



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**U03 ÕPPEHOONE REKONSTRUEERIMIS-
LAHENDUSED LÄHTUVALT OLEMASOLEVATEST
KÜTTE- JA JAHUTUSSÜSTEEMIDEST**

**RENOVATION SOLUTION OF U03 BUILDING BASED ON
EXISTING HEATING AND COOLING SYSTEMS**

MAGISTRITÖÖ

| | |
|----------------|-----------------------------|
| Üliõpilane: | Janar Laaneste |
| Üliõpilaskood: | EAKI153930 |
| Juhendaja: | Martin Thalfeldt, professor |
| Kaasjuhendaja: | Helena Kuivjõgi, doktorant |

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

"17 " mai 2021

Autor: Janar Laaneste

/allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"17" mai 2021

Juhendaja: Martin Thalfeldt

/allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Janar Laaneste (sünnikuupäev:23.02.1996)

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

U03 õppehoone rekonstrueerimislahendused lähtuvalt olemasolevatest kütte ja jahutussüsteemidest

(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on Martin Thalfeldt ja Helena Kuivjõgi,

(juhendajate nimed)

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

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

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

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

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/allkirjastatud digitaalselt /

17. mai 2021

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Janar Laaneste, EAKI153930

Õppekava, peeriala: EAKI02/15 Hoonete sisekliima ja veetehnika, Küte ja ventilatsioon

Juhendaja: Professor Martin Thalfeldt, +372 5209 657 (amet, nimi, telefon)

Kaasjuhendaja: Doktorant Helena Kuivjõgi, +372 5385 107 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *U03 õppehoone rekonstrueerimislahendused lähtuvalt olemasolevatest kütte ja jahutussüsteemidest*

(inglise keeles) *Renovation solutions of U03 building based on existing heating and cooling systems.*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada Taltech'i linnaku õppehoonele simulatsioonimudel ning võrrelda selle reaalsed energiatarvet määrusepõhise energiatarbega.
2. Analüüsida olemasoleva küttesüsteemi temperatuurialanduse potentsiaali ning jahutussüsteemi toimivust rekonstrueeritavas hoones.
3. Pakkuda välja lahendused mida rakendades oleks võimalik alandada hoone energiatarbimise klassi.

Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|----|--|------------|
| 1. | Kirjanduse ülevaate koostamine. | 02.03.2021 |
| 2. | Hoone mudeli koostamine simulatsioonitarkvaras IDA-ICE. | 07.03.2021 |
| 3. | Teostada loodud mudelile energiatarbimise arvutus põhinedes energiatarbimise määrustes toodud vabasoojustel ja hoone kasutusprofiilidel. | 14.03.2021 |
| 4. | Analüüsida hoone tegelikku energiatarbimist, projektdokumentatsiooni ja hooneautomaatikat. | 30.03.2021 |
| 5. | Vastavalt pt 4 saadud tulemustele teostada energiatarbimise arvutus tegelike vabasoojuste ja hoone kasutusprofiilidega. | 12.04.2021 |
| 6. | Modelleeritud ja mõõdetud energiatarbimise analüüs. | 19.04.2021 |
| 7. | Rekonstrueerimise lahenduste pakkumine, ning nende mõju analüüs energiatarbele ja olemasolevatele tehnosüsteemidele. | 26.04.2021 |
| 8. | Töö tulemuste süstematiseerimine ja selle ülevaatlikuks esitamiseks jooniste ning tabelite tegemine. | 03.05.2021 |
| 9. | Lõputöö kokkukirjutamine | 11.05.2021 |

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "17" mai 2021a

Üliõpilane: Janar Laaneste "17" mai 2021. a
/allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Martin Thalfeldt "17" mai 2021. a
/allkirjastatud digitaalselt /

Kaasjuhendaja: Helena Kuivjõgi "17" mai 2021. a
/allkirjastatud digitaalselt /

/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

| | |
|---|-----------|
| EESSÕNA | 8 |
| Lühendid ja mõisted | 9 |
| SISSEJUHATUS | 10 |
| KIRJANDUSE ÜLEVAADE | 11 |
| 1 TEOREETILISED ALUSED | 13 |
| 1.1 Riigi visioon | 13 |
| 1.2 Energiatõhususe miinimumnõuded | 13 |
| 1.3 Hoonete energiatarve | 14 |
| 1.4 Tasakaalutemperatuur | 14 |
| 1.5 Sisekliima | 15 |
| 2 METOODIKA | 16 |
| 2.1 Objekti kirjeldus | 16 |
| 2.2 Simulatsioonimudel..... | 27 |
| 2.3 Hoone soojavarustus..... | 31 |
| 3 HOONE ENERGIATARVE | 35 |
| 3.1 Hoone simulatsioonimudeli kalibreerimine..... | 35 |
| 3.2 Hoone tegeliku kasutuse baasaasta | 37 |
| 4 HOONE SOOJUSVARUSTUS | 42 |
| 4.1 Radiaatorite soojusväljastus..... | 42 |
| 4.2 Püstikute soojusväljastus | 42 |
| 4.3 Soojusvahetid..... | 43 |
| 4.4 Tsoonide küte..... | 44 |
| 5 REKONSTRUEERIMISLAHENDUSED JA ENERGIASÄÄST | 48 |
| 5.1 Renoveerimise pakett 1..... | 48 |
| 5.2 Soojuskaod läbi piirdetarindite | 49 |
| 5.3 Jahutus..... | 50 |
| 5.4 Soojusbilanss..... | 51 |
| 5.5 Temperatuurigraafiku alandamine..... | 51 |
| 5.6 Tsoonide analüüs | 54 |
| 5.7 Küttesüsteemi temperatuurigraafik..... | 56 |
| 5.8 Rekonstrueerimislahenduse erienergiakasutus | 56 |

| | |
|---|-----------|
| 6 TÄIENDAVID MEETMED ENERGIATÖHUSUSE PARANDAMISEKS | 58 |
| <i>6.1 LED valgustus</i> | <i>58</i> |
| <i>6.2 Ventilatsioon</i> | <i>58</i> |
| <i>6.3 PV paneelid</i> | <i>58</i> |
| <i>6.4 ETA</i> | <i>59</i> |
| KOKKUVÖTE..... | 61 |
| SUMMARY | 63 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 65 |
| LISAD | 67 |

EESSÕNA

Antud lõputöö sõnastati Tallinna tehnikaülikooli professori Martin Thalfeldti poolt. Kuigi algselt töö eesmärgist seatud projekti „DigiAudit“-i jaoks mõeldud hoone energiatõhususe analüüsist kasvas välja teine teemaarendus, siis oli võimalik Martin Thalfeldti ja Helena Kuivjõgi abiga kogutud andmeid kasutada olemasoleva magistritöö teostamiseks.

Käesoleva magistritöö tulemusel loodi Tallinna tehnikaülikooli õppehoonest U03 energiasimulatsioon, mille abil hinnata erinevate võimalike rekonstrueerimislahenduste mõju hoones olevatele küttesüsteemi temperatuurigraafikule ning jahutussüsteemi toimivusele. Töö autor soovib tänada juhendajaid Martin Thalfeldti ning Helena Kuivjõgi konstruktiivse juhendamise ning innustuse eest lõputöö koostamisel.

Võtmesõnad:

Temperatuurigraafik

Energiasimulatsioon

Küttesüsteem

Energiatõhusus

Kaugküttevõrk

Magistritöö

Lühendid ja mõisted

| | |
|---------------------|---|
| ESEER | Jahutusseadme tootja poolt antud jahutusperioodi keskmine jahutustegur, mis on arvatud vastavalt Euroopa standarditele, lähtudes tinglikust Euroopa keskmisest jahuti kasutusprofiilist ja -tingimustest, ning milles ei arvestata kondensaatori ventilaatori ja pumba elektritarve |
| ETA | Energiatõhususarv, kWh/(m ² ·a) – arvutuslik summaarne tarnitud energiatega kaalutud erikasutus hoone standardkasutusel, millest arvatakse maha summaarne eksporditud energiatega kaalutud erikasutus |
| Erikasutus | Aastane energiakasutus kilovatt-tundides hoone köetava pinna ruutmeetri kohta [kWh/(m ² ·a)] |
| IDA-ICE | IDA Indoor Climate and Energy 4.8 – simulatsioonitarkvara |
| Kasutus- profiil | Ruumi kasutusaste valgustuse, seadme ja inimese soojuseralduse suhtena maksimaalsesse soojuseraldusse |
| KEK | Kaalutud energiakasutus kWh/(m ² ·a) – hoonesse tarnitud energiatega kaalutud erikasutus hoone reaalsel kasutusel, millest on maha arvestatud eksporditud energiatega erikasutus |
| SFP | Ventilatsiooni elektriline erivõimsus, kW/(m ³ ·s) – kogu hoone või ühe ventilatsioonisüsteemi poolt tarbitava summaarse elektrivõimsuse ja transporditava õhuvoolu suhe. |
| Taltech | Tallinna Tehnikaülikool |
| VAT | Välisõhu arvutuslik temperatuur, °C |

SISSEJUHATUS

Seoses keskkonnasäästliku poliitikaga on Euroopa liit endale seadnud eesmärgiks olla aastaks 2050 kliimaneutraalne. Eesmärgi täitmiseks peab iga liikmesriik konkreetse tegevuskava endale ise paika seadma ning kuna hoonete renoveerimine moodustab energiasäästust märkimisväärse osa, siis on Eesti koostanud 2020 aastal tegevuskava „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia“ [1]. Antud strateegia annab ülevaate olemasolevast hoonefondist ja selle renoveerimise mahust ning seab eesmärgiks olemasoleva hoonefondi tervikliku rekonstrueerimise energiatõhususe C-klassile.

Koos hoonete energiatõhususe parandamisega tuleb kasutusele võtta ka efektiivsemad ning kliimaneutraalsemad soojuse tootmislahendused, mis eeldab madalamate temperatuurigraafikutega kaugküttevõrke. Soojuskandja temperatuuride vähendamisega kaugküttevõrgus minimeeritakse kaugküttetrassi soojuskaod ning luuakse eeldused koostootmisjaamade efektiivsusse tõusuks ning roheenergeetika kasutusele võtmiseks. Olemasolevates kaugküttetrassides on optimaalseimaks lahenduseks vähendada soojuskandja temperatuure 60 kuni 70 kraadini, [2] mis on vajalik kuuma tarbevee tagamiseks. Selle teostamiseks tuleb hinnata tarbijate soojusenergia vajadust ning leida meetodid tarbijapoolse temperatuurigraafiku alandamiseks.

Antud magistritöö esimeses osas antakse ülevaade uuritava hoone, Tallinna Tehnikaülikooli U03 õppehoone, olukorrast ning töö metoodikast. Teises osas luuakse hoonest tunnipõhine energiatarbesimulatsioon, mis on kalibreeritud vastavalt hoone teostusdokumentatsioonile ja moodustatud energiakulule. Töö kolmandas osas antakse ülevaade hoone baasaasta energiabilansist ning analüüsitakse selle temperatuurigraafikute alandamise võimalusi.

Töö neljandas osas pakutakse välja kaasaegne renoveerimislahendus ning analüüsitakse selle mõju hoone küttesüsteemi soojusväljastusele ja temperatuurigraafikule. Eelduste kohaselt on võimalik hoone küttekulu vähendada 2/3-ndikku võrra, mille arvelt saab küttesüsteemi temperatuurigraafiku pealevoolu alandada vähemalt 60-ne kraadini, kui mitte rohkemgi. Küttesüsteemi sekundaarpoole hüdraulilise tasakaalu huvides on temperatuurigraafiku alandamisel tähtis säilitada olemasolev temperatuurilang hoone küttesüsteemis. Töö viiendas osas analüüsitakse pakutud rekonstrueerimislahenduse mõju hoone energiamärgisele ning pakutakse lahendusi energiamärgise täiendavaks alandamiseks.

KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Esimesed soojusvõrgud hoonete kütmiseks rajati juba 19-ndenda sajandi lõpus Ameerika Ühendriikides. Kui algsetes soojusvõrkudes kasutati kõrgeid temperatuure ja soojuskandjaks oli veeaur, siis aja möödudes lahendusi täiustati. Juba 20nenda sajandi esimesel poolel võeti kasutusele soojuskandjaks vesi, kuid süsteemi hoiti piisava rõhu all, kasutamaks soojuskandja temperatuur üle 100 °C. Kuna sellega kaasnesid suured soojuskaod kaugkütte võrkudes, siis otsiti paremaid lahendusi. Alles 1970-nendatel hakati maailmas kasutama „*Skandinaavia soojusvõrkude tehnoloogiat*“ ehk kolmanda generatsiooni kaugkütte lahendust, mille pealevoolu temperatuuri oli võimalik tuua alla saja kraadi. [3]

Tänapäeval on kolmanda generatsiooni kaugkütte lahendus kasutusel enamus maailmas, kuid uute ja energiatõhusamate soojusjaamade ning koostootmisjaamade kasutusele võtmiseks tuleb kaugküttevõrgu pealevoolu temperatuuri veelgi alandada. Madalatemperatuuriliste kaugküttelehenduste kasutuselevõtt on äärmiselt vajalik Euroopa kliimaeesmärkide saavutamiseks. [3] Temperatuurigraafiku alandamiseks kaugküttesüsteemis on vaja vähendada nii kaugkütte soojuskadusid kui ka tarbijate soojusvajadust. Kui tänapäevaste liginullenergiahoonete küttekulu on suurusjärgus 25 kWh/m²·a, siis renoveerimata vanades hoonetes võib see olla kuni 200 kWh/m²·a. [4, 5]

Kuigi soojusvõrgu efektiivsusele annab efekti ka võrgu enda olukorra kvaliteet, siis peamine temperatuurialandamise potentsiaal on siiski tarbijate poolel. Kuna küttesüsteemid on hoonetesse tihti projekteeritud mõningase varuga ning ilma vabasoojusi arvestamata, siis juba süsteemi seadistamisel on võimalik temperatuurigraafikut alandada vähemalt mingil osal aastas. [4, 6, 7]

Taanis läbiviidud uuringute põhjal on suurim potentsiaal temperatuurigraafikuid alandada eramajade rajoonides, kus ligikaudu 70% küttesüsteemidest ei ole seadistatud optimaalsele temperatuurigraafikule. Østergaardi ja Svendseni töö [6] näitel oli neljas 1930nendatel ehitatud eramul võimalik küttesüsteemi temperatuurigraafikuid alandada 50/27/20°C-le, kuigi hoonete piirdetarindid ei vastanud tänapäevastele nõuetele ning soojuskaod olid üle 100 W/m². Kaasaegsemates eramutes oli võimalik radiaatorkütte pealevoolu temperatuuri alandada lausa 45 kraadini. [7]

Rootsis läbiviidud uuringus jõuti järelduseni, et kuigi tehtud renoveerimistöõde, vabasoojuste ning süsteemi tasakaalustamise tulemusel on võimalik kortermajade

temperatuurigraafikuid alandada, siis soojusvõrgus märkimisväärse mõju saavutamiseks on vaja hooned täielikult renoveerida. [8] Tarbijapoolse soojusenergia nõudlust on vaja alandada, sest ainuüksi soojusvõrgu temperatuurigraafiku alandamisel väheneb võrgu temperatuurilang ning kasvavad kulud soojuskandja pumpamisele, mille tõttu märkimisväärsed säästu süsteemis ei saavutata.

Ommen, Markussen ja Elmegraad on jõudnud järelduseni, et olemasolevad kaugküttesüsteemides on mõistlik alandada pealevoolu temperatuur 60 kuni 70 kraadini. Kuigi kuuekümnest kraadist madalamatele temperatuuridele on võimalik kasutada vähem keskkonda mõjutavaid küttelehendusi, siis ei taga soojusvõrgu pealevoolu temperatuur 50°C tarbijale sooja tarbevee tootlikust. Seetõttu tuleks madalamatel pealevoolu temperatuuridel kasutada kaugküttesüsteemi sekundaarpooles elektrilise lisakalorifeere, mis suurendaks märgatavalt tarbija kulutusi nii soojussõlmele kui sooja tarbeveele kasutusele. [2] Sellegipoolest on teema aktuaalne, sest vähendades kaugkütte temperatuurigraafikut 80/40°C pealt 60/30°C-ni saavutatakse lisaks efektiivsemale soojustootmisele ka ligikaudu 30%-line soojuskadude vähenemine kaugkütte trassides. [7]

1 TEOREETILISED ALUSED

1.1 Riigi visioon

Suutmaks täita riigile võetud kliimaeesmärke on pandud paika strateegia konkreetsete eesmärkide saavutamiseks. [1] Mõtestatud tegevuse heaks eeskujuks on võtta Taani, kes tänu oma konservatiivsele energiapoliitikale ja efektiivsete lahenduste kasutuselevõetuga on suutnud üle kolmekümne aasta hoida riigi primaarenergia vajadust samal tasemel. [9] Ka Eestis on viimasel aastakümnel toimunud selles osas märgatav areng. Riigi loodud KredExi mehhanismid arendavad jätkusuutliku ning teadusel põhinevaid rekonstrueerimislahendusi ning 2018 aastal välja töötatud „Tõhusa kaugküte“ statuut motiveerib kaugküttevõrkude haldajaid kasutama efektiivsemaid tootmislahendusi. Märgis antakse kaugküttesüsteemile, „*milles kasutatakse vähemalt 50% taastuvenergiat või 50% heitsoojust või 75% koostoodetud soojust või 50% sellise energia ja soojuse kombinatsiooni.*“ Tänapäevaks on „Tõhusa kaugküte“ tunnustus antud 94-neljale kaugküttesüsteemile 215-st. [10]

1.2 Energiatõhususe miinimumnõuded

Uutele ning renoveeritud hoonetele kehtivate energiatõhususe miinimumnõuetega seatakse ette piirmäärad hoonete summaarsele energiatarbele. Nõuete tõendamiseks kasutatakse energiavajaduse arvutamiseks piisava täpsuse saavutamiseks dünaamilist simulatsiooniarvutust. [11] Nõuded eri kasutusotstarbega hoonete energiatõhususele on välja toodud tabelis 1.

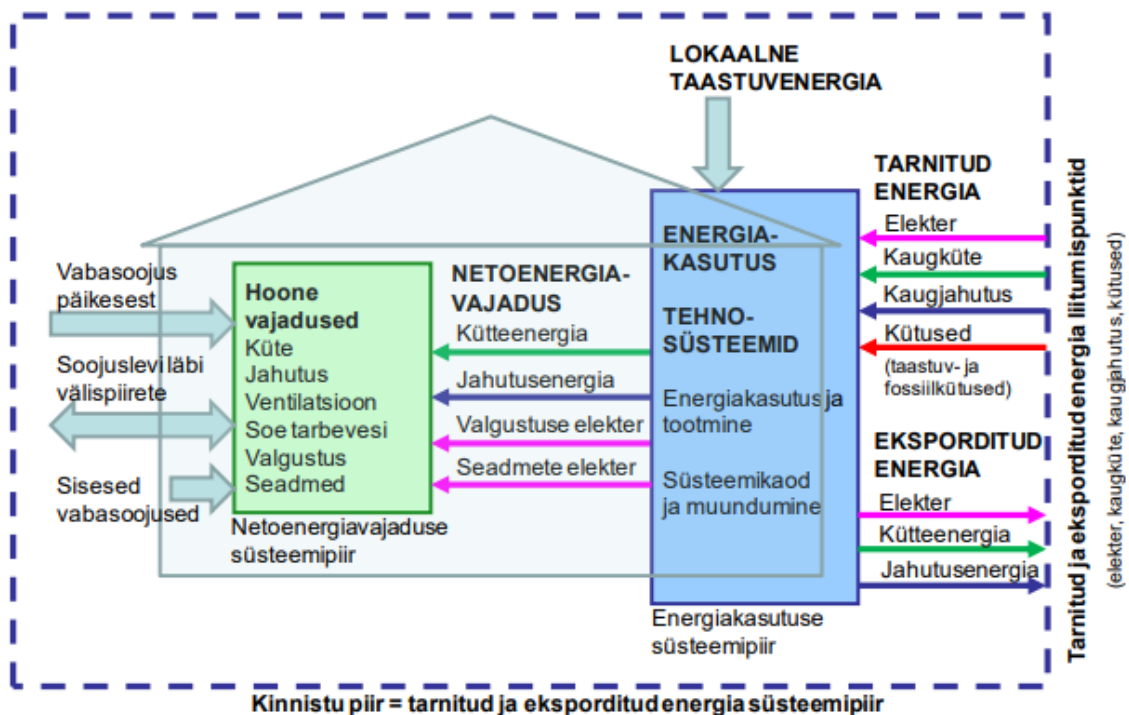
Tabel 1 Kontori- ja haridushoone energiatõhususarvude piirväärtused [11]

| Hoonete energiatõhususarvude piirväärtused | Klass | kWh/(m²·a) |
|--|--------------|------------------------------|
| Liginullenergiahoonete energiatõhususarvude piirväärtused. Kontorihoone | A | 100 |
| Liginullenergiahoonete energiatõhususarvude piirväärtused. Haridushoone | A | 100 |
| Madalenergiahoonete energiatõhususarvude piirväärtused. Kontorihoone | B | 130 |
| Madalenergiahoonete energiatõhususarvude piirväärtused. Haridushoone | B | 120 |
| Oluliselt rekonstrueeritavate hoonete energiatõhususarvude piirväärtused Kontorihoone | C | 160 |
| Oluliselt rekonstrueeritavate hoonete energiatõhususarvude piirväärtused Haridushoone | C | 160 |

1.3 Hoonete energiatarve

Hoonete energiatõhususarvu ETA arutamiseks tuleb leida hoone netoenergiavajadus. ETA märgistus arvestab nii imporditud energia kogusega kui ka selle liigiga. Näiteks on elektri kasutustegur vastavalt määrusele nr 58 [12] korrutatud kahega ja kaugkütte soojusenergia 0,9-ga, mis väheneb 0,65-ni juhul kui kaugküttevõrgule on omistatud „Tõhusa kaugküte“ märgis. Kaalumistegurid on vajalikud tarnitud energia keskkonnamõju hindamiseks.

