



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Energiatehnoloogia instituut

**RUUMILINE PLANEERIMINE VÄIKESTE  
KAUGKÜTTEVÕRKUDE ÜLEMINEKUL  
TAASTUVENERGIALE TALLINNAS**

**SPATIAL PLANNING FOR THE TRANSITION OF SMALL  
DISTRICT HEATING NETWORKS TO RENEWABLE  
ENERGY IN TALLINN**

Magistritöö

Üliõpilane: Kristian Kirs

Üliõpilaskood: 242046MASM

Juhendaja: Anna Volkova, täisprofessor  
tenuuris

Tallinn 2026

# 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.

/ kuupäev digiallkirjas /

Autor: Kristian Kirs

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

/ kuupäev digiallkirjas /

Juhendaja: Anna Volkova

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

/ kuupäev digiallkirjas /

Kaitsmiskomisjoni esimees Alar Konist

/ allkirjastatud digitaalselt /

# **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS**

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristian Kirs,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Ruumiline planeerimine väikeste kaugküttevõrkude üleminekul taastuenergiALE Tallinnas, mille juhendaja on Anna Volkova,

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.

22.05.2026

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Energiatehnoloogia instituut

**Üliõpilane:** Kristian Kirs, 242046MASM

Õppekava, peeriala: Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika magistriõpe

Juhendaja: Anna Volkova, uurimisrühma juht, +37254740716,  
anna.volkova@taltech.ee

## Lõputöö teema:

Ruumiline planeerimine väikeste kaugküttevõrkude üleminekul taastuenergiele  
Tallinnas

Spatial planning for the transition of small district heating networks to renewable  
energy in Tallinn

## Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada ruumilise planeerimise metoodika, mille abil hinnata Tallinna väikeste kaugküttevõrkude sobivust taastuv- ja madalsüsinikulistele soojuslahendustele üleminekuks ning eristada võrgud võimalike dekarboniseerimisteedekondade järgi.
2. Hinnata, millised on Tallinna väikeste kaugküttevõrkude põhilised tehnilised ja keskkonnavalased näitajad olemasoleva andmestiku põhjal
3. Leida erinevate väikeste võrkude soojuskoormus, lineaarne soojustihedus, kütusekasutus ja CO<sub>2</sub>-heitmed Tallinna suure kaugküttevõrgu keskmisest tasemest
4. Määrata ruumilised kriteeriumid, et hinnata väikevõrgu ühendamise teostatavust võrreldes muu keskkonnasõbraliku lahendusega.

## Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus                              | Tähtaeg    |
|----|-------------------------------------------------|------------|
| 1. | <b>Valitud teema ja tööplaani kinnitamine</b>   | 23.02.2026 |
| 2. | <b>Kirjanduse ülevaade ja metoodika mustand</b> | 30.04.2026 |
| 3. | <b>Kaardirakenduse loomine</b>                  | 11.05.2026 |
| 4. | <b>Lõputöö täismustand</b>                      | 20.05.2026 |

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22.05.2026

**Üliõpilane:** ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

# SISUKORD

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| EESSÕNA .....                                                                     | 7  |
| LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....                                                | 8  |
| SISSEJUHATUS .....                                                                | 9  |
| 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....                                                      | 10 |
| 1.1 Taust ja probleemi avamine .....                                              | 10 |
| 1.1.1 Kliimapoliitiline kontekst .....                                            | 11 |
| 1.1.2 Tallinna kaugkütte ajalugu .....                                            | 13 |
| 1.1.3 Väikevõrkude probleemi käsitus .....                                        | 16 |
| 1.2 Väikesed kaugküttevõrgud .....                                                | 17 |
| 1.2.1 Väikese kaugküttevõrgu määratlemise võimalikud tunnused .....               | 18 |
| 1.2.2 Väikese võrgu tehniline ja majanduslik eripära .....                        | 18 |
| 1.3 Kaugkütte dekarboniseerimine ja taastuenergia.....                            | 19 |
| 1.3.1 Taastuvad kütused .....                                                     | 21 |
| 1.3.2 Suursoojuspumbad ja madalatemperatuurilised soojusallikad .....             | 23 |
| 1.3.3 Heitsoojus ja sektoritevaheline lõimimine .....                             | 24 |
| 1.3.4 Elektrikatlad ja soojussalvestus .....                                      | 25 |
| 1.4 Väikeste võrkude ümberkujundamise spetsiifika .....                           | 26 |
| 1.4.1 Eesti kogemus: piirkondlik planeerimine ja tõhusa kaugkütte raamistik ..... | 27 |
| 1.4.2 Üleminekute tüüpilised etapid .....                                         | 28 |
| 1.4.3 Väikevõrgud suurvõrkude kõrval .....                                        | 29 |
| 1.5 Ruumiline planeerimine kaugküttes.....                                        | 31 |
| 1.5.1 GIS kui kaugkütte ruumilise planeerimise töövahend .....                    | 31 |
| 1.5.2 Ruumilise planeerimise alusparameetrid.....                                 | 33 |
| 1.5.3 Mitme-kriteeriumi hindamise rakendamine GIS-is .....                        | 34 |
| 1.5.4 Olemasoleva kaugküttevõrgu laiendamine.....                                 | 36 |
| 1.5.5 Ruumilise planeerimise kasutusjuhtumite kokkuvõte .....                     | 37 |
| 1.5.6 Järeldused Tallinna väikeste kaugküttevõrkude planeerimiseks .....          | 38 |
| 2. Modelleerimine ja stsenaariumianalüüs .....                                    | 39 |
| 2.1 Lähteandmed .....                                                             | 39 |

|                          |                                                                 |    |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.1                    | Lähteandmete allikad .....                                      | 40 |
| 2.1.2                    | Kogutud andmed .....                                            | 42 |
| 2.1.3                    | Andmete eeltöötlus .....                                        | 44 |
| 2.2                      | Mitmekriteeriumiline hindamismudel .....                        | 50 |
| 2.2.1                    | Mudeli algoritm .....                                           | 52 |
| 2.2.2                    | Mudeli kriteeriumid .....                                       | 54 |
| 2.2.3                    | Kaitsealad ja muud ruumilised välistused .....                  | 56 |
| 2.3                      | Andmete kvaliteet ja mudeli piirangud.....                      | 57 |
| 2.4                      | Tallinna võrkude dekarboniseerimise hindamise parameetrid ..... | 58 |
| 3.                       | Tulemused .....                                                 | 61 |
| 3.1                      | Lähteandmete kogumise tulemus.....                              | 61 |
| 3.2                      | Ühendusanalüüs ja lokaalsed lahendused .....                    | 63 |
| KOKKUVÕTE .....          |                                                                 | 69 |
| SUMMARY.....             |                                                                 | 70 |
| KASUTATUD KIRJANDUS..... |                                                                 | 71 |

## EESSÕNA

Käesolev magistritöö „Ruumiline planeerimine väikeste kaugküttevõrkude üleminekul taastuvenergiale Tallinnas“ on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna Energiatehnoloogia instituudis. Töö käsitleb Tallinna väikeste ja füüsiliselt eraldiseisvate kaugküttevõrkude dekarboniseerimise võimalusi ning keskendub küsimusele, kuidas toetada tehnilisi otsuseid ruumilise analüüsi meetodikaga. Uurimisteema kujunes välja huvist linnalise soojusvarustuse, energiasüsteemide ümberkujundamise ja ruumiandmete kasutamise vastu ning seostub ka autori varasema tööga kaugkütte kättesaadavuse ja energiasüsteemide ruumilise analüüsi teemal.

Töö lähtekohaks oli arusaam, et kaugkütte üleminekul taastuv- ja madalsüsinikulistele lahendustele ei sõltu ainult kasutatavast kütusest või tootmisseadmest. Väikeste võrkude puhul muutuvad oluliseks torustiku paiknemine, soojuskoormuse tihedus, kaugus Tallinna suurest kaugküttevõrgust, võimalike ühenduskoridoride keerukus ning ligipääs kohalikele taastuv- ja heitsoojusallikatele. Seetõttu on töös ühendatud energiabilansi näitajad GIS-põhise ruumilise sobivusanalüüsiga. Selline lähenemine võimaldab võrrelda erinevaid väikevõrke ühtse loogika alusel ning eristada juhtumeid, kus eelistada võiks ühendamist suure võrguga, lokaalse suursoojuspumba rajamist, heitsoojuse kasutamist või edasist detailsemat tasuvusanalüüsi.

Magistritöö valmimist toetas Tallinna linna Rae stipendium. Täna juhendajat Anna Volkovat sisulise suunamise, tagasiside ja kannatlikkuse eest kogu tööprotsessi vältel. Samuti tänan kõiki osapooli, kes aitasid andmete, selgituste või aruteludega kaasa töö praktilise suuna kujunemisele. Eraldi soovin tänada lähedasi ja kaasõppureid toetuse ning mõistva suhtumise eest perioodil, mil töö koostamine nõudis järjepidevat keskendumist ja mitme paralleelse ülesande ühildamist.

Märksõnad: kaugküte, väikevõrgud, ruumiline planeerimine, GIS, taastuvenergia, dekarboniseerimine, Tallinn.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

4GDH – 4. põlvkonna kaugküte (ingl k *Fourth Generation District Heating*)

AHP – Analüütiline hierarhiline mudel (ingl k *Analytic hierarchy process*)

COP – Soojustegur (ingl k *Coefficient of performance*)

EHR – Ehitisregister

ETAK – Eesti topograafia andmekogu

GIS – Kohateabesüsteem e geoinfosüsteem (ingl k *Geographic Information System*)

IEA – Rahvusvaheline Energiaagentuur (ingl k *International Energy Agency*)

JASPERS – Ühine projektiabi Euroopa piirkondadele (ingl k *Joint Assistance to Support Projects in European Regions*)

JRC – Teadusuuringute Ühiskeskus (ingl k *Joint Research Centre*)

KOTKAS – Keskkonnaotsuste Infosüsteem

LTDH – Madalatemperatuuriline kaugküte (ingl k *Low-temperature district heating*)

MCDA – Mitme-kriteeriumi hindamine (ingl k *Multiple-criteria decision analysis*)

P2H – Elektrist soojuse tootmine (ingl k *Power-to-Heat*)

PEF – Primaarenergiategur (ingl k *Primary Energy Factor*)

SEJ – Soojuselektrijaam

TES – Soojussalvestus (ingl k *Thermal Energy Storage*)

TOPSIS – Ideaalsele lahendusele kõige lähemal olev alternatiiv (ingl k *Technique for order of preference by similarity to ideal solution*)



## SISSEJUHATUS

Kaugküte on linnalise soojusvarustuse oluline taristulahendus, mis võimaldab koondada soojuse tootmist, kasutada mitmekesisemat tootmisportfelli ning integreerida taastuvaid ja madalsüsinikulisi soojusallikaid suuremas mahus kui üksikhoonete tasandil. Tallinna kaugküttesüsteemi kliimamõju vähendamisel on seni keskne tähelepanu olnud suure põhivõrgu tootmisportfelli muutmisel, sealhulgas biomassi, jäätmesoojuse, koostootmise ja suursoojuspumpade kasutamisel. Samal ajal paiknevad Tallinnas mitmed väiksemad kaugküttevõrgud, mis on ajalooliselt kujunenud eraldi katlamajade ümber ning mille soojuse tootmine sõltub suurel määral fossiilkütustest. Nende võrkude edasine areng mõjutab seda, kui terviklikult saab Tallinna soojusvarustus liikuda kliimanetraalsuse suunas.

Väikeste kaugküttevõrkude dekarboniseerimine ei ole ühesugune tehniline ülesanne. Mõne võrgu puhul võib otstarbekas olla ühendamine Tallinna suure kaugküttevõrguga, kui ühendustorustik on lühike, ruumiliselt rajatav ja ühendatav soojusmaht piisav. Teiste võrkude puhul võib ühendamine osutuda keerukaks või kulukaks ning sobivamaks võib kujuneda lokaalne taastuv- või madalsüsinikuline lahendus, näiteks mere-, põhja- või reoveesoojuspumbal põhinev süsteem, heitsoojuse kasutamine, biokütus või hübriidlahendus koos salvestusega. Seetõttu tuleb väikevõrke hinnata mitte ainult kütusekulu ja heitmete, vaid ka nende ruumilise asendi, tarbijate paiknemise, torustiku pikkuse ja võimalike soojusallikate läheduse põhjal. [1]

Magistritöö eesmärk on koostada ruumilise planeerimise metoodika, mille abil hinnata Tallinna väikeste kaugküttevõrkude sobivust taastuv- ja madalsüsinikulistele soojuslahendustele üleminekuks ning eristada võrgud võimalike dekarboniseerimisteedade järgi. Selleks koondatakse olemasolevad andmed väikeste kaugküttevõrkude soojuskoormuse, müüdud soojuse, torustiku pikkuse, kütusekasutuse ja CO<sub>2</sub>-heitmete kohta ning võrreldakse neid Tallinna suure kaugküttevõrgu keskmiste näitajatega. Seejärel kasutatakse GIS-põhist ühendusanalüüsi, et hinnata võimalikku seost suure võrguga, ühenduskoridori ruumilist keerukust ning lokaalsete lahenduste esmast sobivust.

Töö tulemus ei ole lõplik projekteerimis- ega investeerimisotsus. Tegemist on varajase planeerimisfaasi hindamismudeliga, mis aitab prioriseerida edasist analüüsi ja vähendada otsustusprotsessi ebamäärasust. Selline metoodika võib toetada nii linna, võrguettevõtja kui ka planeerijate tööd olukorras, kus kliimaeesmärgid, energiajulgeolek, taristuinvesteeringud ja ruumilised piirangud tuleb siduda üheks võrreldavaks otsustusraamistikuks

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Kirjanduse ülevaade koondab töö teoreetilise ja poliitilise tausta. Peatükk käsitleb kaugkütte rolli kliimaneutraalsuse saavutamisel, väikeste kaugküttevõrkude eripära, taastuv- ja madalsüsinikuliste soojusallikate kasutamist ning GIS-põhist ruumilist planeerimist. Rõhk on Tallinna olukorral, kus suure linnalise kaugküttevõrgu kõrval paikneb mitu väikest ja ajalooliselt eraldiseisvat võrgupiirkonda.

Peatüki eesmärk on luua alus metoodikale, millega hinnata väikeste kaugküttevõrkude võimalikke ülemineku võimalusi. Seetõttu ei käsitleta soojusmajandust ainult tootmistehnoloogia või kütusevaliku küsimusena, vaid ruumilise süsteemina, kus soojuskoormus, torustiku paiknemine, võimalike soojusallikate kaugus, maakasutus, võrgutemperatuurid ja tarbijate paiknemine mõjutavad otsust ühtaegu.

## 1.1 Taust ja probleemi avamine

Kaugküte on linnalise soojusvarustuse keskne taristulahendus piirkondades, kus hoonestus on piisavalt tihe ja soojusnõudlus koondub suhteliselt väikesele maa-alale. Võrgupõhine soojusvarustus võimaldab kasutada suuremaid ja tehniliselt paremini juhitavaid tootmisüksusi, ühendada eri kütuseid ja soojusallikaid ning rakendada lahendusi, mida üksikhoone tasandil oleks keeruline või majanduslikult ebaotstarbekas kasutada. Selliste allikate hulka kuuluvad koostootmine, biomassi- ja jäätmepõletamine, tööstuslik heitsoojus, reovee- ja mereveesoojus, suursoojuspumbad ning soojussalvestid. [2]

Kaugkütte arendamise põhiküsimus ei ole siiski ainult see, millist kütust või tootmisseadet kasutada. Võrgu majanduslik ja keskkonnamõju sõltub soojusnõudluse ruumilisest tihedusest, trasside pikkusest, temperatuurirežiimist, olemasolevate hoonete tehnilisest valmisolekust ning sellest, kas läheduses paikneb taastuv- või heitsoojusallikaid. Seetõttu on kaugkütte dekarboniseerimine olemuslikult ruumiline planeerimisülesanne: sama tehnoloogia võib olla ühes asukohas põhjendatud ja teises asukohas ebaotstarbekas. [3]

Tallinna puhul on kaugkütte roll eriti oluline, sest linna suur kaugküttevõrk teenindab suurt osa korterelamutest, avalikest hoonetest ja äripindadest. Samal ajal ei ole kogu soojusvarustus füüsiliselt koondunud ühte süsteemi [4]. Linna eri osades on kujunenud väiksemad võrgupiirkonnad, mis võivad sõltuda ühest lokaalsest katlamajast ja mille tootmine põhineb sageli maagaasil või mõnel juhul vedelkütusel. Sellised võrgud on

suure põhivõrguga võrreldes haavatavamad kütusehinna muutustele, reservvõimsuse vajadusele ja investeeringute ühikukulu kasvule. [5]

Väikeste võrkude üleminek taastuenergiale ei ole ühesugune tehniline ülesanne. Mõne võrgu puhul võib kõige mõistlikum olla ühendamine Tallinna suure kaugküttevõrguga, sest suurem tootmisportfell ja madalam fossiilkütuste osakaal annavad kiire heitmekoguse vähenduse [1]. Teise võrgu puhul võib ühendustorustik olla pikk ning ruumiliselt keeruline või asuda lähedal muu madalatemperatuuriline allikas (meri, reoveetaristu, tööstuslik heitsoojus). Kolmandal juhul võib soojusnõudlus olla nii hajus, et kaugkütte säilitamine vajab eraldi kriitilist tasuvus- ja tehnilist analüüsi [6]. Sellest tuleneb lähteprobleem: Tallinna väikeste kaugküttevõrkude dekarboniseerimiseks on vaja meetodikat, mis ühendab energiabilansi näitajad asukohapõhise analüüsiga.

### **1.1.1 Kliimapoliitiline kontekst**

Eesti soojusmajanduse dekarboniseerimine toimub Euroopa Liidu kliima- ja energiapoliitika laiemas raamistikus. Riiklikud ja kohalikud eesmärgid suunavad fossiilkütuste kasutuse vähenemist, taastuenergia osakaalu kasvu ning energiatõhususe parandamist [7].

#### **Euroopa liit**

Euroopa Liidu kliima- ja energiapoliitika seab kaugkütte dekarboniseerimisele üha konkreetsema raamistiku. Euroopa kliimaseadus muudab siduvaks eesmärgi saavutada Euroopa Liidus kliimanetraalsus 2050. aastaks ning vähendada kasvuhoonegaaside netoheitmeid 2030. aastaks vähemalt 55% võrreldes 1990. aasta tasemega. Need eesmärgid ei puuduta ainult elektritootmist, vaid ka soojuse ja jahutuse valdkonda, sest hoonete kütmine, tööstuslik soojusvajadus ja linnade soojusvarustus moodustavad olulise osa lõppenergia tarbimisest. [8]

Taastuenergia direktiivi 2023. aasta muudatused suurendavad survet taastuenergia kasutamisele kõigis sektorites, sh kütte ja jahutuse valdkonnas. Euroopa Komisjoni käsitluses on taastuenergia üldine eesmärk 2030. aastaks vähemalt 42,5% Euroopa Liidu energia lõpptarbimisest, püüdlusega jõuda 45% tasemeni. Kaugkütte jaoks tähendab see, et taastuvate kütuste, madalatemperatuuriliste taastuvallikate, heitsoojuse ja elektrifitseeritud soojuse kasutamine peab kasvama mitte üksnes uutes arendustes, vaid ka olemasolevates võrkudes. [9]

Energiatõhususe direktiivi 2023. aasta uuendus rõhutab tõhusa kaugkütte ja -jahutuse rolli ning seob süsteemide pikaajalise arengu taastuenergia, heitsoojuse ja süsiniku

jalajälje vähenemisega. Direktiiv nõuab liikmesriikidelt ka soojuste ja jahutuse terviklikke hindamisi, mis tuleb siduda riiklike energia- ja kliimakavadega. Selline raamistik toetab lähenemist, kus kaugküttesüsteemi arengut ei hinnata ainult katlamaja tasandil, vaid kogu piirkonna soojusnõudluse, võrgu, alternatiivsete allikate ja ruumilise sobivuse kaudu. [10]

Järeldus Tallinna väikeste võrkude jaoks on, et fossiilkütustel põhinevate eraldiseisvate võrkude jätkumine muutub pikaajaliselt üha raskemini põhjendatavaks [1]. Samal ajal ei tähenda kliimapolitiiline surve, et kõik väikesed võrgud tuleks mehaaniliselt ühendada suure võrguga. Euroopa raamistik soosib eelkõige lahendusi, mis kasutavad kohalikku taastuv- või heitsoojust, vähendavad primaarenergia tarbimist ning arvestavad süsteemi tegelikku ruumilist ja tehnilist konteksti. [10]

### **Eesti Vabariik**

Eesti kliima- ja energiapoliitika seob soojusmajanduse ümberkujundamise riiklike kliimaneutraalsuse ja energiajulgeoleku eesmärkidega. Riiklik energia- ja kliimakava käsitleb kütte- ja jahutusmajandust ühe valdkonnana, kus tuleb vähendada fossiilkütuste kasutust, suurendada taastuvenergia osakaalu ning tagada samal ajal varustuskindlus ja taskukohasus. Eesti kontekstis on oluline ka see, et kaugküte on paljudes linnades ja alevikes juba olemasolev taristu, mille ümberkujundamine võib olla kiirem ja süsteemsem kui täielik üleminek hoonepõhistele lahendustele. [11]

Eesti kaugkütteseadus määratleb tõhusa kaugkütte võrgupiirkonna kriteeriumid. Tõhusaks loetakse võrgupiirkond, kus kasutatakse vähemalt 50% taastuvast allikast muundatud soojusenergiat, 50% heitsoojust, 75% koostootmisrežiimis toodetud soojust või nende kombinatsiooni seaduses sätestatud mahus. See määratlus on oluline, kuna lubab kombineerida taastuvkütuseid, heitsoojust ja koostootmist vastavalt kohalikele tingimustele [12]. Süsinikneutraalse soojus- ja jahutusmajanduse uuringud rõhutavad, et kaugküte, lokaalküte, jahutus, salvestus ja tarbimise juhtimine tuleb käsitleda omavahel seotud süsteemina. Üleminek ei toimu ainult uue tootmiseseadme paigaldamise kaudu, vajalik on seda käsitleda kui pikaajalist teekonda, mis arvestab hoonete renoveerimisega, elektrisüsteemi arenguga, kütuste kättesaadavusega, soojusallikate ruumilise paiknemisega ja investeringute ajastusega. [7]

Eestis asuvad paljud väikesed kaugküttevõrgud ajaloolistes katlamajapiirkondades või väiksemates asulates. Uuringud Eesti kaugküttepiirkondade planeerimisest ja tõhusa kaugkütte edendamise näitavad, et võrgu tulevik sõltub soojusnõudluse tihedusest, katlamaja kütusest, torustiku seisukorrast, kohaliku omavalitsuse rollist ja hinnaregulatsioonist. Tallinna väikevõrgud paiknevad küll suurlinna sees, kuid mitmes

mõttes sarnanevad need oma tehnilise riskiprofiili poolest väiksemate kaugküttesüsteemidega. [13], [14]

### **Tallinna linn**

Tallinna jaoks on kõige otsesem kohalik raamistik kliimakava „Kliimaneutraalne Tallinn. Tallinna säästva energiamajanduse ja kliimamuutustega kohanemise kava 2030“. Kava täpsustab linna strateegilist sihti saavutada kliimaneutraalsus 2050. aastaks ning seab eesmärgiks vähendada 2030. aastaks kasvuhoonegaaside heitmeid vähemalt 40% võrreldes 2007. aastaga. Soojusvarustus on selles raamistikus võtmevaldkond, sest kaugküte mõjutab suurt osa Tallinna hoonete energiakasutusest. Tallinna kliimakava järgi tuleb jätkata kaugküttevõrgustiku laiendamist ning Tallinna kaugküttesoojus peab 2030. aastaks olema valdavas osas toodetud biomassist ja taaskasutamiseks sobimatutest jäätmetest, samal ajal kui maagaas jääb eelkõige tipukoormuste katmiseks. [5]

Tallinna kaugküte viimased arengud näitavad, et dekarboniseerimine on liikunud üldisest eesmärgist konkreetsete investeeringuteni. Paljassaare reovee- ja mereveesoojuspumbajaama ehitus on oluline näide sellest, kuidas linnaline taristu, veemajandus ja kaugküte seotakse ühtseks madala heitmega soojusallikaks. Rajatava jaama koguvõimsuseks saab 110 MW ning see peaks alustama soojuse andmist Tallinna kaugküttevõrku 2026. aasta lõpus [15]. Tallinna vaates on väikevõrkude teema seetõttu eriti oluline. Suure põhivõrgu tootmisportfelli muutmine vähendab linna soojusvarustuse keskmist heitmeintensiivsust, kuid eraldiseisvad väikevõrgud võivad jääda fossiilkütustele tuginevaks jääkprobleemiks. Mõistlik ei ole kõiki väikevõrke käsitleda ühe lahenduspaketina. Nende asukoht, kaugus põhivõrgust, tarbijate hulk, võrgu pikkus, soojuskoormus ning võimalik ligipääs merele, reoveele või heitsoojusele on erinev.

