



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**HARIDUSHOONE SISEKLIIMA JA ENERGIATARBE
ANALÜÜS TARTU ÜLIKOOLI ÕPPE-JA
TEADUSHOONE DELTA KESKUSE NÄITEL**

**ANALYSIS OF INDOOR CLIMATE AND ENERGY USE IN
EDUCATIONAL BUILDING: CASE STUDY OF TU DELTA
RESEARCH CENTRE
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Sirelyn Pommer

Üliõpilaskood: 165261EAEI

Juhendajad: Raimo Simson, *PhD*, teadur
Egge Haiba, *PhD*, vanemlektor

Tartu 2021

(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.

“18.” mai 2021

Autor: Sirelyn Pommer

/digiallkirjastatud/

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“18” mai 2021

Juhendaja: Raimo Simson

/digiallkirjastatud/

Juhendaja: Egge Haiba

/digiallkirjastatud/

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Sirely Pommer

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose HARIDUSHOONE SISEKLIIMA JA ENERGIATARBE ANALÜÜS TARTU ÜLIKOOLI ÖPPE-JA TEADUSHOONE DELTA KESKUSE NÄITEL,

mille juhendajad on Raimo Simson ja Egge Haiba,

- 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.
-

18.05.2021 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Sirelyn Pommer, 165261EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI02/12Tartu - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendajad: Raimo Simson, PhD, teadur, +372 620 2405

Egge Haiba, PhD, vanemlektor, +372 620 4808

Lõputöö teema:

Haridushoone sisekliima ja energiatarbe analüüs Tartu Ülikooli Teadus- ja õppehoone Delta keskuse näitel

Analysis of the indoor climate and energy use in educational building: Case study of TÜ Delta Research centre

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida uuritava hoone arvutuslikku ja tegelikku energiatarvet
2. Analüüsida uuritava hoone sisekliimat valitud ruumide näitel
3. Võrrelda uuritava hoone energiatarbe ja sisekliima parameetreid teiste sarnaste hoonete mõõtmistulemustega.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö kirjandusega. Andmete läbitöötamine kogumine, hoone kirjelduse koostamine	01.01.21
2.	Andmete analüüs, tulemuste analüüs ja arutelu koostamine.	21.04.21
3.	Lõputöö vormistamine ja esitamine.	18.05.21

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg:

"24." mai 2021. a

Üliõpilane: Sirelyn Pommer

.....
/allkiri/

"18." mai 2021. a

Juhendaja: Egge Haiba

.....
/allkiri/

"18." mai 2021. a

Juhendaja: Raimo Simson

.....
/allkiri/

"18." mai 2021. a

Programmijuht: Aime Ruus

.....
/allkiri/

"18." mai 2021. a

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	5
EESSÕNA.....	7
MÕISTETE, LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS.....	11
KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	13
UURIMUSTÖÖ EESMÄRK JA STRUKTUUR	15
1 TÖÖ TEOREETILISED ALUSED	17
1.1 SISEKLIIMA.....	17
1.2 HOONE ENERGIAKASUTUSE JAGUNEMINE	18
1.2.1 Küttesüsteemide energiatarve.....	19
1.2.2 Soojuskao läbi välispiirete	20
1.2.3 Vabasoojused	20
1.2.4 Ventilatsioonisüsteemide energiatarve	21
1.2.5 Energiakulu tarbevee soojendamiseks.....	22
1.2.6 Jahutussüsteemide energiatarve	22
1.2.7 Seadmete ja valgustuse energiakasutus.....	23
1.3 ENERGIATÕHUSUSE INDIKAATORID.....	23
1.4 HOONETE ENERGIATÕHUSUSE MÄÄRAMINE	24
1.5 MÄÄRUSEJÄRGNE ENERGIARVUTUS	25
1.6 ENERGIATÕHUSUSE MIINIMUMNÕUDED	26
2 MEETODID	28
2.1 UURIMUSTÖÖ OBJEKTI ISELOOMUSTUS	28
2.1.1 Hoone üldandmed	29
2.1.2 Hoone arhitektuur ja konstruktsioonid	30
2.1.3 Soojusvarustus ja küte	32
2.1.4 Soe tarbevesi.....	33
2.1.5 Külmarvarustus ja jahutus	33
2.1.6 Ventilatsioon.....	34
2.1.7 Hooneautomaatika.....	36
2.2 ANDMETE KOGUMINE JA ANALÜÜS	37
2.2.1 Hoone ülevaatus.....	38
2.2.2 Arvutusliku energiamärgise andmed.....	38
2.2.3 Piirdetarindite näitajad.....	40
2.2.4 Tarindite õhulekked	40
2.3 TEISTE ÖPPEHOONETE ANDMETE ANALÜÜS.....	41
2.4 KAALUTUD ENERGIA KASUTUS	42
2.5 SISEKLIIMA ANALÜÜS	44
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS	46
3.1 HOONE ENERGIAKASUTUS	46
3.2 KAALUTUD ENERGIAKASUTUS.....	52
3.2.1 Lokaalne energiakatootmine.....	53
3.2.2 Arvutusliku (ETA) ja mõõdetud (KEK) energiatarbe võrdlus	54
3.3 SISEKLIIMA PARAMEETRITE MÕOTMISTULEMUSED.....	59
3.3.1 Ruumiõhu temperatuur	59
3.3.2 Ruumiõhu CO ₂ sisaldus	62
3.3.3 Ruumikliima analüüs seminariruumi ja arvutiklassi näitel	65
3.4 VENTILATSIOONISÜSTEEMIDE PÕHIPARAMEETRITE VÕRDLUS	71
3.5 ÖPPEHOONETE ENERGIATARBE VÕRDLUS	73

KOKKUVÕTE	80
SUMMARY	82
KASUTATUD KIRJANDUS	84
LISAD	87
LISA 1 KEHTIV ETA	88
LISA 2 KEHTIVA ETA LÄHTEANDMED	89
LISA 3 TARTU KRAADPÄEVAD 2020/21	90
LISA 4 ESIMESE KORRUSE PLAAN, SISEKLIIMA REFERENTSRUUMID	91
LISA 5 TEISE KORRUSE PLAAN, SISEKLIIMA REFERENTSRUUMID	92
LISA 6 KOLMANDA KORRUSE PLAAN, SISEKLIIMA REFERENTSRUUMID	93
LISA 7 NELJANDA KORRUSE PLAAN, SISEKLIIMA REFERENTSRUUMID.....	94
LISA 8 HOONE ISELOOMUTUS.....	95
LISA 9 HOONEAUTOMAATIKA.....	98
LISA 10 VÄLJATÕMBESEADMETE TEENINDUSALA JA PARAMEETRID.....	100
LISA 11 RUUMIKLIIMA TULEMUSED	101
LISA 12 VENTILATSIOONIKAMBER	104

EESSÕNA

Käesolev magistritöö võtab kokku Tartu Ülikooli Delta õppehoone sisekliima ja energiatarbe ajavahemikus 17.02.2020 kuni 17.02.2021. Töö koostamisel lähtuti hoone põhiprojektist, tööprojektist, koguti andmeid hooneautomaatika trendidest ja vaadeldi keskuse tehnosüsteemide ning tarindite väljaehitatud olemust. Uuriti põhjalikult energiatõhususe seadusandlust ja teisi õppehooneid käsitlevaid magistritöid.

Töö koostamisel osutas oma poolse abi andmete kogumiseks Tartu Ülikooli hooneautomaatik Henri Lillemaa, Tartu ülikooli kinnisvaraosakonna juhiabi Ester Veskimets ja hoonele energiaarvutused teinud Indrek Raide. TalTech õppejõud Raimo Simson ja TalTech Tartu kolledži õppejõud Egge Haiba andsid oma panuse töö juhendamises. Täna kõik oma panustatud aja eest käesoleva töö valmimisse.

Märksõnad: sisekliima, energiatõhusus, arvutuslik energiatarve, mõõdetud energiatarve, kaalutud energiakasutus, magistritöö

MÕISTETE, LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Mõisted määrusest Energiatõhususe miinimumnõuded. (2020), Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika. (2020)

CAV – konstantne õhuhulk.

EVS – Eesti Vabariigi Standard

Eksportitud energia - hoones või kinnistul toodetud elektri- või soojusenergia, mida ei kasutata hoones ja mis eksporditakse energiavõrku.

Energiakandja kaalumistegur - tegur, millega võetakse arvesse tarnitud energia tootmiseks vajalik primaarenergia kasutus ja selle keskkonnamõju.

Energiatõhususarv (ETA) – arvutuslik summaarne tarnitud energiate kaalutud erikasutus hoone tüüpilisel kasutusel. Energiatõhususarv kajastab hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks ning see arvutatakse hoone köetava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpilisel kasutamisel. Energiatõhususarvu ühikuks on kilovatt-tund hoone köetava pinna ruutmeetri kohta aastas.

Energiaarvutuse baasaasta – sisekliima- ja energiaarvutuseks koostatud väliskliima andmete kogum, mis põhineb üle-eestilistel kliimaandmetel ajavahemikus 1970–2000 ja on koostatud vastavalt Eesti standardile EVS-EN ISO 15927-4:2005 või vastab samalaadsetele nõuetele.

Erikasutus - aastane energiakasutus kilovatt-tundides hoone köetava pinna ruutmeetri kohta [$\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$].

Energiakasutus – soojus- või elektrienergia kasutus vaadeldavas süsteemipunktis. Energiakasutus arvutatakse netoenergiavajadusest, võttes arvesse süsteemikao ja energia muundumise. Tehnosüsteemi lõpp-punktis (üldjuhul liitumispunkt energiavõrguga) võrdub tehnosüsteemi energiakasutus tarnitud energia ja lokaalse taastuvenergia summaga.

EL- Euroopa Liit

Hoone tüüpiline kasutus – hoone tavapärase kasutus energiatõhususe miinimumnõuetele vastavuse tõendamisel. Hoone tüüpilise kasutuse kindlaksmääramisel võetakse arvesse hoone kasutusotstarve, välis- ja sisekliima, hoone ja tehnosüsteemide kasutusaeg ning vabasoojus.

Kasutusprofiil – ruumi kasutusaste valgustuse, seadme ja inimese soojuseralduse suhtena maksimaalsesse soojuseraldusse.

Köetav pind - sisekliima tagamisega ruumide netopind, millest on maha arvestatud madala temperatuuriseadega pind.

Lokaalne taastuenergia - hoones, kinnistul või hoone lähiümbruses päikese-, vee-, pinnase- või tuuleenergiast toodetud elekter või soojusenergia; Tarnitud energia- elektrivõrgust, kaugküttevõrgust või tarnitud kütusest aastas hangitud energia kilovatt-tundides või energiasisaldus kilovatt-tundides, millega kaetakse lokaalsest taastuenergiast katmata jääv hoone aastane summaarne energiakasutus. Hoone asukoha kinnistult saadud kütusest toodetud energia loetakse tarnitud energiaks.

Netoenergiavajadus – sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks ning valgustuse ja seadmete kasutamiseks vajalik soojus- ja elektrienergia ilma süsteemikadudeta ning energia muundamiseta. Netoenergiavajadus jaguneb: netoenergiavajadus ruumide kütteks, ruumide jahutamiseks, ventilatsiooniõhu soojendamiseks, ventilatsiooniõhu jahutamiseks, tarbevee soojendamiseks, valgustamiseks ja seadmete kasutamiseks.

Oluline rekonstrueerimine – on ehitamine, mille puhul on hoone piirdekonstruktsioonide muutmisega ning kande- ja jäigastavate konstruktsioonide muutmise ja asendamisega või välispiirete ja tehnosüsteemide või nende osade muutmise või tehnosüsteemi tervikliku asendamisega seotud kulud suuremad kui üks neljandik rekonstrueeritava hoonega samaväärse hoone keskmisest ehitusmaksumusest.

ppm – miljondikosa (parts per million).

PV paneelid – päikesepaneelid ehk päikeseplatadid.

Sisekliima tagamine - energia kasutamine hoone ruumiõhu kvaliteedi tagamiseks, vastavalt määruses sätestatud ventilatsiooni- ja ruumitemperatuuri nõuetele ning valgustamiseks vastavalt hoone tüüpilisele kasutusele.

SHGC – solar heat gain coefficient – keskmine päikeseläbivustegur.

SPF (*Seasonal Performance Factor*) – hooajaline kasutegur ehk soojuspumba aasta keskmine soojustegur ruumide kütmisel, mis arvutatakse kütte energiakasutuse suhtena elektrikasutusse ning milles on arvestatud kõikide abiseadmete elektritarvet.

Summaarne energiakasutus - hoone tehnosüsteemi summaarne energiakasutus aastas, millest on maha arvatud lokaalselt toodetud ja tarbitud taastuenergia.

Seadmed – tehnosüsteemi koosseisu mittekuuluvad lõppkasutaja seadmed, näiteks kodumasin, elektroonika, kontoriseade.

Tarnitud ja eksporditud energia süsteemiipiir – energiaarvutuses järgitav süsteemiipiir, mis määrab arvessevõetavate energiaoogude omavahelised seosed;

Tehnosüsteemi summaarne energiakasutus - hoone sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks ja tüüpilises kasutuses sisalduvate elektriseadmete kasutamiseks vajalik tehnosüsteemide aastane elektri- ja soojusenergia kasutus kilovatt-tundides.

Tehnosüsteem – küttesüsteem või tarbevee soojendamise süsteem, ventilatsioonisüsteem, jahutussüsteem, valgustussüsteem, automaatikasüsteem, lokaalselt soojusenergiat või elektrit tootev käesoleva määruse järgi energiaarvutuses arvestatav süsteem.

Tõhus kaugküte- või jahutus - kaugküte- või kaugjahutussüsteem, mis kasutab vähemalt 50 % taastuenergiat, 50 % heitsoojust, 75 % koostoodetud soojust või 50 % sellise energia ja soojuse kombinatsiooni.

Vabasoojus - hoonesse sisenev päikesekiirgus, valgustuse ja seadme ning tehnosüsteemi soojuskadu ning inimeselt eralduv soojus.

Välispiirde soojuserikadu H [$W \cdot K^{-1}$] – välispiirde soojuskadu vattides, kui temperatuuride erinevus hoone sees ja väljas on üks kraad.

Välispiirde summaarne soojuserikadu köetava pinna ruutmeetri kohta [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] – hoone köetava pinna ühe ruutmeetri soojuskadu läbi välispiirde, kui temperatuuride erinevus hoone sees ja väljas on üks kraad. Soojuserikadu moodustub summaarselt kõikidest välispiirde ja selle ebatihedusest (infiltratsioonist) tulenevatest soojuskadudest.

Õhulekkearv q_{50} - hoone välispiirde õhupidavust iseloomustav näitaja. Õhulekkearvu ühikuks on õhulekke maht kuupmeetrites välispiirde pinna ruutmeetri kohta tunnis [$m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$]. Õhulekkearv määratakse õhulekkestiga 50 paskali suurusel rõhkude erinevusel. Välispiirde pind arvutatakse hoone piirde sisemõõtude põhjal, mis antakse ruumi, tagades välisõhu ruumiõhuga täielik segunemine.

SISSEJUHATUS

Teadus- ja õppehoone projekteerimisel on väga oluline tagada mõistlike lahenduste ja kuludega mugav hoone sisekliima. Enne ehitamist teostatakse hoone energiatarbe hindamiseks mitmeid energiaarvutusi ja koostatakse mudelid. Selle põhjal antakse välja hoone energiamärgis, mis esitakse kohalikule omavalitsusele koos ehitusloa taotlusega, saamaks ehituseks vaja mineva loa. Paraku võib erineda hoone kasutusea energiaterve tunduvalt sellest, millest lähtuti arvutusmudelite koostamisel ja seepärast on väga oluline analüüsida tegelikke tarbimisandmeid. Magistritöö tulemusena selgitatakse, kui suur on Tartu Ülikooli teadus- ja haridushoone Delta energiatarve ja võrreldakse seda kehtiva energiaarvutuse tulemusega. Analüüsitakse energiatarvet komponentide kaupa, leitakse seoseid eriolukorrast tingitud kasutuse erisuste vahel ja võrreldakse tulemusi teiste õppehoonete samade näitajatega. Lisaks saadakse ülevaade hoone sisekliimast ja analüüsitakse tulemusi piirmäärade parameetritest lähtudes.

Vastavalt uutele energiatõhususe miinimumnõuete, mis kehtib alates 1. jaanuarist 2019, on kehtestatud nõue, et ehitatava teadus- ja õppehoone energiatõhususarv (ETA) on maksimaalselt $120 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, millega piiritletakse B- energiaklass. Energiaklassi B kuuluvaid hooneid nimetatakse madalenergiahooneteks. Alates 2020. aasta 10. juulist kehtivad uued energiatõhususe miinimumnõuded, mille põhjal on Delta haridus- ja õppehoone projekteeritud liginullenergiahoonena ning energiaklassiks on A, sest ETA on väiksem kui $100 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [1].

Magistritöös uuritud sisekliima ja energiatarbe temaatika on oluline, sest nüüdisaja fookus on tagada järeltulevatele põlvedele jätkusuutlik elukeskkond, investeerides olemasolevaid võimalusi energiasäästikumaks majandamiseks. Arvestades, et hoone on aastaringses kasutuses suure hulga inimeste ja õpilaste poolt, tuleb tagada selle kasutajatele hea sisekliima, mis ei kahjustaks tervist ja oleks kasutajasõbralik. Kasutajate heaolu tagamiseks tuleb energiatõhusust kontrollida, et vajadusel viia sisse muutused, tagamaks inimestele parem tegevuskeskkond. Töö käigus antakse ülevaade valitud ruumide sisekliima olukorrast ja selle vastavusest riiklikele haridushoonetele kehtivatele nõuetele. Sisekliima hindamiseks vaadeldakse õhusaaste taset süsihappegaasi sisalduse andmete põhjal ning soojuslikku mugavust sisetemperatuurist lähtudes.

Hoone projekteerimisest ehituseni on tehtud investeeringud ja uuringud, et tagada optimaalne energiatõhusus ja minimaalne energiatarve. Hoone haldajat huvitab, kas kasutusele võetud lahendused on energiatarbe lõppväärtuse vähendamisel avaldunud ja millisel määral. Kasutusele on võetud päikesepaneelid ja paigaldatud päikesekaitse

eesmärgiga välisvarjestuse elemendid. Hoone vajab enamasti intensiivset jahutust ruumides töötavate seadmete tõttu. Töös analüüsitakse päikesepaneelidega toodetud energia koguse mõju energiabilansis. Juhul, kui lubatud energiatõhusust ei ole saavutatud kasutusele võetud tehnoloogiliste meetmetega, analüüsitakse, miks ei ole seda saavutatud.

Uurimisalune hoone on 2019. aastal ehitatud ja lühikest aega töös olnud. Suurim hoone kasutuse mõjutaja oli eriolukord ja riiklikud piirangud, mis olid seotud COVID-19 levikuga. Hoone vähene kasutusaeg ja distantsõppega varieeruv aasta andsid kogu uurimisele ainulaadse lähenemisvõimaluse, mis muutis töö teiste omalaadsete seas eriliseks. Hoone sisekliima uurimisel lähtuti õhutemperatuuri ja õhu saaste parameetritest ning lisati piirangutest tingitud põhjendused.

KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Ligi 50% Euroopa Liidu energia lõpptarbimisest läheb kütmiseks ja jahutuseks, millest 80% kuulub hoonete kasutusalasle. Sellest tulenevalt nõutakse energiatõhususe tõstmist renoveeritavatele hoonetele ja rangemate nõuete kehtestamist uute ehitiste rajamisel [2]. Energiatõhususe nõuete karmistumisest ajendatuna soovis autor praegustele kehtivatele määrustele tuginedes võrrelda hoone kaalutud keskmist- ja arvutuslikku energiatarvet.

Ligi 30 % energiatarbest moodustavad äri- ja avalik sektor, hulka kuuluvad ka haridushooned [3]. Haridushoonete energiatarbe analüüsimiseks tehti Ühendkuningriigis uurimus, kus fookusesse võeti ventilatsioonisüsteem ja selle mõju sisekliima tagamiseks ning energiakulude hindamiseks [4]. Tulemustest selgus, et hoone alumistel korrustel oli probleeme soovitud õhutemperatuuri tagamisega ning hoonete sissepääsude paremad arhitektuurilised lahendused oleks võimaldanud vähendada kütteks kuluva energia tarvet.

Õppehoonete hea sisekliima tagamise temaatika on päevakorral praeguse Koroonaviiruse tõttu. Hästi ventileeritud ruumides ei levi viirused nii edukalt kui halva ventilatsiooniga ruumides [5]. Näiteks ilmus käesoleva aasta aprillis uurimus [6], kus põhjendati ruumide sisekliima tagamise olulistust ja hästi toimiva ventilatsioonisüsteemi tähtsust viiruste leviku tõkestamisel ja tungivat vajadust hoonete kehva seisukorda parandada.

Enamik Eestis teostatud hoone energitarvet ja sisekliimat analüüsivate uurimusteesmärgiks oli analüüsida hoone eplikatsiooni reaalsel olukorda, et pakkuda lahendusi renoveerimismeetmeteks ja säästmiseks. Näited antud eesmärgiga magistritööst olid [7] TalTechi vilistlaste uurimused [8], kus simulatsioonimudeli kasutusprofiilid võeti võimalikult sarnased reaalsele kasutusele, aga määrusepõhist arvutust ei teostatud.

Reaalsete ning määrtustepõhiste kasutusprofiilidega arvutatud energiatarbe võrdlused on lihtsasti teostatavad ja väga informatiivsed. TTÜ Ehitiste projekteerimise instituudis tehti uuring [9], kus analüüsiti väikeelamute, korterelamute ning büroohoonete energiamärgiste vastavust reaalsele tarbimisele ning saadud tulemuste põhjal tehti ettepanekud energiamärgise meetodika edasiarendamiseks. Energiämärgise lähteandmetes kasutatavad koefitsendid on üldised ja ei arvesta tihtipeale hoone eripära, millest tuleneb hoone energiatarbe üle- või alahindamine märgiste koostamisel.

Lisaks võib olla probleem puudulikus teostusdokumentatsioonis, mille põhjal hinnatakse seadmete energiakulu [9].

Liigne süsihappegaasi kogus õhus või väär hoone sisetemperatuur võib vähendada töö- ja õppe edukust, mille kohta on tehtud mitmeid uurimustöid. Hoonete isekliima omab suurt rolli kasutajate tervise seisukorrale. Näiteks TalTechi uurimuses [10] esitati hoonete sisekliima uuringute tulemused, et hinnata töökeskkonna mõju õpitulemusele ja tööviljakusele. Selgus, et enamikes uuritud koolides oli halb ventilatsioon ja kehva sisekliimaga koolimajades oli ühtlasi ka mahajäämus õpitulemustes. Uurimuse järeldused põhinevad sisekliima klassifitseermisel, millest lähtuti ka antud töös uuritud hoone sisekliima hindamisel [11].

Lisaks keskkonna heaolule on esmatähtis inimeste tervis, mida mõjutab õpikeskkond, milles veedetakse suurem osa oma päevast [12]. Seetõttu on oluline, et kõik rajatavad uued õppehooned tagaksid kasutajatele hea sisekliima, toetamaks töö- ning õpivõimet. Antud töö keskendus õppehoone sisekliima parameetrite uurimisele, millega sarnaselt tehti 2018. aastal uurimus Poolas [13]. Töös analüüsiti Poolas asuva Białystok-i Tehnikaülikooli sisekliimat (süsihappegaasi sisaldust, õhutemperatuuri ja õhuniiskust), et hinnata selle mõju õpi- ja töövõimele. Uurimiseks tehti valim õppeklassidest ja viidi läbi CO₂, õhuniiskuse- ja temperatuuri mõõtmised, mille tulemusel koostatud graafikute põhjal järeldati, et sisetemperatuur oli soovituslikust veidi kõrgem, õhuniiskus ligi 40% madalam. Süsihappegaasi sisaldus oli alla 1000 ppm, rahuldades riiklikku soovituslikku ülempiiri.

UURIMUSTÖÖ EESMÄRK JA STRUKTUUR

Magistritöö eesmärk oli analüüsida hoone energiatarvet ja erinevat tüüpi ruumide sisekliimat. Analüüsi aluseks oli kogu Delta hoone tundma õppimine, selleks kasutati hooneautomaatikasüsteemi mõõte- ja seadeandmeid ning hoone projektdokumentatsiooni.

Energiatarbe analüüs annab ülevaate tarbimisallikatest, nende tarbimismahust, kogu tarbitud energiast ning energiatarbijate osakaalu jaotumisest. Selleks koguti vaatlusperioodi energia tarbimise kogused ja tehti arvutused, lähtuti standarditest ja normdokumentidest. Lisaks arvestati piirdetarindite soojuskadu. Vaatlusaluseks perioodiks võeti 17.02.2020-17.02.2021.

Arvutuste aluseks võeti Hoone piirdetarindi soojuslähivuse arvutusjuhend Hoone energiatarbimise arvutamise juhend (EVS 908-1:2016), ja EVS standardid [11] [14] [15] [16]. Vaadeldava hoone välistarindi soojakadude ja külmasildade kontrollarvutused tehti vastavalt konstruktiivsele lahendusele. Tegelik- ja arvutusliku energiatarbe erisuse võrreldi tulemusi kasutusloa järgse ETA-ga.

Energiatarbega paralleelselt analüüsiti hoone katusele paigaldatud päikesepaneelidega toodetud energiat ja selle osakaalu energiabilansis. Lisaks võrreldi tulemusi ETA-s arvutatud aastase päikese paneelide (PV- paneelide) tootlikkusega.

Sisekliima uuringuteks koguti sisetemperatuuri ja CO₂ taseme näidud vaatlusaluse aasta kohta. Andmete kogumise limiteeritud võimaluste tõttu ei kogutud andmeid müra, valgustuse, ning õhuniiskuse kohta. Ruumide valikul lähtuti põhimõttest, et igas ilmakaares oleks esindatud üks ruum iga korruse kohta. Veelgi parema ülevaate saamiseks valiti ruume erinevate kasutusotstarvete põhjal. Valim ruumidest, kus salvestatud süsihappegaasi kontsentratsiooni andmed, on väiksem, sest kõik uuritavad ruumid ei olnud varustatud CO₂ anduritega.

Töö metoodilises osas antakse esmalt ülevaade ülevaade hoonest, selle asukohast. Kirjeldatakse hoone tehnoloogilisi- ja arhitektuurset lahendust. Lisaks tuuakse välja piirete soojustehnilised näitajad, milles vaadeldakse soojuskadusid, külmasildu ja infiltratsiooni. Esitatakse kehtiv energiaarvutus. Tuuakse välja andmete kogumise ja nende analüüsi meetodid.

Tulemuste ja analüüsi osas kirjeldatakse hoone energiatarvet sektiioonide kaupa, vastavalt energiaarvutuste tulemustele. Antakse ülevaade energia tarbimisandmetest,

tuuakse välja kaalutud energiakasutus ja põhjused, miks tulemused erinevad ETA-ga võrreldes.

Sisekliima tulemustest antakse ülevaade töö viiendas peatükis. Tuuakse välja valitud ruumide süsihappegaasi ja sisetemperatuuride kuude keskmised tulemused aasta lõikes ja antakse detailsem ülevaade valitud ruumide aastasest CO₂ ja õhutemperatuuri muutumisest. Järelduste tegemisel lähtuti õppeaastast, kui suurem osa ajast toimus distantsõpe ning hoone kasutamine oli väga madal.

Tulemuste osas võrreldakse muuhulgas vaatlusaluse Delta keskuse energiatarvet teiste haridushoonetega ja põhjendatakse erisusi sama liiki kasutusotstarbega hoonete vahel.

Lõpuks antakse kasutajapoolne hinnang hoone tegelikule energiatarbele. Kogu analüüs baseerub hoone energiahulgal, mis kulutatakse jahutamiseks, kütteks, ventilatsiooniks, vee soojendamiseks ja valgustuseks. Antakse hinnang sisekliimale ja selle juhtimisele. Tehakse kokkuvõtte, kuidas antud hoone samalaadsetest erineb ja millisel määral.

1 TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

1.1 Sisekliima

Hoone sisekliimaks loetakse siseruumis olevate keskkonnategurite koosmõju. Need jaotuvad soojuslikeks, keemilisteks, füüsikalisteks ja inimestest tulenevateks. Uurides hoone sisekliimat, tuleb arvestada nende koosmõju. Õppetöös on hea sisekliima tagamine esmatähtis, sest see tagab hea töö- ja õpivõime, ennetab haiguste teket ja levikut ning muudab kasutajad rahulolevateks [10].

Sisekliimat mõjutavad õhutemperatuur, valgus, suhteline õhuniiskus, müra ja õhus sisalduv süsihappegaas. Määruste ja seadustega on määratletud miinimumnõuded teatud elementaarsematele sisekliima parameetritele (temperatuur, müra, õhuniiskus, valgustihedus ja süsihappegaasi sisaldus) ning olenevalt hoone otstarbest, vajadustest ja võimalustest on defineeritud soovituslike standarditega erinevad sisekliima klassid. Need kajastuvad standardis EVS-EN 16798-1:2019 [11]. Käesolevas töös analüüsiti ruumiõhu temperatuuri ning õhu saastatust CO₂ sisalduse kaudu. Müra, suhtelise niiskuse, valgustiheduse ja täpse kasutajate arvu uurimiseks hooneautomaatikast andmeid ei olnud võimalik saada, sest ruumides puudusid selleks vajalikud mõõteseadmed.

Ruumitemperatuur on heaks indikaatoriks soojusliku mugavuse hindamisel. Operatiivtemperatuuriks nimetatakse kiirguse ja õhutemperatuuri koosmõju arvesse võtvat temperatuuri, mida tunnetab inimene. Juhul, kui ümbritsevate pindade temperatuur ei erine ruumiõhu temperatuurist, siis on operatiivne temperatuur samas suurusjärgus. Sellisel juhul on ruumitemperatuur hea indikaator soojusliku mugavuse hindamisel. Süsihappegaasi sisalduse põhjal saab hinnata ruumiõhu puhtust, kui saasteallikaks on inimeste poolt välja hingatav CO₂. [17]

Sisekliima klassid on esitatud tabelis 1.1. Hinnang sisekliimale antakse süsihappegaasi ja temperatuuri andmete analüüsi põhjal. Hoonele kehtestatud nõuded peavad tagama sisekliima klassi II, vastavalt standardile EVS-EN 16798-1:2019 [11].

Tabel 1.1 Sisekliima klassidel vastavad CO₂ kontsentratsioon, temperatuur ja suhteline niiskus

Sisekliima klass	Selgitus	CO ₂ kontsentratsioon üle välisõhu taseme, (ppm)	CO ₂ kontsentratsioon välisõhu tasemel 400 ppm	Temperatuuri vahemik kütteks kütteperioodil/ jahutusperioodil (°C)
I	Kõrged nõudmised sisekliima kvaliteedile. Soovitav ruumides, kus viibivad väga tundlikud, nõrga tervisega ja erinõuetega inimesed, näiteks puudega inimesed, haiged, vägaväikesed lapsed ning	350	750	21- 23 23,5- 25,5
II	Tavapärased nõudmised sisekliima kvaliteedile. Tuleks rakendada uutes ja renoveeritavates hoonetes	500	900	20- 24 23- 26
III	Mõõdukad nõudmised sisekliima kvaliteedile. Võib rakendada olemasolevates hoonetes	800	1200	19- 25 22- 27
IV	Sisekliimakvaliteedi väärtused, mis jäävad väljapoole eelmainitudklasse. Antud klass võib olla vastuvõetavainult piiratud ajal aastas	> 800	> 1200	-

Toetudes uuringule „Sisekliima, õpitulemus, tööviljakus“ [10] selgub, et süsihappegaasi kontsentratsioonil üle 1000 ppm ja ruumi õhutemperatuuril väljaspool vahemikku 20 °C -22 °C väheneb õppeedukus kuni 30 %. Parimaks töövõimet toetavaks õhutemperatuuriks peetakse 21 °C -23 °C, millest kõrvalekalded enam kui 3 % põhjustavad suhtelise töövõime kahanemist 10% [10].

1.2 Hoone energiakasutuse jagunemine

Tagamaks väliskeskkonnast tulenevate või tingitud mõjude kompenseerimine ja vähendamine, kasutatakse energiat. Enamasti jaguneb energia soojuskadude kompenseerimiseks, ruumitemperatuuri mugavas vahemikus hoidmiseks, piisava valgustatuse tagamiseks, õhu puhtuse tagamiseks ja tarbevee soojendamiseks [18].

Hoones tekkiva vabasoojuse hulgast sõltub jahutus- ja küttevajadus. Kõrgem vabasoojuse hulk tõstab jahutuse osatähtsust, vastupidine olukord toob endaga kaasa suurenenenud küttevajaduse. Kütmiseks vajaliku soojushulga leidmisel arvestatakse vabasoojusi, välispiirete soojuskadusid, ruumi sissepuhutava ventilatsiooniõhu soojenemist ruumitemperatuurini ja infiltratsiooni [18]. Sisekliima olulisemate parameetrite tagamiseks soovitud vahemikes, on tarvis energia kasutus ruumiõhu kvaliteedi tagamiseks, sealhulgas ruumitemperatuuri hoidmiseks, tõstmiseks või langetamiseks, vastavalt nõetele ning valgustamiseks vastavalt hoone standardkasutusele. Lisaks sisekliima tagamisele tarbitakse hoones energiat seadmete tööks ning tarbevee soojendamiseks [18].

1.2.1 Küttesüsteemide energiatarve

Eesti ja teiste Euroopa Liidu liikmesriikide energiatõhususe arvutusmetoodika koostamisel on lähtutud erinevatest CEN standarditest, et arvestada hoone tehno- ja teiste süsteemide kadude ning nende efektiivsustega. EPB standardite pakett on koondatud ühtseks raamistikuks ja lähtub hoonete energiatõhususe- ja nende muutmise direktiividest [19]. Küttesüsteemide energiatarve sõltub paljudest süsteemispetsiifilistest faktoritest, näiteks soojusenergia tootmine või muundamine, väljastamine ja jaotamine. Konkreetse süsteemi energiatarve hindamisel energiamärgise arvutamises arvestatakse vastavad komponendid netoenergiade juurde lihtsustatult soojusallika kasuteguri ning soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegurite kaudu [18].

