimustega, mis ehitusseadustiku mõistes ehitamiseks ei kvalifitseeru [14].

1.1.2 Muinsuskaitse eritingimused

Mälestise ja muinsuskaitsealal asuva ehitise restaureerimise või konserveerimise ehitusprojekti koostamiseks on vajalikud ameti poolt koostatud muinsuskaitse eritingimused (MET), kus kirjeldatakse restaureerimise või konserveerimise nõudeid, pidades silmas ehitise detailide ja tarindite säilimist või seisundi parandamist, vajalikke uuringuid jmt [15].

Ajalooliste hoonete piirdetarindite soojustamise võimalust kirjeldatakse tavaliselt muinsuskaitse eritingimustes ning sõltuvalt hoonest võivad lubatavad energiasäästu meetmed olla erinevad. Mõnikord on piirdetarindite lisa-soojustamine üldse keelatud. Anni Evard toob esile, et muinsuskaitse eritingimuste piirangute tõttu on puitkorterelamute renoveerimine väga keeruline. Näiteks Kreutzwaldi 2, Võru hoone nõudega paigaldada maksimaalselt 7cm välisseinasoojustust ei saavuta olulist energiatõhusust. Samas näitab ta, et hoone energiatõhususe parandamine on saavutatav ja tervikrenoveerimisega on võimalik saavutada ka A-klassi energiatõhusus ilma, et hoone väärtused oluliselt kahjustuksid.

Muinsuskaitseameti soojustamise piirangute kehtestamisega on energiatõhususe saavutamine oluliselt raskendatud. Üks võimalik lahendus sellele probleemile oleks eritingimuste teine sõnastus ehk ameti poolt hoone väljanägemise ja proportsioonide määramine, mitte soojustamise keelamine [16].

Tellis- või kiviseintega elamutel, millel on oluline välisilme säilitamine, on muinsuskaitse eritingimuste järgi välisseinte välispidine soojustamine keelatud. Selliste piirangute iseloom on arusaadav, sest nende hoonete fassaadidel on ajalooline ja arhitektuuriline väärtus. Teiselt poolt takistavad sellised piirangud energiatõhususe parandamist ning võivad tekitada olukorra, kus otsustakse soojustada seestpoolt, mis on soojus- ja niiskustehnilisest seisukohast riskantne tegevus. [17]

Nendes tellis- või kiviseintega hoonetes, kus fassaadid ei ole arhitektuurselt väärtuslikud, on nende soojustamine lubatud, nt Pikk 10, Pärnu hoone. Selle korterelamu välisseinu oli lubatud soojustada, säilitades algupärased proportsioonid ning soojustamise järgselt oli

soovitav kasutada tellisplaati, et säiliks hoone arhitektuurne ilme, kuna tegemist on silikaattelistest korterelamuga [18]. Sellistel juhtudel on tavaliselt tegemist C-kaitsekategooriasse kuuluvate hoonetega, mis asuvad muinsuskaitsealal, kuid mille välisilme ei ole olulisel kohal.

Kahel puitelamul oli muinsuskaitse eritingimustes esile toodud soovitus soojustada hoone horisontaalsed pinnad (põrandad, katuslaed) ning tihendada avade ümbrus ja palgivahed. Seinte välispidine lisasoojustamine oli keelatud või lubatud ainult tuuletõkkekangaga. Tuleb märkida, et ühes hoones oli lubatud seinte soojustamine seestpoolt, kuid rõhutati, et see peab olema teostatud viisil, mis tagaks konstruktsioonide säilimise ning oleks ehitusfüüsikaliselt ohutu. Taolisi piiranguid põhjendati sellega, et fassaadidel oli olemasoleva sokliosa eenduvust seinast vaid mõni sentimeeter ja seinte paksema soojustamisega võivad muutuda avatäidete ja sokliosa paiknemised seinapinna suhtes ning samuti läheksid kaduma hoonele iseloomulikud pärilite ja sarikate profileeritud otsad [19];[20].

Palkmajade soojustamise keeld ei ole eespool toodud põhjustel õigustatud, kuna fassaadide proportsioone on võimalik säilitada ka paksema lisasoojustusekihiga. Sõltuvalt sokli väärtusest saab seda kas soojustada, et selle väljaaste fassaadist jääks samaks või luua sokli välisilme imitatsioon. Kuna tervikrenoveerimine eeldab tavaliselt ka avatäidete restaureerimist või asendamist, saab nende paiknemisi seinas suhtes muuta vastavalt vajadustele. Sarikate profileeritud otsad saab palkseina piiril maha saagida ning paigaldada need fassaadi pinnast soojustuse võrra väljapoole, säilitades renoveerimiseelsed fassaadiproportsioonid.

Katusearindite restaureerimise tingimused on tavaliselt katuse gabariitide ja vormi ning hoone katuseräästa ja -harja kõrguste säilitamine. Oluline on ka ajaloolise katusekatte materjalitüübi säilitamine. Sellest võib järeldada, et katusesoojustamine on muinsuskaitse eritingimuste järgi lubatud.

1.2 Teiste riikide kogemus ja parim praktika mälestiste ja muinsuskaitse alal olevate elamute energiakasutuse vähendamisest

Al-Habaibeh jt [21] käsitlesid enda artiklis *Nottingham Playhouse*'i teatrihoone (riiklikult kaitstud ajalooline hoone, mis on kantud Inglismaa rahvuspärandi nimekirja) energiatõhususe parandamise protsessi ning analüüsisid pärast teatud kavandatud muudatuste rakendamist saavutatud energiatõhusust. Enne energiatõhususe lahenduste projekteerimist teostati hoone energiaaudit, pinnatemperatuuride võrdlus termografeerimisega ning temperatuuri mõõdetavate andurite paigaldusega. Vastavalt uuringutele leiti hoone külmasillad ning energiatõhusust vähendatavad kohad. Järgides uuringus saadud tulemusi tehti hoone seintele ja katusele lisasoojustus, renoveeriti uksed, paigaldati kahekordse klaaspaketiga aknad ning päikesepaneelid, energiasäästlikud valgustid ning täiustatud kütte- ja kliimasüsteem. Artiklis toodud tulemused näitavad, et hoone energiatõhusus on oluliselt paranenud, säilitades samal ajal muinsuskaitsealuse hoone üldilme ja arhitektuursed omadused [21].

Roberti jt viisid läbi uuringu, kus töötasid välja meetoodika, mis võimaldab leida ja võrrelda ajaloolistele hoonetele optimaalseid renoveerimisvõimalusi mitmekülgset ja kvantitatiivselt. Uuringu raportis on esile toodud viis, kuidas saab ajaloolise hoone renoveerimismeetmete valimisel energiasäästu ja soojuslikku mugavust hinnata energiamudeli abil, arvestades samaaegselt hoone ajalooliste väärtustega ning kohalike muinsuskaitseorganite arvamustega. Väärtuste säilimist hinnati muinsuskaitse valdkonna 10 eksperdi arvamuste põhjal, kes pidid vastama küsimusele "Kas energiatõhususe parandamise meetmega Z on säilinud hoone komponendi Y väärtus X?". Vastuseid hinnati kasutades selleks spetsiaalset hinnangusüsteemi. See hinnang koos kütte- ja jahutusvajaduse ning soojusmugavusega on kolm tegurit, millega leiti optimaalsed renoveerimismeetmed Põhja-Itaalias asuvale keskaegsele hoonele. Renoveerimismeetmetena käsitleti erinevat tüüpi välis- ja sisetarindite soojustamist, õhutiheduse parandamist, akende vahetust ja jahutuse paigaldust. Tulemuseks on optimaalsete renoveerimismeetmete kogu, mis sobib kokku ajaloolise hoone väärtustega [22]. Uuringu tulemusena sai esile toodud, et analüüsitava hoone renoveerimine kõige parema variandi puhul vähendaks hoone küttevajadust vähemalt 73%, 150 kWh/m²-lt 40 kWh/m²-le. Need tulemused on saavutatavad, nõustudes 11% hoone

muinsuskaitsete väärtuste vähendamisega. Kasutatud renoveerimismeetmed sellisel juhul olid järgmised: i) välisseinte sisepindade isolatsioon, millel pole ajaloolist väärtust ja ii) aknaklaaside vahetamine ilma raamide vahetamiseta, millega kaasneb akende tihendamine. Analüüsitud juhul jõuti energiavajaduse neljakordse vähendamiseni. Veel suurem energiasääst on saavutatav vaid muinsuskaitsete väärtuste kaotamise hinnaga [22]. Läbiviidud uuring näitab, et ajalooliste hoonete energiatõhususe olulisel määral parandamine sellisena, et kaasneks ka elanike soojusmugavus, on võimalik tehes koostööd muinsuskaitse spetsialistidega, kes mõistavad energiatõhususe olulisust.

Riias asuvate ajalooliste tellishoonete energiatarbimise analüüs [23] näitas, et keskmise energiatarbimise iseloomustamiseks sobib kõige paremini mediaanväärtus. Nendes hoonetes on aastane energiatarbimine kütteks umbes 166 kWh/m² ja sooja vee valmistamiseks 31 kWh/m², mis on madalam kui Läti keskmine. Võrdluseks on keskmine energiatarbimine Lätis 235 kWh/m² aastas (180 kWh/m² aastas küttele ja 55 kWh/m² aastas sooja vee valmistamiseks). Autorite arvates on tulemuste erinevuste põhjuseks järgmised tegurid:

- Lätis on elamute keskmine energiatarbimine suhteliselt kõrge, kuna suur osa hooned on ehitatud nõukogude ajal, mil energiatõhususe standardid olid väga madalad.
- Ajaloolistel telliskivihoonetel on tavaliselt paksemad seinad kui keskmisel Läti hoonel, mis vähendavad soojusläbivust.
- Ajaloolistes hoonetes hoitakse sisetemperatuure sageli madalamal kui uuemates hoonetes, mis vähendab energiatarbimist. [23]

Puitkarkasshoonete keskmine kütmiseks kuluv soojusenergia külma kliimaga riikides varieerub mitmete tegurite ja asukoha tõttu. Näiteks üksikelamutes ja paarismajades on tarbimine järgmine: Gröönimaal 416 kWh/(m²·a), Norras 181 kWh/(m²·a) ja Kanadas 231 kWh/(m²·a). Tüüpiliste tellishoone küttekulu külma kliimaga piirkondades on vahemikus 170 kWh/(m²·a) kuni 280 kWh/(m²·a). Need väärtused on sarnased Ida-Euroopa riikide tulemustega [24].

Uuringus „*Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region*“ on esile toodud, et hoonete tehnosüsteemide (ventilatsiooni- ja küttesüsteemide) uuendamisel on üks suurimaid energiasäästu potentsiaale, ulatudes

kuni 47%-ni primaarenergia osas, kuna olemasolevate süsteemide energiatõhusus on tavaliselt madal. Need meetmed mõjutavad hoone välimust tavaliselt vähem. Samas võivad tehnosüsteemide muutmine, näiteks uute radiaatorite ja ventilatsioonikanalite paigaldamine ning sisekujunduse parandused avaldada suuremat mõju hoone sisekujundusele [25].

Ainuüksi ventilatsioonisüsteemi täiustamine ja parima energiaallika kasutamine võib parandada energiatõhusust järgmiselt:

- Eestis: algset energiakasutust 510 kWh/(m²·a) sai vähendada kuni 273 kWh/(m²·a) (–46%), kasutades maakütet;
- Rootsi: algset energiakasutust 603 kWh/(m²·a) sai vähendada kuni 320 kWh/(m²·a) (–47%), kasutades maakütet;
- Soomes: algset energiakasutust 358 kWh/(m²·a) sai vähendada kuni 228 kWh/(m²·a) (–37%), kasutades õhk-vesi soojuspumba. [25]

Külmas kliimas asuvate ajalooliste puitkorterelamute energiatõhususe ja kulusäästliku renoveerimise uuringus [26] leiti, et D-klassi nõue 180 kWh/(m²a) on saavutatav, kui kombineerida uut küttesüsteemi pööningu põrandasoojustuse, keldri laesoojustuse ning uute akende või seinasoojustusega. Pelletikatla ja soojustagastusega ventilatsioonisüsteemi kasutamisel koos kõigi maksimaalsete soojustusmeetmetega saavutati kuni 63% energiasääst. Renoveerimismeetmete eelarvete ja energiakulude põhjal võrreldi erinevate renoveerimispakettide tõhusust ning leiti, et soojustusmeetmete kombineerimine tehnosüsteemidega avardab võimalusi ning võimaldab saavutada suuremat energiasäästu majanduslikult tasuval viisil. Majandusanalüüsi tulemused näitasid, et ajaloolistes puitelamutes oli võimalik saavutada ETA tase 250 kWh/(m²a). Samuti leiti, et renoveerimispakettide tasuvuspunkt jääb ETA tulemusega umbes 170 kWh/(m²a). Arhitektuurse välisilme osas, mida on oluline säilitada, saavutatakse renoveerimispakettide tasuvuspunkt ligikaudu 210 kWh/(m²a) juures.

1.3 Renoveerimisel probleemsemad kohad

Hoonete renoveerimisel tekivad probleemid juhul, kui on tegemist halva ehituskvaliteediga, valesti projekteeritud lahendustega või lahendamata

renoveerimiseelsete probleemide pärast. Mõnedel juhtudel valitakse riskantsemad lahendused, kui tüüplahenduste kasutamine ei ole lubatud. Lähtuvalt sellest, et ajalooliste hoonete renoveerimine on tavaliselt keerukam kui teiste hoonete puhul, on oluline iga hoonet või hoonetüüpi käsitleda eraldi, et vältida renoveerimise negatiivseid tagajärgi, näiteks mõju kandekonstruktsioonidele või hoone elanikele [27].

Tulenevalt sellest, et osa muinsuskaitsealal olevate hoonete välisseinte soojustamine on väljast keelatud, soojustatakse need seestpoolt, kuid piirdetarindi soojus- ja niiskustehnilisest seisukohast on see riskantne tegevus. Peamised riskid on seotud järgnevaga: sisepinnatemperatuuri alandamise tagajärjel minnakse suhtelise niiskuse tõusuga üle kriitilise piiri, mis võib põhjustada hallituse teket; külmasildade mõju suurenemine; külmakahjustuste tekkega välisseina välispinna temperatuuri alandamine; niiskuse välja kuivamise võimaluse vähenemine. Juhul kui planeeritakse seestpoolset soojustamist, peab teostama põhjaliku uuringu ning koostama projekti riskide maandamiseks [28]. Seestpoolse soojustamise riskide maandamiseks on oluline kehtiva ventilatsioonisüsteemi rajamine ning korraliku küttesüsteemi olemasolu.

Uuringus „*Performance of interiorly insulated log wall*” leiti, et külmas kliimas on piirdetarindite soojustamine seestpoolt niiskustehnilise seisukohast riskantne. Mitmed mõõtmistulemused on näidanud suurt veeauru kondenseerumise ja hallituse kasvu riski seinte sees, eriti hoonetes, kus niiskuskooormus on suur. Ilma põhjaliku analüüsi ja ehitusmaterjalide omaduste mõõtmiseta võib sisemise soojustuse vastupidavus renoveerimislahendusena olla kaheldav. Niiskustehnilise ohutu lahenduse (st hallituseta seintes) saavutamiseks peaks palkide maksimaalne niiskusesisaldus enne soojustamist olema alla 12% ning mineraalvilla sisese isolatsiooni paksus võib olla kuni 50 mm [29].

Uuringus tehtud arvutuste põhjal võib öelda, et kui ohutusvaru määratakse 0,95 usaldustaseme alumisele piirile, siis statistiline riskitõenäosus on Eestis tüüpilistes sise- ja välistingimustes 145 mm paksuse palkseina ja 50 mm paksuse siseseina isolatsiooni korral 36 % [29].

Kriitilisemad kohad, millele tuleb hoonete renoveerimisel tähelepanu pöörata on räästa-, akna- ja soklisõlm ning katuse harja- ja neelukoht. Nendes liitekohtades esinevad külmasillad ning nendega seonduv vähene läbimõtlemine võib hoonete energiatõhusust kriitiliselt vähendada. Proteesimata või asendamata pehastunud puitkonstruktsioonide jätmine võib oluliselt vähendada kandevõimet ning tagada kahjustuste levimise ka

teistele konstruktsiooni osadele. Olulisel kohal on ka tehnosüsteemide renoveerimislahenduste põhjalik projekteerimine [30].

2 MEETODID

Magistritöös analüüsiti 11 muinsuskaitse all ja miljööväärtuslikus piirkonnas oleva elamu energiatõhusust enne ja pärast renoveerimist ja renoveerimise käigus saavutamata jäänud potentsiaali. Samuti saati ülevaade tervikrenoveerimise parimate praktikate kogemustest (õnnestumised ja ebaõnnestumised).

Magistritöö tulemuste saavutamiseks rakendati:

- tööd andmete ja allikatega;
- välimõõtmisi ja vaatlusi objektidel;
- arvutuslikku analüüsi;
- piirdetarindite ja nende liitekohtade projekteerimist.

Täpsem magistritöö kirjeldus on toodud järgmiste alapeatükkide all

2.1 Analüüsitud hooned

Hoonete valikul arvestati IEA SHC Annex 59 [31] soovitusi:

- **Tervikrenoveerimine.** Eesmärk on tuua näiteid, kus on energiatõhususe parandamisel käsitletud hoonet tervikuna. Üksikmeetmed võivad käsitleda nt soojusallika vahetust või taastuenergia tootmise energiavajaduse vähendamist;
- **Projekt on ellu viidud (või terviklikult projekteeritud).** Enamik mõjusid ajalooliste hoonete energiatõhususe parandamisel on seotud nende sobivusega olemasoleva hoonega ja/või kasutusotstarbega. Seetõttu on oluline, et parima praktika näide viitaks renoveerimisprojektile, mis on juba ellu viidud (või terviklikult projekteeritud);
- **Renoveerimisel järgiti hoone väärtuste säilimise eesmärke.** Energiatõhususe parandamisel on arvestatud hoone muinsusväärtuse säilimisega. Muinsusväärtused peavad olema hindamiseks piisavalt kvantifitseeritud;

- **Saavutati märkimisväärne energiatõhususe paranemine.** Projekti lõppeesmärk on saavutada hoonete energiavajaduse selge vähenemine, mistõttu peab olema teada energiakasutus enne ja pärast renoveerimist. Eesmärgipärane energiasääst on olenevalt hoone muinsusväärtusest 20–60%. Mittesaavutamise korral tehakse analüüs põhjustest.
- **Saadaval on tehniliste lahenduste dokumentatsioon ja seireandmete detailne info.** Parima praktika näited peavad olema hästi dokumenteeritud, et saaks selle info ka teistele sidusrühmadele kättesaadavaks teha.

Analüüsitud hooned said valitud muinsuskaitseameti spetsialisti poolt, kes sõelus need välja >2240 mälestise ja muinsuskaitse alal oleva hoone seast, millest oli energiamärgis väljastatud vaid 90 A- ja B-kaitsekategooria väärtusklassiga hoonele ja mälestisele (4%). Kuna muinsuskaitse alal oleva A- ja B-kaitsekategooria väärtusklassiga hoonete ja mälestiste seas ei leidunud ühtegi hoonet, mis vastaks igale ülal loetletud kriteeriumitele, kaasati valimisse ka miljööväärtuslike alade hooned. Lõplik valik tehti valides parimad variandid leitud hoonete seast.

Magistritöö valimisse jäi kokku 11 hoonet Tallinnast, Tartust, Kuressaarest ja Viljandist. Sai valitud üks elamu A-kaitsekategooriast, kuus elamut B-kaitsekategooriast ning kolm elamut, mis asuvad miljööalal. Samuti jäi valimisse üks ehitismälestis. Valikus on kivist ja puidust kandekonstruktsioonidega korterelamud ja eramud.

Tabel 1 Analüüsitavad hooned.

