



Säästva tehnoloogia õppetool

# ENERGIATÕHUSUSE ASPEKTID BOE MÕISAHOONE RESTAUREERIMISEL

ASPECTS OF ENERGY EFFICIENCY AT RESTORATION OF BOE MANOR HOUSE

Magistritöö  
ehitiste restaureerimise erialal

Üliõpilane: Mikk Järviste

Juhendaja: Aime Ruus

Tartu, 2014

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.  
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite  
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt  
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: EAEI 092632

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: ..... (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: ..... (allkiri)

## **ABSTRACT**

Järviste, M. Aspects of energy efficiency at restoration of Boe manor house. 2 volumes. Tartu 2014. 117 pages. 15 tables. 27 drawings. Master's thesis is written in Estonian language.

The aim of the thesis is to give an overview of aspects of energy efficiency at the restoration of Boe manor house. Building construction U-values were calculated according to the valid Estonian Standard. The obtained results were compared to the Minimum Energy Performance Standard in Estonia and in Finland. Thermal camera was used to assess the scope of thermal bridges. With programm Therm 7.1 all the critical places were drawn and then the values of thermal bridges were calculated. Temperature indexes were calculated using the values from the programm Therm 7.1 and values received from thermal camera images. The amount of condensation water and water which dries out were calculated. Finally one component of the energy performance was calculated using all the values which were previously computed.

Keywords: thermal conductivity, thermal transmittance, thermal bridges, thermal camera, building construction U-value, Minimum Energy Performance Standard, water in building construction, temperature indexes.

## SISUKORD

<b>SISSEJUHATUS</b> .....	5
<b>TERMINOLOOGIA</b> .....	6
<b>1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE</b> .....	8
1.1. Boe mõisa ajaloost.....	8
1.2. Palkmaja soojustamine .....	10
1.3. Ekovill.....	11
1.4. SPU isolatsioonimaterjal .....	14
1.5. Energiatõhususe miinimumnõuded .....	15
1.5.1. Energiatõhususe miinimumnõuded Eestis .....	15
1.5.2. Energiatõhususe miinimumnõuded Soomes .....	19
1.6. Külmasillad.....	23
1.7. Hoonepiirete õhulekked.....	24
1.8. Termograafia.....	25
1.9. Niiskus ehituskonstruktsioonides .....	26
<b>2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED</b> .....	28
<b>3. MATERJAL JA METOODIKA</b> .....	29
3.1. Boe mõisahoone kirjeldus.....	29
3.2. Ehituskonstruktsioonide kirjeldus .....	32
3.3. Hoone välispiirete soojusjuhtivuse arvutus .....	34
3.4. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga .....	45
3.5. Programm Therm 7.1 .....	50
3.6. Joonkülmasildade arvutus.....	52
3.7. Termopildistamine.....	54
3.8. Temperatuuriindeksite arvutus .....	54
<b>4. TULEMUSED JA ARUTELU</b> .....	56
4.1. Hoone välispiirete soojusjuhtivuse arvutus .....	56

4.2. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga .....	59
4.3. Joonkülmasildade arvutus.....	64
4.4. Joonkülmasildade lisakonduktantside arvutus.....	66
4.5. Välispiirete summaarne soojuserikadu .....	67
4.6. Termograafia mõõtmistulemused .....	69
4.7. Külmasilla hindamine temperatuurivälja arvutusega .....	75
4.8. Tähtsamate sõlmede temperatuurindeksite arvutused Thermi tulemuste põhjal.....	81
<b>KOKKUVÕTE</b> .....	83
<b>KASUTATUD KIRJANDUS</b> .....	85
<b>LISAD</b> ..	89
LISA 1. BOE MÕISAHOONE JOONISED.....	90
LISA 2. VÄLISSEINA SOOJUSJUHTIVUSE ARVUTUS .....	97
LISA 3. VÄLISÕHU KOHAL OLEVA PÕRANDA SOOJUSJUHTIVUSE ARVUTUS ...	101
LISA 4. PÖÖNINGU PÕRANDA SOOJUSJUHTIVUSE ARVUTUS .....	106
LISA 5. KATUSLAE SOOJUSJUHTIVUSE ARVUTUS .....	109
LISA 6. AKENDE SOOJUSJUHTIVUSE ARVUTUS .....	111
LISA7. FOTOD .....	112

## SISSEJUHATUS

Boe mõisahoone restaureerimine sai valitud lõputöö objektiks, kuna autor on kahe aasta jooksul osalenud nimetatud mõisa ehitustöödel ning on hästi kursis seal tehtud ning tehtavate töödega.

Seoses pidevalt karmistuvatele energiatõhususe miinimumnõuetele ja erinevate energiaressurside hindade tõusule on hakatud ehitama ja rekonstrueerima hooneid, mis tarbiksid vähem energiat ning oleksid omanikule väiksemate ülalpidamiskuludega. Selle saavutamise osutub tihti peale kalliks, sest palju peab investeerima ehitusmaterjalidesse, mis oleksid heade tehniliste näitajatega ning mõeldud konkreetsete tööde jaoks. Tehtud lõputööd saab rakendada sooritatud ehitustööde kontrollimiseks.

Eestis on sarnaseid uuringuid teostatud Tallinna Tehnikaülikooli ehitusteaduskonnas professor Targo Kalamehe eestvedamisel. Põhjalik ja mahukas aruanne on „Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga“.

Boe mõisa näol on tegemist palkhoonega, mis on ehitatud 1850. aastal. Mõisahoone asub Soome Vabariigis, Porvoo linna lähedal, 60 km kaugusel Helsingist. Lõputöö käigus leitakse välispiirete soojusjuhtivused standardi arvutuspõhimõtete kohaselt ning saadud väärtusi võrreldakse kehtivate energiatõhusus miinimumnõuetega nii Eestis kui Soomes. Kontrollitakse kondenseerumist ja kondenseerunud vee väljakuivamist Glaseri meetodil. Leitakse külmasildade joonsoojusjuhtivuste väärtused kasutades programmi Therm 7.1. Võimalikest kriitilistest kohtadest hoonest on tehtud termopildid, et välja selgitada külmasildade olemasolu ja nende kriitilisus. Kriitilisuse hindamiseks arvutatakse temperatuuriindeksid vastavates punktides. Restaureerimisel oleva mõisahoone energiatõhususarv leitakse lihtsustatud meetodil.

Käesolev töö on jaotatud neljaks osaks. Esimeses osas on teostatud kirjanduse ülevaade tööd puudutavatest teemadest. Teises osas on välja toodud töö ülesanne ning eesmärgid. Kolmandas osas on käsitletud töös kasutatud materjali ning meetodikat. Neljandas osas on esitatud töö tulemused ja arutelu. Lisades on projekti joonised, arvutused ning fotod hoonest ja tehtud töödest.

## TERMINOLOOGIA

Piirdetarind – ehitise põhiosa või piire nagu sein, põrand, vahelagi, uks, aken, katus, mis eraldab ruumi teisest ruumist, välisõhust või pinnasest. [1]

Soojustus – materjalikiht soojusülekanne oluliseks tõkestamiseks. [1]

Põrand välisõhu kohal – põrandatarind, mille puhul põrand on pinnasest kõrgemal ning põranda ja pinnase vahel on õhkvahe. [2]

Soojusvoog ( $q$ ) – soojusvool vaadeldava pinna pindalaühiku kohta,  $W/m^2$ . [1]

Soojuseri juhtivus ( $\lambda$ ) – materjali omadus, mis väljendab soojusvoolu vattides, mis läbib 1 meetri paksuse ja  $1\ m^2$  pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindade vahel on  $1\ K$ ,  $W/(m \cdot K)$ . [1]

Soojustakistus ( $R$ ) – kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada soojust voogu läbi toote või elemendi (pinnalt pinnale) statsionaarsetes tingimustes,  $m^2 \cdot K/W$ . [1]

Soojusjuhtivus ( $U$ ) – iseloomustab soojuse voogu läbi piirdetarindi statsionaarsetes tingimustes,  $W/(m^2 \cdot K)$ . [1]

Soojusläbivus ( $U_c$ ) – saadakse arvutatud soojusjuhtivusele,  $U$ , paranduse  $\Delta U$  lisamisega, mis koosneb õhupiludest, mehaanilistest kinnititest, pööratud katusest, soojustuse õhujuhtivusest ja külmasildadest tingitud parandusest,  $W/(m^2 \cdot K)$ . [1]

Külmasild – hoone välispiirde osa, kus soojusjuhtivus on lokaalselt suurem. [3]

Joonkülmsilla lisasoojusjuhtivus ( $\Psi_j$ ) – lisasoojuskadu vattides temperatuuride erinevusel üks kraad joonkülmsilla pikkuse kohta,  $W/(m \cdot K)$ . [1]

Punktkülmsilla lisasoojusjuhtivus ( $\chi_p$ ) – lisasoojuskadu vattides temperatuuride erinevusel üks kraad punktkülmsilla kohta, W/K. [1]



## 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

### 1.1. Boe mõisa ajaloost

Boe mõisamaadest pärinevad ajaloos esimesed sissekanded aastast 1456. Selleaegne Rootsi kuningas Karl VIII Knutsson andis oma truule relvakandjale ja aadlikule Peter Rok'ile riigi idaosasse jääva Bodha nimelise maa-ala. Peter Rok suri järeltulijateta ja seetõttu võeti mõisamaad pärast surma tagasi riigi kasutusse. [4,5]

Pärast seda on Boe omanikena mainitud paljusid Rootsi ja Eesti rahvusest aadlikke. 1535. a. sai Henrik Bengtsson Dufva Boe lääniks kuningas Gustav I'lt. 1537. a. sai Johan Olofsson Stålarml Boe lääniks kuningas Gustav I'lt. 1564. a. sai Hans Larsson Björnram, kes oli mereväe admiral ja Soome kuberner, Boe kingitusena kuningas Erik XIV'lt. 1636. a. abiellus Eesti soost aadlik Reinhold Wrangel Karin Wildeman'iga ning ajalooürikutes on Boe mõisamaade omanikuna mainitud nii Reinhold Wrangel'it kui ka tema poegasid Arvid Wrangel'it ja Bernhard Johan Wrangel'it. 1666. a. ostis Klas Rålamb oma tütrele Annale 5000 riigitaalri eest B. J. Wrangel'ilt Boe valdused. Annast sai samuti Kiiala mõisamaade omanik pärimise teel. Lahkelide tõttu tema varandus panditi ja Boe müüdi oksjoni käigus Emerantia von Buchwald'ile 1698. a. [4,5]

1700. a. algas Boe ajaloos tähenduslik ajajärk, kui Thomas Adlercreutz ostis maad Emerantia von Buchwald'ilt. Thomase sünnijärgne nimi oli Teuterström, aga pärast aadlikuks saamist vahetus tema nimi Adlercreutz'iks, kes oli ka Adlercreutz'ide suguvõsale alusepanija. Boe valdused püsisid Adlercreutz'ide suguvõsa käes kuni 1860. aastani, mil Gustava Wilhelmiina Fredrika Adlercreutz, kes oli abielus Berndt Wilhelm Juselius'ga, müüs Boe mõisamaad Johan Alfred Björkstein'ile 55000 rubla eest. Praeguse Boe mõisa peahoone põhiosa valmis Juselius'e ajal 1850. aastal. [4,5]

Björkstein'ide suguvõsa laiendas Boe mõisa peahoonet 1870. aastal, kui juurde ehitati läänepoolne tiib. Esialgselt ehitati hoone läänepoolsele tiivale lamekatuse, aga ajaloo jooksul on seda muudetud ja praegu on sellel osal torn katusega. Nendel aegadel ehitati Soomes ka maa-aluseid salakäike- ja tunnelid ning Boe põldude alla rajati esimesi savitellistest tunnelid. [4,5]

Vendade Emil Mauritz'i ja Ludvig Alexander Standertskjöld'i valduses oli Boe kordamööda 1882. aastast 1904. aastani. Nende ajal toimusid mõisamaadel Soome suurvürstiriigi esimesed linnukoerte jahivõistlused. Selline jahipidamisviis on ka praegusele mõisahärrale väga südame- lähedane. [4,5]

1904. aastal läks mõis Gustav Emil Borg'i omandisse, mil mõisamaade pindala oli 1422 hektarit, millest põldu 350 hektarit. Gustav Emil Borg reformis põllumajandust märkimisväärselt. 1917. aastal ehitati läänepoolse tiiva kohal kõrguv torni osa. Boe praeguse tegevuse seisukohalt on märkimisväärne fakt, et selleaegsetest hobustest, kes elasid mõisamaadel, oli suurem osa sündinud just sellel samal territooriumil. [4,5]

Uued tuuled puhusid ühiskonnas 1920. aastatel. Svenska Småbruk och Egna Hem Oy ostis Boe mõisa 1925. aastal. Selle tulemusena jaotati mõisamaad väiksemateks osadeks ja jagati erinevate inimeste vahel ning Boe mõisast jääb alles praegused 85 hektarit. [4]

Högvalla Oy pidas sellel ajal populaarset perenaiste kooli Hinthaaras, aga kuna sealsed ruumid ei vastanud enam tingimustele janjäid väikesteks, siis otsustati 1927. aastal Boe mõis enda valdusesse osta ning kogu majapidamine Boe mõisa ruumidesse kolida. Sellest ajast saadik tegutses kool Boe mõisas Högvalla Seminaariumi nime all ja seda peaaegu 20. sajandi lõpuni. [4]

1996. aastal sai mõisamaade omanikuks Samfundet Folkhälsan (sotsiaal- ja tervishoiualane mittetulundusühing), kui otsustati osta Högvalla Oy. Folkhälsan'i ajal tegeldi mõisas erinevate kursuste ja laagriliste tegevustega ning mõisa peahoones toimusid pidulikud vastuvõttud. Folkhälsan'i prioriteedid paiknesid siiski peaaesjalikult muudes asukohtades ja seetõttu otsustati mõis müüa. [4]

2002. aastal ostsid Boe mõisa Leif ja Heidi Hagelstam, kes tegid sellest ratsaspordikeskuse. [5]

2012. aastal alustati Boe mõisa peahoone remonttöödega. [5]

## 1.2. Palkmaja soojustamine

Keskkonna säästmine ja energiaressursside kallinemine on tänapäeval aktuaalsed ja seetõttu pööratakse palju tähelepanu piirete soojapidavusele, sealhulgas ka puitseinte lisasoojustamisele. 20. sajandil ja varem ehitatud elumajade seinad tehti palkidest, mille soojapidavus jäi väheseks. Üldjuhul võib puitseina soojustada väljastpoolt, millega jääb kahjustamata tarindi soojus- ja niiskusrežiimi. Võrreldes seestpoolt soojustamisega on eeliseks võimalus katta seinapind vahelagede ja –seinte kohalt, samuti isoleerida külmasillad. [28]

Algse fassaadi säilitamine koos välispidise soojustamisega nõuab heal tasemel ehitustööd. Enne töödega alustamist peab konsulteerima projekteerijaga, ehitajaga ning võimalusel valitud ehitusmaterjalide turustajaga, et leida hoonele sobiv tehniline lahendus. Oluline on arvestada materjalide soojus- ja niiskustehniliste omadustega ning ehitusfüüsikaliste kriteeriumitega. [28]

Välise lisasoojustamise korral peab projekteerija pöörama tähelepanu tehnilistele aspektidele ja hoone arhitektuursele välisilmele. Projekteerija peab tutvuma hoone, talu ja asula ehitusajalooga ning tegema leitud eeskujude järgi majale ajastuomase ja sobiliku välisviimistluse. [28]

Kui uus soojustus, mis paigaldatakse väljapoole, kahjustab hoone ajaloolist ilmet, tuleb sellisest lahendusest loobuda. Sissepoole paigaldatud lisasoojustus vähendab küll ruumide pindala, kuid välisilme jääb muutumatuks. Juhul kui tegemist on ajalooliselt väärtusliku interjööriaga, ei tohi ka seespool mingeid soojustusega seotud remonttöid teostada. [29]

Hoone soojustamisel peab kasutama võimalikult palju naturaalseid materjale, kui on soov saada hingavate ja tervislike konstruktsioonidega hoone, mis oleks samuti ka soojapidav. Muinsuskaitseamet soovitab selleks pika traditsiooniga turbasammalt ja –põhku, linatakku, meriheina, õlgi, roogu, saepuru ja hõövlilaastu. Samuti selliseid kaasaja ökoehituses kasutusele võetud looduslikke materjale nagu kanepitakk ja puitkiudvill ehk tselluvill. [29]

Vana maja soojustamisel on heaks kasutatavaks materjaliks ka puitkiudvill ehk tselluvill, mida toodetakse makulatuurist. Tulepüsivamaks muutmiseks lisatakse villale booriühendeid, mis hoiavad ühtlasi eemal ka hallitust, seeni, putukaid ja närilisi. Erinevalt niiskust mittesiduvatest

mineraalvilladest (klaas- ja kivivillad), on tselluvill muude puidutoodete kombel suure niiskushahtuvusega ning margub seetõttu märksa aeglasemalt, mis aitab tselluvillaga soojustatud konstruktsioonil üle elada lühiajalisi kõrgemaid niiskuskooormusi. [29]

Et saavutada piirde lisasoojustuse õige toimivus, tuleb kattematerjalid hoolikalt valida ja paigaldada. Muu hulgas tuleb tähelepanu poorata järgnevale: [28]

- soojustus peab täitma kogu selleks maaratud ruumi, liibuma tihedalt vastu sisemist (si-seviimistlusplaat, õhu- ja aurutõke) ja/või välimist (tuuletõke) materjalikihti;
- soojustus peab olema ühtlane. Kihtide ja plaatide vuukides paaseb õhk liikuma, mistõttu peab vuuke olema vähe, need peavad olema võimalikult õhukindlad. Kihiti paigaldatud soojustuse vuugid ei tohi sattuda kohakuti. Kihtide vahele ei tohi jaada ohuvahesid. Alati on parem üks paks homogeenne soojustuskiht kui mitu õhukest kihti;
- soojustusesisese konvektsiooni takistamiseks tuleb soojustuse sisemine osa eraldada välimisest ohutokkega, näiteks ehituspaberiga, mis peab veeauru hästi juhtima;
- soojustusmaterjali laius valitakse karkassipostide järgi. Kui soojustus on liiga lai või kitsas, ei jaa ühendus karkassipostidega ideaalne: tekivad õhukanalid;
- tarindite liitekohtades (seinad, vahelaed, nurgad) tuleb soojustus paigaldada eriti hoolikalt, õhukanaleid ei tohi jaada;
- tuuletokkeplaadid tuleb jätkata karkassipostide kohal, jätkukohad tihendada montaa- zivahu või vastava teibiga.

### **1.3. Ekovill**

#### **Ekovilla tootmine ja kasutusala**

Ekovilla soojustust valmistatakse valitud vanapaberist ja paberitehaste makulatuurist, kuhu lisatakse lohnatuid suttimis- ja madanemisvastaseid aineid. Toote massist 81% on ajalehepaber, suttimis- ja madanemisvastased ained moodustavad ülejäanud 19%. Suurim osa Ekovilla mahust on õhk. [6]

Ekovilla isolatsioonimaterjal on loodusest tulev puukiud. Puukiudude sees on kude, mis sisaldab suurel määral õhku ja nende sees püsib õhk paigal moodustades efektiivse soojusisolatsiooni.

Ekovillas on palju isoleerivat õhku ka puukiudude vahel. Kiud on moodustatud ainulaadsel viisil ja selle tulemusena on Ekovill poorne ning hästi õhku seeshoidev soojustusmaterjal. [7]

Ekovilla valmistatakse loodussäästvalt. Keskkonnauuringute tulemused näitavad, et Ekovilla tootmisprotsess nõuab väga vähe energiat. Ekovilla isolatsioon seob puidukiust oleva süsiniku kogu kasutusajaks endasse, vähendades sellega elamisest põhjustatavat süsiniku saastet. [8]

Ekovilla soojustust kasutatakse pööningu vahelagede, kaldkatuste, seinte, põrandate soojustamiseks ning samuti lisasoojustusena palkmajades. Paigaldusviisidelt saab valida puhutava või pritsitava ja lehtvilla vahel. [6]

### **Keskkonnasõbralikkus**

Soome mets, selle kasvamine ja puidust valmistatud tooted on Soome suurim süsinikku siduv valdkond. Puud vajavad kasvamiseks süsinikdioksiidi ja seovad seda kasvatamise ajal. Kasu on seda suurem, mida rohkem me puitu ja puidutooteid näiteks ehituses kasutame. Kuna puit hoiab salvestatud süsiniku endas kogu kasutusaja jooksul, siis teeb iga enda majja puittooteid valiv ehitaja sellega ka olulise keskkonnavalase heateo. Puidu osakaalu saab oma kodus loomulikult suurendada, valides ka soojusisolatsiooniks puidukiust valmistatud Ekovilla kogu majale. [8]

Kliimamuutuste vältimise kõige tõhusam viis on kasvuhoonegaaside õhkupaiskamise vähendamine. Süsiniku jalajälje mõõdik näitab, kui palju igaüks meist oma tegevusega kasvuhoonegaase tekitab ja selle kaudu kliimamuutust põhjustab. Oluline osa süsinikdioksiidi saastest tekib elamise ja kütmise tagajärjel, mistõttu on tõhusaks saaste vähendamise viisiks hoonete energiatõhususe tõstmine. Suur osa kütteenergiast kaob endiselt seinte ja lae kaudu, mistõttu tuleb maja soojustamisele pöörata suurt tähelepanu. Tihe Ekovilla isolatsioon vähendab tõhusalt küttekulusid ja selle kaudu ka süsiniku jalajälge. [8]

## **Hingav konstruktsioon**

Kui lased oma majal hingata ehk annad maja hingavatele osadele looduslikud tingimused, siis maja seisukord püsib pikalt hea. Puidust ehitatud hooned on püsinud sadu aastaid. Hingavus on oluline aspekt palkhoonete puhul ja puidu hingavus saadakse, kui suudetakse ära kasutada puukiudusid. Üks võimalus selleks on kasutada Ekovilla soojustust. [9]

Hingava konstruktsiooni all mõistetakse konstruktsiooni, millesse võib kanduda difusiooni kaudu veeauru, mis omakorda seotakse hügroskoopes materjalis ning mis liigub pärast tagasi oma algsesse keskkonda. Lisaks veeaurule saab konstruktsioonist läbi liikuda ka süsinikdioksiid. Hügrokoopsetel puidukiust isolatsioonimaterjalidel on suur niiskusmahtuvus, mida saab kasutada ka siseõhu niiskuse juhtimisel. [9]

Ekovillaga soojustamine on turvaline lahendus. Soovitav on teha kogu isoleeritava piirde auru- ja tuuletõke samalaadsest puukiulisest materjalist. Sellisel juhul ei ole kusagil sellist pinda, kus veeaur võiks kondenseeruda. Samuti on lisasoojustuseks on turvaline valida hingav isolatsioonimaterjal selle suure niiskuse läbilaskvuse tõttu. [9]

- Siseõhus olev veeaur seotakse isolatsioonimaterjali orgaaniliste kiududega ja see vabaneb sealt jälle, kui õhu veeauru sisaldus keskkonnas väheneb.
- Konstruktsioonidesse pääsenud veeaur seotakse orgaaniliste kiududega ja see ei kondenseeru materjalide pinnale ega põhjusta niiskuskahjustusi.
- Kiudude veeaurusisaldusele vaatamata toimib isolatsioonimaterjal normaalselt.

**Tabel 1.1.** Ekovilla tehnilised näitajad [10,11]

Liik	Suurus
Soojuseri juhtivus	Puistevill 0,039-0,040 W/(m·K) Lehtvill 0,039 W/(m·K)
Õhutihedus	65...80 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /msPa
Tihedus	Puistevill 32-45 kg/m <sup>3</sup> , olenevalt paigaldamise asukohast Lehtvill 32-42 kg/m <sup>3</sup>
Mõõdud	Lehtvilla paksus on 50, 75, 100, 125 ja 150 mm ning gaba- riitmõõtmed on 565x870 mm.
Niiskusmahtuvus	Ekovilla võime siduda, salvestada ja loovutada niiskust on sarnane puitmaterjalile. See on võimeline talletama oma eri- kaalust kordi rohkem vedelikku.
Tuleohutus	Ekovill ei sula kõrgetel temperatuuridel, vaid söestub nagu massiivpuut. Söestumiskiirus Ekovillal on umbes 50...150 mm/h, massiivpuidul 48 mm/h ja liimpuidul 42 mm/h.

#### 1.4. SPU isolatsioonimaterjal

##### Mis on SPU ja kus seda kasutatakse?

SPU on poliüuretaanvahust valmistatud isolatsioonimaterjal, mida kasutatakse nii uusehitusel kui ka renoveerimisel. See sobib kõikvõimalikeks soojustamistöedeks, olles ühtviisi hea nii põrandale, seina kui ka lakke. [12]

##### Miks valida SPU isolatsioonimaterjal?

- SPU säästab energiat hoone kogu olelusringi jooksul – kasvuhoonegaaside emissioonist moodustab igal aastal märkimisväärse osa hoonete kütmisele kuluv energia ja tõhusaim viis emissioonide piiramiseks on uusehitiste rajamine madal- või passiivenergiamaajadena ning vanade hoonete renoveerimine energiatõhusaks. [13]
- Energiatõhus ja usaldusväärne lahendus – SPU isolatsioonimaterjalide väikese soojusjuhtivuse ja suure veeaurukindluse tõttu pole eraldi õhu- või aurutõkkekihti tarvis. [14]
- Ruumi ja kulude kokkuhoid – SPU isolatsiooniplaatide suurepärase isolatsioonivõime võimaldab rajada isolatsioonivillaga võrreldes oluliselt õhemad konstruktsioonid ning sellega võita ruumi sisepinnas. [14]

- Lihtsalt paigaldatav – jäiga konstruktsiooniga poliüretaanplaadi saab täpselt mõõtu lõigata, freesida ja puurida tavaliste tööriistadega ning kuna plaadid on kerged, siis on neid lihtne paigaldada. [14]
- Tõendatult turvaline – SPU isolatsioonimaterjalid ei vetti, ei tõmbu kokku, ei pehki ega hallita, on tuleohutud ja nende soojusomadused püsivad pikki aastakümneid muutumatuena. [14]

**Tabel 1.2.** SPU isolatsioonimaterjali tehnilised näitajad [15]

Liik	Suurus
Struktuur	Kinniseid struktuuriosakesi üle 90%
Soojusjuhtivus	0,022–0,023 W/(m·K), difusioonitihe pinnakate 0,025–0,027 W/(m·K), difusioonile avatud pinnakate 0,031–0,034 W/(m·K), kipsi-PU kombinatsioon
Tihedus	32-38 kg/m <sup>3</sup> , vastavalt tootele
Vee imendumine	≤ 1,5 mahuprotsendist
Veeauru läbilaskvus (pealistamata Isolatsioonimaterjalil)	0,1-1,2*10 <sup>-12</sup> kg/msPa
Survetugevus	≥ 100 kPa
Soojuspaisumistegur	5-8*10 <sup>-5</sup> / °C
Kuumakindlus (tavatooted) - süttimistemperatuur	-40...+100°C, lühiajaline +250°C Üle +400°C, leegiga u +300°C
Radooni läbilaskvus	≈ 0%

## 1.5. Energiatõhususe miinimumnõuded

### 1.5.1. Energiatõhususe miinimumnõuded Eestis

Täna sel päeval Eesti Vabariigis kehtivad energiatohususe miinimumnõuded on vastu võetud 30. augustil 2012. aastal Vabariigi valitsuse poolt. [16]

Määrusega kehtestatakse kõikide hoonete energiatohususe miinimumnõuded, sealhulgas madalenergiאהoonetele ja liginullenergiאהoonetele. Määruse reguleerimisalasse kuuluvad uued ehitatavad ja oluliselt rekonstrueeritavad sisekliima tagamisega hooned. Hoonete puhul, mida ei ole seaduses nimetatud, tuleb rakendada energiatohususe miinimumnõuete määramiseks vajalikku



pädevust ning kohaldada määruse nõudeid, kontrollida vastavust energiatõhususe miinimumnõuetele, lähtudes kõige sarnasema hoone kasutusotstarbest. Kui hoonel on mitu kasutusotstarvet, määratakse igale eraldi kasutusotstarbega hoone osale, mille köetav pind ületab 10% kogu hoone köetavast pinnast, sellele kasutusotstarbele vastav energiatõhususarv. [16]

Hoone maksimaalseks lubatavaks energiatõhususarvuks on köetava pinna alusel arvutatud hoone osade kasutusotstarvete kaalutud keskmine energiatõhususarv. Energiatõhususe miinimumnõuded kehtestatakse kogu hoonetele tervikuna. Hoone koosseisu arvatakse energiatõhususarvu arvutamisel lisaks piiretele ja tehnosüsteemidele hoonesse või kinnistule paigaldatud hoonete teenindava lokaalse energiatootmise süsteemid (näiteks päikesekollektorid ja –paneelid, tuuleturbiin, soojuse ja elektri koostootmisjaam). [16]

Energiatõhususe miinimumnõuded on ehitatavate ja oluliselt rekonstrueeritavate hoonete summaarse energiakasutuse piirmäärad ning muud nõuded, mis lähtuvad hoonete kasutamise otstarbest ning võtavad arvesse nende tehnilisi näitajaid. Hoone vastavust energiatõhususe miinimumnõuetele hinnatakse hoone projekteerimisel ehitusprojekti alusel. Energiatõhususe miinimumnõuded on väljendatud energiatõhususarvuna. Energiatõhususarv on arvutuslik summaarne tarnitud energiatega kaalutud erikasutus hoone standardkasutusel, millest arvatakse maha summaarne eksporditud energiatega kaalutud erikasutus. Energiatõhususarv kajastab hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks ning see arvutatakse hoone köetava pinna ruutmeetri kohta hoone standardkasutusel. [16]

Ehitatava hoone energiatõhususarv ei tohi ületada järgmisi piirväärtusi: [16]

- 1) väikeelamutes  $160 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 2) korterelamutes  $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 3) büroohoonetes, raamatukogudes ja teadushoonetes  $160 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 4) ärihoonetes  $210 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 5) avalikes hoonetes  $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 6) kaubandushoonetes ja terminalides  $230 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 7) haridushoonetes  $160 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;

- 8) koolieelsetes lasteasutustes  $190 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 9) tervishoiuhoonetes  $380 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ .

Oluliselt rekonstrueeritava hoone energiatõhususarv ei tohi ületada järgmisi piirväärtusi: [16]

- 1) väikeelamutes  $210 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 2) korterelamutes  $180 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 3) büroohoonetes, raamatukogudes ja teadushoonetes  $210 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 4) ärihoonetes  $270 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 5) avalikes hoonetes  $250 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 6) kaubandushoonetes ja terminalides  $280 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 7) haridushoonetes  $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 8) koolieelsetes lasteasutustes  $240 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;
- 9) tervishoiuhoonetes  $460 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ .

Hoone välispiirded peavad olema pikaajaliselt õhkupidavad ja piisavalt soojustatud. Otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse hoone energiatõhususe nõuetest, ruumide soojuslikust mugavusest ja hallituse ning kondensaadi vältimisest külmasildadel, sisepindadel ja tarindites. Ruumide soojusliku mugavuse tagamiseks ei või piirde soojusläbivus üldjuhul ületada väärtust  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Sellest väärtusest kõrgema soojusläbivusega avatäidete puhul tuleb tagada soojuslik mugavus kütelahendustega. Soojustuse valikul tuleb lähtuda sellest, et ehitis oleks hea energiatõhususe tasemega. Elamute välispiirete valikul võib esmase lähenemisena lähtuda järgmistest väärtustest: [16]

- 1) välisseinte soojusläbivus  $0,12\text{--}0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- 2) katuste ja põrandate soojusläbivus  $0,1\text{--}0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- 3) akende ja uste soojusläbivus  $0,6\text{--}1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , kusjuures lõplikud valikud tuleb teha, lähtudes hoone kompaktsusest ning kütte- ja ventilatsioonilahendusest.

Mitteelamute välispiirete valikul võib esmase lähenemisena lähtuda järgmistest väärtustest: [16]

- 1) välisseinte soojusläbivus  $0,15\text{--}0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- 2) katuste ja põrandate soojusläbivus  $0,1\text{--}0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

- 3) akende ja uste soojusläbivus  $0,6-1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , kusjuures lõplikud valikud tuleb teha, lähtudes hoone kompaktsusest ning kütte- ja ventilatsioonilahendusest. Optimaalne soojustus sõltub lisaks eelnevale oluliselt ka vabasoojusest.

Välispiirete keskmine õhulekkearv ei tohi üldjuhul ületada üht kuupmeetrit tunnis välispiirde ruutmeetri kohta [ $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$ ]. Niiskuskonvektsiooni riskide vältimiseks tuleb tarindite kriitilised sõlmed (seina ja vundamendi ning põranda ühendus, sein ja katuse ühendus, katuslae auru- või õhutõkke jätkukohad, läbiviigud) teha võimalikult õhkupidavaks. Välispiirete keskmine õhulekkearv ei tohi ületada energiatõhususe miinimumnõuete vastavuse tõendamiseks tehtud energiaarvutuses kasutatud väärtust. [16]

Energiaarvutusega määratakse hoone summaarne energiakasutus hoone sisekliima tagamiseks (kütmiseks, jahutamiseks, ventilatsiooniks ja valgustuseks), tarbevee soojendamiseks ja elektriseadmete (kodumasinad ja muud olme- ja bürooelektriseadmed ning teised hoonetes kasutatavad seadmed) kasutamiseks. Sellest lähtuvalt arvutatakse tarnitud ja eksporditud energiakasutused ning hoone energiatõhususarv. [16]

Energiaarvutus tehakse energiatõhususe miinimumnõuetele vastavuse tõendamise ja/või energiamärgise koostamise eesmärgil. Määruses sätestatud korras tehtud energiaarvutuse tulemused on kasutatavad mõlemal otstarbel. [16]

Hoone energiatõhususe miinimumnõuetele vastavust näitavad energiaarvutuste tulemused esitatakse ehitatavate ja oluliselt rekonstrueeritavate hoonete ehitusloa taotluse ehitusprojekti dokumentatsiooni osana. Ehitamise ajal on omaniku kohustus jälgida, et ehitusprojekti ei tehta selliseid muudatusi, mille tulemusena energiatõhususe miinimumnõudeid ei täideta. Hoone energiatõhusust oluliselt mõjutavate ehitusprojekti muudatuste korral tehakse energiatõhususe miinimumnõuetele vastavuse kontrolliks uus energiaarvutus. [16]

Energiamärgis on dokument, mis antakse projekteeritava või olemasoleva sisekliima tagamisega hoone kohta ja mille eesmärk on teada anda, milline on selle hoone projekteeritud energiavajadus või tegelik energiatarbimine ning vajaduse korral tõendada hoone vastavust energiatõ-

hususe miinimumnõuetele. Energiamärgisele lisatakse soovitud hoone energiatõhususe parandamiseks, välja arvatud juhul, kui selliseks parandamiseks puudub mõistlik võimalus. Energiamärgisel kajastatakse hoone tegelik või eeldatav aastane energiakasutus, mis märgitakse energiämärgise tiitellehel asuvale skaalale, andes hoonele vastava energiatarbe klassi. [17]

Energiämärgis on kohustuslik uutel ehitatavatel hoonetel, üle 1000 m<sup>2</sup> kasuliku pinnaga avalikel hoonetel ja olemasoleva hoone/hoone osa müügil või väljaüürimisel, kui seda nõuab ostja või üürilevõtja. [18]

**Tabel 1.3.** Muude hoonete energiatõhususarv (ET) või kaalutud energiakasutuse (KEK) klassi skaala [19]

ET või KEK, kWh/(m <sup>2</sup> ·a)	Klass
ET või KEK ≤ 110	A
111 ≤ ET või KEK ≤ 130	B
131 ≤ ET või KEK ≤ 170	C
171 ≤ ET või KEK ≤ 230	D
231 ≤ ET või KEK ≤ 300	E
301 ≤ ET või KEK ≤ 400	F
401 ≤ ET või KEK ≤ 550	G
ET või KEK ≥ 551	H

### 1.5.2. Energiatõhususe miinimumnõuded Soomes

Praegusel ajal on Soomes kehtivad energiatõhususega seotud seadused reguleeritud järgnevate aktidega:

- 1) pikaajalise kliima ja energia strateegia aastatel 2008–2020 ja 2050 (vastu võetud 2008 ja uuendatud 20.03.2013);
- 2) Programm „Energiatõhusalt ehitatud keskkond 2017“ – ERA 17 (vastu võetud 2010);
- 3) Soome Valitsuse programm (vastu võetud 2011);
- 4) Soome teine rahvuslik energiatõhususe tegevuse plaan (vastu võetud 2011).

**Pikaajalise kliima ja energia strateegia** seab eesmärgid 2020. aastaks vähendamaks kasvuhoonegaaside emissiooni, energiahanket ning suurendamaks taastuvenergia osakaalu ja energiatõhusust Soomes. Lisaks nimetatule määrab see visiooni kuni 2050. aastani. Strateegiline eesmärk on vähendada energiatarbimist lõpptarbija poolt ja see võiks jääda alla 310TWh 2020. aastal. Selle eesmärgi saavutamine võib osutada keeruliseks, kuna 2008. aastal tehtud ennustuste kohaselt on tänapäeval tegelik energia tarbimine suurem. [20]

**„Energiatõhusalt ehitatud keskkond 2017“ programmi** eesmärk on saavutada Euroopa Liidu poolt seatud energiatõhususe sihtmärgid 2017. aastaks. Programmis soovitatud tegevused on suunatud energiatõhusale maa kasutusele, detsentraliseeritud energiatootmisele, ehituse juhtimisele, vara- ja omandikasutamisele ja pädevale arendamisele. ERA 17 rõhutab linnavalitsuste osakaalu, millelt oodatakse võtvat juhtivat rolli kui energiatõhususe eestvedajatena. Kohalikud energiatõhususe strateegiad peavad kindlaks määrama planeerimise eesmärgid, maa omandamise, energiatootmise ja seadma energiatõhususe eesmärgid munitsipaalomandis olevatele hoonetele. [21]

**Soome Valitsuse programmi** peamine eesmärk on suunatud energiatõhusale ehitamisele. Eri-list tähelepanu pööratakse avalike hoonete ja korterelamute energiatõhusale ehitamisele ja renoveerimisele. Ehitus- ja arhitektuurikvaliteeti täiustatakse, pannes rõhku arhitektide kvalifikatsioonile ja edendades ehitussektoris olevate inimeste hariduslikke võimalusi. Toetatakse puidust ehitamist. Hoonete energiatõhususe arvutamisel edendatakse ehitusmaterjale ja -tooteid, mille tootmisel on arvestatud elutsükli arvutustega. Avalike hoonete projektides eelistatakse tooteid, millest on jäänud loodusesse kõige väiksem jälg. Uusi ja innovaatilisi renoveerimisvõimalusi edendatakse. [22]

**Soome teise rahvusliku energiatõhususe tegevuse plaani** järgselt jätkub kortermajade renoveerimine kuni aastani 2020. Keskkonnaministeerium sätestas 2012. aastal uute hoonete ehitamisel energiatõhususe printsiibi, mille eesmärk on saavutada liginullenergiahoone. Määruse kohaselt peavad kõik uued avalikud hooned olema liginullenergiahooned alates aastast 2019 ja kõik uued ehitatavad hooned peavad vastama samadele tingimustele alates aastast 2021. [20]

Keskkonnaministeeriumi poolt on vastu võetud akt seoses ehitiste energiatõhususe parandamisega remont- ja renoveerimistöodes 27. veebruaril 2013. aastal. See määrus kehtib ehitistele, kus energiat kasutatakse valgustuseks, ruumide ja ventilatsiooniõhu soojendamiseks või jahutamiseks vastavalt vajadusele ning ehitistele, kus tehakse maaparandus- või ehitusseaduse järgseid remont- või renoveerimistöid või ehitistele, mille kasutusotstarvet muudetakse. [23]

Energiatõhususe parandamisnõuded ei puuduta järgmisi hooneid: [23]

- 1) ehitised, mis on kaitse all ja määruste järgimine nende ehitiste juures tooks kaasa muudatused, mis pole lubatud;
- 2) tootmishooned, kus tootmisprotsessi käigus eraldub nii palju soojusenergiat, et soovitava temperatuuri saamiseks ei ole vaja mingisugust soojusenergiat või seda on vaja vähesel määral või tootmishooned, kus kütisperioodivälise aja soojuseraldus tõstaks ebatõhusalt ruumi temperatuuri või lisaks oluliselt jahutamisele kuluva energia hulka;
- 3) ehitised, mille pindala on väiksem kui 50 m<sup>2</sup>;
- 4) põllumajandushooned, mis ei ole mõeldud elamiseks ja mille energiatarbimine on väike;
- 5) kasvuhooned, pommivarjendid või muud ehitised, mille kasutamine esialgsel otstarbel raskendaks oluliselt selles määruuses sätestatud energiatõhususe nõudmiste täitmist;
- 6) suvilad, millesse ei ole projekteeritud aastaringset küttesüsteemi;
- 7) tähtaja jooksul ehitusplatsil püstitatud demonteeritavad ehitised, mille kasutusotstarve oluliselt ei muutu transpordi ja montaaži ajal;
- 8) ehitised, mida kasutatakse usulistel eesmärkidel.

Ehitise energiatõhususe projekteerimisel ja ehitise välispiirete soojapidavuse arvutamisel peab silmas pidama järgmisi väärtusi: [23]

- 1) välisseinte esialgne U-arv x 0,5, aga ei või olla suurem kui 0,17 W/(m<sup>2</sup>·K). Kui ehitise kasutamise otstarve muutub, siis esialgne U-arv x 0,5, aga ei või olla suurem kui 0,60 W/(m<sup>2</sup>·K);
- 2) katuslae esialgne U-arv x 0,5, aga ei või olla suurem kui 0,09 W/(m<sup>2</sup>·K). Kui ehitise kasutamise otstarve muutub, siis esialgne U-arv x 0,5, aga ei või olla suurem kui 0,60 W/(m<sup>2</sup>·K);
- 3) põranda konstruktsiooni puhul toimida vastavalt võimalustele;

- 4) uute akende ja välisuste U-arv peab olema  $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  või parem. Vanu aknaid ja välisuksi restaureerides toimida vastavalt võimalustele.

Kui ehitise energiatõhususe parandamise projekteerimine ja teostamine toimub ehitise standardkasutusel baseerual energiatarbimise vähendamisel, siis energiatarbimine peab järgima järgmisi nõudmisi: [23]

- 1) väike- või ridaelamu  $\leq 180 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 2) korterelamu  $\leq 130 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 3) büroohoone  $\leq 145 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 4) haridusasutus  $\leq 150 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 5) lasteaed  $\leq 150 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 6) ärihoone  $\leq 180 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 7) majutusasutus  $\leq 180 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 8) spordihoone v.a. jäähall või ujula  $\leq 170 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;
- 9) haigla  $\leq 370 \text{ kWh}/\text{m}^2$ .

Energiatõhususe nõudmine esitatakse vastavalt hoone tüübile arvutusliku energiaarvuna, mille piirmäära ei tohi ületada. Arvutuslik energiaarv, E-arv, on energialiikide koefitsentidega saadud kaalutud energiakasutuse erikulu vastavalt ehitustüübi standardkasutusele. Erikuluna on mõeldud energia aastast tarbimist, mis kulub netoruutmeetri pinna kütmiseks. [24]

**Tabel 1.4.** Uue hoone E-arvu nõudmised [24]

Klass	Hoone tüüp	E-arvu nõue (kWh/neto m <sup>2</sup> /aasta)
1	Väikeelamu, köetav netopind $A_{\text{neto}} < 120 \text{ m}^2$	204
1	Väikeelamu, köetav netopind $120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{neto}} \leq 150 \text{ m}^2$	$372 - 1,4 \cdot A_{\text{neto}}$
1	Väikeelamu, köetav netopind $150 \text{ m}^2 \leq A_{\text{neto}} \leq 600 \text{ m}^2$	$173 - 0,07 \cdot A_{\text{neto}}$
1	Väikeelamu, köetav netopind $A_{\text{neto}} > 600 \text{ m}^2$	130
1	Palkmaja, köetav netopind $A_{\text{neto}} < 120 \text{ m}^2$	229
1	Palkmaja, köetav netopind $120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{neto}} \leq 150 \text{ m}^2$	$397 - 1,4 \cdot A_{\text{neto}}$
1	Palkmaja, köetav netopind $120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{neto}} \leq 150 \text{ m}^2$	$198 - 0,07 \cdot A_{\text{neto}}$
1	Palkmaja, köetav netopind $A_{\text{neto}} > 600 \text{ m}^2$	155
1	Ridaelamu	150
2	Korterelamu	130
3	Büroohoone	170
4	Ärihoone	240
5	Majutusasutus	240
6	Koolimaja ja lasteaed	170
7	Spordihoone v.a. jäähall või ujula	170
8	Haigla	450
9	Muud ja ajutised hooned	E-arvu väärtuse peab leidma, aga selle jaoks puudub nõue

## 1.6. Külmasillad

Külmasillad on kohad piiretes, kus soojusläbivus on lokaalselt suurem ümbritseva tarindi soojusläbivusest. Külmasillad võivad olla geomeetrilised (välisseina välisnurk, pörandi ja välisseina liitumine, välisseina ja akna liitekoht jne.) või põhjustatud ehituskonstruktiiivsest lahendusest (tarindite liitekohad, soojustusest läbiviigud jne.). [26]

Külmasildade kahjulikkus seisneb suurenenud soojusvoolu hulgas (isolatsiooni vähenemise tõttu) ja tarindi sisepinna temperatuuri langemises. Külmasilla tekkimisel on tarindi sisepinna temperatuur madalam ja välispinna temperatuur kõrgem. Lisaks külmasillale võivad sisetemperatuuri paikset jähinemist põhjustada ka soojustuse puudumine, vigaselt paigaldatud soojustus, märgunud soojustus, alarõhu tingimustes õhutõkke lekked ning kütte- ja ventilatsioonisüsteemide halb toimivus. [26]



Külmas kliimas on külmasildadega arvestamine tähtis järgmistel põhjustel: [26]

- mikroorganismide kasv, seinä määrdumine ja veeauru kondenseerumine tarindis või tarindi pinnal on tingitud külmasilla suuremast soojuslähivusest. See tuleneb langenud sisepinna temperatuurist ja suurenenud suhtelisest niiskusest. Veeaur kondenseerub, kui temperatuur langeb alla küllastustemperatuuri, kui suhteline niiskus on 100%. Hallituse kasvaks sobiv suhteline niiskus on 75...80%;
- madalad pinnatemperatuurid suurteil aladel vähendavad soojuslikku mugavust. See tuleneb eelkõige suuremast õhuliikumisest ja ebasümmeetrilisest kiirgusest;
- külmasillad suurendavad hoonete energiakulu. Piirdetarindite soojuslähivuse üldise vähenemise juures hoone soojuskadudes külmasildade osakaal kasvab.

Kuna hoone välispiirete (välissein, katus, katuslagi, põrand) soojuskaod arvutatakse välispiirdeosa soojuslähivuse ja sisemõõtudega arvatud pindalade järgi, tuleb külmasildadest tingitud lisasoojuskaod võtta eraldi arvesse külmasildade joonsoojuslähivusega. Külmasilla soojuslähivus on soojuskadu vattides külmasilla kaudu, kui temperatuuride erinevus on üks kraad. [26]

### 1.7. Hoonepiirete õhulekked

Hoonepiirete ebapiisav õhupidavus väljendub õhuvoolu näol läbi pragude ja ebatiheduste hoone piiretes, mis ei ole planeeritud ega kontrollitud. Õhu infiltratsioon ja selle mõju sõltub hoonepiirete õhupidavusest, lekkekohtade paiknemisest, õhurõhkude erinevusest kahel pool piiret, kasutatavate materjalide omadustest ja kliimatingimustest [tuul (kiirus, suund, vertikaalne muutus), õhutiheduste erinevus]. Õhurõhkude erinevust erinevatel piirete pooltel põhjustavad tuul, temperatuuride erinevus (nn. korstna efekt) või ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevus. [27]

Hoonepiirete õhupidavust iseloomustab õhulekkearv  $q_{50}$  ( $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ), mis näitab õhuvooluhulka ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), mis läbib  $1 \text{ m}^2$  suuruse pindalaga piiret, kui kahel pool piiret on teatud õhurõhkude erinevus (tavaliselt 50 Pa). [27]

Hoonete energiatõhususe analüüsis on oluline roll hoonepiirete õhupidavusel, mis mõjutab otseselt hoone kütte- ja jahutuskulusid. Kui vähendada hoonepiirete soojusjuhtivust, siis kasvab

suhteline kulutus õhuvahetusele (ventilatsioonile ja infiltratsioonile). Hoonel, mille välispiirete õhuleke on suur, võib õhuvahetus, mis toimub piirete õhulekkekohtade kaudu, olla samas suurusjärgus või suuremgi kui ventilatsiooniseadmete poolt vahetatav õhuhulk. Tavapärase hoone energiakulu võib olla oluliselt suurem kui väga väikese õhulekkega hoonel. [27]

Kogu hoone õhupidavust mõjutavad kokkuvõttes kõikide piirete, liitekohtade ja avatäidete õhupidavused. Õhupidavuse tagamine nõuab lõpuni kaalutletud ja keerukaid lahendusi. Piirdetailid tuleb projekteerimise käigus hoolikalt läbi mõelda, õhutõke peab olema ehituse seisukohalt korralikult paigaldatud ja liitekohad nõutavalt tehtud. [27]

Teostatud uuringud on tõestanud, et õhulekete teel kandub siseruumidesse hallituseoseid, radooni või õhusaastet. Eestis tehtud uuringud on näidanud, et suurema õhulekkega hoonepiirete korral olid elanike kurtmise põhjuseks külmad põrandad ja rohkem kõikuv sisetemperatuur, samuti pistikupesadest tulev külm õhk. [27]

## **1.8. Termograafia**

Keha, mille temperatuur on kõrgem kui absoluutne null,  $-273,15\text{ °C}$ , kiirgab soojusenergiat. Termovisiooni teel mõõdetakse kehalt või esemelt kiirgunud või peegeldunud soojusenergiat ja teades ümbritseva keskkonna tingimusi (temperatuur ja niiskus) ja kiirgava pinna omadusi, saab arvutada selle pinna temperatuuri. Tavaline kaamera töötab nähtava valguse lainepikkusel, kuid termokaamera ehk infrapunakaamera on mõeldud töötama infrapunakiirguse lainepikkustel. [25]

Suureks eeliseks termograafia puhul on, et selle abil saab ehitustehnikas teha mitmeid uuringuid piirdetarindit avamata. Termograafia abil on võimalik: [25]

- hinnata erinevate pinnatemperatuuride alusel, missugusel määral erineb hoone piirete soojajuhtivus;
- leida õhulekete asukohti ja hinnata nende ulatust, kui sooritada mõõtmised normaaltin-  
gimustes ja ala- või ülerõhu tingimustes;

- leida ülekuumenenud elektrijuhtmeid, sein- ja põrandasiseseid veetorusid ning neis esinevad lekkeid;
- määrata hoonepiirete pinnatemperatuuride ebäühtlust, mis viitab soojajuhtivuse ja niiskussalduse ebäühtlusele;
- anda hinnang ehituskvaliteedile: külmasillad, õhulekkekohad ja puudulik soojustus, mis on eelkõige tingitud halvast ehituskvaliteedist.

Termograferimisel on oluline, et sise- ja välistemperatuuride vahe oleks minimaalselt 15°C ning samuti ei ole soovitatav tööd teostada vihmaste või päikesepaisteliste ilmadega, sest need mõjutavad tulemust. Kõige parema ülevaate maja sooja- ja õhupidavusest saab, kui kasutada termograafiat koos hoonepiirete õhupidavuse mõõtmisega, mille tulemusena leitakse nii külmasillad kui ka õhulekkekohad. [25]

### **1.9. Niiskus ehituskonstruksioonides**

Piirdes oleva vee hulka ei ole näha, aga liigse niiskuse poolt põhjustatud kahjustus on nähtav. Hoone tarindisse imbuv vesi kahjustab konstruktsiooni kõiki osi. Metallpindade puhul on niiskuskahjustuseks korrosioon, puitpindade puhul hallitus ja mädanik. Piisav niiskus (alates 80%) annab mikroorganismidele soodsad kasvutingimused. Mikroorganismideks on näiteks kõdu- ja hallitusseened. [30]

Niiskuskahjustusega ruumides võib hallitusseente eoste sisaldus õhus tõusta normaalsega võrreldes märgatavalt. Sellisel hulgal on need inimese tervisele ohtlikud, põhjustades silmade ja hingamisteede ärritust ning kopsupõletikku. [30]

Kondenseerumine toimub, kui hoone piirete temperatuur on liiga madal, mis omakorda on põhjustatud sellest, et piirde soojatakistus on liiga madal. Niiskus tahab alati liikuda kõrgema auru- sisaldusega õhust madalama auru- sisaldusega ehk kuivema õhu suunas. Tihtipeale tähendab see seda, et niiskus liigub ruumist välja, aga vahel võib olukord olla ka vastupidine. Kui niiskus liigub ruumist välja ja hoone välispiire on liiga tihe ning ei võimalda niiskusel läbi minna, siis niiskus kondenseerub piirdesse. [30]

Kuna külm õhk on raskem, siis on ta rohkem maapinna lähedal. Soojenedes muutub õhk kergemaks ja tõuseb ülespoole. Seega ruumis põranda pinna lähedal tekib alarõhk ja külm õhk tungib hoonesse põrandapragude ja avauste kaudu, siis soojeneb ja tõuseb lae alla, kus tekib ülerõhk ja selle tulemusel hakkabki niiskus pragudest, pooridest ja avaustest pööningu kaudu välja pressima. Vahelae konstruktsioonid hakkavad niiskuma ja tekib suur kondenseerumise oht. Külmasillad on väga ohtlikud kohad, sest seal kondenseerub niiskus väga kergesti. [30]

Vee ja veeauru liikumist mõjutavad difusioon, konvektsioon ja kapillaarne imendumine. [30]

**Difusioon** on niiskuse liikumine suuremalt rõhult väiksema rõhu poole. Difusiooni levik sõltub materjali poorsusest: mida poorem on materjal, seda rohkem laseb see niiskust läbi. [30]

**Konvektsiooni** puhul liiguvad veemolekulid õhuvooluga kaasa. Erinevus õhurõhus põhjustab õhuvoolu liikumist. Välisrõhu lühiajalisi erinevusi võib põhjustada tuul, sisetingimustel võivad õhurõhu erinevused olla tingitud ventilatsioonist või temperatuurist. Nii liigub niiskus väga lihtsalt läbi pragude ja avauste konstruktsiooni. Konvektsiooni mõjul liigub niiskust rohkem ja kiiremini kui difusiooni puhul. [30]

**Kapillaarne imendumine** on vee liikumine materjali poorides oleva kapillaarjõu ja vee pindpinevuse toimel. Mida väiksemad poorid, seda kõrgemale vesi tõuseb. [30]

Veeauru kondenseerumist saab vältida järgmisi meetmeid kasutusele võttes: [30]

- hoonesse paigaldades hea ventilatsioonisüsteemi;
- ruume ventileerides jahedama õhuga;
- jahedaid ruume ventileerides veel jahedama õhuga;
- vee kasutamise vähendamine ruumides;
- tehes hoone väliskonstruktsioonid tihedad ja kasutades piisavalt soojustust;
- jättes seina konstruktsiooni enne laudvoodri paigaldamist õhuvähe, et niiskus saaks konstruktsioonist välja aurustuda.

## 2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Lõputöö eesmärk on Boe mõisahoone restaureerimisel teostatavate ehitustööde kontrollimine, võttes aluseks Eestis ja Soomes kehtivad energiatõhususe miinimumnõuded ning Eestis kehtivad standardid. Lõpptulemusena võrrelda arvutustel ja mõõtmistel saadud tulemusi kehtivate nõuetega.

Töös lahendatavad ülesanded:

- tutvumine hoone ajaloo, ehituskonstruksioonide ja tehnilise seisundiga ning teaduskirjanduse läbitöötamine;
- tutvumine Eesti ja Soome energiatõhususe miinimumnõuete ja asjakohaste standarditega. Tutvumine tööks vajalike programmidega ja seadmetega: programm Therm ja termovisiooni meetodika;
- välispiirete soojusjuhtivuste leidmine kasutades standardite arvutuspõhimõtteid;
- välispiirete kondenseerumise kontroll Glaseri meetodi abil;
- olulisemate sõlmede: sokkel-sein, räästas, aken-sein, uks-sokkel, hoone välisnurk, välis- ja siseseina ristumine, välisseina ja vahelae ristumine ning külmasildade konduktantside ja temperatuurivälja arvutus programmiga Therm;
- termovisioon hindamaks külmasildade olemasolu ja asukohti. Külmasildade kriitilisuse hindamine termopiltidelt saadud tulemuste abil ja temperatuurivälja arvutustega;
- välispiirete soojuskaod tingituna piirete soojuseri juhtivusest ja õhu infiltratsioonist;
- välispiirete summaarse soojuserikao leidmine köetava pinna ruutmeetri kohta;
- arvutatud ja mõõdetud tulemuste võrdlus;
- tulemuste analüüs.

### **3. MATERJAL JA METOODIKA**

#### **3.1. Boe mõisahoone kirjeldus**

Boe mõisahoone paikneb Lõuna-Soomes, Porvoo linna lähedal, mis asub Helsingist 60 km kaugusel. Mõisahoone on ehitatud kahes osas – 1850. aastal on ehitatud hoone madalam peahoone osa ja 1870. aastal on ehitatud tornipoolne osa.

Alates 1809. aastast kuulus Soome autonoomse suurvürstiriigina Vene impeeriumi koosseisu. Soomes valitsenud arhitektuurieeskujud jagunesid 19. sajandi alguses suuremalt jaolt kaheks: endise pealinna Turu arhitektuuri areng, mis oli mõjutatud Rootsi ehituskunstist ja uues pealinnas – Helsingis – ehitas C.L. Engel välja suurejoonelise klassitsistliku linnaansambli. Sagedased linnatulekahjud, mis leidsid aset 19. sajandi esimesel poolel, on mõjutanud Soome linnade arengut klassitsistliku linnaplaneeringu suunale. Tulekahjude tagajärjel said linnad uued planeeringud, mille juures seati tähtsale kohale ehitiste paigutus linnaruumis vastavalt tuleohutusala nõuetega. Puuduliku gooti ehitustraditsiooni tõttu kasutati linnades sagedamini tüüpfassaadides nõutud iseloomulikke lamedat plekist kelpkatust. Lai, sügava soonega rõhtlaudis, mis pidi imiteerima kivehitise rustikat, vahetas Soome linnades välja varasema püstlaudise. Seda peetakse ülevenemaaliste tüüpfassaadide mõjukuks ja saeveskite inventari täiustamise tõttu oli see ka võimalik. [31]

Soome ja Vene linnade lihtsamad elamud olid suurelt osalt ühetüübilised: kõrge soklikorrusega ja lameda täiskelpkatusega ehitised, korduvad ümarkaarsed aknaavad ja nurgarustika fassaadidel. Selle tulemusena on sellest perioodist soome ja vene arhitektuuriterminoloogiasse tulnud nimetus puitklassitsism. [31]



**Joonis 3.1.** Hoone vaade õhust kirdefassaadile

Peahoone puhul on tegemist hilisklassitsismiga. Selgelt torkab silma ka Vene tüüpfassaadidest võetud fassaadikompositsioon: paaritu arv aknaid ja ümarkaarsed aknaavad, nurgarustika, sammasportikus peahoone kirdepoolisel fassaadil, valtsplekiga kaetud madalam täiskelpkatus. Lisaks sellele on Boe mõisahoonel juures näha Soome puitarhitektuuris väga levinud trempelseina lahendust – s.t. pool korrust katusekarniisi all [31] ning mõisa peahoone on massiivsetest maakividest laotud vundament. Selle osa ulatuses on ehitisel alt tuulutatav põrand. Maakividest vundament jätkub tornipoolisel osal, kus need moodustavad keldrikorruse seinad. Kirdepoolisel fassaadil on kaks ust. Esimese korruse uks avaneb suurele terrassile ja teise korruse uks rõdule. Edelapoolset fassaadi ilmestavad kaks ust, mis on mõisa peasissekäikudeks. Samuti on üks uks tornipoolse osa sissekäiguks. Hoone fassaad on säilinud algupärasena, v.a. ühe ukse ja akna asukohtade vahetus kagupoolisel fassaadil, mis on tingitud praegusest ruumilahendusest ja tulevasest terrassist ning ühe aknaava muutmine ukseavaks, millest pääseb hoone loodepoolsele seinale ehitatavale terrassile.

