

TAL TECH

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

PÕRANDKÜTTE BAASIL JAHUTUSSÜSTEEMI TEHNILISTE LAHENDUSTE TEOSTATAVUSE JA TOIMIVUSE ANALÜÜS KIIKRI 6 KORTERMAJA NÄITEL

FEASIBILITY AND PERFORMANCE ANALYSIS OF TECHNICAL SOLUTIONS OF UNDERFLOOR HEATING- BASED COOLING SYSTEMS: A CASE STUDY OF KIIKRI 6 APARTMENT BUILDING

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Paul Nael
Üliõpilaskood: 144568EAKI
Juhendaja: Karl-Villem Võsa,
doktorant-nooremteadur
Kaasjuhendaja: Raimo Simson, teadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneriplomit taotletud.

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

“17” mai 2021

Autor: Paul Nael

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“17” mai 2021

Juhendaja: Karl-Villem Võsa

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Paul Nael (sünnikuupäev: 29.11.1994)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Põrandkütte baasil jahutusüsteemi tehniliste lahenduste teostatavuse ja toimivuse analüüs Kiikri 6 kortermaja näitel,

mille juhendaja on

Karl-Villem Võsa,

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

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

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

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

¹ *Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal 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.*

(allkirjastatud digitaalselt)

17.05.2021

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Paul Nael, 144568EAKI

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

Juhendaja: Doktorant-nooremteadur, Karl-Villem Võsa, karl-villem.vosa@taltech.ee

Kaasjuhendaja: Teadur, Raimo Simson, raimo.simson@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Põrandkütte baasil jahutussüsteemi tehniliste lahenduste teostatavuse ja toimivuse analüüs Kiikri 6 kortermaja näitel

(inglise keeles) *Feasibility and performance analysis of technical solutions of underfloor heating-based cooling systems: a case study of Kiikri 6 apartment building*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata põrandkütte baasil jahutussüsteemi toimivust korterelamus
2. Tuua välja tehnilised lahendused põrandkütte süsteemile, et oleks rakendatav ka põrandjahutus

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate koostamine ja metoodika valik. Teemakohased teadusartiklid, standardid ja raamatud: anda ülevaade sama teemaga seotud uurimistöödest ja nende tulemustest. Kirjeldada teema olulisust suvise ülekuumenemise vältimise, hoonete energiatõhususe, jahutussüsteemide komponentide (kontrollerid, torustik, armatuur, reguleeremendid, automaatika) valiku ja dimensioneerimise, süsteemi efektiivsuse ja toimimise ning üldises plaanis liginullenergia hoonete kontekstis.	11.01
2.	Uurimisobjektide valik, mudelite lähteparameetrite ja simulatsiooni variantide valik. Kirjeldada teooriat ja töö etappe, tegevusi ning uuritavaid objekte, st erinevaid metoodikaid (teaduskirjandus, IDA ICE), hoone simulatsioonimodeli(te) koostamist, sisekliimaarvutuste teostamist, valitud hoone(te) parameetreid jne.	25.01

3.	Tehniliste lahneduste analüüs, täpsustatud variantide valik, simulatsioonide ja esmaste analüüside teostamine (75% tööst valmis). Koostada hoone(te) ja valitud jahutuskontuuride lahendused ning lahenduste simulatsioonimudelid IDA ICE tarkvara baasil. Analüüsida peamisi probleeme ja pakkuda välja nende vältimise lahendusi (kondensaat, olemasolevate süsteemide ümberehitus, külma-allikad jne). Koostada analüüsitavad variandid tulenevalt süsteemide eripärast, sh juhtimise loogikast, väliskliimast ja sisekeskkonna tingimustest. Teostada analüütilised arvutused ja hoone(te) simulatsioonid. Saadud tulemused presenteerida graafiliselt ja/või tabeli kujul ning kirjeldada tulemusi.	09.04
4.	Tulemuste analüüs: tehniliste lahenduste teostatavus, lahenduste plussid/miinused, kulu- ja energiatõhusus (100% töö sisulisest osast valmis). Analüüsida tehnilisi lahendusi ja nende võimalikku teostatavust ning eksploatatsiooni nii uute projekteeritavate kui olemasolevate korterelamute kontekstis. Analüüsida probleemide vältimise lahendusi ja tulemusi (kondensaat, olemasolevate süsteemide ümberehitus, külma-allikad jne). Analüüsi põhjal koostada töö järelused ja kokkuvõte.	03.05
5.	Töö lõplik vormistamine ja viimistlemine, kaitsmiseks esitamine, sh plakati ja presentatsiooni slaidide koostamine.	10.05

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 17.mai 2021

Üliõpilane: Paul Nael ".....".....201....a
/allkiri/

Juhendaja: Karl-Villem Võsa ".....".....201....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Raimo Simson ".....".....201....a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Thalfeldt ".....".....201....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	8	
SISSEJUHATUS	9	
KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10	
1	TEORIA	11
1.1	Soojuslik mugavus	11
1.2	Põrandjahutus.....	13
1.2.1	Dimensioneerimise meetoodika	15
1.2.2	Juhtimine	17
2	METOODIKA	20
2.1	Uuritav hoone	20
2.1.1	Hoone arhitektuur	20
2.1.2	Hoone küte, ventilatsioon ja jahutus.....	21
2.2	Hoone modelleerimine	23
2.2.1	Tarindid	23
2.2.2	Avatäited	26
2.2.3	Varjestuselemendid	26
2.2.4	Kütte, ventilatsiooni ja jahutuse süsteem	27
2.2.5	Vabasoojused	31
2.2.6	Tehnilised lahendused.....	32
2.3	Simulatsioonid	33
2.3.1	Jahutuskooormuse määramine	33
2.3.2	Põrandjahutuse jahutusvõimsus	35
2.3.3	Erijuhud.....	35
2.3.4	Põrandjahutuse toimivus soojal üleminekuperioodil ning suvel	37
3	TULEMUSED JA ANALÜÜS	39
3.1	Põrandjahutuse jahutusvõimsuse arvutuste tulemused.....	39
3.2	Erijuhtude tulemused.....	42
3.2.1	Kohakuti ruumid	42
3.2.2	Kõrgendatud niiskuskooormus	44
3.3	Põrandjahutus üleminekuperioodil ning soojal suvel.....	47
3.3.1	Neljatorusüsteem	47
3.3.2	Kahetorusüsteem	49
3.3.3	Kahetoru- ja neljatorusüsteemi võrdlus.....	51
3.3.4	Põrandapinna temperatuur	52
3.3.5	Üleminekuperiood	53

3.4	Modelleerimise detailsus.....	54
3.5	Juhtimine	55
3.6	Põrandjahutuse võrdlus konditsioneerisüsteemiga	56
	KOKKUVÕTE	58
	SUMMARY.....	60
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	62
	LISAD	67
	Lisa 1. Hoone tarindid	68
	GRAAFILINE OSA.....	71
	Joonis 1. 2-torusüsteemi korteri ühendusskeem	72
	Joonis 2. 4-torusüsteemi korteri ühendusskeem 4x2-TEE.....	73
	Joonis 3. 4-torusüsteemi korteri ühendusskeem 2x3-TEE.....	74
	Joonis 4. 4-torusüsteemi korteri ühendusskeem 6-TEE	75
	Joonis 5. 2-torusüsteemi soojus- ja külmasõlm	76
	Joonis 6. 4-torusüsteemi soojus- ja külmasõlm	77

EESSÕNA

Käesolev magistritöö koostati Tallinnas. Magistritöö teema pakkus välja töö kaasjuhendaja Raimo Simson. Töö autor tänab juhendajat Karl-Villem Võsa ning kaasjuhendajat Raimo Simsonit, kes aitasid töö valmimisele kaasa nõu, konsultatsiooni ning konstruktiivse kriitikaga.

Töös uuriti põrandkütte baasil ülesehitatud jahutussüsteemi toimivust ning tehnilist lahendust Kii kri 6 kortermaja näitel. Uurimiseks kasutati simulatsioonitarkvara IDA ICE 4.8. Uuriti põrandjahutuse mõju põhiliselt ruumitemperatuuridele ning pakuti välja skemaatilised lahendused kombineerimaks põrandkütet ning -jahutust. Juhti tähelepanu asjaoludele, millega peaks arvestama põrandjahutuse puhul.

Võtmesõnad: põrandjahutus, soojuslik mugavus, IDA ICE, põrandjahutuse juhtimine ,magistritöö.

SISSEJUHATUS

Kliimasoojenemisest tingituna suureneb kuumalainete esinemise tõenäosus, kestvus ning intensiivsus [1]. Kuumalained põhjustavad ohtu hoonete ülekuumenemisele, mille tagajärjel muutub hoones olijatele soojuslik mugavustunne halvemuse poole ning omab negatiivset mõju tervisele ning produktiivsusele [2]. Vältimaks negatiivseid mõjusid hoones viibijatele tuleb seega tagada siseruumides teatud tingimused.

Üheks meetmeks tagada hoones viibijate soojuslik mugavustunne on kasutada põrandjahutust, vältimaks siseõhu temperatuuri liigset tõusu. Põrandjahutus hõlmab endast kõrgtemperatuurilist jahutussüsteemi, mis oma olemuselt ja tööpõhimõttelt sarnaneb põrandküttesüsteemile. Põrandjahutussüsteemi projekteerimisel tuleb arvestada teatavate eripäradega, näiteks väiksem soojusülekanne tegur võrreldes põrandküttega, madal põrandapinna temperatuur, kondenseerumine [3]. Käesolevas töös vaadeldakse põrandjahutuse toimivust Eesti kliimaoludes.

Lõputöö eesmärgiks on uurida põrandkütte baasil jahutussüsteemi teostatavust ning toimivust kortermajas arvestades Eesti kliimaolusid. Põrandjahutuse toimivust ning tehnilist lahendust uuritakse objektipõhiselt. Uuritavaks objektiks on valitud töö kirjutamise ajal projekteerimisstaadiumis olev korterelamu Tallinnas aadressil Kiikri 6. Töös uuritakse lahendusi, mille puhul peab juba projekteeritud põrandküttesüsteemile tegema võimalikult väheseid muudatusi, et süsteemi oleks potentsiaalselt võimalik rakendada ka jahutuseks. Tehniliste lahenduste poole pealt tuuakse välja skemaatilistelt muudatustel põhinevatele ning kirjeldatakse nende tööpõhimõtteid. Vaadeldakse jahutussüsteemi võimekust tagada tubades siseõhu temperatuur ettenähtud piires ning kirjeldatakse põrandjahutuse iseärasusi sooritades mõningaid detailsemaid juhtumiuuringuid. Käesolevas töös kasutatakse põhilise tööriistana simulatsioonitarkvara IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE).

Eestis on põrandjahutust vähe uuritud ning arvestades positiivseid kirjandusnäiteid mujalt maailmast, siis tasub põrandjahutust lähemalt uurida ka Eesti kliimat arvestades. Autorile teadaolevalt on ainsa tööna varasemalt uuritud põrandjahutust Eesti kontekstis Elisa Seinä magistritöös pealkirjaga „Põrandjahutuse kasutamine suveperioodil eluruumide ülekuumenemise vältimiseks“.

Töö põhiosa on jaotatud kolmeks osaks. Esimeses peatükis tuuakse välja teoreetilised alused, mis aitab paremini mõista töö sisu ning kirjeldab põhimõtteid, millele toetutakse töö käigus. Teises peatükis kirjeldatakse uuritavat objekti ning mudeli ülesehitust ja läbiviidavaid simulatsioone simulatsioonitarkvaras IDA ICE. Kolmandas peatükis on välja toodud simulatsioonide käigus saadud tulemused ning neid analüüsitakse.

KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Kliimasoojenemisest tingituna suureneb kuumalainete esinemise tõenäosus, kestvus ning intensiivsus [1]. Kuumalained põhjustavad ohtu hoonete ülekuumenemisele, mille tagajärjel muutub hoones olijatele soojuslik mugavustunne halvemuse poole ning omab negatiivset mõju tervisele ning produktiivsusele [2]. Vältimaks negatiivseid mõjusid hoones viibijatele tuleb seega tagada siseruumides teatud tingimused.

Üheks meetmeks tagada sisekliima tingimusi on põrandjahutus. Põrandjahutus hõlmab endast kõrgtemperatuurilist jahutussüsteemi, mille puhul külmakandjaks on reeglina vesi, mis voolab põrandasse paigaldatud torustikes [4]. Uuringu [5] põhjal on käesoleva sajandi lõpuks oodata märgatavat tõusu jahutusvajaduses. Põrandjahutus esitleb ennast kui kulutõhusat ning energiasäästliku varianti ruumide temperatuuri kontrollimiseks.

Võrreldes traditsioonilistema jahutusmeetoditega on põrandjahutuse rajamis- ning opereerimiskulud madalamad [4], [6]. Põrandjahutuse puhul toimub suurem osa soojusvoost kiiruslikult, mistõttu on võimalik rakendada kõrgemat jahutuse seadeväärtust, et saavutada sama soojuslik mugavustunne, mis madalama seadeväärtusega konvektiivsete süsteemide puhul [7]. Kuna põrandaga jahutamise puhul rakendatakse suurt ala soojuse ülekandmiseks, siis on võimalik kasutada kõrgemat peale voolu temperatuuri, mistõttu saab paremini utiliseerida vabajahutust ning vähendada jahutusseadme kompressorile kuluvat energiat [8].

Tippaja jahutusvõimsust mõjutab veel ka tarindite massiivsus [9]. Massiivsemate tarindiga on võimalik salvestada rohkem soojust ning seeläbi jaotada optimaalsemalt energiat, mis kulub hoone jahutamiseks [10], [11]. Uuringus [12] läbi viidud simulatsioonide põhjal võib kiiruslikel soojusülekandel põhinevatel jahutussüsteemidele ette näha analoogsest konvektiivsest jahutussüsteemist väiksema võimsusega jahutusseadme, seeläbi viies madalamaks rajamiskulud.

Arvestades massiivsete põrandate soojusliku inertsusega tuleb olulist tähelepanu pöörata ka põrandjahutuse juhtimisele, et arvestada põrandapinna aeglasema reageerimisega [13]. Vältimaks kondensatsiooni teket põranda pinnale tuleb piirata jahutusvee peale voolu temperatuuri või piirata ruumis tekkivat ja/või ruumi sisenevat niiskust muul moel [7]. Põrandjahutuse täpne juhtimine on oluline kuna nii tagab ruumis soojusliku mugavustunde ning energiasäästu [14].

1 TEOORIA

Käesolevas peatükis antakse teoreetilised alused, mis aitavad paremini mõista töö sisu ning kirjeldab põhimõtteid, millele toetutakse töö käigus.

1.1 Soojuslik mugavus

Soojuslikku mugavustunne on meeleseisund, kus ollakse rahul ümbritseva kliimaga. Soojusliku mugavustunnet ei saa tekitada kõigile samade tingimustega, alati ei ole keegi rahul. Kuigi on võimalik tagada sisekliimat, mis sobib suurele hulgale inimestest. Soojuslikul sisekliimal on kuus põhilist faktorit: metabolism, riietus, õhu temperatuur, kiirguslik temperatuur, õhu liikumiskiirus ning suhteline õhuniiskus. [15]

Kaks põhilist parameetrit, mida saab mõjutada kütte- ning jahutussüsteemiga on õhu- ning kiirguslik temperatuur, mille kombineeritud väärtust mõistetakse operatiivse temperatuurina. Madalatel õhukiirustel (<0,2 m/s) võib operatiivse temperatuuri väärtust lihtsustatult arvutada kui õhu- ning pindade kaalutud keskmise temperatuuri keskmisena [3]. Kehtivast standardisatsioonist [16] võib leida eluruumidele järgnevad väärtused:

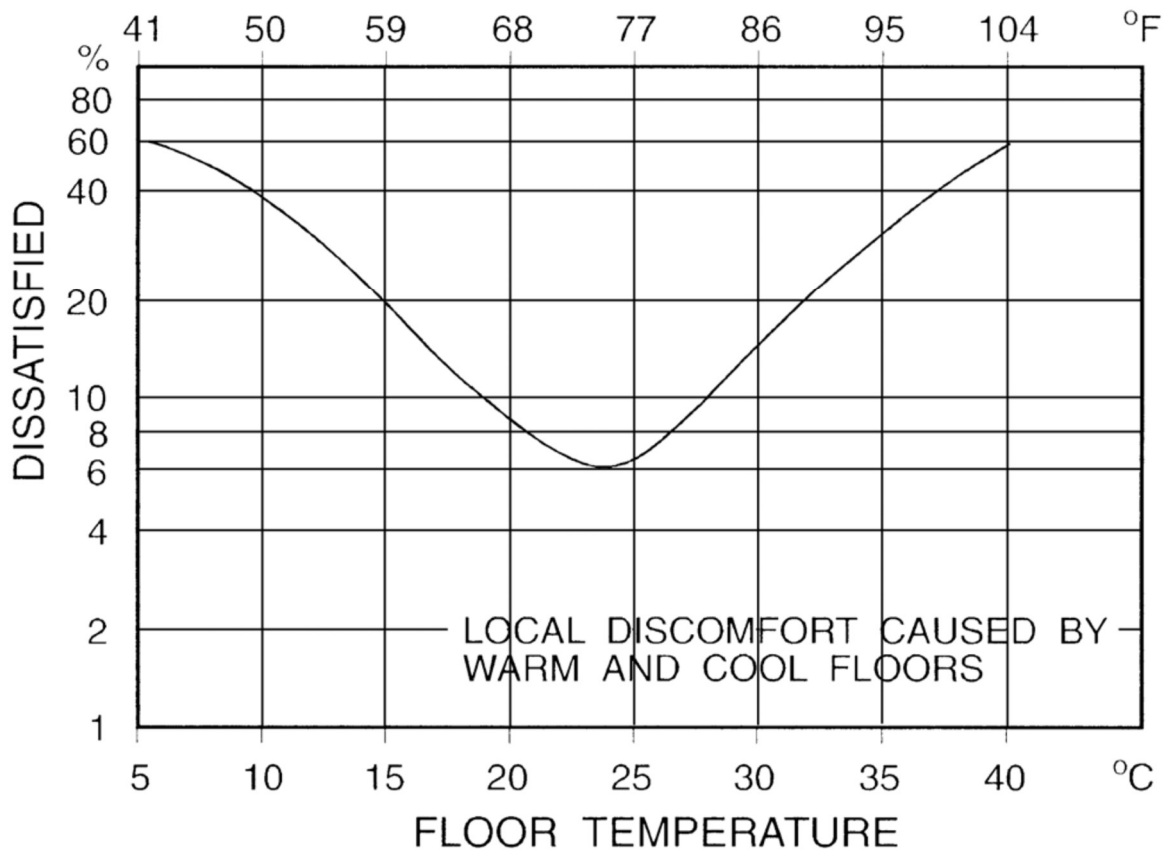
Hoone/ruumi tüüp	Kategooria	Operatiivtemperatuur °C	
		Minimaalne kütte jaoks (talveperiood), umbes 1,0 clo	Maksimaalne jahutuse jaoks (suveperiood), umbes 0,5 clo
Eluhooned, eluruumid (magamistoad, elutoad, köögid jne) Istuv aktiivsus ~ 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
	IV	16,0	28,0

Joonis 1.1 -Sise-operatiivtemperatuuri vaikumis projekteerimisväärtused talvel ja suvel mehaaniliste jahutussüsteemidega hoonete jaoks [16]

Soojusliku mugavustunde tagamiseks tuleks pöörata ka tähelepanu asjadoludele, mis võivad tekitada lokaalse ebamugavustunde, milleks võib olla kiirguslik temperatuuride asümmeetria, tuuletõmbus, vertikaalne temperatuurierinevus ning liiga soe või külm põrandapinna temperatuur [3].

Liiga kõrge kui ka liiga madal põrandapinna temperatuur võivad põhjustada ebamugavustunnet [3], [15], [17]. Üldjuhul loetakse sobilikuks põrandapinna temperatuuri vahemikuks soojusliku mugavuse seisukohast +19°C kuni +29°C [18]. Eeltoodud vahemik kehtib olukorras aga olukorras, kus inimesed kannavad jalanõusid

ning on paiksed. Teistsugused asjaolud võivad nõuda teisi põrandapinna temperatuure [15], [18], [19]. Eelnevate tingimuste puhul on *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) juhendmaterjalides [15] toodud välja seos põrandapinna temperatuuri ning soojusliku mugavustunde rahulolematuse vahel (vaata Joonis 1.2).



Joonis 1.2 - Seos põrandapinna temperatuuri ja soojuslikku ebamugavustunnet tunnetavate inimeste vahel [15]

Inimeste mugavustunnet palja jalga pindadel on uurinud Dr. Bjarne W. Olesen ning pakkus välja sellest tulenevalt soovituslikud põrandapinna temperatuurid vastavalt põranda kattematerjalist (vaata tabelit 1.2) [17].

Tabel 1.1 - Soovituslikud põrandapinna temperatuurid palja jala korral

Floor construction (The underlayer is concrete)	Heat loss estimated according to DIN 52614		Optimal floor temperature		Recommended floor temp. interval - less than 15% dissatisfied	
	1 min	10 min	1 min	10 min		
	kJ/m^2	kJ/m^2	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		
Wooden floor used in the experiment	38	134	26.5	25.5	23 - 28	
Concrete floor used in the experiment	50	293	28.5	27	26 - 28.5	
Textile layer	1)	17	75	19	24	20 - 28
Wilson-carpet	2)	20	91	21	24.5	21 - 28
Sisal-carpet	2)	24	123	23	25	22.5 - 28
Needled felt sheet	2)	21	111	22	25	22 - 28
5 mm cork	3)	26	145	24	26	23 - 28
Pinewood floor	4)	29	124	25	25	22.5 - 28
Oakwood floor	4)	36	182	26	26	24.5 - 28
Vinyl-asbestos tile	2)	80	485	30	28.5	27.5 - 29
PVC-sheet with felt underlay	2)	49	242	28	27	25.5 - 28
PVC-sheet (2 mm)	2)	60	365	29	27.5	26.5 - 28.5
5 mm tessalated floor on gas concrete	3)	60	301	29	27	26 - 28.5
5 mm tessalated floor on 20 mm cork	3)	63	211	29	26.5	25 - 28
2.5 mm hard linoleum on wood	3)	46	176	28	26	24 - 28
2.5 mm hard linoleum on concrete	3)	45	296	28	27	26 - 28.5
Painted concrete floor	2)	77	487	30	28.5	27.5 - 29
Marble	3)	75	511	30	29	28 - 29.5
Concrete slab finished with steel trowel	3)	63	475	29	28.5	27.5 - 29
Concrete slab finished with wooden float	3)	60	419	29	28	27 - 29

1) Schüle and Monroe (17) 2) Wäänänen and Veijalainen (18)

3) Cammerer (4) 4) Cammerer (3)

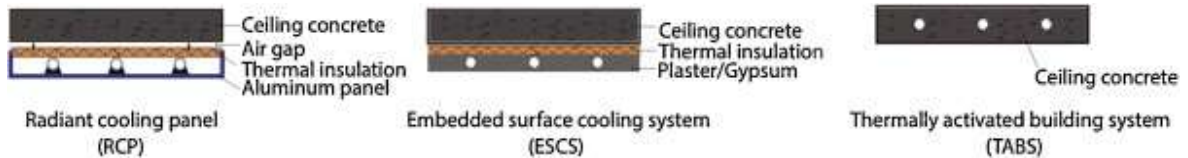
1.2 Põrandjahutus

Kiirgusliku jahutuse üks alaliikidest käsitleb tarindisse sisseehitatud jahutussüsteeme, mille puhul sooja- või külmakandjaga täidetud torustik on paigutatud põrandasse, seina või lakke. Kiirguslikes süsteemides kasutatakse reeglina soojus- või külmakandjana vett, mistõttu väheneb paigalduseks nõutav maht märkimisväärselt võrreldes konvektiivse süsteemiga. Vähene paigaldusruum aga tagab suurema arhitektuurse vabaduse [20].

Kiirguslikud kütte- ning jahutussüsteemid võib jagada kolmeks [19]:

- Kütte ja jahutus kiirguspaneelid (joonisel vasakult esimene);

- Soojus- või külmakandja torustik tarindis paikneb hoone kandekonstruktsioonist termiliselt isoleeritud kihis (joonisel keskmine);
- Soojus- või külmakandja torustik tarindis paikneb hoone kandekonstruktsioonis (tuntud ka kui Thermally Active Building Systems ehk TABS) (joonisel vasakult kolmas).



Joonis 1.3 - Kiirguslikud kütte- ning jahutussüsteemid [21]

Kiirgusliku kütte korral on võimalik tagada sama soojusliku mugavuse tase madalamate siseõhu temperatuuride korral võrreldes konvektiivse süsteemiga [18]. Sama olukord kehtib ka kiirgusliku jahutuse puhul, kus on kõrgema siseõhu temperatuuriga võimalik tagada sama soojusliku mugavuse tase võrreldes konvektiivse süsteemiga. Seetõttu on võimalik vähendada energiakulu tagades sama soojusliku mugavuse taseme võrreldes konvektiivse süsteemiga [18].

Kiirguslikul põrandjahutusel on potentsiaali parandada soojuslikku mugavustunnet ning pakkuda energiasäästu sarnaselt põrandküttele. Võrreldes õhkjahutuse süsteemiga pakub põrandjahutus energiatõhusamat külmakandja transportimise viisi. Kuna põrandjahutuse süsteemid kasutavad siseõhu temperatuurile lähedast külmakandja temperatuuri muutub efektiivsemaks külma tootmine [3]. Põrandjahutus võib pakkuda veel energeetilist säästu tipukoormuse alandamise näol, kui rakendatakse ka muid jahutussüsteeme, mida saab sel juhul dimensioneerida väiksemateks [19].

Põrandkütte ning -jahutuse puhul mõjutavad oluliselt soojusvoolu kogu soojusülekanDETegur ruumi siseõhu ning kütva/jahutava pinna vahel. Kogu soojusülekanDETegur koosneb järgnevatest komponentidest: konvektiivsest ning kiirguslikust ülekanDETegurist, lubatavast minimaalsest ning maksimaalsest pinnatemperatuurist vastavalt soojuslikule mugavusele ja kastepunktile ning soojusülekanDETegurist soojuskandja ning pinna vahel [3], [19].

Põrandjahutus suudab keskkonnast eemaldada ainult ilmset soojust ning varjatud soojuse eemaldamiseks on tarvilik kasutada muid lahendusi. Varjatud soojuse eemaldamiseks rakendatakse ventilatsiooni või kuivatust. Põrandjahutuse jahutusvõimsuse suurendamiseks saab rakendada selliseid ventilatsiooni ning kuivatuslahendusi, mis eemaldavad ruumis niiskust, seeläbi alandades kastepunkti [19], [20].

Põrandapinna temperatuuri puhul tuleb peale soojusliku mugavuse arvestada ka kastepunktiga, et vältida pinnal kondenseerumist. Ruumides, kus ei rakendata niiskuse kontrolli kuivatamisega, tuleb valida selline põrandapinna temperatuur, mis väldiks pinnal kondenseerumist. Ühtlasi piirab põrandapinna temperatuuri piiramine soojusvoogu läbi pinna alandades seeläbi jahutusvõimsust [19].

Praegused standardiseeritud põrandjahutuse projekteerimismetoodikad ei võta arvesse päikese lühilainekiirgust. Seetõttu pole otstarbekas kasutada lihtsustatud metoodikat, kus on suur koormus päikesekiirgusest. Dünaamiliste simulatsioonidega on näidatud, et ISO 11855 [18] arvutusmetoodikaga võrreldes võib saada ~1,4x suurema jahutusvõimsuse [22]. Ilma otsese päikesekiirguseta võib saavutada põrandajahutuse võimsuse vahemikus 35-50 W/m², aga arvestades otsest päikese kiirgust on võimalik saavutada jahutusvõimsus vahemikus 100-150 W/m² [23].