Kood	Kaitse -kat.	Hoone lühikirjeldus	Ehituse aasta	Renoveerimise aasta
K.B.1	B	Kuressaares asuv kahekorruseline korterelamu. Algne hooneosa palkseintega, hilisem juurdeehitus kergplokkidest. Tervikrenoveerimine	1890	2023
K.B.2	B	Kuressaares asuv kahekorruseline eramu. Enne renoveerimistõid oli tegemist kahe korteriga elamuga. Hoone	1897	2024

Kood	Kaitse -kat.	Hoone lühikirjeldus	Ehituse aasta	Renovee- rimise aasta
		kandekonstruksiooniks on palkseinad. Tervikrenoveerimine		
K.B.3	B	Kuressaares asuv kahekorruseline eramu. Enne renoveerimistöid - väike kortermaja. Välisseinte välimiseks kihiks on tahatud paeplokid. Tervikrenoveerimine, välisseinte välispidine soojustus keelatud.	1803	2017
K.B.4	B	Kuressaares asuv kahekorruseline eramu. Enne renoveerimistöid oli tegemist korterelamuga. Kandekonstruksiooniks on kiviseinad, väliskihis lõhatud raudkive, sisekihis aga valdava müüripaksuse osas paekive. Tervikrenoveerimine.	1895	2017
T.A.1	A	Kivikandekonstruksioonidega korterelamu Tallinnas. Tervikrenoveerimine, välisseinte soojustamine keelatud.	1894	2020
T.M.1	Miljöö- ala	Palkseintega kahekorruseline korterelamu Tallinnas. Tervikrenoveerimine.	1927	2018
T.M.2	Miljöö- ala	Puitkilpseintega kahekorruseline korterelamu Tallinnas. Tervikrenoveerimine	1910	2017
T.M.3	Miljöö- ala	Miljöövääruslik kahekorruseline korterelamu Tallinnas. Hoone välisseinad on õhuvahega silikaattellismüürid. Välisseinte õhuvahede täitmine termovahuga. Hoone on osa LIFE IP BuildEST projektist.	1949	2018

Kood	Kaitse -kat.	Hoone lühikirjeldus	Ehituse aasta	Renoveerimise aasta
V.B.1	B	Kahekorruseline telliskorterelamu puhasvuugiga Viljandis. Tervikrenoveerimine. Välisseinte soojustamine väljast keelatud.	1910	2021
V.B.2	B	Kahekorruseline puitkorterelamu Viljandis. Tervikrenoveerimine.	1903	2023
R.ML.1	Mälestis	Topelt savitellisseintega neljakorruseline korterelamu Tartus. Tervikrenoveerimine	1911	2021

2.1.1 Analüüsitavate hoonete tehnilised näitajad

Analüüsitavate hoonete tehnilised näitajad on toodud tabelis 2.

Tabel 2 Analüüsitavate hoonete tehnilised näitajad

Kood	Suletud netopind m²	Köetav pind, m²	Välisseina liik	Välisseina välisviimistluse materjal	Katuste kandva osa materjal
K.B.1	830	830	Palksein, kergplokk	Voodrilaudis	Puit
K.B.2	92	92	Palksein	Voodrilaudis	Puit
K.B.3	130	130	Paekivisein	Krohvimata	Puit
K.B.4	149	149	Paeplokid ja enne renoveerimist seestpoolt saepuruga täidetud puitsõrestik, pärast	Tahutud paeplokid	Puit

Kood	Suletud netopind m²	Köetav pind, m²	Välisseina liik	Välisseina välisviimistluse materjal	Katuste kandva osa materjal
			seestpoolt kergplokid		
T.A.1	707	707	Paekiviseinad	krohvitud	puit
T.M.1	985	755	Palksein	Krohvitud	puit
T.M.2	433	433	Puitkilpseinad	Voodrilaudis	puit
T.M.3	768	768	õhuvahega silikaattellismüür	krohvitud	puit
V.B.1	1048	1048	Kolmekihilised savitellisseinad	krohvimata	puit
V.B.2	276	271	1. Korrus maakivi, 2. Korrus palksein	1. korrus 2. korrus voodrilaudis	puit
R.ML.1	3031	2273	Topelt savitellissein	krohvitud	puit

2.2 Töö andmetega ja allikatega

Enne välimõõtmiste või arvutuste tegemist oli oluline tutvuda valitud hoonete projektdokumentatsiooniga, olemasolul muinsuskaitse eritingimustega ning ehisregistris (EHR) esitatud andmetega. Projektdokumentatsioon oli enamasti saadud hoone omanike käest, erandiks olid hooned, mis said KredEx toetust – nende hoonete dokumentatsioon oli saadud HeritageHOME projektliikmete abiga. Samuti oli mõnede hoonete puhul projekt ja/ või teostusdokumentatsioon esitatud EHR-is ehitus- või kasutusloa saamiseks.

Viidi läbi intervjuud hooneomanikega, et saada põhjalikumat infot:

- **hoone renoveerimiseelse olukorra kohta.** Täpsustati hoone piirdetarindite, tehnosüsteemide ja energiatõhususe lahendusi enne renoveerimist
- **renoveerimistöode kohta.** Saadi info projektist erinevalt teostatud või teostamata jäänud lahenduste kohta. Samuti info renoveerimisprotsessist – projekteerimise, ehitamise, kvaliteedikontroll ja järelevalve osas.
- **energia (soojus, elekter), vee ja hoone kasutuse kohta..**
- **renoveerimistöode maksumuse kohta;**
- **hoone kasutaja kogemuse kohta**

Intervjuusid viisid läbi HeritageHOME'i projektiliikmed. Saadud info oli väga oluline edasiste arvutuste ja analüüside tegemiseks.

Kuna mõõteandmed puudusid ja paljusid hooneid enne renoveerimist ei kasutatud, lähtuti energiatõhususes arvutuslikust olukorrast, et saaks võrrelda hooneid samadel tingimustel.

Paljudel hoonetel puudus projektdokumentatsioon ja renoveerimiseelse olukorra kirjeldus või oli see sootuks puudulik. Sellisel juhul töötati välja lahendused objektimõõtmiste ja -analüüsi käigus omaniku ja/või projekteerija abiga ning koostati enne ja pärast renoveerimist olukorra kirjeldus ning puuduvad ehitusjoonised.

2.3 Välimõõtmised

Välimõõtmisi tehti kümnel hoonel 11-st. Teostati termograafilist mõõtmist, hoonepiirete õhupidavuse ning lühiajalise sisekliima mõõtmist. Eramute õhulekkearv mõõdeti kogu hoone kohta. Korteralamutes teostati õhupidavuse mõõtmist ühes korteris.

2.3.1 Külmasildade leidmine termograafiliste mõõtmiste abil

Objektikülastusel tehti termograafilisi mõõtmisi infrapunakaameraga. Selle abil sai leida külmasildu ja õhulekkekohti, hinnata nende suurust ning ehituskvaliteeti.

Pinnatemperatuuride mõõdistamisel kasutati FLIR ONE termokaamerat (mõõtevahemik -20°C – +120°C, mõõtetäpsus: +3 °C, +5 %) ja FLIR E95 termokaamerat (mõõtevahemik

-20°C – +1500°C, mõõtetäpsus: +2 °C, +2 %) . Termovisiooni mõõtmistel järgiti standardit EVS-EN ISO 6781-1 „Ehitiste toimivus. Soojuse, õhu ja niiskuse ebakorrapärasuste tuvastamine ehitistes infrapunameetoditega.” [32].

Esiteks tehti termograafilisi mõõtmisi tavatingimustes, et leida külmasillad ja õhulekke mõju normaaltingimustes ning seejärel umbes poole tunni pärast 50 Pa alarõhu tingimustes, et leida õhulekked.

Termopilte analüüsiti FLIR tools tarkvaraga.

2.3.2 Külmasildade kriitilisuse hindamine

Külmasilla kriitilisuse määrab temperatuuriindeks f_{Rsi} ehk sisetemperatuuri, t_i ja välistemperatuuri, t_e vahe suhe sisepinnatemperatuuri, t_{si} ja välistemperatuuri vahe suhtesse:

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e}$$

Standardi EVS-EN ISO 13788 „Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus: kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisese kondenseerumise vältimine” rakendamisel kasutatakse Tabel 3 esitatud temperatuuriindeksi piirsuurusi [33].

Tabel 3 Temperatuuriindeksite piirsuurused Eestis hoonete projekteerimisel ka soojusliku kvaliteedi hindamisel

Niiskusklass	Temperatuuriindeksi piirsuurus $f_{Rsi,min}$	
	Uued hooned ja rekonstrueeritud hooned	Enne 2000. aastat ehitatud või rekonstrueeritud hooned olemasoleva olukorra hindamiseks
3	≥0,8	≥0,8
≤2	≥0,8	≥0,65

Eestis kasutatakse aknaraamile veeauru kondenseerumise vältimiseks tabelis 4 esitatud temperatuuriindeksi piirsuurusi. Suurema niiskuskooormusega ruumidel (niiskusklass 4 ja 5) tuleb aktsepteeritav temperatuuriindeks määrata eraldi, aga see ei või olla alla 0,75 [33].

Tabel 4 Temperatuuriindeksite piirsuurused Eestis hoonete projekteerimisel aknaraamile veeauru kondenseerumise vältimiseks

Niiskusklass	Temperatuuriindeksi piirsuurus $f_{Rsi,min}$
3	$\geq 0,7$
≤ 2	$\geq 0,55$

2.3.3 Õhulekke mõõtmine

Hoone piirdetarindite õhulekke mõõdistamisel ja alarõhu tekitamisel on kasutatud Minneapolis Blower Door Model 4" mõõteseadet (mõõteala 50 Pa juures 25 m³ /h – 7.800 m³ /h, täpsus ± 3 %). Õhupidavuse mõõtmisel on järgitud standardit: EVS-EN ISO 9972 „Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method“ [34].

Õhupidavuse mõõtmiseks suleti kõik välispiiretes olevad ukсед, aknad ja luugid ning teibiti kinni värskeõhuklapid ja ventilatsiooniavad. Samuti suleti kaminad, ahjude ja olemasolul teiste küttekollete lõõrid. Äravoolu trapid ja haisulukud täideti veega. Sisemised vaheuksed jäeti avatuks.

Lekkeõhu hulka mõõdeti erinevate õhurõhkude, nii alarõhu kui ka ülerõhu tingimustes, 10 Pa sammuga, 10...±60 Pa. Alarõhu- ja ülerõhu mõõtmistulemuste trendijoonelt loeti lekke õhuvooluhulk 50 Pa juures, millest arvutati keskväärtus.

2.3.4 Õhulekke hindamise meetodid

Majandus- ja taristuministri määruses nr 58 [35], Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika, peatükk 3 „Hoone tüüpiline kasutus“ § 9 on toodud välja, et:

(1) Hoone ehitusloa taotlemiseks või ehitusteatisel esitamiseks tehtavas energiatõhususarvutuses kasutatakse:

1) õhulekkearvu väärtust 1,5 kuupmeetrit tunnis ruutmeetri kohta, kui hoone ehitamisel kavandatakse viia läbi õhulekkearvu mõõtmine;

2) deklareerimismeetodiga määratud õhulekkearvu väärtust.

(4) Kui välispiirde õhuleket ei ole mõõdetud või muul viisil tõendatud, tehakse energiaarvutus tabelis 5 toodud hoone õhulekkearvu baasväärtusega. [35]

Tabel 5 Hoone õhulekkearvu baasväärtused välispiirde ruutmeetri kohta

Kasutusotstarve	Õhulekkearvu baasväärtus m ³ /(h·m ²)	
	Uus hoone, oluline rekonstrueerimine	Rekonstrueerimine, olemasolev hoone
Väikeelamu	4	6
Muu hoone	2,5	4

Õhulekkekoha suurust iseloomustab pinnatemperatuuri suhteline alanemine Δt_s enne (t_{si1}) ja pärast alarõhu testi (t_{si2}):

$$\Delta t_s = \frac{t_{si1} - t_{si2}}{t_i - t_e} * 100\%$$

2.3.5 Lühiajalise sisekliima mõõtmine

Välimõõtmiste ajal mõõdeti välisõhu ja siseruumide õhutemperatuuri ja suhtelist niiskust. Selleks kasutati andureid HOBO UX100-011 (mõõtevahemik: temperatuur-20°C – +70°C, mõõtetäpsus: +0.21°C, suhteline niiskus 1%-95%, mõõtetäpsus: +2.5%).

2.4 Energiatõhususe arvutus

Energiatõhususarvutused tehti vastavalt hoone energiatõhususe miinimumnõuetele [5] ja hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale [35]. Kuna mõõteandmeid polnud ja paljud hooned olid enne renoveerimist kasutusest väljas, lähtuti energiatõhususes arvutuslikust olukorrast, et saaks võrrelda hooneid samadel tingimustel

Hoone energiatõhususe arvutused tehti väikeelamu kalkulaatori [36] või rekonstrueeritava korterelamu ETA arvutustabeli abil [37]. Energiatõhususarvu klass määratakse vastavalt MTM määrusele nr 36 [38].

Energiaarvutuste tulemuste saamiseks leiti soojuskaod läbi piirdetarindi. Piirdetarindite sisepindalad leiti vastavalt hoonete projektdokumentatsioonile. Pindalade arvutamist lihtsustati Autodesk Autocad tarkvaraga.

Piirdetarindite soojusläbivused arvutati vastavalt asjakohasele standardile - EVS 908-1 [39], EVS-EN ISO 6946 [40] ja EVS-EN ISO 13370 [41]. Materjalide soojuserijuhtivused väärtused võeti vastavalt standardile EVS-EN ISO 10456 [42] ning telliskorterelamute uuringule [30].

Piirdetarindite joonsoojusläbivuste väärtused võeti vastavalt artiklile „Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings“ [43].

Piirdetarindite joonsoojusläbivuste pikkused arvutati vastavalt hoonete projektdokumentatsioonile.

Enne hoone renoveerimist hoone piirdetarindite õhulekkearvuks kasutati hoone tüübikohast baasväärtust [44]. Pärast renoveerimist kasutati lõputöös mõõdetud tulemust.

Renoveerimiseelses olukorras arvutati ventilatsiooni õhuvooluhulk aknatuulutuse ($0,05 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$) ja piirdetarindite infiltratsiooni abil (õhulekke arvust).

2.4.1 Energiatõhususarvutuste tulemuste hindamise meetodid

Energiatõhususarvu klass määratakse vastavalt MTM määrusele nr 36 [38].

Energiatõhususklass valitakse vastavalt järgnevate skaaladele:

1. Väikeelamu köetava pinnaga $< 120 \text{ m}^2$ energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala on toodud tabelis 6. [45]

Tabel 6 Väikeelamu köetava pinnaga $< 120 \text{ m}^2$ ETA skaala

ETA või KEK, kWh/(m ² a)	Klass
ETA või KEK ≤ 145	A
$146 \leq \text{ETA või KEK} \leq 165$	B
$166 \leq \text{ETA või KEK} \leq 185$	C
$186 \leq \text{ETA või KEK} \leq 235$	D
$236 \leq \text{ETA või KEK} \leq 285$	E
$286 \leq \text{ETA või KEK} \leq 350$	F
$351 \leq \text{ETA või KEK} \leq 420$	G
ETA või KEK ≥ 421	H

2. Väikeelamu köetava pinnaga $120\text{--}220 \text{ m}^2$ ja ridaelamu energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala on toodud tabelis 7. [45]

Tabel 7 Väikeelamu köetava pinnaga 120–220 m² ETA skaala

ETA või KEK, kWh/(m²a)	Klass
ETA või KEK ≤ 120	A
121 ≤ETA või KEK ≤ 140	B
141 ≤ETA või KEK ≤ 160	C
161 ≤ETA või KEK ≤ 210	D
211 ≤ETA või KEK ≤ 260	E
261 ≤ETA või KEK ≤ 330	F
331 ≤ETA või KEK ≤ 400	G
ETA või KEK ≥ 401	H

3. Väikeelamu köetava pinnaga > 220 m² (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala on toodud tabelis 8. [45]

Tabel 8 Väikeelamu köetava pinnaga > 220 m² ETA skaala

ETA või KEK, kWh/(m²a)	Klass
ETA või KEK ≤ 100	A
101 ≤ETA või KEK ≤ 120	B
121 ≤ETA või KEK ≤ 140	C
141 ≤ETA või KEK ≤ 200	D
201 ≤ETA või KEK ≤ 250	E
251 ≤ETA või KEK ≤ 320	F
321 ≤ETA või KEK ≤ 390	G
ETA või KEK ≥ 391	H

4. Korterelamu energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala on toodud tabelis 9. [45]

Tabel 9 Korterelamu ETA skaala

ETA või KEK, kWh/(m²a)	Klass
ETA või KEK ≤ 105	A
106 ≤ETA või KEK ≤ 125	B
126 ≤ETA või KEK ≤ 150	C
151 ≤ETA või KEK ≤ 180	D
181 ≤ETA või KEK ≤ 220	E
221 ≤ETA või KEK ≤ 280	F
281 ≤ETA või KEK ≤ 340	G
ETA või KEK ≥ 341	H

Olulise renoveerimise miinimumnõue on tavalistel hoonetel C-energiatõhususarvuklass. Muinsuskaitse all olevad hooned on vabastatud energiatõhususe miinimumnõuetest vastavalt Ehitusseadustikule [4].

2.5 Analüüsitud hoonete arvutuste lähteandmed

2.5.1 Piirdetarindid

Soojuslähivuste arvutamisel saadud tulemused on esitatud tabelis 10.

Tabel 10 Uuritud hoonete piirdetarindite soojuslähivused enne ja pärast renoveerimist

Piirdetarind	Aeg	Soojuslähivus U , $W/(m^2 \cdot K)$										
		K.B.1	K.B.2	K.B.3	K.B.4	T.A.1	T.M.1	T.M.2	T.M.3	V.B.1	V.B.2	R.ML.1
Katus	Enne	0.48	0.73	0.71	0.8	0.49	0.52	0.6	0.17	0.71	0.71	0.3
	Pärast	0.16	0.16	0.15	0.16	0.12	0.17	0.13	0.17	0.2	0.19	0.13
Sein	Enne	0.37	0.61	2.24	0.52	1.61	0.61	0.62	1.05	0.71	0.65	0.63
	Pärast	0.23	0.36	0.53	0.13	1.61	0.26	0.20	0.67	0.42	0.19	0.51
Aken	Enne	2.7	2.7	2.8	2.7	2.7	1.4	1.4	1.6	2.7	2.7	2.5
	Pärast	1.1	1.6	1.5	1.1	1.1	1	1.1	1.6	1.1	1.1	1.1
Põrand	Enne	0.29	0.39	0.37	0.38	0.53	0.45	0.48	0.49	0.57	0.38	0.45
	Pärast	0.15	0.18	0.18	0.15	0.22	0.28	0.48	0.49	0.26	0.14	0.2

Allpool on toodud piirdetarindite kokkuvõtlikud kirjeldused.

Välisseinad

Enne renoveerimist olid analüüsitud hoonete välisseinad väga erineva ehitusmaterjali, konstruktsiooni ja viimistlusega. Kivihoonete seas oli nii paekivist kui ka tellistest massiivseid välisseinu; mõned hooned olid krohvitud nii seest kui ka väljast, teised ainult seestpoolt. Ühel uuritud hoonel olid esimese korruse seinad maakivist ja teise korruse seinad palkidest. Puithoonete hulgas leidis nii traditsioonilisi palkseinu ja laudvoodriga ehitisi kui ka monteeritavatest puitpaneelidest ning TEP-plaatidega soojustatud ja laudisega kaetud elamuid. Üks hoone oli väljastpoolt kaetud paekiviga ja seestpoolt saepuruga täidetud puitsõrestikuga. Enamik hoonete siseviimistlusest oli krohvitud ja kaetud värvi või tapeediga.

Analüüsitud hoonete välisseinte renoveerimisel kasutati erinevaid lahendusi, mis sõltusid nii hoonete eritingimustest kui ka seinte konstruktsioonist ja materjalidest.

Paljude hoonete välisseinad soojustati, ja enamiku puithoonete puhul lisati tuuletõkkeplaat. Ühel paekivist seintega hoonel ehitati hoovipoolse seina siseküljele kergplokkidest lisasein. Lisa ja vana sein vahe täideti kergkruusaga. Muinsuskaitsealal asuvatel mälestistel ei olnud välisseinte välispidine soojustamine lubatud, kuid miljöövääruslike alade hoonetele see piirang ei laienenud. Puithoonetel asendati kahjustunud alumised palgid ning laudis taastati vastavalt algsele profiilile. Soojustamise puhul toodi aknad ja uksed fassaadiga ühtlustamiseks väljapoole ning kopeeriti algupärane dekoratsioon, osadel juhtudel pikendati ka sarikaid. Paari hoone välisseinad soojustati seestpoolt, kasutades pilliroomatti ja krohvi, ning siseviimistluses rakendati ka kipsplaadiga katmist.

