

Energiatehnoloogia instituut

KAUGJAHUTUSE TEMPERATUURIDE TÕSTMISE MÕJU

EFFECT OF INCREASING DISTRICT COOLING TEMPERATURES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Robert Raag

Üliõpilaskood 183106MASM

Juhendaja: Phd Igor Krupenski, lektor

Tallinn 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

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

"25" mai 2020a

Autor:

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"25" mai 2020a

Juhendaja:

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/allkirjastatud digitaalselt/

Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Robert Raag, 183106MASM
Õppekava: Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika, MASM02/18
Juhendaja: Lektor, Igor Krupenski, +372 5800 3989

Lõputöö teema:

Kaugjahutuse temperatuuride tõstmise mõju
Effect of increasing district cooling temperatures

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida temperatuuride tõstmise mõju vabajahutuse kasutamisele jahutuse tootmiseks
2. Analüüsida kõrgemate temperatuuridega kaugjahutuse energeetilist, majanduslikku ning keskkonnalast mõju

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kaugjahutuse teoreetilise osa uurimine ning töö antud peatüki formuleerimine	31.01
2.	Vabajahutuse potentsiaali analüüs eri temperatuuridel	15.02
3.	Majanduslik ja keskkonnaalane analüüs	15.04
4.	Lõputöö terviklik esitamine juhendajale	30.04

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "25" mai 2020a

Üliõpilane: Robert Raag "25" mai 2020a

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Igor Krupenski "25" mai 2020a

/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Eduard Latõšov "25" mai 2020a

/allkirjastatud digitaalselt/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
1 KAUGJAHUTUSSÜSTEEMID NING HOONETE LOKAALSED JAHUTUSSÜSTEEMID	8
1.1 Kaugjahutuses kasutatavad tehnoloogiad	11
1.1.1 Absorptsioon jahutus	11
1.1.2 Vaba jahutus	14
1.1.3 Kompressorjahutid	17
1.1.4 Jahutuse salvestid	18
1.2 Hoonete jahutussüsteemid	19
1.2.1 Jahutusallikad hoonetes	20
1.2.2 Enamlevinud ruumide jahutuse lahendused	22
1.2.3 Temperatuurid jahutussüsteemides	24
1.3 Hoonete jahutussõlmed ning jahutusseadmete ühendamine hoones	25
2 KÕRGETEMPERAATUURILISE KAUGJAHUTUSE MÕJU PERSPEKTIIVSELE TALLINNA KESKLINNA KAUGJAHUTUSVÕRGULE.....	28
2.1 Jahutusvajadus	29
2.2 Tallinna kesklinna kaugjahutusvõrgu jahutusprofiil.....	33
2.3 Vabajahutuse võimalused Tallinnas	35
2.3.1 Vabajahutuse sissevoolu torustiku asukoha valik	36
2.3.2 Tallinna lahe vabajahutuse potentsiaal	37
2.4 Energeetiline mõju temperatuuride tõstmisel kaugjahutuse võrgus	40
2.5 Majanduslik mõju temperatuuride tõstmisel kaugjahutuse võrgus	44
2.5.1 Suurem vabajahutuse osakaal	44
2.5.2 Väiksemad torudiametrid	47
2.6 Vabajahutuse mõju keskkonnale.....	48
2.6.1 Mõju teiste paikade kogemusel	48
2.6.2 Kaugjahutuse mõju keskkonnale	48
2.6.3 Täiendavad võimalused keskkonnamõju vähendamiseks	50
KOKKUVÕTE	51
ABSTRACT	53
KASUTATUD MATERJALID	55

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema on valitud juhendaja Igor Krupenski ettepanekul. Töö eesmärgiks on analüüsida kaugjahutusvõrkudes kõrgema temperatuuriga soojuskandja kasutamise mõju energeetilisest, majanduslikest ning keskkonnaalastest aspektidest. Samuti analüüsida vabajahutuse potentsiaali muutust eri temperatuurigraafikute kasutamisel. Töö on koostatud perioodil november 2019 kuni mai 2020. Andmed töö jaoks on kogutud avalikest allikatest ning varem koostatud teadusartiklitest.

Töö autor tänab töö koostamisel abiks olnud inimesi.

Märksõnad: kaugjahutus, kõrgetemperatuuriline, vabajahutus, magistritöö

SISSEJUHATUS

Säästev areng ning jätkusuutliku energeetika juurutamine on teemad, mis leiavad igas arenenud ühiskonnas aasta-aastalt rohkem tähelepanu. Eri valdkondades toetatakse uute keskkonnasäästlike tehnoloogiate kasutuselevõtmist, „roheline“ kütuste kasutamist, loodushoidu ning teisi valdkondi, mis seostuvad puhtama tulevikuga. Tihti saab takistuseks uute tehnoloogiate kasutuselevõtmisel nende sotsiaalmajanduslik mõju – kaovad töökohad, väheneb piirkonna SKP, samuti tahtmatus muuta süsteeme, mis töötanud alates kasutuselevõtmisest muutumatult. Seda enam on oluline uute tootmis- ja tööstusharude juurutamise korral võtta kasutusele parimad võimalikud tehnoloogiad, sest hiljem on muutuste tegemine juba tunduvalt keerukam, vahel ka võimatu.

Eestis, sarnaselt teistele postsovetlikele riikidele, on laialdaselt levinud kaugkütte kasutamine. Hinnanguliselt saab 60% Eesti elanikkonnast kodusoojuse kaugküttevõrgust. Aegamööda käib võrkude rekonstrueerimine, kuid keerukaks väljakutseks on osutunud tänapäevastele madaltemperatuurilistele IV põlvkonna kaugküttevõrkudele üleminek. Määravaks põhjuseks on olemasolev taristu, mis soosib kõrgete temperatuuride kasutamist ning temperatuuride allatoomine on tehniliselt võimatu. Kõrgete temperatuuridega kaugküttevõrk on aga tunduvalt ressursinõudlikum, võrreldes madalamate temperatuuride kasutamisega.

Teistsugune olukord on Eestis kaugjahutusega. Valminud on üksikud regionaalse tähtsusega võrgud, kuid mitmed energiaettevõtted teevad plaane kaugjahutuse võrkude kiireks arendamiseks. Kaugjahutus on üks keskkonnasõbralikumaid jahutusvõimalusi, kuid sellel asjaolul ei tasu lasta ennast pimestada. Eesti energiaettevõtetel on võimalus olla eesrindlik ning õppida teiste vigadest ja arengutest. Kaugjahutuse kasutusele võtmine on Eestis alles hoogu kogumas ning tänu sellele on võimalik võtta kasutusele parim võimalik tehnoloogia ning juurutada kaugjahutusvõrk kohe töötama kõrgematel temperatuuridel võrreldes lääneriikidega, kus alustati kaugjahutuse arendusega kümnete aastate eest ning otsitakse alles nüüd lahendusi temperatuuride tõstmise võimalusteks.

Käesolev töö analüüsib temperatuuride tõstmise mõju kaugjahutuse võrgule. Autor analüüsib kaugjahutuse energiabilanssi erinevate võrgutemperatuuride kasutamisel, samuti temperatuuride kasutamise mõju keskkonnale.

Töö on jaotatud kaheks osaks. Esimene osa on teoreetiline ning kirjeldatakse olemasolevaid süsteeme ja kasutatavaid tehnoloogiaid nii kaugjahutuse võrkudes kui ka hoonete sekundaariosades. Teoreetiline osa on autori hinnangul minimaalne vajalik

maht, mis on vajalik töö kui terviku mõistmiseks. Töö teine osa on analüüsiv. Analüüsitakse võrgu eripärasid ning näitajaid erinevate temperatuurigraafikute kasutamisel. Analüüsi aluseks on Tallinna kesklinna piirkonna perspektiivne kaugjahutuse võrk.

1 KAUGJAHUTUSSÜSTEEMID NING HOONETE LOKAALSED JAHUTUSSÜSTEEMID

Kaugjahutus on süsteem, kus hoonete jahutuseks vajalik jahutusenergia toodetakse hoonete kompleksi jaoks tsentraalselt ning jagatakse kaugjahutuse võrgu kaudu hoonetele. Kaugjahutuse võrk koosneb peale- ning tagasivoolu torust ning selle energiakandjaks on reeglina vesi.

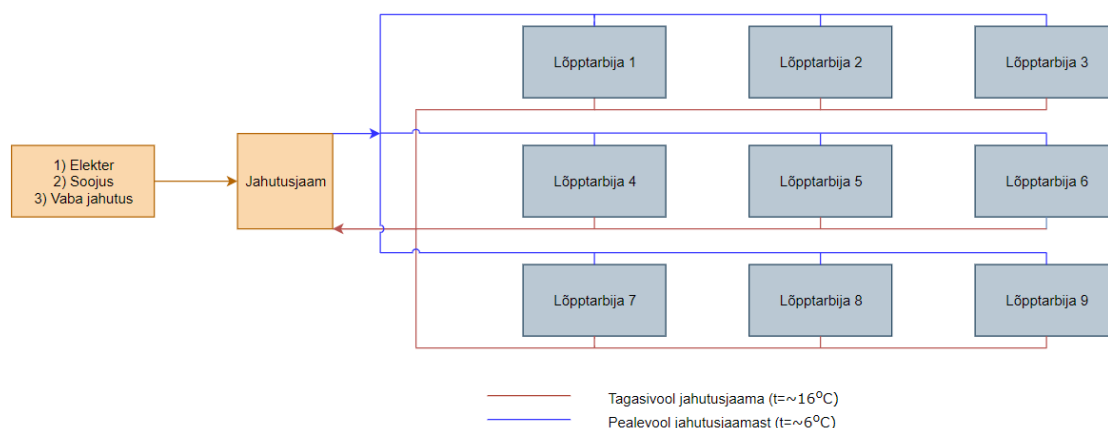
Eesti seadusandluses ei ole kaugjahutus defineeritud. Laiendades kaugkütteseaduses toodud kaugkütte definitsiooni kaugjahutusele, võiks kaugjahutus olla jahutuse tootmine ja võrgu kaudu jaotamine tarbijate varustamiseks jahutusega jahutussüsteemi kaudu. Kaugjahutuse taristu on defineeritud Energiamaajanduseseaduses, kui torustike, seadmete, abiseadmete ja nendega seotud ehitiste kohakindlalt ehitatud talituslik kogum või selle osa, mis on vajalik jahutuse jaotamiseks, välja arvatud tarbija paigaldised. Reguleerimata on samuti kaugjahutuse turg, seega erinevalt kaugküttest on kaugjahutust õigus pakkuda kõikidel teenusepakkujatel ning kaugjahutuse hinda ei ole vajalik kooskõlastada Konkurentsiametiga. Kehtivad vabaturu põhimõtted. Seadusandluses eristatakse tõhusat kaugjahutust tavapärasest kaugjahutusest, vastavalt Ettevõtlus- ja infotehnoloogiaministri määrusele nr 63 (11.12.2018) „Hoonete energiatõhususe miinimumnõuded“ loetakse tõhusaks kaugjahutuse võrguks võrku, mis kasutab vähemalt 50 protsenti taastuenergiat, 50 protsenti heitsoojust, 75 protsenti koostoodetud soojust või 50 protsenti sellise energia ja soojuse kombinatsiooni. Tõhusal kaugjahutusel ning tavapärasel kaugjahutusel on ministri määrusega kehtestatud erinevad kaalumistegurid¹ hoonete energiatõhususe mõistes. Tõhusa kaugjahutuse märgiseid väljastab Eestis MTÜ Eesti Jõujaamade ja kaugkütte ühing. Hetkel Eestis tõhusad kaugjahutuse võrgud puuduvad. Statuudis, mille alusel väljastatakse tõhusa kaugkütte ning -jahutuse märgiseid, ei ole nõuded tõhusale kaugjahutusele kirjeldatud. Jõujaamade ja kaugkütte ühingul on väljatöötamisel uus statuut, kus on kirjeldatud lisaks tõhusale kaugküttele ka kaugjahutus.

Kaugjahutuse süsteemi põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 1. Kaugjahutuse peamine eesmärk on muidu kasutamata jäävate energiaressursside rakendamine, eesmärgiga pakkuda kohalikule turule alternatiivi traditsioonilistele jahutussüsteemidele [1]. Kaugjahutus võimaldab rakendada vabajahutust kohalikest veekogudest ning läbi absorptsiooni protsesside võtta kasutusele ka heitsoojus. Tänu mastaabiefektile muudab kaugjahutus efektiivsemaks ka elektrienergia töötavate kompressorjahutite kasutuse,

¹ Kaalumistegur - tegur, millega võetakse arvesse tarnitud energia tootmiseks vajalik primaarenergia kasutus ja selle keskkonnamõju.

võrreldes lokaalsete kompressorjahutitega. Toimiva kaugjahutuse võrgu loomiseks on sarnaselt kaugküttesüsteemidele vajalik kolme eelduse olemasolu [2].

- 1) Mõistliku hinnaga energia olemasolu jahutusenergia tootmiseks. Hea eelduse loob selleks võimalus kasutada vähemalt osaliselt vabajahutust.
- 2) Nõudlus jahutuse järgi ehk mõistlikus kauguses asuvad äri-, kaubandus- ja tootmishooned, millel on vajadus jahutuse järgi.
- 3) Toruliinid tootmise ning tarbijate vahel jahutuse jaotamiseks või mõistlikud vahemaad tootmisüksuse ja tarbijate vahel, et toruliinide rajamine oleks majanduslikult otstarbekas. Majanduslik otstarbekust sõltub regionaalsetest eripäradest.



Joonis 1 Kaugjahutuse põhimõtteline skeem

Peamised eelised tarbijatele kaugjahutuse eelistamisel lokaalsete jahutussüsteemide asemel on:

- 1) Vabanev pind seadmete alt - suuri jahutusseadmeid hoone esimesel korrusel asendab ehitatav jahutussõlm, mis on väiksemate mõõtmetega ning vabaneb hoonete katusepind jahutite alt võimaldades katusepinnad võtta kasutusele muudel otstarvetel.
- 2) Jahutusest tingitud müra ning vibratsiooni puudumine – lokaalsed jahutusseadmed tekitavad alati hoonetes müra ning vibratsiooni. Kaugjahutuse kasutuselevõtmisel on see müra viidud üle kaugjahutuse jaama.

- 3) Väheneb investering jahutusseadmetesse ning puudub hilisem seadmete hooldus- ja remondivajadus.
- 4) Väiksem mõju hoone energiaklassile – tulenevalt Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määrusest nr 63 (11.12.2018) on kaugjahutus soositud võrreldes lokaalsete jahutusseadmetega.

Peamiselt kasutatakse kaugjahutust ruumi õhutemperatuuri alandamiseks ning hoidmiseks. Hoidmaks ruumides mugavustemperatuuri tuleb jahutusega kompenseerida soojuse juurdevool hoonesse. Soojuse juurdevool hoonesse sõltub välistemperatuurist ning liigsoojusallikatest. Liigsoojusallikateks on ruumis viibivad inimesed, tarbitavat elektrienergiat soojuseks muundavad seadmed, valgustus, päike (soojuskiirgus läbi klaaspindade) jne.

Suurimad ühiskondlikud eelised kaugjahutuse eelistamisel lokaalsetele jahutusüsteemide asemel on [1]:

- 1) Keskkonnale on kaugjahutus kasulikum võrreldes lokaalse jahutusega. Väheneb summaarne õhku paisatava süsinikdioksiidi hulk ning keskkonnaohtlike jahutusainete kasutus.
- 2) Väheneb soovine tipukoormus elektrivõrgus. Võimalik suunata investeeringud võrkudest mujale.

Kaugjahutuse teel üleantav energiahulk sõltub kasutatavast energiakandjast, milleks on üldjuhul töödeldud vesi, vedeliku voolamise kiirusest ning peale- ja tagasivoolu temperatuuride vahet. Ülekantav energiahulk arvutatakse valemiga 1.1.

$$Q=cm(t_2-t_1) \quad (1.1)$$

kus Q – üleantav energiahulk (J)
 c – vedeliku erisoojus (J/(kgK))
 t_2 – tagastatava soojuskandja temperatuur (K)
 t_1 – antava soojuskandja temperatuur (K)
 m – soojuskandja mass (kg)

Võrreldes kaugküttetorustikkudega on kaugjahutuse süsteemides kasutusel olevad torustikud tunduvalt suuremate diameetritega, see on tingitud kaugjahutuses kasutatavast väiksemast temperatuurierinevusest peale- ning tagasivoolu torustike vahel.

Positiivsete omaduste kõrval on leitud ka kaugjahutuse kasutuselevõtu negatiivne mõju majandusele. Kaugjahutus avaldab negatiivset mõju SKPle ning väheneb tööhõive. Mõjud on tingitud kohtjahutuse vajaduse vähenemisest, mis ületab vajalike töökohtade tekke kaugjahutuse võrkude opereerimiseks. [3]

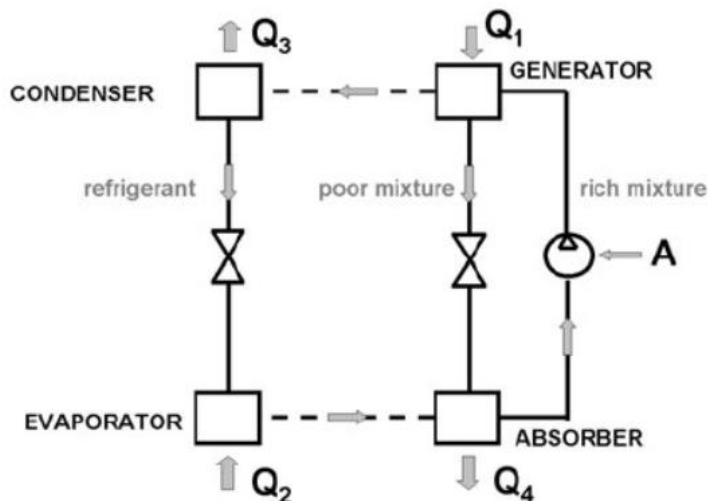
1.1 Kaugjahutuses kasutatavad tehnoloogiad

Külma tootmiseks kaugjahutuse võrku on peamiselt kasutusel kompressor jahutid ning absorptsioon jahutid, samuti kasutatakse vabajahutust. Võimaluse korral on kasutatud ka soojuspumpasid. Kaugjahutusvõrgud on tavapäraselt dimensioneeritud temperatuurigraafikule 6°C/16°C [4]. Antud temperatuurigraafikute kasutamine kaugjahutusvõrgus võimaldab ilma suurte tehnoloogiliste muudatusteta hoonete jahutussüsteemides liita võrku hooneid, mis varasemalt on töötanud lokaalsete jahutussüsteemidega, sest hoonete jahutuskontuuris on reeglina kasutusel temperatuurigraafikud 7°C/17°C või 8°C/18°C [4]. Primaar- ning sekundaarpoole temperatuuride erinevus 1-2°C on kadu, mis esineb soojussõlmedes, eeldusel et ei kasutata sõltuvat ühendust. Jahutustehnoloogiate võrdlevaks parameetrik on esitatud SEER¹ ning primaarenergiategur.

