

Energiatehnoloogia instituut

**VÄIKESTE KAUGKÜTTEVÕRKUDE
ARENGUVÕIMALUSED**

**DEVELOPMENT PROSPECTS FOR SMALL-SCALE
DISTRICT HEATING NETWORKS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kristiina Angela Kelder

Üliõpilaskood 211898

Juhendaja: Kertu Lepiksaar, doktorant-nooremteadur

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.

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

Autor:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kristiina Angela Kelder (sünnikuupäev: 24.07.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Väikeste kaugküttevõrkude arenguvõimalused“,

mille juhendaja on Kertu Lepiksaar,

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

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

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

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

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

/ allkirjastatud digitaalselt /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kristiina Angela Kelder, 211898MASM
Õppekava: MASM energiatehnoloogia- ja soojusenergeetika
Juhendaja: Doktorant-nooremteadur, Kertu Lepiksaar, 6203919
Konsultant: -

Lõputöö teema:

(eesti keeles)*VÄIKESTE KAUGKÜTTEVÕRKUDE ARENGUVÕIMALUSED*

(inglise keeles) DEVELOPMENT PROSPECTS FOR SMALL-SCALE DISTRICT HEATING NETWORKS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida Lavasaare, Tootsi ja Uuemõisa piirkondade hetkeolukorda ja arenguvõimalusi
2. Uurida Lavasaare, Tootsi ja Uuemõisa piirkondade näitel võimalusi suvise sooja tarbevee tootmise optimeerimiseks
3. Analüüsida päikeseenergia ja salvestuse kasutamisel mõju võrgule

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö eesmärgi püstitus	1.03.2024
2.	Lõputöö teoreetiliste osade koostamine	5.05.2024
3.	Lõputöö stsenaariumianalüüs	20.05.2024
4.	Lõputöö mustandi esitamine	20.05.2024
5.	Valmis töö esitamine	27.05.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....202....a

Üliõpilane: Kristiina Angela Kelder ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Kertu Lepiksaar ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Konsultant: ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

EESSÕNA.....	7
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU.....	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. TEOREETILISED ALUSED.....	11
1.1 Kaugküte.....	12
1.1.1 Katlad.....	13
1.1.2 Heitmenormid ja gaasipuhastusseadmed.....	14
1.1.3 Seadusandlus ja hinnastamine.....	16
1.1.4 Soojuse tootmist mõjutavad tegurid – soe tarbevesi.....	16
1.2 SOOJUSPUMBAD.....	18
1.2.1 Külmainete regulatsioonid.....	20
1.2.2 Probleemkohad kaugküttevõrkudes soojuspumpade kasutuselevõtuks.....	21
1.3 PÄIKESEENERGIA KAUGKÜTTES.....	22
1.3.1 Kollektorid.....	22
1.3.2 PV-paneelid.....	22
1.3.3 Päikeseenergia Eestis.....	22
1.4 Energia salvestamine kaugküttes.....	23
2. METOODIKA.....	25
2.1 Töös analüüsitud piirkondade kirjeldused.....	25
2.1.1 Lavassaare.....	26
2.1.2 Tootsi.....	27
2.2 Stsenaariumite kirjeldused.....	29
2.2.1 Referentsstsenaarium.....	30
2.2.2 Päikeseenergial ja soojuspumbal põhinev küttelehendus.....	30
2.2.3 Katelde rekonstrueerimine.....	31
2.3 Arvutuste eeldused.....	31
2.3.1 Elekter.....	33
3. PRAKTILINE OSA.....	34
3.1 Tootsi.....	34
3.1.1 Referentsstsenaarium.....	34
3.1.2 Päikeseenergial ja soojuspumbal põhinev küttelehendus.....	35
3.1.3 Katelde rekonstrueerimine.....	37
3.1.4 Tulemused.....	38
3.2 Lavassaare.....	39
3.2.1 Referentsstsenaarium.....	39
3.2.2 Päikeseenergial ja soojuspumbal põhinev küttelehendus.....	40

3.2.3 Katelde rekonstrueerimine	42
3.2.4 Tulemused	43
3.3 Uuemõisa	44
3.3.1 Referentsstsenaarium	44
3.3.2 Päikeseenergial ja soojuspumbal põhinev küttelehendus	45
3.3.3 Katelde rekonstrueerimine	46
3.3.4 Tulemused	47
KOKKUVÕTE	49
SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	53

EESSÕNA

Töö algidee uurida arendusvõimalusi Uuemõisa, Tootsi ja Lavassaare kaugküttevõrkudes pärineb Nevel Eesti OÜ poolt. Lõputöö teema sõnastus ja töö ülesehitus sõnastati koos juhendaja, Tallinna Tehnikaülikooli energiatehnoloogia instituudi doktorant-nooremteadur, Kertu Lepiksaarega.

Töös kasutatud võrkude andmed pärinevad Nevel OÜ poolt. Analüüsi koostamiseks kasutati täiendavalt võrkude kohta koostatud soojusmajanduse arengukavadest saadud infot ning avalikest andmebaasidest pärinevat infot (sh Ehitisregister, Keskkonnaotsuste infosüsteem, maa-ameti kitsenduste kaart, Euroopa Komisjoni andmebaasid).

Soovin tänada oma juhendajat Kertu Lepiksaart, kelle panus, nõu ja eeskuju innustas tööd koostama. Olulise panuse töö koostamisele andis Enar Kraav, kes pörgatas mõtteid analüüsi koostamisel. Samuti soovin tänada töö idee välja pakkujat Ülo Stokkebyt Nevel Eesti OÜst.

Töö peamine eesmärk oli leida võimalused võrkude arendamiseks Uuemõisa, Tootsi ja Lavassaare piirkonnas. Keskendudes suvise tarbevee tootmise üleviimisele efektiivsematele lahendustele.

LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

CO₂ - süsinikdioksiid (*Carbon dioxide*)

CO_{2e} - CO₂ ekvivalent

COP – soojustegur (*Coefficient of Performance*)

ENMAK – Eesti energiamajanduse arengukava

GWP – kliimamuutuse potentsiaal (*Global Warming Potential*)

HFC – vesinikfluorosüsivesinikud (*Hydrofluorocarbons*)

IEA – Rahvusvaheline Energiaagentuur (*International Energy Agency*)

KHG – kasvuhoonegaas (*Greenhouse Gas*)

KPI – tulemusnäitajad (*Key Performance Indicators*)

LPG – vedel naftagaas (*Liquefied Petroleum Gas*)

LULUCF - Maakasutus, maakasutuse muutus ja metsandus (*Land Use, Land Use Change and Forestry*)

PFC – perfluorosüsivesinikud (*Perfluorocarbons*)

PMT – MS Excel funktsioon annuiteedi perioodilise makse leidmiseks (payment per period)

PV – fotogalvaaniline element (*Photovoltaics* ehk PV)

SF₆ – väävelheksafluoriid (*Sulfur Hexafluoride*)

WACC – kaalutud keskmine kapitali hind (*Weighted Average Cost of Capital*)

SISSEJUHATUS

Rohelisema tuleviku suunas liikudes ning muutuv keskkonnas peab muutuma ka kaugküte. Eesti väikesed kaugküttepiirkonnad peavad kohanema järjest karmistuvate heitmenormide, kahaneva elanikkonna ning muutuvate toetuskeemide keskkonnas. Võimalusi kaugküttevõrkude arenduseks on mitmeid alates lokaalküttele üleminekust, kaugküttevõrgu temperatuuride alandamise, katlamajade, võrkude ning hoonete rekonstrueerimiseni. Magistritöös analüüsitakse kolme kaugküttepiirkonna näitel, Tootsi, Uuemõisa ja Lavassaare, katlamaja rekonstrueerimist ning võimalusi soojuspumpade, elektri boilerite ja päikeseenergialahenduste kasutusele võtmiseks.

Nevel Eesti OÜ emaettevõtte on jätkusuutlikkuse strateegias seadnud eesmärgiks 2030. aastaks saavutada süsinikuneutraalse energia tootmise – eesmärki plaanitakse saavutada läbi katlamajade ja kaugküttevõrkude kaasajastamise, investeeringute taastuvenergiasse ja energiakasutuse optimeerimise [1]. Mistõttu on eriti oluline võrgupiirkondade arendusvõimaluste analüüsimine.

Kaugküte on Eestis levinud soojuse tootmise viis, kokku on Eestis 210 kaugküttevõrku [2]. Eesti kliimaseaduse põhimõtete dokumendis on toodud välja, et alates aastast 2040 on soojuse tootmine CO₂ heitmevaba [3]. Mis tähendab, et olulist rõhku on vaja pöörata kaugküttevõrkudes soojuse üleviimisele heitmevabadele lahendustele.

Lõputöö teoreetilises osas antakse ülevaade kaugküttest ning erinevatest tehnilistest lahendustest, mida kaugküttes kasutatakse sh soojuspumpad, akumulatsioonipaagid, päikeseenergiast toodetud taastuvelektri kasutamine (PV). Lisaks antakse töö teoreetilises osas ülevaade Eesti päikeseenergia kasutamise potentsiaalid ning päikeseenergia sünergiast kaugküttesektoriga.

Praktilises osas pakutakse välja stsenaariumid ning koostatakse nende majanduslik ning soojustehniline analüüs. Töö baseerub avalikest allikatest leitaval infol ning akadeemiliste allikate analüüsil. Analüüsitavate kaugküttevõrkude alase info saamiseks tehti koostööd Nevel Eesti OÜ-ga ning kasutati ka avalikke allikaid (sh soojusmajanduse arengukavasid). Päikeseenergia alane teave saadi avalikest andmebaasidest s.o PVGIS, Riigi Ilmateenistus.

Töös koostati võimalike arengusuundade uurimiseks kolm stsenaariumi. Stsenaariumite ja arvutuste koostamiseks kasutati tarkvara Microsoft Excel.

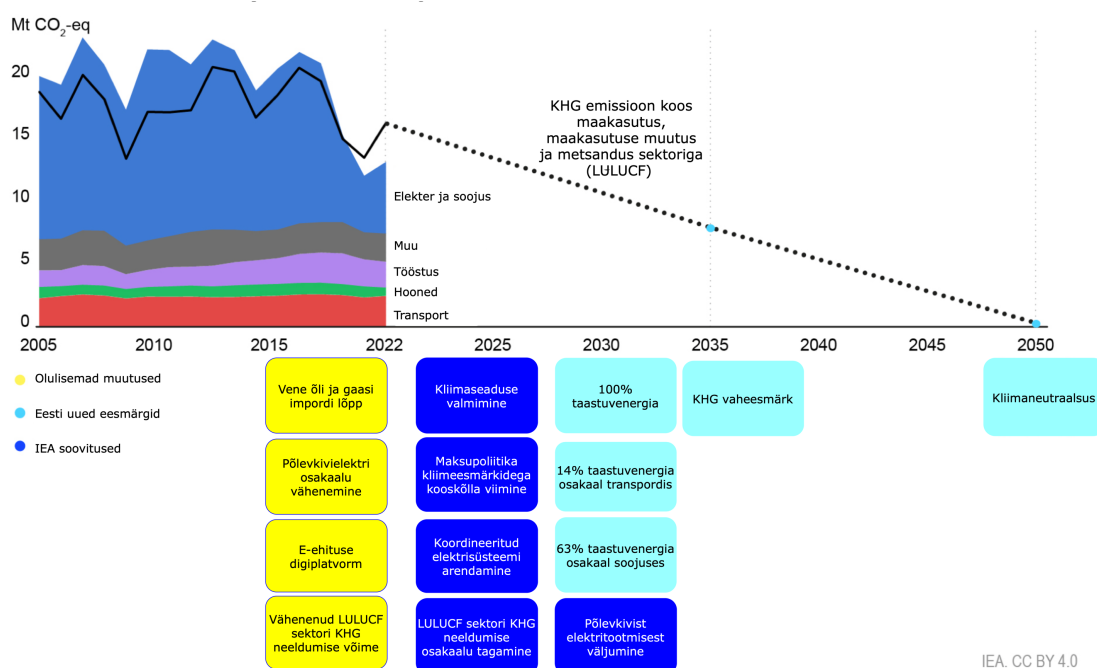
Esimese stsenaariumis eeldati senise tegevuse jätkumist kaugküttevõrgus. Toodi välja võrgu hetkeolukord ning võimalikud kitsaskohad tegevuse jätkamisel. Eraldi analüüsiti ka võrgus olevate kortermajade renoveerimise mõju soojuse tarbimisele. Teises stsenaariumis keskenduti PV-pargi, soojuspumba ning soojussalvestuse lahenduse kasutuselevõtmisele. Kolmandas stsenaariumis võeti eelduseks fossiilkütustest loobumine 2030. aastaks ning arvatati kaugküttevõrgu soojuse hinnad juhul kui katlad rekonstrueeritakse.

Varasemalt on energiatehnoloogia instituudis koostatud mitmeid lõputöid, mis analüüsivad kaugküttevõrkude arenguperspektiive „Haabneeme ja Viimsi Kaugkütte arendusvõimalused“ [5], [6] „Soojuspumpade majanduslik tasuvus maapiirkondade kaugküttevõrkudes“ ning „Päikeseenergia kasutamise võimalused Tallinna kaugküttes“ [7].

Märksõnad: kaugküte, soojustootmine, soojuspumbad, magistritöö

1. TEOREETILISED ALUSED

Eestil on seatud ambitsioonikaid kliimaeesmärke, mille tulemusel on oodata olulisi muutusi energiasektoris. Alates aastast 2030 on Eesti eesmärgiks taastuvelektri osakaal 100% aastasest elektri tarbimisest (2021 aastal 29%) ning soojus- ja jahutussektoris katta 63% toodangust taastuvenergiast (2021 61%); 2050. aastaks on eesmärgiks saavutada süsinikuneutraalsus. [8] Rahvusvahelise energiaagentuuri (IEA) hinnangul pole kehtiv seadusandlus piisav, et tagada seatud eesmärkide saavutamist ning oluline on täiendavate meetmete rakendamine. Eesti kliimapoliitika eesmärgid on toodud alloleval joonisel (Joonis 1.1). Koostamisel on Eesti kliimaseadus, mille vastuvõtmine on planeeritud 2025. aastaks. Seadusandluse karmistumine mõjutab oluliselt nii energia tootjaid kui ka tarbijaid. [9] Kliimaseaduse põhimõtete dokumendis on toodud välja, et alates aastast 2040 on soojuse tootmine CO₂ heitmevaba. [3]



Joonis 1.1 Eesti kliimapoliitika eesmärgid [9]

Senini on Eesti küttesektori süsinikuheite vähendamisel olnud fookus suuresti biomassi kasutusel, kuid keskendumine vaid biomassile omab märkimisväärsed riske. 2021. aastal eksportis Eesti 40% metsanduse biomassi toodetest. Lisaks energiatarbimise efektiivsemaks muutumisele on kliimaeesmärkidel oluline roll ka Eesti maakasutusel, maakasutuse muutus ja metsandus (LULUCF) valdkonna metsanduse emissioonide vähendamise eesmärkidel, mida suur biomassi kasutus ei toeta. Mis võib kaasa viia raiemahtude vähendamise ning biokütuste hinna kasvu. [9]

IEA hinnangul tuleks Eestis soojuse tootmise emissioonide vähendamiseks keskenduda soojuspumpade ja soojussalvestite kasutuselevõtmisele, mis võimaldaks luua paindlikuma ja kulutõhusama soojuse tootmise süsteemi. Eriti integreerituna taastuvenergia tootmisega päikesest või tuulest. Lisaks võimaldab nende lahenduste kasutusele võtmine vähendada lokaalseid peenosakeste õhuheitmeid. [9]

1.1 Kaugküte

Kaugküte on levinud soojuse tootmise viis Põhjamaades ning Baltikumis. Kaugkütte puhul toodetakse soojus ühes või mitmes keskses allikas, milleks võib olla näiteks katlamaja, koostootmisjaam või muu soojuse tootmise lahendus ning edastatakse tarbijatele kaugküttevõrgu kaudu. Eestis on kaugkütte küllaltki levinud, kokku on ligi 210 kaugküttevõrku, millest üle 160 võrgu kasutab osaliselt või täielikult kütusena hakkpuitu või muud puidupõhist kütust. Eestis on 26 kaugküttevõrku, milles kasutatakse soojuse tootmiseks turvast ning soojuspumbad on kasutusel kolmes kaugküttevõrgus. Eestis on kaheksa kaugküttevõrku, mille aastane soojustoodang ületab 40 000 MWh, 15 kaugküttevõrku on vahemikus 15 000-40 000 MWh, 27 võrku vahemikus 5000-15 000 MWh, 85 võrku vahemikus 1000-5000 MWh ning 31 võrku, mille toodang jääb alla 1000 MWh. See tähendab, et suurem osa kaugküttevõrkudest on pigem madala soojustoodanguga ning sarnased töös uuritavate piirkondadega. [2]