Vundamendid

Enne renoveerimist olid hoonete vundamendid ja keldrimüürid väga erineva materjali, paksuse ja sügavusega. Kasutatud oli nii raudbetoon-, maakivi-, kui paekivivundamente, samuti oli hoonetel nii sügavaid keldritega vundamente kui ka madalamaid lahendusi. Enamikul hoonetest oli sokli ja keldrikorruse seisukord renoveerimise ajaks kehv, keldriruumid niisked ja seinu kahjustas maapinnast imbuv niiskus. Üks sagedane kahjustuse põhjus oli puudulik sadevee äravoolusüsteem – hoonete ümbruses ei olnud piisavalt tagatud vee äravool ja drenaaž.

Vundamentide ja sokli renoveerimise käigus kaevati enamik hoonete vundamente lahti, paigaldati vertikaalne soojustus ja hüdroisolatsioon ning krohviti soklid. Isolatsioonimaterjalidena kasutati EPS-plaate ja polüuretaanvahtu. Mitme hoone ümber rajati drenaaž osaliselt või täies ulatuses. Paigaldati uued sadeveetorud ning tagati pinnase kalle hoonest eemale, et juhtida vesi hoonetest kaugemale. Ilma keldrita hoonete soklitesse lisati või renoveeriti tuulutussavad. Ühel hoonel vundeeriti vundament osaliselt sügavamaks, et saaks keldriruumide kõrgust suurendada ja neid abiruumidena kasutada. Ühe hoone puhul oli vajalik osa madalvundamendi täielik asendamine.

Katus

Enne renoveerimist olid hoonete katusekonstruktsioonid ja katusekatted enamasti osaliselt või täielikult amortiseerunud, peamiselt niiskuskahjustuste tõttu. Renoveerimise käigus eemaldati vanad katusekatted ning kontrolliti ja asendati kahjustatud puitkonstruktsioonid. Uue katusekatte valikule pöörati suurt tähelepanu, kasutati vastupidavaid materjale nagu plekk- ja kivikatused. Katuse ventilatsiooni ja tuulutuse

kohad rajati vastavalt tootja juhistele, et ennetada niiskuse kogunemist. Mitmel hoonel muudeti renoveerimise käigus pööningud eluruumideks, mille jaoks paigaldati katuseaknad ning soojustati katuslaed. Lahendustes säilitati katuste ajaloolised elemendid, sealhulgas kuju, kõrgus ja räästad.

Kokkuvõttes hõlmasid renoveerimistööd ulatuslikku katusekonstruktsioonide taastamist, et tagada hoonete vastupidavus ja energiatõhusus. Samuti püüti tasakaalustada hoonete kultuuriväärtuste säilitamist ja kaasaegseid ehitusstandardeid, et pikendada hoonete eluiga.

Avatäited

Enamikul hoonetest olid vanad aknad enne renoveerimist kehvast seisukorras või täielikult amortiseerunud. Isegi hiljuti, vähem kui 10 aastat tagasi vahetatud akendel ilmnesid probleeme koostekvaliteedi või paigalduse osas. Akende vahetamise peamine eesmärk oli üldiselt parandada sooja- ja mürapidavust.

Renoveeritud hoonetes järgiti varasemate akende stiili ja jaotust; uued puitaknad olid kahekaamsed – välimine raam ühekordse klaasiga ja sisemisse raami paigaldati kahe klaasiga pakett (ühel juhul kolmekordne klaaspakett). Kahekaamsete akende puhul esinesid mitmeid probleeme koostekvaliteedi ja paigaldusega: vanad aknad ei pidanud klaaspaketi raskusele vastu, akende freshklapid härmatusid, aknad jäätusid talvel, paigaldusvead tekitasid külmasildu, ja sadevesi ei pääsenud välja. Mõnel juhul õnnestus säilitada vanad puidust raamid, asendades klaasid klaaspakettidega.

Välisuste osas oli info puudulik, mistõttu ei olnud selge, kas ja kuidas nende soojapidavust tõsteti (v.a uute tihendite paigaldus). Kahel juhul restaureeriti vanad ukсед, ühel juhul teostati remont, kuid enamasti asendati need uutega.

Põrand

Esimese korruse algsed puitpõrandad olid üldiselt kehvast seisukorras, mistõttu asendati need soojustatud betoonpõrandaga, millele paigaldati vesipõrandaküte. Ka juhtudel, kus algselt oli pinnasel betoonpõrand, ehitati asemele uus soojustatud betoonpõrand. Restaureeritud puitpõrandate näiteid ei ole, kuigi ühe hoone omanik märkis, et algsed põrandalauad oleks olnud võimalik säilitada. Otsus uute põrandate kasuks tehti aga ehitustööde kiire tempo ja ehitusettevõtte soovitusel tõttu.

Puitvahelaed (ülemistel korrustel) olid hoonetes erinevatel põhjustel kahjustunud – sealhulgas putuka- ja mädanikkahjustused, katuselekete mõju jmt. Ka betoonvahelaed olid sageli halvas seisukorras, kuna armeeringuks kasutatud raud oli korrodeerunud või betoon ise amortiseerunud. Renoveerimistöõde käigus esines nii puitvahelae säilitamist ja tugevdamist kui ka uute raudbetoonvahelagede ehitamist. Puitvahelae põrandakatteks olid valdavalt põrandalauad.

2.5.2 Tehnosüsteemid

Renoveerimise käigus uuendati kõik peamised tehnosüsteemid, sealhulgas kütte-, ventilatsiooni-, veevarustus-, kanalisatsiooni- ja elektrisüsteemid.

Tabel 11 Tehnosüsteemide põhilahendused

Kood	Aeg	Soojus-allikas	Küte	Ventilatsioon	Tarbevee soojendamine
K.B.1	Enne	Kaugküte	Radiaator	õhuleke	El. boiler
	Pärast	Kaugküte	Radiaator, põrandküte	Korteripõhine soojustagastusega (plaat)	Kaugküte
K.B.2	Enne	Ahi	Ahi	õhuleke	El. boiler
	Pärast	Ahi, Õhk-vesi soojuspump, pelletikatel	Põrandküte	soojustagastuse	Soojuspum
K.B.3	Enne	Ahi	Ahi	õhuleke	El. boiler
	Pärast	Õhk-vesi soojuspump, kaminahi	Põrandküte	õhuleke	Soojuspum
K.B.4	Enne	Ahi	Ahi	õhuleke	El. boiler

Kood	Aeg	Soojus-allikas	Küte	Ventilatsioon	Tarbevee soojendamise
	Pärast	Õhk-vesi soojuspump	Põrandküte	soojustagastuse ga	Soojuspump
T.A.1	Enne	Kaugküte	Radiaator	õhuleke	Kaugküte
	Pärast	Kaugküte	Radiaator, põrandküte	soojustagastuse	Kaugküte
T.M.1	Enne	Gaas, ahi	Radiaator, ahi	õhuleke	Gaasivoiler
	Pärast	Gaas, ahi	Radiaator, ahi	soojustagastuse	Gaasiboiler
T.M.2	Enne	Kaugküte	Radiaator	õhuleke	Gaasiboiler
	Pärast	Kaugküte	Radiaator	Soojustagastus	Gaasiboiler
T.M.3	Enne	Gaas, kamin, ahi	Radiaatorid, kamin	õhuleke	Gaasiboiler
	Pärast	Gaas, kamin, ahi	Radiaatorid, kamin	õhuleke	Gaasiboiler
V.B.1	Enne	Ahi	Ahi	õhuleke	El. boiler
	Pärast	Kaugküte	Radiaator	väljatõmme	Kaugküte
V.B.2	Enne	Ahi	Ahi	õhuleke	Kaugküte
	Pärast	Kaugküte	Radiaator	Väljatõmme	Kaugküte
R.ML.1	Enne	Kaugküte	Radiaator	õhuleke	Kaugküte
	Pärast	Kaugküte	Radiaator	õhuleke	Kaugküte

Päikesepaneelid olid paigaldatud ainult ühes hoones R.ML.1.

2.5.3 Muinsuskaitse eritingimuste piirangud

Analüüsitud hoonete puhul olid muinsuskaitse eritingimustes järgmised soojustamise piirangud:

Hoone K.B.1: Oli soovituslik soojustada horisontaalsed pinnad (põrandad, vahelaed) ja katusealune. Vajadusel oli lubatud tuuletõkkepaberi või minimaalselt õhukese tuuletõkkeplaadi paigaldamine. Hoone proportsioonide säilitamiseks ei olnud fassaadide välispidine soojustamine paksema materjaliga lubatud, kuigi tegemist oli vooderdatud palkseinaga, mille soojustamine ei oleks välisilmet muutunud. Proportsioonide säilitamine oleks võimalik sokli soojustamisega ja sarikaotste ning räästaaluse pikendamisega.

Hoone K.B.2: Soojustada oli lubatud horisontaalseid pindu (põrandad, vahelaed) ja katust. Seinte välispidine lisasoojustamine ei olnud lubatud, kuigi tegemist oli vooderdatud palkseinaga, mille soojustamine ei oleks välisilmet muutunud.

Hoone K.B.3: Paekiviseinu ja soklit tuli vajalikes kohtades vuukida. Soojustamine oli kaudselt keelatud välisilme säilitamiseks.

Hoone K.B.4: Dolomiitseinu oli kaudselt keelatud soojustada välisilme säilitamise põhimõttel.

Hoone T.A.1: Välisseinte soojustamine ei olnud lubatud. Põhjused olid ühel joonel ehitatud hooned, fassaadidetailide ja raidkivide säilitamine.

Hoone T.M.1: Soojustamine lubatud.

Hoone T.M.2: Soojustamine lubatud.

Hoone T.M.3: Õhuvahed tellismüürides lubatud täita soojusvahuga, välispidine soojustamine lubatud ainult avatäidete väljapoole liigutamisega, kuid projektis mitte käsitletud. Sokkel lubatud soojustada.

Hoone V.B.1: Tellisseinte välispidine soojustamine keelatud välisilme säilitamiseks.

Hoone V.B.2: Soojustamine lubatud.

Hoone R.ML.1: Soojustamiseks oli lubatud kasutada soojuskrohvi.

2.6 Saavutamata energiatõhusus ja projekteeritud renoveerimislahendused

Selgitati välja renoveerimise käigus kasutamata jäänud energiasäästupotentsiaal. Selleks analüüsiti renoveerimistöde käigus teostatud lahendust ning pakuti välja uued lahendused, millega oleksid muinsusväärtused säilitatud ning lahendus oleks niiskustehniliselt ohutu. Juhul, kui hoone paiknes kõnnitee ääres, siis teepoolsed küljed jäeti ilma lisasoojustuseta.

Kahele hoonele suurema energiasäästupotentsiaaliga projekteeriti olulisemad sõlmejoonised – räästasõlm, aknasõlm ja soklisõlm. Jooniseid tehti tarkvaraga Autodesk AutoCAD. Joonistel on toodud kolm lahendusvarianti – algne lahendus enne renoveerimist, renoveerimistöde käigus tehtud lahendus ning lahendus, millega saaks saavutada parema energiatõhususe.

Algolukorra ning renoveerimistöde käigus tehtud lahenduse jooniseid tehti projektdokumentatsioonist või hoone omakult saadud andmete põhjal. Lahendus, millega saaks saavutada parema energiatõhususe oli projekteeritud sellisena, et säiliks hoone muinsusväärtused, mis olid kirjeldatud muinsuskaitse eritingimustes. Olulisem tingimus oli hoone proportsioonide säilitamine ning algse lahenduse autentsus. Ajalooliste hoonete renoveerimislahenduste projekteerimisel on oluline pöörata tähelepanu proportsioonide säilitamisele ning algse lahenduse autentsusele. Proportsioonide säilimist saab tagada, kui räästa ja sokli eenduvust ning kõrgust mitte muuta. Samuti on oluline akna paigalduskoha sügavus välisseina suhtes. Algse lahenduse autentsuse säilitamine on suurem mõttekoht, kuna juba 1cm soojustuse paigaldusega muudetakse algset autentsust. Autentsuse säilitamisel võiks jälgida põhimõtet, et säilivad algsed konstruktsioonide põhiosad ning arhitektuursed detailid ning eelistatakse originaalmaterjalide taastamist.

Projekteerimisel lähtuti Kredexi rida- ja korterelamute projekteerimise abimaterjalist [46], RT-juhendkaardist 83-10955-et „Vundamendi ja alusmüüri hüdroisolatsioon ning niiskustõke“ [47], materjalide tootelehtedest ning raamatust „Ehitusfüüsika ABC“ [48].

3 TULEMUSED

3.1 Renoveerimistegevuste analüüs

3.1.1 Eeluuringud, projekteerimine

Enne hoonete renoveerimisprojektide koostamist viidi läbi eeluuringuid, et saada täpsem ülevaade hoonete seisukorrast ja renoveerimisvajadustest:

- **Hoone seisukorra hindamine.** Olid uuritud hoone üldine seisukord ning võimalikud kahjustused (näiteks praod, hallitus, lekivad katused). Ühel hoonel olid kontrollitud palkseinte ja sarikate kahjustused puurimise meetodil. Mõnedel hoonetel koostati renoveerimisprojekte juba pärast esialgset lammutamist, seega hoone konstruktsioonide seisukord oli juba teada.
- **Energiaaudit.** Kahele hoonele oli koostatud energiaaudit, et hinnata hoone energiatarbimist ja pakkuda välja energiatõhususe parandamise lahendusi.
- **Muinsuskaitse eritingimused ja hoone ajaloo uuring**
- **Möödistustööd.** Täpsete jooniste koostamiseks olid läbi viidud möödistustööd.

Enne tööde algust puudus sageli valmis tööprojekt või tegevuskava, mis oleks andnud täis informatsiooni, kuidas ehitada. Lammutustööd olid alustatud ilma lõpliku projekti valmimist. Samuti puudus sageli teostusdokumentatsioon ehk ajaloolise mälu edasikandja, mis on muinsuskaitse all olevate hoonete puhul eriti oluline. Ainult mõnel hoonel oli koostatud tehtud tööde aruanne muinsuskaitse järelevalve poolt. Ainult ühel hoonel oli tehtud hooldusjuhend, mis annaks kogu teavet, kuidas hooldada ning tagada hoone pikaajaline kestvus.

3.1.2 Renoveerimise õnnestumised

Energiatõhusust oli parandatud igal hoonel. Enamasti oli tegu tervikrenoveerimisega ning iga töö osas oli eesmärk säilitada hoonete muinsusväärtused. Kuigi tegu oli mälestistega või muinsuskaitse alal olevate hoonetega, mille puhul on põhifookus restaureerimine ehk ehitise autentse seisundi fikseerimine, ei olnud ühegi hoone puhul sellega tegemist. Oli uuendatud tehnosüsteeme (rekonstrueerimine), asendatud samaväärsega (rekonstrueerimise välistus), tehtud remonti või midagi konserveeritud .

Tööde käigus olid renoveeritud kõik tehnosüsteemide lahendused ning kandekonstruksioonid, et pikendada hoone kasutusiga. Ühtlasi oli vähendatud enamike piirdetarindite soojusläbivust.

Enamike hoonete vundamendid olid lahti kaevatud ning paigaldatud vertikaalne soojustus ja hüdroisolatsioon. Mitme hoone ümber oli rajatud osaliselt või täies mahus drenaaž, ümbritseva pinnase kalle oli tehtud hoonest eemale ning paigaldatud vihmaveetorud ja tehtiud vihmavee õige ärajuhtimine fassaadist. Tehtud tööd tagavad hoonete ja nende tarindite säilitamise ning võimaldavad keldrikorrust paremini kasutada.

Soojustatud välisseintel oli muudetud avatäidete asukoha, säilitades ajaloolise paigutuse. Parandatud oli enamike akende sooja- ja mürapidavust.

Horisontaalsete pindade soojustamine ei mõjuta hoonete välisilmet ning polnud muinsuskaitse eritingimustega takistatud. Kõikide hoonete katused olid hästi soojustatud ning soojusläbivus jäi renoveeritud hoonete puhul vahemiku 0.12 kuni 0.2 W/(m²·K). Enamikul hoonetest olid põrandad soojustatud ning soojusläbivus jäi tehtud tööde puhul vahemikku 0.14 kuni 0.28 W/(m²·K).

Renoveeritud hooned on kindlasti kasutajatele mugavamad, eelkõige paranenud sisekliima tõttu. Hoonete välisilmed on oluliselt paranenud ning eluiga pikendatud.

3.1.3 Riskantsed renoveerimislahendused

Mitme hoone puhul olid välisseinad seestpoolt soojustatud, mis on niiskustehniliselt riskantne lahendus. Ühel hoonel oli palkseinu soojustatud 50mm mineraalvillaga ning teisel 50mm pillirooplaadiga. Ühel kivihoonel olid välisseinad soojustatud seest 100mm jäiga pillirooplaadiga

Teine probleem oli ebapiisav välispidine soojustamine. Välisseinu oli võimalik täiendavalt väljastpoolt soojustada, kuid muinsuskaitse piirangutest tingituna seda põhjalikumalt ei kaalutud.

Kolmel hoonel üheteistkümnest jäi mehaaniline ventilatsioon paigaldamata, enamasti majanduslikel põhjustel. Kolmel hoonel oli paigaldatud ventilatsioon ilma soojustagastuseta.

3.2 Piirdetarindite õhulekke mõõtmistulemused

Õhupidavust mõõdeti 10 hoones – 7 korteris ja 3 majas. Tulemused on esitatud kahel viisil – õhulekkearv, q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$], mis iseloomustab lekkeõhu suurust 50 Pa juures jaotatuna korteri piirdetarindite pindalale ja õhuvahetuskordsus 50 Pa juures n_{50} [1/h], mis iseloomustab lekkeõhu suurust jaotatuna korteri sisekubatuurile.

Kõikide mõõdetud hoonete keskmine õhulekkearv $q_{50}=5.10 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ja õhuvahetus 50 Pa juures oli $n_{50}=5.75$ 1/h. Puithoonete keskmine õhulekkearv $q_{50}=5.31 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ja õhuvahetus 50 Pa juures oli $n_{50}=6.13$ 1/h. Kivi- ja tellishoonete keskmine õhulekkearv $q_{50}=4.88 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ja õhuvahetus 50 Pa juures oli $n_{50}=5.37$ 1/h.

