

Energiatehnoloogia instituut

**GEOTERMAALENERGIA KASUTAMISE  
VÕIMALUSED KAUGKÜTTEVÕRKUDES**

**GEOHERMAL ENERGY UTILIZATION OPPORTUNITIES  
IN DISTRICT HEATING NETWORKS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Laretta Maks

Üliõpilaskood 211943MASM

Juhendaja: Igor Krupenski, vanemlektor

Tallinn 2023

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

Autor: .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Laretta Maks (sünnikuupäev: 27.10.1997 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Geotermaalenergia kasutamise võimalused kaugküttevõrkudes, mille juhendaja on Igor Krupenski,
  - 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.

---

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

/ allkirjastatud digitaalselt /

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Laretta Maks, 211943MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18, Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): vanemlektor, Igor Krupenski, +372 5800 3989

### Lõputöö teema:

Geotermaalenergia kasutamise võimalused kaugküttevõrkudes

Geothermal energy utilization opportunities in district heating networks

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada välja geotermaalenergia potentsiaal Eestis, hinnates selle võimalikku panust taastuvenergia kasutuselevõtuks ja fossiilkütuste sõltuvuse vähendamiseks.
2. Analüüsida geotermaalenergia konkurentsivõimet maasoojuspumpade suhtes, arvestades sügavamate geotermaalsüsteemide eeliseid ja puudusi ning kulutõhusust
3. Anda ülevaade geotermaalenergia kasutamise võimalustest kaugküttevõrkudes ning välja tuua järeldused selle taastuvenergiaallika potentsiaali ja tulevikuväljavaadete kohta Eestis.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Euroopa ja Eesti kliimaeesmärkide kirjeldus, geotermaalenergia olemus ning võimalike tehnoloogiate kirjeldus	28.08.2023
2.	Geotermaalenergia potentsiaali uurimine, Põhjamaade näited, pilootprojektide kirjeldus	12.10.2023
3.	Geotermaalenergia võrldus maasoojuspumpadega, võimalikud järeldused	13.12.2023
4.	Magistritöö lõplik vormistus	01.01.2024

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

**Üliõpilane:** ..... ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

**Juhendaja:** ..... ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

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

/ allkirjastatud digitaalselt /

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

/ allkirjastatud digitaalselt /

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. Energia- ja kliimapoliitika eesmärgid .....	10
1.1 Euroopa Liidu nõuded .....	11
1.2 Eesti tegevuskava .....	11
2. Geotermaalenergia definitsioon ja olemus .....	13
2.1 Eesti maapind, geoloogiline ehitus .....	14
2.1.1 Aluskord .....	14
2.1.2 Pealiskord .....	15
2.1.3 Geotermiline gradient .....	15
2.2 Tehnoloogia .....	16
3. Maasoojus kaugküttevõrkudes ja maapõueenergia .....	19
3.1 Eelised ja puudused .....	19
3.2 Põhjamaade näited .....	20
3.2.1 Soome .....	21
3.2.2 Rootsi .....	23
3.2.3 Norra .....	25
4. Maasoojusenergia alane seadusandlus ning Skandinaavia kogemused .....	26
4.1 Süsteemide rajamise kogemused, nõuded ja riskid Soomes .....	26
4.2 Süsteemide rajamise kogemused, nõuded ja riskid Rootsis .....	30
4.3 Soovitused maasoojuspuuraukude rajamisel Eestis .....	34
5. Potentsiaal Eestis .....	38
5.1 Pilootprojektid .....	39
5.1.1 Roosna-Alliku .....	39
5.1.2 Tiskre .....	42
5.1.3 Narva .....	45
6. Geotermaalenergia konkurentsivõime võrreldes maasoojuspumbaga .....	47
6.1 Soojuspumba tööpõhimõte ja valik .....	47
6.2 Investeeringud .....	52
6.3 Järeldused .....	54
KOKKUVÕTE .....	58
SUMMARY .....	61
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	64

## **EESSÕNA**

Käesolev magistritöö on saanud alguse tänu juhendaja pakutud teemale, mis töö autorile on väga huvitava ning väljakutseid pakkuvana tundunud. Töö hõlmab endas maapõueenergiaalaseid uuringuid ja näiteid nii Eestis kui ka Skandinaavias. Lisaks on töös võrreldud erinevaid süsteeme ning jõutud järeldusteni.

Magistritöö koostamisel on olnud suureks toeks juhendaja Igor Krupenski, kelle suunised ning tähelepanekud olid abiks antud töö koostamisel. Töö koostamisel on olnud abiks ka Eesti Geoloogiateenistus ning nende korraldatud seminarid.