1.2.1 Dimensioneerimise metoodika

Dimensioneerimise metoodikat tarindisse sisseehitatud kütte- ning jahutussüsteemide puhul kirjeldab standardiseeria EVS-EN ISO 11855:2015 [18], [24], [25], mida rakendatakse ka käesolevas töös. Soojusülekanne koefitsienti arvutamisel lähtutakse *general resistance* meetodist [24], millest lähtub ka IDA ICE [26].

Metoodika lähtub soojus- või külmakandja ning tarindi pinna vahelisel soojusvoo arvutamisel lineaarsest termilistest takistusest. Luuakse tarindisse torutasapinda ekvivalentne termiline takistus, mis arvestab soojusülekannet soojus- või külmakandjalt toru siseseinale, toru soojuslikku takistust, takistust toru välispinnalt ümbritsevale keskkonnale [24].

Soojusülekande tegur, mis iseloomustab soojusvoogu pinnalt ruumi, sõltub pinna tüübist (põrand, sein, lagi) ning kas temperatuur pinnal on madalam või kõrgem ruumiõhu temperatuurist. Soojusülekande tegur, mida rakendatakse põrandjahutuse korral on 7 W/(m²K), mis hõlmab nii konvektiivset kui ka kiirguslikku ülekannet. Soojusvoo q määramiseks põrandjahutuse korral rakendatakse valemit (1.1) [24]:

$$q = 7(|\theta_{s,m} - \theta_i|) \quad (1.1)$$

kus q - soojusvoog pinnal [W/m²];

$\theta_{s,m}$ - keskmine põrandapinna temperatuur [°C];

θ_i - keskmine siseõhu temperatuur [°C];

7 - pörandjahutuse korral kogu soojusülekandeegur [W/m²K].

Soojusvoogu saab kirjeldada veel valemiga (1.2) [24], mis seob ekvivalentse soojusülekandeeguri K_H ning soojus- või külmakandja ja ruumitemperatuuri vahe $\Delta\theta_H$:

$$q = K_H \cdot \Delta\theta_H \quad (1.2)$$

kus K_H – ekvivalentne soojusülekandeegur [W/m²K];

$\Delta\theta_H$ – soojus- või külmakandja ja ruumiõhu logaritmiline temperatuuride vahe [°C].

Soojus- või külmakandja ja ruumiõhu logaritmiline temperatuuride vahe, leitakse valemiga (1.3) [24]:

$$\Delta\theta_H = \frac{\theta_V - \theta_R}{\ln \frac{\theta_V - \theta_i}{\theta_R - \theta_i}} \quad (1.3)$$

kus θ_V – soojus- või külmakandja pealevoolu temperatuur [°C];

θ_R – soojus- või külmakandja tagasivoolu temperatuur [°C].

Ekvivalentne soojusülekandeegur K_H , mis kirjeldab suhet soojusvoo q ning soojus- või külmakandja ja ruumi temperatuuride vahe $\Delta\theta_H$ vahel, leitakse valemiga (1.4) [24]:

$$K_H = \frac{1}{R_w + R_r + R_x + R_i} \quad (1.4)$$

kus K_H – ekvivalentne soojusülekandeegur [m²K/W];

R_w – toru siseseina ja vedeliku vaheline takistus [m²K/W];

R_r – toruseina takistus [m²K/W];

R_x – toru välispinna ja ümbritseva keskkonna takistus [m²K/W];

R_i – pinna soojusülekande ning tarindi takistus [m²K/W];

Toru siseseina ja vedeliku vaheline takistus R_w on leitav valemiga (1.5) [24]:

$$R_w = \frac{W^{0,13}}{8 \cdot \pi} \left(\frac{d_a - 2 \cdot s_r}{m_{H,sp} \cdot l} \right)^{0,87} \quad (1.5)$$

kus W – torustiku samm tarindis [m];

d_a – toru välisdiameeter [m];

s_r – toruseina paksus [m];

$m_{H,sp}$ – massivooluhulk torus [kg/s];

l – torustiku pikkus [m].

Toruseina takistus R_r on leitav valemiga (1.6):

$$R_r = \frac{W \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_a - 2 \cdot s_r}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_r} \quad (1.6)$$

kus λ_r – toruseina soojuserijuhtivus [W/(m·K)].

Toru välisseina ja ümbritseva keskkonna takistus R_x on ligikaudselt leitav valemiga (1.7) [24]:

$$R_x \approx \frac{W \cdot \ln\left(\frac{W}{\pi \cdot d_a}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b} \quad (1.7)$$

kus λ_b – torustikku ümbritseva materjali soojuserijuhtivus [W/(m·K)].

Valem (1.7) on kasutatav juhul kui $s_r/W > 0,3$ ning $d_a/W < 0,2$.

Pinna soojusülekanne ning tarindi takistus R_i on leitav valemiga (1.8) [24]:

$$R_i = \frac{1}{h_t} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} \quad (1.8)$$

kus h_t – soojusülekande tegur vastavalt tarindile ning temperatuuride erinevusele tarindi ja ruumiõhu suhtes, põrandjahutuse korral on 7 [W/(m²·K)];

s_i – torustiku ekvivalentse kihtide peale jäävate kihtide paksused [m];

λ_i – torustike ekvivalentsete kihtide peale jäävate kihtide soojuserijuhtivused [W/(m·K)].

1.2.2 Juhtimine

Kiirguslikele põrandasüsteemidele on aegade jooksul loodud erinevaid juhtimislahendusi. Enamik neist on loodud juhtima põrandkütet, kuid põrandjahutuse populaarsuse tõusuga on vaja arvestada teatud erisustega. Põrandjahutuse võimsust piiravaks teguriks peale soojusliku mugavuse tegurite on veel jahutava pinna kastepunkt, seetõttu on oluline jahutatavatel aladel mõõta suhtelist õhuniiskust ning jahutatava pinna temperatuuri [20].

ASHRAE pakub välja kolm juhtimisstrateegiat, mis sobivad juhtimaks põrandkütte- ning jahutussüsteemi [20]:

- 1) **Muutuv vooluhulk, konstantne temperatuur** – pealevoolu temperatuuri hoitakse konstantsena ning jahutusvajaduse kasvades suurendatakse vooluhulka läbi põrandakontuuri, põrandapinna temperatuur hoitakse ühtlasena;
- 2) **Konstantne vooluhulk, muutuv temperatuur** – vooluhulka kontuurides hoitakse konstantsena ning jahutusvajaduse kasvades alandatakse pealevoolu temperatuuri vastavalt vajadusel kuni arvutusliku väärtuseni, põrandapinna temperatuur hoitakse ühtlasena;
- 3) **Konstantne vooluhulk, konstantne temperatuur** – nii vooluhulk kui ka pealevoolu temperatuur on kontuurides konstantsed, jahutusvajaduse kasvades tõuseb tagasivoolu ning põrandapinna temperatuur. Väiksema jahutusvajaduse korral on põrandatemperatuur madalam.

Eeltoodud kolmest juhtimisstrateegiast tagab kõige sujuvama kontrolli teine valik ehk konstantne vooluhulk ning muutuv temperatuur pealevoolul [20].

Põrandkütte ning -jahutuse juhtimine on keeruline kuna süsteemil on suur soojuslik inert, mis muudab reageerimise sisemistele ja välimistele muutustele aeglasemaks. Seetõttu tuleb panna rõhku termiliselt inertsete süsteemide juhtimisloogikale, näiteks kasutada ära maksimaalselt eel-jahutamise potentsiaali, et vältida ülekuumenemist suvisel perioodil [27].

Eeljahutuse mõju on hinnatud konvektiivsete jahutussüsteemide puhul ning see on näidanud märgatavat energeetilist ning rahalist säästu [27], [28]. Põrandjahutuse eeljahutuse juhtimist on uuritud vähe [27]. Tarindite õine eeljahutamine eeldab tarindite suurt termilist massi, et tarindid suudaksid päeval rohkem soojust talletada [29].

Põrandapinna temperatuur põrandjahutuse korral on madalam kui ruumi õhutemperatuur. Seetõttu kui põrandapinna temperatuur langeb alla ruumiõhu kastepunkti hakkab põrandale kondenseeruma vett. Põrandapinna temperatuur sõltub jahutusvee pealevoolu temperatuurist, seega on oluline valida see hoolikalt, et vältida põrandapinnale kondenseerumist [20].

Kondensaadi tekke vältimine

Ilma eraldiseisva kuivatussüsteemita tuleb kondenseerumist vältida põrandjahutuse juhtimisega. Kondenseerumise vältimiseks võib rakendada külmakandja pealevoolu temperatuuri muutmist või vooluhulga juhtimist. Siseõhu temperatuuri seisukohalt tagab stabiilsema keskkonna pealevoolu temperatuuri muutmine [30].

Vastavalt juhendmaterjalide [19], [20], [31] on soovitatav võtta arvutuslikes tingimustes kondenseerumisohu vältimiseks selline pinnatemperatuur, mis on kastepunktist 0,5 kuni 2 °C kõrgem. Soovituslik varu sõltub tarindi massiivsusest (massiivsemale tarindile suurem varu) ning ruumi niiskustoodangust.

2 METOODIKA

Käesolevas peatükis on kirjeldatud uuritavat objekti ning modelleerimise põhimõtted. Lisaks kirjeldatakse läbiviidavaid simulatsioone. Modelleerimiseks ning simuleerimiseks kasutatakse simulatsioonitarkvara IDA ICE 4.8 [32].

Töös uuritakse põrandkütte baasil jahutusüsteemi toimivust kasutades simulatsioonitarkvara IDA ICE 4.8. Kasutades allikatena asjakohaseid normatiive, teadusartikleid ning valdkonna tootjate andmeid konstrueeritakse uuritavas hoones põrandjahutuse töö uurimiseks mudel ning juhtimisloogika. Uuritakse põrandjahutuse tööd nii arvutuslikel välisõhu tingimustel kui ka reaalsete kliimaandmetega. Luuakse erijuhud uurimaks põrandjahutuse tööd konkreetsematel juhtudel. Pakutakse välja tehnilised lahendused skeemide näol.

2.1 Uuritav hoone

Uuritavaks hooneks on valitud äripindadega korterelamu Tallinnas aadressil Kiikri 6. Hoone uurimisel on lähtutud põhiliselt põhiprojekti staadiumi dokumentidest, joonisest ning mudelitest.

2.1.1 Hoone arhitektuur

Arhitektuurse põhi-ja tööprojekti on koostanud PIN Arhitektid OÜ. Hoone koosneb kahest viiekorruselisest eraldiseisvast maapealsest hoone osast (A-hoone ning B-hoone) ning ühisest maa-alusest parkimiskorrusest. Hooneosad on põhja-lõunasuunalised paralleelselt murtud mahtudega, mis on oma suuruselt ja kõrguselt võrreldavad ümberkaudsete hoonetega.



Joonis 2.1 - Kiikri 6 renderdus vaadatuna kagust [33]

Hoone suletud netopind on kokku 10469,9 m², millest eluruumide pindala on 6507,2 m². Hoones on kokku 83 korterit ning 7 äripinda, millest 3 on lühiajaliseks majutamiseks [34]. Eelnevad majutusruumid ei erine oma tehniliste lahenduste ning kasutatavuse poolest hoones asuvatest korteritest ning käsitletakse käesolevas lõputöös korterite hulka, see tähendab et lõputöö mõistes on korterite koguhulk 86.

Varjestust pakuvad hoonele eenduvad rõdud, mis on piiritletud turvaklaasiga. Hoone konstruktsioonidena on kasutatud nii massiivseid kui ka mittemassiivseid tarindeid. Avatäited on projekteeritud puitaluminiiumprofiiliga ning klaasosad on ette nähtud kolmekihilise klaaspaketiga ning aknad on varustatud päikesevalgust peegeldava klaasiga [34].

2.1.2 Hoone küte, ventilatsioon ja jahutus

Hoone kütte, ventilatsiooni ja jahutuse põhiprojekti on koostanud Kliimakonsult OÜ. Hoone soojusallikaks on kaugküte, millega varustatakse hoone soojaveearustus, põrand- ning radiaatorkütte süsteemid. Maa-alusel parkimiskorrusel tagatakse õhkküttega temperatuur vähemalt +10 °C. Hoone on projekteeritud II sisekliima klassi, st jahutuga peab tagama sisetemperatuuri vähemalt +26 °C (vaata täpsustuseks peatükki 1.1) [35].

Põrandkütte magistraalitorud on ette nähtud parklas lae alla, kust nad jaotuvad mõlema hooneosa šahtidesse. Šahtidest on igal korrusel küttetorude väljundid ning koridori lae

all jaotatakse kütetorud korteriteni. Vahetult enne korteri sisendit asuvad dünaamilised tasakaalustusventiilid ning soojamõõtjad. Vesipõrandkütte arvutuslik temperatuurirežiim on $+40^{\circ}\text{C}/+35^{\circ}\text{C}$ [35].

Põrandkütte kollektorkapid asuvad reeglina torusisenditele võrdlemisi lähedal (tavaliselt esikus). Põrandkütte kontuuride soojusväljastust kontrollitakse 2-tee ventiili abil piirates vooluhulka läbi kontuuride. Põrandkütteks kasutatakse PEX-a plasttorusid mõõtudega 20x2,0 mm ning sammuga 200 mm. Vannitubades rakendatakse elektrilist põrandkütet. Hoone vesipõrandkütte soojusvõimsus on 165 kW [35].

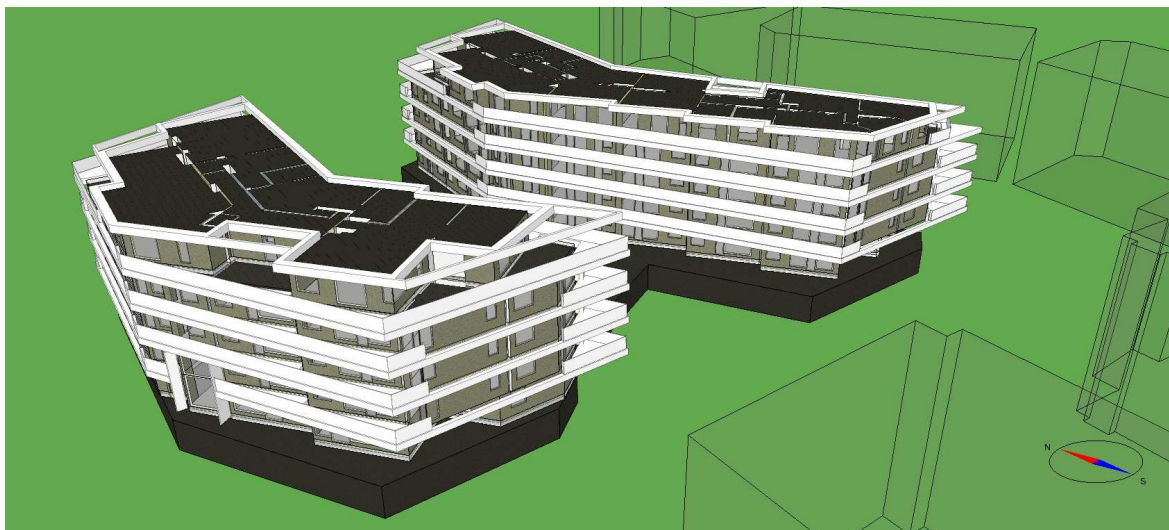
Käesolevas töös rakendatakse vastavalt KVJ põhiprojektist [35] kirjeldatud küttesüsteemi lahendusena töö peatükis 1.2 kirjeldatud teist lahendust, kus torustik paikneb hoone kandekonstruktsioonist termiliselt isoleeritud kihis.

Eluruumidele on ette nähtud korteripõhine rekuperatiivse soojustagastusega mehaaniline ventilatsioonisüsteem. Seadmete õhuvõtt ning väljavise toimub hoone fassaadilt. Ventilatsiooniseadmetel on ette nähtud sissepuhke õhu soojendamiseks elektriline küttekalorifeer. KVJ-süsteemidega ei ole ette nähtud mõjutada siseõhu suhtelist õhuniiskust [35].

Valitud korteritele on ette nähtud freonipõhine (multi)split-jahutussüsteem. Vajadus on määratud ruumi suvise sisetemperatuuri simulatsioonide põhised ja tellija soovide kohaselt. Siseseadmetena on ette nähtud kanalivahelised ning seinapealsed jahutusseadmed, välisosad on projekteeritud katusele [35].

2.2 Hoone modelleerimine

Hoone modelleeritakse ja simuleeritakse tarkvaraga IDA Indoor Climate and Energy (edaspidi IDA ICE) versiooniga 4.8 SP2 [32], mis võimaldab teha detaalseid simulatsiooni hoone energiatarbe ning sisekliima kohta.



Joonis 2.2 - Hoone terviklik mudel IDA ICE's

2.2.1 Tarindid

Hoone tarindid on modelleeritud vastavalt arhitektuurses põhiprojektis toodud väärtustele ning kirjeldustele. Materjalide soojustehnilised andmed on saadud tootjate andmetest ning standarditest. Tarindite modelleerimiseks kasutatud materjalide soojustehnilised andmed on välja toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 - Materjalide soojustehnilised andmed

Materjali nimetus	Soojuserihtivus λ [W/(m·K)]	Tihedus ρ [kg/m ³]	Soojuserimahutus c [J/(kg·K)]
Bituumen [36]	0,23	1100	1000
Betoonmüürikivi Columbia (täisbetoneeritud) [37]	1,19	1150	1050
Vahtpolüstüreen (EPS) [38]	0,037	25	1500
Isover Acoustic [39]	0,040	11	840
Isover Standard [40]	0,037	14	840
Kergblokk Bauroc (Acoustic) [41]	0,17	575	840
Kergblokk Bauroc (Classic) [41]	0,11	425	840
Kipsplaat [36]	0,25	700	1000
Kivivill [42]	0,038	37	800
Krohv [36]	0,80	1600	1000
Mineraalvill+metallroovitus (samm 600) [36]	0,037	40	839

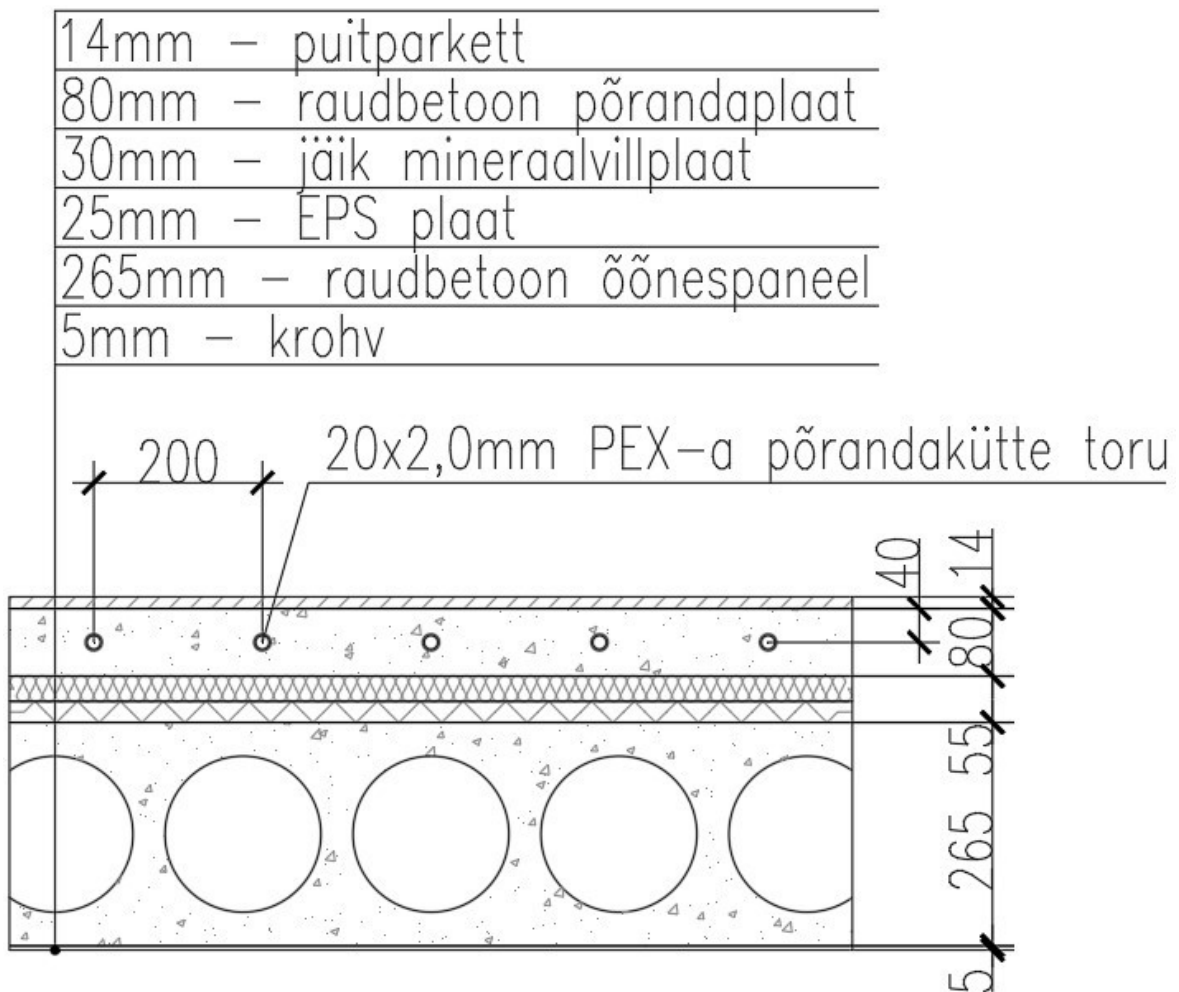
Materjali nimetus	Soojuseri juhtivus λ [W/(m·K)]	Tihedus ρ [kg/m ³]	Soojuserimahutuvus c [J/(kg·K)]
Parkett [36]	0,18	700	1600
Monoliitne raudbetoon [36]	2,3	2300	1000
Raudbetoon õõnespaneelid (h=265mm) [43]	1,2	1750	800
Tsementkiudplaat [36]	0,23	1200	1500
Vineer [36]	0,17	700	1600
Polüisotsüanuraat soojustus (PIR) [44]	0,022	30	1500
Ekstrudeeritud kõrgpolüstüreen soojustus (XPS) [45]	0,033	30	1500
Õhkvahet 20mm/30mm [46]	0,12	1,2	1008

Hoone modelleerimisel kasutatud tarindid on toodud lihtsustatud kujul tabelis 2.2. Tarindite täpsemad kirjeldused on välja toodud välja Lisas 1.

Tabel 2.2 - Hoone tarindid

Tarind	Tähis	U-arv [W/(m ² ·K)]	Märkus
Välissein	VS-1	0,60	Keldrikorruse sein vastu pinnast
	VS-2	0,13	Kortermaja välissein
	VS-3	0,18	Kortermaja välissein
	VS-4	0,13	Kortermaja välissein
Katuslagi	KL-1	0,10	Kortermaja katuslagi
	KL-2	0,11	Katuslagi korteri ning terrassi vahel
	KL-3	0,59	Keldrikorruse katuslagi vastu pinnast
Põrandpinnasel	PP-1	2,74	Keldrikorruusel vastu pinnast
Vahelagi	VL-1	0,51	Korteritevaheline vahelagi
	VL-2	0,19	Vahelagi äripindade ja keldri vahel
	VL-3	0,17	Vahelagi korteri ja keldri vahel
Sisesein	SS-1	3,71	Korteri sisesein
	SS-2	0,35	Korteri sisesein
	SS-3	1,31	Korteri šahtisein
	SS-4	0,49	Korteri sisesein
	SS-5	0,33	Korteri ja liftišahti vaheline sein
	SS-6	0,67	Korteri sisesein
	SS-7	0,24	Korteri sisesein
	SS-8	0,52	Korteri sisesein

Vahelae konstruktsiooni on kirjeldus on toodud allpool (vt Joonis 2.3).



Joonis 2.3 - Vahelae konstruktsioon

Joonsoojusläbivused on arvestatud vastavalt hoone energiamärgises kasutatud väärtustele, täpsemalt välja toodud tabelis 2.3.

Tabel 2.3 - Joonsoojusläbivused

Joonsoojusläbivus	W/(m·K)
Välissein-vahelagi	0,05
Välissein-sisesein	0,03
Välissein-välissein välisnurk	0,06
Akna seinakinnitus	0,05
Ukse seinakinnitus	0,05
Katuslagi-välissein	0,10
Põrandpinnasel-välissein	0,21
Välissein-välissein sisenuk	-0,06
Katuslagi-välissein sisenuk	-0,06
Põrandpinnasel-välissein sisenuk	-0,06

2.2.2 Avatäited

Aknaid iseloomustav info on võetud arhitektuurse projekti akende spetsifikatsioonist [34]. Akende osakaal välispiiretest on A-hoonel 26,2% ning B-hoonel 26,4%. Akende kogu soojusjuhtivuseks (klaas ning raam) on arvestatud $U=0,82 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, akna päikesefaktoriks (g-arvuks) $g=0,4$. Akende raamide osakaaluks on arvestatud akendel 18%, mis on hoone akende kaalutud keskmine raamide osakaal.

2.2.3 Varjestuselemendid

Varjestuselementidena on mudeldatud rõdud ning kirka turvaklaasiga rõdupiirded. Eenduvad rõdud ning turvaklaasiga piirded on mudeldatud SketchUpis [47] (vt Joonis 2.2 valged elemendid). Turvaklaasist piiretele on määratud läbipaistvus klaasi g-arvu põhjal, milleks on $g=0,90$ [48]. Läbipaistvuseks varjestuselemendile IDA ICEs on määratud 90%.

Ümbritsevad hooned

Ümberkaudsetest hoonetest modelleeritakse *building body* elementidega välja naaberhooned kuna need võivad heita varju uuritavale hoonele. *Building body* element võimaldab IDA ICEs kujutada hoonete geometriat [26]. Ümberkaudsed hooned on mudeldatud ligikaudse kujuga. Joonis 2.4 kujutleb ümberkaudsete hoonete paiknemist uuritava objekti suhtes.



Joonis 2.4 - Ümberkaudsed hooned

2.2.4 Kütte, ventilatsiooni ja jahutuse süsteem

Korteritele nähakse ette elektrilise küttekalorifeeriga ventilatsiooniseade, mille sissepuhke temperatuuriks on arvestatud +18 °C ning soojustagasti efektiivsuseks 76%. Ventilatsiooniseade töötab aastaringelt ning pideva tootlikkusega 24h päevas. Tsoonidele on määratud õhuhulgad vastavalt KVJ põhiprojektis toodule [35].

Põrandakontuuride modelleerimine

Põrandakontuuride modelleerimisel kasutatakse IDA ICEs objekti *heating/cooling floor* (edaspidi hc-floor), mis paigutab põrandasse soojusvahetus tasapinna imiteerimaks põrandakontuure [26]. Põrandakontuuri pindala viiakse vastavusse korteris/toas kontuuri all oleva pindalaga. Põrandjahutuse ülesehitusel lähtutakse projekteeritud põrandkütte juhtimisest. Vastavalt KVJ põhiprojektis toodule [35] toimub kontuuride massivooluhulga kontroll 2-tee ventiili abil. Hc-floori elemendi täitmise näide toodud joonisel 2.5.