#### **1.1.2 Tallinna kaugküte ajalugu**

Tallinna kaugküte on kujunenud järk-järgult lokaalkatlamajadel põhinenud soojusvarustusest suureks linnaliseks kaugküttesüsteemiks, mille keskne arengusuund on olnud tootmise koondamine, võrkude ühendamise ja väiksemate ebaefektiivsete tootmisüksuste asendamine suurema süsteemi soojusallikatega. Tallinnas oli veel 20. sajandi esimesel poolel valdavalt kasutusel ahiküte ja hoonepõhised katlamajad; 1946. aastaks oli Tallinna elamufondis 228 keskküttega maja, kuid laiem kaugküte areng algas alles 1950. aastate teisel poolel. [2]

Tallinna kaugküttevõrgu rajamine algas 1956. aastal, kui soojusvarustuse aluseks võeti Tallinna Elektriijaama soojus. Esialgne projekt nägi ette 130/70 °C temperatuurirežiimiga kaugküttevõrgu, mille tarbijate summaarne soojuskoormus oli 128 MW. Esimene soojusmagistraal rajati elektriijaamast Viru väljakuni ning sealt edasi Rävala puistee ja Kentmanni tänava suunas. Ametlikult ühendati esimene hoone Tallinna kaugküttevõrguga 9. oktoobril 1959, kui võrku lülitati Kentmanni 10 hoone. Sama aasta lõpuks oli süsteemis neli hoonet kogukoormusega 1,4 MW ning esimese kahe aasta jooksul ehitati ligikaudu 10 km soojustrasse ja ühendati 86 hoonet. [2]

1960.–1970. aastatel toimus Tallinna kaugkütte kiire ruumiline laienemine. 1963. aastal rajati Mustamäe uue elamurajooni teenindamiseks suur tsentraalkatlamaja ning 1964. aastal Karjamaa katlamaja Põhja-Tallinna piirkonna kütmiseks. 1968. aastaks oli Tallinna soojusvõrkude kogupikkus kasvanud 56 kilomeetrini ning kaugküttega oli ühendatud ligi 800 elamut, ettevõtet ja asutust kogukoormusega ligikaudu 285 MW. 1973. aastal alustas tööd Kadaka katlamaja Lilleküla piirkonna kütmiseks ning Lasnamäe arendamisel muutus oluliseks Iru soojuselektriijaam. [2]

Tallinna kaugkütte arengut iseloomustas varakult väikeste lokaal- ja grupikatlamajade vähendamine. Tallinnas oli 1970. aastateks väikeste katlamajade arv väga suur ning alates 1970. aastast likvideeriti igal aastal kümneid väikeseid katlamaju. Esmajärjekorras ühendati suurema võrguga need hooned ja piirkonnad, mille katlamajad põhjustasid suuremat lokaalset õhusaastet või mille asukoht võimaldas ühendamist olemasolevate linnatrassidega. Kaugkütte laiendamine ei toimunud ainult uute elumupiirkondade teenindamiseks, vaid ka olemasoleva soojusvarustuse ümberkorraldamiseks ja hajutatud tootmise vähendamiseks. [2]

Pärast Eesti taasiseseisvumist muutus Tallinna kaugküttesüsteemi peamiseks probleemiks vananenud taristu, madal efektiivsus ja sõltuvus importkütustest. 1996. aastal toodeti Tallinnas soojust peamiselt masuudist ja maagaasist ning linnas oli ligikaudu 250 lokaal- ja grupikatlamaja, kus kasutati kivisütt, masuuti või kütteõli. Madal gaasihind ja kaugkütte ebaefektiivsus soodustasid sel ajal ka lokaalkatlamajade kasutuselevõttu. See näitab, et kaugkütte konkurentsivõime sõltus otseselt võrgu tehnilisest seisukorrast, kütusehindadest ja tootmisstruktuurist. [2]

2000. aastate alguses algas Tallinna linnaosade kaugküttevõrkude ühendamine ja süsteemsem rekonstrueerimine. Ühendati Tallinna linnaosade võrgud 2000. aastate alguses ning lokaalkatlamajade arv vähenes taas järk-järgult. Kui lokaalkatlamajad paiknesid soojustrassi lähedal, ühendati need üldjuhul suure linnavõrguga. Seejuures ei

kõrvaldatud alati kogu olemasolevat kohalikku taristut, vaid osa senisest torustikusüsteemist jäeti kasutusse ning katlamajad muudeti vajadusel boilerjaamadeks. Tallinna kaugkütte ruumilise integreerimise oluline etapp oli 2010. aasta, kui linna lääne- ja idapiirkonna kaugküttevõrgud ühendati ühendustorustiku kaudu. Selle tulemusena tekkis võimalus edastada soojust läänepiirkonnast kesklinna, Maardu ja Lasnamäe piirkonda ning vastupidi. Tänapäeval katavad Tallinna kaugkütte baaskoormust peamiselt koostootmisjaamad ja suuremad tootmisüksused. Tallinna peamised baaskoormuse allikad on Tallinna SEJ 1 ehk Vao I, Iru jäätmepõletusjaam, Tallinna SEJ 2 ehk Vao II ja Mustamäe koostootmisjaam. Lisaks on süsteemis olulised suuremad katlamajad, näiteks Kristiine ja Ülemiste katlamaja, mida kasutatakse reserv- ja tipukoormuse katmiseks. [2]

Viimaste aastate arengud näitavad, et väikeste võrgupiirkondade liitmine on Tallinnas jätkuvalt aktuaalne. 2023. aastal loiid Tallinna linn ja Utilitas kaugküttevaldkonna ühisettevõtte AS Utilitas Tallinna Soojus, mille eesmärk on juhtida Tallinna piirkonna investeeringuid ning toetada taastuvenergiaga põhinevate kaugküttelehenduste rajamist. 2022. aastal sõlmisid Utilitas ja Adveni eelkokkuleppe Adveni Tallinna võrgupiirkondade liitmiseks Utilitase võrgupiirkonnaga. Tehingu eesmärgiks nimetati jätkusuutliku lahenduse leidmist olukorras, kus maagaasi kõrge hind oli tekitanud eri võrgupiirkondade kaugküttehindades suure erinevuse. Samas rõhutati, et Utilitase soojuse tootmises kasutatakse peamiselt biomassi ja heitsoojust ning maagaas jääb eelkõige tipukoormuse katmiseks, samal ajal kui Adveni Tallinna katlamajad põhinesid sel ajal ainult maagaasil [2]. Endised Adveni väikevõrgud ja Utilitase opereeritud Tallinna kaugküttevõrk asuvad pärast Utilitase ülevõtmist samas kaugkütte piirkonnas, mis tarbijatele tähendab sama soojusenergia maksumust, kuigi need võrgud pole füüsiliselt seotud. [4]

Tabel 1.1 Tallinna kaugküttevõrgu ajalooline ülevaade [2]

| Periood             | Peamine areng Tallinna kaugküttes                                                                                                             |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Enne 1950. aastaid  | Valdav ahiküte, hoonepõhised keskküttesüsteemid ja lokaalkatlamajad.                                                                          |
| 1956–1959           | Tallinna kaugküttevõrgu rajamine Tallinna Elektri jaama soojuse baasil; esimene hoone ühendati 1959. aastal.                                  |
| 1960.–1970. aastad  | Mustamäe, Põhja-Tallinna, Lilleküla ja Lasnamäe kaugküttelehenduste arendamine; väikeste saastavate katlamajade järkjärguline likvideerimine. |
| 1990. aastad        | Vananenud taristu, madal efektiivsus ja suur sõltuvus masuudist ning maagaasist; Tallinnas ligikaudu 250 lokaal- ja grupikatlamaja.           |
| 2000. aastate algus | Linnaosade võrkude ühendamine ja lokaalsete katlamajade liitmine suurema linnavõrguga.                                                        |
| 2010                | Tallinna lääne- ja idapiirkonna kaugküttevõrkude ühendamine, mis suurendas süsteemi paindlikkust.                                             |
| 2010.–2020. aastad  | Biomassi, jäätmesoojuse ja koostootmisjaamade rolli kasv; torustike renoveerimine ja võrgu tõhususe parandamine.                              |
| 2022–2023           | Adveni Tallinna võrgupiirkondade liitmise ettevalmistamine Utilitase võrgupiirkonnaga ning Tallinna linna ja Utilitase ühisettevõtte loomine. |

### **1.1.3 Väikevõrkude probleemi käsitlemine**

Tallinna kaugkütte dekarboniseerimise probleem jaguneb kaheks omavahel seotud tasandiks. Esimene tasand on suur põhivõrk, mille tootmisportfell on mitmekesine ja kuhu on võimalik lisada suuremahulisi madala heitmega allikaid, näiteks reovee- ja mereveesoojuspumpasid, jäätmesoojust, biomassi ning salvestust. Teine tasand on väikesed või funktsionaalselt eraldiseisvad võrgud, mille tootmine võib sõltuda ühest fossiilkütusel katlamajast ja mille tarbijabaas on piiratud. [4], [5]

Suur võrk ja väike võrk erinevad mitte ainult mõõtme, vaid ka otsustusloogika poolest. Suures võrgus saab tootmist optimeerida mitme allika vahel ning üksikute tipukatelde tööaeg võib olla väike. Väikeses võrgus võib sama fossiilkütusel katel katta nii baas- kui tipukoormust, mistõttu kütusevahetus või tootmiseseadme asendamine mõjutab hindasid lõpptarbijale ja varustuskindlust. Väikese võrgu puhul on ka torustiku, juhtimise ja reservvõimsuse püsikulud suuremad ühe müüdud soojuse ühiku kohta [16], [17]. Ruumiliselt tähendab see, et väikevõrgu puhul on vajalik teada, kui kaugel on lähim suure võrgu toru, milline on võimalik ühenduskoridor, tarbijate paiknemine, milline on soojustihedus ning kas läheduses on madalatemperatuurilisi soojusallikaid [3], [18].

#### **Lahenduste otsimine**

Väikevõrkude dekarboniseerimise lahendamine peaks algama varajases ruumilises planeerimisfaasis. Esmalt tuleb võrrelda võrke heitme, müüdud soojuse, soojuskoormuse, võrgu pikkuse ja tarbijate paiknemise järgi. Seejärel tuleb hinnata ühenduse loomise võimalust suure võrguga ning paralleelselt ka lokaalseid alternatiive: mere- või reoveesoojuspump, tööstuslik heitsoojus, andmekeskuse heitsoojus, biomassi- või biogaasilahendus, elektrikatla ja soojussalvesti kombinatsioon või muu hübriidne lahendus. [19], [20], [21], [22]

Ruumianalüüsi roll on muuta see võrdlus läbipaistvaks. GIS-keskkonnas saab ühendada torustiku, hoonete, tarbijapunktide, soojuskoormuse, maakasutuse, kaitsealade, tehnovõrkude ja potentsiaalsete soojusallikate kihid. Mitmekriteeriumiline hindamine (MCDA) aitab seejärel paika seada esialgsed prioriteedid [23]. Väikevõrkude murede lahendamist tuleb käsitleda mitte ainult CO<sub>2</sub>-heitme vähendamisülesandena, vaid ka planeerimisülesandena, mille tulemus peab näitama võimalikke teekondi [3].



## 1.2 Väikesed kaugküttevõrgud

Väikeseks kaugküttevõrguks võib lugeda eraldiseisvat või suure linnavõrgu lähedal asuvat, kuid funktsionaalselt eraldi toimivat võrku, mille soojuskoormus, tarbijate arv ja tootmisportfell on piiratud ning mille otsused sõltuvad tugevalt ruumilisest paiknemisest. Võrk võib paikneda väikelinnas, linna äärealal, ülikoolilinnakus, tööstusalal, elamupiirkonnas või ajalooliselt eraldi kujunenud katlamaja teeninduspiirkonnas. Selle mõiste puhul ei ole määrav üks absoluutne piir, näiteks 1 MW, 10 MW või 100 GWh aastas. Väikese võrgu alla võib kuuluda nii mõne GWh aastase soojusmüügiga küla- või alevikuvõrk kui ka ligikaudu 50-100 GWh aastase tootmismahuga kohalik väikelinnaline süsteem. Olulisem on see, et võrk ei oma suure linnavõrgu mastaabiefekti, mitmekesisest tootmisportfelli ega ulatuslikku tarbijabaasi. [16], [17], [24]

Väikesed kaugküttesüsteemid on pahatihti suureks murekohaks Kesk- ja Ida-Euroopa väiksemates linnades. Leedus läbi viidud uurimuses valiti neli alla 40 000 elanikuga väikelinna, kus olemasolevate süsteemide tehniline, finantsiline ja majanduslik seisund oli erinev. Uuringu eesmärk oli vastata praktilisele küsimusele, kas olemasolevaid väikeseid kaugküttesüsteeme tuleks renoveerida või asendada individuaalsete kütelahendustega. Autorid rõhutavad, et selliste süsteemide edasine säilitamine sõltub konkreetse võrgu tehnilisest seisundist, soojusallika tüübist, torustiku olukorrast, kütusehindadest, tarbijate arvust ja kohaliku omavalitsuse rollist. [16]

Väikest kaugküttevõrku vaadeldakse tootmismahu ja tehnoloogiavaliku kaudu. Rootsi juhtumiuuring põhineb Ronneby kaugküttesüsteemi tegelikul koormuskõveral, kus aastane soojuse tootmine oli ligikaudu 107 GWh ja tippkoormus 34 MW. Märkimisväärne on see, et 2011. aasta statistika järgi üle kolme neljandiku kaugküttesüsteemidest aastase tootmismahuga alla 100 GWh. Väikesed võrgud ei ole haruldased erandid, vaid kaugkütteturu oluline osa, eriti piirkondades, kus kaugküte teenindab väikelinnu või kohalikke asulaid. [17]

Väikese võrgu mõiste võib taanduda veelgi lokaalsema näite poole. Taani Samsø saare kaugküttesüsteemide seas leidub Ballen-Brundby võrk, mis teenindab kahte küla ja ligikaudu 300 tarbijat. Võrgu põhiseadmena kasutati 1,6 MW põhukatelt ning süsteemi aastane tootmine oli mõne gigavatt-tunni suurusjärgus. Väikesed kaugküttevõrgud toimivad kogukondliku ja kohalikel ressurssidel põhineva energiasüsteemina. Otsused soojusallika, soojussalvestuse, soojuspumba või biomassi kasutamise kohta on seotud mitte ainult süsteemi tehnilise toimimisega, vaid ka kohaliku energiamajanduse,

ressursside kättesaadavuse ja kasutusvõimalustega. Iga väikese võrgu süsinikuheite vähendamise strateegiad lahendused on erinevad. [24]

### **1.2.1 Väikese kaugküttevõrgu määratlemise võimalikud tunnused**

Väikest kaugküttevõrku saab kirjeldada vähemalt nelja omavahel seotud tunnuse kaudu. Esimene tunnus on aastane soojuse tootmine või müük, tippkoormus, ühendatud tarbijate arv ja võrgu geograafiline ulatus. Teine tunnus on suhteline mastaap ehk see, kui suur on soojuskoormus võrgu pikkuse ja püsikulude suhtes. Väikese võrgu puhul võivad katlamaja, juhtimissüsteemi, hoolduse, personali, reservvõimsuse ja torustiku kulud jaguneda väiksema soojusmahu peale. [16]

Kolmas tunnus on tootmisportfelli lihtsus. Suurtes linnavõrkudes on sageli mitu baaskoormuse, tipukoormuse ja reservi tootmisüksust ning võimalik kasutada koostootmist, heitsoojust, jäätmepõletust, suursoojuspumpasid või soojussalvestust. Väikestes võrkudes on tootmisportfell sageli lihtsam: üks või mõni katel, piiratud reservvõimsus ning väiksem võimalus kombineerida eri tootmisviise, kuid väikese süsteemi puhul tuleb arvestada, et väiksem kogus paralleelselt kasutuselolevaid tehnoloogiaid võib olla hoopis majanduslikult sobivam. [17]

Neljas tunnus on otsuste tugev sõltuvus kohalikust ruumilisest ja institutsionaalsest kontekstist. Väikese võrgu säilitamine, renoveerimine või asendamine sõltub sellest, kus paiknevad tarbijad, milline on torustiku seisukord, kas läheduses on suurem kaugküttevõrk, millised on kohalikud kütuse- või heitsoojusallikad ning kas kohalikul omavalitsusel või võrku haldaval ettevõttel on olemas võimalused investeerimiseks. Leedus on väikeste süsteemide probleem eriti seotud tarbijate osalise lahkumise, madala seadmekasutuse ja kõrgete küttekuludega [16]. Samsø juhtumi korral on biomassivõrgud kogukondlikult rajatud ja võivad kitsalt ärimajanduslikult [24].

### **1.2.2 Väikese võrgu tehniline ja majanduslik eripära**

Väikese kaugküttevõrgu põhiprobleem on püsikulude ja investeeringute jaotumine väiksema soojusmahu peale. Katlamaja, pumplad, mõõtesüsteemid, juhtimine, hooldus ja torustik vajavad investeeringuid ka siis, kui tarbijaid on vähe. Kui osa tarbijaid lahkub võrgust või hoonete renoveerimine vähendab soojusvajadust, võib võrgu soojustihedus väheneda ning halvendada olemasoleva kaugküttevõrgu majanduslikku seisu, sest samad torud teenindavad väiksemat soojusmahtu. [16], [17], [24]

Kaugkütte soojuse tootmiskulu võib kasvada süsteemi mõõtme vähenedes, sest väike võrk ei tähenda ainult väiksemat nõudlust, vaid ka seda, et osa mastaabiefektist kaob. Väikestes süsteemides on vähem majanduslikult sobivaid tehnoloogiaid, sest eriinvesteeringud võivad väikese tootmismahu korral liiga suureks osutuda. Samal ajal ei tähenda see seda, et väike võrk on ilmtingimata ebaefektiivne, kombineeritud tehnoloogiaportfell võib vähendada tundlikkust kütusehinna muutuste suhtes ning parandada primaarenergia kasutust. [17]

Väikesed kaugküttevõrgud võivad tekitada tõsiseid majanduslikke probleeme, eriti Kesk- ja Ida-Euroopa ajaloolise taristuga asulates, kus plaanimajanduse ajal rajatud süsteemid on pärast turumajandusele üleminekut kaotanud osa tarbijatest. Osades Leedu väikelinnades on kaugküttega liitunud vaid 10–20% elumajadest ning maksimaalsed tippkoormused ei ületa sageli 50% paigaldatud tootmisvõimsusest, mistõttu on võrgud tundlikud suurte tarbijate lahkumise ja uute liitujate puudumise suhtes. Üledimensioneeritud katlamajad ja torustikud muutuvad majanduslikuks koormaks. Seetõttu tuleb lisaks kütuse vahetamisele hinnata ka seadmete tegelikku kasutust, reservvõimsuse vajadust, torustiku pikkust, tarbijate paiknemist ja soojuse müügi mahtu. [16]

### **1.3 Kaugkütte dekarboniseerimine ja taastuenergia**

Kaugkütte dekarboniseerimise kirjandus käsitleb kaugkütet üha enam osana laiemast energiasüsteemist, ei piirduta vaid torustikust ja katlamajast koosneva tehnilise lahendusega. Soojuse tootmine, elektrisüsteemi paindlikkus, soojussalvestus, hoonete renoveerimine, jäätmemajandus, reoveetaristu ja linnaplaneerimine moodustavad järjest enam omavahel seotud süsteemi. Väikeste kaugküttevõrkude puhul lokaalse võrgu otsused sõltuvad sageli mitte ainult kütusest, vaid sellest, millised soojusallikad ja tarbijad paiknevad mõnesaja meetri või mõne kilomeetri raadiuses [25].

Neljanda põlvkonna kaugkütte (4GDH) mõiste on oluline, sest väikeste Tallinna võrkude dekarboniseerimine ei pea tähendama ainult kütuse vahetamist samas katlamajas. Kui võrk jääb eraldiseisvaks, võib selle tulevik olla seotud madalama temperatuurigraafiku, lokaalse soojuspumba, soojussalvestuse ja tarbijate energiatõhususe parandamisega. Võrgu ühendamisel suure süsteemiga, võib see saada osa laiemast tootmisportfelist, kus biomass, jäätmed, suursoojuspumbad ja tipukoormuse katlad töötavad koos [26]. 4GDH lähenemine rõhutab, et tootmise dekarboniseerimine ja tarbimise vähendamine peavad liikuma paralleelselt. Hoonete renoveerimine vähendab soojuskoormust ja võib alandada vajalikku pealevoolutemperatuuri. See omakorda suurendab soojuspumpade

ja madalatemperatuuriliste soojusallikate kasutatavust. Väikeste võrkude puhul tuleb siiski arvestada, et liiga suur soojuskoormuse vähenemine võib muuta pika torustikuga võrgu majanduslikult nõrgemaks. [26]

Madalatemperatuurilise kaugkütte (LTDH) kasutuselevõtt on üks olulisemaid tehnilisi eeldusi, mis võimaldab väikestes võrkudes taastuv- ja heitsoojuse osakaalu suurendada. Tallinna Kopli uusarenduspiirkonna näitel käsitletakse kolme soojusvarustuse stsenaariumi: ühendamine olemasoleva kõrgetemperatuurilise kaugküttevõrguga temperatuurigraafikul 95/55 °C, väikese lokaalse gaasikatlamaajaga kaugküttevõrgu rajamine graafikul 80/40 °C ning lokaalse LTDH-võrgu rajamine graafikul 60/35 °C koos merevett kasutava suursoojuspumbaga. [26]

Olemasolevate võrkude puhul on madalatemperatuurilisele tööle üleminek keerulisem kui uusarenduspiirkondades. Peamiseks piiranguks on olemasolev taristu ja tarbijapoolsed kütteseadmed, mis on sageli projekteeritud kõrgematele temperatuuridele. Tänu sellele on uusarendustes, kus saab hoonete küttesüsteemid, soojussõlmed ja võrgu temperatuurirežiimi tervikuna kavandada, LTDH tehniliselt lihtsamini rakendatav. Olemasolevate väikeste Tallinna võrkude puhul tuleb madalama temperatuurigraafiku potentsiaali hinnata koos hoonete renoveerimise, soojussõlmede seisukorra ja tarbijate küttekehade võimekusega. [26]

Ühendamine suurema kaugküttevõrguga on sageli esimene loogiline dekarboniseerimisvariant, kui väike võrk paikneb füüsiliselt suure võrgu lähedal. Ühendamise eelis seisneb selles, et lokaalne fossiilkütusel põhinev tootmine saab asenduda suurema süsteemi tootmisportfelliga. Suures süsteemis on tavaliselt võimalik kasutada efektiivsemaid katlaid, koostootmisjaamu, taastuvaid kütuseid, jäätmesoojust, suursoojuspumpasid ja salvestust. Samuti võib suurem süsteem pakkuda kõrgemat varustuskindlust, sest tootmisvõimsused ja tipukoormuse katmine on hajutatud. Ühendamise puuduseks on ühendustorustiku investeeering, ehitusaeg, tänavaruumis tekkivad konfliktid ning võimalik vajadus rõhurežiimide ja temperatuurigraafikute ühtlustamiseks. Kui väike võrk asub hõreda hoonestusega piirkonnas ja ühendustoru oleks pikk, võib investeeeringu ühikukulu olla kõrge. Ühendusvariandi hindamisel tuleb käsitleda vähemalt kolme ruumilist näitajat: kaugus lähima põhivõrgu toruni, võimaliku torukoridori keerukus ning ühendatava võrgu lineaarne soojustihedus. [26]

Olemasolevate kaugküttevõrkude dekarboniseerimisel ei pruugi tootmisseadmete täielik asendamine olla majanduslikult otstarbekas. Olemasolevate kaugküttevõrkude

torustike eluiga võib ületada 30 aastat ning seetõttu on tootmisseadmete rekonstrueerimine ja optimeerimine oluline viis emissioonide vähendamiseks ilma kogu võrgutaristut välja vahetamata. Dekarboniseerimise lahendus peab arvestama korraga kapitalikuluseid, opereerimiskuluseid, CO<sub>2</sub>-kulu, võrgusiseseid soojuskaduseid, rõhukaduseid ja temperatuurirežiimi. [27]

Tulemused näitavad ka, et CO<sub>2</sub> hinna kasv nihutab optimaalset tootmisportfelli soojuspumpade suunas. Gaasi- või muu tipukoormuskatla roll võib alles jääda reservi ja lühiajaliste tippude katmiseks, samal ajal kui baaskoormus liigub madalama heitmega tehnoloogiatele. Tallinna väikeste võrkude kontekstis tähendab see, et realistlik üleminekutee ei pruugi olla fossiilse katlamaja kohene sulgemine, vaid rolli järkjärguline vähendamine. [27]

Sellest tulenevalt võib väikeste Tallinna kaugküttevõrkude taastuvenergiale üleminekut käsitleda mitmeastmelise planeerimisülesandena. Esimeses etapis tuleb hinnata võrgu tehnilist ja ruumilist lähteolukorda: soojuskoormust, lineaarset soojustihedust, torustiku seisukorda, kaugust suurest võrgust ja lähedal asuvaid taastuv- või heitsoojusallikaid. Teises etapis võrreldakse alternatiive: ühendamine suure kaugküttevõrguga, lokaalse madalatemperatuurilise võrgu arendamine, tootmisseadmete rekonstrueerimine või kombinatsioon nendest. Kolmandas etapis tuleb hinnata ülemineku ajastust, sest kõige väiksema riskiga lahendus võib olla järkjärguline lahendus, kus olemasolev fossiilkütusel toimiv katel säilib ajutiselt tipukoormuse ja varustuskindluse tagamiseks. [27]

### **1.3.1 Taastuvad kütused**

Biomass on Baltikumis ja Põhjamaades oluline kaugküttele dekarboniseerimise vahend, sest see on juhitav kütus ja sobib olemasolevate katelde ning koostootmisjaamade kasutusloogikaga. Samal ajal ei saa biomassi käsitleda piiramatult laiendatava lahendusena. [28] Euroopa Komisjoni Teadusuuringute Ühiskeskuse (JRC) raport rõhutab, et puidupõhise biomassi kasutamine energiaks on osa laiemast metsamajanduse ja bioressursside ringlusest. Raporti järgi moodustab Euroopa Liidu energiapuidu sisendist ligikaudu 49% sekundaarne puit ehk puidutööstuse kõrvalsaadused, koor ja taaskasutatud puit, vähemalt 37% primaarne puit ning ligikaudu 14% on statistikas liigitamata päritoluga. Seega energiasektor sõltub osaliselt samadest kõrvalsaadustest, mida kasutavad ka puidu- ja paberitööstus. Biomassi kasutuse laiendamisel võivad seetõttu tekkida konkurents ja hinnasurve, eriti juhul, kui soovitakse kasutada rohkem kvaliteetset või alternatiivsetes sektorites väärtuslikku puitressurssi. [28]

Biomassi kliimamõju käsitlemisel on oluline eristada katlamaja heitmeid ja maakasutuse süsinikubilanssi. JRC raporti järgi ei tähenda biomassi põletamisel rakendatav nullheitme käsitus energiasektoris, et biomassi kasutus oleks automaatselt süsinikuneutraalne. Biomassi süsinikumõju tuleb arvesse võtta maakasutust ja muutusi metsanduse sektoris ning see sõltub sellest, kas lisanduv raieaht, metsade süsinikuvaru ja taastumine jäävad kooskõlla kliimaeesmärkidega. [28] Kaugkütte seisukohalt on biomassi tugevuseks eelkõige selle juhitavus. Erinevalt päikese- ja tuuleenergiast saab biomassikatelt kasutada nii baaskoormuse kui ka tipukoormuse katmiseks. Põhja-Euroopa kontekstis on bioenergia aidanud kaugküttes kiiresti asendada fossiilkütuseid, kuid piiratud biomassiressurssi tuleks kasutada seal, kus selle süsteemne väärtus on suurim. [19]

Biomassil põhinevas väikeses kaugküttevõrgus ei pruugi täiendava taastuenergia lisamine automaatselt vähendada kulusid ega heitmeid. Uuring, kus modelleeriti Soome munitsipaalset kaugküttevõrku ning kus biomass kattis juba üle 90% soojusest tuvastas, et suveperioodil on võimalik saavutada nullheitmed 13,2% aastase päikese-soojuse osakaaluga, kuid see eeldas soojussalvesti installeerimist ja hoolikalt kavandatud integreerimisstrateegiat. Suuremad, 15-25% päikese-soojuse osakaalud suurendasid selles juhtumis hoopis kulusid ja heitmeid võrreldes lähteolukorraga. [19]

Biomassi saadavuspiirangute korral ei saa kliimaneutraalsuse saavutamine põhineda ainult bioenergia laiendamisel ning et energiaspektori dekarboniseerimine on selliste piirangute puhul jätkuvalt võimalik, kuid eeldab hoonefondi ja kaugküttetaristu energiatõhususe parandamist ning teiste taastuvate lahenduste, sh soojuspumpade ja päikeseenergia, ulatuslikumat kasutamist. Selline tee võib nõuda Läti näitel üle 326 miljoni euro lisainvesteeringuid. Biogaas ja biometaan võivad olla kaugküttes kasulikud eelkõige olemasoleva gaasitaristu, reservkatelde ja tipukoormuse katmise seisukohalt. Nende eelis on sarnasus maagaasiga kasutusloogikas – biometaani saab tehniliselt kasutada gaasivõrgus või gaasikateldes ilma kogu soojusvarustuse taristut ümber ehitamata. Samas on biogaasi ja biometaani kättesaadavus piiratud ning selle kasutus konkureerib transpordi, tööstuse ja muude sektoritega. Seetõttu on biogaas pigem täiendav või üleminekuline kütus olukordades, kus elektrifitseerimine, heitsoojus või ühendamine suure võrguga ei kata kogu koormust. [29]

### **1.3.2 Suursoojuspumbad ja madalatemperatuurilised soojusallikad**

Suursoojuspumbad on kaugkütte dekarboniseerimisel üha olulisem tehnoloogia, sest need võimaldavad tõsta madalatemperatuurilise soojuse kaugküttevõrgu jaoks sobivale temperatuurile. Soojusallikatena saab kasutada merevett, jõevett, järvevett, põhjavett, reovett, suitsugaaside kondenseerimissoojust, tööstuslikku heitsoojust, andmekeskuste jahutust, külmhoonete jääksoojust, maapõueenergiat ja välisõhku. Soojuspumba sobivus sõltub allika temperatuurist, vooluhulgast, kaugusest tarbijatest, elektri hinnast, vajaliku pealevoolutemperatuuri tasemest ning töörežiimist. Tänapäeval ei ole tehnoloogia enam katsetuslik nišilahendus. Euroopa linnades. Heat Roadmap Europe'i stsenaariumides nähakse kaugkütte osakaalu kasvu kuni umbes 50%-ni Euroopa soojusnõudlusest aastaks 2050 ning 25–30% sellest kaugküttest võiks olla kaetud suursoojuspumpadega. [20]

Tallinna puhul tehtud uuringud näidanud, et optimaalses lahenduses oleks Tallinnas võimalik integreerida umbes 122 MW soojuspumbavõimsust, kasutades reovett, jõe-, välisõhu-, mere- ja põhjavett [6]. Tallinna tingimustes võivad kaldast kaugemal paiknevad merevee soojuspumbad töötada aastaringselt hooajalise COP-ga umbes 3,5 ning anda ligikaudu 34% väiksema CO<sub>2</sub>-heitme kui elektrikatla sidumine [30]. Suured soojuspumbad võivad soodsas regulatiivses raamistikus katta Balti riikide kaugkütte nõudlusest kuni 50%, kuid võrreldes biomassiga kujuneb regulatsioon kriitiliseks edu- või läbikukkumisteguriks [25].