Põhiplaanilt on mõisahoonel kagu-loode suunaline. Mõisa madalama peahoone osa on kahekorruseline, mis on mõeldud eluruumideks. Tornipoolsel osal on lisaks kahele korrusele kahekorruseline keldri osa ning pööningu osa, kus on tehniline ruum ventilatsiooniseadmete jaoks. Keldri ülemisse ossa on plaanitud saun koos pesu- ja eesruumiga ning alumisse ossa on plaanitud hoidla, veinikelder, tehniline ruum ja pesuruum. Kogu mõisahoonel esimese korruse brutopind on 619 m<sup>2</sup>, teise korruse brutopind on 448 m<sup>2</sup>, ülemise keldri brutopind on 108 m<sup>2</sup>, alumise keldri brutopind on 90 m<sup>2</sup>. Kogu mõisahoonel brutopind on kokku 1265 m<sup>2</sup>. Mõis on eraomanduses ja selle madalam peahoone osa kahe korruse ulatuses jääb erakasutusse. Torniosa on tulevikus võimalus välja üürida näiteks konverentside ja koosolekute pidamiseks.

Mõisahoonel on palkseinad, mis on soojustatud seestpoolt. Fassaadilaudis on terves ulatuses viimati värvitud 1998. aastal ja selle seisukord on rahuldav. Kuna väline ilme pidi jääma samaks või siis puutumata ning maja ümbritseb rahuldavas seisukorras laudvooder, otsustati sisemise soojustuse kasuks ning ühtlasi saavad selle tulemusena siseseinad sirgeks.

Küttelahendusena on kasutatud vesipõrandakütet ja algupäraseid restaureeritud radiaatoreid. Vesipõrandaküte on esimesel korrusel köögi ja WC ulatuses ning teisel korrusel olevate vannitubade, WC-de ja sauna ulatuses. Ruumidesse, kus puudub põrandaküte, on ette nähtud radiaatorküte. Lokaalsest katlamajast, mis katab kõiki kompleksi hooned, liigub puitpelletite põlemisel saadud soojusenergia kaugküttena mõisahoonesse.

Töös on käsitletud mõisa peahoone madalamat osa, kuna hetkel käivad ehitustööd peamiselt selles osas ja torniosa tegeletakse hiljem.



### 3.2. Ehituskonstruksioonide kirjeldus

Välispiirete soojusjuhtivuste ja kondenseerumisrisiki arvutamiseks kasutatakse järgneva tabeli andmeid.

**Tabel 3.1.** Arvutustes kasutatud materjalide omadused [32]

Materjal	Soojuserijuhtivus $\lambda$ , W/(m·K)	Difusioonitakistus-kons- tant $\mu$	Aurutakistus $S_d$ , m
Puit	0,13	20	
Vineer	0,17	90	
Aurutõkkepaber			0,7 <sup>5)</sup>
Pingupapp			0,052 <sup>6)</sup>
Tapeet			0,027 <sup>6)</sup>
Ekovill	0,039 <sup>1)</sup>	2	
SPU	0,023 <sup>2)</sup>	60	
Kipsplaat	0,25	12	
Klinkerplaat	0,8		1,2
Bitroc tuuletõkkeplaat	0,048 <sup>3)</sup>		0,16 <sup>7)</sup>
Homogeenne kivim	3,5 <sup>4)</sup>		

<sup>1)</sup> Ekovilla.

Kättesaadav: <http://www.ekovilla.com/ohjeet/ohjeet-suunnittelijoille/> (19.05.2014)

<sup>2)</sup> SPU.

Kättesaadav: <http://www.spu.fi/tuotteet/tuote/spu-al/> (19.05.2014)

<sup>3)</sup> Hunton.

Kättesaadav: <http://fi.hunton.no/product/bitroc/> (19.05.2014)

<sup>4)</sup> EVS-EN ISO 13370:2008 Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid.

<sup>5)</sup> Eltete.

Kättesaadav: [http://www.eltete.fi/rakennuspaperi/DoP\\_Elt-Kraft\\_VCL\\_plus.pdf](http://www.eltete.fi/rakennuspaperi/DoP_Elt-Kraft_VCL_plus.pdf) (19.05.2014)

<sup>6)</sup> Jürgenson, L. Elamuehitus 1. Tartu. Teaduslik Kirjandus. 1949. 470 lk.

Pingupapi ja tapeedi aurutakistus on leitud teisendamise teel, kasutades andmeid Jürgensoni raamatust.

<sup>7)</sup> Hunton.

Kättesaadav: [http://fi.hunton.no/wp-content/uploads/sites/3/2014/03/RT\\_0314.pdf](http://fi.hunton.no/wp-content/uploads/sites/3/2014/03/RT_0314.pdf) (19.05.2014)

Tuuletõkkeplaadi aurutakistus on leitud teisendamise teel, kasutades abimaterjalina [http://www.calabro-parati.com/lafarge%20gessi/Isolamento\\_Termico.pdf](http://www.calabro-parati.com/lafarge%20gessi/Isolamento_Termico.pdf) veebilehte.

### Välissein

Välisseinte kandvaks osaks on rõhtpalgid, mis on 150 mm paksused. Välisseinad on heas seisukorras. Perimeetri ulatuses vahetati alumise vöö mädanenud palgid välja ja need asendati uute palkidega. Väljastpoolt katab seinu tuuletõkkepaber, mille peale on löödud distantliistud ja nende külge on kinnitatud välisvoodrilaud. Fassaadilaudis on algupärane ning see on rahuldavas seisukorras. Eeloleval suvel on plaanis lahtine ja vana värv eemaldada ning teostada mõisahoone

fassaadi värvimine. Sissepoole on paigaldatud puitkarkasspostid, ristlõikega 50x50 mm sammuga 400 mm, mis on kinnitatud lengikruvidega. Karkassivahed on täidetud märjalt pritsitud puiste tselluvillaga, mille keskmine paksus on 70 mm. Villa pind on kaetud aurutõkkepaberiga ja kõik vuugid on teibitud ning selle peale on kinnitatud vineer paksusega 12 mm. Kuna siseviimistlusega on soov saada vanamoeline välimus, siis vineer kaetakse pingupapiga, mille peale liimitakse tapeet (vt. joonis 4.7.a.).

## **Põrand**

Põrandakonstruktsioonis vahetati halvas seisukorras põrandatalad välja. Uute taladena paigaldati puitprussid või kertopuu talad ristlõikega 50x200 mm ning need kinnitati palgikingade abil. Pikemate sillete korral oli 19. sajandi keskpaigas ehitatud mõisahoone puhul kasutatud tugesisid, mis olid ehitatud sarnaselt vundamendile maakividest. Nende asemele tehti uued toed, millele valati betoonist taldmik ja laoti müüriplokkidest tugi. Põrandatalad kaeti altpoolt laudadega, mille ristlõige oli 22x100 mm nii, et nende vahele jäeti 10 mm vahe tuuldumise jaoks. Kohtades, kus põranda all ei olnud piisavalt ruumi töötamiseks, paigaldati laudad pealtpoolt. Laudade peale paigaldati 12 mm paksune tuuletõkkeplaat nii, et põrandatalade vahed said tihedalt kaetud ega tuul pääsenud liikuma. Seinte juures paigaldati põrandatalade otsa vuukidesse klambrite abil tuuletõkkepaber, et vähendada õhulekkeid. Põrandalaakide paigaldamisel lähtuti vana põranda kõrgusest ja tulevases põrandalaua paigaldamise suunast ning vastavalt sellele kasutati põranda ehitamisel erinevate ristlõigetega puitmaterjali (50x100 mm, 50x125 mm, 50x150 mm, 50x200 mm). Laagid on paigaldatud 400 mm ja 600 mm sammuga. Soojustamiseks kasutati kuivalt puhutud tselluvilla ning selle keskmiseks paksuseks tuli 400 mm. Põrandalaagid ja soojustus on kaetud aurutõkkepaberiga, mille kõik vuugid on teibitud. Laakide peale paigaldati vineer paksusega 12 mm ja selle peale paigaldatakse põrandalaua paksusega 28 mm. Lammutustööde käigus säilitati võimalikult palju vanu põrandalaua ning need paigaldatakse pärast hõõveldamist. Puudujääv osa kaetakse uute laudadega.

Põrandate puhul, kus kasutatakse põrandakütet, on paigaldatud 18 mm paksune vineer. Vineeri peal on laotatud veeküttetoru ning selle peale on valatud õhuke tasanduskiht, mille peale on liimitud erikasutusotstarbeline kipsplaat põrandatel kasutamiseks. Viimistluskihina kasutatakse põrandaplaati (vt. joonis 4.10.a.).

### **Sisesein**

Siseseinade sirgeks ajamisel lähtutakse põhimõttest, et lõpptulemusena jääks kasutusse võimalikult palju pörandapinda. Loodimiseks kasutatakse puitmaterjali 22x100 mm või 32x100 mm ning need paigaldatakse sammuga 400 mm. Selle tulemusena peab pistikupesad ja harukarbid vajalikus ulatuses palkide sisse freesima. Siseseinad kaetakse 12 mm paksuse vineeriga ning viimistluse puhul toimitakse sarnaselt välisseinadele.

### **Vahelagi**

Vahelae taladeks on 150 mm ja 200 mm läbimõõduga palgid, mis on paigaldatud sammuga 700 mm ja 800 mm. Palkide vahele on ilma vahedeta paigaldatud lauad. Lauad on kaetud ehituspaberiga, et vältida soojusisolatsioonmaterjali alla kukkumist. Pörandalaakide paigaldamisel lähtuti sarnaselt esimese korruse pörandale vana pörandalaakide kõrgusest ja pörandalaakide paigaldamise suunast ning selleks kasutati puitmaterjali ristlõikega 50x150 mm. Laagid paigaldati 400 mm sammuga. Laakide vahed täideti kuivaltu puustatud tselluvillaga, mille keskmiseks paksuseks tuli 400 mm. Laagid kaetakse 12 mm paksuse vineeri ja seejärel 28 mm paksuse laudisega (vt. joonis 4.8.a).

### **Lagi**

Lae roovituseks kasutati puitmaterjali ristlõikega 32x100 mm sammuga 400 mm. Lage on toodud vastavalt kõige madalamale nurgale allapoole, et lõpptulemus oleks sirge. Viimistluseks kasutatakse kipsplaati.

### **Katuslagi**

Katuslae ehitamisel kasutati soojustusena poliüretaanvahust ehitusplaati, mis on mõlemalt poolt kaetud fooliumiga ning mis paigaldati kahes kihis – 50 mm ja 150 mm. Sarikateks on 200x200 mm ristlõikega palgid sammuga 900 mm. Sarikate sisekülgedele kinnitati puitmaterjal ristlõikega 50x50 mm nii, et selle alumisest servast sarika alumise servani on 50 mm. Õhem SPU kiht kinnitati nii, et selle alumine külg moodustaks koos sarikatega ühtse pinna. Sellega on tagatud 100 mm tuulutusahe, mis jääb SPU ja katuse laudise vahele. Sarikatega risti paigaldati puitmaterjal ristlõikega 50x150 mm sammuga 1200 mm ning need kinnitati nurkraudadega. Nende

vahele paigaldati 150 mm paksune SPU. Soojustusplaatide kinnitamisel kasutati kiile ja poliüretaanvahtu. Katuslae lahendust kasutati selles osas, kus tegemist on kalduse osaga. See ulatub nii kõrgele, kust lagi muutub horisontaalseks. Lae roovituseks kasutati puitmaterjali 32x100 mm sammuga 400 mm. Viimistluseks kasutatakse kas kipsplaati või laudist (vt. joonis 4.9.a.).

### **Pööninglagi**

Laetaladeks kasutati materjali ristlõikega 50x125 mm sammuga 400 mm ning kinnitamisel kasutati palgikingasid. Altpoolt kaeti laetalad aurutõkkepaberiga, mille kõik vuugid teibiti ning ülevalt poolt teostati soojustamine 500 mm ulatuses kuivalt puistatud tselluvillaga. Roovituseks ja siseviimistluseks kasutatakse samasid materjale, mis katuslae puhul.

### **Katus**

Sarikatega samasuunaliselt on nende peale kinnitatud puitmaterjal ristlõikega 32x100 mm. Samast materjalist, aga risti sarikatega, on tehtud laudis katusepleki alla. Laudis kinnitati 20 mm tuulutusvahedega, v.a. hari ja räästas, kus lauad kinnitati tihedalt 1 meetri ulatuses. Katusetööde käigus vahetati kõik halvas seisukorras olevad detailid. Katusekatteks kasutati tsingitud valtsprofiilplekki.

### **3.3. Hoone välispiirete soojusjuhtivuse arvutus**

Piirdetarindite soojusjuhtivuse arvutusmeetod põhineb materjalide ja toodete soojuserijuhtivuse või soojustakistuse arvutusväärtusel. Meetodit saab rakendada selliste tarindite ja tarindiosade puhul, mis moodustuvad soojuslikult homogeensetest kihtidest (mille seas võivad olla õhkvaht) või soojuslikult mittehomogeensetest kihtidest (välja arvatud juhtumid, kus soojustuskihis on oluline külmasild). [1]

Hoonete välispiirded peavad olema pikaajaliselt õhkupidavad ja piisavalt soojustatud. Otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse hoone energiatõhususe nõuetest, ruumide soojuslikust mugavusest ja hallituse ning kondensaadi vältimiseks külmasildadel, sisepindadel ja tarindites. Piirete soojusjuhtivus arvutatakse standardi EVS 908-1:2010 järgi. [1]

Piirete soojusjuhtivuse arvutusmeetodi põhimõtted on järgmised: [1]

- arvutatakse piirdetarindi iga soojuslikult homogeense kihi soojustakistus;
- määratakse piirdetarindi kogu soojustakistus üksikute kihtide ja pindade soojustakistuste summeerimisel;
- arvutatakse piirde soojusjuhtivus, mida korrigeeritakse, arvestades mehaaniliste kinnitite mõju, sademete mõju pööratud katustele, soojustuse õhujuhtivuse mõju ja külmasildade mõju.

### Välispiirded

Piirde soojusjuhtivus,  $U$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$  arvutatakse valemiga (1) ümardatuna kahe kohani pärast koma: [1]

$$U = \frac{1}{R_T}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (1)$$

kus:

$R_T$  piirde kogusoojustakistus,  $(m^2 \cdot K)/W$ .

Soojuslikult homogeensetest kihtidest tarindi kogusoojustakistus  $R_T$   $(m^2 \cdot K)/W$ , arvutatakse valemiga (2): [1]

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2)$$

kus:

$R_{si}$  piirde sisepinna soojustakistus  $(m^2 \cdot K)/W$ ;

$R_1, R_2$  iga materjalikihi arvutuslik soojustakistus,  $(m^2 \cdot K)/W$ ;

$R_{se}$  piirde välispinna soojustakistus  $(m^2 \cdot K)/W$ .

Kui õhkvahe on tuulutatav, siis võib välisvoodri ja tuulutusvahe arvestamata jätta ning piirde välispinna soojustakistuse võib nende võrra sissepoole nihutada.

Soojuslikult homogeense materjalikihi arvutuslik soojustakistus,  $R$ ,  $(m^2 \cdot K)/W$ , arvutatakse valemiga (3): [1]

$$R = \frac{d}{\lambda_d}, \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (3)$$

kus:  $d$  materjalikihi paksus, m;  
 $\lambda$  materjali soojusjuhtivus, W/(m·K).

Soojuslikult mittehomogeensete kihtidega tarindi kogusoojustakistus,  $R_T$ , (m<sup>2</sup>·K)/W, arvutatakse valemiga (4): [1]

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}, \frac{m^2 \times K}{W} \quad (4)$$

kus:

$R'_T$  mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga risti olevaid seksioone), (m<sup>2</sup>·K)/W;  
 $R''_T$  mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse alumine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga paralleelselt olevaid kihte), (m<sup>2</sup>·K)/W.

Kui kütmata ruumi välispiirde on soojustamata, võib lihtsustatult võtta kütmata ruumi arvesse kui täiendava soojustakistuse. Väikeste kütmata ruumide mõju võib arvesse võtta, käsitledes kütmata ruumi koos selle välispiirdetarinditega kui täiendavat homogeenset kihti, mille soojustakistus  $R_u$  leitakse vastavalt valemile (5): [1]

$$R_u = 0,09 + 0,4 \frac{A_j}{A_e}, \frac{m^2 \times K}{W} \quad (5)$$

kus:

$A_j$  kõikide sisekeskkonna ja kütmata ruumi vahel asuvate komponentide üldpind;  
 $A_e$  kõikide kütmata ruumi ja väliskeskkonna vahel asuvate komponentide üldpind.

Kogusoojustakistuse ülemise ja alumise piirväärtuse leidmiseks tuleb piirdetarind tükeldada soojuslikult homogeenseteks seksioonideks ja kihtideks. [1]

Mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus  $R'_T$ , (m<sup>2</sup>·K)/W, arvutatakse piirdetarindi pinnaga risti olevate seksioonide soojusjuhtivuste summa abil vastavalt valemile (6): [1]

$$R'_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_{Ta}} + \frac{A_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{R_{Tn}}}, \frac{m^2 \times K}{W} \quad (6)$$

kus:

- $A_a, \dots, A_n$  piirde üksikute seksioonide osapindalad (osakaalud);  
 $R_{Ta}, \dots, R_{Tn}$  piirde üksikute seksioonide soojustakistused, mis arvutatakse vastavalt valemile 2.

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus  $R''_T$ ,  $(m^2 \cdot K)/W$ , arvutatakse piirdetarindi pinnaga paralleelselt olevate kihtide ühemõõtmeliste soojusvoogude summana vastavalt valemile (7): [1]

$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \frac{m^2 \times K}{W} \quad (7)$$

kus:

- $R_{si}$  piirde sisepinna soojustakistus, horisontaalse soojusvoolu korral 0,13  $(m^2 \cdot K)/W$ ;  
 $R_1, R_x, R_n$  iga kihi soojustakistus, mis arvutatakse vastavalt valemile 3 (soojuslikult homogeenne kiht) või vastavalt valemile 7 (soojuslikult mittehomo-geenne kiht),  $(m^2 \cdot K)/W$ ;  
 $R_{se}$  piirde välispinna soojustakistus, horisontaalse soojusvoolu korral 0,13  $(m^2 \cdot K)/W$ .

Mittehomoogensete materjalikihtide soojustakistus  $R_x$ ,  $(m^2 \cdot K)/W$ , arvutatakse vastavalt valemile (8): [1]

$$R_x = \frac{A_{xa} + A_{xb} + \dots + A_{xn}}{\frac{A_{xa}}{R_{xa}} + \frac{A_{xb}}{R_{xb}} + \dots + \frac{A_{xn}}{R_{xn}}}, \frac{m^2 \times K}{W} \quad (8)$$

kus:

- $A_{xa}, \dots, A_{xn}$  mittehomoogene kihi üksikute osade osapindalad (osakaalud),  $m^2$ ;  
 $R_{xa}, \dots, R_{xn}$  mittehomoogene kihi üksikute osade soojustakistused, mis arvutatakse vastavalt valemile 3.

Maksimaalne suhteline arvutusviga  $e$ , %, arvutatakse valemiga (9): [1]

$$e = \frac{R_T' - R_T''}{2 \times R_T} \times 100\%, \% \quad (9)$$

kus:

- $R_T'$  mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga risti olevaid seksioone),  $(m^2 \cdot K)/W$ ;  
 $R_T''$  mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse alumine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga paralleelselt olevaid kihte),  $(m^2 \cdot K)/W$ .

Et võtta arvesse soojustuses olevaid tühimikke (paigalduse vead), soojustuskihti läbivaid kinniteid, pööratud katusel sademete mõju ja õhu liikumist soojustuses, tuleb soojusjuhtivust korrigeerida. Korrigeeritud soojusjuhtivus,  $U_c$ , saadakse arvutatud soojusjuhtivusele,  $U$ , paranduse  $\Delta U$  lisamisega, valem (10): [1]

$$U_c = U + \Delta U, \frac{W}{m^2 \times K} \quad (10)$$

Piirde soojusjuhtivust on korrigeeritud järgmistel eeldustel: [1]

- soojustus on hästi paigaldatud, aga esinevad mõned soojustuskihti läbivad õhupraod; õhu ringlust soojustuse soojemal poolel ei esine;
- soojustus on sisemise õhutõkke ja välimise tuuletõkke vahel, millega on välditud konvektsioonist tingitud lisasoojuskaod;
- ei ole soojustust läbivaid metallkinniteid.

Parandus,  $\Delta U$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ , saadakse valemist (11): [1]

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r + \Delta U_a + \Delta U_{\psi X}, \frac{W}{m^2 \times K} \quad (11)$$

kus:

- $\Delta U_g$  õhupiludest tingitud parandus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  
 $\Delta U_f$  mehaanilistest kinnititest tingitud parandus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  
 $\Delta U_r$  pööratud katusest tingitud parandus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  
 $\Delta U_a$  soojustuse õhujuhtivusest tingitud parandus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  
 $\Delta U_{\psi X}$  külmasildadest põhjustatud parandus.



Õhupiludest tingitud parandust  $\Delta U_g$ , mõjutavad kolm paigaldustaset, mis sõltuvad õhupilude ulatusest ja nende paiknemisest, valem (12): [1]

$$\Delta U_g = \Delta U'' \times \left( \frac{R_I}{R_T} \right)^2, \frac{W}{m^2 \times K} \quad (12)$$

kus:

$\Delta U''$  tegur, mis sõltub soojustuse paigaldustasemest,  $W/(m^2 \cdot K)$

$R_I$  pilusid sisaldava materjalikihi soojustakistus, mis arvutatakse valemiga 3 (soojustuslikult homogeenne kiht) või valemiga 7 (soojustuslikult mittehomogeenne kiht);

$R_T$  piirdetarindi kogusoojustakistus, mis arvutatakse valemiga 2 (homogeensete kihtidega piirdetarind) või valemiga 4 (mittehomogeensete kihtidega piirdetarind).

Võimaliku soojustusesisese mikrokonvektsiooni mõju piirde soojusjuhtivusele arvestab parandustegur  $\Delta U_a$ , valem (13): [1]

$$\Delta U_a = \Delta U''_a \times \left( \frac{R_I}{R_T} \right)^2, \frac{W}{m^2 \times K} \quad (13)$$

kus:

$\Delta U''_a$  tegur, mis mõjub seintele või järsemale kui  $45^\circ$  kaldega katuslaele ning katuslaele ja põrandale (postvundamendi puhul või kui põrandaaluse ruumi tuulutusavade pindala on suurem kui 8% põranda pindalast);

$R_I$  pilusid sisaldava materjalikihi soojustakistus, mis arvutatakse valemiga 3 (soojustuslikult homogeenne kiht) või valemiga 7 (soojustuslikult mittehomogeenne kiht);

$R_T$  piirdetarindi kogusoojustakistus, mis arvutatakse valemiga 2 (homogeensete kihtidega piirdetarind) või valemiga 4 (mittehomogeensete kihtidega piirdetarind).

Välispiirete nurkade ja liitekohtade (välissein-välissein, põrand-välissein, katuslagi-välissein, akna seinakinnituse sõlm jne) lisasoojuskaod võetakse eraldi arvesse geomeetriliste joonkülmasilidade lisasoojusjuhtivusega  $\Psi_j$ ,  $W/(m \cdot K)$ . Ka muud võimalikud tarinditest tulenevad külmasilid võetakse arvesse vastava külmasilla lisasoojusjuhtivusega. Kui soojustuslikult mittehomogeense tarindi materjalide soojuseri juhtivused erinevad üle viie korra või kui tarindis on süsteemilised külmasillad, mida on otstarbekas teisendada välispiirde korrigeeritud soojusjuhtivuse väärtusesse, arvutatakse külmasildadest tingitud parandus vastavalt valemile (14): [1]

$$\Delta U_{\Psi} = \frac{\sum \Psi_j \cdot l_j}{A} + \frac{\sum \chi_p \cdot n_p}{A}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (14)$$

kus:

- $\Delta U_{\Psi}$  külmasildadest tingitud parandus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $\Psi_j$  joonkülmasilla lisasoojusjuhtivus,  $W/(m \cdot K)$ ;
- $l_j$  joonkülmasilla pikkus, m;
- $\chi_p$  punktkülmasilla lisasoojusjuhtivus,  $W/K$ ;
- $n_p$  samasuguste punktkülmasildade arv välispiirdeosas, tk;
- $A$  piirdetarindi pindala,  $m^2$ .

### Soojuslevi pinnasesse

Soojuslevi pinnasesse iseloomustavad järgmised tegurid: [2]

- soojuslevi läbi põranda, mis sõltub põranda tarindusest;
- soojuslevi läbi põranda ääreala, mis sõltub seal asuvast külmasillast;
- soojuslevi läbi põranda ääreala, mis sõltub pinnase soojuslikust inertsist.

Põrandas tekkiva soojusvoo kolmemõõtmelisusega arvestamiseks on käesolevas rahvusvahelises standardis toodud valemities kasutatud põranda „tunnusmõõtmeid“  $B$ , mis on määratletud kui põrandapindala ja poole perimeetri väärtuse jagatis ja tähistatud valemiga (15): [2]

$$B' = \frac{A}{0,5P} \quad (15)$$

kus:

- $B'$  põranda tunnusmõõde, m;
- $A$  põranda pindala,  $m^2$ ;
- $P$  põranda välisperimeeter, m.

Põrand välisõhu kohal on igasugune põrand, mis ei ole kontaktis pinnasega, näiteks on toetatud puitu või talasid ja plokke kasutades. Põrand välisõhu kohal on põrand, mille õhkvahet tuulutatakse loomulikult ja välisõhku kasutades. [2]

Põranda soojusläbivus on antud valemiga (16):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \quad (16)$$

kus:

- $U_f$  on põranda välisõhu kohal asuva osa soojusjuhtivus  $W/(m^2 \cdot K)$  (hoone siseruumi ja õhkvahe vahel);
- $U_g$  on soojusjuhtivus, mis tuleneb pinnasesse suunduvast soojusvoost,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $U_x$  on võrdväärne soojusjuhtivus õhkvahe ja väliskeskkonna vahel, mis tuleneb soojuslevist läbi õhkvahe seinte ning õhkvahe tuulutamisest,  $W/(m^2 \cdot K)$ .

Võrdväärne kogupaksus – välisõhu kohal asuva põranda alune pinnas leitakse valemiga (17):

[2]

$$d_g = w + \lambda(R_{si} + R_g + R_{se}) \quad (17)$$

kus:

- $w$  välisseinte paksus, m;
- $\lambda$  pinnase soojusjuhtivus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $R_{si}$  piirdetarindi sisepinna takistus,  $(m^2 \cdot K)/W$ ;
- $R_g$  õhkvahe põhjas asuva isolatsioonikihi soojustakistus  $(m^2 \cdot K)/W$ ;
- $R_{se}$  piirdetarindi välispinna takistus,  $(m^2 \cdot K)/W$ .

Tegur  $U_g$  arvutatakse valemiga (18): [2]

$$U_g = \frac{2 \times \lambda}{\pi \times B' + d_g} \times \ln \left( \frac{\pi \times B'}{d_g} + 1 \right) \quad (18)$$

kus:

- $\lambda$  pinnase soojusjuhtivus,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $B'$  põranda tunnusmõõde, m;
- $d_g$  võrdväärne kogupaksus – välisõhu kohal asuva põranda alune pinnas, m.

Tegur  $U_x$  arvutatakse valemiga (19): [2]

$$U_x = 2 \times \frac{h \times U_w}{B'} + 1450 \times \frac{\varepsilon v f_w}{B'} \quad (19)$$

kus:

- $h$  põrandapinna keskmine kõrgus ümbritseva maapinna suhtes;  
 $U_w$  on õhkvahe seinte soojusjuhtivus välise maapinna kohal,  $W/(m^2 \cdot K)$ , arvutatud vastavalt standardile ISO 6946;  
 $\varepsilon$  on tuulutusavade pindala õhkvahe ümbermõõdu pikkuses,  $m^2/m$ ;  
 $v$  on keskmine tuule kiirus 10 meetri kõrgusel,  $m/s$ ;  
 $f_w$  on tuuletõkketegur.

### Akende soojusjuhtivus

Akna soojusjuhtivus  $U_a$  arvutatakse järgmise valemiga (20): [38]

$$U_a = \frac{U_k \times A_k + U_r \times A_r + \Psi_k \times l_k}{A_k + A_r}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (20)$$

kus:

- $U_k$  on klaasiosa U-arv,  $W/(m^2K)$ ;  
 $A_k$  on klaasiosa pindala,  $m^2$ ;  
 $U_r$  on lengi- ja raamiosa U-arv,  $W/(m^2K)$ ;  
 $A_r$  on raamiosa pindala,  $m^2$ ;  
 $\Psi_k$  on klaasiserva (aknalengi perimeetril) joonkülmsilla lisakonduktants,  $W/(mK)$ ;  
 $l_k$  on klaasiserva perimeetri pikkus,  $m$ .

### Välispiirete summaarne soojuserikadu

Välispiirete summaarne soojuserikadu leitakse valemiga (21): [39]

$$H_e = \sum A \times U + \sum \Psi_j \times l_j + \sum \Psi_p \times n_p + \rho_a \times c_a \times V_{inf}, \frac{W}{K} \quad (21)$$

kus:

- $A$  välispiirete pindala;  
 $U$  välispiirete soojusjuhtivus;  
 $\Psi_j$  joonkülmasilla lisakonduktants,  $W/(m \cdot K)$ ;  
 $l_j$  joonkülmasilla pikkus,  $m$ ;  
 $\Psi_p$  punktülmasilla lisakonduktants,  $W/(m \cdot K)$ ;  
 $n_p$  punktülmasildade arv välispiirdes;  
 $\rho_a$  õhu tihedus,  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ;

- $c_a$  õhu erisoojus, 1,005 kJ/kg;  
 $V_{inf}$  infiltratsiooni õhuhulk, m<sup>3</sup>/s.

Infiltratsiooni õhuhulk arvutatakse valemiga (22): [38]

$$V_{inf} = \frac{q_{50} \times A}{3600 \times x}, \frac{m^3}{s} \quad (22)$$

kus:

- $q_{50}$  hoone välispiirete keskmine õhulekkearvu baasväärtus, m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>);  
 $A$  välispiirete s.h. pörandate pindala, m<sup>2</sup>;  
 $x$  tegur, mis ühekorruselistel hoonetel 35, kahekorruselistel 24, kolme- ja enama-korruselistel 20.

Tegur  $x$  määratleb infiltratsiooni õhuvooluhulga arvutamisel hoonete õhulekkearvu baasväärtused  $q_{50}$  välispiirete ruutmeetri kohta järgmiselt: [38]

**Tabel 3.2.** Hoone õhulekkearvu baasväärtused välispiirete ruutmeetri kohta [38]

Kasutusotstarve	Õhulekkearvu baasväärtus m <sup>3</sup> /(h·m <sup>2</sup> )	
	Uus hoone, oluline rekonstrueerimine	Rekonstrueerimine, olemasolev hoone
Väikeelamu	6	9
Muud hooned	3	6

### Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta

Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta leitakse valemiga (23): [39]

$$\frac{H_e}{A}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (23)$$

kus:

- $H_e$  välispiirete summaarne soojuserikadu, W/K;  
 $A$  köetava pinna pindala, m<sup>2</sup>.