Võtmesõnad: Eesti energia-ja kliimapoliitika, geotermaalenergia, BTES, GEOENEST, magistritöö

## LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

ATES – Põhjaveekihi soojusenergia salvestamine (ingl k *Aquifer Thermal Energy Storage*);

BTES – Soojuspuuraugu energia salvestamise süsteem (ingl k *Borehole Thermal Energy Storage*);

COP – Soojuspumba soojustegur (ingl k *Coefficient of Performance*);

EGS – Täiustatud geotermiline süsteem (ingl k *Enhanced Geothermal System*);

ENMAK – Energiamajanduse arengukava;

EVS – Eesti Vabariigi standard;

GSHP – Maasoojuspump (ingl k *Ground Source Heat Pump*);

HT-BTES – Kõrge temperatuuriga puuraugu soojusenergia salvestamine (ingl k *High Temperature Borehole Thermal Energy Storage*);

SCOP – Soojuspumba sesoonne soojustegur (ingl k *Seasonal Coefficient of Performance*);

SGU – Rootsi geoloogiateenistus (ingl k *Swedish Geological Survey*);

## SISSEJUHATUS

Taastuvate energiaallikate suuremahuline kasutuselevõtt peaks tänaseks olema iga arenenud riigi üks põhifookustest. See on oluline faktor nii energiajulgeoleku kui ka kliimaeesmärkide saavutamiseks. Euroopa Liit on võtnud pikaajalised eesmärgid, mille idee on vähendada järk-järgult fossiilkütuste ülekaalu, suurendada energiatõhusust ning vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid. Eesti kui Euroopa Liidu liikmesriik võtab samuti osa eesmärkide saavutamisest ning on pannud paika ka enda strateegia, kuidas tulevikus toota energiat keskkonnasõbralikumalt kasutades taastuvaid energiaallikaid ning saavutada energiajulgeolek.

Geotermaalenergia on üks võimalus vähendada sõltuvust fossiilkütustest ja edendada roheline energia kasutuselevõttu, mis on oluline samm kestliku tuleviku suunas. Maapõueenergia põhineb maapõues leiduval soojusel, mis võimaldab ammutada soojust tagamaks usaldusväärset ja odavat kütelahendust.

Eestis on täna juba kasutusel maasoojusenergia lahendused, kuid need on pigem üksikelaamute kütte ja sooja tarbevee tarbeks ning mastaapsemad lahendused antud hetkel puuduvad. Maapõueenergia laialdane kasutuselevõtt maailmas ei ole jäänud aga ka Eestis märkamatuks ning tänasel päeval on algatatud mitmeid projekte uurimaks meie geotermaalenergia potentsiaali.

Antud magistritöö annab ülevaate tulevikutrendidest energeetikas, keskendudes sealjuures maapõuesoojusele. Töö esimene pool keskendub geotermaalenergia olemusele, terminoloogiale ning tehnoloogiale. Lisaks on kajastatud eelised ja puudused maasoojuse kasutamisel kaugküttevõrkudes.

Kuna sügavamate ja keerulisemate maapõuesoojussüsteemide kasutuselevõtt on Eestis antud hetkel uudne, on töös uuritud ning kirjeldatud Skandinaavia riikide maasoojussüsteeme ning toodud erinevaid näited süsteemide toimimisest. Samuti kajastab töö kahe riigi näitel maapõuesoojust kirjeldavat seadusandlust ning süsteemide rajamisega seotud riske ja nõudeid, mis omakorda annavad suunilused Eestile maapõuesoojuse kasutuselevõtuks.

Töös keskendutakse Eestis kavandatavatele pilootprojektidele. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi tellimusena alustatud projekti raames GEOENEST on planeeritud kaks katsejaama üks Tallinna linnas Haabersti linnaosas Taludevahe tn 116 ning teine Järva maakonna Roosna-Alliku alevikus. Töös on toodud mõlema projekti andmed, projektide asendiplaanid ning soojussõlmede skeemid, lisaks selgitatakse olukorda vastavates piirkondades ning kirjeldatakse töid, mis tulevikus teostatakse.



Kolmas maapõuesoojussüsteem on plaanis rajada Narva. Seda Eesti Energia AS poolt koostöös Geothermal Baltic OÜ-ga. Ka selle projekti andmed ning süsteemi kirjeldus on toodud antud magistritöös.