Kui siamaani on kaugküttes soojust toodetud erinevates katlamajades või koostootmisjaamades kasutades tahke- ja vedelkütuseid, siis järjest enam kasutatakse ka soojuspumpasid. Enim kasutatakse sel otstarbel vesi-vesi tüüpi soojuspumpasid, millega on võimalik madalatemperatuurilisest soojusest toota kõrgemal temperatuuril vett, mida kütteks kasutatakse. [2] Soojuspumbad ei ole põhjala-baltikumi regiooni kaugküttes veel väga levinud, kuid on olnud kasutusel juba pikka aega. Näiteks võeti Rootsis soojuspumbad kaugküttes kasutusele juba 1970. aastatest. [4] Eestis on hetkel vaid kolm kaugküttevõrku, kus on kasutusel soojuspump: Palamuse, Kiikla ja Kaarepere. [2] Soojuspumpa plaanitakse rajada ka Tallinna kaugküttevõrku – Utilitas AS plaanib investeerida ligi 450 miljonit eurot reo- ja mereveesoojuspumpade rajamiseks. [10]

Järjest suurenev energia tootmine tuulest ja päikesest suurendab elektri hinna volatiilsust ja hooajalisust, mistõttu võib periooditi olla elektri kasutamine kaugküttevõrkudes järjest tasuvam [4]. Kui Eestis on elektri tootmisel küllaltki suur süsinikujalajalg (Eesti 2022. aasta segajääk 715 g/kWh [11]) tulenevalt põlevkivielektri osakaalust, siis põhjala regioonis on elektri eriheide madalam (Soome segajääk 2022.

aastal 471,27 g/kWh [12]). Plaanitakse ühenduste suurendamist Baltikumi ja Põhjamaade vahel, mistõttu saab eeldada, et nii suuremast elektrivõrkude integreeritusest kui ka suurenevast taastuvenergia kasutamisest elektri emissioonitegur Eestis väheneb, muutes elektrist soojuse tootmise keskkonnasõbralikumaks. [4]

Elektriliste soojuse tootmise viiside ehk *power to heat* lahenduste kasutusele võtmine kaugküttesektoris suurendab soojuse tootmise paindlikkust ning tekitab stabiilsust energiahindades. Tehnoloogia mitmekesistumisel on mitmeid potentsiaalseid häid külgi: näiteks paindlikkus tootmises ning sellest tulenevalt ka suurem vastupanu tuleviku muutustele energiasüsteemis, suurem valik madala CO₂ emissiooniga tootmist ja võimalus kasutada ära taastuvelektri suurenevast tootmisest tulenevaid madala hinnaga perioode. [4]

Eesti Energiamaajanduse Arengukava (ENMAK) 2035 tööversioonis nähakse Eesti kaugküttes fossiilkütuste asendamisel lahendusena madaltemperatuurilise kaugkütte suuremat kasutuselevõttu, keskkonna- ja heitsoojuse suuremat kasutamist ning soojussalvestust. Maagaasi on võimalik ajutise lahendusena asendada biogaasiga, kuid õlikatelde asemel tuleb leida uued lahendused, milleks võib olla elektrienergia suurem kasutus soojusvaldkonnas. [8]

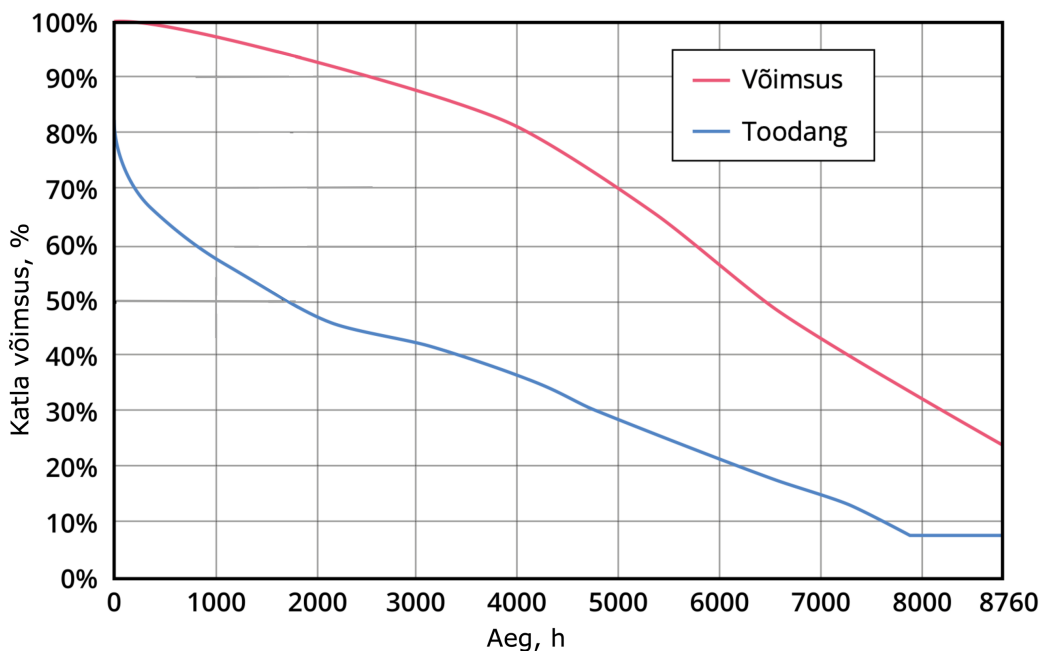
Keskkonnaaspektide kõrval on oluline ka inimeste toimetulek. ENMAK 2035 tööversioonis on seatud 2035. aastaks eesmärk, et kõige kallima kaugkütte hinna suhe keskmisesse võrgu hinda on kuni 120%, algtase on 148%. Võrkude arendamisel tuleb silmas pidada tarbijate maksevõimet, kaugküttevõrgud on jätkusuutlikud kui suudetakse tagada madalam hind võrreldes lokaalkütte lahendustega. [8]

1.1.1 Katlad

Eesti kaugküttevõrkudes on tüüpiliselt baaskoormuskatlaks tahkekütuse katel ning tipukoormuskatlaks õli- või gaasikatel. [2] Katelde, mis on vanad ja hooldamata, suitsugaaside temperatuurid ja hapniku sisaldus suitsugaasis on suurem, mis tähendab, et põlemisprotsess ja soojusülekanne on ebaefektiivsem. Alakoormatutel kateldel alaneb katla kasutegur ning suureneb kütusekulu. [13]

Vastavalt standarditele on biokütusekatelde stabiilse töö piirkond 30-100%. Uuemad katlad suudavad töötada ka ligi 20% koormuse juures, suveperioodi madala soojuskoormuse katmiseks biokütuse katlaga ei tohiks suve keskmine soojuskoormus jääda madalamaks kui 20% katla nominaalvõimsus. Joonis 1.2 illustreerib katla nimivõimsuse ja väljastatava soojustoodangu suhet Eesti kliimaatilistes tingimustes.

Tavapärestes Eesti kaugküttesüsteemides on maksimumilähedase koormuse periood lühike. [14]



Joonis 1.2 Biokütusekatla nimivõimsuse ja väljastatava soojustoodangu vahekord Eesti kliimaatilistes tingimustes [14]

Elektriboilerid on sarnaselt soojuspumpadele kaugküttevõrkudes kasutusel piirkondades, kus on elekter periooditi madala hinnaga. Elektriboileri puhul soojendatakse vett elektrilise küttekehaga. [15] Põhjamaises kliimas on tihti elektrihinna maksimumid periooditi, kus soojuse tarbimine on kõrge, mistõttu vaid elektriliste lahenduste rakendamine on problemaatiline.

1.1.2 Heitmenormid ja gaasipuhastusseadmed

2015. aastal võeti vastu direktiiv „Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv (EL) 2015/2193 Keskmise võimsusega põletusseadmetest õhku eralduvate teatavate saasteainete heite piiramise kohta“. Direktiiv kohaldub põletusseadmetele, mille nimisoojusvõimsus on vahemikus 1 kuni 50 MW. Direktiivi kohaselt ei tohi alates 1. jaanuar 2030 olemasolevates põletusseadmetes, mille võimsus on alla 5 MW ületada tabelis 1.1 toodud väärtusi. Uute seadmete paigaldamisel on väärtused veel rangemad. [16]

Tabel 1.1 Heite piirväärtused (mg/Nm³) olemasolevate keskmise võimsusega põletusseadmete jaoks, mille nimisoojusvõimsus on võrdne või suurem kui 1 MW ja väiksem kui 5 MW [16]

Saasteaine	Tahke biomass	Muud tahkekütused	Vedelkütused	Maagaas
SO ₂	200 ¹	1100	350	-
NO _x	650	650	650	250
Tolm	50	50	50	-

¹ Väärtust ei kohaldata seadmetele, mis põletavad üksnes puidupõhist tahket biomassi

Kehtima hakkavate direktiivide täitmiseks on vajalik kasutusele võtta gaasipuhastusseadmeid. Alljärgnevas tabelis on toodud erinevate seadmete kasutusnäitajad (Tabel 1.2) [14]. Hetkel on analüüsitavates piirkondades kasutusel multitsüklonid.

Tabel 1.2 Gaasipuhastusseadmete kasutusnäitajad [14]

Saasteaine	Gaasi tuhasus, mg/Nm ³	Kasutustemperatuur, °C
Multitsüklon	150-500	<500
Kottfilter	10-50	<150
Elektrifilter	99,9%*	<300
Skraber	50-100	<70-80

*Puhastusefektiivsus

Multitsüklonid on seadmed, milles tahkete osakeste eraldamine toimub tsentrifugaaljõu toimel. Seadmes toimub tahkete osakeste eraldamine vertikaalses torus, mis on ühendatud kollektori ja punkriga seadmega. Tegemist on väga levinud puhastusmeetodiga, kuna seadmed on lihtsa konstruktsiooniga, suhteliselt odavad ning ei vaja spetsiaalset hooldust. [14], [17], [18]

Kottfiltrid on seadmed, kus tahkete osakeste püüdmiseks kasutatakse peenesilmalist kangast või poorset keraamilist filtrit. Võrreldes multitsüklonitega, on tegemist efektiivsema seadmega, kuid seade vajab regulaarset regenererimist-puhastamist tagamaks madal takistus ja filtri efektiivsus. Täiendavalt peab kottfilter süttimisohu vältimiseks olema kaitstud suitsugaaside kõrgete temperatuuride ja kõrge hapniku sisalduse vastu. [14], [18]

Elektrifiltrite puhul juhitakse puhastatav gaas läbi elektrivälja ning seeläbi sadestuvad tahked osakesed elektrodidele. Elektrodile antakse alandatud kõrgpinge. Selle toimel ioniseerub suurem osa gaasi negatiivselt ning negatiivsed ioonid liiguvad sadestuselektrodile. Liikuvad ioonid põrkuvad tolmu osakestega ning negatiivse potentsiaali saanud tolmuosakesed liiguvad sadestuselektrodile. Tegemist on efektiivse

lahendusega, kuid kalli hinna tõttu ei ole see väiksemates kaugküttevõrkudes levinud lahendus. [14], [18]

Suitsugaaside kondensaatorid võimaldavad vähendada suitsugaasi tuhaosakeste sisalduse kottfiltriga võrreldavale tasemele ning võimaldavad tõsta ka süsteemi kasutegurit. Suitsugaaside jahutamisel alla kastepunkti kondenseerub suitsugaasist välja veeaur. Mida madalamale temperatuurile jahutatakse, seda suurem on kondenseerunud vee hulk ning sellest saadav soojus. Jahutuseks kasutatakse küttesüsteemist tagastuvat vett. Kondensaat sisaldab vähesel määral tolmuosakesi, orgaanilist ainet mittetäielikust põlemisest ja raskemetalle, mistõttu tuleb enne loodusesse laskmist seda töödelda. Suitsugaaside kondensaatoreid on Eestis viimastel aastatel järjest enam kasutusele võetud. [14]

1.1.3 Seadusandlus ja hinnastamine

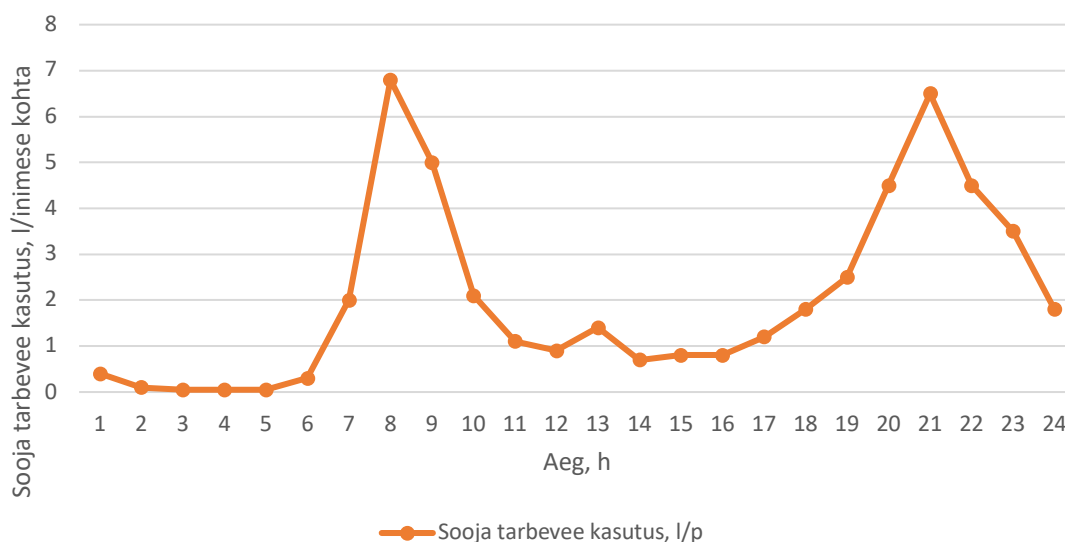
Kaugkütteseadus reguleerib soojuse tootmise, jaotamise ja müügiga seonduvaid tegevusi kaugküttevõrgus ja võrguga liitumist. [19] Kaugkütte piirhind on vaja soojusettevõtjatel kooskõlastada regulaatoriga, milleks Eestis on Konkurentsiamet. Mõistliku ärikasumi suurust mõõdetakse Konkurentsiameti poolt lubatud tulunormi ehk kaalutud keskmise kapitali hinna (*WACC- Weighted Average Cost of Capital*) kaudu ning selle alusel toimub müüdava teenuse põhjendatud tulukuse arvutamine. [20]

2023. aastal Eleringi tellimusel läbiviidud analüüsis töid soojusettevõtted välja mitmeid turubarjääre, mis piiravad soojuspumpade kasutusele võttu. Hetkel kasutusel olev soojuse tootmise hinnametoodika fookus on võimalikult madala soojuse hinna hoidmisel, mistõttu investeringud, mis tõstavad soojuse hinda ei ole eelisseisus. See takistab investeringuid soojuspumpadesse, mis hetke turutingimustes jäävad alla gaasi- ja õlikateldele, kuid pikas perspektiivis elektri hinna alanemisel võivad tagada tarbijale madalama soojuse hinna ning keskkonnasõbralikuma kütteleahenduse. [21]

1.1.4 Soojuse tootmist mõjutavad tegurid – soe tarbevesi

Soe tarbevesi moodustab hoonete küttekulust olulise osa. Tüüpiline sooja tarbevee kasutus varieerub riigiti, kuid on Eesti lähiriikides Soomes 43 L/päevas ja Rootsis 33 l/päevas. Samuti erinevad ka tarbimisprofiilid, näiteks Saksamaal on hommikune tarbimine suurem, kuid Soomes on suurem just õhtune tarbimine. [22] Sooja tarbevee tarbimist mõjutavad tegurid on: tarbijate arv, tarbimisharjumused, elustiil, sotsiaalmajanduslikud võimalused, kliimatilised tingimused. Nii päevane kui ka tunnipõhine tarbimine varieerub. Siiski on olemas tüüpiline trend ning päeva jooksul on

kaks tarbimispiiki – hommikul ja õhtul. Alloleval joonisel on kujutatud Soome kortermaja näitel sooja tarbevee kasutuse päevasisene kõikumine. (Joonis 1.3) Kui soojuspumba kasutusele võtmise peamine eesmärk on katta ära suvine sooja tarbevee tootmine on oluline võtta arvesse soojuspumba valimisel lisaks keskmisele nõutavale soojuse kogusele ka tarbimise piigid. [22]



Joonis 1.3 Novembri nädalasisene sooja tarbevee tarbimine Soome näitel [22]

Soojuse tarbimist mõjutab oluliselt ka kaugküttevõrkude ja tarbivate hoonete seisukord. Konkurentsiamet on seadnud kaugküttevõrkudele soojuskao eesmärgid, mis on toodud tabelis 1.3 [23]. Eesti hoonefond on küllaltki vananenud ning hoonete rekonstrueerimisel saavutatav soojuse tarbimise vähenemine on olenevalt hoonetüübist terviklikul rekonstrueerimisel ligikaudu 50% eelnevast tarbimisest (Tabel 1.4) [24].