Floor heating and cooling (temperature control)		
	Cooling	Heating
Design power	27.8	27.8
	1660.0	1660.0
		W/m ²
		W
dT(water) at design power	5	5
		°C
Controller	Põrandkütte ja -jahutus	
Sensor	Surface temperature	

Coil massflow	
<input checked="" type="radio"/> Flow control (2 way valve)	
<input type="radio"/> Temperature control (3 way valve). Flow given by Design power and this DeltaT:	n.a. °C

Location in slab	
Depth under surface	0.054 m

Heat transfer coefficient	
H-water-pipe-fin*	27.1 W/(m ² ·K)

* In the nomenclature of the EN 15377-1 standard:
 $1/H\text{-water-pipe-fin} = R_w + R_r + R_x = R_t - R_z$

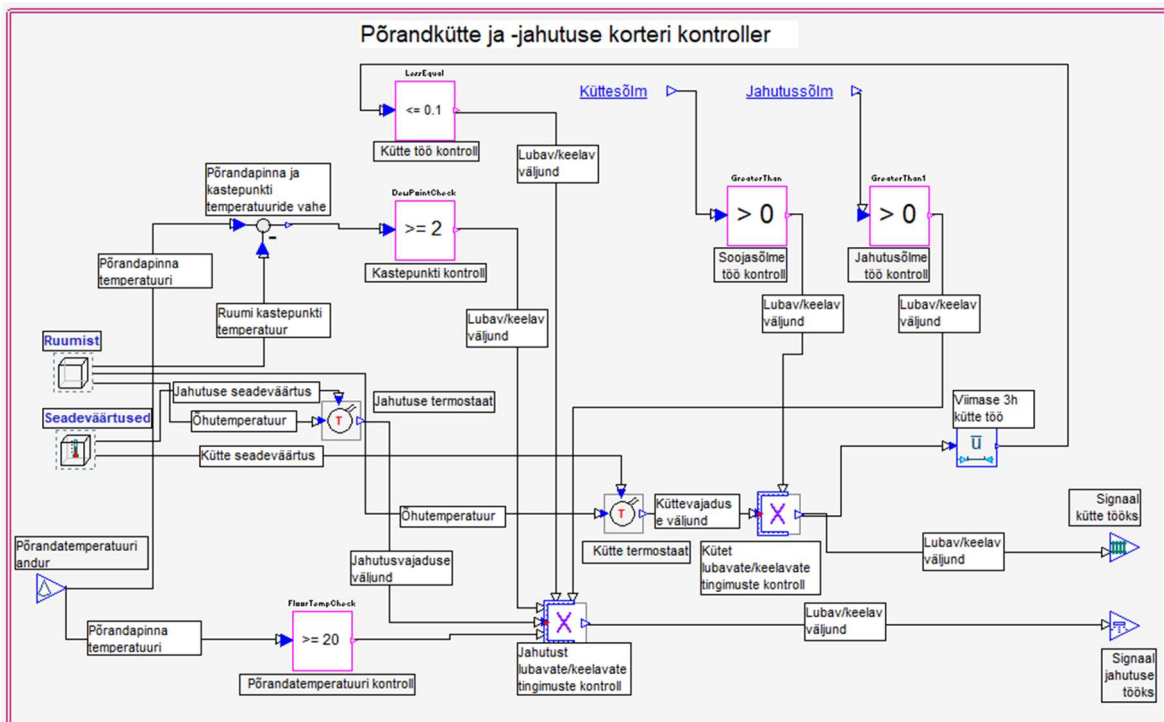
Joonis 2.5 - Põrandkütte objekti näide

Kütte- ning jahutusvõimsused on võetud KVJ põhiprojektist vastavalt kontuuride võimsusele [35]. IDA ICE kasutab sisestatud võimsust selleks, et määrata maksimaalne massivooluhulk kontuuris ning ei iseloomusta täpset soojusülekanne pinnaühiku kohta

[32]. Temperatuuritõus kontuuris on arvestatud võrdväärseks temperatuurilanguga kütte puhul, milleks on 5°C. Sellisel juhul jäävad massivooluhulgad kontuurides nii jahutus- kui ka kütterežiimis võrdseteks ning süsteemi ei pea täiendavalt tasakaalustama [25]. Vastavalt KVJ põhiprojektis toodule [35] toimub kontuuride massivooluhulga kontroll 2-tee ventiili abil. Kontuuri sügavuseks on arvestatud 54 mm, millest puitparkett on 14 mm ning monoliitne raudbetoon põrandaplaat 40 mm. Soojusülekanne koefitsienti arvutamisel lähtutakse *general resistance* meetodist [24]. Kontrollerile on loodud juhtimisalgoritm, mida kirjeldatakse täpsemalt järgmises punktis.

Põrandakontuuride juhtimine

Põrandakütte ning -jahutuse juhtimiseks luuakse IDA ICEs kontrolleri juhtimisalgoritm (vt joonis 2.6). Juhtimisalgoritmi koostamisel keskendutakse eelkõige jahutusrežiimi juhtimisele, küttele luuakse lihtsam juhtimisalgoritm. Põrandkütte ja -jahutuse korteri kontrolleri loomisel lähtutakse valdkonna tootjate juhendmaterjalidest [49]–[52].



Joonis 2.6 - Põrandkütte ja -jahutuse juhtimisalgoritm

Kütte juhtimisel kasutatakse kütte termostaati, mille sisenditeks on ruumist saadavat kütte seadeväärtust (milleks on +21 °C) ning ruumiõhu temperatuur. Kütte termostaat saadab edasi lubava või keelava väljundi. Lisaks kontrollitakse, kas soojussõlmes on kütte tööks tingimused tagatud, st kontrollitakse, kas küttesõlm töötab. Kui kaks eelnevat tingimust on lubatud, siis rakendatakse kütterežiim.

Jahutuse töötamiseks peavad olema täidetud allolevad viis tingimust:

- Jahutuse termostaadi sisenditeks on ruumiõhu temperatuur ning jahutuse seadeväärtus. Kui ruumiõhu temperatuur ületab jahutuse seadeväärtuse, siis on termostaat saadab edasi jahutuse tingimuste kontrolli lubava väljundi;
- Põrandapinna temperatuuri anduriga mõõdetakse toa põrandapinna temperatuur. Seejärel võrreldakse seda tingimusega, kus põrandapinna temperatuur peab olema +20 °C või suurem. Kui põrandapinna temperatuur on võrdne või suurem kui +20 °C, siis saadetakse jahutuse tingimuste kontrolli lubav väljund;
- Kondenseerumise vältimiseks mõõdetakse põrandapinna temperatuuri ning ruumi kastepunkti temperatuuri. Seejärel kontrollitakse, kas põrandapinna ning kastepunkti temperatuuri vahe on vähemalt 2 °C, kus põrandapinna temperatuurist lahutatakse kastepunkti temperatuur. Kui eelnev vahe on vähemalt kahekraadne, siis saadetakse jahutuse tingimuste kontrolli lubav väljund;
- Vältimaks kütte- ning jahutusrežiimide liigset vaheldumist arvestatakse ajaoluga, et jahutuse tööks ei tohi olla kütterežiim lubatud viimase kolme tunni jooksul. Selleks mõõdetakse viimase kolme tunni kütterežiimi väljundit ning juhul kui kütte väljund pole ettenähtud aja jooksul olnud lubatud, siis saadetakse jahutuse tingimuste kontrolliks lubav väljund;
- Kontrollitakse, kas jahutussõlmes on jahutuse tööks tingimused tagatud, st kontrollitakse, kas jahutussõlm töötab.

Juhul kui kõik eelnevad viis tingimust on lubava väljundiga, siis rakendub jahutusrežiim.

Põrandjahutuse parameetrite määramine

Põrandjahutuse pealevoolu temperatuuri määramiseks *general resistance* meetodit [25], mis kirjeldab soojuslevi lihtsustatult lineaarsel kujul. Sama metoodikat rakendab ka oma arvutustes IDA ICE [26]. Põrandapinna temperatuur valitakse selline, mis välistab suure tõenäosusega kondenseerumise põranda pinnal, kuna suhtelist niiskust kontrollivaid meetmeid ei rakendata. Arvestatakse soojussisaldusega temperatuuril +27 °C ning suhtelisel õhuniiskusel 60%, mis on kondensaadivabade jahutussüsteemide soovituslikud arvutusparameetrid [53], [54]. Sellisel juhul on kastepunktiks temperatuur +18,6 °C.

Vastavalt juhendmaterjalide [19], [20], [31] on soovitatav võtta kondenseerumisohtu vältimiseks selline arvutuslik pinnatemperatuur, mis on arvutuslikus olukorras kastepunktist 0,5 kuni 2 °C kõrgem. Soovituslik varu sõltub tarindi massiivsusest (st massiivsemale tarindile suurem varu) ning ruumi niiskustoodangust. Käesoleval juhul valitakse selleks 1,4 °C, st põrandapinna temperatuur ei tohi langeda alla +20 °C. Selline põrandapinna temperatuuri väärtus on kõrgem peatükis 1.1. kirjeldatud minimaalse põrandapinna temperatuuri. Pinnatemperatuuri +20 °C kasutatakse, et määrata pealevoolu temperatuur, kus kondensaadivastane kaitse rakenduks võimalikult vähe ning tagaks süsteemi sujuva töö.

Kasutades peatükis 1.2.1 kirjeldatud meetodikat ning lähteandmeid tabelis 2.4 leitakse jahutusvee temperatuurirežiim ning vajalik soojusülekanndetegur IDA ICE hc-floor elemendi tarbeks.

Tabel 2.4 - Lähteandmed jahutusvee peale- ja tagasivoolu temperatuuride leidmiseks

Tähis	Kirjeldus	Suurus	Ühik
c	vee erisoojus	4200	kJ/(kg·K)
$\theta_{S,m}$	keskmise põrandapinna temperatuur	20	°C
θ_i	keskmise siseõhu temperatuur	26	°C
W	torustiku samm	0,20	m
d_a	toru välisdiameeter	0,02	m
s_r	toruseina paksus	0,002	m
$m_{H,sp}$	massivooluhulk torus	0,0228	kg/s
l	torustiku pikkus	69,9	m
λ_r	toruseina soojuserijuhtivus	0,35	W/(m·K)
λ_b	torustikku ümbritseva materjali soojuserijuhtivus	2,3	W/(m·K)
h_t	Põrandjahutuse soojusülekanndetegur	7	W/(m ² ·K)
s_1	parketi paksus	0,014	m
s_2	raudbetoonplaadi paksus toru teljest	0,002	m
λ_1	parketi soojuserijuhtivus	0,18	W/(m·K)
λ_2	raudbetooni soojuserijuhtivus	2,3	W/(m·K)

Eeltoodud tabelis massivooluhulk torus $m_{H,sp}$ ning torupikkus l on aritmeetiliselt keskmistatud terve hoone kontuuride peale, et IDA ICEs oleks võimalik rakendada sama koefitsienti igal kontuuril. Eeltoodud parameetrite keskmistamise mõju ülekanndetegurile on marginaalne.

Tabel 2.5 – Põrandjahutuse parameetrite määramise tulemused

Tähis	Kirjeldus	Suurus	Ühik
R_w	torusiseseina ja vedeliku vaheline takistus	0,0006	(m ² ·K)/W
R_r	toruseina takistus	0,0203	(m ² ·K)/W
R_x	toru välispinna ja ümbritseva keskkonna takistus	0,0160	(m ² ·K)/W
R_i	pinna soojusülekannde ning tarindi takistus	0,2380	(m ² ·K)/W
R_t	ekvivalentne takistus	0,2749	(m ² ·K)/W
$K_{H/C}$	ekvivalentne soojusülekanndetegur	3,6373	W/(m ² ·K)
$\Delta\theta_{H/C}$	soojus- või külmakandja ja ruumiõhu logaritmiline temperatuuride vahe	11,5	°C
t_{pv}	külmakanda pealevoolu temperatuur	12	°C

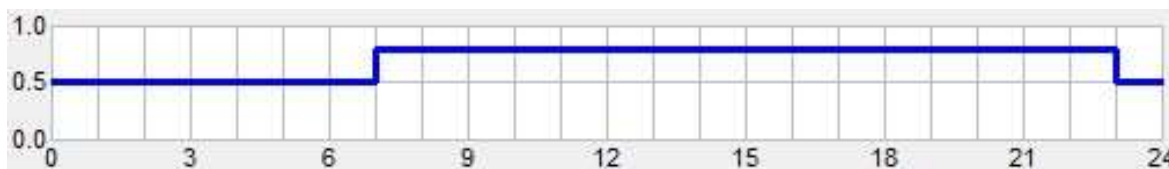
Tähis	Kirjeldus	Suurus	Ühik
t_{pv}	külmakanda pealevoolu temperatuur	17	°C
H-water pipe fin	IDA ICEs sisestatav soojusülekanndetegur	27,1	W/(m ² ·K)

IDA ICE küsitav soojusülekanndetegur (vt Joonis 2.5 viimane täidetav lahter) arvestab toruseina ja vedeliku vahelist takistus, toruseina takistust ning toru välispinna ja ümbritseva keskkonna takistust ehk $R_w + R_r + R_x$. Konkreetset juhul saadi tulemuseks 27,1 W/(m²·K), mis on ligilähedane IDA ICE enda pakutud 30 W/(m²·K) betoonis asetsevate torude puhul. Külmakandja pealevoolu temperatuur leitakse olukorras, kus maksimaalne siseõhu temperatuur on +26 °C ning põrandapinna minimaalne temperatuur +20 °C. Külmakandja pealevoolu temperatuur valitakse +12 °C.

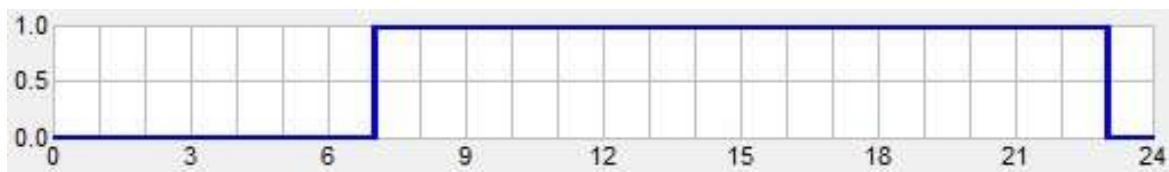
2.2.5 Vabasoojused

Vabasoojuste arvestamisel lähtutakse majandus- ja taristuministri määruses nr 58 [55] toodud korterelamu vabasoojuste väärtustest ning kasutusgraafikutest.

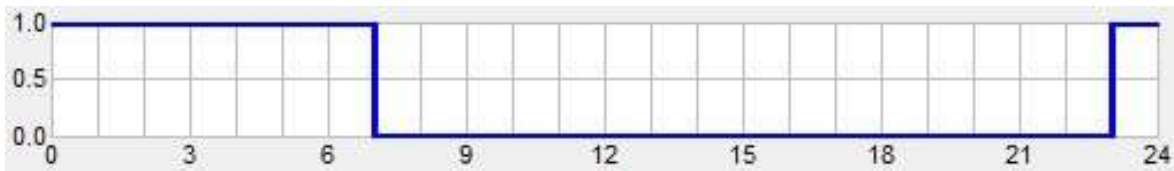
Pirolukorra ning erijuhtude hindamiseks modifitseeritakse määruses toodud kasutusgraafikuid. Luuakse olukord, kus eeldatakse, et inimesed asuvad pidevalt eluruumides. Inimeste arv võetakse magamiskohtade järgi, näiteks kolme magamistoaga korterisse arvestatakse neli inimest, kaks täiskasvanut ning kaks last. Täiskasvanute soojuseralduseks arvestatakse 1,2 met ning lastele 1,0 met, seadmete ning valgustuse vabasoojused pinnaühiku kohta on jäetud muutmata.



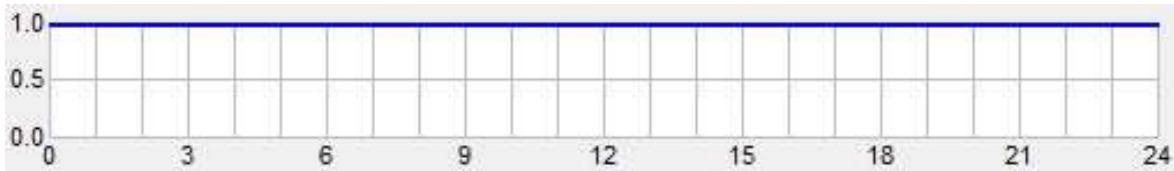
Joonis 2.7 - Seadmete kasutusgraafik (vertikaalteljel kasutusaste ning horisontaalteljel kellaeg)



Joonis 2.8 - Elutoa kasutusgraafik (vertikaalteljel kasutusaste ning horisontaalteljel kellaeg)



Joonis 2.9 - Suure magamistoa kasutusgraafik (vertikaalteljel kasutusaste ning horisontaalteljel kellaaeg)



Joonis 2.10 - Väikese magamistoa kasutusgraafik (vertikaalteljel kasutusaste ning horisontaalteljel kellaaeg)

Seadmete kasutusgraafiku modifitseerimisel on lähtunud määruses [55] toodud kasutusgraafiku miinimumväärtusest ning maksimumväärtusest. Muutmise loogika lähtub sellest, et päeval ajal on rakendatud määruses toodud maksimum väärtus, milleks on 0,8 ning öisel ajal miinimumväärtus, milleks on 0,5 (vt joonis 2.7). Elutoas arvestatakse inimeste hulgaks päeval ajal kaks täiskasvanut ning öisel ajal null, suures magamistoaas on vastandolukord (vt joonis 2.8 ja 2.9). Väikestes magamistubades arvestatakse inimeste hulgaks üks laps, kelle kohalolek ruumis on pidev (vt joonis 2.10). Vastavate muudatuste tegemine tõstab vabasoojustest tulevat energiahulka ligikaudu 30%.

2.2.6 Tehnilised lahendused

Käesolevas töös uuritakse tehniliste lahendustena kahetoru- ja neljatorusüsteeme.

Kahetorusüsteem

Kahetorusüsteemi puhul kasutatakse nii kütmiseks kui ka jahutamiseks sama magistraalorustikku, see tähendab, et kas kogu majaosa saab olla kas kütte- või jahutusrežiimis. Kütte- ning jahutusrežiimi ümberlülituse tegemisel juhindutakse vastavalt küttevajadusele. Kahetorusüsteemi kirjeldavad joonised on toodud töö graafilises osas (joonised 1 ja 5). Kahetorusüsteemi korteri ühendusskeem ei erine suurelt osalt põrandkütte skeemist. Lisatud on referentsandur, millega mõõdetakse peale ruumitemperatuuri ka ruumi suhtelist õhuniiskust ning põrandapinna temperatuuri. Referentsanduri põhjal juhatakse kondenseerumist vältivate meetmete rakendumist. Referentsandur oleks seega mõistlik paigaldada ruumi, kus on kõige suurem kondenseerumisoht. Kahetorusüsteemi soojus- ja külmasõlme skeemile on lisatud soojusvahetid, mida saab vastavalt kütte- ja jahutusrežiimile lülitada hooneosa

teenindama. See tähendab, et üks hooneosa saab olla kas kütte- või jahutusrežiimis vastavalt sellele kumba soojusvahetit kasutatakse.

Neljatorusüsteem

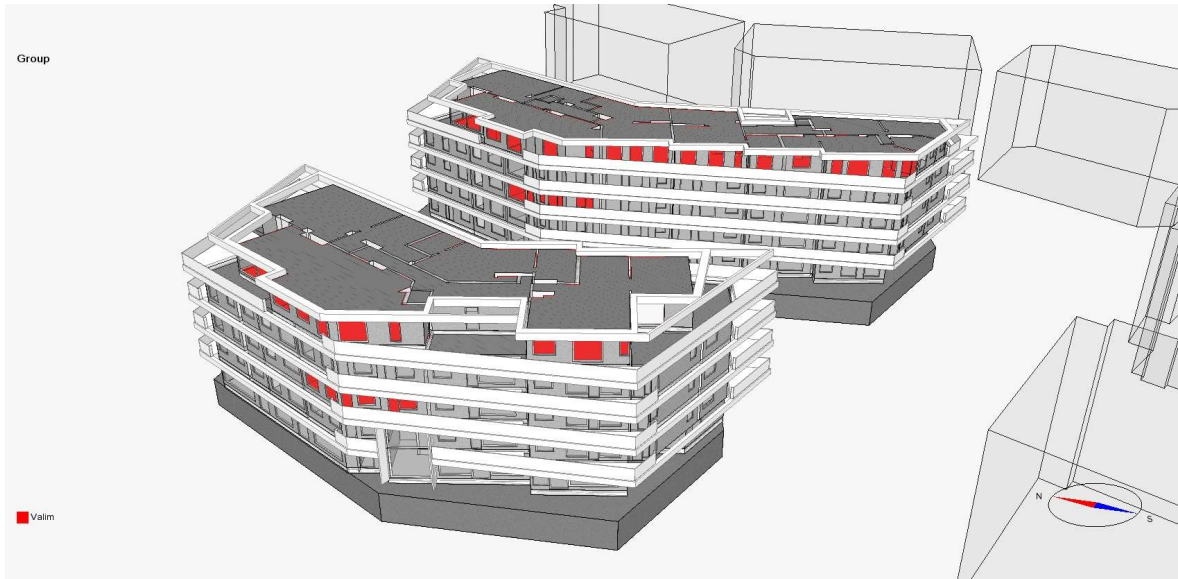
Neljatorusüsteemi puhul kasutatakse kütmiseks ning jahutamiseks eraldiseisvat magistraaltorustikku. See loob olukorra, kus iga korter saab vastavalt vajadusele kütta või jahutada. Neljatorusüsteemi kirjeldavad joonised on toodud töö graafilises osas (joonised 2; 3; 4 ja 6). Neljatorusüsteemi korterite ühenduskeemide puhul on välja toodud kolm erinevat ühendusviisi, mis erinevad omavahel ainult ümberlülituseks mõeldud ventiilide poolest. Neljatorusüsteemil toimub lülitus kütte- ja jahutusrežiimi vahel korteripõhiselt kasutades selleks ajamitega ventiile, mis saavad signaali korterikontrollerilt. Neljatorusüsteemi soojus- ja külmasõlme skeemile on lisatud jahutusele analoogne lahendus kui seda on küttel.

2.3 Simulatsioonid

Alapeatükis kirjeldatakse läbi viidavaid simulatsioone. Simuleerimisel kasutatakse Eesti aasta kliimafaili [56] ning aasta 2014 kliimafaili hindamaks pörandjahutusesüsteemi toimivust üleminekuperioodil ning soojal suvel. Kuigi hoonesse on ette nähtud ka õhk-õhk konditsioneerid, siis käesolevas töös neid arvestata kuna keskendutakse pörandjahutuse uurimisele.

2.3.1 Jahutuskooormuse määramine

Simuleeritakse kogu hoone korterite jahutuskooormust *ideal cooler* jahutuselementidega, mis võimaldavad määrata korterite jahutusvõimsust määramata täpset jahutuselementi. Selleks et töömaht ei muutuks liiga suureks valitakse tulemustest välja üheksa korterit, mis on ligi 10% kogu eluruumide hulgast. Eesmärgiks on valimisse võtta korterid kus on kõige suurem soojuskooormus pörandapinnale, et uurida kuidas mõjutab pörandkütte baasil projekteeritud jahutussüsteem siseõhu temperatuuri. Valitud korteriteks ostusid A-hoone korterid 18; 34; 36 ja 37 ning B-hoone korterid 65; 67; 80; 88 ja 89 (vt joonis 2.11).



Joonis 2.11 - Korterite valim

Tabelis 2.6 on välja toodud ruumide akende pinna osakaal põrandapinnale (inglise keeles *window-to-floor ratio* (lühidalt WFR)) ning ilmakaar, kuhu aknad on suunatud. Ruumides, kus on aknad mitmes suunas, on toodud ilmakaar, kuhu on suunatud enim aknaid (akna pinna põhjal arvestatuna). Ilmakaarte puhul tähistab „N” põhja, „S” lõunat, „E” ida ning „W” läänt. Valimis on kõige rohkem aknaid suunatud läände. Keskmine akna pinna osakaal põrandapinnast on valimis 0,31.

Tabel 2.6 - Ruumide akna pinna osakaal põrandapinnale ning akende ilmakaar

Akna pinna osakaal põrandapinnale										
Korter		18	34	36	37	65	67	80	88	89
Tuba	Elutuba/köök	0.25	0.40	0.20	0.32	0.31	0.23	0.27	0.22	0.39
	Suur magamistuba	0.36	0.31	0.25	0.36	0.31	0.62	0.37	0.28	0.20
	Magamistuba 1	0.29	0.23	0.30	0.21	0.39	0.26	0.39	0.37	0.32
	Magamistuba 2	-	0.27	0.23	0.19	0.35	-	-	0.40	0.27
Ilmakaar										
Tuba	Elutuba/köök	W	W	E	S	E	W	W	E	W
	Suur magamistuba	W	W	N	W	W	W	W	W	W
	Magamistuba 1	W	W	N	W	W	W	W	W	W
	Magamistuba 2	-	W	E	E	W	-	-	W	W

2.3.2 Põrandjahutuse jahutusvõimsus

Korterite valimil ideaalsed jahutus- ning kütteseadmed asendatakse hc-floor elementidega, täpsemaks kirjelduseks vaata punkti 2.2.4. Vabasoojustena kasutatakse peatükis 2.2.5 kirjeldatud kõrgendatud väärtusi ning kasutusgraafikuid, mis arvestavad inimeste pidevat kohalolu.

Korterite valimiga simuleeritakse läbi erinevatel seadeväärtustel suvised jahutusarvutused, uurimaks, kas ja millisel seadeväärtusel suudetakse tagada siseõhu temperatuur ettenähtud piires. Väliskliima arvutuslikeks parameetriteks arvestatakse kondensaadivaba süsteemi näol välisõhutemperatuuriks +27 °C ning suhteliseks õhuniiskuseks 60% [53], [54], st märja termomeetri temperatuur on +21,2 °C. Arvutuspäeva minimaalse temperatuuri määramisel kasutatakse ASHRAE Fundamentalsis [57] kirjeldatud meetodikat. Meetodikas kasutatakse kohalikku päikeseaega, päevast maksimaalset õhutemperatuuri ning empiirilist tabelit, mis kirjeldab päevast temperatuurikõikumist. Eelnevate väärtuste abil leitakse arvutuspäeva välistemperatuuri tunniväärtused. Arvutuslike tingimuste temperatuurisinusoidi miinimumväärtuseks tuleb +19°C.

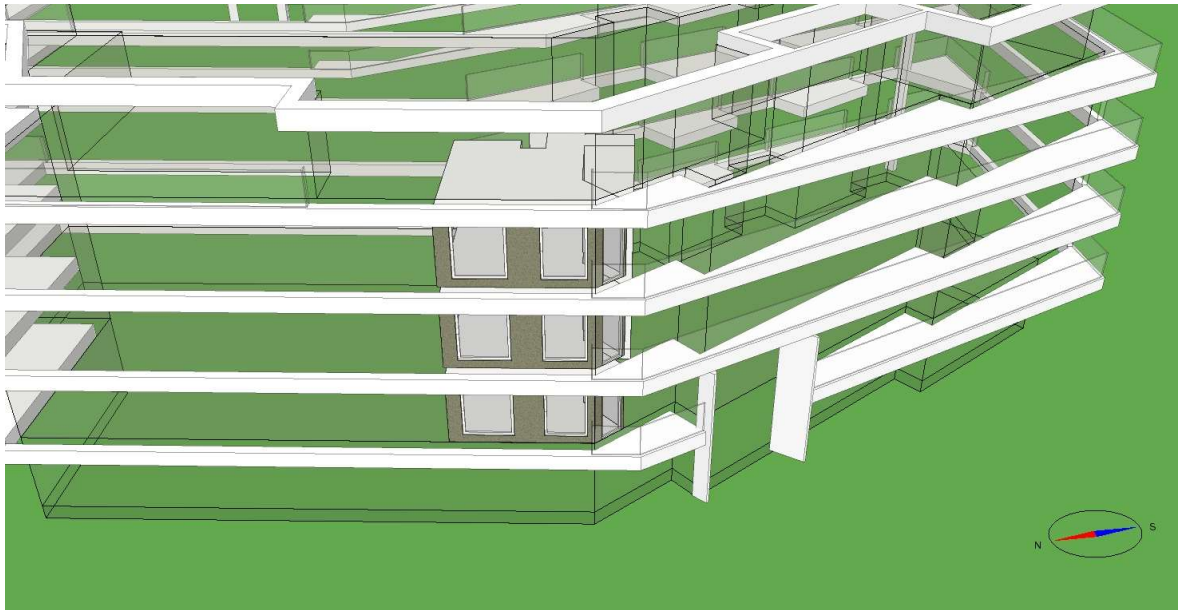
IDA ICEs mudeldatakse välja valimi korterid ruumide täpsustega ning määratakse korrektsed sisetarindid, ukсед ning KVJ-projektijärgsed põrandakontuuride pindalad. Simulatsioonidega tahetakse teada saada kuidas mõjutavad erinevad seadeväärtused ning öine seadeväärtuste alandamine põrandjahutuse tööd arvutuslikel tingimustel.