Hoone küttesüsteemi arvutuste koosseisus leitakse ruumi kütte, ventilatsiooniõhu ja tarbevee soojendamise energiakasutus. Kõikide tarnitavate energiade puhul eraldatakse soojus- ja elektrienergia kasutamine. Selleks, et arvutada küttesüsteemi elektri- ja soojusenergiakasutus, tuleb kasutada vastavate küttesüsteemide kasutegureid ja arvestada abiseadmete elektritarbimist [18].

Määruse [18] järgi saadakse küttesüsteemi energiakasutus netoenergiavajaduse jagamisel küttesüsteemi kasuteguriga. Küttesüsteemide kasuteguri leidmiseks korrutatakse soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegur soojusallika kasuteguriga. Soojusallika kasutegur arvutatakse tootja andmetest lähtudes või kasutatakse määruse [18] 5. ptk Tabel 8 esitatud väärtusi. Soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegurite ning abiseadmete elektritarbimise arvutamiseks on esitatud määruuses [18] 5 ptk Tabel 9 kasutegurid ning elektritarbimine.

1.2.2 Soojuskaod läbi välispiirete

Välispiirete omadustel on oluline roll muuhulgas hoone püsivuse, niiskusliku toimivuse ja soojusliku sisekliima kujundamisel. Energiatõhususe seisukohast on mitteläbipaistvate oluline tarindite korral eelkõige soojuslähivus, mille määravad tarindi konstruktsioon, materjalid ja nende paksused. Kogu konstruktsiooni soojuslähivus U arvutatakse valemiga [20]:

$$U = \frac{1}{R_{si} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (1.1)$$

kus U – konstruktsiooni soojuslähivus, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,

σ_i – üksiku materjalikihi paksus, m,

λ_i – üksiku materjali kihi soojuserijuhtivus, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,

R_{si} – sisepinna soojustakistus, $m^2 \cdot K^{-1} \cdot W^{-1}$,

R_{se} – välispinna soojustakistus, $m^2 \cdot K^{-1} \cdot W^{-1}$.

Infiltratsiooni õhuvooluhulga arvutamisel kasutati Vabariigi Valitsuse määrust „Hoone energiatoõhususe arvutamise metoodika“ [18]. Infiltratsiooni õhuvooluhulk q_i arvutatakse kasutades valemit:

$$q_i = \frac{q_{50}}{3,6^x} \cdot A \quad (1.2)$$

kus: q_{50} – hoone välispiirete keskmine õhulekkearv, $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^2$

A – hoone välispiirete pindala, m^2 ,

3,6 – tegur teisendamaks õhuvooluhulga $m^3 \cdot h^{-1}$ ühiku $l \cdot s^{-1}$ ühikuks,

X – tegur, mis väljendab korruselisust (viie ja enam korruste puhul 15).

Hoone korruste arv on neli, aga korruse kõrguseks loetakse kuni 3 m, siis antud hoone 20 m kõrguse puhul peab valima viie ja enam korruseliste hoonete teguri [18].

Soojuserijuhtivuse arvutamiseks lähtuti ETA arvutuses (vt Lisa 2) välja toodud lähteandmetest, sest muudatusprojektis kajastatud muutused tarindite soojusjuhtivuses on kajastatud ka energiamärgise arvutuste algandmetes.

1.2.3 Vabasoojused

Vabasoojust eraldavad ruumi eelkõige päike, inimesed, seadmed ja valgustus. Ruumi temperatuuri tagamisel on vabasoojustel oluline roll kütte- ja jahutusvajaduse

kujunemisel. Vabasoojus võib vähendada küttevajadust ning suurendada jahutusvajadust. Sõltuvalt aastajast ja ruumide kasutusest võib vabasoojuskoormus suurtes piirides varieeruda [18]. Seega on mõistlik hooneid, st arhitektuuri, tehnosüsteeme ja automaatikalahendusi kavandada nii, et küttevajaduse korral kasutatakse vabasoojust võimalikult palju ning jahutusvajadusel eelkõige päikesest tulenevaid vabasoojuseid blokeeritakse [21].

Vabasoojuskoormusest tuleneva temperatuuri tõusu leidmiseks kasutatakse valemit, milles vabasoojuskoormuse ja hoone soojuserikao jagatise väärtusena saadakse temperatuuri tõusu kogus vabasoojuse arvelt [18]:

$$\Delta t_s = \frac{\varphi_{vabasoojus}}{H}, \quad (1.3)$$

kus $\varphi_{vabasoojus}$ – vabasoojuskoormus, W,
 H – hoone soojuserikadu, W·K⁻¹.

1.2.4 Ventilatsioonisüsteemide energiatarve

Kasutajatele mugava sisekliima tagamiseks tuleb hoonesse sisenev jahe õhk üles soojendada või jahutada, suvel vajadusel ka niisutada. Hoonetel on erinevaid ventilatsioonisüsteeme ja olenevalt sellest kasutatakse lisaks sissepuhke õhu soojendamisele ka soojustagastust. Teisisõnu soojendatakse hoonesse sisenev õhk üles väljatõmmatavast õhust eraldatava soojusega [18].

Temperatuuri suhtarv (vt valem 1.4), võimaldab iseloomustada soojustagasti ilmse soojuse tagastuse efektiivsust, aga antud valem ei arvesta niiskuse tagastust ega varjatud soojuse tagastust. Siiski sel viisil on võimalik ventilatsioonisüsteeme teatud määral omavahel võrrelda. Ventilatsiooniseadme soojustagastuse efektiivsuse määrab lisaks veel soojustagasti tööpõhimõtte ja konstruktsioon, seadme ja soojustagasti juhtimisloogika. Temperatuuri suhtarvu leidmiseks võrdsete õhuvooluhulkade korral kasutatakse valemit [20]:

$$\eta_t = \frac{t_{pt}^{sp} - t_{et}^{sp}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} \quad (1.4)$$

kus η_t – temperatuuri suhtarv
 t_{et}^{sp} – sissepuhke õhu temperatuur enne soojustagastit, °C,
 t_{pt}^{sp} – sissepuhke õhu temperatuur peale soojustagastit, °C,
 t_{et}^{vt} – väljatõmbe õhu temperatuur enne soojustagastit, °C.

Hoone ventilatsioonisüsteemi juures on oluline selle ventilaatorite elektriline erivõimsus (SFP – ingl kl *Specific Fan Power*). See näitab kui palju elektrienergiat ajaühikus kasutatakse $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ õhu liigutamiseks. SFP määratakse ventilatsioonisüsteemile tervikuna kui ka sissepuhkele ja väljatõmbele eraldi. Elektrilise erivõimsuse leidmiseks kasutatakse valemit [22]:

$$SFP = \frac{N}{L} \quad (1.5)$$

kus N – ventilaatorite poolt tarbitav elektrivõimsus, kW,

L – ventilaatorite õhuvoolum, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Kõrgema temperatuurisuhtarvuga soojustagasti ja madalama erivõimsusega ventilatsioonisüsteem tagavad madalama soojuse ja elektri kulu. Teisisõnu peab sisse puhutatavat õhku vähem üles soojendama ja madalama erivõimsuse juures kulub ventileerimiseks vähem elektrienergiat [23].

1.2.5 Energiakulu tarbevee soojendamiseks

Tarbevee vahetuks soojendamiseks kasutatakse elektri või soojusenergiat. Lisanduvad ka tsirkulatsiooni ja mahtveesoojendite soojuskaod, millest enamik jõuab hoonesse vabasoojusena. Sooja tarbevee soojendamiseks kuluvat soojusenergiat arvutatakse lähtudes vee kogusest ning vee temperatuuridest [18].

1.2.6 Jahutussüsteemide energiatarve

Jahutussüsteemi energiakasutus koosneb jahutusenergia tootmiseks vajalikust energiast ning energia jaotamiseks ja väljastamiseks vajalike abiseadmete elektrienergiast. Jahutusenergia tootmiseks vajalik aastane energiakasutus arvutatakse ruumide jahutuse netoenergiavajaduse põhjal [18].

Tubakontori, nõupidamise ruumi, klassiruumi ja koolieelse lasteasutuse mängu- ja magamisruumi suvise ruumitemperatuuri kontroll ning jahutusvõimsuse dünaamiline arvutus tehakse Hoone energiatarvuse arvutamise metoodika tabelis 3 [18] esitatud ruumi detailsete kasutusprofiilidega. Klassiruumis ja nõupidamiste ruumis kasutatakse metoodika tabelis 4 [18] esitatud vabasoojuse väärtusi. Teistes ruumides kasutatakse metoodika tabelis 1 esitatud vabasoojuse väärtusi [18].

Haridushoone dünaamilises arvutuses võetakse lapse kogusoojuseralduseks 110 vatti. Lapse kogusoojuseraldusest moodustab ilmne soojus 75 vatti. Lapse keha pindalaks arvestatakse 1,8 m², mis vastab soojuseraldusühikule 1,0 met [18].

1.2.7 Seadmete ja valgustuse energiakasutus

Valgustuse ja seadme elektritarbimine võrdub energiaarvutuses valgustuse ja seadme soojuseraldusega. Elamu, kasarmu, kontorihoone, haridushoone, koolieelse lasteasutuse hoone, majutushoone, kaubandushoone, ravihoone, laohoone ja tööstushoone dünaamilises energiaarvutuses kasutatakse Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika tabelis 2 ja tabelis 2.1 [18] sätestatud hoone detailset kasutusprofiili.

Energiaarvutuse jaoks korrutatakse suurim soojuseraldus kasutusastmega. Valgustuse või seadme või inimese aastane soojuseraldus Q [kW·h·m⁻²·a⁻¹] arvutatakse järgmise valemiga [18]:

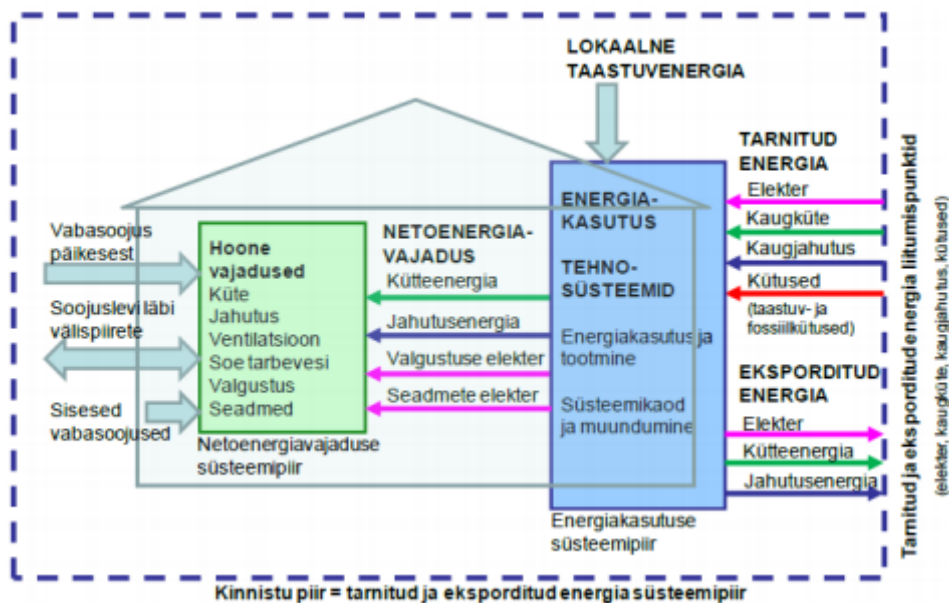
$$Q_1 = k \cdot P \frac{T_d}{24} \cdot \frac{T_v}{7} \cdot \frac{8760}{1000} \quad (1.6)$$

kus k – on energiakandjale i vastav lokaalse taastuenergia omatarbe omakaal,
 P – soojuseraldus, W·m²,
 T_d – on energiakandjale i vastav eksporditud energia hulk, kW·h·a⁻¹,
 T_w – hoone kasutuspäevade arv nädalas, d.

1.3 Energiatõhususe indikaatorid

Hoonete energiatõhususe nõuded Eesti õigusruumis on sätestatud hoonesse tarnitud primaarenergia piirväärtusega, nn energiatõhususarvuna, mille kaudu mõjutatakse hoone arhitektuuri, tehnosüsteemide ja tarindte konstruktsioonide valikuid. Energiatõhususarvu väärtused on määratud vastavalt hoone tüübile kuluoptimaalsete lahenduste baasil ning neid väärtuseid uuendatakse iga viie aasta järel [24].

Hoone energiavajaduse leidmiseks kasutatakse reeglina dünaamilist simulatsiooniarvutust, mille tarvis modelleeritakse hoone ning selle tehnosüsteemid vastavalt hoone ehitusprojekti andmetele, määrustega [18], [25] sätestatud metodikast tulenevate parameetrite ning hoone tüüpkasutuse alusel. Simulatsiooniarvutuse tulemusena leitakse tehnosüsteemide energiavajadus hoone sisekliima parameetrite tagamiseks [25].



Joonis 1.3 Tarnitud ja eksporditud energia süsteemiirid [26]

Kasutusaegse energiamärgise abil saab ülevaate olemasolevale hoone energiakasutusest. Arvutuslik energiatarve saadakse vavatalt standardkasutusele, arvestades määruseid [25] [18]. Tegelik energiatarve põhineb mõõdetud energiatarbel. Tegeliku tarbe andmetega on võimalik leida kaalutud energiaerikasutus (KEK), mis on energiamärgise määramise aluseks, mis omakorda näitab, kui palju hoone või selle osa tarbib aastas energiat kütava pinna ruutmeetri kohta tegelike tarbimisandmete põhjal [18]. Energiatõhususarv (ETA) on arvutuslik summaarne tarnitud energiade kaalutud erikasutus hoone tüüpsel kasutamise, milles kajastub hoone energiakasutus sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamises hoone kütava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpsel kasutamisel [18]. Kõige energiasäästlikum on A-klass. Energiamärgise väljastamisel võetakse arvesse energia, mis kulub hoone kütmiseks, jahutuseks, vee soojenduseks, ventilatsiooniks, valgustamiseks, elektriseadmete toimimiseks. Joonis 1.3 kirjeldab energia ekspordi ja impordi süsteemiiri piltlikult [26]. Lisaks on olulised kokkuhoiumeetmed ja sisekliima parenduseks rakendatavad lahendused. Energiamärgis kinnitab ühtlasi ka projekteeritava hoone vastavust energiatõhususe miinimumnõuetele [24].

1.4 Hoonete energiatõhususe määramine

Kavandatava hoone energiatõhusus määratakse vastavalt Ehitusseadustikus sätestatud määruste [24], [25], [18] järgselt, olenevalt hoone tüübist kaalutud primaarenergia energiakasutusena tüüpsel kasutustungimusel.

Arvesse võetakse tarnitud energia, mis on vajalik hoone sisekliima tagamiseks ja tarbevee soojendamiseks. Nii hoone tarindite soojustehnilised

parameetrid, tehnosüsteemide efektiivsuse näitajad kui ka valgustuslahendused optimeeritakse minimaalselt energiatõhususe miinimumnõuete tagamiseks ning arvestatakse piisavas mahus energiaarvutuses. Arvutustulemuste baasil antakse konkreetne ETA väärtus, mis vastab hoone projektis kajastatud tehnilistele andmetele [24].

Koostatud arvutus esitatakse esmajärgus ehitusloa taotlusega kohalikule omavalitsusele. Kontrollarvutusi teostatakse projekteerimise etappides projekteeritud lahenduste täpsustumisel või muutumisel, kasutuloa taotlusel vastavalt välja ehitatud lahendustele [18].

1.5 Määrusejärgne energiaarvutus

Üheseks energiaarvutuse mõistmiseks on oluline kõiki etappe eraldi käsitleda ja saadud tulemusi analüüsida. Seejuures soojuse ja elektri kasutust käsitletakse eraldi [25].

Energiaarvutuses tuleb järgida etappe vastavalt sellele, milliseid tehnosüsteeme kasutatakse. Üldjuhul leitakse simulatsioonarvutusega aastane netoenergiavajadus, mis koosneb kütte-, jahutuse- ja ventilatsiooniõhu soojendamiseks vajalikust energiast. Sooja tarbevee ja elektri tarbivate seadmete, mis ei ole seotud sisekliima tagamisega, netoenergia arvestatakse määrusepõhiselt vastavalt hoone tüübile. Ventilatsioonisüsteemide korral arvestatakse ventilaatorite elektritarvet ja olenevalt projekteeritud süsteemidest ka kütte-, jahutus- ja äärmuslikel juhtudel ka siseõhu niisutamiseks (va protsessienergia) kuluvat energiat [18].

Välispiirete soojustus peab olema piisav, et tagada energiatõhusus ja soojuslik mugavus kasutajatele. Lisaks tarindite soojuslähivusele on oluline hoonekarbi õhupidavus, mis mõjutab nii soojuslikku ning niiskuslikku toimivust, sisekliimat kui ka energiakulu ruumide küttele ja jahutusele. Eestis soojuslähivuse (U) väärtusele, ehk tarindi omadusele, mis väljendab soojusvoolu vattides läbi ühe m^2 suuruse pinnaga tarindi, komponendipõhiseid nõudeid ei kehtestata. Nõue on antud sisekliima parameetrite teatava taseme tagamisega miinimumnõuetega kehtestatud vastava hoonetüübi energiakasutusega väljendatuna maksimaalse primaarenergia tarbe piirväärtusega [24].

Tehnosüsteemid peavad olema kavandatud toimima pikaajaliselt ja efektiivselt. Siseõhu kvaliteedi tagamiseks peab üldjuhul kasutama mehaanilist soojustagastusega sissepuhke- ja väljatõmbeventilatsiooni, madala rõhulanguga torustikku, lõppelemente ning piisavalt kõrge kasuteguriga ventilaatoreid. Lisaks on tehnosüsteemide efektiivse toimimise ja sellest tulenevalt ka energiatõhususe seisukohast oluline roll

automaatikalahendustel. Energiakasutuse jälgimiseks on nõutud, juhul kui see on majanduslikult põhjendatud, tuleks paigaldada energiaarvestid eraldi tehnosüsteemide osadele, st ventilatsiooni-, kütte-, jahutuse- ja sooja tarbeveesüsteemidele [24].

Valgustusele kuluv energia arvestatakse kas määrusejärgsete lähteandmetega või vastavalt projekteeritud lahendustele, kui on teostatud tüüpruumide valgustusarvutused. Lokaalse päikeseelektrijaama korral teostatakse vastava lahenduse elektri toodangu arvutus, millest ETA arvutuses võetakse arvesse vaid omatarbe osa [24].

Ventilatsioonisüsteemide elektrikasutuse arvestuses tehakse arvutused projektikohaste ventilatsioonisüsteemide tehnilistest andmetest lähtudes, arvestades määrusekohaseid õhuvooluhulkasid. Kõik tulemused esitatakse lähteandmetega hoone energiatõhususe arvutamise metoodikas sätestatud korras [18].

Energiaarvutuse ja suvise ruumitemperatuuri kontrolliks kasutatakse Eesti energiaarvutuse baasaastat, mis iseloomustab kolme dekaadi tüüpiliset väliskliimat [18].

Sisekliima analüüsiks kasutatakse ETA energiaarvutuses seadustikus välja toodud ruumitemperatuuri seadearvu ja ventilatsiooni õhuvooluhulka. Väljaspool kasutusaega kasutatakse ventilatsioonisüsteemi õhuvooluhulgak $0,15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ [18]

1.6 Energiatõhususe miinimumnõuded

Euroopa Liit (EL) on kehtestanud oma liikmesriikidele energiatõhususe direktiivid, mille rakendamise kohustus rakendub ka Eestile. Direktiiv 2018/844 EL [2] kohustab riike vähendama 40% võrra kasvuhoonegaaside heitekogusid 2030. aastaks. Protsentuaalne võrdlus baseerub 1990. aasta heitgaaside koguses. Selleks, et saavutada EL poolt kehtestatud norm aastaks 2030, tuleb tarbida rohkem taastuvenergiaallikatest saadavat energiat, tagada konkuretsivõime, säästu ja energiapüüdnud terves liidus. Riik reguleerib oma seadusandlusega direktiivi täitmist ja selle kohaselt peab uue hoone seadmestik olema suure energiatõhususega, nõuetekohaselt dokumenteeritud, energiasäästlik ja süsinikhappe gaaside (CO₂) heidet vähendav [2].

Alates 2008. a., peavad hooned vastama energiatõhususe miinimumnõuetele [27] ja hoonetele väljastatakse energiamärgis. Energiamärgise aluseks on määrusest lähtuv energiaarvutus [24].

Hetkel kehtivates energiatõhususe miinimumnõuetes on kehtestatud piirväärtused liginulleenergia-, madalenergia ja oluliselt rekonstrueeritavate hoonete tarvis. Uued haridushooned peavad vastama liginulleenergiahoonete nõuetele [24].

Liginulleenergiahoone nõue hakkas kehtima 2018. aasta 31. detsembrist alates püstitatud riigimandisse kuuluvatele uusehitistele, seetõttu kavandati Delta õppehoone täitmaks tollaseid tulevikunorme [27]. Nõuetega kaasnevaid määruseid järgitakse ETA arvutustes. ETA koostamisel arvestatakse piirete, tehnosüsteemide, lokaalsete energiatootmise süsteemide ja energiavõrguga seotud tehnosüsteemide parameetritega. Miinimumnõuded väljendatakse ETA kaudu, mis kajastab hoone energiakasutust sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks ja elektriseadmete kasutamiseks selle tüüpilisel kasutamisel [25].

Energiatõhususe miinimumnõuete määruse lisas nr 2 esitatakse energiatõhususarvude piirväärtused. Liginulleenergiahoonete piirväärtused varieeruvad laohoonetele kehtestatud $65 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ -st $820 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ suuruse energiatarbega hooneteni. Haridushoonetele puhul on energiatõhususarvu piirväärtus $100 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [28].

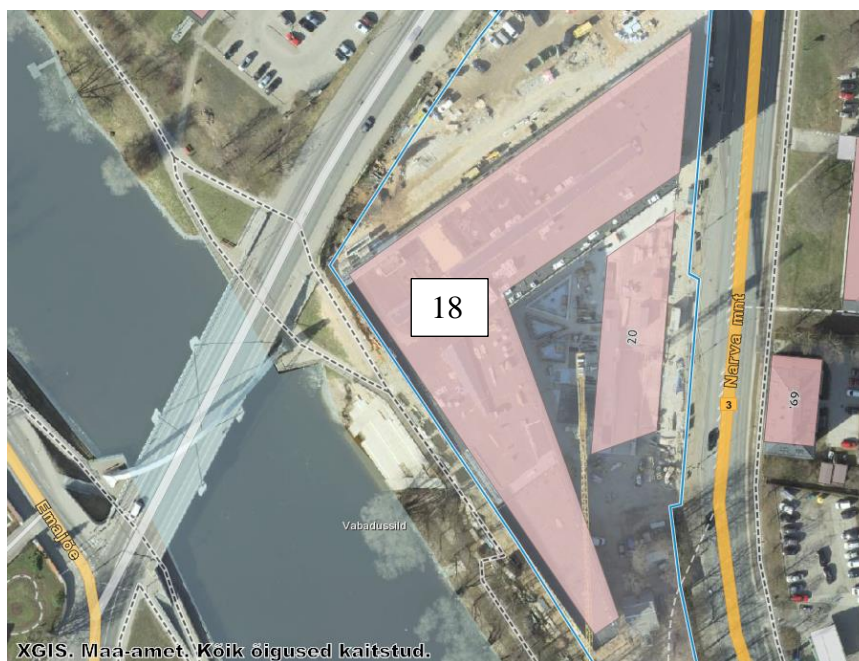
2 MEETODID

2.1 Uurimustöö objekti iseloomustus

Uuritav objekt, Tartu Ülikooli Delta õppehoone, asub Tartu maakonnas, Tartu linnas, Narva mnt 18//20, 13763 m² suuruse krundi läänepoolses osas (vt joonis 2.1). Haridushoone ehitati 2018. aastal lammutatud Oeconomikum õppehoone asemele. Läänest piirneb hoone jõega, lõunasuunal Ülejõe pargikompleksiga ja põhja-ida suunal Vene tänava ning Narva mnt-ga. Sissesõit on rajatud hoonele idast [15].

Jõe poolisel kaldal olevad puud aitavad hoonet kaitsta päikese eest lõuna- ja osaliselt ida ilmakaartes. Veekogu äärne külg on ühendatud astmik-terrassiga [15]. Liiklustihedus on põhjas ja idas väga tugev ja mõjutab hoonet eeskätt suure müra ning õhusaastega.

Hoone (hoone nr 18, joonis 2.1) on neljakorruseline, üldpinnaga 12184,7 m². Lisandub 4600 m² suurune maa alune parkla ja viiekorruseline ettevõtlusmaja üldpinnaga ligi 4700 m². [16]



Joonis 2.1 Delta keskuse paiknemine krundil ↑N [29]

2.1.1 Hoone üldandmed

Tartu Ülikooli Delta õppehoone üldandmed on esitatud alljärgnevas tabelis (tabel 2.1), info pärineb ehitisregistrist. Hoone võeti kasutusele 2019. aastal [30].

Tabel 2.1 Hoone tehnilised andmed [30]

Ehitise liik	Hoone
Otstarve	12634 Ülikooli, rakenduskõrgkooli õppehoone
Esmane kasutuselevõtu aasta	2019
Korruste arv maa peal	4
Maa aluste korruste arv	1
Hoonealune pind (m ²)	7887,5
Suletud netopind (m ²)	22625,5
Hoone maht (m ³)	106850
Üldkasutatav pind (m ²)	12516,2
Maapealse osa maht (m ³)	77198
Kõetav pind (m ²)	18203,0
Tehnopind (m ²)	1468,2
Absoluutne kõrgus (m)	55
Kõrgus (m)	20
Pikkus (m)	125,4
Laius (m)	120,8
Sügavus (m)	4,1

Delta keskus on Tartu Ülikooli – ja ühtlasi rakenduskõrgkooli õppehoone. Standardi EVS 812 järgi kuulub Delta keskus TP1 tuleohutusklassi [31]. Kogu hoone on varustatud 142 maa aluse- ja 10 maa pealse parkimiskohaga. Lisaks on jalgratta parkimiseks õppehoonel 200 kohta, mis on jaotatud krundi piires maa peale ja alla [32].

Delta keskuse tehnilised andmed võeti ehitisregistri andmebaasist ja esitati tabelis 2.2 [30]. All olevas tabelis 2.2 välja toodud info on oluline energiaarvutuste lähteandmete esitamisel.

Tabel 2.2 Hoone tehnilised andmed

Elektrisüsteemi liik	Võrk; lokaalne päikeseenergiat põhinev
Veevarustuse liik	Võrk
Kanaliseerimise liik	Võrk
Soojusvarustuse liik	Kaugküte
Ventilatsiooni liik	Sundväljatõmme; soojustagastusega ventilatsioon
Jahutussüsteemi liik	Tsentraalne vesijahutus
Võrgu-või mahutigaasi olemasolu	Puudub
Liftide arv	3

2.1.2 Hoone arhitektuur ja konstruktsioonid

Delta kaasaegne arhitektuurne lahendus muudab selle Tartu linna silmatorkavaimaks maamärgiks. Ehitis on nomineeritud erinevatele auhindadele, mille hulgas on Aasta 2020 Sisearhitektide Liidu aastapreemia, Aasta 2020 Maastikuarhitektide Liidu aastapreemia ja Tartu linna aasta tegu 2020 [33].

Delta õppehoone põhjatiib piirneb Vene tänavaga, kus asub ka peasissepääs. Jõe poolne pikem tiib piirneb trepistikuga ja istumisalaga, olles osa pargi- ja jõe ühendusest. (vt joonis 2.1)



Joonis 2.1 Delta õppehoone mudelvaade [18]

Hoonesisene liikumine korruste vahel (vt Lisa 8.1) on tagatud vertikaalselt põhjatiiva kahe avatud trepi ja kolme lifti abil. Maa alusel korrusel paiknevad parkla ja tehnilised ruumid [32].

Fassaadi lahendusel lähtuti põhimõttest, et esimene korrus suhestuks linnaruumiga ja oleks võimalikult läbipaistev. Alates teisest korrusest katab hoonet Sandwich paneelidest fassaad, lintakende ja metallribistikuga osa. Ribistik pakub silmailu ja päikesekaitset. Tegu on õhukestest 50 x 25 mm kuni 50 x 150 mm profiilidest koosneva metallist konstruktsiooniga, mis on tumehalli ja messinguga toonis (vt L8.2 ja L8.3). Hoonet otsese päikesekiirguse eest kaitsev lahendus on piisavalt valgust läbilaskev ja hoonesisest loomulikku valgustust ei sega [32].

Katusel olevad 3,5 m parapetid jäävad hoone põhjapoolsesse külge ja varjavad katusel paiknevaid tehnosüsteeme [32].

Kogu hoone kavandati eesmärgiga saavutada maksimaalne energiatõhusus, piirates päikesest tingitud liigse vabasoojuse tungimist ruumidesse ning vähendades jahutuskoormust, lisaks minimaliseerides liigest päevavalgusest tingitud räiguse probleeme. Hoone välispiirded projekteeriti praeguste välispiirete nõuete kohaselt piisava soojustusega, et tagada energiatõhususe ja ruumi soojusliku mugavuse nõuete täitmine [24]. Tänapäevased aknad on kolmekordse klaaspaketiga, soojuslähivusega $U = 0,7-1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Ruumid on nelja korruse vahel jaotatud järgmiselt: esimesel korrusel on auditooriumid, raamatukogu ja toitlustusala. Ühtlasi on tegu suurima liikumisalaga, seega planeering on võimalikult avar. Teisel korrusel on klassiruumid, laborid ning hoone lõunatiivas on koostöö- ja koosolekuruumid. Viimased kaks korrust on kaetud kabinetide ja abiruumidega. Suuremad tehnilised ruumid on rajatud keldrikorrusele, ülejäänud paiknevad korrustele jaotatuna [32]. Hoone lõunapoolses osas asub teise ja kolmanda korruse tasandis renditavate ruumidega Tudengibüroo, millel on eraldi kangialune sissepääs [32]. Hoonesisese loomuliku valgustuse tagamiseks tehti teisel ja kolmandal korrusel jõe poole vaatega rõdud, neljandal korrusel katuseterrass ning teisest neljanda korruseni läbiv klaaskatusega õhuruum (vt Lisa 8.1) [32].

Krunt asub jõeäärsel kaldal nõrga kandvusomadustega pinnasel, mistõttu rajati hoone vaivundamendile. Vertikaalsed ja horisontaalsed kandekonstruksioonid on enamasti raudbetoonist paneelidest, talad ja postid monteeritavast betoonist. Lisaks kasutati teraskonstruksioone [32].

Kandvad välisseinad tehti monteeritavatest raudbetoonpaneelidest, mittekandvad välisseinad rajati kahe esimese korruse lõikes termoprofiilidest ja klaasfassaadi süsteem ehitati postidele. Kahe viimase korruse välisseinad koosnevad *sandwich* kergpaneelidest, millel puudub kandev funktsioon. Isolatsioonimaterjalina kasutati mineraalvilla ja jäigastuseks T-profiiliga terasposte. Akende alused vööd varustati termoprofiilidega [32].

Katuse kandvaks osaks on õõnespaneelid. Katuskate on kahekordne SBS (modifitseeritud bituumenrullmaterjal), kust vihmavesi hoonesiseselt ära juhitakse. Rullmaterjali all on punnsoonitusega mineraalvill ja soojusisolatsioon EPS soojuseri juhtivusega $0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Käidavad katuseterrassid projekteeriti ja ehitati pööratud katustena [32].

Kandvad siseseinad tehti monteeritavatest raudbetoonpaneelidest, mittekandvad kipskarkass seintena. Kergplokksseinad on maa alustel korrustel, šahtide -ja tuletõkkeseksiooni aladel piirdeseintena. Kergplokkidena kasutati 150 mm ja 200 mm

Fibo plokke. Siseseintes kasutatud 190 mm betoonblokid täideti betooniga. Neljandal korrusel on betoonblokke kasutatud vaid summutamaks heli, mis ventilatsiooniruumist tuleb. Hoonesised trepid on raudbetoonist, vahelaed õõnespaneelidest, millel ujuv betoonpõrand [32].

Karkass siseseinad koosnevad U-profiilidest kuumtsingitud terasest ja kahekordsetest kipsplaatidest. Katvad plaadid on 13 mm paksused [32].

Avatäited kogu hoone lõikes on alumiiniumprofiil raamidega, kolmekordse argooniga täidetud klaaspaketid, mille katteliistud on mustad. Keskmine soojusläbivus klaaspaketil on $U = 0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, päikese kiirgusläbilaskvusega maksimaalselt SHGC = 0,3. Klaaspakett on kolmekihiline, argoontäitega, mille paketi soojusläbivus väärtus on $U = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [32].

2.1.3 Soojusvarustus ja küte

Delta õppehoone soojusvarustus põhineb kaugküttel, mis on ühenduses Fortum tartu AS-i katlamajaga. Kaugküte on tsentraalselt toodetud soojuse jaotamise süsteem elamutele ja hoonetele. Soojusallikas, toodetud kuum vesi, tarnitakse keskuse soojussõlme, milles loodi soojusvahetite abil ühendus küttesüsteemidega. Soojusvahetis kantakse keskkütte soojus üle hoone küttesüsteemides ringlevale kütteveele ja soojale tarbeveele. Küttevee temperatuuri reguleeritakse vastavalt vajadusele, mis sõltub välisõhu temperatuurist ja tarbija kasutusmugavusest [34].

Soojussõlm asub hoone tehnilises ruumis ning koosneb kütte, põrandakütte, ventilatsiooni, sooja vee soojusvahetitest ja kaugküte baasil soojusvahetitega eraldatud pumbasõlmedest. Soojussõlme reguleerimiskeskus juhib soojussõlme tööd vastavalt sisestatud temperatuurigraafikutele ja ajaprogrammile. Reguleerimiskeskus omab andmeside protokoll (LON). Ringluspumpade tööd juhib pumpade juhtimiskeskus, mis sisaldab magnetkäiviteid, termokaitseid ja märgutulesid. Soojusenergia arvelduste tarbeks primaarpoole tagasivoolu torustikule on ette nähtud ultrahelisoojusarvesti. Hoone küttesüsteemide täitmine toimub läbi veemõõtja kaugküte võrgust, kus veemõõtja on avatud näidikuga. Küttesüsteemide veemahu muutuste kompenseerimiseks küttesüsteemidele on lisatud membraan-paisupaagid [34].