Reoveesoojuse kasutatavust Tallinna kontekstis täpsustab Balti pealinnade võrdlev uuring. Artiklis hinnati Tallinna, Riia ja Vilniuse puhastatud reovee jääksoojuse integreerimist kaugküttesüsteemi absorptsioonsoojuspumpade abil ning kasutati energia-, keskkonna-, majandus- ja sotsiaalseid näitajaid. Tallinna puhul oli puhastatud reovee keskmine vooluhulk 140 000 m<sup>3</sup> ööpäevas, potentsiaalseks soojusvõimsuseks hinnati 27 MW ning absorptsioonsoojuspumbaga toodetavaks soojuskoguseks 276 GWh aastas. Uuringus eeldati, et ühendus olemasoleva kaugküttevõrguga oleks ligikaudu 2,5 km ning reoveesoojuse osakaal kaugkütte tootmises võiks Tallinnas ulatuda 13,88%-ni. [31]

IEA soojuspumba tehnoloogiate raport rõhutab, et kaugküttevõrku integreeritud soojuspumbad täidavad korraga mitut rolli: need aitavad asendada fossiilkütuseid, kasutada madalatemperatuurilisi ja heitsoojusallikaid, vähendada võrgukadusid ning pakkuda elektrisüsteemile paindlikkust olukorras, kus elektritootmises suureneb tuule- ja päikeseenergia osakaal. Raporti järgi võimaldavad soojuspumbad kasutada madalaid,

alla 60 °C, ja ülimadalaid, alla 45 °C, kaugkütte temperatuuritasemeid ning vähendada sellega jaotusvõrgu soojuskadusid. [32]

### **Maapõueenergia**

Maapõueenergia ehk geotermaalenergia on üks võimalik madalatemperatuuriline soojusallikas, mille kasutamine kaugküttes eeldab tavaliselt soojuspumba rakendamist ühes puuraukude või -kaevudega. Sellise lahenduse efektiivsus sõltub soojuspumba kasutegurist (COP) ning võrgu temperatuurirežiimist [33]. Kaugkütte seisukohalt on maapõueenergia eelis selle kohalik ja suhteliselt stabiilne iseloom, kuid piiranguks on sageli kõrge alginvesteering, puurimistööde keerukus ning vajadus tagada, et puuraugust ammutatav soojusvõimsus oleks pikaajaliselt kestlik. [34].

Eestis on maapõueenergia kasutamist kaugkütte ja suuremate hoonete soojusvarustuse kontekstis katsetatud GEOENEST projekti raames. Projekti käigus rajati maasoojusenergia katsejaamad Taludevahe tänaval Tiskres asumis Tallinnas, Roosna-Allikul ja Arbaveres. Roosna-Allikul ühendati maasoojuspump olemasoleva kaugküttevõrguga, kus see töötab koos õlikatlaga ning varustab muu hulgas kohaliku lasteaia, põhikooli ja valla teeninduskeskuse hooneid. Arbaveres katsetatakse kesk-sügava puuraugu lahendust madalatemperatuurilise kaugkütte- ja jahutusvõrgu jaoks. Maapõueenergia kasutamine Eesti oludes ei piirdu üksikhoonetega, vaid võib olla osa väikese kaugküttevõrgu või lokaalse hübriidse soojusvarustussüsteemi dekarboniseerimisest. [35]

Tallinna väikeste kaugküttevõrkude seisukohalt on eriti oluline Tiskre asumi Taludevahe katsejaam. Tegemist on Tallinna territooriumil paikneva katseprojektiga, mille eesmärk on hinnata kesk-sügavast puuraugust saadava maapõueenergia tehnilist ja majanduslikku sobivust. Katsejaama jaoks puuriti 505 m sügavune soojuspuurauk, kuhu paigaldati topelt U-toru, ning süsteem ühendati 46 korteriga kortermaja küttevõrguga. Esimese kütteperioodi tulemuste põhjal tootis maasoojuspump 2024. aasta oktoobrist 2025. aasta maini ligikaudu 340 MWh soojusenergiat, mis kattis umbes 77% hoone kogu soojusenergia tarbimisest; keskmine kasutegur oli 3,6 ning maagaasi kasutus vähenes ligikaudu 210 MWh võrra. [35]

### **1.3.3 Heitsoojus ja sektoritevaheline lõimimine**

Heitsoojuse kasutamine on neljanda põlvkonna kaugkütte üks keskseid põhimõtteid. Linna sees tekib heitsoojust paljudest allikatest: tööstusprotsessidest, andmekeskustest, külmhoonetest, kaubanduskeskuste jahutussüsteemidest, jäähallidest, reoveest, elektrialajaamadest ning mõnel juhul ka elektriseadmete



jahutamisest. Heitsoojuse eelis on see, et energia on juba tekkinud ning ilma kasutuseta hajuks see keskkonda. Puuduseks on sageli madal temperatuur, kättesaadavus ja sõltuvus soojuse tootja põhiprotsessist [36]. Heitsoojuse kasutamine seob kaugkütte teiste linnaliste süsteemidega. Kaugküttevõrk võimaldab eri allikatest pärineva madalatemperatuurilise energia koondada. [25]

Linnaliste madalatemperatuuriliste soojusallikate kasutamiseks on esmalt vaja süsteemset kaardistamist. Potentsiaalsed allikad on võimalik jagada linnaliseks heitsoojuseks ja looduslikeks soojusallikateks ning selle põhjal hinnata iga allika puhul asukohta, temperatuuritaset, koormusprofiili, kättesaadavust, töökindlust, hooajalist ja ööpäevast muutlikkust ning andmete kvaliteeti [37]. Väikeste võrkude puhul võib heitsoojus olla eriti huvipakkuv siis, kui võrk on põhivõrgust kaugel, kuid lähedal paikneb mõni suur pideva koormusega objekt. Kui väike võrk asub näiteks tööstusala, sadama, kaubanduskeskuse, spordirajatise, veetaristu, elektrialajaama või andmekeskuse läheduses, tuleb neid objekte käsitleda potentsiaalsete soojusallikatenä. [21], [36]

Metoodiliselt lähenedes tuleb heitsoojuse sobivust hinnata kaugust potentsiaalsest allikast olemasoleva või kavandatava kaugküttetorustikuni. Teiseks tuleb hinnata allika eeldatavat temperatuuritaset ning seda, kas soojus on võimalik võrku anda otse soojusvaheti kaudu või on vaja soojuspumpa. Kolmandaks tuleb võrrelda allika koormusprofiili väikese võrgu soojusnõudlusega. Neljandaks tuleb arvestada allika ärilist ja institutsionaalset kindlust. [38]

### **1.3.4 Elektrikatlad ja soojussalvestus**

Elektrikatlad ja soojussalvestid on soojussüsteemi siduvad paindlikustehnoloogiad. Nende roll kaugküttes seisneb eelkõige selles, et soojuse tootmist saab nihutada ajas, kasutada madala või väga muutliku elektrihinna perioode ning vähendada fossiilsetel kütustel töötavate tipukatelde kasutust. Väikeste kaugküttevõrkude puhul käsitleme seda võimaliku abitehnoloogiana, mis võib toetada lokaalse soojuspumba, heitsoojuse, suure võrguga ühenduse või muu taastuva soojusallika tööd. [39]

Elektrikatla tehniline põhimõte on, et elektrienergia muundatakse soojuseks takistusliku kütteelemendi või elektroodkatla abil ning seadme soojuslik kasutegur tootmiskoha vaates kõrge, kuid süsteemi tasandil sõltub lahenduse kliimamõju sellest, millise elektritootmisega elektritarbimine ajaliselt seostub. Kui elektrikatelt kasutatakse madala hinnaga või taastuvelektri ülejäägi ajal koos soojussalvestiga, võib see aga

pakkuda kasulikku *power-to-heat* (P2H) ehk elektrist soojuse tootmise paindlikkust. [39]

Elektrikatlade üks peamisi eeliseid võrreldes paljude põletuspõhiste tehnoloogiatega on kiire juhitavus. Seade saab suhteliselt kiiresti sisse ja välja lülitada ning sobib paremini lühiajalise paindlikkuse pakkumiseks kui aeglasema dünaamikaga suur soojuspump või biomassikatel. Elektrikatlade võivad pakkuda paindlikkust ka sagedusteenuste ja tasakaalustamisturgude jaoks, sest nende tarbimist saab suurendada ajal, mil elektrisüsteemis on ületootmine või madal hind [39]. Soojussalvestus (TES) võimaldab kaugküttesüsteemil toime tulla soojusnõudluse, tootmise ja energiahindade dünaamilise muutumisega. TES-i saab käsitleda kui puhvrit nõudluse ja tootmise vahel, salvesti abil saab kasutada ülejäävat soojust või madala hinnaga toodetud soojust hiljem, kui nõudlus või hind on suurem. See on oluline taastuvenergia, heitsoojuse, koostootmise, soojuspumpade ja elektrikateldega süsteemides, sest kõigi nende puhul võib parim tootmishetk erineda tegelikust soojuse tarbimise hetkest. [40]

Soojussalvesti asukoht võib olla tsentraalne, hajutatud või paikneda tarbija poolel. Tsentraalne salvesti asub tootmisüksuse või põhivõrgu lähedal ning sobib suurema süsteemi töö optimeerimiseks. Planeerimisvaates tuleb elektrikatlade ja soojussalvestust hinnata koos teiste alternatiividega. Kui väike võrk asub suure kaugküttevõrgu lähedal, võib ühendamine anda suurema süsteemse kasu kui eraldi elektrikatlade rajamine. Kui lähedal on reovesi, meri, andmekeskus või muu madalatemperatuuriline soojusallikas, võib salvesti toetada soojuspumbalahendust. [22], [40]

## **1.4 Väikeste võrkude ümberkujundamise spetsiifika**

Väikeste linnade ja maapiirkondade kaugkütte üleminek fossiilkütustelt taastuvatele või madala süsinikuheitmega lahendustele erineb suurte linnavõrkude dekarboniseerimisest seetõttu, et suures linnavõrgus on enamasti olemas tihe tarbijabaas, mitmekesine tootmisportfell, suurem reservvõimsus ning parem võimalus siduda võrku suured taastuvad või jääksoojuse allikad [25], [26]. Väiksemas asulas on otsustusruum kitsam: soojuskoormus on väiksem, torustiku pikkus tarbitud soojuse suhtes sageli suurem, tarbijate arv piiratud ning üks investeering võib määrata kogu võrgu hinnataseme ja tehnoloogilise suuna pikaks ajaks. [41].

### **1.4.1 Eesti kogemus: piirkondlik planeerimine ja tõhusa kaugkütte raamistik**

Eesti on väikeste ja keskmiste kaugküttevõrkude käsitlemiseks hea näide, sest kaugküte on riigis laialt levinud ning võrgud paiknevad nii suuremates linnades kui ka väiksemates asulates. Eesti kaugküttesektori arendamine on oluline riiklike kliima- ja energiaeemärkide saavutamiseks, mis tähendab et vähendada tuleb võrgukadusid, suurendama taastuvate ja heitsoojusallikate osakaalu ning integreerima salvestust ja nutikaid juhtimislahendusi. Eesti kaugküttevõrgud ei ole ühetaolised. 146. kaugküttepiirkonna seast, mis katsid umbes 85% Eesti kaugkütte soojuse tootmisest; oli 40 võrgu pikkus alla 1000 m, 85 võrgu pikkus 1000-10 000 m ja 21 võrgu pikkus üle 10 000 m. Ülemineku küsimus ei puuduta ainult suuri linnavõrke, vaid väga suurt hulka väiksemaid piirkondlikke süsteeme. [13]

Eestis on see oluline ka selle pärast, et kaugkütte üleminek on seotud õigusliku ja tarbijapõhise raamistikuga. Eesti Jõujaamade ja Kaugkütte Ühingu ning Tallinna Tehnikaülikooli koostöös oli välja töötatud tõhusa kaugkütte märgise metoodika, mille märgis tugineb Euroopa Liidu energiatõhususe direktiivi määratlusele – kaugküttesüsteem on tõhus, kui see kasutab vähemalt 50% taastuenergiat, 50% heitsoojust, 75% koostoodetud soojust või 50% nende kombinatsiooni. [14]

Tõhusa kaugkütte märgis loob Eestis ka praktilise stiimuli üleminekuks, sest märgise saanud kaugküttevõrgule rakendub hoonete energiatõhususe arvutustes madalam primaarenergiategur (PEF). Selle järgi on tõhusa kaugkütte PEF väärtus 0,65, samal ajal kui mittetõhusa oma on 0,9; seega on vahe ligikaudu 28%. Kaugküttevõrgu dekarboniseerimine ei mõjuta üksnes katlamaja heitmeid, vaid ka hoonete energiatõhususe arvestust, uute hoonete planeerimist ja kinnisvaraarendajate valikuid. [14]

#### **Soojuspumbad maapiirkondlikes kaugküttevõrkudes**

Soojuspumpasid Eesti maapiirkondades asuvates kaugküttevõrkude põhiliste soojusenergiaallikate näol on samuti uuritud, tuues välja, et Eestis katab biomass suure osa kaugkütte soojusvajadusest, kuid süsinikumahukaid kütuseid kasutatakse endiselt tipukoormuse ja madalama koormusega perioodide katmiseks. Soojuspumbad võivad väiksemates asulates olla sobiv lahendus, kuna seal on sageli rohkem vaba maad seadmete ja maakontuuri paigaldamiseks ning läheduses võib leiduda madalatemperatuurilisi soojusallikaid. Samas tuleb arvestada, et soojuspumpade kasutuselevõtt eeldab suuremat alginvesteeringut kui gaasi-, biomassi- või elektrikatelde rajamine. [42]

Eestis on ka reaalseid väikese kaugküttevõrgu soojuspumba näiteid nagu Palamuse, Kaarepere ja Kiikla. Palamusel on kaks väikest eraldiseisvat kaugküttevõrku, millest üks varustab kooli ja selle abihooneid ning teine seitset erahoonet. Mõlemad kasutavad maasoojuspumpasid ja nende aastane soojustarbimine on vastavalt ligikaudu 830 MWh ja 750 MWh. Kaareperes varustab maasoojuspump kuut erahoonet ja lasteaeda, aastase tarbimisega ligikaudu 730 MWh. Kiikla võrgus katab soojusvajadust 400 kW soojuspump, mis kasutab lähedal asuva kaevanduse vett ning mille aastane soojustarbimine on ligikaudu 530 MWh. Need näited on väikeste linnade ja asulate üleminekute käsitlemisel olulised, sest need näitavad, et dekarboniseerimine ei pea alati tähendama biomassi katlamaja rajamist; lokaalne madalatemperatuuriline allikas võib teatud tingimustel olla sobivam [42].

Soojuspumpade sobivus sõltub aga süsteemi suurusest ja investeeringutoetusest. Eesti maapiirkonna kaugküttevõrgud on võimalik suuruse järgi gruppidesse jagada ning võrrelda kahte lahendust: biomassikatel koos soojuspumbaga ning ainult soojuspumbal põhinev lahendus. Uuringu tulemuste järgi on väiksemates võrkudes maasoojuspumbad majanduslikult soodsamad kui pinna- või reoveesoojuspumbad, samas kui suuremates võrkudes muutub erinevus soojusallika tüüpide vahel väiksemaks. Tarbijahinna seisukohast osutus kogu nõudluse katmine soojuspumbaga soodsamaks juhul, kui olemasolevad katlad tuleb niikuinii asendada. Investeeringutoetuse mõju on eriti suur väikestes võrkudes: 50% investeeringutoetus võib vähendada tarbijahinda kuni 31%, samal ajal kui suuremates võrkudes on mõju väiksem. [42]

### **1.4.2 Üleminekute tüüpilised etapid**

Üks põhietappidest on olemasoleva olukorra kaardistamine. See hõlmab kütusesegu, tarbijate arvu, aastase müügi, torustiku pikkuse, võrgukadude, katlamaja vanuse, tipukoormuse ja varuvõimsuse hindamist. Võrreldavate andmeteta ei ole võimalik hinnata, millised piirkonnad vajavad torustiku renoveerimist, millised tootmise muutust ja millised tarbijate lisamist. Samuti on oluline nõudluse ja võrgu tuleviku hindamine. Hoonete renoveerimine vähendab soojusvajadust, kuid võib kaugküttevõrgu majandamist halvendada, kui tarbijate arv ei kasva ja püsikulud peaksid jaotuma väiksema müügi mahu peale. [13]

Olulisel kohal on ka kohalike ressursside hindamine. Bioenergia sobib sageli piirkondadesse, kus ressurss on lähedal ja logistika korraldatav, kuid selle kestlikkus ja hind sõltuvad kohalikust tarneahelast. Soojuspumbad sobivad juhul, kui on kättesaadav madalatemperatuuriline soojusallikas ja elektrivõrk suudab lisakoormust kanda [42]. Päikesesoojus võib aidata vähendada suvist fossiilkütuse või biomassi kasutust, kuid

selle lisamine vajab salvestust ja töörežiimi kavandamist [19]. Heitsoojus ja reoveesoojus on eriti atraktiivsed juhul, kui allikas paikneb tarbijate lähedal ja selle temperatuuritase sobib kaugküttevõrgu temperatuurirežiimiga [43].

Tasub ka arvestada sellega, et väikelinnal ei pruugi olla võimalik teha korraga täielikku üleminekut, mistõttu on mõistlik järk-järguline üleminekuprotsess. Eialgu tasub piirduda torustiku renoveerimise ja kadude vähendamisega ning alles seejärel hakata vähendama sõltuvust fossiilsetest kütustest. Isegi kõrge taastuenergia osakaaluga süsteemis võib viimasest fossiilkütuse osast loobumine olla tehniliselt ja majanduslikult keeruline, mistõttu tuleb keskenduda tegelikule heitme vähenemisele. [19]

### **1.4.3 Väikevõrgud suurvõrkude kõrval**

Kuigi Tallinn ei ole väikelinn, käituvad linna territooriumil paiknevad väiksemad võrgud suures osas sarnaselt ühe väikelinna kaugküttevõrguga: Tarbijate arv neis on piiratud, tootmisportfell lihtne, maagaasi osakaal suur ning ühendus suurema süsteemiga võib olla ruumiliselt võimalik, kuid ei pruugi olla majanduslikult otstarbekas. Selliste võrkude puhul ei ole mõistlik eeldada ühte universaalset lahendust, mõnes võrgus võib parim üleminek olla ühendamine suurema võrguga, mõnes lokaalne soojuspump, mõnes mängib aga suuremat rolli biomass või biogaas. Samuti võib mõnes piirkonnas osutada kasulikuks soojussalvestuse või elektrikatla lisamine paindlikkuse suurendamiseks.

Otsustamisel tuleb arvesse võtta vähemalt nelja aspekti: olemasoleva võrgu tehnilist seisukorda, soojuskoormuse ruumilist ja lineaarset tihedust, kohalike taastuv- või heitsoojusallikate kättesaadavust ning võimalikku ühendamist suurema kaugküttevõrguga. Neid tegureid koos hinnates saab vältida lihtsustatud järeldusi, nagu tuleks kõik väikesed võrgud tingimata ühendada, sulgeda või asendada ühe kindla tehnoloogiaga.

### **Väikeste eraldiseisvate võrkude ühendamine suuremaks süsteemiks**

Väikeste kaugküttevõrkude ühendamine suurema või ülelinnalise võrguga on ruumilise planeerimise seisukohalt eraldi oluline teema, sest sellisel juhul ei kavandata ainult uusi tarbijaühendusi, vaid muudetakse soojusvarustuse süsteemset ülesehitust. Ühendamisega võib väike fossiilkütusel põhinev katlamaja kaotada baaskoormuse rolli või jääda tipukoormuse ja reservi katmiseks, samal ajal kui soojus tuleb suuremast tootmisportfellist. [44]

Uuringus, mis käsitles Taani Sønderborgi omavalitsuses viie eraldiseisva kaugküttevõrgu järkjärgulist ühendamist, kasutati tunnipõhise resolutsiooniga

lineaarset optimeerimismudelit ning juhtumiuuringus hinnati erinevaid ühendusjärjekordi ja tööstusliku heitsoojuse kasutamise mõju. 2013. aasta võrdlussüsteemis osutus kaks neljast ühendusest majanduslikult tasuvaks. Tuleviku energiasüsteemi 2029. aasta stsenaariumis vähendas täielik ühendamine primaarenergia vajadust 9,5%, CO<sub>2</sub>-heitmeid 11,1% ja võrgukulusid 6,3%. Tööstusliku heitsoojuse lisamine täielikult ühendatud võrgule vähendas primaarenergia vajadust veel 3%, CO<sub>2</sub>-heitmeid 2,2% ja süsteemikulusid 1,3%. Ühendamise tasuvus sõltub mitte ainult toru pikkusest, vaid ka ühendatavate võrkude senistest tootmisportfellidest. Mõni ühendus, mis tänases energiasüsteemis ei näi piisavalt tasuv, võib muutuda kasulikuks olukorras, kus suureneb taastuvelektri osakaal, lisanduvad uued paindlikustehnoloogiad või muutuvad kütuse- ja CO<sub>2</sub>-hinnad. [44]

### **TalTechi linnaku ühendamine linna kaugküttevõrguga**

2022. aastal liitus Tallinna kaugküttevõrguga Tallinna Tehnikaülikool ning mille kontekstis valmis asjakohane uuring, kus analüüsiti ülikooli linnaku üleminekut lokaalselt gaasikatlalt linnaülesele võrgule. Linnakus on 26 hoonet, millest osa oli juba ühendatud Tallinna kaugküttevõrku ja osa paiknes TalTechi enda lokaalses gaasikatlaga võrgus. Uuringus võrreldi referentslahendust kahe ühendusstsenaariumiga: tavapärane ühendus kõrgetemperatuurilise linna kaugküttevõrguga ning madalatemperatuuriline energiakaskaad, kus kasutatakse linna võrgu tagasivoolu soojust ja vajadusel tagatakse kõrgem temperatuur varuühendusega. [41]

Tehnikaülikooli juhtum on väikeste võrkude ühendamise seisukohalt väärtuslik, sest see sarnaneb Tallinna väikeste lokaalsete kaugküttevõrkude probleemile. Lokaalne võrk on olemas, osa torustikku saab taaskasutada ning kas gaasikatla kütus asendada, või siduda lokaalne võrk suurema linnasüsteemiga. Uuringu kohaselt oli kohaliku võrgu aastane soojusnõudlus 13 068 MWh ning olemasoleva torustiku kasutamine madalatemperatuurilise alavõrguna võimaldas vähendada investeringuvajadust. Tulemuste järgi vähendanuks madalatemperatuuriline kaskaadühendus CO<sub>2</sub>-heitmeid 955 tonni võrra, tavapärase kõrgetemperatuurilise ühenduse puhul aga 765 tonni võrra. [41]

TalTechi näide toob esile, et ühendamine ei pea alati tähendama väikese võrgu täielikku kadumist. Mõnel juhul võib olemasolev lokaalne torustik jääda kasutusse alavõrguna, mille soojusallikaks on suurem linnavõrk. Selline lahendus on ruumiliselt atraktiivne siis, kui lokaalne võrk on kompaktne, torustiku seisukord võimaldab seda kasutada ning läheduses on suure võrguga sobiv ühenduspunkt. Uuring näitab, et madalam temperatuurirežiim võib anda täiendavat süsteemset kasu, vähendades soojuskadusid ja parandades suurema võrgu tagasivoolutemperatuuri. See on oluline ka Tallinna

väikeste võrkude analüüsis: liitmist ei tule vaadelda ainult kõrgetemperatuurilise ühendusena, vaid hinnata tuleb ka alavõrgu, tagasivoolu kasutamise ja kaskaadlahenduste võimalust. [41]

## **1.5 Ruumiline planeerimine kaugküttes**

Kaugküte on ruumiliselt seotud energiataristu: selle toimivus sõltub mitte ainult tootmistehnoloogiast, vaid ka sellest, kus paiknevad tarbijad, olemasolevad torustikud, võimalikud ühenduskoridorid ja madalatemperatuurilised või taastuvad soojusallikad. Väikeste kaugküttevõrkude dekarboniseerimist ei saa käsitleda üksnes katlamaja kütusevahetusena. Sama, fossiilsel kütusel töötav väike võrk võib olla ühes asukohas mõistlik ühendada suurema linnavõrguga, teises asukohas asendada lokaalse soojuspumba ja salvestusega ning kolmandas asukohas vajada põhjalikumalt hinnangut, kas kaugkütte säilitamine on üldse majanduslikult ja tehniliselt põhjendatud. [45]

Kaugkütte ruumilise planeerimise kirjanduses korduvad kolm põhilist analüüsitasandit. Esiteks hinnatakse soojusnõudlust ja selle tihedust, et eristada kaugküttele sobivamaid ja nõrgemaid piirkondi. Teiseks võrreldakse olemasoleva või kavandatava torustiku geomeetriat, ühenduste pikkust ja võimalikke trassikoridore, sest suure osa võrguinvesteeringust moodustavad torustiku rajamise kulud. Kolmandaks hinnatakse soojusallikate paiknemist. [46], [47]

### **1.5.1 GIS kui kaugkütte ruumilise planeerimise töövahend**

GIS ehk geoinfosüsteem võimaldab koguda, hallata, analüüsida ja visualiseerida ruumiandmeid. Kaugkütte planeerimisel on GIS väärtuslik, kuna peamised otsused on asukohapõhised: hooned, torustikud, katlamajad, soojusallikad, tänavad, kinnistud, kaitsealad ja tehnilised piirangud paiknevad konkreetsetes ruumis ning nendevahelised kaugused ja kattuvused mõjutavad otsust otseselt. [18]

ArcGIS Pro on Esri arvutipõhine GIS-tarkvara, mis võimaldab koostada kaarte, hallata ruumiandmeid, teha geotöötlust, analüüsida 2D, 3D ja ajakomponendiga andmeid ning jagada tulemusi ArcGIS Online või ArcGIS Enterprise keskkondade kaudu. ArcGIS Pro on töö teostamiseks sobiv vahend, sest see võimaldab ühendada erineva päritoluga andmeid: kaugküttetrassid, tarbijate asukohad, hooned, tootmisüksused, katastriüksused, tänavavõrk, kaitsealad ja potentsiaalsed soojusallikad. Kaugkütte ruumianalüüsis on ArcGIS Pro abil võimalik arvutada kaugusi, luua puhvraid, teha kattuvusanalüüsi, hinnata trassikoridoride teostatavust, liita tabelandmeid ruumiobjektidega ning visualiseerida võrkude prioriteetsust. Näiteks saab iga

väikevõrgu kohta hinnata lähima suure võrgu toru kaugust, mere või reoveetaristu lähedust, tarbijate koondumist, lineaarset soojustihedust ning ruumilisi välistusi, mis mõjutavad tootmisüksuse või ühendustoru rajamist. [48]

GIS-is sisaldab iga punkt, objekt või kiht ruumilise asukoha kõrval ka kirjeldavat informatsiooni, mida saab eraldi vaadata ja analüüsida. GIS-i oluline eelis on ka analüüsi läbipaistvus. Kui otsustusmudeli sisendkihid ja kaalud on dokumenteeritud, on võimalik selgitada, miks üks võrk saab kõrgema prioriteedi ühendamiseks, samas kui teise puhul on otstarbekam analüüsida lokaalset soojuspumba lahendust. See on tähtis linnaplaneerimises, kus otsused mõjutavad tänavaruumi, kinnistuid, tarbijaid ja investeeringute ajastust. [23]

### **Vitoria-Gasteizi ja Gaziantepi juhtumiuuringud**

Vitoria-Gasteizi juhtumiuuringus, kus rakendati GIS-i, hoonete andmete, tööstusallikaid ja teedevõrgu töötlemiseks, et kavandada kaugküttevõrke tööstusliku heitsoojuse kasutamiseks olemasolevas linnakeskkonnas. Metoodikas jaotatakse analüüsiala puhvriteks ja ruudustikeks, hinnatakse ühendatavaid hooneid ning kasutatakse marsruutimisalgoritme torustiku võimaliku kulgemise määramiseks. Uuringus saadi erinevad võrgukonfiguratsioonid pikkusega ligikaudu 8-27 km ning autorid rõhutavad, et keskmine lineaarne energiatihedus ja torustiku pikkus on majandusliku teostatavuse kriitilised tegurid. [47]

GIS-i saab kasutada ka taastuvate soojusallikate ja kaugkütte koostoime hindamiseks. Gaziantepi juhtumiuuringus kasutasid soojusnõudluse prognoosimiseks masinõpet ning sobivate kaugküttepiirkondade hindamiseks GIS-i. Uuringu fookus oli päikesesoojuse ja soojuspumpade kombineerimisel, kuid töö metoodiline järelendus on laiem – ruumiline planeerimine saab siduda tulevase soojusnõudluse, kohaliku ressursi ja tehnoloogilise lahenduse. [49]

### **Kombineeritud ruumi- ja energiaplaneerimine**

Kaugküttevõrgu sobivus sõltub mitmest ruumilisest tegurist, mida ei saa taandada ühele tihedusnäitajale. Analüüsida tuleb kaugkütte keskkondlikku ja majanduslikku teostatavust kombineeritud ruumi- ja energiaplaneerimise vaates mis tõstatavad esile selle, et olulised tegurid on linnaruumi funktsioonide segunemine, tihendamise ja laiendamise potentsiaal, hoonete, elanike ja töökohtade tihedus, hoonetüüp, soojusisolatsiooni potentsiaal ning kasutatav soojusallikas. Kaugküte ei ole energiavarustuse küsimus, vaid osa linnaruumi kujundamisest ning planeeringud, mis soodustavad hoonestuse tihendamist ja funktsioonide segunemist, võivad parandada kaugkütte pikaajalist tasuvust [50]. Integreeritud planeerimise vaatest tuleb vältida



paralleelseid ja omavahel konkureerivaid taristuid. Kui samas piirkonnas hoitakse korraga üleval kaugküttevõrku ja gaasivõrku ning tarbijad jagunevad kahe süsteemi vahel, väheneb kaugkütte koormus ja tõusevad ühikukulud. Juhtumiuuringutes toodi välja see, et uuritud piirkondades ei esinenud samaaegselt konkureerivat gaasi- ja kaugküttetaristut [51].