### Soojuskaod läbi piirete tingituna piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist

Soojuskaod läbi piirete tingituna piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist leitakse valemiga (24): [39]

$$\frac{H_e \times \text{kraadpäevad} \times 24}{A}, \frac{kWh}{m^2 \cdot a} \quad (24)$$

kus:

- $H_e$  välispiirete summaarne soojuserikadu, W/K;  
kraadpäevade arv;
- 24 ööpäeva pikkus, h;
- A köetava pinna pindala, m<sup>2</sup>.

Soojuskaod läbi piirete tingituna soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist moodustavad ühe komponendi energiatõhususarvu (ETA) koosseisust.

Soojuserikao leidmisel kasutatakse Vantaa piirkonna baasaasta kraadpäevade arvu, mis pärineb Soome Meteoroloogiainstituudi kodulehelt. [40]

### 3.4. Välispiirde kondenseerumise riski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga

Veeauruga seonduvalt on oluline hoone välispiirde (sein, lagi, põrand) selline ehitus, mis ei lase tekkida kondensveel. Kui seda tekib lubatud kogus, peab see saama välja kuivada. [33]

Difusioonitakistuskonstant  $\mu$  iseloomustab läbi seinamaterjali toimuvat difusiooni. See näitaja annab teada, mitu korda on materjali difusioonitakistus suurem kui sama paksu seisva õhu (või mineraalvilla) oma. See dimensionita konstant annab teavet materjali omadustest, kuid selle kaudu ei ole võimalik hinnata sellest materjalist tehtud seinakihi aurutakistust  $S_d$ , mis annab osalise ettekujutuse kogu seina difusioonsest käitumisest. [33]

Seinakihi aurutakistuse (difuusne veeaurutakistus) leidmiseks on vaja materjali difusioonitakistuskonstant korrutada selle materjalikihi paksusega. Tulemus on seisva õhu (või mineraalvilla) kihi paksus meetrites  $S_d$ , valem (25), millel on samasugune difusioonitakistus kui vaadeldaval materjalil: [33]

$$S_d = \mu \cdot s, m \quad (25)$$

kus:

- $\mu$  vaadeldava ehitusmaterjali difusioonitakistuskonstant;
- $s$  materjalikihi paksus, m.

Seina konstrueerimisel kehtib järgnev rusikareegel: seinakihtide aurutakistused peavad seest väljapoole vähenema. See tähendab, et väljaspool oleva kihi aurutakistus ei tohi olla sisemise omast suurem. Sellest rusikareeglist kinnipidamisel ei oma tähtsust, kui suur on seinamaarne aurutakistus. Kogu seinaura utakistus, valem (26), on üksikute kihtide aurutakistuste summa: [33]

$$S_d = S_{d1} + S_{d2} + S_{d3} + \dots + S_{dN} \quad (26)$$

Veeauru osarõhk (partisaalrõhk) ruumis arvutatakse vastavalt valemile (27): [33]

$$P = P_s \cdot \varphi \quad (27)$$

kus:

- $P_s$  küllastunud aururõhk, Pa;
- $\varphi$  relatiivne õhuniiskus, %.

Küllastunud aururõhk on maksimaalne võimalik õhus sisalduva veeauru rõhk antud temperatuuril. Relatiivne niiskus on õhus sisalduva veeauru koguse suhe veeauru küllastuskogusesse või vastavalt veeauru osarõhu suhe küllastusrõhuse. [33]

Materjalikihi veeauru difusioonitakistus vastavalt valemile (28): [33]

$$\frac{1}{\Delta} = \mu \cdot s \cdot \frac{1}{\delta_L}, \frac{m^2 hPa}{kg} \quad (28)$$

kus:

- $\mu$  difusioonitakistuskonstant;
- $s$  ehitusmaterjali kihipaksus, m;
- $\delta_L$  õhu aurujuhtivusväärtus, kg/mhPa.

$\delta_L$  on seotud ümbritseva õhu temperatuuriga, aga antud arvutustes võib võtta kui konstanti: [33]

$$\delta_L \approx 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mhPa.}$$

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinu puhul tuleneb vastavalt valemile (29): [33]

$$\frac{1}{\Delta} = \sum(\mu_n \cdot s_n) \cdot 1,5 \cdot 10^6, \frac{m^2 h Pa}{kg} \quad (29)$$

kus:

$\mu_n \cdot s_n$  difusioonitakistuskonstandi ja seinakihi aurutakistuse summa.

Veeauru difusioonivoog  $i$  tuleneb partsiaalrõhkudest järgnevalt vastavalt valemile (30): [33]

$$i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta}, \frac{kg}{m^2 h} \quad (30)$$

kus:

$p_i$  sisemine partsiaalrõhk, Pa;

$p_a$  välimine partsiaalrõhk, Pa;

$1/\Delta$  seinu veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinu puhul,  $m^2 h Pa/kg$ .

Difusiooni arvutuse eesmärk on kindlaks teha, kas difusiooni tõttu seinas tekib kondensvett või mitte. Kondensvee tekkimisel ei tohi kondensvesi kahjustada seinakonstruktsioone ja soojustusmaterjale. Selle tingimuse täitmiseks tuleb jälgida, et (vastavalt DIN 4108-3): [33]

- kondenseerumisperioodil tekkinud kondensvesi peab kuivamisperioodil välja kuivama;
- konstruktsioon ei tohi kondensvee tõttu kahjustuda (seened, korrosioon);
- kondensvee kogus ei tohi ületada  $1,0 \text{ kg/m}^2$ ;
- kapillaarselt mitteimavate ehitusainete puhul on kondensvee koguse piirang  $0,5 \text{ kg/m}^2$ ;
- puidu puhul on piiranguks niiskusesisaldus 5%, puidust ehitusmaterjalide puhul 3%.

Raamtingimused, mis tuleks arvesse võtta arvutuste tegemiseks on järgmised (DIN 4108-3 järgi): [33]

- kondenseerumisperioodil ( $t_T$ ):
  1. väliskliima  $-10^\circ\text{C}$ , 80% relatiivne niiskus;
  2. sisekliima  $+20^\circ\text{C}$ , 50% relatiivne niiskus;
  3. perioodi pikkus 1440 h (60 päeva). Eesti tingimustes võiks periood olla pikem – 2160 h (90 päeva).



- aurumisperioodil ( $t_v$ ):
  1. seinad ja mitte vastu katust olevate lagede puhul:
    - a. väliskliima  $+12^\circ\text{C}$ , 70% relatiivne niiskus;
    - b. sisekliima  $+12^\circ\text{C}$ , 70% relatiivne niiskus;
    - c. kliima kondenseerumiskohas  $+12^\circ\text{C}$ , 100% relatiivne niiskus;
    - d. perioodi pikkus 2160 h (90 päeva).
  2. laed vastu katust:
    - a. väliskliima  $+12^\circ\text{C}$ , 70% relatiivne niiskus;
    - b. katusepinna temperatuur  $+20^\circ\text{C}$ ;
    - c. sisekliima  $+12^\circ\text{C}$ , 70% relatiivne niiskus;
    - d. kliima kondenseerumiskohas temperatuur vastavalt temperatuurikõveralale, 100% niiskus;
    - e. perioodi pikkus 2160 h (90 päeva).

Kondensvee kogus  $W_T$  on arvutatav vastavalt valemile (31): [33]

$$W_T = t_T \cdot (i_i - i_a), \frac{kg}{m^2} \quad (31)$$

kus:

- $t_T$  kondenseerumisperiood, h;
- $i_i$  difusioonivoo tihedus seest kondenseerumispiirkonda,  $kg/(m^2h)$ ;
- $i_a$  difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja,  $kg/(m^2h)$ .

Difusioonivoo tihedus seest kondenseerumispiirkonda leitakse vastavalt valemile (32): [33]

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{1/\Delta_i}, \frac{kg}{m^2h} \quad (32)$$

kus:

- $p_i$  sisemine partsiaalrõhk, Pa;
- $p_{sw}$  kondenseerumisele vastav rõhk, Pa;
- $1/\Delta_i$  seinavaeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinapuhul,  $m^2hPa/kg$ .

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja leitakse vastavalt valemile (33): [33]

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a}, \frac{kg}{m^2h} \quad (33)$$

kus:

$p_{sw}$  kondenseerumispunktile vastav rõhk, Pa;

$p_a$  väline partsiaالرّhk, Pa;

$1/\Delta_a$  seinä veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinä puhul,  $m^2hPa/kg$ .

Kuivava vee kogus arvutatakse valemiga (34): [33]

$$W_w = t_v(i_i + i_a), \frac{kg}{m^2} \quad (34)$$

kus:

$t_v$  kuivamisperiood, h;

$i_i$  difusioonivoo tihedus seest kondenseerumispiirkonda,  $kg/(m^2h)$ ;

$i_a$  difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja,  $kg/(m^2h)$ .

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast ruumi sisse leitakse vastavalt valemile (35): [33]

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i}, \frac{kg}{m^2h} \quad (35)$$

kus:

$p_{sw}$  kondenseerumispunktile vastav rõhk, Pa;

$p_i$  sisemine partsiaالرّhk, Pa;

$1/\Delta_i$  seinä veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinä puhul,  $m^2hPa/kg$ .

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja leitakse vastavalt valemile (36): [33]

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a}, \frac{kg}{m^2h} \quad (36)$$

kus:

$p_{sw}$  kondenseerumispunktile vastav rõhk, Pa;

$p_a$  väline partsiaالرّhk, Pa;

$1/\Delta_a$  seinä veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinä puhul,  $m^2hPa/kg$ .

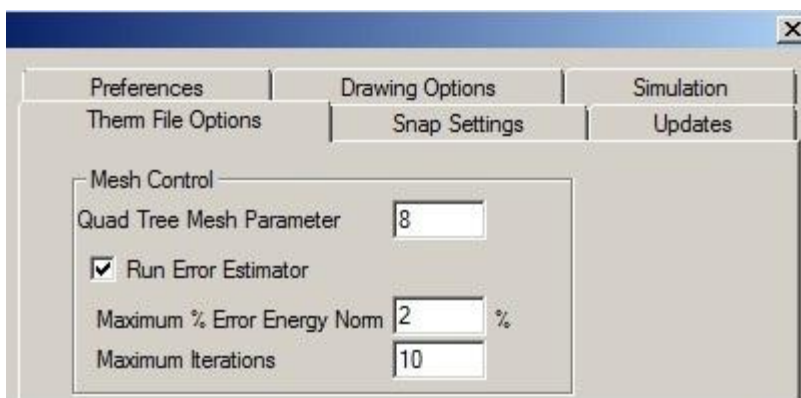
Juhul kui kondenseerumine on toimunud mitmes tasandis või kihis tervikuna, tuleb arvutada kõik kihid eraldi. [33]

Kondenseerunud vee kogus on aktsepteeritav juhul kui  $W_T < 1,0 \text{ kg/m}^2$  (või  $0,5 \text{ kg/m}^2$  kapillaarselt mitteimavate ehitusmaterjalide puhul) ja  $W_V > W_T$ . [33]

### 3.5. Programm Therm 7.1

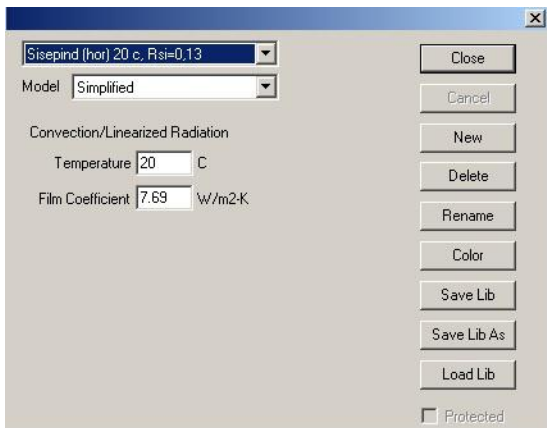
Therm on Microsoft Windowsil põhinev arvutiprogramm, mis on välja töötatud Lawrence Berkeley Rahvuslikus Laboratooriumis, mida kasutatakse ehitusmaterjalide tootmisel, haridusasutustes, inseneride ja arhitektide poolt, kes on huvitatud materjalide soojusjuhtivusest. Thermi kasutades saab modelleerida kahemõõtmelisi soojusjuhtivuse tegureid erinevate hoonete komponentide juures nagu aknad, ukSED, seinad, vundamendid, katused ja kõik seadmed, mille juures külmasillad võivad olla probleemiks. Thermi soojusjuhtivuse analüüs võimaldab hinnata toote energiatõhusust ja temperatuuri erinevusi, mis võivad otseselt viidata probleemidele, mis on seotud kondensvee, niiskuse ja struktuurse terviklikkusega. [34]

Enne arvutusmodelite koostamist on vaja määrata õiged simulatsioonisätted. See tagab programmi vigadeta töö ning täpse lõpliku arvutustulemuse. Programmi seadistusmenüüst valida *Options* ja *Preferences* ja seejärel sektsioon nimega *Therm File Options*. Liikudes ülevalt allapoole peab lahtrid täitma numbritega 8, 2 ja 10. [35]



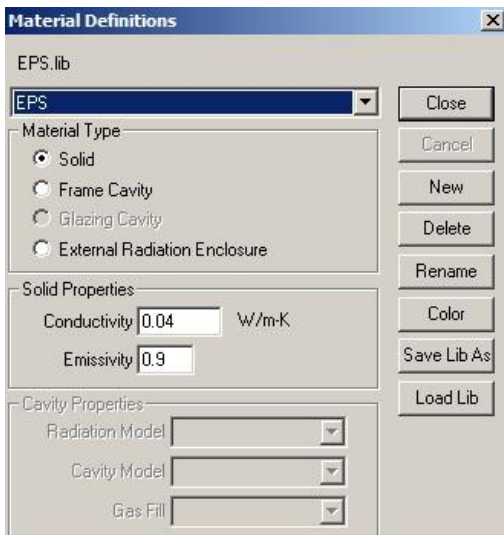
Joonis 3.2. *Therm File Options*

Therm tarkvaras peab määrama keskkonna piirtingimuste teegid. Selle jaoks on vaja lisada kirjeid ja selleks tuleb toimida järgnevalt. Avada keskkonna piirtingimuste seadistusmenüü *Libraries* ja seejärel *Boundary Condition Library*. Uue kirje lisamiseks vajutada nupule *New*. Avanev aknas saab sisestada soovitud nime ning lahtrid täita keskkonna temperatuuri ja pinna juhtivuse kohta. Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et pinnatakistuse puhul on tegemist pöördväärtusega (välispinna puhul  $1/0,04 = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja sisepinna puhul  $1/0,13 = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Nupuga *Color* on võimalik määrata pinda tähistavale joonele värvus. Kuigi külmasilla arväärtus ei sõltu keskkonna piirpinna temperatuuri seadistusest ning need ei ole standardiseeritud, kasutatakse arvutustes üldjuhul sisepinna temperatuuri  $+20^\circ\text{C}$  ja välispinna temperatuuri  $-10^\circ\text{C}$ . [35]



**Joonis 3.3.** *Boundary Condition Library*

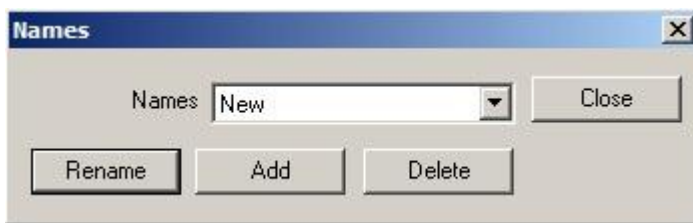
Materjalide lisamine ja materjalide teegi lisamine toimib analoogselt piirtingimuste lisamisele.



**Joonis 3.4.** *Material Definitions*

Materjalide seadistusmenüüst valida *Libraries* ja seejärel *Material Library*. Uut materjali on võimalik lisada vajutades nuppu *New*. Lahtrisse *Conductivity* kirjutada soovitud materjali deklareeritud soojusjuhtivus ja lahtrisse *Emissivity* materjali emissiooniteguri väärtus, mis peab olema 0,9. [35]

Therm väljastab arvutustulemusi ääritingimuste pikkusele taandatud niiöelda ekvivalentse soojajuhtivustegurina (U-arv) ja alates 7.1 versioonist ka soojusvoolu ja –voona. Huvipakkuvale pinnale on tulemuste saamiseks vajalik määrata U-arvu lipikud (*UFactor name*). Enne simulatsiooniprotsessi käivitamist määratakse, milliste keskkonna ääritingimuste alusel Therm U-arvu arvutab ning valitakse vastav U-arvu lipik. U-arvu lipiku valikust ei sõltu arvutustulemus, kuid selguse mõttes on soovituslik defineerida kaks U-arvu lipikut vastavalt sellele, kas arvutatakse välis- või sisemõõtmete järgi. U-arvu lipiku defineerimiseks avage vastav menüü *Libraries* ja *UFactor Names* ning seejärel vajutada nuppu *Add*. Avanenud aknas saate seada leitavate U-arvude lipikud. [35]



**Joonis 3.5.** *U Factor Names*

Kui piirdetarind on joonistatud ning välis- ja sisepind on määratud, siis järgneb arvutus, mis näitab vaikumisi piirdetarindi samatemperatuurijooni ja U-arvu väärtusi. Selleks tuleb valida menüüst *Calculation* ja selle rippmenüüst valik *Calculation*. Kui valida samast rippmenüüst valik *Show U-factors*, siis näeb joonistatud piirdetarindi U-arvu, pikkust, soojusvoolu ja –voogu.

### **3.6. Joonkülmasildade arvutus**

Külmasilla olemasolu tekitab kolme- või kahemõõtmelisi soojusvoogusid, mille andmeid on võimalik täpselt määrata standardis EVS-EN ISO 10211:2008 kirjeldatud üksikasjalike numbriliste arvutusmeetodite abil. [3]

Joonkülmasilla lisasoojusjuhtivus leitakse vastavalt valemile (37): [3]

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j, \frac{W}{m \cdot K} \quad (37)$$

kus:

- $L_{2D}$  on külmasilla soojuse erikadu, mis on leitud kahte vaadeldavat keskkonda eraldava 2-D arvutuse põhjal,  $W/(m \cdot K)$ ;
- $U_j$  on kahte vaadeldavat keskkonda eraldava 1-D komponendi soojusläbivus,  $j$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $l_j$  on pikkus, mille ulatuses kohaldatakse väärtust  $U_j$ , m.

Joonkülmasilla lisasoojusjuhtivuse väärtuste määramisel on vaja teada, millist mõõdet (nt sise- või välimist) kasutatakse, kuna eri tüüpi külmasildade puhul sõltuvad sellest valikust lisasoojusjuhtivuse väärtused. [3]

Antud töös arvestatakse külmasildasid hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika järgi, mis on kinnitatud Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi määrusega. Välispiirdeosa külmasildade soojusläbivus  $\Delta\Psi$  leitakse valemiga (38): [38]

$$\Delta\Psi = \sum \Psi_j \cdot l_j + \sum \Psi_p \cdot l_p, \frac{W}{K} \quad (38)$$

kus:

- $\Psi_j$  joonkülmasilla soojusläbivus,  $W/(m \cdot K)$ ;
- $\Psi_p$  punktkülmasilla soojusläbivus,  $W/(m \cdot K)$ ;
- $l_j$  joonkülmasilla pikkus, m;
- $l_p$  samasuguste punktkülmasildade arv välispiirdes.

Antud töös on joonkülmasilla lisasoojusjuhtivuste määramisel kasutatud programmi Therm 7.1 ja lähtutud on joonestatud mudelite sisemistest mõõtmetest.

### 3.7. Termopildistamine

Termopildistamiseks kasutati termokaamerat Flir E6. Antud aparaat töötab temperatuurivahemikus  $-15^{\circ}\text{C}\dots+50^{\circ}\text{C}$ , fikseerib objektide temperatuuri vahemikus  $-20^{\circ}\text{C}\dots+250^{\circ}\text{C}$  ning selle mõõtmistäpsus on  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  või  $\pm 2\%$  lugemist kui keskkonna ümbritsev temperatuur on vahemikus  $+10^{\circ}\text{C}\dots+35^{\circ}\text{C}$  ning objekti temperatuur on üle  $0^{\circ}\text{C}$ . [36]



**Joonis 3.6.** Termokaamera Flir E6

Termograferimisel on oluline, et sise- ja välistemperatuuride vahe oleks minimaalselt  $15^{\circ}\text{C}$  ning samuti ei ole soovitatav tööd teostada vihmaste või päikesepaisteliste ilmadega, sest need mõjutavad tulemust. [25]

### 3.8. Temperatuuriindeksite arvutus

Külmasillast põhjustatud sisepinna madalama temperatuuri kriitilisuse taseme määrab sisepinna temperatuuri, välistemperatuuri ja sisetemperatuuride omavaheline suhe ehk temperatuuriindeks. [37]

Temperatuuriindeks  $f_{Rsi}$  leitakse valemiga (39): [37]

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} = \frac{R_T - R_{Si}}{R_T} \quad (39)$$

kus:

- $f_{Rsi}$     temperatuuriindeks;
- $t_{si}$     sisepinnatemperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_i$     siseõhu temperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_e$     välisõhu temperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$R_T$  piirdetarindi kogusoojustakistus,  $m^2 \cdot K/W$ ;

$R_{si}$  piirdetarindi sisepinna soojustakistus,  $m^2 \cdot K/W$ .

Vajaminevad temperatuurid saab termograafilise mõõdistamise käigus mõõta või temperatuurivälja arvutusega arvutada ning seejärel saab temperatuuriindeksi abil hinnata külmasilla kriitilisust. [37]

**Tabel 3.3.** Niiskustehniliselt turvalised temperatuuriindeksi piirväärtused Eestis [37]

Niiskukoormus	Temperatuuriindeksi $f_{R_{si}}$ piirsuurus (mõõdetud või arvatud tulemus peab olema piirsuurusest suurem)	
	Hallituse vältimine	Kondenseerumise vältimine
Niiskuslisa talvel $+6 \text{ g/m}^3$ ja suvel $+2,5 \text{ g/m}^3$ (suure asustusega ja halva ventilatsiooniga elamud)	0,8	0,7
Niiskuslisa talvel $+4 \text{ g/m}^3$ ja suvel $+1,5 \text{ g/m}^3$ (väikese asustustihedusega ja hea ventilatsiooniga elamud)	0,65	0,55



## 4. TULEMUSED JA ARUTELU

### 4.1. Hoone välispiirete soojusjuhtivuse arvutus

Arvutustes kasutatud materjalide soojuseri juhtivused on võetud tabelist 3.1. ja ehitismaterjalide paksused piirete kirjeldustest. Õhukeste kihtide (aurutõkkepaber, pingupapp, tapeet) soojuseri juhtivusi pole arvestatud.

**Välissein 1** (viimistluseks pingupapp ja tapeet, mis pannakse vineeri peale)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,07}{0,039} + \frac{0,15}{0,13} + 0,13 = 3,28 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,07}{0,13} + \frac{0,15}{0,13} + 0,13 = 2,02 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{350 + 50}{\frac{350}{3,28} + \frac{50}{2,02}} = 3,04 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{70 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{350 + 50}{\frac{350}{\left(\frac{0,07}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,07}{0,13}\right)}} = 1,39 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + 1,39 + \frac{0,15}{0,13} + 0,13 = 2,87 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{3,04 + 2,87}{2} = 2,96 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{3,04 - 2,87}{2 \times 2,96} \times 100\% = 2,9\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{2,96} = 0,34 \frac{W}{m^2 \times K}$$

70 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 70 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{1,39}{2,96}\right)^2 = 0,002 \frac{W}{m^2 \times K}$$

70 mm paksuse soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 70 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{1,39}{2,96}\right)^2 = 0,001 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,34 + 0,002 + 0,001 = 0,343 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Välisseinte 2, 3, 4 soojusjuhtivuse arvutused on lisas 2 (vt. lk. 99). Välisõhu kohal olevate põrandate soojusjuhtivuse arvutused on lisas 3 (vt. lk. 103). Pööningu põrandate soojusjuhtivuse arvutused on lisas 4 (vt. lk. 108). Katuslae soojusjuhtivuse arvutus on lisas 5 (vt. lk. 111). Akende soojusjuhtivuse arvutused on lisas 6 (vt. lk. 113).

**Tabel 4.1.** Leitud väärtuste võrdlus Eestis ja Soomes kehtivate U-arvudega

Välispiire	U-arv W/(m <sup>2</sup> ·K)	Eesti ener- giatõhusus miini- mum nõuded	Soome ener- giatõhusus miini- mum nõuded
Välissein 1	0,343	0,15 - 0,25	≤ 0,17 või ≤ 0,6 kui ehitise kasu- tusotstarve muutub
Välissein 2	0,333		
Välissein 3	0,343		
Välissein 4	0,18		
Aknad	1,19 - 1,41	0,6 - 1,1	≤ 1,0
Uksed	1,0 <sup>1)</sup>	0,6 - 1,1	≤ 1,0
Pööningu põrand 1	0,093	0,1 - 0,2	Toimida vastavalt võimalustele
Pööningu põrand 2	0,122		
Põrand välisõhu kohal 1	0,121	0,1 - 0,2	Toimida vastavalt võimalustele
Põrand välisõhu kohal 2	0,112		
Põrand välisõhu kohal 3	0,112		
Katuslagi	0,12	0,1 - 0,2	≤ 0,09 või ≤ 0,6 kui ehitise kasu- tusotstarve muutub

1) Sydanpuu.

Kättesaadav: <http://www.sydanpuu.com/> (27.05.2014)

Välisseinte puhul on soojusjuhtivus märgatavalt suurem, kui seda on mõlema riigi kehtivate standardite järgi. See on tingitud faktist, et hoone on soojustatud seestpoolt ja sisemise soojuse puhul sai määravaks villakihi paksus, mille juures tekib kondensvesi, aga see kuivab ka välja. Akende puhul on leitud suurused suuremad, kui seda nõuavad energiatõhusus miinimumnõuded. Uste väärtused jäävad nõuete piiridesse, kuna uste puhul polnud piisavalt andmeid, et arvutada nende soojusjuhtivusi ja lähtunud on tootja andmetest. Põranda konstruktsiooni puhul pole Soomes ettenähtud kindlat suurust, vaid peab toimima vastavalt võimalustele. Leitud suurused jäävad Eestis kehtivate nõuete piiresse. Katuslae puhul jääb leitud väärtus Eestis kehtivate normide piiresse, kuid Soomes kehtivate nõuete kohaselt võiks konstruktsiooni soojusjuhtivus olla parem.

#### 4.2. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga

Arvutustes kasutatud materjalide difusioonitakistuskonstandid ja aurutakistused on võetud tabelist 3.1. ja ehitusmaterjalide paksused piirete kirjeldustest.