1.1.1 Absorptsioon jahutus

Absorptsioon jahutuse põhimõte on sarnane kompressorjahutite tööpõhimõttega. Erinevuseks on asjaolu, et jahutustsükkel on absorptsiooniprotsessis töös hoitud süsteemi antud soojusenergiaga, mitte elektrijõul töötava kompressoriga. Üheastmelise absorptsioonijahuti põhimõtteline skeem on toodud joonisel 2.

¹ SEER (seasonal energy efficiency ratio) – aastane energiatõhususe suhtarv (panustatud energia/saadud jahutusenergia)



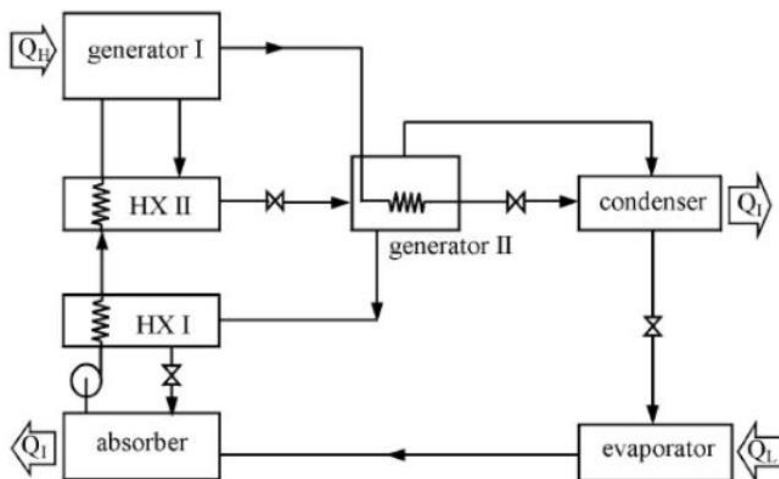
Joonis 2 Üheastmelise absorptsiooni seade põhimõtteline skeem [5]

(Kasutatud mõisted: Absorber – Absorber; Condenser – Kondensaator; Evarporator – Aurusti; Generator – Generaator; Poor mixture – Lahja segu; Refigerant – Külmutus agens; Rich mixture – Rikas segu)

Joonisel oleval skeemil on näidatud üheastmelise absorberite põhimõtteline skeem. Absorptsiooni seade koosneb absorberist, kondensaatorist, aurustist ning generaatorist. Enim kasutatud agensid on absorptsiooniseadetes LiBr^1 ning vee segu [6]. Samuti on laialdaselt kasutusel väiksemates seadetes agensid ammoniaagi ning vee segu [7]. Sisseantav soojushulk (Q_1) suunatakse generaatorisse (*generator*), kus ammoniaagirikas vee ja ammoniaagi segu. Sisenedu soojushulga toimel segu ammoniaak aurustub. Tekkinud gaas suunatakse kondensaatorisse (*condensator*), kus see kondenseerub, selles punktis väljub protsessist soojushulk (Q_3). Segu suunatakse läbi drosselventiili aurustisse (*evaporator*), milles siseneb süsteemi soojushulk (Q_2). Segu aurustub ning liigub absorberisse (*absorber*), kus see seguneb vee ning ammoniaagi seguga ning suunatakse omakorda protsessi. Absorberis eraldub soojushulk (Q_4).

Üheastmeline absorptsioonijahuti on lihtsaim absorptsioonijahuti, kus on kasutusel üks absorber ning üks generaator. Võrreldes mitmeastmelise absorptsiooniprotsessiga, mille skeem on toodud joonisel 3, on üheastmelisel seadmel väiksem kasutegur, kuid samaaegselt ka väiksem alginvesteering.

¹ LiBr - Liitiumbromiid



Joonis 3 Kaheastmeline absorptsioonjahuti [8]

(Kasutatud mõisted: Absorber – Absorber, Condenser – Kondensaator, Generator – Generaator; Evarporator – Aurusti; HX – Soojusvaheti)

Mitme astmelises absorptsiooniseadmes juhitakse soojus generaatorisse, kus aurustatakse vee-agentsi segust agents sarnaselt üheastmelisele absorptsiooniseadmele. Seejärel tekkinud gaas kondenseerub ning eraldunud soojuse abil toodetakse lisa jahutusenergiat generaatori teises astmes.

Absorptsiooni seadmed vajavad töötamiseks auru või kuuma vett temperatuuriga alates ca 116°C [9]. Mitmeastmelised absorptsioon jahutid vajavad kõrgema temperatuuriga soojuskandja olemasolu, antud seadetele on vajalik soojusallikas temperatuuriga ca 205°C. Seadmete keskmised efektiivsustegurid ning primaarenergia tegurid on toodud tabelis 1. Absorptsiooni jahutid vajavad töös hoidmiseks ka elektrit, kuid see on tunduvalt väiksem kogus kui kompressorjahutite töös hoidmiseks on vajalik. Elekter on kasutusel külmaagensi pumpade käitamiseks.

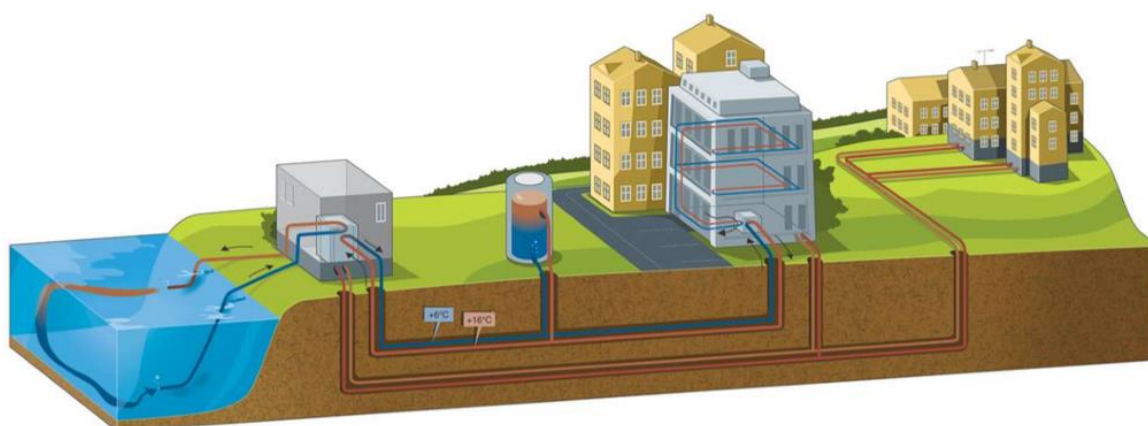
Absorberite kasutamisele jahutuse tootmiseks saabki tihtilugu takistuseks vajalik kõrgetemperatuuriline soojuskandja. Teatavasti esinevad suurimad jahutusvajadused ajal, mil küttevajadus on minimaalne. Seega soovi korral toota jahutust kaugküttevõrgus ringleva soojuskandja energial, tuleks suveajal tõsta võrgutemperatuure, mis ei ole otstarbekas arvestades üldist soovi võrgutemperatuure hoida madalamal. Absorberite kasutamine võib tulla kaalumisele olukorras, kus jahutusjaam asub sellise tööstuse vahetus läheduses, kus tekib hulgaliselt kõrgetemperatuurilist jääsoojust. Nii puuduvad vajalikud ülekandekulutused soojusele ning ei muutu üldine võrgu dünaamika.

Tabel 1 Absorptsioonjahutuse tehnilised parameetrid [10]

	SEER	Primaarenergiategur
Absorptsioonjahutus (kasutades jääsoojust)	20-35	0,13 – 0,07

1.1.2 Vaba jahutus

Vabajahutus on jahutusjaamade loomisel esimene eelistus, sest antud jaama kütus on tasuta. Vabajahutuse korral kasutatakse madalaid temperatuure looduslikes veekogudes, maapinna madalamat temperatuuri või õhu madalamat temperatuuri, et jahutada kaugjahutuse vett, samuti on leidnud kasutust ka tööstuse jääkkülma kasutus. Vabajahutust on võimalik kasutada, kui ümbritseva keskkonna temperatuur on madalam kui soovitud temperatuur jahutuseks. Samuti saab vabajahutust kasutada nii-öelda kombineeritud tsükli, kus vabajahutus on jahutuse tsükli esimene aste, misjärel jahutatakse külmakandja soovitud temperatuurini juba absorptsiooni või kompressorjahutites. Vabajahutussüsteemi põhimõtteline skeem, kus kasutatakse jahutuseks loodusliku veekogu vett, on toodud joonisel 4.



Joonis 4 Vabajahutuse põhimõtteline skeem [11]

Vabajahutuse protsess on järgmine:

- 1) Merepõhjas olev külm merevesi suunatakse kaugjahutuse jaama, kus seda kasutatakse kaugjahutuse vee jahutamiseks läbi soojusvahetite, misjärel suunatakse merevesi tagasi merre.
- 2) Vajadusel, kui mereveest ei piisa kogu vajalikuks jahutuseks, jahutatakse kaugjahutuse külmakandjat täiendavalt kompressor või absorptsiooni jahutusseadmetes.
- 3) Juhul kui süsteemi on installeeritud salvesti, milleks võib olla külma vee või jää reservuaar, juhitakse öisel ajal, kui jahutuse tarve on minimaalseim, ülejääv jahutus reservuaari.
- 4) Jahutusvesi suunatakse hoonete jahutussõlmedesse, kus antakse jahutusenergia üle hoonete sekundaarpoole kontuurile, misjärel suundub soojenenud kaugjahutuse vesi tagasi kaugjahutuse jaama ning antud protsess kordub.

Külmade veekogude jahutuse ressursi kasutamiseks on vajalik vaid energia pumpade töös hoidmiseks, seega on tegu väikseima energiakuluga külma tootmise tehnoloogiaga. Vabajahutuse SEER ning primaarenergiategur on näidatud tabelis 2.

Tabel 2 Vabajahutuse tehnilised parameetrid [10]

	SEER	Primaarenergiategur
Vabajahutus	25-40	0,1 – 0,06

Vabajahutuse kasutamiseks on oluline kasutatava veekogu lähedus külma tarbivatele hoonetele ning jahutusjaamadele, et hoida investeeringud torustikesse minimaalsena. Oluline on ka veekogude temperatuur. Üldjuhul on kaugjahutussüsteemides kasutusel pealevoolu temperatuur 6°C. Kaugjahutuse käitamine kõrgematel temperatuuridel suurendab vabajahutuse potentsiaali hüppeliselt [12].

Vabajahutust on võimalik kasutada ka mitmeastmelise jahutuse I astmena. Mitmeastmelise jahutuse korral jahutatakse energiakandja vabajahutuse abil

väliskeskonna temperatuurini ning seejärel absorptsiooniseadmete või kompressorjahutite abil soovitud temperatuurini. Antud tehnoloogia kasutamisel saab vabajahutuse jaoks rakendada veekogusid, mille temperatuur on kõrgem soovitud jahutustemperatuurist.

Kasutades vabajahutuseks veekogu võetakse jahutusvesi veekogust ning tagasivool juhitakse samuti veekogusse. Tavapäraselt on kasutusel kinnised süsteemid ehk veekogu vesi ei ringle jahutuskontuuris, vaid soojus antakse veekogu veele soojusvahetite kaudu. Otstarbekas on veevõtukoht ning tagasivoolu tagasivoolu koht planeerida üksteisest eemale, et tagasivoolu vesi ei soojendaks võetavat jahutusvett. Jõgede kasutamisel vabajahutuseks tuleb arvestada voolu suunaga. Mere ja väiksemate veekogude kasutamisel on otstarbekas kaasata vabajahutuse planeerimisel mereteadlased ning arvestada kohalike hoovustega. Samuti annab jahutusvõrgule paremad näitajad veevõtu kohtade eemalviimine rannaalast, kus vesi on soojem. Tagasivoolu võib juhtida ranniku lähedale, sealjuures on see ka abistav meede rannikuala jäävaba hoidmisel näiteks sadamate piirkonnas, kus see on kriitilise tähtsusega. Joonisel 5 on näidatud kaugjahutuse veevõtu torustik Göteborgi linnas, kus kaugjahutuseks on kasutusel jõevesi. Torustiku jõevee vastuvõtt on viidud jõe keskele ning tagasivool viiakse jõerannale lähemale.

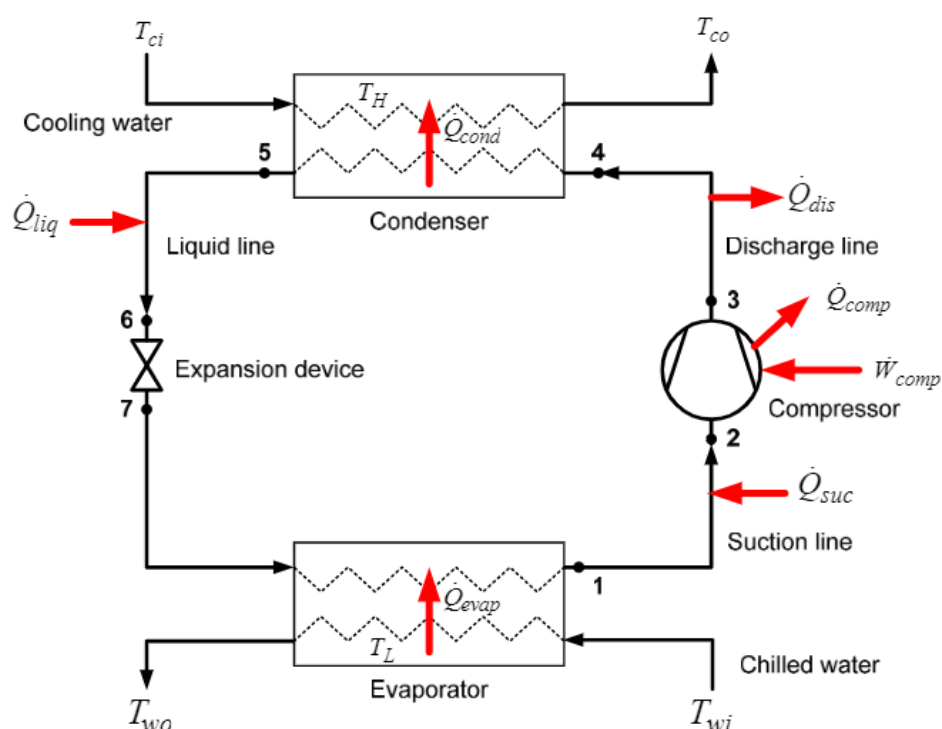


Joonis 5 Vabajahutuse torustik jões [13]

Sügavamate veekogude puhul piirkondades, kus veekogu on sügav juba alates kaldast, on võimalik veevõttu rannikust kaugemale viimine asendada veevõtmisega sügavamatest veekihtidest ning tagasivool suunates pealmistesse veekogu kihtidesse.

1.1.3 Kompessorjahutid

Kompessorjahutid kasutavad Carnot' ringprotsessi, et eraldada soojus jahutussüsteemist, erinevalt absorptsioon jahutitest kasutatakse antud protsessi mehaanilist kompressorit, mille sisendenergiaks on elekter. Antud tehnoloogiat kasutatakse kui jahutuskoormuse katmiseks ei ole piisavalt vabajahutuse potentsiaali ega jääsoojust absorptsiooni protsessi kasutamiseks. Kompessorjahuti põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 6.



Joonis 6 Kompessorjahuti põhimõtteline skeem [14]

(Kasutatud mõisted: Compressor – Kompessor; Condenser – Kondensaator; Cooling tower – Jahutustorn; Chilled water – Jahutatud vesi; Discharge line – Tühjendus toru; Evaporator – Aursuti; Expansion valve – Paisventiil; Suction line – Imemistoru)

Kompessorjahuti tööprotsess koosneb neljast astmest:

- 1) Elektrijõul töötav kompressor (*compressor*) tõstab gaasilises olekus külmutusagensi temperatuuri läbi selle kokku surumise.
- 2) Kokku surutud gaas suunatakse kondensaatorisse (*condenser*), kus see aurustub ning soojus Q_{cond} suunatakse protsessist välja.

3) Külmutusagents suunatakse läbi paisventiili (*expansion device*), kus tema rõhk langeb.

3) Agents juhitakse aurustisse (*evaporator*), kus madala rõhuga külmutusagents aurustub – soojus Q_{evap} siseneb süsteemi ning seejärel algab protsess otsast peale.

Tabelis 3 on näidatud tüüpilised kompressorjahutite SEER väärtused ning primaarenergiategur.