Geotermaalenergia konkureerib ka maasoojuspumbaga. Seetõttu on töös analüüsitud mõlemaid variante, toodud välja soojuspumba detailne tööpõhimõte ning pumba tööd kirjeldavate parameetrite valemid. Geotermaalenergia puhul on tegemist majanduslikult kuluka investeeringuga ning see on ajendanud tegema ka teatud investeeringute ülevaate, kus näitena on võetud Soome sügava geotermaalsüsteemi projekti maksumus, mille järgi omakorda on võimalik indikatiivselt määrata maapõuesoojussüsteemi rajamise kallimad komponendid.

Magistritöö toob välja maapõueenergia kasutamise võimalused kaugküttevõrkudes ning töö käigus tekkinud järeldused peegeldavad arvamust geotermaalenergia potentsiaali kohta nii antud ajahetkel kui ka tulevikus.

# 1. Energia- ja kliimapoliitika eesmärgid

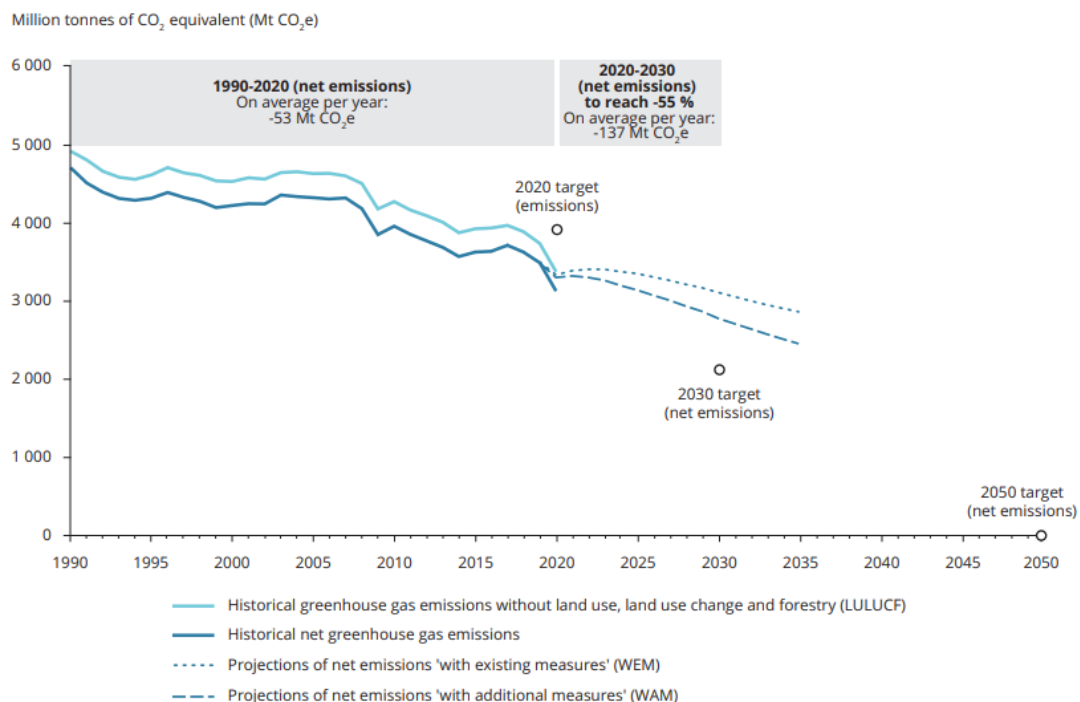
Nii Eestit kui ka teisi Euroopa Liidu liikmesriike mõjutavad eesmärgid, mis on seatud vähendamaks emissioone, fossiilsete kütuste ülekaalu, keskendudes sealjuures jätkusuutlikule ja puhtamale tulevikule. Need sihid hõlmavad suuresti taastuvate energiaallikate kasutuselevõttu, energiatõhususe suurendamist ja kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamist.

Juba 2005. aastal lepiti kokku pikaajalistes kliimaeesmärkides, mille kohaselt pidi Euroopa Liit [1]:

- Vähendada kasvuhoonegaaside heitkogust 20% võrra võrreldes aastaga 1990.
- Toota 20% energiat taastuvatest energiaallikatest.
- Suurendada energiatõhusust 20% võrra.

Sealjuures kaks põhilist meetet eesmärkide täitmiseks olid heitkogustega kauplemise süsteem ja jõupingutuste jagamise määrus.

Euroopa Keskkonnaagentuuri 2021. aastal avaldatud aruande kohaselt oli EL liikmesriikide kasvuhoonegaaside koguheide 2020. aastal 31% väiksem võrreldes 1990. aastaga. Ehk seatud eesmärki ületati märkimisväärselt. [1]



Joonis 1 Kasvuhoonegaaside heitkoguste ajaloolised suundumused ja prognoosid. [2]

Täna on võtnud Euroopa Liit ambitsioonikad eesmärgid kliimaneutraalsuse saavutamiseks aastaks 2050, oleme teel nende saavutamise suunas, kuid arenguruumi veel on. Siinkohal on riikide omavaheline koostöö ja teadlikkuse kasv võtmetähtsusega, et saavutada vastavad kriteeriumid ja luua säästlikum tulevik.