**Välissein 1** (viimistluseks pingupapp ja tapeet, mis pannakse vineeri peale)

- Kondenseerumine

Kliimatingimused: sees  $20^{\circ}\text{C}$  ja  $\text{RH} = 50\%$   $\rightarrow p_i = 0,5 \cdot 2337 = 1,169 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

väljas  $-10^{\circ}\text{C}$  ja  $\text{RH} = 80\%$   $\rightarrow p_a = 0,5 \cdot 259,7 = 207,76 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

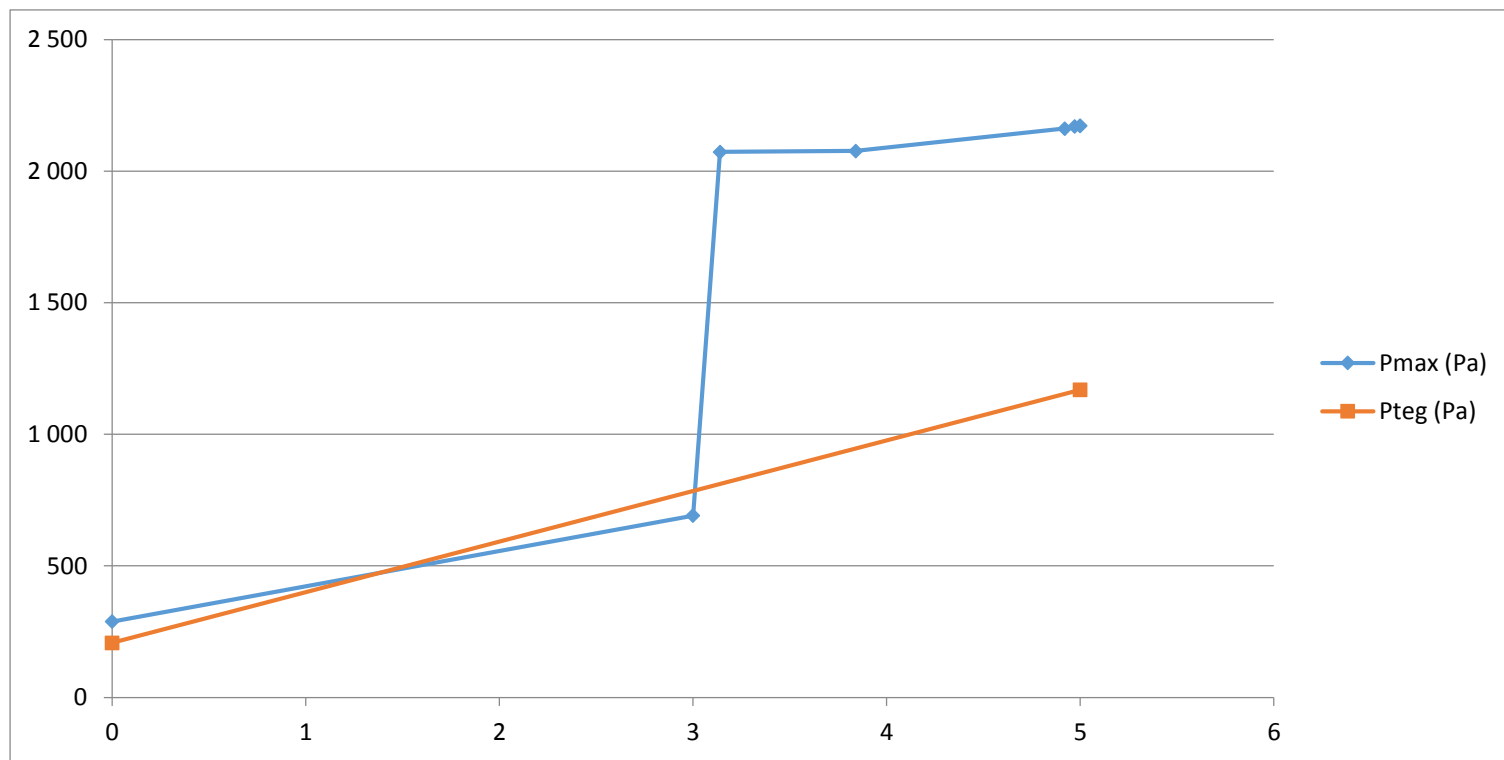
kondenseerumisperiood 90 päeva = 2160 h

Kondenseerumispunkti väärtus vastavalt graafikust ja tabelist  $p_{sw} = 1,70^{\circ}\text{C} = 691 \text{ Pa}$

**Tabel 4.2.** Välisseina kondenseerumise arvutustabel

Tarindi osa	Kihi pak- sus, m	Lambda, $\lambda$	R	%R	$\Delta t$	Välis- tempera- tuur	Sisetem- peratuur	$\mu$	$S_d$	$P_{teg}$ (Pa)	$P_{max}$ (Pa)	$S_d$ summa
						-10	20				260	
Välispind			0,13	3,95	1,19	-10	-8,81			207,9017	289	0
Palk	0,15	0,13	1,15	35,06	10,52	1,70	18,07	välisõhk	20	3	691	3
Tselluvill	0,07	0,039	1,79	54,55	16,36	18,07	18,10	välispind	2	0,14	2 073	3,14
Aurutõkkepa- ber	0,0003	0,1	0,00	0,09	0,03	18,10	18,74	kihtide	—	0,7	2 077	3,84
Vineer	0,012	0,17	0,07	2,15	0,64	18,74	18,80	vahel	90	1,08	2 162	4,92
Pingupapp	0,0007	0,1	0,01	0,21	0,06	18,80	18,81		—	0,052	2 171	4,97
Tapeet	0,00013	0,1	0,00	0,04	0,01	18,81	20,00		—	0,027	2 172	5,00
Sisepind			0,13	3,95	1,19	20,00		sisepind			1169,095	2 338
		R(m2K)/W	3,29	100,00			kontroll	sisepind				
		U W/m2K	0,30					siseõhk		4,999		
											Veeauru osarõhud sees ja väljas	
									2 338	260		
									50	80		
									1169	207,9	961,1932	

19



Joonis 4.1. Välisseina kondenseerumise graafik

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinu puhul, vastavalt valemile (29):

$$(0,027 + 0,052 + 1,08 + 0,7 + 0,14) \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 3,0 \cdot 10^6 \frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg}$$

Difusioonivoo tihedus seest kondenseerumispiirkonda, vastavalt valemile (32):

$$i_i = \frac{1169 - 691}{3,0 \cdot 10^6} = 159,3 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{h \cdot m^2}$$

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinu puhul, vastavalt valemile (29):

$$3 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 4,5 \cdot 10^6 \frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg}$$

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja, vastavalt valemile (33):

$$i_a = \frac{691 - 208}{4,5 \cdot 10^6} = 107,3 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{h \cdot m^2}$$

Kondenseerunud vee kogus, vastavalt valemile (31):

$$W_T = 2160 \cdot (159,3 - 107,3) \cdot 10^{-6} = 0,112 \frac{kg}{m^2}$$

Tingimus kondenseerumisel:

$$W_T = 0,112 \frac{kg}{m^2} < 1,0 \frac{kg}{m^2}$$

- Väljakuivamine

Kliimatingimused: sees 12°C ja RH = 70% →  $p_i = 0,7 \cdot 1402 = 981,4$  Pa  
väljas 12°C ja RH = 70% →  $p_a = 0,7 \cdot 1402 = 981,4$  Pa  
kondenseerumiskohas 12°C ja RH = 100% →  $p_{sw} = 1402$  Pa  
kuivamisperiood 90 päeva = 2160 h

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinu puhul, vastavalt valemile (29):

$$(0,027 + 0,052 + 1,08 + 0,7 + 0,14) \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 3,0 \cdot 10^6 \frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg}$$

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast ruumi, vastavalt valemile (35):

$$i_i = \frac{1402 - 981,4}{3,0 \cdot 10^6} = 140,2 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{h \cdot m^2}$$

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinu puhul, vastavalt valemile (29):

$$3 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 4,5 \cdot 10^6 \frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg}$$

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja, vastavalt valemile (36):

$$i_a = \frac{1402 - 981,4}{4,5 \cdot 10^6} = 93,5 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{h \cdot m^2}$$

Välja kuivava vee kogus, vastavalt valemile (34):

$$W_V = 2160 \cdot (140,2 + 93,5) \cdot 10^{-6} = 0,505 \frac{kg}{m^2}$$

Tingimus välja kuivamisel:

$$W_V = 0,505 \frac{kg}{m^2} > W_T = 0,112 \frac{kg}{m^2}$$

Väljakuivava vee kogus on suurem, kui seda tekib kondenseerumisel ja seega on tingimused rahuldatud.

Kondensvesi tekib kõikide põranda ja välisseinte piirete puhul, välja arvatud välisseina lähenduse puhul, kus lehtvill on paigaldatud karkassipostide vahele. Tekkiv kondensvesi kuivab kõik välja ja seega jääkkondensi ei jää. Välisseina piirete puhul ületab väljakuivava vee kogus tekking kondensvee koguse keskmiselt viiekordselt. Katuslae ja pööningu põranda puhul ei teki kondensvett.



### 4.3. Joonkülmastide arvutus

Külmastide joonsoojusjuhtivused on leitud, vastavalt valemile (37):

#### Välissein-välissein kontaktist tulenev joonsoojusjuhtivus:

$$L_{2D} = 0,3633 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 2D} = 2,074 \text{ m}^1)$$

$$U_{j, 1. \text{ sein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 1. \text{ sein}} = 1,037 \text{ m}^1)$$

$$U_{j, 2. \text{ sein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 2. \text{ sein}} = 1,037 \text{ m}^1)$$

$$\Psi = 0,3633 \cdot 2,074 - (0,3419 \cdot 1,037 + 0,3419 \cdot 1,037) = 0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

<sup>1)</sup> Tulemused on saadud arvutuste käigus programmis THERM 7.1.

#### Välissein-sisesein kontaktist tulenev joonsoojusjuhtivus:

$$L_{2D} = 0,3329 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 2D} = 2,35 \text{ m}^1)$$

$$U_{j, 1. \text{ sein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 1. \text{ sein}} = 1,055 \text{ m}^1)$$

$$U_{j, 2. \text{ sein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 2. \text{ sein}} = 1,055 \text{ m}^1)$$

$$\Psi = 0,3329 \cdot 2,35 - (0,3419 \cdot 1,055 + 0,3419 \cdot 1,055) = 0,06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

<sup>1)</sup> Tulemused on saadud arvutuste käigus programmis THERM 7.1.

#### Välissein-vahelagi kontaktist tulenev joonsoojusjuhtivus:

$$L_{2D} = 0,2338 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 2D} = 2,64 \text{ m}^1)$$

$$U_{j, 1. \text{ sein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 1. \text{ sein}} = 1,105 \text{ m}^1)$$

$$U_{j, 2. \text{ sein}} = 0,1498 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^1)$$

$$l_{j, 2. \text{ sein}} = 1,0 \text{ m}^1)$$

$$\Psi = 0,2338 \cdot 2,64 - (0,3419 \cdot 1,105 + 0,1498 \cdot 1,0) = 0,09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

<sup>1)</sup> Tulemused on saadud arvutuste käigus programmis THERM 7.1.

### Välissein-katuslagi kontaktist tulenev joonsoojusjuhtivus:

$$L_{2D} = 0,1301 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, 2D} = 2,914 \text{ m}^{1)}$$

$$U_{j, \text{välissein}} = 0,1498 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, \text{välissein}} = 1,12 \text{ m}^{1)}$$

$$U_{j, \text{katuslagi}} = 0,123 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, \text{katuslagi}} = 1,79 \text{ m}^{1)}$$

$$\Psi = 0,1301 \cdot 2,914 - (0,1498 \cdot 1,12 + 0,123 \cdot 1,79) = 0,06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

<sup>1)</sup> Tulemused on saadud arvutuste käigus programmis THERM 7.1.

### Välissein-põrand kontaktist tulenev joonsoojusjuhtivus:

$$L_{2D} = 0,183 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, 2D} = 5,402 \text{ m}^{1)}$$

$$U_{j, \text{välissein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, \text{välissein}} = 1,059 \text{ m}^{1)}$$

$$U_{j, \text{põrand}} = 0,137 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, \text{põrand}} = 4,343 \text{ m}^{1)}$$

$$\Psi = 0,183 \cdot 5,402 - (0,3419 \cdot 1,059 + 0,137 \cdot 4,343) = 0,03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

<sup>1)</sup> Tulemused on saadud arvutuste käigus programmis THERM 7.1.

### Akna seinakinnitusest tulenev joonsoojusjuhtivus:

$$L_{2D} = 1,737 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, 2D} = 2,34 \text{ m}^{1)}$$

$$U_{j, \text{välissein}} = 0,3419 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1)}$$

$$l_{j, \text{välissein}} = 1,175 \text{ m}^{1)}$$

$$U_{j, \text{aken}} = 0,92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{2)}$$

$$l_{j, \text{aken}} = 1, \text{ m}^{1)}$$

$$\Psi = 1,737 \cdot 2,34 - (0,3419 \cdot 1,175 + 0,92 \cdot 1,0) = 2,74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

<sup>1)</sup> Tulemused on saadud arvutuste käigus programmis THERM 7.1.

<sup>2)</sup> Väärtus on saadud tootja kodulehelt.

#### 4.4. Joonkülmasildade lisakonduktantside arvutus

Joonkülmasildade lisakonduktantside väärtused on saadud eelnevalt leitud joonsoojusjuhtivuste kaudu vastavalt valemile (37).

##### **Välissein-välissein kontaktist tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,04 \cdot 26,6 = 1,06 \text{ W/K}$$

##### **Välissein-sisesein kontaktist tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,06 \cdot 88,5 = 5,31 \text{ W/K}$$

##### **Välissein-vahelagi kontaktist tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,09 \cdot 88,8 = 7,99 \text{ W/K}$$

##### **Välissein-katuslagi kontaktist tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,06 \cdot 34 = 2,04 \text{ W/K}$$

##### **Välissein-pööninglagi kontaktist tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,4^{1)} \cdot 54,8 = 21,92 \text{ W/K}$$

##### **Välissein-põrand kontaktist tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,03 \cdot 108,4 = 3,25 \text{ W/K}$$

##### **Akende seinakinnitustest tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,4^{1)} \cdot 248,1 = 99,2 \text{ W/K}$$

##### **Uste seinakinnitustest tulenevad külmasillad:**

$$\Delta\Psi = 0,4^{1)} \cdot 56,5 = 22,6 \text{ W/K}$$

<sup>1)</sup> Hoonete energiatõhususe arvutamise meetoodika. Majandus- ja kommunikatsiooni ministri 9. jaanuari 2013. a. määrus nr. 63.

Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118102012001> (19.05.2014)

##### **Geomeetriliste külmasildade lisakonduktantsid kokku:**

$$\Delta\Psi = 1,06 + 5,31 + 7,99 + 2,04 + 21,92 + 3,25 + 99,2 + 22,6 = 163,37 \text{ W/K}$$

#### 4.5. Välispiirete summaarne soojuserikadu

Tabel 4.3. Soojakadusid iseloomustav tabel

Piirdetarindi osa	A m <sup>2</sup>	U W/(m <sup>2</sup> K)	A·U W/K	A·U + l·ψ %
1	2	3	4	5
<b>Seinad</b>	<b>564</b>			
Välissein 1 <sup>1)</sup>	408 <sup>6)</sup>	0,343 <sup>7)</sup>	139,94	24,2
Välissein 2 <sup>1)</sup>	65,3 <sup>6)</sup>	0,333 <sup>7)</sup>	21,74	3,8
Välissein 3 <sup>1)</sup>	29,2 <sup>6)</sup>	0,343 <sup>7)</sup>	10,01	1,7
Välissein 4 <sup>1)</sup>	61,5 <sup>6)</sup>	0,18 <sup>7)</sup>	11,07	1,9
<b>Aknad</b>	<b>86,6</b>			
Aken 1 <sup>2)</sup>	44,3 <sup>6)</sup>	1,31 <sup>7)</sup>	58,03	10,0
Aken 2 <sup>2)</sup>	4,9 <sup>6)</sup>	1,41 <sup>7)</sup>	6,91	1,2
Aken 3 <sup>2)</sup>	18,8 <sup>6)</sup>	1,21 <sup>7)</sup>	22,75	3,9
Aken 4 <sup>2)</sup>	2,0 <sup>6)</sup>	1,26 <sup>7)</sup>	2,52	0,4
Aken 5 <sup>2)</sup>	3,6 <sup>6)</sup>	1,31 <sup>7)</sup>	4,72	0,8
Aken 6 <sup>2)</sup>	4,1 <sup>6)</sup>	1,26 <sup>7)</sup>	5,17	0,9
Aken 7 <sup>2)</sup>	7,6 <sup>6)</sup>	1,19 <sup>7)</sup>	9,04	1,6
Aken 8 <sup>2)</sup>	1,3 <sup>6)</sup>	1,28 <sup>7)</sup>	1,66	0,3
<b>Uksed</b>	<b>23,8</b>			
Uks 1	6,0 <sup>6)</sup>	1,0 <sup>8)</sup>	6,0	1,0
Uks 2	3,5 <sup>6)</sup>	1,0 <sup>8)</sup>	3,5	0,6
Uks 3	8,2 <sup>6)</sup>	1,0 <sup>8)</sup>	8,2	1,4
Uks 4	2,3 <sup>6)</sup>	1,0 <sup>8)</sup>	2,3	0,4
Uks 5	3,8 <sup>6)</sup>	1,0 <sup>8)</sup>	3,8	0,7
<b>Pööningu pörand</b>	<b>294,3</b>			
Pörand 1 <sup>3)</sup>	191,7 <sup>6)</sup>	0,093 <sup>7)</sup>	17,83	3,1
Pörand 2 <sup>3)</sup>	102,6 <sup>6)</sup>	0,122 <sup>7)</sup>	12,52	2,2
<b>Pörand välisõhu kohal</b>	<b>449,6</b>			
Pörand 1 <sup>4)</sup>	134,8 <sup>6)</sup>	0,121 <sup>7)</sup>	16,31	2,8
Pörand 2 <sup>4)</sup>	259,4 <sup>6)</sup>	0,112 <sup>7)</sup>	29,05	5,0

1	2	3	4	5
Põrand 3 <sup>4)</sup>	55,4 <sup>6)</sup>	0,112 <sup>7)</sup>	6,20	1,1
<b>Katuslagi</b> <sup>5)</sup>	<b>123,7</b> <sup>6)</sup>	<b>0,12</b> <sup>7)</sup>	<b>14,84</b>	2,6
$\Sigma A \cdot U$			<b>414,11</b>	<b>71,6</b>
<b>Välispiirete geomeetriliste külmasildade lisakonduktantsid</b>	<b>l</b> <b>m</b>	<b>Ψ</b> <b>W/(mK)</b>	<b>l·ψ</b> <b>W/K</b>	
Välissein-välissein	26,6 <sup>6)</sup>	0,04 <sup>9)</sup>	1,06	0,2
Välissein-sisesein	88,5 <sup>6)</sup>	0,06 <sup>9)</sup>	5,31	0,9
Välissein-vahelagi	88,8 <sup>6)</sup>	0,09 <sup>9)</sup>	7,99	1,4
Välissein-katuslagi	34 <sup>6)</sup>	0,06 <sup>9)</sup>	2,04	0,4
Välissein-pööninglagi	54,8 <sup>6)</sup>	0,4 <sup>10)</sup>	21,92	3,8
Välissein-põrand	108,4 <sup>6)</sup>	0,03 <sup>9)</sup>	3,25	0,6
Akende seinakinnitus	248,1 <sup>6)</sup>	0,4 <sup>10)</sup>	99,2	17,2
Uste seinakinnitus	56,5 <sup>6)</sup>	0,4 <sup>10)</sup>	22,6	3,9
$\Sigma l \cdot \psi$			<b>163,37</b>	<b>28,4</b>
$\Sigma (A \cdot U + l \cdot \psi)$			<b>577,48</b>	<b>100</b>

1) LISA 2

2) LISA 6

3) LISA 4

4) LISA 3

5) LISA 5

6) Pindalad ja pikkused arvatud vastavalt joonistele ja mõõtmistele

7) EVS 908-1:2010 Hoone piirdetarindi soojusjuhtivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire. 2010. Eesti Standardikeskus.

8) Sydanpuu.

Kättesaadav: <http://www.sydanpuu.com/> (27.05.2014)

9) Käesolevas töös leitud külmasilla joonsoojusjuhtivused valemi (35) järgi

10) Hoonete energiatõhususe arutamise meetodika. Majandus- ja kommunikatsiooni ministri 9. jaanuari 2013. a. määrus nr. 63.

Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118102012001> (27.05.2014)

Välispiirete summaarne soojuserikadu leitakse vastavalt valemile (21):

$$H_e = 414,11 + 163,37 + (1,2 \times 1,005 \times 6 \times 0,1071 \times 1542) = 1772,49 \frac{W}{K}$$

Infiltratsiooni õhuhulk leitakse vastavalt valemile (22):

$$V_{inf} = \frac{6 \times 1542}{3600 \times 24} = 0,1071 \frac{m^3}{s}$$

Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta leitakse vastavalt valemile (23):

$$\frac{H_e}{A} = \frac{1772,49}{730,4} = 2,43 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Soojuskaod läbi piirete tingituna piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist leitakse vastavalt valemile (24):

$$\frac{1772,49 \times 4097 \times 24}{730,4} = 239 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$$

Eestis kehtivate energiatõhusus miinimumnõuete järgi peab oluliselt rekonstrueeritava väikeelamu puhul energiatõhususarv olema väiksem kui 210 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Soome kehtivate nõuete järgi peab sama arvu väärtus olema väiksem või võrdne 180 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Mõisahoonel on tegemist suure hoonega, aga võrreldud sai väikeelamute vastavaid väärtusi sellepärast, et mõisahoonel näol on tulevikus tegemist ühepereelamuga ja teistesse olemasolevatesse kategooriatesse mõis samuti ei sobitu.

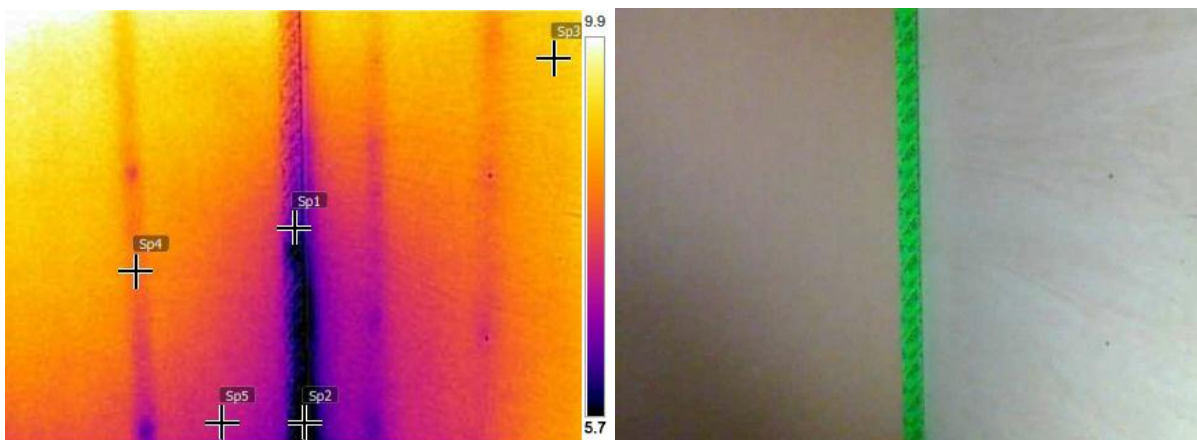
Kuna energiatõhususe arvutustes on kasutatud lihtsustatud meetodit, siis saadud tulemus ei kajasta lõplikku energiatõhususarvu. Arvutuste teel leidud tulemus on üks komponent kogu hoone energiatõhususarvust. Energiaarvutus sisaldab veel ventilatsiooni, küttesüsteemi, jahutussüsteemi ja elektrisüsteemi tarbitavaid energiahulkasid. [16]

#### 4.6. Termograafia mõõtmistulemused

Antud töös käsitletavat termopildid on tehtud Boe mõisahoones 2014. aasta jaanuarikuus. Pildid on tehtud hoones sees kohtades, kus võiksid esineda külmasillad ning neid sõlmesid on käsitletud programmis Therm 7.1. Piltide pealt on selgelt eristatavad kohad, mis on ülejäänud piirdest tumedamad. Temperatuurindeksite arvutamiseks vajalikud sisemised ja väline temperatuur on mõõdetud Vernieri LabQuesti mõõteparaadi kontaktandurit kasutades. Termopiltide tegemise hetkel olid mõisas ehitustööd käimas ja radiaatorid olid ühendatud ainult mõnes toas ning

seetõttu oli sisemine temperatuur madal ja erines ruumide ulatuses. Võrreldes Thermist leitud temperatuuridega seisneb erinevus selles, et Thermi on kantud kõik tarindite kihid, mis peaksid tulema sinna, kui viimistlus on tehtud. Samas termopiltide temperatuur on vastavalt sellele, kui kaugel olid ehitustööd parajasti termografeerimise hetkel.

Joonisel 4.2 esitatud termopilt on tehtud mõisahoone esimesel korrusel, ruumis 003, välisest välisseinte nurgast.



**Joonis 4.2.** Vasakul termopilt välisseina välimisest nurgast ja paremal foto samast kohast.

Tabelis 4.4. esitatud temperatuuriindeksid on leitud vastavalt termopiltidel olevate pinnatemperatuuride järgi, mis paiknevad erinevates kohtades ja vastavalt temperatuuridele, mis on leitud Thermi joonistelt.

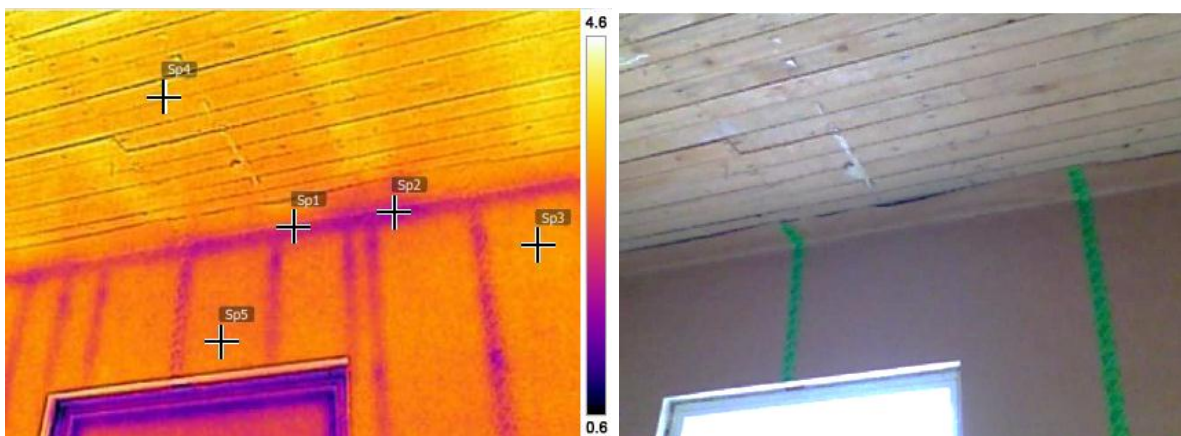
**Tabel 4.4.** Välisseina välimise nurga temperatuuriindeksid, mõõte- ja arvutustulemused

Välistemperatuur	-8°C	Temperatuuriindeksid (termopiltide põhjal)	Temperatuuriindeksid (Thermi põhjal, vt. joonis 4.7.b.)
Sisetemperatuur	10°C		
Sp1	6,3°C	0,79	0,92
Sp2	5,4°C	0,74	
Sp3	8,6°C	0,92	0,94
Sp4	7,6°C	0,87	0,94
Sp5	6,8°C	0,82	0,94

Joonisel 4.2. esitatud termopiltide põhjal näeb, et antud nurgas on külmasild olemas, kuna seinanurgas on termopildi värvus selgelt tumedam kui muudes kohtades. Termokaamera fikseeritud kõige madalam pinnatemperatuur on nurgas 5,4°C. Termopildi tegemise hetkel polnud antud

pildil vasakule seinale kinnitatud vineerplaati ja seega on sellel poolel temperatuurid madalamad. Temperatuuriindeksi kohaselt puuduvad selles nurgas kondenseerumise ja hallituse oht. Välisnurgas tekkinud probleemi vältimiseks oleks pidanud soojustustööd korralikumalt teostama. Tagantjärgi probleemi likvideerimine nõuab palju aega ja lisatööd.

Joonisel 4.3. esitatud termopilt on tehtud mõisahoone esimesel korrusel, ruumis 012, välisseina ja vahelae liitumisest.



**Joonis 4.3.** Vasakul termopilt välisseina ja vahelae liitumisest ning paremal foto samast kohast.

Tabelis 4.5. esitatud temperatuuriindeksid on leitud vastavalt termopiltidel olevate pinnatemperatuuride järgi, mis paiknevad erinevates kohtades ja vastavalt temperatuuridele, mis on leitud Thermi joonistelt.

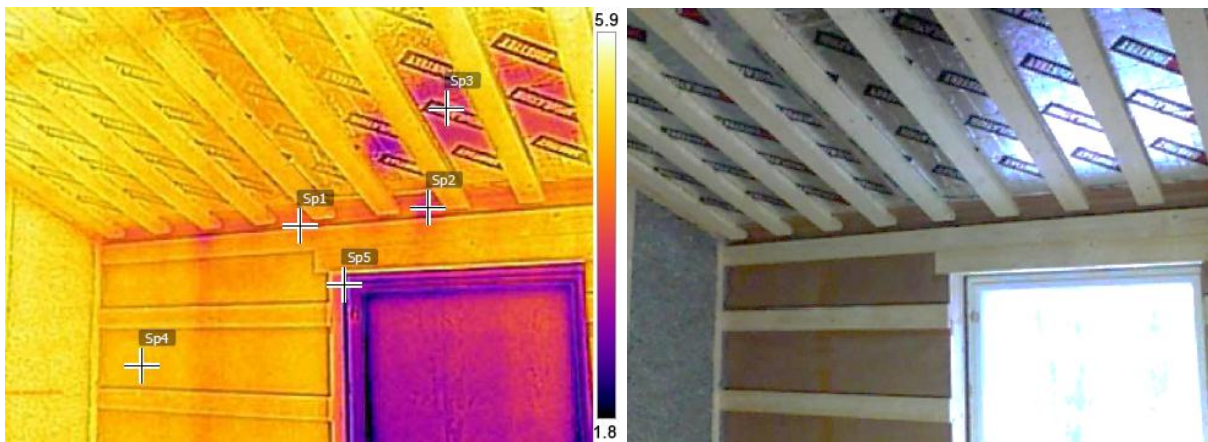
**Tabel 4.5.** Välisseina ja vahelae liitumispunkti temperatuuriindeksid, mõõte- ja arvutustulemused

Välistemperatuur	-8°C	Temperatuuriindeksid (termopiltide põhjal)	Temperatuuriindeksid (Thermi põhjal, vt. joonis 4.8.b.)
Sisetemperatuur	5°C		
Sp1	2,3°C	0,79	0,91
Sp2	1,9°C	0,76	0,91
Sp3	3,1°C	0,85	0,95
Sp4	3,2°C	0,86	1,0
Sp5	2,9°C	0,84	0,95



Joonisel 4.3. esitatud termopiltide pinnatemperatuuride juures peab arvestama sellega, et vahelagi ega välissein alates vahelae laudisest kuni teise korruse välisseina alumise vööni polnud soojustatud. Sellest tingitult on välisseina ja vahelae ristumisel tekkivad temperatuurid madalamad. Mõõtmiste kohaselt on kõige madalam temperatuur lakke kinnitatud seinakarkassi nurgas, kus see jääb 1,9°C juurde. Seina ja lae pinnal näitavad mõõtmistulemused ühtlast temperatuuri. Temperatuuriindeksi arvutuse kohaselt on selles nurgas nii kondenseerumine kui ka hallituse tekkimine välditud. Head tulemust pole saadud seetõttu, et soojustustööd on halvasti teostatud.

Joonisel 4.4. esitatud termopilt on tehtud mõisahoone teisel korrusel, ruumis 205, välisseina ja katuslae liitumisest.



**Joonis 4.4.** Vasakul termopilt välisseina ja katuslae liitumisest ning paremal foto samast kohast.

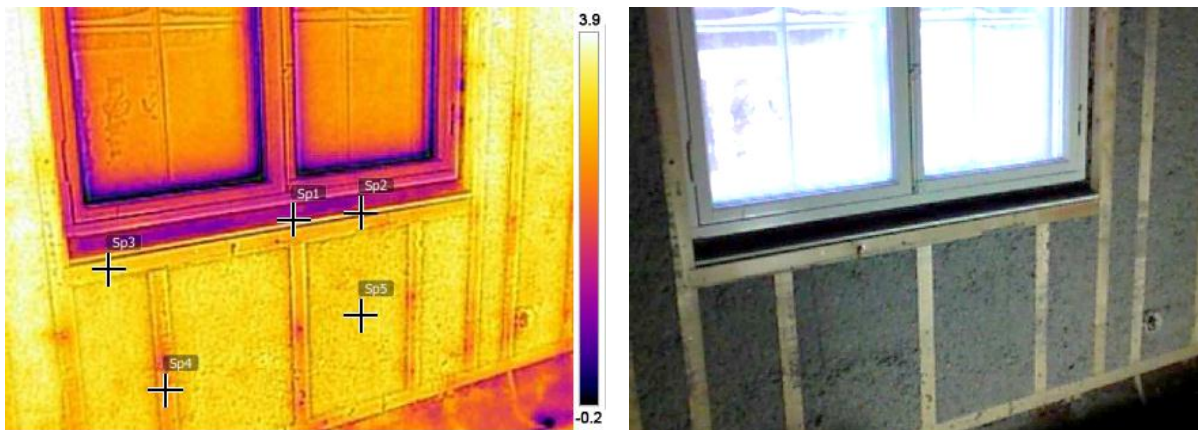
Tabelis 4.6. esitatud temperatuuriindeksid on leitud vastavalt termopiltidel olevate pinnatemperatuuride järgi, mis paiknevad erinevates kohtades ja vastavalt temperatuuridele, mis on leitud Thermi joonistelt.