Tarnitud ja eksporditud energia süsteemi piiir



Joonis 1 Hoone eksporditud ning imporditud energiatarve süsteemi piiir [12]

1.4 Tasakaalutemperatuur

Kraadpäevade kasutamine võimaldab erinevate hoonete soojuskasutuse viia ühtsele normaasta baasile, kus eri aastate kliimaolude mõjud soojuskasutusele on kõrvaldatud. Hoone siseõhu temperatuur koosneb vabasoojustest ning kütteenergia koosmõjust. Vabasoojuste arvelt väheneb hoonete küttevajadus ligikaudselt 10-15% mille tulemusel tõuseb siseõhu temperatuur keskmiselt 3°C võrra. [13]

1.5 Sisekliima

Hoonete sisekliima tagavad hästi projekteeritud kütte-, ventilatsiooni-, ning jahutussüsteemid. Kuna inimesed viidavad suure osa oma elust siseruumides, siis sobilik sisekliima on äärmiselt tähtis nii tervise kui töö produktiivsuse aspektist. [14] Lisaks sobivale ruumitemperatuurile sõltub sisekliima ka akustikast, õhu kvaliteedist ning ruumi valgustusest. [15]

1.5.1 Sisekliima klassid ja piirväärtused

Standard ESV-EN 16798-1:2019 jagab sisekliima kolme klassi lähtuvalt siseõhu kvaliteedist, ruumi soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja aukustikast. Kontoris ja klassiruumides on nõutud valgustihedus 500lx. [16, 17]

Tabel 2 Sisekliimale esitatavad nõuded [16]

| | Sisekliima klass | | |
|--|------------------|---------|---------|
| | I | II | III |
| PPD – Prognoositud rahulolematute protsent, % | < 6 | < 10 | < 15 |
| Ruumi temperatuur kontoris ja sarnase tegevusega ruumis, Istuv tegevus ~ 1,2 met | 21...25,5 | 20...26 | 19...27 |
| Ventilatsiooni õhuvooluhulk ühe inimese kohta, l/s | 10 | 7 | 4 |
| CO ₂ kontsentratsioon | 550 | 800 | 1350 |

2 METOODIKA

Uurimistöö teostamiseks on esmalt tutvutud uuritava hoone lähteandmetega. Seda on tehtud nii vaatluse teel kui ka läbi projektidokumentatsiooni. Õppehoonel U03 on olemas 2006 ja 2012 aasta rekonstrueerimiselahendused ning nende teostusdokumentatsioon. Olemasolevad arhitektuursed plaanid, vaated, lõiked ning eriosade joonised on piisvad hoone simulatsioonimudeli koostamiseks.

2.1 Objekti kirjeldus

Ehitajate tee 5/3 asuv õppehoone on ehitatud aastal 1966. Hoone on jagatud kaheks osaks: A korpus on 5-korruseline telliskivist hoone, kus toimib statsionaarne õpe ning B korpus on kolme korruseline metallkarkassist hoone, mille alumistel korrustel asuvad materjalide laboratooriumid ning ülemistel korruselt ülikooli personali kabinetid. Õppehoone U03 viimane suurem renoveerimine teostati aastal 2006, mille käigus vahetati hoones aknad, uuendati fassaadi ning tehnosüsteeme. Saavutamaks ülikooli linnakule seatud kliimanetraalsuse eesmärgi, planeeritakse tulevikus õppehoone renoveerida liginullenergiahooneks.



Joonis 2 Taltech'i linnak. Allikas Ehitusregister



Joonis 3 Taltech'i linnak. Allikas Tallinna Tehnikaülikool

2.1.1 Õppehoone U03 üldandmed

Tabel 3 Hoone üldandmed

| | |
|---|--|
| Hoone aadress | Ehitajate tee 5/3 |
| EHR kood | 101026151 |
| Ehitusaasta | 1966 |
| Hoone kasutamise otstarve | 12634 Ülikooli, rakendus kõrgkooli õppehoone |
| Korruste arv | 5 |
| Ehitusalune pind | 2826 m ² |
| Suletud netopind ¹⁾ | 6459 m ² |
| Köetav pind | 5502 m ² |
| Köetav pind koos viienda korrusega ² | 6008 m ² |
| Maht | 30459 m ³ |

Tabel 4 Õppehoones teostatud suuremad renoveerimistööd

| Aasta | Selgitus |
|-------|---|
| 2006 | Tehnosüsteemide kapitaalremont |
| 2006 | Akende vahetus kahekordse klaaspaketi vastu |
| 2012 | Jahutussüsteemi laiendamine |

¹ Suletud netopind on võetud õppehoone projektist ja erineb ehitusregistris olevast väärtusest.

² Hoone köetav pind on võetud õppehoone projektist ja erineb ehitusregistris olevast väärtusest. ETA arvutustes on köetavaks pinnaks loetud ka viienda korruse köetud tehnoruumed.

2.1.2 Konstruksioon

Hoone 2006 aasta rekonstrueerimise käigus ei keskendunud välispiirete soojuslähivuse parandamisele. Peamine eesmärk oli korrastada fassaad ning ehitada välja kaasaegsed tehnosüsteemid, mis tagaksid ruumide sisekliima. Täpsema ülevaate tarindite kohta saab lisast 1 ning nende üldise osakaalu ja soojusjuhtivuse tabelist 5 ja 6. Sõlmalahendused hoone projektis puuduvad ning külmasildade puhul on kasutatud IDA-ICE „Internal“ külmasildade „Typical“ ja „Poor“ vahepealseid väärtuseid mille graafiline esitus on toodud joonisel 4 ning arvutuslikud väärtused tabelis 6.

Tabel 5 Hoone konstruktsioonide väljavõtte simulatsiooniprogrammist IDA ICE

| Hoone piirdetarindid | Pindala, m ² | Soojusjuhtivus, W/(m ² ·K) | U·A, W/K | Piirde- tarindi osakaal, % |
|--|-------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Välisseinad | 2540,63 | 0,44 | 1129,33 | 16,62 |
| VS-07 terasprofiil + krohv | 101,56 | 0,26 | 26,54 | 0,39 |
| VS-03 krohv fassaad | 335,44 | 0,36 | 121,3 | 1,79 |
| VS-06 betoon + krohv fassaad | 122,43 | 0,3 | 37,32 | 0,55 |
| VS-05 betoon + telliskivi fassaad | 95,69 | 0,28 | 27,07 | 0,4 |
| VS-01(02) Telliskivi fassaad | 1885,5 | 0,49 | 917,1 | 13,5 |
| Sokli seinad | 677,58 | 0,68 | 458,62 | 6,75 |
| VS-09 U03b sokli sein | 116,99 | 0,32 | 36,97 | 0,54 |
| VS-11 sokli sein, raudbetoon | 560,6 | 0,75 | 421,66 | 6,21 |
| Katus | 1550,78 | 0,26 | 408,34 | 6,01 |
| KK-02 soojustus + plekkprofiil | 441,45 | 0,19 | 83,04 | 1,22 |
| KK-01 EPS + õõnespaneel | 1109,33 | 0,29 | 325,3 | 4,79 |
| Põrand pinnasel | 834,46 | 0,27 | 224,32 | 3,3 |
| PK-1 Betoon + XPS | 296,05 | 0,22 | 66,36 | 0,98 |
| PK-2 Betoon + TEP plaat | 538,41 | 0,29 | 157,95 | 2,32 |
| Põrand pinnasel (kõrgemal maapinnast) | 785,87 | 0,6 | 469,2 | 6,91 |
| PK-2 Betoon + TEP plaat | 785,87 | 0,6 | 469,2 | 6,91 |
| Aknad | 1069,42 | 2,72 | 2908,83 | 42,81 |
| Kahekordne klaaspakett | 1069,42 | 2,72 | 2908,83 | 42,81 |
| Uksed | 22,37 | 1,71 | 38,14 | 0,56 |
| EST 2019 Standard uks | 22,37 | 1,71 | 38,14 | 0,56 |
| Külmasillad | 0 | 0 | 1158,73 | 17,05 |
| Kokku | 7481,12 | 0,91 | 6795,51 | 100 |



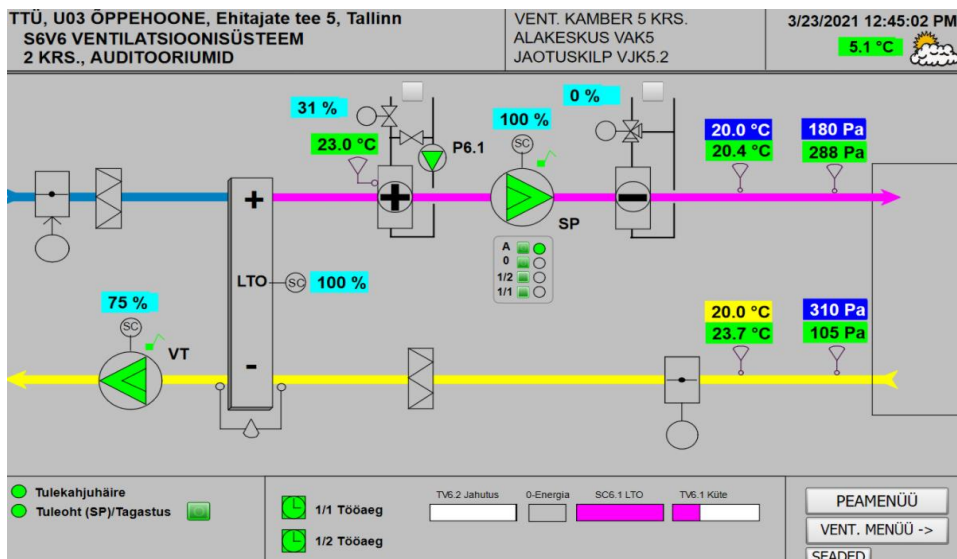
Joonis 4 Külmasilda graafiline väärtus simulatsiooniprogrammist

Tabel 6 Hoone külmasildade arvutuslikud väärtused

| Joonkülmasild | $\psi_j, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | I_j, m | $H_{\text{joonsl}}, \text{W}/\text{K}$ |
|--|--|-----------------|--|
| Välissein-Välissein | 0.13 | 141.8 | 18.1 |
| Välissein-Katuslagi | 0.27 | 482.9 | 128.9 |
| Põrand pinnasel - välissein | 0.58 | 413.0 | 239.5 |
| Akna seinakinnitus | 0.22 | 2736.2 | 602.0 |
| Ukse seinakinnitus | 0.22 | 45.2 | 9.9 |
| Välissein-sisesein | 0.06 | 479.3 | 29.0 |
| $H_{\text{joonsl}}, \text{W}/\text{K}$ | | | 1027.5 |

2.1.3 Tehnosüsteemide ülevaade

Info õppehoone tehnosüsteemidest on saadud hoone projektist ning vaatluse tulemusel. Õppehoone soojusvarustus on tagatud linnaku soojusjaamaga, mis on ühendatud õppehoonega keldrikorrusel. Sisekliima tagamiseks on hoonesse paigaldatud 2006 aastal soojustagastusega sundventilatsioon ning jahutusseadmed arvutiklassidesse. Hiljem, aastal 2012, lisati hoone katusele külmajaam, mis suudab ventilatsiooniõhu jahutada kuni 14 °C-ni. Hoone tehnosüsteemid on seotud automaatikasüsteemiga mille abil on andmed saadetud õppehoone haldusprogrammi, kus on neid võimalik monitorida. Vajadusel saab hoone haldaja tehnosüsteemide tööd ning ruumiõhu temperatuure ümber seadistada läbi hoone haldusprogrammi.



Joonis 5 Kuvatõmmis hoone haldusprogrammist. Tumesinine – Manuaalselt seadistatav seadeväärtus, Roheline – Mõõdetud väärtused, Helesinine – reaalsed väärtused mis on arvutatud automaatika poolt, et seadeväärtused oleks sobivas vahemikus.

2.1.4 Soojussõlm

Õppehoone U03A ja U03B korpuses on eraldiseisvad soojussõlmed, mis on ühendatud sõltumatu ühendusskeemiga Taltech'i ülikooli linnaku gaasikatlamajaga. Kaugkütte trassi arvutuslikuks pealevoolu temperatuuriks on 110 °C ja tagasivoolu temperatuuriks 70°C. Soojussõlmes on eraldi soojusvahetid tarbevee soojendamiseks, ruumide kütteks ning ventilatsiooniõhu soojendamiseks, mis välja toodud tabelis 7. Kütte- ning ventilatsioonisüsteemide pealevoolu temperatuuri juhitakse kvalitatiivselt välistemperatuuri järgi, küttesüsteemi temperatuurigraafik on esitatud joonisel 6.

Tabel 7: Õppehoone U03 tehnosüsteemid

| Süsteem | Tähis | Võimsus, kW | Prim, Temp °C | Sek, Temp °C | Soojusvaheti tüüp | Pump |
|------------------------|-------|-------------|---------------|--------------|-------------------|------------|
| Jahutus 2012 | | 255,4 | 4/9 | 7/12 | XB 70L-1 180 | Danfoss |
| Jahutus 2006 | | 54 | | | | |
| U03A Soojussõlm | | | | | | |
| Tarbevesi | LS01 | 85 | 65/25 | 55/10 | M18-40 (WP418) | UP 25-55B |
| Küte | LS02 | 350 | 110/70 | 95/70 | L-57-40 (WP757) | UPS 40-120 |
| Ventilatsioon | LS03 | 100 | 110/70 | 80/60 | L-18-40 (WP418) | UPS40-120 |
| U03B Soojussõlm | | | | | | |
| Tarbevesi | LS01B | 40 | 65/25 | 55/10 | M18-20 (WP418) | UP 25-55B |
| Küte | LS02B | 65 | 110/70 | 70/50 | GBS 100 (WP1) | UPS 40-120 |
| Ventilatsioon | LS03B | 145 | 110/70 | 80/60 | L25-50 (WP525) | UPS40-120 |
| Kokku | | | | | | |
| Tarbevesi | | 125 | | | | |
| Küte | | 610 | | | | |

Hoone tarbevee soojendamise koguvõimsuseks on 125 kW ja kütte võimsuseks 640 kW, millest 415 kW moodustab ruumide kütte ja 245 kW ventilatsiooniõhu soojendamine.

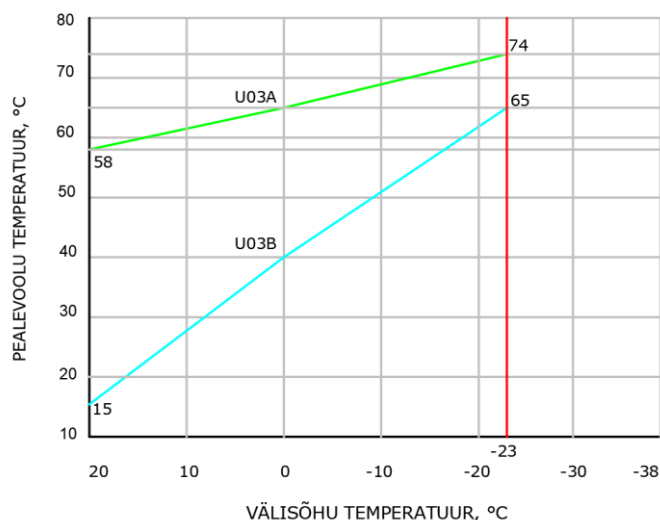
2.1.5 Ruumide küte

2006 aastal renoveerimise käigus muudeti olemasolev ühetoru küttesüsteem altjaotusega vertikaalseks kahetoruküttesüsteemiks. Küttesüsteemi isoleeritud magistraaltorustik paikneb keldri ja esimese korruse laes ning ülemiste korruste küttekehade ühenduseks on radiaatorite kõrval püstikud. U03A õppehoone osas on kasutuses malmradiaatoreid ning U03B osas on paigaldatud uued paneelradiaatorid.

Radiaatorite temperatuuri esimese astme reguleerimine toimub läbi hoone automaatika vastavalt välisõhu temperatuurile. Ruumide temperatuuri individuaalseks reguleerimiseks on radiaatoritele paigaldatud eelseadeventiilid ja ajamiga termostaatventiilid, mis võimaldavad täielikult ära kasutada ruumides oleva

vabasoojuse. Vältimaks samaaegset kütmist ja jahutamist on samas ruumis olevate radiaatorkütte ning jahutusseadmete ventiilid omavahel ühendatud.

Küttesüsteemi seadeväärtusi on võimalik muuta vaid hoone haldajal, läbi selleks ettenähtud haldusprogrammi. Kuigi hoone kütte projektis on U03A ja U03B korpuse pealevoolu temperatuurid vastavalt 95 ja 70 °C siis hoone automaatikas on küttegaafikud ümber seadistatud vastavalt joonisele 6.



Joonis 6 Õppehoone küttesüsteemide pealevoolu temperatuurigraafik vastavalt välisõhu temperatuurile.

Radiaatorid

U03A õppehoone korpuses on kasutatud MS-140-500 tüüpi malmsektsoonradiaatoreid, mille suurimaks eeliseks on selle töökindlus ning vastupidavus korrosioonile ja agressiivsele keskkonnale. [13] Radiaatorid suudavad vastu pidada temperatuurini kuni 130°C ja rõhuni kuni 9 baari. U03B õppehoone korpusesse on jäänud MS-140-500 tüüpi küttekehad vaid mehaanika laboratoriumisse U03B-114, ülejäänud korpusesse on paigaldatud Purmo „VKO“ ja „Compact“ paneelradiaatorid.

Tabel 8 Malmradiaatori MS-140-500 tehnilised andmed

| Radiaator MS-140-500 | |
|--------------------------------------|----------------------|
| Ühenduste vahe | 500 mm |
| Sektsooni kõrgus | 588 mm |
| Sektsooni laius | 108 mm |
| Sektsooni ekvivalentpindala | 0,208 m ² |
| Sektsooni soojuskandja mahtuvus | 1,45 l |
| Sektsooni kaal (ilma soojuskandjata) | 7,1 kg |
| Sektsooni soojusväljastus 95/70/20°C | 160 W |



Joonis 7 U03B korpusesse paigaldatud Purmo plekkradiaatorid

2.1.6 Ventilatsioon

Hoone ventilatsioonisüsteemis on kokku üheksa suurt ventilatsiooniagregaati ning kuus väljatõmbeventilaatorit U03A õppehoone viiendal korrusel asuvas tehnilises ruumis paiknevad S1/V1, S2/V2, S2/V3, S4/V4, S5/V5, S6/V6, S7/V7 ja V8 ventilatsiooniseadmed. U03B korpusesse katusel asub S11/V11, V13 ning kolmandal korrusel S12/V12 ventilatsiooniseadmed. Laborite ja katseruumide teenindamiseks on U03B korpusesse paigaldatud väljatõmbe ventilaatorid KV1, KV2, KV3, ja KV4 mis töötavad nõudluspõhiselt. Ventilatsiooniseadmete täpne asukoht ja teeninduspiirkonnad on välja toodud tabelis 11 ja joonisel 8.

Ventilatsiooniseadmete tööd on võimalik läbi hoone haldusprogrammi monitoorida ja juhtida. Sagedusmuundurid on paigaldatud seadmetele S3/V3, S4/V4, S5/V5 S6/V6, S7/V7, S12/V12. Sissepuhke õhutemperatuur jääb vahemikku 18 kuni 23 kraadi ning seda juhitakse vastavalt väljatõmbe temperatuurile. Õhuvooluhulk on vähendatud 50 % võrra kui välisõhu temperatuur langeb alla 8°C.

Hoone sissepuhke õhuvooluhulk on 10 784 l/s, mis teeb õhuvahetuse kоекud pinna kohta 1,89 l / (s · m²) ning suletud netopinna kohta 1,67 l / (s · m²)

Ventilatsioonisüsteemidele lisati 2012 aasta renoveerimise käigus vesijahutus-kalorifeerid. Ventilatsiooniõhu jahutus on projekteeritud tööle, kui ruumide temperatuur ehk väljatõmbe temperatuur tõuseb üle 24 °C. Kuigi jahutusvõimsus on piisav alandamiseks sissepuhke temperatuuri 14-nele kraadile siis, tõenäoliselt tõmbuse tekkimise vältimiseks on ka suveajal jäetud sissepuhke temperatuuri seadeväärtuseks 20°C.

Tabel 9: U03 Ventilatsioon, projekteeritud

| Süsteem nimi | Seade | SP, l/s | SP, l/(s·m ²) | SP võimsus, kW | VT, l/s | VT võimsus, kW | Küte, kW |
|--------------|----------|---------|---------------------------|----------------|---------|----------------|----------|
| S1/V1 | EC-04 | 1430 | 1,4 ¹ | 4,0/0,6 | 875 | 1,4/0,18 | 19 |
| S2/V2 | EC-03 | 702 | 1,8 ¹ | 1,85/0,25 | 702 | 1,4/0,18 | 10 |
| S3/V3 | EC-04 | 1220 | 3,4 | 2,2 | 1220 | 2,2 | 14 |
| S4/V4 | EC-03 | 720 | 3,8 | 1,5 | 720 | 1,5 | 8 |
| S5/V5 | EC-04 | 1220 | 5,3 | 2,2 | 1220 | 2,2 | 17 |
| S6/V6 | EC-04 | 1072 | 4,5 | 2,2 | 1072 | 1,5 | 13 |
| S7/V7 | EC-03 | 900 | 2,9 | 2,2 | 600 | 1,1 | 12 |
| V8 | CT280-4 | | | | 584 | 1,3 | |
| S11/V11 | | 800 | 1,1 | - | 600 | - | 25 |
| S12/V12 | | 2720 | - | - | 1300 | - | 120 |
| V13 | CT225-4 | | | | 250 | | |
| KV1 | DKEK 225 | | | | 220 | | |
| KV2 | DKEK 280 | | | | 750 | | |
| KV3 | DKEK 280 | | | | 600 | | |
| KV4 | DKEK 280 | | | | 600 | | |

Tabel 10 Mõõdistatud õhuvooluhulgad ning SFP-ed.