Tabel 1.3 Konkurentsiameti trassikadude tehnilised nõuded [23]

Aasta	Trassikadude tehnilised nõuded, %
2023	13,5
2025	13
2027	12,5
2029	12
2031	11,5

Tabel 1.4 Renoveerimise mõju hoonete soojuse eritarbimisele [24]

Hoone	Soojuse kasutus enne renoveerimist, kWh/(m ² a)	Soojuse kasutus pärast renoveerimist, kWh/(m ² a)
Korterelamu	170	70
Büroo	130	70

Kaubanduslik	80	55
Haridus	140	55

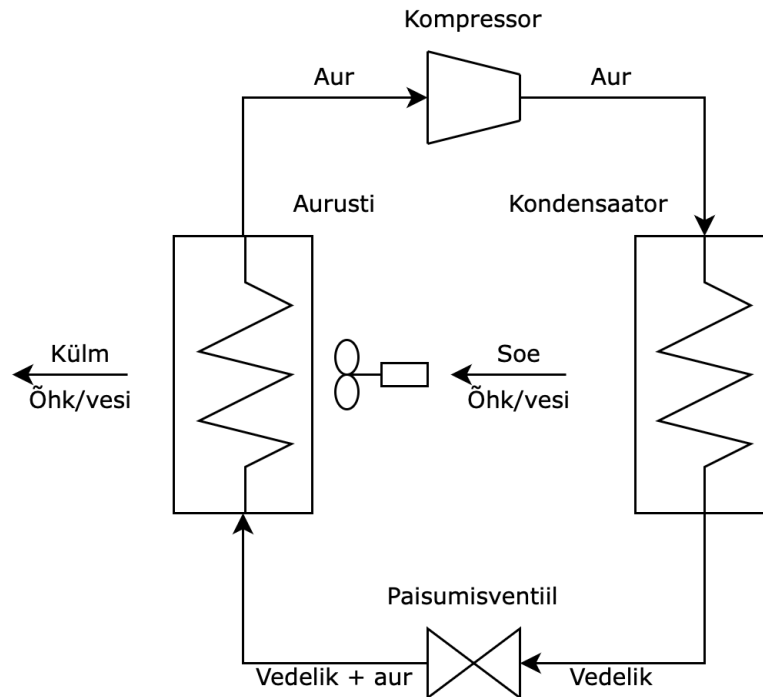
1.2 SOOJUSPUMBAD

Järjest enam pannakse soojusvarustuses rõhku efektiivsusele ning viimastel aastatel on nii lokaal- kui ka kaugküttes olulisemalt rohkem hakatud kasutama soojuspumpasid. 2021. aastal oli 34% Eesti majapidamistest soojuspump ning 2022. aastal oli Eesti Euroopas neljandal kohal soojuspumpade müügit, saavutades taseme 32 müüdüd soojuspumpa 1000 majapidamise kohta. [9]

Soojuspumpasid saab kasutada nii kütmiseks kui ka jahutamiseks nii elamutes, tööstuses kui ka avalikes hoonetes, samuti on võimalik saada madaltemperatuurilist soojust tööstuslikeks protsessideks (demonstratsioon-projektides kuni 180 °C). Soojuspumpade abil on võimalik ühest ühikust elektrienergiast saada tavapäraselt 2,5-5,5 ühikut soojusenergiat, seda olenevalt tehnoloogiast. [25]

Soojuspumba tööpõhimõte baseerub külmaine tsükli (inglise k. *refrigerant cycle*). Süsteemi käitatakse elektrienergia abil ning kasutatakse välist soojusallikat soojuse saamiseks (näiteks vesi, õhk, maa või madaltemperatuuriline heitsoojus). Soojusagensi abil (külmutusaine) viiakse soojust madalama temperatuuriga soojusallikalt kõrgema temperatuuriga keskkonda. Peamine soojuspumba tüüp on aurukompressor-soojuspump (inglise k. *vapor compression heat pump*), mille töötsükkel koosneb neljast etapist. [25] (Joonis 1.4)

1. Soojusagens aurustub madalal rõhul ja temperatuuril soojusvahetis (aurustis) kokkupuutel soojusallikaga;
2. Aurustunud soojusagens komprimeeritakse kompressoris, mis põhjustab temperatuuri ja rõhu tõusu;
3. Seejärel suunatakse gaas teise soojusvahetisse (kondensaatorisse), kus soojusagens eraldab soojuse keskkonnale, mida köetakse. Protsessi käigus soojusagens kondenseerub;
4. Rõhu all suunatakse kondensaat paisuventiili ehk drosselventiili, kus rõhk alaneb ning langeb temperatuur. Tekkinud madala rõhu ja temperatuuriga vedelik suunatakse aurustisse ning tsükkel kordub.



Joonis 1.4 Soojuspumba töötsükkel [26]

Peamised soojuspumba tüübid on järgnevad:[27]

- Maasoojuspump – energiaallikana kasutatakse maapinna soojust, mida saadakse pinnasesse paigaldatud maakollektori abil. Kasutusel on horisontaalseid ja vertikaalseid süsteeme, mis on omakorda ühendatud soojuspumbaga. Eri süsteeme kasutatakse vastavalt vaba ruumi ja pinnase tingimustele;
- Õhksoojuspump – soojusallikana kasutatakse välisõhu või ventilatsiooniõhu soojust. Õhksoojuspumpade testimisel kasutatakse standardina õhku temperatuuril $+2\text{ °C}$ või $+7\text{ °C}$, mistõttu tuleb tavapäraselt Eesti laiuskraadidel kasutada ka lisakütteallikat;
- Õhk-õhk soojuspump – õhk-soojuspumba korral antakse välisõhust vajalik soojusenergia ruumi siseõhule. Enamasti kasutatakse sellist lahendust eramute korral. Tulenevalt madalaimast soetuskulust on tegemist levinuima soojuspumba tüübiga;
- Õhk-vesi soojuspump – õhk-vesi soojuspumba korral võetakse soojusenergia välisõhust ning antakse üle vesiküttesüsteemile. Samuti on selle lahendusega võimalik toota ka sooja tarbevett.

Soojuspumba süsteeme on erinevate võimsustega, suurimad olemasolevad süsteemid on võimsustega ligi 35 MW ning neid kasutatakse kaugküttevõrkudes. BASF and MAN Energy Solutions on teatanud 120 MW soojuspumba plaanist, millega plaanitakse toota tööstuslikku auru. Elamutes kasutatavad soojuspumbad suudavad toota 70 °C vett, erisüsteemid 90 °C vett, tööstuslikud soojuspumbad suudavad väljastada temperatuuri

kuni 160°C ning demoseadmetega on suudetud saavutada ka temperatuure kuni 180°C. Tänapäevased süsteemid suudavad töötada ka temperatuuridel -25°C ning tagada efektiivsuse taseme ligi 100% ka temperatuuril alla -10°C . [25]

Järjest suurenev taastuvenergia osakaal elektriturul suurendab elektrihinna volatiilsust. Soojuspumbad koos soojussalvestusega võimaldavad madala elektrihinna korral soojust salvestada ning salvestatud soojust saab kasutada kui elektri hinnad on kõrged.[25]

Soojuspumba efektiivsuse hindamiseks kasutatakse tihti järgnevaid parameetreid:

- COP ehk soojustegur (inglise keeles *Coefficient of performance*)
- sCOP – sessorne soojustegur (inglise keeles *seasonal coefficient of performance*)
- SPF – aastane soojustegur (inglise keeles *Seasonal performance factor*)

Soojuspumpade kasutamisel on kaugküttevõrkudes potentsiaali. Tulenevalt madalamast COP väärtusest ei vaadelda aga enamasti õhk-soojuspumpasid kaugküttes kui potentsiaalseid soojusallikaid. Enamasti peetakse kaugküttes perspektiivikateks soojusallikateks maasoojust, heitsoojust või veekogu soojust. [28]

1.2.1 Külmainete regulatsioonid

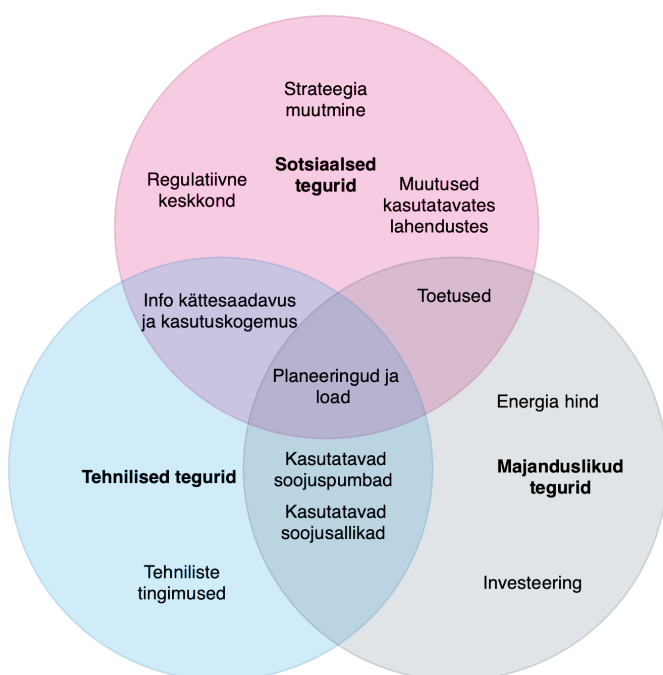
Soojuspumpades kasutatakse erinevaid külmaineid. Külmaine valimisel on olulised aine termodünaamilised omadused (sh suur aurustumissoojus, madal külmumistemperatuur, kõrge kriitiline temperatuur), füüsikalised omadused (sh hea soojusülekanne omadused, madal viskoossus, inertsus ja stabiilsus). Lisaks on oluline ainete tuleohutus, mittetoksilisus ning et aine ei moodustaks plahvatusohtliku segu õhuga. Samuti ei tohi külmaine põhjustada osoonikihi õhenemist ja kliima soojenemist. [26]

Kyoto protokolliga võttis Euroopa Liit kohustuse 2050. aastaks vähendada kasvuhoonegaaside (KHG) heitkoguseid 80-95% võrra 1990. aasta tasemest. Protokoll hõlmab ka kolme fluoritud kasvuhoonegaasi (F-gaas), väävelheksafluoriid (SF₆), perfluorosüsivesinikud (PFC). 1. jaanuaril 2015 jõustus Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus nr 517/2014 F-gaaside kohta ja määruse (EÜ) nr 842/2006 kehtetuks tunnistamise kohta. Määrusega kehtestati spetsiifilised nõuded F-gaaside olulistsükli erinevatele etappidele, alates tootmisest kasutuse lõpuni. Määrusega sätestati ka HFC-de kasutamise järk-järguline vähendamine – ajavahemikul 2015-2030 on turule lastavate HFC-de vähendamine 79%. Siiski võivad käitlejad kasutada olemasolevate külmutusainetega jahutus- ja kliimaseadmeid ning soojuspumpasid, kuid uute seadmete ostmisel on oluline arvestada muutunud seadusandlusega. [29]

Madala GWP-ga (*Climate warming potential*) külmutusagensid on näiteks ammoniaak ja süsinikdioksiid. Ammoniaak (R-717) on levinud külmaine, mida kasutatakse peamiselt tööstuslikes soojuspumpades ja kaubanduslikes konditsioneerides. Ammoniaak on kõrge toksilisusega, kuid madala GWP-ga. Süsinikdioksiid (R-744) pole toksiline ega tuleohtlik ning on madala GWP-ga, peamiseks probleemiks kasutamisel on kõrge kondenseerumisrõhk (61 atm 32 °C) ning kasutamisel madal soojuspumba soojustegur. [26]

1.2.2 Probleemkohad kaugküttevõrkudes soojuspumpade kasutuselevõtuks

Soojuspumpade kaugküttes kasutusele võtmisel on mitmeid takistavaid tegureid, mis jaotuvad kolme põhilisse kategooriasse: tehnilised, majanduslikud ja sotsiaalsed. (Joonis 1.5) [28] Kaugküttes kasutatavad kõrge soojuskandja temperatuuri saavutamise on praeguse tehnoloogia taseme juures veel raske. Soojuspumpade kasutusele võtmisel tuleb leida optimaalne soojusallikas ning tehnoloogia saavutamaks soovitud parameetreid. Kaugkütte ettevõtetel Eestis ei ole piisavat kogemust ja teadmust kasutusest ning mõjust. Tehnoloogia kasutusele võtmine nõuab investeringuid, mis võivad tõsta tarbijate jaoks kaugkütte hinda ning praeguse hinna kooskõlastamise metodika juures ei ole lahendused, mis tarbija jaoks kaugkütte kallimaks teevad soovitud. Tasuvuse seisukohalt on väga oluline faktor energia hind. Sotsiaalsed faktorid, mis mõjutavad oluliselt investeringuid on regulatiivne keskkond ja ettevõtete vajadus võtta kasutusele lahendused, mille kasutamisele puudub kogemus. [28] [21]



Joonis 1.5 Soojuspumpade kaugküttes kasutusele võtmist takistavad tegurid [28]

1.3 PÄIKESEENERGIA KAUGKÜTTES

Päikeseenergiat kasutavad jahutus- ja küttesüsteemid on järjest olulisemad kõrgete energiahindade keskkonnas, varustuskindluse seisukohalt ning rohelisemate tehnoloogiate prioritseerimisel. Päikeseenergiat on võimalik kütte- ja jahutussüsteemidesse integreerida kasutades PV-paneele või päikesekollektoreid. Päikeseenergiat kasutades on võimalik luua sünergia soojuse tootmisega. Kui soojuse tootmine elektrifitseerida st võtta kasutusele kas elektri boiler või soojuspump on päikeseelektri abil võimalik vähendada võrgust ostetava soojuse kogust. Kollektorit kasutades on võimalik suunata soe vesi otse võrku. [30]

Päikeseenergiat töötavate süsteemide efektiivseks kasutamiseks on olulised mitmed tegurid. Kõige olulisem on päikeseenergia saadavus. See on seadme geograafilisest asukohast ning ehituslikest tingimustest, s.o ehituslikud piirangud, päikesepaneeli paigutusnurg. Majanduslikku tasuvust mõjutavad oluliselt energiahinnad. Lisaks on oluline ka tarbija energiatarbimise ning päikeseenergia tootmise süsteemi tootlikkusprofiili ühtimine. [30]

1.3.1 Kollektorid

Päikesekollektorites muundatakse päikeseenergia soojuseks. Enamik kollektorites soojuseks muundatust energiast (ca 50%) tuleneb lainepikkusel 400-780 nm (s.o nähtav valgus), infrapuna spektris >780 nm tuleneb ligikaudu 40%, ning UV spektril (200-400 nm) ainult ligikaudu 10%. Tume pind suurendab neelduvust. Kollektori energiat absorbeeriv pind on ühenduses soojuskandjaga. [30] Kuigi kollektorid on soojuse tootmiseks perspektiivne lahendus, siis töös on keskendatud PV-paneelidele, kuna PV-paneelidest toodetud elektrienergia ülejääki on võimalik kaugküttevõrkude soojusenergia kasutuse vähenemisel omatarbeks tarbida või elektrivõrku müüa.