Tabel 12 Õhupidavuse mõõtetulemused

Objekti kood	q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]	n_{50} [1/h]
K.B.1*	3.38*	3.98*
K.B.2	9.3	8.88
K.B.3	6.56	5.17
K.B.4	3.09	2.82
T.A.1*	3.75*	3.27*
T.M.1*	5.49*	6.68*
T.M.2*	6.9*	9.07*
V.B.1*	0.83*	0.97*
V.B.2*	1.5*	2.02*
R.ML.1*	10.19*	14.64*

*Õhupidavus mõõdetud korteris

Peamised õhulekkekohad mõõdetud hoonetel olid:

- Välisseina ja vahelae liitekohas (Joonis 1)
- Avatäited ja nende välisseina liitekohas (Joonis 2)
- Pööningu vahelaes (Joonis 3)
- Välisseina ja põranda liitekohas (Joonis 4)

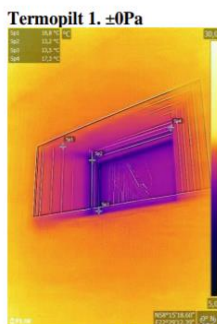


IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+1.8
Sisitemperatuur, °C	+22
Label	Value
Sp1	25.7 °C
Sp2	21.8 °C
Sp3	22.6 °C
Sp4	25.3 °C
fRsi1	1.18
fRsi2	0.99
fRsi3	1.03
fRsi4	1.16

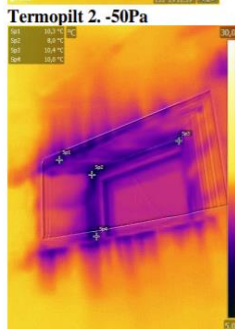


IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+1.8
Sisitemperatuur, °C	+22
Label	Value
Sp1	19.8 °C
Sp2	14.9 °C
Sp3	20.1 °C
Sp4	19.5 °C
Δt , Sp1	29%
Δt , Sp2	34%
Δt , Sp3	12%
Δt , Sp4	29%

Joonis 1 Vasakul välisseina ja vahelae liitekohta õhulekke fotod enne ja pärast, paremal punktide temperatuurid ja pinnatemperatuuri suhtelise alanemise väärtused (Δt_s)



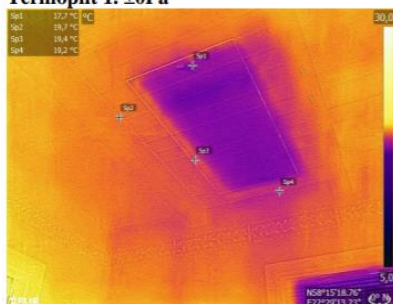
IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+1.8
Sisitemperatuur, °C	+18.5
Label	Value
Sp1	18.8 °C
Sp2	13.2 °C
Sp3	13.5 °C
Sp4	17.3 °C
fRsi1	1.02
fRsi2	0.68
fRsi3	0.70
fRsi4	0.92



IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+1.8
Sisitemperatuur, °C	+18.5
Label	Value
Sp1	10.3 °C
Sp2	8.0 °C
Sp3	10.4 °C
Sp4	10.0 °C
Δt , Sp1	51%
Δt , Sp2	31 %
Δt , Sp3	18%
Δt , Sp4	44%

Joonis 2 Vasakul akna ja välisseina õhulekke fotod enne ja pärast, paremal punktide temperatuurid ja pinnatemperatuuri suhtelise alanemise väärtused (Δt_s)

Termopilt 1. ±0Pa



IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+1.8
Sisitemperatuur, °C	+18.5
Label	Value
Sp1	17.7 °C
Sp2	19.7 °C
Sp3	19.4 °C
Sp4	19.2 °C
fRsi1	0.95
fRsi2	1.07
fRsi3	1.05
fRsi4	1.04

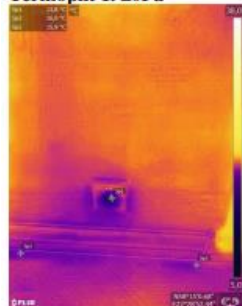
Termopilt 2. -50Pa



IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+1.8
Sisitemperatuur, °C	+18.5
Label	Value
Sp1	10.1 °C
Sp2	8.7 °C
Sp3	11.5 °C
Sp4	11.0 °C
$\Delta t, Sp1$	45%
$\Delta t, Sp2$	65%
$\Delta t, Sp3$	47%
$\Delta t, Sp4$	49

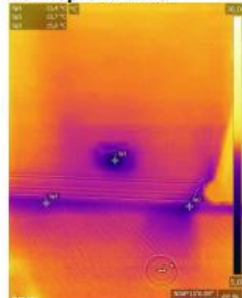
Joonis 3 Vasakul pööningu vahelae õhulekke fotod enne ja pärast, paremal punktide temperatuurid ja pinnatemperatuuri suhtelise alanemise väärtused (Δt_c)

Termopilt 1. ±0Pa



IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+2.0
Sisitemperatuur, °C	+21.0
Label	Value
Sp1	13.8 °C
Sp2	16.0 °C
Sp3	15.9 °C
fRsi1	0.62
fRsi2	0.74
fRsi3	0.73

Termopilt 2. -50Pa



IR Text Comment	Value
Välitemperatuur, °C	+2.0
Sisitemperatuur, °C	+21.0
Label	Value
Sp1	11.4 °C
Sp2	13.7 °C
Sp3	15.6 °C
$\Delta t, Sp1$	12.6%
$\Delta t, Sp2$	12,1%
$\Delta t, Sp3$	0 %

Joonis 4 Vasakul põranda ja välisseina liitekohas õhulekke fotod enne ja pärast, paremal punktide temperatuurid ja pinnatemperatuuri suhtelise alanemise väärtused (Δt_s)

3.3 Külmasildade mõõtmistulemused

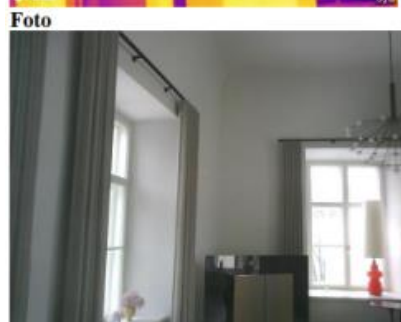
Termograafilised mõõtmised tehti hoonest seestpoolt. Probleemsed külmasillad esinesid enamasti akende ja välisseinte liitekohas (Joonis 6) ning välisseina välisnurgas (Joonis 5). Samuti esinesid külmasillad välisseina ja vahelae või pööningupõranda liitekohas, välisseina ja põranda liitekohas.



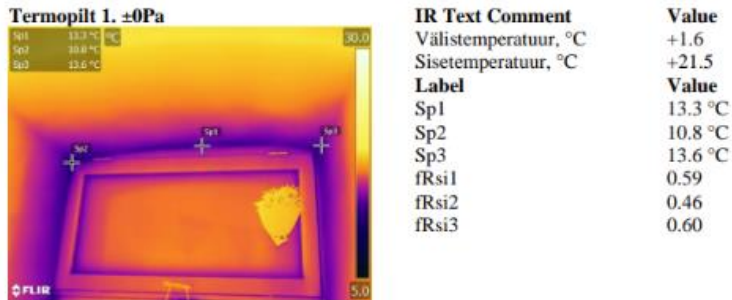
IR Text Comment	Value
Välistemperatuur, °C	+3.0
Sisetemperatuur, °C	+21.5
Label	Value
Sp1	12.5 °C
Sp2	12.3 °C
Sp3	14.4 °C
fRsi1	0,51
fRsi2	0,50
fRsi3	0,62



IR Text Comment	Value
Välistemperatuur, °C	+3.0
Sisetemperatuur, °C	+21.5
Label	Value
Sp1	12.0 °C
Sp2	12.1 °C
Sp3	14.3 °C
$\Delta t, Sp1$	3%
$\Delta t, Sp2$	1%
$\Delta t, Sp3$	0%



Joonis 5 Oluline külmasild välisseina välisnurgas



Joonis 6 Oluline külmasild akna ja välisseina liitekohas

3.4 Energiatõhusus enne ja pärast renoveerimist

Energiatõhususe parandamiseks oli hoonete renoveerimisel kasutatud järgmised meetmeid:

- **Piirdetarindite soojustamine.** Olid soojustatud välisseinad, põrandad, katuslagi või pööning, samuti keldriseinad ja keldri vahelagi. Mõnedel hoonetel oli piirdetarindite soojustamine piiratud või üldse keelatud, nt välisseinte soojustamine välisilme säilitamiseks.
- **Avatäidete renoveerimine või vahetus.** Olid vahetatud või renoveeritud aknad, paigaldades sisemisele raamile klaaspaketid. Uksed olid renoveeritud ja muudetud soojuspidevamaks.
- **Tehnosüsteemide põhilahenduste renoveerimine.** Olid uuendatud kütte-, ventilatsiooni-, veevarustus- ja kanalisatsioonisüsteemid ning elektrivarustus.
- **Taastuenergia allikad.** Ühe hoone katusele olid paigaldatud päikesepaneelid elektri tootmiseks.

Enne renoveerimist moodustasid kõige suurema osa soojuserikadudest välisseinad, keskmiselt 38%, seega nende soojustamisel sai kõige rohkem vähendada energiatõhusust. Soojuskaod avatäidetest moodustasid enne renoveerimist 17%, katusest 15% ning põrandast 12%. Tabelis 13 on toodud soojuskadude jaotus arvutuste järgi enne ja pärast renoveerimist.

Tabel 13 Soojuskadude jaotus enne ja pärast renoveerimist

	Aeg	Osakaal summaarsest soojuserikaost, %										
		K.B.1	K.B.2	K.B.3	K.B.4	T.A.1	T.M.1	T.M.2	T.M.3	V.B.1	V.B.2	R.ML.1
Välissein	Enne	31	27	51	21	63	27	30	50	31	50	31
	Pärast	38	22	41	12	73	21	18	36	40	47	34
Katus	Enne	13	27	15	28	6	18	21	4	15	15	4
	Pärast	6	6	11	17	4	9	8	6	11	9	3
Põrand	Enne	15	9	5	14	5	22	21	10	12	8	6
	Pärast	19	31	7	13	3	18	27	14	13	6	4
Avatäited	Enne	22	22	11	17	13	16	10	12	19	16	27
	Pärast	17	20	16	34	7	24	15	20	21	25	20
Külmasillad	Enne	4	6	11	10	6	5	5	12	12	5	11
	Pärast	7	8	10	10	7	8	9	13	12	9	10
Õhulekked	Enne	15	9	7	10	6	12	12	12	11	7	21
	Pärast	13	14	15	13	5	20	23	11	3	4	29

Tabelites 14 ja 15 on esitatud arvutatud energiavajadus enne ja pärast renoveerimist

Tabel 14 Energiavajadus enne renoveerimist

		Energiavajadus, kWh/(m ² a)										
		K.B.1	K.B.2	K.B.3	K.B.4	T.A.1	T.M.1	T.M.2	T.M.3	V.B.1	V.B.2	R.ML.1
Soojusvarustus												
Ruumide kütte	Elekter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Soojus	240	231	289	241	346	197	178	197	330	458	232
Vent. õhu soojendamise	Elekter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Soojus	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
Tarbevee soojendamise	Elekter	-	-	28	33	-	-	-	-	-	-	-
	Soojus	33	33	-	-	33	33	33	33	33	33	33
Vent. süsteem	Elekter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Valgustus	Elekter	7	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7
Seadmed	Elekter	23	23	18	3	23	23	23	23	23	23	23
Summa (tehnosüsteemide sum. energiakasutus)		310	299	347	309	416	267	248	267	400	528	302

Energiatõhususarv / kaalutud energiakasutus	312	276	296	282	407	297	256	297	301	384	304
Energiatõhususarvu klass	G	E	F	F	H	G	F	G	G	H	G

Tabel 15 Energiavajadus pärast renoveerimist

		Energiavajadus, kWh/(m ² a)										
		K.B.1	K.B.2	K.B.3	K.B.4	T.A.1	T.M.1	T.M.2	T.M.3	V.B.1	V.B.2	R.ML.1
Soojusvarustus												
Ruumide kütte	Elekter	-	44	46	33	-	-	-	-	-	-	-
	Soojus	111	(103*)	(106*)	(76*)	252	89	85	121	82	138	137
Vent. Õhu soojendamise	Elekter	-	10	6.7	9	-	-	-	-	-	-	-
	Soojus	8.4				3.4	4.3	10	6.7	56	56	6.7
Tarbevee soojendamise	Elekter	-	18	16	15	-	-	-	-	-	-	-
	Soojus	33	(30*)	(25*)	(25*)	33	33	33	33	33	33	33
Vent. süsteem	Elekter	7	7	-	6	4	8	7	-	6	4	-
Valgustus	Elekter	7	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7
Seadmed	Elekter	23	23	18	18	23	23	23	23	23	23	23
Summa (tehnosüsteemide sum. energiakasutus)		188	107	92	86	323	165	164	192	208	262	209
Energiatõhususarv / kaalutud energiakasutus		171	214	184	172	329	203	189	222	227	274	179
Energiatõhususarvu klass		D	D	D	D	G	E	E	F	F	F	E

* Kajastab soojuste kulu lähtuvalt soojustepumba soojustegurist (küttekulu vähenemine arvutatakse sellest suurusest)

Keskmine energiatõhususarvu vähenemine oli 31%. Renoveerimistöde käigus saavutati hoonete energiatõhususarvu klassi paranemist. Kõige madalam energiatõhusus klass G oli saavutatud A-kaitsekategooria hoone renoveerimisel, kus oli keelatud välisseinte soojustamine. Kõrgeim energiatõhususarvu klass D oli saavutatud viiel hoonel – ühel ehitismälestisel ja neljal hoonel B-kaitsekategooriaga.

Keskmine soojusvajaduse vähenemine oli 51%. Mälestise ja A-kaitsekategooria hoone küttevajaduse muutus oli 30% ehk teistest hoonetest väiksem. Miljööala hoonete küttevajaduse vähenemine keskmiselt oli 40% ning B-kaitsekategooriate hoonete oma keskmiselt 64%.

Järgmisena on esitatud kokkuvõtlik tabel energiakasutusest enne ja pärast renoveerimist, mis annab parema ülevaade saadud tulemustest.

Tabel 16 Energiavajadus enne ja pärast renoveerimist

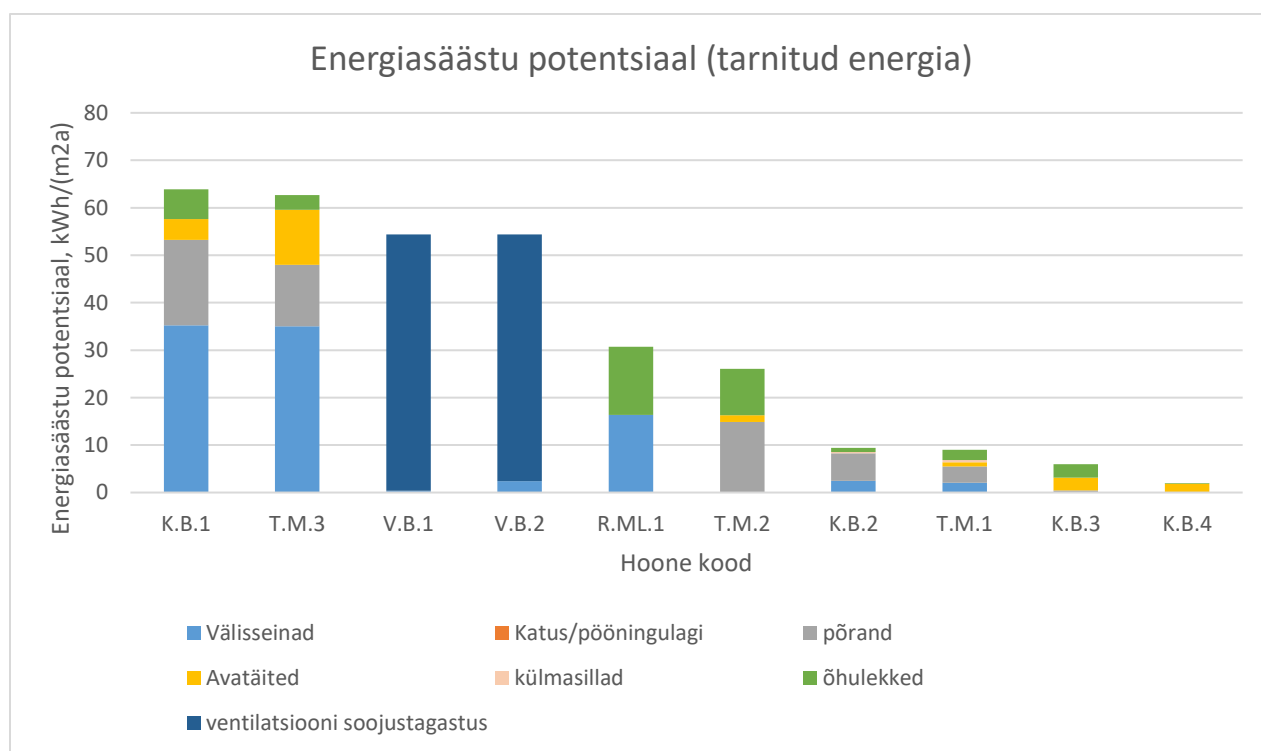
	Aeg	Energiavajadus, kWh/(m ² a)										
		K.B.1	K.B.2	K.B.3	K.B.4	T.A.1	T.M.1	T.M.2	T.M.3	V.B.1	V.B.2	R.ML.1
Soojus (küte, vent.õhu soojendamise, tarbevee soojendamise)	Enne	280	237	296	247	385	237	218	237	370	498	272
	Pärast	153	72 (143*)	69 (138*)	57 (110*)	288	127	128	162	172	228	177
Elekter (vent. süsteem, valgustus, seadmed)	Enne	30	61	51	61	30	30	30	30	30	30	30
	Pärast	35	35	23	29	34	38	36	30	36	34	30
Tarnitud soojus ja elekter	Enne	310	298	347	309	416	267	248	267	400	528	302
	Pärast	188	107	92	86	323	165	164	192	208	262	209
Energia-tõhususarv	Enne	312	276	296	282	407	297	256	297	301	384	304
	Pärast	171	214	184	172	329	203	189	222	227	274	179
Energia-tõhusus-arvu klass	Enne	G	E	F	E	H	G	F	G	G	H	G
	Pärast	D	D	D	D	G	E	E	F	F	F	D
Energia-tõhusus-arvu vähenemine, %		45	22	38	39	19	32	26	25	25	29	42
Soojusvajaduse vähenemine, %		46	73 (47*)	79 (57*)	80 (61*)	25	47	41	32	54	54	35

* Kajastab soojuse kulu lähtuvalt soojuspumba soojustegurist (küttekulu vähenemine arvutatakse sellest suuruselt)

3.5 Saavutama jäänud energiatõhusus

Energiatõhususe potentsiaal jäi realiseerimata piirdetarindite ebapiisava soojustamise või tehnosüsteemide renoveerimata jätmise pärast. Mõnedel hoonetel oli vähene või puuduv soojustus piirdetarinditel põhjustatud hoone välisilme säilitamisega, aga oli ka juhtumeid, kus näiteks hoone välisseinu oli võimalik paremini soojustada, säilitades samal ajal ka hoone proportsioone ja arhitektuuriväärtusi. Samuti jäi vaatamata projekteerimisele osal hoonest soojustagastusega ventilatsioon paigaldamata.

Järgmises graafikus on näidatud, kus peitub energiatõhususe saavutamise potentsiaal uuritud hoonetes.



Joonis 7 Energiasäästu täiendav potentsiaal (tarnitud energia)

Järgmises tabelis on kirjeldatud uuritud hoonete lahendused, mis olid teostatud renoveerimistöde käigus ning lahendused, milledega saaks saavutada parema energiatõhususe.

Tabel 17 Energiasäästu potentsiaali lahenduste kirjeldus

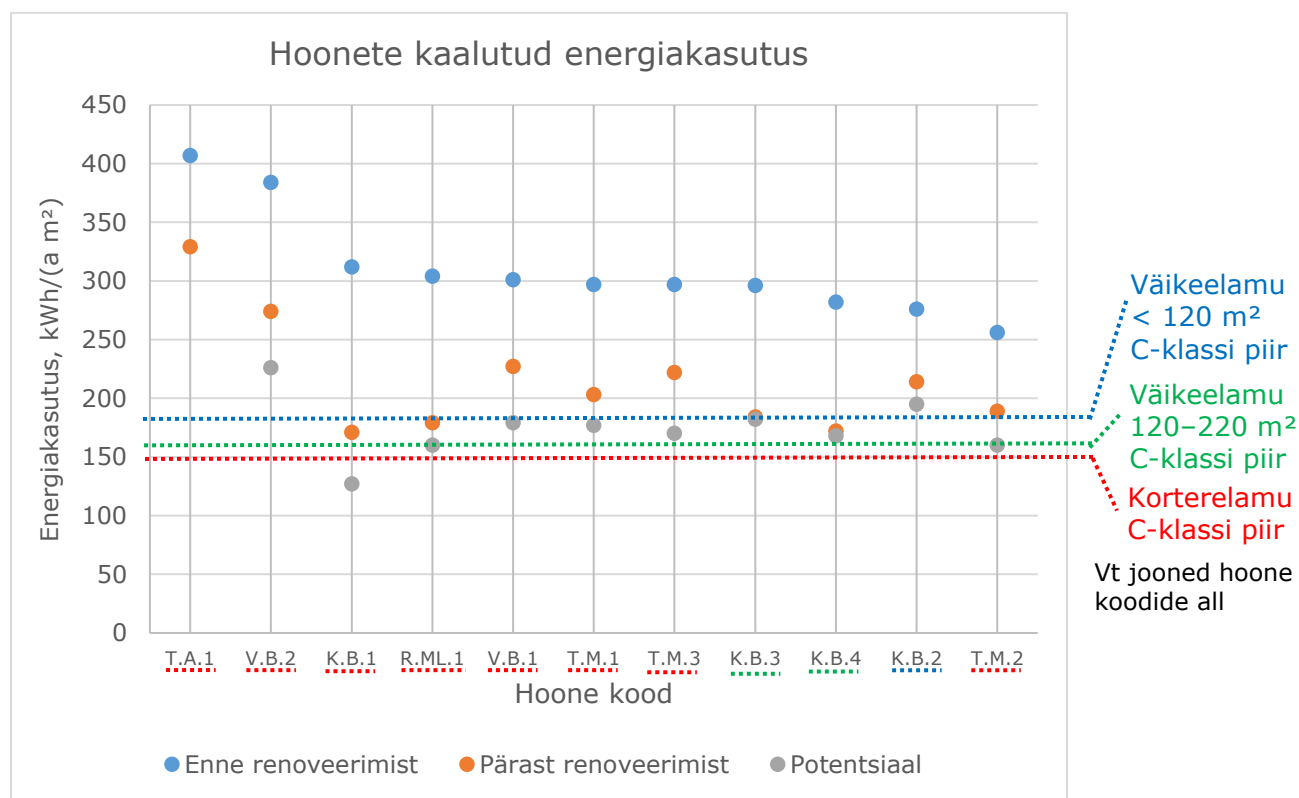
Hoone kood	Katus		Välissein		Põrand		Ventilatsioon	
	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal
K.B.1	Soojustatud pööningulagi 200mm min.villaga (U=0.16 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Palksein soojustatud seestpoolt 50mm ja väljastpoolt min.villast tuuletõkkeplaat 30mm. (U=0.23 W/(m ² ·K)) Tuhaplokkidest sein soojustatud 100mm min.villaga ja tuuletõkkeplaat. (U=0.22 W/(m ² ·K))	Palksein soojustatud 150mm, tuuletõkkeplaat 30mm. (U=0.18 W/(m ² ·K)) Tuhaplokkidest sein soojustatud 150mm, tuuletõkkeplaat 30mm. (U=0.18 W/(m ² ·K))	Soojustatud 150mm (U=0.17 W/(m ² ·K))	Soojustatud 200mm (U=0.14 W/(m ² ·K))	sissepuheväljatõmme soojustagastusega	ei muutunud
K.B.2	Puitvahe-lagede vahel soojustatud 300mm min.villaga (U=0.16 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Palksein soojustati tseluvillaga 2-4cm kihiga väljastpoolt, seestpoolt 50mm pillirooplaad (U=0.36 W/(m ² ·K))	Palksein soojustatud 150mm min.villaga 30mm tuuletõkkeplaat (U=0.18 W/(m ² ·K))	Soojustatud EPS-iga 150mm raudbetoonpõrand (U=0.18 W/(m ² ·K))	Soojustatud EPS-iga 200mm raudbetoonpõrand (U=0.15 W/(m ² ·K))	sissepuheväljatõmme soojustagastusega	ei muutunud
K.B.3	Katuslagi soojustatud 300mm min.villaga ja 30mm tuuletõkkeplaadiga. (U=0.14 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Paekivisein soojustatud seestpoolt 100mm pillirooplaadiga (U=0.53 W/(m ² ·K))	ei muutunud, sest väljastpoolt soojustamine polnud võimalik	Soojustatud EPS-iga 150mm raudbetoonpõrand. (U=0.18 W/(m ² ·K))	Soojustatud EPS-iga 200mm raudbetoonpõrand. (U=0.15 W/(m ² ·K))	loomulik	sissepuheväljatõmme soojustagastusega
K.B.4	Katuslagi soojustatud 300m klaasvillaga ja 18mm tuuletõkkeplaadiga (U=0.16 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Välimine kiht-tahatud paeplokkid, sisemine - EcoTerm 500 mm kergbetoonplokkidest (U=0.13 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Soojustatud EPS-iga 200mm raudbetoonpõrand (U=0.15 W/(m ² ·K))	ei muutunud	sissepuheväljatõmme soojustagastusega	ei muutunud