Radiaatorküttesüsteemi (plaatradiaatorid) arvutuslik võimsus on 270 kW, mille soojuskandja on vesi temperatuuri graafikuga 70 /50 °C. Põrandakütte arvutuslik võimsus 65 kW, mille soojuskandjaks on vesi temperatuuri graafikuga 40/ 35 °C [34].

Ventilatsioonikalorifeeride soojusvarustussüsteemi skeemi põhjal jaotub küttesee magistraalitorustike kaudu ventilatsiooni järelsoojenduse kalorifeeridele ja garaažide õhkkütteseadmetele. Ventilatsioonisüsteemi arvutuslik võimsus on 700 kW, mille soojuskandjaks on vesi parameetritega 70/ 40 °C. Kalorifeerid ühendatakse süsteemiga segamissõlmede abil, millega toimub kalorifeeride väljundvõimsuse reguleerimine. Soojuskandja parameetrid pärast segamissõlme 60/ 40 °C [34].

2.1.4 Soe tarbevesi

Hoone tarbevee soojendamiseks kasutatakse kaugkütte soojust, mis kantakse üle tarbevee soojendamiseks. Lisaks hoone tarbeveel soojendamise kulule lisandub ka tsirkulatsiooni ja mahtvee soojendite soojuskadu, mis jõuab enamasti hoonesse vabasoojusena [34].

2.1.5 Külmasõlm ja jahutus

Hoones kasutatakse kaugjahutussüsteemi, mis tarbib vähem elektrit, võimaldab suunata jääksoojust kaugküttevõrku ja kasutab vabajahutuseks jõe vett. Lisaks madalamale energiatarbele tekib vähem CO₂ heidet [35].

Suvisele ruumitemperatuurile kehtestatud nõue on haridushoone puhul rahuldatud, juhul kui 1. maist 15. juunini ja 15. augustist 30. septembrini ei ületa see 100 kraadtundi. Seda eeldusel, et hoone on 16. juunist 14. augustini suletud. Ruumides, kuhu ei ole ette nähtud mehaanilist jahutust, peab olema tagatud passiivsete meetmetega suvise ülekuumenemise vältimine [36]. Selleks, et tagada ruumitemperatuuri ülemise piiri nõude täitmine, on hoones kasutusel jahutussüsteem.

Külmasõlm asub tehnilises ruumis, hoone 0-korrusel. Külmasõlme reguleerimiskeskus juhib külmasõlme tööd vastavalt sisestatud temperatuurigraafikutele ja ajaprogrammile. Hoone jahutussüsteemide täitmine toimub läbi veemõõtja tarbevee võrgust. Jahutussüsteemide veemahu muutuste kompenseerimiseks lisatakse membraan-paisupaagid. Täiendavalt on hoone serveriruumi jahutamiseks paigaldatud eraldi külmasõlm. Külmasõlmes on projekteeritud soojusvahetid, reguleerimis armatuur

ja ringluspump. 1.-l ja 2. korrusel on ventilaator konvektor jahutussüsteem, kus külmakandjaks on vesi temperatuurigraafikuga 15/ 18 °C. Hoone 3. ja 4. korrusel asuvate ruumide jahutamiseks on projekteeritud jahutuspalkidega jahutussüsteem. Külmakandjaks on vesi, temperatuurigraafikuga 15/ 18 °C. Ventilatsiooniseadmete jahutuspatareide jahutussüsteemi külmakandjaks on vesi temperatuurigraafikuga 8/ 18 °C. Samalt süsteemilt on kavandatud ka serveriruumi jahutussüsteemi külmavarustus plaatsoojusvaheti kaudu. Serveriruumi jahutussüsteemi külmakandjaks on vesi temperatuurigraafikuga 15/ 20 °C [34].

Serveriruumi alternatiivjahutuseks on eraldi veepõhine jahutussüsteem komplektse külmamasinaga, mis asub hoone katusel. Alternatiivjahutuse süsteemi külmakandjaks etüleenglükooli 40% lahus, temperatuurigraafikuga 10/ 15 °C. Alternatiivjahutuse süsteem on samuti külmavarustus serveri jahutussüsteemile eraldi plaatsoojusvaheti kaudu [34].

2.1.6 Ventilatsioon

Ventilatsioonisüsteem koosneb jahutusega varustatud 14-st sisse- ja väljatõmbe süsteemist, millest 13 on soojustagastusega ning väljatõmbesüsteemiga WC- ja prügiruumidest. Jahutustalad asuvad 3. ja 4. korruse kabinetides ja halduri ruumides 1040 ja 2051. Seadmete agregaadid, mis teenindavad 1. ja 2. korrust, asuvad 0. korrusel ventilatsioonikambris. 3. ja 4. korruse ventilatsiooni seadmete agregaadid asuvad 4. korruse kambris. Muutuva vooluhulgaga süsteemid on nn VAV-süsteemid ja ruumipõhise sisse- ja väljalülitussüsteemiga on nn CAV-süsteemid. Õppeklasside, seminariruumide ja auditooriumite süsteemide hulka kuuluvad VAV-õhuklapid, millega reguleeritakse ruumi ventileerimise ja jahutamise intensiivsust vastavalt CO₂ taseme ja siseõhu temperatuuri mõõtmisele. Minimaalses asendis on tagatud 30 % õhuvahetus. Ülejäänud ruumide harud on eraldatud CAV- klappidega, et tagada tasakaal VAV-õhuklappides toimunud muutuste korral. CAV- klappidega seadmed teenindavad 3. ja 4. korruse ruume, vaid koosolekuruumidesse on paigaldatud VAV- klappid [34].

Erandiks on ka ventilatsiooniseade SV9, mis teenindab ühte suurt auditooriumi ja suurendab õhuvooluhulka, kui ruumi CO₂ tase tõuseb üle lubatud piiri. Sama süsteemiga töötab parkla väljatõmme S14 agregaat. SV10, SV11, SV12 ja SV13 on rootor soojusvahetiga ning CAV- klappidega. Õppehoone eripära on laboriruumid, milles on koht ära- ja koht väljatõmbeotsikud. Seda ala teenindab SV7 ventilatsioonisüsteem, mis on kombineeritud VAV/CAV ning On/ Off klappidega. SV8 omab konstantset õhuvooluhulka ja põhineb rootor mehhanismil. Maa aluse garaaži ventilatsiooniks töötab

S14 ja V14.1 koos V14.2-ga. Kütteta prügiruumides ja WC-de üksikud väljatõmbesüsteemid funktsioneerivad katuseventilaatorite baasil [34]. Lisades 12 (L12.1-L12.3) olevad autori tehtud fotod on 4. korruse ventilatsioonikambrisse paigaldatud seadmetest.

Tabel 2.1 kirjeldab ventilatsioonisüsteeme, nende parameetreid ja paiknemist hoones [34]. All olevas tabelis kajastatakse realselt välja ehitatud seadmeid

Tabel 2.1 Ventilatsioonisüsteemi paiknemine ja parameetrid [37]

Seade	Proj. sissepuhe $l \cdot s^{-1}$	Tegelik sissepuhe $l \cdot s^{-1}$	Proj. Väljatõmme $l \cdot s^{-1}$	Tegelik väljatõmme $l \cdot s^{-1}$	SFP	Teenindusala
SV1	2220	2220	1820	1820	1,81	0. korruse üldruumid serveriruum 2.korruse arvutiklassid
SV2	3200	3179	3200	3218	1,75	1. korruse koridor küttesõlm 1.korruse auditooriumid
SV3	2400	2477	2400	2477	2,01	1.korruse auditooriumid
SV4	5470	5732	4835	4946	2,08	2. korruse köök ja puhkeala 2.korruse auditooriumid seminariruumid
SV5	1695	1761	1485	1481	1,46	2.korruse koridor trepikoda arvutiklassid seminariruumid
SV6	2900	3021	2900	2931	1,66	0. korruse tehnoruum 1. korruse koridor auditooriumid
SV7	2430	-	2470	-	1,68	2. korruse laborid laoruumind
SV8	1500	1532	1450	1435	1,3	1. korruse köök ja kohvik
SV9	2400	2477	2400	2477	1,69	auditoorium 1037
SV10	2660	2692	2476	2587	1,58	3.-4. korruse kabinetid alumise tiiva teised ruumid
SV11	2782	2830	2665	2738	1,70	3.-4. korruse kabinetid ülemise tiiva teised ruumid (ülemine osa)
SV12	2456	2518	2190	2219	1,44	3.-4. korruse kabinetid ülemise tiiva teised ruumid (alumine osa)
SV13	1530	1594	1550	1610	1,25	koridor 2001-A
S14	4800	4865			0,71	parkla

Ventilatsioonisüsteemide parameetrite arvestamisel energiaarvutustes on oluline eristada seadme tüüp ja parameetrid, mis iseloomustavad selle töö efektiivsust [18]. Tabelis 2.2 on koondatud ventilatsioonisüsteemide SFP $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ kaalutud keskmised ja soojustagastus temperatuuri suhtarv (%). Lisas 10 (vt Lisa 10) esitatud tabelis on väljatõmbeseadmete projekteeritud ja tegelike väljatõmbe õhuvooluhulkade ning teenindusala kirjeldus.

Tabel 2.2 Ventilatsioonisüsteemi keskmised parameetrid (autori arvutus)

Süsteem	Süsteemi SFP $\text{kW}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Soojustagasti temperatuuri suhtarv %	Minimaalne heitõhu temperatuur $^{\circ}\text{C}$
VAV (rootoriga)	1,9	78%	- 18,1
CAV (rootoriga)	1,5	83%	- 18,8
CO ₂ indikaatoriga	1,4	76%	- 16,4
Vahesoojuskandjaga	1,5	72%	- 17,6

2.1.7 Hooneautomaatika

Hoonesse on projekteeritud automatiseeritud süsteem, mis koosneb kontrolleritest ning on ehitatud automaatika lokaalvõrgust tehnosüsteemide integreerimiseks. Süsteem on ühendatud BMS (*Building Management System*) Tartu Ülikooli Desigo CC serverisse. BMS automaatikasüsteemist on võimalik jälgida ja vajadusel korrigeerida hoone kliima parameetreid ja tehnosüsteeme. Antud süsteem võimaldab vaadelda trende CO₂ kontsentratsiooni ja temperatuuri muutustest ruumides, kus vastavad andurid ja kontrollerid on paigaldatud. Lisas 9 (vt Lisa 9.1) on kuvatõmmis ventilatsiooniseadme skeemi võimalikust kuvamisest, kus on näha õhutemperatuuri muutumine seadme osades. Iga skeem kannab endas infot süsteemi töö ala paiknemisest. Süsteemis tekkivad kõrvalekalded ja häired kuvatakse vaate ülemise riba alale ning avaldub häire signaalina kõlaritest [34].

Keskne automaatikasüsteem omab ühendust reguleer- ja andursignaalidega, olekute indikatsioonide ja alarmidega. Eesmärk on süsteemide juhtimine vastavalt (sisekliima) vajadustele ja infovahetusele (sh häired, veateated, monitooring, seadesuurused).

Automaatika visualiseerib tehnosüsteemide juhtimisskeemid ja ajaprogrammid. Öö- ja päevarežiimide ajaline jaotus on halduritele muudetav. Kontrollerid on sideliini kaudu

ühendatud digitaalselt. Nendes moodulites kasutatakse järgmiseid punkte: analoogsisendeid, analoogväljundeid, digitaalseisundeid- ja väljundeid [34].

Kogu juhtimiskeskus on ühendatud ventilatsioonisüsteemi, küttesüsteemi, jahutussüsteemi ja ruumikliima juhtimisse. Ventilatsioonikambris on puuetundlik kontrollpaneel, kus saab süsteemi reguleerida, jälgida ning häirete puhul olukorda stabiliseerida.

2.2 Andmete kogumine ja analüüs

Energiamärgise arvutamiseks koguti esmalt lähteandmeid. Andmete kogumise aluseks kasutati nõudeid energiamärgise andmisele ja energiamärgisele, Kredexi koduleheküljelt andmeid kraadpäevade kohta kuna hoone kaalutud energiakasutuse arvutamisel kasutatakse kraadpäevi [18], [36]. Lisas 3 on välja toodud Tartu kraadpäevade tabel, kombineerituna andmetest 2020. aasta 17. veebruarist 2021. aasta 17. veebruarini.

Hoone tarbimisandmed saadi suuremas osas hooneautomaatika süsteemist. Saadud materjalist filtreeris autor vaatlusperioodile vastava ja olulise. Lisaks eristati Ettevõtluskeskuse andmete osa õppehoonest, sest arvutustes esitatavad nõuded erinesid hoonete kasutusotstarbe tõttu.

Ruumikliima analüüsiks kasutati CO₂ andurite ja temperatuurimõõdikutega varustatud ruumide andmeid. Valikus lähtuti ruumide paiknemisest hoones, et saada ülevaade ühest ruumist igas ilmakaares ja kõikidel korrustel. Andmed saadi süsteemi salvestunud baasist, mille põhjal tehti graafikud ja tabelid, toodi välja vaatlusaluste ruumide aasta keskmised sisetemperatuurid ja süsihappegaasi sisalduse tulemused ning analüüsiti tulemusi mõjuteguritega.

Vaatamata sellele, et tegu on õppeasutusega, hoiti hoone töös ka suvisel ja talvisel puhkusel. Teadustööd tehakse hoones aastaringse ja seetõttu ei kasuta vaheaegadest tulenevaid hoone tehnosüsteemide seisakuid.

Delta õppehoone energiakasutuse andmete kogumiseks kasutati arvestite näitude väljavõtteid alates 17.02.2020 kuni 17.02.2021. Hoone energiabilansi jälgimiseks on kaks peaarvestit, mille näitude summeerimisel saadi kogu tarbitud elektrikogus.

Järgnevates peatükkides kirjeldatakse uurimise läbiviimiseks vajatud andmete kogumiseks kasutatud meetodeid. Kõiki arvutatud, salvestatud ja kogutud andmeid on kirjeldatud all olevates alapeatükkides kirjeldatud.

2.2.1 Hoone ülevaatus

Kogu uurimustöö aluseks oli hoonega tutvumine ja lähem vaatlus. Hoone automaatik-inseneri juhendamisel tutvuti kõikide korruste ruumidega ja külastati tehnosüsteemide eraldatud hoone ruume. Ülevaatus käigus saadi ülevaade küttesüsteemide paiknemisest, ruumikontrollerite asukohtadest ja multimeedia seadmetest, mida ruumides kasutatakse. Vaadeldi ventilatsioonisüsteemide paiknemist ruumides ja veenduti projektdokumentatsioonis kajastatud ruumide otstarvete vastavust tegelikkusele.

2.2.2 Arvutusliku energiamärgise andmed

Tegelike energiatarbimise tulemuste võrdlemiseks kasutati kehtiva ETA väärtusi. Narva mnt 18 asuv Delta teadus- ja õppehoone sai energiamärgise klassis A. Praeguseks kehtetu, esmane Ehitisregistris (EHR-s) kättesaadav märgis, anti välja 3. detsembril 2019. aastal. Kasutusloajärgse energiamärgise teatis avaldati 20. jaanuaril 2020 ning energiaarvutustel põhinev energiamärgise teatis 22. jaanuaril aastal 2020. Kehtiv energiaarvutuste tulemus on esitatud Lisades (vt Lisa 1) ja arvutuse algandmed (vt Lisa 2). Erinevused kahe ETA vahel on all olevas tabelis 2.1 [19].

Tabel 2.1 Kehtiva- ja kasutusloa eelse energiaarvutuse andmete võrdlus [30]

	03.12.2019	20.01.2020
Köetav pind m ²	18 278,4	18 306,5
Netopind m ²	23 273,3	23 348,3
Energiatõhususarv kW·h·m ⁻² ·a ⁻¹	79,0	74,0
Tarnitud energia (elekter) kW·h·a ⁻¹ ·m ²	16,8	14,4
Kaalutud energiakasutus (elekter) kW·h·a ⁻¹ ·m ²	33,7	28,7
Ruumide küte (elekter) kW·h·a ⁻¹ ·m ²	0,5	0,4
Elekter päikesest kW·h·a ⁻¹ ·m ²	8,6	11,1
Päikesepaneelide võimsus kW	283,4	284,0

Energiamärgise arvutustes analüüsiti elektrit, kaugkütet ja kaugjahutust hoone tüüpsel kasutusel. Vastavalt Delta keskuse õppehoone energiaarvutuse tulemuste dokumendile (vt Lisa 2), moodustas suurima aastase energiatarbe, 758288 kW·h·a⁻¹ kaugküte, järgneb elekter 317919 kW·h·a⁻¹ ja seejärel kaugjahutus 344457 kW·h·a⁻¹. Kogu tarnitud energia hulk oli 1076207 kW·h a⁻¹. Lokaalse taastuenergiastemina oli

arvutustes arvestatud päikesepaneelide. Delta korpuse lokaalselt taastuva energia hulk oli $151200 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$.

Ruumide küttes arvestati kõikide soojusallikate kasuteguriks 1,0. Jaotamise ja väljastamise kasutegurid varieeruvad. Lisas 2 esitatakse ETA arvutuses kasutatud ventilatsioonisüsteemi arvutusandmeid [38]. Hoonel on ka lokaalne taastuvenergia süsteem päikesepaneelidena. Selle maksimaalne võimsus 283,4 kW võeti energiaarvutustes arvesse. Soojus tagatakse Delta keskusesse kaugkütte süsteemiga, millega on ühenduses radiaatorid ja põrandakütte torustik. Hoones on soojustagastusega sissepuhke- väljatõmbe ventilatsioonisüsteem. Väljatõmbeventilatsioon täidab sekundaarse süsteemi rolli. Hoone omab jahutussüsteemi [27].

Lisades (vt Lisa 2) esitatakse ETA arvutuses kasutatud ventilatsioonisüsteemide parameetrid. Tegelikuses erinesid seadmete SFP, väljuvad ja sisenevad õhuvooluhulgad, väljaviske temperatuur (määruses plaatsoojusvahetil 0 või rootorsoojusvahetil $-5 \text{ }^\circ\text{C}$) ning klappide tüübid. Reaalselt kasutuses olevate seadmete lähteandmed esitati ventilatsiooni peatükis ning võrdlus ETA arvutuses kasutatud ventilatsioonisüsteemide parameetrite ja tegelike seadmete näitajate kohta kajastati tulemuste ja analüüsi peatükis (vt ptk 3.2). Lähteandmete esitamisel olid vabasoojust andvad elemendid: inimesed, seadmed ja valgustus. Lisamärkusena iseloomustati valgusteid LED- valgustitena, klassiruumide ja kabinettide kaalutud keskmise $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ -ga. Üldaladel on LED-valgustite kaalutud keskmiseks erivõimsuseks $3,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tabel 2.2 kirjeldab kõiki vabasoojus kadusid põhjustavate tegurite maksimaalseid suuruseid pinna ruutmeetri kohta ning haridushoone kasutusaega ja astet tüüpsel kasutusajal [39].

Tabel 2.2 Vabasoojusallikad ja kasutusaeg ETA lähteandmetes [39]

Hoone tüüp	Inimesed $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Seadmed $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Valgustus $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Kasutusaste %	Kasutusaeg nädalas päeva	Kasutusaeg tundides
Haridushoone	14	8	6,76 ⁶	50	5	8

Praegu kehtiva Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika põhjal arvutusi tehes oli Valgustuse kui vabasoojusallika suurim väärtus tüüpse kasutuse korral $12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

2.2.3 Piirdetarindite näitajad

Hoone energiatarbe- ja sisekliima uurimiseks koondati info Delta Teadus- ja õppehoone piirdetarindite soojuslähivuse ja külmasildade kohta.

Tabelis 4.1 esitatakse piirdetarindite ja nende liitumiskohtade soojuskaod. Andmete kogumisel lähtuti projekteerija andmetest ja neid võrreldi ETA lähteandmetega. Kuna tarindite soojuslähivused ja koguse andmed ei muutunud, kasutati arvutustes samu lähteandmeid. Välispiirde summaarne soojuserikadu kätava pinna ruutmeetri kohta leiti tabeli 2.1 andmete põhjal.

Tabel 2.1 Soojuskaod läbi piirdetarindite ja külmasildade

Soojuskaudu läbi piirdetarindite	g	U _i (W·m ² ·K ⁻¹)	A _i (m ²)	H _{juhtivus} (W·K ⁻¹)
Välissein		0,20	2699	539,80
Sokkel		0,18	0,18	142,92
Katuslagi		0,14	0,14	648,76
Pörand parkla kohal		0,31	0,31	1343,23
Pörand välisõhu kohal		0,24	0,24	112,32
Välisuks		1,4	1,40	63
Aken põhjas	0,3	0,9	551	495,90
Aken idas	0,3	0,9	879	791,10
Aken lõunas	0,3	0,9	793	713,70
Aken läänes	0,3	0,4	961	864,90
Klaasgaleriid	0,23	0,4	430	172,00
Külmasillad		(W·m ² ·K ⁻¹)	I _j	H _{külmasild} (W·K ⁻¹)
Välissein-välissein		0,2	81	16,2
Välissein - välissein		-0,1	83	-8,3
Katuslagi-välissein		0,2	869	173,8
Välissein pörand		0,3	494	148,2
Avatäide		0,1	3724	372,4
Välissein-sisesein		0,1	1330	133
Välissein-vahelagi		0,1	3580	358
Välissein-vahelagi		0,1	3580	358
Välissein-vahelagi		0,1	3580	358

2.2.4 Tarindite õhulekked

Hoone kaalutud keskmine õhulekke arv oli lähteandmete põhjal $q_{50}=3,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Lekkekohtade korruste täisarv on neli ja selle pindala on kokku 16587 m². Infiltratsiooni V_{inf} oli lähteandmete põhjal 0,9215 m³·s⁻¹. Tehtud arvutuste tulemusena sai õhulekkekohtade soojuskaod väärtuseks 847,8 W·K⁻¹. Täpsustav arvutus tehti autori poolt, sest algandmete esitamisel oli liidetud TÜ Ettevõtluskeskuse ja Delta õppehoone

andmed. Käesolev töö andis hinnangu Delta õppehoone energiatarbele, milleks oli vaja eraldada ettevõtluskeskuse ja uurimises käsitletud hoone soojuskaod.

Tabel 2.1 Soojuskadu läbi õhulekkekohtade

	suurus	ühik
Korpuste kaalutud keskmine õhulekke arv q_{50}	3,0	$m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$
Välispiirete pindala A_{VD}	16 587	m^2
Korruste arv n	4	tk
Arvutuslik infiltratsioon V_{inf}	0,922	$m^3 \cdot s^{-1}$
Soojuserikadu infiltratsioonile	847,8	$W \cdot K^{-1}$

2.3 Teiste õppehoonete andmete analüüs

Delta Teadus- ja õppehoone energiatarbe võrdlemiseks teiste õppehoonetega, võeti aluseks TalTech-i tudengite varasematel aastatel (sh käesoleval aastal), teostatud magistritööd [8] [7] [40] [41], kus analüüsiti õppehoonete energiatarvet. Iga töö oli omanäoline ja andmete esitamise viis varieerus ning kõiki antud hoones käsitletud energiatarbe aspekte võrrelda ei saanud. Lisaks on kõik tööd valminud erinevatel aastatel mistõttu oli määrustest ja väliskliimast tulenevalt taustinfo erinev. Valmisse kuulusid: Tallinna Tehnikaülikooli (endine TTÜ, praegune TalTech) SOC õppehoone (10 360 m²), Tallinna Tehnikaülikooli (endine TTÜ, praegune TalTech) U05 hoone (5 550 m²), Saaremaa Ühisgümnaasium (5 267,3 m²) ja Tallinna Ülikooli (TLÜ) Nova õppe- ja teadus hoone (23 554 m²).

Võrdlus koostati hoonete soojus- ja elektrienergia tarbimisandmetest, mis taandati pindalaühikule, et hoone mõõtmetest tulenevaid tarbimiskoguseid taandada. Mõne hoone puhul sai võrrelda hoone jahutusenergiat ja tarbimisandmeid täpsemalt.

Sisekliima andmete võrdlemiseks uuriti Saaremaa Ühisgümnaasiumi ja Taltech U05 hoonete keskmiseid sisetemperatuuride ja süsihappegaasi sisalduse mõõtmistulemusi. Sisekliima parameetrite mõõtmised tehti erinevate kasutusotstarvetega ruumides ja keskmise temperatuuri leidmisel arvestati kõikide uuritud ruumide keskmiseid tulemusi.

Andmete võrdluseks koostati graafikud ja tehti järeldused andmete sarnasusest või erisusest. Leiti seosed Koroonaviirusest tulenevate piirangute ja energiatarbe muutuste vahel.

2.4 Kaalutud energia kasutus

Reaalse tarbimise KEK-i arvutamisel lähtuti 17.02.2020-17.02.2021 keskmistest kasutatud soojus- ja elektrienergia kogustest. Sellele eelnenud perioodil esines andmebaasides lünki ja alguses kõik arvestid funktsionaalselt ei töötanud, seetõttu valiti vaatlusperioodiks stabiilseima andmepagasiga ajavahemik, kus kõikide vaatlusalaste energiatarbijate andmed olid kättesaadavad.

Igal energiakandjal on oma kaalumistegur, mis võtab arvesse tarnitud energia tootmiseks vajaliku primaarenergia kasutuse ja selle avaldatava keskkonnamõju. Hoone energiatarbimise miinimumnõuete määramisel on välja toodud erinevate energiakandjate kaalumistegurid, mida kasutatakse energiaarvutuste tegemisel. Antud hoone energiakandjate kaalumistegurid on esitatud all olevas tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Energiakandjate kaalumistegurid [18]

Energiakandja	Kaalumistegur
Elekter	2,0
Kaugküte (tõhus)	0,65
Tõhus kaugjahutus	0,2
Taastuvtoormel põhinev kütus	0,65
Kaugküte (tavaline)	0,9
Kaugjahutus (tavaline)	0,4
Vedelkütus, kütteõli, vedelgaas	1,0
Maagaas	1,0
Tahke fossiilkütus	1,0
Turvas ja turbabrikett	1,0

Arvutused taandati Kredexi koduleheküljelt pärinevatele kraadpäevade andmetele [36], mis sõltusid hoone piirkonna asukohast. Antud hoone asub Tartus ehk jaotusklassifikatsiooni II piirkonnas [36]. Energiamärgise andmiseks vajaliku hoone kaalutud energiakasutuse arvutamisel kasutatakse alati tasakaalutemperatuuri 17 °C [18]. Lisas 3 (vt Lisa 3) on esitatud antud töös käsitletud ajavahemiku kraadpäevade tabel.

Lähtudes määrustest: „Energiatarbimise miinimumnõuded“ [24], „Hoone energiatarbimise arvutamise meetodika“ [18], „Nõuded energiatarbimise andmisele ja energiatarbimisele“ [25] ning autori kogutud andmetest, oli Delta õppehoone kaalutud keskmise energiakasutuse arvutuskäik järgmine:

- 1) Normaalaasta kraadpäevade arvu (vt Lisa 3) põhjal taandatud 2020-2021 küttesoojuse kulu arvutus [42]:

$$Q_{N,kyt} = Q_{teg,kyt} \cdot \frac{S_N}{S_{teg}} \quad (2.1)$$

kus $Q_{teg,kyt}$ – küttesoojuse kulu vaadeldaval kalendriaastal, $\text{MW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,
 S_N – normaalaasta kraadpäevade arv,
 S_{teg} – kraadpäevade arv vaadeldaval kalendriaastal.

2) Normaalaasta kaalutud küttesoojuse kulu arvutus [25]:

$$Q_{(C,kyt)j} = \sum_{i=1}^p C_{k,i} \cdot Q_{(N,kyt)i} \quad (2.2)$$

kus p – kütteks vajatava soojuse saamiseks kasutatud energiaallikate arv
 $C_{k,i}$ – energiakandja kaalumistegur. VV Määruse 65 kohaselt on C_k energiakandja kaalumistegur tõhusa kaugküte puhul 0,65 [18].

3) Kaalutud tarbevee valmistamise kulu ühe kalendriaasta kohta [25]:

$$Q_{(C,tvs)j} = \sum_{i=1}^p C_{k,i} \cdot Q_{(tvs)i} \quad (2.3)$$

kus Q_{tvs} – soojuse kulu tarbevee soojendamiseks vaadeldaval kalendriaastal, $\text{MW}\cdot\text{h}$,
 p – sooja tarbevee soojendamiseks vajatava soojuse saamiseks kasutatud energiaallikate arv vaadeldaval kalendriaastal,
 $C_{k,i}$ – energiakandja kaalumistegur.

4) Energiakandja kaalumisteguriga läbi korrutatud aasta keskmine elektrikulu [25]:

$$Q_{C;el} = C_{k,el} \cdot \sum_{i=1}^p Q_{el,i} \quad (2.4)$$

kus $Q_{el,i}$ – elektri kulu, $\text{MW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,
 C_k – energiakandja kaalumistegur.

5) Energiakandja kaalumisteguriga läbi korrutatud aasta keskmine energiakulu jahutusele [25]:

$$Q_{C;jah} = C_{k,jah} \cdot \sum_{i=1}^p Q_{jah,i} \quad (2.5)$$

kus $Q_{jah,i}$ – jahutuse energia kulu, $MW \cdot h \cdot a^{-1}$,
 n – vaadeldavate kalendriaastate arv,
 C_k – energiakandja kaalumistegur.

6) Hoone keskmine normaalaasta energiakasutus [25]:

$$Q_C = Q_{C,kyt} + Q_{C,tvs} + Q_{C,el} + Q_{C;jah} \quad (2.6)$$

kus $Q_{jah,i}$ – jahutuse energia kulu, $MW \cdot h \cdot a^{-1}$,
 $Q_{el,i}$ – elektri kulu, $MW \cdot h \cdot a^{-1}$,
 Q_{tvs} – soojuse kulu tarbevee soojendamiseks vaadeldaval kalendriaastal, $MW \cdot h \cdot a^{-1}$,
 $Q_{teg,kyt}$ – küttesoojuse kulu vaadeldaval kalendriaastal, $MW \cdot h \cdot a^{-1}$.

7) Hoone aastane kaalutud energiaerikasutus [25]:

$$Q_C = 1000 \cdot \frac{Q_c}{A_{kyt}} \quad (2.7)$$

kus A_{kyt} – on hoone köetav pind, m^2 ,
 Q_c – hoone keskmine normaalaasta energiakasutus, $MW \cdot h \cdot a^{-1}$.

KEK-i tulemuse põhjal sai klassifitseerida hoone energiatõhususe klassi. Selleks lähtuti Hoone enrgiatõhususe arvutamise meetodikas esitatud Lisa 3 [25] tabelist, kus on esitatud ETA ja KEK-i väärtustele vastavad energiaklassid. All olevas tabelis 2.1 on KEK või ETA tulemusele vastavad haridushoonete energiaklassid.

Tabel 2.1 Energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiakasutuse (KEK) väärtused ja klassifikatsioon [25]

ETA või KEK	klass
ETA või KEK ≤ 90	A
$91 \leq$ ETA või KEK ≤ 120	B
$121 \leq$ ETA või KEK ≤ 160	C
$161 \leq$ ETA või KEK ≤ 200	D
$201 \leq$ ETA või KEK ≤ 250	E
$251 \leq$ ETA või KEK ≤ 310	F
$311 \leq$ ETA või KEK ≤ 390	G
ETA või KEK ≥ 391	H

2.5 Sisekliima analüüs

Sisekliima komponentidest analüüsiti antud töös soojusliku mugavuse hindamiseks ruumiõhu kuiva termomeetri temperatuuri, õhupuhtuse ning ventilatsiooni toimimiseks ruumiõhu süsihappegaasi sisaldust. Delta õppehoone ruumide arvukuse tõttu valiti uurimiseks igal korrusel üks ruum neljast ilmakaarest, et saada ülevaade õpperuumide temperatuuridest ja süsihappegaasi kontsentratsioonist. Lisades 5- 7 on korruseplaanid, millel on ruumikliima analüüsiks valitud alad korruse lõikes nummerdatud (1-16).

Kogutud andmete põhjal saadi ülevaade hoone sisekliimast ja analüüsiti tulemusi koos neid põhjustavate teguritega. Detailsem analüüs tehti arvutiklassi nr 2021 ja seminariruumi nr 2034 kohta kogutud andmete põhjal (vt ruumid 6 ja 7, Lisa 6).

Möötmistulemuste hindamiseks kasutati riigiteataja määrust [43]. Määruses on järgmised nõuded: haridusasutustes peab ruumide temperatuur olema õpperuumis vähemalt 19°C ja CO₂ tase võib olla keskmiselt kuni 1000 ppm. Antud hoones oli projekteeritud säilitatav talvine ja suvine siseõhu temperatuur 21°C ning keskmine CO₂ tase ≤ 500 ppm. Õpperuumide akendel peab olema kaitse otsese päikesekiirguse eest ja heledavärvilised aknakatted, mis reguleerivad ruumi ülekuumenemise eest [43]. Õppehoonet ilmestav kuldne ribistki ja rulood täitsid nõutavat päikesekaitse rolli.

Möötmistulemused saadi Desigo CC süsteemi salvestatud ruumikliima info põhjal. Andmete saamiseks valiti rippmenüüst Narva mnt 18-DELTA õppehoone, sealsetest valikutest ruumikliima, vastav korrus, sellel paiknev ruum, kus oli paigaldatud ruumikontroller õhu temperatuuri reguleerimiseks või andur CO₂ taseme jälgimiseks. Andmed salvestati MS Exceli tabelitena ja saadud infoga tehti graafikud või tabelid, et hinnata ruumikliimat vaadeldavates ruumides.

Vaatlusaluste klasside seintel on ruumitermostaat, mis võimaldab kasutajatel reguleerida sisetemperatuuri vastavalt vajadusele. Ruumidesse on paigaldatud Siemens RDG160KN ruumikontrollerid (vt Lisa 9.2), mis kuvavad tegeliku temperatuuri. Süsteem töötab ruumiregulaatorile antud käsu peale järgmiselt: VAV- õhuklappide kaudu toimub ruumi ventilatsiooni ja jahutuse intensiivsuse reguleerimine lähtudes sisendi iseloomust. Muutub fancoilide ventilaatorite kiirus, kontrollitakse regulaatorventiilide ning kütteradiaatorite/põrandakütte ventiile. Andmete salvestamine süsteemi on 5 minutiliste intervallidega.

Hoone sisekliima tulemuste analüüsis on oluline välja tuua ruumid, kus toimus jahutuskoormuse tõstmine võimsamate arvutite kasutuse tõttu. All olevas tabelis on loetletud ruumid ja nendes paiknevate arvutite võimsused. Eelnevalt oli antud ruumides arvestatud 70 W võimsusega arvutitöökohtadega.