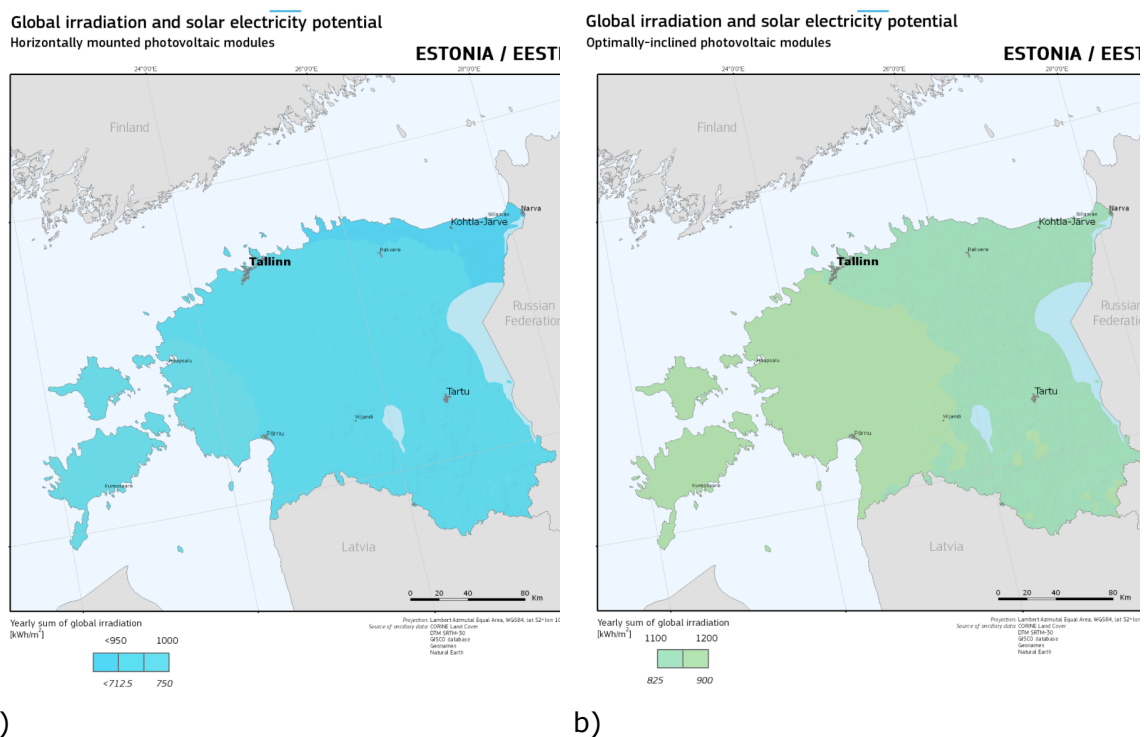
1.3.2 PV-paneelid

PV (*photovoltaic*)-paneelide korral muundatakse päikeseenergia elektrienergiaks. PV-paneelidest toodetud elektrienergiat on võimalik kasutada kaugküttes elektri boilerite ja soojuspumpade käitamiseks. Elektrienergia tootmise korral on võimalik kahepoolse ühenduse korral toodetud elektrienergia suunata võrku.

1.3.3 Päikeseenergia Eestis

Horizontaalsele pinnale langev aastane summaarne päiksekiirgus Eestis jääb vahemikku 825-950 kWh/m² ning optimaalse kaldega pinnale 1100-1200 kWh/m². (Joonis 1.6) Ligikaudu 80-90% päiksekiirgusest langeb Eestis maapinnale märtsist kuni septembrini.

[31] Hinnanguliselt PV süsteemi puhul 1kW päikesepaneeli võtab ligikaudu 5 m² pinda ning sellega suudetakse toota ligikaudu 1 MWh elektrienergiat.



Joonis 1.6 Päikesekiirgus pinnaühiku kohta Eestis - a) horisontaalpinnal [32] b) optimaalse kaldenurga korral [33]

1.4 Energia salvestamine kaugküttes

Salvestusvõimalusi kasutusele võttes on võimalik energiasüsteemide paindlikkust kasvatada. Elektrienergia salvestuse võimalused on nt akud ja pump-hüdroakumulatsioonijaamad, soojusenergia jaoks on võimalik kasutada soojussalvesteid.[8]

Tehnoloogiat kasutusele võttes on võimalik süsteemile kahepoolset mõju avaldada – tarbimist suurendada või vähendada. Võimalik on olenevalt lahendusest soojuse salvestamiseks ära kasutada madala elektri hinnaga perioode või muuta katla töö efektiivsemaks, läbi optimaalsel koormusel töötamise.[8] Soojussalvestite puhul on võimalik nihutada tiputarbimine tavatarbimise tasemele, mille abil on võimalik katlamajal töötada baas- või nominaalvõimsusel, mis suurendab energiaefektiivsust. [34]Akupaagi ühe kuupmeetri kohta on salvestusvõimsust 60-80 kWh/m³. [8]

Võttes arvesse taastuenergia suurenevat tootmist on salvestuslahendustel järjest olulisem roll paindlikkuse tagamisel. Hetkel on Eestis ligikaudu 1800 MW soojussalvesteid. Kuid plaanitakse salvestite mahu märkimisväärselt kasvu, 2035. aastaks soovitakse saavutada tase 2400 MW. [8]

Viimastel aastatel on loodud mitmeid kaugkütte salvestusprojekte Eesti ja lähiriikides. Näiteks Tartu elektrijaamas võeti kasutusele 2023. aastal soojussalvesti. Salvesti kõrgus on 45 m ja läbimõõt 17 m, salvestusmaht on 500 MWh/a. Investeeringu suurus oli 5,5 miljonit eurot. Gren Eesti hinnangul võimaldab salvesti kasutusele võtt vähendada gaaskütuse kasutamist ligi 9000 MWh/a. [35] 2020. aastal võeti Vaskiluotos kasutusele Soome senini suurim soojussalvesti suurusega 210 000 m³ salvestusvõimsusega 100 MW. [36] Soome Vantaa piirkonda plaanitakse alustada 2024 aasta suvel hooajalise salvesti (*seasonal thermal storage*) rajamist. Rajada plaanitakse 1 100 000 m³ salvesti, mille soojusvõimsus on 90 GWh. Projekti maksumus on eelduste kohaselt 200 miljonit eurot. [37]

2. METOODIKA

2.1 Töös analüüsitud piirkondade kirjeldused

Töös analüüsitavates piirkondades pakub kaugkütte teenust Nevel Eesti OÜ. Nevel Eesti OÜ kuulub ettevõttele Ardian Infrastructure, mis on Euroopa üks suurimaid taristuinvestoreid. Emaettevõtte on Nevel Oy jätkusuutlikkuse strateegias on seadnud eesmärgiks 2030. aastaks saavutada süsinikuneutraalse energia tootmise – eesmärki plaanitakse saavutada läbi katlamajade ja kaugküttevõrkude kaasajastamise, investeeringute taastuenergiasse ja energiakasutuse optimeerimise. [1] Mistõttu on ettevõttel huvi analüüsida arenguvõimalusi uuritavates piirkondades. Ettevõtte tegutseb Soomes, Rootsis ja Eestis ning hallatakse üle 40 kaugküttevõrgu. Eestis hallatakse Uuemõisa, Tootsi, Lavassaare, Mooste, Taebla, Palivere, Säreveere ja Väike-Kamari kaugküttevõrke. Töös keskendutakse Lavassaare, Uuemõisa ja Tootsi võrkude uurimisele. [38]

Kõikides analüüsitavates piirkondades on võrgu küttegaafik suveperioodil 60/50 °C ning talvel 65/50 °C ning eesmärk on tagastuvat temperatuuri 5°C võrra alandada. Suveperioodil kasutatakse piirkondades väikseimat tahkekütuse katelt. Tahkekütuse katelde käivitamine on aeglane ning toimub hetkel käsitsi, samuti puudub võimalus teha kiireid ümberlülitusi. Suvisel perioodil kasutatakse piirkondades väikseimat tahkekütuse katelt.

Suveperioodil, mil toodetakse tarbijatele vaid sooja tarbevett on katlad alakoormatud ning võivad töötada isegi koormusel 10-15%. Tootja poolne hinnang minimaalsele efektiivsele koormusele on 20–25%. Alla tootjapoolse soovitusliku minimaalse koormuse töötamisel on põlemine ebaefektiivne ning vaja on investeerida nõuete täitmiseks efektiivsemasse suitsugaaside puhastamise lahendusse kui hetkel kasutuses olevad multitsüklonid. Täiendavad investeeringud puhastusseadmetesse on kulukas investeering ning seetõttu on töös analüüsitud erinevaid lahendusi piirkondades soojuse tootmise efektiivsemaks muutmiseks.

Töö peamine eesmärk oli leida võimalused võrkude arendamiseks Uuemõisa, Tootsi ja Lavassaare piirkonnas. Keskendudes suvise tarbevee tootmise üleviimisele efektiivsematele lahendustele.

2.1.1 Lavassaare

Lavassaare on Alev Audru vallas, mis asub turbarabade keskel. Lavassaare alevile on 2016. aastal koostatud soojusmajanduse arengukava perioodiks 2016-2026. Lavassaare katlamaja asub aadressil Turbatööstuse, Lavassaare alev, Pärnu linn, Pärnu maakond, katastriüksusel 62401:001:0131. (Joonis 2.1) Keskkonnaloas L.ÕV.PM-138086 [39]toodud maksimaalne kütusekasutus aastas on 1700 t tükkturvast, 1700 t hakkpuitu ja 30 t põlevkiviõli. Tabelis 2.1 on toodud piirkonna katelseadmete info. Lavassaare kaugküttevõrk on küllaltki väike, võrgu pikkus on 1,8 km ning võrku on ühendatud 29 tarbijat. Võrku iseloomustab ühendatud hoonete suur soojuse eritarbimine 137 kW/m². Võrk töötab aastaringselt, kuna lisaks küttele väljastatakse ka sooja tarbevett. [40]



Joonis 2.1 Lavassaare katlamaja kinnistu (maa-amet) [27]

Tabel 2.1 Lavassaare kaugküttevõrgu katlad ja nende parameetrid [39] [40]

Parameeter	Katel 1	Katel 2	Katel 3
Prioriteet	Baaskoormus	Baaskoormus	Reservkatel
Katelseade	Danstoker/Jutsen	Danstoker/Jutsen	Unical Trioprex N840+põleti Baltur BT 120 DSG 3V
Tüüp	Tahkekütusekatel	Tahkekütusekatel	Õlikatel
Kütus	Tükkturvas	Tükkturvas	Põlevkiviõli
Nimisoojusvõimsus, MW	1,765	0,765	0,933
Kasutegur	85%	85%	90%
Püüdeseade	Multitsüklon	Multitsüklon	-

2.1.2 Tootsi

Tootsi alev asub Pärnumaal. Tootsi vallale on 2016 aastal koostatud soojusmajanduse arengukava perioodiks 2016-2026. 2017 aasta 21. oktoobris ühinesid Halinga vald, Tootsi vald, Vändra vald ja Vändra Alev ühtseks Põhja-Pärnumaa vallaks. [41]

Tootsi katlamaja asub endise Tootsi Turvas tööstusalal. Katlamaja ümbritsevad valdavalt tootmiskaad. Katlamaja asub aadressil Tööstuse tn 4, Metsaküla, Põhja-Pärnumaa vald. Katastrinumbril 27601:005:0040. (Joonis 2.2) Katlamaja keskkonnalaos nr on L.ÕV/324581 [42]. Keskkonnalaos alusel on aastane kütusekulu: 6250 t hakkpuitu, 5000 t tükkturvast ja 150 t põlevkiviõli. [41] Tabelis 2.2 on toodud katelde info. 2016. aasta soojusmajanduse arengukava alusel oli võrgukadu piirkonnas vahemikus 27-33%, mis ületab oluliselt Konkurentsi ameti poolt seatud piirväärtusi, kuid arengukava järgselt on piirkonnades torustikku oluliselt uuendatud. [41] 2017. aastal saadi Keskkonna Investeeringutekeskuse poolt toetust soojustorustiku renoveerimise I etapile ja 2021. aastal II etapile. [43]



Joonis 2.2 Tootsi katlamaja (maa-amet)[44]

Tabel 2.2 Tootsi kaugküttevõrgu katlad ja nende parameetrid

Parameeter	Katel 1	Katel 2	Katel 3
Prioriteet	Baaskoormus	Baaskoormus	Avarii-reservkatel
Katelseade	Orions O-3H4 3530	Orions O-3H1 1760	Högfors 31
Tüüp	Tahkekütusekatel	Tahkekütusekatel	Õlikatel
Kütus	Hakkpuit/tükkturvas	Hakkpuit/tükkturvas	Põlevkiviõli (kerge fraktsioon)
Kasutuselevõtmise aasta	2011	2011	1985
Nimisoojusvõimsus, MW	3,0	1,5	1,45
Kasutegur, %	80	82	90
Püüdeseade	Multitsüklon	Multitsüklon	-

Uuemõisa

Uuemõisa piirkonnale on tehtud soojusmajanduse arengukava 2015. aastal. Uuemõisa katlamaja asub aadressil Tehnika tn 20, Uuemõisa alevik, Haapsalu linn, Lääne maakond. Katastri number on 67401:009:0137. (Joonis 2.3) Keskkonnaloa nr L-ÕV/326023 [45] alusel on aastased kütusekogused 6500 t hakkpuitu, 5000 t tükkturvast ja 135 t põlevkiviõli. [46] Katelde info on toodud tabelites 2.3–2.4.



Joonis 2.3 Uuemõisa katlamaja (maa-amet)[44]

Tabel 2.3 Uuemõisa kaugküttevõrgu katlad ja nende parameetrid –1

Parameeter	Katel 1	Katel 2
Prioriteet	Baaskoormus	Baaskoormus
Katelseade	Kalvis K-720M1	Orions O-3H3
Tüüp	Tahkekütuse katel	Tahkekütusekatel
Kütus	Hakkpuit/Tükkturvas	Hakkpuit/Tükkturvas
Kasutuselevõtmise aasta	2013	1994
Nimisoojusvõimsus, MW	0,72	2,5
Kasutegur, %	85	85
Püüdesead	Multitsüklon	Multitsüklon

Tabel 2.4 Uuemõisa kaugküttevõrgu katlad ja nende parameetrid–2

Parameeter	Katel 1	Katel 2	Katel 3
Prioriteet	Reservkatel	Reservkatel	Reservkatel
Katelseade	TP-15	TP-15	VK-1,0
Tüüp	Õlikatel	Õlikatel	Õlikatel
Kütus	Põlevkiviõli	Põlevkiviõli	Põlevkiviõli
Kasutuselevõtmise aasta	1994	1994	1992
Nimisoojusvõimsus, MW	1	1	1
Kasutegur, %	90	90	90
Püüdesead	-	-	-

2.2 Stsenaariumite kirjeldused

Töös koostati soojustehniline ja majanduslik analüüs võrkude arendamiseks. Ülevaade stsenaariumis analüüsitud tehnoloogiatest on toodud tabelis 2.5.

Tabel 2.5 Stsenaariumite ülevaade

	S0	S1	S2
Stsenaariumi nimi	Referentsstsenaarium	Päikeseenergial ja soojuspumbal põhinev kütelahendus	Katelde rekonstrueerimine
Soojuspumbad		X	
PV-paneelid		X	
Salvestus		X	
Üleminek biokütustele või elektrile			X

2.2.1 Referentsstsenarium

Stsenaariumi puhul eeldati senise tegevuse jätkumist. Stsenaariumis analüüsitakse piirkondade hetkeolukorda ning võimalikke kitsaskohti tegevuse jätkamisel. Optimaalne võimsus on arvutatud püsikulude ja muutuvkulude alusel.

2.2.2 Päikeseenergia ja soojuspumbal põhinev küttelehendus

Stsenaarium keskendub võrkudes suvise koormuse katmiseks soojustootmise elektrifitseerimisele. Analüüsitakse soojuspumpade, elektri boilerite kasutusele võtmist. Samuti on koostatud analüüs piirkonnas päikeseelektri tootmiseks ning üheaegsuse soojustarbimisega ning päikesetoodangu vahel. Stsenaariumi analüüs on koostatud kasutades Microsoft Excel tarkvara.