Jahutuse seadeväärtustena kasutatakse väärtusi: +26°C; +25°C; +24°C; päevane seadeväärtus +26°C ning öine seadeväärtus +24°C ja päevane seadeväärtus +25°C ning öine seadeväärtus +23°C. Kusjuures seadeväärtuste muutmise juures peatakse päevaseks ajaks ajavahemikku 07:00 kuni 23:00 ning öine ajavahemik 23:00 kuni 07:00. Öise temperatuuriseade alandamisega jahutatakse tarindeid enne päeva maha, et alandada päevast siseõhu temperatuuri tippu.

2.3.3 Erijuhud

Erijuhtudena uuritakse põrandjahutuse mõju siseõhu temperatuurile kohakuti paiknevates ruumides ning kõrgendatud niiskuskooormust ja akna avamise mõju. Selle tarbeks mudeldatakse välja kolm kohakuti identset köök-elutuba, kus vaadeldakse keskmise ruumi siseõhu temperatuuri. Valitakse korterite 10; 18 ning 26 (korterid alt üles) kohakuti köök-elutoad uurimisobjektideks, mis on toodud välja joonisel 2.12. Vabasoojustena kasutatakse peatükis 2.2.5 kirjeldatud võimendatud väärtusi, mis

arvestab inimeste pidevat kohalolu. Väliskliimana kasutatakse aasta kliimafaili [56] ning uuritakse võrdlemisi sooja ning päikselist nädalat vahemikus 3.07 kuni 9.07.



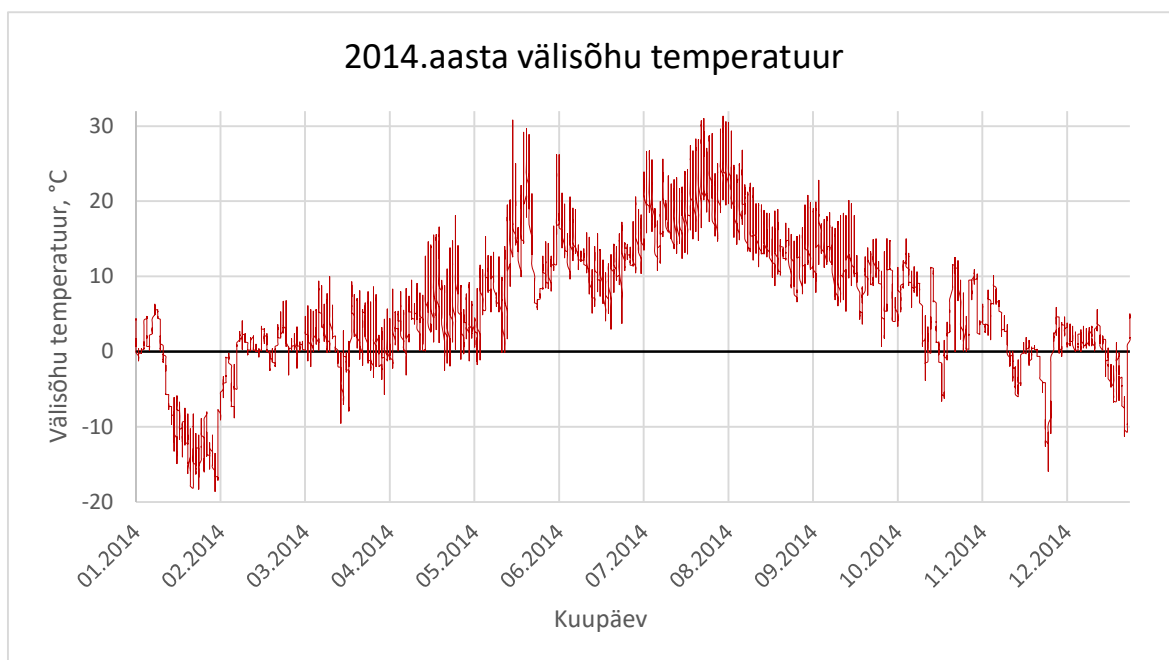
Joonis 2.12 - Kohakuti korterite valim IDA ICEs

Uuritava ruumi siseõhu temperatuuri vaadeldakse juhul kui ülemises ruumis pole põrandjahutus töös ning juhul kui alumises ruumis pole põrandjahutus töös. Ruumis, kus põrandjahutus ei tööta, eemaldatakse ka vabasoojused inimeste ning valgustuse näol ning jäetakse seadmete vabasoojus pideva 0,5 graafikuga, kirjeldamaks olukorda, kus näiteks ülemised/alumised naabrid lähevad kodust ära ning ei rakenda äraoleku ajal jahutust. Tulemusena saadakse kuidas mõjutab ülemise ja alumise korteri käitumine uuritava korteri siseõhu temperatuuri.

Kõrgendatud niiskuskooormusega juhul lisatakse uuritavasse köök-elutuppa lisa niiskuskooormused toidutegemise, nõudepesu ning taimede näol. Arvestatud on vastavalt korterile 3-liikmelise perekonnaga ning niiskuslisa väärtused on võetud ASHRAEst [57]. Arvestatakse inimeste pidevat kohalolu päeval (vahemik 7-23-ni) ning niiskuslisana on arvestatud söögi tegemine ning nõudepesu hommikul, lõunal ning õhtul vastavalt 275 g, 300 g ning 790 g. Lisaks arvestatakse taimede niiskuslisa näol pidevalt 30 g/h. Uuritavaks vahemikuks on samuti arvestatud 3.07 kuni 9.07. Uuritakse veel akna tuulutusasendisse avamise mõju ruumiõhu temperatuurile. Akna tuulutusasendisse avamise puhul arvestatakse, et aken avatakse inimeste kohalolu ajal ning akna tuulutusasendi avatud osakaal on 10% akna pinnast.

2.3.4 Põrandjahutuse toimivus soojal üleminekuperioodil ning suvel

Kasutatakse 2014. aastal Harkus mõõdetud tulemustega kliimafaili, et hinnata põrandjahutuse mõju siseõhu temperatuurile arvestades kevadist ning sügisest üleminekuperioodi ning keskmisest soojemal suvel. Simulatsioonid viiakse läbi nii kahetoru- kui ka neljatorusüsteemidega. Vabasoojustena arvestatakse majandus- ja taristuministri määruses nr 58 [55] toodud korterelamu vabasoojuste väärtustest ning kasutusgraafikutest. Seadeväärtuseks kasutatakse +24°C lähtudes sellest, et arvutuslikel tingimustel tagas konkreetne seadeväärtus enamustes ruumides temperatuuri alla piirväärtuse. Siseõhu temperatuuri väärtusi uuritakse eelkirjeldatud üheksa korteri valimil.

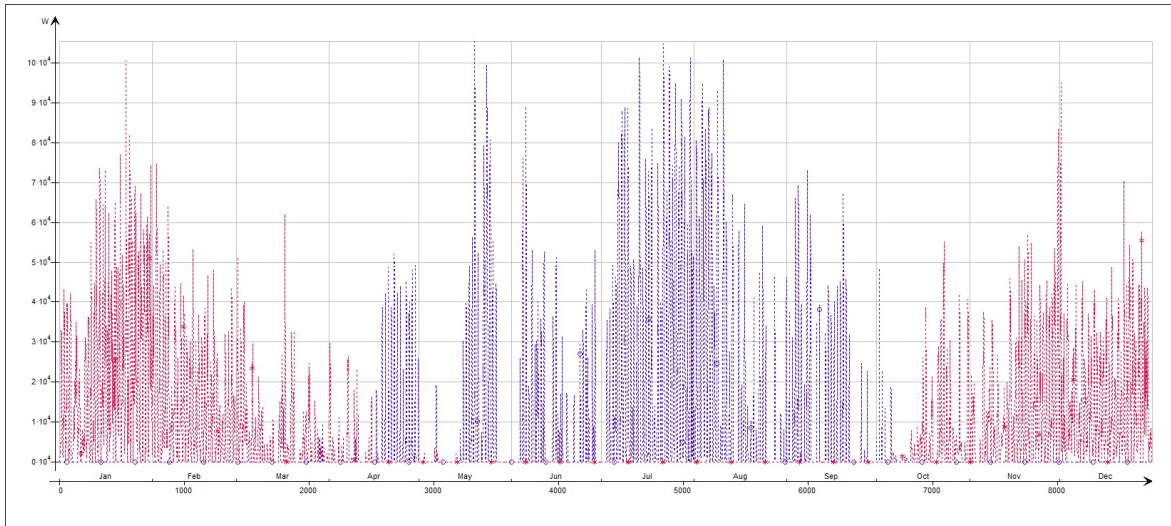


Joonis 2.13 - 2014. aasta välisõhu temperatuurid

Joonisel 2.13 on toodud 2014. aasta välisõhu temperatuurid. Tüüpilisest aastast kõrgemaid välisõhu temperatuure on näha mai keskpaigast kuni augusti esimeste nädalateni. Mingil määral on jahedamat perioodi juunikuus.

Kahetorusüsteemi puhul kasutatakse nii kütmiseks kui ka jahutamiseks sama magistraalitorustikku, see tähendab, et kas kogu maja saab olla kas kütte- või jahutusrežiimis. Kütte- ning jahutusrežiimi ümberlülitus tehakse vastavalt küttevajadusele, mis määratakse antud juhul hoone aastase kütte- ning jahutusvajaduse simulatsiooniga.

Kahetorusüsteemi puhul pannakse paika vastavalt hoone kütte- ning jahutusvajadusele kütte- ning jahutusperiood. Hoone kütte- ning jahutusvajadus on välja toodud joonisel 2.14 on välja toodud hoone jahutus- ning küttevajadus. Alumisel teljel on näidatud aeg ning vertikaalsel teljel võimsus. Joonisel 2.14 on punasega tähistatud küttevajadus ning sinisega on tähistatud jahutusvajadus. Juhindudes sellest, määratakse kütteperioodiks vahemik 7. oktoobrist 19. aprillini ning jahutusperioodiks vahemik 20. aprillist 6. oktoobrini.



Joonis 2.14 - Hoone kütte- ning jahutusvajadus 2014. aasta kliimafailiga

Neljatorusüsteemi puhul kasutatakse kütmiseks ning jahutamiseks eraldiseisvat magistraaltorustikku. See loob olukorra, kus iga korter saab vastavalt vajadusele kütta või jahutada.

3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

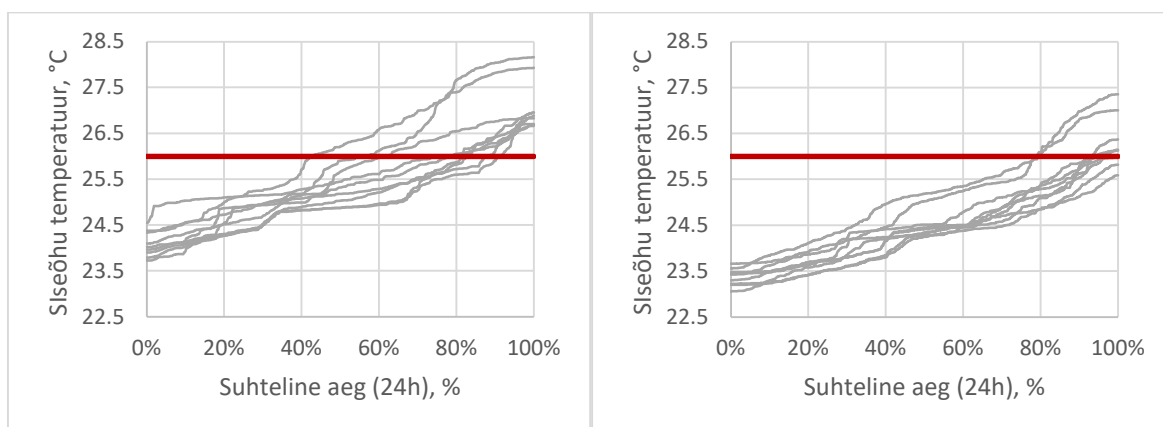
Käesolevas peatükis esitletakse simulatsioonidest saadud tulemused ning teostatakse nende põhjal analüüs ning järeldused.

3.1 Põrandjahutuse jahutusvõimsuse arvutuste tulemused

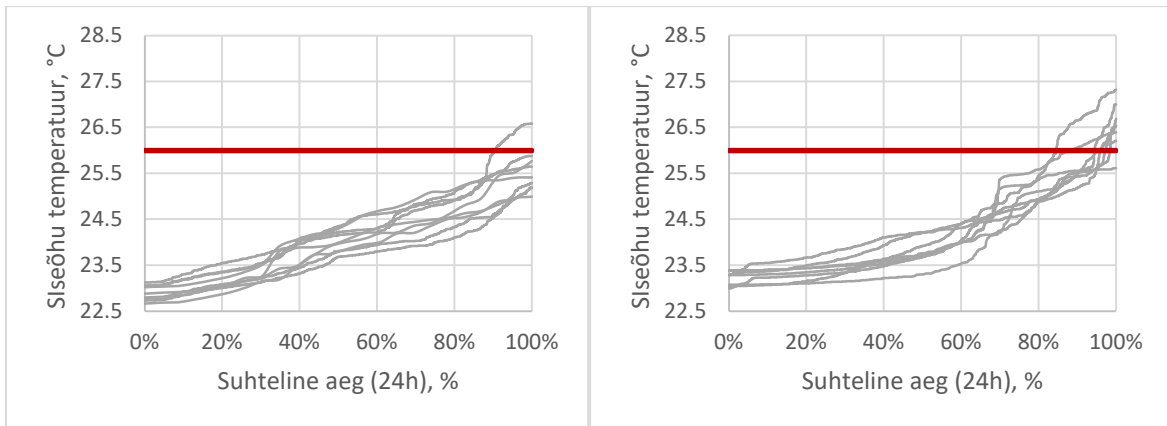
Simuleeriti kõige ebasoodsamas olukorras kortereid, simulatsioonid teostati toa täpsusega. Vaatluse alla võeti eelkirjeldatud 9 korteri valimist elutuba-köök tüüpi ruumid. Simulatsioonide kiiremaks toimimiseks kustutati mudelist kõik tsoonid, mis ei olnud uuritavate korterite kõrval. Tulemused võeti iga toa kohta kõige ebasoodsamast kuust.

Simulatsioonide käigus selgitati temperatuuri seadeväärtuse mõju õhutemperatuurile ning põrandapinna temperatuurile. Õhutemperatuuri piirväärtuseks võeti vastavalt sisekliima II klassile $+26^{\circ}\text{C}$ [16], põrandapinna minimaalseks temperatuuriks võeti $+20^{\circ}\text{C}$ ning soovituslikuks piiriks puitpõrandatele palja jala korral arvestati $+23^{\circ}\text{C}$ (vt Tabel 1.1).

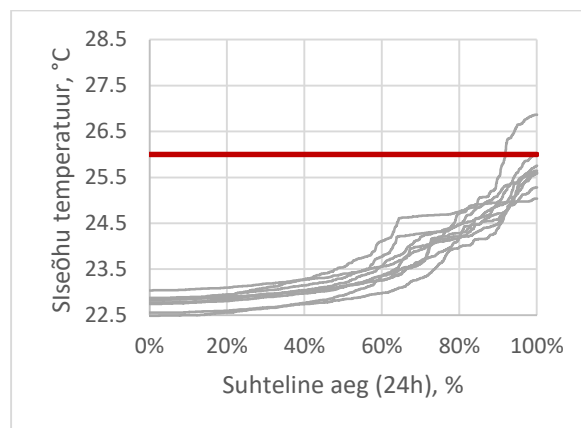
Temperatuuride graafikud esitatakse kestvusgraafikute näol, kus ajalise telje maksimaalväärtuseks on 24 h. Lisaks on märgitud peale punaste joontega eelnevas lõigus kirjeldatud piirmäärad ja soovituslikud suurused. Üldpildi mõistmiseks on tehtud kõikide köök-elutubade joone hallideks ning ei ole eraldi välja toodud täpsemalt.



Joonis 3.1 - Õhutemperatuuri kestvusgraafik seadeväärtusel $+26^{\circ}\text{C}$ (vasak) ning $+25^{\circ}\text{C}$ (parem)



Joonis 3.2 - Õhutemperatuuri kestvusgraafik seadeväärtusel +24°C (vasak) ning päevasel seadeväärtusel +26°C ja öisel seadeväärtusel +24°C (parem)



Joonis 3.3 - Õhutemperatuuri kestvusgraafik päevasel seadeväärtusel +25°C ning öisel seadeväärtusel +23°C

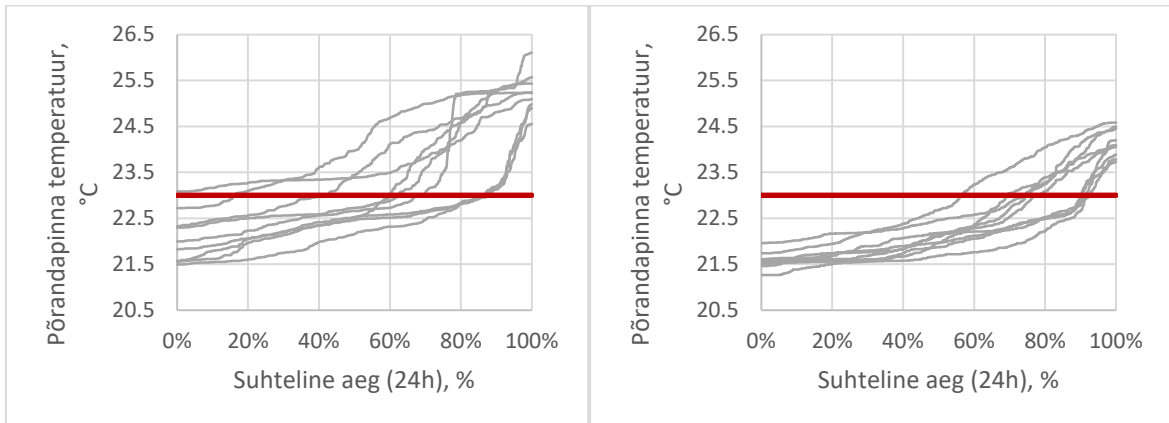
Joonistel 3.1 kuni 3.3 on toodud välja arvutuslikel tingimustel siseõhu temperatuuride kestvusgraafikud, mis hõlmab korterite valimi köök-elutubasid. On märgata, et temperatuuri seadepunktil on märgatav mõju siseõhu temperatuurile. Ruumiõhu temperatuur on oodatavalt kõige kõrgem suurima seadeväärtuse puhul. Seadeväärtusega +26°C on märgata, et osades köök-elutubades täidetakse siseõhu temperatuurinõue ära vaid 40% ajast ning osades 90% ajast, seega on märgata suurt erinevust ruumide vahel.

Seadepunkti alandamisega +25°C-ni on näha, et siseõhu temperatuuri piirväärtuse täidetakse ära minimaalselt 80% ajast, enamikel juhtudel üle 90%. Seadeväärtusega +24°C on täidavad siseõhu temperatuuri piirväärtuse ära kõik köök-elutoad välja arvatud üks, kus siseõhu temperatuur ületab +26°C umbes 10% ajast.

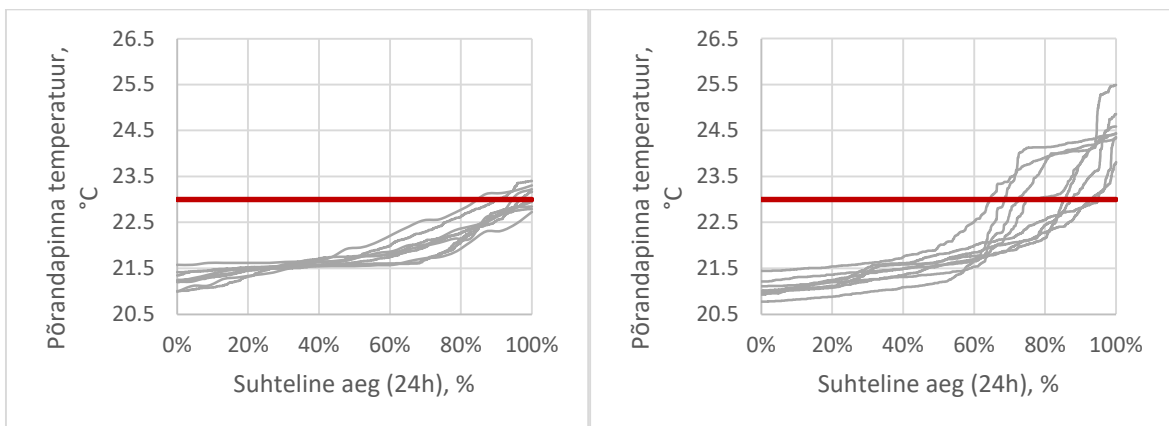
Kahekraadine seadeväärtuse alandamine öösiti päevaselt seadeväärtuselt +26°C ning +25°C öisele vastavalt +24°C ning +23°C alandab märgatavalt aega, mil ruumiõhu temperatuur ületab piirväärtust. Kui päevasel seadeväärtusel +26°C täidetakse piirnorm kõige vähem ära 40%, siis öise kahekraadise alandamisega täidetakse piirnorm

ära kõige vähem umbes 85%. Kui päevasel seadeväärtusel +25°C täidetakse piirnorm kõige vähem ära 80%, siis öise kahekraadise alandamisega täidetakse piirnorm ära pea et kõigil juhtudel välja arvatud ühel.

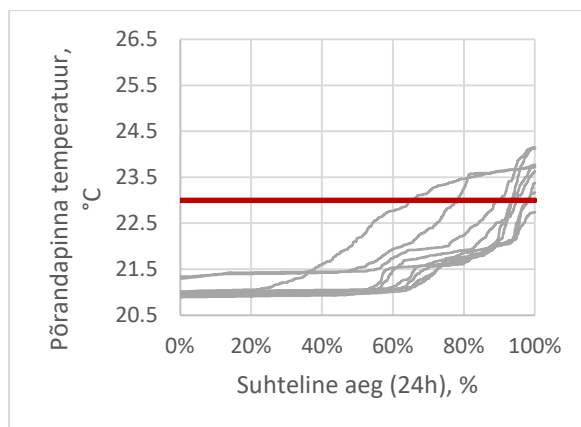
Seadeväärtusega +24°C ning päevase seadeväärtusega +25°C ja öise seadeväärtusega +23°C suudeti enamikes köök-elutubades tagada suurim lubatud siseõhu temperatuur +26°C, erandiks osutus üks köök-elutuba, mille puhul ruumiõhu temperatuur ületas piirarvu mõlemal juhul ~10% ajast.



Joonis 3.4 - Põrandatemperatuuri kestvusgraafik seadeväärtusel +26°C (vasak) ning +25°C (parem)



Joonis 3.5 - Põrandatemperatuuri kestvusgraafik seadeväärtusel +24°C (vasak) ning päevasel seadeväärtusel +26°C ja öisel seadeväärtusel +24°C (parem)



Joonis 3.6 - Põrandatemperatuuri kestvusgraafik päevasel seadeväärtusel +25°C ja öisel seadeväärtusel +23°C

Joonistel 3.4 kuni 3.6 on toodud välja arvutuslikel tingimustel põrandapinna temperatuuride kestvusgraafikud, mis hõlmab korterite valimi köök-elutubasid. Põrandapinna temperatuuri miinimumväärtust, milleks on antud juhul +20°C, ei ületanud ükski tuba kordagi. Vaadeldi ka lisaks põrandapinna soovituslikku piirmäära palja jala korral.

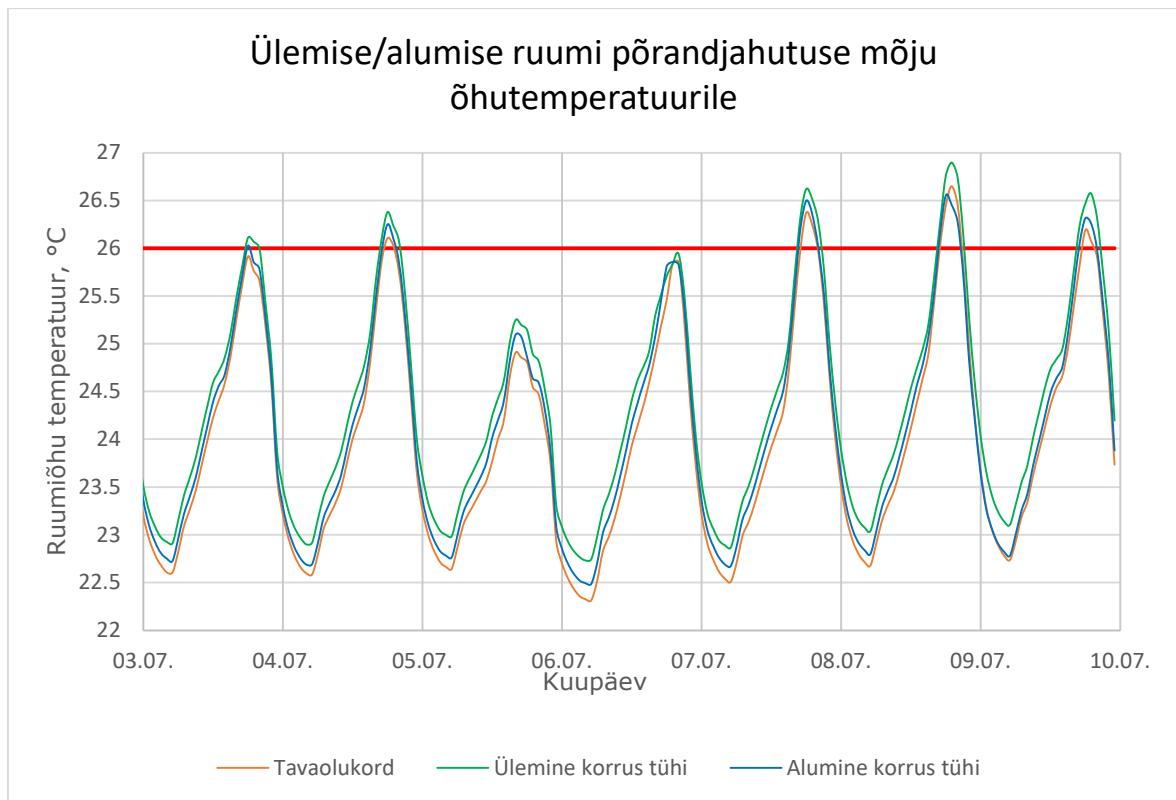
Seadeväärtusega +26°C on põrandapinna temperatuur enim aega üle soovitusliku piiri. Kuna jahutusvajadus ei ole võrreldes teiste seadeväärtusega nii suur, siis ei jahtu ka põrand rohkem maha. Temperatuuri seadepunkti alandamisega muutub ka suuremaks aeg, mille jooksul põrandapinna temperatuur on allpool soovituslikku piiri. Seadeväärtusega +24°C on põrandapinna temperatuur peaaegu terve aja allpool soovituslikku piiri, kuid ei lange alla miinimumnõude.

3.2 Erijuhtude tulemused

Erijuhtudena vaadeldi olukordi kohakuti asetsevate naaberruumide vahel ning lisaks vaadeldi köök-elutoa kõrgendatud niiskuskooormust ning akna tuulutusasendisse avamise mõju.