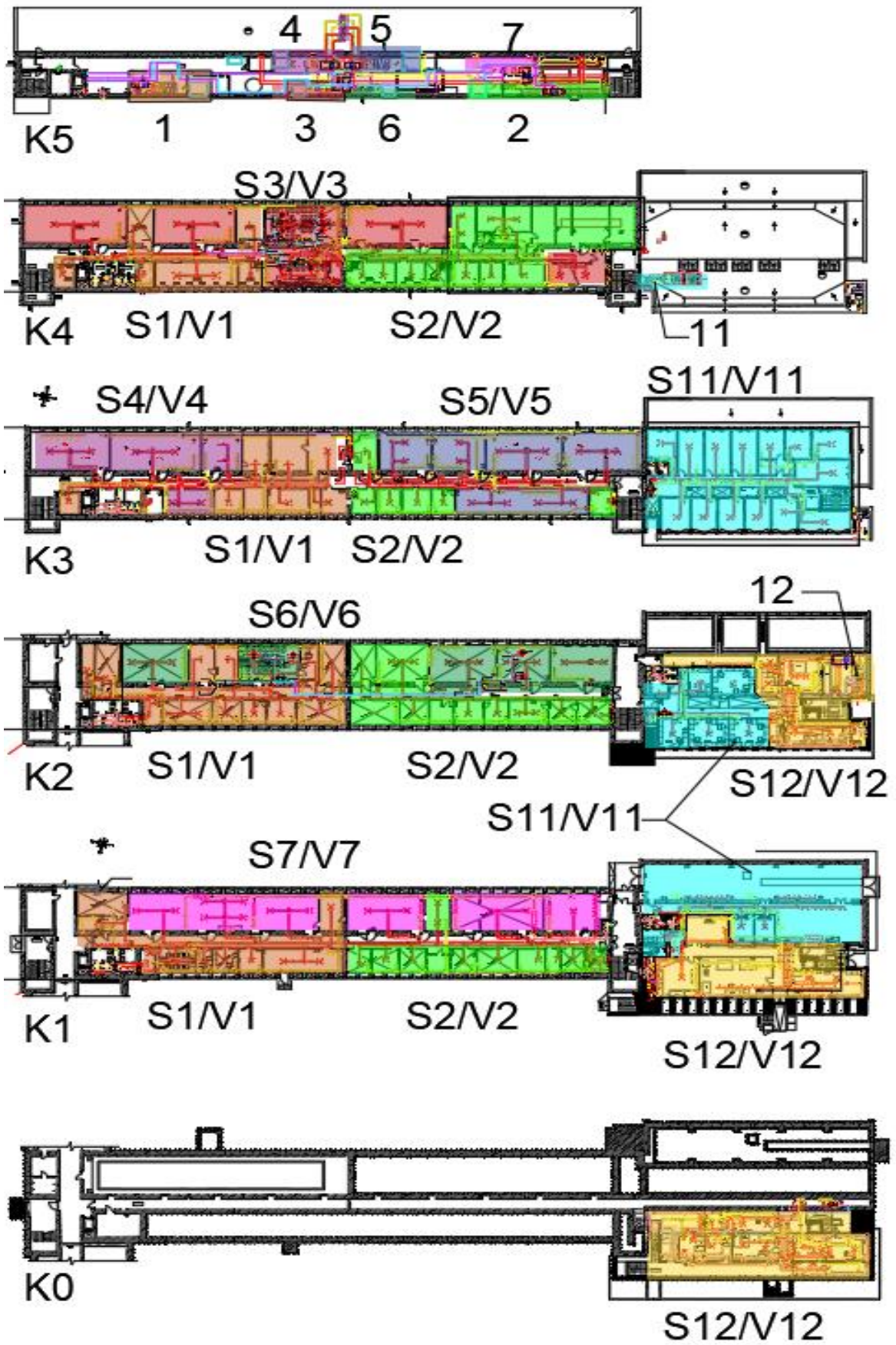
| Süsteem nimi | Seade | SP 2006 mõõdistatud, l/s | VT 2006 mõõdistatud, l/s | SP võimsus 75%, kW | VT võimsus 75%, kW | SFP 75%, kW/(m ³ /s) | SFP projekteeritud, kW/(m ³ /s) |
|--------------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|--|
| S1/V1 | EC-04 | 1576/788 | 960/480 | | | | 3,43 |
| S2/V2 | EC-03 | 792/346 | 828/414 | | | | 4,10 |
| S3/V3 | EC-04 | 1269 | 1248 | 0,56 | 0,5 | 1,1 | 3,47 |
| S4/V4 | EC-03 | 756 | 798 | 0,45 | 0,4 | 1,5 | 3,76 |
| S5/V5 | EC-04 | 1344 | 1408 | 0,62 | 0,7 | 1,3 | 3,13 |
| S6/V6 | EC-04 | 1155 | 1138 | 0,71 | 0,42 | 1,3 | 3,20 |
| S7/V7 | EC-03 | 980 | 666 | 0,56 | 0,28 | 1,1 | 3,37 |
| V8 | CT280 | | 643 | | | | |
| S11/V11 | | - | - | - | - | - | |
| S12/V12 | | - | - | 0,8 | 2,21 | 1,0 | |

Ventilatsiooniseadmed töötasid 75% juures ruumide vähese kasutuse tõttu, mis oli põhjustatud riigis kehtestatud eriolukorrast.

¹ S1 ja S2 ventilatsiooniseadmete põrandapinna põhine arvutus on tehtud kontorite põrandapinna kohta. Ventilatsiooniseadmete sissepuhke õhuvooluhulgast on lahutatud koridori õhuvahetus ning arvutuses pole arvestatud koridori pindalaga.

Tabel 11 Süsteemide kasutusprofiilid

| Süsteemi nimi | Tööaja algus | Tööaja lõpp | MÄRKUS | Teeninduspiirkond |
|-----------------------------|---------------|-------------|-------------|------------------------------|
| S1/V1 (614m ²) | 06:00 | 20:00 | E-R | U03A V.Tiiva Kontorid |
| S2/V2 (389m ²) | 06:00 | 20:00 | E-R | U03A P.Tiiva Kontorid |
| S3/V3 (359m ²) | 06:00 | 20:00 | E-R | U03A 4. Kor. Auditooriumid |
| S4/V4 (192m ²) | 06:00 | 20:00 | E-R | U03A3 Kor. V. Auditooriumid |
| S5/V5 (230m ²) | 06:00 | 20:00 | E-R | U03A 3 Kor. P. Auditooriumid |
| S6/V6 (241m ²) | 06:00 | 19:00 | E-R | U03A 2 Kor. Auditooriumid |
| S7/V7 (306m ²) | 06:00 | 19:00 | E-R | U03A 1 Kor. Laborid |
| V8 | 00:00 | 23:59 | Töötab 24/7 | U03A WC-d |
| S11/V11(727m ²) | 06:00 | 18:00 | E-R | U03B Kabinetid |
| S12/V12(450m ²) | 06:00 | 19:00 | E-R | U03B Katseruumid |
| V13 | 00:00 | 23:59 | Töötab 24/7 | U03B WC-d |
| KV1 | Nõudluspõhine | | | U03B 0 korrus |
| KV2 | Nõudluspõhine | | | U03B 0 korrus |
| KV3 | Nõudluspõhine | | | U03B 1 korrus |
| KV4 | Nõudluspõhine | | | U03B 2 korrus |



Joonis 8 Ventilatsioonisüsteemide teeninduspiirkonnad

2.1.7 Jahutus

2006 a. paigaldati hoonesse kahe välisosaga split tüüpi jahutussüsteem. Hoone katusele paigaldati kaks jahutusseadet CRUN1008TO, koguvõimsusega 54 kW. Ruumidesse paigaldati jahutusseadmed arvutiklassidesse.

Tabel 12 2006 aastal paigaldatud jahutussüsteem arvutiklassidesse

| Ruum | Fancoil | Jahutus projektis, kW |
|---------|-------------------|-----------------------|
| U03-215 | 2x LG GRNN186TEAO | 10,6 |
| U03-219 | 2x LG GRNN186TEAO | 10,6 |
| U03-403 | 4x LG GRNN126TEAO | 14 |
| U03-412 | 2x LG GRNN186TEAO | 10,6 |
| Kokku: | | 45,8 |

Õppehoones renoveeriti jahutussüsteemi aastal 2012, mille käigus lisati jahutus ventilatsioonisüsteemile ning kohtjahutus ruumidele U03-301, U03-302, U03-308 ja U03-309.

Külma tootmiseks on hoone katusele paigaldatud külmajaam Clivet WSAT XSC2 110D Air.

- Välisosa on valitud vastavalt välisõhu parameetritele +35°C/RH50%.
- Jahutussüsteemi primaarpoole temperatuurigraafik on 4/9°C.
- Jahutussüsteemi sekundaarpoole temperatuurigraafik 7/12°C.

Tabel 13 2012 aastal paigaldatud külmajaam Cliver WSAT XSC2 110D

| Külmajaama parameetrid | Väärtus | Ühik |
|--------------------------------|---------|------|
| Arvutuslik jahutusvajadus | 255,4 | kW |
| Maksimaalne Jahutusvõimsus | 273 | kW |
| Maksimaalne energiatarve | 92,8 | kW |
| EER | 3,11 | - |
| ESEER | 4,41 | - |
| Jahutuse jagunemine: | | |
| Kohtjahutus – Fancoilid | 17,7 | kW |
| Ventilatsiooni jahutuspatareid | 236,5 | kW |

Kogu külmajaama arvutuslikuks võimsuseks on 255,4 kW, millest ventilatsiooniõhu jahutamiseks kulub 236,5 kW ning kolmanda korruse auditooriumite jahutamiseks 17,7kW. Arvutusliku välisõhu temperatuuriks ventilatsiooniõhu jahutusvõimuse määramisel on kasutatud õhku +27°C/RH50%.

Tabel 14 2012 aastal paigaldatud jahutussüsteemi jagunemine ventilatsioonisüsteemide vahel.

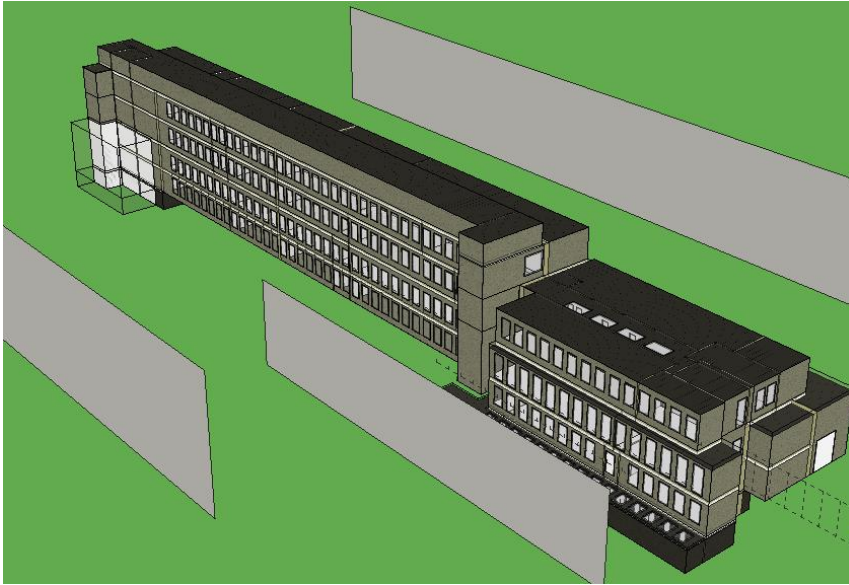
| Süsteem/ ruum | SP, l/s | Jahutus projektis, kW |
|------------------|---------------|--------------------------|
| S1 | 1 430 | 32 |
| S2 | 702 | 15,7 |
| S3 | 1 220 | 26,6 |
| S4 | 720 | 16 |
| S5 | 1 220 | 26,4 |
| S6 | 1 072 | 22,4 |
| S7 | 900 | 20 |
| S11 | 800 | 17,2 |
| S12 | 2 720 | 60,2 |
| Kokku: | 10 784 | 236,5 |
| U03-301 | | 4,2 |
| U03-302 | | 5,0 |
| U03-308 | | 4,2 |
| U03-309 | | 4,3 |
| Kokku: | | 17,7 |

2.1.8 Elekter

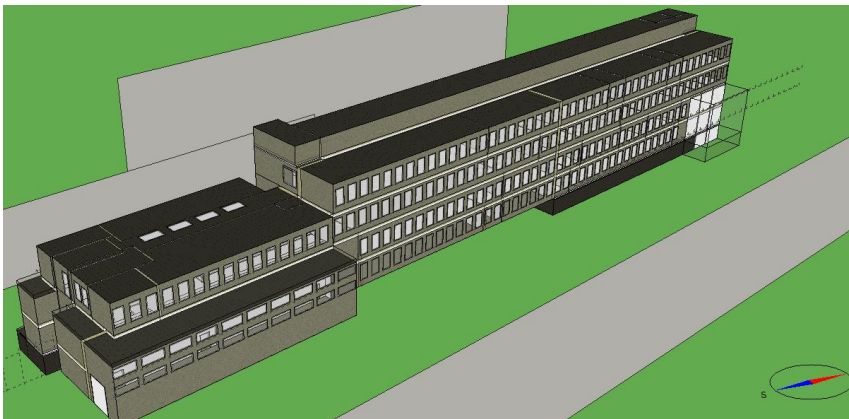
Õppehoone reaalne energiatarve on saadud Taltechi hooneautomaatikast. Õppehoonete U01, U02 ja U03 seadmete ning valgustuse energiatarve on mõõdetud ühes mõõdupunktis. Eelduslikult on kõigi kolme õppehoone energiatarve ligikaudselt võrdne ning U03 õppehoone energiatarve on saamiseks on kogu energiatarve jagatud kolmeka Simulatsioonimudel is on seadmete ja valgustuse puhul arvestatud määrusepõhiseid [12] väärtuseid ja selle süsteemi detailidesse antud uurimistöös ei minda.

2.2 Simulatsioonimudel

Teostamiseks õppehoonele dünaamiline energiaarvutus on antud magistritöös kasutatud IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) 4.8 simulatsioonitarkvara. Arvutusmudeli kalibreerimiseks on kasutatud Harku ilmavaatlusjaama kliimaandmeid aastate 2016 kuni 2020 kohta. Hoone edasiseks analüüsimiseks on kasutatud Eesti baasaasta kliimafaili Estonian TRY (Test Reference Year) [18].



Joonis 9 Hoone vaade edelast



Joonis 10 Hoone vaade kirdest

2.2.1 Simulatsioonimudeli koostamine

Õppehoone simulatsioonimudel on jagatud 97-eks tsooniks. Tsoonide grupeerimisel on lähtutud põhimõttest, et neid oleks nii palju kui vaja, kuid nii vähe kui võimalik. Suur tsoonide arv on tingitud hoone ventilatsioonisüsteemist, mille seadmed teenindavad ruume vastavalt nende kasutusotstarvetele.

Grupeerimine on tehtud vastavalt järgnevatele põhimõtetele:

- Mudel on grupeeritud ruumide tüübi järgi.
- Mudel on grupeeritud tehnosüsteemide järgi.
- Mudel on grupeeritud eri fassaadide kaupa.
 - Kokku on pandud sarnase kasutusega ruumid, mis asetsevad ühel fassaadil ning mida teenindab sama tehnosüsteem.

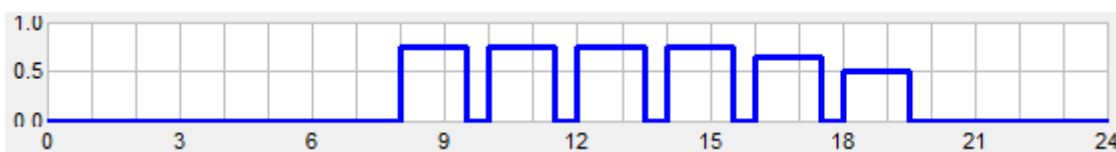
2.2.2 Kasutusprofiilid

Hoone kalibreerimismudelis on kasutatud reaalsele kasutuse vastavad prognoositud profiile. Õppetöö toimub hoones septembrist juunini ning suvisel ajal kasutatakse auditooriume vähesel määral ülikooli organisatsioonide poolt. Tegelikkuusele kalibreeritud mudelis on eristatud eri ruumitüüpide kasutusprofiilid.

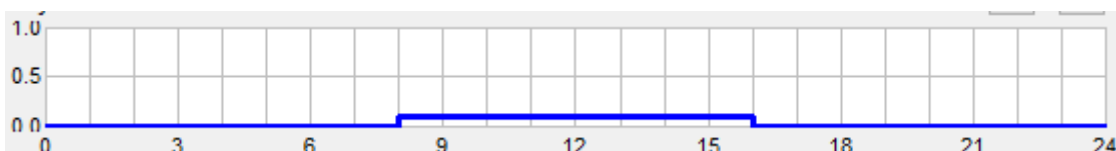
Auditooriumite kasutusprofiil (joonis 11) on seadistatud vastavalt tüüpsele tunniplaanile ajavahemikus 15 august kuni 14 juuni. Suvisel ajal on auditooriumite kasutuskoormus 0,1. Soojuseraldused valgustusest ja seadmetest on jäetud vastavalt 12 ja 8 W/m². [12] Inimeste aktiivsus met on 1,2 ning inimeste arv ruumis on 2,1 m²/in, mis ühtib suvise ruumitemperatuuri kontrollväärtusega ning ligikaudsete istekohtadega auditooriumites.

Arvutiklasside kasutusprofiil (joonis 11) on seadistatud vastavalt tüüpsele tunniplaanile ajavahemikus 15 august kuni 14 juuni. Suvisel ajal on arvutiklasside kasutuskoormus 0,1. Soojuseraldused valgustusest ja seadmetest on jäetud vastavalt määruel 15 ja 50W/m². Inimeste aktiivsus met on 1,2 ning inimeste arv ruumis on 2,1 m²/in, mis ühtib suvise ruumitemperatuuri kontrollväärtusega ning ligikaudsete istekohtadega arvutiklassides.

Laborite kasutusprofiil (joonis 11) on seadistatud vastavalt tüüpsele tunniplaanile ajavahemikus 15 august kuni 14 juuni. Suvisel ajal on laborite kasutuskoormus 0,1. Soojuseraldused valgustusest ja seadmetest on jäetud vastavalt 12 ja 8 W/m². Inimeste aktiivsus met on 1,2 ning inimeste arv ruumis on 17 m²/in. [12]

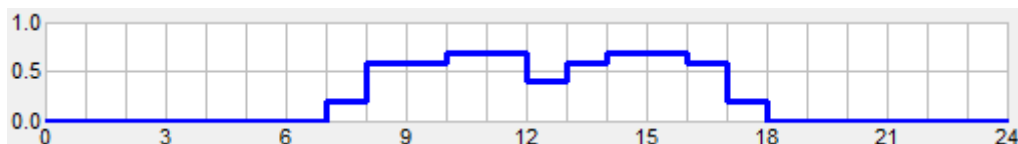


Joonis 11 Auditooriumite, arvutiklasside ning laborite kasutusprofiil perioodil 08.august kuni 06.juuni



Joonis 12 Auditooriumite, arvutiklasside ning laborite kasutusprofiil suvisel perioodil

Kontoriruumide kasutusprofiilid on aastaringelt samad ning võetud määrusepõhise kontorihoone järgi. Soojuseraldused valgustusest ja seadmetest on jäetud vastavalt määrusel 10 ja 12 W/m². Inimeste aktiivsus met on 1,2 ning inimeste arv ruumis on 17 m²/in. [12]



Joonis 13 Kontoriruumide kasutusprofiil tööpäeviti

Hoone energiamärgis on arvatud vastavalt määruses nr 58. kehtestatud andmetele ning meetodikale. [12]

2.2.3 Simulatsioonimudeli kalibreerimine

Hoone kohta on olemas tarbimisandmed alates 2016 aastast. Hoone soojuskulu on mõõdetud eraldi U03A ja U03B korpuse kohta, kuid selle täpsemast jagunemisest hoone kütte, ventilatsiooni kütte ning sooja vee tarbimise vahel pole mõõdistatud. Hoone elektrikulu on mõõdetud ühises mõõdupunktis U01, U02 ja U03 hoonete kohta ning täpsemast elektrikulu jagunemisest ülevaade puudub. Simulatsioonimudeli kalibreerimisel on arvestatud, et U03 õppehoone tarbib mõõdetud elektrikulu ligikaudu ühe kolmandiku mõõdetud väärtusest.

Kalibreerimise aluseks on hoone tarbimisandmed kuude lõikes, mida on võrreldud simulatsiooni kütte- ja elektritarbega. Hoone kalibreerimise käigus lisati mudelisse kõrvalhooneid jäljendavad ekraanid. Korrigeeriti külmasildade suuruseid ning korrigeeriti vabasoojuseid ja ventilatsioonisüsteemide kasutusprofiile.

Kuna reaalse elektritarbe arvestusega on tehtud märkimisväärne lihtsustus ja kütteenenergia tarbe konkreetne jaotus pole teada siis on kalibreerimine loetud õnnestunuks kui 2016 kuni 2020 aasta energiatarve ei erine üle 10%. Lisaks on võrreldud simulatsioonimudel vastavust Ashrae juhendmaterjalis esitatud määramatusele. [19]

$$CVRMSE = 100 \cdot \left[\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p) \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{y} \quad (2.1)$$

Kus,

CVRMSE – Igakuise mõõdetud ning arvatud soojusenergia tarbimise ruutviga [-]

y_i – Hoone mõõdetud soojusenergia tarve [kWh]

\hat{y}_i – Simulatsioonimudeli arvatud soojusenergia tarve [kWh]

\bar{y} – Mõõdistatud soojustarbe aritmeetiline keskmine [kWh]

p – Konstant, mis simuleeritud ja mõõdetud energiatarbe arvutuses võrdub ühega [-]

n – valimite arv [-]

$$NMBE = 100 \cdot \frac{\sum^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n - p) \cdot \bar{y}} \quad (2.2)$$

Kus,

NMBE – Kogu simulatsiooni baasviga [-]

2.2.4 Simulatsioonid

Peale simulatsioonimudeli kalibreerimist on hoonele teostatud dünaamiline energiaarvutus vastavalt määruses kehtestatud haridushoonele esitatud väärtustele ning profiilidele. Energiamärgise arvutused on tehtud eesmärgiga võrrelda uuritava hoone määrusepõhise ning standardkasutuse energiavajaduse erinevust.

Küttegraafiku alandamise potentsiaali hindamiseks on õppehoonele teostatud dünaamiline energiaarvutus võimaliku rekonstrueerimislahenduse korral. Rekonstrueeritud mudelis on parandatud tarindite soojustehnilisi omadusi ja vähendatud külmasildade ning infiltratsioonikao osakaalu, mis on esitatud joonisel 27 ning tabelites 20 ja 21. Hoones olevad vabasoojused ning ventilatsioonisüsteem on jäetud muutmata.

2.3 Hoone soojavarustus

Küttesüsteemi peamine eesmärk on tagada ruumides nõuetekohane sisetemperatuur. Ruumide sisetemperatuuri hoidmiseks peab küttesüsteemi soojusväljastus olema võrdne hoone soojuskadudega arvutuslikul siseõhu temperatuuril. Hoone küttevõimsus on arvutatud valemiga;

$$Q = G \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{pv} - t_{tv}) \quad (2.3)$$

Kus,

Q – Küttevõimsus [W]

G – Soojuskandja mahuline vooluhulk [l/s]

c – Soojuskandja massierisoojus [kJ/kg·K]

ρ – Soojuskandja tihedus [kg/m³]

t_{pv} – Soojuskandja pealevoolu temperatuur [°C]

t_{sv} – Soojuskandja tagasivoolu temperatuur [°C]

Andmed hoone/ruumide küttekehade soojusväljastuse kohta on võetud õppehoone kütte projektist. Andmed terve hoone soojuskasutuse erikulu kohta on võetud hoone automaatikast. Märkida tuleb, et hoone automaatikas ei ole eraldi mõõdetud soojuskulu kuuma tarbevee tootmiseks ning selle suurus on võetud vastavalt seaduses ette nähtud

normmääradele. Kuuma vee tarbimise alusväärtuseks pole võetud suvist mõõdetud soojuste erikulu kuna hoone on perioodilise kasutusega ning suvised väärtused ei anna piisava täpsusega infot õppeperioodi sooja vee soojuserikulu kohta.