Tabel 3 Kompressorjahutite tehnilised parameetrid [10]

	SEER	Primaarenergiategur
Kompressorjahutid	5-8	0,5-0,3

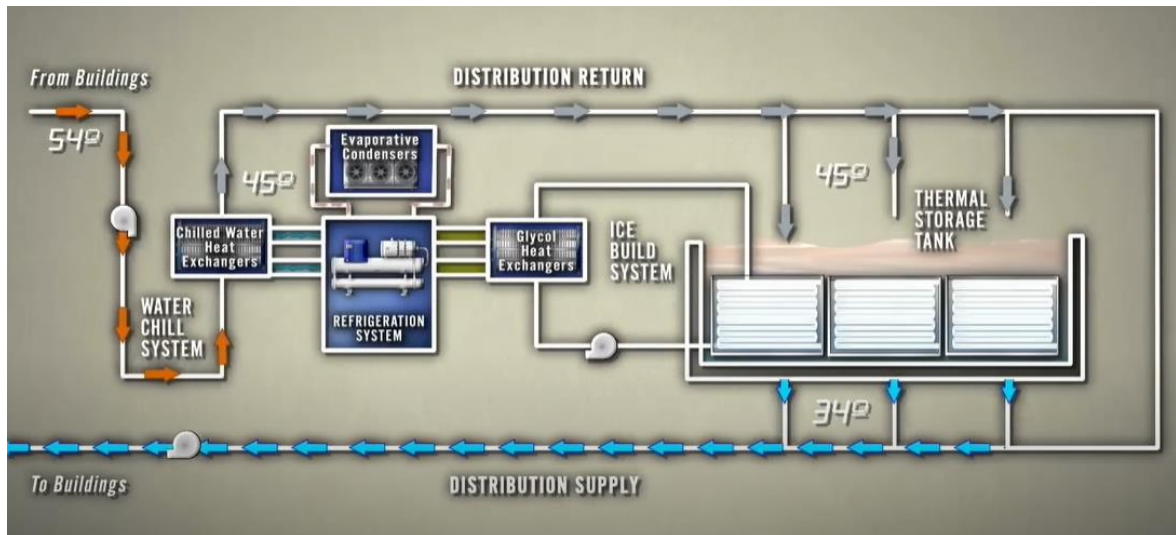
1.1.4 Jahutuse salvestid

Tihti installeeritakse kaugjahutusvõrkudesse lisaks jahutuse tootmise seadmetele ja võrkudele ka võimalused jahutusenergia salvestamiseks. Jahutusenergia salvestamine võrkudes on otstarbekas. Sest jahutusenergia vajadus on ka lühikeste ajaperioodide sees volatiivne. Järsud energiavajaduse muutused on suvel öö ja päeva vahel, samuti tekivad järsud koormuskõikumised kiire ilmamuutuse korral. Jahutuse salvestamine võimaldab toota pikemal ajal jahutust baaskoormustel ning vähendab tipukoormuse katmiseks installeeritud seadmete kasutusaega, mis muudab jahutusvõrgu efektiivsemaks energiatõhususe seisukohalt. Lisandväärtusena aitab see stabiliseerida koormust elektrivõrkudes, mis on üks kaugjahutuse kasutamise eelistest. Jahutuse salvestamiseks on kasutusele erinevad meetodid.

Akumulatsiooni paagid. Lühiajalisi koormuskõikumisi on võimalik kompenseerida akumulatsiooni paakide installeerimisega kaugjahutuse võrku. Akupaagid täidetakse jahutatud külmakandjaga ajal kui koormus on väiksem, näiteks öösel. Salvestatud jahutusenergiat on võimalik kasutada ajal mil on võrgus tipukoormus. Samuti on antud lahendusel võimalik suurendada võimsusi kaugjahutuse võrgu kaugeimates punktides ilma toru diameetreid suurendamata.

Jääpangad. Selleks on rajatud n-ö jääjaamad, milles jää moodustatakse öistel tundidel, kus jahutusvajadust ei ole ning elektrivõrgus on madala tarbimisega aeg, mida on võimalik kasutada järgnevate tipukoormuste katmiseks. Joonisel 7 on näidatud jää salvestusjaama põhimõtteline skeem. Jaam on suur veemahuti, milles on radiaatorid,

kus ringleb töövedelikuna glükool. Öösel glükool jahutatakse ning radiaatorite ümber tekib jää, sest vee külmumistemperatuur on kõrgemal kui on jahutatud glükooli temperatuur. Päeval ajal kui jahutuskooormus ületab tootmisvõimekuse, suunatakse võrgu vesi läbi mahuti, kus radiaatoritele tekkinud jää sulab ning jahutab kaugjahutuse võrgu vett. Antud lahendust on võimalik kasutada ka mitmeastmelistes jahutussüsteemides, kus jääpank on jahutuse esimene või teine aste.



Joonis 7 Jahutusenergia salvestamine jääga

(Kasutatud mõisted: Daily average cold load – Päevane keskmine jahutuskooormus; Outdoor temperature – Välisõhu temperatuur; Weekday – Tööpäev; Weekend – Nädalavahetus)

1.2 Hoonete jahutussüsteemid

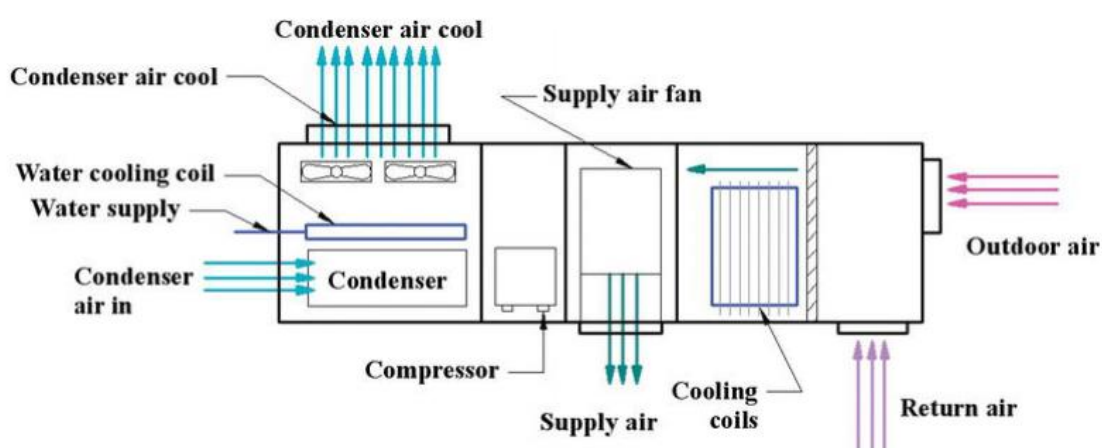
Tänapäevases ehituspraktikas pannakse üha enam rõhku hoonete passiivsele jahutusele, antud lahendused võetakse kasutusele juba planeerimise faasis. Passiivseteks meetoditeks on näiteks hoone paiknemine ilmakaarte suunas, varjestuse kasutamine akende ees kui ka hoonete piirdematerjalid ja konstruktsioonid. Passiivse jahutuse võib defineerida kui jahutuse, mille käitamiseks ei vajata elektrilist, termokeemilist ega mehhaanilist energiat. Siiski, sõltumata hoones kasutusele võetud passiivsetest jahutusmeetmetest, vajavad hooned ka aktiivset jahutusallikat.

Jahutussüsteemid on hoonetes vajalikud, et oleks tagatud parim võimalik sisekliima inimestele. Sisekliima hõlmab endas nii õhutemperatuuri kui ka õhu niiskust, samuti õhu

teisi parameetreid. Hoonete lokaalseks jahutamiseks on kasutusele võetud erinevad tehnoloogiad. Peamiselt on mitteiluhoonetes kasutusel kolm lahendust.

1.2.1 Jahutusallikad hoonetes

Õhkjahutus RTU¹ seadme korral paikneb hoone katusel RTU seade, tegu on komplekse seadmega, mis sisaldab seadmeid nii jahutuseks kui ka kütteks, samuti ventilaatorit ning värsket õhu sissevõtu võimekust. RTU süsteemi põhimõtteline skeem on toodud joonisel 8.



Joonis 8 RTU seadme põhimõtteline skeem [15]

(Kasutatud mõisted: Compressor – Kompressor; Condenser – Kondensaator; Condenser air in – Kondensaator õhuvõtt; Condenser air cool; Cooling coils – Jahutusradiaator; Outdoor air – Välisõhk; Return air – Tagastuv õhk; Supply air – Tagastatav õhk; Supply air fan – Tagastava õhu ventilaator; Water cooling coil – Vesijahutus radiaator; Water supply – Toitevesi)

Joonisel on seade, mis on võimeline vaid jahutama õhku, kuid ei küta seda. RTU seade suunab hoonest tagastava ventilatsiooni õhu (*return air*) osaliselt atmosfääri ning osaliselt tagasi ringlusesse segades seda värsket õhuga (*outdoor air*). Õhk läbib filtrid ning jahutusradiaatori (*cooling coil*). RTU seadmetel, mis on võimelised õhku kütma, asub antud kohas ka kütte radiaator. Seejärel suunatakse jahutatud õhk taaskord

¹ ik. Rooftop Unit

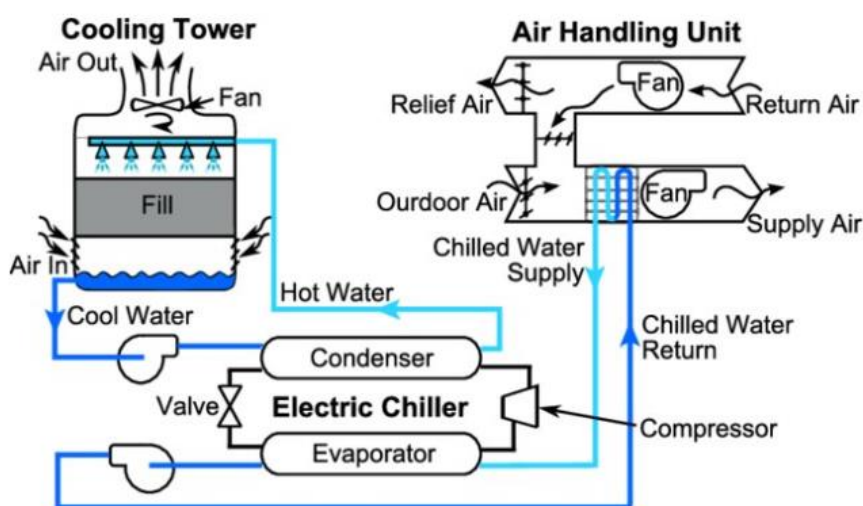
hoonesse. RTU seade on kompleksne seade, seega paiknevad selles ka õhu jahutamiseks vajalikud seadmed – kompressor (*compressor*), kondensaator (*condenser*), drosselventiil ning aurusti.

Seade suunab soovitud parameetritega õhu mööda hoone kütte- ning jahutussüsteemi ruumidesse. Hoone eri ruume/tsoone on võimalik eraldi juhtida. Antud süsteeme kasutatakse valdavalt madalates hoonetes, kus hoonete katusepindala ei ole oluliselt väiksem kui hoone kasutatav põrandapindala.

Kompressorseadmed koos jahutustorniga hoone katusel või väljaspool hoonet.

Kompressorseadmed toodavad külma vett, mis suunatakse hoone sisesesse jahutuskontuuri, et varustada õhukonditsioneer külma veega. Kasutusel on kahte tüüpi kompressorseadmeid – vesijahutusega ning õhkjahutusega. Vesi ja õhk on vastavalt energiakandjad, millega kompressorseadmete kondensaatoreid jahutatakse.

Vesijahutusega kompressorseadmed paigaldatakse üldjuhul hoone kõige madalamale korrusele. Antud kompressoritele on vajalik jahutustorn (*cooling tower*), millega eemaldatakse üleliigne soojus hoonest. Kompressorseade toodab külma vett (*chilled water*), mis juhitakse mööda hoonet AHU¹ seadmetesse, mis on ventilatsiooniseade, kus jahutatud õhk suunatakse ruumidesse ning üleliigne õhk tagasi atmosfääri. Jahutatud vett suunatakse ka jahutuspaikidesse ning fancoilidesse. Vesijahutusega kompressorseadme põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 9. Antud skeemil jahutatakse vaid ventilatsiooniõhku ning hoones puuduvad muud jahutusseadmed.



Joonis 9 Kompressorjahutusseadme põhimõtteline skeem [16]

¹ ik. Air handling unit

(Kasutatud mõisted: Air handling unit -Õhu käitlemise seade; Air in – Õhk sisse; Air out – Õhk välja; Compressor – Kompressor; Condenser – Kondensaator; Cool water – Jahutatud vesi; Cooling tower – Jahutustorn; Chilled water return – Jahutusvee tagastus; Chilled water supply – Jahutus vee toide; Electric chiller – Elektriline kompressorjahuti; Evaporator – Aurusti; Fan – Ventilaator; Fill – Täide; Hot water – Kuum vesi; Outdoor air – Välisõhk; Relief air – Vabanev õhk; Return air – Tagastuv õhk; Supply air – Ruumi suunatav õhk)

Õhkjahutusega kompressorseadmete tööpõhimõte on sarnane, kuid need paiknevad tavapäraselt hoonete katustel või väljaspool hoonet eraldiseisvana, nad ei vaja eraldiseisvat jahutustorni, vaid kondensaatoreid jahutatakse otse keskkonna õhuga suunates õhu seadme kondensaatoritele.

Kompressorseadmeid kasutav süsteem on reeglina efektiivsem kui RTU süsteem ning on kasutatav ka tornmajades.

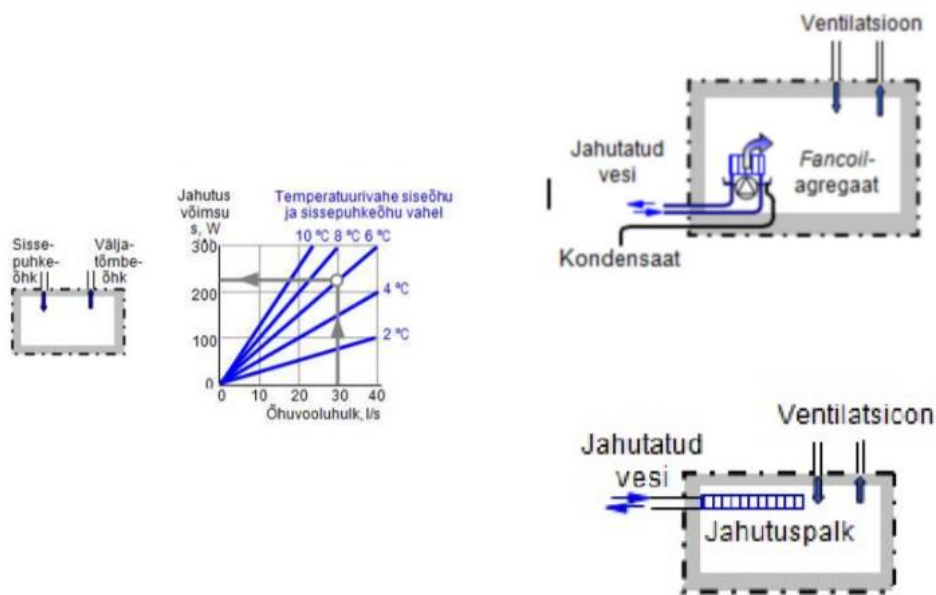
Hoonete lokaalsete jahutusseadmete tüüpilised SEER tegurid on näidatud tabelis 4.

Tabel 4 Lokaalsete jahutusssüsteemide tüüpilised parameetrid [16]

	SEER
Kompressorjahutid	5-8
RTU seadmed	8-12

1.2.2 Enamlevinud ruumide jahutuse lahendused

Jahutuse suunamiseks ruumidesse on kasutusel erinevad meetodid, peamiselt kasutatavad lahendused on näidatud joonisel 10.



Joonis 10 Ruumide enamlevinud jahutuse lahendused [17]

Seadmete valikul lähtutakse konkreetse hoone jahutusvajadusest ning tehnilistest võimalustest. Kõik joonisel 10 näidatud seadmed saavad enda jahutusenergia tsentraalsetelt jahutusseadmetelt (või kaugjahutuse võrgust). Eri seadmed vajavad töötamiseks erinevate parameetritega külmakandjaid. Kõige kõrgema temperatuuriga võib külmakandja olla jahutuspaikide kasutamisel, nendes seadmetes tuleb kriitiliselt jälgida, et pealevoolu temperatuur ei ületaks ruumi õhu kastepunkti, vastasel juhul ruumiõhk kondenseerub jahutuspaikidel ning põhjustab liigvee tekke ruumides. Jahutuspaikide temperatuurigraafik on ca 14°C/18°C. Eristatakse aktiivseid jahutuspaikke ning passiivseid jahutuspaikke. Aktiivsete jahutuspaikide puhul juhitakse süsteemi lisaõhku, mis läbib düüside kaudu n-õ jahutusradiaatori. Sellest tulenevalt on aktiivsed jahutuspaikid tunduvalt suurema jahutusvõimsusega kui passiivsed jahutuspaikid, kus kasutakse ära ruumides tekkiv loomulik õhu tsirkulatsioon, mis on tingitud eri temperatuuril õhu erinevas erimahus.

Ventilatsiooni jahutamiseks on vajalik madalama temperatuuriga külmakandjat, üldjuhul on ventilatsiooniseadmed dimensioneeritud pealevoolutemperatuurile 8°C. Antud temperatuur aitab ennetada liigniiske õhu juhtimist ruumidesse, sest madalama temperatuuriga külmakandjate kasutamisel on võimalik veeaur ventilatsiooniõhust välja kondenseerida.

Ruumis paiknevad n-õ fancoilid dimensioneeritakse reeglina samuti madalamaid temperatuure kasutama, põhjuseks kõrgemate temperatuuride kasutamisel tekkiv oluline seadmete suuruse kasv, sest kõrgemate temperatuuride korral on vajalik

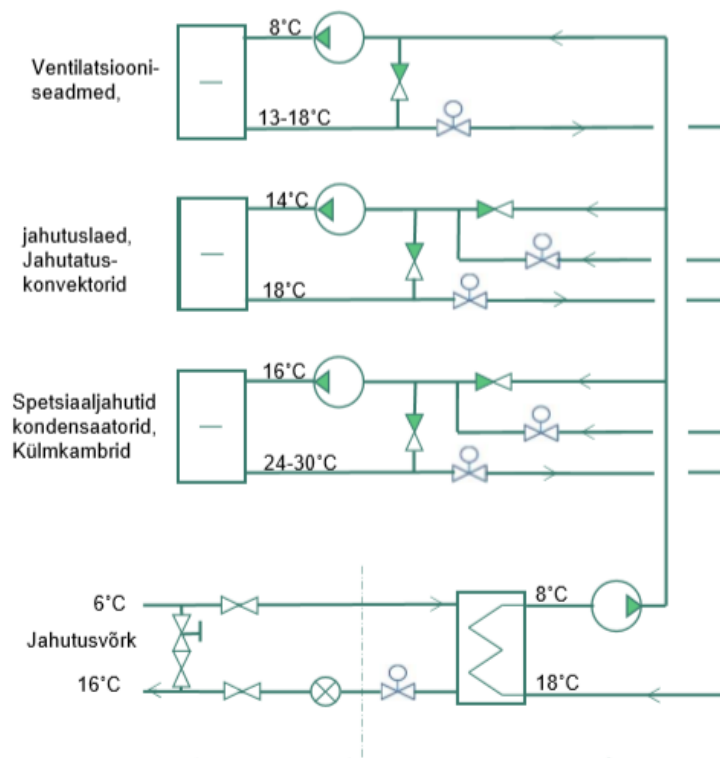
kasutada suuremaid jahutuspindasid. Samuti on suuremate jahutuspindadega seadmed oluliselt kallimad ning tõstavad hoone jahutussüsteemi kogumaksumust.