3.2.1 Kohakuti ruumid

Ülemise ning alumise ruumi põrandjahutuse mõju uuritavale ruumile uuriti asjaoludel, kus vastavalt ülemises või alumises ruumis oli põrandjahutus väljalülitatud ning inimesi polnud kodus.



Joonis 3.7 - Põrandjahutuse mõju ülemise/alumise ruumi vahel

Joonisel 3.7 on välja toodud ruumiõhu temperatuurid uuritavas keskmises köök-elutoas. Vertikaalsel teljel on ruumiõhu temperatuur ning alumisel teljel on kuupäev. Tavaolukord (joonisel oranž) kirjeldab juhtu, kus kõikides kolmes korteris on sarnased tingimused ning põrandjahutus töötab. Juhtu, kus ülemisel korrusel põrandjahutus ei tööta kirjeldab roheline joon ning juhtu, kus alumisel korrusel põrandjahutus ei tööta kirjeldab sinine joon. Piirtemperatuurina on välja toodud eelnevalt kasutatud +26 °C.

Jooniselt 3.7 on märgata, et kõige madalamad tiputemperatuurid on juhul kui naaberruumides töötab põrandjahutus. Juhtudel, kus ühe naaberruumi põrandjahutus ei tööta, omab suuremat mõju juht, kus ülemise ruumi põrandjahutus ei tööta. See on tingitud asjaolust, et tavaolukorras jahutab ülemise korruse põrandakontuur ka uuritava toa lage, aidates seeläbi jahutada ruumiõhku. Päevaste tippude ning öiste madaltemperatuuride vahed erijuhtude vahel jäävad alla 0,5 °C, seega võiks väita, et kohakuti ruumide vahel olulist omavahelist mõju ei ole.

Tabel 3.1 kirjeldab ruumide jahutusenergiat juhtudel kui uuritava ruumi suhtes ülemise või alumise ruumi põrandjahutus ei tööta. Uuritav ruum asub korteris 18. Tabelist näeb, et juhul kui ülemisel korrusel põrandjahutuse ei tööta, tõstab see ka ootuspäraselt uuritava ruumi jahutusenergia kulu, kuna ruumi ei jahutata enam lae kaudu nii palju kui ülemise ruumi töötava põrandjahutuse korral. Uuritava ruumi jahutusenergia kasv on ligikaudu 21% võrreldes tavaolukorraga. Alumise korruse mittejahutamine ei oma

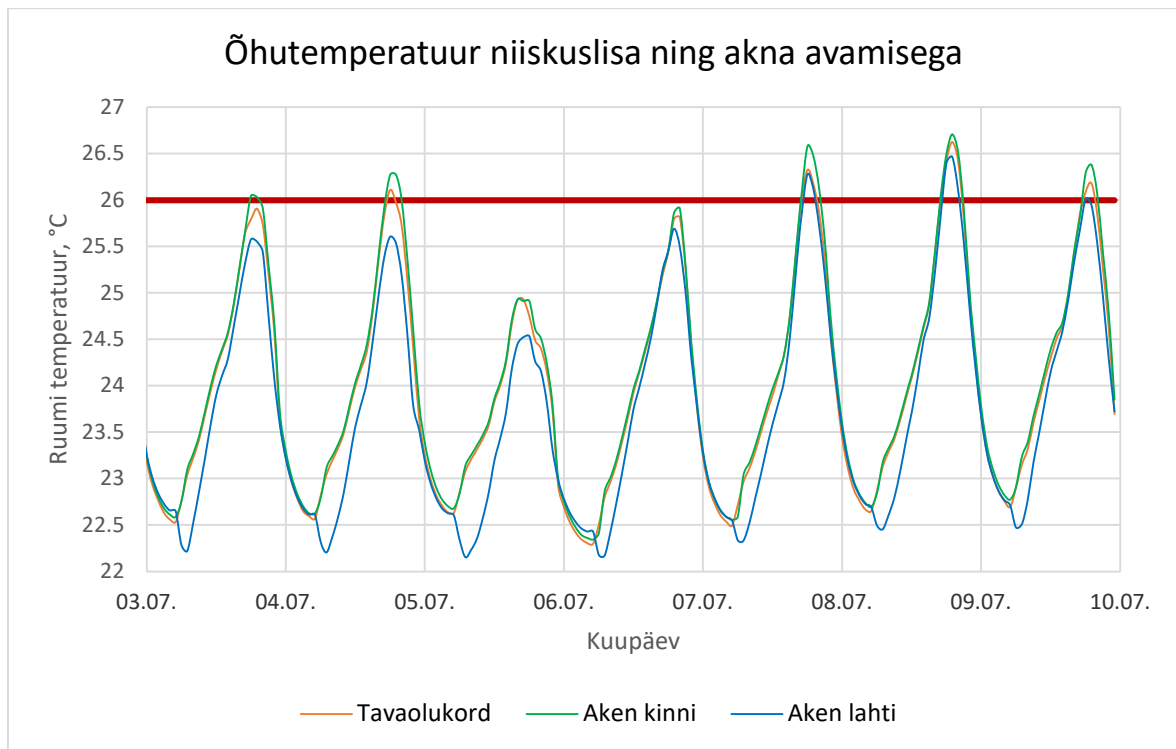
nii suurt mõju, kuigi uuritava ruumi jahutamiseks kuluv energia tõuseb ligikaudu 12%. Kasv tuleneb asjaolust, et alumise korruse õhutemperatuur on kõrgem, mis muudab soojusülekanne ruumiõhult laelt suuremaks (temperatuuride vahe tõttu) ning seeläbi tõuseb jahutamiseks kuluv energiahulk. Vajab märkimist asjaolu, et vaadeldi nädalast perioodi ning antud jahutusenergia kasv ei pruugi laieneda pikemale perioodile. Kuid lühiajaliste kuumemate perioodide puhul võib naaberkorteri jahutusenergia kasv olla märgatav, eriti juhul kui ülemises korteris jahutus ei tööta.

Tabel 3.1 - Energiakulu tubade vahel

Jahutusenergia [kWh]			
Korter	10	18	26
Tavaolukord	70.6	78.6	78.4
Ülemine korrus tühi	67.8	95.3	0
Alumine korrus tühi	0	88	78.1

3.2.2 Kõrgendatud niiskuskooormus

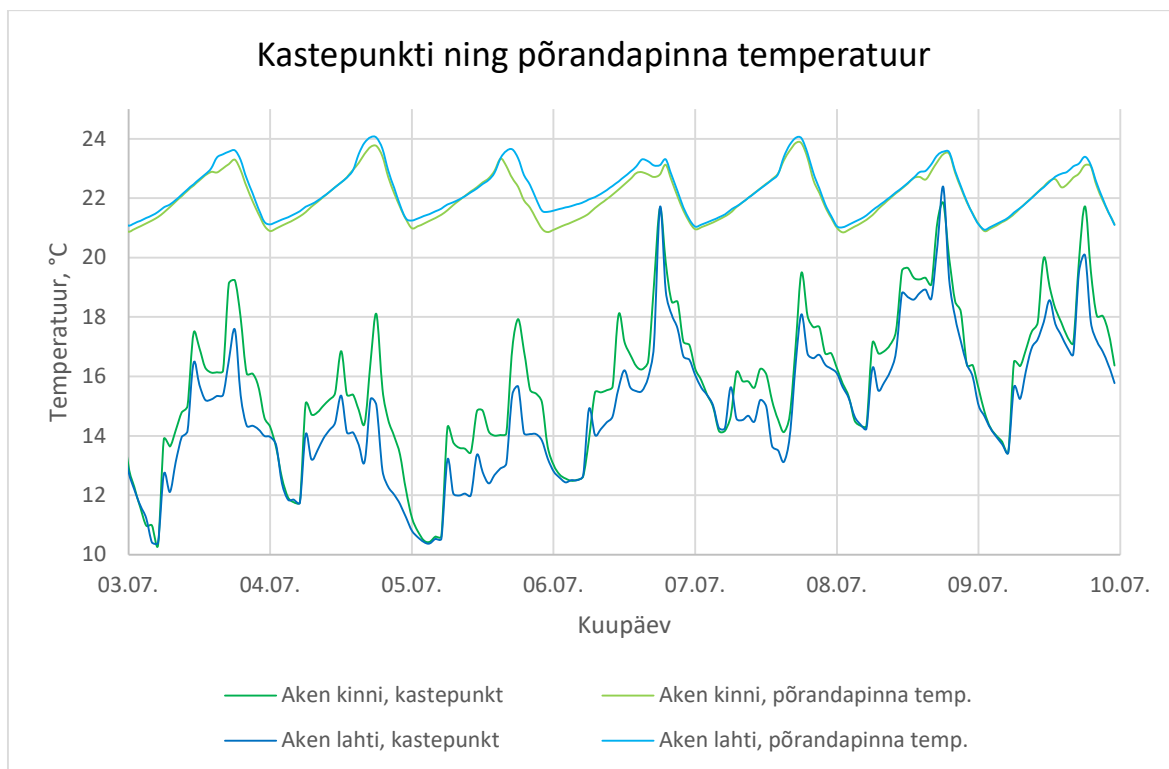
Kõrgendatud niiskuskooormusega juhtumi uurimisel lisati köök-elutuppa söögivalmistamisest, nõudepesemisest ning taimedest tingitud niiskuskooormus lisaks olemasolevate inimeste niiskuskooormusele. Vaadeldi ruumiõhu temperatuuri erinevust ilma lisatud niiskuskooormusega olukorras ning niiskuskooormusega olukorras, ühel juhul kinnise aknaga ning teisel juhul avatud aknaga. Akent hoiti tuulutusasendis pidevalt sel ajal kui inimesed viibisid ruumis kella seitsmest hommikul kuni üheteistkümnene öhtul. Vannitoas eeldati, et hügieeni ja pesupesemise niiskuskooormus tekib lokaalselt ainult vannitoas ja sealt ka ventilatsiooniga eemaldatakse ning see ei mõjuta teiste tubade suhtelist õhuniiskust.



Joonis 3.8 - Suurendatud niiskuskoormuste korral ruumiõhu temperatuur

Joonisel 3.8 on välja toodud kolmel juhul siseõhu temperatuurid. Tavaolukord (joonisel oranž) kirjeldab ruumiõhu temperatuuri juhul kui niiskuskoormus ruumis on ainult inimestest ning infiltratsioonist. Olukorda, kus on arvestatud eelkirjeldatud niiskuslisadega, kirjeldab joonisel roheline joon juhul kui aken pole avatud ning sinine joon juhul kui aken on arvatud tuulutusasendisse.

Jooniselt 3.8 on näha, et tavaolukorra ning niiskuslisadega kinnise akna korral pole märgata erist erinevust ruumiõhu temperatuuridel. Kinnise akna korral mõningad tipukoormusolukorrad on kõrgemad kui tavaolukorras, kuid erinevused on väikesed, jäädes maksimaalselt 0,2 °C juurde. Seega on alust arvata, et kondenseerumiskaitse piiri ei ületatud. Suuremat erinevust on märgata juhul kui avatakse ka aken tuulutusasendisse. Kuna simuleeriti olukorda, kus kohe hommikul avatakse aken tuulutusasendisse, siis on märgata ka suuremat temperatuurilangust kohe hommikuperioodil ning päeva tipptemperatuur on madalam kui teistel juhtudel. Maksimaalselt erinevus tavaolukorraga jääb 0,5 °C juurde. Uuritu põhjal võib väita, et akna avamine võib mõjuda ruumiõhu temperatuuri langetamisele positiivselt kuna akna avamisega ei täheldatud, et olukord muutuks eelnevaga võrreldes halvemaks.



Joonis 3.9 - Suurendatud niiskuskooormuse simulatsiooni kastepunkti ja põrandapinna temperatuurid

Joonis 3.9 kirjeldab põrandapinna temperatuuri ning kastepunkti kahel juhul, kui on kõrgendatud niiskuskooormusega aken pidevalt kinni ning kui aken on päevasel ajal lahti. Kinnise aknaga olukorda kirjeldavad rohelised jooned, hele ning tume toon tähistavad vastavalt põrandapinna temperatuuri ning kastepunkti temperatuuri. Eelnevale sarnasel kirjeldavad sinised jooned avatud aknaga olukorda.

Jooniselt 3.9 on märgata, et lahtise aknaga juhul on kastepunkt tavaliselt oluliselt madalamal võrreldes kinnise aknaga juhtumi korral. Näha on ka kolme korda kui kastepunkti ning põrandapinna temperatuuride vahe on väiksem kui ettenähtud 2°C-ne kondensaadikaitse piir. Kahel juhul, 06.07. ning 08.07., on näha, et ei ole vahet kas aken on kinni või lahti, mõlemal juhul rakendub kondensaadikaitse ning edasine jahutamine keelatakse ära kuniks töötingimused taastuvad. Kolmandal juhul, 09.07., on näha, et jahutuse keelamine toimub ainult kinnise aknaga juhul. Kuna niiskuskooormused on perioodiliselt sama kõigil juhtudel ja kondensaadikaitse rakendumine toimus kinnise ja lahtise akna korral korruga ning ühe korra ainult kinnise akna korral, siis võiks arvata, et suuremat mõju konkreetsel juhul omavad väljas valitsevad tingimused, mitte niivõrd sisemised niiskuskooormused.

Lisaks vaadeldi ka põgusalt mõju energeetilisele poolele. Tavaolukorras sarnaselt tabelis 3.1 toodule oli jahutusenergia tarve 78,6 kWh uuritavas köök-elutoas. Niiskuslisadega ning kinnise akna korral oli jahutusenergia tarve 78,8 kWh, seega sisuliselt muutust ei

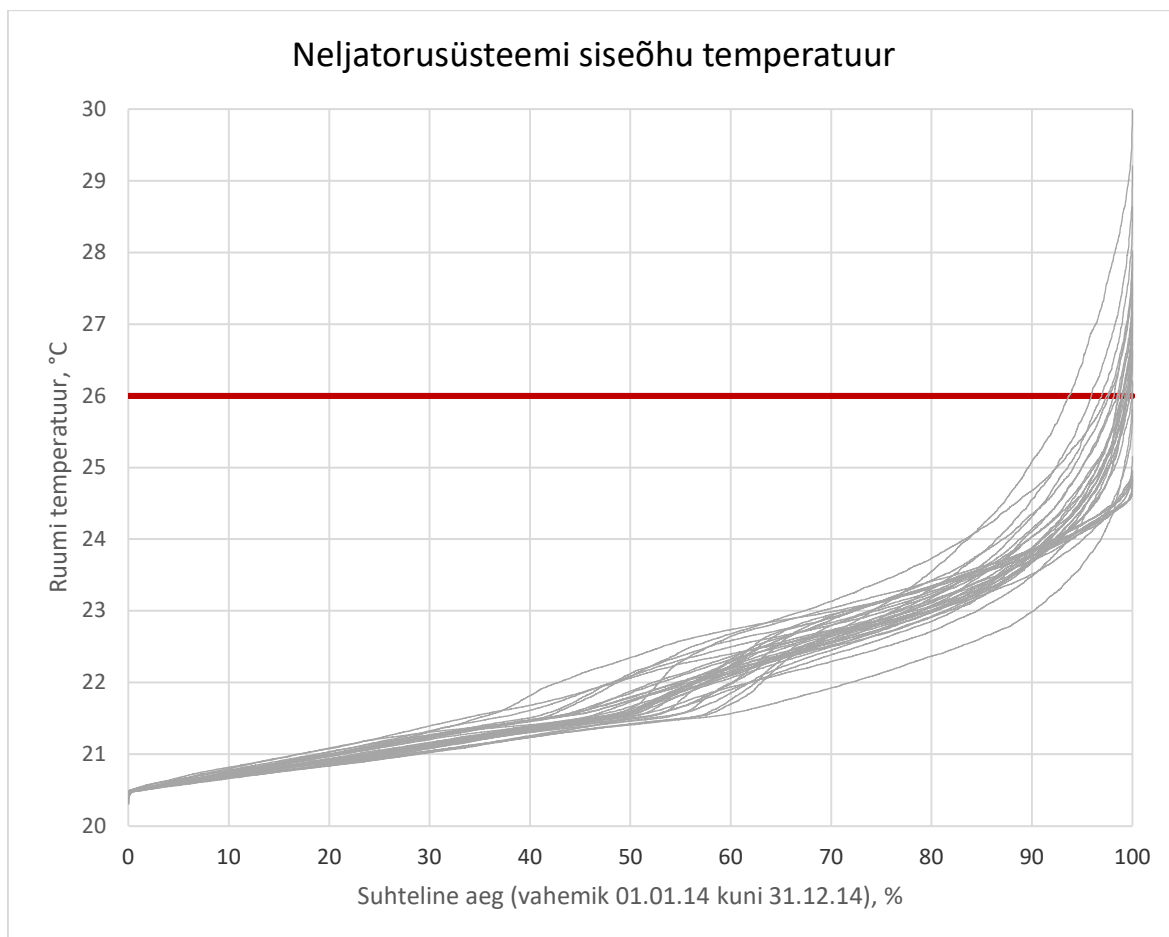
olnud. Kui aga avada aken langes jahutusenergia tarve 72,0 kWh-ni, mis võib olla tingitud asjaolust, et läbi akna tuulutuse toimub ka ruumiõhu jahutamine. Kuna põrandjahutus jahutab eelkõige konstruktsiooni, siis tõenäoliselt pakub akna avamine kiiremat lahendust ruumiõhu jahutamisele teatud oludes, ning seeläbi säästab põrandjahutuse energiatarvet. Uuritud sooja ja võrdlemisi päikesepaistelise perioodi puhul täheldati akna avamisest soodsat mõju nii siseõhu temperatuurile kui ka jahutusenergia tarbele.

3.3 Põrandjahutus üleminekuperioodil ning soojal suvel

Üleminekuperioodi ning sooja suve uurimiseks kasutati 2014. aasta kliimafaili. Simuleeriti olukordi põrandjahutusega nii kahetoru- kui ka neljatorusüsteemi korral. Simuleeriti peatükis 2.3.1 kirjeldatud kõige ebasoodsamate korterite valimi elu- ning magamistuba. Valimis on kokku 33 köök-elutuba ning magamistuba. Simulatsioonid teostati ka õhk-õhk konditsioneeridega ning kinnitati, et siseõhu temperatuuri piirnormi täitmine on tagatud.

3.3.1 Neljatorusüsteem

Põrandjahutuse neljatorusüsteemi korral oli külmamasina töö pidev aastaläbi ning küttesõlm oli töös septembri algusest mai lõpuni. Neljatorusüsteemi korral on toodud välja joonisel 3.10 siseõhu temperatuuride kestvusgraafik, kus uuritavate tubade kestvusgraafikud on välja toodud hallidena ning siseõhu temperatuuri piirtemperatuur punasega. Vertikaalsel teljel on kujutatud siseõhu temperatuuri ning horisontaalsel teljel suhteline aeg, kus skaalaks on terve aasta. Jahutuse seadeväärtusena kasutati +24°C.

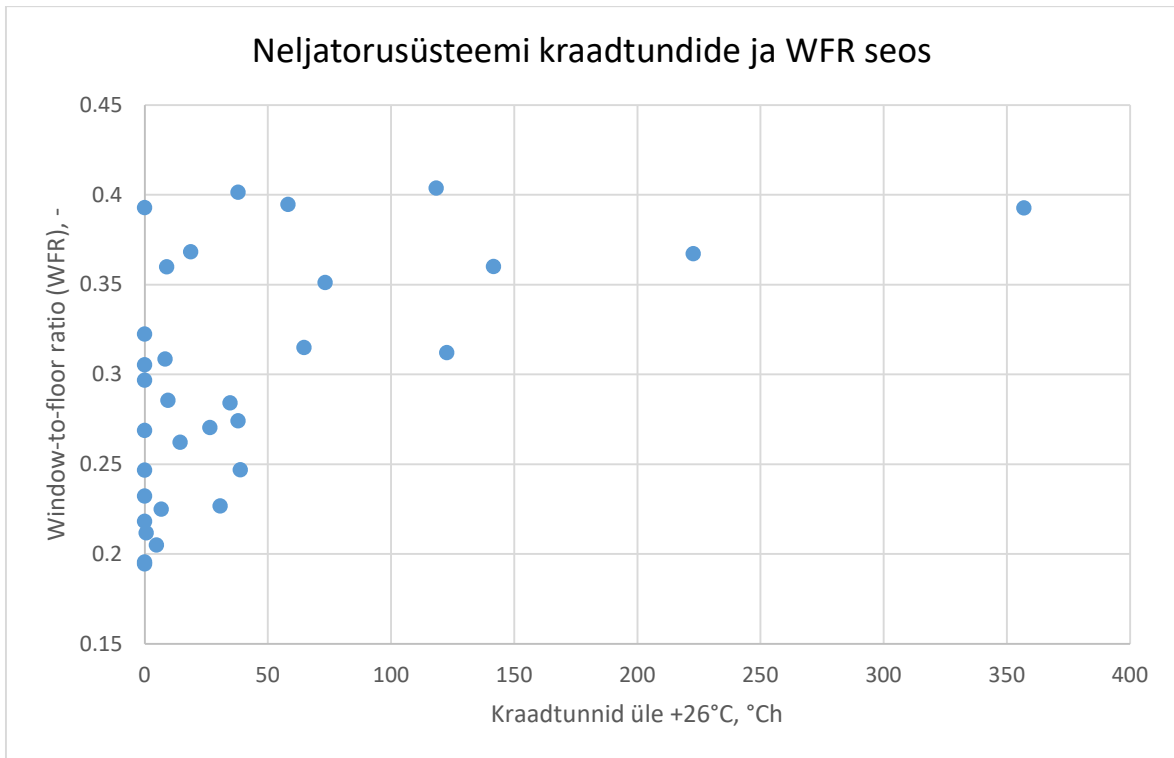


Joonis 3.10 - Siseõhu temperatuuri kestvusgraafik põrandjahutuse neljatorusüsteemi korral

Joonisel 3.10 on näha uuritavate ruumide siseõhu temperatuure kestvusgraafiku näol. On märgata, et suures osas ruumides tõusis siseõhu temperatuur kohati üle piirnõrmi, milleks on +26°C. Märgata on suurt siseõhu temperatuuri tõusu graafiku lõpu poole, mis annab alust arvata, et mõningate soojemate päevadega ei suuda põrandjahutus tagada siseõhu temperatuuri alla piirnõrmi +26 °C väärtuse. Tabelis 3.2 on välja toodud korterite valimi kraadtunnid üle +26°C.

Tabel 3.2 – Kraadtunnid [°Ch] üle +26°C põrandjahutuse neljatorusüsteemi puhul

Korter		18	34	36	37	65	67	80	88	89
Tuba	Köök-elutuba	39	38	0	0	0	31	0	0	58
	Suur magamistuba	9	123	0	142	8	770	19	35	5
	Magamistuba 1	9	7	0	1	357	14	0	223	65
	Magamistuba 2	-	27	0	0	73	-	-	118	38

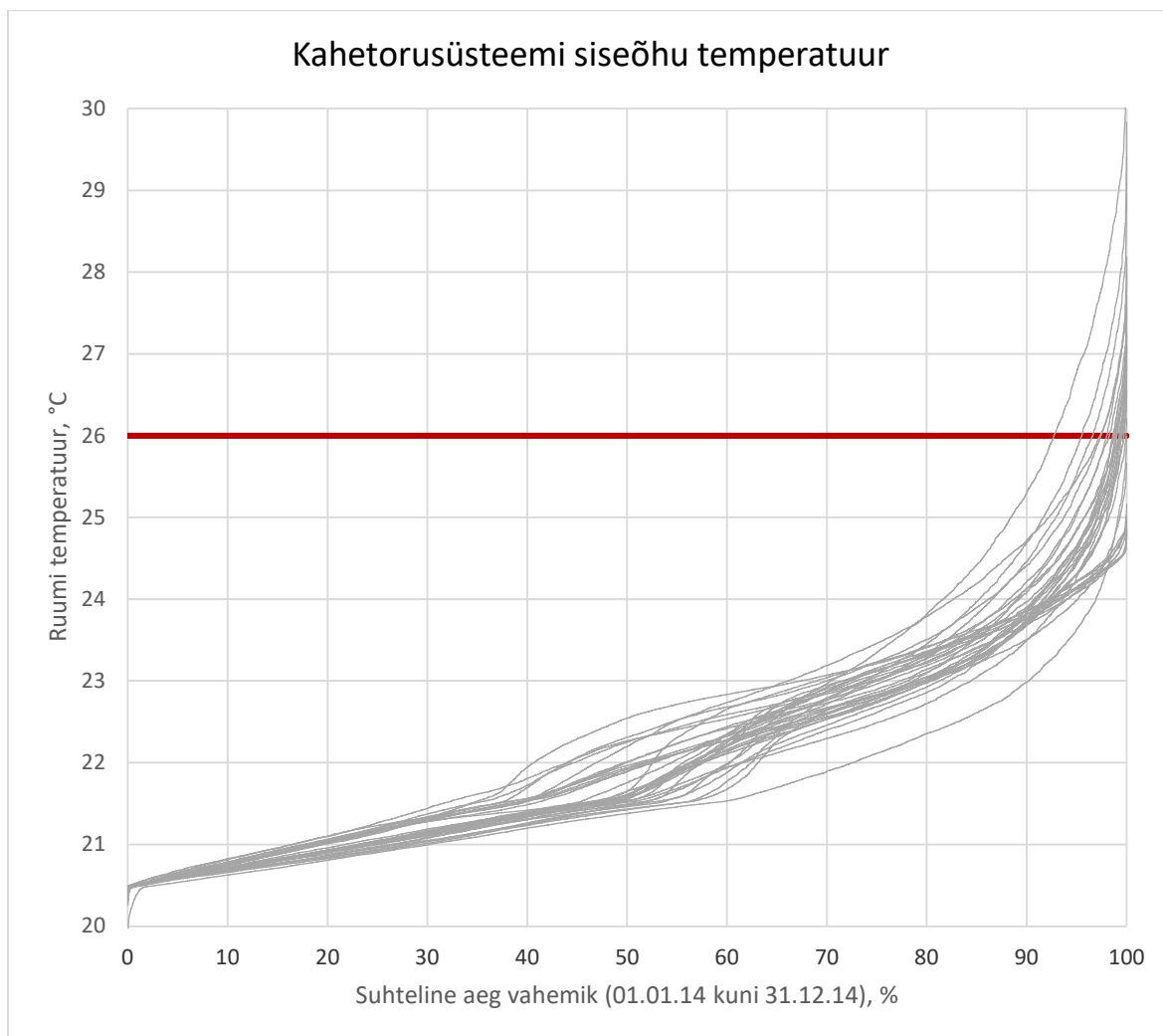


Joonis 3.11 - Neljatorusüsteemi kraadtundide ja window-to-floor ratio (WFR) seos

Joonisel 3.11 on kujutatud kraadtundide ning window-to-floor ratio (akende pinna osakaal põrandapinnale) suhet. Jooniselt 3.11 on välja jäetud korteri 67 suure magamistoja punkt kuna ta erineb teistest ülemäära palju. Märgata on, et suurema WFR puhul ületatakse ka tõenäolisemalt enam ruumiõhu temperatuuri piirnormi. Suuremad erinevused kraadtundides tekivad juhtudel kui WFR on üle 0,30.

3.3.2 Kahetorusüsteem

Põrandjahutuse kahetorusüsteemi korral kütte- ning jahutussõlmed samal ajal ei töötanud. Kütteperioodiks, mil küttesõlm töötas, arvestati 7.oktoober kuni 19. aprill ning jahutusperioodiks, mil jahutussõlm töötas, vahemik 20.aprillist kuni 6.oktoobrini. Kahetorusüsteemi korral on toodud välja joonisel 3.12 siseõhu temperatuuride kestvusgraafik, kus uuritavate tubade kestvusgraafikud on välja toodud hallidena ning siseõhu temperatuuri piirtemperatuur punasega. Vertikaalsel teljel on kujutatud siseõhu temperatuuri ning horisontaalsel teljel suhteline aeg, kus skaalaks on terve aasta.