### **1.5.2 Ruumilise planeerimise alusparameetrid**

#### **Soojusnõudluse ruumiline tihedus**

Soojusnõudluse ruumiline tihedus kirjeldab, kui palju soojust tarbitakse pinnaühiku kohta. Tiheda korterelamupiirkonna kaugküttepotsentsiaal on üldjuhul suurem kui hajusa väikeelamupiirkonna potsentsiaal, sest torustiku pikkus ühe tarbija või MWh kohta on väiksem. Ruumilise tiheduse kaart aitab leida piirkonnad, kus kaugkütte laiendamine või ühendamine on tõenäoliselt mõistlikum [52].

#### **Lineaarne soojustihedus**

Lineaarne soojustihedus arvutatakse tavaliselt müüdud soojuse ja torustiku pikkuse suhtena. See on väikevõrkude võrdlemisel üks olulisemaid näitajaid, sest see seob tarbimismahu olemasoleva taristu pikkusega. Madal lineaarne soojustihedus ei tähenda automaatselt, et võrk tuleb sulgeda, kuid see on signaal, et torustiku renoveerimist, ühendamist või jätkamist tuleb põhjalikult põhjendada [1].

#### **Kaugus suurest võrgust ja ühenduskoridori teostatavus**

Kaugus suurest võrgust on ühendamisvariandi esmane ruumiline parameeter, kuid pelgalt linnulennuline kaugus ei ole piisav. Vaja on hinnata realistlikku ühenduskoridori piki tänavaid või muid tehniliselt sobivaid trasse, arvestades olemasolevaid maa-aluseid kommunikatsioone, kinnistupiire, haljastust, liikluskorraldust ja ehituslikke piiranguid. GIS-is saab võrrelda linnulennulist kaugust, tänavavõrgupõhist kaugust ja võimalikke alternatiivseid koridore. [3]

#### **Soojusallikate lähedus ja potsentsiaal**

Potsentsiaalsete soojusallikate lähedus on lokaalse lahenduse võtmeparameeter. Mere, reovee, tööstuse, andmekeskuse või muu heitsoojusallika lähedus ei tähenda veel automaatselt kasutatavust, kuid annab aluse detailsemaks inventuuriks. Lisaks kaugusele tuleb hinnata temperatuuri, vooluhulka, aastaajalist profiili, omandit, lubasid ja ühendusvõimalust. [38]

#### **Heitmeintensiivsus ja dekarboniseerimise prioriteetsus**

Heitmeintensiivsus ehk CO<sub>2</sub>-heitmed müüdud soojuse ühiku kohta aitab hinnata, millised võrgud võivad anda kiireima kliimakasu. Kõrge heitmeintensiivsusega võrk võib saada kõrgema prioriteedi isegi siis, kui selle soojusmaht ei ole väga suur. Samas ei saa

heitmeintensiivsus olla ainus otsustuskriteerium, sest ruumiline teostatavus ja lahenduse hind võivad määrata, kas heitme vähendamine on praktiliselt saavutatav. [1]

### Ruumilised piirangud ja maa kasutatavus

Tootmisüksuse, soojuspumba, pumpla, salvesti või uue torustiku rajamine sõltub maa kasutatavusest. Kaitsealad, miljööväärtuslikud alad, maaomand, detailplaneeringud, tehnovõrkude kaitsevööndid ja kitsendused võivad muuta muidu tehniliselt sobiva lahenduse keeruliseks. Seetõttu peaks väikevõrgu sobivusanalüüs sisaldama kitsenduste ja planeeringuliste piirangute GIS-kihte. [53]

### Andmete kvaliteet ja ajakohasus

Ruumilise planeerimise tulemuse usaldusväärsus sõltub andmete kvaliteedist. Ebatäpne torustiku asukoht, üldistatud tarbimisandmed või puudulik info soojusallikate kohta võib muuta sobivusanalüüsi tulemust. Seetõttu tuleb GIS-mudeli puhul dokumenteerida andmeallikad, ajakohasus, ruumiline täpsus ja oletused ning eristada kindlaid andmeid hinnangulistest sisenditest. [23]

Tabel 1.2 Ruumilise planeerimise alusparameetrid väikevõrkude hindamisel

| Parameeter                       | Mida kirjeldab                                      | Miks oluline                                              |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Soojusnõudluse ruumiline tihedus | Soojusvajadus pinnaühiku kohta                      | Näitab kaugkütte ruumilist sobivust                       |
| Lineaarne soojustihedus          | Müüdud soojus torustiku meetri kohta                | Seob võrgu pikkuse, müüginahku ja kuluriski               |
| Kaugus suurest võrgust           | Ühendusvõimaluse ruumiline lähtepunkt               | Mõjutab ühendustoru investeeringut ja ehitusriskid        |
| Soojusallikate lähedus           | Meri, reovesi, tööstus, andmekeskused jm            | Määrab lokaalsete madala heitmega lahenduste potentsiaali |
| Ruumilised piirangud             | Kitsendused, kaitsealad, kinnistud, tehnovõrgud     | Mõjutab trasside ja tootmisüksuste rajatavust             |
| Heitmeintensiivsus               | CO <sub>2</sub> -heitmed müüdud soojuse ühiku kohta | Aitab prioriseerida kliimakasu                            |
| Andmete kvaliteet                | Ajakohasust, ruumilist täpsust                      | Andmete usaldusväärsus ja tõsiseltvõetavus                |

### 1.5.3 Mitme-kriteeriumi hindamise rakendamine GIS-is

Mitme-kriteeriumi hindamine ehk MCDA on ruumilise planeerimise jaoks sobiv metoodiline raamistik, sest paljud planeerimisülesanded ei sõltu ainult ühest näitajast, vaid mitmest samaaegselt hinnatavast tehnilisest, majanduslikust, keskkonnavalasest ja ruumilisest kriteeriumist. GIS-i ja MCDA ühendamisel saab ruumiandmed, kriteeriumite

väärtused ja otsustaja eelistused koondada ühtseks hindamismudeliks, mille tulemuseks võib olla sobivuskaart, alternatiivide pingerida või stsenaariumite võrdlus. See on kasulik varajases planeerimisfaasis, kus eesmärk ei ole veel lõpliku projekteerimisotsuse tegemine, vaid kõige perspektiivsemate lahenduste eristamine edasiseks analüüsiks. [53]

GIS-MCDA protsess algab otsustusprobleemi sõnastamisest ning alternatiivide ja kriteeriumite määramisest. Alternatiivideks võivad olla näiteks väikese kaugküttevõrgu ühendamine suure võrguga, lokaalse suursoojuspumba rajamine, heitsoojuse kasutamine või olemasoleva tootmisüksuse rekonstrueerimine. Kriteeriumid võivad omakorda kirjeldada nii mõõdetavaid tehnilisi näitajaid kui ka ruumilisi piiranguid: kaugus suurest kaugküttevõrgust, lineaarne soojustihedus, lähedus reovee-, merevee- või heitsoojusallikale, torukoridori keerukus, kaitse- ja piirangualade kattumine, heitme vähendamise potentsiaal ning tehnorajatiste asukoht. GIS-i roll on siduda need näitajad konkreetse asukohaga ning võimaldada nende arvutamist kaugusanalüüsi, kihtanalüüsi, tsoonianalüüsi, võrgupõhise kauguse või raster- ja vektorandmete kombineerimise kaudu. [53]

Kuna kriteeriumid on tavaliselt eri ühikutes, tuleb need enne koondhindamist viia võrreldavale skaalale. Skaleerimisel tuleb arvestada iga kriteeriumi mõju suunda: mõne näitaja puhul annab väiksem väärtus kõrgema sobivus hinnangu/skoori, näiteks kauguse või investeeringukulu korral, samas kui teiste näitajate puhul annab kõrgem väärtus kõrgema sobivushinnangu/skoori, näiteks lineaarse soojustiheduse või heitme vähendamise potentsiaali korral. Pärast skaleerimist määratakse kriteeriumitele kaalud, mis väljendavad nende suhtelist olulisust. Üks levinud viis kaalude määramiseks on kasutada analüütilist hierarhilist mudelit ehk AHP-d, kus kriteeriume võrreldakse paarikaupa ning kaalud tuletatakse suhteliste eelistuste põhjal. AHP eelis on see, et see sunnib otsustajat kriteeriumite olulisust süstemaatiliselt põhjendama ning võimaldab kontrollida hinnangute kooskõllalisust. [54]

Kõige lihtsam GIS-is rakendatav koondamismeetod on kaalutud lineaarne kombinatsioon, kus iga kriteeriumi standardiseeritud skoor korrutatakse selle kaaluga ning tulemused liidetakse. Selline meetod sobib hästi esialgseks sobivusanalüüsiks, sest see on läbipaistev, kergesti kontrollitav ja GIS-tarkvaras tehniliselt lihtsasti teostatav. Samas tuleb arvestada, et kaalutud summa eeldab osalist kompenseeritavust: ühe kriteeriumi halb väärtus võib olla tasakaalustatud teise kriteeriumi hea väärtusega. Seetõttu on planeerimisülesannetes mõistlik eristada pehmeid hindamiskriteeriume ja välistavaid tingimusi. Näiteks kaitseala, tehnilise ligipääsu puudumine või soojusallika

ebapiisav võimsus võib olla jah/ei tingimus, mida ei tohiks lihtsalt madala skoorina teiste näitajatega kompenseerida. [53]

Lisaks kaalutud summale saab kasutada ka järjestusmeetodeid, näiteks TOPSIS-meetodit, mis hindab alternatiive selle järgi, kui lähedal on need ideaalsele lahendusele ja kui kaugel negatiivsest ideaallahendusest. Tallinna väikeste kaugküttevõrkude puhul võiks ideaalne lahendus tähendada näiteks väikest kaugust suurest võrgust või madalatemperatuurilisest soojusallikast, kõrget lineaarset soojustihedust, suurt heitme vähendamise potentsiaali ja madalat planeeringulist keerukust. Negatiivne ideaallahendus oleks vastupidine olukord. TOPSIS sobib seega olukorras, kus soovitakse võrrelda mitut konkureerivat võrku või üleminekuteed ning leida kompromisslahendus, mis ei pruugi olla igas kriteeriumis parim, kuid on tervikuna kõige tasakaalustatum. [55]

GIS-MCDA-d tuleb kasutada eelkõige eelistusmodelina. Mudel ei asenda hüdraulilist modelleerimist, detailset tasuvusarvutust ega projekteerimist, kuid aitab esimestes etappides eristada, millised võrgud vajavad suure võrguga ühendamise analüüsi, millised sobivad lokaalse soojuspumba või heitsoojuse kasutamise kandidaadiks ning millised vajavad täiendavat andmekogumist. Mudeli usaldusväärsuse suurendamiseks tuleb teha tundlikkusanalüüs, kus kontrollitakse, kuidas muutub võrkude pingerida kriteeriumite kaalude või punktilävendite muutmisel. Kui tulemused püsivad ka erinevate kaalude korral sarnased, on järeldus tugevam; kui pingerida muutub oluliselt, tuleb vastav võrk märkida otsustuslikult ebakindlaks ning suunata täpsemasse analüüsi. [53]

#### **1.5.4 Olemasoleva kaugküttevõrgu laiendamine**

Olemasoleva kaugküttevõrgu laiendamine on keerukam kui uue võrgu kavandamine tühjale alale, sest otsus peab arvestama olemasoleva torustiku, tootmisvõimsuste, rõhurežiimide, temperatuuride ja investeeringute ajastusega. Kaugküttevõrgu laiendamisel tuleb määrata, milliseid hooneid või piirkondi ühendada. [56]

Kui ühendada esimesena madala koormusega või pika torustikuga piirkond, võib projekt tunduda majanduslikult nõrk isegi siis, kui samas piirkonnas on olemas hilisemaks etapiks atraktiivsemaid tarbijaid. Seetõttu tuleks väikeste võrkude liitmist käsitleda etapilise planeerimisena. Esmalt tuleks hinnata suure koormuse ja lühikese ühendusteeconnaga piirkondi, seejärel potentsiaalseid laiendusi, mis suurendavad ühendustoru kasutust ja parandavad lineaarset soojustihedust. [56]

Selline etapiline käsitus on eriti oluline siis, kui ühendustrassi rajamine on kallid, kuid selle koridoris paikneb mitu potentsiaalset tarbijat või allikat. Ühenduse loomine ei ole ainult ühe väikese võrgu investering, vaid võib olla tulevase piirkondliku arengu selgroog. Seetõttu peaks ruumiline planeerimine hindama nii esialgset koormust kui ka torustiku hilisemat täituvust. Kui ühendustoru läbib alasid, kus on korterelamuid, avalikke hooneid, ärihooneid või tulevase arendusi, võib esialgu piiripealne investering muutuda pikaajaliselt mõistlikuks. [56]

### 1.5.5 Ruumilise planeerimise kasutusjuhtumite kokkuvõte

Tabel 1.3 koondab valitud juhtumiuuringud ja nende olulisemad õppetunnid väikeste kaugküttevõrkude hindamiseks.

Tabel 1.3 Ruumilise planeerimise juhtumiuuringute kokkuvõte

| Juhtumiuuring                      | Ruumilise planeerimise küsimus                                         | Meetod                                                                                     | Õppetund väikeste võrkude jaoks                                                                                                 |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sønderborg, Taani [44]             | Viie eraldiseisva kaugküttevõrgu järkjärguline ühendamine.             | Tunnipõhine optimeerimine, GIS, ühenduste ja heitsoojuse stsenaariumid.                    | Ühendamise kasu sõltub ühendatava võrgu senisest kütusest, tootmisportfellist ja tulevikustsenaariumist.                        |
| TalTech, Tallinn [41]              | Lokaalse gaasikatla linnakuvõrgu ühendamine Tallinna kaugküttevõrguga. | EnergyPRO modelleerimine; kõrgetemperatuuriline ühendus ja madalatemperatuuriline kaskaad. | Olemasolev väike võrk võib jääda alavõrguna kasutusse; madalatemperatuuriline ühendus võib anda suurema kasu.                   |
| Leibnitz, Austria [57]             | Kolme võrgu ühendamine ja kahesuunalise soojusülekanne juhtimine.      | Energiajuhtimissüsteem, nõudluse poole juhtimine, reaalne võrgu test.                      | Füüsiline ühendus vajab juhtimisloogikat; kasu sõltub mitme allika koordineerimisest.                                           |
| Olemasoleva võrgu laiendamine [56] | Milliseid hooneid või piirkondi ühendada ja millises järjekorras?      | Segatäisarvuline lineaarne optimeerimine ja etapiline investeerimisloogika.                | Ühendusstrateegia mõjutab projekti finantsilist elujõulisust; laiendamist tuleb kavandada etapiliselt.                          |
| Vitoria-Gasteiz, Hispaania [47]    | Tööstusliku heitsoojuse ühendamine linnalise kaugküttevõrguga.         | GIS, hooneandmed, teedevõrk, ruudustikud ja marsruutimisalgoritmid.                        | Trassi tegelik pikkus ja lineaarne energiatihedus on otsustavad; linnulennuline kaugus ei ole piisav.                           |
| Šveits [46]                        | Kaugkütte potentsiaal muutuva soojusnõudluse ja tehnoloogia korral.    | Riiklik soojusatlas ja lineaarse nõudlustiheduse hindamine.                                | Renoveerimine võib muuta kõrgetemperatuurilise võrgu potentsiaali, kuid suurendada madalatemperatuuriliste lahenduste sobivust. |

### **1.5.6 Järeldused Tallinna väikeste kaugküttevõrkude planeerimiseks**

Kirjanduse ja juhtumiuuringute põhjal saab Tallinna väikeste kaugküttevõrkude jaoks koostada ruumilise planeerimise loogika, kus iga võrku ei hinnata ainult kütuse või katlamaja järgi, vaid selle asukoha ja süsteemse ühendatavuse järgi. Esimene samm on olemasoleva olukorra kaardistamine: võrgu piirid, torustiku pikkus, tarbijate soojusnõudlus, lineaarne soojustihedus, tootmisseadmete vanus, kütus, võrgukaod ja temperatuurirežiim. Teine samm on ühendatavuse hindamine: kaugus lähima suure võrgu toruni, võimalik ühendustrass piki tänavavõrku, trassi keerukus, tarvilik soojuslik võimsus ning ühenduse mõju suurema võrgu rõhu- ja temperatuurirežiimile. Kolmas samm on alternatiivsete kohalike allikate hindamine. [1]

Selle põhjal saab eristada vähemalt kolme planeerimistüüpi. Esimene tüüp on suure võrgu lähedal paiknev kompaktne väike võrk, millel on piisav lineaarne soojustihedus ja fossiilne tootmine. Sellisel juhul on prioriteetne analüüsida ühendamist suurema kaugküttevõrguga. TalTechi ja Sønderborgi uuringud näitavad, et selline ühendamine võib vähendada heitmeid ja asendada lokaalse fossiilkütuse suurema süsteemi mitmekesisema tootmisportfelliga. [41], [44]

Teine tüüp on väike võrk, mis paikneb suurest võrgust kaugemal, kuid mille läheduses on sobiv madalatemperatuuriline soojusallikas. Sellisel juhul ei pruugi pikk ühendustoru olla esimene valik; vajalik võib olla lokaalse soojuspumba, madalama temperatuurigraafiku ja soojussalvestuse analüüs. GIS-põhised uuringud näitavad, et soojusallika tegelik kaugus, trassikoridor ja ühendatavate tarbijate ruumiline jaotus määravad, kas selline lahendus on praktiline. [47], [49]

Kolmas tüüp on madala tihedusega või tehniliselt piiratud väike võrk, mille ühendustekond suure võrguni oleks liiga pikk ja mille läheduses puudub piisav lokaalne soojusallikas. See annab tugeva signaali, et tuleb võrrelda kaugkütte säilitamist, torustiku rekonstrueerimist, lokaalseid taastuvlahendusi ja vajadusel muid soojusvarustuse viise. Nendel juhtudel soojusnõudluse tihedus, hoonestuse tüüp ja tulevane renoveerimine ning uued arendused mõjutavad kaugkütte sobivust pikaajaliselt. Seega on kaugkütte ruumiline planeerimine eelkõige võrdlev otsustusraamistik. Eesmärk on tuvastada, millise võrgu puhul annab ühendamine süsteemse kasu, millise võrgu puhul on lokaalne madalatemperatuuriline lahendus tõenäoliselt parem ning millise võrgu puhul tuleb madala tiheduse ja pika torustiku tõttu kaaluda põhjalikumalt alternatiive. [46], [50]

## 2. MODELLEERIMINE JA STSENAARIUMIANALÜÜS

Selles peatükis kirjeldatakse metoodikat, mille abil hinnatakse Tallinna väikeste kaugküttevõrkude ümberkujundusvõimaluste sobivust taastuv- ja madalsüsinikulistele soojuslahendustele üleminekuks. Lõputöö eesmärk on luua ruumiline kaart, et võrke võrrelda ühtsetel alustel. [1], [13], [23], [58]

Metoodika lähtepunkt on arusaam, et kaugküttevõrgu dekarboniseerimine ei sõltu ainult kasutatavast kütusest. Seetõttu ühendatakse töös energiabilansi arvutused GIS-põhise sobivusanalüüsiga. [58] Peatükis kasutatakse varajase planeerimisfaasi loogikat. GIS-põhine mitmekriteeriumiline mudel on aitab vähendada alternatiivide hulka, selmet asendada insenertehnilist projekteerimist. [1], [23], [58]

### 2.1 Lähteandmed

Uurimisobjektiks on Tallinna linna territooriumil paiknevad väikesed kaugküttevõrgud, mis toimivad suurest linnavõrgust eraldatult ning millel puudub füüsiline ühendus Tallinna põhivõrguga. Analüüsi eesmärk on hinnata, kas sellise võrgu jaoks on eelistatum ühendamine suure kaugküttevõrguga või lokaalse madalatemperatuurilise soojusallika kasutamine. [4], [5], [59]

Võrkude valimisel lähtuti kolmest tingimusest. Esiteks pidid nii tarbijad kui ka kütteallikas paiknema Tallinna linnas. Teiseks pidi võrgu kohta olema võimalik leida avalikest allikatest vähemalt minimaalne ruumiline ja tehniline informatsioon, näiteks katlamaja asukoht ja torustiku paiknemine. Kolmandaks jäeti põhiandmestikust välja väga väikesed lahendused, kus tarbivaid hooneid oli vähem kui kolm või kus puudus piisav alus võrgu kui eraldi kaugkütteobjekti käsitlemiseks. Selline piirang vähendab juhuslike hoonepõhiste lahenduste mõju ning hoiab fookuse võrkudel, mille puhul ruumiline planeerimine on sisuliselt põhjendatud. [59], [60], [61]

Andmete kogumisel kasutati 2023. aasta andmeid avalikest andmebaasidest, kuna need olid mitme väikese kaugküttevõrgu kohta kõige uuemad võrreldavad ja kättesaadavad andmed. [62] Esmase kaardistuse käigus tuvastati 22 potentsiaalset väikest kaugküttevõrku. Modelleerimise põhivalimisse koondati neist 18 võrku, mis vastasid eespool kirjeldatud tingimustele. Valimi eristamine on oluline, sest kõik tuvastatud võrgud võivad olla planeerimise seisukohalt huvipakkuvad, kuid mitmekriteeriumiliseks hindamiseks on vaja andmeid, mis on kõigi vaadeldavate võrkude lõikes võrreldavad. [59]

Lähteandmete töötlus on üles ehitatud kihipõhiselt. Iga kaugküttevõrku kirjeldatakse energia-, ruumi-, keskkonna- ja piiranguparameetrite kaudu. Energiaparameetrid kirjeldavad võrgu olemasolevat toimimist, ruumiparameetrid määravad võimaliku ühendus- või tootmislahenduse paiknemise, keskkonnaparameetrid kirjeldavad heitme vähendamise potentsiaali ning piirangud näitavad, kus tehniline lahendus võib olla välistatud või vajada täiendavat menetlust. [23], [58]

### **2.1.1 Lähteandmete allikad**

Lähteandmete kogumisel kasutati eelistatult avalikke ja kontrollitavaid allikaid, sest töö eesmärk on koostada metoodika, mida oleks võimalik korrata või täiendada ka siis, kui kõiki võrguettevõtja detailandmed ei ole kättesaadavad. Avalike allikate kasutamine ei välista hilisemat täpsustamist võrguettevõtja andmetega, kuid loob esmase, läbipaistva ja dokumenteeritava analüüsiraamistiku [58], [59], [60], [61]. Tabelis 2.1 on esitatud töös kasutatud allikad ja nende roll lähteandmete kogumisel.

Maa- ja Ruumiameti Geoportaali ruumiandmed on ruumilise analüüsi põhiline alusallikas. Sealt on võimalik alla laadida aluskaarte, katastriüksuste piire, kitsenduste andmeid, kaitstavate objektide kihte ja muid geoinformatsiooni kihte, mis aitavad hinnata torutrasside ja tehnorajatiste paigutust. Kaugkütte seisukohalt on oluline, et andmed võimaldavad eristada tänavamaad, kinnistuid, rohevõrgustiku või kaitsealuseid piirkondi ning kontrollida, kas potentsiaalne ühendustorustik läbib alasid, kus ehitamine võib olla piiratud. [60]

Keskkonnaotsuste Infosüsteem (KOTKAS) on töö jaoks oluline energiabilansi ja heitmeandmete allikas. Keskkonnakaitselubade aastaaruannetes kajastuvad katlamajade kütusekogused, heitkogused ja loaobjektide üldandmed. KOTKAS-e andmeid kasutatakse olemasoleva olukorra kirjeldamiseks ning fossiilkütuste kasutuse ja CO<sub>2</sub>-heitme vähendamise potentsiaali hindamiseks. Joonisel 2.1 on esitatud näide keskkonnaloa aastaaruande väljavõttest [59]. Lisaks on töös kasutatud Keskkonnaagentuuri valduses olevat Keskkonnaportaali, mille andmebaasis on muuseas leitavad asukohaandmed Tallinna territooriumil paiknevate piirkondlike katlamajade ja muude katelde kohta [63]. Joonisel 2.2 on esitatud keskkonnaportaali kaardi lehekülg Tallinna heiteallikate asukohtade näitena.