2.3.1 Soojusvahetid

Soojusvaheti on seade, mis võimaldab kanda soojust üle ühelt keskkonnalt või kehalt teisele. [13] Uuritavas õppehoones on kasutusel vastuvoolded plaatsoojusvahetid. Plaatsoojusvahetite võimsuse saab leida seosest:

$$\Phi = U \cdot \Delta t \cdot A \quad (2.4)$$

Kus,

U – Soojusvaheti küttepind [m^2]

Δt – Soojuskandjate vaheline keskmine logaritmiline temperatuuride vahe [$^{\circ}C$]

A – Plaatsoojusvaheti pindala [m^2]

2.3.2 Radiaatorid

Radiaatorite soojuskandja temperatuurid

Eestis kasutati aastatel 1950 – 1990 valdavalt soojuskandja temperatuure 95/70 $^{\circ}C$. Peale 1990-nendaid alandati arvutuslikud temperatuurid 80/60 $^{\circ}$ nii rekonstrueeritavates kui ka uutest hoonetes. Aja jooksul on hoonetele esitatavad energiatõhususe nõuded pidevalt karmistunud ning koos sellega ka hoonetes olevate küttesüsteemide arvutuslikud temperatuurid järk järgult vähenenud. Kuigi tänapäeval ehitatud uutel kui ka rekonstrueeritavates hoonetes kasutatakse endiselt temperatuurigraafikut 70/50 $^{\circ}C$, siis paljudel juhtudel on seda võimalik vähendada. [13]

Radiaatorite soojusväljastus

Olenevalt küttekeha konstruktsioonist, soojuskandja temperatuurist ning ruumi temperatuurist toimub küttekehalt soojust ülekandmine ruumi konvektsiooni ja kiirguse teel. Sellest tulenevalt on küttekehade soojusväljastus tugevalt sõltuvuses radiaatori pinna- ja ruumiõhu temperatuurist ning selle asetusest ruumis. Radiaatorite soojusväljastus on erinevates tööpunktides võimalik arvutada valemiga [8, 13]:

$$Q_{rad} = K_{rad} \cdot \Delta t_m^n \cdot \eta_1 \quad (2.5)$$

Kus,

Q_{rad} – Küttekeha soojusväljastus [W]

K_{rad} – Küttekeha soojusväljastuse koefitsient [W/K n]

η_1 – Küttekeha paigaldusest tingitud parandustegur [-]

n – Küttekeha eksponenttegur [-]

Küttekeha soojusväljastuse konvektiivse ja kiirgusliku soojusväljastuse mittelineaarsuse arvestamiseks kasutame logaritmilist valemit küttekeha peale- ning tagasivoolu ja ruumi õhu temperatuuri vahel [13]:

$$\Delta t_{ln} = \frac{t_{s,pv} - t_{s,tv}}{\ln \frac{t_{s,pv} - t_{\bar{o}}}{t_{s,tv} - t_{\bar{o}}}} \quad (2.6)$$

Kus,

Δt_{ln} – Logaritmiline temperatuuride vahe projekteeritud temperatuuridel [-]

$t_{s,pv}$ – Soojuskandja pealevoolu temperatuur [°C]

$t_{s,tv}$ – Soojuskandja tagasivoolu temperatuur [°C]

$t_{\bar{o}}$ – Ruumiõhu temperatuur [°C]

Soojusväljastuse mittelineaarsuse arvestamiseks on kasutatud küttekehade eksponenttegurit väärtusega 1,3.

2.3.3 Torustik

Küttesüsteemi magistraal- ja jaotussüsteemis on kasutatud isoleerimata terastoru (värvitud). Ruumides paiknevat püstikud on läbimõõdus DN20 ja DN15 ning on ühenduses kõrval olevate radiaatoritega. Ruumis oleva torustiku soojuserikaad on arvutatud valemiga [13]:

$$\varphi_t = \frac{t_{sk} - t_v}{R_t} \quad (2.7)$$

Kus

Φ_t – Torustiku soojuserikadu [W/m]

t_{sk} – Soojuskandja temperatuur [°C]

t_v – Ümbritseva keskkonna temperatuur [°C]

R_t – Torustiku kogusoojustakistus [m·K/W]

2.3.4 Hüdrauliline tasakaal

Soojuskandja ringluses hoidmiseks on süsteemis sagedusmuunduriga pump. Küttesüsteemi tasakaalustamiseks on igale püstikule paigaldatud Danfoss'i tasakaalustusventiil MSV-BD. Ruumipõhise juhtimise võimaldamiseks on iga radiaator varustatud lisaks eelseadventiilile ka termostaatventiiliga. Olemasoleva hoone küttesüsteemi arvutuslikud temperatuurigraafikud on 95/70/20 ning 70/50/20 ning hüdraulilise toimivuse huvides ei tohi temperatuurigraafiku alandamise käigus süsteemi arvutuslikku temperatuurilangu liigselt muuta.

2.3.5 Küttesüsteemi juhtimine

Hoone küttesüsteemi juhitakse kvalitatiivsel meetodil. Hoone küttesüsteemi pealevoolu temperatuur on viidud vastavusse välisõhu temperatuuriga ning küttesüsteemi pealevoolu temperatuuri hoitakse arvutusliku väärtuse lähedal läbi primaarpoole vooluhulga reguleerimise. Selleks on enne plaatsoojusvahetit paigaldatud primaarpoolele mootorajamiga ventiil, mis sulgub ja avaneb vastavalt automaatikasüsteemi käsklustele.

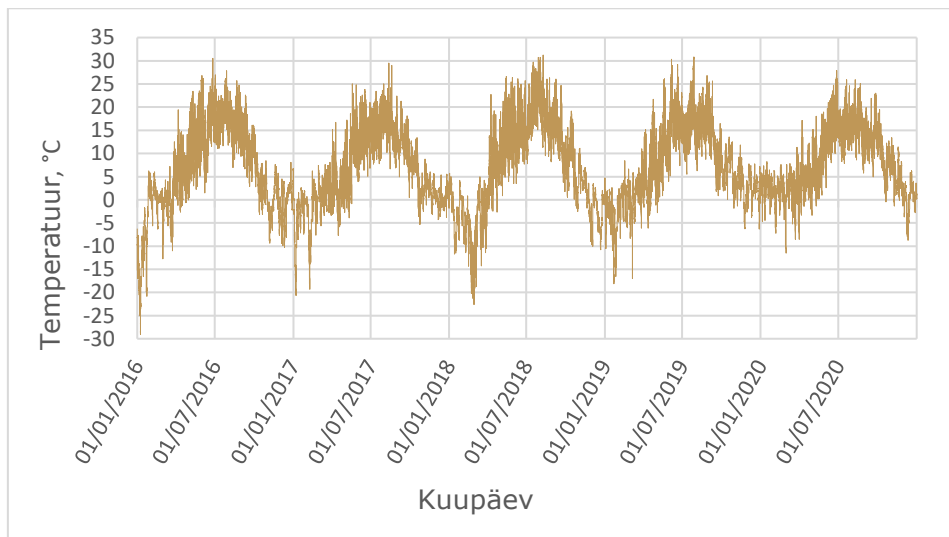
2.3.6 Soojuskandja temperatuurigraafiku optimeerimine

Kaugkütte süsteemi võimalikult efektiivseks toimimiseks on lisaks madalale pealevoolu temperatuurile vaja tekitada tarbija poolel ka maksimaalne temperatuurilang. Selle tulemusel on võimalik vähendada kulusid soojuskandja ringlemisele ning torustiku soojuskadudele. Kuigi suurte temperatuurilangude kasutamisel küttesüsteemis on mitmeid eeliseid siis selle peamiseks puuduseks on suur tundlikus vooluhulga muutustele. [13] Olemasolevas hoones kasutatakse püstikutes staatilisi tasakaalustusventiile MVS-BD ning kuigi staatiliselt tasakaalustatud süsteem toimib hästi arvutuslikel tingimustel siis ruumides olevad liigsed vabasoojused võivad süsteemi lihtsasti tasakaalust välja viia. Kuna energiatõhusates hoonetes on ruumides soojuskaod väiksed, siis juba mõningane vabasoojuste olemasolu ruumides tekitab küttekehades vooluhulga muutust ning sellega süsteemis tasakaalutust. Vastavalt Danfossi objektide analüüsidele [20] on kirjeldatud tasakaalutuse mõju hoone küttekoormusele 10 kuni 25%. Kasutades küttesüsteemis dünaamilisi tasakaalustusventiile on võimalik vähendada ruumide üle kütmist ning sellega kaasnevat liigset kulu soojusenergia kasutusele. Küttesüsteemi õige seadistuse arvelt on võimalik vähendada nii soojuskandja pealevoolu temperatuuri kui suurendada temperatuurilangu küttekehades. [8]

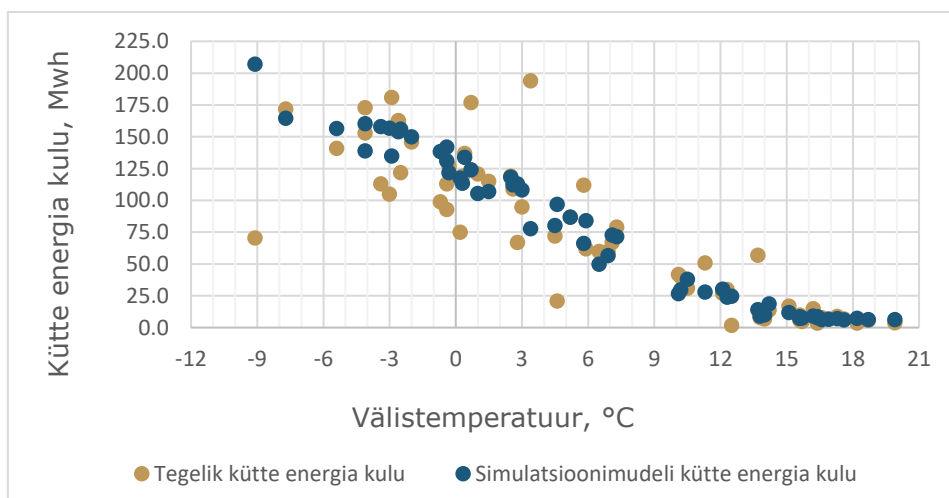
3 HOONE ENERGIATARVE

3.1 Hoone simulatsioonimudeli kalibreerimine

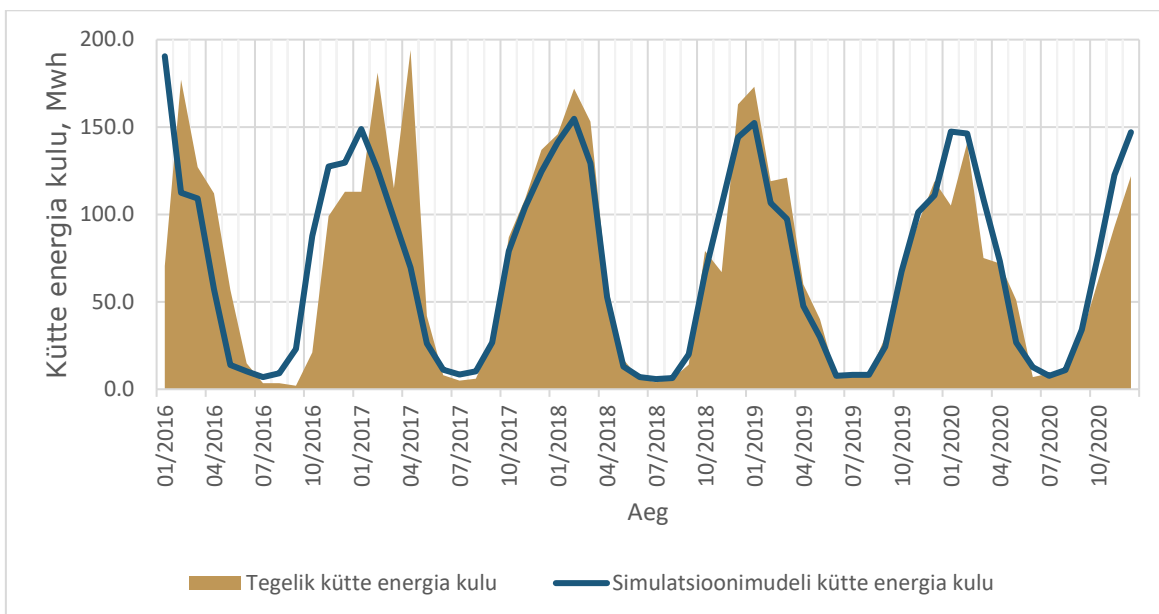
Mudel on koostatud U03 teostusdokumentatsiooni baasil. Igasse tsooni on koondatud sarnase kasutusega ruumid, mida teenindab kindel ventilatsiooniseade. Mudeli kalibreerimiseks kasutati 2016 kuni 2020 aasta kliimafaili ning selle ajavahemiku mõõdetud energiakulu. Hoone esmase simulatsioonimudeli järgi oli erinevus reaalse ja tarbitud soojusenergia vahel ligikaudu 15 %. Täpsema tulemuse saavutamiseks korrigeeriti mudeli avatäiteid, vabasoojuseid ning külmasildu vastavaks tabelis 6 ja joonisel 4 esitatud väärtustele.



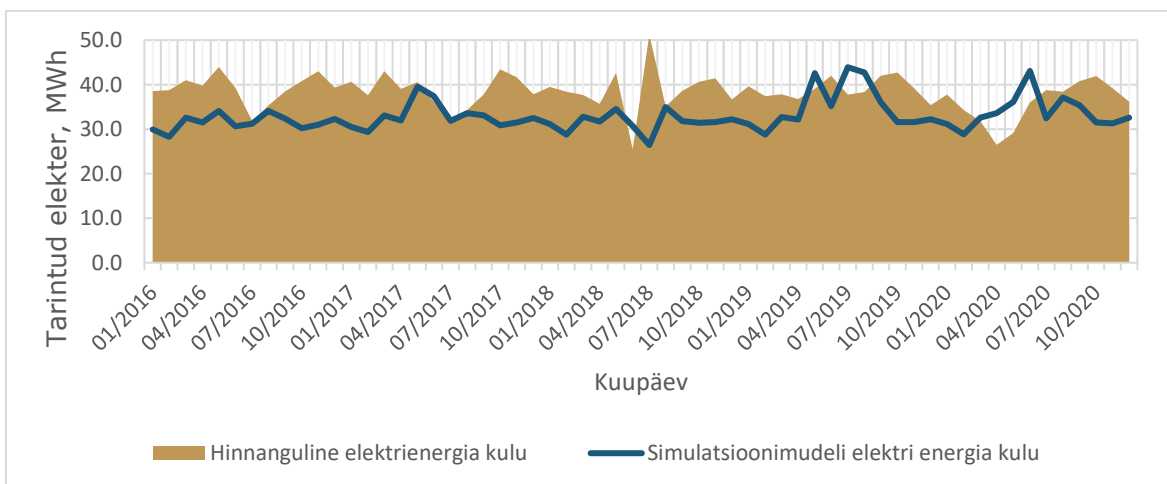
Joonis 14 Välisõhu temperatuur, Harku Ilmavaatlusjaam



Joonis 15 Kütte energiakulu sõltuvus välitemperatuurist



Joonis 16 Õppehoone kütte energiatarbe võrdlus



Joonis 17 Õppehoone elektri energiatarbe võrdlus

Jooniselt 15 nähtuvad tegeliku kulu suurte kõrvalekallete kõige tõenäolisemaks põhjuseks on ebaregulaarne näitude ülesmärkimine perioodil 2016 jaanuar kuni 2017 aprill. Seda kinnitab joonis 16, kus erisused tegeliku ja simulatsiooni kütteenegiakulu vahel on suured kuni 2017 aprillini, peale mida on tõenäoliselt tehtud korrektuurid soojusenergia mõõdistamises ning tegelik ning simulatsiooni küttekulu energia on sisuliselt samad.

Hoone tegelik energiakulu kütteks aastatel 2016 kuni 2020 oli 4335 MWh ning elektrikulu oli hinnanguliselt 2296 MWh. Kalibreeritud simulatsioonimodeli energiakulu samadel aastatel oli soojusenergiale 4531 MWh ja elektrienergiale 1978 MWh.

Simulatsioonimudeli küttekulu moodustab tegelikust kulust 104,5 % ning elektrienergia kulu 86,1%. Simulatsioonimudeli arvutusest lähtub, et uuritava hoone elektrienergiatarve moodustab mõõdetud hoonete komplekti elektrienergiatarbest ligikaudu 29 %.

Kasutades simuleeritud soojustarbe hindamiseks ASHREA metoodikat on terve simulatsiooniperioodi määramatus vastavalt valemile (2.2) $NHBE=4,6\%$ ning igakuiste soojusenergia väärtuste ruutviga vastavalt valemile (2.1) $CVRMSE=45\%$. Arvutades määramatust vaid perioodile 2017 mai kuni 2020 detsember vähenevad väärtused 1,6 ja 7,4 % peale. Elektritarbe määramatust ASHREA metoodikaga ei hinnatud kuna konkreetse uuritava objektipõhiseid tarbimisandmed puudusid.

3.2 Hoone tegeliku kasutuse baasaasta

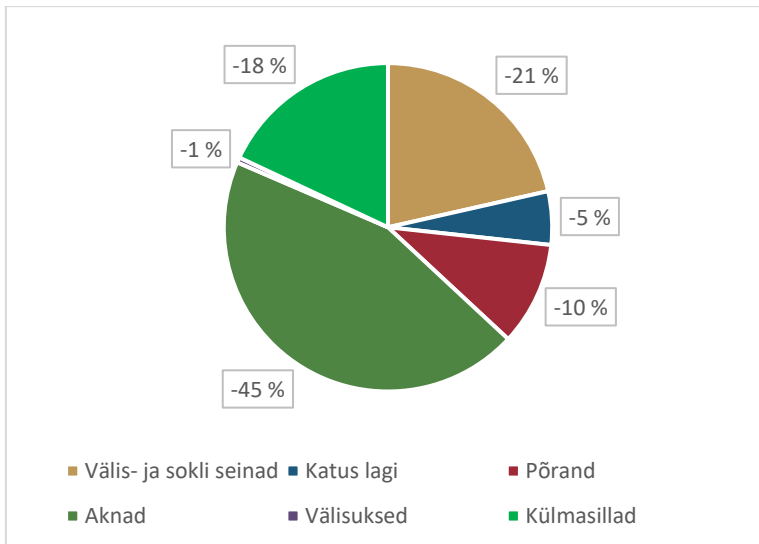
Antud peatükis on välja toodud õppehoone baasaasta energiatarbimine prognoositud hoone kasutuse korral. Hoone tegeliku kasutuse simulatsioonimudel on võetud aluseks rekonstrueerimislahenduste arvutamiseks.

3.2.1 Soojuskaod läbi piirdetarindite

Välispiirete osakaalude jaotus on võetud IDA ICE simulatsiooniprogrammist. Täpsemad piirdetarindite jagunemist ja nende soojusjuhtivust saab vaadata tabelist 5. Välispiirete summaarne soojuskadu on $0,90\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Suurima osa hoone soojuskadudest moodustavad akende soojuskaod.

Tabel 15 Piirdetarindite soojuskaod

| Piirdetarind | Tarindi pindala, m ² | Keskmine soojusläbivustegur, W/(m ² *K) | Soojuskadu läbi piirdetarindi, MWh/a | Soojuskaos osakaal, % |
|------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------------|
| Välis- ja sokli seinad | 3218 | 0.49 | -155 | 23.4 |
| Katus lagi | 1551 | 0.26 | -38 | 6.0 |
| Põrand | 1620 | 0.43 | -74 | 10.2 |
| Aknad | 1069 | 2.81 | -322 | 42.8 |
| Välisüksed | 22 | 1.71 | -4 | 0.6 |
| Külmasillad | | | -130 | 17.1 |
| Kokku | 7481 | | -722 | 100 |



Joonis 18 Piirdetarindite soojuskadude jaotus

3.2.2 Vabasoojused

Tabel 16 Hoones olevad vabasoojused kütteperioodil

| Vabasoojused | Soojuseraldused, kWh |
|--------------|----------------------|
| Seadmed | 45 317 |
| Valgustus | 51 281 |
| Inimesed | 26 548 |
| Kokku | 123 145 |

3.2.3 Infiltratsioon

Hoone infiltratsiooni õhuvooluhulk on määratud vastavalt määruses [12] § 13 kehtestatud valemitele. Vastavalt korruselisuse tegurile 15 ja hoone välispiirete pindalale on infiltratsiooni õhuvooluhulk hoones 594 l/s ja sellega kaasnev soojuskadu baasaasta kütteperioodil on 165 MWh/a.

3.2.4 Soojusenergia / Kaugküte

Hoone küte on ühendatud Tallinna Tehnikaülikooli kaugküttevõrguga, mille arvutuslikuks pealevoolu temperatuuriks on 110°C. Hoone soojavarustussüsteemi vajalik võimsus on 583 kW millest radiaatorküttesüsteemi võimsus moodustab 321 kW. Hoone aastane soojusenergia tarve 989 MWh/a ehk 164,6 kWh/(a·m²)

3.2.5 Tarbevesi

Sooja tarbevee erikulu leidmiseks on kasutatud määrusekohaseid suuruseid, mis haridushoonetel on $172 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Aastas kulub sooja tarbevee soojendamiseks ligikaudu 65 MWh soojusenergiat.

3.2.6 Ventilatsioon

Ventilatsiooniseadmete aastane elektrienergiatarve on 129 MWh. Ventilatsiooniõhu soojendamiseks vajalik küttevõimsus on 254 kWh ning aastane soojustarve ventilatsiooniõhu soojendamiseks on 224 MWh ehk $37,2 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$.