Hoone kood	Katus		Välissein		Põrand		Ventilatsioon	
	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal
T.M.1	Soojustatud 300mm kivivillaga (U=0.17 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Palkseinad soojustati 100mm kivivillaplaadiga ja 30mm tuuletõkkeplaadiga (U=0.26 W/(m ² ·K))	Palkseinad soojustati 150mm kivivillaplaadiga ja 30mm tuuletõkkeplaadiga (U=0.19 W/(m ² ·K))	Keldri betoonist vahelagi soojustatud 50mm kivivillaga (U=0.36 W/(m ² ·K))	Keldri betoonist vahelagi soojustatud 150mm kivivillaga (U=0.19 W/(m ² ·K))	sissepuheväljatõmme soojustagastusega	ei muutunud
T.M.2	Pööningulagi soojustatud 400mm (U=0.13 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Puitkilpseinad soojustati 150mm ja tuuletõkkeplaadiga	ei muutunud	soojustamata (U=0.40 W/(m ² ·K))	Keldri betoonist vahelagi soojustatud 150mm kivivillaga (U=0.18 W/(m ² ·K))	sissepuheväljatõmme soojustagastusega	ei muutunud
T.M.3	Katuslagi soojustatud 300mm kivivillaga (U=0.17 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Silikaattelistest välissein, õhuvahe täidetud termovahuga (U=0.67 W/(m ² ·K)) Sokkel soojustatud 100mm kivivillaga (U=0.33 W/(m ² ·K)) Maa-alune keldrisein soojustatud XPS-plaatidega 100mm (U=0.21 W/(m ² ·K))	Silikaattelistest sein soojustatud min.villa plaatidega 200mm (U=0.15 W/(m ² ·K)) Sokkel soojustatud 200mm EPS-iga (U=0.18 W/(m ² ·K))	Soojustamata betoonpõrand (U=0.49 W/(m ² ·K))	Betoonpõrand soojustatud 150mm EPS-iga (U=0.17 W/(m ² ·K))	loomulik	sissepuheväljatõmme soojustagastusega
V.B.1	Katuslagi soojustatud 300mm min.villaga (U=0.20 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Keraamilistest tellistest sein	ei muutunud	Raudbetoonist vahelagi soojustatud 50mm min.villaplaadiga (U=0.26 W/(m ² ·K))	Raudbetoonist vahelagi soojustatud 150mm min.villaplaadidega (U=0.20 W/(m ² ·K))	Väljatõmbeventilatsioon	sissepuheväljatõmme soojustagastusega

Hoone kood	Katus		Välissein		Põrand		Ventilatsioon	
	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal	Praegu	Potentsiaal
V.B.2	Katuslagi soojustatud 250mm min.villaga ja tuultõkkeplaadiga (U=0.19 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Palkseinad soojustatud 50mm tselluvillaga ja tuuletõkkeplaadiga, seestpoolt soojustatud 50mm pillirooplaadiga. Maa-alune sein soojustatud 100mm Styrofoam plaadiga (U=0.19 W/(m ² ·K))	Maa-alune sein soojustatud 150mm Styrofoam plaadiga (U=0.14 W/(m ² ·K))	Raudbetoonplaat soojustatud 200mm Styrofoam plaatidega	ei muutunud	Väljatõmbeventilatsioon	sissepuheväljatõmme soojustagastusega
R.ML.1	Katuslagi soojustatud 400mm min.villaga ja puistevillaga (U=0.13 W/(m ² ·K))	ei muutunud	Savitelistest fassaad ja sokkel soojustatud soojustuskrohviga (U=0.51 W/(m ² ·K) ja U=1.0 W/(m ² ·K)). Otsaseinad soojustatud 200mm min.villaga	Fassaad ja sokkel soojustatud 200mm min villaga (teepoolne külg soojustamata) (U=0.15 W/(m ² ·K) ja U=0.17 W/(m ² ·K))	Põrand pinnasel soojustatud 100mm EPS-iga	ei muutunud	loomulik	sissepuheväljatõmme soojustagastusega

Potentsiaal peitub ka soojusallikas – soojuspumba paigalduses (soojusteguri kaudu) või kaugküttes (parem süsteemi juhtimine, kõrgem efektiivsus kui vanal ahjul), mis mõjutab eelkõige ruumide kütet ja tarbevee soojendamist. Soojustegur on soojuspumpade jõudlust iseloomustav näitaja, mis näitab, kui palju soojust suudab seade toota iga kasutatud energiaühiku kohta ning määrab kui tõhusalt see töötab. Näiteks õhk-vee soojuspumpadel keskmine soojustegur on sageli 3-4 ehk siis toodab soojuspump kolm või neli korda rohkem soojust, kui see ise tarbib elektrit. Parema süsteemi juhtimine võimaldab täpsemat temperatuuri reguleerimist, mis vähendab energiakulu. Soojusallika mõju muinsusväärtusele pole üldjuhul suur ning neid meetmeid võib alati lisada ka hilisemate etappide jooksul, mistõttu ei ole see selle lõputöö fookus.

Joonisel 8 on näidatud analüüsitud hoonete energiatarvete tulemused enne ja pärast renoveerimist ning tulemus, mille oleks võinud saavutada säilitades muinsusväärtusi. Keskmiselt saaks energiatarvust parandada veel 14% (tulemused vahemikus 1%-26%). Soojusvajadust saaks keskmiselt vähendada veel 23% (tulemused vahemikus 3%-41%). Selliste lahendustega keskmine energiatarvuse vähenemine võrreldes algolukorraga saaks olla 42%.



Joonis 8 Hoonete kaalutud energiakasutus

Energiatõhusus oli paljude hoonete projektides käsitlemata või käsitletud väga vähesel määral. Kuna muinsuskaitse all olevad hooned on vabastatud energiatõhususe miinimumnõuetest, ei ole nende renoveerimisprojektide koostamisel energiatõhususe parandamine peamine eesmärk. Seega jääb selliste hoonete renoveerimisel energiatõhususe potentsiaal lõpuni realiseerimata. Energiatõhusus oli projekteeritud miljööala hoonete projektides ning ühe B-kaitsekategooria hoonel (K.B.4).

Hoone T.A.1 renoveerimistöõde puhul oli saavutatud maksimaalne võimalik energiatõhusus. Välisseinte soojustamine selle hoone puhul ei olnud võimalik vastavalt asukohale ning muinsuskaitseliste piirangute pärast.

Muinsuskaitse eritingimustes toodud soojustamise piirangutega oli ära võetud võimalus, et projekteerija saaks ise renoveerimisprojekti koostamisel välja pakkuda lahendusi, mis oleksid rohkem energiatõhusamad ning samal ajal säiliks ka muinsusväärtused. Nii näiteks hoonete K.B.1, K.B.2, T.M.3 ja R.ML.1 oli saavutama energiatõhusus otseselt seotud põhjendamatute soojustamise piirangutega, mis ei olnud seotud muinsusväärtuse rikkumisega. Nendel hoonetel, kus välispidine soojustamine oli keelatud välisilme säilitamise pärast, oli tegemist arhitektuurselt oluliste välisseintega, nt keraamilistest tellistest välisseinad, mille soojustamine oleks neid peitnud.

3.6 Renoveerimislahendused parema energiatõhususe saavutamiseks

3.6.1 Puithoone renoveerimislahendused

Puithoone projekteeritud lahendused parema energiatõhususe saavutamiseks on leitavad lisades 1-3. Joonised on tehtud palkmaja K.B.1 näitel. Joonistel on toodud kaks lahendusvarianti – algne lahendus enne renoveerimist ning lahendus, millega saaks saavutada parema energiatõhususe.

Pööning ja põrand olid renoveerimisel korralikult soojustatud, mistõttu jäävad need piirdetarindid hetkel teostatud renoveerimislahendusega samaks. Renoveerimisel oli välissein soojustatud ainult tuuletõkkeplaadiga ning sokkel jäi soojustamata. Proportsioonide säilitamiseks tuleb sokkel ja välissein soojustada sama paksuse soojusisolatsiooniga.

Iga lahendusvariandi piirdetarindite soojuslähivused on toodud järgmises tabelis:

Tabel 18 K.B.1 hoone piirdetarindite soojusläbivused

Piirdetarind	Soojusläbivus U, W/(m ² K)		
	Enne renoveerimist	Pärast renoveerimist	Energiatõhususe potentsiaal
Pööning	0.48	0.16	0.16
Välissein	0.36	0.29	0.19
Põrand	0.29	0.15	0.15
Aken	2.7	1.1	0.9

Projekteeritud lahendustega on hoonel K.B.1 võimalik saavutada C-energiatõhususklassi.

Niiskusprobleemide vältimiseks kaetakse hoone vundament hüdroisolatsiooniga ning hoone ümber rajatakse drenaaž. Maapinna kalle tehakse hoonest eemale.

Räästa proportsioonide säilimiseks tuleb sarikaotsad palkseina piiril maha saagida ning paigaldada need fassaadi pinnast soojustuse võrra väljapoole, säilitades renoveerimiseelsed fassaadiproportsioonid. Räästakõrgus väheneb 150mm välisseina soojustuse korral 50mm ning harja kõrgus jääb samaks, kuna soojustatud oli pööningu vahelagi.

3.6.2 Kivihoone renoveerimislahendused

Kivihoone projekteeritud lahendused parema energiatõhususe saavutamiseks on leitavad lisades 4-6. Joonised on tehtud tellismaja T.M.3 näitel. Joonistel on toodud kaks lahendusvarianti – algne lahendus enne renoveerimist ning lahendus, millega saaks saavutada parema energiatõhususe. Räästasõlme joonisel on näidatud variant renoveerimisprojektist ja parema energiatõhususega lahendus. Algne hoone krohvitud räästakarniis oli mingil ajal ära lammutatud ja asendatud puitlaudis kastidega. Renoveerimistöde käigus jäi algne karniis taastamata, kuigi see oli projektis ette nähtud.

Renoveerimisel olid silikaattellismüüride õhkvahe soojustatud termovahuga. Sokkel oli soojustatud 100mm kiviplaatidega, millega rikuti hoone algsed proportsioonid.

Proportsioonide säilitamiseks tuleb sokkel ja välissein soojustada sama paksuse soojusisolatsiooniga. Lõputöös pakutud lahenduses soojustatakse tellismüürid 200mm mineraalvillaplaatidega ja sokkel 200mm EPS plaatidega. Hoone enamik aknaid olid enne renoveerimistöid asendatud plastikakendega. Hoone kõik plastikaknad ning sobimatu välisilmega aknad tuleb projekti järgi asendada 2 raamiga puitakendega, mille välisel raamil on selektiivklaas ja sisemisel pakett. Renoveerimistöode käigus pole seda teostatud.

Räästa proportsioonide säilimiseks tuleb räästakarniis soojustada tellismüüridega sama paksusega. Lõputöös toodud parema energiatõhususega lahenduses on räästa kõrgus vähenenud 10mm.

Iga lahendusvariandi piirdetarindite soojusläbivused on toodud järgmises tabelis:

Tabel 19 Hoone T.M.3 soojusläbivused

Piirdetarind	Soojusläbivus U, W/(m ² K)		
	Enne renoveerimist	Pärast renoveerimist	Energiatõhususe potentsiaal
Katuslagi	0.17	0.17	0.17
Välissein	1.05	0.65	0.13
Põrand	0.49	0.49	0.17
Aken	1.6	1.6	0.9

Projekteeritud lahendustega on hoonel T.M.3 võimalik saavutada D-energiatõhususklassi. Pärast renoveerimistöid on hoonel F-energiatõhususklass.

4 TULEMUSTE HINDAMINE

4.1 Piirdetarindite külmasillad ja õhulekked

Hoonepiirete õhupidavusel on suur mõju hoonete energiatõhususele, kuna see mõjutab otseselt küttekulusid ja sisekliima kvaliteeti. Tuleb silmas pidada, et hoone piirded, küttesüsteem ja ventilatsioon töötavad tervikliku süsteemina – kui üks neist ei toimi korralikult, jääb soovitud kvaliteet saavutamata. Õhupidavate piiretega hoones peab kogu õhuvahetuse tagama efektiivne ventilatsioon. See võib toimida kas loomulikul või mehaanilisel viisil, kuid oluline on, et õhuvooluhulk oleks piisav. Ilma toimiva ventilatsioonisüsteemita pole õhutihedate piiretega hoones võimalik kvaliteetset sisekliimat saavutada. Samuti ei taga energiatõhusust ka kõige paremini toimiv kütte- ja ventilatsioonisüsteem, kui hoone piirded ei ole piisavalt õhu- ja soojapidavad.

Lõputöös mõõdetud keskmine õhulekkearv $q_{50}=5.10 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ on väiksem, kui määruses nr 58 toodud väärtus väikeelamutele rekonstrueerimise puhul ($6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) ning suurem, kui olulise rekonstrueerimise puhul ($4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$). Samuti tulemus on suurem, kui muude hoonete baasväärtused. Suurem mõõdetud õhulekkearv oli $10.19 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ning mõõdetud hoone oli mälestis.

Analüüsitud hoonete õhulekkearv q_{50} ja õhuvahetuskordus n_{50} ei olnud omavahel võrdsed, sest korteritel on välispiirete pindala suurem, mistõttu on q_{50} väärtus väiksem. Piirete pindala ja ruumi sisekubatuuri suhe sõltub hoone kompaktsusest, mida mõjutavad planeeringu keerukus ja korruste kõrgus.

Ebapiisav õhupidavus hoone piirdetarindites põhjustab kontrollimatut õhu liikumist läbi piirete, mis on sageli tingitud pragudest ja muust ebatihedusest.

Ebapiisava õhupidavusega piiretes võib niiskuse konvektsioon transportida palju suuremaid niiskusekoguseid kui seda võimaldaks veeauru difusioon. Isegi kui hoone piirded on dimensioneeritud nii, et veeauru difusioon ei põhjustaks niiskusprobleeme, võib niiskuse konvektsioon siiski tekitada liigseid niiskustasemeid.

4.2 Energiatõhusus

Hoone piiretest on suurim energiasäästu potentsiaal välisseina soojustamisel, kuna enne renoveerimist moodustasid kõige suurema osa soojuserikadudest välisseinad, keskmiselt 38%. Sama tulemus on saadud ka uuringus „*Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region*” [25]. Uuringus oli selle põhjuseks algsete välisseinte kõrge soojuslabilaskvus ja välisseinte suur pindala kogu hoone piirde suhtes. Uuringus käsitletud kivimajadel, kus välisseinte soojuslabilaskvus oli teiste majatüüpidega võrreldes kõrgem, parandas välisseina lisasoojustus energiatõhusust kaks korda Eestis ja kolm korda Soomes [25].

Renoveerimistöde käigus ei saavutatud ühegi hoone puhul energiatõhususe miinimumnõuetest tulenevat C-klassi. Kõrgem saavutatud klass oli D-klass. Tulenevalt asjaolust, et energiatõhususe miinimumnõuded ei kehti muinsuskaitse all olevate hoonete puhul, ei olnud energiatõhususe parandamine renoveerimisprojekti koostamisel esikohal. Ajalooliste hoonete ühise energiatõhususe parandamise eesmärgi puudumisel ei ole projekteerijatel ka ühist sihti, millega nad saaksid arvestada renoveerimisprojektide koostamisel. On kindlasti erandeid, nt mälestised, kus sellist ühist sihti oleks raske rakendada, aga kindlasti tuleb ka nende energiatõhususe parandamisele pöörata rohkem tähelepanu kui seda tehakse praegu. B-kaitsekategooria ja miljööalal asuvatele hoonetele võiksid olla rakendatud nende väärtustega arvestatavad energiatõhususe miinimumnõuded.

Selleks, et jõuda ETA väärtuseni 160 kWh/(m²a) oli vajalik energiatõhususe parandada keskmiselt veel 23%.

Külmas kliimas asuvate ajalooliste puitkorterelamute energiatõhususe ja kulusäästliku renoveerimise uuringus [26] toodi esile erinevad renoveerimismeetmete paketid, kus energiasääst oli vahemikus 20% kuni 55%. Väiksem energiasääst 20% oli seotud minimaalsete renoveerimistöödega ning 55% täisrenoveerimisega.

Lõputöös analüüsitud hoonete keskmine energiatõhususarvu vähenemine oli 31%, vahemikus 19% kuni 45%. Ülalpool kirjeldatud uuringute tulemustega võrreldes on lõputöös renoveeritud hoonetel tegemist keskmise renoveerimisulatusega.

Uuringus „*Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region*” on esile toodud, et hoonete tehnosüsteemide (ventilatsiooni- ja küttesüsteemide) uuendamisel sai ETA tulemust 47% vähendada, kuid seal oli tegemist

küttelahenduste muutmistega ehk maakütte paigaldamisega, mis iga ajaloolise hoone renoveerimisel pole võimalik.

Keskmiselt oleks olnud võimalik energiatõhusust parandada veel 14% (tulemused vahemikus 1%-26%). Energiatõhususklassi C oleks olnud võimalik ühel B-kaitsekategooriaga hoonel saavutada nii, et säiliks kõik muinsusväärtused.

Muinsuskaitse eritingimuste dokumendis toodud piirangud olid mõnedel juhtudel põhjendamatud ning takistasid parema energiatõhususe saavutamist. Muinsuskaitse eritingimused võiksid sõnastada hoonete muinsusväärtusi ning projekteerija saaks juba otsustada millised renoveerimislahendused sobiksid hoonetele ning ei kahjustaks hoonete muinsusväärtusi. Samuti olid muinsuskaitse eritingimustes toodud lahendused mõnedel juhtudel kopeeritud teiste hoonete dokumentidest ehk iga juhtum ei olnud täielikult läbi mõeldud.