Stsenaariumi koostamiseks viidi läbi järgnevad etapid:

Vastavalt piirkonnas olevale vabale ruumile maksimaalse päikesepargi suuruse leidmine. Arvutustes kasutatud väärtused on toodud Tabelis 2.7. Päikeseenergia kasutamiseks on võimalik kasutada kahte erinevat lahendust – kollektorid ja PV-paneelid. 1 kW päikesepargi kohta on vajalik vaba ruum ligikaudu 4,7 m². Päikeseparkide jaoks kasutatava vaba ruumi hindamiseks kasutati Nevel Eesti OÜ poolt edastatud infot, mis on toodud allolevas tabelis. (Tabel 2.6) Piirkondliku päikese kiirguse hindamiseks kasutati Euroopa Komisjoni PV GIS andmebaasi. [47]

Tabel 2.6 Ruum päikeseenergia lahenduse rajamiseks [48]

Vaba pindala	Uuemõisa	Tootsi	Lavassaare
Katusel, m ²	900	250	450
Katlamaja ümbruses, m ²	–	1500	1200
Muu, m ²	–	5000	–
Kokku vaba ruum, m ²	900	6750	1650
Maksimaalne võimsus, kW	191	1436	351

Tabel 2.7 PV pargi suuruse leidmiseks kasutatavad väärtused

Parameeter	Lamekatus	Viilkatus	Maa
Võimsus pindalaühiku kohta, kW/m ²	0,10	0,20	0,19
Investeering võimsusühiku kohta, €/kW	702	658	596
Tootlikus võimsusühiku kohta, kWh/kW	938	917	920

1. Sooja tarbevee tarbimise profiili ja rajatava PV-pargist toodetud elektrienergia kasutuse profiil. Piirkonna sooja tarbevee hindamiseks võeti suvekuude keskmine tarbimine. Täiendavalt koostati tarbimise jaotus eri tundide vahel.

Soojuspumba puhul kasutati soojustegurit COP 4. Soojuspumba kasuteguriks võeti 88%.

2. Kui eelnevates etappides leiti, et PV- ja soojuspumba lahendusega on võimalik ära katta kogu sooja tarbevee tarbimine, siis analüüsitakse soojussalvestuse lisamist, et tagada ka tarbimistippude katmine.

$$V = \left(\frac{\left(\frac{(Q_{\text{toodang}} - Q_{\text{tarbimine}})}{t} \right)}{\frac{(c_p * \Delta T)}{\rho}} \right) * 3600 * t \quad 2.1$$

Kus, V – akumaagi maht, m^3

Q_{toodang} – soojuse toodang, kWh

$Q_{\text{tarbimine}}$ – soojuse tarbimine, kWh

t – tundide arv, mil PV-pargi ja soojuspumba lahendus ültab tunnipõhist soojuse tarbimist, h

c_p – soojusmahtuvus, J/kg*K

ΔT – temperatuurierinevus, K

ρ – tihedus, kg/ m^3

2.2.3 Katelde rekonstrueerimine

Kolmas stsenaarium võtab aluseks Nevel Eesti OÜ emaettevõtte seatud eesmärgi saavutamaks 2030. aastaks saavutada süsinikuneutraalne energia tootmine. Stsenaariumi korral on fossiilsetel kütustel põhinevate lahenduste amortisatsiooniperioodiks võetud kuus aastat tavapärase 20 aasta asemel. Hakkpuidu ja pelleti korral on amortisatsiooniperioodiks eeldatud 20 aastat, soojuspumba korral 15 aastat ning elektriboileri korral seitse aastat. Stsenaarium annab ülevaate mõjust kaugküttehinnale erinevate lahenduste rakendamise korral. Arvutustes on tehtud lihtsustus ning ei ole arvesse võetud soojusehinna arvutamisel kaugküttevõrgu hinnakomponenti. Arvesse on võetud kütteseadmete investeeringu kulu võimsusühiku kohta, kütuse hinnad ning käidukulu.

2.3 Arvutuste eeldused

Optimaalne võimsus on arvutatud püsikulude ja muutuvkulude alusel kasutades MS Excel *Solver* funktsiooni. Koormusgraafiku kliimaandmete alusena kasutati keskmist kliima-aastat Eestis, mis baseerub 2004-2011 aasta Eestis mõõdetud kliimaandmetel.[21] Töös on kasutatud suvise tarbevee koormuse katmise lahenduse

analüüsis soojustegurit 4,0. Temperatuurist sõltuva soojusteguri väärtusena on kasutatud soojuspumba katselistel väärtustel põhinevaid andmeid soojustegurile. [49] Soojuse tarbimise normaliseerimiseks kasutatakse kraadipäevade meetodikat, mis võimaldab elimineerida erinevate aastate välisõhu temperatuuride kõikumise mõju (Võrrand 2.2). Normaliseerimine on teostatud Pärnu (V) kliimapiirkonna Kasutatud on 1975-2023. aasta keskmist väärtust tasakaalutemperatuuril 17 °C, milleks on 2022/2023 kütteperioodil 3480 päeva. [50]

$$Q_N = \frac{(Q_{teg} - C) * S_N}{S_{teg}} + C \quad 2.2$$

Kus, Q_{teg} tegeliku aasta soojustarbimine, MWh/a

C- kraadpäevadest sõltumatus soojustarbimine, MWh/a

S_n – normaalaasta kraadpäevade arv tasakaalutemperatuuril

Majanduslike arvutuste eelduseks on võetud allolevates tabelites toodud eriinvesteeringute maksumused (Tabel 2.8) ja kütuse hinnad (Tabel 2.9). Käidukulude (OPEX) hindamisel on võetud eelduseks 10 €/MW. Paaksoojussalvesti puhul on investeeringuks mahuühiku kohta arvestatud 1000 €/m³. Elektrifiltri investeering võimsusühiku kohta on hinnatud 100 000 €/MW. [18] Uuele katlale paigalduse korral on võetud eelduseks, et investeering väheneb ligikaudu 20%. Kaugkütte hinna arvutamisel on kasutatud Excel PMT finantsfunktsiooni.

Tabel 2.8 Analüüsis kasutatud eriinvesteeringute väärtused [18]

Tüüp	Investeering võimsusühiku kohta, €/MW
Hakkpuuit	1 000 000
Pellet	350 000
LPG	160 000
Põlevkiviõli	160 000
Maagaas	200 000
Soojuspump	700 000 [51]
Elektriotseküte	60 000

Tabel 2.9 Kütuse hinnad [18]

Kütus	Hakkpuuit	Pellet	LPG	Põlevkiviõli	Maagaas	Elekter
Hind, €/MWh	25	57	63	65	73	114

Kliimamõju hindamisel on kasutatud Keskkonnainvesteeringute Keskuse meetmes „Kaugkütte katlamajade ja soojustorustike uuendamine“ toodud KHG ja energiasäästu arvutusmudelit. [52]

2.3.1 Elekter

Nevel Eesti OÜ-l on sõlmitud fikseeritud hinnaga elektrileping perioodiks 1.11.2023-31.03.2024. Elektri hind kõikides analüüsitavates piirkondades on hetkepaketti järgi 97,61 €/MWh. Lavassaare ja Tootsi piirkonnas on võrguteenuse pakkuja Elektrilevi OÜ ning Uuemõisa piirkonnas Imatra elekter. Ülevaade võrgupakettide kohta on toodud allolevas tabelis (Tabel 2.10).

Stsenaariumite koostamisel on elektribörsihinda Elering Live [53] keskkonna andmelaost perioodil 2022 november kuni 2023 oktoober ning elektrihinna võrgukomponendi hindamiseks on kasutatud Elektrilevi [54] VMA2 paketti elektri edastamistasu ning kuutasu komponendid. Täiendavalt on hinnale lisatud ka 6 €/MWh [55] rohesertifikaadi tasu.

Tabel 2.10 Võrgupakettide info [48]

Parameeter	Lavassaare	Tootsi	Uuemõisa
Võrguteenuse pakett	VMA2	VMA2	-
Võrguühenduse läbilaskevõime, A	3x200	3x400	3x125
Nimitoitepinge liitumispunktis, kV	0,4	0,4	0,4
Teenusepakkuja	Elektrilevi	Elektrilevi OÜ	Imatra Elekter

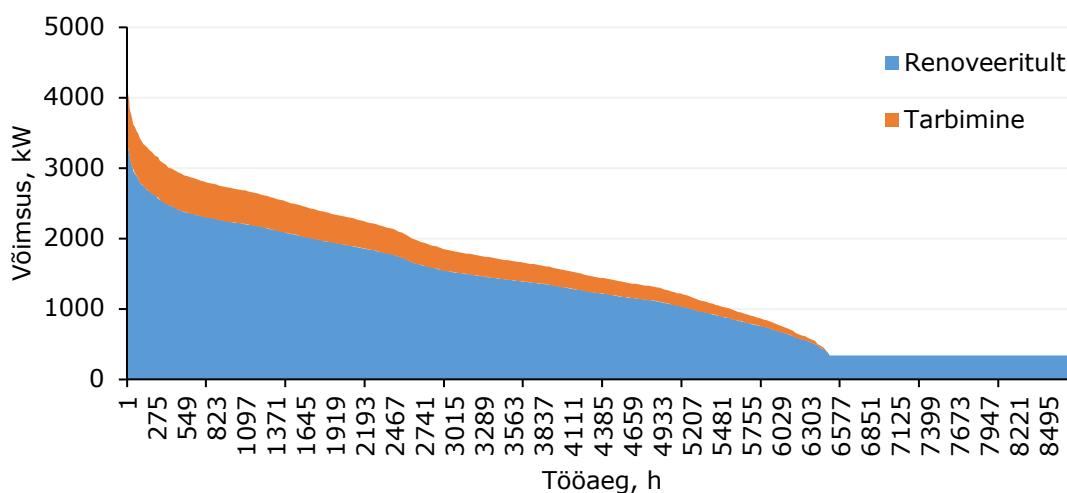
3. PRAKTILINE OSA

3.1 Tootsi

3.1.1 Referentsstsenarium

Võrgupiirkonna 2022/2023 soojuse toodang oli 9763 MWh. Katlamaja kasutegur ehk soojuse toodangu ja kasutatud primaarenergia suhe oli 86,2%. Soojuse toodang on vähenenud 1438 MWh (-12,8%) võrreldes 2012-2015 aasta keskmise soojusmajanduse arengukavas esitatud toodanguga. Soojust toodetakse hakkpuidu ja põlevkiviõliga. 2022/2023 aasta kütteperioodil oli põlevkiviõlist tulenev CO_{2e} kogus põlevkiviõli kasutusest 73,5 t/a ning hakkpuidu kasutusest 369,4 t/a.

Joonis 3.1 toob välja Tootsi kaugküttevõrgu koormusgraafiku. Piirkonnas on 2021. aastal väljastatud G klassi energiamärgis Kooli 14 ning F klassi energiamärgis 2022. aastal Ehitajate tee 2 hoonele, mis viitab huvile hooneid renoveerida. Võrgupiirkonnas on energiamärgiseta korterelamute pindala 19 234 m² ning nende hoonete terviklikul renoveerimisel väheneks tarbimine 100 kWh/m² [24] kohta, mis vähendaks võrgupiirkonnas tarbimist ligi 1923 MWh/a. Joonisel on renoveerimise korral tarbimine kujutatud sinise värviga. Joonisel on renoveeritud hoonete tarbimine kujutatud sinise värviga ning renoveerimise mõju on kujutatud oranži värviga.



Joonis 3.1 Tootsi kaugküttevõrgu koormusgraafik

Arvutuslik baaskoormuskatla võimsus sisendvõimsuse järgi on 2797 kW ning tipukoormuskatel sisendvõimsuse järgi 4470 kW. Renoveeritud kortermajade tarbimisega on baaskoormuskatla arvutuslik sisendvõimsus 2263 kW ning tipukoormuskatla sisendvõimsus 3641 kW. Hetkel on tahkekütusekatelde koguvõimsus

4,5 MW ning õlikatla võimsus 1,45 MW. Katlad on hetke soojuse nõudluse tagamiseks piisavad, kuid renoveerimise korral jääb katelde võimsust oluliselt üle.

Tulenevalt karmistuvatest direktiividest tuleb tahkekütuste katelde puhul kasutada efektiivsemaid puhastusseadmeid praegu kasutatavate multitsüklonite asemel. Tabel 3.1 esitab elektrifiltri investeeringu mõju olemasolevatele kateltele ning juhul kui rajatakse stsenaariumi järgi optimeeritud uued tahkekütuse katlad. Uute katelde korral on filtersüsteemi rajamisest mõju kaugkütte hinnale väiksem, kuna arvutuslikult sobivad võrku ka senisest madalama võimsusega katlad ning uue lahenduse juurde lisaseadme projekteerimisel on eelduslikult seadmete lisamine odavam.

Tabel 3.1 Elektrifiltri investeeringu mõju kaugkütte hinnale

Parameeter	Väärtus
Seadme kasutusaeg - olemasolev seade, a	10
Seadme kasutusaeg - uus seade, a	20
Püüdeseadmete maksumus, €/kW	100
Puudeseadmete maksumus uutele kateltele, €/kW	80
Olemasolevate katelseadmete võimsus, MW	4,5
Uute katelde võimsus, MW	2,80
Olemasolevate katelde korral investeering, €	450 000
Uute katelde korral investeering, €	223 773
Mõju kaugkütte hinnale - olemasolev, €/MWh	5,8
Mõju kaugkütte hinnale - uued katlad, €/MWh	1,95

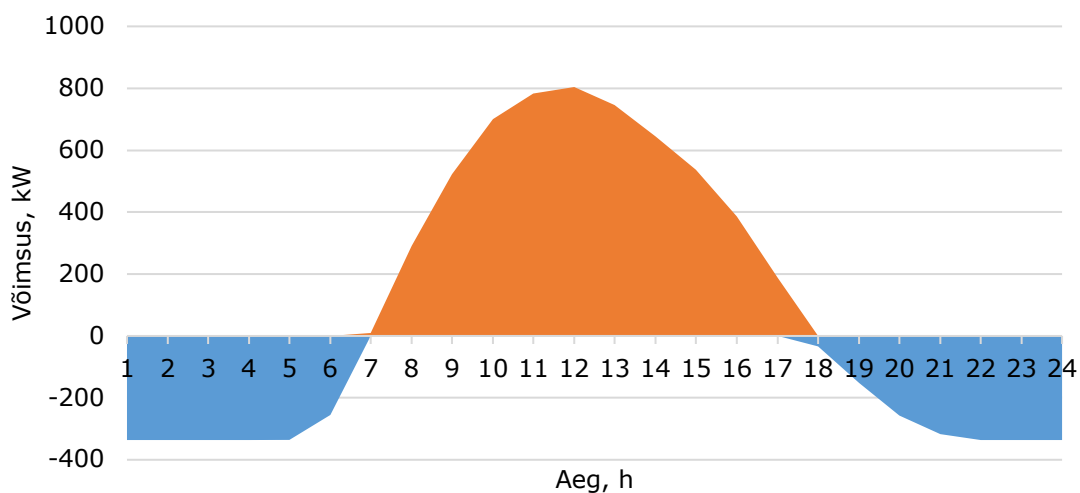
3.1.2 Päikeseenergia ja soojuspumbal põhinev küttelehendus

Tootsi katlamaja kinnistul ja selle lähiümbruses on oluliselt vaba ruumi, mis sobib PV-pargi rajamiseks. Maa-ameti kitsenduste kaardirakenduse alusel on kinnistul vaid sideehitise ja erinevate elektripaigaldiste kaitsevööndid. Tabel 3.2 toob välja päikesepargi rajamise maksimaalse võimekuse.

Tabel 3.2 Päikeseenergia rajamise võimekus

Tüüp	Pindala, m ²	Võimsus, kW	Investeeringu maksumus, €	Toodang, kWh
Kinnistu	1500	288	171 923	265 385
Katus	250	25	17 269	23 077
Kinnistu	5000	962	573 077	884 615
Kokku	6750	1274	762 269	1 173 076

Joonis 3.2 toob välja erinevuse PV-pargi ja soojuspumba lahenduse toodangu ning sooja tarbevee tarbimise vahel. Joonisel on sinise värviga kujutatud võimsus, mida tuleb salvestada ning oranži värviga toodang, mis ületab soojuse tarbimist.



Joonis 3.2 Sooja tarbevee tarbimise ning soojuspumba toodangu soojusbilanss

Tabel 3.3 toob välja stsenaariumi tulemused. Üleminek PV-pargi ning soojuspumba hübriidlahendusele on tarbija jaoks tänastel eeldustel liiga kulukas. Lahenduse märkimisväärselt kõrge hind tuleneb hetkel, kuna lahenduse kasutus on arvestatud suveperioodile. Juhul kui lahendust kasutatakse rohkem langeks ka hind. Hetkel on soojuspumba hindamisel kasutatud ühikväärtuseid esialgse hinnangu andmiseks lahendusele. Täiendavaks hindamiseks on oluline saada pakkumused objektispetsiifilisteks lahenduste rajamiseks.