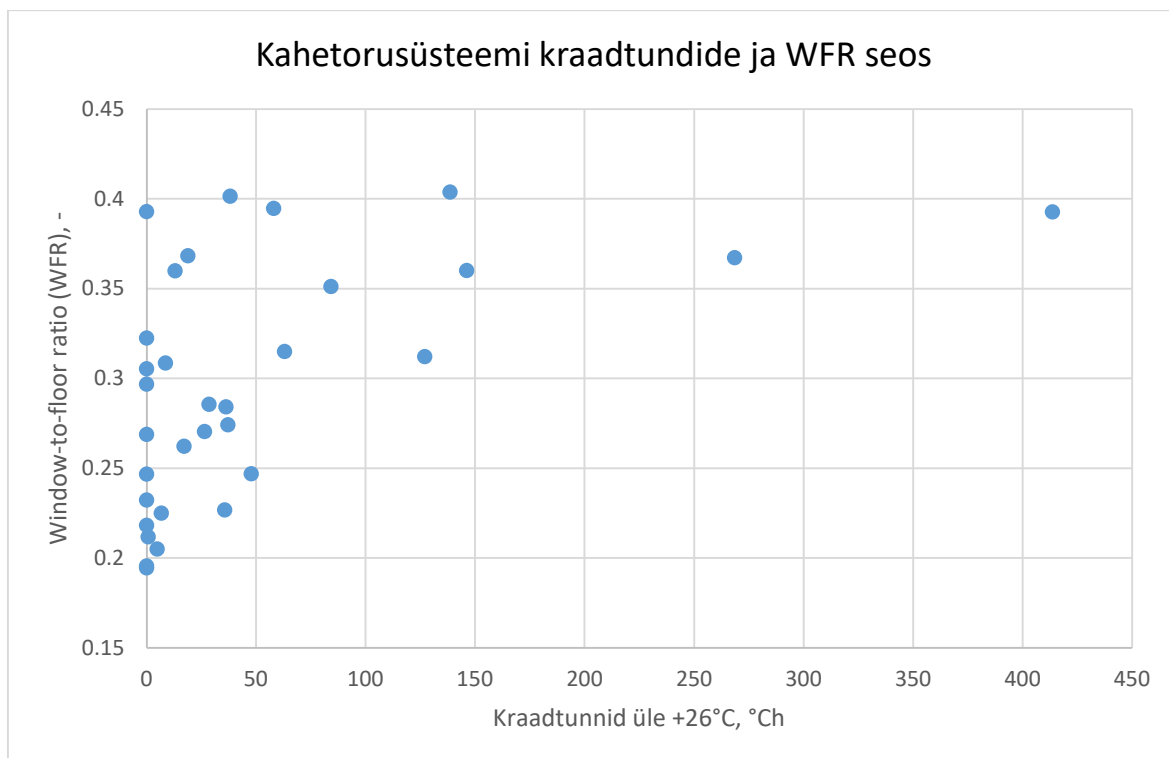


Joonis 3.12 - Siseõhu temperatuuri kestvusgraafik põrandjahutuse kahetorusüsteemi korral

Joonisel 3.12 on näha uuritavate ruumide siseõhu temperatuure kestvusgraafiku näol. On märgata, et suures osal tubades tõusis siseõhu temperatuur kohati üle piirnormi, milleks on +26°C. Märgata on suurt siseõhu temperatuuri tõusu graafiku lõpu poole, mis annab alust arvata, et mõningate soojemate päevadega ei suuda põrandjahutus tagada siseõhu temperatuuri vajalikes piires. Tabelis 3.3 on välja toodud korterite valimi kraadtunnid üle +26°C.

Tabel 3.3 – Kraadtunnid [°Ch] üle +26°C põrandjahutuse kahetorusüsteemi puhul

Korter		18	34	36	37	65	67	80	88	89
Tuba	Köök-elutuba	48	38	0	0	0	36	0	0	58
	Suur magamistuba	13	127	0	146	9	947	19	36	5
	Magamistuba 1	28	7	0	1	414	17	0	268	63
	Magamistuba 2	-	26	0	0	84	-	-	139	37



Joonis 3.13 - Kahetorusüsteemi kraadtundide ja window-to-floor ratio (WFR) seos

Joonisel 3.13 on kujutatud kraadtundide ning window-to-floor ratio (akende pinna osakaal põrandapinnale) suhet. Jooniselt 3.13 on välja jäetud korteri 67 suure magamistoa punkt kuna ta erineb teistest ülemäära palju. Märgata on, et suurema WFR puhul ületatakse ka tõenäolisemalt enam ruumiõhu temperatuuri piirnormi. Sarnaselt neljatorusüsteemile on ka siin suuremad erinevused kraadtundides tekivad juhtudel kui WFR on üle 0,30.

3.3.3 Kahetoru- ja neljatorusüsteemi võrdlus

Töös uuriti kahetoru- ning neljatorusüsteemi erinevust tubade siseõhu temperatuurile. Selleks kasutati 2014.aasta kliima andmeid. Vaadates jooniseid 3.10 ning 3.12 näeb, et enamikel uuritud juhtudes suutis põrandküte ning -jahutus tagada siseõhu temperatuuri piirnormi täitmise ligikaudu 98-99% ajast, vaid mõnel üksikul juhul ületati piirnormi rohkem.

Eelkirjeldatud kahe süsteemi puhul esinesid suuremad kraadtunnid kahetorusüsteemi puhul, mida oli ka oodata. Tabelis 3.4 on välja toodud kahetoru- ja neljatorusüsteemide kraadtundide protsentuaalsed erinevused. Erinevust arvestatakse kraadtundide tõusu neljatorusüsteemilt kahetorusüsteemile. Kumulatiivselt suurenesid kraadtunnid 16%.

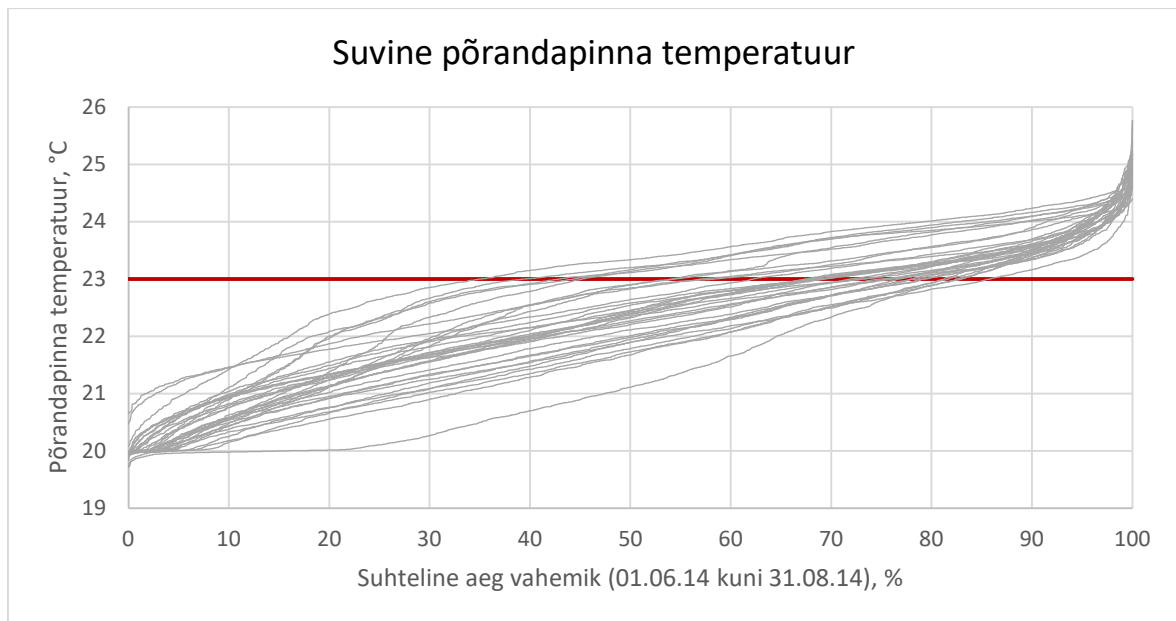
Tabel 3.4 - Kahetoru- ja neljatorusüsteemide kraadtundide erinevus

		Erinevus, %								
Korter		18	34	36	37	65	67	80	88	89
Tuba	Elutuba/köök	23	0	0	0	0	17	0	0	0
	Suur magamistuba	45	4	0	3	2	23	0	5	1
	Magamistuba 1	200	0	0	0	16	18	1	21	0
	Magamistuba 2	-	0	0	0	15	-	-	17	0

Võrdlemisi väikese erinevuse kraadtundides võis tingida asjaolu, et vabasoojused tubades olid võrdsed terve simulatsiooni ulatuses ning ei tekkinud vabasoojuste erinevusest tingitud kütte- ning jahutusvajaduse erinevust eri korterites. Lisaks toimus jahutus- ning kütteperioodi määramine teoreetiliselt ning päriselus ei pruugita vahetust teha nii täpselt ning seega kahetorusüsteemi tulemus võib muutuda oluliselt halvemaks. Kahetorusüsteemi puhul vältimaks riski, et hoone erinevad toad soovivad samaaegselt kütet ning jahutust, oleks mõistlik kaaluda konditsioneeride paigaldamist ruumidesse, mis on üleminekuperioodil ebasoodsas seisus.

3.3.4 Põrandapinna temperatuur

Põrandapinna temperatuur mängib rolli inimeste soojuslikus mugavustundes, seega vaadeldi ka põrandapinna temperatuure. Põrandjahutuse puhul on jahutavaks elemendiks põrandapind, millel on ka otsene kontakt inimesega. Joonisel 3.14 on välja toodud korterite valimi köök-elutubade ning magamistubade põrandapinna temperatuurid põrandjahutuse korral. Joonisel 3.14 toodud andmed pärinevad simulatsioonidest, kus kasutati 2014.aasta kliimafaili, ajaskaalaks on võetud suvekuud, st vahemikku 01.06.14 kuni 31.08.14. Kahetoru- ning neljatorusüsteemide puhul oleks väärtused samad kuna suvekuudel töötaksid jahutusrežiimil mõlemad süsteemid. Punase joonega on tähistatud soovituslik puitpõrandate minimaalne põrandapinna temperatuur palja jala korral, milleks on +23°C.

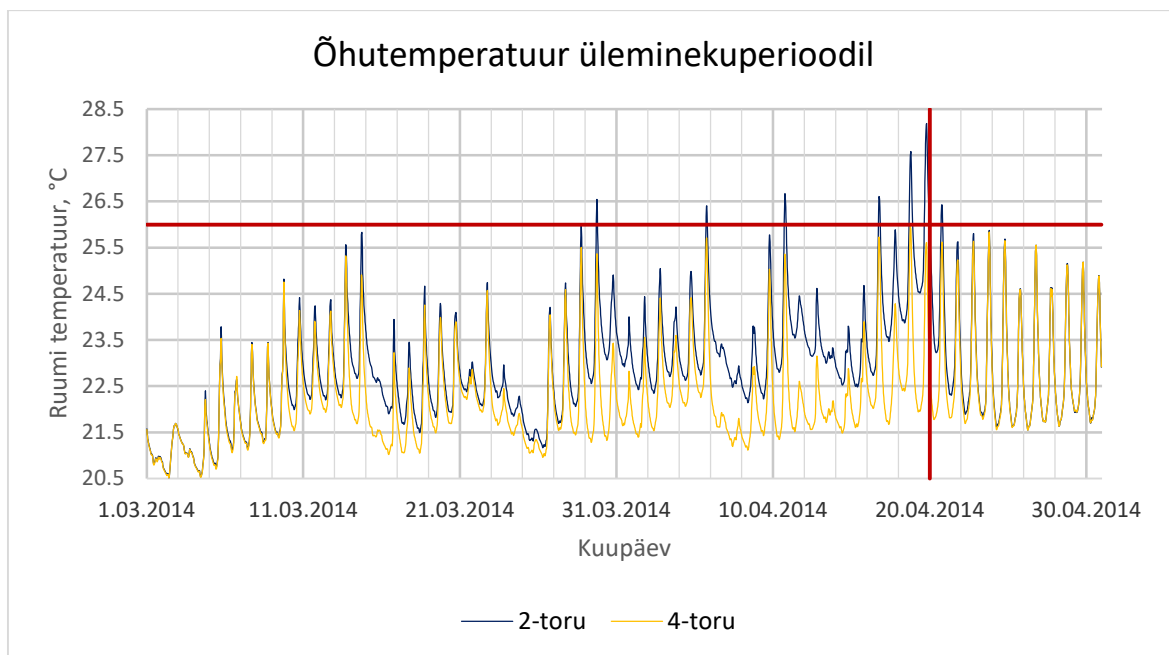


Joonis 3.14 – Suvine põrandapinna temperatuur

Jooniselt 3.14 on näha, et alla minimaalse määratud põrandapinna temperatuuri, milleks on käesolevas töös määratud $+20^{\circ}\text{C}$, väärtused ei lähe. Põrandapinna palja jala soovitusliku temperatuuri ei täideta olenevalt toas ligikaudu 35-85% ajast. Seega võib jahe põrand mõjutada oluliselt inimeste soojuslikku mugavustunnet suvekuudel.

3.3.5 Üleminekuperiood

Lisaks vaadeldi põrandjahutuse kahe- ja neljatorusüsteemi korral kõige suurema kraadtundide arvu vahega toa siseõhu temperatuuri. Selleks toaks osutus korteri 18 väike magamistuba, kus kraadtunnid neljatorusüsteemi korral olid 9°Ch ning kahetorusüsteemi korral 28°Ch . Täpsemalt vaadeldi märtsi- ning aprillikuu siseõhu temperatuure, mis on välja toodud joonisel 3.15. Kahetorusüsteem on näidatud tumesinise joonega ning neljatorusüsteem kollase joonega. Kahetorusüsteemi puhul hakkab külmasõlm tööle 20. aprillil (märgitud vertikaalse punase kriipsuga). Temperatuuride ühtlustumiseks läheb aega ligikaudu kolm päeva.



Joonis 3.15 - Siseõhu temperatuurid üleminekuperioodil korteri 18 väikeses magamistoas

Joonisel 3.15 on märgata, et enne jahutusperioodi algust on osadel päevadel siseõhu temperatuur kõrgem kahetorusüsteemi puhul ning kohati ületades isegi piirnormi. Näha on, et kevadisel perioodil võivad ilma jahutuseta siseõhu temperatuurid ületada piirnormi.

3.4 Modelleerimise detailsus

Oluline on ka pöörata tähelepanu modelleerimise detailsusele. Töö käigus võrreldi kraadtunde ning jahutusenergiat juhtudel kui mudel oli modelleeritud korteri täpsusega (st korter oli üks tsoon mudelis) ning ruumide täpsusega (st ruumid olid omaette tsoonid mudelis). Tabelis 3.5 toodud andmed pärinevad neljatorusüsteemi simulatsioonidest kasutades 2014.aasta kliimafaili. Ruumide täpsusega mudeli korral on välja toodud korteris olevate ruumide kraadtundide summa (vt ruumide kaupa tabel 3.2).

Tabel 3.5 – Kraadtundide ja jahutusenergia võrdlus

Korter	18	34	36	37	65	67	80	88	89	Jahutusenergia [kWh]
Ruumide täpsusega mudel [°Ch]	57	194	0	142	439	815	19	376	165	23679
Korteri täpsusega mudel [°Ch]	17	96	0	0	0	106	0	0	59	24661

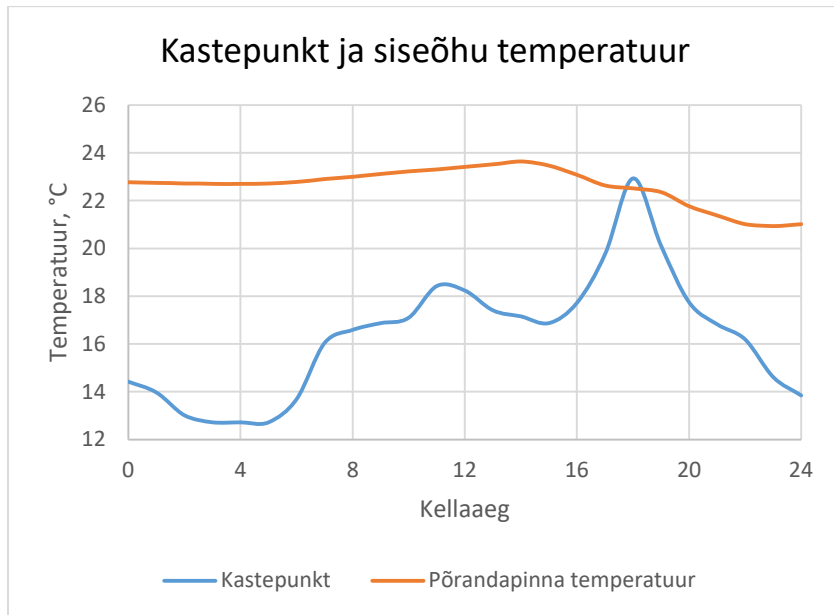
Tabelist 3.5 näeb, et kui vaadelda jahutusenergiat, siis pole väga suurt erinevust, kas mudeli detailsus on ruumi- või korteripõhine. Mudeldades tsoonid ruumide täpsusega (võrreldes korteri täpsusega), siis jahutusenergia on ~4% väiksem. Seega võib öelda, et jahutusenergia seisukohalt pole väga suurt erinevust eelneva kahe täpsusklassi vahel. Vaadates kraadtundide seisukohast omab modelleerimise detailsus suuremat mõju. Kui korteri detailsusega mudel mõningates korterites ei näita üldse, et siseõhu temperatuur tõuseks üle piirnormi, siis ruumide detailsusega mudelist tuleb välja, et üksikutes ruumides võib temperatuur olla oluliselt kõrgem. Ruumide täpsusega modelleerimise puhul on kraadtundide arv ligikaudu 8 korda kõrgem.

3.5 Juhtimine

Põrandkütte ning -jahutuse juhtimiseks peab omama juhtimisautomaatika sellist võimekust, et juhtida mõlemat režiimi. Kontroller peab olema võimeline suhtlema ka hooneautomaatikaga, et teada saada, mis hetkel on tsentraalselt sees küte/jahutus. Käesolevas töös rakendatud juhtimisloogika on laiemalt näidatud töö graafilises osas korteri ühendusskeemide joonistel ning peatükis 2.2.4. Käesolevas töös rakendatakse märgades ruumides elektrilist põrandkütet, kuid kui oleks märjad ruumid ka veeküttel, siis jahutuse olukorras tuleks märgade ruumide kontuuridel keelata jahutuse vältimaks külma põrandat ning kondensaadi teket.

Ruumitermostaadid tuleks paigaldada sellistesse kohtadesse, kus neil on minimaalselt väliseid mõjutusi, mis võivad mõõtmistulemusi häirida. Põrandaandurile tuleks ka valida selline koht, kus ta oleks jahutuskontuuri võrdlemisi alguses ning kuhu ei paista reeglina päike otse peale. Kuna otsene päikesekiirgus võib põrandapinna temperatuuri oluliselt tõsta lokaalselt [23], siis võib see asjaolu mõjutada kondenseerumisvastase kaitse rakendumist. Olenevalt tootjate võimekusest, annab suurema kindlustunde kui mõõdetakse suhtelist õhuniiskust igas jahutatavas toas, kuid üldjuhul piisab ka eelnevate mõõtmisest kõige kriitilisemas toas, milleks on reeglina köök-elutuba.

Töö käigus sai kinnitust asjaolu, et Eesti kliimatingimustes oleks tarvilik mõõta eluruumide niiskuseliku olukorda ning rakendada meetmeid kondensaadi tekkimise vältimiseks jahutavale pinnale. Käesolevas töös rakendati kondenseerumisohtu vältimiseks kontuuride vooluhulga piiramist juhindudes ruumi kastepunkti temperatuuri ja põrandapinna temperatuuride vahest.

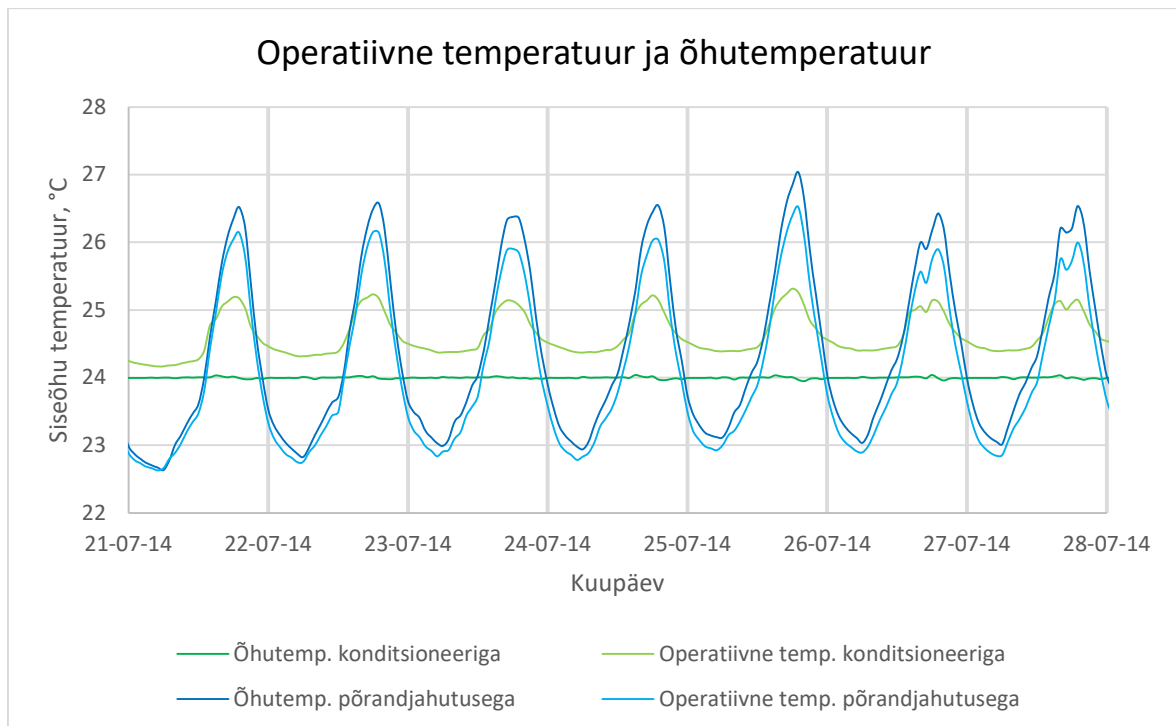


Joonis 3.16 - Kastepunkti ning siseõhu temperatuurid

Joonis 3.16 kirjeldab olukorda, kus põrandjahutuse juhtimisloogikast võeti kastepunkti kontrollimise moodul ära, hindamaks vajadust selle järele. Joonise 3.16 koostamisel kasutati andmeid kõrgendatud niiskuslisadega simulatsioonidest. Joonisel toodud kondenseerumise juht ei ole ainus ning on toodud illustreerimaks juhtu kui ei rakendata eluhoones kondenseerumisvastaseid lahendusi.

3.6 Põrandjahutuse võrdlus konditsioneerisüsteemiga

Joonisel 3.17 on välja toodud korteri 67 köök-elutoa operatiivne ning õhutemperatuur juhul kui on jahutusena rakendatud õhk-õhk konditsioneer ning juhul kui on rakendatud põrandjahutust. Joonisel 3.17 toodud andmed pärinevad simulatsioonidest, kus kasutati 2014.aasta kliimafaili. Valiti võrdlemisi soe ning päikseline nädalane periood. Operatiivse temperatuuri määramisel arvestati, et okupant asub ruumi keskel ja 0,6 m kõrgusel põrandast.



Joonis 3.17 - Operatiivsed ning siseõhu temperatuurid põrandjahutuse ning konditsioneeridega juhul

Vaadates joonisel 3.17 õhk-õhk konditsioneeride tulemusi (märgitud hele- ja tumeroheliste joontega) on näha, et õhutemperatuuri hoitakse konstantselt seadeväärtusel +24°C. Konditsioneerisüsteemi puhul on ka märgata, et terve perioodi jooksul on operatiivne temperatuur, mida inimesed tunnetuslikult tajuvad, kõrgem õhutemperatuurist. Selle tingib asjaolu, et õhk-õhk konditsioneer ei jahuta maha tarindeid nii edukalt, mille tõttu on ka operatiivne temperatuur kõrgem kui õhutemperatuur.

Vaadates joonisel 3.17 põrandjahutuse tulemusi (märgitud hele- ja tumesiniste joontega) on näha, et õhutemperatuur kõigub ööpäeva lõikes võrdlemisi palju sama +24°C seadeväärtuse juures. Küll aga on näha, et põrandjahutuse puhul toimub tarindite jahutamine suuremal määral, mille tõttu on ka suure osa ajast tajutav operatiivne temperatuur madalam kui õhutemperatuur. Seetõttu võib põrandjahutuse mõju mingil määral alahinnata vaadeldes ainult siseõhu temperatuure.

Käesolevas töös ei vaadeldud kuid kirjanduses leiab kinnitavaid andmeid mõningate põrandjahutuse sisekliima aspektide kohta. Põrandjahutuse puhul on pea ideaalne vertikaalne temperatuurigradient, mille tõttu on ka väiksem tuuletõmbe tunne [7]. Põrandjahutuse eelis konditsioneerisüsteemi ees on veel asjaolu, et ilma konditsioneerideta jäävad ära potentsiaalsed müraprobleemid ning ebamugavustunne liiga suurest õhu liikumiskiirusest.

KOKKUVÕTE

Lõputöö käigus uuriti põrandkütte baasil jahutussüsteemi tehniliste lahenduste teos Kiikri 6 kortermaja näitel. Töö alguses loodi teoreetilised alused uurimaks põrandjahutust. Seejärel valiti välja uurimisobjekt, mille põrandküttesüsteemi hakati uurima jahutuse võtmes. Uuritav hoone modelleeriti tarkvadaga IDA ICE vastavalt põhiprojektides kirjeldatule. Põrandjahutuse ning juhtimisloogika modelleerimisel lähtuti normatiividest ning valdkonna firmade toodete võimekusest.

Hoonest valiti välja jahutuse seisukohast kõige ebasoodsamad korterid, mida hakati täpsemalt uurima. Eelneva korteri valimi põhjal koostati simulatsioonid erinevatel jahutuse seadeväärtustel uurimaks põrandjahutuse võimekust arvutuslikel välisõhu tingimustel. Saadi teada, et valdaval osal valimi köök-elutubadel tagas arvutuslikel välisõhu tingimustel siseõhu temperatuuri seadeväärtus $+24^{\circ}\text{C}$, millest lähtuti ka ülejäänud simulatsioonide puhul.

Lisaks uuriti mõningaid erijuhte. Ühe erijuhuna vaadeldi mõju põrandjahutusele juhul kui on köök-elutoas elutegevusest tingitud kõrgemad niiskuskooormused. Ilmnes asjaolu, et vaadeldud perioodil ei tuvastatud erilist mõju põrandjahutuse toimivusele kasutades kõrgendatud niiskuslisaga olukorda. Küll aga ilmnes mõju akna avamisega juhul. Akna avamisel tuulutusasendisse alanesid nii ruumiõhu temperatuur ning ka jahutamiseks vajaminev energia. Käesolevas töös vaadeldi akna avamise mõju põrandjahutusele põgusalt ning seda tuleks kindlasti täiendavalt uurida. Erijuhtude puhul uuriti põgusalt ka kohakuti asetsevate ruumide omavahelist mõju. Ilmnes asjaolu, et uuritava toa suhtes ülemisel korteril võib olla mõningane mõju alumise korteri suhtes, mõjutades ruumiõhu temperatuuri kuni $0,5^{\circ}\text{C}$. Rohkem mõju oli märgata jahutusenergiale, kus uuritava toa jahutusenergia suurenes ligikaudu 21% vaadeldud perioodil. Kortermajade puhul peaks põrandjahutust rakendama tervikuna, et vältida liigset korterite omavahelist mõju.