## Aastaaruannete register

◀ Tagasi nimekirja

## 1. Aruande esitaja ja käitise andmed

## Loa andmed

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| Aruandeaasta        | 2023             |
| Loa number          | L.ÖV.HA-46066    |
| Loa liik            | Keskonnaluba     |
| Loa andmise kuupäev | 06.09.2022       |
| Loa kehtivusaeg     | 01.01.2006 - ... |

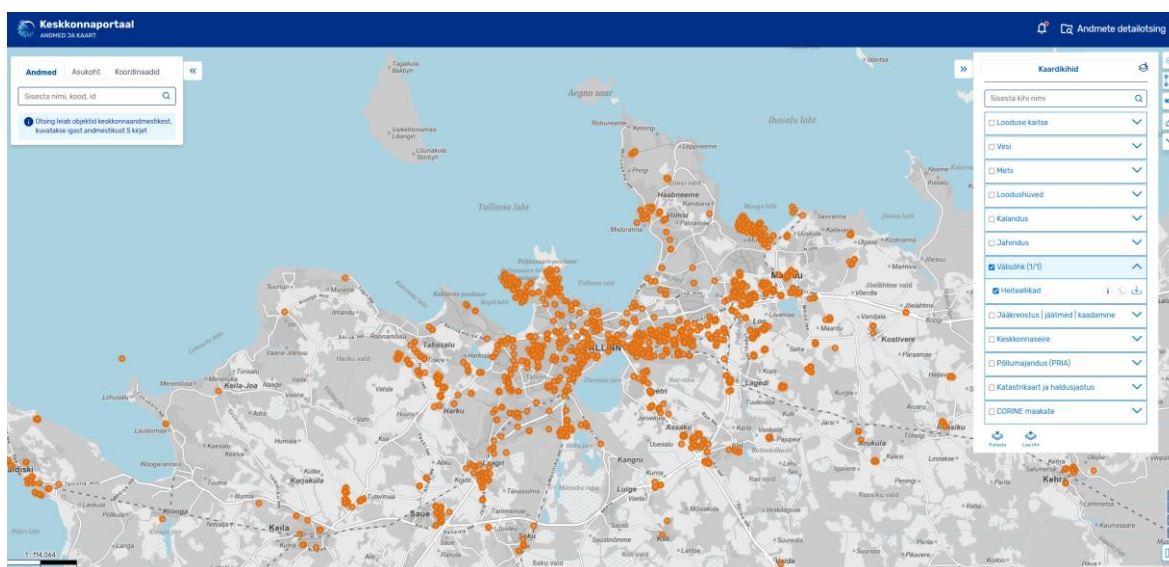
## Aruande esitaja

|                                |                                                     |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Arimini / füüsilise isiku nimi | AS Utilitas Tallinn                                 |
| Äriregistrikood / Isikukood    | 10811060                                            |
| Aadress                        | Mahla tn 87, Nõmme linnaosa, Tallinn, Harju maakond |
| Telefon                        |                                                     |
| E-posti aadress                | info@utilitas.ee                                    |
| Põhitegevusala kood (EMTAK)    | 35301 - Auru ja konditsioneeritud õhuga varustamine |
| Territoriaalkood (EHAK)        | 0524 - Nõmme linnaosa, Tallinn, Harju maakond       |

## Tegevuskoht

|                                 |                                                     |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Käitise nimetus                 | Utilitas Tallinn Mahla 87                           |
| Käitise üldkontakt, telefon     |                                                     |
| Aadress                         | Mahla tn 87, Nõmme linnaosa, Tallinn, Harju maakond |
| Käitise L-EST97 keskkordinaadid | 📍 X: 6588128, Y: 535348                             |
| Territoriaalkood EHAK järgi     | 0524 - Nõmme linnaosa, Tallinn, Harju maakond       |
| Maakonna kood EHAKi järgi       | 0037 - Harju maakond                                |

Joonis 2.1 Utilitas Tallinn Mahla 87 2023. keskkonnaloa aastaaruanne KOTKAS-es



Joonis 2.2 Keskonnaportaali andmete ja kaardi lehekülg

Ehitisregister (EHR) on vajalik tarbijate ja hoonete kontrollimiseks. Selle abil saab täpsustada hoonete asukohta, kasutusotstarvet, ehitusaastat, köetavat pinda ja mõnel juhul tehnosüsteemide infot. Ehitisregistrit kasutatakse eelkõige selleks, et kontrollida, kas kaugküttevõrgu potentsiaalsed tarbijad paiknevad samas ruumilises klastris ning kas hoonete funktsioon ja paiknemine toetavad võrgu kui terviku käsitlemist. [61]

Riigi Teatajat kasutatakse töös kehtiva õigusliku raamistiku ja sellest tulenevate nõuete täpsustamiseks. See aitab hinnata nii ruumiandmetega seotud piirangute tähendust kui ka erinevate objektide või tegevuste loa-, registreerimis- ja aruandluskohustust. Seetõttu käsitletakse Riigi Teatajat üldise õigusliku kontrolli allikana, mis toetab andmete tõlgendamist ja kasutamist kooskõlas kehtivate nõuetega. [64]

Tabel 2.1. Kasutatud allikad ja nende roll lähteandmete andmebaasis.

| Allikas                                     | Kogutav teave                                                                    | Kasutus ArcGIS Pro mudelis                                                          | Märkused                                                |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Maa- ja Ruumiameti Geoportaal [60]          | Aluskaardid, katastriüksused, kitsendused, kaitstavad alad, ruumilised piirangud | Lähedusanalüüs, kaardikihid, piirangukihtide kontroll, torukoridori eelhinnang      | Eelistada ametlikke kihte; kontrollida andmete kuupäeva |
| KOTKAS ja Keskkonnaportaal [59], [63]       | Katlamajade asukohad ja kütusekasutus, heitkogused, loaobjektide info            | Baastaseme heitmed, kütuseasenduse potentsiaal, fossiilkütuse osakaal               | Vajalik loaobjekti ja võrgu vastavuse kontroll          |
| Ehitisregister [61]                         | Hooned, kasutusotstarve, asukoht, võimalik köetav pind                           | Tarbijate kontroll, ruumilise klatri määramine, soojusnõudluse jaotuse täpsustamine | Andmete täielikkus võib varieeruda hoonete lõikes       |
| Riigi Teataja [64]                          | Õigusaktid, kaitse- ja planeeringupiirangud                                      | Jah/ei kontroll ja piirangute selgitamine                                           | GIS-kiht ei asenda õiguslikku tõlgendust                |
| Teadusartiklid ja juhendid [53], [54], [55] | Kriteeriumid, kaalud, heat mapping ja GIS-MCDA põhimõtted                        | Mudeli ülesehitus, hindamine ja tundlikkusanalüüs                                   | Kohandada Tallinna ruumilisele kontekstile              |

### 2.1.2 Kogutud andmed

Kogutud andmed jagunevad võrgu-, tootmis-, keskkonna- ja ruumipiirangute andmeteks. Võrguandmed kirjeldavad olemasoleva kaugküttevõrgu mahtu: tarbijate arvu, torustiku pikkust, müüdud soojust ja vajadusel toodetud soojust. Tootmisandmed kirjeldavad katlamaja või soojusallika kütusekasutust ja heitmeid. Tarbijaandmed kirjeldavad hoonete paiknemist ning võimaldavad hinnata, kas võrk moodustab ruumiliselt kompaktse klatri. Keskkonnaandmed kirjeldavad heitmeintensiivsust ja fossiilkütuste asendamise potentsiaali. Piirangute andmed kirjeldavad alasid, kus ühendustoru või uus soojusallikas võib olla ebasobiv, kallis või menetluslikult keerukas. [58], [59], [61]

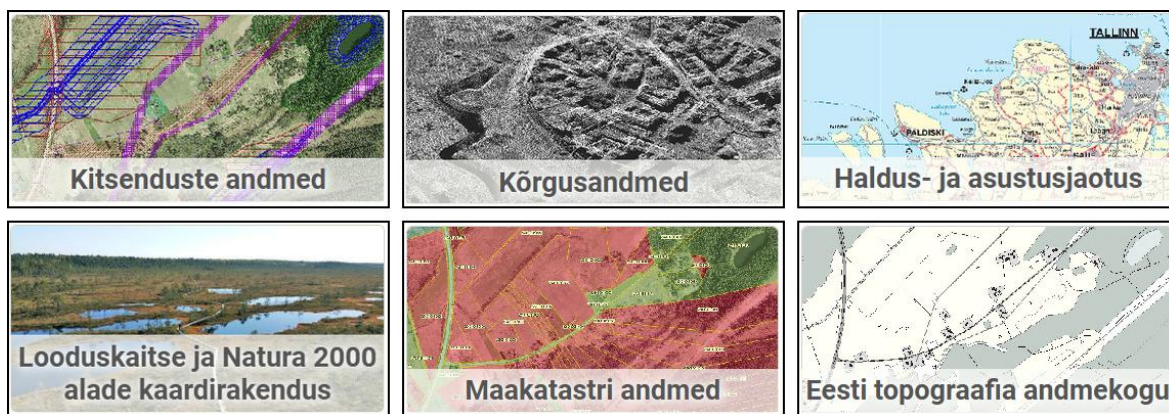
### **Andmed KOTKASest ja Keskkonnaportaalist**

Keskkonnaportaalist saadi kätte katlamajade ruumilise paiknemise määramiseks vajaliku GIS-punktkihti (*point layer*), mis võimaldas siduda katlamajad nende asukohaga kaardipõhises analüüsis. KOTKASest koguti paiksete heiteallikate aastaaruannete põhjal andmed katlamajades kasutatud kütuseliikide, tarbitud kütusekoguste ja tekkivate heitkoguste kohta. Kütusekogused olid esitatud sõltuvalt kütuseliigist gaaskütuste puhul tuhandetes normaalkuupmeetrites ning vedel- ja tahkekütuste puhul tonnides. Heitkoguste andmetest kasutati analüüsis eelkõige süsinikdioksiidi aastaseid heitkoguseid tonnides.[59], [63]

Katlamajade tootmis- ja heitmeandmed, mis olid võetud KOTKASe aastaaruannete registrist, on pärit aastast 2023, mis on uusimad saadaval andmed mitme väikevõrgu kohta. Põhjus tuleneb sellest, et alla 1 MW<sub>th</sub> soojussisendile vastava nimisoojusvõimsusega põletusseadmete puhul kaotati paikse heiteallika käitaja registreeringu kohustus alates aastast 2025. Muudatus võeti vastu kliimaministri poolt 18. oktoobril 2024 ning tunnistati kehtetuks varasem 0,3–1 MW<sub>th</sub> põletusseadmete registreerimiskohustus. Kuna registreerimis- ja aruandluskohustus on kadunud, ei pidanud põletusseadme käitaja 2024. aasta, ega ka hilisemaid andmeid enam esitama. [62]

### **Andmed Geoportaalist**

Maa- ja Ruumiameti Geoportaalist võeti kasutusele tööks vajalikke ruumiandmeid, mis pärinesid mitmest riiklikust andmekogust. Maakatastri andmebaasist kasutati katastriüksuste andmeid, Eesti topograafia andmekogust (ETAK) hoonete, rajatiste, maa-aluste hoonete, puittaimestiku, teede, rööbasteede, liikluskorralduslike rajatiste (sillad ja autotunnelid) ning seisu- ja vooluveekogude kihte. Kitsenduste andmebaasist koguti kaugkütteobjektide ja nendest tulenevate mõjualade andmed, kõrgusandmete kogust nõlvakalded ning haldus- ja asustusjaotuse andmebaasist Tallinna linna ja linnaosade piirid. Lisaks kasutati looduskaitse ja Natura 2000 alade rakenduse andmeid riiklike kaitsealade, hoiualade ja kohaliku omavalitsuse kaitstavate loodusobjektide kohta [60]. Joonisel 2.3 on näidatud Maa- ja Ruumiameti Geoportaalist võetud ning töös kasutatud andmekogud. Tabelis 2.2 on esitatud Geoportaalist ja Keskkonnaportaalist pärit GIS- kihi koondandmed.



Joonis 2.3 Maa- ja Ruumiameti Geoportaalist kasutuselevõetud andmekogud [60]

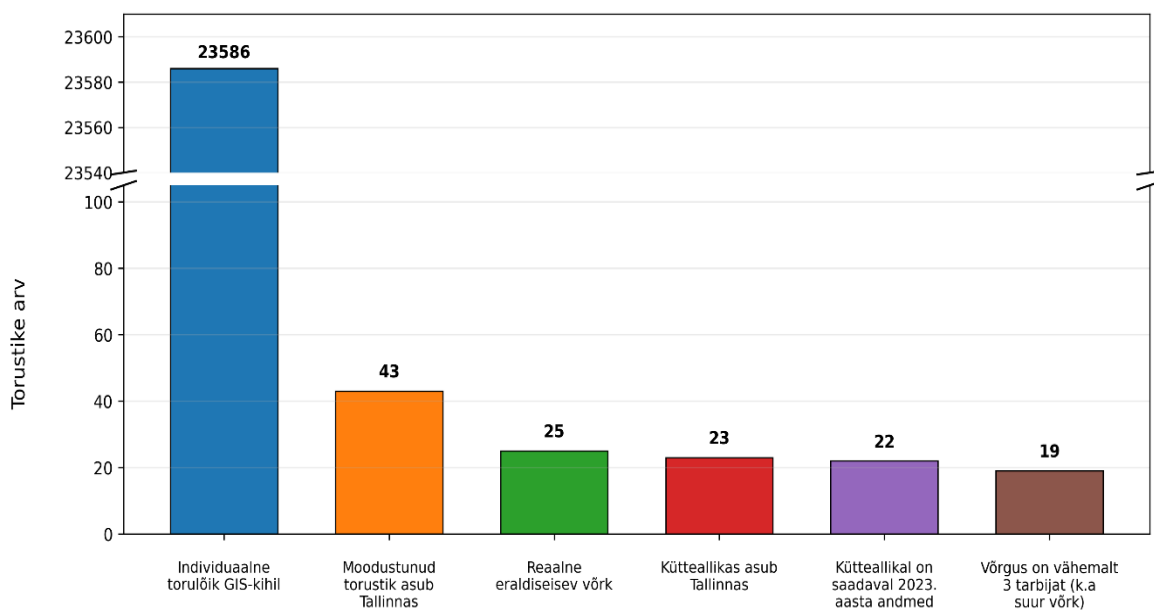
Tabel 2.2 Geoportaalist ja Keskkonnaportaalist pärit GIS-kihid [60], [63]

| Kihi nimetus                    | Andmekogu                                  | GIS-kihi kujund |
|---------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|
| Hooned                          | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Muud rajatised                  | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Maa-alused hooned               | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Katastriüksused                 | Maakatastri andmed                         | Hulktahukas     |
| Puittaimestik                   | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Teed                            | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Rööbasteed                      | ETAK                                       | Joon            |
| Liikluskorralduslikud rajatised | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Seisuveekogud                   | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Vooluveekogud                   | ETAK                                       | Hulktahukas     |
| Kaugkütte objektid              | Kitsenduste andmed                         | Joon            |
| Kaugkütte mõjualad              | Kitsenduste andmed                         | Hulktahukas     |
| Nõlvakalded                     | Kõrgusandmed                               | Hulktahukas     |
| Riiklikud kaitsealad            | Looduskaitse ja Natura 2000 alade rakendus | Hulktahukas     |
| Hoialad                         | Looduskaitse ja Natura 2000 alade rakendus | Hulktahukas     |
| KOV kaitstavad loodusobjektid   | Looduskaitse ja Natura 2000 alade rakendus | Hulktahukas     |
| Omavalitsused                   | Haldus- ja asustusjaotus                   | Hulktahukas     |
| Asustusüksused                  | Haldus- ja asustusjaotus                   | Hulktahukas     |
| Heiteallikad                    | Välisõhk                                   | Punkt           |

### 2.1.3 Andmete eeltöötlus

Põhiandmestikus käsitletud 18 võrgu müüdud summaarne soojusenergia hulk oli 61 750,7 MWh aastas. Vaadeldavate võrkude kogupikkus oli 26 814,8 m ning tarbijate arv 359. Summaarne installeeritud soojusvõimsus oli 68,5 MW. Andmestikus on võrke, mille lineaarne soojustihedus on üle 2 MWh·m<sup>-1</sup>, kuid on ka võrke, mille näitaja jääb alla 1 MWh·m<sup>-1</sup>. JASPERSi juhend käsitleb 2 MWh·m<sup>-1</sup> väärtust ligikaudse rusikareeglina, millest kõrgem lineaarne soojustihedus toetab kaugküttevõrgu majanduslikku toimivust, kuid see ei ole absoluutne otsustuspiir. Väikese võrgu puhul võib madalam näitaja olla põhjendatud, kui läheduses on sobiv odav soojusallikas või kui torustik on juba olemas ja heas seisukorras [1]. Joonisel 2.4 näitab lähteandmete filtreerimise etappe, mille abil eraldati suurest GIS-andmestikust modelleerimiseks sobivad väikesed

kaugküttevõrgud. Individuaalsete torulõikude GIS-kiht sisaldas 23586 objekti. Nendest moodustunud torustikest paiknes Tallinnas 43 ning reaalse eraldiseisva kaugküttevõrguna tuvastati 25 võrku. Edasise analüüsi jaoks kitsendati valimit veelgi, arvestades kütteallika paiknemist Tallinnas, 2023. aasta andmete olemasolu ning vähemalt kolme tarbija olemasolu. Lõplikku põhivalimisse jäi 19 võrku, mille kohta olid olemas modelleerimiseks vajalikud võrreldavad lähteandmed.



Joonis 2.4 Analüüsitava võrkude tuvastamise voog

Kütusekasutuse alusel on uuritavate võrkude peamine probleem fossiilkütustel põhinev soojuse tootmine. Andmestiku koondandmete järgi kasutati väikestes võrkudes valdavalt maagaasi, millele lisaks esines põlevkiviõli ning ühes võrgus ka biogaasi. Neto- $\text{CO}_2$ -heitmeid oli 14 971 tonni aastas ning keskmine netoheitme intensiivsus  $242,4 \text{ kg CO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$  müüdud soojuse kohta. See näitaja on kõrgem kui Tallinna suurde võrku tootvate soojusenergia tootmisüksuste keskmise põhjal tuletatud  $140,3 \text{ kg CO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$ , mistõttu on ühendamine suure võrguga üheks asjakohaseks stsenaariumiks. Samas tuleb arvestada, et suure võrgu tulevane heitmeintensiivsus muutub koos tootmisportfelli arenguga. [6], [20], [25]

Tabel 2.3 koondab väikevõrkude andmestiku võrgupõhised näitajad. Tabelit kasutatakse meetodikas eelkõige eelsõelumiseks. Kõrge  $\text{MWh}\cdot\text{m}^{-1}$  väärtus viitab sellele, et võrgu säilitamine, ühendamine või rekonstrueerimine võib olla mõistlikum kui individuaallahenduste suunas liikumine. Kõrge  $\text{kg CO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$  väärtus näitab suuremat heitmevähenduse prioriteeti. Väike tarbijate arv ja pikk torustik viitavad vastupidiselt vajadusele kontrollida võrgu kadusid, võimalikke renoveerimisvajadusi ja alternatiivseid lahendusi. Tabelis kajastub, et väikevõrkudest kõrgeima lineaarse soojustihedusega on

Teelise võrk Nõmme linnaosas ning kõige kõrgema CO<sub>2</sub>-heitmega müüdnud megavatt-tunni kohta on Sepa võrk Põhja-Tallinnas [13], [25], [50]. Tabelis 2.4 on Tallinna suure kaugküttevõrgu katlamajad ja koostootmisjaamad koos põhinäitajatega.

Tabel 2.3. Põhiandmestikku kuuluvate väikeste kaugküttevõrkude 2023. aasta koondnäitajad.

| Võrk             | Linnaosa      | Tarbijad | Pikkus, m | Müüdnud soojus, MWh | MWh·m <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> ·MWh <sup>-1</sup> |
|------------------|---------------|----------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Tiskre           | Haabersti     | 27       | 857,2     | 2 212               | 2,58                | 209,4                                 |
| Merirahu         | Haabersti     | 15       | 1760,2    | 1 947               | 1,11                | 266,8                                 |
| Kasvu            | Kristiine     | 3        | 155,8     | 662                 | 4,25                | 243,6                                 |
| Mäe              | Lasnamäe      | 3        | 119,7     | 460                 | 3,84                | 223,2                                 |
| Haldja           | Nõmme         | 32       | 3 033,3   | 6 496               | 2,14                | 242,1                                 |
| Sinirebase       | Nõmme         | 12       | 874,7     | 1 290               | 1,47                | 297,0                                 |
| Järve            | Nõmme         | 5        | 380,3     | 2 181               | 5,73                | 224,2                                 |
| Vabaduse         | Nõmme         | 7        | 469,5     | 900                 | 1,92                | 253,5                                 |
| Laste            | Nõmme         | 4        | 598,5     | 1 496               | 2,50                | 232,5                                 |
| Rahu             | Nõmme         | 3        | 163,9     | 574                 | 3,50                | 244,9                                 |
| Teelise          | Nõmme         | 9        | 694,0     | 4 126               | 5,95                | 243,2                                 |
| Mahla            | Nõmme         | 72       | 5 883,0   | 16 255              | 2,76                | 232,0                                 |
| Vana-Pärnu       | Nõmme         | 16       | 1 181,4   | 2 103               | 1,78                | 245,4                                 |
| Põllu            | Nõmme         | 30       | 2 728,4   | 5 300               | 1,93                | 263,7                                 |
| Metsavahi        | Pirita        | 27       | 2 728,4   | 5 141               | 1,88                | 258,5                                 |
| Padriku          | Pirita        | 59       | 2602,2    | 5 401               | 2,08                | 317,4                                 |
| Purje            | Pirita        | 7        | 894,6     | 2862                | 3,20                | 220,1                                 |
| Sepa             | Põhja-Tallinn | 28       | 1 672,1   | 2 345               | 1,40                | 350,6                                 |
| Kokku / keskmine | -             | 359      | 26 814,8  | 61 751              | 2,30                | 252,5                                 |

Eeltöötlus algab andmete importimisest ArcGIS Pro geoandmebaasi. Tabelandmed imporditakse eraldi atribuutandmete tabelitena ning ruumiandmed punkt-, joon- või hulktahtakakihtidena. Seejärel määratakse kõigile kihtidele ühtne koordinaatsüsteem. Järgmisena kontrollitakse geomeetriad: eemaldatakse dubleeritud objektid, parandatakse katkised geomeetriad, liidetakse vajadusel sama võrgu torustikulõigud ning kontrollitakse, et tarbijad, katlamaja ja torustik paiknevad samas ruumilises piirkonnas. [58], [60]

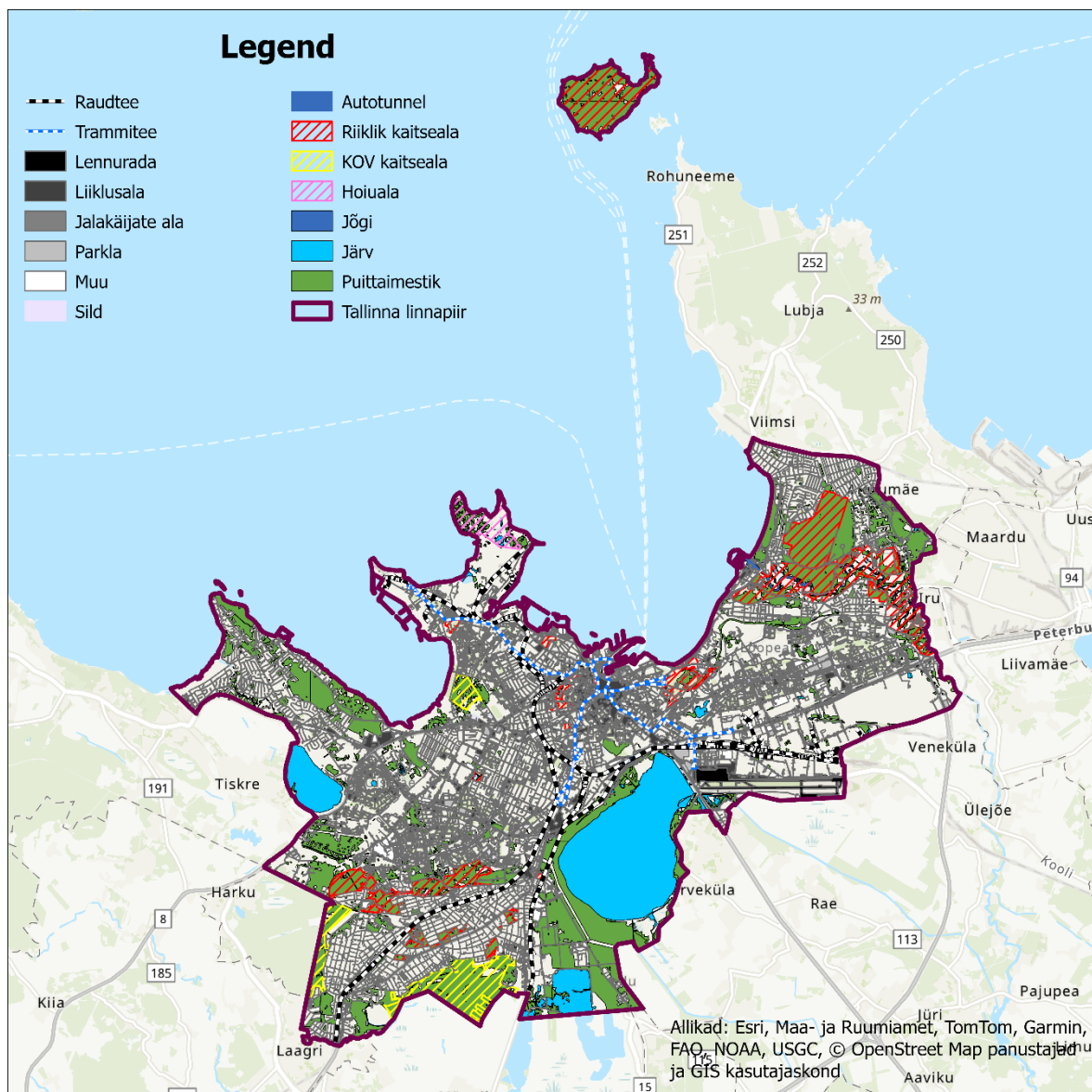
Tabel 2.4 Suurde võrku soojust tootvate tootmisüksuste 2023. aasta koondnäitajad.

| <b>Tootmisüksus</b> | <b>Linnaosa</b> | <b>Käitaja</b> | <b>Põhikütus</b> | <b>Võimsus, MW</b> | <b>Müüdnud soojus, MWh</b> | <b>kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup></b> |
|---------------------|-----------------|----------------|------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| Iru                 | Maardu          | Enefit         | Jäätmed          | 572,0              | 416096                     | 360,4                                     |
| Väo 1               | Lasnamäe        | Utilitas       | Biomass          | 82,0               | 306001                     | 0,2                                       |
| Väo 2               | Lasnamäe        | Utilitas       | Biomass          | 87,0               | 482638                     | 0,1                                       |
| Sepise              | Lasnamäe        | Utilitas       | Maagaas          | 17,4               | 8694                       | 218,7                                     |
| Mustamäe            | Mustamäe        | Utilitas       | Biomass          | 298,0              | 385448                     | 110,7                                     |
| Raja                | Mustamäe        | Utilitas       | Maagaas          | 7,0                | 7967                       | 217,2                                     |
| Ülemiste            | Kesklinn        | Utilitas       | Maagaas          | 269,2              | 44124                      | 222,2                                     |
| Saku                | Kesklinn        | Utilitas       | Maagaas          | 1,2                | 636                        | 236,7                                     |
| Türi                | Kesklinn        | Utilitas       | Maagaas          | 0,6                | 479                        | 236,7                                     |
| Kristiine           | Kristiine       | Utilitas       | Maagaas          | 324,4              | 313179                     | 202,2                                     |
| Spordi              | Kristiine       | Utilitas       | Maagaas          | 17,2               | 62815                      | 198,2                                     |
| Västriku            | Kristiine       | Utilitas       | Maagaas          | 1,2                | 1224                       | 249,0                                     |
| Siidisaba           | Kristiine       | Utilitas       | Maagaas          | 13,4               | 12480                      | 207,9                                     |
| Ristiku             | Põhja-Tallinn   | Utilitas       | Maagaas          | 0,6                | 434                        | 273,1                                     |
| Kopli-ranna         | Põhja-Tallinn   | Utilitas       | Maagaas          | 5,4                | 4195                       | 221,5                                     |
| Puuvilla            | Põhja-Tallinn   | Utilitas       | Maagaas          | 1,3                | 944                        | 230,0                                     |
| Uus-maleva          | Põhja-Tallinn   | Utilitas       | Maagaas          | 6,0                | 11236                      | 225,2                                     |
| Kokku keskmine      | /               | -              | -                | 1703,9             | 2058590                    | 140,3                                     |

Joonisel 2.5 on kujutatud Tallinna linn koos rohealade, kaitsealade ja infrastruktuuriga. Joonis 2.6 näitab Tallinna kaugküttetaristu, soojusenergia tootmisüksuste ja ruumiliste piirangute paiknemist. Kaart võimaldab hinnata, millised väikesed võrgud või tootmisüksused paiknevad olemasolevale kaugküttevõrgule lähedal ning milliste puhul võivad ühendamisest või uue lahenduse rajamisest mõjutada kaitsealad, veekogud, puittaimestik või muud ruumilised piirangud.