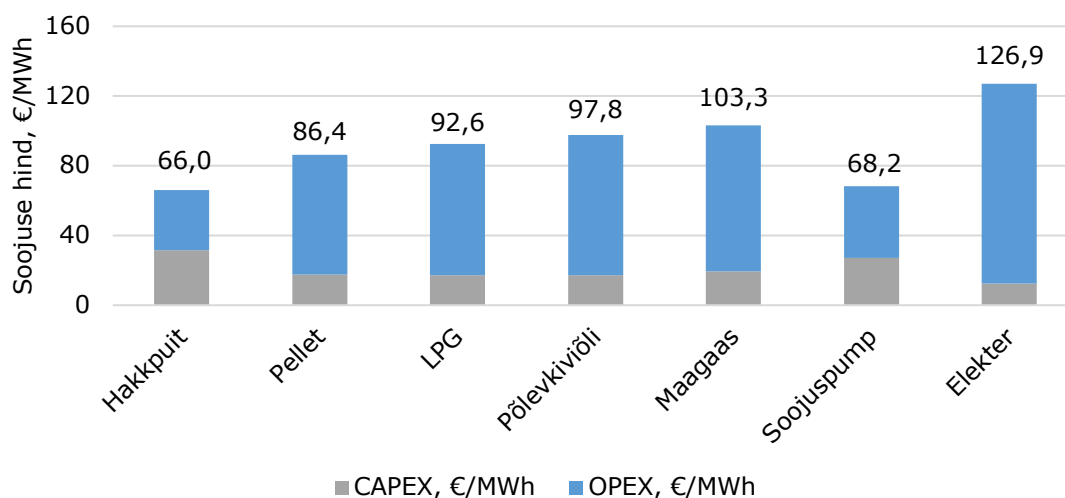
Tabel 3.3 Stsenaariumi tulemused

Parameeter	Väärtus
Sooja tarbevee päevane tarbimine, kWh	2526
Maksimaalne PV-pargi võimsus, kW	275
PV-pargi optimaalne suurus, kW	211
Soojuspumba võimsus, kW	416
Salvesti suurus, m ³	94
Investeering PV-park, €	125 616
Investeering soojuspump, €	291 512
Investeering salvestus,€	93 928
Investeering kokku, €	511 056
Soojuse hind (CAPEX + OPEX), €/MWh	227

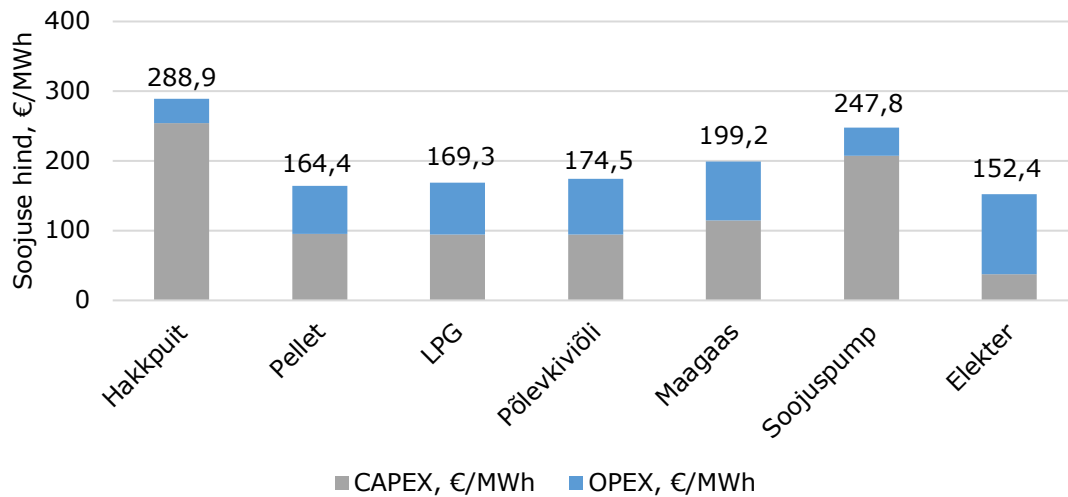
3.1.3 Katelde rekonstrueerimine

Stsenaariumi arvutused on koostatud baaskoormuskatla sisendvõimsusega 2894 kW ja tipukoormuskatla võimsusega 4470 kW. Joonisel 3.3 on toodud baaskoormuse kaugkütte hind erinevaid kütuseid kasutades ning joonisel 3.4 tipukoormuse soojuse hind. Tabel 3.4 annab ülevaate eri lahenduste rakendamise korral baas- ja tipukoormuseks. Stsenaariumi tingimuste rakendamisel suureneb märkimisväärselt fossiilkütuseid kasutatavate lahenduste hind. Tüüpiliselt tipukoormuseks kasutatavad maagaasi või põlevkiviõli kasutuse korral oleks soojuse hind sarnases suurusjärgus pelleti kasutusele. See tähendab, et hetkel lõpliku tasuvuse hindamiseks tuleks võtta konkureerivad pakkumused ning otsustavaks saaks ka kui soodsatel tingimustel ning kui pikaajalised lepingud erinevate kütustele on võimalik sõlmida.

Baaskoormuse katmiseks on stsenaariumi hinnaeelduseid kasutades jätkuvalt odavam lahendus hakkpuit. Kuid konkureerivaks lahenduseks on ka soojuspumba kasutamine. Soojuspumba ja elektrikatla puhul on suurimaks probleemiks varasema lahenduse kasutamiskogemuse puudumine võrkudes ning elektri hinna volatiilsus. Konkureeriv on lahendus stsenaariumis kasutatud 2022/2023 perioodi elektri börsihinda kasutades.



Joonis 3.3 Baaskoormuse soojuse hind



Joonis 3.4 Tipukoormuse soojuse hind

Tabel 3.4 Kaugküttevõrgu koguhinna tabel horisontaalselt tipukoormuse lahendus ja vertikaalselt baaskoormuseks kasutatav lahendus

Koguhind, €/MWh	Hakkpuit	Pellet	LPG	Põlevkiviõli	Maagaas	Soojus-pump	Elekter
Hakkpuit	94	78	79	80	83	89	77
Pellet	112	96	97	98	101	107	95
LPG	117	102	102	103	106	112	100
Põlevkiviõli	122	106	107	108	111	117	105
Maagaas	127	111	112	112	115	122	110
Soojus-pump	96	80	81	82	85	91	79
Elekter	147	132	132	133	136	142	130

3.1.4 Tulemused

Kuivõrd nii riiklikud kui ka ettevõtte seatud eesmärgid nõuavad võrgus muutusi tõuseb võrgus tehtavate investeeringute tõttu tarbijate jaoks hind. Olemasolevatele tahkekütusekateldele elektrifiltri lisamisel suureneb kaugkütte hind ligikaudu 5,8 €/MWh olenedes tahkekütuse katelde käitamise perioodist. Katelde vahetamisel tuleks arvestada nii hetke kui ka prognoositavat soojuse tarbimist. Samuti gaasi-või õlikatelde korral on ettevõtte seatud eesmärgid arvesse võttes amortisatsiooniperiood tavapärasest madalam, mistõttu tarbija jaoks teeb see kütuse hinna kõrgemaks. Sooja tarbevee jaoks loodud PV-pargi ja soojuspumba lahenduse korral on soojuse hind äärmiselt kõrge.

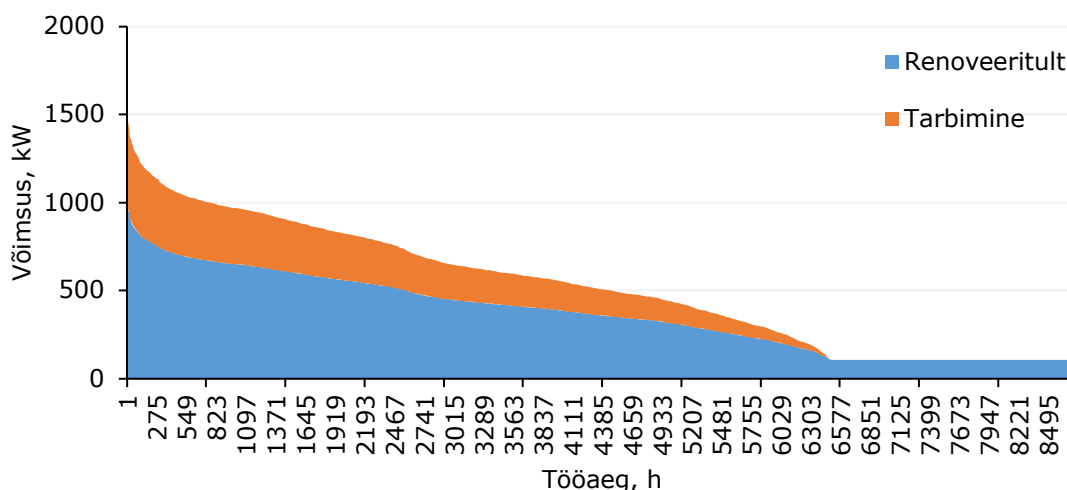
3.2 Lavassaare

3.2.1 Referentsstsenaarium

Võrgupiirkonna 2022/2023 aasta kütteperioodi soojustoodang oli 3551 MWh. Võrreldes soojusmajanduse arengukavas toodud 2013-2015 aastate keskmise tarbimisega on tarbimine vähenenud 296 MWh võrra (7,7%). Arengukavas oli toodud tarbimisele kaks prognoosi aastaks 2026 on tarbimine 3600 MWh kui olulisemaid meetmeid renoveerimiseks ei rakendata ning 2800 MWh energiasäästu meetmete rakendamisel. Praeguseks hetkeks on realiseerunud esimene stsenaarium, mis viitab hoonete jätkuvalt kehvale energiatõhususe seisukorrale. Soojust toodetakse tükkturba ja põlevkiviõliga. 2022/2023 aasta kütteperioodil põlevkiviõli ei kasutatud ning kogu CO_{2e} heide 1525 t/a tulenes turba kasutusest. Katlamaja efektiivsus oli perioodil 83%, mis jääb alla tänapäevaste tahkekütusekatelde kasutegurile 85%.

Joonis 3.5 kujutab kaugküttevõrgu koormusgraafikut. Piirkonnas on kolmele korterelamule väljastatud energiamärgis: Pärna tn 12 D klassi energiamärgis 2009. aastal, Võidu tn 2 F klassi energiamärgis 2021. aastal ja Pärna tn 6 F klassi energiamärgis 2023 aastal. Võrgupiirkonnas on energiamärgiseta korterelamute pindala 12 814,5 m² ning nende hoonete terviklikul renoveerimisel väheneks tarbimine 100 kWh/m² [24] kohta, mis vähendaks võrgupiirkonna tarbimist ligi 1281 MWh/a. Joonisel on renoveerimise korral tarbimine kujutatud sinise värviga. Joonisel on renoveeritud hoonete tarbimine kujutatud sinise värviga ning renoveerimise mõju on kujutatud oranži värviga.

Arvutuslik baaskoormuskatla võimsus on sisendvõimsuse järgi 992 kW ning tipukoormuskatel 1612 kW. Renoveeritud kortermajade tarbimisega on baaskoormuskatla arvutuslik võimsus 681 kW ja tipukoormuskatla nõutud võimsus 1060 kW. Hetkel on tahkekütusekatelde koguvõimsus 2525 kW ning õlikatla võimsus 933 kW. Olemasolevad katlad on hetkel võrgupiirkonda arvestades liiga võimsad.



Joonis 3.5 Lavassaare kaugküttepiirkonna koormusgraafik

Piirkondlike heitmete vähendamise esmase meetmena on võimalik võrgus üle minna hakkpuidu kasutusele. Tulenevalt karmistuvatest direktiividest tuleb tahkekütuste katelde puhul kasutada efektiivsemaid puhastusseadmeid praegu kasutatavate multitsüklonite asemel. Tabel 3.5 esitab elektrifiltri investeeringu mõju olemasolevatele kateldele ning juhul kui rajatakse stsenaariumi järgi optimeeritud uued tahkekütuse katlad.

Tabel 3.5 Elektrifiltri investeeringu mõju kaugkütte hinnale

Parameeter	Väärtus
Seadme kasutusaeg - olemasolev seade, a	10
Seadme kasutusaeg - uus seade, a	20
Püüdeseadmete maksumus, €/kW	100
Puudeseadmete maksumus uutele kateldele, €/kW	80
Olemasolevate katelseadmete võimsus, MW	2,53
Uute katelde võimsus, MW	0,99
Olemasolevate katelde korral investeering, €	253 000
Uute katelde korral investeering, €	79 382
Mõju kaugkütte hinnale - olemasolev, €/MWh	9,2
Mõju kaugkütte hinnale - uued katlad, €/MWh	1,96

3.2.2 Päikeseenergia ja soojuspumbal põhinev kütelahendus

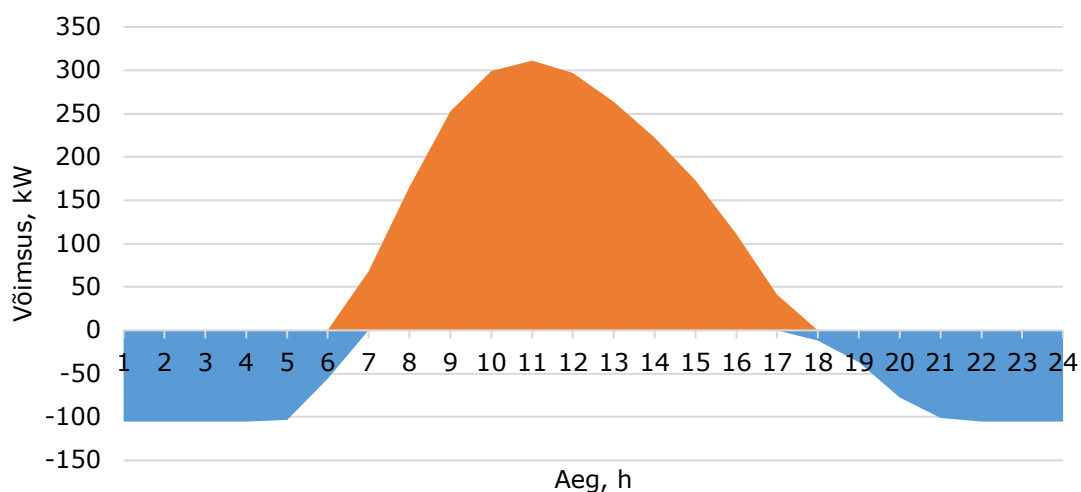
Lavassaare on oluline turbatööstuse keskus ning paikneb turbaalade keskel. Tulenevalt paiknemisest tööstusalal on katlamaja vahetus läheduses oluliselt ruumi erinevate lahenduste rajamiseks. Maa-ameti kitsenduste kaardi järgi on katlamaja vahetus

läheduses vaid erinevate elektripaigaldiste piiranguvööndid. Tabel 3.6 toob välja vastavalt vabale pindalale päikeseenergia tootmise võimekuse piirkonnas.

Tabel 3.6 Päikeseenergia rajamise võimekus

Tüüp	Pindala, m ²	Võimsus, kW	Investeeringu maksumus, €	Toodang, kWh
Kinnistu	1200	231	137 538	212 308
Katus	450	44	31 085	41 538
Kokku	1650	275	168 623	253 846

Joonis 3.6 toob välja erinevuse PV-pargi ja soojuspumba hübriidlahendusel toodetud soojuse ning sooja tarbevee tarbimise vahel. Joonisel on sinise värviga kujutatud võimsus, mida tuleb salvestada ning oranži värviga toodang, mis ületab soojuse tarbimist.



Joonis 3.6 Sooja tarbevee tarbimise ning soojuspumba toodangu soojusbilanss

Tabel 3.7 toob välja stsenaariumi tulemused. Üleminek PV-pargi ning soojuspumba hübriidlahendusele on tarbija jaoks tänastel eeldustel liiga kulukas.