Tabel 2.1 Suurendatud jahutuskoormusega ruumid ja nendes paiknevate seadmete võimsus

Ruum (nr)	Arvutite võimsus kokku (W)
3024	645
3032	1189
3037	1606
3048	860
3050	450
3058	875
3077	1600
3107	300

3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Hoone energiakasutus

Vaadeldavas aasta pikkuses ajavahemikus tarbis hoone kokku 920 725,50 kW·h ehk 50,3 kW·h·a⁻¹·m⁻² elektrienergiat. Kogu elektrienergia summaarne erikasutus koosnes serveriruumide, valgustite, ventilatsiooniseadmete, ruumide kütte, tugijaamade, seadmete pumpade ja abimehhanismide tarbimistest. All olevas tabelis 3.1 esitatakse aastase vaatlusperioodi energiatarbe andmed.

Tabel 3.1 Vaatlusperioodi energiatarbe koondtabel

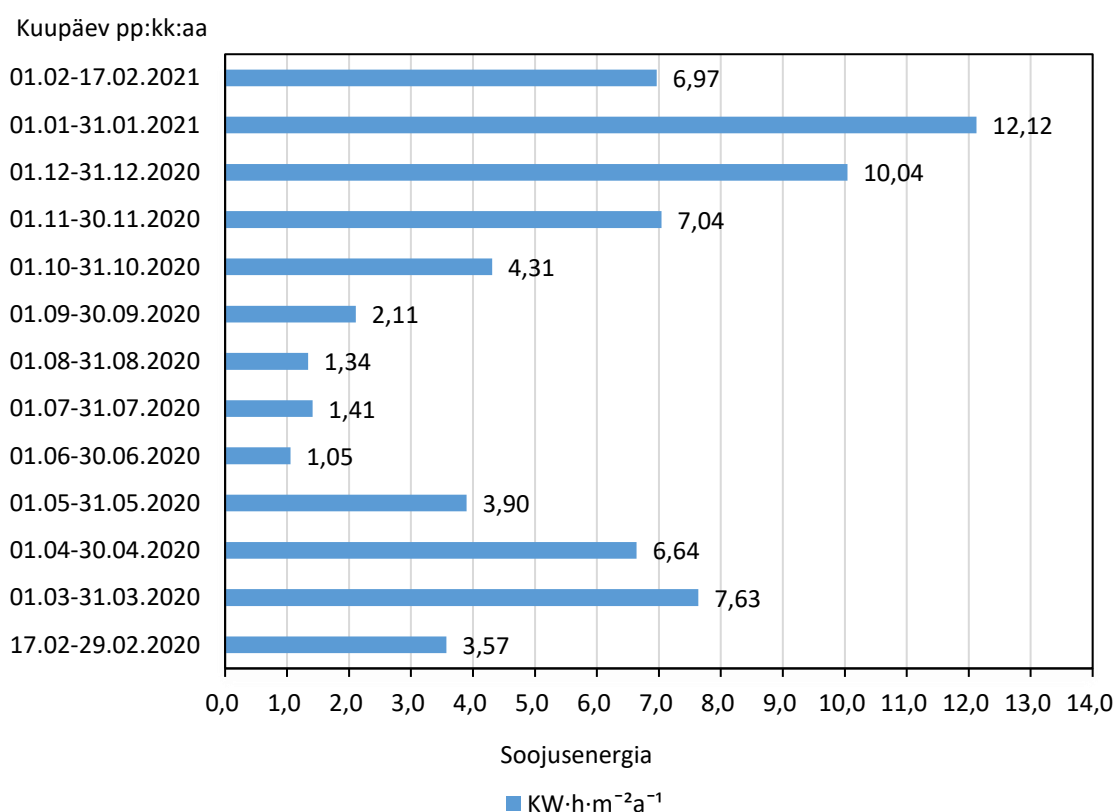
Tarbija	Tarbitud/toodetud kogus kW·h	kW·h·a ⁻¹ ·m ⁻²	Energialiik
Tugijaamad	5743	0,31	Elektrienergia
Jahutusarvesti (kogu)	495900	27,09	Elektrienergia
Jahutusarvesti server	168530	9,21	Elektrienergia
Peasoojusarvesti	1336070	72,98	Soojusenergia (Fortumist)
Põrandaküte	103681	5,66	Elektrienergia
Radiaatorküte	575860	31,46	Elektrienergia
Sooja vee tootmine	73610	4,02	Elektrienergia
Soojus- ja külmasõlm	25407	1,39	Elektrienergia (pumbad, seadmed)
Serverid	213837	11,68	Elektrienergia (serveriruumides)
Ventilatsiooni soojusarvesti	564030	30,81	Soojusenergia (ventilatsioonile)
Ventilatsiooni elektrienergia	255238	13,94	Elektrienergia (VS-1...VS-14)
Väline valgustus	12570	0,69	Elektrienergia
Peaarvestid (PJK1 + PJK2)	920726	50,30	Kogu tarbitud elektrienergia
Päikesepaneelide tootang	187867	10,26	Kogu toodetud elektrienergia

KEK arvutusteks koondati tarbimisandmed, et hinnata energiakulu jahutuse, kütte ja elektri tarbijate jaotusest lähtuvat. Tabelis 3.2 esitatakse kaalutud energiakasutuse arvutamiseks saadud energia tarbimisandmed ja nende klassifitseerimine.

Tabel 3.2 Vaatlusperioodil 17.02.2020-17.02.2021 hoone energiatarbimise hindamisel arvesse võetud tarbijad

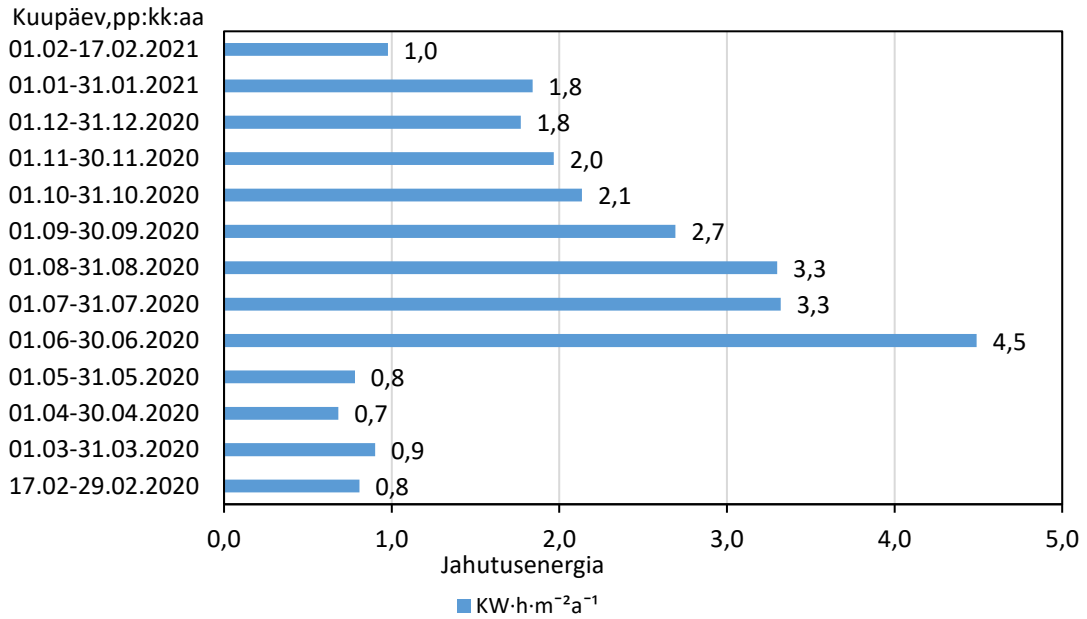
Energiatarbija	kW·h	kW·h·a ⁻¹ ·m ⁻²
Ventilatsioon ja pumbad (elekter)	280645	15,33
Elekter	433337	23,67
Ruumide ja ventilatsiooni küte (tõhus kaugküte)	1243571	67,93
Soe tarbevesi (kaugküte)	73610	4,02
Ruumide ja ventilatsiooni jahutus (tõhus kaugjahutus)	327370	17,88

All olevatel joonistel (vt joonis 3.1- 3.3) kajastatakse hoone elektri-, soojus- ja jahutusenergia tarbimine kuude lõikes. Vaatlusperiood algas 17.02.2020 ja kestis kuni 17.02.2021. Joonisel 3.1 estitakse aastase soojusenergia kogutarve kuude kaupa. Diagrammil kajastub suvine madal soojusenergia tarve, mis kasvas talvekuudel oma maksimumini. Kõige enam tarbiti teadus- ja õppehoones soojusenergiat novembrist märtsini. Kuna vaatlusperiood lõikas veebruari andmed kahe kuu peale, saadi nende liitmisel suuruselt teise enim soojusenergiat tarbinud kuu. Talvekuude madal välisõhutemperatuur viis siseruumide kütmisvajaduse kasvuni.



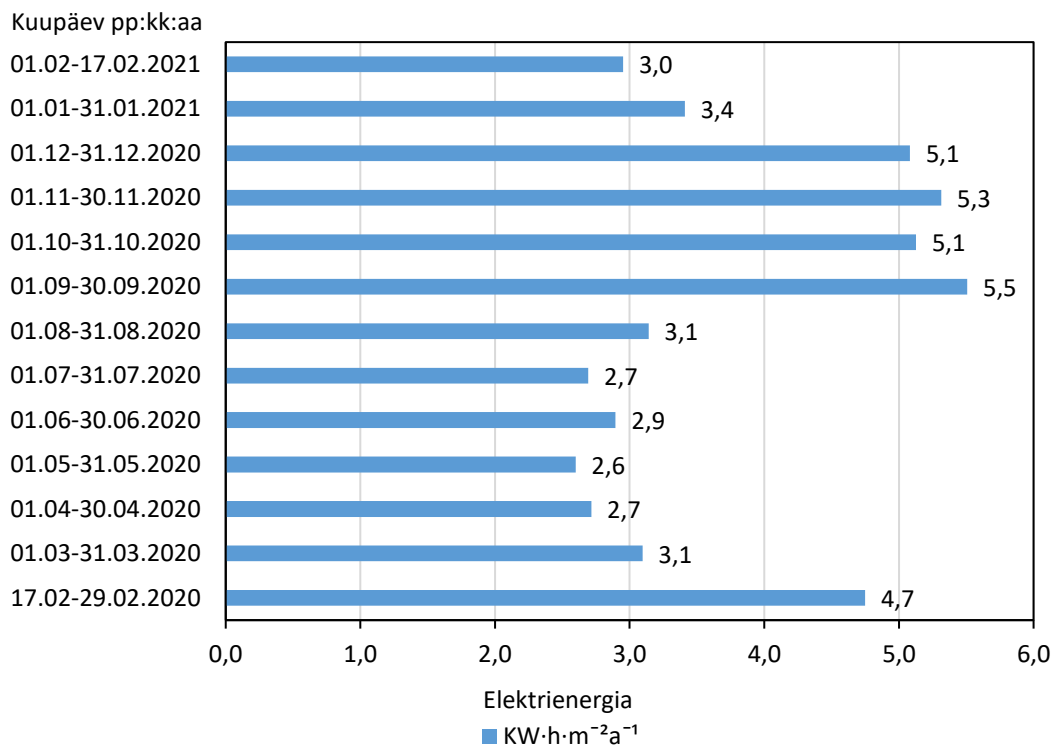
Joonis 3.1 Vaatlusaasta kogu soojusenergia tarbe jaotus kuude kaupa

Joonis 3.2 kirjeldab hoones tarbitud jahutusenergiat ja selle jagunemist aastasel vaatlusajal. Eeldatavasti küttis suvine päikesekiirgus ruumide sisetemperatuuri kõrgemaks ja seetõttu vajati suuremat õhuvooluhulka jahutuseks. Hoones tehti teadustööd ka suveperioodil, kuid õppetööd polnud. Lisanduv tõstis vabasoojus ruumide jahutusvajadust. Kõige enam tõsis jahutuskoormus juunis, kus kuu jooksul tarbiti 4,2 kW·h·a⁻¹·m⁻² jahutusenergiat. Võrreldes 2020. aasta aprilliga, kui jahutuseks kulus vaid 0,7 kW·h·a⁻¹·m⁻², oli tegu suure erinevusega. Jahutusenergia tarve vähenes eriolukorrast tingitud õppetöö seisaku tõttu. Vabasoojuseraldus oli väike ja jahutuseks puudus vajadus. 2020. aasta sügisel oli taas võimalik õppetegevus, mis on näha jahutusvajaduse kasvus joonisel 3.2.



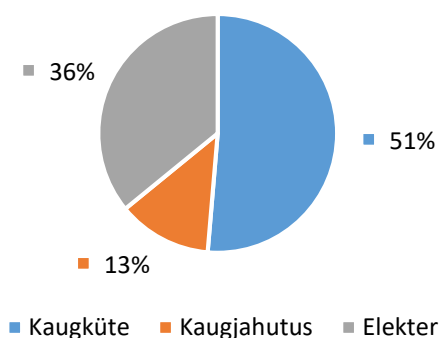
Joonis 3.2 Vaatlusaasta jahutusenergia kogutarbe jaotus kuude kaupa

Joonisel 3.3 on summeeritud kuude kaupa peajaotuskilpide (PJK1 ja PJK2) elektrienergia tarbimise andmed. Kogu aastane tarbitud elektrienergia kogus oli 50,3 kW·h·a⁻¹·m⁻². Joonise 5.3 põhjal jaotub elektri tarbimine kaheks: Kõige kõrgem sügise- ja talvekuudel ja madalaim kevad- ja suvekuudel. Õppetöö välisel ajal oli tarve madalam, sest siis auditooriumites tööd enamasti ei toimunud, sealseid graafikaseadmed ja valgustus elektrienergiat ei vajanud. Kõrgeim tarbimine oli septembris, kui kuu jooksul kasutati 5,5 kW·h·a⁻¹·m⁻² ehk 101 MW·h elektrienergiat. Järgnesid november, oktoober ja detsember, kus tarbiti 93 MW·h kuni 98 MW·h jagu elektrit. Sel perioodil lubati auditoorne õppe- ja teadustöö. Kõige enam mõjutaski elektri tarvet valgustus ja seadmed, mis olid otseselt seotud kasutajate arvuga hoones. Serveriruumide toide oli kõrge ka kaugtöö puhul ning ei olenenud hoones viibijatest.



Joonis 3.3 Vaatlusaja elektrienergia tarbimine kuude kaupa

All oleval joonisel 3.4 selgub, et hoone kütteks kulunud energia omas üle poole kogu tarbitava energia osakaalust. Üle kolmandiku läks elektrienergia tarbeks ja väikseim kulu oli hoone jahutuseks. Kuna hoones paiknevate seadmete ja neid kasutavate inimeste hulk oli piirangutest tingituna väike, eritus vähem vabasoojust, mis tõstis küttevajadust. Hoone kasutusaste oli madal ja sealsete seadmete töökoormus sellest tingituna minimaalne. Juhul kui vabasoojuse eraldumine on madal, puudub vajadus ruumide jahutuseks energiat kasutada.

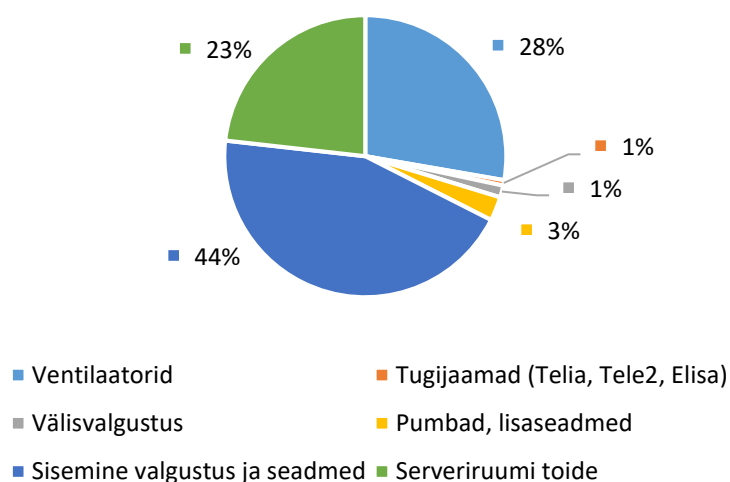


Joonis 3.4 Hoone elektri-, kütte- ja jahutusenergia protsentuaalne jaotus

Joonis 3.5 toob välja Delta keskuse elektrienergia tarbimise detailsema jaotuse. Selgus et, suurimad elektritarbijad olid siseruumide valgustid ja ruumides töötavad seadmed, sest võtsid 44% kogu elektrienergia kasutusest. Järgnes ventilaatorite tööks kasutatav

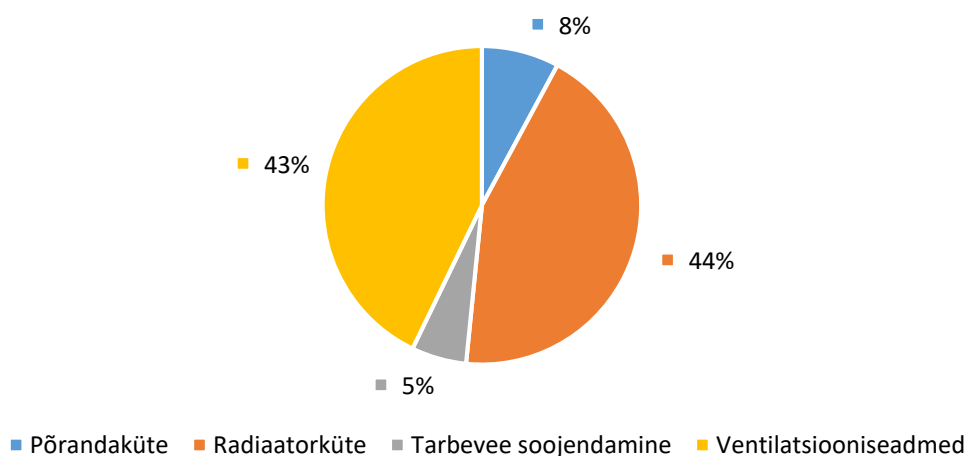
elektri energia 28%-ga ja serveriruumide toide 23%-ga. Viimane moodustas ligi veerandi kogu elektrienergiast, mis aastas hoones tarbiti. Serveriruumide tarbimisega ei arvestatud ETA arvutamisel, mis tõi endaga kaasa energiatarbe alahindamise. Väiksem roll oli tugijaamade pumpade, lisaseadmete ja välisvalgustuse osal.

Seadmete ja sisemise valgustuse energiatarve oli ootuspäraselt suure osakaaluga, sest kõik auditooriumid ja õppeklassid on varustatud rohkete multimeedia seadmete ja suurte ekraanidega.



Joonis 3.5 Elektrienergia jagunemine

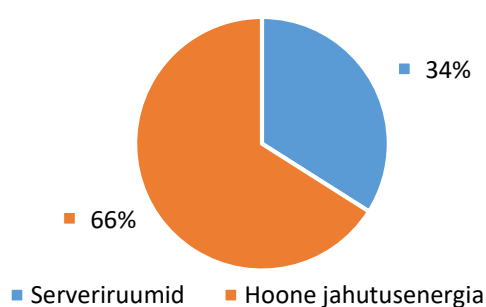
Hoone soojusenergia kasutamine omas, Delta teadus- ja õppehoones suurimat energiatarbija rolli. Joonis 3.6 annab ülevaate soojusenergia jaotusest Delta õppehoones.



Joonis 3.6 Soojusenergia tarbimise jaotus

Jooniselt 3.6 selgus, et võrdselt suurimad soojusenergia tarbijad olid kõikidel korrustel paiknevad radiaatorid (44%) ja ventilatsiooniseadmed (43%). Põrandaküte on paigaldatud vaid esimesel korrusel vähestesse ruumidesse ja omas seetõtu väiksemat osakaalu (8%). Vähim soojusenergiat nõudis tarbevee soojendamine (5%). Kuna hoonet kasutavate inimeste (õpilased) arv oli aasta lõikes madal, siis alahindas antud tulemus tavakasutuse aasta võimalikku tulemust.

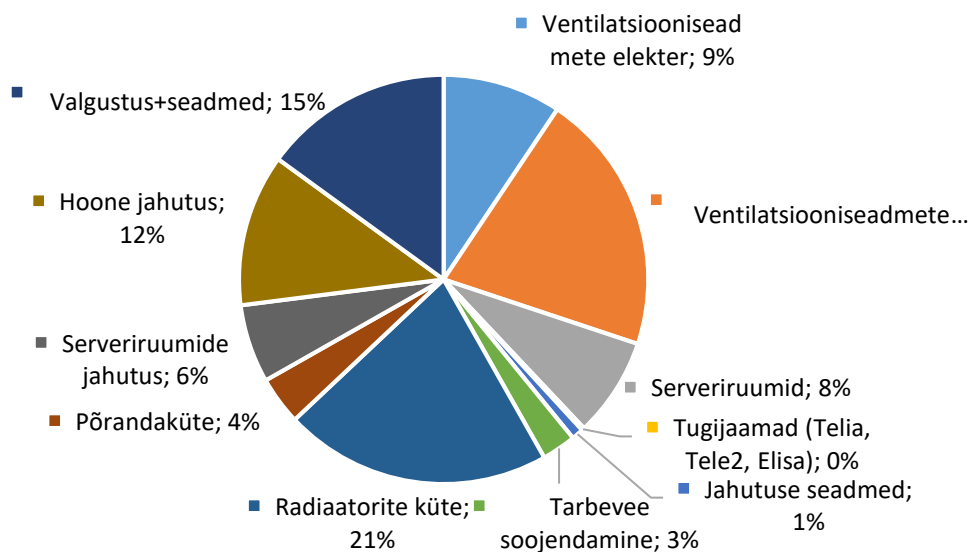
Energiatarbimise kolmas lüli, jahutusenergia, jaotus hoones serveriruumide ning ülejäänud hoone jahutamiseks. Serveriruumide jahutuseks kasutati kolmandik kogu jahutusenergiast, 66% kuulus kõikide teiste õppehoone ruumide tarbeks.



Joonis 3.7 Jahutusenergia tarbimise jaotus

Delta õppehoone on varustatud serveriruumidega, sest mitmed õpperuumid teenindavad arvuteid, mille võimsusaste on tavakasutajale tuttavatest seadmetest suurem. Õppehoone ETA arvutamisel ei arvestatud serveriruumidele kulunud jahutusenergiaga ja sellega alahinnati jahutamiseks kuluva energia kogust. Joonisel 3.7 selgub, et serveriruumide jahutuseks kulus koguni kolmandik kogu jahutusenergiast. See muutis kogu hoone energiatarvet ligi 12% suuremaks. Jahutusenergia suurenemist saab põhjendada oodatust võimsamate seadmete kasutamisega töökohtadel. Projekteeritud 70 W võimsusega arvutite asemel oli ühes ruumis kuni neli, maksimaalselt 400 W võimsusega arvutit, sõltuvalt ruumi kasutajate arvust. Seetõttu tõsteti 2020. aasta suvel ka nende ruumide jahutust, kus töös olnud seadmed oodatust suuremat vabasoojust tekitasid. Kõik suurenenud jahutusvajadust omanud tööruumid asuvad 3. korrusel ja on eelnevalt välja toodud ptk 3.1 „Sisekliima analüüs“ asuvas tabelis 3.1.

Terve hoone energiatarbe sai esitleda veelgi detailsemalt. All oleval diagrammil (vt joonis 3.8) kajastatakse kõikide tarbijate protsentuaalset osa kogu energia tarbes.



Joonis 3.8 Delta keskuse kogu energiatarbimise jaotus

3.2 Kaalutud energiakasutus

Hoone energiatarbe kontrollimiseks tehti kaalutud energiakasutuse energiaarvutused (KEK). Kaalutud keskmine energiakasutus iseloomustab Delta õppehoone reaalselt energiatarvet kõige täpsemalt. Hoone pole oma täisvõimsusel tööle saanud, sest Koroonaviirusest tingitud asjaolude tõttu piirati õppetegevuse auditoorset toimumist, mille tulemusena oli kogu energiatarve madalam tavapärasest kasutusolukorrast.

Vastavalt määrusele „Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele“ [1] liigitus Delta haridushoonete kaalutud energiakasutuse ja energiatõhususarvu klassi C, sest arvutustulemuse väärtus KEK $134,7 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} \leq 160 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Kasutusloajärgse energiamärgise arvutustulemuse põhjal liigitati hoone klassi A, sest ETA- väärtuseks saadi $74 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Tegelikke tarbimisandmeid analüüsides selgus, et aastane kaalutud keskmine energiatarve (kasutades arvutustes kaalumistegureid), oli ligi $60 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ kõrgem. Energiakasutus oli suurem, vaatamata hoone madalamale kasutusastmele, mis oli tingitud Koroonaviiruse levikut tõkestavatest piirangutest õppetöös ja huvitegevuses.

KEK oluliselt suurem väärtus ETA-st oli põhjustatud täpsetest tarbimisandmetest. ETA-arvutuses lähtuti hoone standardkasutusest, määrusepõhistest suurusjärgudest ning lähteandmetest, mis koosnesid välis- ja sisekliima infost, hoone ja tehnosüsteemi

kasutus- ja käiguageadest, vabasoojuse ja välispiirde õhulekke lähteandmetest. Olemasolevad seadmete põhised andmed võeti projektdokumentatsioonist [14].

3.2.1 Lokaalne energia tootmine

Hoone katusel asuvad PV- paneelid, mis toodavad lokaalset taastuvenergiat (vt joonis 3.1). Antud teave lähteandmetest oli oluline, et anda hinnang paneelide tootlikkuse rollile energiatarbe kompenseerimiseks.

Paneelid asuvad Delta õppehoone katusel ja ühendatud viies osas, vastavalt inverteerite järgi. Kokku on viis HUAWEI SUN2000-36KTL inverterit, võimsusega 40 kW. Kolm inverterit on 148 paneeliga- ja kaks 144 paneeliga ühenduses. Ühendus tagati elektrienergia tagastamiseks üldisesse võrku ja hoone omatarbeks. Teadus- ja õppehoone katusel paiknevad jaotuskeskused PV-JK1 ja PV-JK2, kus on inverteerite kaitseautomaadid, mis saavad toite peajaotuskeskusest [44].



Joonis 3.1 Delta õppehoone katusel paiknevad PV-paneelid [45]

Päikesepaneelide mooduli efektiivsus on 17,29 %, maksimaalne võimsus 335 W. Inverteeri efektiivsus on 98,3 %, maksimaalne 98,6 %. Maksimaalseks väljundvõimsus 40,8 kW.

Päikesepaneelide koguvõimsus on 239,9 kW ning inverteerite koguvõimsus 200 kW. Jaam vajab oma inverteerite ja monitooringu seadmete toiteks tunnis 100 W suurust võimsust [44].

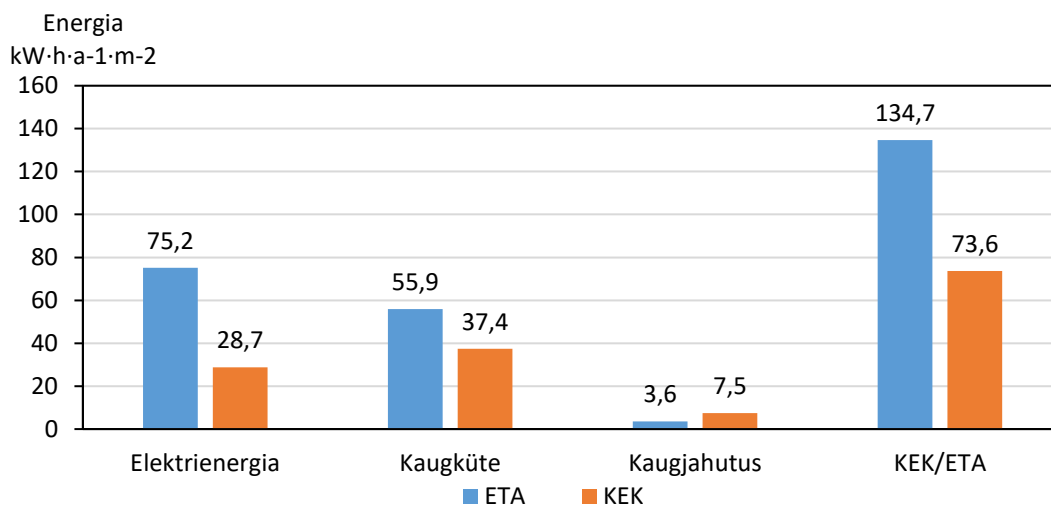
Paneelide toodetud energiakasutuseks on erinevaid viise: tarbida koha peal kõik, kasutada osa toodangust ja müüa ülejäänud võrku tagasi või müüa kogu energia võrku [18]. Delta õppehoones tarbiti üldjuhul kogu toodang omatarbeks. Väga päikesepaisteliste ilmade korral, kui toodetakse tarbimisvajadusest rohkem energiat, müüdi toodang elektrivõrku tagasi. Meie kliimas on selliste päevade hulk väga väike [46], seega arvutustes eeldas autor täielikku kasutamisprotsenti.

Uurimisaastal kogutud andmete põhjal oli paneelide kogutoodang $187867,63 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ ehk $10,26 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Päikesepaneelide poolt toodetud energiakogus aasta vältel muudaks hoone energiatarbe selle võrra madalamaks. Antud hoone puhul väheneks energiakasutus elektri kaalumistegurit 2,0 arvesatades $20,52 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ võrra ja tagaks parema energiaklassi B.

Kehtivas ETA märgises oli PV-paneelide võimsuseks märgitud 283,4 kW·h, mis oli 43,5 kW·h enam tegelikust. Teadus- ja õppehoone kompleksi kuuluv Ettevõtluskeskus kasutab lokaalse taastuvenergia tootmiseks samuti PV- paneele (130 paneeli), seepärast liideti ETA lähteandmetes mõlema hoone päikesepaneelide võimsus ja saadi kõrgem võimsuse väärtus. Päikesepaneelide poolt toodetud energia omatarbeks kasutati kogu toodang, analoogselt kontorihoonega, mis kinnitas ETA arvutuses päikesepaneelide toodangu arvutuse päevust, seda kriisist olemata.

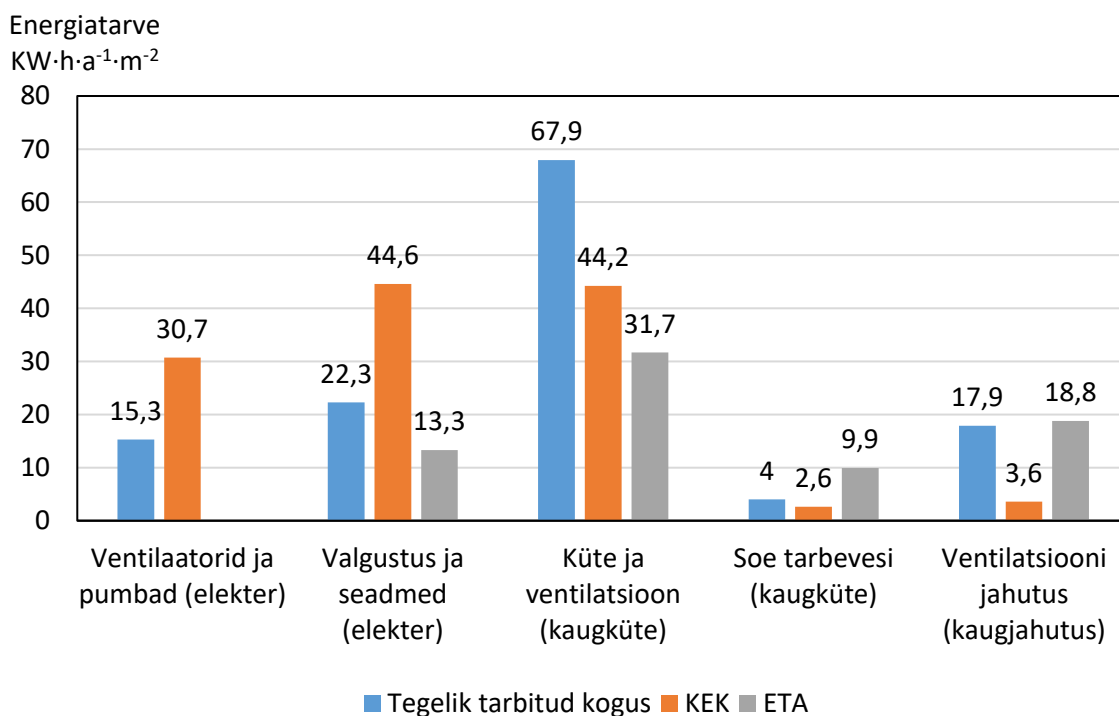
3.2.2 Arvutusliku (ETA) ja mõõdetud (KEK) energiatarbe võrdlus

KEK-i arvutamistulemusest (kus kasutati kaalumistegureid) selgus, et tegelik energiatarve oli hoones ligi kaks korda kõrgem, kui kehtiva ETA põhjal eeldati. Tulemuste võrdlus on esitatud joonisel 3.1. Hoone täituvus ja ruumide kasutus oli tavapärasest õppeperioodist madalam, mistõttu võib eeldada veelgi suuremat erinevust, kui õppetöö oleks toimunud hoones tavapärase elukorra järgi. Antud uurimisperiood jäi koroonakriisi aega, seega klasside täituvus ja seadmete kasutus oli madalam. Lisaks alahinnati esialgse projektiga hoone jahutusvõimsust, mis hilisemal keskuse kasutusajal ilmnis ja projektis ei kajastunud.



Joonis 3.1 Vaatlusperioodi andmete ja kaalumisteguritega arvatud KEK-i ja ETA võrdlus

Joonisel 3.2 võrreldi Delta energiatarbe tegelike tulemusi kehtivas ETA energiakasutuse andmete tulemustega. Jahutusenergiasse arvestati serveriruumide jahutuseks kulunud energia. Serveriruumi arvestamata oleks olnud aastane jahutuskooormus 327370 kW·h.