Töös uuriti kaht erinevat tehnilist teostust kahe- ning neljatorusüsteemi näol kasutades 2014.aasta kliimaandmeid. Kumulatiivselt täheldati, et kraadtundide arv tõusis ligikaudu 16% kahetorusüsteemi puhul võrreldes neljatorusüsteemiga. Tuleks aga silmas pidada asjaolu, et kütte- ning jahutusperiood määrati kahetorusüsteemil teoreetiliselt ning reaalses tingimustes tõenäoliselt nii täpselt seda ei tehta. Lisaks olid vabasoojused võrdlemisi sarnased hoone ulatuses, mis võisid põhjustada hoone suhteliselt ühtlast kütte- ning jahutusvajadust. Päriselulistest tingimustes võib seetõttu olla kahetorusüsteemi puhul kraadtundide arv suurem kui käesolevas töös leiti. Kahetorusüsteemi rakendamist võib kaaluda lisajahutusena või kui eesmärgiks on suviste tippude vähendamine. Kahe- ning neljatorusüsteemidele loodi skemaatilised

lahendused ning töökirjeldused korteri ühendusskeemide ning soojus- ja külmasõlme skeemide näol.

2014. aasta kliimafaili kasutades vaadeldi, et põrandjahutus suudab enamikes tubades tagada siseõhu temperatuuri piirnormi ligikaudu 98-99% ajast. Mõningates probleemsemates ruumides tuleks rakendada lisajahutust. Suures osas osutus siseõhu temperatuuri tagamine probleemseks ruumides, mille aknad olid suunatud enamuses läände. Ruumiõhu piirnormi täitmise koha pealt osutusid kõige probleemsetemaks ruumid, kus akna osakaal põrandapinda oli üle 0,30. Ei saa ka välistada, et peale korterite valimi ei ole rohkem probleemseid ruume. Tulemustest ilmnes, et kõige enam ületati siseõhu piirtemperatuuri just magamistubades, mitte niivõrd köök-elutubades. Seega tuli ka välja, et töö eelnevas punktis võidi alahinnata kohati põrandjahutuse võimekust hoida ruumitemperatuuri alla piirnormi kui uuriti toimivust arvutuslikes tingimustes vaadeldes ainult köök-elutubasid.

Põrandapinna temperatuuri seisukohast minimaalset põrandale seatud temperatuurist allapoole ei mindud. Küll aga olenevalt toas võis suvine põrandapinna temperatuur olla madalam paljale jalale soovituslikust põrandapinna temperatuurist. Olenevalt toast oli põrandapinna temperatuur soovituslikust piirist madalamal 35-85% ajast suvel. Seetõttu osades ruumides võib tekkida probleeme soojusliku mugavuse seisukohast jaheda põranda tõttu.

Ühe aspektina vaadeldi modelleerimise detailsust, kus ühelt poolt vaadeldi korteri detailsusega mudelit ning teisalt ruumide detailsusega mudelit. Tuli välja, et jahutusenergia seisukohast oli 4% kõrgem tulemus korteri detailsusega mudel. Ruumiõhu temperatuuri erinevus oli ligikaudu 8-kordne, suuremad väärtused ruumidega detailsusega mudelil.

Töös uuriti ka põrandjahutuse juhtimist ning kirjeldati asjaolusid, millega peab juhtimisel arvestama. Töö käigus saadi kinnitust asjaolule, et Eesti kliimatingimustes on tarvilik mõõta eluruumides suhtelist õhuniiskust ning kasutada kondenseerumist takistavaid meetmeid. Töös leiti, et põrandjahutus võib olla piisav viis tagada eluruumides ruumiõhu temperatuur alla piirnormi, kuid osadel probleemsematel juhtudel tuleks arvestada siiski lisajahutusega.

SUMMARY

In the course of the dissertation, the performance and technical solutions of the underfloor heating-based cooling system of Kiikri 6 apartment building were studied. At the beginning of the work, theoretical foundations were created to study floor cooling. Then, a case study object was selected, and the floor heating-based cooling system was studied. The case study building was modeled with IDA ICE software as described in the design projects. The modeling of floor cooling and control logic was based on norms and the capabilities of the products of the companies in the field.

The most unfavorable apartments in terms of cooling were selected from the building and further research was carried out. Based on the sample of the previous apartment, simulations were prepared at different cooling setpoints to investigate the floor cooling capacity under the design outdoor conditions. It was found that in the majority of the living rooms of the sample, the air temperature setpoint capable of cooling the majority of rooms was + 24°C, which was then used in the rest of the simulations.

In addition, some special cases were investigated. As a special case, the effect on floor cooling was considered if there are higher humidity loads in the kitchen-living room due to living activities. It was found that no significant effect on the performance of underfloor cooling was found during the investigated period using a situation with a high moisture content. However, there was an effect of opening the window in cases where opening the window had a favorable effect on lowering the room air. In this work, the effect of window opening on floor cooling was briefly examined and should definitely be further investigated. In another case, the interaction between vertical rooms was also briefly examined. It turned out that the apartment above the room in question may have some effect on the apartment below. In the study room, both the number of degree hours and the increase in cooling energy consumption were noticed because the ceiling of the study room no longer had a cooling effect. Therefore, in the case of apartment buildings, floor cooling should be applied as a whole in order to avoid excessive interactions between apartments.

In the study, two different distribution systems in the form of two- and four-pipe systems were studied using climate data of the year 2014. The work did not yield very different results between the two systems described above. This may have led to the fact that the heating and cooling periods on a given two-pipe system are unlikely to be determined as accurately as in theory than in real conditions. In addition, the internal heat gains were relatively similar throughout the building, which could lead to a relatively even heating and cooling demand for the building. However, in real-life conditions, the needs of apartments may differ and therefore it is not recommended to

use a two-pipe system as the only cooling solution. The implementation of a two-pipe system may be considered as additional cooling or if the aim is to reduce summer peaks. Schematic solutions and job descriptions were created for two- and four-pipe systems in the form of apartment connection diagrams and heating and cooling unit diagrams.

Using the 2014 climate file, it was observed that underfloor cooling can provide sufficient cooling capacity for approximately 98-99% of the time in most rooms. In some of the more problematic rooms, the indoor air temperature turned out to be so high that additional cooling, such as air conditioning, should be applied. For the most part, maintaining the indoor air temperature proved to be the most problematic in bedrooms. It cannot be ruled out that there are no more problematic rooms in addition to the sample rooms. In terms of floor surface temperature, it did not go below the minimum floor temperature. However, depending on the room, the summer floor temperature may have been lower than the recommended floor temperature for bare feet. Depending on the room, the floor surface temperature was below the recommended limit 35-85% of the time in summer.

In one aspect, the accuracy of the model was considered, where on the one hand the model accuracy was an apartment and on the other hand the model accuracy was a room. It turned out that there was not a big difference in terms of cooling energy. The cooling energy consumption of the room-precision model was 4% lower than that of the apartment-precision model. However, there was a bigger difference in terms of indoor air temperature. The results showed that the indoor air temperature limit was exceeded the most in the bedrooms, not so much in the kitchen-living rooms. Thus, it also turned out that in the previous point of the work, the efficiency of floor cooling could be underestimated in some cases when examining the performance in computational conditions by looking only at the kitchen-living rooms.

The work also examined the control of floor cooling and described the circumstances that must be taken into account in the design process. In the course of the work, it was confirmed that in Estonian climatic conditions it is necessary to measure the indoor air humidity and take preventive steps in order to avoid condensation of the floor.

The study found that floor cooling can be a potential way to ensure that the indoor temperature does not rise very high in dwellings, but in some cases additional cooling should still be considered.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] S. C. Chapman, N. W. Watkins, and D. A. Stainforth, "Warming Trends in Summer Heatwaves," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 46, no. 3, 2019, doi: 10.1029/2018GL081004.
- [2] M. S. Andargie, M. Touchie, and W. O'Brien, "A review of factors affecting occupant comfort in multi-unit residential buildings," *Building and Environment*, vol. 160, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106182.
- [3] B. Olesen, "Radiant floor cooling systems," *ASHRAE J.*, vol. 50, no. 9, 2008.
- [4] J. ; Babiak and G. Vagiannis, "Thermally Activated Building System (TABS): Efficient cooling and heating of commercial buildings," in *Climamed 2015*, 2015, no. September.
- [5] A. Dadoo and L. Gustavsson, "Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios," *Energy*, vol. 97, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.086.
- [6] L. Bergia Boccardo, O. B. Kazanci, J. Quesada Allerhand, and B. W. Olesen, "Economic comparison of TABS, PCM ceiling panels and all-air systems for cooling offices," *Energy Build.*, vol. 205, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109527.
- [7] K. N. Rhee, B. W. Olesen, and K. W. Kim, "Ten questions about radiant heating and cooling systems," *Build. Environ.*, vol. 112, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.030.
- [8] F. Meggers, V. Ritter, P. Goffin, M. Baetschmann, and H. Leibundgut, "Low exergy building systems implementation," *Energy*, vol. 41, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.07.031.
- [9] A. Reilly and O. Kinnane, "The impact of thermal mass on building energy consumption," *Appl. Energy*, vol. 198, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.024.
- [10] D. O. Rijksen, C. J. Wisse, and A. W. M. van Schijndel, "Reducing peak requirements for cooling by using thermally activated building systems," *Energy Build.*, vol. 42, no. 3, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.007.
- [11] A. Staszczuk and T. Kuczyński, "The impact of floor thermal capacity on air

- temperature and energy consumption in buildings in temperate climate," *Energy*, vol. 181, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.202.
- [12] E. Bourdakis, O. B. Kazanci, and B. W. Olesen, "Load calculations of radiant cooling systems for sizing the plant," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 78, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.333.
- [13] M. A. Hassan and O. Abdelaziz, "Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems – Part II: Simulation, control, and integration," *Energy and Buildings*, vol. 224. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110263.
- [14] J. Romani, A. De Gracia, and L. F. Cabeza, "Simulation and control of thermally activated building systems (TABS)," *Energy and Buildings*, vol. 127. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.057.
- [15] ASHRAE, "Thermal environmental conditions for human occupancy," *ASHRAE Stand.*, no. 55, 2010.
- [16] EVS-EN 16798-1:2019, "Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6," 2019. <https://www.evs.ee/et/evs-en-16798-1-2019> (accessed Apr. 06, 2021).
- [17] B. W. Olesen, "THERMAL COMFORT REQUIREMENTS FOR FLOORS OCCUPIED BY PEOPLE WITH BARE FEET.," in *ASHRAE Transactions*, 1977, vol. 83, no. Pt 2.
- [18] EVS-EN ISO 11855-1:2015, "Building environment design - Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems - Part 1: Definition, symbols, and comfort criteria," 2015. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-11855-1-2015> (accessed Apr. 02, 2021).
- [19] J. Babiak and B. W. Olesen, "Low Temperature Heating and High Temperature Cooling," *REHVA*, no. 7, 2013.
- [20] ASHRAE, *2019 ASHRAE Handbook - HVAC Applications, SI EDITION*. 2019.
- [21] J. Feng, S. Schiavon, and F. Bauman, "Cooling load differences between radiant and air systems," *Energy Build.*, vol. 65, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.009.
- [22] J. Feng, S. Schiavon, and F. Bauman, "New method for the design of radiant

- floor cooling systems with solar radiation," *Energy Build.*, vol. 125, pp. 9–18, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.048.
- [23] J. Pantelic, S. Schiavon, B. Ning, E. Burdakis, P. Raftery, and F. Bauman, "Full scale laboratory experiment on the cooling capacity of a radiant floor system," *Energy Build.*, vol. 170, pp. 134–144, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.002.
- [24] EVS-EN ISO 11855-2:2015, "Building environment design - Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems - Part 2: Determination of the design heating and cooling capacity," 2015. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-11855-2-2015> (accessed Apr. 02, 2021).
- [25] EVS-EN ISO 11855-3:2015, "Building environment design - Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems - Part 3: Design and dimensioning," 2015. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-11855-3-2015> (accessed Apr. 02, 2021).
- [26] EQUA Simulation AB, "User Manual IDA Indoor Climate and Energy Version 4.5," 2013. <http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ice45eng.pdf> (accessed Apr. 02, 2021).
- [27] J. Joe and P. Karava, "A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings," *Appl. Energy*, vol. 245, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.209.
- [28] W. J. N. Turner, I. S. Walker, and J. Roux, "Peak load reductions: Electric load shifting with mechanical pre-cooling of residential buildings with low thermal mass," *Energy*, vol. 82, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.02.011.
- [29] M. Schmelas, T. Feldmann, and E. Bollin, "Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm," *Energy Build.*, vol. 103, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.012.
- [30] J. H. Lim, J. H. Jo, Y. Y. Kim, M. S. Yeo, and K. W. Kim, "Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 1, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.01.019.
- [31] ASHRAE, *ASHRAE HVAC Systems and Equipment*. ASHRAE Handbook, 2016.
- [32] EQUA Simulation Technology Group, "IDA Indoor Climate and Energy," no.

- 2014/09/08. EQUA Simulation AB, 2014, [Online]. Available:
<https://www.equa.se/en/ida-ice>.
- [33] "Kiikri Residentside elukvartal." <https://www.kiikri6.ee/> (accessed Mar. 29, 2021).
- [34] Neeme Tiimus, *Kiikri 6 äripindadega korterelamu põhiprojekt*. Tallinn: PIN Arhitektid OÜ, 2020.
- [35] U. Saksakulm, *Kiikri 6 korterelamu kütte, ventilatsiooni ja jahutuse põhiprojekt*. Tallinn: Kliimakonsult OÜ, 2020.
- [36] EVS-EN ISO 10456:2008, "EHITUSMATERJALID ja -TOOTED. Soojus ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid.," 2008.
<https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10456-2008> (accessed Mar. 27, 2021).
- [37] "Columbia Kivi 190-õõnesplokki." <https://www.columbia-kivi.ee/190-oonesplokk/> (accessed Mar. 27, 2021).
- [38] "Toimivusdeklaratsioon EPS," 2018.
https://estplast.ee/pdf/TOIMIVUSDEKLARATSIOON_006_EPS_100.pdf?rand=3781 (accessed Mar. 27, 2021).
- [39] "Toimivusdeklaratsioon Isover Acoustic," 2020.
<https://www.isover.ee/tooted/isover-acoustic> (accessed Mar. 27, 2021).
- [40] "Toimivusdeklaratsioon Isover Standard," 2020.
<https://www.isover.ee/tooted/isover-standard> (accessed Mar. 27, 2021).
- [41] "Bauroc Manual," 2017. <https://bauroc.ee/uploads/sites/2/2018/05/bauroc-manual-EST-27.04.2018.pdf> (accessed Mar. 27, 2021).
- [42] "Toote teabeleht PAUROC ROB 60gt," 2020.
<https://www.paroc.ee/tooted/konstruktsioonid/lamekatuste-soojustus-/paroc-rob-60gt> (accessed Mar. 27, 2021).
- [43] B. Park, "Thermal Analysis of Hollow Core Ventilated Slab Systems," University of Colorado, 2016.
- [44] "Kingspan Insulation Tooteloend," 2020. <https://www.kingspan.com/ee/et-ee/tooted/soojustus/therma/therma-tr26-soojustusplaat-lamekatustele-et>

(accessed Mar. 27, 2021).

- [45] "Toimivusdeklaratsioon XPS," 2013. <https://www.isover.ee/tooted/xps-250-foam-sl-endine-styrofoam-250-sl-n> (accessed Mar. 27, 2021).
- [46] EVS-EN ISO 6946:2017, "Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojusläbivus. Arvutusmeetodid.," 2017. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6946-2017> (accessed Mar. 27, 2021).
- [47] "SketchUp." Trimble Inc., [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/>.
- [48] "SGG DIAMANT tootebrožüür." https://www.saint-gobain-facade-glass.com/sites/saint-gobain-facade-glass.com/files/Resources/diamant_brochure.pdf (accessed Mar. 27, 2021).
- [49] D. A/S, *Installation Guide: Expansion Module for Danfoss Icon Master*. 2018.
- [50] KAN, *SÜSTEEM KAN-therm: Põrandkütte juhend*. 2015.
- [51] REHAU AG, *NEA Smart 2.0 Service Manual*. 2019.
- [52] Uponor, *Radiant Cooling Design Manual*. 2013.
- [53] EVS 906:2018, "Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017," 2018. <https://www.evs.ee/et/evs-906-2018> (accessed Apr. 02, 2021).
- [54] Riigi Kinnisvara AS, "KÜLMAVARUSTUS JA JAHUTUS," 2020. <https://nouded.rkas.ee/images/files/05-KULMAVARUSTUS-JA-JAHUTUS.pdf> (accessed Apr. 02, 2021).
- [55] Majandus- ja taristuminister, *Hoone Energiatõhususe Arvutamise Metoodika*. Avaldamismärge: RT I, 07.07.2020, 12.
- [56] T. Kalamees and J. Kurnitski, "Estonian test reference year for energy calculations.," *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 40–58, 2006.
- [57] ASHRAE, "ASHRAE Handbook Fundamentals 2017, SI Edition," in *ASHRAE Handbook*, 2017.

LISAD

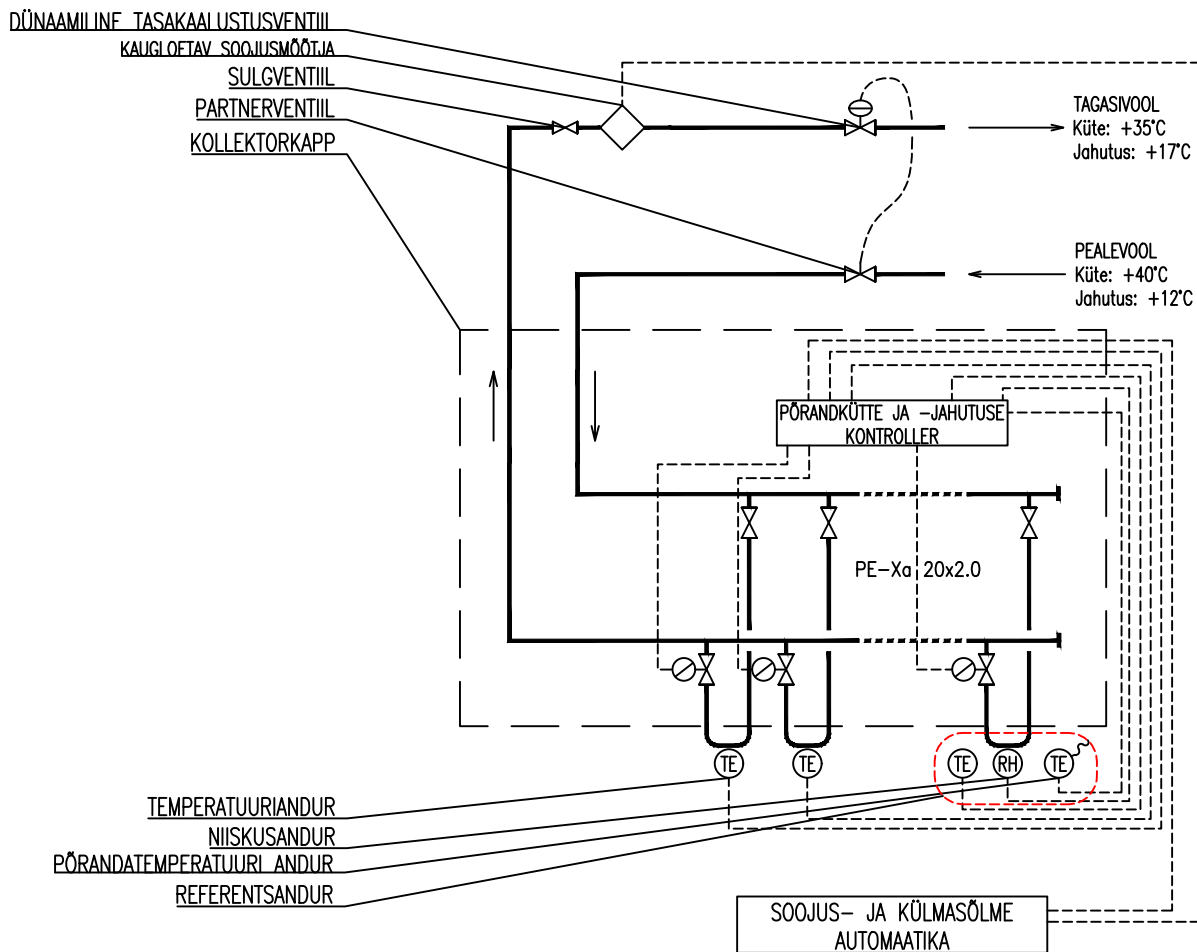
Lisa 1. Hoone tarindid

Tarind	Tähis	Kiht (seest välja/ülevaalt alla)	Paksus [mm]	U-arv [W/(m ² ·K)]	Märkus	
Välissein	VS-1	Monoliitne raudbetoon	250	0,60	Keldrikorruse sein vastu pinnast	
		Ekstrudeeritud käärgpolüstüreen soojustus (XPS)	50			
		Σ	300			
	VS-2	Krohv	5	0,129	Kortermaja välissein	
		Kipsplaat	26			
		Mineraalvill+metalloovitus (samm 600)	275			
		Tsementkiudplaat	9			
		Σ	315			
	VS-3	Krohv	5	0,175	Kortermaja välissein	
		Monoliitne raudbetoon	200			
		Mineraalvill+metalloovitus (samm 600)	200			
		Tsementkiudplaat	9			
		Σ	414			
	VS-4	Krohv	5	0,128	Kortermaja välissein	
		Kipsplaat	39			
		Mineraalvill+metalloovitus (samm 600)	275			
Tsementkiudplaat		18				
Σ		337				
Katuslagi	KL-1	Bituumen	1	0,10	Kortermaja katuslagi	
		Kivivill	25			
		PIR	160			
		EPS	85			
		Raudbetoon õõnespaneel	220			
		Krohv	5			
		Σ	496			
	KL-2	Bituumen	1	0,11	Katuslagi korteri ning terrassi vahel	
		PIR	160			
		EPS	85			
		Raudbetoon õõnespaneel	265			
		Krohv	5			
		Σ	516			
	KL-3	XPS	50	0,59	Keldrikorruse katuslagi vastu pinnast	
		Monoliitne raudbetoon	300			
		Σ	350			
	Põrand-pinnasel	PP-1	Monoliitne raudbetoon	450	2,74	Keldrikorruusel vastu pinnast
			Σ	450		
Vahelagi	VL-1	Parkett	14	0,51	Korteritevahelise vahelagi	
		Raudbetoonplaat	80			

Tarind	Tähis	Kiht (seest välja/ülevalt alla)	Paksus [mm]	U-arv [W/(m ² ·K)]	Märkus
		Kivivill	30		
		EPS	25		
		Raudbetoon õõnespaneel	265		
		Σ	414		
	VL-2	Parkett	14	0,19	Vahelagi äripindade ja keldri vahel
		Monoliitne raudbetoon	320		
		Isover Standard	180		
		Σ	514		
	VL-3	Parkett	14	0,17	Vahelagi korteri ja keldri vahel
		Raudbetoonplaat	80		
		PIR	100		
		EPS	50		
		Monoliitne raudbetoon	320		
		Σ	564		
Sisesein	SS-1	Krohv	5	3,71	Korteri sisesein
		Monoliitne raudbetoon	200		
		Krohv	5		
		Σ	210		
	SS-2	Krohv	5	0,35	Korteri sisesein
		Kergblokk Bauroc (Acoustic)	150		
		Isover Acoustic	30		
		Õhkvähe	20		
		Kergblokk Bauroc (Classic)	100		
		Krohv	5		
		Σ	310		
	SS-3	Krohv	5	1,31	Korteri šahtisein
		Kergblokk Bauroc (Acoustic)	100		
		Σ	105		
	SS-4	Krohv	5	0,49	Korteri sisesein
		Kipsplaat	25		
		Isover Acoustic	66		
		Kipsplaat	25		
		Krohv	5		
		Σ	126		
	SS-5	Krohv	5	0,33	Korteri ja liftišahti vaheline sein
Kipsplaat		25			
Isover Acoustic		95			
Õhkvähe		30			
Monoliitne raudbetoon		200			
Σ		355			
SS-6	Krohv	5	0,67	Korteri sisesein	
	Monoliitne raudbetoon	200			


Tarind	Tähis	Kiht (seest välja/ülevalt alla)	Paksus [mm]	U-arv [W/(m ² ·K)]	Märkus
		Õhkvähe	8		
		Isover Acoustic	42		
		Kipsplaat	25		
		Krohvi	5		
		Σ	285		
	SS-7	Krohvi	5	0,24	Korteri sisesein
		Kergblokk Bauroc (Acoustic)	150		
		Isover Acoustic	30		
		Õhkvähe	20		
		Kergblokk Bauroc (Classic)	100		
		Õhkvähe	8		
		Isover Acoustic	42		
		Kipsplaat	25		
		Krohvi	5		
		Σ	200		
	SS-8	Krohvi	5	0,52	Korteri sisesein
		Kipsplaat	25		
		Isover Acoustic	42		
		Kergblokk Bauroc (Acoustic)	100		
		Σ	172		

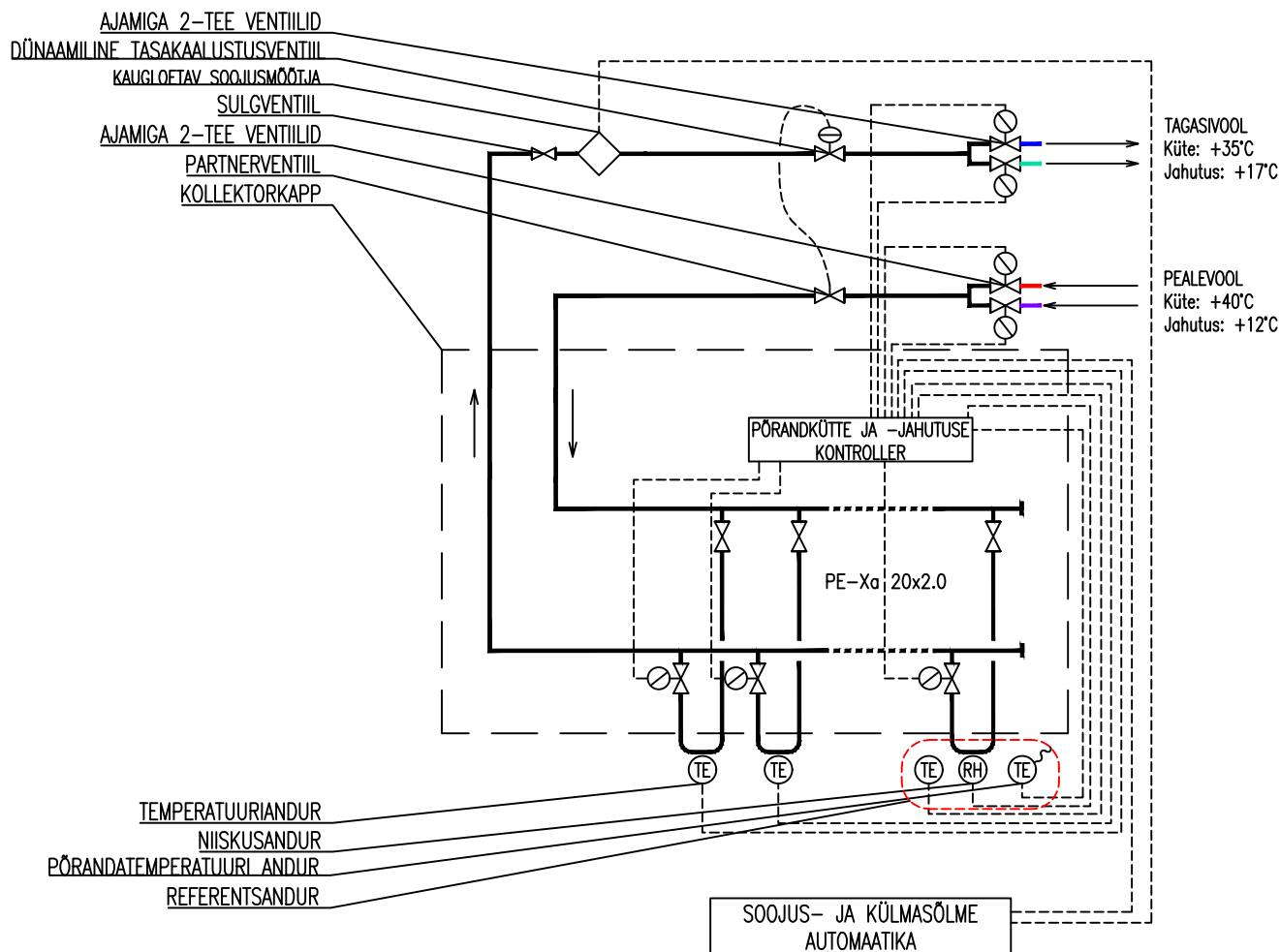
GRAAFILINE OSA



Märkused:


- Korterite kontrollid juhivad korteri põrandkütte ning -jahutuse tööd;
- Korterite kontrollid peavad olema võimelised suhtlema hooneautomaatikaga;
- Ruumitemperatuuri saab reguleerida tubadesse paigaldatud termostaatide abil;
- Vooluhulka juhitakse ajamitega 2-tee ON/OFF ventiilide abil;
- Jahutusrežiimi võib lülitada juhul kui teatud aja jooksul (nt 3h) ei ole ükski ruum olnud kütterežiimis, vältimaks tihedat režiimivahetust;
- Olenevalt kasutatavatest tootest peavad olema võimalik vähemalt ühe anduriga mõõta ruumiõhu suhtelist niiskust ning põrandapinna temperatuuri (võimalusel mõõta igas ruumis);
- Kondensaadiohu tekkimisel sulguvad tsooni ajamid kuniks on tagatud tarvilik töötingimused;
- Põrandatemperatuuri langemisel alla piirnõrmi sulguvad tsooni ajamid kuniks on tagatud tarvilikud töötingimused.