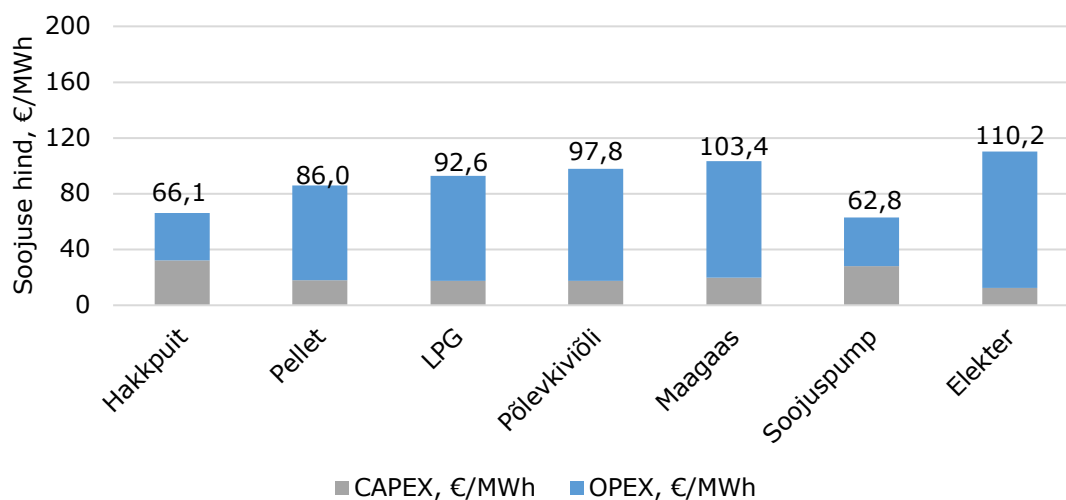
Tabel 3.7 Stsenaariumi tulemused

Parameeter	Väärtus
Sooja tarbevee päevane tarbimine, kWh	2526
Maksimaalne PV-pargi võimsus, kW	275
PV-pargi optimaalne suurus, kW	211
Soojuspumba võimsus, kW	416
Salvesti suurus, m ³	94
Investeering PV-park, €	125 616

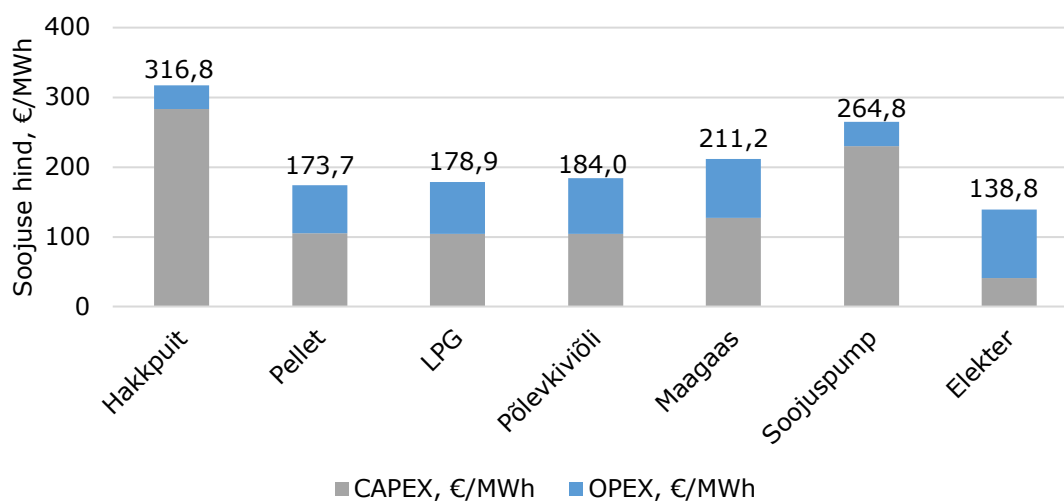
Investeering soojuspump, €	291 512
Investeering salvestus,€	93 928
Investeering kokku, €	511 056
Soojuse hind (CAPEX + OPEX), €/MWh	227

3.2.3 Katelde rekonstrueerimine

Stsenaariumi arvutused on koostatud baaskoormuskatla sisendvõimsusega 1074 kW ja tipukoormuskatla võimsusega 1612 kW. Joonisel 3.7 on toodud baaskoormuse kaugkütte hind erinevaid kütuseid kasutades ning joonisel 3.8 tipukoormuse soojuse hind. Tabel 3.8 toob välja võrgu koguhinna vastavalt erineva lahenduse kasutuselevõtmisele.



Joonis 3.7 Baaskoormuse soojuse hind



Joonis 3.8 Tipukoormuse soojuse hind

Tabel 3.8 Kaugküttevõrgu koguhinna tabel horisontaalselt tipukoormuse lahendus ja vertikaalselt baaskoormuse lahendus

Koguhind, €/MWh	Hakkpuit	Pellet	LPG	Põlevkivi-õli	Maagaas	Soojus-pump	Elekter
Hakkpuit	95	79	79	80	83	89	75
Pellet	113	96	97	97	101	107	92
LPG	119	102	103	103	106	113	98
Põlevkiviõli	123	107	107	108	111	117	103
Maagaas	128	112	112	113	116	122	108
Soojus-pump	92	76	76	77	80	86	72
Elekter	134	118	118	119	122	128	113

3.2.4 Tulemused

Kuivõrd nii riiklikud kui ka ettevõtte seatud eesmärgid nõuavad võrgus muutusi tõuseb võrgus tehtavate investeeringute tõttu tarbijate jaoks hind. Olemasolevatele tahkekütusekateldele elektrifiltri lisamisel suureneb kaugkütte hind ligikaudu 9,2 €/MWh olenedes tahkekütuse katelde käitamise perioodist. Esmase meetmena tasuks võrgus keskkonnaheitmete vähendamiseks minna üle turba kasutamisel hakkpuidu kasutamisele. Katelde vahetamisel tuleks arvestada nii hetke kui ka prognoositavat soojuse tarbimist. Piirkonnas on vaba ruumi erinevate lahenduste rajamiseks, kuid sooja tarbevee jaoks loodud PV-pargi ja soojuspumba lahenduse korral on soojuse hind äärmiselt kõrge ning seetõttu tuleks keskenduda teistsuguste lahenduste rakendamisele eesmärkide saavutamiseks.

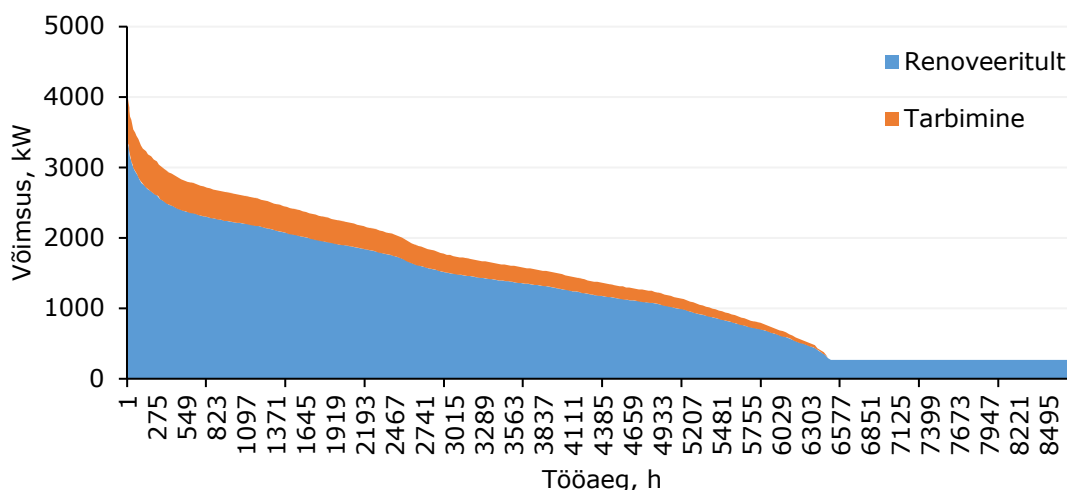
3.3 Uuemõisa

3.3.1 Referentsstsenaarium

Võrgupiirkonna 2022/2023 aasta kütteperioodi soojuse toodang oli 9674 MWh. Toodang on suurenenud 406 MWh (4,4%) võrreldes 2012. aasta soojusmajanduse arengukavas esitatud toodanguga. Soojust toodetakse hakkpuidu ja põlevkiviõliga. 2022/2023 kütteperioodil oli põlevkiviõli kasutus mõnevõrra suurem tavapärasest, kuna juulist septembrini rekonstrueeriti tahkekütuse ladu.

Joonis 3.9 toob välja Uuemõisa kaugküttevõrgu koormusgraafiku. Piirkonnas on mitmetele hoonetele väljastatud energiamärgised, mis viitab huvi hoonete renoveerimisele. C klassi energiamärgis on 2009 aastal väljastatud Kaare tänav 12 hoonele, 2019. aastal Haudejaama tee 26/1 ja 26/2 ning Kaare tänav 17/1 ja 17/2 hoonetele ning 2023. aastal Ehitajate tee 7 hoonele. Võrgupiirkonnas on energiamärgiseta korterelamute pindala 16 115 m² ning nende hoonete terviklikul renoveerimisel väheneks tarbimine 100 kWh/m² [24] kohta, mis vähendaks võrgupiirkonna tarbimist ligi 1612 MWh/a. Joonisel on renoveeritud hoonete tarbimine kujutatud sinise värviga ning renoveerimise mõju on kujutatud oranži värviga. Kaugküttepiirkond asub piirkondliku tõmbekeskuse läheduses, mistõttu on tõenäoline, et tarbijad on rohkem huvitatud hoonete renoveerimisest ning kaugküttevõrguga liitumisest.

Arvutuslik baaskoormuskatla võimsus sisendvõimsuse järgi on 2678 kW ning tipukoormuskatel sisendvõimsuse järgi 4025 kW. Renoveeritud kortermajade tarbimisega on baaskoormuskatla arvutuslik võimsus 2280 kW ja tipukoormuskatla nõutud võimsus 3680 kW. Hetkel on tahkekütusekatelde koguvõimsus 2525 kW ning õlikatla võimsus 933 kW. Uute tarbijatel liitumine on raskendatud, sest liitumise korral on vaja suurendada tootmisvõimsust. 2022/2023 aasta kütteperioodil oli CO_{2e} heide põlevkiviõli kasutusest 327,8 t/a ja hakkpuidu kasutusest 161,3 t/a.



Joonis 3.9 Uuemõisa kaugküttevõrgu koormusgraafik

Kuigi piirkonnas võib renoveerimise tulemusel soojuse tarbimine väheneda, on tõenäoline, et piirkondliku tömbekeskuse läheduse tõttu liituvad uued tarbijad ning võrgus tuleb toomisvõimsust suurendada.

Tulenevalt karmistuvatest direktiividest tuleb tahkekütuste katelde puhul kasutada tõhusamaid puhastusseadmeid praegu kasutatavate multitsüklonite asemel. Tabel 3.9 esitab elektrifiltri investeeringu mõju olemasolevatele kateldele ning juhul kui rajatakse stsenaariumi järgi uued optimeeritud võimsusega tahkekütuse katlad.

Tabel 3.9 Elektrifiltri investeeringu mõju kaugkütte hinnale

Parameeter	Väärtus
Seadme kasutusaeg - olemasolev seade, a	10
Seadme kasutusaeg - uus seade, a	20
Püüdeseadmete maksumus, €/kW	100
Puudeseadmete maksumus uutele kateldele, €/kW	80
Olemasolevate katelseadmete võimsus, MW	3,22
Uute katelde võimsus, MW	2,68
Olemasolevate katelde korral investeering, €	322 000
Uute katelde korral investeering, €	214 260
Mõju kaugkütte hinnale - olemasolev, €/MWh	4,36
Mõju kaugkütte hinnale – uued katlad, €/MWh	1,97

3.3.2 Päikeseenergial ja soojuspumbal põhinev küttelehendus

Katlamaja asub tiheasustus piirkonnas hoonete vahel. Kinnistule on maa-ameti kitsenduste kaardi alusel seatud erinevate elektripaigaldiste kaitsevööndid ning samuti

on ka veehaarde sanitaarkaitseala. Katlamaja vahetusse lähedusse on soojuspumpade rajamine raskendatud. Samuti on väga piiratud ka PV-paneelide paigaldamiseks nõutud vaba ruum. Kokku on võimalik paigaldada kinnistu katusele vaid 89 kW võimsusega päikesepark. (Tabel 3.10)

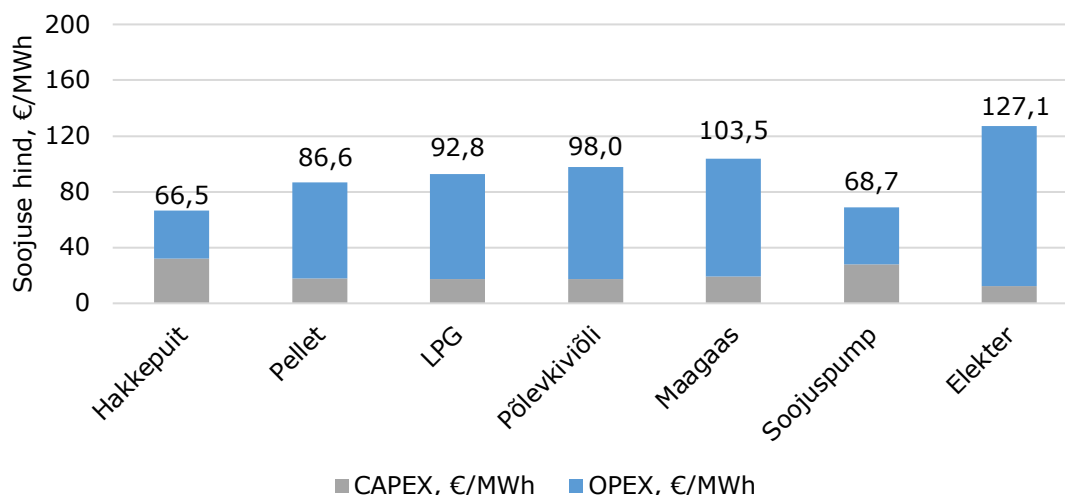
Tabel 3.10 Päikeseenergia rajamise võimekus

Tüüp	Pindala, m ²	Võimsus, kW	Investeeringu maksumus, €	Toodang, kWh
Katus	900	89	62 169	83 077

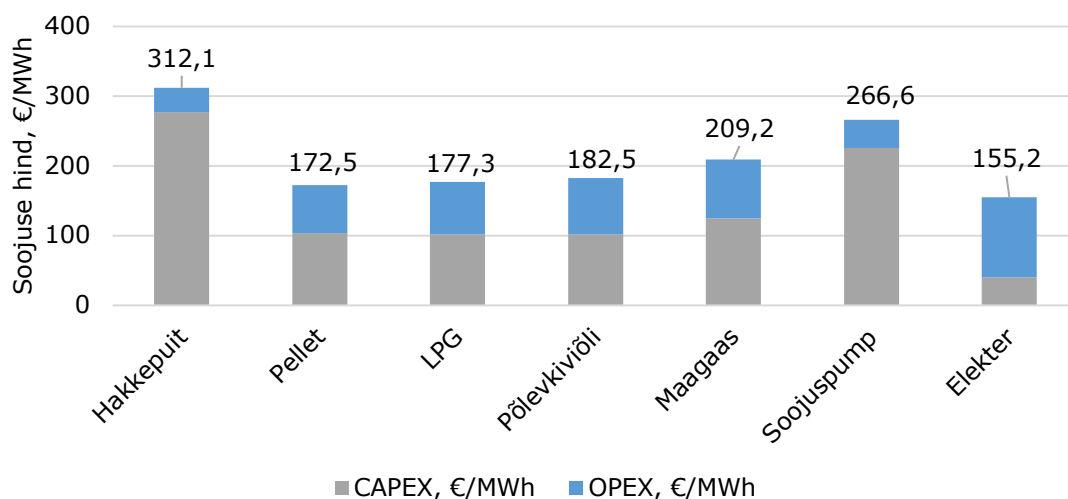
PV-pargiga toodetud elektrienergia kogus ei ole piisav, et taastuvelektriga või soojuspumba lahendusega sooja tarbevee tootmist katta. Lahenduse käitamiseks tuleks kasutada kas täiendavat elektrienergiat võrgust, mille korral sõltub investeeringu tasuvus oluliselt kaugküttevõrgu elektri hinnast või tuleks lahenduse korral täiendavalt katlaid käitada. Stsenariumi eesmärk oli lõpetada katelde käitamine suveperioodil ning kuna lahendus ei vasta esialgsetele stsenariumi tingimustele ei ole töös piirkonnas PV-pargi, elektrikütte ning salvesti lahendust täiendavalt analüüsitud.