3.2.7 Jahutus

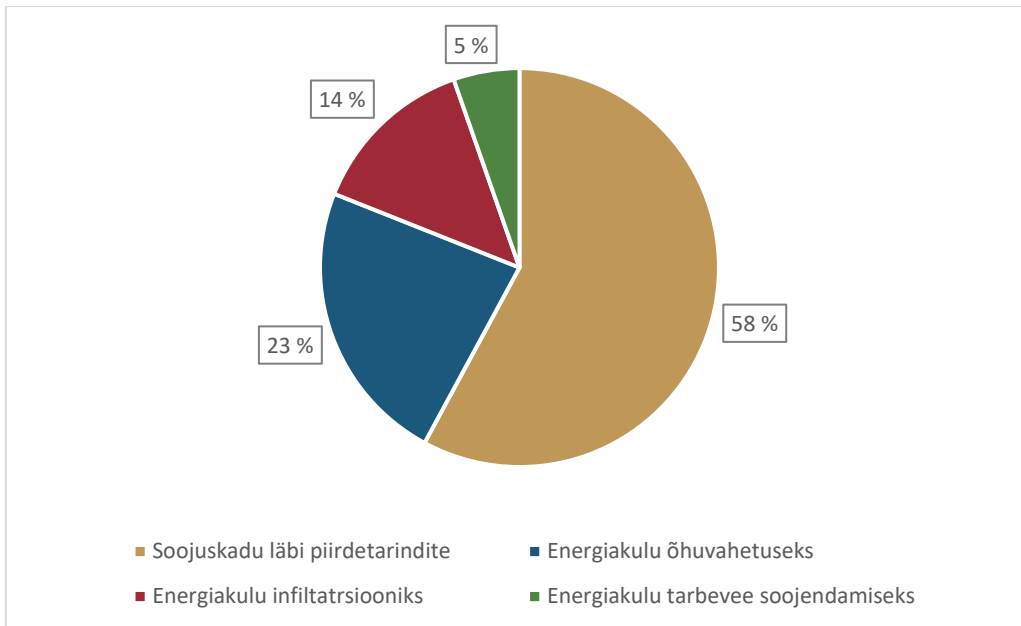
Vastavalt tegeliku kasutuse simulatsioonimudelile töötavad kohtjahutused peatükis 2.1.7 välja toodud ruumides ning ventilatsiooniõhu sissepuhke seadeväärtus on 20°C . Kirjeldatud olukorras on hoone baasaastal jahutussüsteemi summaarne energiavajadus 30 MWh ehk $5,0 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$. Jättes ventilatsiooniagregaatide töö muutmata ning lisades kõikidesse kabinetidesse, auditooriumitesse ning laboritesse kohtjahutuse, oleks jahutussüsteemi vajalik võimsus 242 kW ning aastane energiavajadus 120 MWh ehk $20,0 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$. Madal jahutusvajadus on tingitud hoone massiivsest konstruktsioonist ning auditooriumite ja arvutiklasside vähesest kasutusest suvisel perioodil. Sellest tulenevalt on olemasoleva külmajaama võimsus piisav kogu hoone jahutusvõimsuse katmiseks.

3.2.8 Soojusbilanss

Hoone soojusbilansi koostamiseks on kasutatud baasaasta soojusenergia simulatsioonikulu ja vabasoojuseid.

Tabel 17 Hoone baasaasta soojusbilanss

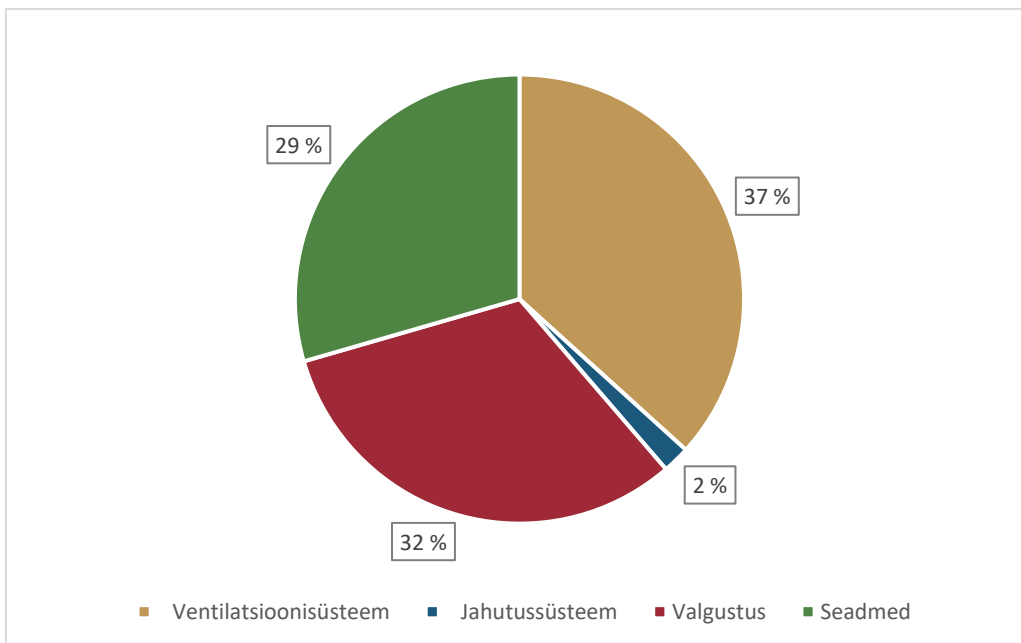
| Soojusbilanss | MWh/a | % |
|-------------------------------------|--------------|----------|
| Soojuskadu läbi piirdetarindite | 722 | 58 |
| Energiakulu õhuvahetuseks | 280 | 23 |
| Energiakulu infiltratsiooniks | 165 | 14 |
| Energiakulu tarbevee soojendamiseks | 65 | 5 |
| Kokku | 1 232 | |
| Vabasoojusenergia | 242 | 20 |
| Tarnitud soojusenergia | 975 | 80 |
| Kokku | 1 232 | |



Joonis 19 Hoone baasaasta kütteenergia arvutuslik jagunemine

3.2.9 Elektrienergia bilanss

Hoone aastane elektrienergiatarve on 378 MWh/a, ehk 60 kWh/(a·m²). Elektrienergia-tarbe mudelleeritud jagunemine on esitatud joonisel 20.



Joonis 20 Hoone baasaasta elektrienergia arvutuslik jagunemine

3.2.10 Hoone energiaerikasutus

Tabel 18 Hoone arvutuslik erienergiakasutus

| | Elekter, kWh/a | Küte, kWh/a | Tarnitud energia, kWh/(a·m ²) | Kaalumistegur | Energiatõhusus arv, kWh/(a·m ²) |
|---|----------------|----------------|---|---------------|---|
| Määrusepõhine koolihoone ETA¹ | | | | | |
| Küttesüsteem | | | | | |
| Ruumide küte | | 721 023 | 120,0 | 0,9 | 108,0 |
| Ventilatsiooniõhu soojendamine | | 174 485 | 29,0 | 0,9 | 26,1 |
| Tarbevee soojendamine | | 64 825 | 10,8 | 0,9 | 9,7 |
| Tehnosüsteemide elekter | | | | | |
| Ventilatsioonisüsteem | 137 390 | | 22,9 | 2 | 45,7 |
| Jahutussüsteem | 5 213 | | 0,9 | 2 | 1,7 |
| Valgustus | 64 871 | | 10,8 | 2 | 21,6 |
| Seadmed | 43 247 | | 7,2 | 2 | 14,4 |
| Summa | 250 721 | 960 333 | 201,6 | 2 | 227,3 |
| Tegeliku kasutuse simuleeritud KEK¹ | | | | | |
| Küttesüsteem | | | | | |
| Ruumide küte | | 688 704 | 114,6 | 0,9 | 103,2 |
| Ventilatsiooniõhu soojendamine | | 236 394 | 39,3 | 0,9 | 35,4 |
| Tarbevee soojendamine | | 64 825 | 10,8 | 0,9 | 9,7 |
| Tehnosüsteemide elekter | | | | | |
| Ventilatsioonisüsteem | 128 983 | | 21,5 | 2 | 42,9 |
| Jahutussüsteem | 6 912 | | 1,2 | 2 | 2,3 |
| Valgustus | 111 837 | | 18,6 | 2 | 37,2 |
| Seadmed | 103 531 | | 17,2 | 2 | 34,5 |
| Summa | 351 263 | 989 923 | 223,2 | 2 | 265,2 |
| Tegeliku kasutuse KEK | | | | | |
| Elekter 2016 kuni 2020 | 2 296 231 | | | | |
| Keskmine | 459 249 | | 71 | 2 | 142 |
| Küte 2016 kuni 2020 | | 4 335 460 | | | |
| Keskmine | | 867 092 | 134 | 0,9 | 121 |
| Summa | 459 249 | 824 092 | | | 263 |

¹ Simulatsioonides olid kohtjahutusseadmed paigaldatud vastavalt reaalsele olukorrale

4 HOONE SOOJUSVARUSTUS

4.1 Radiaatorite soojusväljastus

Selleks, et küttesüsteem jääks hüdrauliliselt sarnasena toimima, tuleb renoveeritud hoones vähendada temperatuurigraafikut ning jätta soojuskandja vooluhulkade suurus muutmata või muuta neid vähesel määral. Hüdraulilise süsteemi muutmata jätmise annab võimaluse renoveeritud hoones kasutada olemasolevat küttesüsteemi ilma märkimisväärsete renoveerimistöödeta. Säilitada on võimalik nii soojussõlm kui ka ruumides asetsevad kütteseadmed. Selleks, et veenduda uue süsteemi toimivuses tuleb kõrvutada omavahel radiaatorite soojusväljastus uutel temperatuurigraafikutele ning hoone soojuskaod.

Kui antud uurimistöös on peamine viis temperatuurigraafiku vähendamiseks piirdetarindite soojapidavuse parandamine, siis kriitilistes ruumides võib selleks olla ka küttekehade lisamine või vanade radiaatorite väljavahetus. [6] Vastavalt valemile (2.5) ning (2.6) väheneb tabeli 19 põhjal küttesüsteemi pealevoolu temperatuuri alandamisel 95-elt kraadilt 65-le kraadile MC140 küttekehades soojusväljastus 69% võrra.

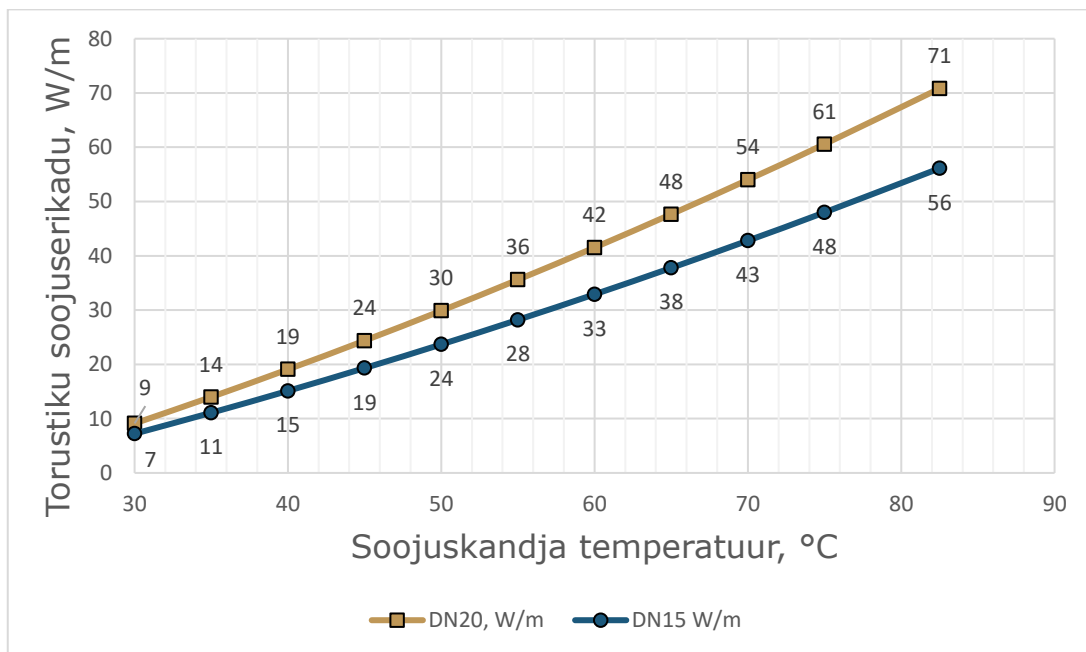
Tabel 19 MC140 ühe sektsiooni soojusväljastus sõltuvalt kütte temperatuurigraafikust.

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Soojuskandja $T_{s,pv}$, °C | 95 | 75 | 60 | 50 | 50 | 50 |
| Soojuskandja $T_{s,tv}$, °C | 70 | 50 | 35 | 25 | 30 | 35 |
| Ruumi temperatuur, °C | 20 | 20 | 20 | 20 | 22 | 22 |
| Logaritmiline vahe, Δt_{ln} | 61,7 | 41,2 | 25,5 | 14,0 | 16,0 | 19,6 |
| Parand β_1 | | 0,59 | 0,32 | 0,14 | 0,17 | 0,22 |
| Parand β_2 | | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| MC140 sektsiooni väljastus, W | 160 | 93,0 | 49,7 | 22,7 | 27,1 | 35,2 |
| Protsentuaalne erinevus, % | 100 | 58 | 31 | 14 | 17 | 22 |

4.2 Püstikute soojusväljastus

Kuna üks püstik teenindab mõlemat enda kõrval olevat radiaatorit siis võib arvestada torustiku soojuskadu osaks ruumide küttena. Ühe radiaatori kohta on ruumis arvestuslikult kolme meetri pikkune terasest toru mille soojusväljastuse võib leida soojuskandja keskmise temperatuuri järgi jooniselt 21. Temperatuurigraafikul 95/70 ja 60/35 on keskmine soojuskandja temperatuur torustikus vastavalt 82,5 ning 47,5 kraadi. Valemi (2.7) järgi kahaneb DN20 toru soojuseraldus antud temperatuuridel 71 W/m-ilt 27 W/m-ini. Jaotustorustiku soojusväljastuse vähenemine on võrreldes

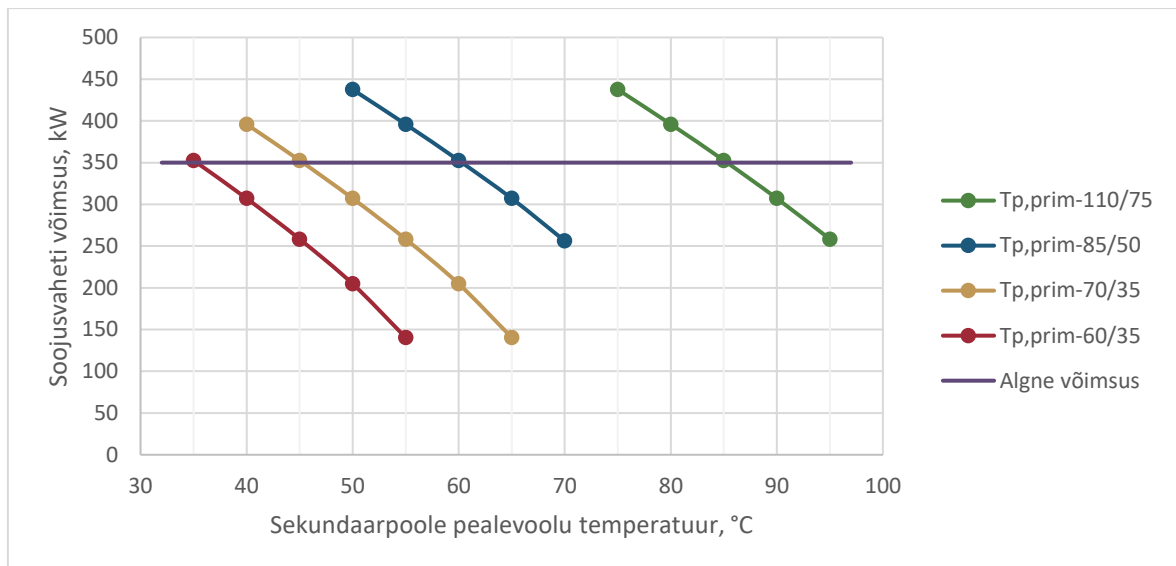
küttekehadega väiksem ning on arvutusliku näite korral 62%. Terastoru soojuseriitvuseks on võetud 50 W/(m·K) ning toru seinapaksuseks 2,60 mm.



Joonis 21 Jaotustorustiku soojusväljastus ruumi muutuva soojuskandja temperatuuri korral siseõhu temperatuur 20°C juures.

4.3 Soojusvahetid

Hoone küttesüsteemis on kasutatud CEA Ecobraze (Kelvio) soojusvahetiteid WP757 ja GBS100. Soojusvahetite arvutuslikud võimsused on 450 ja 65 kW, mis vastavalt valemile (2.4) teeb soojusvahetite soojuslähikandeteguriteks 4,7 ja 4,3 W/(m²·K). Hoides soojusvahetis konstantset logaritmilist temperatuurimuutu on võimalik temperatuurigraafikut nihutades säilitada soojusvaheti väljastatav võimsus.

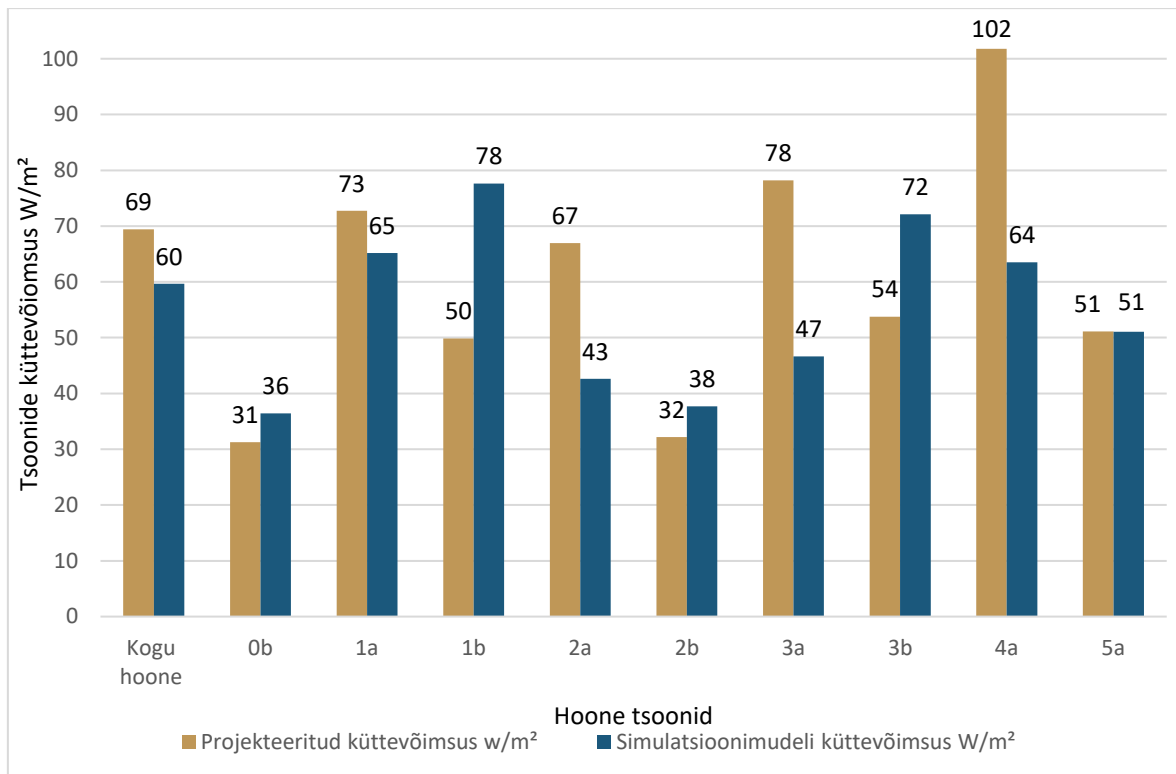


Joonis 22 Kütte soojusvaheti WP757 soojusväljastus erinevatel primaarpoole temperatuurigraafikute korral juhul kui sekundaarpoole tagasivoolu temperatuur on primaarpoole tagasivoolu temperatuurist viie kraadi võrra väiksem.

4.4 Tsoonide küte

Hoonesse projekteeritud küttesüsteemi ning simuleeritud soojuskadude võrdlemiseks on hoones olevate küttekehade ja torustike soojusväljastus võrreldud dünaamilise arvutuses vajaliku küttevõimsusega. Hoone küttesüsteemi soojusväljastuseks on arvestatud nii radiaatorite kui ruumis olevate isoleerimata jaotustorustiku soojusväljastus. Korpuse A küttekehade soojusväljastus on projekteeritud temperatuurigraafikule 95/70/20°C ning korpuse B 70/55/20 °C. Vastavalt hoone automaatikale on ruumide üldine siseõhu temperatuur on 22°C. Kortermajade analüüsi näitel on ühe kraadi siseõhu temperatuuri tõstmise mõju küttekuludele ligikaudu 11 %.