5 JÄRELDUSED

Muinsuskaitse all olevate hoonete energiatõhususe parandamine on võimalik, kuid isegi C-energiatõhususklassini jõudmiseks tuleb koostada põhjalik renoveerimisprojekt. Renoveerimistöodega oli uuritud hoonete keskmist energiatõhususarvu vähendatud 31% võrra. Keskmiselt oli võimalik energiatõhusust parandada veel 14% (tulemused vahemikus 1%-26%). Paremini läbimõeldud renoveerimislahendustega saaks keskmine energiatõhususe vähenemine olla algolukorraga võrreldes 42%. Sellest lähtuvalt sai hoonete renoveerimist teha energiatõhususe osas paremini.

Muinsuskaitse piirangud osutusid sageli suureks takistuseks soovitud energiatõhususe saavutamisel. Näiteks on paljudel juhtudel välistatud välisseinte soojustamine, mis mõjutab oluliselt hoone energiatõhusust. Samuti võivad muinsuskaitse nõuded olla ülemäärased ja mitte alati kontekstile sobivad, mis viitab vajadusele parema paindlikkuse järele eritingimuste koostamisel. Parima tulemuse saavutamiseks soovitatakse muinsuskaitse eritingimuste koostamisel keskenduda hoone väärtuslike detailide kaitsmisele, võimaldades samas projekteerijatele suuremat vabadust tehniliste lahenduste osas. See vähendaks olukordi, kus energiatõhususe tõstmine on piiratud ülemääraste piirangute tõttu.

Lõputöös projekteeritud renoveerimislahendused näitavad, et hoonete proportsioonide säilitamine on soojustamisega võimalik ning ajalooliste hoonete väärtuse saab säilitada energiatõhususe olulisel parandamisel. Ainus muutus oli räästa kõrguse vähenemine 5cm ja 1cm võrra, mis oleks silmale vähe eristatav. Sellised muutused peaksid olema muinsuskaitse poolt lubatud, kuna ei muuda eriti välisilmet ning annavad samal ajal elanikele parema sisekliima, ja väiksemad küttekulud Renoveerimisprojektide koostamisel tuleb teha põhjalikud eeluuringud ning sõlmed peavad olema põhjalikult läbi mõeldud. Lõputöös projekteeritud renoveerimislahendustega oleks hoonel K.B.1 võimalik saavutada C-energiatõhususklass ja hoonel T.M.3 D-energiatõhususklass.

Tulevikus on vaja arendada meetodeid, kuidas paika panna energiatõhususe nõuded muinsuskaitse all olevatele hoonetele. Ajalooliste hoonete ühise energiatõhususe parandamise eesmärgi puudumisel ei ole projekteerijatel ka ühist sihti, millega nad saaksid arvestada renoveerimisprojektide koostamisel. On kindlasti erandeid, nt mälestised, kus sellist ühist sihti oleks raske rakendada, aga kindlasti tuleb ka nende energiatõhususe parandamisele pöörata rohkem tähelepanu kui seda tehakse praegu. B-kaitsekategooria ja

miljöalal asuvatele hoonetele võiks olla rakendatud nende väärtustega arvestatavad energiatõhususe miinimumnõuded.

KOKKUVÕTE

Lõputöö esimene eesmärk oli saada ülevaade mälestiste ja muinsuskaitse alal olevate kodude energiatõhususest enne ja pärast renoveerimist ning tervikrenoveerimise praktikate kogemustest (õnnestumised ja ebaõnnestumised). Kokku analüüsi 11 muinsuskaitse all olevat hoonet. Renoveerimistöde käigus ei saavutatud ühegi hoone puhul energiatõhususe miinimumnõuetest tulenevat C-klassi. Kõrgeim saavutatud klass oli D-klass. Keskmine energiatõhususarvu vähenemine oli 31% ning keskmine soojusvajaduse vähenemine oli 51%. Hoonete renoveerimistöde käigus oli uuendatud tehnosüsteemide lahendusi ning tugevdatud kandekonstruktsioone, et pikendada hoonete kasutusiga. Ühtlasi oli vähendatud enamike piirdetarindite soojuslähivust. Renoveeritud hooned on kindlasti kasutajatele mugavamad, eelkõige paranenud sisekliima tõttu. Hoonete välisilme on oluliselt paranenud ning eluiga pikendatud. Tervikrenoveerimise käigus oli mitme hoone puhul teostatud niiskustehniliselt riskantseid lahendusi – välisseinu olid soojustatud seestpoolt. Teine probleem oli ebapiisav välispidine soojustamine. Välisseinu oli võimalik täiendavalt väljastpoolt soojustada, kuid muinsuskaitse piirangutest tingituna seda põhjalikumalt ei kaalutud. Kolmel hoonel üheteistkümnest jäi mehaaniline ventilatsioon paigaldamata, enamasti majanduslikel põhjustel. Kolmel hoonel oli paigaldatud ventilatsioon ilma soojustagastuseta.

Lõputöö teine eesmärk oli välja selgitada renoveerimise käigus kasutamata jäänud energiasäästupotentsiaal ja kuidas oli võimalik seda saavutada, säilitades hoone väärtusi. Energiatõhususe potentsiaal jäi realiseerimata piirdetarindite ebapiisava soojustamise või tehnosüsteemide renoveerimata jätmise pärast. Keskmiselt saaks energiatõhusust parandada veel 14% (tulemused vahemikus 1%-26%). Soojusvajadust saaks keskmiselt vähendada veel 23% (tulemused vahemikus 3%-41%). Selliste lahendustega keskmine energiatõhususe vähenemine võrreldes algolukorraga saaks olla 42%.

Kolmas eesmärk oli analüüsida tulemusi ja arendada seni kasutatud renoveerimislahendusi edasi, et parandada energiatõhusust ja sisekliimat, säilitades muinsusväärtusi. Selleks olid projekteeritud sõlmed, mis näitavad hoone algolukorda ning lahendust, millega oleks võinud saavutada paremat energiatõhusust. Lõputöös projekteeritud renoveerimislahendused näitavad, et hoonete proportsioonide säilitamine on soojustamisega võimalik ning ajalooliste hoonete väärtused saab säilitada energiatõhususe olulisel parandamisel.

SUMMARY IN ENGLISH

The first goal of the thesis was to gain an overview of the energy performance of heritage residential buildings before and after renovation, as well as to gather experiences from comprehensive renovation practices (successes and failures). A total of 11 heritage buildings were analysed. During the renovation, none of the buildings achieved the minimum C-class energy efficiency requirement. The highest class achieved was D-class. The average reduction in energy performance was 31%, and the average reduction in heating demand was 51%. During the renovations, technical equipment was updated, and load-bearing structures were strengthened to extend the buildings' lifespan. Additionally, the thermal transmittance of most building envelope components was reduced. The renovated buildings are certainly more comfortable for users, primarily due to improved indoor climate. The external appearance of the buildings has significantly improved, and their lifespan has been extended. During the comprehensive renovation, several buildings employed solutions that posed moisture-related risks as external walls were insulated from the inside. Another issue was insufficient external insulation. While it was possible to further insulate the external walls from the outside, this was not thoroughly considered due to heritage protection restrictions. Mechanical ventilation was not installed in three out of the eleven buildings, mostly due to economic reasons. In three buildings, ventilation systems were installed without heat recovery.

The second goal of the thesis was to identify the energy-saving potential during renovation and how it could have been achieved while preserving the buildings' values. The potential for energy performance was unrealized due to insufficient insulation of building envelope components or the failure to renovate technical systems. On average, energy performance could be improved by an additional 14% (results ranging from 1% to 26%). Heating demand could be further reduced by an average of 23% (results ranging from 3% to 41%). With such solutions, the average energy performance reduction compared to the initial state could reach 41%.

The third goal was to analyse the results and develop previously used renovation solutions further to improve energy performance and indoor climate while preserving heritage values. For this purpose, detail drawings were created, showing the building's initial state and solutions that could have achieved better energy performance. The renovation solutions designed in the thesis demonstrate that preserving the proportions of buildings is possible

with insulation, and the historical values of the buildings can be maintained while significantly improving energy performance.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast) (Text with EEA relevance)*. 2024. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>
- [2] „EU Building Stock Observatory - Database”. <https://building-stock-observatory.energy.ec.europa.eu/database/>
- [3] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives*. 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662>
- [4] „Ehitusseadustik–Riigi Teataja”. <https://www.riigiteataja.ee/akt/105032015001>
- [5] „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded–Riigi Teataja”. <https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014?leiaKehtiv>
- [6] B. Young ja W. Wright, „Energy efficiency of heritage buildings”. https://www.ca-epbd.eu/Media/638373627043371380/02-CT2_Factsheet-Heritage.pdf
- [7] Ü. Alev, A. Allikmaa, ja T. Kalamees, „Potential for Finance and Energy Savings of Detached Houses in Estonia”, *Energy Procedia*, kd 78, lk 907–912, nov 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.017.
- [8] E. Arumägi ja T. Kalamees, „Analysis of energy economic renovation for historic wooden apartment buildings in cold climates”, *Applied Energy*, kd 115, lk 540–548, veebr 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.041.
- [9] T. Kalamees et al., „Korterelamute välispiirete lisasoojustamise sõlmejoonised ja tüüporterite ventilatsioonilahendused”. 2015. <https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Korterelamute%20välispiirete%20lisasoojustamise%20sõlmjoonised%20ja%20tüüporterite%20ventilatsioonilahendused.pdf>
- [10] K. Kuusk ja T. Kalamees, „Estonian Grant Scheme for Renovating Apartment Buildings”, *Energy Procedia*, kd 96, lk 628–637, sept 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.113.
- [11] S. Lidelöw, T. Örn, A. Luciani, ja A. Rizzo, „Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review”, *Sustainable Cities and Society*, kd 45, lk 231–242, veebr 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.09.029.
- [12] „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia”. Tallinna Tehnikaülikool, Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, juuni 2020.
- [13] „Mälestise liikide ja muinsuskaitseala riikliku kaitse üldised kriteeriumid ning muinsuskaitsealal asuvate ehitiste väärtusklassid–Riigi Teataja”. Vaadatud: 22. september 2024. <https://www.riigiteataja.ee/akt/110112020007?leiaKehtiv>
- [14] „Projekti alusel ehitistel tehtavad tööd | Muinsuskaitseamet”. Vaadatud: 22. september 2024. <https://www.muinsuskaitseamet.ee/oigusaktid-ja-nouded/tood-malestistel/projekti-alusel-ehitistel-tehtavad-tood>
- [15] „Muinsuskaitseadus–Riigi Teataja”. Vaadatud: 22. september 2024. <https://www.riigiteataja.ee/akt/119032019013?leiaKehtiv>
- [16] A. Evard, „A’ ENERGIATÕHUSUSARVU KLASSI LAHENDUSED ÜLE 100 AASTA VANUSTELE PUITKORTERELAMUTELE (F. R. KREUTZWALDI 2, VÖRU HOONE NÄITEL)”, Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2022. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/7c8f3c77-1765-4a80-adfd-9adbd9e91e8c>
- [17] „Hygrothermal performance of a brick wall with interior insulation in cold climate: Vapour open versus vapour tight approach - Paul Klõšeiko, Targo Kalamees, 2022”. Vaadatud: 6. detsember 2024. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/17442591211056067>

- [18] „Muinsuskaitse eritingimused Pikk tn 10 Pärnu“. Muinsuskaitseamet, 2020.
- [19] „Muinsuskaitse eritingimused Pargi 2“. Muinsuskaitseamet, 2021.
- [20] „Muinsuskaitse eritingimused Uus tn 1, Kuressaare“. Muinsuskaitseamet, 2019.
- [21] A. Al-Habaibeh, A. Hawas, L. Hamadeh, B. Medjdoub, J. Marsh, ja A. Sen, „Enhancing the sustainability and energy conservation in heritage buildings: The case of Nottingham Playhouse“, *Frontiers of Architectural Research*, kd 11, nr 1, lk 142–160, veebr 2022, doi: 10.1016/j.foar.2021.09.001.
- [22] F. Roberti, U. F. Oberegger, E. Lucchi, ja A. Troi, „Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process“, *Energy and Buildings*, kd 138, lk 1–10, märts 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.028.
- [23] K. Kass, A. Blumberga, ja G. Zogla, „Energy performance of historical brick buildings in Northern Climate zone“.
- [24] K. Kuusk, T. Kalamees, ja M. Maivel, „Cost effectiveness of energy performance improvements in Estonian brick apartment buildings“, *Energy and Buildings*, kd 77, lk 313–322, juuli 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.026.
- [25] Ü. Alev *et al.*, „Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region“, *Energy and Buildings*, kd 77, lk 58–66, juuli 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.049.
- [26] Endrik Arumägi ja T. Kalamees, „Analysis of energy economic renovation for historic wooden apartment buildings in cold climates | Signed in“. Vaadatud: 11. november 2024. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84891163644&origin=reflist>
- [27] G. Nair, L. Verde, ja T. Olofsson, „A Review on Technical Challenges and Possibilities on Energy Efficient Retrofit Measures in Heritage Buildings“, *Energies*, kd 15, nr 20, Art. nr 20, jaan 2022, doi: 10.3390/en15207472.
- [28] P. Klõšeiko, E. Arumägi, ja T. Kalamees, „Muinsuskaitse all oleva koolimaja tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse soojus- ja niiskustehnilise toimivuse uuring“. Tallinna Tehnikaülikool, 2013. <https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Muinsuskaitse%20all%20oleva%20koolimaja%20tellistest%20välisseina%20seespolse%20lisasoojustuse%20soojus-%20ja%20niiskustehnilise%20toimivuse%20uuring.pdf>
- [29] T. Kalamees, E. Arumägi, ja Ü. Alev, „Performance of interiorly insulated log wall Experiences from Estonian cold climate conditions“.
- [30] T. Kalamees, T.-A. Kõiv, R. Liias, K. Öiger, ja teised, „Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga“, 2010.
- [31] „IEA SHC || Task 59 || Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy“. <https://task59.iea-shc.org/>
- [32] „EVS-EN ISO 6781-1:2023“, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6781-1-2023>
- [33] „EVS-EN ISO 13788:2012“, EVS. Vaadatud: 6. november 2024. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13788-2012>
- [34] „EVS-EN ISO 9972:2015“, EVS. Vaadatud: 6. november 2024. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-9972-2015>
- [35] „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika–Riigi Teataja“. <https://www.riigiteataja.ee/akt/107072020012>
- [36] „Väikeelamu kalkulaator“. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. <https://mkm.ee/sites/default/files/documents/2022-03/V%C3%A4ikeelamu%20energiat%C3%B5hususarvu%20kalkulaator.xlsx>
- [37] „Rekonstrueeritava korterelamu ETA arvutustabel“. Kredex. https://kredex.ee/sites/default/files/2019-05/Rekonstrueeritava%20korterelamu%20ETA%20arvutustabel_1.xlsx
- [38] „Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele–Riigi Teataja“. <https://www.riigiteataja.ee/akt/106052015002>

- [39] „EVS 908-1:2016”, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-908-1-2016>
- [40] „EVS-EN ISO 6946:2017”, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6946-2017>
- [41] „EVS-EN ISO 13370:2017”, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13370-2017>
- [42] „EVS-EN ISO 10456:2008/AC:2009”, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10456-2008-ac-2009>
- [43] S. Ilomets, K. Kuusk, L. Paap, E. Arumägi, ja T. Kalamees, „Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings”, *Journal of Civil Engineering and Management*, kd 23, nr 1, Art. nr 1, jaan 2017, doi: 10.3846/13923730.2014.976259.
- [44] J. Hallik, T. Kalamees, ja E. Pikas, „Airtightness of Estonian dwellings – median and base-values for heat loss estimation”, 2023.
- [45] „Kaalatud energiaerikasutuse ja energiatõhususarvu klassi määramine”.
- [46] „Liginullenergia eluhooned - rida-ja korterelamud”. Kredex, november 2017. https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Liginullenergia_eluhooned_Rida_ja_korterelamu_juhend.pdf
- [47] „RT 83-10955-et Vundamendi ja alusmüüri hüdroisolatsioon ning niiskustõke”. Eesti Ehitusteabe fond, aprill 2009.
- [48] T. Masso, *Ehitusfüüsika ABC*.