**Tabel 4.6.** Välisseina ja katuslae liitumispunkti temperatuuriindeksid, mõõte- ja arvutustulemused

Välistemperatuur	-8°C	Temperatuuriindeksid (termopiltide põhjal)	Temperatuuriindeksid (Thermi põhjal, vt. joonis 4.9.b.)
Sisetemperatuur	6°C		
Sp1	3,8°C	0,84	0,96
Sp2	3,0°C	0,79	0,96
Sp3	3,4°C	0,81	0,99
Sp4	4,6°C	0,9	0,99
Sp5	2,0°C	0,71	

Joonisel 4.4. esitatud termopiltidel esineb mõningaid tumedamaid laike. Termopiltidel fikseeritud temperatuurid jäävad samasse suurusjärku. Tume ala katuslael on tingitud aknaklaasi peegeldusest ja sealt tulevast jahedamast temperatuurist. Kõige kõrgem temperatuur on välisseinal, 4,6°C, ja kõige madalam on temperatuur akna servas, 2,0°C, mis on tingitud sellest, et akende soojustamisel kasutati linatakku. Välisseina ja katuslae ristumisel ei teki hallitust ega kondensi vastavalt termopiltide põhjal teostatud temperatuuriindeksite arvutustele. Antud sõlm on ehituslikult lahendatud hästi.

Joonisel 4.5. esitatud termopilt on tehtud mõisahoonel teisel korrusel, ruumis 201, akna kinnitusest.



**Joonis 4.5.** Vasakul termopilt aknast ja paremal foto samast kohast.

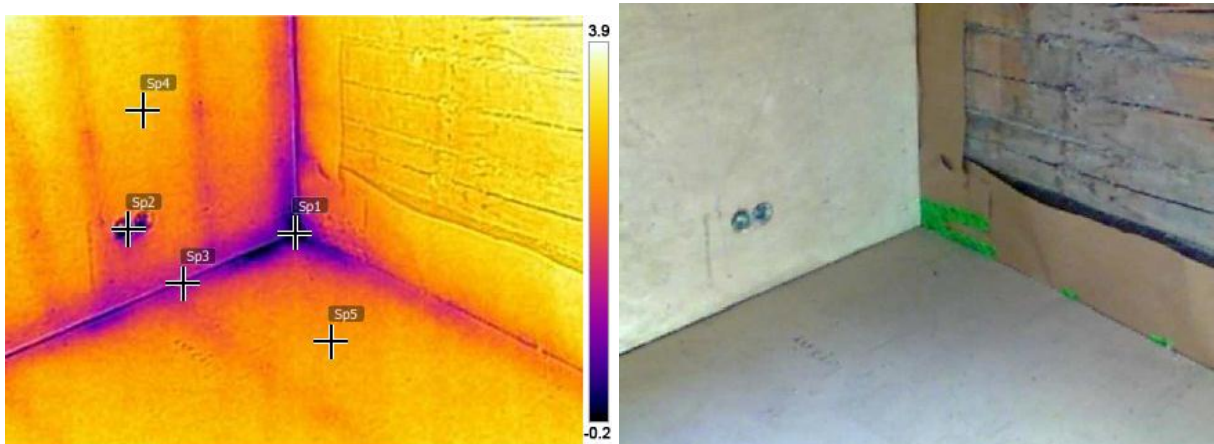
Tabelis 4.7. esitatud temperatuuriindeksid on leitud vastavalt termopiltidel olevate pinnatemperatuuride järgi, mis paiknevad erinevates kohtades ja vastavalt temperatuuridele, mis on leitud Thermi joonistelt.

**Tabel 4.7.** Akna seinakinnituse temperatuuriindeksid, mõõte- ja arvutustulemused

Välistemperatuur	-8°C	Temperatuuriindeksid (termopiltide põhjal)	Temperatuuriindeksid (Thermi põhjal, vt. joonis 4.10.b.)
Sisetemperatuur	6°C		
Sp1	2,1°C	0,72	0,82
Sp2	2,4°C	0,74	0,69
Sp3	3,1°C	0,79	0,91
Sp4	2,5°C	0,75	0,96
Sp5	3,1°C	0,79	0,96

Joonisel 4.5. esitatud termopiltidel peab arvestama sellega, et ehitustööde käigus ei olnud pildistamise hetkel soojustuskihi peale kinnitatud ühtegi materjali. Selle tõttu on temperatuurid madalamad. Piltide kohaselt on kõige madalamad temperatuurid akna ristumisel seinaga, mis on 2°C juures. Madalam temperatuur on tingitud sellest, et akende soojustamisel kasutati linataktu. Ehitusfüüsika seisukohalt oleks akna ja välisseina liitumisel tekkiva külmasilla mõju väiksem, kui aken paikneks välisseina keskel. Seda ei olnud aga võimalik teha, kuna aknad oleks pidanud viima väljapoole ning sellega oleks muudetud mõisahoone välisilmet, mida ei tohtinud teha. Temperatuuriindeksite kohaselt on sellel pildil välditud kondenseerumine ja hallituse teke. Lõpptulemusena kinnitatakse akna alusele prussile aknalaud, mis ulatub akna lengi peale ning sellega peaks sisemine temperatuur akna ja aknalaua ristumisel tekkivas punktis vähesel määral tõusma ning olukord paranema.

Joonisel 4.6. esitatud termopilt on tehtud mõisahoone esimesel korrusel, ruumis 017, välisseina ja põranda liitumisest.



**Joonis 4.6.** Vasakul termopilt välisseina ja põranda liitumisest ning paremal foto samast kohast.

Tabelis 4.8. esitatud temperatuuriindeksid on leitud vastavalt termopiltidel olevate pinnatemperatuuride järgi, mis paiknevad erinevates kohtades ja vastavalt temperatuuridele, mis on leitud Thermi joonistelt.

**Tabel 4.8.** Välisseina ja põranda liitumispunkti temperatuuriindeksid, mõõte- ja arvutustulemused

Välis temperatuur	-8°C	Temperatuuriindeksid (termopiltide põhjal)	Temperatuuriindeksid (Thermi põhjal, vt. joonis 4.11.b.)
Sisetemperatuur	5°C		
Sp1	-0,5°C	0,58	
Sp2	0,5°C	0,65	
Sp3	0,9°C	0,68	0,9
Sp4	2,9°C	0,84	0,94
Sp5	2,6°C	0,82	0,98

Joonisel 4.6. esitatud termopildi järgi võib öelda, et põranda ja seina ristumisel tekkivas nurgas on tegemist külmasillaga. Antud punktis on temperatuur  $-0,5^{\circ}\text{C}$  ja seal on oht nii hallituse kui kondenseerumise tekkele. See on tingitud halvasti sooritatud soojustustööst. Teise punkti puhul on mõõdetud temperatuuri pistikupesa kohalt ja sealgi on temperatuur tunduvalt madalam, kui see peaks olema. Seegi on tingitud puudulikust soojustusmaterjalist ning sealgi on oht kondenseerumisele. Välisseina ja põranda ristumisel mõõdetud punkti puhul on tegemist samade ohtudega. Punktid, kus temperatuuri on mõõdetud seina ja põranda pealt, on ehituslikust seisukohast tehtud hästi. Kui arvestada temperatuuriindeksite tulemusi termopiltide järgi, siis on see nurk ehitatud halvasti.

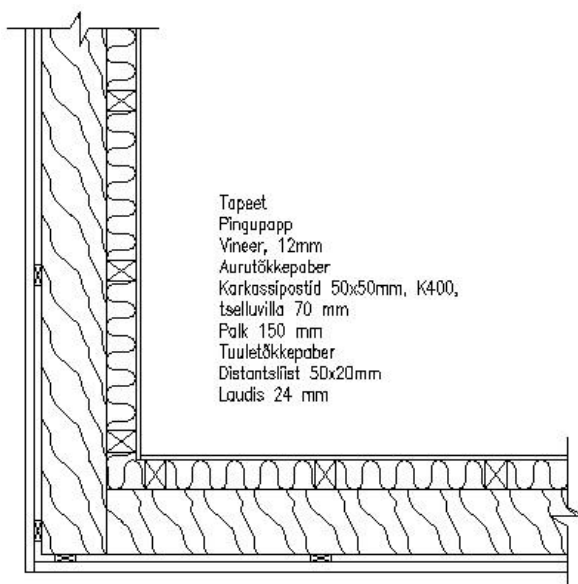
#### **4.7. Külmasilla hindamine temperatuurivälja arvutusega**

Külmasilla temperatuurivälja arvutusega saab hinnata esineva külmasilla kriitilisust ning määrata selle külmasilla punkt- ja joonsoojusjuhtivuse väärtust. [37]

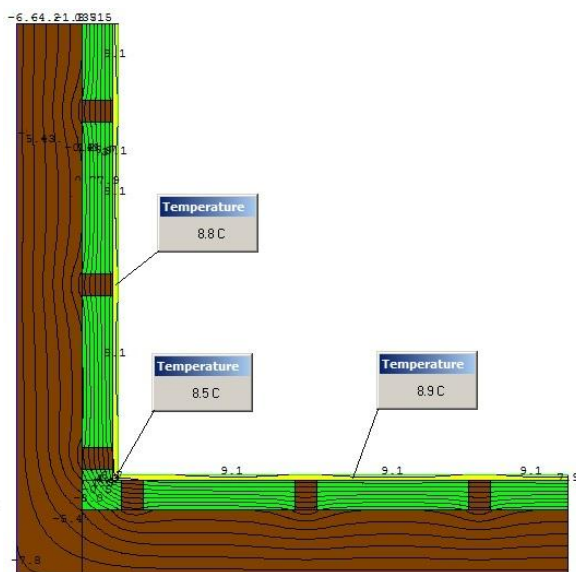
Käesolevas töös on kasutatud temperatuurivälja programmi THERM 7.1. Eelnevalt on arvutustes määratud kõikide pindade temperatuurid, soojustakistused ja soojuseri juhtivused. Objektis kasutatud materjalid on erinevate omadustega ning esinevad sõlmed on lahendatud vastavalt vajadusele. Selle põhjal on Thermis lahendatud liitekoht ning arvutatud soojusvool läbi tarindite liitekohtade. Thermis lahendatud sõlmede puhul on kliimatingimusi muudetud vastavalt termografeerimise hetkel valitsenud välis- ja sisetemperatuuridele ja lisatud on nurgas olevate tem-

peratuuride väärtused, et saaks arvutuste teel leida temperatuuriindeksite väärtused. Thermi joonistel on märgitud kõik kihid, mis peaksid sinna tulema lõpptulemusena, kui siseviimistlus on tehtud.

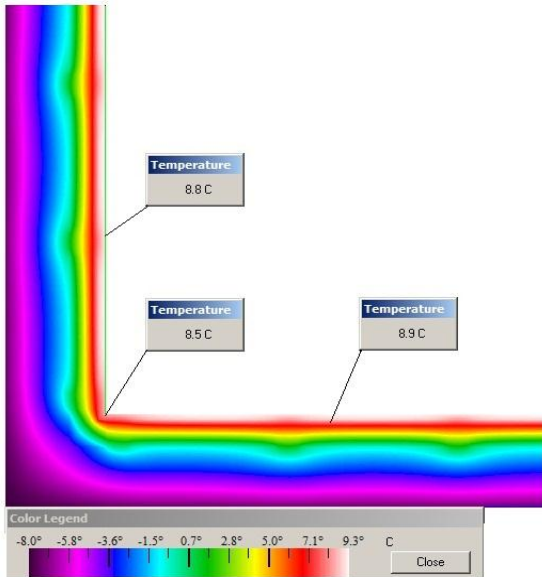
Joonisel 4.7.a on kujutatud mõisahoone välisseina välimist nurka, mis on joonestatud programiga AutoCAD Architecture. Joonisel 4.7.b on kujutatud sama nurga samatemperatuurijooned. Joonisel 4.7.c on kujutatud lahendatud sõlme lõikes erinevad temperatuurid, mille väärtuste hindamiseks on lisatud skaala.



**Joonis 4.7.a.** Välisseina välimine nurk

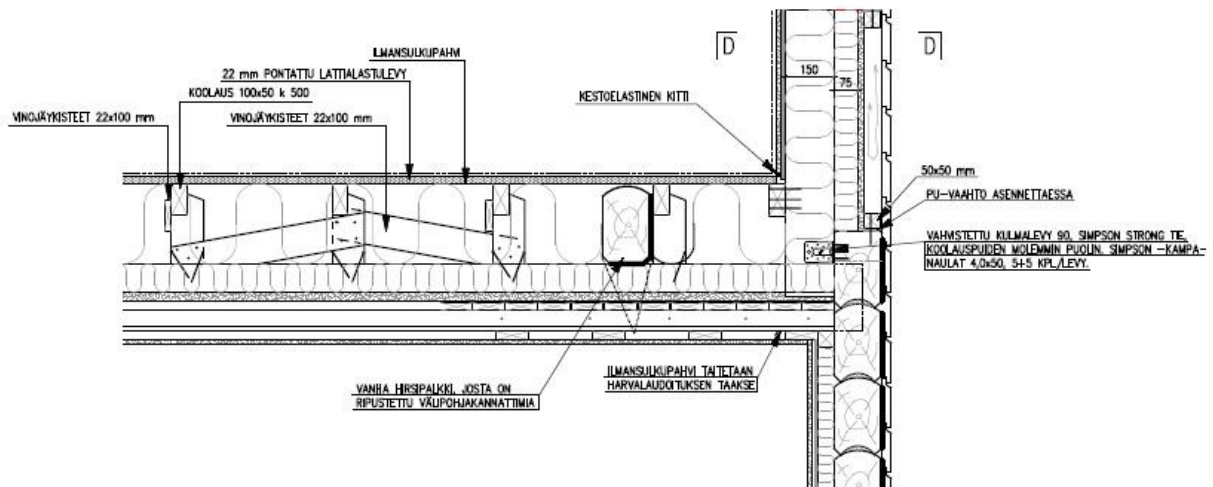


**Joonis 4.7.b.** Välisseina samatemperatuurijooned



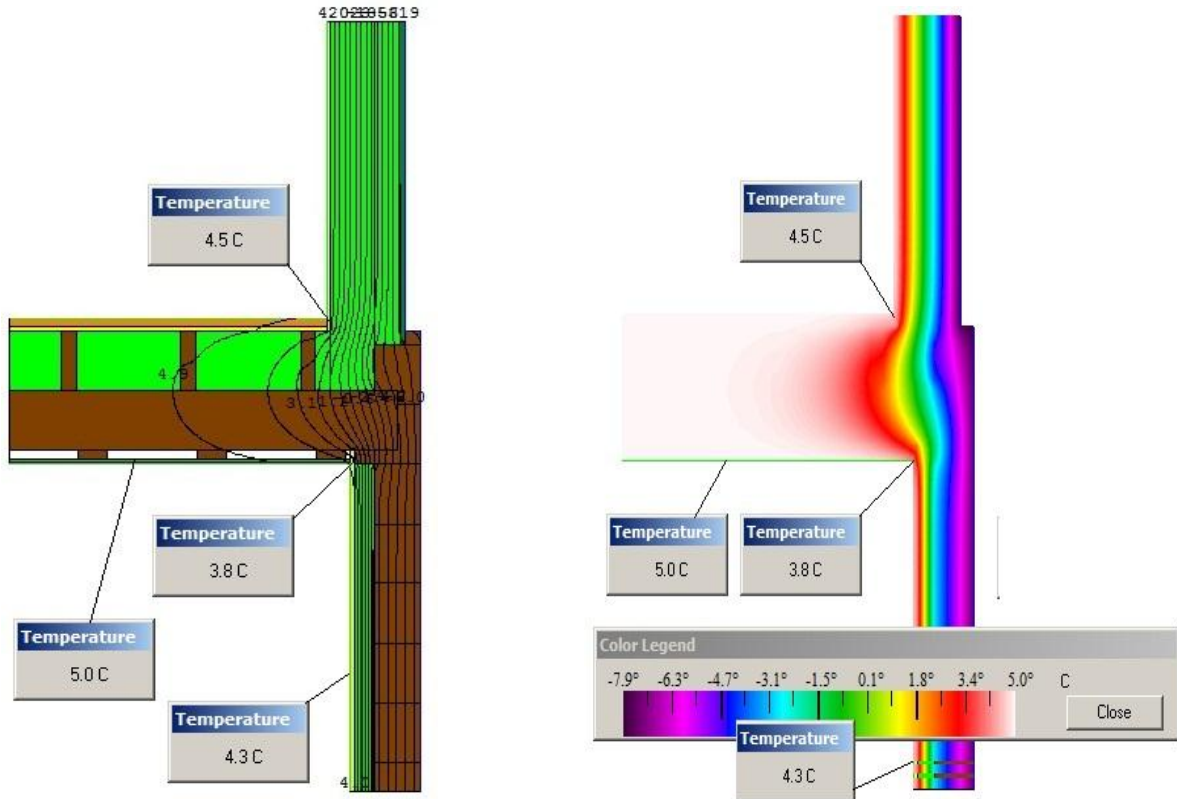
**Joonis 4.7.c.** Välisseina temperatuurid

Joonisel 4.8.a on kujutatud mõisahoone välisseina ristumist vahelaega, mis on joonestatud programmiga AutoCAD Architecture. Joonisel 4.8.b on kujutatud antud sõlme samatemperatuurijooned. Joonisel 4.8.c on kujutatud lahendatud sõlme lõikes erinevad temperatuurid, mille väärtuste hindamiseks on lisatud skaala.



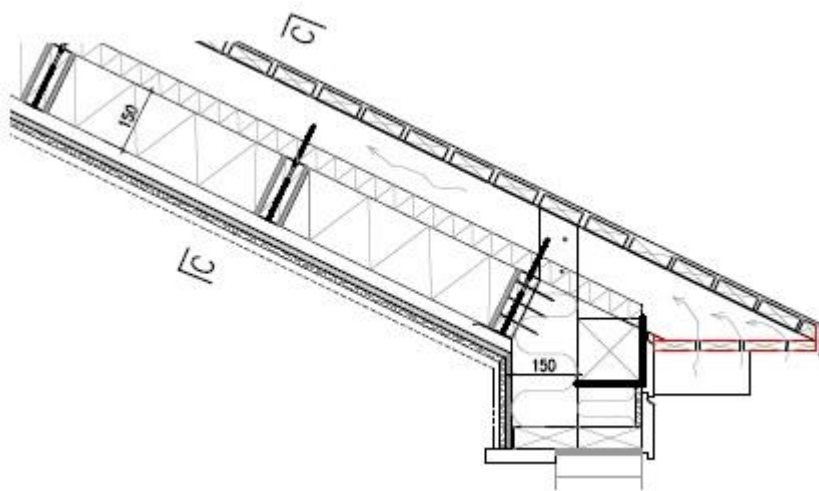
**Joonis 4.8.a.** Vahelae sõlm



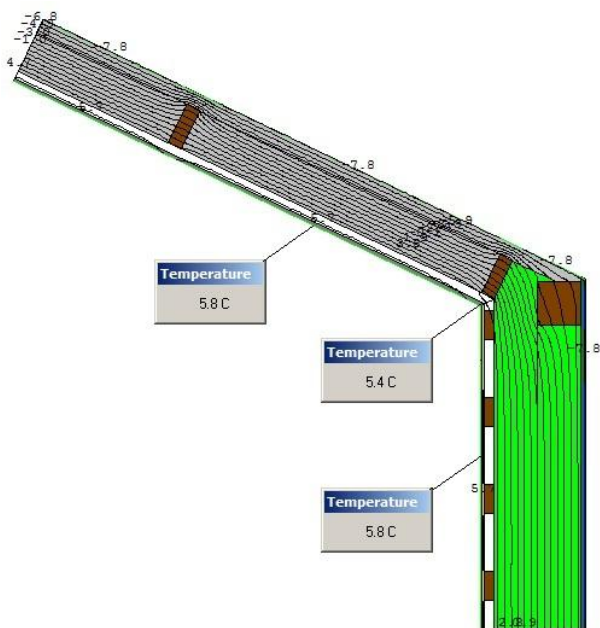


**Joonis 4.8.b.** Vahelae samatemperatuurijooned **Joonis 4.8.c.** Vahelae temperatuurid

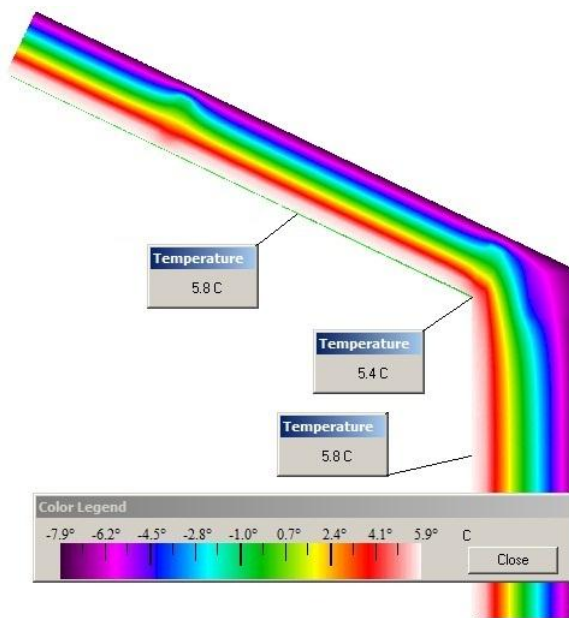
Joonisel 4.9.a on kujutatud mõisahoone välisseina ristumist katuslaega, mis on joonestatud programmiga AutoCAD Architecture. Joonisel 4.9.b on kujutatud antud sõlme samatemperatuurijooned. Joonisel 4.9.c on kujutatud lahendatud sõlme lõikes erinevad temperatuurid, mille väärtuste hindamiseks on lisatud skaala.



**Joonis 4.9.a.** Räästasõlm

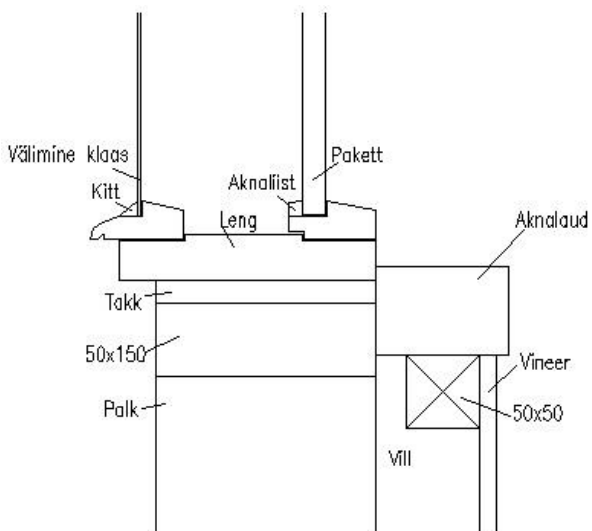


**Joonis 4.9.b.** Räästa samatemperatuurijooned



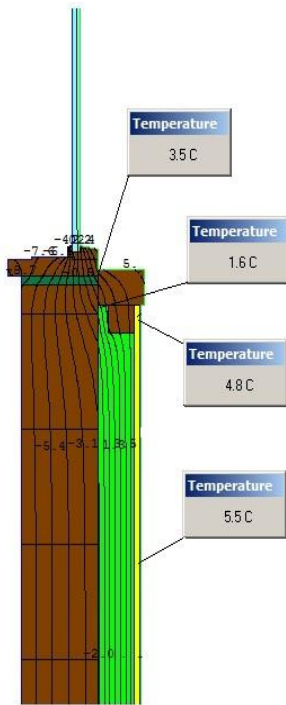
**Joonis 4.9.c.** Räästa temperatuurid

Joonisel 4.10.a on kujutatud mõisahoone akna kinnitust, mis on joonestatud programmiga AutoCAD Architecture. Joonisel 4.10.b on kujutatud antud sõlme samatemperatuurijooned. Joonisel 4.10.c on kujutatud lahendatud sõlme lõikes erinevad temperatuurid, mille väärtuste hindamiseks on lisatud skaala.

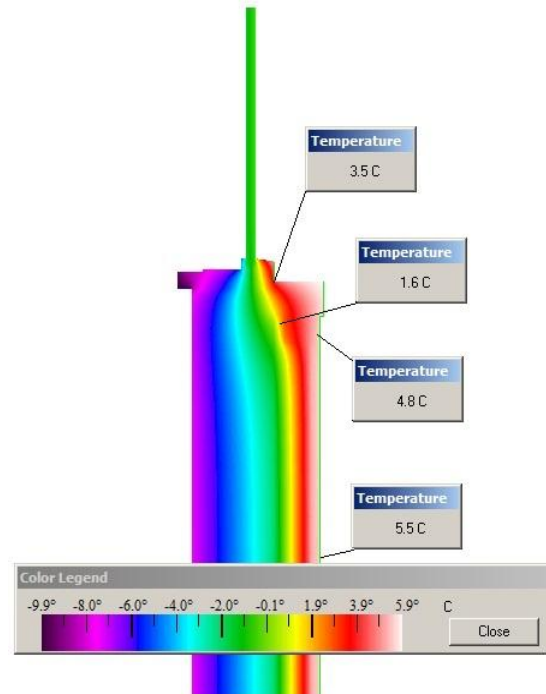


**Joonis 4.10.a.** Akna kinnitus



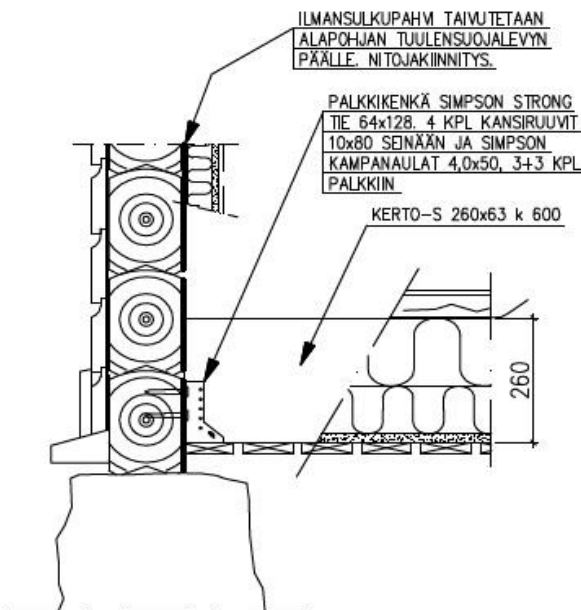


**Joonis 4.10.b.** Akna samatemperatuurijooned

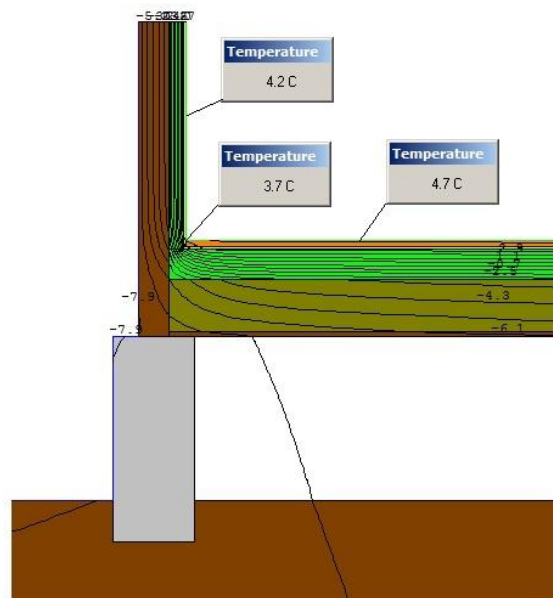


**Joonis 4.10.c.** Akna temperatuurid

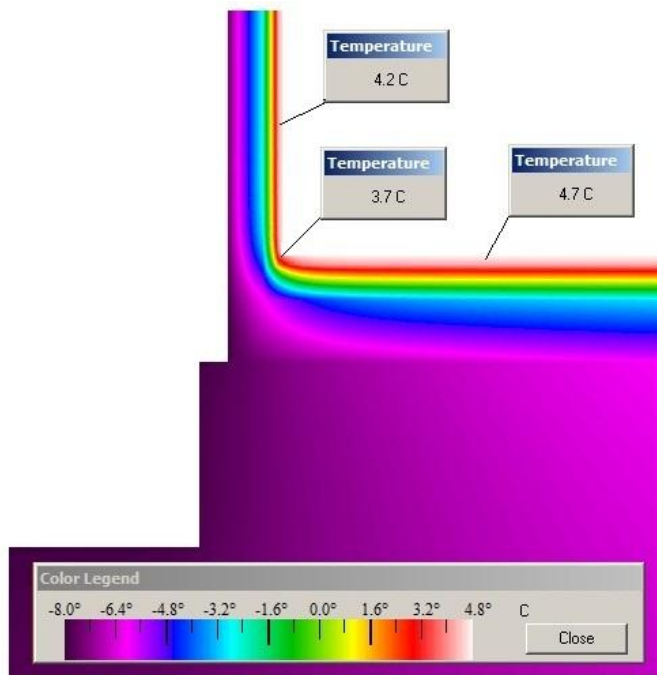
Joonisel 4.11.a on kujutatud mõisahoone välisseina ristumist põrandaga, mis on joonestatud programmiga CAD Architecture. Joonisel 4.11.b on kujutatud antud sõlme samatemperatuurijooned. Joonisel 4.11.c on kujutatud lahendatud sõlme lõikes erinevad temperatuurid, mille väärtuste hindamiseks on lisatud skaala.



**Joonis 4.11.a.** Sokli sõlm



**Joonis 4.11.b.** Sokli samatemperatuurijooned



Joonis 4.11.c. Sokli temperatuurid

#### 4.8. Tähtsamate sõlmede temperatuuriindeksite arvutused Thermi tulemuste põhjal

Sõlmede arvutused on tehtud vastavalt Thermi joonistelt saadud temperatuuridele, mis on tekkinud piirete ristumisel nende nurkades.

##### Välissein-välissein

$$f_{Rsi,1} = \frac{8,8 - (-8)}{10 - (-8)} = 0,94; f_{Rsi,2} = \frac{8,5 - (-8)}{10 - (-8)} = 0,92; f_{Rsi,3} = \frac{8,9 - (-8)}{10 - (-8)} = 0,94$$

##### Välissein-vahelagi

$$f_{Rsi,1} = \frac{4,5 - (-8)}{5 - (-8)} = 0,96$$

$$f_{Rsi,2} = \frac{5 - (-8)}{5 - (-8)} = 1,0; f_{Rsi,3} = \frac{3,8 - (-8)}{5 - (-8)} = 0,91; f_{Rsi,4} = \frac{4,3 - (-8)}{5 - (-8)} = 0,95$$

**Välissein-katuslagi**

$$f_{Rsi,1} = \frac{5,8 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,99; f_{Rsi,2} = \frac{5,4 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,96; f_{Rsi,3} = \frac{5,8 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,99$$

**Akende seinakinnitus**

$$f_{Rsi,1} = \frac{3,5 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,82$$

$$f_{Rsi,2} = \frac{1,6 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,69; f_{Rsi,3} = \frac{4,8 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,91; f_{Rsi,4} = \frac{5,5 - (-8)}{6 - (-8)} = 0,96;$$

**Välissein-põrand**

$$f_{Rsi,1} = \frac{4,2 - (-8)}{5 - (-8)} = 0,94; f_{Rsi,2} = \frac{3,7 - (-8)}{5 - (-8)} = 0,90; f_{Rsi,3} = \frac{4,7 - (-8)}{5 - (-8)} = 0,98$$

Therm 7.1. tulemuste põhjal leitud temperatuuriindeksite väärtused on kõik väga head ja üheski sõlmes ei tohiks tekkida hallitust ega kondenseerumist.