1.2.3 Temperatuurid jahutussüsteemides

Enamus piirkondades ei ole kaugjahutuse võrgud ning hooned planeeritud, projekteeritud ning ehitatud samaaegselt. Sel põhjusel ei ole olnud võimalik vaadata tervikpilti juba planeerimise esimeses etapis. On tavapärane, et kaugjahutuse võrku hakatakse ehitama piirkonda, kus on juba varasemalt tekkinud kriitiline hulk tarbijaid, mis annab kaugjahutusele piisava mastaabi parima efektiivsuse saavutamiseks. Samas loob see olukorra, kus kaugjahutuse konkurentsivõime tõstmiseks tuleb see projekteerida nii, et olemasolevates hoonete süsteemides vajalikud muudatused puuduksid või oleksid minimaalsed. Antud seaduspärasus on loonud olukorra, mis tingib kaugjahutuse võrkudes madalate temperatuuride vahe peale- ning tagasivoolu torustiku vahel ning toob temperatuurid madalaks. Kaugjahutuse võrgu tagasivoolu temperatuur on reeglina kuni 16°C, samas hoonetes loetakse mugavustemperatuuriks 22°C. Antud nähtus tuleneb olemasolevate hoonete lokaalsetest jahutuse süsteemidest, mida käitatakse temperatuurigraafikuga 8°C/18°C. Arvestades temperatuurikadu soojusvahetites ongi hoonete süsteemide liitmiseks kaugjahutuse võrgu optimaalne temperatuurigraafik 6°C/16°C. Samas annaks tagasivoolu temperatuuride tõus võimaluse oluliselt efektiivsemaks külmakandja jahutuspotentsiaali ära kasutamiseks.

Tavapäraselt on hoonetes kasutusel mitut eri liiki jahutussüsteemi – jahutatakse ventilatsiooniõhku, kuid samas paiknevad ruumis ka jahutuspalgid või nõ. fancoilid. Erinevatel kasutatavatel seadmetel on erinevad nõutud temperatuurid jahutusveele.

Lihtsaim moodus hoonesisese tagastuva temperatuuri tõstmiseks on seadmete ühendamine tavapärase paralleelühenduse asemel seadmete ühendamine jadamisi, kus kõige külmemat temperatuuri nõudvatest seadmetest tagastuv külmakandja suunatakse seadmetesse, mis ei vaja niivõrd madalaid temperatuure. Joonisel 11 on näidatud Fortum Tartu soovituslik põhimõtteline skeem seadmete ühendamiseks.



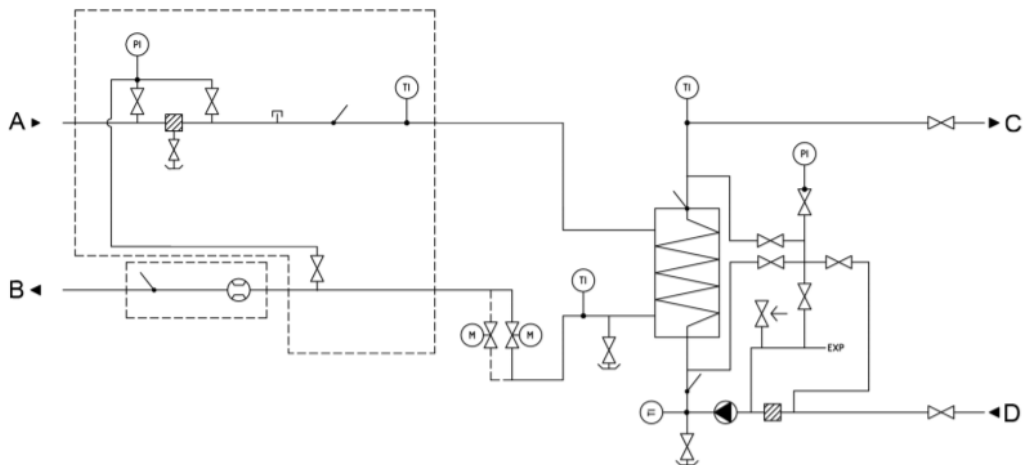
Joonis 11 Hoonesisene jahutussüsteem. Rööpühendus [18]

Erinevatel kasutatavatel seadmetel on erinevad nõutud temperatuurid jahutusveele. Kõrgemate temperatuuridega töötavad jahutuslaed ning palgid, mille puhul on kõrgemad temperatuurid isegi eelistatumad, sest liigjahedate pindade puhul võib tekkida kondens, mida ei ole võimalik jahutuspaikidelt/lagedelt eemale juhtida.

1.3 Hoonete jahutussõlmed ning jahutusseadmete ühendamine hoones

Jahutussõlmed on kasutusel, et ühendada kaugjahutusvõrk hoonesisese jahutustorustikuga üksteisest sõltumatu viisil. Joonisel 12 on toodud tüüpilise jahutussõlme põhimõtteline skeem. Jahutussõlm koosneb soojusvahetist, mis eraldab kaugjahutuse võrku hoonesisese jahutustorustikuga juhtseadme, pumpadest ning ventiilidest.

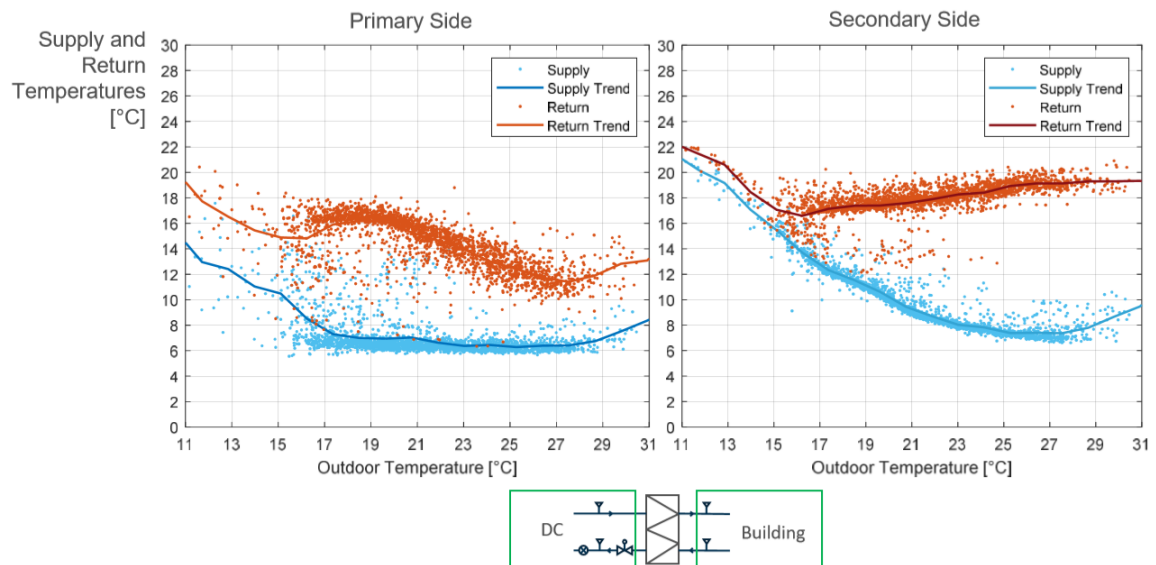
Kaugjahutuse sõlm varustatakse automaatikaga, mis reguleerib vooluhulkasid ning hoiab nii primaar- kui ka sekundaarkontuuris soovitud temperatuurigraafikuid. Näitena on Göteborgi linna kaugjahutusvõrgu primaarpoole temperatuurigraafikuks 6°C/16°C ning sekundaarkontuuris nähakse ette temperatuurigraafik 8°C/18°C. Tavapärane on, et soojusvahetites tekib n-ö temperatuurilang ca 1-2°C.



Joonis 12 Jahutussõlme põhimõtteline skeem [4]

- A- Kaugjahutustorustiku pealevool
- B- Kaugjahutustorustiku tagasivool
- C- Sekundaarkontuuri pealevool
- D- Sekundaarkontuuri tagasivool

Kaugjahutuse võrgu efektiivses toimimises on võtmeroll kaugjahutuse sõlmede automaatikal, mis paiknevad tarbijate juures. On kriitilise tähtsusega, et automaatika reageeriks operatiivselt jahutuskoormuse muutustele, kuid ei reguleeriks ennast üle. Göteborgi kaugjahutusevõrgu väikese delta t sündroomi peamiseks põhjustajaks on justnimelt ebaõnnestunud sõlmede automaatika. Joonisel 13 on näide ebaõnnestunud temperatuuride hoidmisest Göteborgi kaugjahutuse võrgus, kus on mõõdetud nii primaar kui sekundaar poole temperatuurisid jahutussõlmedes [13].



Joonis 13 Kaugjahutuse temperatuurid Göteborgi kaugjahutuse võrgus [13]

(Kasutatud mõisted: Building – Hoone; DC – Kaugküte; Outdoor temperature – Välisõhu temperatuur; Primary side – Primaarpool; Return – Tagastus; Returne trend – Tagastuse trendijoon; Secondary side – Sekundaarpool; Supply – Toide; Supply and Return Temperature – Toite ja tagastuva vee temperatuur; Supply Trend – Toite trendijoon)

Jooniselt on näha, et temperatuuri tõustes suutsid hoonete süsteemid hoida disaintemperatuuri, kuid kaugjahutuse tagasivoolu temperatuur oli siiski mitme kraadi võrra madalam võrreldes disaintemperatuuriga, mis vähendab oluliselt võrgu efektiivsust. Selline anomaalia temperatuurides on tingitud jahutsõlmede automaatika ebapiisavast seadistusest.

Sama uurimise käigus analüüsiti Göteborgi kaugjahutuse võrku ühendatud hoonete võrguvee temperatuure nii primaar- kui sekundaarpoolel. Uuringust selgus, et olukorras, kus võrk toimib tipukoormuse lähedal ehk ca +25°C juures, on hoonete sekundaarpoolel pealevoolu temperatuur vahemikus 6-16°C ning tagasivoolu temperatuur vahemikus 8-25°C. [19]

2 KÕRGETEMPERatuurILISE KAUGJAHUTUSE MÕJU PERSPEKTIIVSELE TALLINNA KESKLINNA KAUGJAHUTUSVÕRGULE

Käesolevas töös analüüsitakse võimalusi kaugjahutuse võrkudes kõrgemate temperatuuride kasutamiseks, seeläbi optimeerides kulutusi jahutuse tootmiseks ning vähendades jahutuse mõju keskkonnale, samuti vabajahutuse potentsiaali suurendamist. Võrdluseks väljakujunenud temperatuurigraafikutele on valitud jahutuse maksimaalseks pealevoolu temperatuuriks 12 °C. Olemasolevad süsteemid kasutavad valdavalt arvutuslikku pealevoolutemperatuuri 6°C. Peale- ning tagasivoolu temperatuuride vaheks on arvestatud 10 °C. Lisaks on arvutustesse toodud ka olukord, kus projekteeritud tagasivoolu temperatuuri ei suudeta hoida ning see langeb 14°C, seejuures pealevoolu temperatuuri mitte muutes. Seega jäetakse süsteemi temperatuuride vahe pealevoolu temperatuure tõstes olemasolevate süsteemidega võrreldes samaks ning sama vooluhulga korral (torustiku diameeter; energiakandja kiirus) kantakse üle sama kogus energiat. Seetõttu ei ole süsteemi kasutamisel vajalik toru diameetrite suurendamine, mis kaugjahutuse süsteemide korral on kriitilise tähtsusega.

Tallinna linna Kesklinna linnaosa perspektiivne arvutuslik jahutusvõimsus on kajastatud mitmetes allikates. R. Havi poolt kaitstud magistritöös „Tallinna Kesklinna kaugjahutuse eskiisprojekt“ on hinnatud jahutuskoormuseks 26,18MW. Antud maksimaalne soojuskoormus on leitud lihtsustatud meetodil. Kaardistatud on Tallinna Kesklinna piirkonna olemasolevad ning potentsiaalsed tarbijad ning määratud maksimaalseks jahutuskoormuseks 30W/m². [20]

AS Utilitas Eesti on leidnud enda arendustegevust arvestades Kesklinna võrgupiirkonna maksimaalseks koormuseks 60MW [21]. Antud töös on tehtud vabajahutuse osakaalu arvutused lähtudes Utilitas Tallinna arendusplaanidest. Siiski, tuleb arvestada, et tegu on maksimaalse jahutuskoormusega, mis soovitakse saavutada aastaks 2035. Seega tuleb jahutusvõrk välja ehitada ning saavutada jahutusvõimsus etapiti, kuid maksimaalsed koormust tasub arvesse võtta juba planeerimise esimestes etappides.

Tallinna Kesklinna kaugjahutusvõrk on mudeldatud ka vabavaralises tarkvaras „Thermos tool¹“, mis võimaldab planeerida kaugjahutuse ning -kütte võrke. Joonisel 14

¹ Thermos tool – on vabavaraline veebipõhine tarkvara, mis on rendatud abistamiseks kaugkütte ning – jahutusvõrke planeerida. Tarkvara arendust on rahastanud Euroopa Liidu Horzon 2020 programmist

on esitatud antud programmi abil koostatud jahutustiheduse kaart. Kaardil on kontrastsemalt näidatud suurimat hulka aastast jahutusenergiat vajavad piirkonnad.



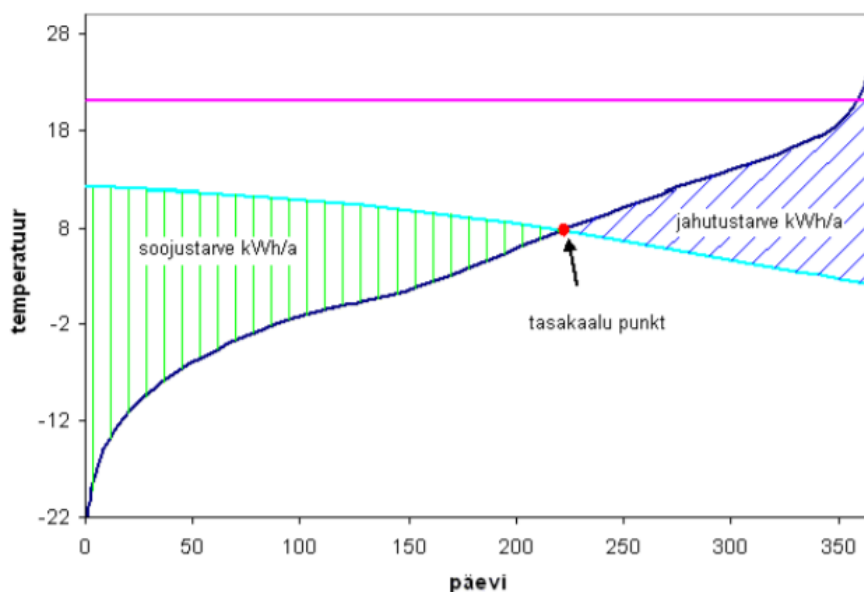
Joonis 14 Tallinna kesklinna jahutuskooormuse tihedus programmis Thermos Tool

Kesklinna linnaosas on kolm piirkonda, mis eristuvad jahutustiheduselt selgelt teistest rajoonidest. Suurim ala, asub südalinnas Kreutzwaldi, Kentmanni ja Ahtri tänava ning Rävalla puistee vahelisel alal. Edela osas esile tõusev piirkond asub Pärnu maantee ääres, kus paiknevad ministeeriumite ühishoone, Tallinna Tehnika kõrgkool ning teised ärihooned. Loode pool olev suure jahutustihedusega ala on Balti jaama piirkond. Kagunurgas olev üksik ala on Zelluloosi ja Sikupilli piirkond, mis esialgu moodustab Utilitase plaanides eraldiseisva võrgupiirkonna [21]. On ilmne, et parim piirkond kaugjahutuse arendamiseks on südalinna tsoon.

2.1 Jahutusvajadus

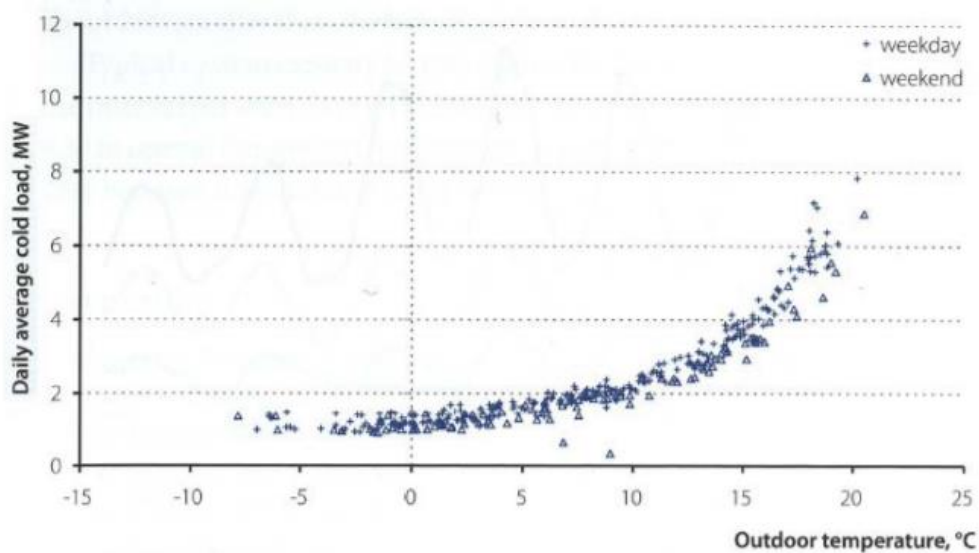
Hoonete vajalik jahutusvõimsus sõltub hoonete kasutusotstarbest – ärimajad, kauplused, koolid jne, lisaks hoonete piirete materjalist, omadustest ning paiknemisest ilmakaarte suhtes. Hoone vajalikku soojus- ning jahutusvõimsust iseloomustab kütte

ning jahutuse kestuskõver. Keskmise kütte erisoojuskoormusega hoone jahutus- ning küttevajadust iseloomustab joonis 15.