LISAD

Lisa 1 K.B.1 räästasõlm

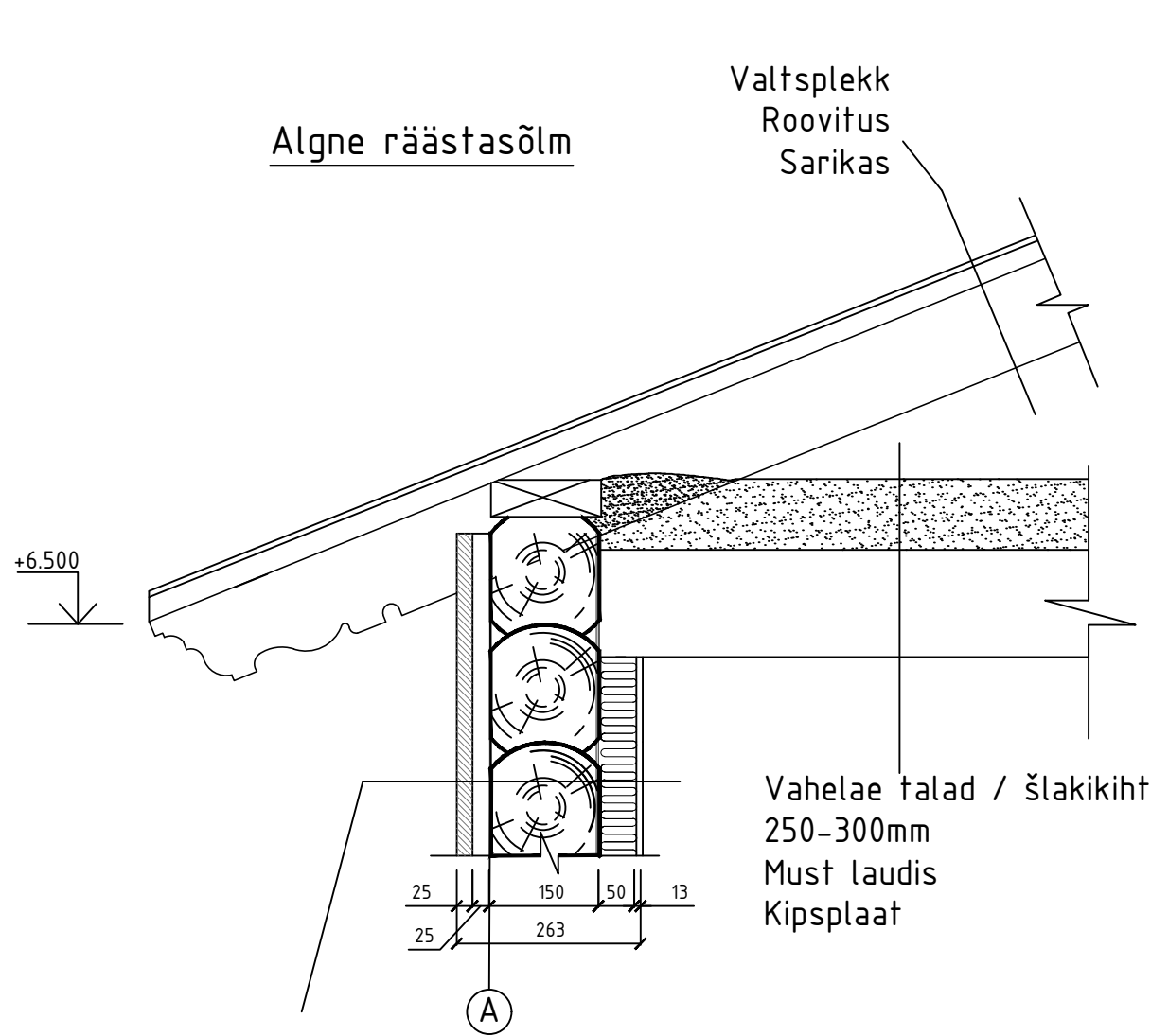
Lisa 2 K.B.1 aknasõlm

Lisa 3 K.B.1 soklisõlm

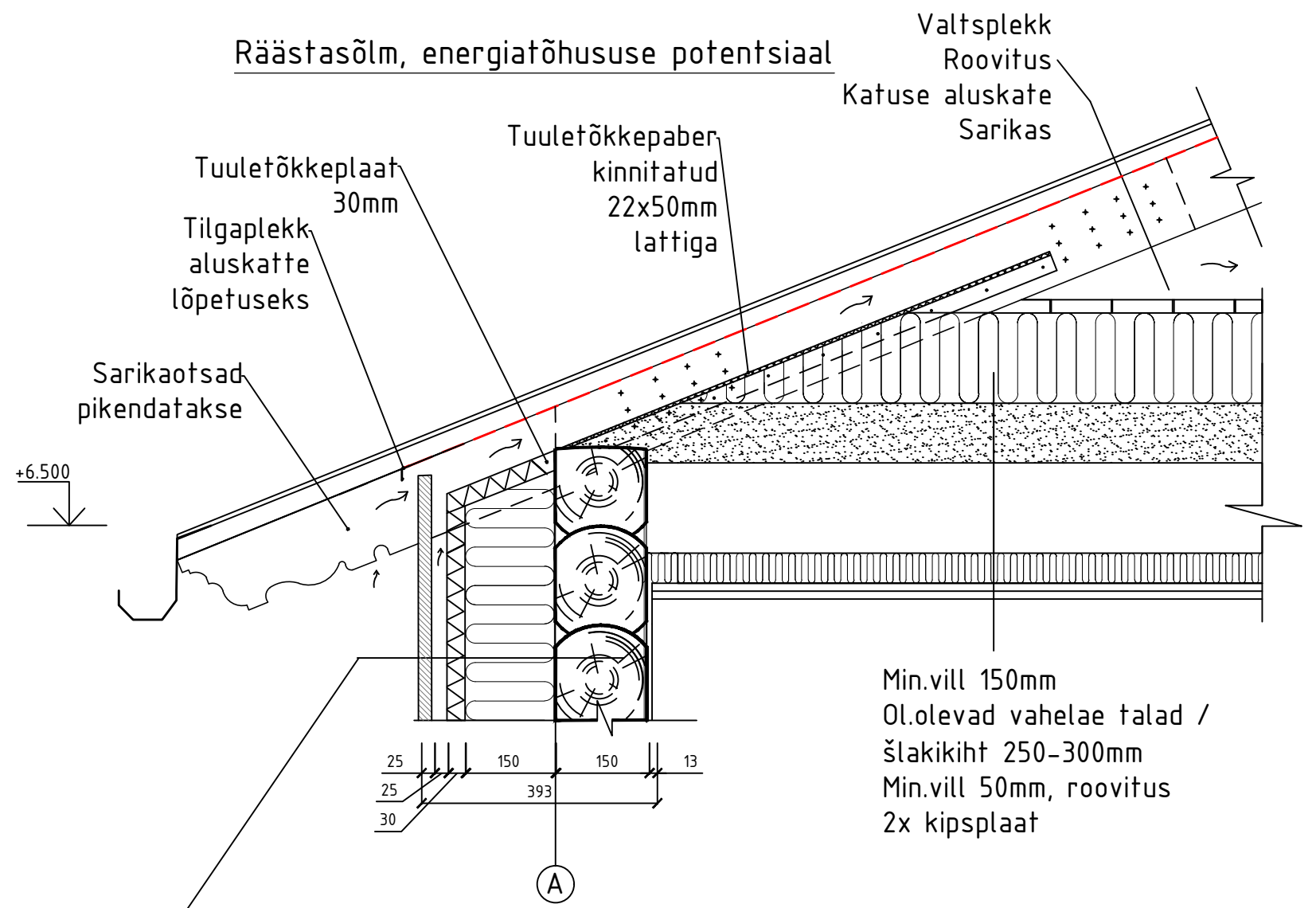
Lisa 4 T.M.3 räästasõlm

Lisa 5 T.M.3 aknasõlm

Lisa 6 T.M.3 soklisõlm



Voodrilaud
Õhkvahe 25mm
Palksein 150 mm
Min. vill 50mm / karkass
Kipsplaat
Siseviimistlus



Voodrilaud
Õhkvahe 25mm
Tuuletõkkeplaat 30mm
Min.vill 150mm/ roov 50x100, s. 600
Palksein 150 mm
Min.vill/karkass
Kipsplaat
Siseviimistlus

Min.vill 150mm
Ol.olevad vahelae talad / šlakikiht 250-300mm
Min.vill 50mm, roovitus
2x kipsplaat

	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: Hoone lahenduste võrdlus	Töö nr: 0001
	Magistritöö	Objekt: K.B.1	
Autor Kood, rühm	Alice Merkulova 192783EAEI	Joonise nimetus: Räästasõlm LISA 1	Möötkava: 1:10
Juhendas:	Targo Kalamees	Stadium:	Kuupäev: 13.11.2024
Hindas:		Faili nimi:	Joonise nr. P_01

(A) Algne akna vertikaallõige

(A) Akna vertikaallõige, pärast renoveerimist

(A) Akna vertikaallõige, energiatõhususe potentsiaal

Voodrilaud
Õhkvähe 25mm
Palksein 150 mm
Min. vill 50mm / karkass
Kipsplaat
Siseviimistlus

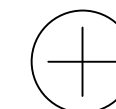
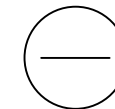
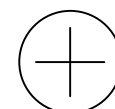
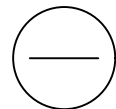
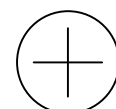
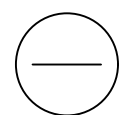
Voodrilaud
Õhkvähe 25mm
Tuuletõkkeplaat 30mm
Palksein 150 mm
Min.vill 50mm /karkass
Kipsplaat
Siseviimistlus

Voodrilaud
Õhkvähe 25mm
Tuuletõkkeplaat 30mm
Min.vill 150mm/
roov 50x100, s. 600
Palksein 150 mm
Min.vill/karkass
Kipsplaat
Siseviimistlus

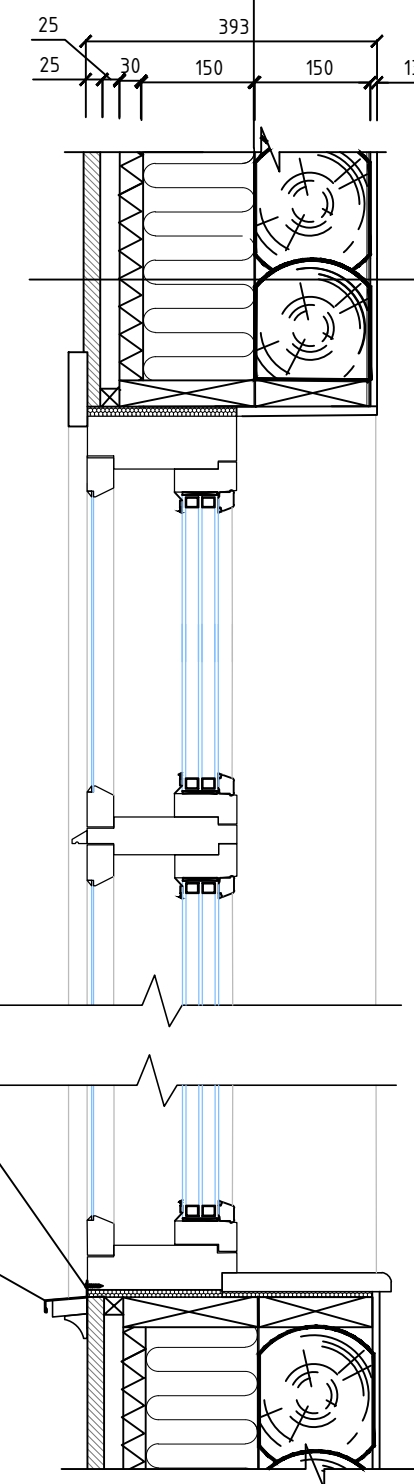
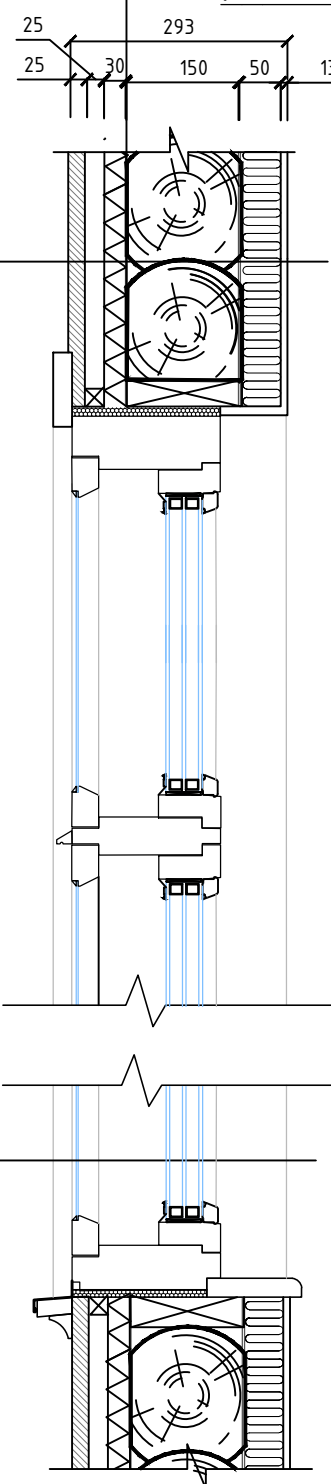
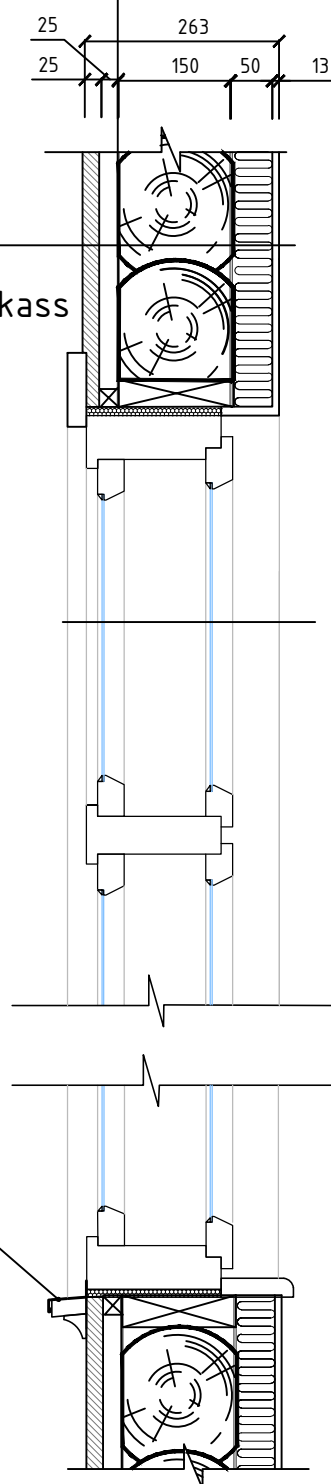
Sisse-sisse
avanev
puitaken


Uus puitaken,
sisse-välja avanev,
sees kolmekordne
klaaspakett

Aknaplekk
kinnituskrugi 3x20
Aknaplekk 0,6mm
1/6 kaldega

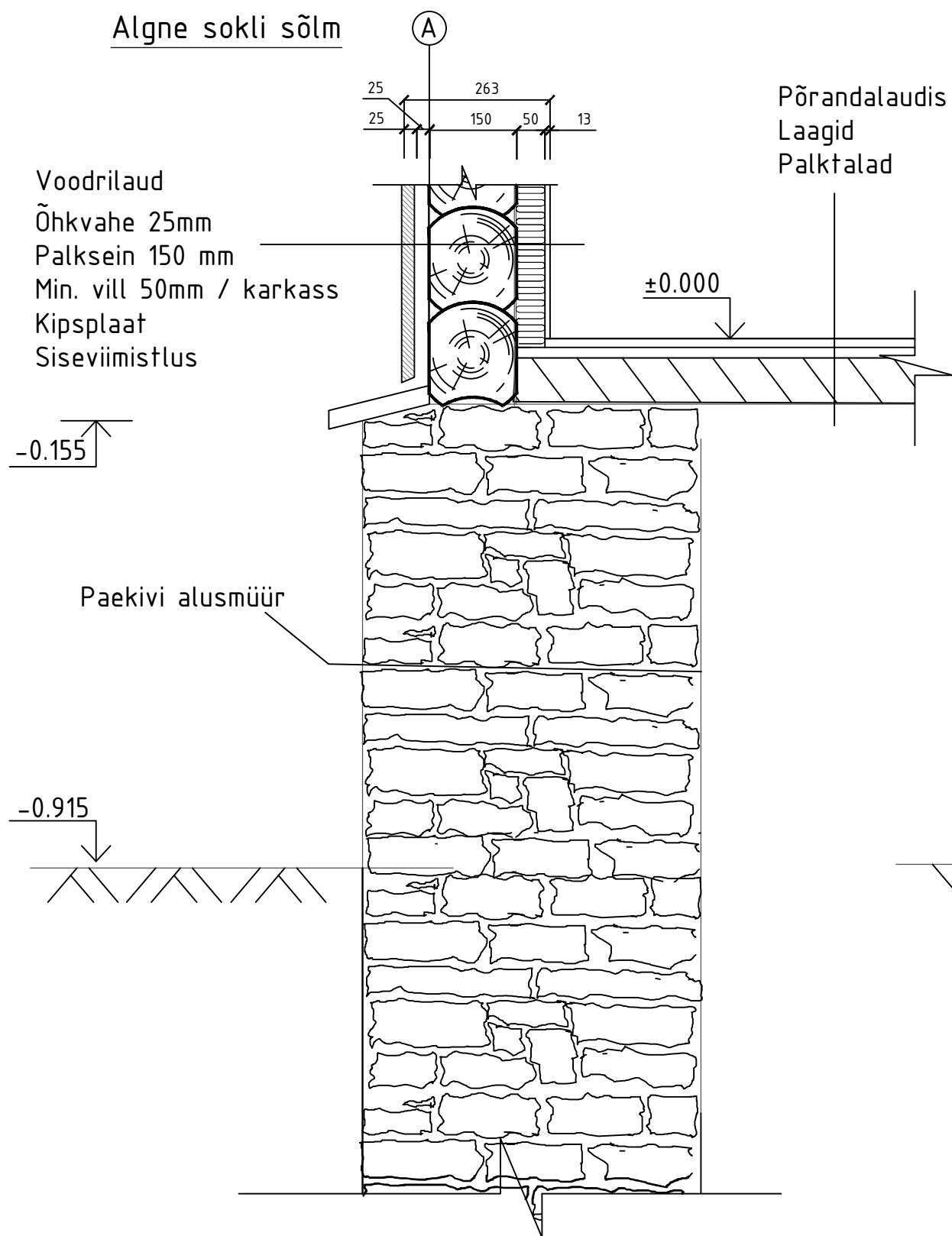


Aknaplekk

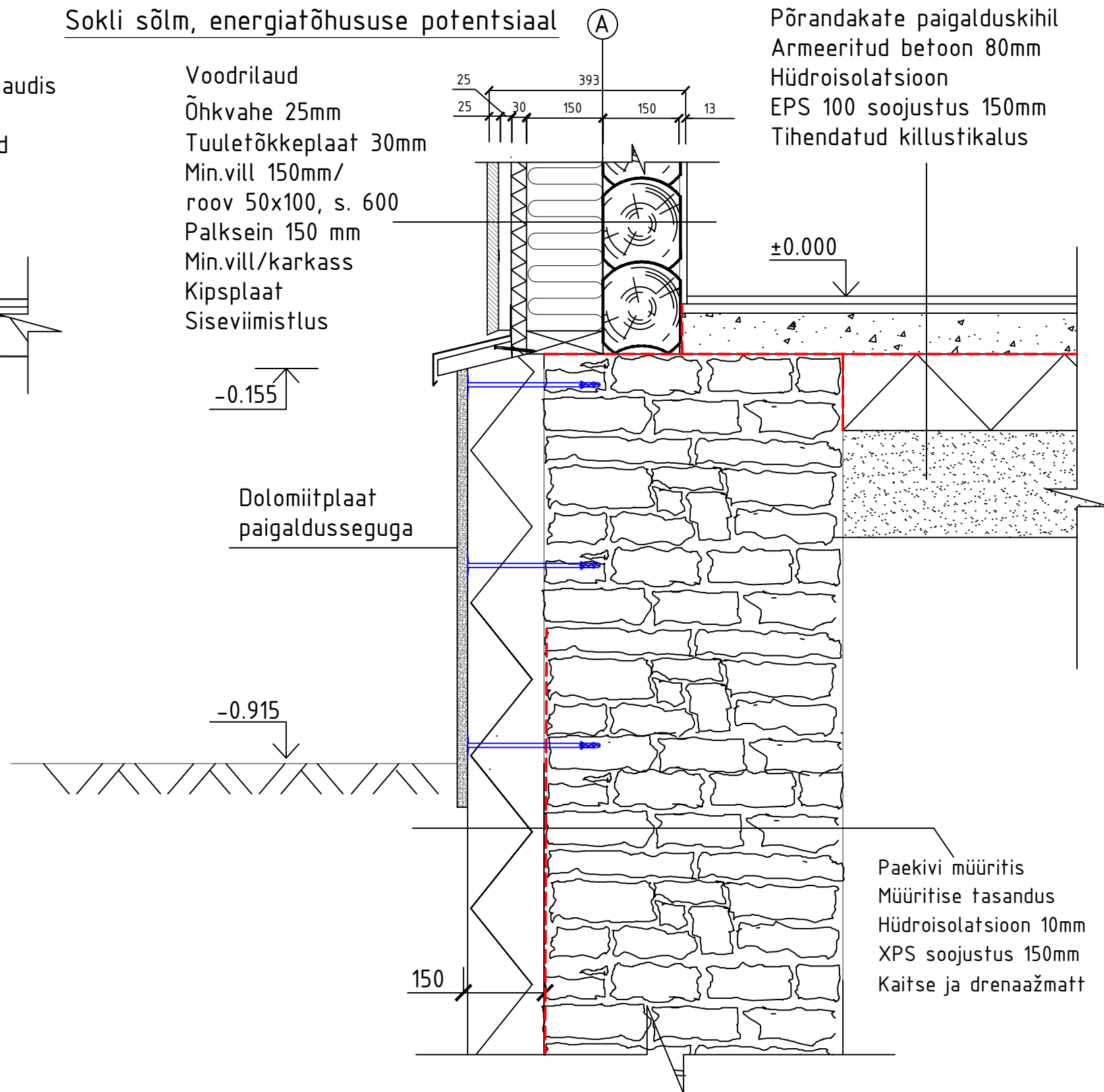



	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: Hoone lahenduste võrdlus	Töö nr: 0001
	Magistritöö	Objekt: K.B.1	
Autor Kood, rühm	Alice Merkulova 192783EAEI	Joonise nimetus: Aknasõlm LISA 2	Mõõtkava: 1:10
Juhendas:	Targo Kalamees	Stadium:	Kuupäev: 13.11.2024
Hindas:		Faili nimi:	Joonise nr. P_02