## KOKKUVÕTE

Käesolev töö on teostatud Boe mõisahoone põhjal, mis paikneb Soome Vabariigis. Töö eesmärgiks oli arvutada välispiirete soojusjuhtivused ning võrrelda saadud tulemusi Eestis ja Soomes kehtivate energiatõhusus miinimumnõuetega, kontrollida välispiirete kondenseerumist Glaseri meetodi abil, termovisiooni abil hinnata külmasildade olemasolu ja asukohti, programmi Therm 7.1. abil skitseerida tähtsad sõlmed, milles esinevad külmasillad ning arvutada nende väärtused, leida temperatuuriindeksite väärtused kahel erineval meetodil ja leida lihtsustatud meetodil energiatõhususarvu üks komponentidest (soojuskaod läbi piirete  $m^2$  kohta aastas).

Välisseinte soojusjuhtivus ei vastanud Eesti ega Soome kehtivatele energiatõhusus miinimumnõuetele. Arvutuste tulemused oli  $0,33 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$  ja  $0,34 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$ . Välisseinte soojusjuhtivuse oleks saanud parema tulemuse, kui oleks suurendatud villakihi paksust. Sellega oleks aga omakorda tekkinud oht kondenseerunud vee mitte väljakuivamisele, kuna tegemist on seespidise soojustusega. Akende soojusjuhtivused, mis on arvutuste põhjal saadud, jäid suuremaks, kui on kirjas nõuetes. Põrandate, katuslae ja pööningu põranda arvutatud soojusjuhtivused tulid väärtused, mis jäävad Eesti energiatõhusus miinimumnõuete raamidesse. Katuslae soojusjuhtivus peab Soome nõuete kohaselt olema  $\leq 0,09 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$ . Arvutatud väärtuseks tuli  $0,12 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$ .

Välisseintes ja põranda konstruktsioonis tekib kondensvett, aga see kõik kuivab suure varuga välja. Katuslae puhul ei teki arvutuste kohaselt kondensvett, kuna selles konstruktsioonis on kasutatud soojustusmaterjalina SPUD, mis on oma olemuselt tihe polüuretaanvaht.

Termokaamera abil tuvastati kohad konstruktsiooni sõlmedes, mis olid kehvasti soojustatud. Piltidelt võib selgelt eristada tumedamaid laike, mis viitavad külmasildade olemasolule. Temperatuuriindeksite võrdluses oli kõige halvemini teostatud põranda ja välisseina ristumine, kus eksisteerib oht nii hallituse kui kondenseerumise tekkele. Arvutuste juures peab arvestama asjaoluga, et kogu mõisahoone on veel ehitamise järgus ning termopiltide ja temperatuuriindeksite väärtused muutuksid, kui uued mõõtmised teostataks siis, kui hoone restaureerimine on valmis.

Programm Therm 7.1. abil skitseeriti välispiirete sõlmede lahendused. Temperatuurivälja arvutustega leiti temperatuuriindeksite väärtused, mis tulid kõik nõuetele vastavad. Therm 7.1. abil leiti joonkülmasildade soojusjuhtivused ning mõõtmiste ja joonistelt mõõdetud tulemuste põhjal arvutati külmasildade lisakonduktantsid.

Lõpptulemusena leiti soojuskaod läbi piirete tingituna piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist. Saadud vastus oli  $239 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , mis on üks komponent üldisest energiatõhusarvust.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. EVS 908-1:2010 Hoone piirdetarindi soojusjuhtivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire. 2010. Eesti Standardikeskus.
2. EVS-EN ISO 13370:2008 Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid. 2008. Eesti Standardikeskus.
3. EVS-EN ISO 10211:2008 Külmasillad hoones. Soojusvood ja pinnatemperatuurid. Üldised arvutusmeetodid. 2008. Eesti Standardikeskus.
4. Boe Gård. Historia.  
Kättesaadav: <http://www.boe.fi/fi/historia/> (12.03.2014)
5. Hagelstam, L. Boen kartanon omistushistoriikki.
6. Ekovilla.  
Kättesaadav: <http://www.ekovilla.ee/> (13.03.2014)
7. Ekovilla.  
Kättesaadav: <http://www.ekovilla.com/n/miksi-ekovilla/lammin/> (13.03.2014)
8. Ekovilla.  
Kättesaadav: <http://www.ekovilla.com/ee/archive/miks-ekovilla/keskkonnasobralik/> (13.03.2014)
9. Ekovilla.  
Kättesaadav: <http://www.ekovilla.com/n/miksi-ekovilla/hengittava/> (13.03.2014)
10. Ekovilla.  
Kättesaadav: <http://www.ekovilla.com/n/ohjeet/ohjeet-suunnittelijoille/> (13.03.2014)
11. Ekovilla.  
Kättesaadav: <http://www.ekovilla.com/ee/n/archive/juhendid/sertifikaadid/> (13.03.2014)
12. SPU Insulation.  
Kättesaadav: <http://www.spu.ee/spu/ettevete/> (13.03.2014)
13. SPU Insulation.  
Kättesaadav: <http://www.spu.ee/miks-valida-spu-isolatsioonimaterjalid/keskkonnan-saastlikkus/> (14.03.2014)

14. SPU Insulation.  
Kättesaadav: <http://www.spu.ee/miks-valida-spu-isolatsioonimaterjalid/tohus-lahendus/> (14.03.2014)
15. SPU Insulation.  
Kättesaadav: <http://www.spu.ee/projekteerimine/tehnilised-omadused/> (14.03.2014)
16. Energiatõhususe miinimumnõuded, Vabariigi Valitsuse 30. augusti 2012. a. määrus nr. 68 (RT I 05.09.2012, 4).  
Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004> (15.03.2014)
17. Tehnilise Järelevalve Amet. Tööstusohutus. Ehitus. Hoonete energiaklassid.  
Kättesaadav: <http://www.tja.ee/hoonete-energiaklassid> (16.03.2014)
18. Kredex. Energiatõhusus. Hoone energiamärgis.  
Kättesaadav: <http://www.kredex.ee/energiatohususest/energiatohusus/statistika-2/> (16.03.2014)
19. Energiamärgise vorm ja väljastamise kord, Vabariigi Valitsuse 17. detsembri 2008. a. määrus nr. 107 (RTL 2008, 100, 1428).  
Kättesaadav: [https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1291/2201/0034/129122010034\\_lisad.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1291/2201/0034/129122010034_lisad.pdf#) (16.03.2014)
20. Työ- ja elinkeinoministeriö. Suomen toinen kansallinen energiatehokkuuden toimintasuunnitelma NEEAP-2. 2011  
Kättesaadav: [http://www.tem.fi/files/37646/TEMjul\\_32\\_2011\\_web\\_18092013.pdf](http://www.tem.fi/files/37646/TEMjul_32_2011_web_18092013.pdf) (17.03.2014)
21. Työ- ja elinkeinoministeriö. ERA 17. For an Energy-Smart Built Environment 2017. 2010  
Kättesaadav: <http://era17.fi/en/> (17.03.2014)
22. Eduskunta. Programme of Prime Minister Jyrki Katainen's Government. 22 June 2011.  
Kättesaadav: <http://valtioneuvosto.fi/hallitus/hallitusohjelma/pdf/en334743.pdf> (17.03.2014)
23. Kauppinen, J. Ympäristöministeriö. Rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen korjaus- ja muutostöissä. 27. helmikuuta 2013.  
Kättesaadav: [http://www.finlex.fi/data/normit/40799-EU\\_27\\_2\\_2013YM\\_\\_asetus\\_lopullinen\\_FIN.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/40799-EU_27_2_2013YM__asetus_lopullinen_FIN.pdf) (17.03.2014)

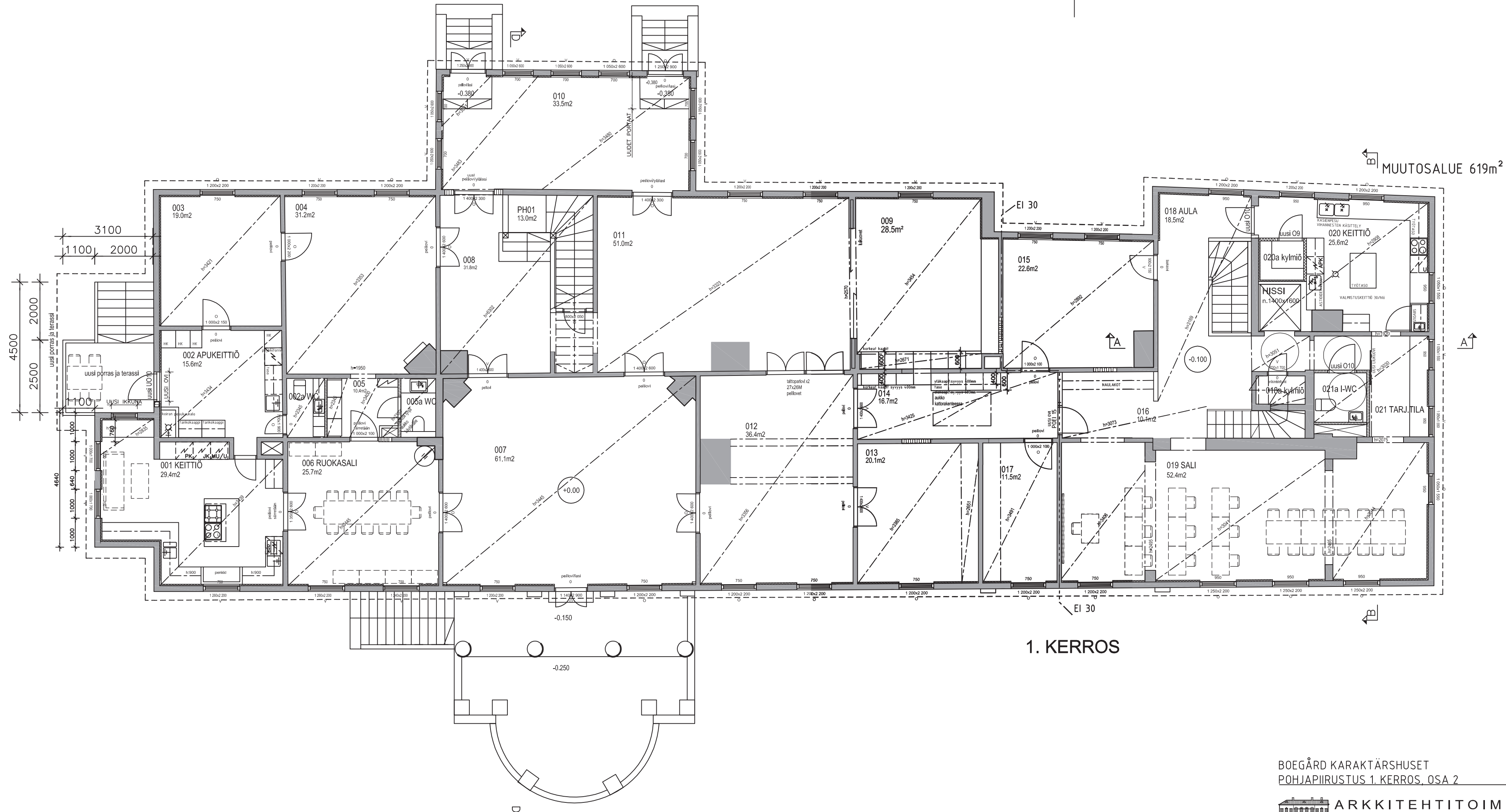
24. Puuinfo. Energiatehokkuusvaatimukset. Tekninen Tiedote. 1.7.2012  
Kättesaadav: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/rakentamismaaraykset/energiatehokkuusvaatimukset/energiatehokkuusvaatimukset172012.pdf>  
(17.03.2014)
25. Ehitusuuringud. Teenused. Termografeerimine.  
Kättesaadav: <http://www.ehitusuuringud.ee/teenused/termografeerimine/> (18.03.2014)
26. Kalamees, T. Ehitusfüüsika seos hoone energiatõhususega. Külmasillad. 23 mai 2012.  
Kättesaadav: [http://www.teaduspark.ee/UserFiles/Projektid/empower/Targo%20Kalamees\\_Konspekt%20\\_23.05.2012.pdf](http://www.teaduspark.ee/UserFiles/Projektid/empower/Targo%20Kalamees_Konspekt%20_23.05.2012.pdf) (24.03.2014)
27. Kalamees, T. Ehitusfüüsika seos hoone energiatõhususega. Hoonepiirete õhulekked. 23 mai 2012.  
Kättesaadav: [http://www.teaduspark.ee/UserFiles/Projektid/empower/Targo%20Kalamees\\_Konspekt%20\\_23.05.2012.pdf](http://www.teaduspark.ee/UserFiles/Projektid/empower/Targo%20Kalamees_Konspekt%20_23.05.2012.pdf) (24.03.2014)
28. Metslang, J. Vana maamaja käsiraamat. Tammerraamat. 2012. lk 296.
29. Telliskivi Selts. Seinte soojustamine.  
Kättesaadav: <http://telliskiviselts.info/cmtls/1/94/album/179/193/download>  
(24.03.2014)
30. Hüdroisolatsioon. Niiskus ehituskonstruksioonides. Niiskuse kondenseerumine piiretes.  
Kättesaadav: <http://hydroisolatsioon.edicypages.com/539585162695/niiskuse-kondenseerumine-piiretes> (24.03.2014)
31. Tohvri, E. Vene tüüpfassaadide ja nende rakendamine Tartu linnaruumis. Magistritöö. Tartu Ülikool, Filosoofiateaduskond, Ajaloo osakond, Kunstiajaloo õppetool. Tartu. 2002. 144 lk.
32. Metsamägi, M., Lasn, P. Materjalide soojuserijuhtivus ning veeauru difusioonimadusi kirjeldavad näitajad. TTÜ Tartu Kolledž. 12 lk.
33. Piirfeld, A. Soojustatud välisseina hingamine ja selle arvutusmeetodika. Tarmatrade.  
Kättesaadav: <http://www.tarmatrade.ee/File/FASSAADIDE%20HINGAMISE%20ARVUTUS.pdf> (13.04.2014)
34. Lawrence Berkeley National Laboratory. Therm 6.3 / Window 6.3 NFRC Simulation Manual. July 2013.



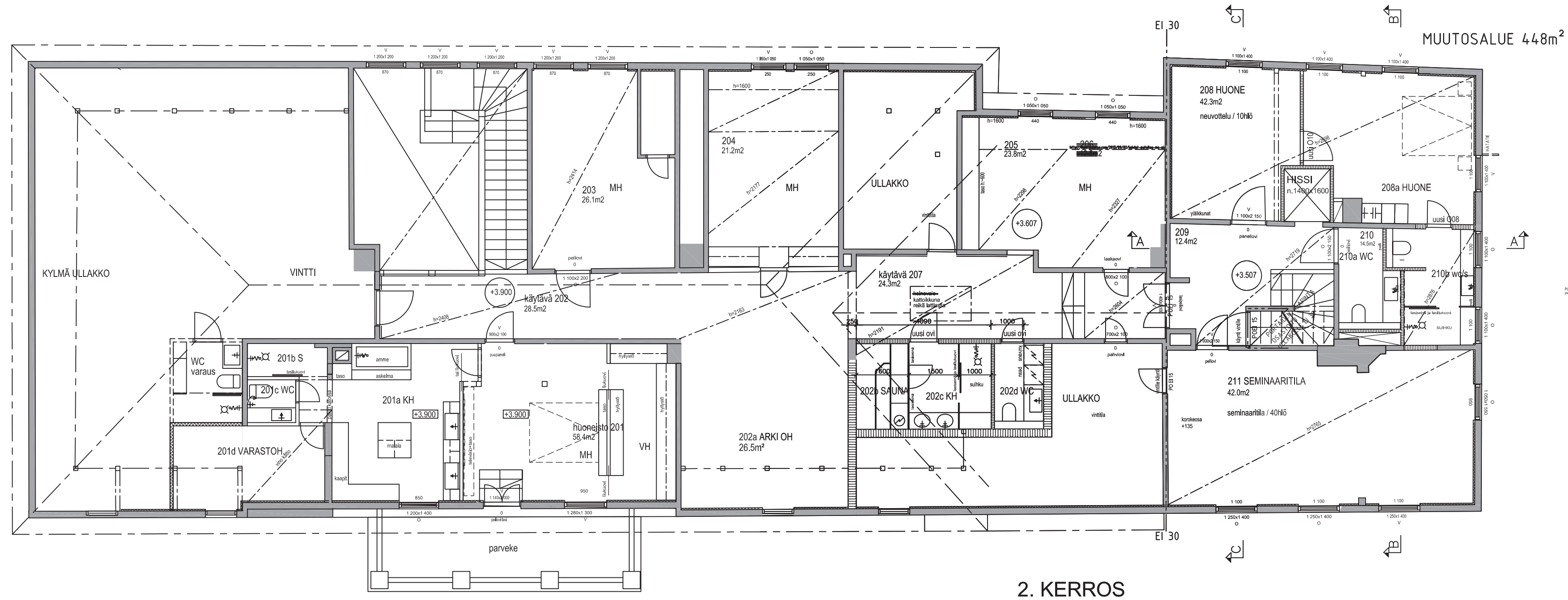
- Kättesaadav: <http://windows.lbl.gov/software/NFRC/SimMan/NFRCSim6.3-2013-07-Manual.pdf> (13.04.2014)
35. PassiveHouse. Tarkvarapakett LBNL Therm. Külmasildade joonsoojusjuhtivuste arvutustarkvara. Kiirjuhend.  
Kättesaadav: <http://www.tud.ttu.ee/material/epi/Ehitusfuusika/THERM%20kiirjuhend.pdf> (13.04.2014)
36. Flir. Flir Ex-Series Technical specifications.  
Kättesaadav: <http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=61456> (06.05.2014)
37. Kalamees, T. Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. 2011. Tallinna Tehnikaülikooli Ehitusteaduskond.  
Kättesaadav: [http://www.kredex.ee/public/Uuringud/TTY\\_Puitelamute\\_uuring.pdf](http://www.kredex.ee/public/Uuringud/TTY_Puitelamute_uuring.pdf) (06.05.2014)
38. Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika, Majandus- ja kommunikatsiooni ministri 9. jaanuari 2013. a. määrus nr. 63.  
Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118102012001> (06.05.2014)
39. Hani, A. Investigation of Energy Efficiency in Buildings and HVAC Systems. Tallinn. TTÜ Kirjastus. 2012. 126 lk.
40. Ilmatieteen Laitos. Lämmitystarveluku eli astepäiväluku.  
Kättesaadav: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut> (27.05.2014)

## **LISAD**

## **LISA 1. Boe mõisahoone joonised**

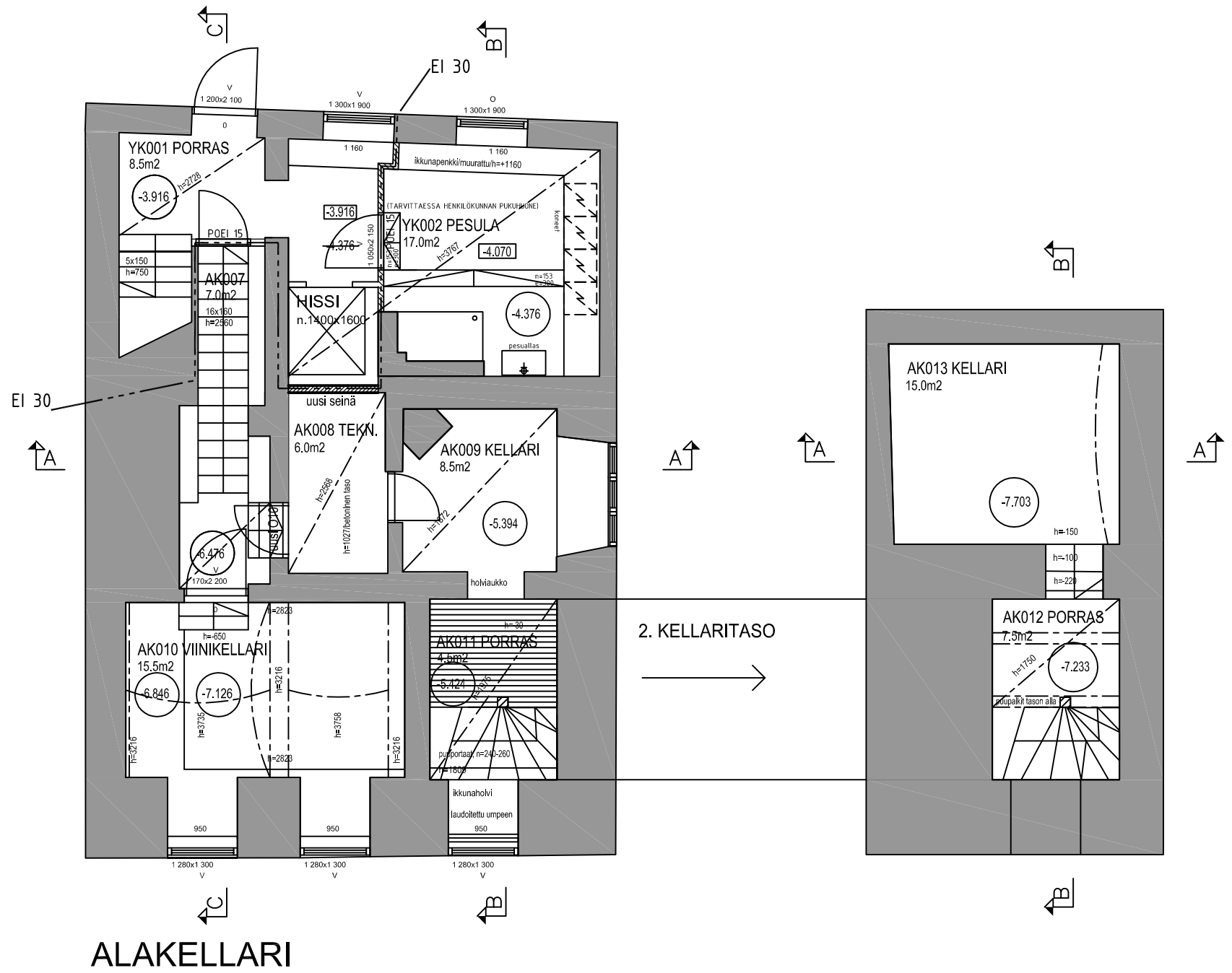
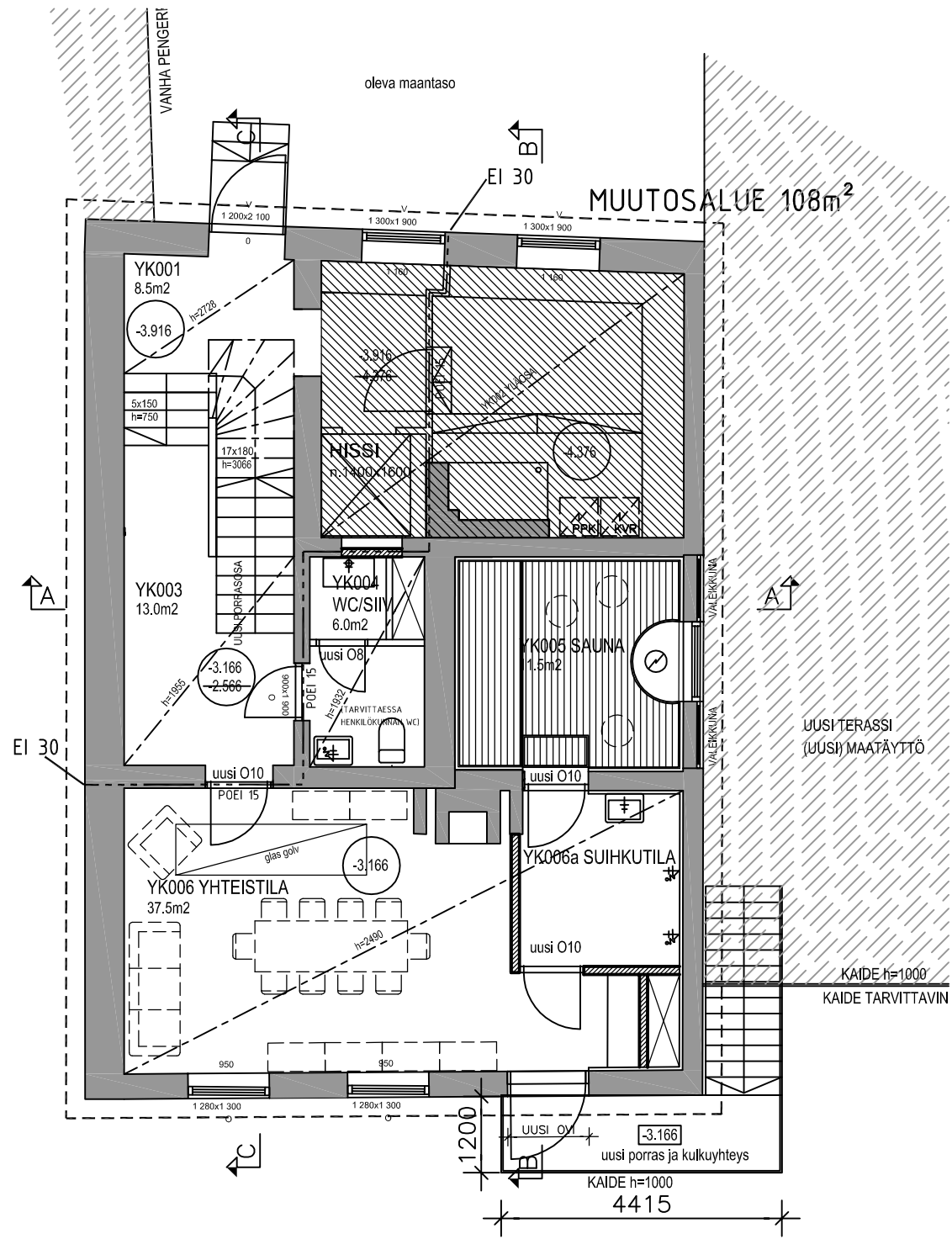