Joonis 15 Keskmise kütte erisoojuskoormusega hoone jahutus- ja soojustarve [22]

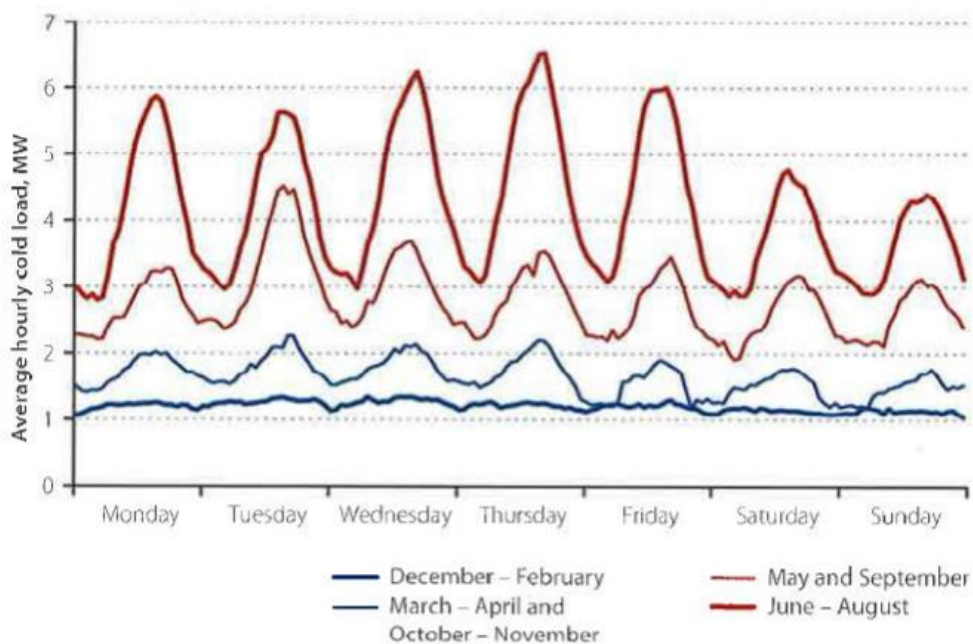
Joonisel iseloomustab helesinine joon hoone tasakaalutemperatuuri, mis on vaja tagada, et hoones oleks mugavustemperatuur – ca 22°C. Lisaks küttele ja jahutusele mõjutavad hoone temperatuuri seal paiknevad tehnoseadmed, inimesed ning ruumi sisenev päikesekiirgus, seetõttu on tasakaalutemperatuur madalam kui soovitud ruumitemperatuur. Tasakaalutemperatuur on aasta lõikes muutuv, sest muutuv on vabasoojuse hulk. Talvekuudel on päikesekiirgus madal, kuid alates märtsist hakkab kasvama ning mõjutab oluliselt hoone kütte- ning jahutusvajadust, kuni hakkab sügiskuudel taas langema [22]. Tasakaalupunkt iseloomustab joonisel punkti, kus hoone ei vaja ei kütmist ega jahutamist. Tasakaalutemperatuur sõltub konkreetse hoone energiatõhususest. Vajalik süsteemide jahutusvõimsus arvestatakse arvutuslikule välisõhutemperatuurile 27°C. Jahutusvajadus esineb hoonetes ka temperatuuridel, mis on tugevalt alla hoone tasakaalutemperatuuri. Joonis 16 iseloomustab Soomes paikneva Helsingborgi linna kaugjahutusvõrgu jahutusvõimsuse sõltuvust välistemperatuurist. Graafikult on näha, et jahutusvajadus säilib ka aasta külmematel perioodidel (<-10°C) jahutusvajadus hakkab hüppeliselt kasvama kui välisõhutemperatuur tõuseb üle 10 kraadi. Nädalavahetustel ja riigipühadele langevatel päevadel on jahutuskooormus pisut väiksem kui tööpäevadel, sest mõned äritarbijad vajavad jahutust vaid tööpäevadel. [2]



Joonis 16 Jahutuse vajaduse sõltuvus välisõhu temperatuurist [2]

(Kasutatud mõisted: Daily average cold load – Päevane keskmine jahutuskooormus; Outdoor temperature – Välisõhu temperatuur; Weekday – Tööpäev; Weekend – Nädalavahetus)

Joonis 17 iseloomustab kaugjahutuse võrgu nõudluse sõltuvust nädalapäevast eri aastaegadel. Joonisel on näha, et soojadel perioodidel on jahutusvajadus oluliselt suurema amplituudiga öö ning päevaaja vahel, kui külmadel aastaegadel püsib jahutusvajadus stabiilsena kogu nädala lõikes ja ööpäeva jooksul. Kõrge jahutusvajadusega päevadel on päevane keskmine jahutuskooormus ca 25% võrra väiksem kui päevane tipukoormus.



Joonis 17 Kaugjahutuse nõudlus nädalapäevade lõikes eri aastaegadel [2]

(Kasutatud mõisted: Average hourly cold load – Keskmise tunnipõhine jahutuskoormus; Friday – Reede; June – August – Juuni kuni august; December – February – Detsember kuni Veebruar; March – April and October – November – Märts kuni aprill ja oktoober kuni november; May and September – Mai ja september; Monday – Esmaspäev; Saturday – Laupäev; Sunday – Pühapäev; Thursday – Neljapäev; Tuesday – Teisipäev; Wednesday – Kolmapäev)

Analüüsid on näidanud eri baaskoormusi jahutussüsteemidele. RESCUE¹ analüüs, kus uuriti 50 hoone jahutuskoormust, mis asuvad üle Euroopa asuvates kaugjahutuse võrkudes näitas, et baaskoormus, mis ei sõltu välistemperatuurist, moodustab keskmiselt 8% võrgu tipukoormusest. Baaskoormusel töö moodustab omakorda ca 56% kogu kaugjahutuse jaamade toodangust. Analüüs täiendab, et keskmisest suuremad baaskoormused on tingitud suurest hulgast tööstustarbijatest, kes ei kasuta jahutussüsteeme ruumiõhu jahutamiseks vaid tööstuslikeks protsessideks. Analüüsi käigus leiti, et jahutuse vajadus hakkab tõusma 9°C juures ning tõuseb lineaarselt kuni tipukoormuse saavutamiseni [23].

¹ RESCUE- Renewable Smart Cooling for Urban Europe

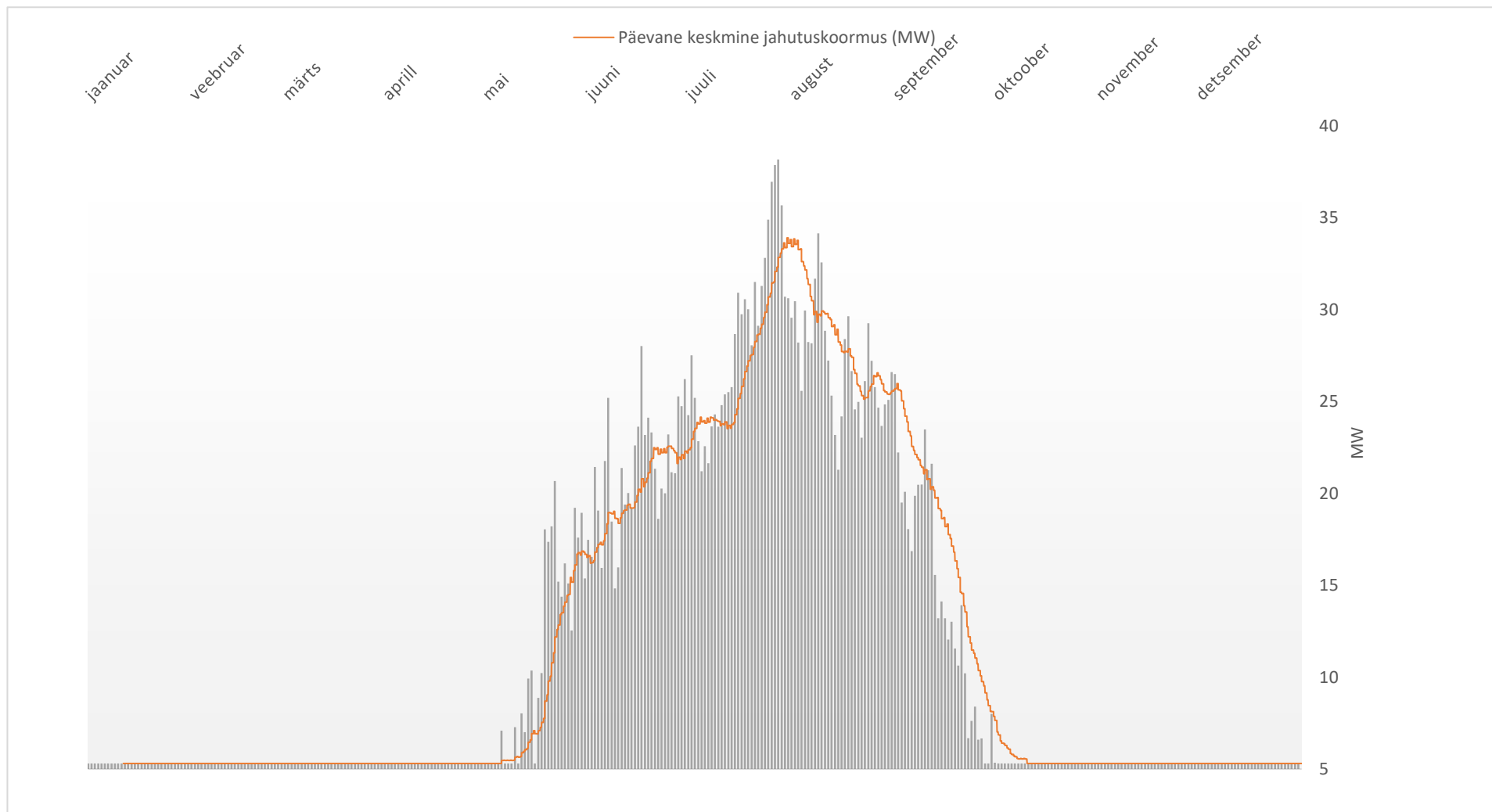
2.2 Tallinna kesklinna kaugjahutusvõrgu jahutusprofiil

Antud töös on aastane jahutusprofiil arvatud lihtsustatud mudelil. Kasutatud on olemasolevate võrkude võimsusprofiile ning viidud need vastatavusse Tallinna kesklinna kaugjahutuse võrgu suurusega.

Antud töös on võetud Tallinna kesklinna kaugjahutusevõrgu perspektiivseks tipukoormuseks 60MW, mille on Utilitas välja käinud kui perspektiivse võrgu tipukoormuse [21]. Profiil on koostatud eeldusel, et võrgu baaskoormus on 8% tipukoormusest ehk 4,8 MW. Baaskoormus on võrgus temperatuuridel alla 10°C. Hoonete jahutuse arvutuslikuks välistemperatuuriks võetakse tavapäraselt 27°C. Koormused temperatuuridele vahemikus 10°C ja 27 °C leitakse interpoleerimise teel. Temperatuuril 27 °C ja rohkem töötab võrk tipukoormusel. Antud meetod ei arvesta otsese päikesekiirgusega, vabasoojuse hulga ning hoonete ehituslike eripäradega, kuid kuna analüüsitakse võrku kui tervikut, mitte selle väiksemaid üksikuid osi ning võrku kuuluvad eri parameetritega hooned, on kasutatav meetod töö eripärasid arvestades piisava täpsusega.

Ilmastikuandmed on pärit Eesti Ilmateenisutuse Harku ilmajaamast, mis on Tallinna Kesklinna linnaosale lähim ilmajaam. Antud töös on kasutatud viimase viie aasta Harku Ilmajaama ilmavaatluste keskmisi tunniandmeid.

Joonisel 18 on graafik, millel on kujutatud vajalikku sessaonset jahutusvõimsust Tallinna Kesklinna perspektiivses kaugjahutuse võrgus. Graafikul on päevaste keskmiste jahutuskooormuste trendijoon. Tulemused on saadud antud peatükis kirjeldatud lihtsustatud meetodi kasutamisel. Graafikul on näidatud ka päevased keskmised jahutusvõimsused.



Joonis 18 Tallinna kesklinna perspektiivse jahutusvõrgu võimsuskõver

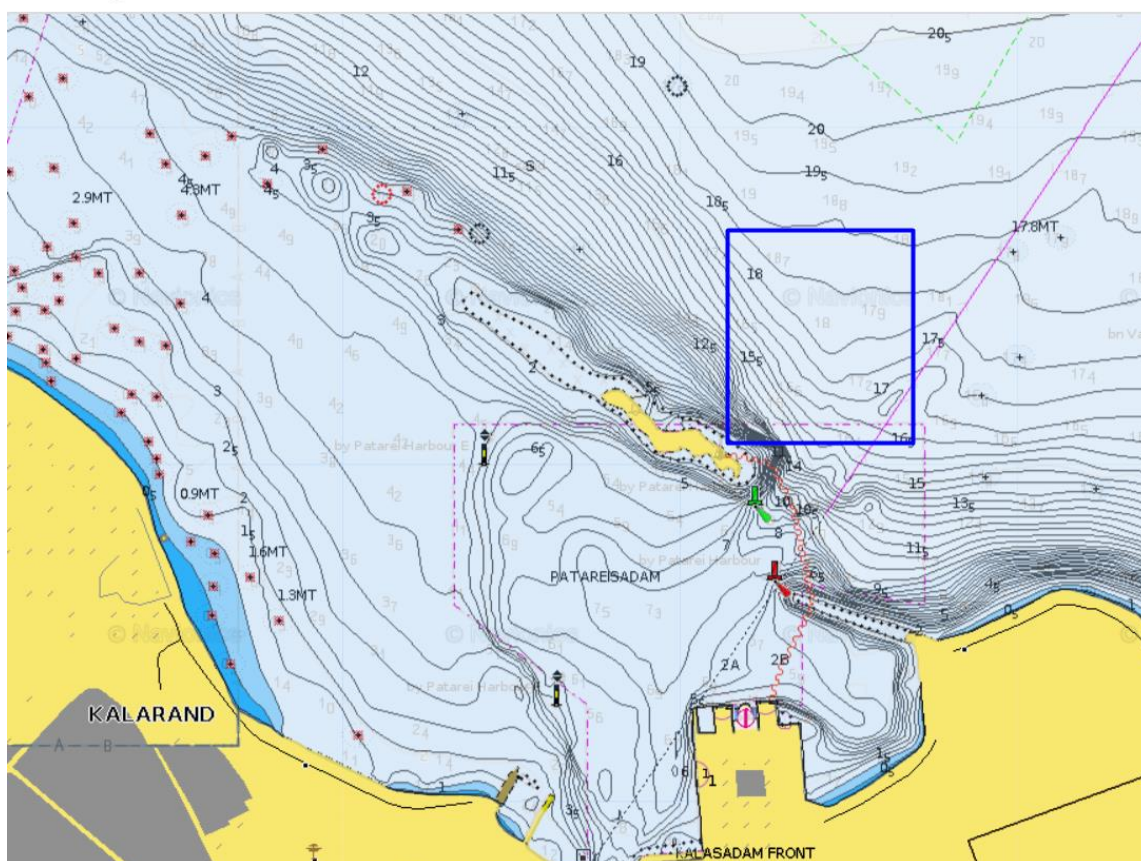
Jooniselt 18 on näha, et mida suuremaks lähevad koormused suveajal, seda volatiivsemaks muutub päevane jahutusvõimsuse vajadus. Tulenevalt asjaolust, et võrguprofiili arvutamisel on kasutatud viie aasta keskmiseid temperatuure, ei joonistu diagrammil välja üksikute aastate kuumaperioodidest tingitud tipukoormused, samuti ei kajastu diagrammil päevased maksimumid – kujutatud on päevaseid keskmiseid koormusi, et anda ülevaade aastasest võrguprofiilist. Diagrammil esinevad seaduspärasused on kehtivad ka olukoras, kus Tallinna kesklinna jahutusprojekt realiseerub olulisemalt suuremana või väiksemana võrreldes analüüsituga. Võrgu dünaamikat muudab vaid olukord, kus võrgus on suur osakaal hoonetel, mis ei kasuta jahutust ruumiõhu jahutamiseks, vaid tööstuslikeks protsessideks, mis ei sõltu välisõhu temperatuurist.