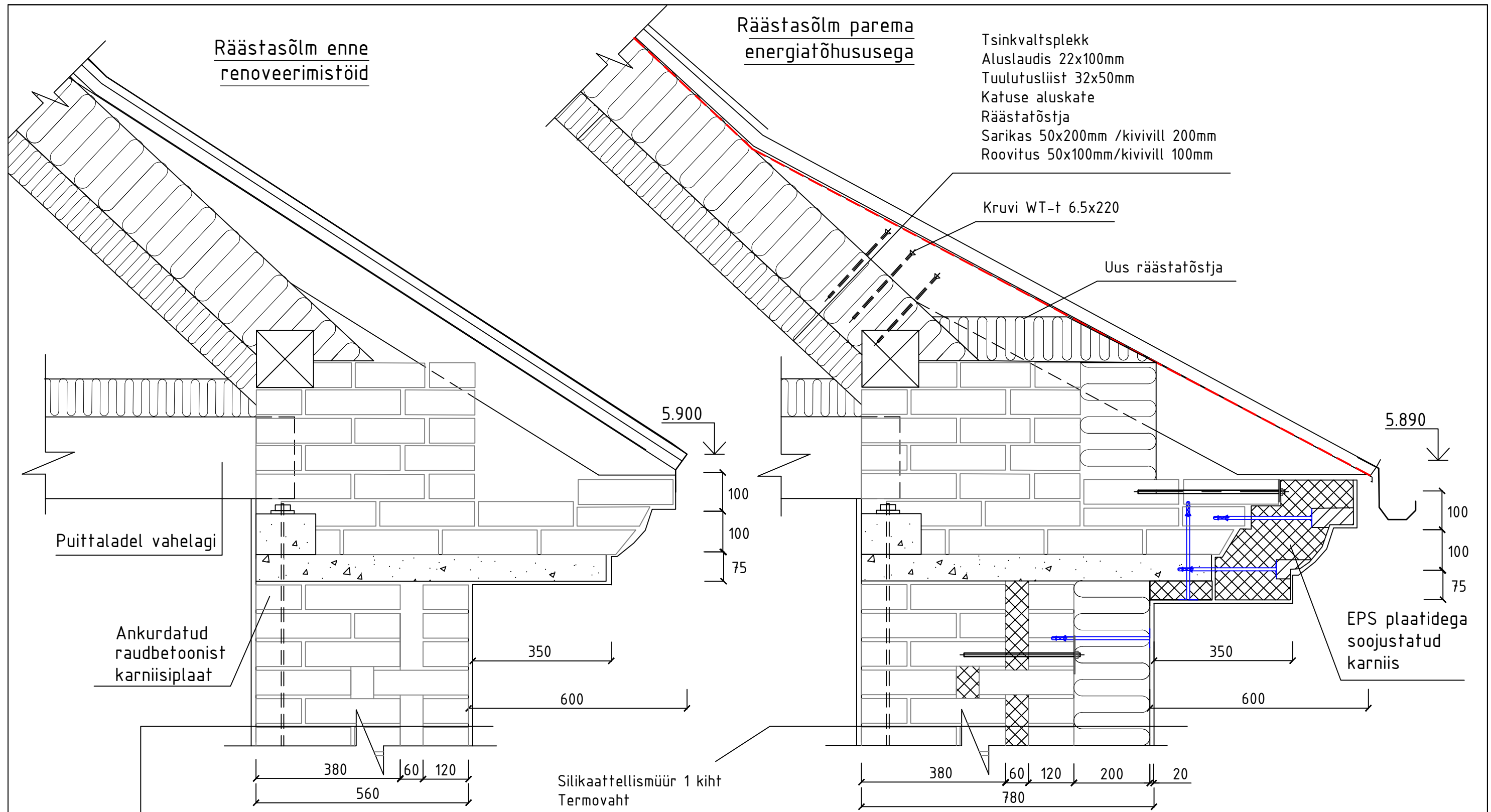
Algne sokli sõlm



Sokli sõlm, energiatõhususe potentsiaal



	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: Hoone lahenduste võrdlus	Töö nr: 0001
	Magistritöö	Objekt: K.B.1	
Autor Kood, rühm	Alice Merkulova 192783EAEI	Joonise nimetus: Sokli sõlm LISA 3	Möötkava: 1:10
Juhendas:	Targo Kalamees	Stadium:	Kuupäev: 13.11.2024
Hindas:		Faili nimi:	Joonise nr. P_03



Räästasõlm enne renoveerimistööd

Räästasõlm parema energiatõhususega

Tsinkvaltsplekk
 Aluslaudis 22x100mm
 Tuulutusliist 32x50mm
 Katuse aluskate
 Räästatõstja
 Sarikas 50x200mm /kivivill 200mm
 Roovitus 50x100mm/kivivill 100mm

Kruvi WT-t 6.5x220

Uus räästatõstja

5.900

5.890

Puittaladel vahelagi

Ankurdatud raudbetoonist karniisiplaat

EPS plaatidega soojustatud karniis

350

350

600

600

380

60

120

560

380

60

120

200

20


780

Silikaattellismüür 1 kiht
 Termovaht
 Silikaattellismüür 2 kiht
 Tasanduskiht/liimsegu
 Mineraalvillplaadid
 Armeerimiseseu
 Lubi-tsement krohv
 Silikaatvärv

Silikaattellismüür 1 kiht
 õhkvahe
 Silikaattellismüür 2 kiht
 Lubi-tsement krohv
 Silikaatvärv

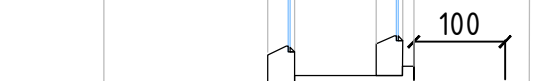
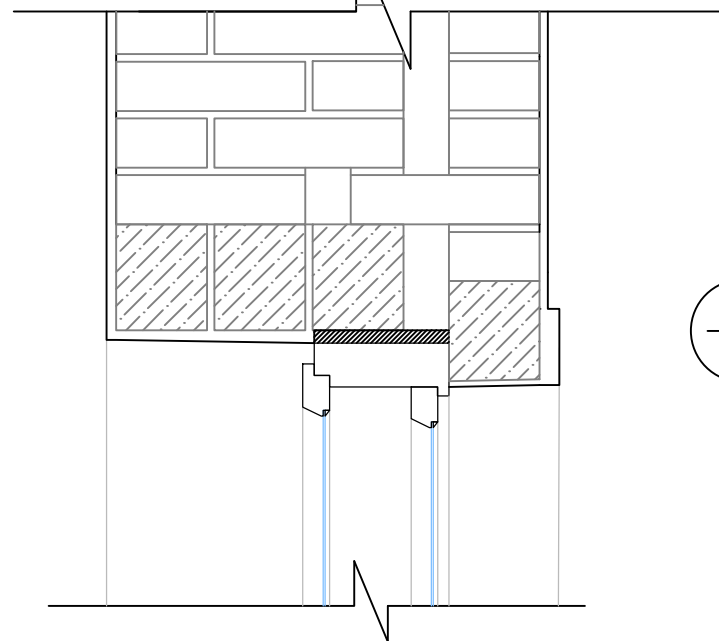
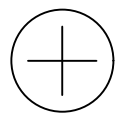
Märkused:

1. Tellismüür tugevdatakse keermelattidega $\phi 10\text{mm}$, tugevusklass 4.5, DIN 975. Keermelatid kinnitatakse keemilise kinnitusmastiksiga, kinnitite arv 4-6 tk/m²

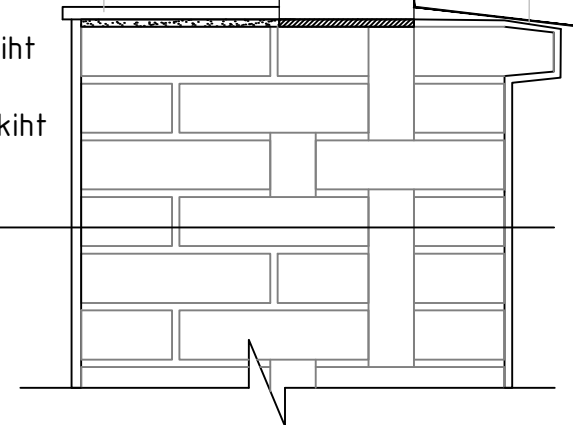
	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086		Objekt: Hoone lahenduste võrdlus	Töö nr: 0001
	Magistritöö		Objekt: T.M.3	
Autor Kood, rühm	Alice Merkulova 192783EAEI		Joonise nimetus: Räästasõlm LISA 4	Möötkava: 1:10
Juhendas:	Targo Kalamees	Stadium:	Kuupäev: 03.12.2024	Joonise nr. P_04
Hindas:		Faili nimi:		

Algne akna
vertikaallõige

560
380 60 120

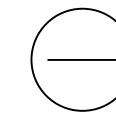
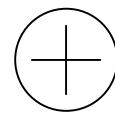
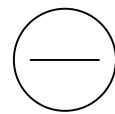


Silikaattellismüür 1 kiht
õhkvahe
Silikaattelismüür 2 kiht
Lubi-tsement krohv
Silikaatvärv



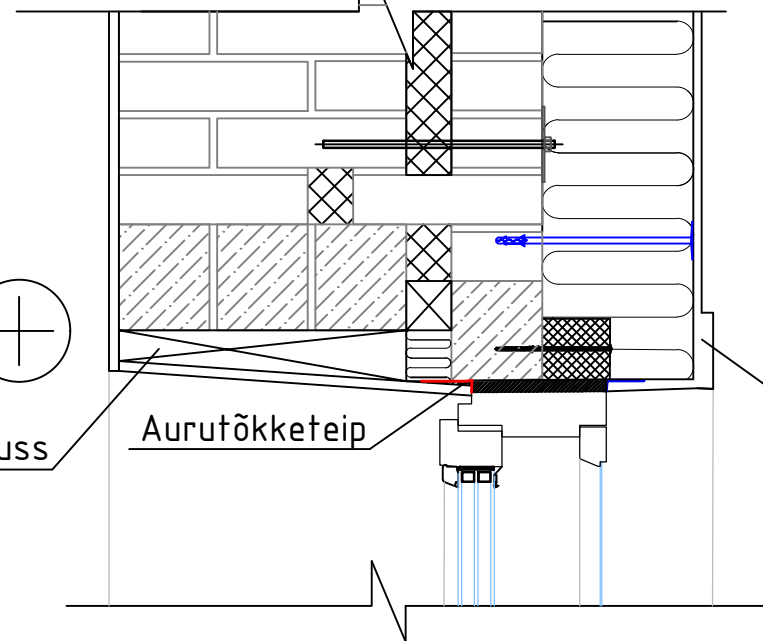
Akna vertikaallõige
parema
energiatõhususega

780
380 60 120 200 20



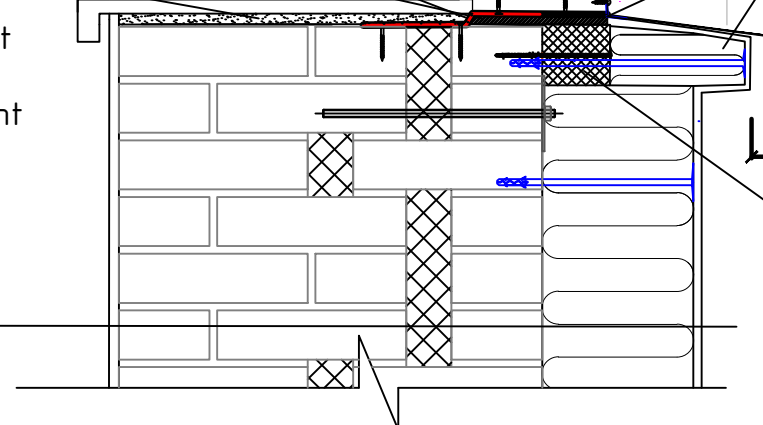
Kallet andev puitpruss

Aurutõkketeip



Paigaldusklamber
Montaaživaht
Tasandussegu

Silikaattellismüür 1 kiht
Termovaht
Silikaattelismüür 2 kiht
Tasanduskiht/liimsegu
Mineraalvillplaadid
Armeerimisegu
Lubi-tsement krohv
Silikaatvärv



Aknaraamistus
taastatakse
olemasoleva eeskujul

Aknaplekki kinnituskruvi 3x20


Tuuletõkketeip

Aknaplekk 0,6mm
1/6 kaldega

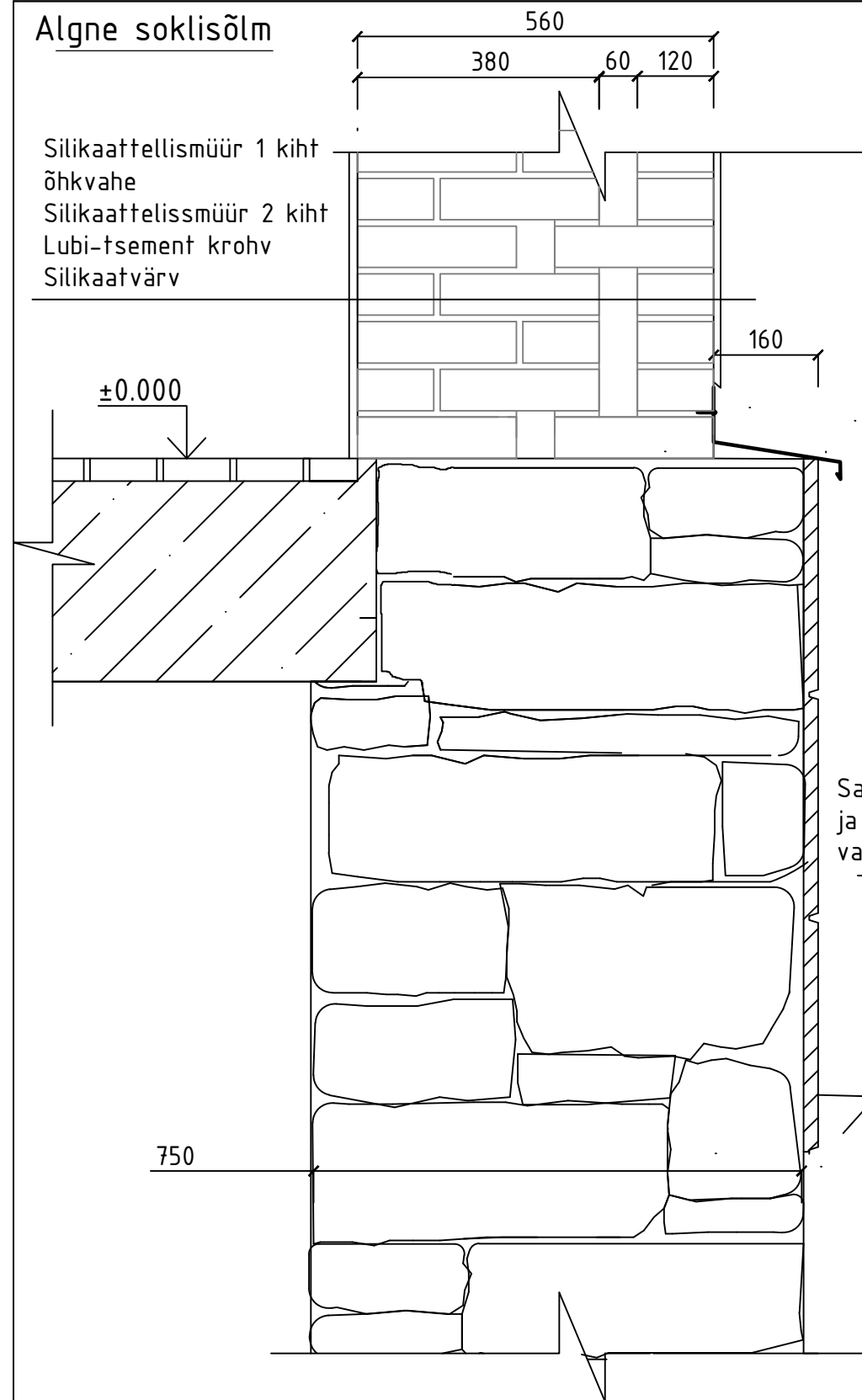
Termoprofiil kinnitatud lamepea
aknaraamikruvidega L=150mm

Märkused:

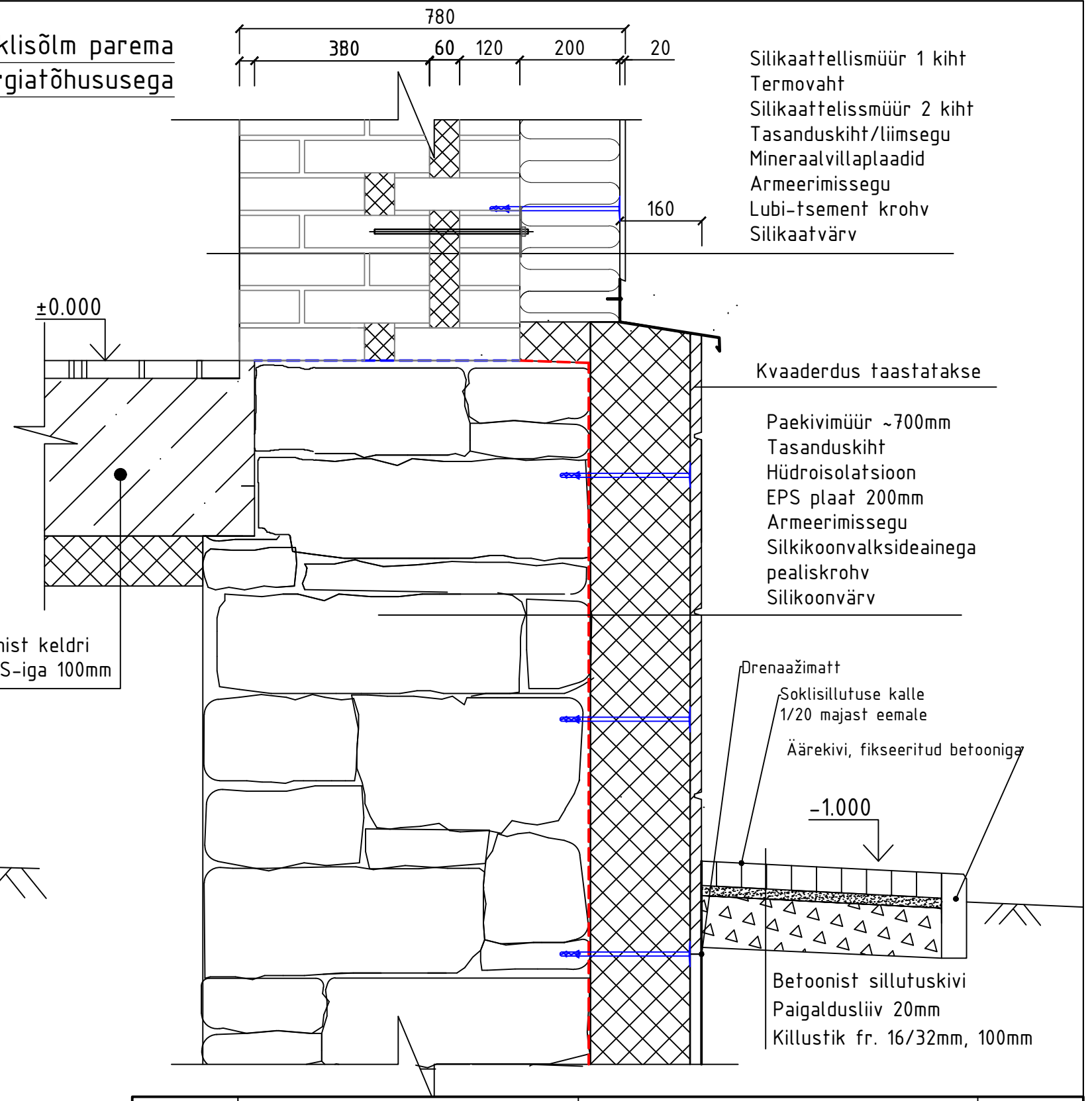
1. Tellismüür tugevdatakse keermelattidega $\phi 10\text{mm}$, tugevusklass 4.5, DIN 975. Keermelatid kinnitatakse keemilise kinnitusmastiksiga, kinnitite arv 4-6 tk/m²

	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: Hoone lahenduste võrdlus	Töö nr: 0001
	Magistritöö	Objekt: T.M.3	
Autor Kood, rühm	Alice Merkulova 192783EAEI	Joonise nimetus: Aknasõlm LISA 5	Möötkava: 1:10
Juhendas:	Targo Kalamees	Stadium:	Kuupäev: 03.12.2024
Hindas:		Faili nimi:	Joonise nr. P_05

Algne soklisõlm



Soklisõlm parema energiatõhususega



Sardtellisplokkidest ja monoliitse raudbetoonist keldri vahelagi soojustatud EPS-iga 100mm

Silikaattellismüür 1 kiht
Termovaht
Silikaattellismüür 2 kiht
Tasanduskiht/liimsegu
Mineraalvillaplaadid
Armeerimisegu
Lubi-tsement krohv
Silikaatvärv


Kvaaderdus taastatakse
Paekivimüür ~700mm
Tasanduskiht
Hüdroisolatsioon
EPS plaat 200mm
Armeerimisegu
Silikoonvalksideainega
pealiskrohv
Silikoonvärv

Dreenažimatt
Soklisillutuse kalle 1/20 majast eemale
Äärekivi, fikseeritud betooniga

Betoonist sillutuskivi
Paigaldusliiv 20mm
Killustik fr. 16/32mm, 100mm

Märkused:

1. Parema energiatõhususe saavutamiseks soojustatakse põrand pinnasel
2. Tellismüür tugevdatakse keermelattidega $\phi 10\text{mm}$, tugevusklass 4.5, DIN 975. Keermelatid kinnitatakse keemilise kinnitusmastiksiga, kinnitite arv 4-6 tk/m²

	Tallinna Tehnikaülikool Ehituse ja arhitektuuri instituut Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: Hoone lahenduste võrdlus	Töö nr: 0001
	Magistritöö	Objekt: T.M.3	
Autor Kood, rühm	Alice Merkulova 192783EAEI	Joonise nimetus: Sokli sõlm LISA 6	Möötkava: 1:10
Juhendas:	Targo Kalamees	Stadium:	Kuupäev: 03.12.2024
Hindas:		Faili nimi:	Joonise nr. P_06