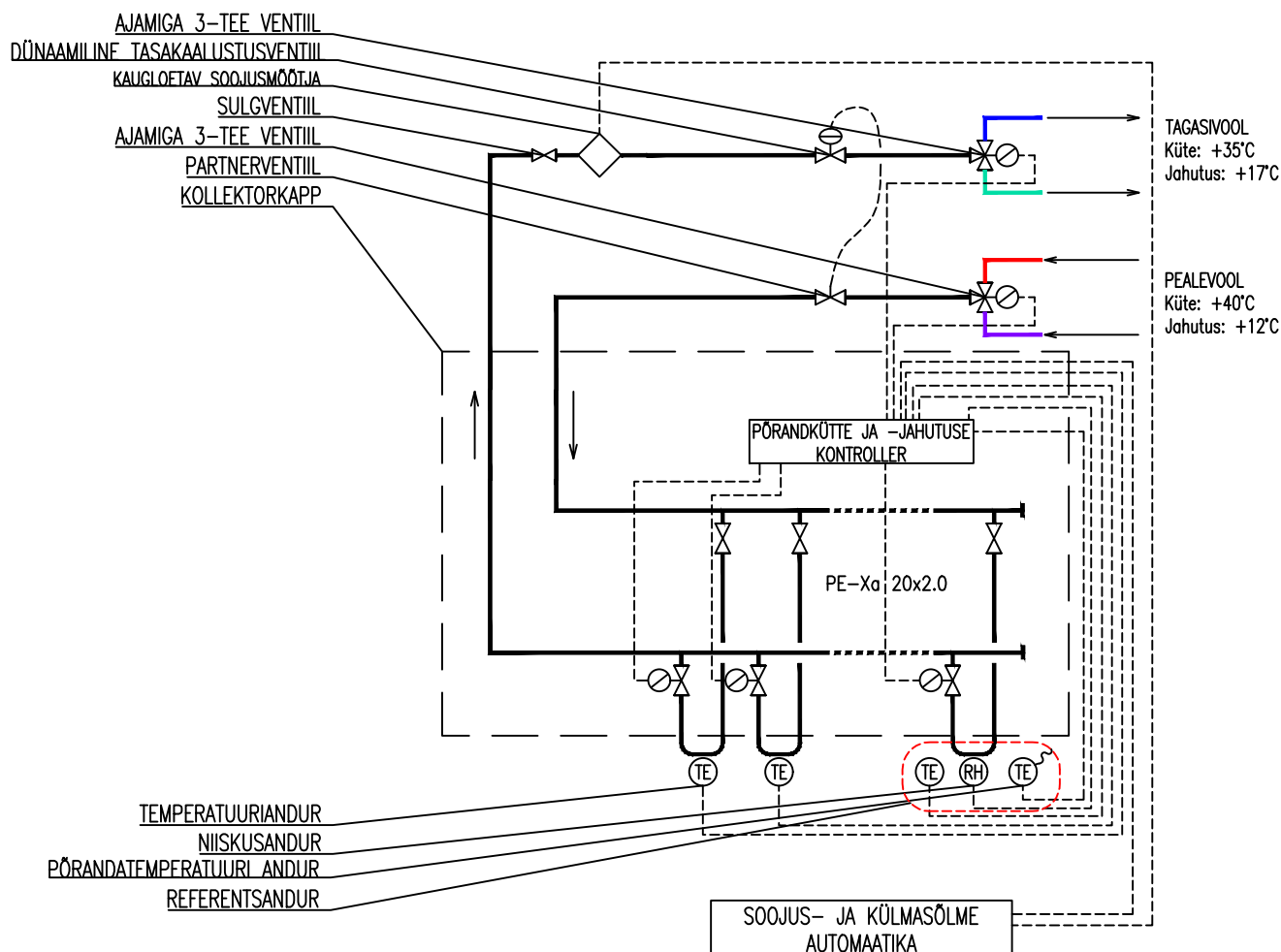
	Tallinna Tehnikaülikool <i>Inseneriteaduskond</i> Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt:	<i>Kiikri 6 kortermaja</i>		Töö nr:	-	
	Õppeaine:	-	Objekti aadress:	-			
Teostas: Kood	Paul Nael 144568EAKI	Joonise nimetus:	<i>2-torusüsteemi korteri ühendusskeem</i>		Mõõtkaava:	-	
Juhendas:	-	Staadium:	-	Kuupäev:	17.05.2021	Joonise nr.	1/6
Hindas:	-	Faili nimi:	Skeemid.dwg				



Märkused:

- Korterite kontrollid juhivad korteri põrandkütte ning -jahutuse tööd;
- Korterite kontrollid peavad olema võimelised suhtlema hooneautomaatikaga;
- Ruumitemperatuuri saab reguleerida tubadesse paigaldatud termostaatide abil;
- Vooluhulka juhitakse ajamitega 2-tee ON/OFF ventiilide abil;
- Jahutusrežiimi võib lülitada juhul kui teatud aja jooksul (nt 3h) ei ole ükski ruum olnud kütterežiimis, vältimaks tihedat režiimivahetust;
- Olenevalt kasutatavatest tootest peab olema võimalik vähemalt ühe anduriga mõõta ruumiõhu suhtelist niiskust ning põrandapinna temperatuuri (võimalusel mõõta igas ruumis);
- Kondensaadiohu tekkimisel sulguvad tsoonid ajamid kuniks on tagatud tarvilik töötingimused;
- Põrandatemperatuuri langemisel alla piirnormi sulguvad tsoonid ajamid kuniks on tagatud tarvilikud töötingimused.
- Vastavalt kütte- ja jahutusrežiimile avatakse ja sulgetakse korteri sisendil ajamitega ventiilid.

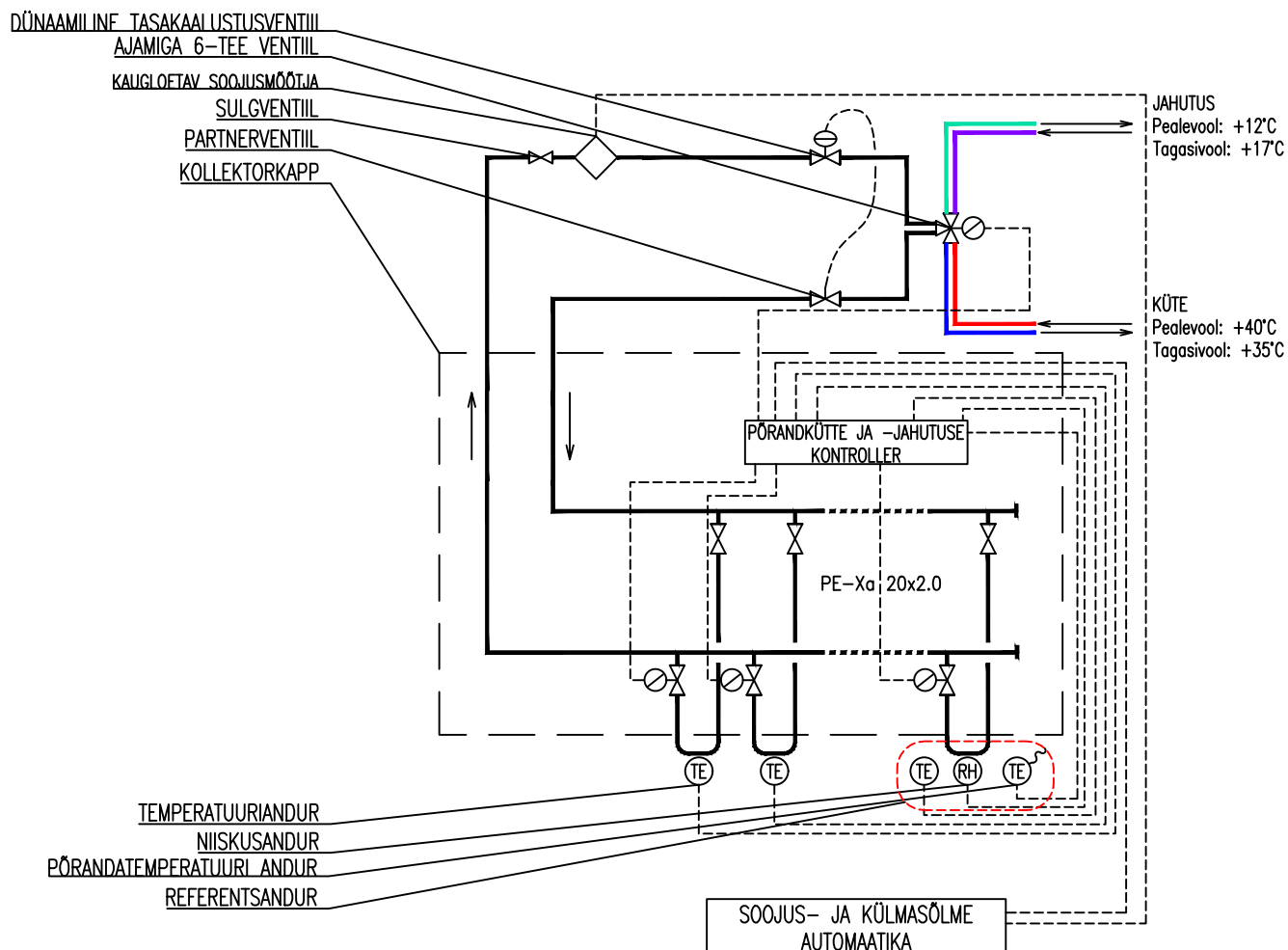
	Tallinna Tehnikaülikool <i>Inseneriteaduskond</i> Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: <i>Kiikri 6 kortermaja</i>	Töö nr: -
	Õppeaine: -	Objekti aadress: -	
Teostas: Kood	Paul Nael 144568EAKI	Joonise nimetus: <i>4-torusüsteemi korteri ühendusskeem 4X2-TEE</i>	Mõõtkava: -
Juhendas: -	Staadium: -	Kuupäev: 17.05.2021	Joonise nr. 2/6
Hindas: -	Faili nimi: Skeemid.dwg		



Märkused:

- Korterite kontrollid juhivad korteri põrandkütte ning -jahutuse tööd;
- Korterite kontrollid peavad olema võimelised suhtlema hooneautomaatikaga;
- Ruumitemperatuuri saab reguleerida tubadesse paigaldatud termostaatide abil;
- Vooluhulka juhitakse ajamitega 2-tee ON/OFF ventiilide abil;
- Jahutusrežiimi võib lülitada juhul kui teatud aja jooksul (nt 3h) ei ole ükski ruum olnud kütterežiimis, vältimaks tihedat režiimivahetust;
- Olenevalt kasutatavatest tootest peab olema võimalik vähemalt ühe anduriga mõõta ruumiõhu suhtelist niiskust ning põrandapinna temperatuuri (võimalusel mõõta igas ruumis);
- Kondensaadiohu tekkimisel sulguvad tsooni ajamid kuniks on tagatud tarvilik töötingimused;
- Põrandatemperatuuri langemisel alla piirnormi sulguvad tsooni ajamid kuniks on tagatud tarvilikud töötingimused.
- Vastavalt kütte- ja jahutusrežiimile määratakse korteri sisendil ventiili asend (küte või jahutus).

	Tallinna Tehnikaülikool <i>Inseneriteaduskond</i> Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt: <i>Kiikri 6 kortermaja</i>	Töö nr: -	
	Õppeaine: -	Objekti aadress: -		
Teostas: Kood	Paul Nael 144568EAKI	Joonise nimetus: <i>4-torusüsteemi korteri ühendusskeem 2x3-TEE</i>	Mõõtkava: -	
Juhendas:	-	Staadium: -	Kuupäev: <i>17.05.2021</i>	Joonise nr. <i>3/6</i>
Hindas:	-	Faili nimi:	Skeemid.dwg	



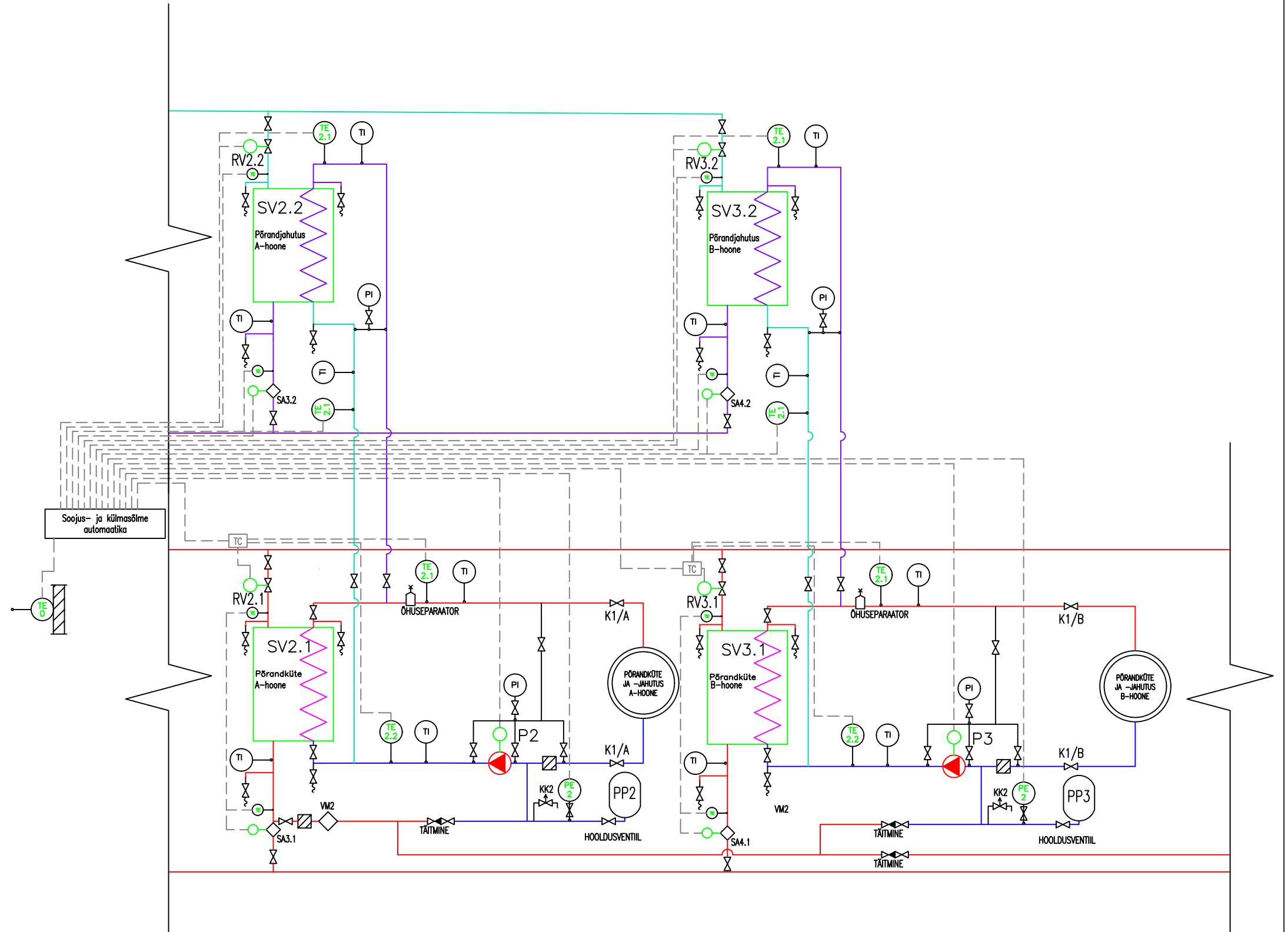
Märkused:

- Korterite kontrollid juhivad korteri põrandkütte ning -jahutuse tööd;
- Korterite kontrollid peavad olema võimelised suhtlema hooneautomaatikaga;
- Ruumitemperatuuri saab reguleerida tubadesse paigaldatud termostaatide abil;
- Vooluhulka juhitakse ajamitega 2-tee ON/OFF ventiilide abil;
- Jahutusrežiimi võib lülitada juhul kui teatud aja jooksul (nt 3h) ei ole ükski ruum olnud kütterežiimis, vältimaks tihedat režiimivahetust;
- Olenevalt kasutatavatest tootest peab olema võimalik vähemalt ühe anduriga mõõta ruumiõhu suhtelist niiskust ning põrandpinna temperatuuri (võimalusel mõõta igas ruumis);
- Kondensaadiohu tekkimisel sulguvad tsooni ajamid kuniks on tagatud tarvilik töötingimused;
- Põrandatemperatuuri langemisel alla piirnormi sulguvad tsooni ajamid kuniks on tagatud tarvilikud töötingimused.
- Vastavalt kütte- ja jahutusrežiimile määratakse korteri sisendil ventiili asend (küte või jahutus).

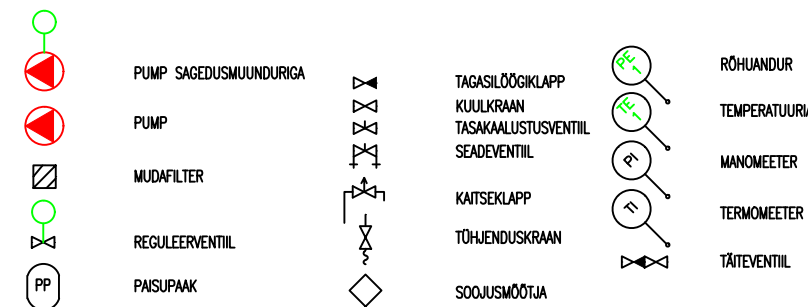
	Tallinna Tehnikaülikool <i>Inseneriteaduskond</i> Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt:	<i>Kiikri 6 kortermaja</i>		Töö nr:	-	
	Õppeaine:	-	Objekti aadress:	-			
Teostas: Kood	Paul Nael 144568EAKI	Joonise nimetus:	<i>4-torusüsteemi korteri ühendusskeem 6-TEE</i>		Mõõtka:	-	
Juhendas:	-	Stadium:	-	Kuupäev:	17.05.2021	Joonise nr.	4/6
Hindas:	-	Faili nimi:	Skeemid.dwg				

Märkused:

- A ning B hooneosad on lahendatud eraldiseivate soojusvahetitega;
- Külma varustust ei ole lahendatud;
- Soojusvarustus tagatakse kaugküttevõrgust;
- Kütte ning jahutuse pealevoolutemperatuure juhitakse tsentraalselt;
- Kütte pealevoolutemperatuur määratakse vastavalt välisõhu temperatuurile;
- Jahutuse pealevoolutemperatuuri hoitakse konstantsena +12°C juures;
- 2-torusüsteemi puhul kütte- ning jahutusperiood määratakse vastavalt välistingimustele;
- Vastavalt kütte- või jahutusperioodile suletakse/avatakse vastavate soojusvahetite kontuurid;
- Sagedusmuunduritega ringluspumpad hoiavad süsteemis konstantset rõhku.



TINGMÄRGID:

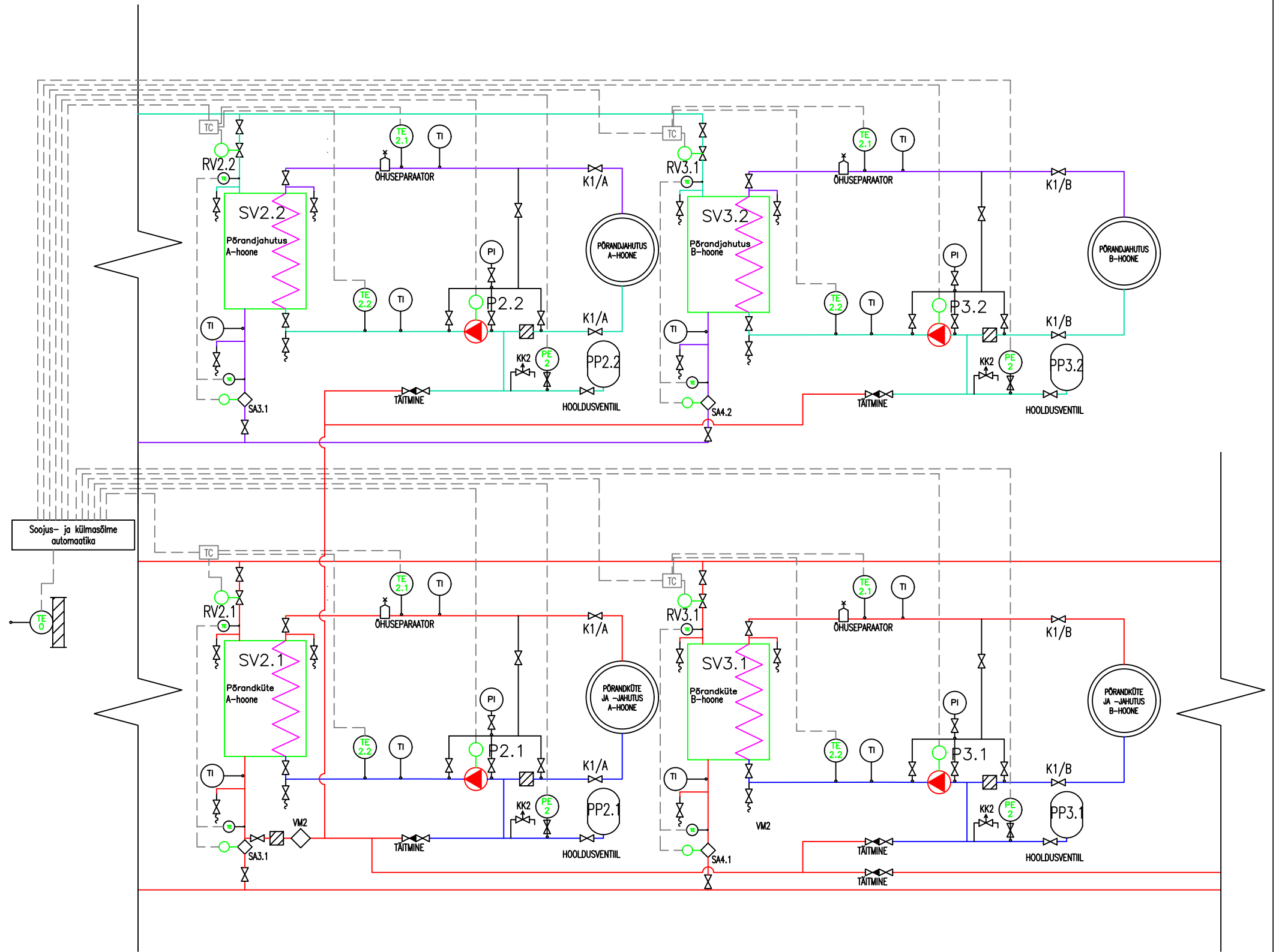


Tallinna Tehnikaülikool
Inseneriteaduskond
Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086

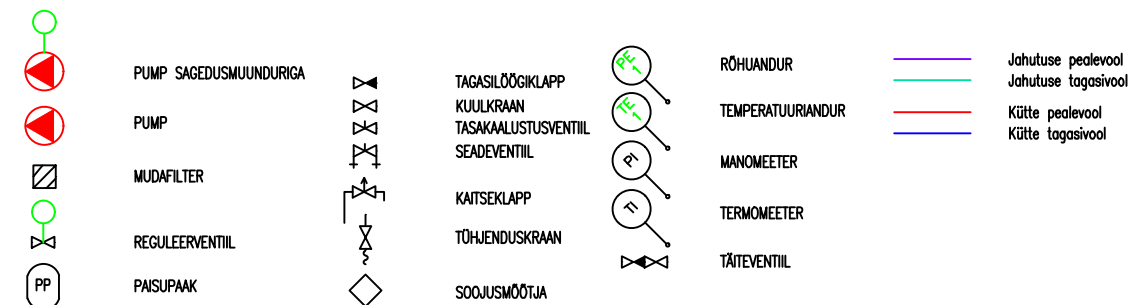
Objekt:	Kikkri 6 kortermaja		Töö nr:	-
Õppeaine:	-			
Objekti address:	-			
Teostas:	Paul Nael		Joonise nimetus:	2-torusüsteemi soojus- ja külmasõlm
Kood:	144568EAKI		Mõõtkava:	-
Juhendas:	-	Staadium:	-	Kuupäev: 17.05.2021
Hindas:	-	Faili nimi:	Skeemid.dwg	
			Joonise nr.	5/6

Märkused:

- A ning B hooneosad on lahendatud eraldiseivate soojusvahetitega;
- Külmavarustust ei ole lahendatud;
- Soojusvarustus tagatakse kaugküttevõrgust;
- Kütte ning jahutuse pealevoolutemperatuure juhitakse tsentraalselt;
- Kütte pealevoolutemperatuur määratakse vastavalt välisõhu temperatuurile;
- Jahutuse pealevoolutemperatuuri hoitakse konstantsena +12°C juures;
- 4-torusüsteemi puhul kütte- ning jahutusperiood võivad vastavalt oludele kattuda ning määratakse vastavalt välistingimustele;
- Sagedusmuunduritega ringluspumpad hoiavad süsteemis konstantset rõhku.



TINGMÄRGID:



	Tallinna Tehnikaülikool Inseneriteaduskond Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Objekt:	Kiikri 6 kortermaja	Töö nr:	-
	Õppeaine:	-	Objekti aadress:	-	
Teostas:	Paul Nael	Joonise nimetus:	4-torusüsteemi soojus- ja külmasõlm	Mõõtka:	-
Kood:	144568EAKI	Stadium:	-	Kuupäev:	17.05.2021
Juhendas:	-	Faili nimi:	Skeemid.dwg	Joonise nr.	6/6
Hindas:	-				