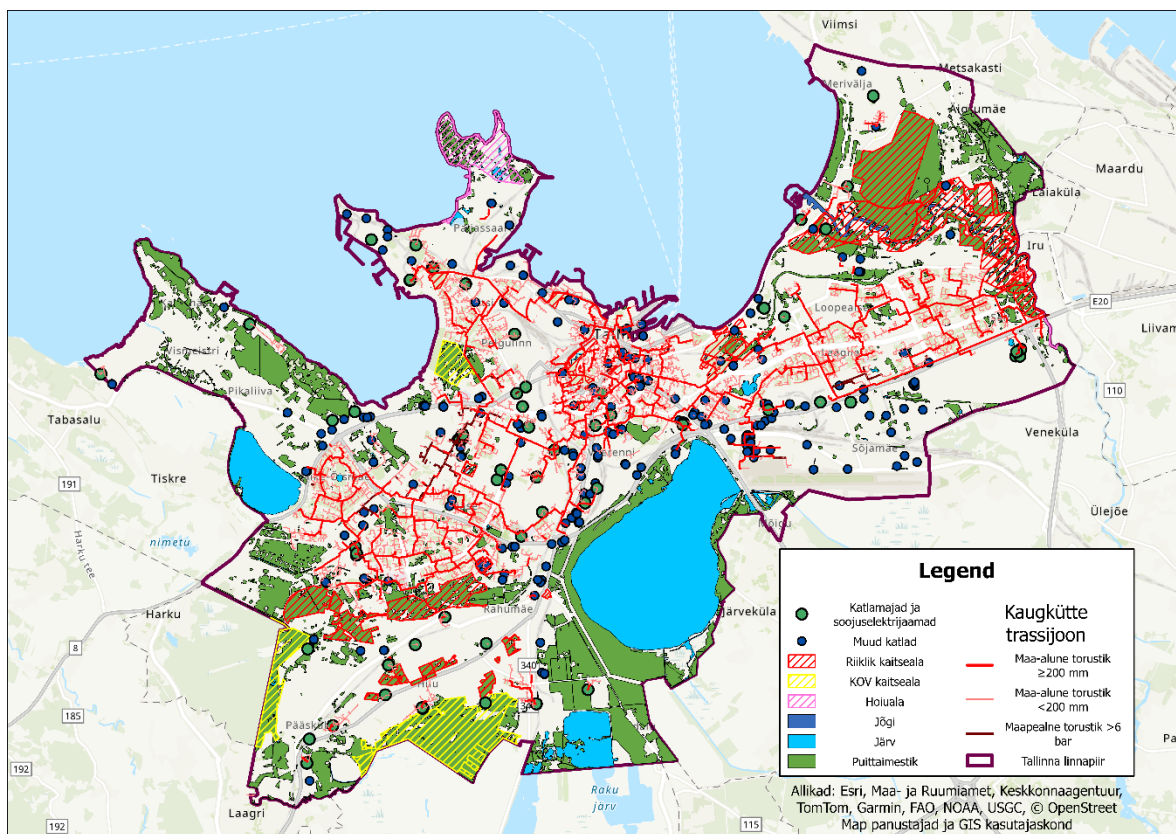
Joonis 2.5 koondab Tallinna peamised ruumilised piirangud ja taristukihid, mis võivad mõjutada tehniliste lahenduste kavandamist. Joonis 2.6 seob need piirangud kaugküttetaristu, tootmisüksuste ja võimalike ühendustrassidega. Kaartide koostamine võimaldab hinnata, kas väikese kaugküttevõrgu ümberkujundamisel on realistlikum ühendamine suurema kaugküttevõrguga, lokaalse tootmislahenduse arendamine või vajadus täiendava tehnilise ja planeeringulise analüüsi järele.





Joonis 2.5 Näidis Tallinna kaardist ArcGIS Pro keskkonnas Geoportaalist alla laetud kihtidega





Joonis 2.6 Kaart Tallinna mandriosast ArcGIS Pro keskkonnas koos alla laetud kihtidega

Tabel 2.5 Andmete eeltötluse põhisammud ArcGIS Pro töövoos. [23], [47], [58]

| Samm                                  | Tegevus                                                                                               | Tulemus mudelis                                                        |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1. Import ja koordinaatsüsteem        | Kõik tabelid ja ruumikihid tuuakse geoandmebaasi ning teisendatakse samasse koordinaatsüsteemi.       | Kaugused, pindalad ja pikkused on võrreldavad.                         |
| 2. Geomeetria kontroll                | Parandatakse vigased geomeetriad, eemaldatakse duplikaadid, liidetakse sama võrgu lõigud.             | Vähendatakse valede pikkuste ja kattuvuste riski.                      |
| 3. Tarbijate kontroll                 | Tarbija hooned seotakse võrgu ID-ga ja kontrollitakse EHR-i, kaugküttepiirkonna või muu allika järgi. | Tarbijate arv ja ruumiline klaster on usaldusväärsemad.                |
| 4. Võrgu keskpunkt ja analüüsitsoonid | Luuva võrgu tsentroid, katlamaja punkt ja 250/500/1000/2000 m tsoonid.                                | Võimaldab lähedusanalüüsi ja soojusallikate eelsõelumist.              |
| 5. Lähedusanalüüs                     | Arvutada kaugus suure võrguni, mere/reovee/heitsoojusallikateni ja piirangualadeni.                   | Tekivad ruumilised kriteeriumid skoorimiseks.                          |
| 6. Koridori hinnang                   | Hinnata realistlikku ühendusmarsruuti mööda tänavavõi tehnikoridori.                                  | Sirgjooneline kaugus asendub planeerimislikult tõlgendatava kaugusega. |
| 7. Normaliseerimine                   | Teisendada kriteeriumid 1-5 skaalale või 0-1 vahemikku.                                               | Erinevad näitajad muutuvad kaalutud mudelis võrreldavaks.              |
| 8. Kvaliteediklass                    | Märkida andmeväljade usaldusväärsus ja puuduvad andmed.                                               | Tulemuste tõlgendamisel eristatakse tugevad ja nõrgad järeldused.      |

Kõigi eeltöötuse sammude tulemuseks on võrgu tasemel analüüsitabel, kus igal real on üks väike kaugküttevõrk ning veergudes on nii arvutatud energiabilansi näitajad kui ka GIS-ist saadud ruumilised näitajad. See tabel on mitmekriteeriumilise hindamismudeli sisend. Kui mõni oluline näitaja puudub, ei tohiks seda vaikimisi nulliks seada, sest null võib tähendada nii andmepuudust kui ka tegelikku puudumist. Puuduvate andmete jaoks tuleb kasutada eraldi märgendit ning vajadusel arvutada mudel kahes variandis: konservatiivne variant, kus puuduv väärtus vähendab sobivust, ja optimistlik variant, kus puuduv väärtus ei välista lahendust enne täiendavat kontrolli. [23], [58]

## **2.2 Mitmekriteeriumiline hindamismudel**

Mitmekriteeriumilise hindamismudeli eesmärk on võrrelda väikesi kaugküttevõrke olukorras, kus ühte tehnilist või majanduslikku näitajat ei saa pidada ainsaks otsustusalusel. Näiteks võib mõnel võrgul olla kõrge heitmeintensiivsus, kuid pikk ja keeruline ühendus põhivõrguga. Teisel võrgul võib olla lühike ühenduskaugus, kuid väike soojusmaht ja madal heitmed. Kolmandal võrgul võib olla hea asukoht mere või reoveetaristu lähedal, kuid olemasolev temperatuurirežiim võib vähendada soojuspumba kasutegurit. Mitmekriteeriumiline mudel teeb sellised kompromissid nähtavaks. [23], [54], [65]

Mudelit ei käsitleta absoluutse tõena, vaid otsustustoena. Tulemus on skoor, klass või prioriteetsus, mida tuleb tõlgendada koos andmete kvaliteedi ja mudeli piirangutega. MCDA tugevus seisneb läbipaistvuses: kriteeriumid, kaalud ja skoorimise loogika on nähtavad ning neid saab muuta, kui otsustaja soovib rõhutada näiteks heitmevähendust, investeerimislihtsust või varustuskindlust [23]. Kaalude määramisel kasutatakse kombineeritud lähenemist. Esmased kaalud valitakse kirjanduse ja insenertehnilise põhjenduse põhjal. Seejärel kontrollitakse tulemuste tundlikkust, muutes peamiste kriteeriumide kaalu. AHP-põhimõtet saab kasutada ekspertide kaasamisel, sest see võimaldab kriteeriume paarikaupa võrrelda ja kaalud süsteemselt tuletada. [54], [65]

Tallinna väikeste kaugküttevõrkude dekarboniseerimise hindamiseks kasutatakse töös lihtsustatud GIS-põhist mitmekriteeriumilist hindamismudelit. Mudeli teoreetiline alus on mitmekriteeriumiline otsustusanalüüs, mille puhul eri tüüpi kriteeriumid teisendatakse võrreldavale hindamisskaalale ning seejärel kombineeritakse koondhinnanguks. GIS-MCDA käsitluses on oluline, et ruumilised kriteeriumid, näiteks maakasutus, hoonestus, veekogud, kaitsealad, teed ja tehnilised koridorid, seotakse otsustusreeglitega raster- või vektorkeskkonnas [53]. Selles töös kasutatakse

lihtsustatud aditiivset mudelit, mis on sisuliselt lihtsa aditiivse kaalumise ehk SAW-meetodi ruumiline rakendus. SAW-meetodi tugevus seisneb selles, et see on läbipaistev ja sobib alternatiivide võrdlemiseks mitme kriteeriumi põhjal ning iga kriteeriumi mõju väljendatakse numbrilisel skaalal [55].

Käesolevas töös kasutati lõplikus ArcGIS Pro töövoos siiski võrdsete kaaludega mudelit. Selline lihtsustus valiti seetõttu, et töö põhirõhk on Tallinna väikeste võrkude ruumilisel eelhindamisel ning kõik kasutatud ruumilised konfliktikihid kirjeldavad sama otsustusprobleemi eri tahke. Võrdsete kaalude kasutamine vähendab eksperthinnangust tulenevat subjektiivsust ja tuleb käsitleda eelhinnanguna.

Kõigile ruumilistele algkihtidele määrati atribuudiväljal  $MCDACOST$  kuluväärtus. Madal väärtus tähistab trassi rajamiseks soodsat või eelistatud ruumi ning kõrge väärtus tähistab ruumilist, õiguslikku või ehituslikku keerukust. Kõik kriteeriumikihid rasterdati samas koordinaatsüsteemis, sama tööala ja sama rasterlahutusega. Seejärel liideti rasterkihtide väärtused *Raster Calculator* töövoos üheks ühendamise kulupinnaks. Kuna kaalusid ei kasutatud, on ühendamise kulupind arvutatud kriteeriumide otsese summana. Kui rasterkihte on  $n$  ning iga rasterraku kriteeriumiväärtus on  $c_i$ , siis ühendamise kulupinna väärtus on kõikide rasterkihtide summa ja nende aritmeetiline keskmine annaksid trasside suhtelisel võrdlemisel sama järjestuse, kasutati praktilises ArcGIS Pro töövoos summat. Selle eelis on lihtsus ning otsene seos rasterrakkudele antud  $MCDACOST$  väärtustega. Suurema väärtusega rakud suurendavad ühendustrassi akumulereitud kulu ning seetõttu eelistab *Optimal Region Connections* tööriist madalama summaarse kuluga koridore. Tabelis 2.6 on  $MCDACOST$  väärtuste tõlgendus ühendustrassi kulupinnal.

Tabel 2.6  $MCDACOST$  väärtuste üldine tõlgendus ühendustrassi kulupinnal.

| <b><math>MCDACOST</math></b> | <b>Tõlgendus</b>                                                                                       |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                            | Väga soodne või eelistatud trassikoridor                                                               |
| 3                            | Pigem soodne või väikese lisariskiga ala                                                               |
| 5                            | Neutraalne või mõõduka keerukusega ala                                                                 |
| 7                            | Keerukas ala, mille läbimist tuleks võimalusel vältida                                                 |
| 9                            | Väga keerukas ala, mille läbimine on võimalik ainult tugeva põhjenduse korral                          |
| 99                           | Kõrge piiranguga ala; mudelis ei välistata absoluutselt, kuid trass suunatakse sellest tugevalt eemale |

Sillad ja tunnelid käsitleti erandkihina, mitte eraldi boonuskihina. Kuna töövoog tuli hoida lihtne, ei loodud sildade ja tunnelite ümber eraldi leevendavat rasterkoridori. Selle asemel kasutati *Erase* tööriista: veekogude ja rööbasteede objektid eemaldati nendest asukohtadest, kus sillad või tunnelid võimaldavad ristumist. Selline lahendus vähendab trassi kulupinnal veekogu või rööbastee mõju just nendes kohtades, kus olemasolev

taristu võib füüsilise ristumise muuta realistlikumaks. Metoodiliselt tähendab see, et mudel ei premeeri kõiki sildu ja tunneleid, vaid eemaldab takistuse ainult võimaliku ristumiskoha ulatuses.

### 2.2.1 Mudeli algoritm

Mudeli esimene etapp oli ruumiliste lähtekihtide ettevalmistamine. Kõigile ühenduskoridori mõjutavatele kihtidele määrati atribuudiväli COST, mille väärtus väljendas vastava objekti läbimise suhtelist keerukust. Madal väärtus tähistas eelistatavat või tehniliselt lihtsamat koridori ning kõrge väärtus viitas suuremale ruumilisele, õiguslikule või ehituslikule riskile. Selline skaleerimine võimaldas kasutada erineva sisuga ruumiandmeid ühtses rasterpõhises kulumudelis. Katastriüksuste puhul arvestati nii omandivormi kui maakasutuse sihtotstarvet, teede puhul eelistati transpordikoridore, hoonete, veekogude, kaitsealade ja järskude nõlvade puhul kasutati kõrgeid kuluväärtusi.

Teises etapis teisendati ettevalmistatud vektorandmed rasterkihtideks. *Polygon*-kihtide puhul kasutati *Polygon to Raster* tööriista ning joonkihtide puhul *Polyline to Raster* tööriista. Kõik rasterkihid viidi samasse koordinaatsüsteemi, lahutusse, ulatusse ja ruudustiku joondusse. Selle tulemusena sai iga rasterrakk väärtuse, mis väljendas vastava kriteeriumi suhtelist ühenduskulu. Ruumilise MCDA rastermudeli põhimõtte kohaselt saab seejärel kattuvate rakkude väärtusi aritmeetiliselt kombineerida, et leida koondindeks või kulupind [53].

Kolmandas etapis liideti kõik COST-väärtustega rasterkihid võrdse kaaluga koondkulupinnaks. Kuna eksperdipõhist kriteeriumikaalude määramist ei tehtud, kasutati kõigi ruumiliste kriteeriumide puhul sama kaalu. Kuna *Optimal Region Connections* tööriista jaoks on oluline rakkude omavaheline suhteline kulu, ei muuda summa jagamine kriteeriumide arvuga trasside järjestust, vaid ainult arväärtuste skaalat.

Neljandas etapis kasutati ArcGIS Pro tööriista *Optimal Region Connections*. Sisendregioonidena kasutati Tallinna suurt kaugküttevõrku ja vaadeldavaid väikevõrke ning kulupinnana eelnevalt koostatud koondkulurasterit. Tööriist leidis võrkude vahel madalaima kumulatiivse ruumilise kuluga ühendusjooned. Tulemuseks saadi iga väikevõrgu jaoks ühendus geomeetria, ühenduse pikkus, suhteline ühenduskulu ja suhteline kulu meetri kohta. Sarnane ruumilise ühenduse ja laienduse eelhindamine on vajalik, sest kaugküttevõrgu laiendamise sobivus sõltub lisaks tarbimiskoormusele ka

ühendustrassi pikkusest, ruumilisest keerukusest ja hilisemast torustiku täituvusest [56].

Viiendas etapis teisendati ühendamise tulemus võrgupõhiseks skooriks  $S_{ühendus}$ .  $S_{ühendus}$  anti skaalal 1–5, kus 5 tähistas väga sobivat ühendamisvariant ja 1 vähesobivat ühendamisvariant. Skoor põhines eelkõige ühenduse pikkusel ning suhtelisel kulul, sest just need näitajad kirjeldavad planeerimistasandil ühendamise ruumilist keerukust. Lühikeste ühenduste puhul on võimalik olemasolevat suurt kaugküttevõrku kasutada väikese võrgu dekarboniseerimise lähtepunktina; pikkade ja keerukate ühenduste puhul muutub lokaalne lahendus suhteliselt atraktiivsemaks.

Kuuendas etapis arvutati lokaalse lahenduse sobivusskoor  $S_{lokaalne}$ . Selle eesmärk oli anda kiire võrdlushinnang olukordades, kus ühendustrassi rajamine on keeruline või pikk, kuid võrgu koormus ja heide annavad selge põhjenduse lokaalsete taastuv- või madalsüsinikuliste lahenduste kaalumiseks. Lokaalse lahenduse skoor arvutati valemiga:

$$S_{lokaalne} = 0,35 \cdot S_{trassikeerukus} + 0,25 \cdot S_{CO_2} + 0,20 \cdot S_{koormus} + S_{kütus} \quad (2.1)$$

kus  $S_{trassikeerukus}$  - kirjeldab ühenduse ruumilist keerukust,

$S_{CO_2}$  - võrgu heite vähendamise potentsiaali,

$S_{koormus}$  - soojusnõudluse suurus,

$S_{kütus}$  - olemasoleva kütuse või tootmislahenduse asendamise vajadust.

Trassikeerukusele anti suurim kaal, sest lokaalne lahendus muutub eelkõige asjakohaseks siis, kui ühendamine suure võrguga on pikk või kulukas.  $CO_2$  kriteeriumile anti teine kaal, kuna töö keskne eesmärk on dekarboniseerimine. Koormuse ja kütuse kriteeriumid said väiksema, kuid võrdse kaalu, sest need täpsustavad lokaalse lahenduse põhjendatust, kuid ei asenda ühenduskeerukuse ja heitepõhise hinnangu rolli.

Lõplik otsus tehti kahe skoori võrdlusena. Kui  $S_{ühendus}$  oli suurem kui  $S_{lokaalne}$ , klassifitseeriti võrk kaugküttega ühendamise kandidaadiks. Kui  $S_{lokaalne}$  oli suurem kui  $S_{ühendus}$ , klassifitseeriti võrk kohaliku ehk lokaalse lahenduse kandidaadiks. Võrdsete või väga lähedaste väärtuste korral tuleks võrk määrata täiendavasse detailanalüüsi, kuid käesoleva andmestiku puhul oli lõplik klassifikatsioon võimalik kõigi vaadeldud võrkude jaoks.

Väikevõrkude tehnilise toimivuse, heitmeintensiivsuse ja dekarboniseerimislahenduste võrdlus tugineb mitmele arvutuslikule parameetrile. Lineaarne soojustihedus näitab, kui palju soojust müüakse võrgu pikkuse ühe meetri kohta (võrrand 2.2), mistõttu iseloomustab see kaugküttevõrgu ruumilist kasutustihedust ja torustiku koormust. Kõrge lineaarne soojustihedus toetab võrgu säilitamist või suure võrguga ühendamist, sest torustiku püsikulud ja soojuskaod jagunevad suuremale müüdüd soojusmahule. Madal väärtus ei välista kaugkütet, kuid viitab vajadusele kontrollida võrgu kadusid, tarbijate hajusust ja võimalikke lokaalseid alternatiive. JASPERSi juhendis toodud 2 MWh·m<sup>-1</sup> väärtust saab kasutada eelsõelumise võrdluspunktina, kuid Tallinna väikeste võrkude puhul tuleb seda tõlgendada koos olemasoleva taristu, kütusekasutuse ja ruumilise paiknemisega. [1]

Heitmeintensiivsus väljendab, kui palju CO<sub>2</sub>-heidet tekib ühe müüdüd soojusenergia ühiku kohta (võrrand 2.3), võimaldades võrrelda eri suurusega võrke ühtsel alusel. Heitme vähendamise potentsiaali hindamisel tuleb see siduda ka võrgu soojusmahuga, sest väike, kuid väga kõrge heitmeintensiivsusega võrk võib olla oluline kohaliku prioriteedina, samal ajal kui suurem mõõduka heitmeintensiivsusega võrk võib anda absoluutarvudes suurema CO<sub>2</sub>-vähenduse. Seetõttu kasutatakse töös kahte näitajat: kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> ja t CO<sub>2</sub>·a<sup>-1</sup>. Esimene kirjeldab soojusvarustuse süsinikumahukust, teine aga võimaliku projekti kogumõju linna kliimaeesmärkidele. [1], [20], [31]

$$q_L = \frac{Q_{müüdüd}}{L} \quad (2.2)$$

kus  $q_L$  on lineaarne soojustihedus, MWh·m<sup>-1</sup>;

$Q_{müüdüd}$  on aastane müüdüd soojus, MWh;

$L$  on võrgu pikkus, m.

$$e = \frac{CO_{2\text{neto}}}{Q_{müüdüd}} \cdot 1000 \quad (2.3)$$

kus  $e$  on netoheitme intensiivsus, kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup>;

$CO_{2\text{neto}}$  on aastane netoheitmed, t CO<sub>2</sub>·a<sup>-1</sup>.

## 2.2.2 Mudeli kriteeriumid

Ühenduskoridori hindamisel kasutatud ruumilised kriteeriumid väljendavad eelkõige torustiku rajamise ruumilist eelistatavust või keerukust. Ruumilise MCDA põhielemendid on alternatiivid, kriteeriumid ja otsustusreegel; käesolevas mudelis on alternatiivideks ühendamine ja lokaalne lahendus ning kriteeriumid jagunevad ruumilisteks ühenduskriteeriumideks ja võrgupõhisteks lokaalse lahenduse kriteeriumideks. Mudeli kriteeriumid on valitud nii, et need kirjeldaksid korraga tehnilist sobivust,

keskkonnamõju ja ruumilist teostatavust. Kriteeriumide arv ei tohi olla liiga suur, sest liiga detailne mudel jätab eksliku mulje täpsusest. Samas peab kriteeriumide kogum katma kõik peamised otsustegurid: soojuskoormus, kaugus, heitmed, soojusallikad, piirangud ja paigutatavus [23], [54]. Tabelis 2.7 on esitatud ühenduskoridoride ruumilised kriteeriumid ja tõlgendused.

Tabel 2.7 Ühenduskoridori ruumilised kriteeriumid ja nende tõlgendus

| Kriteerium                  | Kasutatud kiht                               | Madala COST väärtuse tähendus                                            | Kõrge COST väärtuse tähendus                                        |
|-----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Maakasutus ja omand         | Katastriüksused                              | Avalik või transpordiga seotud maa, kus koridori leidmine on tõenäolisem | Eraomand, kaitsealune maa, veekogude maa või ebaselge omandistaatus |
| Veekogud                    | Jõesed, ojad, tiigid ja järved               | Ristumine olemasoleva silla või tunneli kaudu                            | Veekogu läbimine ilma selge ristumiskohata                          |
| Puittaimestik               | Metsad ja põõsastikud                        | Väiksem haljastuskonflikt                                                | Ulatuslik puittaimestik või haljastuskonflikt                       |
| Kaitsealad                  | Riiklikud, linna ja hoiualad                 | Kattuvus puudub                                                          | Kaitsealal paiknemine või selle läbimine                            |
| Nõlvad                      | Tallinna nõlvad                              | Väike nõlvakalle                                                         | Järsk nõlv ja keerukam ehitatavus                                   |
| Teed ja transpordikoridorid | Tallinna teed                                | Olemasolev tee- või transpordimaa koridor                                | Lennurada, määramata ala või keeruline liiklusala                   |
| Hooned ja rajatised         | Hooned, muud rajatised, maa-alused rajatised | Objektidest vaba ala                                                     | Hoonestatud või maa-aluste rajatistega konfliktne ala               |
| Rööbasteed                  | Trammi- ja raudteed                          | Ristumine silla või tunneli kaudu                                        | Raudtee või trammittee läbimine ilma sobiva ristumiskohata          |
| Olemasolev kaugküttetrass   | Tallinna kaugkütte trassijoon                | Olemasolev energiakoridor või ühendusele lähedane asukoht                | Olemasolevast võrgust kaugel paiknev ala                            |

Lokaalse alternatiivi kriteeriumid valiti nii, et need oleksid arvutatavad olemasolevast väikevõrkude andmestikust ning toetaksid töö eesmärki eristada võrgud võimalike dekarboniseerimisteedekondade järgi. Tabelis 2.8 on esitatud lokaalsete lahenduste skooride kriteeriumid. Kriteeriumide valikul lähtuti sellest, et need oleksid operatiivsed, väldiksid liigset dubleerimist ja jääksid piiratud andmestiku korral tõlgendatavateks. [55].

Tabel 2.8 Lokaalse lahenduse skoori kriteeriumid

| Kriteerium       | Kaal | Skoori 1 tähendus                          | Skoori 5 tähendus                            | Põhjendus                                                                                                                                       |
|------------------|------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Strassikeerukus  | 0,35 | Ühendamine on lühike ja ruumiliselt soodne | Ühendamine on pikk või ruumiliselt keeruline | Kõige olulisem lokaalse alternatiivi argument on ühenduse keerukus. Kui ühendus suure võrguga on lihtne, on lokaalse lahenduse vajadus väiksem. |
| S <sub>CO2</sub> | 0,25 | Heite vähendamise potentsiaal on väike     | Heite vähendamise potentsiaal on suur        | Dekarboniseerimise eesmärgi tõttu on kõrge                                                                                                      |

|                      |      |                                               |                                                                 | CO <sub>2</sub> -heitega<br>prioriteetsed. võrgud                                             |
|----------------------|------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| S <sub>koormus</sub> | 0,20 | Soojusnõudlus on väike                        | Soojusnõudlus on suur                                           | Suurem koormus parandab lokaalse lahenduse kasutust ja võib põhjendada eraldi investeeringut. |
| S <sub>kütus</sub>   | 0,20 | Olemasolev lahendus on juba madalsüsinikuline | Olemasolev lahendus põhineb fossiilkütusel või vajab asendamist | Kütusepõhine skoor näitab, kui tugev on olemasoleva tootmise asendamise vajadus.              |

Ühendamise skoori teisendamiseks kasutati viieastmelist skaalat. Väga lühikeste ja väikese suhtelise kuluga ühenduste korral anti  $S_{ühendus}$  väärtuseks 5. Keskmise pikkuse ja kuluga ühendused said väärtuse 2–3 ning pikad või ruumiliselt keerukad ühendused väärtuse 1. Lokaalse lahenduse trassikeerukuse komponent arvutati ühendamise skoori pöördväärtusena:

$$S_{trassikeerukus} = 6 - S_{ühendus} \quad (2.4)$$

Seega annab hästi ühendatav võrk lokaalse lahenduse trassikeerukuse komponendile madala väärtuse, samas kui raskesti ühendatav võrk annab sellele kõrge väärtuse. See on oluline, sest lokaalne lahendus ei konkureeri ühendamisega samadel alustel: lokaalse lahenduse eelistamise peamine põhjus on sageli just ühendamise ruumiline ja majanduslik keerukus. Tabelis 2.9 esitatud üldkaalud sobivad esialgseks pingereaks, kuid alternatiivide võrdlemisel tuleb neid kohandada. Ühendamise alternatiivi puhul on kaugus suurest võrgust ja lineaarne soojustihedus olulisemad kui heitsoojuse lähedus. Lokaalse soojuspumba puhul suureneb madalatemperatuurilise allika ja tehnorajatiste paigutatavuse kaal.

### 2.2.3 Kaitsealad ja muud ruumilised välistused

Kaitsealad, veekogud, hooned, järsud nõlvad ja maa-alused rajatised on ühenduskoridori planeerimisel kriitilised ruumilised piirangud. Käesolevas töös ei moodustatud neist eraldi absoluutset takistusrasterit, vaid need sisestati kulupinda COST-väärtuste kaudu. Väga kõrge kuluväärtus ei tähenda alati absoluutset õiguslikku võimatust, kuid suunab mudeli eelistama koridore, mis neid alasid väldivad. Selline käsitus sobib eelhindamise tasemele, sest mudeli eesmärk on tuvastada suhteliselt paremad ühendussuunad, mitte kinnitada ehituslikult lõplikku trassi. Kui kaitseala läbimine on ainus realistlik võimalus, tuleb see märkida tugeva piiranguna ning lahendus suunata täiendavasse lubade ja keskkonnamõju hindamise kontrolli. [56]

Veekogude ja rööbasteede puhul kasutati täiendavalt sildade ja tunnelite lihtsustatud leevendust. Sildade ja tunnelite kattuvad osad eemaldati takistavatest joontest või *polygonidest Erase* tööriistaga. Seetõttu ei käsitletud mudel olemasolevat ristumiskohta



samaväärselt läbimatu takistusega. Siiski tuleb rõhutada, et see on planeerimistasandi eeldus. Tegelik võimalus paigaldada kaugküttetorustik silla konstruktsioonile, tunneli lähedusse või raudtee ületuse piirkonda vajab järgmises etapis eraldi tehnilist ja kooskõlastuslikku kontrolli.

Kaitsealade puhul eelistati konservatiivset tõlgendust. Kui ühenduskoridor sattus kaitsealale, suurenes kulupinna väärtus ning mudel otsis alternatiivset teekonda. Kaitsealade puhul ei ole küsimus üksnes ehituslikus keerukuses, vaid ka lubade, looduskaitseliste piirangute ja avaliku huvi tasakaalus. Sama põhimõtte kehtib veekogude, hoonete ja tihedalt hoonestatud kinnistute kohta. Seetõttu tuleb mudeli tulemusi tõlgendada kui esmast ruumilist sobivust, millele peab järgnema täpsem projekteerimis- ja kooskõlastusprotsess.