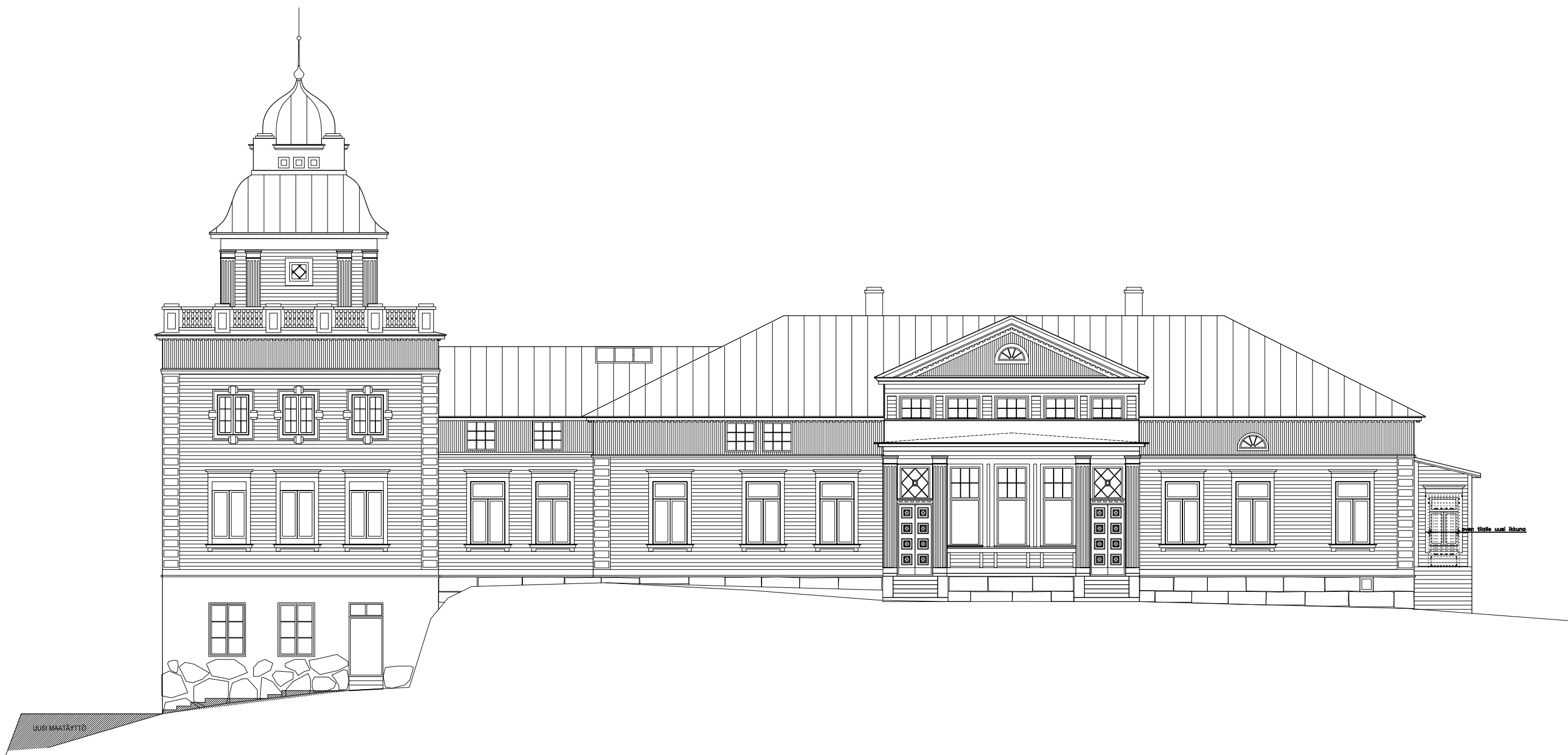
1. KERROS



2. KERROS







JULKISIVU LOUNAASEEN

BOEGÅRD KARAKTÄRSHUSET  
JULKISIVUT

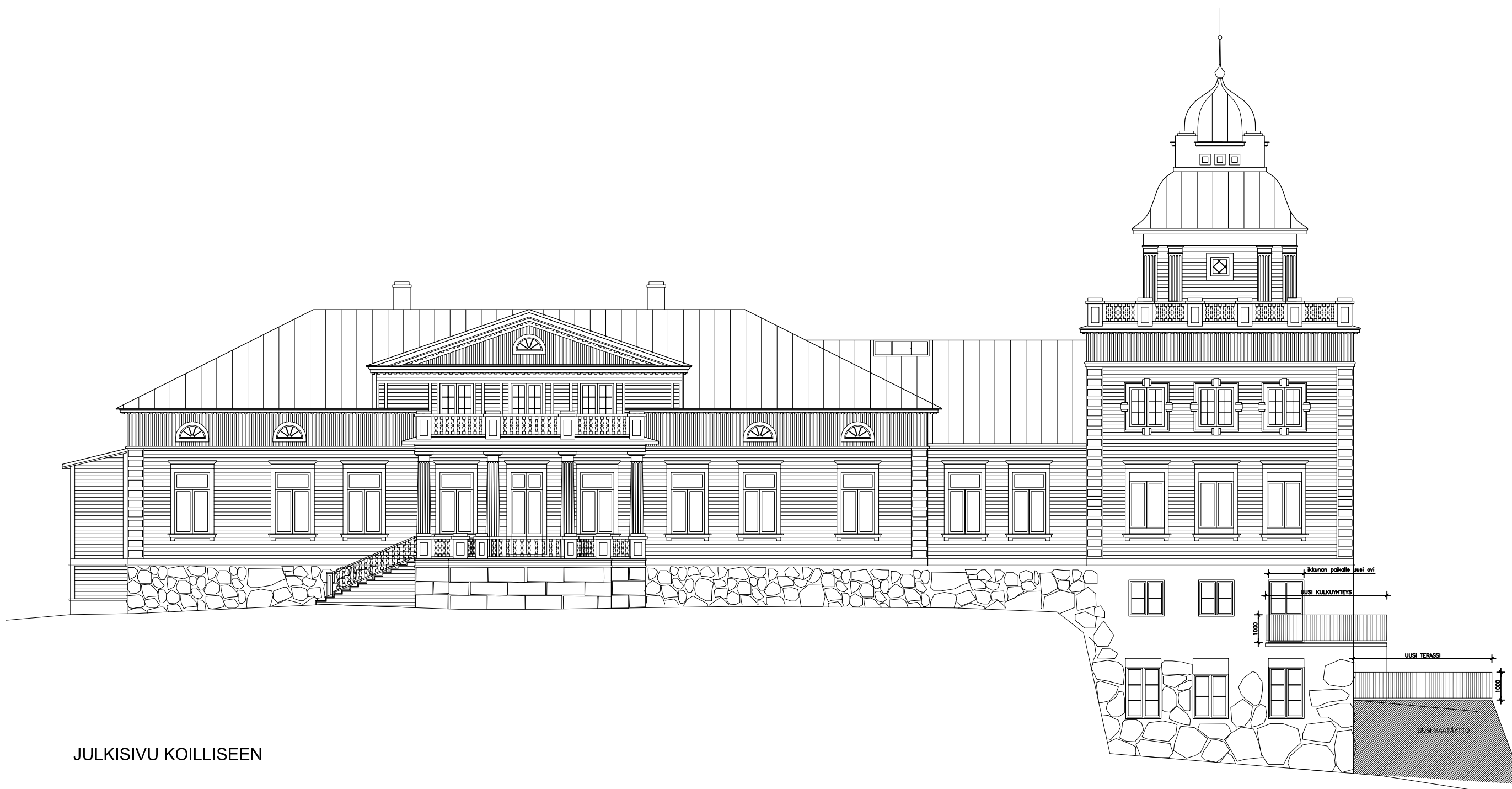
11.09.2013

1:150



ARKKITEHTITOIMISTO SIGGE OY

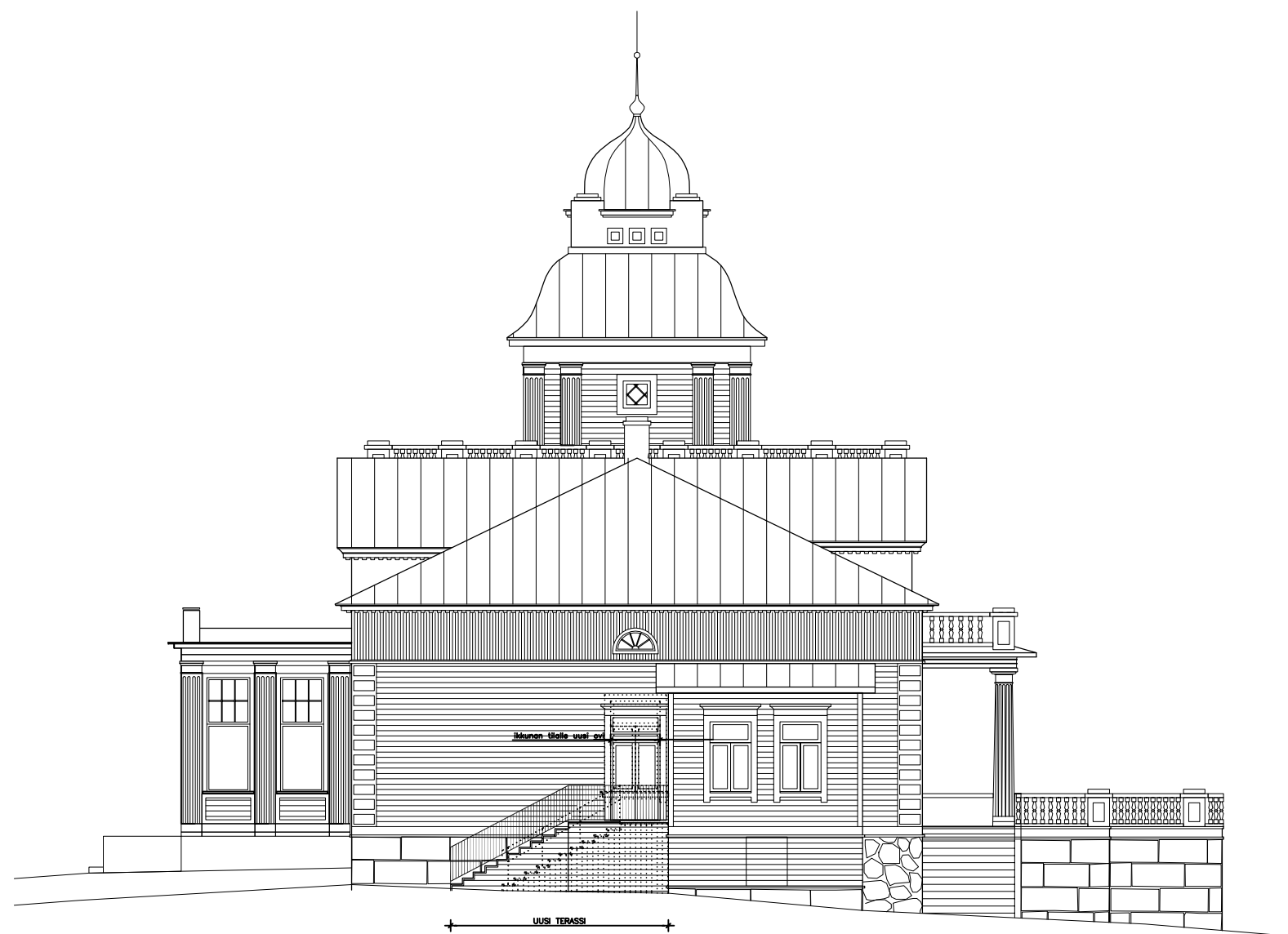
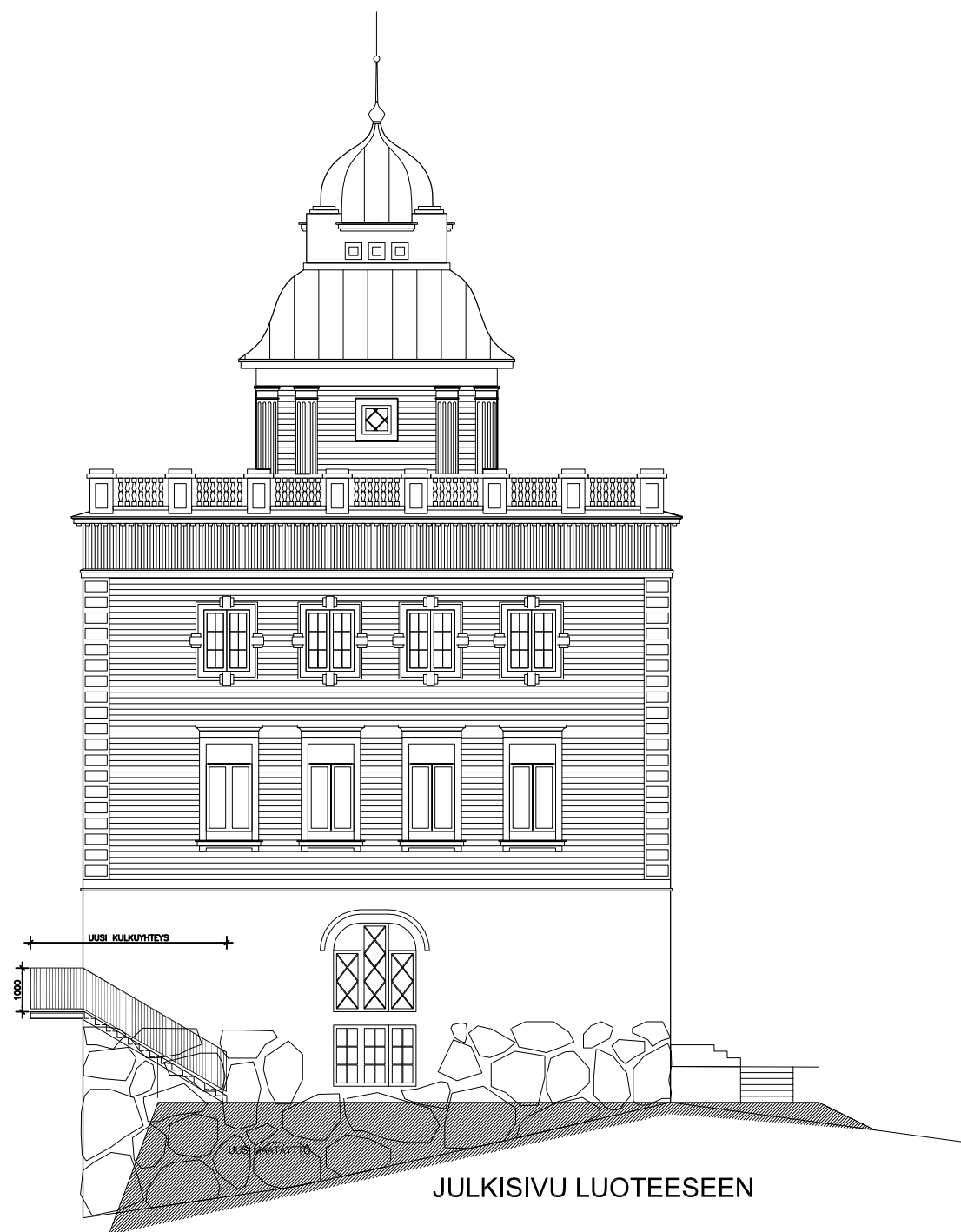
LÄNTINEN RANTAKATU 9 20100 TURKU www.sigge.fi tel +358-2-2781500 fax +358-2-2310550 e-mail sigge@sigge.fi



JULKISIVU KOILLISEEN







## LISA 2. Välisseina soojusjuhtivuse arvutus

Arvutustes kasutatud materjalide soojuseri juhtivused on võetud tabelist 3.1. ja ehitusmaterjalide paksused piirete kirjeldustest. Õhukeste kihtide (aurutõkkepaber, pingupapp, tapeet) soojuseri juhtivusi pole arvestatud.

**Välissein 2** (sein vastu külma pööningut, millel on viimistluseks pingupapp ja tapeet, mis pannakse vineeri peale)

Kütmata ruumi soojustakistus, vastavalt valemile (5):

$$R_u = 0,09 + 0,4 \cdot \frac{65,3}{210,8} = 0,21 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{soojustuse\ sektsioon} = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,07}{0,039} + \frac{0,15}{0,13} + 0,21 = 3,36 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{sõrestiku\ sektsioon} = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,07}{0,13} + \frac{0,15}{0,13} + 0,21 = 2,10 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{350 + 50}{\frac{350}{3,36} + \frac{50}{2,10}} = 3,13 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{70\ mm\ soojustus/sõrestik} = \frac{350 + 50}{\frac{350}{\left(\frac{0,07}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,07}{0,13}\right)}} = 1,39 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + 1,39 + \frac{0,15}{0,13} + 0,21 = 2,95 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{3,13 + 2,95}{2} = 3,04 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{3,13 - 2,95}{2 \times 3,04} \times 100\% = 3,0\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{3,04} = 0,33 \frac{W}{m^2 \times K}$$

70 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 70 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{1,39}{3,04}\right)^2 = 0,002 \frac{W}{m^2 \times K}$$

70 mm paksuse soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 70 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{1,39}{3,04}\right)^2 = 0,001 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,33 + 0,002 + 0,001 = 0,333 \frac{W}{m^2 \times K}$$

**Välissein 3** (viimistluseks klinkerplaat, mis pannakse kipsplaadi peale)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,013}{0,25} + \frac{0,07}{0,039} + \frac{0,15}{0,13} + 0,13 = 3,27 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,013}{0,25} + \frac{0,07}{0,12} + \frac{0,15}{0,13} + 0,13 = 2,02 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{350 + 50}{\frac{350}{3,27} + \frac{50}{2,02}} = 3,04 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{70 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{350 + 50}{\frac{350}{\left(\frac{0,07}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,07}{0,13}\right)}} = 1,39 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R_T'' = 0,13 + \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,013}{0,25} + 1,39 + \frac{0,15}{0,13} + 0,13 = 2,87 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{3,04 + 2,87}{2} = 2,96 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{3,04 - 2,87}{2 \times 2,96} \times 100\% = 2,9\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{2,96} = 0,34 \frac{W}{m^2 \times K}$$

70 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 70 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{1,39}{2,96}\right)^2 = 0,002 \frac{W}{m^2 \times K}$$

70 mm paksuse soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 70 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{1,39}{2,96}\right)^2 = 0,001 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,34 + 0,002 + 0,001 = 0,343 \frac{W}{m^2 \times K}$$

**Välissein 4** (lehtvill karkassipostide vahel, viimistluseks pingupapp ja tapeet, mis pannakse vineeri peale)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + 0,16 + \frac{0,225}{0,039} + \frac{0,018}{0,048} + 0,13 = 6,63 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + 0,16 + \frac{0,225}{0,13} + \frac{0,018}{0,048} + 0,13 = 2,60 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{550 + 50}{\frac{550}{6,63} + \frac{50}{2,60}} = 5,87 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{225 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,225}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,225}{0,13}\right)}} = 4,83 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,012}{0,17} + 0,16 + 4,83 + \frac{0,018}{0,048} + 0,13 = 5,70 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{5,87 + 5,70}{2} = 5,79 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{5,87 - 5,70}{2 \times 5,79} \times 100\% = 1,5\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{5,79} = 0,17 \frac{W}{m^2 \times K}$$

225 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_g \text{ 225 mm soojustus/sõrestik} = 0,01 \times \left(\frac{4,83}{5,79}\right)^2 = 0,007 \frac{W}{m^2 \times K}$$

225 mm paksuse soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_a \text{ 225 mm soojustus/sõrestik} = 0,005 \times \left(\frac{4,83}{5,79}\right)^2 = 0,003 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,17 + 0,007 + 0,003 = 0,18 \frac{W}{m^2 \times K}$$

### LISA 3. Välisõhu kohal oleva põranda soojusjuhtivuse arvutus

Arvutustes kasutatud materjalide soojuseriiktivused on võetud tabelist 3.1. ja ehitusmaterjalide paksused piirete kirjeldustest. Õhukese kihi (aurutõkkepaber) soojuseriiktivust pole arvestatud.

**Põrand 1** (põrandalaakide samm 400 mm, viimistluseks vineer ja põrandalaud)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$\begin{aligned} R_{\text{soojustuse sektsioon}} &= 0,13 + \frac{0,028}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,4}{0,039} + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = \\ &= 11,37 \frac{m^2 \times K}{W} \end{aligned}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,028}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,4}{0,13} + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = 4,19 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{350 + 50}{\frac{350}{11,37} + \frac{50}{4,19}} = 9,36 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{400 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{350 + 50}{\frac{0,4}{0,039} + \frac{0,4}{0,13}} = 7,94 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,028}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + 7,94 + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = 9,05 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{9,36 + 9,05}{2} = 9,21 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{9,36 - 9,05}{2 \times 9,21} \times 100\% = 1,7\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{9,21} = 0,11 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 400 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{7,94}{9,21}\right)^2 = 0,007 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuskivi õhujuhitvuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 400 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{7,94}{9,21}\right)^2 = 0,004 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,11 + 0,007 + 0,004 = 0,121 \frac{W}{m^2 \times K}$$

**Põrand 2** (põrandalaakide samm 600 mm, viimistluseks vineer ja põrandalaud)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$\begin{aligned} R_{\text{soojustuse sektsioon}} &= 0,13 + \frac{0,028}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,4}{0,039} + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = \\ &= 11,37 \frac{m^2 \times K}{W} \end{aligned}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,028}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + \frac{0,4}{0,13} + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = 4,19 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{550 + 50}{\frac{550}{11,37} + \frac{50}{4,19}} = 9,95 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{\text{400 mm soojustus/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,4}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,4}{0,13}\right)}} = 8,59 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,028}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + 8,59 + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = 9,70 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{9,95 + 9,70}{2} = 9,83 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{9,95 - 9,70}{2 \times 9,83} \times 100\% = 1,3\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{9,83} = 0,10 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 400 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{8,59}{9,83}\right)^2 = 0,008 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 400 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{8,59}{9,83}\right)^2 = 0,004 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,10 + 0,008 + 0,004 = 0,112 \frac{W}{m^2 \times K}$$

### Soojuslevi pinnasesse

Põranda tunnusmõõde, vastavalt valemile (15):

$$B' = \frac{20,1}{0,5 \cdot 17,8} = 2,26$$

Võrdväärne kogupaksus, vastavalt valemile (17):

$$d_g = 0,233 + 3,5 \times (0,17 + 0 + 0,04) = 0,97 \text{ m}$$

Tegur  $U_g$  vastavalt valemile (18):

$$U_g = \frac{2 \times 3,5}{\pi \times 2,26 + 0,97} \times \ln\left(\frac{\pi \times 2,26}{0,97} + 1\right) = 1,84$$

Tegur  $U_x$  vastavalt valemile (19):

$$U_x = 2 \times \frac{0,6 \times 0,343}{2,26} + 1450 \times \frac{0,0069 \times 4,0 \times 0,1}{2,26} = 1,95$$



Põranda soojuislahvitus, vastavalt valemile (16):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,112} + \frac{1}{1,84 + 1,95}\right)} = 0,06 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Kuna pinnase soojuslevi mõjutab tulemusi vähe, siis jätan need edaspidistest arvutustest välja.

**Põrand 3** (põrandalaakide samm 600 mm, viimistluseks kips- ja klinkerplaat)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$\begin{aligned} R_{\text{soojustuse sektsioon}} &= 0,13 + \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,013}{0,25} + \frac{0,018}{0,17} + \frac{0,4}{0,039} + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = \\ &= 11,25 \frac{m^2 \times K}{W} \end{aligned}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$\begin{aligned} R_{\text{sõrestiku sektsioon}} &= 0,13 + \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,013}{0,25} + \frac{0,018}{0,17} + \frac{0,4}{0,13} + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 \\ &= 4,07 \frac{m^2 \times K}{W} \end{aligned}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{550 + 50}{\frac{550}{11,25} + \frac{50}{4,07}} = 9,81 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{400 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,4}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,4}{0,13}\right)}} = 8,59 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,013}{0,25} + \frac{0,018}{0,17} + 8,59 + \frac{0,018}{0,048} + \frac{0,025}{0,13} + 0,13 = 9,59 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{9,81 + 9,59}{2} = 9,7 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{9,81 - 9,59}{2 \times 9,7} \times 100\% = 1,1\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{9,7} = 0,10 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 400 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{8,59}{9,7}\right)^2 = 0,008 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 400 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{8,59}{9,7}\right)^2 = 0,004 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,10 + 0,008 + 0,004 = 0,112 \frac{W}{m^2 \times K}$$

#### LISA 4. Pööningu pöranda soojusjuhtivuse arvutus

Arvutustes kasutatud materjalide soojuserijuhtivused on võetud tabelist 3.1. ja ehitusmaterjalide paksused piirete kirjeldustest. Õhukese kihi (aurutõkkepaber) soojuserijuhtivust pole arvestatud.

**Pörand 1** (laetalade samm 400 mm, viimistluseks kipsplaat)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,5}{0,039} + 0,2 + 0,04 = 13,40 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,125}{0,13} + \frac{0,375}{0,039} + 0,2 + 0,04 = 11,16 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{350 + 50}{\frac{350}{13,40} + \frac{50}{11,16}} = 13,07 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{500 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{350 + 50}{\frac{350}{\left(\frac{0,5}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,125}{0,13} + \frac{0,375}{0,039}\right)}} = 12,29 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + 12,29 + 0,2 + 0,04 = 12,87 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{13,07 + 12,87}{2} = 12,97 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{13,07 - 12,87}{2 \times 12,97} \times 100\% = 0,8\%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{12,97} = 0,08 \frac{W}{m^2 \times K}$$

500 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g \text{ 500 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{12,29}{12,97}\right)^2 = 0,009 \frac{W}{m^2 \times K}$$

500 mm paksuse soojustuskihi õhujuhitvuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

$$\Delta U_{a \text{ 500 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{12,29}{12,97}\right)^2 = 0,004 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,08 + 0,009 + 0,004 = 0,093 \frac{W}{m^2 \times K}$$

**Põrand 2** (laetalade samm 400 mm, allpool viimistluseks kipsplaat ja ülevalpool vineer)

Kütmata ruumi soojustakistus, vastavalt valemile (5):

$$R_u = 0,09 + 0,4 \cdot \frac{65,3}{210,8} = 0,21 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Soojustuse sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$\begin{aligned} R_{\text{soojustuse sektsioon}} &= 0,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,025}{0,13} + \frac{0,4}{0,039} + \frac{0,012}{0,17} + 0,21 \\ &= 11,07 \frac{m^2 \times K}{W} \end{aligned}$$

Sõrestikupostide sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,025}{0,13} + \frac{0,4}{0,13} + \frac{0,012}{0,17} + 0,21 = 3,89 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{350 + 50}{\frac{350}{11,07} + \frac{50}{3,89}} = 8,99 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_{400 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = \frac{350 + 50}{\frac{350}{\left(\frac{0,4}{0,039}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,4}{0,13}\right)}} = 7,94 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R_T'' = 0,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,025}{0,13} + 7,94 + \frac{0,012}{0,17} + 0,21 = 8,75 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{8,99 + 8,75}{2} = 8,87 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{8,99 - 8,75}{2 \times 8,87} \times 100\% = 1,4 \%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{8,87} = 0,11 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur, vastavalt valemile (12):

$$\Delta U_{g400 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \times \left(\frac{7,94}{8,87}\right)^2 = 0,008 \frac{W}{m^2 \times K}$$

400 mm paksuse soojustuskihi õhujuhitvuse parandustegur, vastavalt valemile (13):

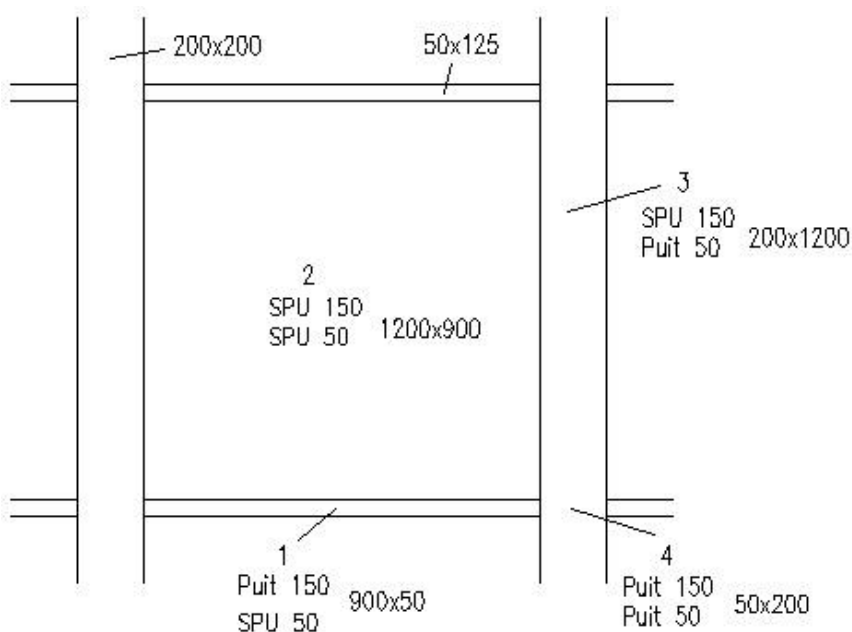
$$\Delta U_{a400 \text{ mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \times \left(\frac{7,94}{8,87}\right)^2 = 0,004 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Korrigeeritud piirdetarindi soojusjuhtivus, vastavalt valemile (10):

$$U_c = 0,11 + 0,008 + 0,004 = 0,122 \frac{W}{m^2 \times K}$$

## LISA 5. Katuslae soojusjuhtivuse arvutus

Arvutustes kasutatud materjalide soojuseri juhtivused on võetud tabelist 3.1. ja ehitusmaterjalide paksused piirete kirjeldustest. Katuslae puhul on arvatav piire jagatud tsoonideks, et tööd lihtsustada.



Joonis 4.12. Katuslagi tsoonideks jagatuna

### Katuslagi

Soojustuse ja sõrestiku sektsiooni soojustakistus, vastavalt valemile (2):

$$R_1 = 0,1 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,15}{0,13} + \frac{0,05}{0,023} + 0,1 = 3,74$$

$$R_2 = 0,1 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,15}{0,023} + \frac{0,05}{0,023} + 0,1 = 9,11$$

$$R_3 = 0,1 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,15}{0,023} + \frac{0,05}{0,13} + 0,1 = 7,32$$

$$R_4 = 0,1 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + \frac{0,15}{0,13} + \frac{0,05}{0,13} + 0,1 = 1,95$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus, vastavalt valemile (6):

$$R'_T = \frac{0,05 \times 0,9 + 1,2 \times 0,9 + 0,2 \times 1,2 + 0,05 \times 0,2}{\frac{0,05 \times 0,09}{3,74} + \frac{1,2 \times 0,9}{9,11} + \frac{0,2 \times 1,2}{7,32} + \frac{0,05 \times 0,2}{1,95}} = 8,16 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Mittehomogeense materjalikihi soojustakistus, vastavalt valemile (8):

$$R_x = \frac{0,05 \times 0,9 + 1,2 \times 0,9 + 0,2 \times 1,2 + 0,05 \times 0,2}{\frac{0,05 \times 0,9}{\left(\frac{0,15}{0,13} + \frac{0,05}{0,023}\right)} + \frac{1,2 \times 0,9}{\left(\frac{0,2}{0,023}\right)} + \frac{0,2 \times 1,2}{\left(\frac{0,15}{0,023} + \frac{0,05}{0,13}\right)} + \frac{0,05 \times 0,2}{\left(\frac{0,2}{0,13}\right)}} = 7,68 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus, vastavalt valemile (7):

$$R_T'' = 0,1 + \frac{0,013}{0,25} + 0,16 + 7,68 + 0,1 = 8,09 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus, vastavalt valemile (4):

$$R_T = \frac{8,16 + 8,09}{2} = 8,13 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Suhteline arvutusviga, vastavalt valemile (9):

$$e = \frac{8,16 - 8,09}{2 \times 8,13} \times 100\% = 0,4 \%$$

Piirde soojusjuhtivus, vastavalt valemile (1):

$$U = \frac{1}{8,13} = 0,12 \frac{W}{m^2 \times K}$$

Õhupilude parandustegur puudub, kuna katuslae soojustusmaterjal kinnitati poliüretaanvahuga ja sellega elimineeriti õhu liikumine õhupilude kaudu. Samuti puudub ka soojustuskihi õhujuhtivuse parandustegur, kuna katuslae soojustusmaterjal on tihe.

## LISA 6. Akende soojusjuhtivuse arvutus

Akna soojusjuhtivus, vastavalt valemile (20):

$$U_{a,1} = \frac{0,82 \times 1,86 + 1,7 \times 0,71 + 0,06 \times 10,4}{1,86 + 0,71} = 1,31 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,2} = \frac{0,82 \times 1,05 + 1,7 \times 0,54 + 0,06 \times 7,82}{1,05 + 0,54} = 1,41 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,3} = \frac{0,82 \times 2,04 + 1,7 \times 0,62 + 0,06 \times 8,15}{2,04 + 0,62} = 1,21 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,4} = \frac{0,82 \times 0,73 + 1,7 \times 0,27 + 0,06 \times 3,43}{0,73 + 0,27} = 1,26 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,5} = \frac{0,82 \times 1,27 + 1,7 \times 0,48 + 0,06 \times 7,13}{1,27 + 0,48} = 1,31 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,6} = \frac{0,82 \times 0,75 + 1,7 \times 0,28 + 0,06 \times 3,46}{0,75 + 0,28} = 1,26 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,7} = \frac{0,82 \times 1,16 + 1,7 \times 0,34 + 0,06 \times 4,3}{1,16 + 0,34} = 1,19 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$U_{a,8} = \frac{0,82 \times 0,20 + 1,7 \times 0,05 + 0,06 \times 1,2}{0,20 + 0,05} = 1,28 \frac{W}{m^2 \times K}$$



## LISA7. Fotod



**Foto 1.** Katuse laudise vahetus



**Foto 2.** Tuuletõkkeplaadi paigaldamine põrandale



**Foto 3.** Põrandalaakide paigaldus



**Foto 4.** Põrandalaakide vahele paigaldatud puistevill ja aurutõkkepaberi paigaldamine





**Foto 5.** Välisseina roovitus



**Foto 6.** Puistevilla paigaldus seinakarkassi vahele



**Foto 7.** Üleliigse villa eemaldamine



**Foto 8.** Soojustatud välissein



**Foto 9.** Soojustatud katuslagi