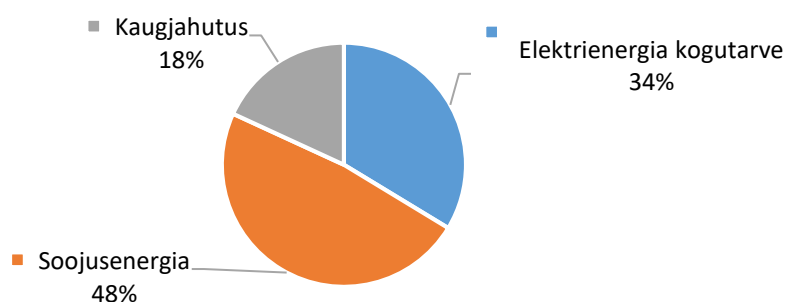


Joonis 3.2 Määrusejärgne energiaarvutus ja tegelik tarbimine

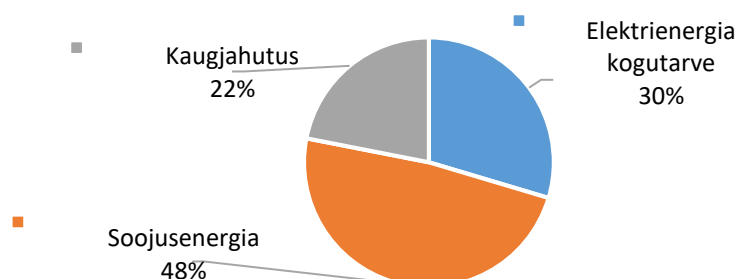
Joonise 3.2 põhjal sai järeldada, et ETA alahindas summaarset energiatarvet. Valgustuse ja seadmete elektritarve oli 10 kW·h·a⁻¹·m⁻² kõrgem eeldatust, kaalumistegureid arvestades isegi 30 kW·h·a⁻¹·m⁻² suurem. Ilmselt oli hoonesse

paigaldatud seadmete elektritarve antud hoones palju suurem, kui määrusejärgsed arvutustes kasutatavad väärtused seda hindavad. Kaugküttele ja ventilatsioonile kulunud soojusenergiat oli $36 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ võrra rohkem, kaalumistegureid arvestades oli vahe väiksem, suurusega $13 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Kaugjahutuse tegelik energiatarve ei erinenud palju ETA-s kajastatust, olles $1 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ kõrgem. Kaalumistegureid arvestades kulus jahutusenergiat $15 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ vähem. Kuna hoone oli hõredalt rahvastatud ja seadmed töötasid väga vähesel määral, oli ruumis eeldatust vähem vabasoojust, mis tingis küttevajaduse kasvu ja minimaliseeris jahutusvajaduse. $5 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ kõrgemaks hinnati kulu sooja tarbevee valmistamisele, kaalumistegureid arvesse võttes oli vahe $7,2 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Viimase tulemust mõjutas kõige enam Koroon kriisi aegne häiritud õppetöö, mistõttu sooja vee tarbijaid oli eeldatust vähem.

All olevad joonised 3.3 ja 3.4 võimaldavad võrrelda KEK ja ETA energiatarbe jaotumist elektri-, soojus- ja jahutusenergia vahel. Järeldus, et protsentuaalselt oli soojusenergia erikasutus eeldusliku osakaaluga tasakaalus. Erinevused tulid jahutuse ja elektrienergia vaatlemisel. ETA alahindas elektrienergia- ja ülehindas jahutuse osakaalu. Vaatamata osakaalude hinnangu küllaltki sarnasest tulemusest olid reaalsed tulemused summaarses energiatarbes märkimisväärsed.



Joonis 3.3 KEK arvutustel baseeruv energiatarbe jaotus



Joonis 3.4 ETA-le baseeruv energiatarbe jaotus

Selleks, et leida põhjused, miks ala- või ülehindas ETA hoone energiakasutust, toodi välja erisused arvutuses esitatud lähteandmetes, mõõtmistulemustes ja arvutusmetoodikas.

- 1) Hoonesse paigaldatud ventilatsiooniseadmete keskmine SFP väärtus tegelikkuses varieerus. VAV klappidega (rootor) seadmete puhul $SFP = 1,9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ja CAV klappide puhul $SFP = 1,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$; CO₂ anduritega seadmete korral $1,4 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ja vahesoojuskandjaga (SV7 ja SV8) $1,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$. ETA lähteandmetes oli kõigil $1,7 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$. Põhiprojektis arvestati SV5 seadmega eQ-050 FläktWoodsi seadmega, mille SFP väärtuseks oli 1,65; SV7 oli esialgselt planeeritud eQ-123 FläktWoodsi seadmena, kus süsteemi SFP väärtus oli 2,1. Mõlema SFP muutus seadme valikul väiksemaks. Kui SFP on väiksem, siis ventilaatorid tarbivad vähem elektrit sama õhuvooluhulga korral. ETA arvutuses kasutatud kõrgem SFP muudab ventilaatorite elektritarbe hoone ventileerimisel suuremaks. ETA arvutustes lähteandmetes esitatud ventilatsiooniseadmete minimaalse heitõhu temperatuur oli määruse järgsete andmete kasutamisel oluliselt kõrgem tegelike seadmete parameetritest ja seadmeid läbivad õhuvooluhulgad madalamad. Arvestades, et hoonet uuriti koroonakriisi aastal, oli õppehoone üleventileeritud. Ventilatsioonisüsteemi pidev töö nõudis energiat ja tõstis eeldatavat energiatarvet, mis tõstis vaatlusaasta energiakulu ventileerimisele.
- 8) Tulemuste võrdlemisel oli oluline lähtuda samast metoodikast, andmaks hinnangu võrdsetel arvutuselustel. ETA ja KEK-i arvutamisel kasutati erinevaid kaalumistegureid: alates 2018 on Fortum Tartu tõhusa kaugkütte pakkuja ja selle tarbijate puhul kasutatakse kaalumistegurit 0,65. Selle kaalumisteguri põhjal oli antud hoone kaugkütteks kulunud energiatarve $55,9 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. ETA-s kasutati kaalumistegurit 0,9 ja saadi kütte kaalutud energiakasutuse väärtuseks $37 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. KEK-i vana määruse põhjal kaalumisteguriga 0,9 arvutades oli elektrienergia tarve vaatlusaasta andmetega $77,4 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.
- 9) 2021.aasta andmete põhjal kannab Fortum Tartu tõhusa kaugjahutuse märgist, mis võimaldas KEK-i arvutuses kasutada kaalumistegurit 0,2. ETA- arvutustes kasutati väärtust 0,4. See andis jahutuse kaalutud energiakasutuseks $7,6 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Kasutades reaalseid aastaseid tarbimisandmeid, saadi tõhusa kaugjahutuse kaalumisteguriga tulemuseks $3,6 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Reaalse tarbimistulemuse ja vana määruse järgse kaalumisteguriga 0,4 oleks tulemus $7,15 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, mis on ETA-ga samaväärne tulemus.
- 10) Päikesepaneelid on Delta õppehoone lokaalne taastuv- ja eksporditav energiaallikas. Vaatlusaastal kogutud andmete põhjal oli paneelide kogutoodang

187 867,63 kW·h·a⁻¹ ehk 10,26 kW·h·a⁻¹·m⁻². Saadud energiakogus oli 14 782,37 kW·h·a⁻¹·m⁻² väiksem ETA-s arvatud toodangu kogusest, milleks hinnati 202 650 kW·h·a⁻¹ ehk 11,06 kW·h·a⁻¹·m⁻². Siiski oli ETA-s tehtud arvutus pädev, sest toodetud energia kasutati analoogselt kontorihoonega omatarbeks.

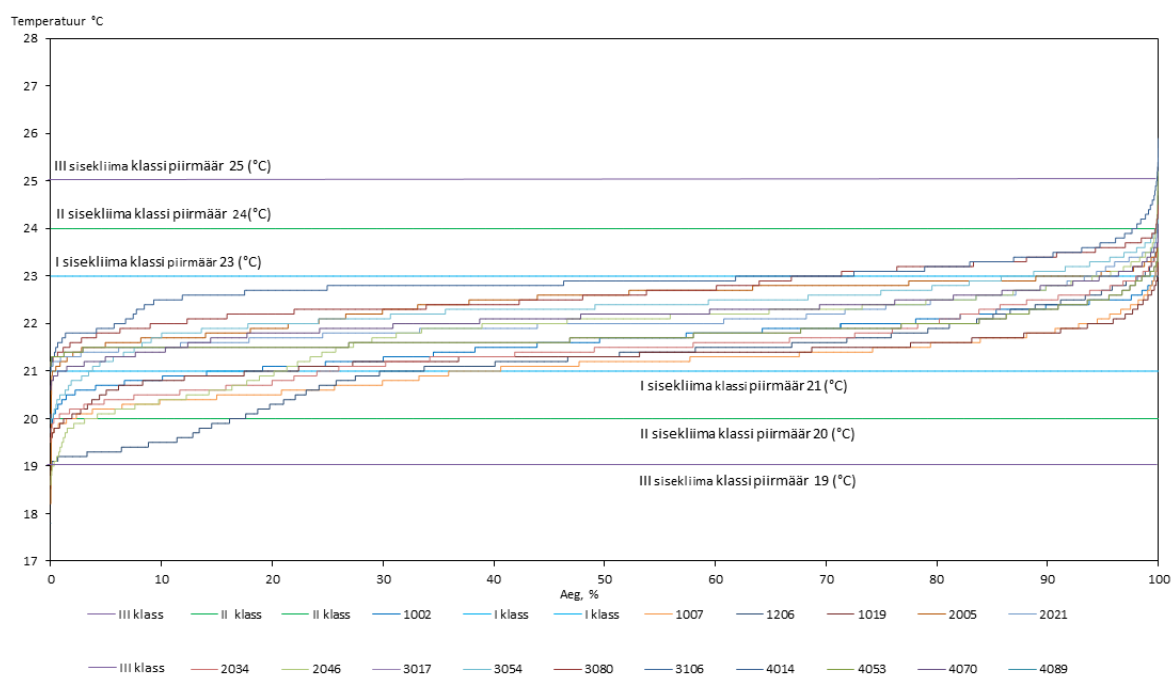
- 11) Suurim vahe energiaarvutuste tulemustes oli kaugkütte ja ventilatsiooni võrdluses. Hoone projekteerimisel arvestatud seadmete võimsus erines suuresti tegelikest. Osade töökohtade arvutite võimsust alahinnati hinnanguliselt 5-korda, mis tõstis suvel 2020 sisetemperatuure paljudes ruumides oodatust kõrgemaks. Selle kompenseerimiskes suurendati jahutuseks suunatavaid õhuvooluhulkasid. Kehtivas ETA-s seadmete kasutusvõimsust ja sellest tulenevat suuremat jahutuskoormust ei arvestatud ja kehtiv ETA alahindas tegelikku olukorda. Praegu kasutatavad seadmed andsid suurema vabasoojuse, mis oli määratud Hoone energiatõhususe arvutusmetoodikas [18].
- 12) Lisaks eelnevalt mainitud üleventileerimisele, kulus hoone kütmiseks arvatust rohkem kütte energiat. Määrustes järgi arvestati 21 °C seadesuurust kütmiseks, aga tegelikkuses hoiti hoones kõrgemat temperatuuri (keskmiselt 22 °C), mis tõstis küttekulusid ja seepärast oleks mõistlikum kasutada antud väärtust ETA arvutuses, et saada võrreldavamad tulemused.
- 13) Lisaks suuremale eritatavale vabasoojusele, tarbisid võimsamad seadmed rohkem elektrienergiat. Seadmete võimsus antud hoones oli standardkasutuses arvestatust suurem (töökoha eeldatav arvuti võimsus 70 kW oli tegelikkuses mitmeid kordi kõrgem, vt ptk 2.8 tabel 2.1). Seadmete hulka kuulusid kõik elektroonika- ja kontoriseadmed. Delta hoones oli keskmisest kõrgem hulk suuri ekraane, kaameraid, helitehnikat ja teisi multimeedia seadmeid. Nende energiatarve oli kõrgem ja sellest tulenevad ka suuremad kulud seadmete töös hoidmisel. Kõikides energiatarbimise valdkondades avaldas tulemustele märkimisväärset mõju Koroonaviiruse levik ja sellest tingitud auditoorse õppe vähesus. Hoone täisvõimsusel töötades eritavad seadmed piisavalt palju vabasoojust, mis tõstab jahutusvajadust, vähendades samaaegselt küttevajadust. Vaadeldud erilisel aastal ei täheldatud eelmainitud jahutusvajaduse kasvu ja tarbevee kasutamise hulk oli oluliselt madalam, mis andis kinnitust madalale kasutusastmele.

3.3 Sisekliima parameetrite mõõtmistulemused

3.3.1 Ruumiõhu temperatuur

Ruumide sisetemperatuuri mõõtmistulemused saadi viieminutiliste intervallide kohta. Valdavalt oli hoones hoitav sisetemperatuuri arvutuslik väärtus +21 °C. Vaatlusaluste ruumide sisetemperatuuride aastaste keskmiste tulemuste põhjal selgus, et sisetemperatuuri muudeti vastavalt kasutaja soovidele või kaldus kõrvale siseruumis hoitavast temperatuurist vabasoojuse ja päikesekiirguse tõttu. Kõrvalekalded olid aasta keskmisena väga väikesed (± 2 °C), mis tõestas, et ruumides olevad andurid ja seadmed töötasid ootuspäraselt, võimaldades kasutajatel ruumi temperatuuri muuta kuni 3 °C.

Keskmise temperatuuri andmete põhjal sai väita, et Delta õppehoone liigitus enamasti keskmiste temperatuuride näitudega I sisekliima klassi (vt joonis 3.1), rahuldades ootuseid haridushoonele [43].



Joonis 3.1 Uuritud ruumide õhutemperatuuride aastased kestvusgraafikud 5- minutiliste mõõtmise intervallidega

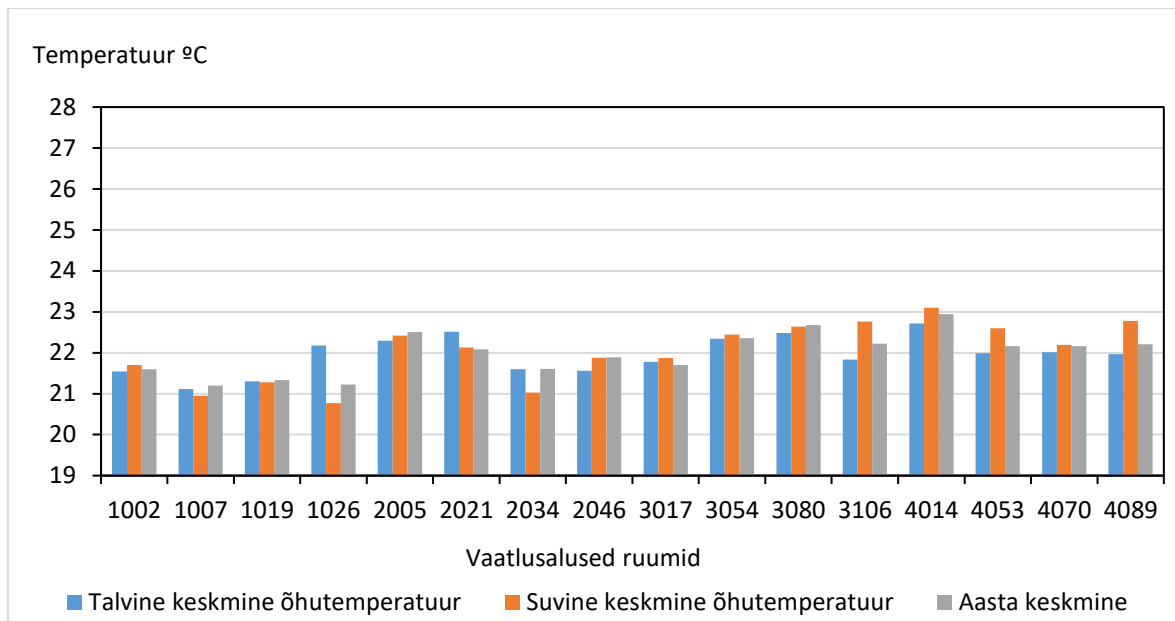
Aasta pikkuse andmestiku põhjal selgus, et uuritud ruumide keskmine sisetemperatuur aasta jooksul oli enamasti 21 °C ja 23 °C vahemikus. Ööpäevase profiili põhjal selgub, et 80% ajast vastavad ruumid klassile I, 18% ajast klassile II ja 2% klassile III.

Jooniselt 3.1 selgub, et seminariruumis 1206 esines kõige pikemal perioodil madalamaid temperatuure, langedes II sisekliima klassi piirmäärast madalamale. Väga vähesel määral olid ruumid 1002 koridor, 2046, 2034, 1019 ja 1007 II sisekliima klassi piirmäärast jahedamad. Püsivalt kõigeim kõrgem sisetemperatuur oli kabinettides 4014, 3080, 3054 ning arvutiklassis 2005. Enamik ruume olid siiski suurem osa ajast sisekliima klass I temperatuurivahemikus, mis kinnitab, et antud ruumides ei ole puudulikku õhuvahetust, jahutust ega liigkütmist. Kuna kõikides ruumides oli võimalik kasutajatel reguleerida sisetemperatuuri 3 °C võrra üles või alla, siis võib järeldada, et kasutajad tundsid end kõige mugavamalt sisekliima klasside standardiga parimaks töötemperatuuriks määratud vahemikes.

Andmeid analüüsid näis temperatuur üldiselt stabiilne, aga tuginedes COVID olukorrale, ruumidesse oleks võinud paigaldada kohalolekuandurid, et vältida otstarbetut ventileerimist ja jahutamist ajal, mil õppetööd klassides ei toimunud. Ruumide siseõhutemperatuuride sisalduse muutusi vaadates oli näha, et valitud ruumid ei olnud iga päev kõikidel tööaegadel kasutuses ka COVID piirangute puudumisel. Sellisel juhul ei olnud vajalik tagada sisekliima parameetreid ja kütte ning jahutuse arvelt oleks saanud kokku hoida. Ruumide siseõhu temperatuurid on määruse [18] järgselt +21 talvisel kütteperioodil ja suvisel jahutusperioodil +25 °C. Reaalses kasutuses antud väärtused ei kajastunud ja seepärast oli oluline aastase keskmise temperatuuri vaatlemisel eristada suvine- ja talvine periood.

Analüüsid talviseid sisetemperatuure, oli kütte energiatarvet ETA-s ala hinnatud. Lisaks kütteenegiale oli hoones kasutatav jahutusenergia arvutuslikult üle dimensioneeritud. Vaadeldavates ruumides ei tõusnud õhutemperatuur suvises vaatlusperioodis kuni 25 °C pikemal ajaperioodil tõusnud ja keskmised temperatuurid olid +1,9 °C kuni +3,7 °C madalamad.

All olev joonis 3.2 toob välja vaatlusaluste ruumide kütte- ja jahutusperioodide keskmised siseõhu temperatuurid. Selgus, et madalamatel korrustel kippusid olema temperatuurid jahedamad kui kõrgematel korrustel. Kõrgemate suviste siseõhu temperatuuridega ruumid asuvad lääne-, põhja- ja loode ilmakaartes, seega ei saanud antud tulemust otseselt päikesekiirgusega põhjendada, küll aga varjestasid puud lõuna- ja edela ilmakaartes asuvaid ruume ning kõrval asetsev Ettevõtluskeskus ida- ja kagusuunast. Enamikes ruumides oli suvise ja talvise temperatuuri erinevus väike, aga suurim (1,4 °C) erinevus esines esimese korruse seminariruumis nr 1026 (Lisa 4, vaatlusruum nr 4).



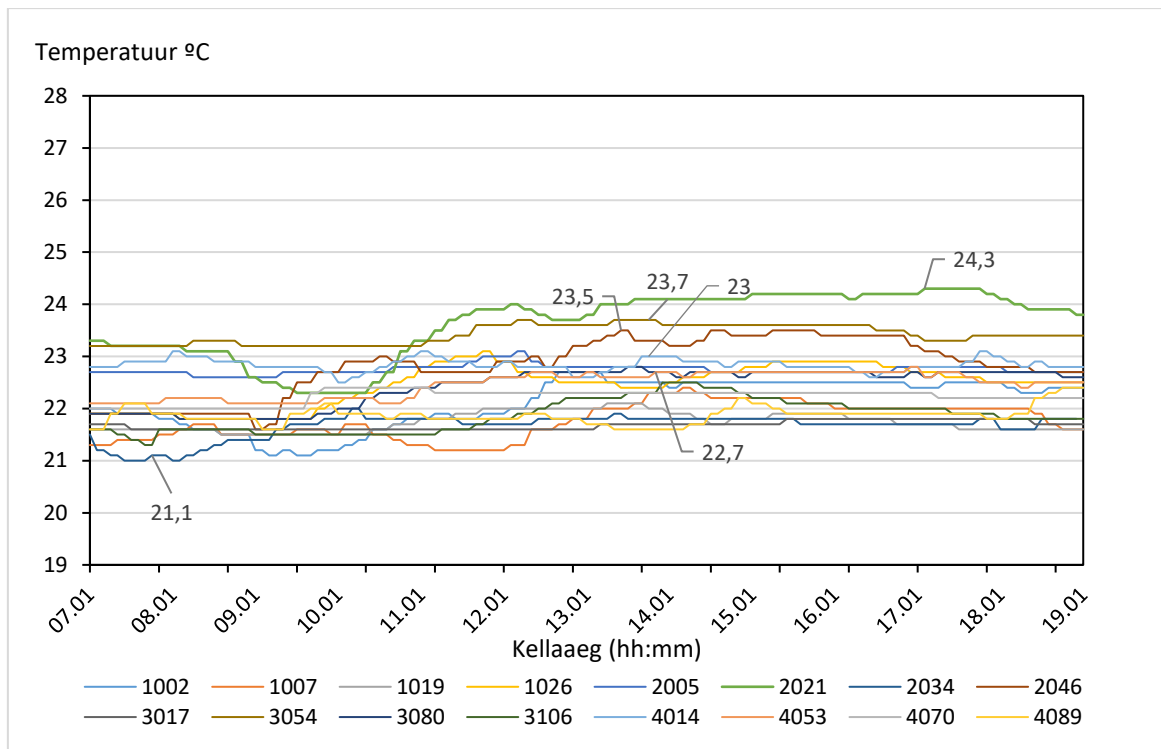
Joonis 3.2 Ruumide keskmised siseõhu temperatuurid suve- ja talveperioodil

Hoone kütte- ja jahutusperioodi temperatuurivahemikud ruumides oli keskmiselt 22 °C, kuuludes sisekliima I klassi.

Kõrgemat temperatuuri hoiti kabinetites, kus oli tõenäoline kasutajate meelevaldne õhu temperatuuri muutmine. Suurtes auditooriumites ja koridoris oli õhutemperatuur stabiilsem ja seadeväärtusele ligilähedasem.

Arvutustes võiks kasutada kõrgemat sisetemperatuuri seadeväärtust praeguse 21°C asemel, sest realsel kasutusel hoiti hoones talvist temperatuuri kõrgemana. Antud muudatus tagaks ligilähedasema KEK-i väärtuse ETA- arvutustele.

All oleval joonisel 3.3 on ruumide siseõhu temperatuuri muutumist kirjeldav graafik. Vaatlusaluseks päevaks võeti 16.10.2020, ajavahemik 7:01-19:01. Sellel põhjusel, et hoone ei kannu endas vaid õppetöö eesmärki, võeti esialgseks hindamiseks pikem ajavahemik, kui õppehoone tööaeg määruses eeldab.



Joonis 3.3 Vaadeldavate ruumide tööaja 5-minuti mõõtmisintervalliga siseõhu temperatuuri graafik 16.10.2020

Töötaja keskmine õhutemperatuur kõikides ruumides oli 22,4 °C. Vaadeldavate ruumide sisetemperatuur varieerus 22,6 °C ja 23,4 °C vahemikus, andes sisekliima klass II eeldatud siseõhu temperatuuri vahemiku.

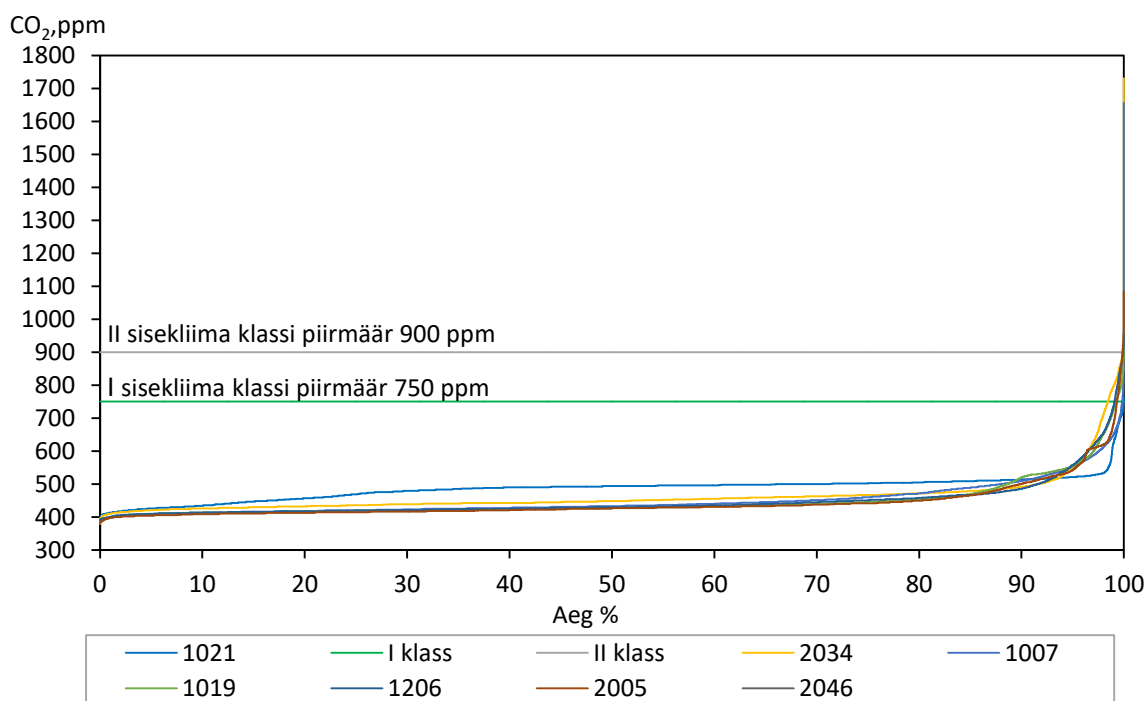
3.3.2 Ruumiõhu CO₂ sisaldus

Õhusaaste peamine indikaator on CO₂ tase, mis tõuseb ruumis viibivate inimeste tõttu. Uuritavates ruumides olid andurid, mis registreerisid CO₂ taseme õhus. Vaatlusaluste ruumide süsihappegaasi sisaldust aastase perioodi vältel kujutatakse joonisel 3.1. Kokku mõõdeti seitsme ruumi CO₂ taset. Andmed koguti samal meetodil nagu ruumitemperatuure, lähtudes Desigio CC programmi kasutajavaate võimalustest andmete väljavõtteks. Lisa 11 esitatud tabel kirjeldab vaadeldud ruumide aasta keskmist süsihappegaasi taset, vt Lisa 11.1.

Valitud ruumide aasta keskmine CO₂ tase jäi alla 500 (ppm) ja rahuldab projektdokumentatsioonis kajastatud nõuet, muuhulgas haridushoone keskmise, alla 1000 (ppm) taseme nõuet [43]. Süsihappegaasi andmed komplekteeriti ööpäevastest keskmistest, sh väljaspool tööaega (tööaeg 8:00-16:00 haridushoonetel; 07:00-18:00

kontorihoonetel), kui süsihappegaasi taset kasutajad ei muuda, võib antud tabel alahinnata tööaegadele kehtestatud piirarve.

All olev joonis (vt joonis 3.1) kirjeldab uuritud ruumide aastase süsihappegaasi sisalduse jaotust. 98% ajast oli kõikides ruumides süsihappegaasi sisaldus alla 750 ppm, jäädes I sisekliima klassi piiridesse. Võrreldavatest ruumidest kõrgeim süsihappegaasi sisaldus oli auditooriumis 1007, kus keskmine CO₂ kontsentratsioon oli 450 ppm. Teiste ruumide profiilid olid küllaltki sarnased.



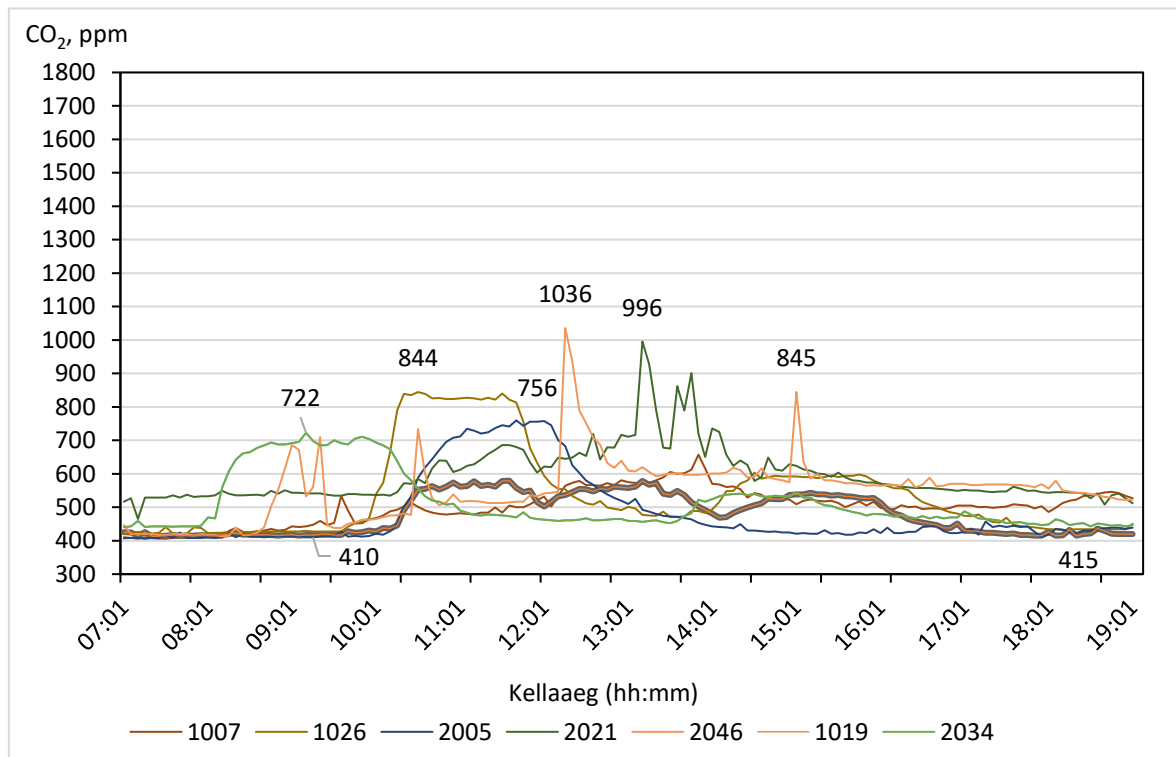
Joonis 3.1 Uuritud ruumide süsihappegaasi kontsentratsiooni aastased kestvusgraafikud

Kõige kõrgemaks tõusis süsihappegaasi sisaldus auditooriumis 1007 ja arvutiklassis 2005, kus tase oli II klassi piirmäära ja sellest ülegi kerkinud. Kogu vaatlusperioodi jooksul esines kõrge süsihappegaasi sisalduse ajavahemik väga harva ning ei mõjutanud keskmist. Sedavõrd stabiilne süsihappegaasi sisalduse tulemus oli oodatav, sest ventilatsioonisüsteem reageeris CO₂ sisalduse korral suurenevate õhuvooluhulkadega.

Uuritud ruumide puhul sai järeldada hästi toimivat ventilatsioonisüsteemi, kus õhuvoolululgad ruumis suurenesid süsihappegaasi taseme tõusmisel. Kõige madalamad tasemed püsisid suure ruumalaga auditooriumites. Kõige kõrgemaks tõusis CO₂ tase väiksema pindalaga ruumides. Tulemused kinnitasid fakti, et ruumide õhuvahetus CO₂ taseme järgimisel oli piisav ja õhuvooluhulkade suurenemisel/vähendamisel põhinev

ventilatsioonisüsteem toimib. Arvestades fakti, et mõõtmistulemused viidi läbi ajal, kus kasutajate arv oli väike, ventileeriti ruume vajadusest suuremal määral.

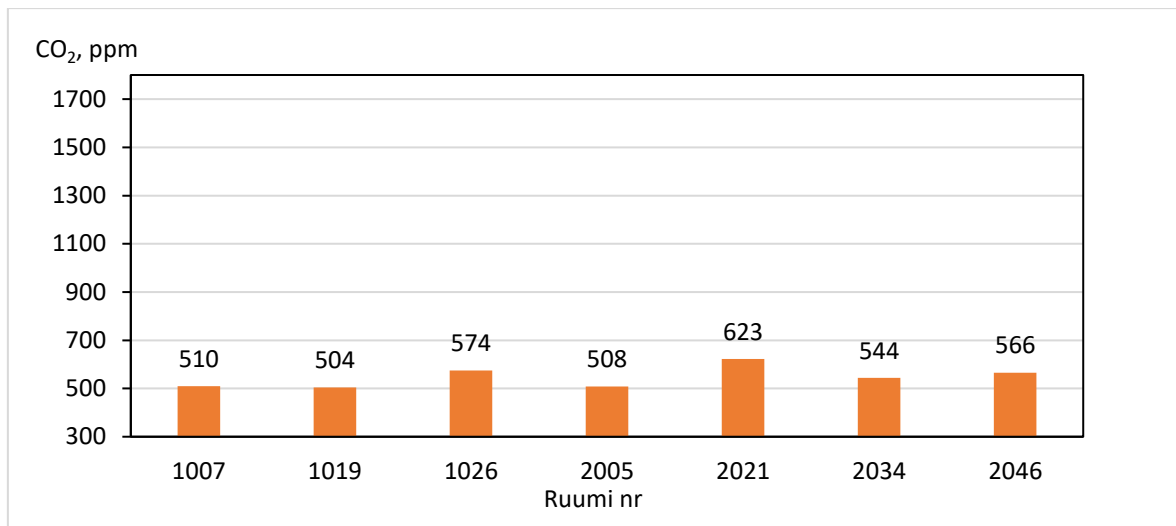
Kõikides ruumides, kus CO₂ tase tõusis, toimus ka taseme kiire stabiliseerimine. All oleval joonisel 5.2 esitati kõikide uuritud ruumide CO₂ taseme muutumine vaatluspäeval, 16.10.2020, ajavahemikus 07:01- 19:01.