## 2.3 Andmete kvaliteet ja mudeli piirangud

Mudeli tulemused sõltuvad otseselt lähteandmete täpsusest, ajakohasusest ja ruumilisest lahtusest. Kasutatud andmestik võimaldab teha Tallinna väikevõrkude ruumilise planeerimise eelhindangu. Kõige olulisem piirang seisneb selles, et ruumilised COST-väärtused on eksperthinnangulised ja suhtelised. Need kirjeldavad, kas trassi kulgemine läbi konkreetse ruumilise objekti on tõenäoliselt lihtsam või keerulisem, kuid ei anna otsest eurodes väljendatud ehitusmaksumust.

Teiseks kasutati ruumilises kulumudelil võrdseid kriteeriumikaale. Tavapärases MCDA protsessis võib kriteeriumide olulisust määrata näiteks AHP paarisvõrdluste abil, mille põhjal saadakse kaalud otsustaja eelistustest [54]. Käesolevas töös sellist kaalude tuletamist ei tehtud, sest töö eesmärk oli koostada rakendatav ja läbipaistev esmane mudel olemasoleva andmestiku põhjal. Võrdkaaluline mudel vähendab põhjendamata kaalude riski, kuid samal ajal ei kajasta see olukorda, kus näiteks kaitsealad, maaomand või maa-alused rajatised võivad praktikas olla oluliselt määravamad kui muud kriteeriumid.

Kolmandaks on sildade ja tunnelite käsitlemine lihtsustatud. *Erase* tööriistaga eemaldatud lõigud lubavad mudelil olemasolevat ristumiskohta arvestada, kuid ei tõenda, et konkreetne ristumine on tehniliselt, õiguslikult või majanduslikult teostatav. Sama kehtib ka *Optimal Region Connections* tööriista väljundite kohta. Leitud ühendusjooned on optimaalsed valitud kulupinna tingimustes, kuid need ei ole projekteeritud torustikutrassid. Tegelik trass tuleb hiljem täpsustada tänavaruumis,

tehnovõrkude kooskõlastustes, kinnistupiiride, torustiku läbimõõdu, rõhukadude ja temperatuurigraafiku alusel.

Neljandaks on lokaalse lahenduse hindamine indikatiivne. Valem  $S_{\text{lokaalne}}$  ei arvuta konkreetse soojuspumba, biomassikatla, elektrikatla või heitsoojuslahenduse investeeringut, kasutegurit ega elektritarbimist. See annab üksnes võrdleva sobivusskoori, mis näitab, milliste võrkude puhul on lokaalne lahendus ühendamisega võrreldes tõenäoliselt olulisem alternatiiv. Täpsemaks hindamiseks oleks vaja tehnoloogiapõhiseid stsenaariume, tunnipõhist või vähemalt kuupõhist soojuskoormust, elektri hinna ja heitmeteguri stsenaariume, olemasolevate katlamajade ruumivõimalusi ning hinnangut madalatemperatuuriliste soojusallikate olemasolule.

Viiendaks tuleb arvestada, et müüdnud soojuse, kütusetarbimise ja CO<sub>2</sub>-heite andmed on aastapõhised. Need sobivad võrkude omavaheliseks eelhindamiseks, kuid ei kirjelda tipukoormust, koormuse kestuskõverat ega hooajalisi erinevusi. Kaugkütteühenduse tegelik tehniline sobivus sõltub ka sellest, kas suur võrk suudab katta väikese võrgu tipukoormuse, millised on temperatuuri- ja rõhutingimused ning kas ühendus annaks süsteemile kasu ainult aastabilansis või ka operatiivses juhtimises.

Kuues piirang on torustiku täpne geomeetria. Avalikult kättesaadavad ruumiandmed ei pruugi sisaldada kõiki kaugküttetorustiku lõike, läbimõõte, vanust, isolatsiooniklassi ega rekonstrueerimisvajadust. Lineaarse soojustiheduse arvutamisel kasutatakse kogupikkust, kuid see ei näita torustiku seisukorda ega kadusid. Kaks sama MWh/m väärtusega võrku võivad olla väga erinevas olukorras, kui üks on uus ja hästi isoleeritud ning teine vana ja suurte kadudega. [1], [47], [58]

## **2.4 Tallinna võrkude dekarboniseerimise hindamise parameetrid**

Dekarboniseerimise hindamise parameetrid on vajalikud selleks, et mitmekriteeriumilise mudeli tulemus ei jääks ainult ruumiliseks pingereaks. Iga võimalik üleminekuteekond peab olema seostatav mõõdetava mõjuga: kui palju väheneb fossiilkütuse kasutus, kui palju väheneb CO<sub>2</sub>-heitmed, kui suur osa soojusest asendatakse madala heitmega allikaga ja kui suur on muutus võrreldes Tallinna suure kaugküttevõrgu keskmisega. Need parameetrid ei asenda tasuvusanalüüsi, kuid annavad ühtse mõju hindamise raamistiku. [1], [5], [23] Tabelis 2.9 on esitatud dekarboniseerimise hindamise peamised parameetrid.

Baastase on olemasolev olukord. Põhiandmestiku järgi on uuritavate väikeste võrkude müüdnud soojus  $61750,7 \text{ MWh}\cdot\text{a}^{-1}$  ja neto- $\text{CO}_2$ -heitmed  $14971,0 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ . Keskmise netoheitme intensiivsus on  $252,5 \text{ kg CO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$ . Baastaset kasutatakse kõigi stsenaariumide võrdlusalusena. Kui hiljem täpsustuvad kütusekogused või müüdnud soojus, tuleb baastase uuendada ja kõik vähendusnäitajad uuesti arvutada. [59]

Esimene põhinäitaja on välditud  $\text{CO}_2$ -heitmed. See arvutatakse baastaseme ja stsenaariumi heitmeintensiivsuse vahena. Ühendamisstsenaariumis võib stsenaariumi heitmeintensiivsuseks võtta Tallinna suure kaugküttevõrgu keskmise netoheitme intensiivsuse, kui analüüsi eesmärk on esmase võrdluse tegemine. [1], [4], [20]

Teine põhinäitaja on fossiilkütuse asendamine. Kui võrk kasutab maagaasi või põlevkiviõli, saab ülemineku mõju kirjeldada välditud kütusekogusena. Andmestiku koondtasemel oli väikevõrkudes maagaasi kasutus  $6612,1$  tuhat  $\text{Nm}^3$  ning põlevkiviõli kasutus  $712,5 \text{ t}$ . Fossiilkütuse vähenemist tuleb eelistatult esitada kütuseliikide kaupa, sest kliimamõju, varustuskindlus ja hinnariski profiil erinevad. Kui stsenaarium asendab ainult osa aastasest soojusest, tuleb välditud kütusekogus korrutada asendatava soojuse osakaaluga.

Kolmas põhinäitaja on soojuse heitmeintensiivsus. See võimaldab võrrelda eri suurusega võrke ning eri tehnoloogiaid. Ühendamisstsenaariumi puhul sõltub intensiivsus suure võrgu tootmisportfellist. Soojuspumbastsenaariumi puhul sõltub see elektri heitmefaktorist ja COP-st. Biomassi või biogaasi puhul tuleb eristada biogeenset ja fossiilset  $\text{CO}_2$  ning arvestada kütuse jätkusuutlikkuse piiranguid. Kirjanduses rõhutatakse, et biomassi kasutamine võib olla osa dekarboniseerimisest, kuid seda tuleb käsitleda piiratud ressursina ning mitte automaatse universaalse lahendusena. [28], [29]

Neljas parameeter on varustuskindlus. Dekarboniseerimine ei tohi vähendada soojusvarustuse töökindlust. Kui lokaalne katlamaja asendatakse ühendusega suure võrku, tuleb hinnata, kas endist katelt säilitatakse reservina või likvideeritakse. Kui võrk saab lokaalse soojuspumba, tuleb määrata tipukoormuse ja reservi allikas. Soojussalvestus võib suurendada paindlikkust ning vähendada fossiilse tipukatla kasutust. [22], [40]

Viies parameeter on elluviimise järjekord. Kõrge  $\text{CO}_2$ -vähendus ei tähenda alati, et projekt tuleb ellu viia esimesena. Esimese järjekorra projektid võiksid olla need, kus heitmevähendus, ruumiline teostatavus ja andmekvaliteet on korraga head. Teise

järjekorra projektid on need, kus potentsiaal on suur, kuid vaja on täiendavaid koormus- või temperatuurimõõtmisi. Kolmanda järjekorra projektid on need, kus andmepuudus või ruumilised piirangud on nii suured, et enne otsust tuleb teha eraldi teostatavusuuring. [1], [23]

Tabel 2.9 Dekarboniseerimise hindamise peamised parameetrid. [1], [5], [20]

| Parameeter                        | Arvutus<br>kirjeldus                                       | Tõlgendus                              | Kasutus<br>otsustamisel                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Välditud CO <sub>2</sub> -heitmed | Võrrand 2.6                                                | Näitab projekti absoluutset kliimamõju | Prioriseerib suure mõjuga projekte                         |
| Heitmeintensiivsus                | kg CO <sub>2</sub> ·MWh <sup>-1</sup> müüdud soojuse kohta | Võimaldab eri suurusega võrke võrrelda | Näitab, kus soojus on kõige süsinikumahukam                |
| Madala heitmega soojuse osakaal   | Madala heitmega allika MWh / võrgu MWh                     | Näitab ülemineku ulatust               | Võimaldab võrrelda 50%, 80% ja 100% stsenaariume           |
| Varustuskindlus                   | Reservvõimsus, tipukoormuse lahendus, salvestus            | Näitab, kas lahendus on töökindel      | Väldib ainult keskmisele energiabilansile tuginevat otsust |
| Skaleeritavus                     | Kas lahendus sobib ühele või mitmele võrgule               | Näitab piirkondliku mõju potentsiaali  | Aitab planeerida klastripõhiseid lahendusi                 |
| Andmekvaliteet                    | Sisendandmete usaldusväärsus                               | Näitab tulemuse kindlust               | Määrab, kas otsus võib minna järgmisse etappi              |

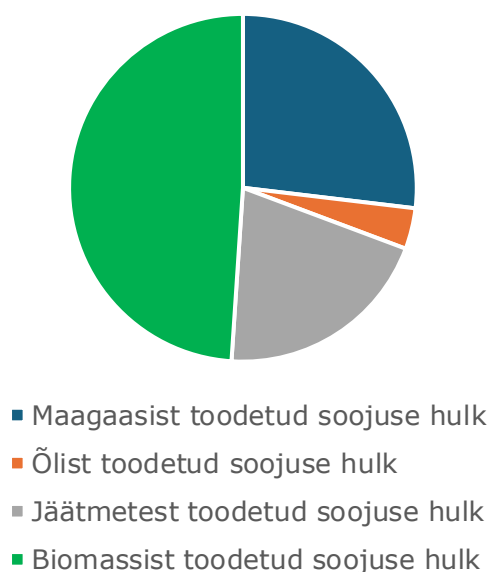
### 3. TULEMUSED

Tulemuste peatükis esitatakse ArcGIS Pro põhise ühendusanalüüsi ja lihtsustatud lokaalse lahenduse võrdlusindeksi tulemused. Kokku hinnati 18 Tallinna väikest kaugküttevõrku. Kõigi võrkude kohta leiti ühendus suure kaugküttevõrguga, arvutati ühenduse pikkus ja suhteline ühenduskulu ning võrreldi ühendamise skoori lokaalse lahenduse sobivusskooriga. Tulemused on planeerimistasandi indikatiivsed ning nende eesmärk on eristada võrgud edasiste dekarboniseerimisteedekondade järgi, mitte määrata lõplikku ehituslikku lahendust.

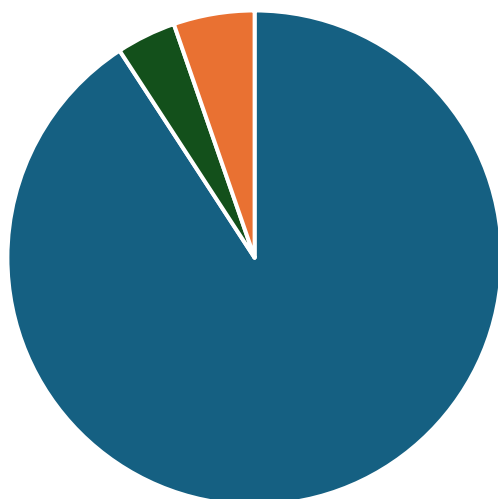
#### 3.1 Lähteandmete kogumise tulemus

Tallinna suure võrgu summaarseks toodetud soojuseks 2 102 572,8 MWh ja müüdud soojuseks 2 075 577,9 MWh. Joonis 2.1 näitab müüdud soojuse jaotuses moodustas biomass ligikaudu 49,0%, olmejäätmed 19,7%, maagaas 27,6% ning põlevkiviõli 3,8%. Kogu CO<sub>2</sub>-heitmed oli 826 733,2 t, biogeenne CO<sub>2</sub> 534 045,1 t ja neto-CO<sub>2</sub> 292 688,1 t.

Suurvõrgu netoheitme intensiivsus oli tööfaili põhjal 141,0 kg CO<sub>2</sub>/MWh müüdud soojuse kohta. See on oluliselt madalam kui uuritavate väikeste võrkude netoheitme intensiivsus 252,5 kg CO<sub>2</sub>/MWh. Selline erinevus annab aluse käsitleda ühendamist suure võrguga ühe võimaliku dekarboniseerimisvariandina. Samas tuleb meeles pidada, et suure võrgu tulevane heitmeintensiivsus muutub, eriti Paljassaare soojuspumba ja teiste investeeringute tõttu.



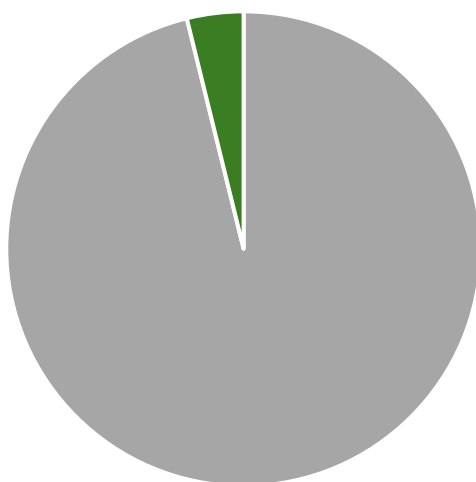
Joonis 3.1 Tallinna kaugküttevõrgus toodetud soojuse kütuseallikad



- Maagaasist toodetud soojuse hulk
- Biogaasist toodetud soojuse hulk
- Ölist toodetud soojuse hulk

Joonis 3.2 väikevõrkudes toodetud soojus

Töös kasutatud andmed on võetud aluseks 2023. aasta keskkonnakaitseloa aastaaruannete alusel. Ühes kaugküttevõrgus oli kasutatud biogaasi, mille puhul on tegemist taastuva kütusega ning mille põletamisel toodetud CO<sub>2</sub> on biogeense päritoluga, mis oma olemuselt ei ole lisanduvaks süsihappegaasi heitmeks atmosfääri. Seega on selle kaugküttevõrgu fossiilse CO<sub>2</sub> jalajälg selle võrra väiksem



- Fossiilne CO<sub>2</sub> väikevõrkudes
- Biogeenne CO<sub>2</sub> väikevõrkudes

Joonis 3.3 Väikevõrkudes toodetud CO<sub>2</sub> päritolu

Nõmme ja Pirita paistavad esile kui piirkonnad, kus on vaja terviklikumat vaatlust. Kui ühes linnaosas paikneb mitu väikest võrku, ei pruugi neid olla mõistlik käsitleda üksikhaaval. Võimalik on piirkondlik lahendus: osa võrke ühendatakse omavahel, osa suure võrguga, osa saab lokaalse soojusallika.

## 3.2 Ühendusanalüüs ja lokaalsed lahendused

*Optimal Region Connections* tööriista põhjal leiti kõigile väikevõrkudele võimalik ühendus suure kaugküttevõrguga. Ühenduste pikkused varieerusid märkimisväärselt. Kõige lühemad ühendused leiti Sepa võrgule, mille ühendus oli 130,1 m, ning Kasvu võrgule, mille ühendus oli 169,6 m. Kõige pikemad ühendused leiti Tiskre võrgule, mille ühendus oli 6035,8 m, ning Teelise võrgule, mille ühendus oli 5450,3 m. Kõigi võrkude keskmine ühenduse pikkus oli 2489,9 m.

Ühendamise kandidaadiks klassifitseeritud võrkudel oli ühenduse keskmine pikkus 410,7 m, samas kui lokaalse lahenduse kandidaatidena käsitletud võrkudel oli keskmine ühenduse pikkus 3289,6 m. See näitab, et lõplik otsus oli tugevalt seotud ühenduskoridori ruumilise läheduse ja keerukusega. Väiksema ühenduskaugusega võrgud said kõrgema ühendamise skoori ning seetõttu osutusid need sobivamaks suure kaugküttevõrguga ühendamise kandidaatideks.

Lokaalse lahenduse skoori arvutamisel andis suurima mõju ühenduse keerukus, mida käsitleti ühendamise skoori pöördväärtusena. Seetõttu said pikad ja ruumiliselt keerukad ühendused kõrge lokaalse lahenduse trassikomponendi. Sellele lisandus CO<sub>2</sub>-heite, müüdnud soojuse ja olemasoleva kütusepõhise tootmise mõju. Valemi kasutamine võimaldas võrrelda ka neid võrke, mille puhul detailne tehnoloogiapõhine modelleerimine ei olnud veel tehtud.

Tulemusena klassifitseerus 5 võrku suure kaugküttevõrguga ühendamise kandidaatideks ja 13 võrku lokaalse lahenduse kandidaatideks. Ühendamise kandidaatideks osutusid Järve, Kasvu, Mäe, Sepa ja Vana-Pärn. Need võrgud olid üldjuhul suurele kaugküttevõrgule lähedal ning nende ühendamise skoor ületas lokaalse lahenduse skoori. Kohaliku lahenduse kandidaatideks osutusid Haldja, Laste, Mahla, Merirahu, Metsavahi, Padriku, Põllu, Purje, Rahu, Sinirebase, Tellise, Tiskre ja Vabaduse. Nende puhul oli ühendus enamasti pikem või ruumiliselt keerukam ning lokaalse lahenduse skoor oli kõrgem. Tabelis 3.1 on esitatud ruumilise analüüsi koondandmed, mis käsitlevad nii ühendusanalüüsi kui ka lokaalset lahendust.

Võrgupõhine analüüs näitab, et suur osa uuritavate võrkude soojusmahust ja heitmest paikneb Nõmmel. Nõmme linnaosa sisaldab uuritavas valimis kümmet võrku, kokku üle 40 GWh müüdud soojust ning ligikaudu 9,85 kt CO<sub>2</sub> koguheitmeid. Pirita kahe võrgu müüdud soojus on ligikaudu 10,5 GWh ning heitmed ligikaudu 3,04 kt CO<sub>2</sub>. Haabersti kahe võrgu müüdud soojus on ligikaudu 4,16 GWh ning Põhja-Tallinna Sepa võrgu müüdud soojus ligikaudu 2,35 GWh.

Lineaarse soojustiheduse järgi on võrgud väga erinevad. Kõrgeima väärtusega on Järve, Teelise, Kasvu ja Mäe, mille soojuskoormus võrgu pikkuse kohta on suhteliselt hea. Madalama väärtusega on Merirahu, Padriku, Tiskre, Sinirebase ja Vana-Pärnu. Madal lineaarne soojustihedus võib viidata pikale torustikule vähese soojusmahu suhtes, hajusale hoonestusele või suurele arenduskulule võrgu ühendamisel. Samas tuleb seda alati kontrollida kaardi pealt: mõnel juhul võib madal näitaja tuleneda sellest, et torustik teenindab ruumiliselt laiali paiknevaid, kuid strateegiliselt olulisi tarbijaid.

CO<sub>2</sub> intensiivsuse järgi paistavad silma võrgud, kus kasutatakse põlevkiviõli või kus müüdud soojuse suhtes on heitmed kõrge. Põhja-Tallinna Sepa võrgus on koguheitme intensiivsus tööfaili põhjal üle 350 kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup>. Pirita Padriku võrgus on näitaja üle 300 kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup>. Need võrgud võivad saada kõrgema prioriteedi, kui eesmärk on vähendada fossiilset heitmeid kiiresti. Samas ei piisa ainult heitmest: kui võrgu ühendamine on ruumiliselt keeruline, võib lokaalne lahendus olla mõistlikum.

Peavõrguga ühendamise esmased kandidaadid on Sepa ja Järve, samas kui Kasvu, Mäe ning mitmed väikevõrgud on pigem „kiire otsuse” objektid: kas odav liitmine lähedase peavõrguga või võrgu sulgemine ja hoonepõhine asenduslahendus. Suurte soojuspumpade peamised kandidaadid on Tiskre, Merirahu, Metsavahi, Padriku ja Purje, kus merevee või põhjavee potentsiaal on ruumiliselt usutav. Biomassi/biogaasi peamised kandidaadid on Haldja ja eriti Põllu, kus biogaasi kasutus on juba olemas. Heitsoojuse kõige veenvamad kandidaadid on Mahla ja Teelise, kuid nende puhul on konkreetse allika inventuur kõige olulisem järgmine samm.

Joonistel 3.1–3.3 on esitatud ruumilise analüüsi peamised tulemused. Joonisel 3.1 on esitatud katastriüksuste keerukuskaart, mis kujutab ühe olulise aluskihi panust ühendustrassi planeerimisse. Katastriüksuste keerukus kujunes eeskätt maa kasutusotstarbe ja omandivormi alusel määratud väärtustest. Kaardilt on näha, et madalama keerukusega alad paiknevad peamiselt transpordi-, tootmis- ja üldkasutatava maa piirkondades, kus trassi rajamine on ruumiliselt lihtsam. Kõrgemad keerukusväärtused koonduvad aladele, kus maakasutus või omandisuhted muudavad



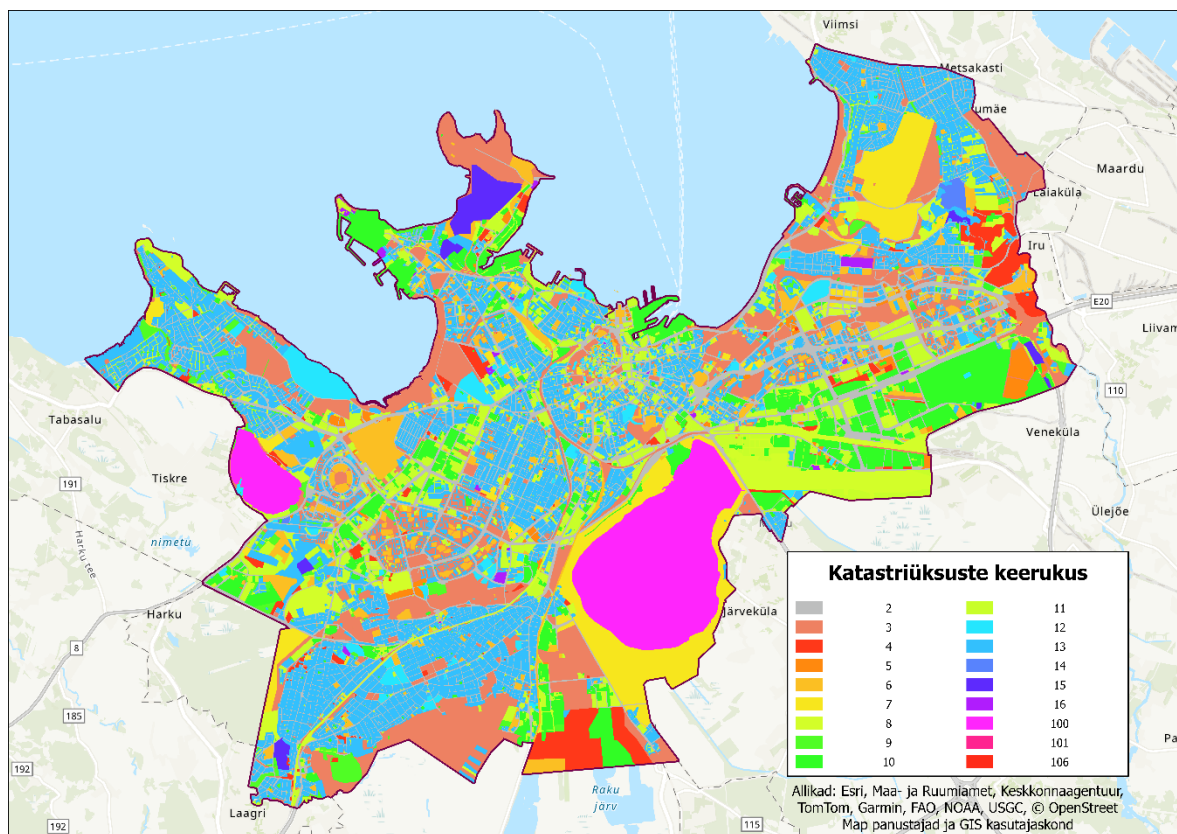
torustiku rajamise keerulisemaks. Seega ilmestab kaart, et mida kõrgem on katastriüksusele omistatud väärtus, seda keerukam on selle kaudu ühendustrassi kavandada.

Joonisel 3.2 on esitatud lõplik summeeritud pinna keerukuse rasterkiht, mis moodustati kõigi analüüsis kasutatud alusrasterite liitmisel. Sellesse lõppkihti olid kaasatud katastriüksused, taristukihid (teed, rööbasteed, sillad ja tunnelid), hoonestus ja muud rajatised, maa-alused rajatised, veekogud, kaitsealad, nõlvad ning puittaimestik. Lõplik raster väljendab ruumilist kogukeerukust: madalamad väärtused viitavad aladele, kus ühendustrassi rajamine on tõenäoliselt lihtsam ja vähem konfliktne, kõrgemad väärtused aga aladele, kus erinevad takistused ja piirangud kuhjuvad. Seetõttu toimis see raster kulupinnana, mille alusel hinnati võimalikke ühenduskoridore.

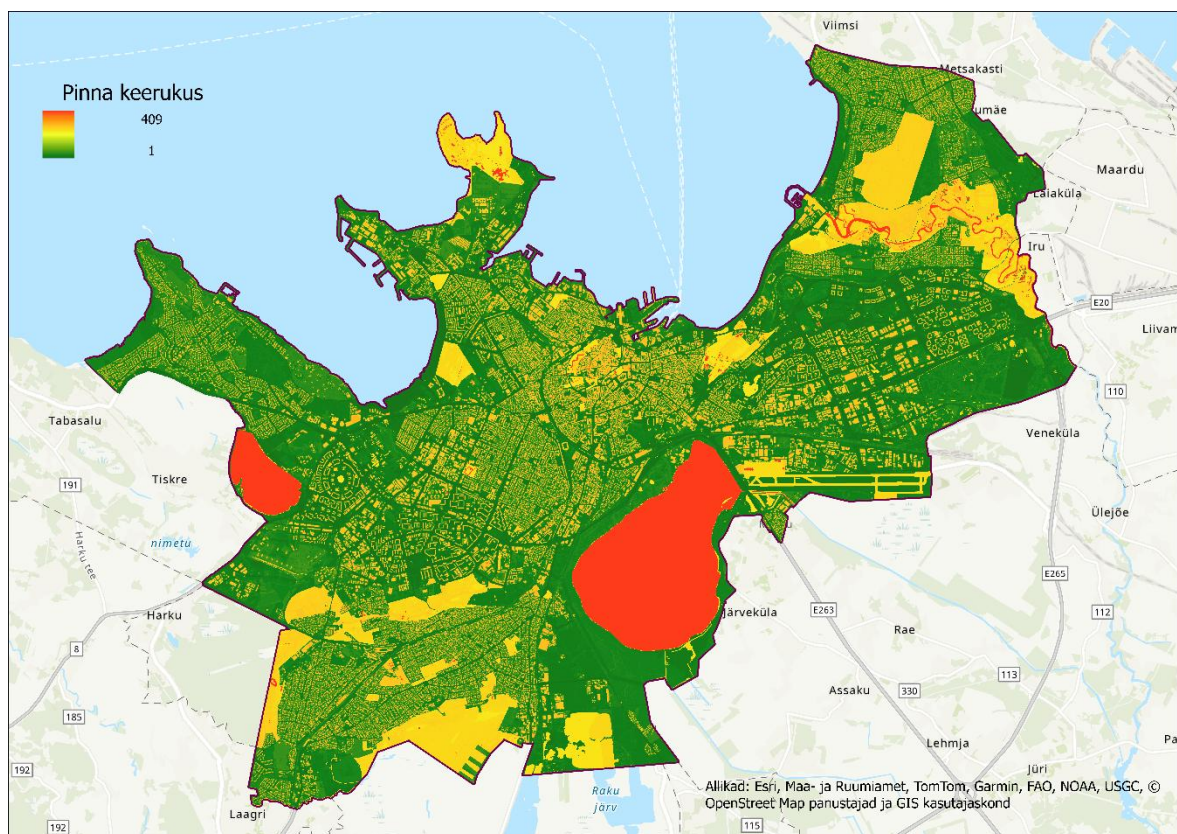
Joonisel 3.3 on esitatud ruumilise analüüsi lõpptulemus koos olemasolevate väikeste kaugküttevõrkude, suure Tallinna võrgu, oluliste piiravate kihtide ning mudeli abil leitud optimaalsete ühendusteedkondadega. Kaardilt on näha, et optimaalsed ühendused kulgevad üldjuhul mööda ruumiliselt vähem keerukaid koridore, vältides võimalikult palju kaitsealasid, veekogusid, tihedat hoonestust ja muid takistusi. Sillad ja tunnelid käsitleti erandkihina, mistõttu eemaldati jõgede ja rööbasteede kiht täpselt nendes kohtades, kus olemasolev sild või tunnel võimaldas realistlikku ristumist. Tulemuste põhjal eristusid ka ühendused, mille suhteline kulu oli madalam ja mis osutusid potentsiaalselt tasuvamateks liitumisvariantideks. Nii võimaldas ruumiline analüüs välja tuua võrgud, mille puhul on suure võrguga ühendamine tõenäolisemalt otstarbekas, ning eristada need võrkudest, mille puhul võib lokaalne lahendus olla sobivam.