2.3 Vabajahutuse võimalused Tallinnas

Suurimad Tallinnas paiknevad veekogud, mida on võimalik kasutada Tallinnas vabajahutuseks, on Tallinna laht ning Ülemiste järv. Ülemiste järves paikneb Tallinna joogiveevaru ning seetõttu on selle kasutamine keerukas, sest juba väikesed järvevee temperatuuritõusud võivad mõjutada vee kvaliteeti. Lisaks paiknevad Tallinnas veel Harku ning Pae järv, samuti läbib Tallinna Pirita jõgi. Harku järv asub tänase linnaruumi arenduspiirkondadest eemal ning suure vahemaa tõttu ei ole tema kasutamine jahutamiseks perspektiivikas, olukord võib muutuda, kui Haabersti ja Õismäe piirkonda realiseeritakse uusi suuremahulisi elamupiirkondi, tööstusparke või ärilinnakuid. Hetkel sarnsaid projekte realiseerumas antud piirkonnas ei ole. Pae tiik on väikse veehulgaga läbivooluta veekogu, mis paikneb kaugjahutuse praegustest arenduspiirkondadest eemal. Samuti ei ole hetkel perspektiivikas eelnevatel põhjustel Pirita jõe võimaluste uurimine vabajahutuse kasutusele võtmiseks. Käesolevas töös on autor uurinud võimalikku Tallinna lahe kasutamist vabajahutuseks. Tallinna laht on valitud lähtudest selle lähedusest perspektiivsele võrgule nii olemasolevat olukorda arvesse võttes kui ka Tallinna linna üldplaneeringul põhinevaid perspektiivseid tuleviku arendusi silmas pidades. Tingitult Tallinna lahe suuruselt, võrreldes teiste piirkonna veekogudega, omab see suurimat potentsiaali vabajahutuse kasutamiseks veekogu baasi. Samuti on valiku kriteeriumiks autori eeldus, et Tallinna lahe kasutamine omab kõige väiksemat keskkonnamõju ning kohalike elanike vastasseis on Tallinna lahe rakendamisel väiksem võrreldes teiste kohalike veekogude kasutamisega.

2.3.1 Vabajahutuse sissevoolu torustiku asukoha valik

Arvestades Tallinna kesklinna võrgu perspektiivset asukohta ning planeeritavat kaugjahutuse jaama asukohta Tallinna Linnahalli piirkonnas, on otstarbekas kaugjahutuse merevee torustikud planeerida Tallinna Reidi piirkonda. Tallinna reid on Tallinna lahe kagupoolne lahesopp, kus paikneb ka Tallinna sadam. Reidi kallas on valdavalt lauge ning 10 meetri sügavusjoon paikneb 0,5 – 1,0 km kaugusel rannast. Kaugjahutuse planeerimisel tuleb läbi viia keskkonnauuring ning majanduslik analüüs. Samuti on otstarbekas kaasata protsessi mereteadlased otsustamiseks täpsem jahutusvee sissevõtu asukoht. Lähtudes võimalikust jahutusjaama asukohast ning mere sügavusest, mis on kujutatud sügavuskaardil joonisel nr 19, leiab autor, et olemasolevate andmete põhjal asub parim piirkond jahutusvee sissevooluks Topeltpatarei taguses alase. Perspektiivne veevõtmise asukoht on näidatud joonisel 19. Asukoha valikul tuleb arvestada Tallinna lahes olevate laevateedega. Torustiku paigaldamine segab laevaliiklust, samuti tuleb kasutada vajalike meetmeid tourstiku hilisemaks kaitsmiseks laevade eest. Teine asjaolu on Tallinna lahes seilavad laevad, mis muudavad veekogu pealmised kihid jahedamaks ning alumised kihid soojemaks, võrreldes seisvate veekogudega. Antud faktor muudab kaugjahutuse võrgu, mille vee sissevõtt toimub veekogu põhjast, ebaefektiivsemaks.



Joonis 19 Võimalik kaugjahutuse torustiku vee sissevoolu asukoht [24]

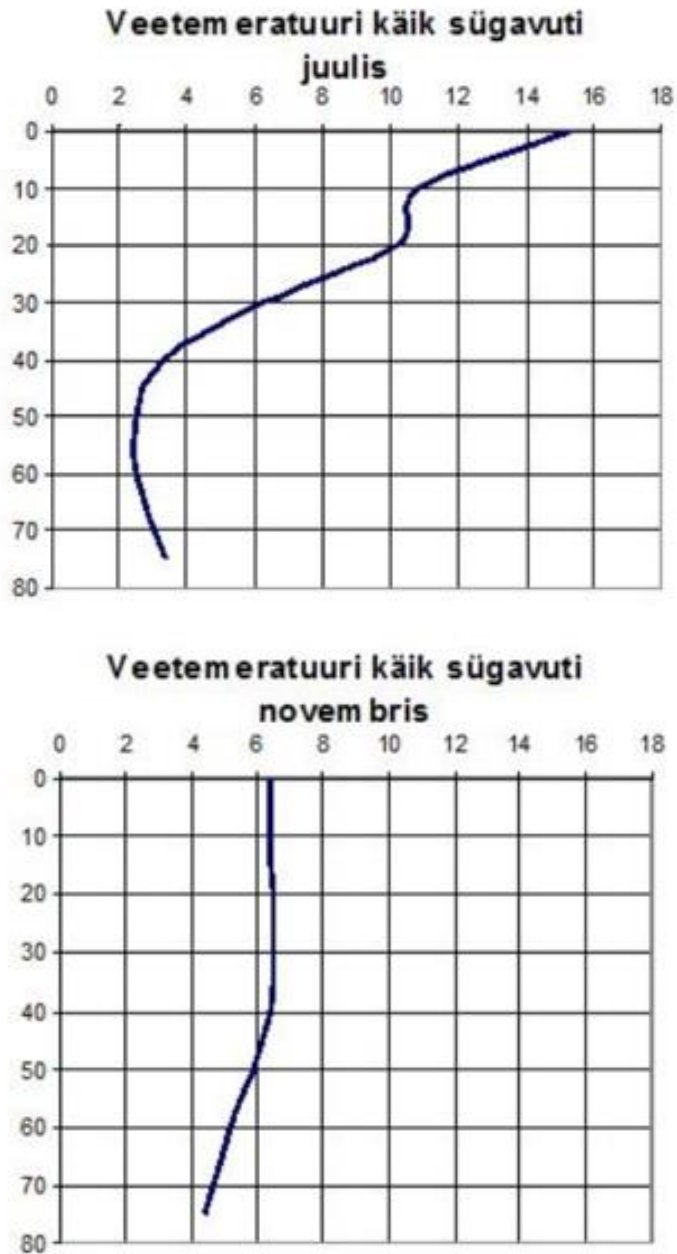
2.3.2 Tallinna lahe vabajahutuse potentsiaal

Tallinna laht asub piirkonnas, kus avamerel võib aastane temperatuuri kõikumine olla üle 20 kraadi- talvisest -1 kraadist kuni suvise +22 kraadini [25].

Tallinna lahes on ajalooliselt läbi viidud palju uuringuid, mille käigus on mõõdetud merevee temperatuuri muutuste dünaamikat. Põhjalikeim neist viidi läbi Eesti Ilmateenistuse poolt 27 aasta jooksul (1965 – 1992), kus koguti andmeid Aegna ja Naissaare vaheliselt alalt. Tänapäeval viiakse järjepidevalt hüdroloogilisi uuringuid läbi Tallinna lahel Riigi Ilmateenistuse poolt Pirita jahisadamas ning Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituudi poolt Tallinna Miinisadamas ning Tallinna Vanasadamas. Samuti viiakse mereveetemperatuuride seiret läbi NOAA¹ poolt. NOAA hindab veetemperatuure sateliitandmete põhjal. Veetemperatuurid on esitatud vee pinnakihilt.

¹ NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

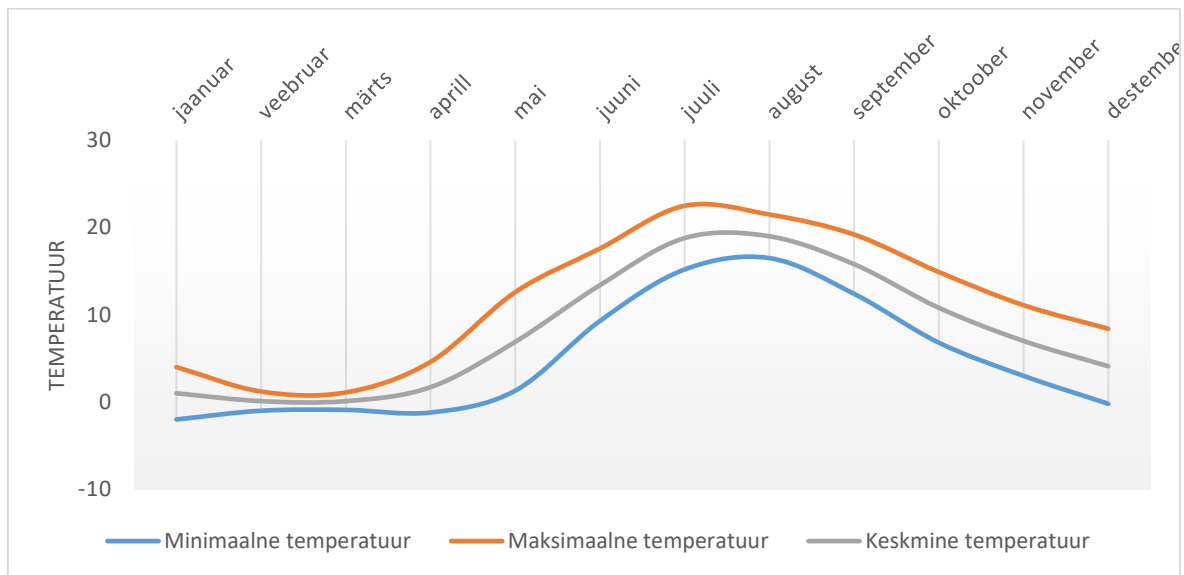
Eesti Ilmateenistuse poolt läbi viidud uuringus on leitud keskmine veetemperatuuri lang merevees 1 meetri sügavnemise kohta. Antud seaduspära on näidatud joonisel 20.



Joonis 20 Veetemperatuuri käik sügavuti eri aastaegadel [25]

Töös on kasutatud NOAA andmeid veetemperatuuride kohta ning tulenevalt Eesti Ilmateenistuse andmetest on leitud veetemperatuurid kümne meetri sügavusel. Valitud sügavus on võetud eelmises peatükis pakutud jahutusjaama asukohast ning temperatuuri langust empiirilistest suhetest vee sügavusse. Vahemikus 10 meetrit kuni 20 meetrit püsib veetemperatuur ka suveajal meres küllaltki stabiilsena, seega ei ole

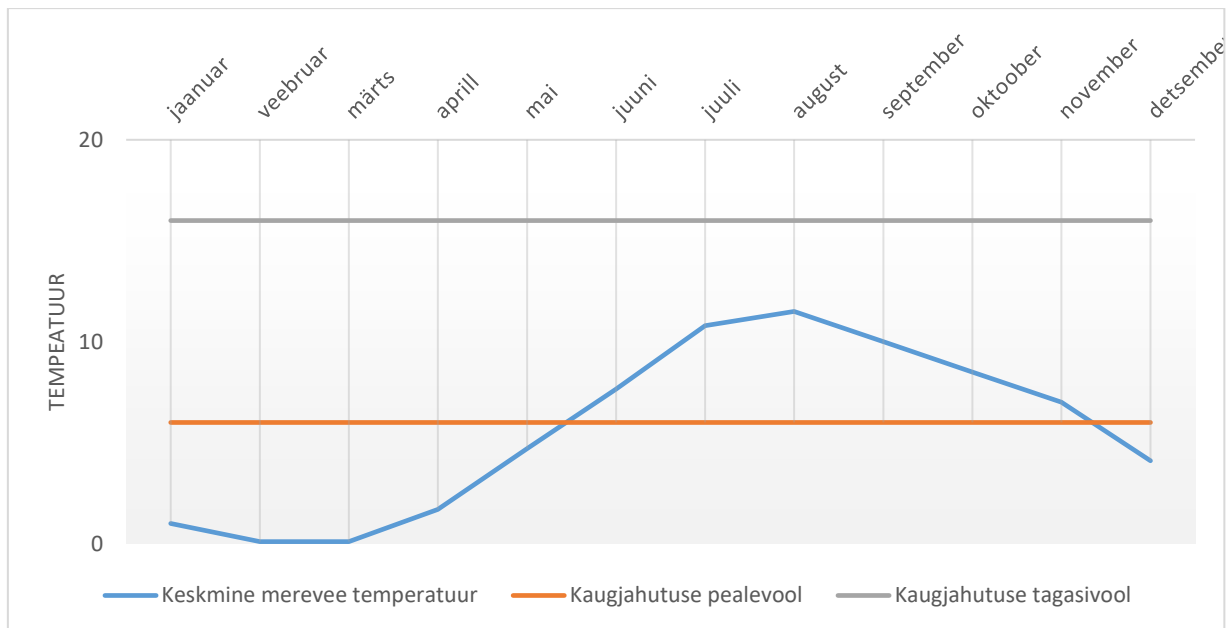
otstarbekas viia vee sissevoolu ava sügavamale kui 10 meetrit. Joonisel 21 on graafik aastaste keskmiste pinnatemperatuuridega Tallinna lahes ning minimaalsed ning maksimaalsed temperatuurid, mis on päevaste keskmistena esinenud antud alal.



Joonis 21 Tallinna lahe veetemperatuurid

Edasi käsitleme töös merevee keskmiseid temperatuure antud aastatel. Tulenevalt Eesti Ilmateenistuse läbiviidud uuringust talveperioodil, ei erine merevee pinnatemperatuur temperatuurist eri sügavustel, määral mis muudaks arvutuste tulemusi. Suveperioodil võib arvestada, et merevee temperatuuri lang on 1 kraad meetri kohta. [25]

Joonisel 22 on toodud sügvusega korrigeeritud merevee temperatuurid ning näidatud ka tavapärase kaugjahutuse temperatuurigraafik 6/16 °C.



Joonis 22 Merevee temperatuur ning kaugjahutuse temperatuurigraafik

Võrdluseks töötab Helsingi kaugjahutuse võrk täielikult vabajahutuse režiimis novembrist maini, kui merevee temperatuur on alla 8°C [26] Joonisel 22 paikneva graafiku põhjal on näha, et sarnases vabajahutuse kasutamise graafikus on potentsiaali rakendada ka Tallinna planeeritaval kaugjahutuse võrgul.

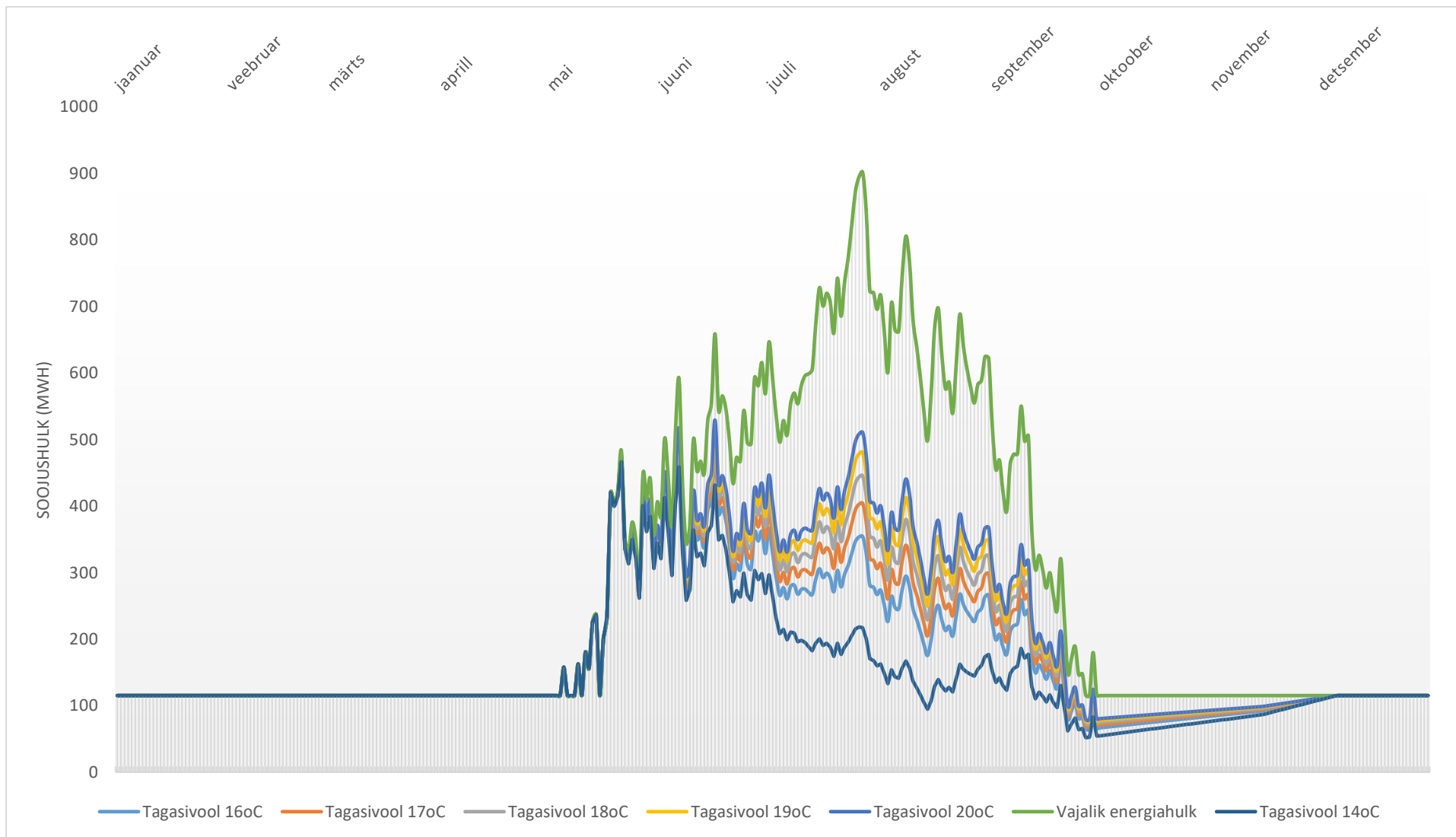
2.4 Energeetiline mõju temperatuuride tõstmisel kaugjahutuse võrgus

Sõltuvalt soovitud temperatuurigraafikust on võimalik katta vabajahutuse energiaga erinev osa kogu vajalikust jahutusenergiast. Seejuures on tähelepanuväärne, et enamus jahutusenergiat vajatakse suveperioodil kui veetemperatuurid on kõrgemad võrreldes talveperioodiga kui veetemperatuurid on madalamad. Vabajahutuse rakendamiseks täpse asukoha valimisel on kriitilise tähtsusega kaasata protsessi mereteadlased, et selgitada välja täpne temperatuuride dünaamika soovitud ala rannikupiirkonnas ning valida välja parimate temperatuuridega mereala, mis kaugjahutuse seisukohast on ala, kus suvisel perioodil on veetemperatuurid minimaalsed ning teiseks kriteeriumiks on mereala lähedus rannikule ja planeeritava kaugjahutuse jaama asukohale.