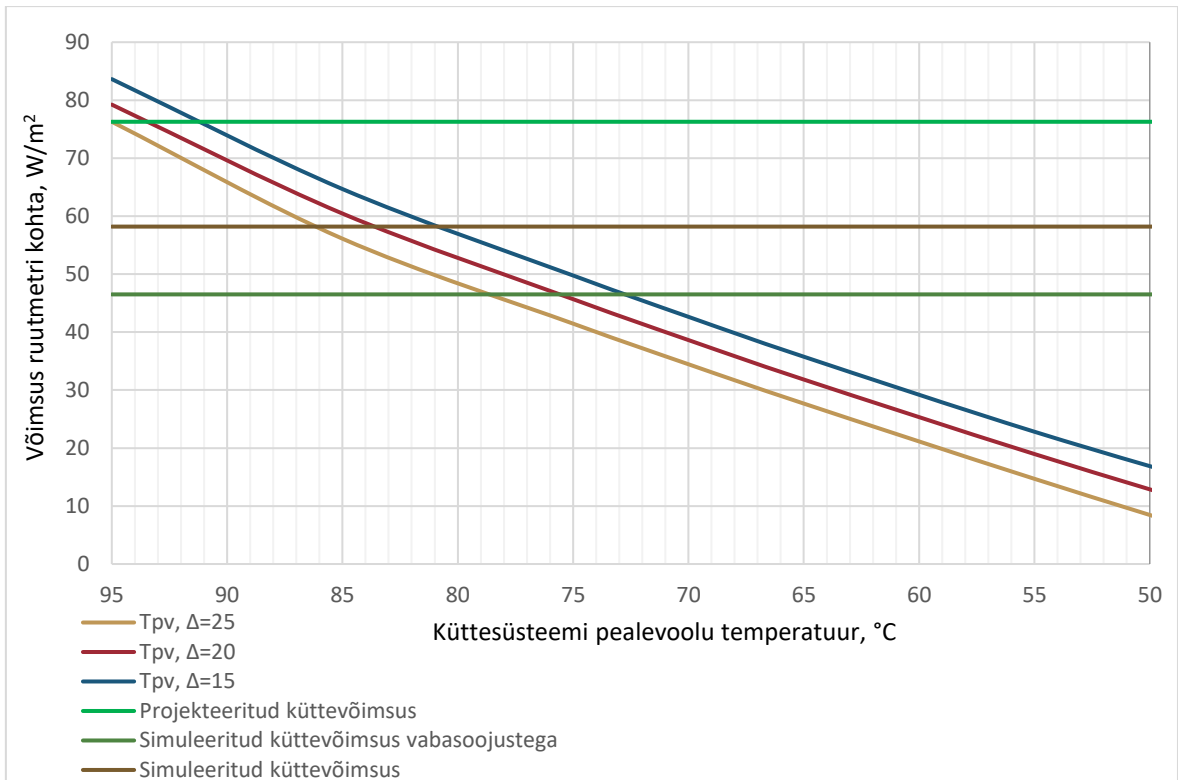
[21]



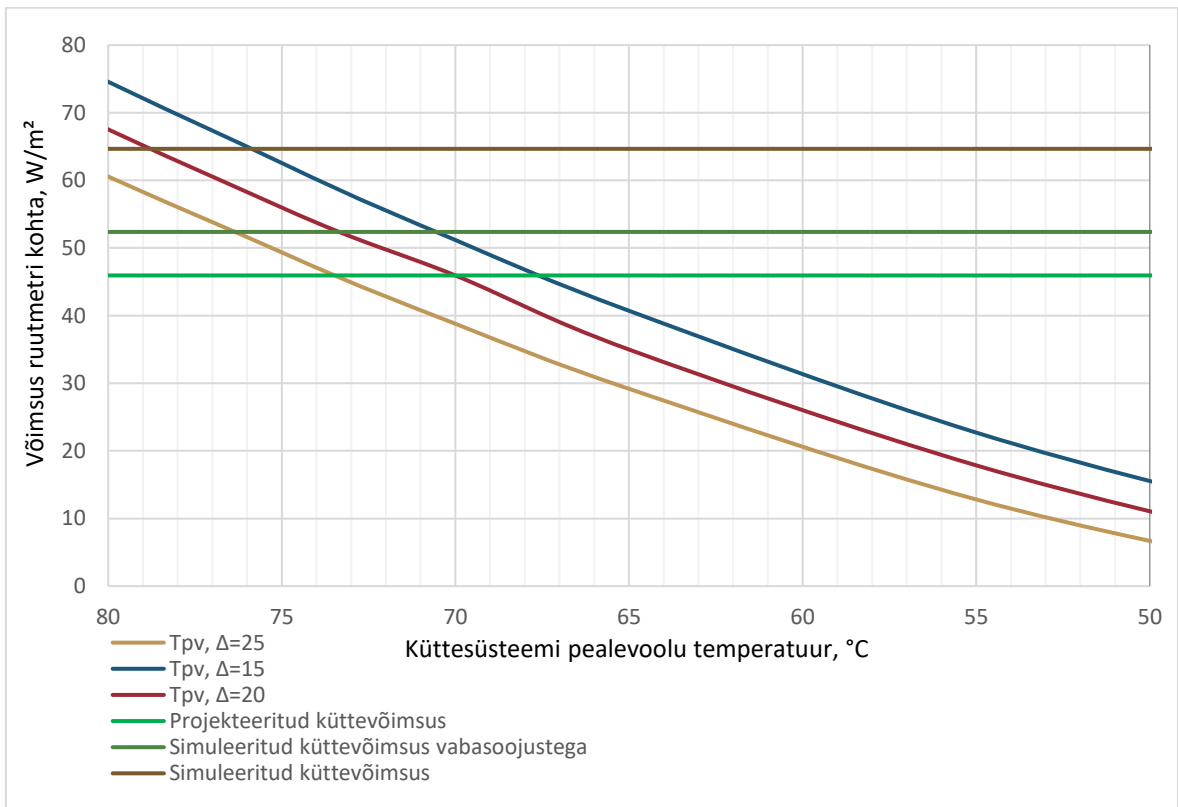
Joonis 23 Õppehoone soojuskadude võrdlus projekteeritud küttesüsteemiga võimsusega põrandapinna kohta.

Õppehoone A korpuse esimene ning viimane korrus vastab simulatsioonimudeli arvutuslikule küttevõimsusele. Korpuse teine kuni neljas korrus on küttesüsteem üle dimensioneeritud üle 35 % ning seal on suurim potentsiaal temperatuurigraafikut alandada.

Õppehoone B korpus on võrreldes simulatsioonimudeli arvutuslikule küttevõimsusele aladimensioneeritud. Suurimad erinevused esinevad keldris ning esimesel ja kolmandal korrusel. Kui keldri korruse kriitiliseks ruumiks on katuseakendega koridor ning esimese korruse kriitilisteks tsoonideks on ruumid, mille all puudub keldrikorrus. Siis kolmandal korrusel kriitilised ruumid puuduvad ning korrus on ühtlaselt aladimensioneeritud.

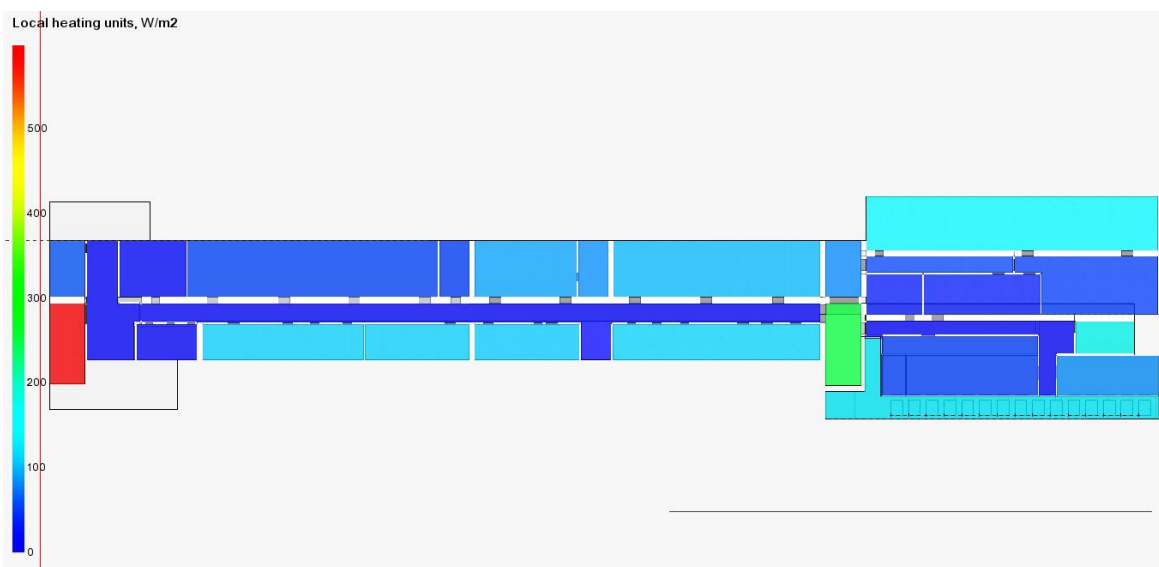


Joonis 24 Öppehoone A korpuse hetkeline olukord arvutuslikul siseõhu temperatuuril 22°C, VAT -21 °C



Joonis 25 Öppehoone B korpuse hetkeline olukord arvutuslikul siseõhu temperatuuril 22°C, VAT -21°C

Hoone projekteeritud küttevõimsus koos jaotustorustiku soojusväljastusega on 419 kW ($69,7 \text{ W/m}^2$), millest A korpuse küttekehade soojusväljastus moodustab 356 kW (76 W/m^2) ning B korpuse küttekehad 62,5 kW ($45,9 \text{ W/m}^2$). Kogu projekteeritud soojusväljastusest moodustab 85% küttekehade soojusväljastus ning 15 % jaotustorustiku soojusväljastus. Jaotustorustiku suur osakaal on tingitud küttekehade ühendamise skeemist kus iga kahe radiaatori kohta on hoones üks isoleerimata jaotuspüstik. Konstantse temperatuurimuudu korral on vabasoojuste arvelt võimalik A korpuse pealevoolu temperatuuri alandada 79 kraadini kuid B korpuse pealevoolu temperatuuri tuleks tõsta 73 kraadini kuna projekteeritud küttevõimsus on simuleeritud küttevõimsuse väärtuses madalam. Hoones kasutatav madalamat pealevoolu temperatuuri võib põhjendada üldkasutatavate- ning laboratooriumiruumide arvutuslikust madalamate siseõhu temperatuuri seadeväärtustega. Ainuüksi mehaanika labori U03B-114 projekteeritud küttevõimsus moodustab B korpuse küttevõimsusest 15 000W (24,8%) samas on selle ruumi arvutuslik soojuskadu siseõhu temperatuuril 18°C 23 637 W, mis ületab projekteeritud väärtust 36,5% võrra.

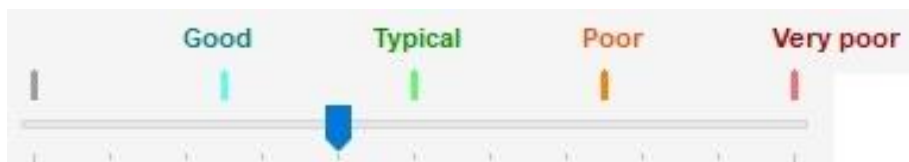


Joonis 26 Hoone esimese korruse simuleeritud küttevõimsus W/m^2 . Kui keldrikorruse kohal olevate tsoonide vajalik küttevõimsus jääb alla 75 W/m^2 siis maapinnaga kontaktis olevate ruumide küttevajadus on ligikaudu 150 W/m^2 . Trepikodade suur küttekoormus põrandapinna kohta on tingitud sellest, et trepikodade tsoonid asetsevad üle mitme korruse.

5 REKONSTRUEERIMISLAHENDUSED JA ENERGIASÄÄST

5.1 Renoveerimise pakett 1

Hoone renoveerimispaketis on kas vahetatud välja või lisatud tarindite kihtidesse jäik polüuretaanvaht ehk PIR plaat soojusjuhtivusega 0,022 W/(m·K) eesmärgiga vähendada tarindi soojusjuhtivust alla 0,15 W/(m²·K) väärtuse. Aknad on renoveeritavas hoones asendatud kolmekordse klaaspaketiga passiivakende vastu. Akna päikesefaktor on idafassaadis 0,5 ning läänefassaadis 0,3. Tarindite renoveerimisega seotult on vähendatud ka joonkülmasildade ja infiltratsioonikao väärtuseid. Täpsema ülevaate tarindite tehnilistest näitajatest saab tabelist 20 ja 21. Hoone summaarseks U arvuks on 0,41 W/(m²·K)



Joonis 27 Rekonstrueerimislahendusega hoone külmasilda graafiline väärtus simulatsiooniprogrammist

Tabel 20 Hoone külmasildade arvutuslikud väärtused rekonstrueerimislahenduse korral

| Joonkülmasild | $\psi_j, \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $I_j, \text{ m}$ | $H_{\text{joonsl}}, \text{ W}/\text{K}$ |
|---|---|------------------|---|
| Välissein-Välissein | 0.07 | 141.8 | 10.2 |
| Välissein-Katuslagi | 0.13 | 482.9 | 65.1 |
| Põrand pinnasel - välissein | 0.33 | 413.0 | 135.5 |
| Akna seinakinnitus | 0.07 | 2736.2 | 186.1 |
| Ukse seinakinnitus | 0.07 | 45.2 | 3.1 |
| Välissein-sisesein | 0.02 | 479.3 | 10.8 |
| $H_{\text{joonsl}}, \text{ W}/\text{K}$ | | | 410.8 |

Tabel 21 Hoone konstruktsioonid pakutud rekonstrueerimislahenduse korral

| Hoone piirdetarindid | Pindala, m ² | Soojusjuhtivus, W/(m ² ·K) | U·A, W/K | Piirdetarindi osakaal, % |
|---|-------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------------------|
| Välisseinad | 2553 | 0,13 | 331,0 | 10,9 |
| VS-07 terasprofiil + PIR100 + krohv ¹ | 102 | 0,12 | 12,1 | 0,4 |
| VS-03 + PIR150 krohv fassaad ² | 335 | 0,13 | 44,2 | 1,5 |
| VS-06 betoon + PIR150 + krohv fassaad ² | 122 | 0,14 | 17,3 | 0,6 |
| VS-05 betoon + PIR150 + telliskivi fassaad ² | 96 | 0,14 | 13,0 | 0,4 |
| VS-01(02) + PIR150 + Telliskivi fassaad ² | 1898 | 0,13 | 244,4 | 8,0 |
| Sokli seinad | 678 | 0,66 | 446,4 | 14,6 |
| VS-09 U03b sokli sein + PIR100 ¹ | 117 | 0,13 | 15,2 | 0,5 |
| VS-11 sokli sein, raudbetoon | 561 | 0,77 | 431,2 | 14,1 |
| Katus | 1557 | 0,12 | 187,6 | 6,2 |
| KK-02 soojustus + PIR100 + plekkprofiil ¹ | 441 | 0,11 | 47,4 | 1,6 |
| KK-01 + PIR100 + EPS + õõnespaneel ¹ | 1116 | 0,13 | 140,2 | 4,6 |
| Põrand pinnasel | 834 | 0,27 | 223,9 | 7,3 |
| PK-1 Betoon + XPS | 296 | 0,22 | 66,3 | 2,2 |
| PK-2 Betoon + TEP plaat | 538 | 0,29 | 157,6 | 5,2 |
| Põrand pinnasel (kõrgemal maapinnast) | 786 | 0,6 | 469,2 | 15,4 |
| PK-2 Betoon + TEP plaat | 786 | 0,6 | 469,2 | 15,4 |
| Aknad | 1072 | 0,84 | 900,5 | 29,5 |
| 3xaken, g=0.3 | 459 | 0,84 | 385,6 | 12,6 |
| 3xaken, g=0.5 | 613 | 0,84 | 514,9 | 16,9 |
| Uksed | 22 | 1,71 | 38,1 | 1,3 |
| EST 2019 Standard uks | 22 | 1,71 | 38,1 | 1,3 |
| Külmasillad | 0 | 0 | 455,7 | 14,9 |
| Kokku | 7502 | 0,41 | 3052,3 | 100 |

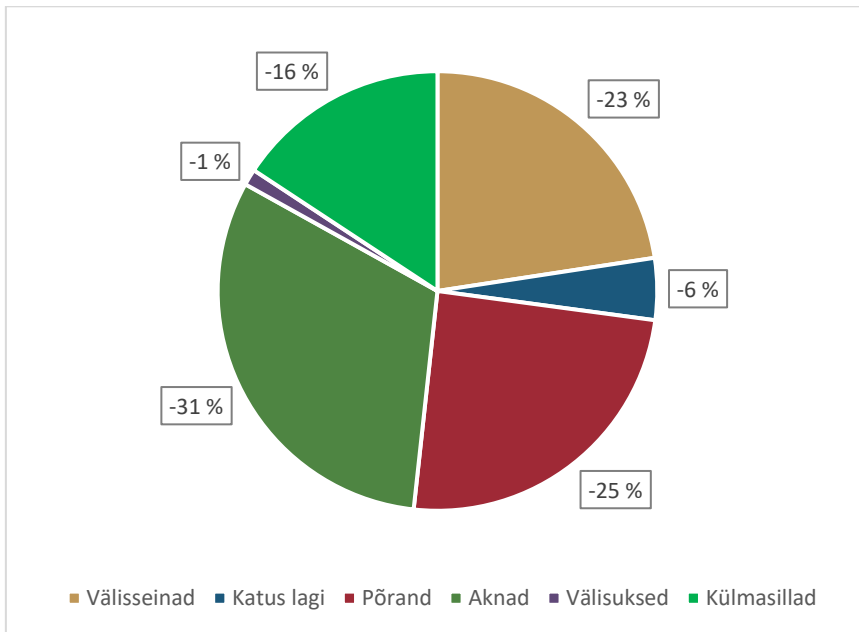
5.2 Soojuskaod läbi piirdetarindite

Tabel 22 Renoveeritud hoone piirdetarindite soojuskaod

| Piirdetarind | Tarindi pindala, m ² | Keskmine soojusläbivustegur, W/(m ² ·K) | Soojuskadu läbi piirdetarindi, MWh/a | Soojuskadu läbi piirdetarindi enne, MWh/a | Soojuskao vähenemine, % |
|--------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|---|-------------------------|
| Välisseinad | 2553 | 0,13 | 67 | 155 | -57 |
| Sokli seinad | 678 | 0,66 | | | |
| Katus lagi | 1557 | 0,12 | 13 | 38 | -64 |
| Põrand | 1620 | 0,43 | 73 | 74 | -1 |
| Aknad | 1072 | 0,84 | 93 | 322 | -71 |
| Välisüksed | 22 | 1,71 | 4 | 4 | -4 |
| Külmasillad | | | 47 | 130 | -64 |
| Kokku | 7502 | | 297 | 722 | -59 |

1 PIR plaat paigaldatud olemasolevale soojustusplaadile peale

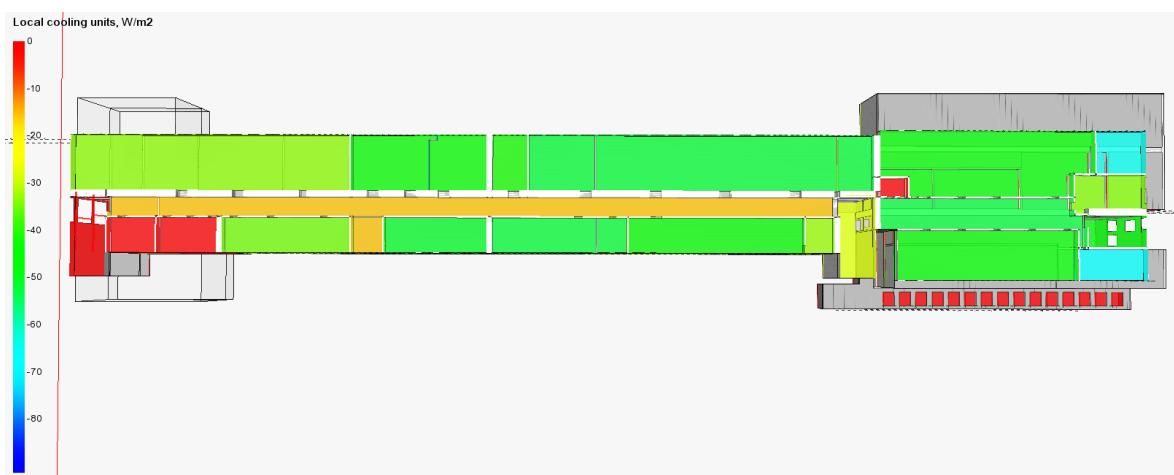
2 Vana soojustus eemaldatud ning selle asemele paigaldatud PIR plaat.



Joonis 28 Renoveeritud hoone piirdetarindite soojuskadude jagunemine

5.3 Jahutus

Jahutussüsteemi vajalik võimsus pakutud renoveerimislahenduste juures on 192 kW (32,0 W/m²). Ventilatsiooni sissepuhke temperatuuri juures 20 °C moodustab jahutusvajadusest 85,6 kW (14,2 W/m²) ventilatsiooniõhu jahutus ning 106,3 kW (17,8 W/m²) ruumide jahutus. Jahutussüsteemi summaarne vajalik elektrienergiatarve on 14,8 MWh ehk 2,5 kWh/m².



Joonis 29 Uuritava hoone kolmanda korruse ruumipõhine jahutusvajadus pakutud renoveerimislahendusega. Ruumipõhine jahutusvajaduse võimsus ületas 60 W/m² piiri arvutiklassides ning U03B 3 korruse kagu ja edela välisnurgas olevates kabinetides.

5.4 Soojusbilanss

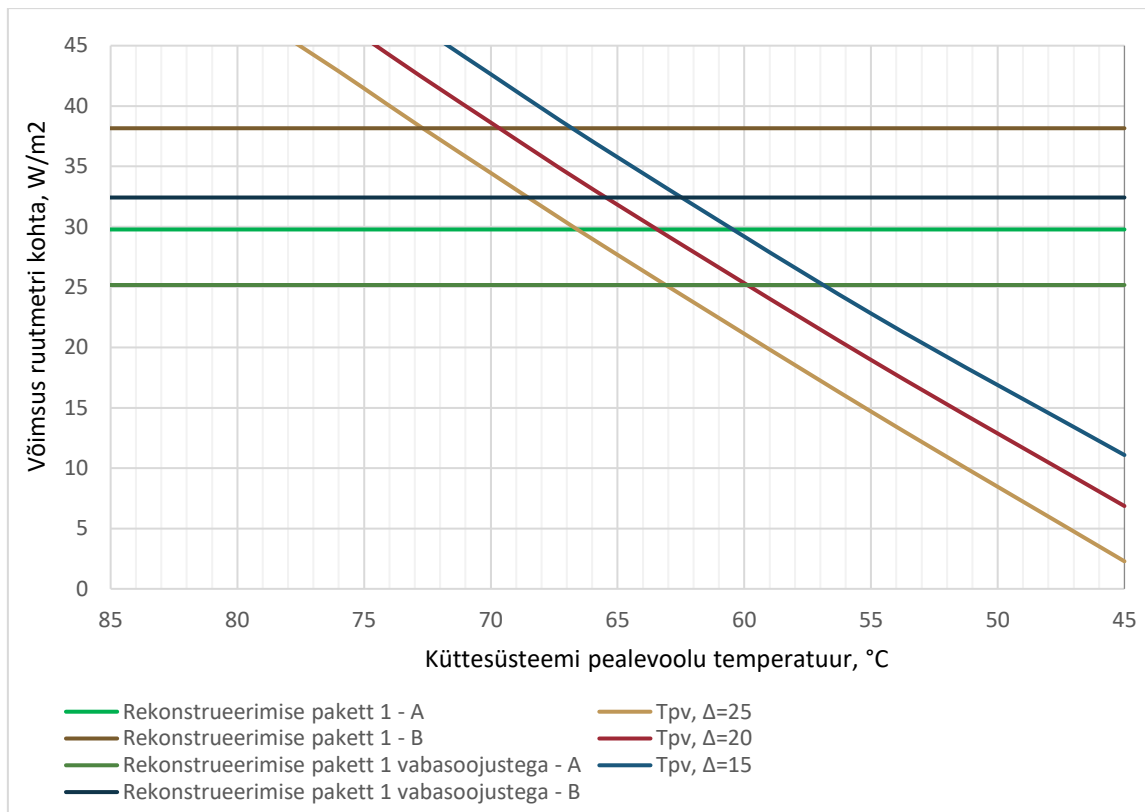
Hoone soojusvarustussüsteemi vajalik võimsus peale rekonstrueerimist väheneb 415 kW-ini (69,1 W/m²) millest radiaatorkütte süsteemi võimsus moodustab 153 kW (25,4 W/m²). Võrreldes esijalgse olukorraga alaneb radiaatorkütte süsteemi vajalik võimsus poole võrra ning hoonesse tarnitud aastane soojusenergia 42 %, mis teeb vajalikuks soojusenergia tarbeks 82,7kWh/(m²·a).