Joonis 3.2 Vaatlusruumide 5-minuti mõõtmisintervalliga CO₂ sisaldus töö ajal 16.10.2020

Ruumides 2046, 2021 ja 1026 saavutati võrdlusalustest ruumidest kõige kõrgem süsihappegaasi sisaldus. Joonisel 3.2 selgub, et tõusnud CO₂ tase stabiliseerus kiirelt. Ruumides, kus süsihappegaasi tase tõusis 800-1036 ppm tasemini, teenindas VAV-klappidega ventilatsioonisüsteem (sh. teistes vaatlusruumides), mis reageeris CO₂ tõusule õhuvooluhulkade suurendamisega. Antud juhtudel põhjendas hüppelist süsihappegaasi tõusu ülerahvastatus, mistõttu lühiajaline õhusaaste taseme ületus oli loomulik ja kiire stabiliseerumine kinnitas ventilatsioonisüsteemi efektiivset tööd.

Kõik süsihappegaasi anduriga varustatud ruumid olid haridushoone õppeklasside otstarbega, seepärast uuriti tööaja keskmise süsihappegaasi taseme leidmisel ajavahemikku 8:00-16:00. Selgus, et kasutusaja keskmine CO₂ tase jäi 504-623 ppm vahelisse suurusjärku. Joonis 3.3 kirjendab valitud ruumide ühe tööpäeva keskmist süsihappegaasi sisaldust õhus.



Joonis 3.3 Vaatlusaluste ruumide tunnikeskmine CO₂ sisaldus töö ajal 08:00-16:00

Kõikides ruumides jäi kasutusaegne keskmine süsihappegaasi sisaldus alla 1000 ppm, täites Tervisekaitse nõudeid koolidele [43]. Antud ruumide keskmine CO₂ sisaldus rahuldab sisekliima I klassi nõuete piirmäära [11].

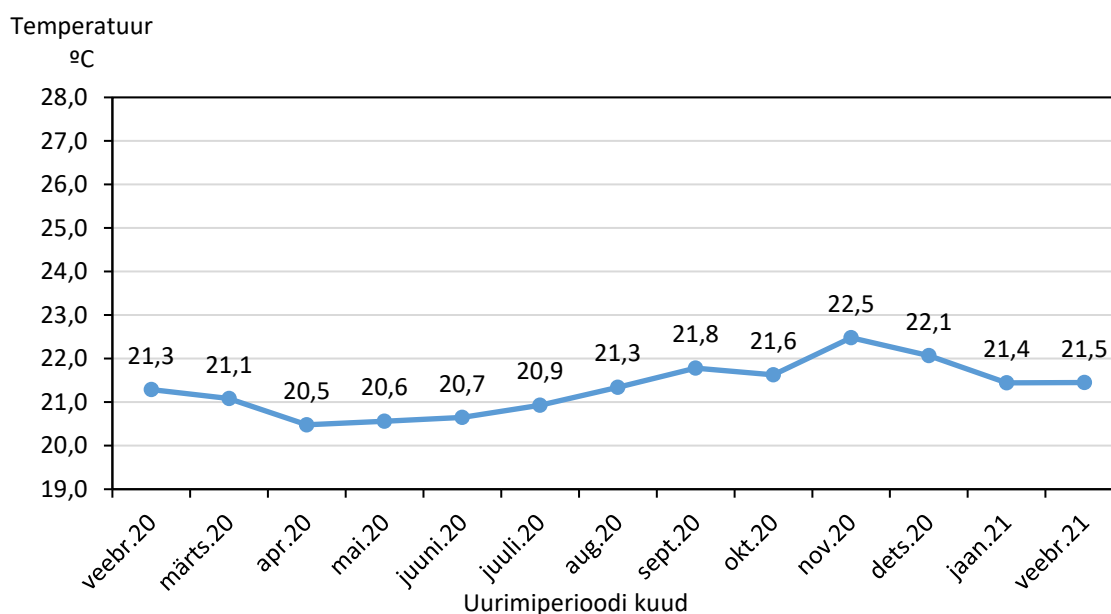
Võttes arvesse COVID-19 leviku tõkestamist siseruumides, oli antud hoone piisavalt hästi ventileeritud, et tõkestada viiruseosakeste levikut. Itaalias kahes põhikoolis läbi viidud uuringule [47] toetudes võis väita, et hoones oleks vähemalt 50 % filtreerimistõhususega maske kandes lõplik reproduktsiooninumber alla ühe, minimaliseerides nakkusohu õppehoones.

Delta teadus- ja õppehoones saab edukalt õppetööd korraldada hajutamise ja maski kandmise abil, sest uurimuse [48] monitoorimismudeli tulemustest selgus asjaolu, et ruumide süsihappegaasi kontsentratsiooni piiramise, piisnakkusena levivate haiguste tõkestamiseks kasutatavate maskide ning haljutamise koosmõjul, väheneb haigustekitajate leviku risk märkimisväärselt. Hoones on piisavalt palju õpperuume ja tagatud hea ventilatsioon, mis võimaldaks praktiseerida õppetööd hajutatult ja maskidega varustatult.

3.3.3 Ruumikliima analüüs seminariruumi ja arvutiklassi näitel

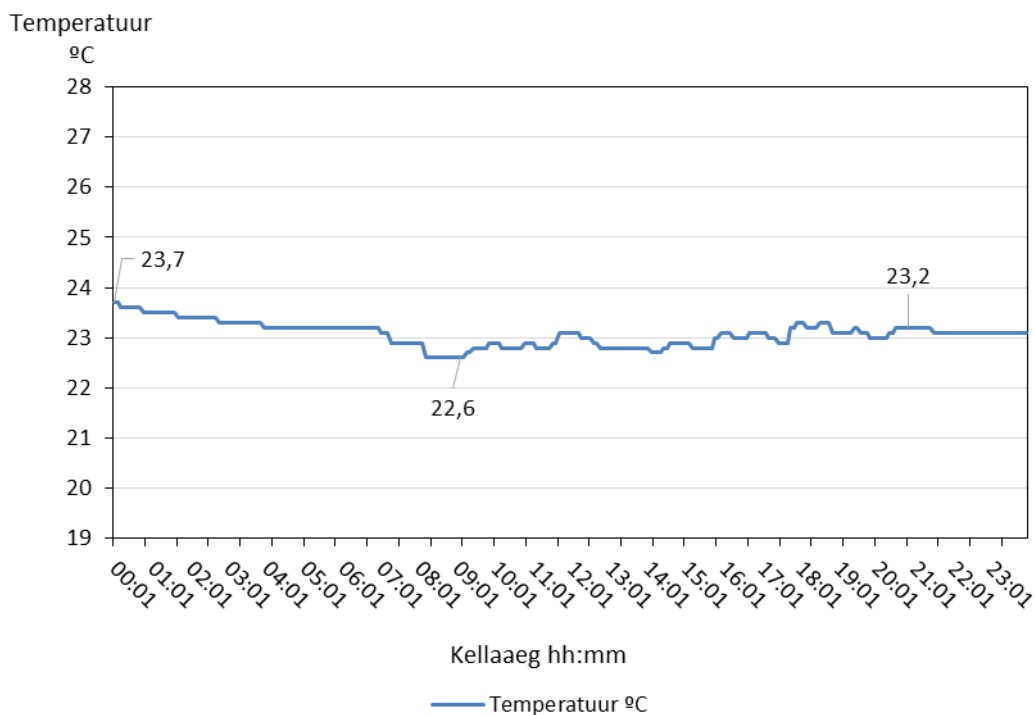
Esimese ruumipõhise analüüsi koostamiseks valis autor seminariruumi 2034. Ruumi sisekliimat mõjutab päikesekiirgus, kasutajate arv, valgustus ja seadmed, mis tingivad vabasoojuse leviku ning inimeste poolt muudetud sisetemperatuuri seadeväärtuse. Kuna hoone oli suunaga sisehoovi (kagu ilmakaar), mida varjestas Ettevõtluskeskus, siis ei avaldanud Päike väga suurt mõju ruumi sisekliimale. Sisetemperatuur oli ruumis

projektijärgselt seadistatud väärtusele 21,0 °C. Joonisel 3.1 esitati seminariruumi kuude keskmised siseõhutemperatuurid.



Joonis 3.1 Seminariruumi kuu keskmised õhutemperatuurid

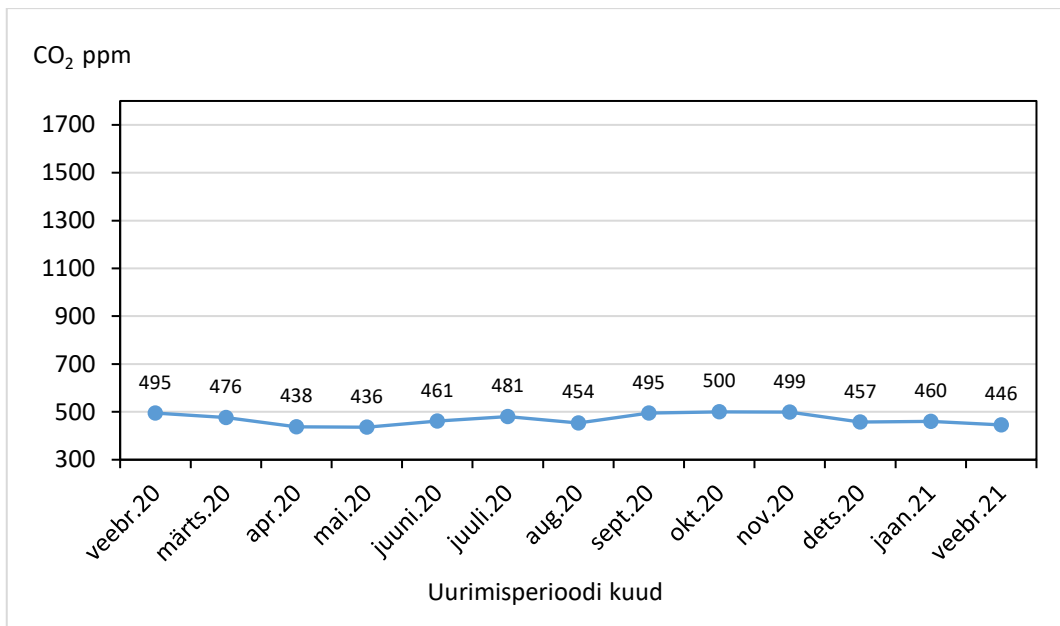
Hoone kütte-, ventilatsiooni- ja jahutussüsteem tagab projektijärgselt temperatuuri hoidmise ruumis 21 °C juures, aga joonisel 3.1 on näha püsivalt kõrgemat temperatuuri, kui ette nähti. See tulenes kasutajate poolsest sisendist ruumikontrollerist õhutemperatuuri muuta. Kõrgeim õhutemperatuur ruumis oli 11.novembril, 2020. aastal, kui see tõusis 23,7 °C-ni. Kõrgeim temperatuur jäi ööpäevase vaatlusaja öö tundidele ja seetõttu ei olnud see tingitud kasutajate arvust või päikesekiirguse toimest ruumiõhku soojendada (talvekuu). Hoone on suunaga kagusse ja varjestub kõrval oleva Ettevõtluskeskusega, mistõttu päikesekiirgus antud ruumi sisekliimas märkimisväärset mõju ei avaldanud. Ööpäevase temperatuurivahemiku põhjal liigitus ruum temperatuur põhjal sisekliima klassi II ning vastas õppehoonele seatud määruse nõuetele [43].



Joonis 3.2 Seminariruumi ööpäevane temperatuurigraafik

Selleks, et veenduda ruumitemperatuuri seadistuses, kontrolliti töövälise päeva ööpäevast ruumitemperatuuri. Valiti sama päev, kus vaadeldi laupäeva ööpäevast süsihappegaasi sisaldust seminariruumis. Lisas 11 (vt L11.3) on 2020. aasta 12. detsembri ööpäevane temperatuurigraafik. Graafikul on näha, et kasutusaja väliselt varieerus ruumi temperatuur 22,1-22,2 °C vahel. Ruumis hoitav õhutemperatuur oli 1,1 °C - 1,2 °C võrra kõrgem projekteeritud seadeväärtusest. Sarnaste ruumide rohkuse tõttu tõstis see küttekulusid eeldatust kõrgemaks. Ruumis hoitud temperatuurivahemik jäi sisekliima klass II väärtusesse ja kinnitas haridushoone sisekliima parameetritele vastavust [11], [43].

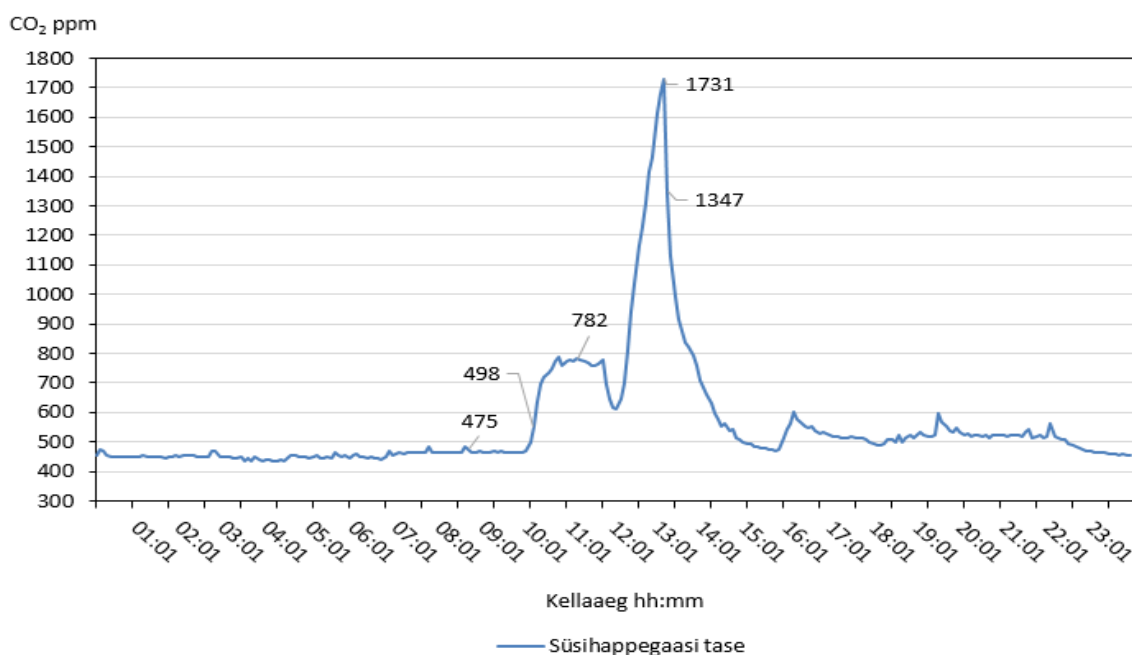
Seminariruumi CO₂ sisalduse lähemal vaatlusel selgus, et ruumi süsihappegaasi tase jäi vahemikku 436 ppm kuni 500 ppm. Joonisel 3.3 on ruumi keskmised süsihappegaasi kogused kuude lõikes. Joonisel 3.3 kajastub süsihappegaasi kuu keskmise taseme languse ja Koroonapiirangute perioodi kattuvus. Töö piirati 2020. aastal üleriigilise eriolukorra tõttu 12. märtsist kuni 18. maini. 14.-31. detsembril keelati taas õppetöö [49], mida iseloomustas keskmise CO₂ taseme langus ruumis.



Joonis 3.3 Seminariruumi kuu keskmised süsihappegaasi kogused ruumiõhus

Päevapõhises analüüsis oli lühiajalisi muutuseid, kus CO₂ tase küündis 1731 ppm (vt joonis 3.4). Ventileerimise vooluhulga muutmisega püüti kiirelt CO₂ hulka vähendada ja hea ruumikliima tagada. Analüüsimise perioodi kõrgeim CO₂ kogus õhus oli 2020. aasta 2. novembril, kui kell 13:11 mõõdetud CO₂ tase oli 1731 ppm. Selline kiire süsihappegaasi tõus kinnitas õppetöö toimumist ruumis ja kasutajate mõju sisekliima muutumisele. Veerand tundi hiljem langes tase taas alla 1000 ppm, rahuldades koolidele kehtestatud nõudeid [43]. Ruumi süsihappegaasi andurid andsid ventilatsiooniseadmele käsu muuta õhuvooluhulkasid, mis stabiliseeris ruumi üldise CO₂ taseme. Joonis 3.4 kinnitab ventilatsioonisüsteemi toimimist süsihappegaasi taseme vähendamiseks antud ruumis, kui kasutajate arv CO₂ tõstab.

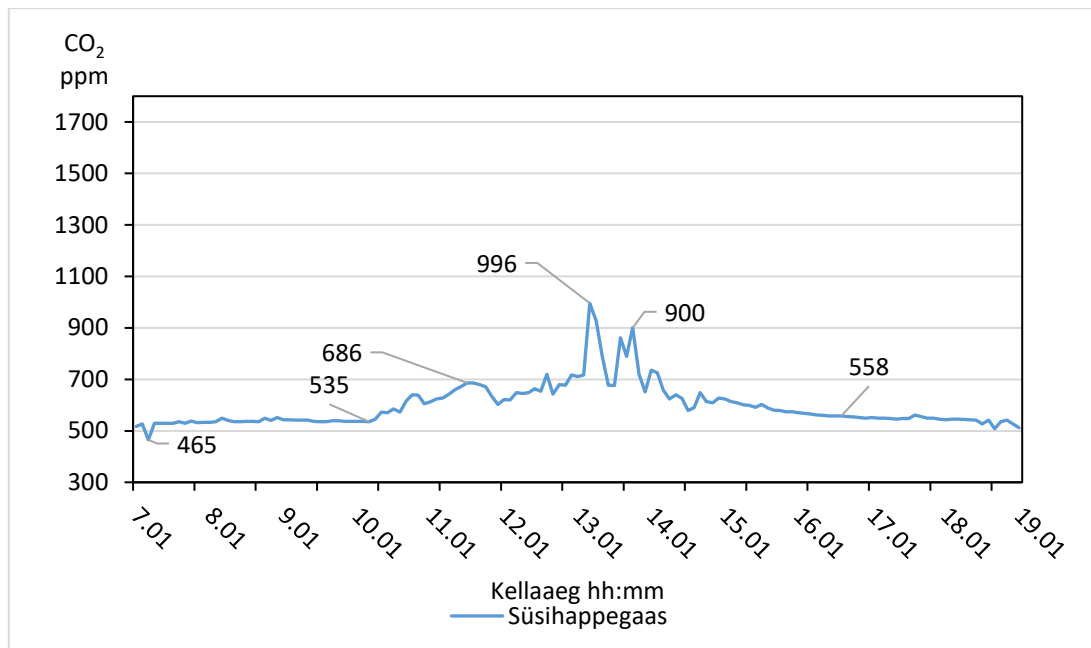
CO₂ sisalduse vähendamine on oluline ajavahemikus, mil ruumis toimub töö. Adekvaatse hinnangu andmiseks vaadeldi lähemalt tööaega. Võttes vaatluse alla ajavahemiku 8:01-17:01, oli keskmine süsihappegaasi sisaldus õhus 677 ppm. Antud tulemus klassifitseerus väga hea ruumikliima hinnanguastmesse ja tagas sisekliima klassi I, ületades haridushoonetele seatud klass II nõuet.



Joonis 3.4 Süsihappegaasi hulga ööpäevane muutus seminariruumis

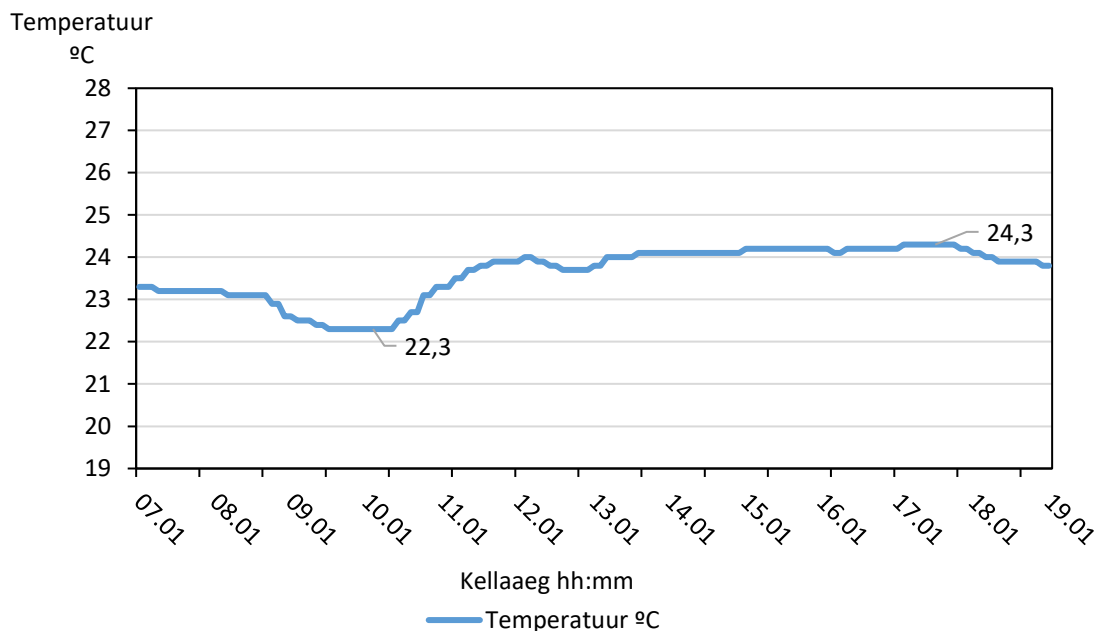
Võrdluseks kasutusaegse süsihappegaasi sisaldusele, on Lisa 11 esitatud joonisel (Lisa 11.1), kus selgus, et töövälisel ajal oli ööpäevane CO₂ hulk õhus vahemikus 425-476 ppm. Sel ajal ei mõjutanud kasutajad ruumikliimat ja ruumikliima seadmed töötasid vastavalt seadistatud parameetritele. Vaadeldav kuupäev 12. 12. 2020 kinnitas süsihappegaasi madalat hulka kasutajateta ruumi vaatlusajal ning CO₂ normaliseerunud taset tööaja välisel ajal.

Hoone eripäraks on arvutiklasside rohkus. Seepärast võeti teise lähema vaatlus alla arvutiklass ruumi numbriga 2021. Selle klassi kasutusaegse süsihappegaasi sisalduse muutusgraafiku, (vt joonis 3.5) tegemiseks võeti andmed 16. oktoobril. Vaadeldaval kuupäeval oli märgata hüppelist muutust õhu süsihappegaasi sisalduses, mille põhjal võib eeldada õppetöö toimumist antud kuupäeval. All olevalt graafikult on näha süsihappegaasi stabiilne muutus, kus ajavahemikus 8:01-16:01 oli keskmine CO₂ tase 622 ppm, mis taaskord rahuldab Tervisekaitseõdeid koolidele [43], jäädes alla 1000 ppm. Järsud süsihappegaasi taseme tõusud olid tingitud rahvahulga kiirest kasvust, millele süsteem momentaalselt ei reageerinud. Graafikute järsud langused kinnitavad, et ventilatsioonisüsteemide reageerimiskiirus oli siiski piisavalt kõrge, tagamaks süsihappegaasi koguse normaliseerumine poole tunni jooksul.



Joonis 3.5 Arvutiklassi süsihappegaasi sisaldus õhus tööajal

Arvutiklasside õhutemperatuuri hindamiseks võeti detailsema vaatluse alla arvutiklass, kus vaatluskuupäevaks valiti 09.10.2020 ja vastavad tulemused on esitatud joonisel 3.6.

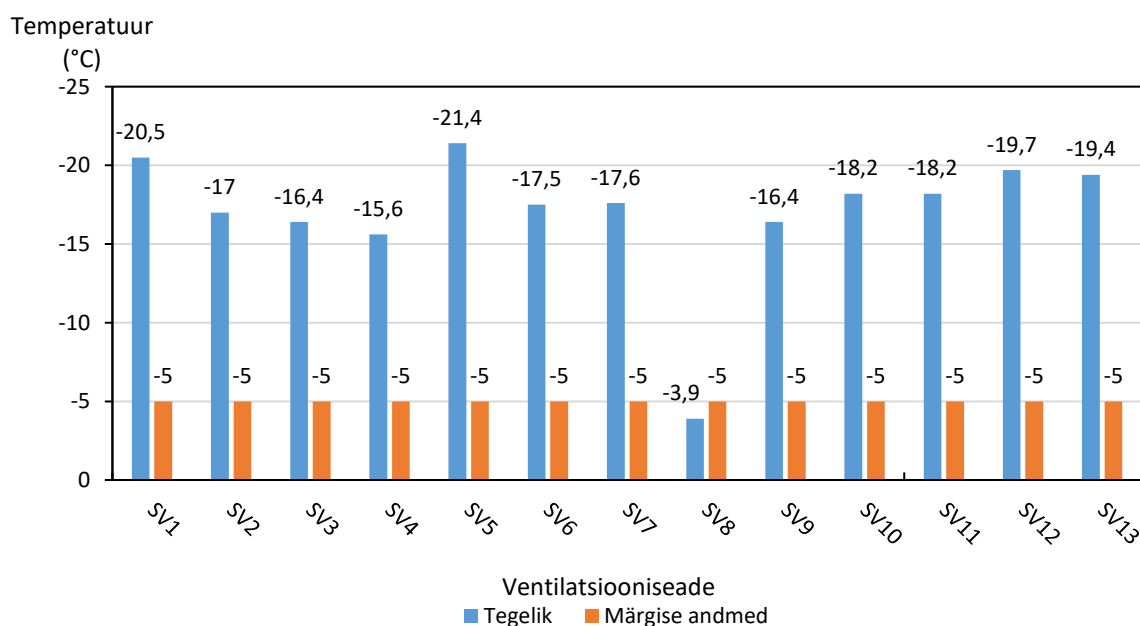


Joonis 3.6 Arvutiklassi õhutemperatuuri muutus tööpäeval, vaatluskuupäeval 09.10.2020

Uuritud aja kõrgeim õhutemperatuur oli 24,3 °C ja madalaim 22,3 °C. Töötaja keskmine õhutemperatuur oli 23,6 °C, mis liigitas II sisekliima klassi [11], rahuldades ühtlasi Tervisekaitseõudeid koolidele [43] ja jäädes EVS-EN 16798-1:2019 haridushoonetele kehtestatud piirääradesse.

3.4 Ventilatsioonisüsteemide põhiparameetrite võrdlus

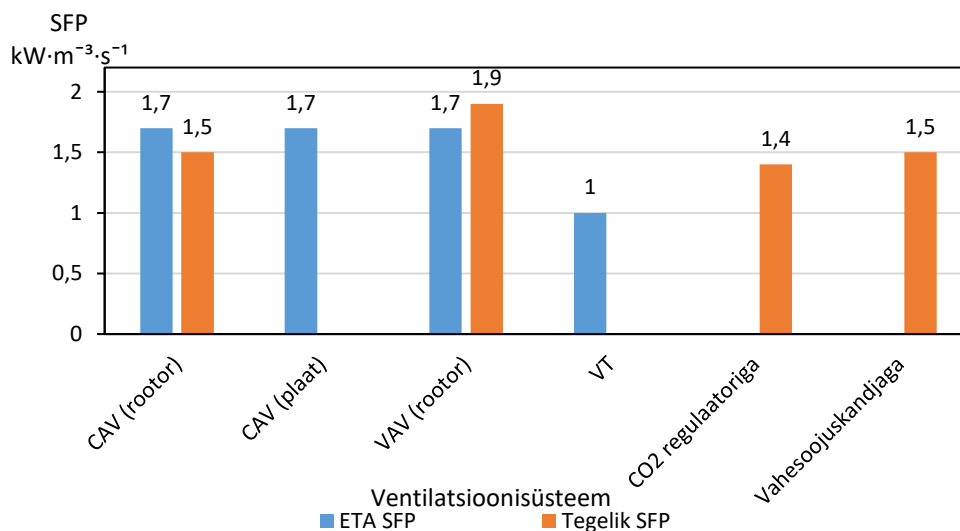
Graafikud (vt joonis 3.1- 3.3) toovad välja tegelike ventilatsiooniseadmete parameetrite erinevused ETA arvutuses kasutatud andmetest. Joonisel 3.1 on välja toodud ventilatsiooniseadmete minimaalsed väljavisketemperatuurid ETA arvutamisel ja tegelike välja ehitatud seadmete väärtuste põhjal. Juhul, kui ei olnud teada seadme täpne väärtus, kasutati määruse põhjal rootorsoojusvahetil väärtust $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ning plaatsoojusvahetil $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. See väärtus on väga oluline energiatõhususe seisukohalt, sest piirab soojustagasti temperatuuri suhtarvu, teisisõnu energiatagastusvõimekust. Juhul kui soojustagasti kasutegur on kõrge, aga külmumise vältimiseks piiratakse heitõhu temperatuuri, siis võib seade rohkem energiat tarbida, kui näiliselt väiksema soojustagasti kasuteguriga ja madalama lubatud heitõhutemperatuuriga seade. Antud juhul oli heitõhu temperatuur palju madalam, kui määruses arvestatud. Delta teadus- ja õppehoone ventilatsioonisüsteemide elektrienergia kulu oli ETA arvutuses $212697\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$. Reaalselt tarbiti $255238\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$, mis oli $42541\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ rohkem arvutuslikust. Arvestades seadmete väljaviske temperatuuride miinimumide suurt erinevust, ei olnud arvutuslik tulemus väga palju erinev.



Joonis 3.1 Ventilatsiooniseadmete väljaviske temperatuuri miinimumide võrdlus märgise andmetega

Vaadates lähemalt ventilatsiooni SFP väärtuseid (vt joonis 3.2), siis väga suuri erinevusi ei esinenud. Põhiline erinevus tuli sedametest, millest lähtuti ETA arvutuses ja millised ehitati tegelikult välja. Selgub, et tegelikkuses plaatsoojusvaheteid, millel oleks CAV klappid, ei kasutatud. Kasutati CAV ja VAV klappidega rootorsoojusvaheteid ning CAV/VAV klappide kombineerimist vahesoojusandjaga. Parklas ja hoone suurimas

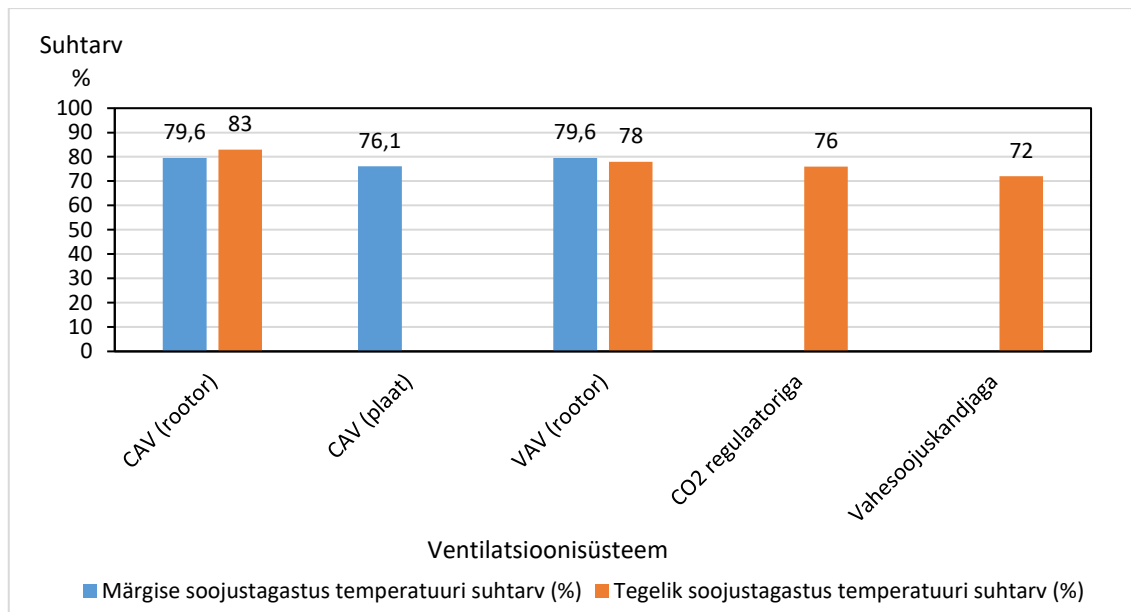
auditooriumis kasutatud seade reageerib CO₂ taseme muutumisele. All olev joonis 3.2 iseloomustab ETA-s kajastatud seadmeid ja nende SFP väärtust ning võrdleb tegelikke kasutatud seadmeid ja nende SFP tulemusi.



Joonis 3.2 Ventilatsioonisüsteemide SFP võrdlus liigiti

Hoone ventilatsioonisüsteemide soojustagastus temperatuuride protsentuaalne suhtarv (vt joonis 3.3) ei erinenud palju ETA arvutuste lähteandmetest (vt Lisa 2). Kuna kajastatud oli CAV ja VAV klappidega ning rotor ja plaatsoojusvaheteid, siis on joonisel 5.3 näha süsihappegaasi ja vahesoojusandjaga ventilatsiooniseadmete soojustagastus temperatuuride suhtarvud, lisaks võrdlusele CAV rotor-, VAV rootoriga süsteemidele. Kuna plaatsoojusvaheteid ei kasutatud, ei esitatud selle kohast võrdlust.

Ventilatsiooni jahutusenergia tegelik tarbimine oli kasutuse andmete põhjal 495900 kW·h·a⁻¹, ETA tulemustes oli aastane jahutusenergia suurus 344457 kW·h·a⁻¹. Tegelik ventilatsioonisüsteemi jahutusenergia tarve oli arvutuslikust 151443 kW·h·a⁻¹ suurem.



Joonis 3.3 Ventilatsioonisüsteemide soojustagastus temperatuuride suhtarv

Soojusenergia tarve ventilatsioonisüsteemile oli reaalsete tarbimisandmete põhjal $564030 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$. ETA märgises $74441 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$, ehk $489589 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ vähem tegelikust tarbest. Arvutusliku ja tegeliku soojusenergia tarve ventilatsioonisüsteemile oli suur ja vajaks ümberarvutamist ETA-s.