Merevee sissevõtu ja väljalaske avade planeerimisel on oluline jälgida, et tagastatav soojendatud merevesi ei mõjutaks temperatuure merevee sissevõtu avade läheduses.

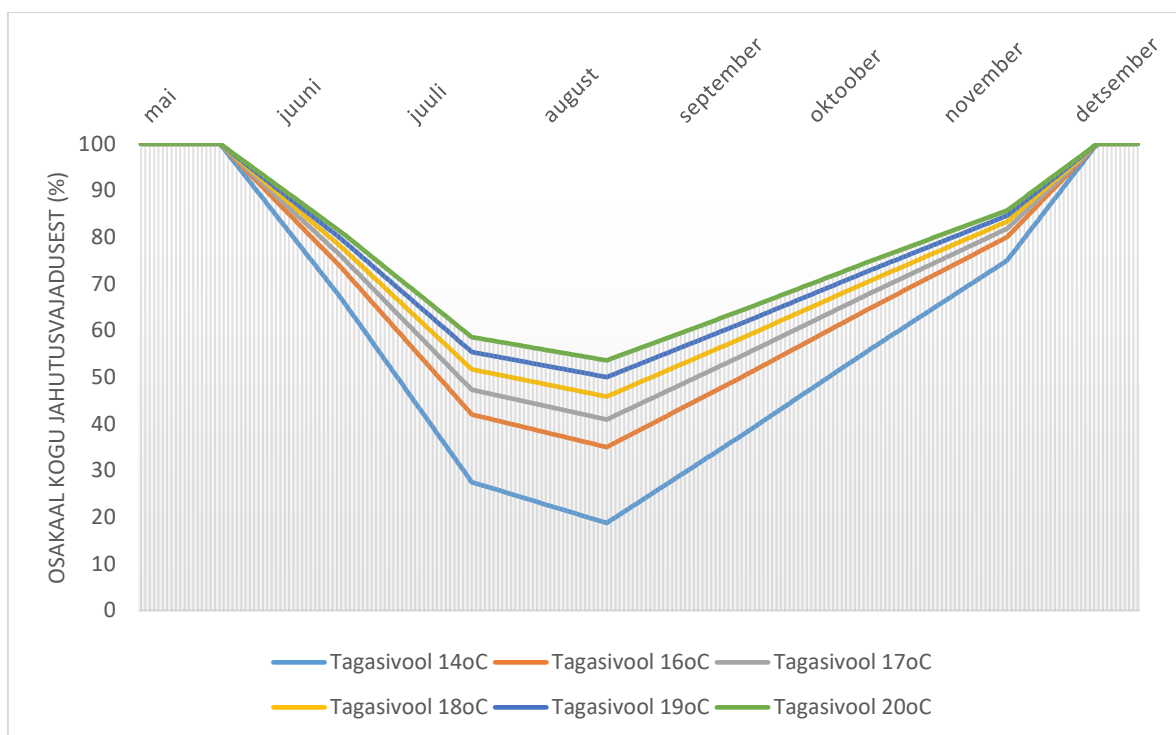
Seeläbi võib jätta arvutustes arvestamata jahutusjaama mõju veetemperatuuridele. Merevee kasutamisel jahutamiseks on tavapärane, et vee sissevõtu avad asuvad rannaalast eemal, kus veetemperatuurid on jahedamad. Tagasivoolu avade viimine rannaalalt eemale ei ole tavapäraselt otstarbekas. Joonisel 21 paikenvalt graafikult on näha, et täielikult kataks jahutusvajaduse Tallinna lahe vabajahutus vahemikus novembri keskpaik kuni mai ning osaliselt jahutuse esimeseks astmeks vahemikus mai kuni juuni teine pool ning september kuni november. Jooniselt on nähtav, et kevad-sügisel perioodil on merevee temperatuuride muutused kiired ning täiendava jahutusvõimsuse annab iga täiendav kraad, mille võrra suudetakse tõsta kaugjahutusvõrgu tagasivoolu temperatuuri. Vabajahutuse teel üle antav enegiahulk suureneb lineaarselt temperatuuride muutusega.

Joonisel 23 on kujutatud soojushulk, mis saadakse mereveelt erinevatel tagasivoolu temperatuuridel hoides soovitud jahutusvee pealevoolu temperatuuri konstantsena 6 °C juures. Kasutatud on eelmises peatükis leitud andmeid kaugjahutusvõrgu jahutusenergia vajaduse kohta ning keskmisi õhu- ning veetemperatuure antud perioodil. Arvutustes on arvestatud, et kaugjahutuse võrgu pealevoolu temperatuur on kõikidel juhtudel 6°C. Graafikul on toodud välja vajalik kogu enegiahulk ning tagasivoolu temperatuur 14°C. See iseloomustab olukorda, kus kasutusele võetakse tavapärane temperatuurigraafik 6/16°C, kui tagasivoolu temperatuuri ei suudeta hoida vajalikul kõrgusel.



Joonis 23 Vabajahutuse potentsiaal eri tagasivoolu temperatuuridel

Joonisel 23 paikneval graafikul avaldub, et tagasivoolu temperatuuri tõstmisel kasvab kasutatava vabasoojuse hulk kiiresti. Summaarselt kasutatakse vabasoojust aastases vaates temperatuurigraafiku 6°C/16°C juures ca 62 300MWh, kui temperatuurigraafikuga 6°C/20°C kasvab kasutatava vabasoojuse hulk 72 400MWh-ni, mis teeb liikaudu 16% võrra suurema vabajahutuse kasutuse. Suurimad erinevused on kesksuvisel perioodil, kus merevett on võimalik kasutada vaid jahutuse esimeseks astmeks ning kõrgema temperatuuri korral on esimeses astmes võimalik suuremas mahus kaugjahutuse vett eeljahutada. Keskmiselt toob ühekraadine tagasivee temperatuuri tõus vabasoojus hulga kasvu 3,5% võrra. Sealjuures ühekraadise tagasivoolu temperatuuri tõus toob vabajahutuse aastase kasutuse kasvu 5,1% võrra ning täiendava temperatuuri tõusu korral hakkab kasu sellest vähenema, tagasivoolu temperatuuri tõstmisel 19 kraadilt 20 kraadile toob kasu vaid 3% aastase keskmisena. Joonisel 24 on näidatud erinevate temperatuurigraafikute korral vabajahutuse osakaal kogu jahutusvajadusest joonise loetavuse parendamiseks on näidatud graafikul vaid see osa aastast, kus vabajahutuse potentsiaal on väiksem kui 100% kogu jahutusvajadusest.



Joonis 24 Tagasivoolu temperatuuri mõju vabajahutuse osakaalule

Graafikult on näha, kui olulist rolli mängib vabajahutuse potentsiaalis tagasivoolu temperatuur, mida suudetakse hoida. Võrdluseks on toodud ka olukord, kui tagasivoolu temperatuur langeb 14 kraadini. Võimalik vabajahutuse aastane kogus langeb nõnda võrreldes 16 kraadise tagasivoolu temperatuuriga 16% võrra (ca 8000MWh).

2.5 Majanduslik mõju temperatuuride tõstmisel kaugjahutuse võrgus

Positiivne mõju investeeringu tulukusele avaldub kõrgemate temperatuuride kasutamisel vähenenud vajalikest energiakogusest, mis avaldab mõju jaama opereerimiskuludele. Samuti võimaldab kõrgemate temperatuuride kasutamine ja seeläbi suurema osakaalu võrgu vajadustest vabajahutusega katmine hoida kokku investeeringutelt jahutusseadmetesse, mis ei pea seetõttu olema nõnda suure võimsusega. Need on vaid peamised argumendid, mis toetavad kõrgemate temperatuuride kasutuselevõttu. Teatud juhtudel võib veel näiteks lisanduda võimalus ehitada välja jahutustaristu, kasutades väiksemaid torudiametreid tulenevalt suuremast temperatuuride vahet peale- ning tagasivoolu vahel.

2.5.1 Suurem vabajahutuse osakaal

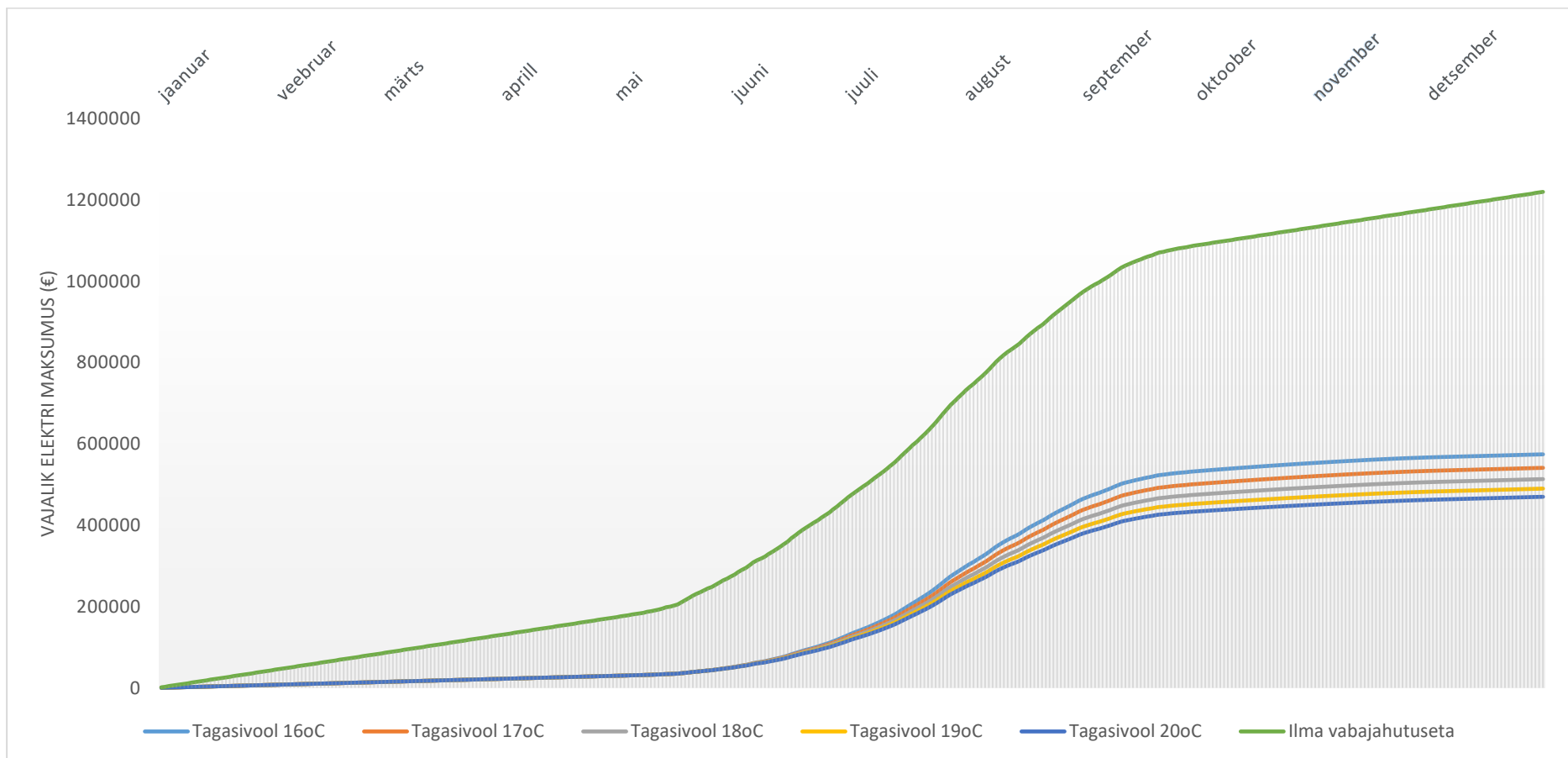
Eelmistes käeoleva töö peatükkides on välja arvatud erinevate kaugjahutusvõrgu tagasivoolu temperatuuride juures Tallinna lahest kasutatava vabajahutuse osakaal ning võimalik vabajahutuse kasutatav energiahulk. Lähtudes asjaolust, et soovitud jahutuskoormus tuleb katta igal juhul, leiame vajaliku osa jahutusenergiast, mis on vaja katta teiste allikatega. Peatükis 1 on välja toodud eri tootmistehnoloogiate efektiivsustegurid. Antud töös analüüsime olukorda, kus vabajahutuse alternatiivtehnoloogiaks on kompressorjahutid. Absorptsiooniseadmete mitte sobimine Tallinna kesklinna kaugjahutuse võrku on kirjeldatud töö peatükis number 1. Otstarbekas on kasutada eri võimsustega kompressorseadmeid, millest ühe tootmisüksusega saaks katta suvise täiendava baaskoormuse, mis tuleb stabiilselt lisada vabajahutuse panusele. Väiksema võimsusega kompressorjahuti võetakse kasutusele suviste tippude katmiseks ning kevad-sügiseseks perioodiks, kus vabajahutus vajab lisaenergiat vaid hooti või väiksemas mahu. Tabelis 5 on toodud vabajahutuse ning kompressorseadmete efektiivsustegurid, analüüsiks on valitud kompressorjahuti

efektiivsusteguriga 6, mis on sessorne keskmine efektiivsustegur arvestades eri tootmisseadmeid. Vabajahutuse kasutamisel kulub elektrienergia pumpade ja teiste seadmete käitamiseks. Vabajahutuse efektiivsusteguriks on valitud 35. Kompessorjahutitel on arvestatud kompressori kasutatava elektrienergiaga.

Tabel 5 Vabajahutuse ning kopressorjahutite aastased keskmised efektiivsustegurid

Seade	SEER
Kompressorjahuti	5-8
Vabajahutus	25-40

Tabelis 5 toodud keskmiste väärtuste põhjal on näha, et vabajahutuse kasutamisel on jahutuseks vajalik energiahulk ca 5 korda väiksem võrreldes kompressorjahutitega, tasub veel ära märkida, et absortsioonjahutite SEER on vaid pisut madalam võrreldes vabajahutusega. Käesolevas töös on loodud kuupõhine mudel vajaliku kaugjahutuse toimimiseks vajaliku elektrienergia kogusega, seejärel on elektrikogused viidud kokku koos keskmiste elektrihindadega Eestis äritarbijatele ning leitud eri tagasivoolutemperatuuride mõju kaugjahutuse tasuvusele. Aastatel 2010 - 2020 on olnud Eestis keskmine elektri lõpphind ilma käibemaksuta mitte kodutarbijatele vahemikus 0,057 kuni 0,084€/kWh [27]. Sealjuures aastast 2014 on hind olnud vahemikus 0,07 – 0,08€/kWh. Antud töö raames on võetud baashinnaks 0,075€/kWh. Kasutades keskmiseid eri tehnoloogiate SEER väärtusi on leitud rahaline sääst eri temperatuuride kasutamisel. Joonisel 25 on välja toodud eri tagasivoolu temperatuuride ning vaid kompressorjahutite kasutamisel vajaminev täiendava elektrienergia maksumus. Graafik on kumulatiivne. Olgu märgitud, et kulutused on toodud vaid soojuskandja jahutamise kulud, mitte kogu võrgu töös hoidmise kulud. Jooniselt on nähtav, et võrgus annab vabajahutuse kasutamine olulise säästu, aasta lõikes vähenevad kulud 27%, kui võrrelda temperatuuri graafikut 6/16°C ning ilma vabajahutuseta võrku. Iga täiendav kraad, mida suudetakse tõsta tagasivoolu temperatuuri, annab täiendava võidu kulutustes jahutuse tootmiseks keskmiselt 2 % võrra ühe kraadi kohta.



Joonis 25 Jahutuse tootmise kumulatiivne kulu elektrile eri temperatuuridel

2.5.2 Väiksemad torudiametrid

Suurem vabajahutuse osakaal on vaid üks komponent, mis toetab kõrgemate temperatuuride kasutamist. Kõrgemate temperatuuride kasutamine aitab optimeerida ka trassi ehitamise kulutusi. Kui pealevoolu temperatuur jätta muutumatuks (6 kraadi) suurendab tagasivoolu temperatuuri tõstmine temperatuuride erinevust, mis võimaldab kasutada väiksemaid torudiametreid, sest väiksema vooluhulga juures on suurema temperatuuride vahega ülekantav soojushulk suurem. Analüüsides R.Havi magsitritöös „Tallinna kesklinna kaugjahutuse eskiisprojekt“ koostatud projekti kõrgematel temperatuuridel. Antud töös on koostatud võrk võimsusele 27MW on läbi viidud torustiku hüdrauliline arvutus ning dimensioneerimine temperatuurigraafikul 6°C/16°C [20]. Kuna antud projektis on kujutatud ringvõrk ning kogu torustik on dimensioneeritud samale diameetrile arvestades torustiku summaarset tarbimist, siis on kogu ringistatud toru sama diameetriga. Antud nõue tõstab torustiku tarnekindlust, sest torustiku rikke korral on võimalik kogu piirkonda varustada ringi kaudu. Samas on antud lahenduse korral torustik enamus osa aastast tugevalt üle dimensioneeritud – ajal mil torustik on täies ulatuses funktsioneeriv. Tallinna kesklinna kaugjahutuse projektis on torustik dimensioneeritud lähtuvalt maksimaalsest voolukiirusest torustikus. Käesolevas töös on antud projekt ümber arvatatud suurematele temperatuuride vahedele. Arvutustes on lähtutud, et võrgu rõhukadu ei tõuseks võrreldes olemasoleva projektiga ning et voolukiirus võrgus jääks lubatu piiresse, milleks on valitud 2 m/s. Antud väärtus on maksimaalne lubatud vedelike voolukiirus raskesti ligipääsetavates torustikes, kui vedelike temperatuur on väiksem kui 10°C [28]. Antud voolukiiruse piirväärtust on kasutatud ka Tallinna kesklinna kaugjahutuse eskiisprojektis. Jättes antud reegli samaks on võimalik torustik ühe diameetri võrra alla dimensioneerida ehk ehitada välja ringvõrk diameetriga DN600, juhul kui tagastuva vee temperatuuri suudetakse tõsta 2,5°C võrra ehk temperatuurini 18,5°C, mis oluliselt vähendab ehituse ning materjali kulusid. Hinnanguliselt võib hinnaerinevus olla ca 200€/m, mis sisaldab nii soodsama maksumusega ehitusmaterjale, vähenevat montaažikulu kui ka väiksemaid kaevetööde ning vajalikke katete taastamise mahtusid. Mida suuremaks lähevad võrgu võimsused – Utilitas Tallinna plaanides on 60MW – seda suuremaks lähevad ka kokkuhoiuvõimalused toru diameetrite vähendamisest, sest torustiku ehituse maksumus ei sõltu lineaarselt torudiametrist.