Tabel 23 Renoveeritud hoone soojusbilanss

| Soojusbilanss | MWh/a | % |
|-------------------------------------|--------------|----------|
| Soojuskadu läbi piirdetarindite | 297 | 40 |
| Energiakulu õhuvahetuseks | 259 | 35 |
| Energiakulu infiltratsiooniks | 128 | 17 |
| Energiakulu tarbevee soojendamiseks | 65 | 9 |
| Kokku | 749 | |
| Vabasoojusenergia | 167 | 22 |
| Tarnitud soojusenergia | 582 | 78 |
| Kokku | 749 | |

5.5 Temperatuurigraafiku alandamine

Hoones oleva küttesüsteemi temperatuurigraafikut on võimalik alandada nii küttekehade lisamisega kui hoone soojuskao vähendamisega. Töö esmaseks lahenduseks on pakkuda välja võimalik temperatuurigraafiku alandus piirdetarindite soojuskadude vähendamise arvelt.



Joonis 30 Õppehoone U03 küttegaafik rekonstrueerimiselahenduse 1 korral

Hoone piirdetarindite soojustamise arvelt on võimalik arvutuslikel tingimustel vähendada U03A ja U03B korpuse küttegaafiku temperatuure vastavalt 67/42/22°C ning 70/50/22 kraadini. Hoones olevate vabasoojuste arvelt on võimalik küttegaafikuid vähendada veelgi. Temperatuurigraafikud on sel juhul 63/38/22°C ning 65/45/22°C. Vähendades U03A korpuse küttesüsteemi temperatuurilangu 5°C võrra langeb süsteemi temperatuurigraafik 64/44/22°C peale, mis vabasoojusteid arvestades oleks 60/40/22°C.

Kuna antud töös on küttesüsteemi toimivus arvatud temperatuurile 22°C siis ruumi pikaajalisel kasutamata jätmisel väheneb selles olev siseõhu temperatuur keskmiselt 19-nele kraadile. Kuigi antud temperatuur kasvatab ruumis olijate rahulolematuse protsenti vastavalt tabelile 2 viieteistkümne protsendini, siis arvestades ülikooli ruumide vähest kasutust [22] on antud meede mõistlik energiasäästu silmas pidades. Oma magistritöös on K.R.Penu välja toonud, et ruumi siseõhu temperatuuri alandamisel 23/20°C, ajaperioodil 57,1 % nädalast, väheneb vajalik kütteenergia 11,7% võrra [23], mis antud kontekstis tähendaks ligikaudu 10 %-list energiasäästu iga kasutusest väljas oleva ruumi kohta.

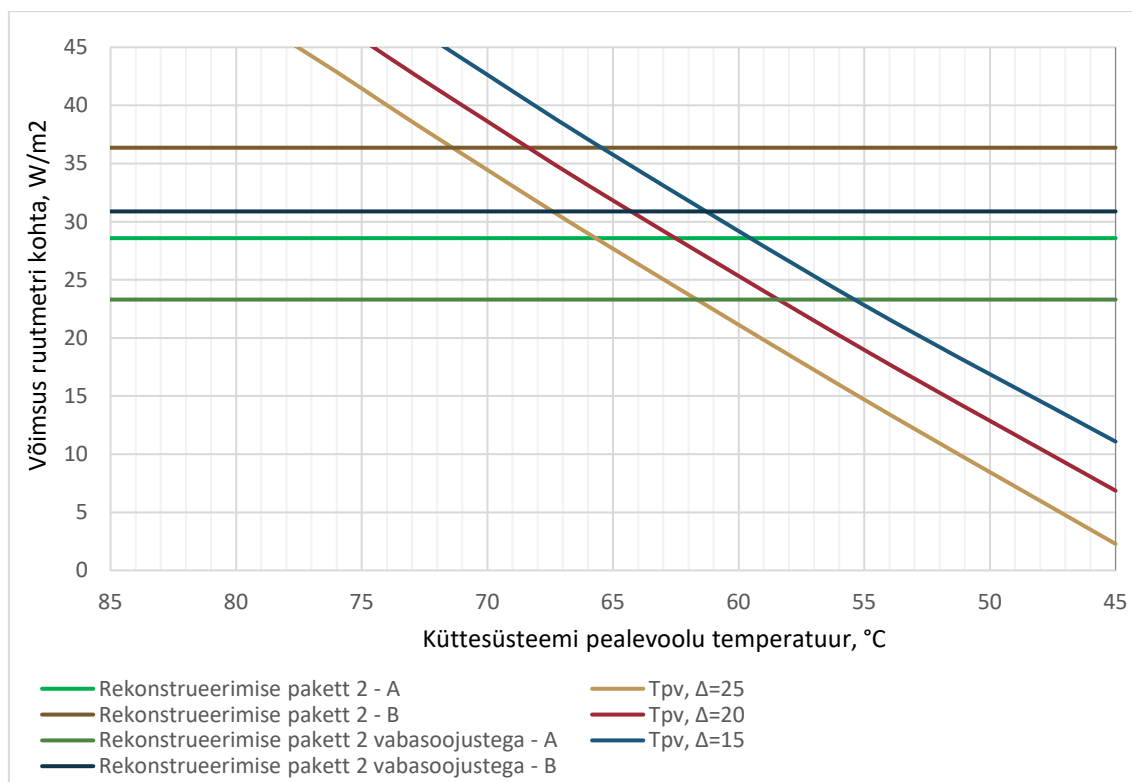
Kuigi küttesüsteemi pealevoolu temperatuure on temperatuudilangu vähendamisega võimalik veelgi alandada, siis pole see kaugküttesüsteemi toimivust arvestades mõistlik.

Iga kraadi vähendatud küttesüsteemi temperatuurilangu kohta väheneb pealevoolu temperatuur 0,6 kraadi võrra kuid samas tõuseb tagasivoolu temperatuur 0,4 kraadi võrra.

5.5.1 Rekonstrueerimispakett 2 - Akende vahetus

Vahetades kolmekordsed aknad neljakordsete akende vastu, mille summaarne soojuskadu on 0,6 W/m² ning päikeseläbivuse tegur 0,1 võrra parem, rekonstrueerimislahenduses 1 kasutatavatest akendest, väheneb soojuskadu läbi akende 28 % ehk 97 MWh/a pealt 67 MWh/a-le. Hoone küttesüsteemi võimsus alaneb 11 kW võrra väärtuseni 404 kW ning summaarne soojusenergia vajadus väheneb 20 MWh/a võrra ehk 3,5%. Hoone jahutussüsteemi võimsus alaneb 18 kW võrra väärtuseni 174 kW ning summaarne jahutussüsteemi elektrienergia vajadus väheneb 3,2 MWh/a ehk 28%. Paremate akende kasutuselevõtuga väheneks ETA väärtus 177,6-ni, mis on 2,9 võrra parem rekonstrueerimislahendusega 1 saavutatud väärtusest.

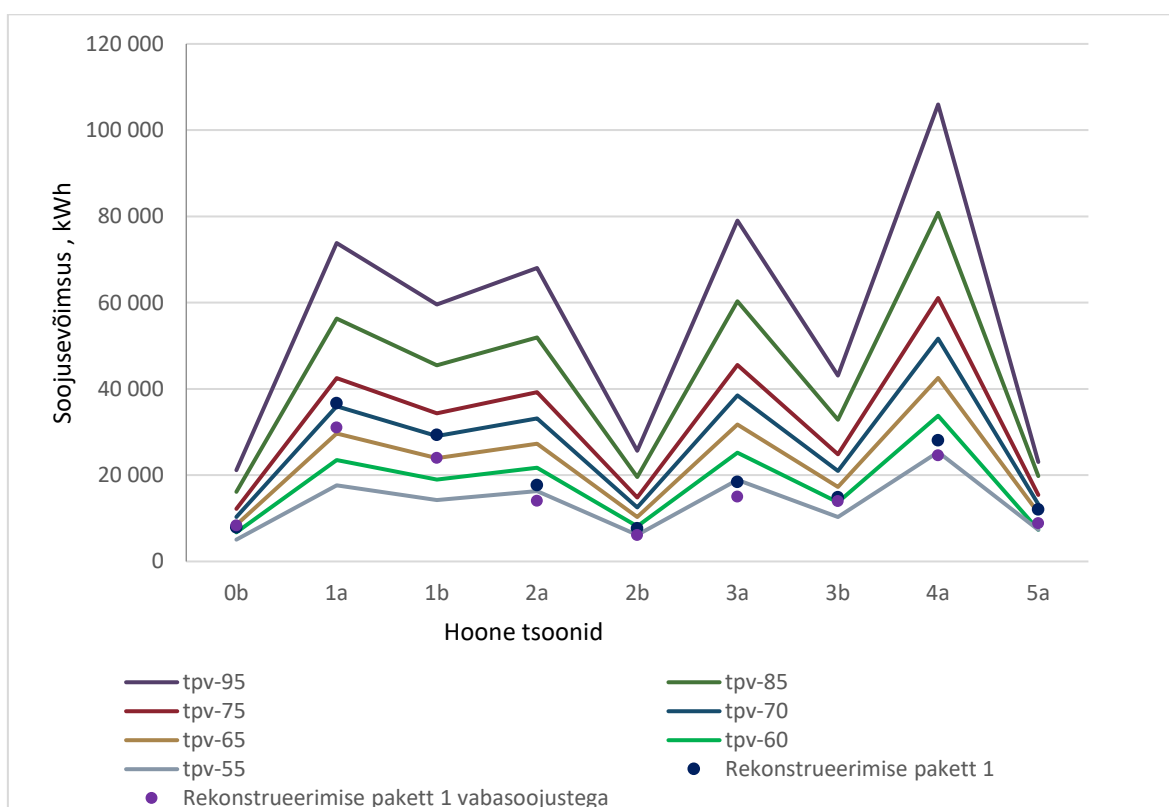
Akende parandamise tulemusel vähenevad küttegaafikute temperatuurid 66/41/22°C ning 68/48/22 kraadile. Hoones olevate vabasoojuste arvelt alaneksid temperatuurigraafikud 62/37/22°C ning 63/43/22°C väärtusteni.



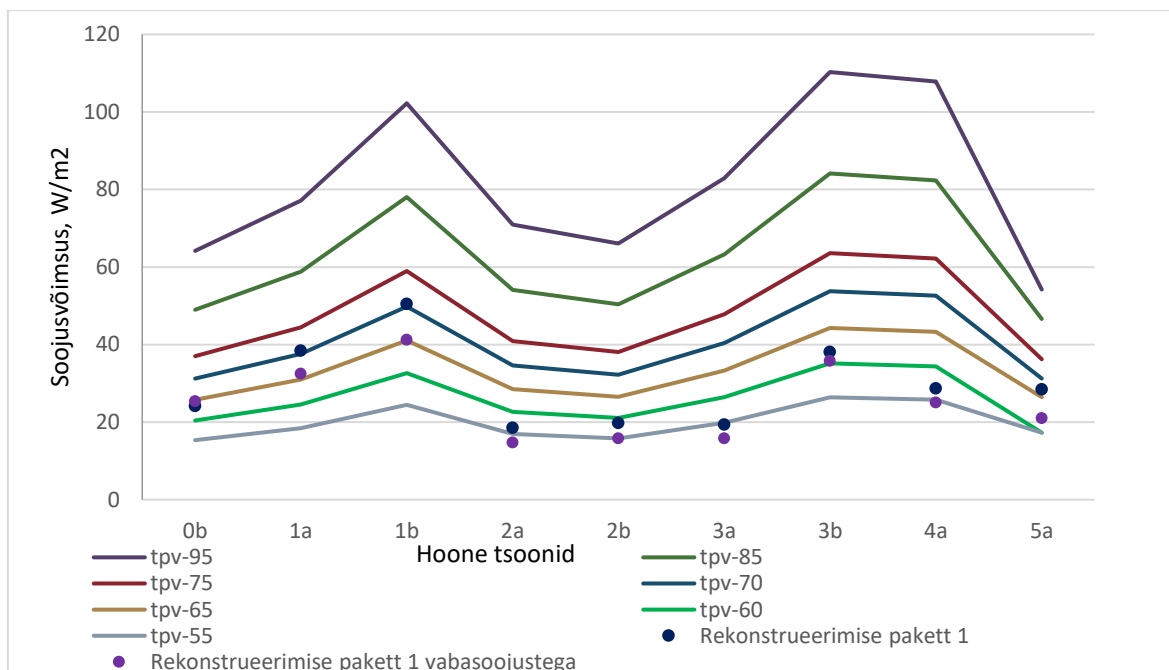
Joonis 31 Õppehoone U03 küttegaafik kui rekonstrueerimiselahenduses parandada akende soojusläbivust 0,84 pealt 0,6 W/(m²·a) peale

5.6 Tsoonide analüüs

Kuna pakutud rekonstrueerimislahendus ei hõlma endas põrandate soojuslähivuse parandamist siis osutuvad kriitilisteks tsoonideks just mõlema korpuse esimesed korrused. Tsoonide analüüsist selgub, et kuigi hoone korpuste soojusväljastus oleks tagatud temperatuurigraafikutele 67/42/22°C ja 70/50/22°C siis nendel väärtustel juures pole tagatud esimese korruse optimaalne temperatuur. Sealsed soojuskadud on võrreldes ülejäänud hoonega vähem langenud, mistõttu esimese korruse sisekliima tagamiseks oleks vajalik küttesüsteemi temperatuurigraafik mõlemas korpuses 71/51/22°C. Vähendamaks kogu hoone temperatuurigraafikut tuleb täiendavalt vähendada kriitiliste tsoonide soojuskadusid või suurendada sealsete küttekehade pinda. Joonisel 32 ja 33 kujutavad joonega näidatud väärtused tsoonide küttekehade soojusväljastust erinevate temperatuurigraafikute korral ning punktidega näidatud väärtused hoone küttekoormust pakutud rekonstrueerimislahenduse 1 korral.



Joonis 32 Hoone tsoonide küttekehade soojusväljastus erinevate pealevoolu temperatuuride korral kui soojuskandja temperatuurilang on 20°C, siseõhu temperatuur 22°C ning VAT -21°C



Joonis 33 Hoone tsoonide küttekehade soojusväljastus ruutmeetri kohta erinevate pealevoolu temperatuuride korral kui soojuskandja temperatuurilang on 20°C, siseõhu temperatuur 22°C ning VAT -21°C

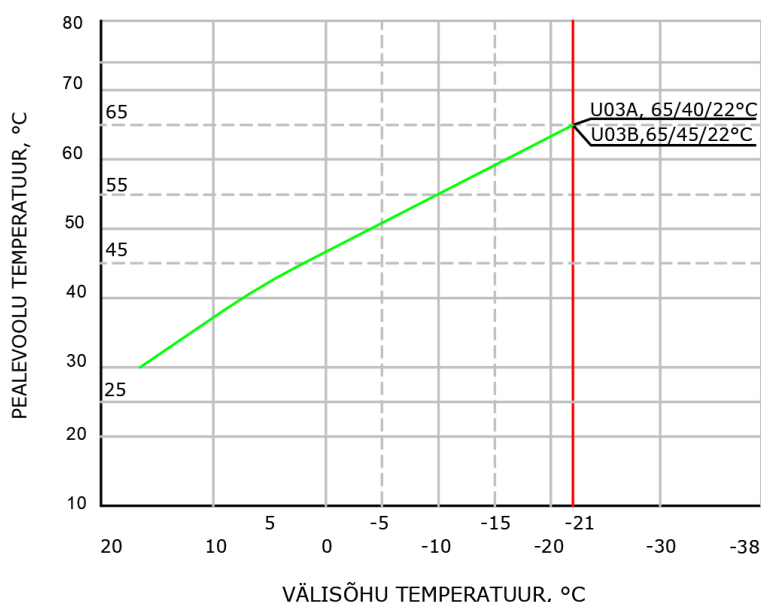
Tabel 24 Täiendavad meetmed soojuskandja temperatuuride alandamiseks

| Tsoon | Parandusettepanek | Mõju arvutusliku kütte temperatuurigraafikule. |
|-------|---|---|
| 1b | Suurendada laboriruumi 114 küttekehade soojusväljastust 50 % | Küttekehade pindala kasvu arvelt saab t_{pv} -d alandada 65 °C-ini |
| | Suurendada laboriruumi 115 küttekehade soojusväljastust 100 % | |
| 3b | Kabinettide radiaatorid vahetada välja, PC21-800 → PC21-1000 | Küteviimsuse kasv 18 %, Suurendatud küttekehade arvelt saab t_{pv} alanemine 55°C-ini. |
| 1a | Vähendada siseõhu arvutuslik temperatuur 20-le kraadile ning suurendada maapinna peal asetsevate ruumide küttekehade soojusväljastust 30% võrra | Vajaliku soojusviimsuse vähenemine 9% koos küttekehade soojusviimsuse kasvuga 30%, t_{pv} alanemine 60°C-ini. |
| 5a | Lisada üks PC21-1800-600 radiaator | Küteviimsuse kasv 16%, t_{pv} alanemine 65°C-ini |
| 1a/1b | Paigaldada tarbevee soojendamiseks kaheastmeline soojusvaheti süsteem | Tagatud aastaringe minimaalne tagasivoolu temperatuur kaugkütte võrku. |
| 1a/1b | Põrand- või seinkütte kasutamine vähendamaks radiaator- ja ventilatsiooniküte tagasivoolu temperatuuri | Tagatud aastaringe minimaalne tagasivoolu temperatuur kaugkütte võrku. |

5.7 Küttesüsteemi temperatuurigraafik

Võrreldes tulemusi uuritavas hoones kasutatava temperatuurigraafikuga pole näha märkimisväärset pealevoolu temperatuuride vähenemist kuigi renoveerimispaketi üks korral vähenesid soojuskaod 42% võrra. Kuna olemasolevas hoones on küttekehade soojusväljastuse üle- ja aladimensioneerimine tsoonide lõikes ebaühtlane siis võib oletada, et kasutatav temperatuurigraafik on seatud võimalikult madalaks, et vähendada ruumide üle kütmist.

Täiendavate meetmete rakendamisel saaks rekonstrueeritava hoone A korpuses kasutada temperatuurigraafikut 65/40/22°C ning B korpuses 65/45/22°C. Vabasoojuse arvelt on võimalik temperatuurigraafikut veelgi alandada 4 kraadi võrra. Täiendavaks energiasäästuks tuleks renoveeritavas hoones kasutada küttesüsteemi tarka juhtimist, mis tagaks ruumides operatiivse temperatuuri ning hoiaks kulud soojuskandja ringlemisele minimaalsed.



Joonis 34 Õppehoone küttesüsteemide pealevoolu temperatuurigraafik pakutud renoveerimislahenduse korral.

5.8 Rekonstrueerimislahenduse erienergiakasutus

Rekonstrueerimislahenduste rakendamisel on võimalik hoone ETA väärtust võimalik vähendada 227 pealt 171-ni. Tulemuse vähenemine oli suure osas tingitud ruumide küttevajaduse vähenemisest, mille väärtus enne renoveerimist on 721 MWh. Kuigi pakutud rekonstrueerimispaketiga ei olnud võimalik saavutada C energiatõhususklassi siis läbi valgustussüsteemi uuenduse või päiksepaneelide lisamise on konkreetne eesmärk võimalik saavutada. Pakutud meetmete mõju ETA väärtustele toodaks välja peatükis 6.

Tabel 25 ETA välja pakutud renoveerimislahenduse korral

| | Elekter, kWh/a | Küte, kWh/a | Tarnitud energia, kWh/(a·m ²) | Kaalumistegur | Energiatõhusus arv KEK, kWh/(m ² ·a) | Energiatõhusus arv praegu, kWh/(a·m ²) |
|--------------------------------|----------------|----------------|---|---------------|---|--|
| Küttesüsteem | | | | | | |
| Ruumide küte | | 360 279 | 60,0 | 0,9 | 54,0 | 108,0 |
| Ventilatsiooniõhu soojendamine | | 155 966 | 26,0 | 0,9 | 23,4 | 26,1 |
| Tarbevee soojendamine | | 64 864 | 10,8 | 0,9 | 9,7 | 9,7 |
| Tehnosüsteemide elekter | | | | | | |
| Ventilatsioonisüsteem | 137 393 | | 22,9 | 2 | 45,7 | 45,7 |
| Jahutussüsteem | 7 592 | | 1,3 | 2 | 2,5 | 1,7 |
| Valgustus | 64 908 | | 10,8 | 2 | 21,6 | 21,6 |
| Seadmed | 43 271 | | 7,2 | 2 | 14,4 | 14,4 |
| Summa | 253 164 | 581 109 | 138,9 | 2 | 171,3 | 227,3 |

Tabel 26 KEK pakutud renoveerimislahenduse korral

| | Elekter, kWh/a | Küte, kWh/a | Tarnitud energia, kWh/(a·m ²) | Kaalumistegur | Energiatõhusus arv, kWh/(a·m ²) | Energiatõhusus arv praegu, kWh/(a·m ²) |
|--------------------------------|----------------|----------------|---|---------------|---|--|
| Küttesüsteem | | | | | | |
| Ruumide küte | | 291 025 | 48,4 | 0,9 | 43,6 | 103,2 |
| Ventilatsiooniõhu soojendamine | | 225 738 | 37,6 | 0,9 | 33,8 | 35,4 |
| Tarbevee soojendamine | | 64 865 | 10,8 | 0,9 | 9,7 | 9,7 |
| Tehnosüsteemide elekter | | | | | | |
| Ventilatsioonisüsteem | 128 466 | | 21,4 | 2 | 42,8 | 42,9 |
| Jahutussüsteem | 14 780 | | 2,5 | 2 | 4,9 | 2,3 |
| Valgustus | 111 837 | | 18,6 | 2 | 37,2 | 37,2 |
| Seadmed | 103 531 | | 17,2 | 2 | 34,5 | 34,5 |
| Summa | 358 614 | 581 628 | 156,5 | 2 | 206,5 | 265,2 |

6 TÄIENDAVID MEETMED ENERGIATÕHUSUSE PARANDAMISEKS

6.1 LED valgustus

Arvutuslikult moodustab valgustus ligikaudu kolmandiku hoone elektrienergiakulust. Vahetades olemasoleva valgustuse LED valgustite vastu on võimalik märkimisväärselt säästa hoone elektrienergia vajaduselt. Kuigi 2020 aastaks prognoositakse leedide valgusviljastuseks 200 lm/W, siis erinevate kadude tõttu on valgusti efektiivsus tegelikult madalam. [24] Arvestades leedi väljastatava valgustiheduse väärtuseks 100 lm/W ning vajalikuks valgustiheduseks ruumides 500 lx, siis on vajalikuks valgustuse võimsuseks 5 W/m², mis on 68% väiksem määruses nr. 58 arvestatud energiakulust.