3.3.3 Katelde rekonstrueerimine

Stsenariumi arvutused on koostatud baaskoormuskatla sisendvõimsusega 2831 kW ja tipukoormuskatla võimsusega 4375 kW. Joonisel 3.10 on esitatud baaskoormuse kaugkütte hind erinevaid kütuseid kasutades ning joonisel 3.11 tipukoormuse soojuse hind. Tabel 3.11 toob välja võrgu koguhinna vastavalt erineva lahenduse kasutuselevõtmisele.



Joonis 3.10 Baaskoormuse soojuse hind



Joonis 3.11 Tipukoormuse soojuse hind

Tabel 3.11 Kaugküttevõrgu koguhinna tabel horisontaalselt tipukoormuse lahendus ja vertikaalselt baaskoormuse lahendus

Koguhind, €/MWh	Hakkepuit	Pellet	LPG	Põlevkiviõli	Maagaas	Soojus-pump	Elekter
Hakkepuit	79	80	80	84	90	77	59
Pellet	97	97	98	101	108	95	76
LPG	102	103	104	107	114	100	82
Põlevkiviõli	107	107	108	111	118	105	86
Maagaas	112	112	113	116	123	110	91
Soojus-pump	81	82	82	85	92	79	60
Elekter	133	133	134	137	144	130	112

Stsenaariumi tingimustel tagab madalaima kaugkütte hinna, 59 €/MWh, hakkepuiduga baaskoormuse katmine ning elektriga tipukoormuse katmine. Baaskoormuse korral konkureeriv lahendus oleks kasutada soojuspumpa, kuid võttes arvesse, et katlamaja läheduses pole vaba ruumi on perspektiivsem lahendus siiski hakkepuit. Tipukoormuse katmiseks on konkureeriv lahendus pelleti kasutamine. Investeeringutes tänasesse lahendus, kus baaskoormuse jaoks kasutatakse hakkepuitu ning tipukoormuseks põlevkiviõli oleks katelde rekonstrueerimise järel kaugkütte hind märkimisväärselt kallim, 84 €/MWh.

3.3.4 Tulemused

Kuivõrd nii riiklikud kui ka ettevõtte seatud eesmärgid nõuavad võrgus muutusi tõuseb võrgus tehtavate investeeringute tõttu tarbijate jaoks hind. Olemasolevatele

tahkekütusekateldele elektrifiltri lisamisel suureneb kaugkütte hind ligikaudu 4,36€/MWh olenedes tahkekütuse katelde käitamise perioodist. Katelde vahetamisel tuleks arvestada nii hetke kui ka prognoositavat soojuse tarbimist. Piirkonnas puudub piisav vaba ruum katlamaja läheduses PV-pargi ja soojuspumba lahenduse loomiseks.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli leida arenguvõimalused kolmele kaugküttepiirkonnale: Uuemõisa, Tootsi ja Lavassaare.

Nevel Eesti OÜ emaettevõtte on jätkusuutlikkuse strateegias seadnud eesmärgiks 2030. aastaks saavutada süsinikuneutraalse energia tootmise – eesmärgi plaanitakse saavutada läbi katlamajade ja kaugküttevõrkude kaasajastamise, investeeringute taastuenergiasse ja energiakasutuse optimeerimise. [1] Mõistõttu on võrgupiirkondades vaja teha muutused jätkusuutlikumate lahenduste kasutuselevõtmiseks juba lähitulevikus. Senini on võrkudes kasutatud peamiselt hakkpuitu, turvast ning põlevkiviõli.

Lõputöö teoreetilises osas anti ülevaade kaugküttest ning karmistuvatest heitmenormidest ning erinevatest tehnilistest lahendustest, mida kaugküttes kasutatakse sh soojuspumbad, akumulatsioonipaagid, PV-paneelid. Metoodika peatükkis anti põhjalikum ülevaade võrgupiirkondade hetkeolukorrast.

Võrgupiirkondade analüüsimiseks koostati kolm stsenaariumit, mida on täpsemalt kirjeldatud peatükkis 2.2. Stsenaariumite analüüsimiseks kasutati tarkvara Microsoft Excel. Referentsstsenaariumis anti ülevaade võrgupiirkonna hetkeolukorra kohta ning toodi ka renoveerimisest tulenev mõju piirkonna soojuse tarbimisele. Täiendavalt toodi stsenaariumis välja elektrifiltri kasutuselevõtmise mõju kaugküttele hinnale. Elektri stsenaarium keskendus igas võrgus päikeseenergia, soojuspumba ning salvestuse ühislahenduse mõjule. Katelde optimeerimise stsenaariumi aluseks oli 2030. aastaks süsinikuneutraalse soojuse tootmiseni jõudmine ehk kõikide fossiilkütustel lahenduste korral oli eeldatud amortisatsiooni periood kuni kuus aastat.

Piirkondades kasutatavad lahenduste rakendamise potentsiaal on erinev. Lavassaare ja Tootsi piirkonnas on vaba ruumi PV-pargi ja soojuspumba lahenduse rajamiseks, kuid Uuemõisa piirkonnas puudub piisav vaba ruum katlamaja läheduses eelmainitud lahenduste rajamiseks. Analüüsi eeldusena kasutatud investeeringu maksumuste ja kütuse hindade korral on PV-pargi ja soojuspumba lahenduse kasutamisel suvise sooja tarbevee tootmiseks hind tarbijate jaoks kõrge. Katelde rekonstrueerimise stsenaariumi tingimuste korral kallineb fossiilsete kütuste baasil lahenduste korral soojuse hind ning varasemalt vähemlevinud lahendused nt pelleti või elektri kasutamine muutuvad konkurentsivõimelisemaks.

Täiendavalt oleks võimalik analüüsida päikesekollektorite kasutamist kaugküttevõrkudes ning täpsemalt analüüsida erinevate soojuspumba lahenduste korral mõju kaugkütte hinnale.

SUMMARY

The aim of the master's thesis was to identify development opportunities for three district heating areas: Uuemõisa, Tootsi, and Lavassaare.

Nevel Eesti OÜ has set a goal in its sustainability strategy to achieve carbon-neutral energy production by 2030. This goal is planned to be achieved through the modernization of boiler houses and district heating networks, investments in renewable energy, and optimization of energy use. Therefore, changes need to be made in the network areas to implement more sustainable solutions in the near future. Until now, the main fuels in the heating networks are wood chips, peat, and shale oil.

The theoretical part of the thesis provided an overview of district heating, the increasingly stringent emission standards, and various technical solutions used in district heating, including heat pumps, accumulation tanks, and PV panels. The methodology chapter gave a more detailed overview of the current situation in the network areas.

Three scenarios were developed to analyze the network areas, which are described in more detail in chapter 2.2. Microsoft Excel was used to analyze the scenarios. The reference scenario provided an overview of the current situation in the network area and also highlighted the impact of renovations on the region's heat consumption. Additionally, the scenario outlined the impact of the introduction of an electric filter on the price of district heating. The electricity scenario focused on the impact of a combined solution of solar energy, heat pumps, and storage in each network. The boiler optimization scenario was based on achieving carbon-neutral heat production by 2030, assuming a depreciation period of up to six years for all fossil fuel solutions.

The potential for implementing solutions varies across the areas. In the Lavassaare and Tootsi areas, there is free space for the construction of a PV park and a heat pump solution, but in the Uuemõisa area, there is not enough free space near the boiler house for these solutions. Given the investment costs and fuel prices used in the analysis, the price for consumers for producing summer hot water using a PV park and a heat pump solution is high. Under the conditions of the boiler reconstruction scenario, the price of heat using fossil fuel-based solutions increases, and previously less common solutions, such as the use of pellets or electricity, become more competitive.

Additionally, it would be possible to analyze the use of solar collectors in district heating networks and more precisely analyze the impact of various heat pump solutions on the price of district heating.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Nevel Oy, „Nevel sustainability report 2022“.
- [2] A. Volkova, E. Latõšov, V. Mašatin, I. Krupenski, A. Siirde, ja J. Kaugküte, „Jätkusuutlik kaugküte“, 2021.
- [3] Kliimaministeerium, „Kliimaseaduse taust ja põhisuunad“, 2024.
- [4] K. Helin, S. Syri, ja B. Zakeri, „Improving district heat sustainability and competitiveness with heat pumps in the future Nordic energy system“, *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2018, lk 455–464. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.210.
- [5] M. Põlluveer, „Haabneeme ja Viimsi kaugkütte arendusvõimalused“, 2018.
- [6] K. Kalme, „Soojuspumpade majanduslik tasuvus maapiirkondade kaugküttevõrkudes“, 2021.
- [7] G.-M. Kajandi ja E. Latõšov, „Päikeseenergia kasutamise võimalused Tallinna kaugküttes“, 2023.
- [8] Kliimaministeerium, „ENMAK 2035 eelnõu tööversioon 21032024“, 2024.
- [9] I. - International Energy Agency, „Energy Policy Review Estonia 2023“, 2023. [Online]. Available at: www.iea.org
- [10] Utilitas, „Reo- ja merevee soojuspumbad on innovaatiline ja keskkonnasäästlik lahendus mereäärse Tallinna kaugkütte arendamiseks - Utilitas | Utilitas“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.utilitas.ee/reo-ja-merevee-soojuspumbad-on-innovaatiline-ja-keskkonnasaastlik-lahendus-mereäärse-tallinna-kaugkutte-arendamiseks/>
- [11] Elering, „Segajääk | Elering“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: <https://elering.ee/segajaak>
- [12] Fortum, „Origin of electricity in Finland | Fortum“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.fortum.com/origin-electricity-finland#>
- [13] Energex Energy Experts OÜ, „Türi valla Säreveere aleviku soojusmajanduse arengukava aastateks 2021-2031“, 2021.
- [14] Ü. Kask, V. Vares, ja M. Saareoks, *Puitkütuste kasutaja käsiraamat*. Tartu: Tartu Regiooni Energiaagentuur, 2020. [Online]. Available at: www.trea.ee
- [15] S. Frederiksen ja S. Werner, *District Heating and Cooling*. Lund: Studentlitteratur AB, 2013.
- [16] Euroopa Parlament ja nõukogu, „EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV (EL) 2015/ 2193 keskmise võimsusega põletusseadmetest õhku eralduvate teatavate saasteainete heite piiramise kohta“, 2015.
- [17] Hekotek AS, „MULTITSÜKLON HEKMC - 2X3 TEHNILISED ANDMED“, 2005.

- [18] Energex Energy Experts OÜ, „Võru valla soojusmajanduse arengukava aastateks 2023-2033“, 2023.
- [19] Riigikogu, „Kaugkütteseadus“. Vaadatud: 3. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/KKütS>
- [20] Konkurentsiamet, „Kaalutud keskmise kapitali hinna juhend (kinnitatud 19.07.2023)“, 2023.
- [21] Energex Energy Experts OÜ, „Sensitivity analysis to Estonian electricity demand scenarios“, 2023.
- [22] A. Ferrantelli, K. Ahmed, P. Pylsy, ja J. Kurnitski, „Analytical modelling and prediction formulas for domestic hot water consumption in residential Finnish apartments“, *Energy Build*, kd 143, lk 53–60, mai 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.021.
- [23] Konkurentsiamet, „Soojuse piirhinna kooskõlastamise põhimõtted“, 2020.
- [24] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia“, 2020.
- [25] Z. Yu, A. McKeown, Z. Hajabdollahi Ouderji, ja M. Essadik, „A flexible heat pump cycle for heat recovery“, *Communications Engineering*, kd 1, nr 1, aug 2022, doi: 10.1038/s44172-022-00018-3.
- [26] A. Paist ja A. Poobus, *Soojusgeneraatorid*. 2009.
- [27] Soojuspumbaliit, „Soojuspumbad“. Vaadatud: 9. veebruar 2024. [Online]. Available at: <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumbad>
- [28] IEA, *Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems Final Report Annex 47 HPT IEA*. 2019.
- [29] Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ, „Külmatehnika tehniline juhend: OKA-de ja F-gaaside alternatiivid“, 2016.
- [30] P. Kohlenbach ja U. Jakob, *Solar Cooling*. 2014.
- [31] O. I -Taastuenergialahendused, „Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele“.
- [32] European Commission, „Global irradiation and solar electricity potential“. Vaadatud: 24. aprill 2023. [Online]. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/G_hor_EE.png
- [33] European Commission, „Global irradiation and solar electricity potential. Optimally-inclined photovoltaic modules“. Vaadatud: 24. aprill 2023. [Online]. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/G_opt_EE.png
- [34] S. Kalaiselvam ja R. Parameshwaran, *Thermal Energy Storage Technologies For Sustainability*. 2014.

- [35] Gren Eesti, „Avasime Tartu elektrijaamas ainulaadse soojussalvesti Eestis - Gren Eesti“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: <https://gren.com/ee/uudised/avasime-tartu-elektrijaamas-ainulaadse-soojussalvesti-eestis/>
- [36] EPV, „Storing heat and power - EPV“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.epv.fi/en/project/storing-heat-and-power/>
- [37] Vantaan Energia, „World’s largest thermal energy storage to be built in Vantaa, Finland | Vantaan Energia“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.vantaanenergia.fi/en/worlds-largest-thermal-energy-storage-to-be-built-in-vantaa-finland/>
- [38] Nevel, „Nevel“. Vaadatud: 7. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://nevel.com/et/>
- [39] Keskkonnaamet, „Lavassaare katlamaja keskkonnaluba L.ÕV.PM-138086“, 2020.
- [40] ÅF-Consulting AS, „Audru valla soojusmajanduse arengukava 2016-2026“, 2016. [Online]. Available at: www.audru.ee
- [41] OÜ Pilvero, „Tootsi valla soojusmajanduse arengukava aastateks 2016-2026“, 2016.
- [42] Keskkonnaamet, „Tootsi katlamaja keskkonnaluba L.ÕV/324581“, Tootsi katlamaja keskkonnaluba, 2021.
- [43] Keskkonnainvesteeringute Keskus, „Rahastatud projektid | Keskkonnainvesteeringute keskus“. Vaadatud: 25. mai 2024. [Online]. Available at: <https://kik.ee/et/projektid>
- [44] Maa-amet, „X-GIS“. Vaadatud: 9. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>
- [45] Keskkonnaamet, „Uuemõisa katlamaja keskkonnaluba L.ÕV/326023“, 2023.
- [46] A. Vabamägi, „Ridala valla Uuemõisa kaugküttevõrgu soojusmajanduse arengukava“, 2015.
- [47] „JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission“. Vaadatud: 16. mai 2024. [Online]. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [48] Nevel Eesti OÜ, „Analüüsi algandmed“. 2024.
- [49] Eastern Switzerland University of Applied Sciences, „Test results of heat pump | OST“. Vaadatud: 25. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.ost.ch/en/research-and-consulting-services/technology/system-technology/ies-institute-for-energy-systems/heat-pump-test-center-wpz/test-results-of-heat-pump>

- [50] „Energiatõhusus - Tööriistad energiatohususe mõõtmiseks | KredEx“. Vaadatud: 16. mai 2024. [Online]. Available at: <https://kredex.ee/et/energiatohusus-uuringud-ja-andmed/kraadpaevad>
- [51] H. Pieper, T. Ommen, F. Buhler, B. L. Paaske, B. Elmegaard, ja W. Brix Wiebke, „Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating“, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.104.
- [52] „Kaugkütte katlamajade ja soojustorustike uuendamine | Keskkonnainvesteeringute keskus“. Vaadatud: 16. mai 2024. [Online]. Available at: <https://kik.ee/et/toetatavad-tegevused/kaugkutte-katlamajade-ja-soojustorustike-uuendamine>
- [53] Elering, „Elering Live“. Vaadatud: 25. mai 2024. [Online]. Available at: <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=days&start=2024-05-24T21:00:00.000Z&end=2024-05-25T20:59:59.999Z>
- [54] Elektrilevi, „Hinnakirjad - Elektrilevi“. Vaadatud: 25. mai 2024. [Online]. Available at: <https://elektrilevi.ee/et/hinnakirjad>
- [55] Rohesert, „Rohesert: Muuda enda elekter 100% roheliseks!“ Vaadatud: 25. mai 2024. [Online]. Available at: <https://rohesert.ee/et>