2.6 Vabajahutuse mõju keskkonnale

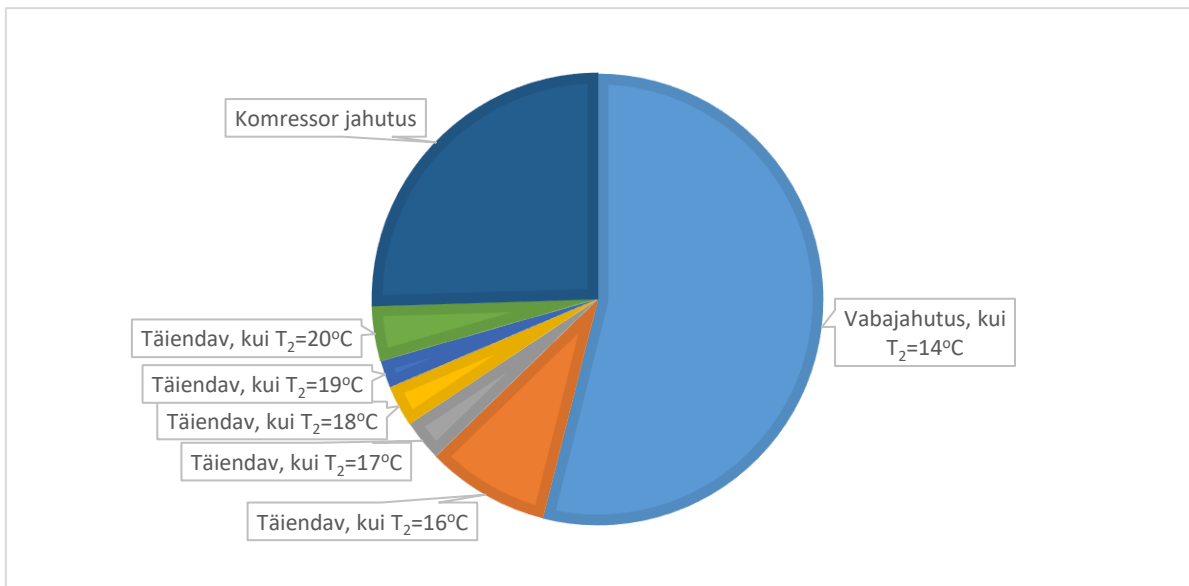
2.6.1 Mõju teiste paikade kogemusel

Vabajahutus veekogu baasil on lähiriikides kasutusele võetud näiteks Rootsis Göteborgi ning Helsingburgi linnas, Soomes Helsingi linnas. Eestis kasutatakse vabajahutuseks Tartus Emajõe vett. Enne vabajahutuse kasutuselevõttu on korraldatud keskkonnamõjude hindamine. Tartu näitel, kus kasutusel on jõgi, mis on jahutusveest kergemini mõjutatav võrreldes suuremahulise mereveega, on leitud, et suublasse tagasi suunduv jahutusvesi ei ületa ümbritsevat jõevett temperatuurilt enam kui 10°C- ga, keskmine veetemperatuuri tõus on 4,4°C. Sealjuures jõevee temperatuur suublast allavoolu tõuseb jahutusjaamast allavoolu maksimaalselt 0,09 °C. Keskkonnamõjude positiivse poole pealt on leitud, et väheneb elektri vajadus jahutuse tootmiseks 70% ning õhku jääb paiskamata 6000t süsihappegaasi aastas. Kaladele ja muule vee-elustikule arvestatav mõju puudub. [29]

Helsingi linna kaugjahutus põhineb samuti suures mahus vabajahutusel, milleks vajalik jahutusenergia saadakse Soome lahest. Mõju keskkonnale, mis seaks vabajahutuse kaustamise keskkonnasõbralikkuse küsimärgi alla ei ole täheldatud. [30]

2.6.2 Kaugjahutuse mõju keskkonnale

Kaugjahutuse tootmisel kasutatakse elektrienergiat sõltumata kasutatavast tehnoloogiast vähem võrreldes lokaalsete jahutusseadmetega summaarselt sama koguse jahutuse tootmisel. Loodussäästlikumaid lahendusi motiveerivad peamiselt kasutama nende majanduslik tasuvus ning säästlikumate lahenduste soosimine läbi seadusandluse, säästlikud lahendused aitavad saavutada ka hoonete energiatõhususe miinimumnõudeid. Joonisel 26 on näidatud eeldatav võimalik vabajahutuse osakaal erinevate võrgutemperatuuride kasutamisel.



Joonis 26 Vabajahutuse osakaal kaugjahutuse võrgus

Jooniselt on näha, et vaba jahutus moodustaks olulise osa kogu energiavajadusest. Eestis elektri tootmise keskmine CO₂ eriheide oli 2016 1,12t/MWh kohta [31]. Kasutades antud väärtust on leitud õhku paistava CO₂ koguse vähenemine vabajahutuse erinevate temperatuuride korral, tulemused on tabelis 6. Märkimisväärne on, et antud tabelis on võrreldud vaid vabajahutuse kasutamise eelist võrreldes kaugjahutusejaamades kompressorjahutitega jahutuse tootmisel. Lokaalsete seadmete efektiivsustegurid on tunduvalt madalamad, samuti ei ole neid võimalik mastaabiefekti puudumise tõttu hoida pidevalt optimaalses töörežiimis, nende koormus sõltub konkreetse hoone hetkelisest jahutusvajadusest.

Tabel 6 Elektrienergia kulu ja CO₂ heide eri tagasivoolu temperatuuridel

Tagasivoolu temperatuur (°C)	Vähenev vajaminev elektrienergia võrreldes vabajahutust kasutamata (MWh)	Vähenev õhku paisatav CO ₂ kogus (t)
14	7388	8275
16	8606	9638
17	9048	10 134
18	9417	10 547
19	9729	10 897
20	9997	11 196

2.6.3 Täiendavad võimalused keskkonnamõju vähendamiseks

Kaugjahutust on võimalik muuta veelgi enam keskkonnasõbralikuks võttes kasutusele salvestid. Salvestite tehnoloogiad on kirjeldatud peatükis 1. Nende säästlikkus seisneb võimaluses muuta vajalik toodang stabiilsemaks, mis tähendab, et on võimalik seadmetel pikemalt töötada optimaalses töörežiimis. Samuti aitab see ühtlustada elektrivõrgu koormust ning vähendada elektritarbimise ööpäevast volatiivsust. Jahutuse salvestamine nõuab palju vähem ressursi võrreldes elektrienergia salvestamisega, mis oleks alternatiivne võimalus elektrivõrgu volatiivsuse vähendamiseks.

Jahutuse tipukoormused ühtivad ajaga, millal päikese aktiivsus ning potentsiaalne päikeseenergia on suurimad. Kaugjahutusvõrkude rajamisel on otstarbekas kaaluda jahutusjaamade juurde päikeseelektriparkide rajamist, mis võimaldaksid kasutada jahutuse tootmiseks taastuvaid energiaallikaid ning majanduslikust vaatest tarbida elektrit ilma võrgutasudeta, mis vähendab sisendenergia hinda.

KOKKUVÕTE

Töös on analüüsitud võimalusi vabajahutuse kasutamiseks perspektiivses Tallinna kesklinna kaugjahutuse projektis. Autori hinnangul on suurima potentsiaaliga Tallinna lahe rakendamine vaba jahutuse allikana jahutusjaama jaoks. Tallinna laht asub vahetus läheduses perspektiivsetele jahutustarbijatele ning omab suurimat potentsiaali võrreldes teiste ümbruskonnas paiknevate veekogudega. Samuti on eeldus, et merevee kasutamisel tekib väiksem ühsikondlik vastumeel, võrreldes siseveekogude kasutamisega. Tallinna lahe vabajahutuse kasutamise keskkonnamõjud vajavad täiendavat uurimist.

Töös on vastamisi seatud eelduslikud jahutuskoormuse graafikud ning merevee temperatuur, piirkonnas, mis on autori hinnangul parim jahutuse kasutamiseks. Käesoleva töö tulemusel on leitud, et 1 kraad tagasivoolu temperatuuri tõstmist, vähendab täiendavat jahutusenergia tootmist teiste seadmetega 2% võrra aasta lõikes. Täielikult on võimalik katta vajalik jahutuskoormus vabajahutuse teel perioodil november – mai, vahepealsel ajal on vabajahutust võimalik kasutada jahutuse esimeseks astmeks, misjärel tuleb muudel meetoditel jahutusvee temperatuuri veelgi madalamale viia.

Teistes riikides on välja töötatud lahendused, hoonete sekundaarosades tagastuva temperatuuri tõstmiseks. Autori ettepanek on kontakteeruda võimalike jahutusklientidega juba enne jahutusvõrgu ehitamist ning kaardistada nende olemasolevad jahutussüsteemid. Samuti teostada mõõtmised olemasolevates jahutusvee kontuurides, mis annaks aimu, millised ümberehitused on vaja teha rakendamaks nendes hoonetes kaugjahutust ning kas süsteemid võimaldavad väiksemate modifikatsioonide korral kasutada kõrgemaid temperatuure võrreldes tavapärase 6°C/16°C graafikuga. Töös on välja toodud asjaolu, et tõstes tagasivoolu temperatuuri tõuseb temperatuuride vahe võrgus ning soodsatel juhtudel on võimalik vähendada investeringu maksumust läbi väiksemate torudiameetrite kasutamise. Vajadusel on võimalik võrgu kaugemates punktides hilisema võrgu koormuse suurenemisel kasutada akupaake ning jääpankasid.

Täiendava säästumeetmena on töös välja toodud võimalus rajada jahutusjaamade juurde päikesepargid, mis aitavad vähendada vajalikku sisseostetava elektrienergia hulka. Suurimad jahutuskoormuse vajadused esinevad ajal, mil päikeseaktiivsus on suurim. Samuti aitab päikeseelektri tootmisüksuste loomine vähendada koormust elektrivõrgule.

Kriitiline tähtsus on enne kaugjahutuse jaama ja vabajahutuse välja ehitamist kaasata protsessi mereteadlased, eelkõige uurimaks vabajahutuse võimalikku mõju mereelustikule ning leidmaks parimad asukohad sisendvee avadeks, mis omaks minimaalset mõju merele ning maksimaalset mõju kaugjahutusjaama efektiivsusele.

ABSTRACT

The author of the master thesis analyses the possibilities of using free cooling in a perspective district cooling project in the center of Tallinn. According to the author, the implementation of the Gulf of Tallinn as a free cooling source for the cooling plant provides the greatest potential. The Gulf of Tallinn is located in the immediate vicinity of promising cooling consumers and has the largest potential compared to other water bodies in the vicinity. Besides, an assumption is taken into the account that the use of seawater is less socially repulsive than the use of inland waters. The environmental impacts of the use of free cooling in the Gulf of Tallinn need further investigation.

In this paper, the assumed cooling load graphs are contrasted with the seawater temperature in the area which, in the author's opinion, is best for cooling. As a result of this research, it has been found that raising the return temperature by 1 degree reduces the production of additional cooling energy by other equipment by 2% per year. Thus it is possible to completely cover the required cooling load by free cooling in the period from November to May, meanwhile free cooling can be applied in the first stage of cooling, after which the cooling water temperature must be lowered even further on the account of other methods.

Other countries have developed solutions to increase the return temperature in the secondary parts of buildings. The author suggests to contact potential customers interested in cooling before building the cooling network and to map their existing cooling systems. In addition, to perform measurements in existing cooling water circuits to give an idea of what modifications are needed to implement district cooling in these buildings, and whether the systems allow higher temperatures compared to the conventional 6°C/16°C schedule for minor modifications. The paper outlines the fact that by increasing the return temperature, the temperature difference in the network grows and in favorable cases it would be possible to reduce the investment cost by using smaller pipe diameters. If required, battery tanks and ice banks can be used at remote points of the network should the load on the network grow later.

As an additional economical measure, the author has pointed out the possibility of constructing solar parks next to cooling plants, which will help reduce the amount of electricity purchased. The need for the biggest cooling loads occurs at a time when solar activity is at the peak. The establishment of solar power generation units will also help reduce the burden on the electricity grid.

Involvement of marine scientists in the process before building a district cooling plant and free cooling is of critical importance, in particular, with the aim to study the potential impact of free cooling on marine life and to find the best locations for inlet openings with minimal impact on the sea while featuring maximum efficiency.

KASUTATUD MATERJALID

- [1] E. & Power, „Possibilities with more district cooling in Europe,“ Euroheat & Power, Brüssel, 2006.
- [2] S. W. Svend Frederiksen, „Fundamentals of District Heating,“ *District heating and Cooling*, Lund, Studentlitteratur, 2013, p. 21.
- [3] Stockholm Environment Institute, „Eesti kliimaambitsiooni tõstmise võimaluste analüüs,“ Tallinn, 2019.
- [4] Cetetherm, „District Cooling substations,“ [WWW]. Kättesaadav: <https://www.cetetherm.com/download/18.6cfd599516a1ff9e61a3d91/1557997712832/Maxi%20Cooling%201807.pdf>. [Kasutatud 02 01 2020].
- [5] J. F. Z. S. J. Pospisil, „Cool Producing Systems Based on Burning and Gasification of Biomass,“ *Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT*, Elounda, Greece, 2006.
- [6] I. H. P. Programme, „Ab-Sorption Machines for Heating and cooling in future energy systems, Final Report,“ 2000.
- [7] A. Neave, „Absorption Refigereation,“ *Bioresource Technology*, January 2018 .
- [8] S. A. S. C. Pongsid Srihirin, „A review of absorption refrigeration,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 5, p. 343–372, 2001.
- [9] M. A. Rosen ja S. Koohi-Fayegh, „Chilling and district cooling systems,“ 2016.
- [10] Ecoheatcool and Euroheat & Power , „The European Cold market. Final report,“ Belgia, 2006.
- [11] J. Dahlberg, „Sustainable energy to rely on,“ Fortum, 2009.
- [12] M. Jangsten, „High temperature District Cooling,“ *5th International Conference of Smart Energy Systems*, Copenhagen, 2019.
- [13] M. Jangsten, „District cooling in Götheburg,“ Tallinn, 2020.
- [14] T.-S. Lee, „Second-Law Analysis to Improve the Energy Efficiency of Screw Liquid Chillers,“ *Entropy*, nr 12, pp. 375-38, 2010.
- [15] S. Seyam, „Central HVAC systems,“ *HVAC Systems*, London, IntechOpen, 2018.
- [16] Y. L. M. I. a. J. E. S. P. L. Xiao Li, „Extremum seeking control of cooling tower for self-optimizing efficient operation of chilled water systems,“ *American Control Conference (ACC)*, Montréal, 2012.
- [17] T. Tark, „Kaugjahutus ja lokaaljahutus,“ *Kaugkütte ja kaugjahutuse süsteemid*, Tallinn, 2020.
- [18] M. Raud, „Kaugjahutus,“ Tallinn, 2020.
- [19] P. F. T. L. J.-O. D. Maria Jangsten, „High Temperature District Cooling: Challenges and Possibilities Based on an Existing District Cooling System and its Connected Buildings,“ *Energy*, 18 03 2020.
- [20] R. Havi, „Tallinna kesklinna kaugjahutuse eskiisprojekt,“ Tallinn, 2019.
- [21] T. Kirs, „Kaugjahutus. Keskkonnasõbralik jahutusviis linnakeskkonnas,“ *Kaugjahutuse konverents*, Tallinn, 2020.
- [22] T. Tark, „Välisõhu kestuskõver ja selle kasutamine kütte koormuse ja kulu,“ Tallinn, 2016.

- [23] T. A. F. H. R. A. Swedblom M, „District Cooling Customer Measurement Analysis,“ Capital Cooling Energy Service AB, 2014.
- [24] „Tallinna lahe merekaart,“ Navionics, [WWW]. Kättesaavad: <https://gis.ee/meri/?layers=navionics-vta-sonar#15/59.4476/24.7559>. [Kasutatud 18 03 2020].
- [25] I. Saaremäe, „Merevee temperatuur Tallinna lahes,“ [WWW]. Kättesaavad: <http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/ilmajutud/merevee-temperatuur-tallinna-lahe/>. [Kasutatud 04 01 2020].
- [26] V. B. Tanja Kenkmann, „Contribution of Renewable Cooling to the Renewable Energy Target of the EU,“ Öko-Institut e.V. , Utrecht, Netherlands , 2012.
- [27] Eurostat, „Electricity prices by type of user,“ 2019. [WWW]. Kättesaavad: <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do;jsessionid=TbnvDeqJOcBeqxVPALLuR17wJqLtPxXQeHQWT8ihQxi8m6AdBPLU!272774262?tab=table&plugin=1&pcode=ten00117&language=en>. [Kasutatud 15 02 2020].
- [28] R. H. Garrett, Hot and Cold Water Supply: Second edition, Ocford:: Blackwell Scienve LTd., 2006.
- [29] R. Kõks, „Kaugjahutuse (KJ) võimalused Tartus,“ Tartu, 2014.
- [30] M. Riipinen, „District cooling in Helsinki,“ *Basrec*, Helsinki, 2014.
- [31] E. Latõšov, „Elektri ja kaugkütte CO2 eriheidete tegurid,“ *Teadmistepõhine ehitus 2018*, Tallinn, 2016.