6.2 Ventilatsioon

Olemasoleva ventilatsioonisüsteemi arvutuslik soojustagastus on 60% ning seadmete keskmine SFP väärtus 100%-lise töörežiimi juures ligikaudu 3,6 kW/(m³/s). Hoone summaarse õhuvooluhulga 10,7 m³/s juures on süsteemide aastane elektrienergiatarve 129 MWh ning soojusenergiatarve 224 MWh. Paigaldades hoonele uued ventilatsiooniseadmed mille SFP väärtus oleks 1,5 ning soojustagastus 80% väheneks aastane energiatarbe arvutuslik vajadus ning vajalik elektrienergiatarve samade õhuvooluhulkade juures oleks 57,5 MWh ning soojusenergiatarve 34,4 MWh.

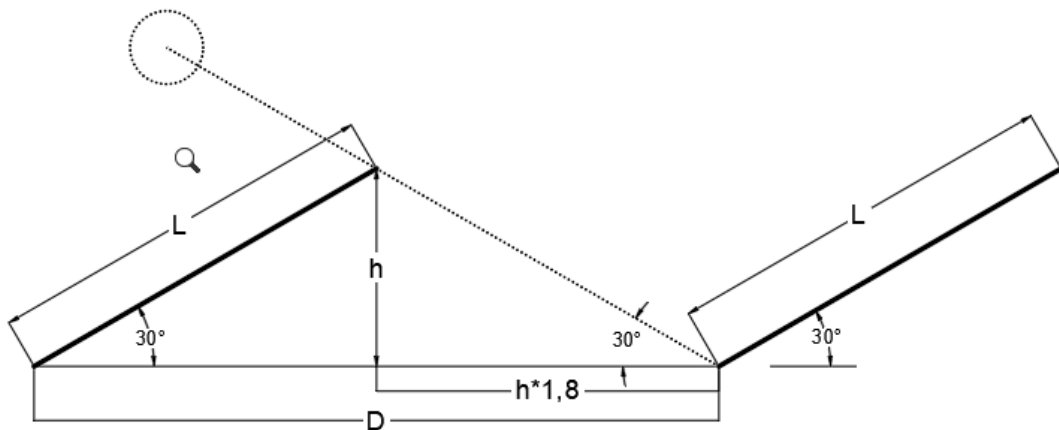
Kasutades hoones olemasolevaid seadmeid tuleb ventilatsiooniseadmete tööd vähendada 75%-ini. Vaadeldud andmete põhjal on ventilatsiooniseadmete SFP väärtus 75%-lise tööpunkti juures 1,1 kuni 1,6kW/(m³/s). Tuginedes Tallinna Tehnikaülikooli U06 ruumide analüüsile [22], on enamus õppehoones olevatest ruumidest alakasutatud. Kui eeldada, et ülikooli sarnasete hoonete kasutusprofiil on samalaadne, siis on võimalik nõudluspõhise ventilatsiooniga parandada nii ruumide õhukvaliteeti kui hoida kokku õhuvahetusele kuluvat energiat. Olemasolevate seadmete säilitamise täpsema säästupotentsiaali hindamiseks on vaja teostada lisauuringuid ventilatsioonisüsteemi toimivusest ning ventilatsiooniseadmete amortiseerimisest.

6.3 PV paneelid

Hoone asetseb põhja lõuna ilmakaarte suhtes 12 kraadi võrra pööratuna, mis teeb hoone pikematele fassaadidele päikesepaneelide paigaldamise ebaotstarbekaks. Samuti

on vaja eraldi hinnangut hoone lõuna poolsele fassaadile PV paneelide paigalduseks, kuna hoonest lõuna suunas asub kõrge männik. Kuigi hoone katusel asetsevad ventilatsiooniõhu väljaviskeelemendid, üks ventilatsiooniagregaat ning 5 katuseakent, siis on ligi 1000 m² suurusel katusel piisavalt ruumi ka päikesepaneelideks.

Ideaalsel tingimustel suudab 1 ruutmeetri suurune paneel toota kuni 150W energiat. Arvestades Eesti ilmastikuolusid jääb ühe ruutmeetri paneeli toodanguks ligikaudu 100 kuni 150 kWh aastas. Vähendamaks paneelidele mõjuvat tuulekoormust ning paneelide varjude tekkega on otstarbekas paigaldada lamekatusel asetsevad päikepaneelid 30 kraadise kalde alla. [25] Arvestades, et 20% katuse pindalast pole tehnosüsteemide ja katuseakende tõttu kasutatav ning paneelide vahele tuleb jätta 1,8 kordne paneeli kõrguse vahe on võimalik katusele paigaldada ligikaudu 454 m² paneele võimsusega 68 kW ning tootlikkusega 45 kuni 68 MWh aastas. Arvestades määruuses [12] kehtestatud arvutusmeetodikat ja haridushoone omatarvet 0,6 on sellise PV-jaama tootlikus 61,6 MWh/a, millest omatarve moodustab 37 MWh/a.



Joonis 35 PV-paneelide kaldenurk [25]

6.4 ETA

Antud renoveerimislahenduse juures on lisaks renoveerimislahendusele 1 hinnatud akende soojusläbivuse parandamist 0,6 W/(m·K)-ni, valgustuse parandamist, ventilatsioonisüsteemi uuendamist ning PV paneelide paigaldamist uuritava hoone katusel.

Tabel 27 ETA täiendavate meetmete rakendamisel.

| | Elekter, kWh/a | Küte, kWh/a | Tarnitud energia, kWh/(a·m ²) | Kaalumistegur | Energiatõhusus arv, kWh/(a·m ²) | Energiatõhusus arv praegu, kWh/(a·m ²) |
|--------------------------------|----------------|----------------|---|---------------|---|--|
| Küttesüsteem | | | | | | |
| Ruumide küte | | 367 451 | 61,2 | 0.9 | 55.0 | 108.0 |
| Ventilatsiooniõhu soojendamine | | 34 455 | 5,7 | 0.9 | 5.2 | 26.1 |
| Tarbevee soojendamine | | 64 864 | 10,8 | 0.9 | 9.7 | 9.7 |
| Tehnosüsteemide elekter | | | | | | |
| Ventilatsioonisüsteem | 57 445 | | 9,6 | 2 | 19.1 | 45.7 |
| Jahutussüsteem | 8 131 | | 1,4 | 2 | 2.7 | 1.7 |
| Valgustus | 27 247 | | 4,5 | 2 | 9.1 | 21.6 |
| Seadmed | 43 593 | | 7,3 | 2 | 14.5 | 14.4 |
| PV paneelid | 37 000 | | 6,16 | 2 | -12.32 | |
| Summa | 136 416 | 466 770 | 100.4 | | 103,0 | 227,3 |

Saavutamaks uurivas hoones A energiatõhususklassi, ehk liginullenergiahoone energiaklassi, tuleks rakendada täiendavaid meetmeid.

- Suurendades PV paneelide omatootlikust 80 %-ni väheneb ETA märgis 4,1 ühiku võrra.
- Ühendades hoone tõhusa kaugküttevõrguga väheneb ETA märgis 27,9 ühiku võrra.
- Hinnata lõunafassaadile paigaldatavate PV paneelide tootlikust.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks on anda ülevaade Tallinna Tehnikaülikooli U03 võimalike renoveerimislahenduste mõjust hoone kütte- ja jahutussüsteemile. Eelduste kohaselt on peale hoone rekonstrueerimist võimalik hoone olemasoleva küttesüsteemi soojussõlme primaarpoolel kasutada sama temperatuuri, mis oleks vajalik sooja tarbevee tootmiseks. Lähtuvalt püstitatud eesmärgile tuleb hoone küttesüsteemi sekundaarpoole pealevoolu temperatuur alandada alla 60-ne kraadi. Töö tulemusena on välja selgitatud küttesüsteemi võimalik temperatuurialandus ning jahutussüsteemi toimivus hoonesse väljapakutud renoveerimislahenduse korral.

Töö käigus tutvuti hoone projekti- ja teostusdokumentatsiooniga ning hoone juhtimiseks kasutatava haldusprogrammiga. Uuritavale hoonele teostati ülevaatus, saamaks andmeid reaalsest olukorrast ning tehnosüsteemide toimivusest. Uurimistöö käigus koostati hoonest simulatsioonimudel, mille energiatarbe kalibreerimiseks kasutati hoone mõõdetud energiatarbimist ja reaalseid kliimaandmeid aastast 2016 kuni 2020.

Hoonele pakutud rekonstrueerimispaketi 1 tulemusel õnnestus vähendada soojusenergia tarvet 42% võrra. Peale rekonstrueerimislahenduste rakendamist jäi küll suurimaks soojuskao liigiks piirdetarindid, kuid nende osakaal vähenes 58-lt protsendilt 40-nele. Samal ajal jäi ventilatsiooniõhu soojendamiseks kuluv soojusenergia konstantseks ning tõusis hoone soojusbilansis 35 protsendini. Rekonstrueerimislahendusega 1 saavutati välispiirete summaarne soojuskadu 0,41 W/(m²·K), kuid ei saavutatud energiatõhususe klassi C.

Esmasel hinnangul oli vähenenud soojusenergia vajaduse arvelt võimalik hoone küttesüsteemi temperatuurigraafikut alandada seadistatud 74-jalt kraadilt 67 kraadini, mida on vabasoojuste arvelt võimalik vähendada veel 4 kraadi võrra. Uuritava objekti tsoonide kaupa analüüsimisel selgus, et kriitilistes ruumides operatiivse temperatuuri tagamiseks on vaja ette näha 71 kraadi suurust pealevoolu temperatuuri. Antud väärtust oli võimalik alandada läbi kriitiliste tsoonide siseõhu temperatuuri alandamise ning küttekehade lisamise arvelt, mille tulemusel langes küttesüsteemi pealevoolu temperatuur alla 60-ne kraadi enamuse ajast aastas.

Võrreldes tulemusi olemasoleva küttegaafikuga on süsteemi pealevoolu temperatuuride alandus pigem tagasihoidlik. Üheks selle põhjuseks võib tuua hoone aktiivse halduse, mille tulemusel on süsteem seadistatud optimaalseimale režiimile, et vähendada hoone üle kütmist ning kasutada maksimaalselt ära hoones olevaid

vabasoojuseid. Samas võib pidada realistlikuks, et staatiliselt tasakaalustatud küttesüsteemis on tasakaalu huvides vähendatud soojuskandja temperatuurilangu ja suurendatud voolukiiruseid. Kuna töö käigus süsteemi tagasivoolu temperatuure ei mõõdistatud ning küttesüsteemi juhtimist ei uuritud siis seda kindlat väita ei saa kuid see võib olla üheks põhjuseks miks uurimistöö tulemusel saadud soojuskandja pealevoolu temperatuuri alandus oli pigem tagasihoidlik. Küttesüsteemi juhtimisele hinnangu andmiseks ning parandusettepanekute esitamiseks on vaja teostada täiendav analüüs.

Vähendades hoone küttesüsteemi pealevoolu temperatuuri, samas tagades süsteemis maksimaalse temperatuurilangu, on võimalik luua eeldused tulevikus kliimaneutraalsemate kütteleikide kasutuselevõtuks ülikooli linnaku soojusvõrgus. Rekonstrueerimislahenduste tulemusel on võimalik hoone olemasoleva küttesüsteemi tagasivoolu temperatuuri alandada ligilähedaseks ruumide õhutemperatuuriga enamuse osa ajast aastas. Antud tulemil on tulevikus võimalik kaugküttesüsteemis kasutada nii soojuspumpasid, energia ja soojuse koostoomise jaamasid, kondensaatkatlamaju või biomassil põhinevaid küttesüsteeme nende maksimaalse efektiivsuse juures.

SUMMARY

The aim of this final research thesis is to provide overview of the impact of the Tallinn University of Technology's U03 building renovation solution on a heating and cooling system. According to assumptions, after the reconstruction of the building, it is not necessary to raise the supply temperature of district heating network above the value what is required for the production of domestic hot water. Based on that purpose, the supply temperature of building heating system must be lowered below 60 degrees. As a result of the work, the possible temperature reduction of the heating system and the performance of the cooling system after the possible renovation solution have been determined.

In the course of the work, building management system as well as design and implementation documentation was examined. The investigated building was inspected to obtain data on the real situation and the performance of the hvac systems. In the course of the research, a simulation model of the building was composed. For model calibration the energy expense was based on the real measured energy consumption of the building and real climate data from year 2016 to 2020.

As a result of proposed reconstruction package 1, it was possible to reduce building heating energy consumption by 42%. After the implementation of the reconstruction solutions, the largest type of heat loss remained the structures of building, but their share decreased from 58% to 40%. At the same time, the heating energy used to warm the ventilation air remained constant and increased to 35 percent in the building heating balance. Reconstruction solution 1 achieved a total heat loss of $0.41 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for the external boundaries, but did not achieve energy efficiency class C.

According to the initial estimate, due to the reduced heating energy need, it was possible to reduce the supply temperature of the heating system of the building to 67 degrees, which can be reduced by another 4 degrees at the expense of free heat. The analysis of the object zones investigation revealed that in order to ensure the operating temperature in the critical rooms, it is necessary to provide a flow temperature of 71 degrees. This value could be reduced by lowering the indoor air temperature or adding heaters to critical zones. Impact of improving critical zones resulted a supply flow temperature of the heating system dropped below 60 degrees for most of the year.

Comparing the results with the existing heating schedule, the reduction of the system supply flow temperature is rather light. One of the reasons for this can be the active

management of the building, as a result of which the heating system is set to the most optimal mode to reduce overheating of the building and to make maximum use of the free heat in the building. At the same time, it can be considered realistic that in a statically balanced heating system, the temperature drop of the heat transfer medium is decreased and the flow rates are increased for the sake of heating system balance. Since the system return temperatures were not measured during the work, this cannot be stated with full certainty, but this may be one of the reasons why the reduction of the supply flow temperature of the research was rather modest. Further analysis is needed to assess and propose improvements to the management of the heating system.

By reducing the flow temperature of the building's heating system, while ensuring the maximum temperature drop in the system, it is possible to create preconditions for the introduction of more climate-neutral production of heating energy for the university campus district heating system. As a result of the reconstruction solutions, it is possible to lower the return temperature of the existing heating system of the building to close to the room air temperature for most of the year. Which can be followed by possibility to use heat pumps, energy and heat production plants, condensing boilers or biomass based heating systems at their maximum efficiency.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Tallinna Tehnikaülikool, „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia,” Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, 2020.
- [2] T. Ommen, W. B. Markussen ja B. Elmegaard, „Lowering district heating temperaturese impact to system performance in current and future Danish energy scenarios,” *Energy*, vol. 94, pp. 273-291, 2016.
- [3] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund ja B. V. Mathiesen, „4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” *Energy*, vol. 68, pp. 1-11, 2014.
- [4] M.Jangsten, J.Kensby, J.O.Dalenbäcl ja A.Trüschel, „Survey of radiator temperatures in buildings supplied by district heating,” *Energy*, vol. 137, pp. 292-301, 2017.
- [5] A. Mikola, A. Hamburg, J. Kurnitski ja T. Kalamees, „Rekonstrueeritud korterelamute sisekliima ja energiakasutuse analüüs,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2017.
- [6] D. Østergaard ja S. Svendsen, „Replacing critical radiators to increase the potential to use low-temperature district heating - a case study of 4 Danish single-family houses from the 1930s,” *Energy*, vol. 110, pp. 75-84, 2016.
- [7] D. Østergaard ja S. Svendsen, „Space heating with ultra low temperature district heating - a case study of four single family houses from the 1980s,” *Energy procedia*, vol. 116, pp. 226-235, 2017.
- [8] M. Jangsten, „Survey of radiator temperatures in buildings supplied by district,” Chalmers university of technology, Gothenburg, 2016.
- [9] H. Lund, „Renewable energy strategies for sustainable development,” *Energy*, vol. 32, pp. 912-919, 2007.
- [10] Eesti jõujaamade ja kaugkütte ühing, [Vörgumaterjal]. Available: <https://epha.ee/tohus-energia/>.
- [11] Ettevõtlus- ja infotehnoloogiaminister, „Hoonete energiatõhususe miinumum nõuded. Määrus nr 63,” Riigi teataja, 2020.
- [12] Majandus- ja taristuminister, „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika. Määrus nr 58,” Riigi teataja, 2020.
- [13] T.Kõiv ja A. Rant, Hoonete küte, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2019.
- [14] M. Maripuu, „Sisekliima Õpitulemus Tööviljakus,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2015.
- [15] E. Abel ja H. Voll, Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn: Presshouse OÜ, 2014.
- [16] Eesti Standardikeskus EVS-EN 16798-1:2019, „Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6,” 2019.
- [17] Eesti ehitusteabe fond, „Sisekliimaliigutus 2018, Sisekeskkonna sihtväärtused, projekteerimisjuhised ja tootenõuded,” 2018.
- [18] T. Kalamees ja J. Kurnitski, „Estonian test reference year for energy calculations,” Estonian academy publishers, 2006.
- [19] ASHRAE, „Measurement of Energy and Demand Saving,” American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers inc, Atlanta, 2002.
- [20] Danfoss, „Energy saving solutions for renovation of heating and cooling systems,” Danfoss, Vejle, 2014.
- [21] K. Randjärv, „Õhuvahetuse ja temperatuuri mõju kütteenergiale ja sisekliimale KredExi toetuse abil rekonstrueeritud kortermajade näitel,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.
- [22] R. Männi, „Tallinna Tehnikaülikooli U06 õppehoone sisekliima ja energiatõhususe analüüs,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.
- [23] K.R.Penu, „Õhutemperatuuri alandamisega radiaatorkütte energiasäästupotentsiaali hindamine,” Tallina Tehnikaülikool, Tallinn, 2020.

- [24] A. Erik, „LED valgustitel põhinev valgussüsteem väikeelamule,“ Eesti Maaülikool, Tartu, 2017.
- [25] Tallinna Tehnikaülikool, „Liginullenergia eluhooned rida ja korterelamud,“ Kredex, Tallinn, 2017.

LISAD

LISA nr.1 Tallinna Tehnikaülikooli linnaku õppehoone U03 konstruktsioonid

Lisa nr.1.1 Põrand

PK-01

| Kiht | Paksus, mm | |
|-----------------|------------|--|
| Siseviimistlus | 3 | |
| Betoonvalu | 80 | |
| XPS | 100 | |
| Tihendatud liiv | | |
| Pinnas | | |
| | | |

PK-02

| Kiht | Paksus | |
|----------------|--------|--|
| Siseviimistlus | 3 | |
| Tasandussegu | 20 mm | |
| Betoonvalu | 80 mm | |
| TEP Plaat | 150 mm | |
| Pinnas | | |
| | | |

Lisa nr.1.2 Välissein

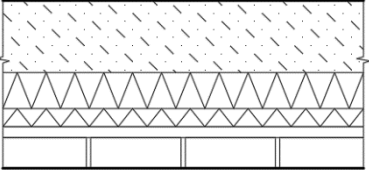
VS-01(2), $U=0,49 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus | |
|----------------|--------|--|
| Siseviimistlus | 5 | |
| Telliskivi | 120 mm | |
| Kivivill | 50mm | |
| Telliskivi | 380mm | |
| | | |

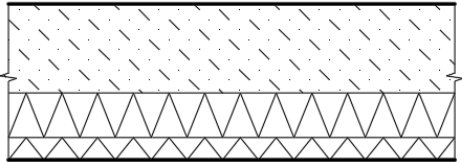
VS-03(8), $U=0,36 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus | |
|----------------|--------|--|
| Siseviimistlus | 5 | |
| Telliskivi | 380 mm | |
| EPS | 100 mm | |
| Krohv | 5 mm | |
| | | |

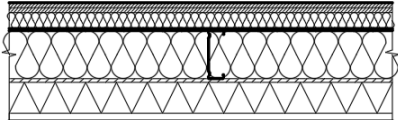
VS-05, $U=0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus |  |
|----------------|--------|--|
| Siseviimistlus | 5 | |
| Raudbetoon | 200 mm | |
| EPS | 150 mm | |
| Õhkvahe | 30 mm | |
| Telliskivi | 120 mm | |

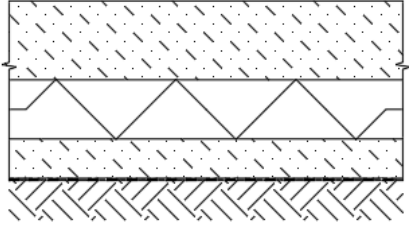
VS-06, $U=0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus |  |
|----------------|--------|--|
| Siseviimistlus | 5 | |
| Raudbetoon | 200mm | |
| EPS | 150mm | |
| Krohv | 5mm | |

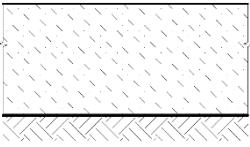
VS-07, $U=0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus, mm |  |
|------------------------|------------|--|
| Siseviimistlus | | |
| Kipsplaat | 26 | |
| Kivivill/ teraskarkass | 42 | |
| Kivivill/ Termoprofiil | 125 | |
| Tsementkiudplaat | 9 | |
| EPS | 70 | |
| Krohv | 5 | |

VS-09, $U=0,43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

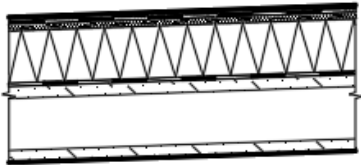
| Kiht | Paksus |  |
|----------------|--------|--|
| Siseviimistlus | 10 | |
| Raudbetoon | 200 mm | |
| EPS 80 | 100mm | |
| Raudbetoon | 100mm | |
| Pinnas | | |

VS-11, $U=1.98 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus |  |
|----------------|--------|---|
| Siseviimistlus | 10 | |
| Raudbetoon | 650 mm | |
| Pinnas | | |

Lisa nr.1.3 Katus

KK-01, $U=0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus |  |
|----------------------------|--------|--|
| SBS kate | 20 | |
| Tuulutussoontega soojustus | 30 | |
| EPS | 140 | |
| RB õõnespaneel | 230 | |
| Siseviimistlus | 5 | |

KK-02, $U=0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

| Kiht | Paksus |  |
|----------------------------|--------|---|
| SBS kate | 20 mm | |
| Tuulutussoontega soojustus | 30 mm | |
| Kivivill | 200 mm | |
| Vineer | 12mm | |
| Kandev plekkprofiil | | |
| Siseviimistlus | | |