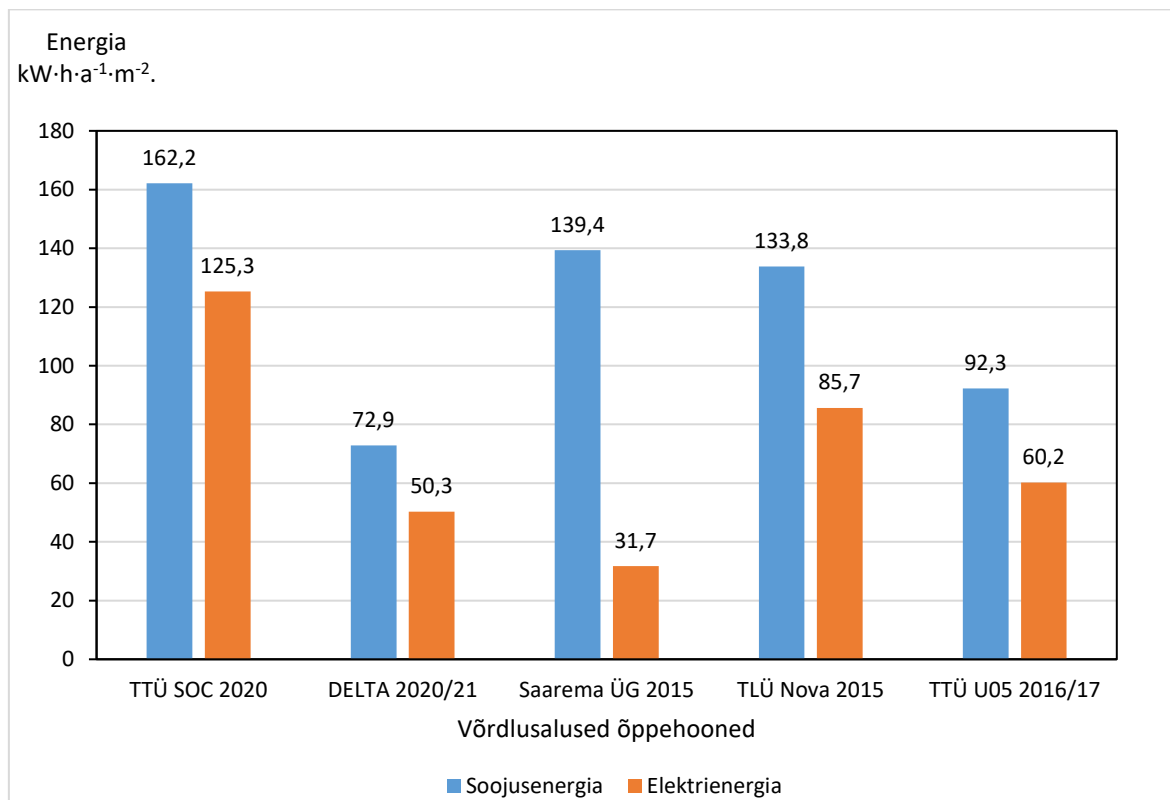
Jahutus-, elektri- ja soojusenergia realselt tarbitud koguste ja ETA-s arvatatud väärtuste võrdluste alustel on energiakulu ala hinnatud ning reaalse ventilatsioonisüsteemi energia tarbimine oli arvutuslikust kõrgem.

3.5 Õppehoonete energiatarbe võrdlus

Selleks, et võrrelda Delta Teadus- ja õppehoone energiatarvet teiste õppehoonetega, võeti TalTech-i tudengite varasematel aastatel (sh käesoleval aastal), teostatud magistritööd, kus analüüsiti õppehoonete energiatarvet. Iga töö oli omanäoline ja andmete esitamise viisid varieerusid. Kõiki antud hoones käsitletud sisekliima- ja energiatarbe näitajaid seepärast võrrelda ei saanud.

Võrdlusalused andmed võeti Saarema Ühisgümnaasiumi [8], Tallinna Tehnikaülikooli (praegune TalTech) SOC õppehoone [41], Tallinna Tehnikaülikooli (praegune TalTech) U05 õppehoone [7] ja TLÜ Nova teadus- ja õppehoone [40] energiatarvet ning sisekliimat käsitlevatest magistritöödest. Hoonete andmed on saadi erinevate aastate

mõõtmiste käigus. Joonisel 5.1 esitati võrdlusaluste õppehoonete vaatlusaastal tarbitud elektri- ja soojusenergia kogused.



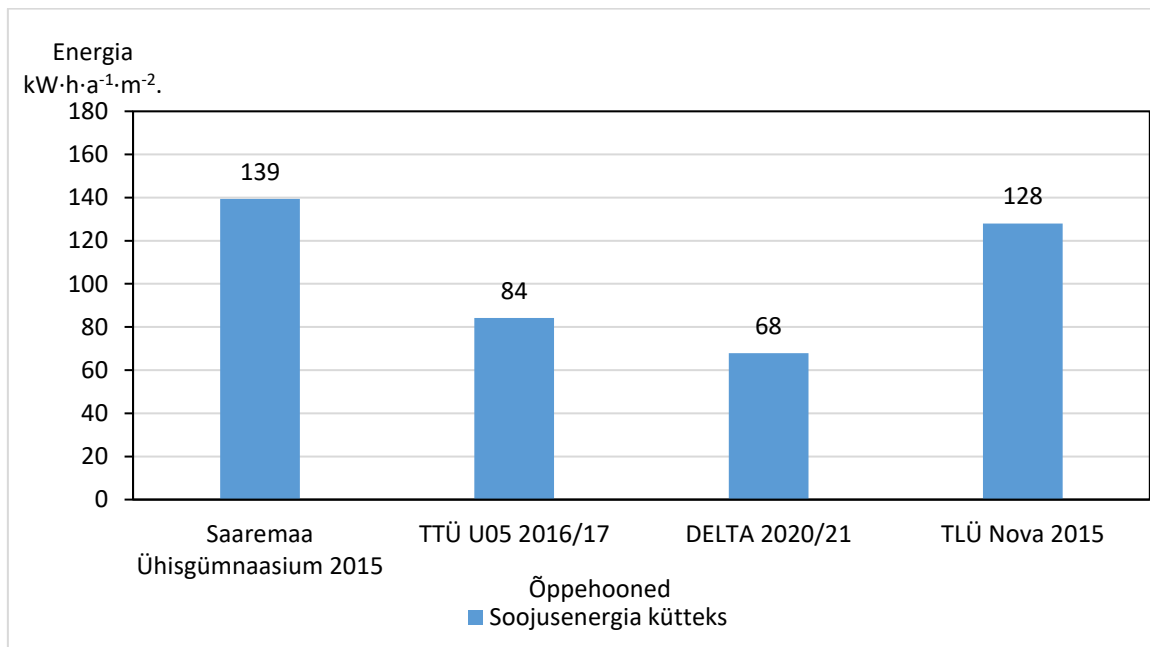
Joonis 3.1 Elektri- ja soojusenergia aastased tarbitud kogused köetavale pinnale taandatult TTÜ (praegune TalTech) – Tallinna Tehnikaülikool
Saaremaa ÜG – Saaremaa Ühisgümnaasium
TLÜ Nova – Tallinna Ülikooli Nova õppehoone
Delta – Tartu Ülikooli Teadus- ja õppehoone

TalTech SOC hoone omab kõige sarnasemat vaatlusaasta tausta Delta õppehoonega, mis mõjutus Koroonaviirusest. Sellele vaatamata, ei ole aastane tarbitud soojus- ja elektrienergia kogused võrreldavad Delta teadus- ja õppehoonega. Väga sarnane aastane elektri tarbimine oli TalTech U05 ja Delta õppehoonel (vt joonis 3.1).

Teiste hoonetega võrreldes, tarbis Delta vähem soojus- ja elektrienergiat oma pindala ühiku kohta, kui teised hooned. Vaatlusalustest hoonetest oli tegu kõige uuema ehitisega, milles kasutatud seadmed olid Koroonakriisist tingutuna vähe töös, millest omakorda tulenes väiksem energiatarve. Hoone piirdetarindite summaarne soojuslähivustegur oli teistest madalam, mis tagas madalamad küttekulud ja soojuskao.

Soojustarve sõltub vaatlusaasta välisõhu temperatuuridest ja hoone vabasoojusest. Tavapäeasest soojemad aastad olid madalamate soojusenergia tarvetega, keskmisest jahedamad olid vastupidi. Selleks, et võrrelda soojusenergia tarbimises kütteenergia tarbimist eraldi, koostati võrdlus õppehoonete aastastest reaalsetest kütteenergia

tarbimistest. All oleval joonisel 3.2 võrreldi haridushoonete tarbimisandmed. Eelmisel joonisel kajastatud TalTech SOC hoonet pole all oleval joonisel kajastatud, sest kütteenergia andmed antud hoone kohta koostatud töös võrreldavas formaadis puudusid.



Joonis 3.2 Võrdlusaluste õppehoonete soojusenergia tarve kütteks vaatlusalustel aastatel.

TTÜ (praegune TalTech) – Tallinna Tehnikaülikool

Saaremaa ÜG – Saaremaa Ühisgümnaasium

TLÜ Nova – Tallinna Ülikooli Nova õppehoone

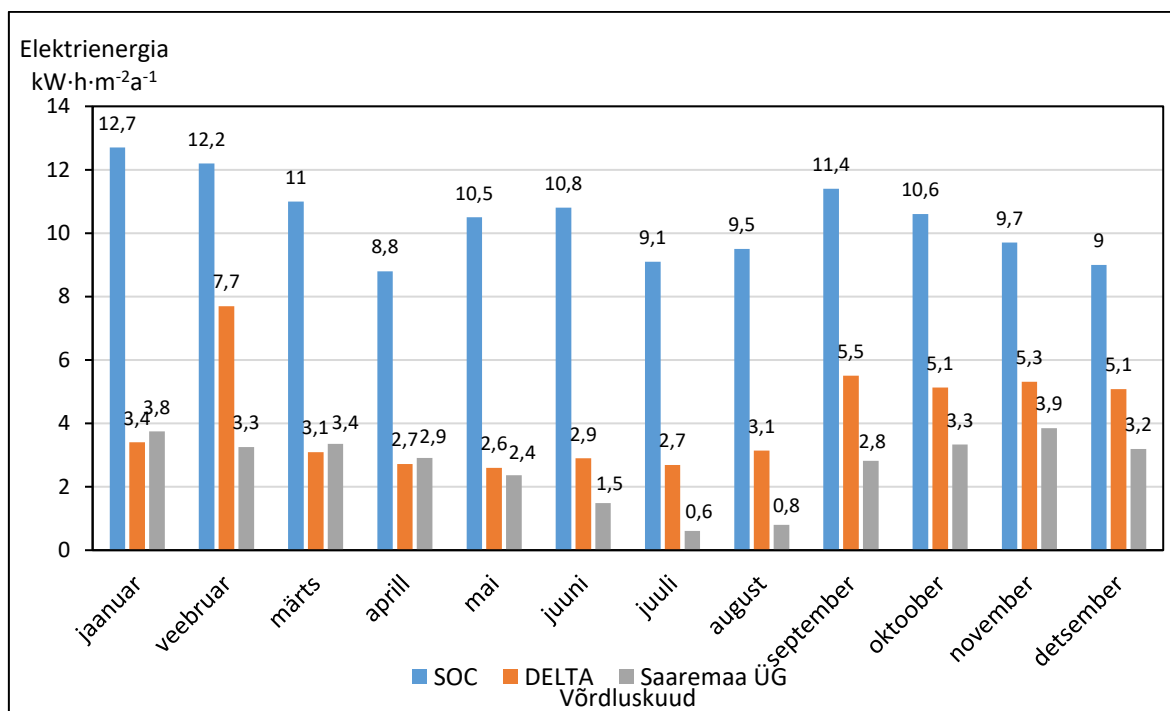
Delta – Tartu Ülikooli Teadus- ja õppehoone

Joonisel 3.2 on näha, et enamik soojusenergiast, mis hoonetes tarbiti, kulus kütmiseks. 2015. aastal oli Harjumaal kogu aasta keskmine temperatuur 7,5 °C. 2016. aastal

6,6 °C ning 2017. aastal 6,3 °C. 2020. aastal oli Tartu keskmine õhutemperatuur 8,1 °C [50]. Eelmise aasta soojem keskmine õhutemperatuur võis olla üks põhjus, miks Delta soojustarve kütteks oli madalam võrdlusalustest hoonetest. Teiste hoonete kütteenergia tarbed olid kõrgemad ja ühtlasi olid õppehoonete tarbimisandmed aastatest, kui keskmine õhutemperatuur oli madalam, kui Delta teadus- ja õppehoone energiatarvet iseloomustaval aastal. Lisaks mõjutasid 2020. ja 20201. aasta auditoorse õppetöö piirangud, mistõttu hoone soojusmugavuse tagamine polnud kasutajate poolt palju reguleeritud.

Täpsem elektrienergia tarbimisandmestik saadi Saaremaa Ühisgümnaasiumi ja TalTech SOC õppehoonet uurivatest magistritöödest. Joonisel 3.3 selgus, et Saaremaa Ühisgümnaasium ja Delta teadus- ja õppehoone tarbisid elektrienergiat sarnastes kogustes. Väga palju suurem elektrienergia tarve oli SOC õppehoonel, mille aastane elektrienergia kulu oli 125,3 kW·h·m⁻²a⁻¹. Delta tarbis 50,3 kW·h·m⁻²a⁻¹ ning Saaremaa

Ühisgümnaasium $31,7 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Kõetava pinna maht olid SOC hoonel ja Saaremaa Ühisgümnaasiumil sarnased, jäädes vahemikku $3000 - 6000 \text{ m}^2$ [41], [8] TLÜ Nova õppe- ja teadusmaja [40] oli võrdluseks kasutatud hoonetest suurim. Delta hoone on mõõtmetelt ligi 4- korda suurem, ning tarbimise kogus jaotus suuremal pinnal näiliselt madalamaks.

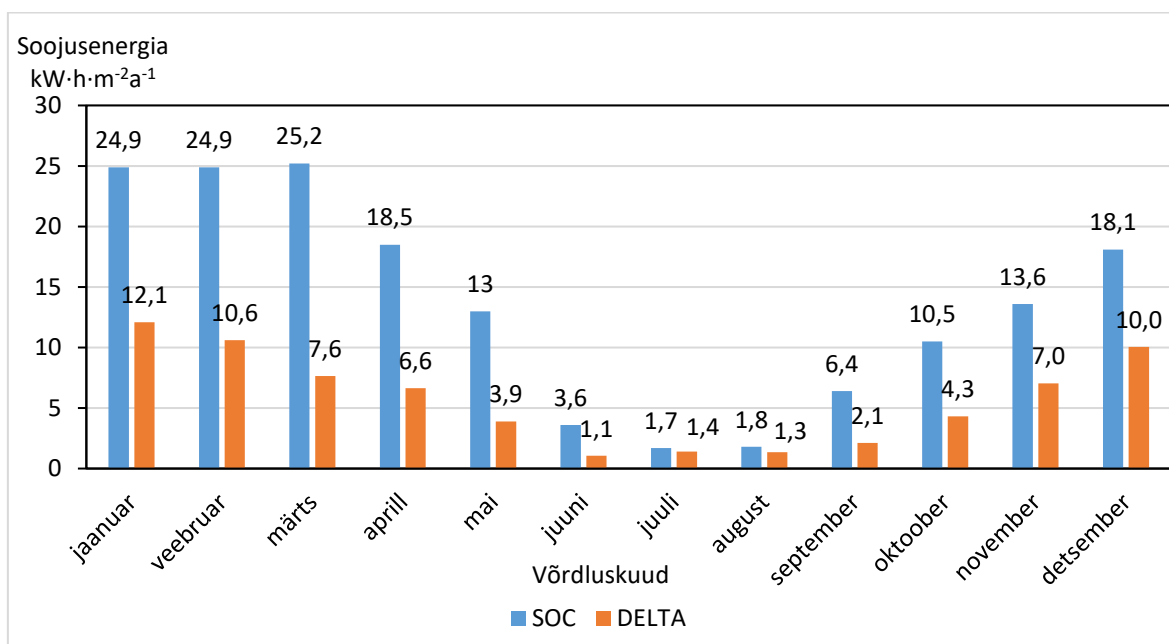


Joonis 3.3 Elektrienergia tarbimine kuude kaupa

Kõik võrreldavad õppehooned tarbisid elektrienergiat enamasti suvekuudel vähem. Aastaringelt kõrge elektri tarbimine oli TTÜ SOC õppehoonel. Antud hoones tegutseb Infotehnoloogia osakond ja teenindab Delta õppehoonega sarnaseid seadmeid, millega antud valdkonna õppeklassid on varustatud. SOC õppehoone kõrgema energiatarbimise põhjuseks võivad olla sealsed arvutid ja seadmed. Samalaadsete seadmete kasutamine tõstis ka Delta õppehoone energiakasutust. Joonisel 3.3 on näha Delta keskuse hüppeliselt kõrge energiatarbimine veebruaris. Antud kuu summaarse elektrienergia leidmiseks liideti 2021. aasta 1.-17. veebruar ning 2020. aasta 17.- 29. veebruar, mistõttu võis tulemus üle hinnata elektri tarbimist. 2020. aasta veebruaris toimus Tartu Ülikooli Delta õppehoones tavapärase õppetöö ning seadmete kasutamine oli tavapärase. 2021. aasta puhul kehtis juba eriolukord, mis pärssis õppetegevust. Seda kinnitab TÜ Delta ja TTÜ SOC õppehoone tarbimisandmete langemine [41].

Soojusenergia tarbimise detailsem analüüs oli võimalik SOC õppehoone ja Delta igakuise soojusenergia tarbimise andmete baasil [41]. Mõlema hoone tarbimisandmete järgi oli madalaim soojusenergia tarve jahutusperioodil ja kõrgeim kütteperioodil. Summaarselt

erines aastane soojusenergia tarve ligi kaks korda. Delta teadus- ja õppehoone tarindid on uuemad ja paremate soojusjuhtivuse näitajatega, mis tagas eeldatavlt soojusenergia madalama tarbe. Mõlema hoone soojusvajadust mõjutas Koroonapiirangutest tingitud madal kasutusaste, millest tulenes väiksem vabasoojuse hulk ja küttevajaduse kasv. Küttevajaduse tõusu kinnitas Tallinna Tehnikaülikooli SOC hoone energiatavet käsitlevas magistritöös selgunud aspekt, et 2020. aasta kütteenergia oli viimase viie aasta keskmisest kõrgem [41].

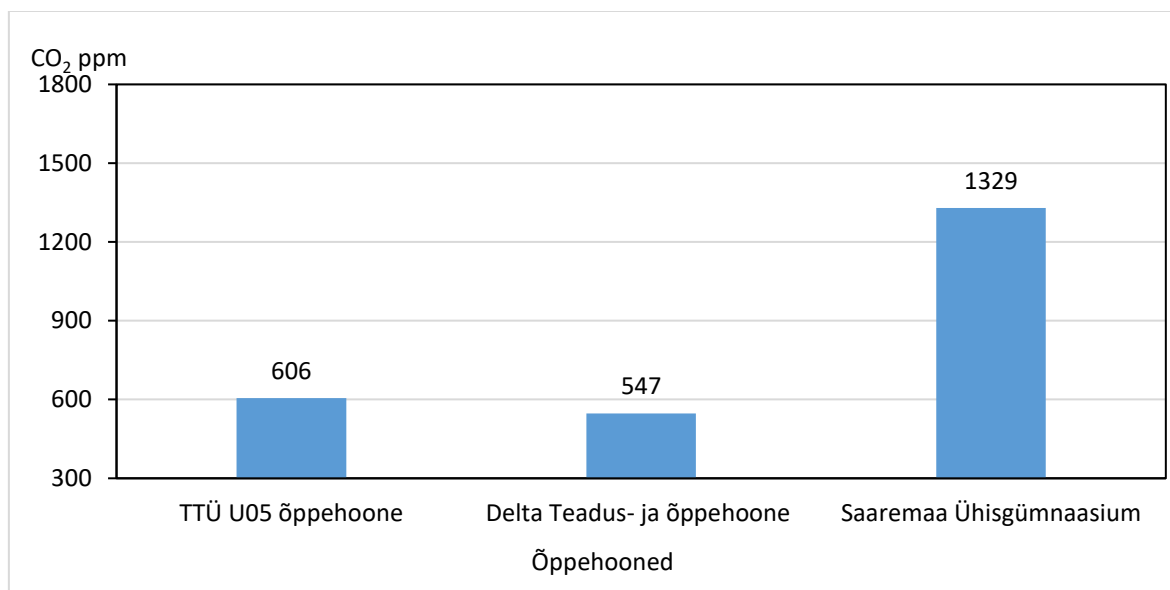


Joonis 3.4 TTÜ SOC hoone ja Delta aastased soojusenergia tarbimised kuude kaupa

Delta Teadus- ja õppehoone sisekliima hindamiseks võrreldi saadud tulemusi TalTech õppehoone U05 [7] ja Saaremaa Ühisgümnaasiumi sisekliimat [8] käsitletud uurimistöödega.

Õppehoonete sisekliima profiilid olid sarnased TalTech U05 ja Delta õppehoone puhul, kus tööaja keskmine CO₂ sisaldus jäi õppehoonetele seatud 1000 ppm piiridesse [43], väärtustega 606 ppm TalTech U05 õppehoones ja 547 ppm Delta õppehoones. Väga kõrge süsihappegaasi sisaldus oli Saaremaa Ühisgümnaasiumis, kus mõõteperioodi keskmine oli 1329 ppm. Antud tulemus ei rahuldanud Tervisekaitse nõuded koolidele seatud piirmäära [43]. Jagades hoonete keskmised süsihappegaasi sisaldused sisekliima klassidesse, kuulusid TÜ Delta ja TTÜ U05 hooned ainuüksi ruumi temperatuuri arvestades õppeasutuste I klassi ja Saaremaa Ühisgümnaasium III klassi. All olev joonis 3.5 kirjeldab võrreldud õppehoonete ruumide keskmist süsihappegaasi sisaldust õhus. TalTech U05 hoone puhul koosnes ruumide valim õpperuumide mõõtmistulemustest,

Delta Teadus- ja õppehoonel auditooriumitest, seminariruumidest ja arvutiklassidest. Saaremaa Ühisgümnaasiumi süsihappegaasi andmed koguti klassiruumides tehtud mõõtmistest.

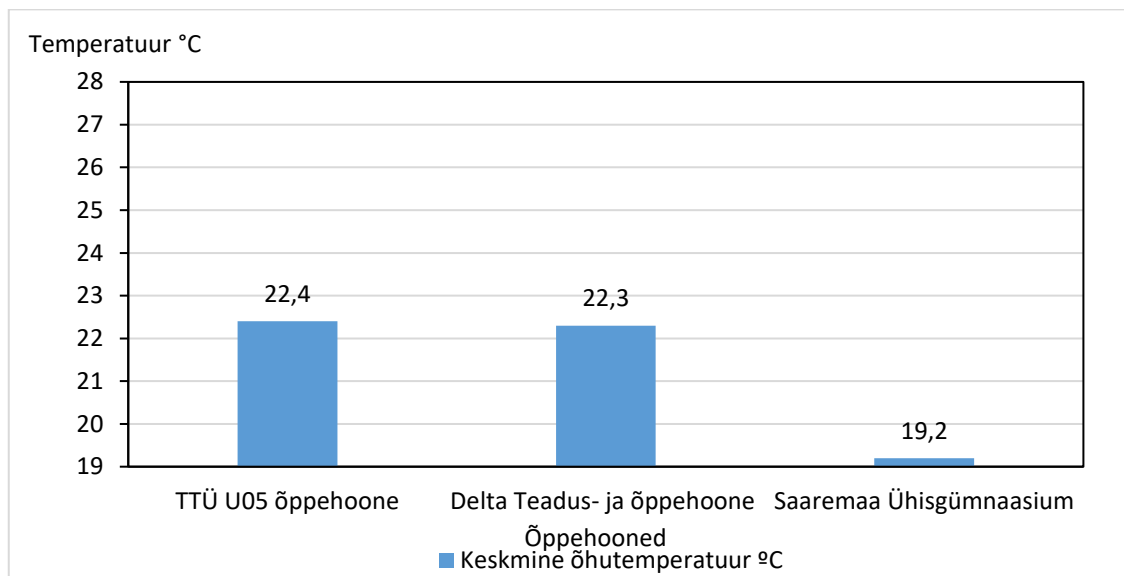


Joonis 3.5 Võrreldavate õppehoonete ruumide keskmine süsihappegaasi sisaldus

Koroonakriisi taustal muutus aktuaalseks avalike hoonete ventileerimise vajadus. Antud tulemuste põhjal olid TTÜ U05 ja Delta Teadus- ja õppehoone head näited hästi ventileeritud asutustest, kus viiruste leviku tõkestamine ventilatsiooni tõhususe kaudu oli juba võimalik. Saaremaa Ühisgümnaasiumi ventilatsiooni töö uuritud aastal nõuetele ei vastanud. Paraku oli kõik võrdlusaluste õppehoonete ruumide kasutusotstarbed erinevad ja kasutajate arv ei olnud võrreldav. Lisaks võeti Delta mõõteandmed koroonaviiruse leviku ajal ning tegu polud ainult töö aja väärtusi kajastavate keskmistega, mistõttu võis tegelik keskmine süsihappegaasi sisaldus töö ajal olla kõrgem.

Hoonete sisekliimat võrreldi keskmiste sisetemperatuuride alusel. Delta ruumitemperatuuride valim koosnes auditooriumitest, seminariruumidest, arvutiklassidest, koridorist ja kabinetidest. TalTech U05 õppehoone puhul koguti andmed arvutiklasside, töökodade, kabinetide, auditooriumite ning töökodade temperatuuri mõõtmistulemustest. Saaremaa Ühisgümnaasiumi andmestikust piirduti klassiruumide sisetemperatuuride valimiga. All oleval joonisel 3.6 esitati võrreldavate õppehoonete keskmiseid õhutemperatuurid. Delta Teadus- ja õppehoone uuritud ruumide õhutemperatuuri keskmine 22,3 °C oli võrdväärne TalTech U05 õppehoonega, kus kütteperioodi keskmiseks mõõdeti 22,4 °C. Mõlema hoone keskmised rahuldasi sisekliima tingimusi õppehoonetes, tagades sisekliima I klassi. Saaremaa

Ühisgümnaasiumi sisetemperatuur rahuldab õpperuumidele kehtestatud nõude alampiiri 19 °C väärtust, aga sisekliima klasside jaotumises kuulus III sisekliima klassi [11].



Joonis 3.6 Võrreldavate õppehoonete ruumide keskmine õhutemperatuur

Võrdlusaluste õppehoonete kõrval on Delta teadus- ja õppehoone väga hea sisekliima ja madala energiatarbega. Antud hoone hea sisekliima tagamiseks on tehtud investeeringud ventilatsioonisüsteemidesse, mis tagavad hoone stabiilse sisetemperatuuri ja süsihappegaasi taseme kiire normaliseerumise ruumides, kus toimub õppetöö. Kuna klassides tagatud hea sisekliima avaldub väljaspool õppe- ja töoaega, siis saab hoone kütte- ja jahutuse kulutusi vähendada kohalolekuandurite sidumisega kütte- ja ventilatsioonisüsteemi. Sellisel juhul oleks hea sisekliima tagatud õppetöö ajal ja kokkuhoiduga tööaja välise aja arvelt oleks igakuised kulud väiksemad.

KOKKUVÕTE

Käesoleva uurimustöö eesmärk oli saada ülevaade Tartu Ülikooli Delta teadus- ja õppehoone energiakasutusest ja sisekliimast ning tulemuste analüüsiga anda hinnang vaatlusperioodi tulemustele. Analüüsiks koguti energiatarbe andmed ning võrreldi soojus- ja elektrienergia tarvet teiste õppehoonete aastasete tulemustega. Kaalutud energiatarvet võrreldi tegeliku tarbega ning kõrvutati arvutusliku tulemusega, mille tulemusena selgus, et ETA ja KEK-i väärtuse tulemuse vahe oli $60 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Tegelik energia tarve oli $10 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ madalam kaalutud energiakasutusest.

Samas suurusjärgus oli päikesepaneelide eeldatav aastane toodetud energia kogus ETA ja KEK-i arvutustes. Võttes arvesse PV- paneelide toodangu, elektrienergia kaalumisteguri 2,0 ja selle täieliku omatarbe, liigitus hoone energiaklassi B, andes aastaseks energiatarbeks $114 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Objektivsema ETA arvutuse jaoks tuleks arvestada PV- paneelide toodangut büroo hoone näitel täielikuks omatarbeks ja teha vastav simulatsioonarvutus.

Tegeliku- ja arvutusliku energiatarbe erinevuse põhjused ei piirdu vaid määrusejärgsete arväärtuste ebatäpsuses antud hoone energiatarbe määramiseks. Delta keskuse tegeliku- ja arvutusliku energiatarbe tulemuste erinevus oli tingitud välja ehitatud ventilatsioonisüsteemide võimsuse- ning vabasoojusallikate erinevusest. Antud hoones oli keskmisest võimsamad elektriseadmed, mis tarbisid rohkem elektrienergiat ja eritasid rohkem vabasoojust, kui määruses on ette antud. Tulemusena suurenes vajadus tõsta elektrienergiat hoone jahutamiseks ja seadmete tarbeks. Hoone energiatarbe analüüs tehti Koroon kriisi aastal, mis mõjutas tulemusi kasutajate poolt eraldatava väiksema eraldatud vabasoojuse, madalama sooja vee- ja elektri tarbimisega.

Magistritöö eesmärk oli hinnata hoone sisekliimat, lähtudes 16-st erineval korrusel ja ilmakaares asuvatest ning varieeruvate kasutusotstarvetega ruumidest. Süsihappegaasi ja temperatuuri andmete analüüsi tulemuste põhjal liigitus hoone sisekliima klassi I, mis rahuldab kõige kõrgemate nõuetega hoonete sisekliima parameetreid. Antud hoone sisekliima klassi tagas aastase vaatlusperioodi ruumide süsihappegaasi sisalduse keskmine näit, mis varieerus ruumides vahemikus 400- 490 ppm ning sisetemperatuuri muutumisvahemikus 21- 23 °C. Ventilatsioonisüsteem rahuldab nõuded sisekliima tagamiseks, hoides CO₂ taseme määrtustega kehtestatud piirides.

Teistes TalTechi magistritöodes, kus käsitleti õppehoonete enrgiatarvet ja sisekliimat, ei olnud tulemused nii head, kui Deltas. Uuritud hoone tarbis oma pindala kohta

vaatlusaasta tarbimisandmete põhjal vähem kütte- ja elektrienergiat kui Saarema Ühisgümnaasium, Taltech SOC õppehoone, TalTech U05 õppehoone ja TLÜ Nova õppe- ja teadusmaja. Ehitiste andmed saadi erinevate aastate mõõtmiste käigus, mis andis kõikidele unikaalse tausta ja muutis võrdluse selle võrra ebatäpsemaks. Kindlasti mõjutab sisekliima- ja energiatarbe tulemust hoone vähene kasutusaeg, mille tingis Koroonakriis ning seepärast peaks tulevikus kordama uurimust, et saada objektiivsemad andmed Delta hoone võrdlemiseks teiste õppehoonetega.

Töö tulemused kinnitasid asjaolu, et Koroonakriisist häiritud auditoorse õppetöö vähesuse tõttu oli õppehoones märgatav elektrienergia kasutamise langus. Lisaks oli suurem energiavajadus kütteks, sest vabasoojusallikatest tulenev soojusenergia oli madal. Koroonakriisist hoolimata oli Delta keskuse energiatarve arvutuslikust kõrgem kuid võrreldes teiste õppehoonetega oli õppehoone energiasäästlikum. Antud hoone energiatarvet oleks saanud reguleerida ruumidesse paigaldatavate kohalolekuanduritega, et piirata sisekliima tagamist ruumides, kus õpilasi ei viibi ja tööd ei toimu. Praeguse vaatlusaasta põhjal olid ruumid kasutajate puudumisest hoolimata nõuetele vastavalt ventileeritud ja köetud, mis kajastus tööaja välisest kõrgest hoitavast sisetemperatuurist ja madalast süsihappegaasi sisaldusest uuritud ruumides.

SUMMARY

The aim of this research was to get an overview of the energy use and indoor climate of the Delta research and study centre of the University of Tartu and to evaluate the results of the observation period by analyzing the results. The first chapter gives an overview of theoretic basis of the thesis. The second chapter deals with the methods of the survey. The third one represents the results and explains them. The conclusion of the thesis presents all the main results and gives an assessment for the indoor climate and energy use in Delta.

For the analysis, data on energy consumption was collected and the heat and electricity consumption was compared with the annual results of other educational buildings. The weighted energy consumption was compared with the actual consumption and compared with the calculated result, which showed that the difference between the result of the ETA and the KEK value was $60 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\text{a}^{-1}$. Actual energy consumption was $10 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\text{a}^{-1}$ lower than the weighted energy consumption.

The expected annual amount of energy produced by solar panels was similar with the ETA and KEK calculations. Taking the production of PV panels into account, the electricity weighting factor of 2.0 and its total own consumption, the building was classified as energy class B, giving an annual energy consumption of $114 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\text{a}^{-1}$. For a more objective ETA calculation, the production of PV panels for full self-consumption on the example of an office building should be taken into account and a corresponding simulation calculation should be performed.

The reasons for the difference between the actual and calculated energy consumption are not limited to the inaccuracy of the statutory numerical values for determining the energy consumption of a given building. The reasons for the discrepancies between the actual and calculated energy consumption of the Delta Center were the difference in the capacity of the ventilation systems and the influence of free heat sources. This building had more powerful electrical equipment than average, which consumed more electricity and emitted more free heat than calculated by the regulation. This increased the need for cooling the building and equipment for electricity. The analysis of the building's energy consumption was carried out in the year of the Corona crisis, which affected the results with lower free heat released by users, lower hot water and electricity consumption.

The aim of the master's thesis was to assess the indoor climate of the building based on 16 rooms on different floors and in different parts of the cardinal directions with

different uses. Based on the results of the analysis of carbon dioxide and temperature data, the indoor climate of the building was classified as class I, which satisfied the indoor climate parameters of the buildings with the highest requirements. The indoor climate class of this building was ensured by the average result of the carbon dioxide content of the rooms during the annual observation period, which varied between 400-490 ppm and the change of the internal temperature between 21-23 °C. The ventilation system met the requirements for ensuring the indoor climate, keeping the CO₂ level within the limits set by the regulations.