Tabel 3.1 Väikevõrkude arvutuste tulemused koos hinnangute sobiva lahenduse osa

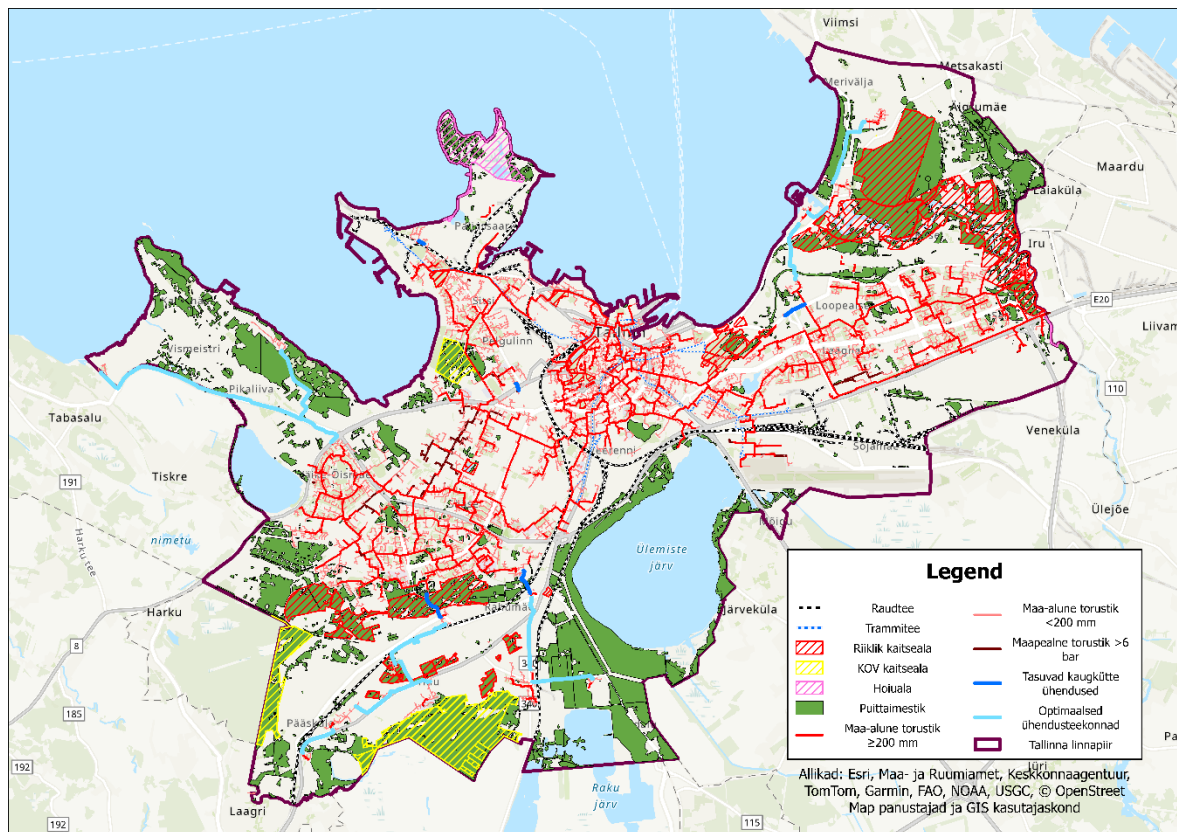
| Võrgunimi       | Loodava ühenduse pikkus, m | Suhteline hind | Suhteline hind/m | Müüdnud soojusenergia MWh | Heitmeintensiivsus kgCO <sub>2</sub> /MWh | Kütusetarve Tuh. Nm <sup>3</sup> | Lineaarne soojustihedus MWh/m | Hinne ühenduse loomisele | Lokaalse lahenduse hinne | Otsus    |
|-----------------|----------------------------|----------------|------------------|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|
| Haldja          | 3426.4                     | 13599          | 4.0              | 6496.4                    | 1572.9                                    | 6496.4                           | 2.14                          | 1                        | 3.55                     | Kohalik  |
| Järve           | 608.2                      | 4286           | 7.0              | 2180.9                    | 489.0                                     | 2180.9                           | 5.73                          | 3                        | 2.65                     | Kaugküte |
| Kasvu           | 169.6                      | 1849           | 10.9             | 662.0                     | 161.3                                     | 662.0                            | 4.25                          | 5                        | 1.75                     | Kaugküte |
| Laste           | 2426.3                     | 9879           | 4.1              | 1496.1                    | 347.9                                     | 1496.1                           | 2.50                          | 1                        | 3.15                     | Kohalik  |
| Mäe             | 497.6                      | 1220           | 2.5              | 460.1                     | 102.7                                     | 460.1                            | 3.84                          | 4                        | 1.9                      | Kaugküte |
| Mahla           | 2256.9                     | 10087          | 4.5              | 16255.1                   | 3771.4                                    | 16255.1                          | 2.76                          | 1                        | 3.75                     | Kohalik  |
| Merirahu        | 3026.2                     | 8659           | 2.9              | 1947.0                    | 519.4                                     | 1947.0                           | 1.11                          | 1                        | 3.25                     | Kohalik  |
| Metsavahi       | 1928.7                     | 6330           | 3.3              | 5140.6                    | 1328.7                                    | 5140.6                           | 1.88                          | 2                        | 3.4                      | Kohalik  |
| Padriku         | 3625.6                     | 13407          | 3.7              | 5401.0                    | 1714.4                                    | 5401.0                           | 2.08                          | 1                        | 3.75                     | Kohalik  |
| Põllu           | 4506.7                     | 16247          | 3.6              | 5299.5                    | 797.1                                     | 5299.5                           | 1.93                          | 1                        | 3.75                     | Kohalik  |
| Purje           | 1397.2                     | 6330           | 4.5              | 2861.8                    | 630.0                                     | 2861.8                           | 3.20                          | 2                        | 3                        | Kohalik  |
| Rahu            | 1499.2                     | 6534           | 4.4              | 573.6                     | 140.5                                     | 573.6                            | 3.50                          | 2                        | 2.8                      | Kohalik  |
| Sepa            | 130.1                      | 299            | 2.3              | 2345.0                    | 822.2                                     | 2345.0                           | 1.40                          | 5                        | 2.1                      | Kaugküte |
| Sinirebase      | 3641.7                     | 13982          | 3.8              | 1290.0                    | 383.1                                     | 1290.0                           | 1.47                          | 1                        | 3.25                     | Kohalik  |
| Teelise         | 5450.3                     | 19674          | 3.6              | 4126.3                    | 1003.4                                    | 4126.3                           | 5.95                          | 1                        | 3.35                     | Kohalik  |
| Tiskre          | 6035.8                     | 9760           | 1.6              | 2212.4                    | 463.3                                     | 2212.4                           | 2.58                          | 1                        | 3.35                     | Kohalik  |
| Vabaduse        | 3543.6                     | 12817          | 3.6              | 900.2                     | 228.2                                     | 900.2                            | 1.92                          | 1                        | 3.25                     | Kohalik  |
| Vana-Pärnu      | 648.2                      | 3021           | 4.7              | 2102.7                    | 516.0                                     | 2102.7                           | 1.78                          | 3                        | 2.65                     | Kaugküte |
| <b>Keskmine</b> | <b>2489.9</b>              | <b>8776.7</b>  | <b>3.5</b>       | <b>3430.6</b>             | <b>832.9</b>                              | <b>3430.6</b>                    | <b>2.8</b>                    | <b>2.0</b>               | <b>3.0</b>               | <b>-</b> |



Joonis 3.1 Katastriüksuste summeeritud keerukuse rasterkiht



Joonis 3.2 Lõplik summeeritud pinna keerukuse rasterkiht



Joonis 3.3 Väikevõrkude ühendamise optimaalseimad teekonnad ja äratasuvad liitumised

Teiste kaardikihtidega saab lähemalt tutvuda ArcGIS Online keskkonna kaudu, link millele asub siin: [link](#)

## KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärk oli töötada välja ruumilise planeerimise metoodika Tallinna väikeste kaugküttevõrkude dekarboniseerimisteedade esmaseks hindamiseks. Töö keskendus küsimusele, milliste võrkude puhul võiks eelistada ühendamist Tallinna suure kaugküttevõrguga ning milliste puhul on tõenäolisem lokaalse taastuv- või madalsüsinikulise soojuslahenduse kasutamine. Selleks koguti avalikke energiabilansi ja heitmeandmeid ning töödeldi GIS-põhise ruumianalüüsiga, kus arvestati muu hulgas ühenduse pikkust, ruumilist keerukust, lineaarset soojustihedust, müüdü soojusenergiat, kütusekasutust ja CO<sub>2</sub>-heitmeid.

Analüüsi põhjal hinnati kokku 18 Tallinna väikest kaugküttevõrku. Uuritavate võrkude summaarne torustiku pikkus oli 26793,2 m, müüdü soojus 61750,7 MWh ning neto-CO<sub>2</sub>-heitmed 14971,0 t aastas. Võrkude keskmine lineaarne soojustihedus oli 2,30 MWh·m<sup>-1</sup> ning netoheitme intensiivsus 252,5 kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> müüdü soojuse kohta. Võrdluseks oli Tallinna suure kaugküttevõrgu 2023. aasta andmetel netoheitme intensiivsus 141,0 kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup>. See erinevus näitab, et väikeste fossiilkütustel põhinevate võrkude ümberkujundamine võib anda olulise heitmevähenduse, kuid lahendus sõltub iga võrgu asukohast ja tehnilisest kontekstist.

GIS-põhise ühendusanalüüsi tulemusel leiti kõigile uuritud võrkudele võimalik ühendus Tallinna suure kaugküttevõrguga. Ühenduste pikkused varieerusid oluliselt: kõige lühemad võimalikud ühendused olid Sepa ja Kasvu võrgul, kõige pikemad Tiskre ja Teelise võrgul. Koondhindamise põhjal klassifitseerusid Järve, Kasvu, Mäe, Sepa ja Vana-Pärnu võrgud suure kaugküttevõrguga ühendamise kandidaatideks. Haldja, Laste, Mahla, Merirahu, Metsavahi, Padriku, Põllu, Purje, Rahu, Sinirebase, Teelise, Tiskre ja Vabaduse puhul osutus esmases hinnangus sobivamaks lokaalne lahendus või lokaalse lahenduse detailsem edasiuurimine.

Tulemused kinnitavad, et väikeste kaugküttevõrkude dekarboniseerimist ei saa lahendada ühe standardse meetmega. Lühikese ja ruumiliselt lihtsa ühenduskoridori korral võib suure võrguga liitmine olla kiire ja mõjus viis fossiilkütuste osakaalu vähendamiseks. Pikemate, hajusamate või ruumiliselt keerukamate võrkude puhul tuleb eelistada kohapõhist analüüsi, mis hindab suursoojuspumpade, heitsoojuse, biokütuste, salvestuse või hoonepõhiste lahenduste sobivust. Töö peamine praktiline väärtus seisneb selles, et loodud metoodika muudab erinevate võrkude võrdlemise läbipaistvamaks ja aitab suunata järgmise etapi detailseid tehnilisi ja majanduslikke uuringuid.

## SUMMARY

The aim of this master's thesis was to develop a spatial planning methodology for the preliminary assessment of decarbonisation pathways for small district heating networks in Tallinn. The study focused on identifying which networks could be more suitable for connection to Tallinn's main district heating system and which networks would more likely require a local renewable or low-carbon heat supply solution. For this purpose, available energy balance and emissions data were combined with GIS-based spatial analysis, considering connection length, spatial complexity, linear heat density, heat sales, fuel use and CO<sub>2</sub> emissions.

In total, 18 small district heating networks in Tallinn were assessed. The combined pipeline length of the analysed networks was 26,793.2 m, their annual heat sales amounted to 61,750.7 MWh, and their net CO<sub>2</sub> emissions were 14,971.0 t per year. The average linear heat density of the networks was 1.50 MWh·m<sup>-1</sup>, while the net emission intensity was 252.5 kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> of sold heat. For comparison, the net emission intensity of Tallinn's large district heating network was 141.0 kg CO<sub>2</sub>·MWh<sup>-1</sup> in 2023. This difference indicates that the transformation of small fossil-fuel-based networks can provide a significant emission reduction, although the most suitable solution depends on the spatial and technical context of each network.

The GIS-based connection analysis identified a possible connection route to Tallinn's large district heating network for all analysed networks. However, the connection lengths varied considerably: the shortest potential connections were found for the Sepa and Kasvu networks, whereas the longest were associated with the Tiskre and Teelise networks. Based on the combined assessment, the Järve, Kasvu, Mäe, Sepa and Vana-Pärnu networks were classified as candidates for connection to the main district heating network. For Haldja, Laste, Mahla, Merirahu, Metsavahi, Padriku, Põllu, Purje, Rahu, Sinirebase, Teelise, Tiskre and Vabaduse, the preliminary assessment indicated that a local solution, or more detailed investigation of such a solution, would be more appropriate.

The results confirm that the decarbonisation of small district heating networks requires site-specific planning rather than one standard solution. Short and feasible connection corridors may justify integration with the main network, while longer or more complex cases should be assessed for local heat pumps, waste heat, biofuels, storage or building-level solutions. The proposed methodology supports transparent prioritisation before detailed techno-economic studies



## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Joint Assistance to Support Projects in European Regions, "jaspers-guide-to-decarbonisation-of-district-heating-systems," 2024. Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: <https://jaspers.eib.org/files/library/2024/jaspers-guide-to-decarbonisation-of-district-heating-systems.pdf>
- [2] Nutikad kaugküttelahendused ja kasvuhoonegaaside emissioonide keskkonnamõju integreeritud hindamise uurimisrühm, "Jätkusuutlik kaugküte - Digiõpik." Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: <https://kaugkute.taltech.ee/>
- [3] T. Novosel, T. Pukšec, N. Duić, and J. Domac, "Heat demand mapping and district heating assessment in data-poor areas," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109987.
- [4] Energiakontsern Utilitas, "2024. Aasta konsolideeritud majandusaasta aruanne," 2025. Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: [https://utilitas.ee/wp-content/uploads/2023/01/Utilitas-konsolideeritud-majandusaasta-aruanne\\_2024.pdf](https://utilitas.ee/wp-content/uploads/2023/01/Utilitas-konsolideeritud-majandusaasta-aruanne_2024.pdf)
- [5] Tallinna Linnavalitsus, "Kliimaneutraalne Tallinn Tallinna säästva energiamajanduse ja kliimamuutustega kohanemise kava 2030," 2021.
- [6] H. Pieper, V. Mašatin, A. Volkova, T. Ommen, B. Elmegaard, and W. B. Markussen, "Modelling framework for integration of large-scale heat pumps in district heating using low-temperature heat sources: A case study of Tallinn, Estonia," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 20, pp. 67–86, 2019, doi: 10.5278/ijsepm.2019.20.6.
- [7] Trinomics B.V., "Transitioning to a carbon neutral heating and cooling in Estonia by 2050 Deliverable 7 Report: Action plans," 2024. Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: <https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2024-09/E%C3%9CSSNJA%202050%20D7%20-%20S%C3%BCsinikneutraalse%20soojus-%20ning%20jahutusmajanduse%20%C3%BClemineku%20tegevusplaanid%20vastavalt%20loodud%20stsenaariumitele.pdf>
- [8] Euroopa Parlament ja Nõukogu, *MÄÄRUS (EL) 2021/1119, millega kehtestatakse kliimaneutraalsuse saavutamise raamistik ning muudetakse määruseid (EÜ) nr 401/2009 ja (EL) 2018/1999 (Euroopa kliimamäärus)*. 2021.
- [9] Euroopa Parlament ja Nõukogu, *DIREKTIIV (EL) 2023/2413, millega muudetakse direktiivi (EL) 2018/2001, määrust (EL) 2018/1999 ja direktiivi 98/70/EÜ seoses taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise ja ning tunnistatakse kehtetuks nõukogu direktiiv (EL) 2015/652*. 2023.

- [10] Euroopa Parlament ja Nõukogu, *DIREKTIIV (EL) 2023/1791, mis käsitleb energiatõhusust ja millega muudetakse määrust (EL) 2023/955 (uuesti sõnastatud)*. 2023.
- [11] Kliimaministeerium, "Eesti riikliku energia-ja kliimakava aastani 2030 ajakohastatud versioon," 2025.
- [12] Riigikogu, *Kaugkütteseadus*. 2003. doi: 10.06.2009.
- [13] A. Volkova, E. Latõšov, K. Lepiksaar, and A. Siirde, "Planning of district heating regions in Estonia," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 27, no. Special Issue, pp. 5–16, 2020, doi: 10.5278/ijsepm.3490.
- [14] E. Latõšov, S. Umbleja, and A. Volkova, "Promoting efficient district heating in Estonia," *Util. Policy*, vol. 75, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jup.2021.101332.
- [15] Energiakontsern Utilitas, "Utilitas alustas Paljassaares soojuspumbajaama ehitust." Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: <https://utilitas.ee/utilitas-alustas-paljassaares-soojuspumbajaama-ehitust/>
- [16] E. F. Dzenajavičiene, V. Kveselis, C. McNaught, and M. Tamonis, "Economic analysis of the renovation of small-scale district heating systems-4 Lithuanian case studies," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2569–2578, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.09.009.
- [17] N. Le Truong and L. Gustavsson, "Cost and primary energy efficiency of small-scale district heating systems," *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 419–427, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.05.031.
- [18] B. Möller, E. Wiechers, U. Persson, L. Grundahl, and D. Connolly, "Heat Roadmap Europe: Identifying local heat demand and supply areas with a European thermal atlas," *Energy*, vol. 158, pp. 281–292, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.025.
- [19] E. Mäki, L. Kannari, I. Hannula, and J. Shemeikka, "Decarbonization of a district heating system with a combination of solar heat and bioenergy: A techno-economic case study in the Northern European context," *Renew. Energy*, vol. 175, pp. 1174–1199, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.04.116.
- [20] A. David, B. V. Mathiesen, H. Averfalk, S. Werner, and H. Lund, "Heat Roadmap Europe: Large-scale electric heat pumps in district heating systems," Apr. 22, 2017, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en10040578.
- [21] X. Yuan *et al.*, "Data center waste heat for district heating networks: A review," Sep. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2025.115863.
- [22] H. Golmohamadi, K. G. Larsen, P. G. Jensen, and I. R. Hasrat, "Integration of flexibility potentials of district heating systems into electricity markets: A review," May 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2022.112200.



- [23] J. Malczewski, "GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 20, no. 7, pp. 703–726, Aug. 2006, doi: 10.1080/13658810600661508.
- [24] P. A. Østergaard, J. Jantzen, H. M. Marczinkowski, and M. Kristensen, "Business and socioeconomic assessment of introducing heat pumps with heat storage in small-scale district heating systems," *Renew. Energy*, vol. 139, pp. 904–914, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.140.
- [25] A. Volkova, H. Koduvere, and H. Pieper, "Large-scale heat pumps for district heating systems in the Baltics: Potential and impact," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112749.
- [26] A. Volkova, I. Krupenski, H. Pieper, A. Ledvanov, E. Latõšov, and A. Siirde, "Small low-temperature district heating network development prospects," *Energy*, vol. 178, pp. 714–722, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.083.
- [27] M. Sollich, Y. Wack, R. Salenbien, and M. Blommaert, "Decarbonization of existing heating networks through optimal producer retrofit and low-temperature operation," 2024, doi: 10.48804/MNH.
- [28] Camia A, Giuntoli, J. Jonsson, and R. Robert, "The use of woody biomass for energy production in the EU and impacts on forests The use of woody biomass for energy production in the EU", doi: 10.2760/831621.
- [29] S. A. Ozoliņa *et al.*, "Can energy sector reach carbon neutrality with biomass limitations?," *Energy*, vol. 249, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123797.
- [30] H. Ali, A. Hlebnikov, I. Pakere, and A. Volkova, "An evaluation and innovative coupling of seawater heat pumps in district heating networks," *Energy*, vol. 312, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133461.
- [31] J. Ziemele, A. Volkova, E. Latõšov, L. Murauskaitė, and V. Džiuvė, "Comparative assessment of heat recovery from treated wastewater in the district heating systems of the three capitals of the Baltic countries," *Energy*, vol. 280, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128132.
- [32] R. Geyer, D. Hangartner, M. Lindahl, and S. Vinther Pedersen, "Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems Final Report Annex 47," 2019.
- [33] D. Romanov and B. Leiss, "Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock," Oct. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2022.112727.
- [34] J. S. Figueira *et al.*, "Shallow geothermal energy systems for district heating and cooling networks: Review and technological progression through case studies," *Renew. Energy*, vol. 236, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121436.

- [35] H. Gailan, T. All, T. Rahe, S. Tarros, H. Bauert, and L. Maala, "GEOENEST projekti lõpparuanne. Maasoojusenergia katsejaamad – Taludevahe, Roosna-Alliku ja Arbavere," Rakvere, 2026.
- [36] H. Dorotić, K. Čuljak, J. Miškić, T. Pukšec, and N. Duić, "Technical and Economic Assessment of Supermarket and Power Substation Waste Heat Integration into Existing District Heating Systems," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15051666.
- [37] D. Sundell and M. Rämä, "A methodology for systematic mapping of heat sources in an urban area," Dec. 01, 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10098-022-02401-2.
- [38] D. Sundell and M. Rämä, "A methodology for systematic mapping of heat sources in an urban area," Dec. 01, 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10098-022-02401-2.
- [39] R. Sinha, B. Bak-Jensen, J. R. Pillai, and H. Zareipour, "Flexibility from electric boiler and thermal storage for multi energy system interaction," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.3390/en13010098.
- [40] E. Guelpa and V. Verda, "Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review," Oct. 15, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113474.
- [41] P. Hiltunen, A. Volkova, E. Latõšov, K. Lepiksaar, and S. Syri, "Transition towards university campus carbon neutrality by connecting to city district heating network," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 9493–9505, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.055.
- [42] K. Lepiksaar, K. Kalme, A. Siirde, and A. Volkova, "Heat Pump Use in Rural District Heating Networks in Estonia," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 786–802, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuct-2021-0059.
- [43] H. Yu, C. Bergaentzlé, S. Petrović, E. O. Ahlgren, and F. Johnsson, "Combining techno-economic modeling and spatial analysis for heat planning in rural regions: A case study of the Holbæk municipality in Denmark," *Smart Energy*, vol. 14, May 2024, doi: 10.1016/j.segy.2024.100144.
- [44] D. F. Dominković, I. Bačeković, D. Sveinbjörnsson, A. S. Pedersen, and G. Krajačić, "On the way towards smart energy supply in cities: The impact of interconnecting geographically distributed district heating grids on the energy system," *Energy*, vol. 137, pp. 941–960, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.162.
- [45] S. Chicherin, A. Volkova, and E. Latõšov, "GIS-based optimisation for district heating network planning," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2018, pp. 635–641. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.228.

- [46] J. Chambers, K. Narula, M. Sulzer, and M. K. Patel, "Mapping district heating potential under evolving thermal demand scenarios and technologies: A case study for Switzerland," *Energy*, vol. 176, pp. 682–692, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.044.
- [47] M. Lumbreras, G. Diarce, K. Martin-Escudero, A. Campos-Celador, and P. Larrinaga, "Design of district heating networks in built environments using GIS: A case study in Vitoria-Gasteiz, Spain," *J. Clean. Prod.*, vol. 349, May 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131491.
- [48] ESRI, "ArcGIS Pro Overview." Accessed: May 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- [49] S. Eslami, Y. Noorollahi, M. Marzband, and A. Anvari-Moghaddam, "District heating planning with focus on solar energy and heat pump using GIS and the supervised learning method: Case study of Gaziantep, Turkey," *Energy Convers. Manag.*, vol. 269, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116131.
- [50] F. Zach, S. Erker, and G. Stoeglehner, "Factors influencing the environmental and economic feasibility of district heating systems - A perspective from integrated spatial and energy planning," *Energy Sustain. Soc.*, vol. 9, no. 1, Jun. 2019, doi: 10.1186/s13705-019-0202-7.
- [51] P. Lichtenwoehr, S. Erker, F. Zach, and G. Stoeglehner, "Future compatibility of district heating in urban areas - A case study analysis in the context of integrated spatial and energy planning," *Energy Sustain. Soc.*, vol. 9, no. 1, Mar. 2019, doi: 10.1186/s13705-019-0192-5.
- [52] S. Nielsen and L. Grundahl, "District heating expansion potential with low-temperature and end-use heat savings," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020277.
- [53] J. Malczewski and C. Rinner, "Advances in Geographic Information Science Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science," 2015. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/7712>
- [54] T. L. Saaty and L. G. Vargas, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, 2nd ed. 2012. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/6161>
- [55] G.-H. Tzeng and J.-J. Huang, "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications," 2011.
- [56] A. Delangle, R. S. C. Lambert, N. Shah, S. Acha, and C. N. Markides, "Modelling and optimising the marginal expansion of an existing district heating network," *Energy*, vol. 140, pp. 209–223, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.066.

- [57] V. Kaisermayer *et al.*, "Smart control of interconnected district heating networks on the example of '100% Renewable District Heating Leibnitz,'" *Smart Energy*, vol. 6, May 2022, doi: 10.1016/j.segy.2022.100069.
- [58] M. Jakubcionis and K. Kavvadias, "Background report providing guidance on tools and methods for the preparation of public heat maps," 2015, doi: 10.2790/57519.
- [59] Keskkonnaamet, "Keskkonnaotsuste Infosüsteem." Accessed: May 03, 2026. [Online]. Available: <https://kotkas.envir.ee/>
- [60] Maa- ja Ruumiamet, "Geoportaal." Accessed: May 03, 2026. [Online]. Available: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/kitsenduste-andmed-p32.html>
- [61] Maa- ja Ruumiamet, "Ehitisregister." Accessed: May 03, 2026. [Online]. Available: <https://livekluster.ehr.ee/ui/ehr/v1>
- [62] Kliimaminister, *Keskkonnaministri 19. detsembri 2017. a määruse nr 60 „Tegevuse künnisvõimsused, millest alates on vajalik paikse heiteallika käitaja registreering, registreeringu taotluse ja tõendi andmekoosseis” muutmine*. 2024. Accessed: May 02, 2026. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/122102024003#>
- [63] Keskkonnaagentuur, "Keskkonnaportaal." Accessed: Mar. 03, 2026. [Online]. Available: <https://register.keskkonnaportaal.ee/register>
- [64] Riigikantselei, "Riigiteataja." Accessed: Apr. 01, 2026. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/index.html>
- [65] R. W. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used," 1987.