In TalTech's other master's theses, which topics were about the energy consumption and indoor climate of study buildings, the results were not as good as in Delta. Based on the consumption data of the reference year, the surveyed building consumed less heating and electricity per area than Saarema Ühisgümnaasium, Taltech SOC study building, TalTech U05 study building and TÜ Nova study and research building. Data on buildings were obtained from measurements of different years, which gave everyone a unique background and made the comparison less accurate. The result of indoor climate and energy consumption was certainly affected by the short service life of the building caused by the Corona crisis, and therefore the study should be repeated in the future to obtain more objective data to compare the Delta building with other educational buildings.

The results of the work confirmed the fact that due to the lack of work in the classroom disrupted by the Corona Crisis, there was a significant decrease in the use of electricity in the study building. In addition, the energy demand for heating was higher because the heat energy from free heat sources was low. Despite the Corona crisis, the energy consumption of the Delta Center was higher than calculated, but the study building was more energy efficient compared to other study buildings. The energy consumption of this building could have been regulated by presence sensors installed in the premises in order to limit the provision of indoor climate in rooms where students are not represented and work does not take place. Based on the current reference year, the rooms were properly ventilated and heated, despite the absence of users, which was reflected in the higher temperature and the low carbon content of the rooms maintained outside of the working hours.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Hoonete energiatõhususe miinimumnõuded - *Riigi Teataja*“, 01.01.2019. [Kasutatud 24.08.2020].
2. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv (EL) 2018/844 - *Euroopa Liidu Teataja*, 12.05.2018. [Kasutatud 15.09.2020].
3. H. Tammoja, Eesti elektritarbimine uuringu aruanne 2015, TalTech, Tallinn, 2015.
4. S. Barbhuiyaa ja S. Barbhuiya, *Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building*, Building and Environment, Amsterdam, Holland, 2013.
5. J. W. W. B. j. Lidia Morawskaa, *How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?*, Environment International, 2020.
6. C. S. M. B. P. R. L. S. A. K. K. N. B. B. T. A. Nehul Agarwal, *Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic*, Elsevier, 2021.
7. V. Kadastik, Tallinna Tehnikaülikooli U05 õppehoone sisekliima ja energiatarbe analüüs, Tallinna Tehnikaülikool, Inseneriteaduskond, Tallinn, 2017.
8. G. Kuldsaar, Saaremaa Ühisgümnaasiumi energiatõhususe ja sisekliima analüüs, Tallinna Tehnikaülikool, Inseneriteaduskond, Tallinn, 2019.
9. T. K. A. H. K. K. T. M. K. R. Jarek Kurnitski, Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Hoonete arvutuslike energiamärgiste vastavus tegelikule tarbimisele, 2016. [WWW]. https://www.mkm.ee/sites/default/files/hoonete_arvutuslike_energiamargiste_vastavus_tegelikule_tarbimisele.pdf. [Kasutatud 22.04.2020].
10. J. Kurnitski, M. Murdvee, T.-Andrus Kõiv, M. Teichmann; Sisekliima, õpitulemus, tööviljakus: Tallinna Tehnikaülikool, 2015. [WWW] https://www.terviseamet.ee/sites/default/files/sisekliima_tooviljakus.pdf [Kasutatud 17.05.2020].
11. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6: Eesti standard EVS-EN 16798-1:2019, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2019.
12. K. K. T. O. K. Klementi, Muutuv kooliruum, 2019. [WWW] https://www.arhitektuurikool.ee/wp-content/uploads/2020/01/EAL_MuutuvKooliruum_web.pdf. [Kasutatud 01.05.2021].
13. D. A. Krawczyk ja B. Wadolowska, *Analysis of indoor air parameters in an education building*, Science Direct, 2018.
14. Akende, uste ja luukide soojuslik toimivus. Soojuslähivuse arvutus. Osa 1: Üldosa (parandatud väljaanne 03.2020): Eesti standard EVS-EN ISO 10077-2:2017, Tallinn: Eesti standardikeskus, 2017.
15. Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailsed arvutused: Eesti standard EVS-EN ISO 10211:2017, 16.08.2017. Tallinn: Eesti standardikeskus, 2017.
16. Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid, Eesti standard EVS-EN ISO 13370:2017. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
17. O. Seppänen ja M. Seppänen, „Hoone sisekliima kujundamine“, Tallinn: Koolibri, 1998.

18. Hoone Energiatõhususe arvutamise meetodika - *Riigi Teataja*,“ 10.06.2020. [Kasutatud 21.10. 2020].
19. M3-M11 Technical Building Systems Under EPB, EPB Standard: (2021)
20. V. H, E. Abel, Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn: OÜ Presshouse, 2010.
21. T. Kalamees, Madalenergia- ja liginullenergiahoonete kavandamine. Juhend büroo ja avalike hoonete tellijale,“ 08.02.2012. Kredex. [WWW] <https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Madalenergia-%20ja%20liginullenergiahoone%20kavandamine.%20Juhend%20b%20c3%20bcroo%20ja%20avalike%20hoonete%20tellijale.pdf>. [Kasutatud 04.05.2021].
22. Hoone energiatõhusust oluliselt mõjutavale tehnosüsteemile esitatavad nõuded - *Riigi Teataja*, 12.07.2020. [Kasutatud 05 02 2021].
23. T. Tark, Soojustgastite kasutegurid, [WWW]. <https://www.hevac.ee/wp-content/uploads/2016/04/Soojustagastite.pdf>. [Kasutatud 02 05 2021].
24. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded - *Riigi Teataja* 10.06.2020. [Kasutatud 16.09.2020].
25. Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele - *Riigi Teataja* 10.07.2020. [Kasutatud 30.03.2021].
26. Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika (Lisa 1) - *Riigi Teataja*, 05.06.2015. [Kasutatud 04.05.2021].
27. Energiatõhususe miinimumnõuded - *Riigi Teataja*, 01.01.2008. [Kasutatud 11.11.2020].
28. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded (Lisa 2) - *Riigi Teataja*, 10.07.2020. [Kasutatud 01.05.2021].
29. Kaardirakendused, Geoportaal: Maa- Amet. 10.02.2020. [WWW]. <https://xgis.maaamet.ee/ky/79501:002:0651>. [Kasutatud 28.09.2020].
30. Ehitisregister, Tartu Ülikooli Delta õppehoone 120813675, 14.03.2019. [Kasutatud 16.09.2020].
31. Ehitise tuleohutus, Eesti standard: EVS 812:2017. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2017.
32. I. Truverk, Tartu Ülikooli Delta Õppehoone Arhitektuurse osa seletuskiri, Architect 11 OÜ, Tallinn, 2016.
33. Delta.ut, [WWW]. <https://delta.ut.ee/>. [Kasutatud 07.02.2021].
34. Hiieko AS, Tartu Ülikooli Delta õppehoone ehitusprojekt. Kõide: küte ja ventilatsioon, Tartu, 2017.
35. Fortum AS, Tooted ja teenused: Kaugjahutus. [WWW] <https://www.fortumtartu.ee/tooted-ja-teenused/kaugjahutus/>. [Kasutatud 02.05. 2021].
36. Energiatõhusus - Tööriistad energiatõhususe mõõtmiseks, Kredex. [WWW]. <https://www.kredex.ee/et/energiatohusus/tooriistad-energiatohusususe-mootmiseks>. [Kasutatud 29 .03.2021].
37. Variax OÜ, Ventilatsioonisüsteemi pass Tartu Ülikooli Delta õppehoone, Narva mnt 18, Tartu. Tartu, 2019.
38. I. Raide, Energiaarvutusel põhinev energiamärgis, Nordic Energy solutions OÜ, Tallinn, 2020.
39. I. Raide, Energiaarvutuse lähteandmete esitamine, Tallinn, 2019.

40. M. Sults, TLÜ Nova õppehoone energiatarbe analüüs ja tehnosüsteemide optimeerimine, Tallinn: TalTech, 2016.
41. K. Karpov, Taltech'i linnaku õppehoone SOC energiatarbimise tunnipõhine modelleerimine ja võrdlus tegeliku tarbimisega, Tallinn: TalTech, 2021.
42. Soojusvarustuse kulude arvestamise ja jaotamise meetodika - *Riigi Teataja*, 1997. [Kasutatud 02.05.2021].
43. Tervisenõuded koolidele- *Riigi Teataja*, 01.09.2013. [Kasutatud 31.03.2021].
44. Energiateenus OÜ, Teostusprojekti seletuskiri: Tartu Ülikooli Delta õppehoone päikeseelektrijaam, Tartu, 2019.
45. H. Narits, Fotomaterjal, Tartu 2019.
46. K. R. P. P. Ain Kallis, 100 aastat Eesti ilma teenistust, 2019. [WWW] https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2019/05/100_aastat_Eesti_ilma_teenistust.pdf. [Kasutatud 02.05.2021].
47. C. T. L. Schibuola, „*High energy efficiency ventilation to limit COVID-19 contagion in school environments*,“ *Energy and buildings (Elsevier)*, 2021.
48. O. K. A. E. C. K. K. Z. G. J. W. M. B. Martin Z. Bazant, „*Monitoring carbon dioxide to quantify the risk of indoor airborne transmission of COVID-19*,“ *MedRxiv*, 16.04.2021.
49. Koroonaviiruse levik ja haridusvaldkond: soovitused ja korduma kippuvad küsimused, Haridus- ja Teadusministeerium, 05.04.2021. [WWW] <https://www.hm.ee/et/koroona>. [Kasutatud 06.04.2021].
50. Kliimakaardid, Riigi ilmateenistus“ [WWW] <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/ohutemperatuur/>. [Kasutatud 20.04.2020].
51. K. Vabamäe, „Delta hoone fotod,“ Tartu, 2020.
52. Vamos Automaatika, Siemens: Room thermostats with KNX communications.
53. Tartu Ülikooli Delta õppehoone seletuskiri, Vamos Automaatika, 04.10.2019.

LISAD

Lisa 1 Kehtiv ETA

Energiaarvutuse tulemuste esitamine - DELTA korpus

Andmed hoone kohta							
Hoone kasutusotstarve	12634 Ülikooli, rakenduskõrgkooli õppehoone			+ Uusehitus			
Address	Narva mnt 18/20, Tartu linn, Tartumaa			<input type="checkbox"/> Oluline rekonstrueerimine			
Ehitusaasta	2019			<input type="checkbox"/> Rekonstrueerimine			
Kõetav pind	18306,5 m ²			<input type="checkbox"/> Olemasolev hoone			
Netopind	23348,3 m ²						
Energiaõhususarv	74 kWh/(m² a) (kWh kõetava pinna ruutmeetri kohta)						
Energiakasutuse kokkuvõte	Hangitud kütused massi või kogus/a	Tarnitud energia kWh/a	Tarnitud energia kWh/(a m ²)	Eksporditud energia kWh/a	Eksporditud energia kWh/(a m ²)	Kaalumis- tegur -	Kaalutud energiakasutus kWh/(a m ²)
Elekt	-	262 796	14,4	0	0,0	2,0	28,7
Kaugküte	-	761 381	41,6	-	-	0,9	37,4
Kaugjahutus	-	344 457	18,8	-	-	0,4	7,5
Summa	-	1 024 177	55,9	-	-	-	73,7
Summaarne energiakasutus		Elekt	Soojus	Jahutus	Elekt	Soojus	Jahutus
		kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/(a m ²)	kWh/(a m ²)	kWh/(a m ²)
Küttesüsteem		9 702	761 381	-	-	-	-
Ruumide küte		9 702	504 910	-	0,53	27,6	-
Ventilatsiooniõhu soojendamise		-	74 441	-	-	4,1	-
Tarbevee soojendamise		-	182 030	-	-	9,9	-
Ventilatsioonisüsteem		212 691	-	-	11,6	-	-
Jahutussüsteem		-	-	344 457	-	-	18,8
Valgustus ¹		111 347	-	-	6,1	-	-
Seadmed		131 616	-	-	7,2	-	-
Summa (tehnosüsteemide)		465 356	761 381	344 457	25,4	41,6	18,8
summaarne energiakasutus)							
¹ Valgutuse kaalutud keskmine erivõimsus on 7 W/m ²							
Lokaalne taastuv- ja eksporditud energia	Lokaalne taastuv		Eksporditud				
	kWh/a	kWh/(a m ²)	kWh/a	kWh/(a m ²)			
Elekt päikesest	202 560	11,06	0	0,00			
Netoenergiavajadus	kWh/a	kWh/(a m ²)					
Ruumide küte ²	489 762	26,8					
Ventilatsiooniõhu soojendamise ³	74 441	4,1					
Tarbevee soojendamise	182 030	9,9					
Jahutus	313 143	17,1					
² sisaldab infiltratsiooniõhu ja ventilatsiooniõhu soojenemise ruumis							
³ arvatud koos soojustagastusega							
Energia vabasoojustest	kWh/a	kWh/(a m ²)					
Päikesekiirgus	228 567	12,5					
Inimesed	238 098	13,0					
Valgustus	111 347	6,1					
Seadmed	131 616	7,2					
Tehnosüsteemide võimsused	Elekt	Soojus					
	kW	kW					
Küttesüsteem	-	-					
Jahutussüsteem	-	-					
Arvutusprogrammi nimi ja versioon	IDA-Indoor Climate and Energy 4.8						
Arvutusprogrammi litsentsi number	Expert Stand Alone Licence						
20.01.2020	Indrek Raide	/allkirjastatud digitaalselt/					
Kuupäev	Nimi	Allikri					

Lisa 2 Kehtiva ETA lähteandmed

Energiaarvutuse lähteandmete esitamine

Energiaarvutuse lähteandmed	
Arvutusoonide arv	381
Küttesüsteemi tüüp	
-soojuse tootmine ja kütus	Kaugküte, soe vesi
-soojuse jaotamine	Radiaatorküte, põrandküte
Ventilatsioonisüsteemi tüüp	Soojustagastusega mehaaniline sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioon (peamine süsteem) ja väljatõmbeventilatsioon (sekundaarne süsteem)
Jahutussüsteem (on/lei ole)	On

Piirdetarind	Soojuskaod läbi piirdetarindite				Soojuskaod läbi külmasildade				Soojuskaod läbi õhulekkekohtade	
	g	$U_{i,e}$ W/(m ² ·K)	$A_{i,e}$ m ²	H_{juhivus} W/K	Külmasild	$\Psi_{i,e}$ W/(m·K)	$l_{j,e}$ m	$H_{\text{külmasild}}$ W/K	Omadus	Suurus
Välissein 1_EVK		0,17	505	85,9	Välissein-välissein (vn)_EVK'	0,132	160	21,1	Korpuste kaalutud keskmine õhulekke-arv	3,00
Välissein 2_EVK		0,13	1029	133,8	Välissein-välissein (sn)_EVK'	-0,10	17	-1,7	q_{50} , m ³ (h·m ²)	
Välissein 3_DELTA		0,20	2699	539,8	Katuslagi-välissein_EVK'	0,122	157	19,2	A_{vnl} (välispiirded), m ²	21404
Sokkel_DELTA		0,18	794	142,9	Välissein-põrand_EVK'	0,242	251	60,7	Korustate arv (täisarv)	6
Katuslagi_EVK		0,08	1015	81,2	Avatäidete seinakinnitus_EVK'	0,075	1602	120,2	V_{inf} , m ³ /s	1,19
Katuslagi_DELTA		0,14	4634	648,8	Välissein-sisesein_EVK'	0,10	130	13,0		
Põrand parkia kohal_EVK		0,24	649	155,8	Välissein-vahelagi_EVK'	0,075	673	50,5		
Põrand parkia kohal_DELTA		0,31	4333	1343,2	Välissein-välissein (vn)_DELTA	0,20	81	16,2		
Põrand välisõhu kohal_EVK		0,10	376	37,6	Välissein-välissein (sn)_DELTA	-0,10	83	-8,3		
Põrand välisõhu kohal_DELTA		0,24	468	112,3	Katuslagi-välissein_DELTA	0,20	869	173,8		
Välisukse_EVK		1,20	9	10,8	Välissein-põrand_DELTA	0,30	494	148,2		
Välisukse_DELTA		1,40	45	63,0	Avatäidete	0,10	3724	372,4		
Aken (põhi)_DELTA	0,30	0,90	551	495,9	Välissein-sisesein_DELTA	0,10	1330	133,0		
Aken (ida)_DELTA	0,30	0,90	879	791,1	Välissein-vahelagi_DELTA	0,10	3580	358,0		
Aken (lõuna)_DELTA	0,30	0,90	793	713,7						
Aken (lääs)_DELTA	0,30	0,90	961	864,9						
Aken (põhi) (1k)_EVK	0,35	0,80	25	20,0						
Aken (ida) (1k)_EVK	0,35	0,80	143	114,4						
Aken (ida) (2-5k)_EVK	0,28	0,80	345	276,0						
Aken (kirre) (2-5k)_EVK	0,28	0,80	79	63,2						
Aken (lõuna) (1k)_EVK	0,35	0,80	8	6,4						
Aken (lääs) (1k)_EVK	0,35	0,80	6	4,8						
Aken (lääs) (2-5k)_EVK	0,28	0,80	219	175,2						
Aken (loe) (1k)_EVK	0,35	0,80	29	23,2						
Aken (loe) (2-5k)_EVK	0,28	0,80	96	76,8						
Klaasgaleriid	0,23	0,40	430	172,0						
Klaasgaleriid - turnm	-	0,10	284,4	28,4						
Kokku:			H_{juhivus} , W/K	7181,0			$H_{\text{külmasild}}$, W/K	1476,2	$H_{\text{õhulekke}}$, W/K	1434,1
Välispiirete summaarne soojuserikadu					$\sum H_i$, W/K			10091,4		
Välispiirete keskmine soojusläävitus					$\sum H_i / A_{\text{vnl}}$			0,5		
Hoone kütav pind					$A_{\text{kütav}}$, m ²			22618,6		
Välispiirete summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta					$\sum H_i / A_{\text{kütav}}$			0,45		

* Joonkülmasiladade arvutustulemused Ettevõtluskeskuse korpuse kohta on toodud energiamärgise lisas 7

Ventilatsioonisüsteem	Rõhutõste sissep./väljat.	Ventilaatori kasutegur sissep./väljat.	Õhuvooluhulk sissep./väljat.	Süsteemi SFP	Soojustagastus temperatuurisuhe ^a	väljaviske min. temp.
	Pa / Pa	% / %	m ³ /s / m ³ /s	kW/(m ³ /s)	% ^a	°C
DELTA_CAV-1 (rootor) ^b	450 / 400	50 / 50	34,7 / 34,3	1,7	79,6	-5
DELTA_CAV-2 (plaat) ^b	450 / 400	50 / 50	8,1 / 7,7	1,7	76,1	0
DELTA_VAV-1 (rootor) ^b	450 / 400	50 / 50	11,8 / 11,4	1,7	79,6	-5
DELTA ja EVK VT-1	- / 500	- / 50	- / 1,6	1,0	-	-
EVK_CAV-1 (büroo) ^a	450 / 450	50 / 50	8,85 / 8,45	1,6	78	-5

^a Arvestuslikul koollivaheajal 15. juuni kuni 15. august vastab ventilatsiooni töörežiim kasutusaja välisele režiimile

^b Sarnaste süsteemide kaalutud keskmised koondandmed

Küttesüsteem	Soojusallika kasutegur	Jaotamise ja väljastamise kasutegur	Kütteperioodi keskmine soojustegur	Abiseadmete elekter (M ² a)
Ruumide küte				
- Delta korpus	1,00	0,97 ^b	-	0,53 ^a
- Ettevõtluskeskuse korpus	1,00	0,974 ^a	-	0,56 ^a
Ventilatsiooniseade				
- Delta korpus	1,00	1,00	-	-
- Ettevõtluskeskuse korpus	1,00	1,00	-	-
Tarbevee soojendamise				
- Delta korpus	1,00	1,00	-	-
- Ettevõtluskeskuse korpus	1,00	1,00	-	-

^a küttesüsteemide (põrand-/radiaatorküte) kaalutud keskmine

Jahutussüsteem	Jahutusperioodi keskmine jahutustegur
Tsentraalne	3,04

Lokaalse taastuenergia süsteemid	Päikesekollektori aktiivpindala, m ²	Päikesepaneelide max võimsus, kW	Tuulegeneraatori nimivõimsus, kW
PV-paneelid	-	283,4	-

Vabasoojused	Inimesed	Seadmed	Valgustus	Kasutusaste	Kasutusaeg nädalas	
	W/m ²	W/m ²	W/m ²	%	d	tundi
Haridushoone, 70%	14	8	6,76 ^b	50 ^b	5	8
Büroohoone, 30%	5	12	6,23 ^c	55	5	11

^a Kasutusel LED valgustus - 6,76W/m² (vastavalt tööprojektile 123,18kW / 18 230m²)

^b Kasutusel LED valgustus - kaalutud keskmine erivõimsus 6,23 W/m² (7,2 W/m² bürooruumides ning 3,2 W/m² üldaladel).

Kaalutud keskmise arvutus esitatud valgusarvutuste lisas

^c arvestuslikul koollivaheajal 15. juuni kuni 15. august on kasutusaste 10%

20.01.2020	Indrek Raide	/alkkirjastatud digitaalselt/
Kuupäev	Nimi	Altkiri

Lisa 3 Tartu kraadpäevad 2020/21

2020/21. aasta Tartu kraadpäevad erinevatel tasakaalutemperatuuridel kuude kaupa

tB	jaan.21	veeb. 20/21	märts.20	apr.20	mai.20	juuni.20	juuli.20	aug.20	sept.20	okt.20	nov.20	dets.20	Aasta
1	161	232	18	0	0	0	0	0	0	0	3	58	473
2	190	255	28	1	0	0	0	0	0	0	9	82	566
3	221	279	44	4	0	0	0	0	0	2	19	110	679
4	252	306	63	14	0	0	0	0	0	5	34	139	812
5	283	333	88	30	1	0	0	0	0	9	52	170	965
6	314	360	117	50	5	0	0	0	0	15	73	201	1134
7	345	388	147	74	12	0	0	0	0	23	95	232	1315
8	376	416	178	99	22	0	0	0	0	34	119	263	1505
9	407	444	209	128	34	0	0	0	0	46	145	294	1706
10	438	472	240	157	49	0	0	0	1	63	175	325	1918
11	469	500	271	186	69	1	0	0	3	83	205	356	2141
12	500	528	302	215	90	2	0	0	8	106	235	387	2373
13	531	556	333	245	115	5	1	2	16	132	265	418	2617
14	562	584	364	275	143	9	4	7	30	160	295	449	2881
15	593	402	395	305	173	13	12	15	49	190	325	480	2952
16	624	431	426	335	204	19	26	26	73	220	355	511	3248
17	655	460	457	365	235	27	44	40	99	251	385	542	3557
18	686	489	488	395	266	41	67	59	127	282	415	573	3886
19	717	518	519	425	297	58	92	84	157	313	445	604	4227
20	748	547	550	455	328	77	120	112	187	344	475	635	4577
21	779	576	581	485	359	99	151	141	217	375	505	666	4933

Lisa 4 Esimese korruse plaan, sisekliima referentsruumid



Lisa 5 Teise korruse plaan, sisekliima referentsruumid



Lisa 6 Kolmanda korruse plaan, sisekliima referentsruumid



Lisa 7 Neljanda korruse plaan, sisekliima referentsruumid



Lisa 8 Hoone iseloomutus

L8.1Korruste vaheline ühendus



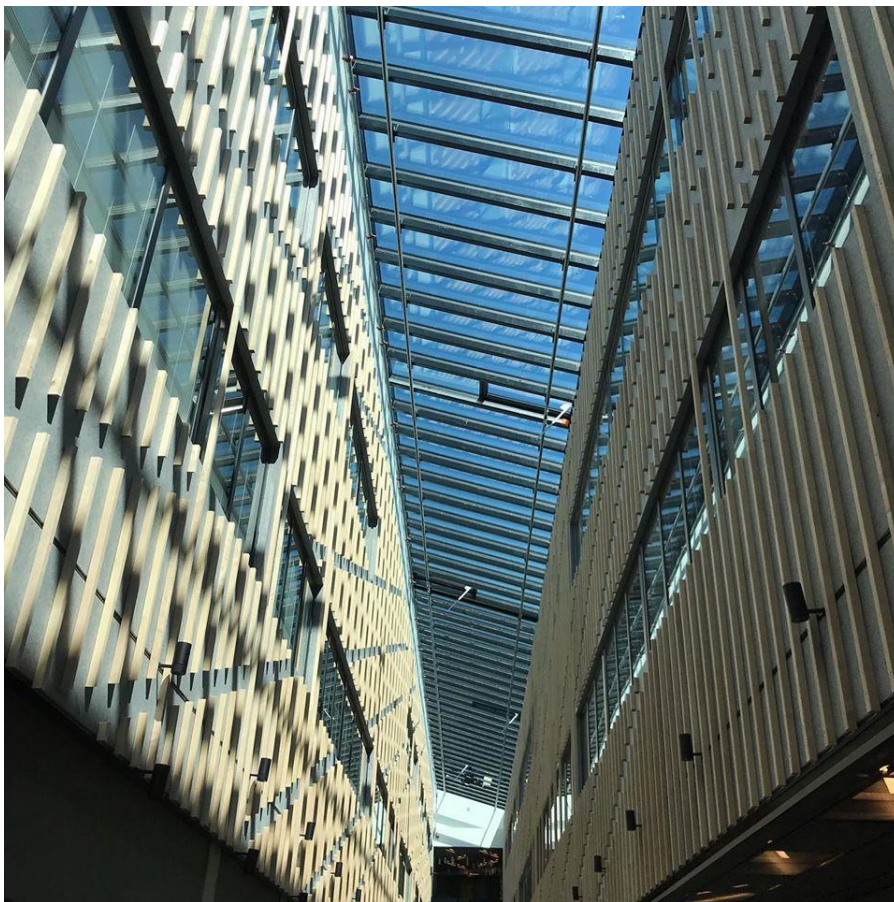
[51]

L8.2 Metallribistik hoone fassaadil



[51]

L8.3 Sisevaade klaaskattega õhuruumist



[51]

Lisa 9 Hooneautomaatika

L9.1 Ventilatsioonisüsteemi SV1 kuva ja andmed/juhtimisvalikud

The screenshot displays the VAMOS AUTOMAATIKA software interface for a ventilation system (SV1). The main window shows a detailed technical diagram of the system, including components like fans, filters, and ductwork, with various temperature and pressure readings. The interface is divided into several sections:

- System Browser (Left):** Lists various rooms and systems, including SV1 - Seaded, SV1 - VAV, and SV2 - 1k koridor ja küttesõlm.
- Technical Viewer (Center):** Displays the main schematic of the SV1 ventilation system. It includes a legend for 'Agrospidid' (setpoints) and 'Sissepuhke temperatuur' (supply air temperature). The diagram shows air flow paths, filters (FG1, FG2), fans (Väljaviske ventilator, Sisepuhke ventilator), and control units (Küttesõlm, Jähtluskalorifer).
- Bottom Panel:** Contains an 'Operation' log, an 'Extended Operation' log, and a 'Related Items' section with options for 'Icons' and 'Ungroup'.

L9.2 Ruumikontroller Siemens



[52]

Lisa 10 Väljatõmbeseadmete teenindusala ja parameetrid

[37]

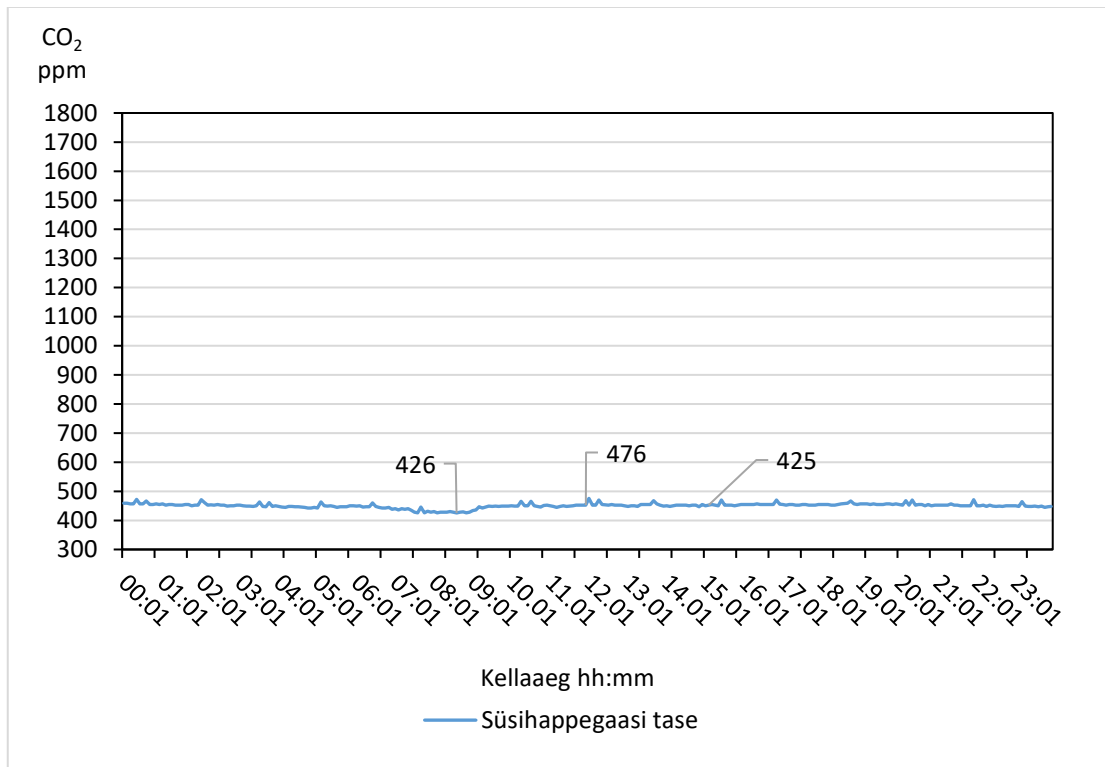
Seade	Projekteeritud tootlikkus $l \cdot s^{-1}$	Tegelik tootlikkus $l \cdot s^{-1}$	Teenindusala
V-14.1	2604	2667	0. korruse garaaži väljatõmme
V-32	120	117	Väljatõmme 4. korruse WC-dest
V-14.2	2418	2459	Väljatõmme 0. korruse garaažist.
V-20	150	150	Väljatõmme 1. korruse WC-dest
V-21	110	109	Väljatõmme 1. korruse WC-dest
V-22	300	302	väljatõmme 1. korruse prügiruumist.
V-23	180	184	Väljatõmme 1. korruse WC-dest
V-24	240	236	Väljatõmme 2. korruse WC-dest
V-25	180	173	Väljatõmme 2. korruse WC-dest
V-26	100	111	Väljatõmme 2. korruse WC-dest
V-27	120	122	Väljatõmme 3. korruse WC-dest
V-28	120	117	Väljatõmme 3. korruse WC-dest
V-29	80	80	Väljatõmme 3. korruse WC-dest
V-30	60	60	Väljatõmme 3. korruse WC-dest
V-31	120	121	Väljatõmme 4. korruse WC-dest

Lisa 11 Ruumikliima tulemused

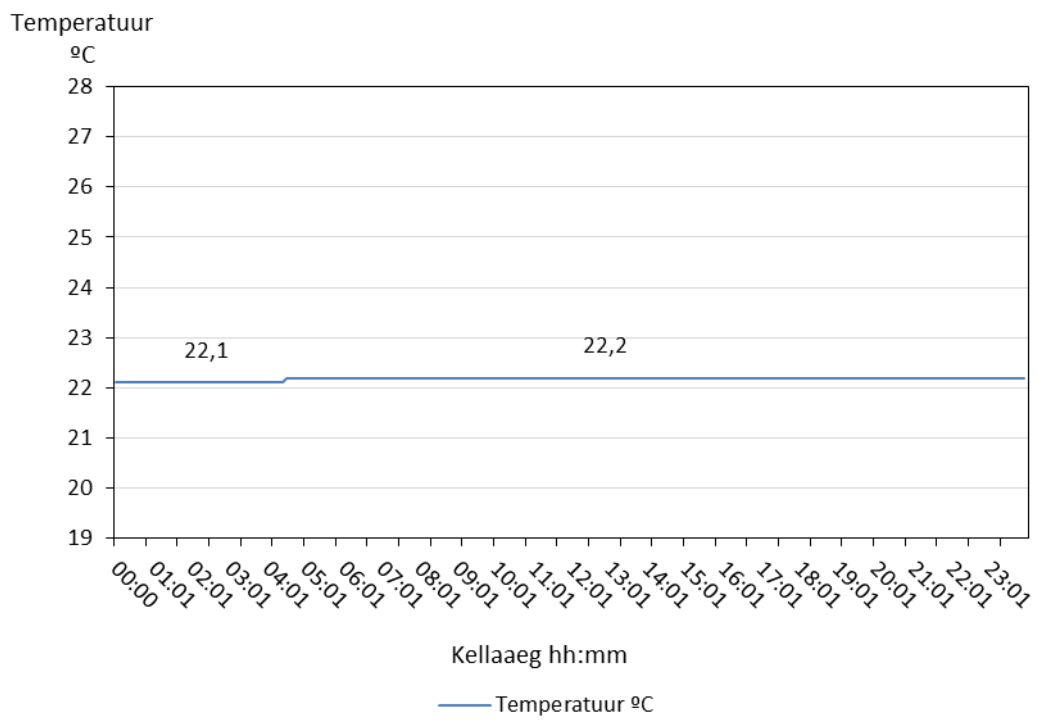
L11.1 Aasta keskmised ruumipõhised CO2 kogused

ruumi nr	ruumi funktsioon	ventilatsiooni seade	süsteem	CO ₂ tase (ppm)
1007	Auditoorium	SV6	VAV	450
1019	Auditoorium	SV2	VAV	446
1026	Seminariruum	SV4	VAV	447
2005	Arvutiklass	SV1	VAV	442
2021	Arvutiklass	SV3	VAV	485
2034	Seminariruum	SV4	VAV	462
2046	Auditoorium	SV4	VAV	456

L11.2 Seminariruumi tööaja välise ööpäeva CO2 sisaldus õhus



L11.3 Seminariruumi kasutusaja väline õhu temperatuur



Lisa 12 Ventilatsioonikamber

L12.1 Ventilatsiooniseade kütte- ja jahutuskalorifeeri sõlmed



L12.2 Ventilatsiooniseadme SV10 õhuvõtu kanali termomeeter ja filtri rõhuandur manomeeter



L12.3 SV10 rootorsoojusvaheti