## 1.1 Euroopa Liidu nõuded

Euroopa roheline kokkulepe aitab Euroopa Liidul üle minna rohelisele majandusele, mille lõppeesmärgiks on kliimaneutraalsuse saavutamine aastaks 2050. [3]

Eelnevalt mainitud roheline kokkulepe hõlmab endas Euroopa Komisjoni poolt loodud ettepanekute paketti „Eesmärk 55“, mille suunis on saavutada klimaneutraalsus aastaks 2050, täites sellega Pariisi kokkuleppes tulenevad kohustused. Kliimamääruse vastuvõtmisega on kohustatud EL ja selle liikmesriigid vähendama heitkoguseid 55% võrra aastaks 2030 võrreldes 1990. aasta tasemega. [3]

Ettepaneku kohaselt soovitakse suurendada 2030. aastaks taastuvate energiaallikate osakaalu kõikidest energiaallikatest 32%-lt vähemalt 40%-ni, mille arvelt on võimalik vähendada energeetikasektori kasvuhoonegaaside heidet ning pakkuda alternatiivi imporditavatele fossiilkütustele. [3]

Lisaks on Euroopa Liidus käivitatud kava „REPowerEU“, mille eesmärk on vähendada sõltuvust Venemaa fossiilkütustest, sealjuures säästa energiat ja parandada energiatõhusust, mitmekesistada energiatarneid ja kiirendada üleminekut puhtale energiale. [4]

## 1.2 Eesti tegevuskava

Eesti kui Euroopa Liidu liikmesriik sõltub paljuski Euroopa Liidu arengutest ning nõuetest. Eesti energiapoliitika arengukava on kooskõlas Euroopa Liidu pikaajalise energia- ja kliimapoliitikaga ning tagab tarbijatele turupõhise hinna ja kättesaadavusega energiavarustuse, panustades Eesti majanduskliima ja keskkonnaseisundi parendamisse. [5]

Energiamaajanduse arengukava aastani (ENMAK) 2030 üheks eesmärgiks on järgnev:

- 80% Eestis toodetud soojusest toodetakse taastuvate energiaallikate baasil, kohalike energiaallikate olulisust soojuse tootmisel suurendab veelgi turvas. [5]

Energiamajanduse arengukava aastani 2035 koostamise eesmärgiks on võetud ajakohastada juba kehtivas ENMAK 2030 sisalduvaid energiamajanduse eesmärke ja tegevusi. Koostamisel lähtutakse Euroopa Liidu suundumustest aastani 2030 ja 2050, strateegiast „Eesti 2035“ ning selle tegevuskavast, kus on seatud vajalikuks muutuseks üleminek kliimaneutraalsele energia tootmisele tagades energiajulgeoleku. Antud arengukava hõlmab energiatootmise- ja tarnimisega ning energiatõhususe suurendamisega seotud tegevusi järgmistel teemadel [6]:

- Energiajulgeoleku tagamine
- Taastuenergia üleminek
- Energiatõhususe suurendamine.

Võttes arvesse eelnevat, kus taastuvate energiaallikate kasutuselevõttu peetakse üheks prioriteediks, on tänaseks alustanud Eesti ka maapõueenergia potentsiaali uurimist.

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi tellimusena on alustatud projektiga GEOENEST, mille teostajaks on Eesti Geoloogiateenistus ning mille kestus on 2021. aasta suvest 2024. aasta suveni.

Projekti tegevuskava näeb ette geotermaalenergia taustauuringuid Tallinnas, Roosna-Allikul ja Narvas, uuringuid geotermaalenergia rakenduste kohta Põhja-Eestis, kaevandus- ja merevee soojusenergia rakenduste kasutuspotentsiaali uurimist. Samuti valmib vähemalt kaks geotermaalenergia katsejaama ning edendatakse geotermaalenergia alast kompetentsi ja teadlikkust. Selle tulemusena luuakse eeldused geotermaalenergia rakenduste kasutusele võtmiseks Eestis. [7]

Energeetika ja maavarade programm 2022-2025 käskkirjas on eraldi välja toodud geotermaalenergia potentsiaali tuvastamise ja piloteerimise meede (ca 2...3 mln eurot), mille rahastus tuleneb 2013-2020 perioodi EL-i kasvuhoonegaaside heitmekaubandussüsteemi tuludest. [8]

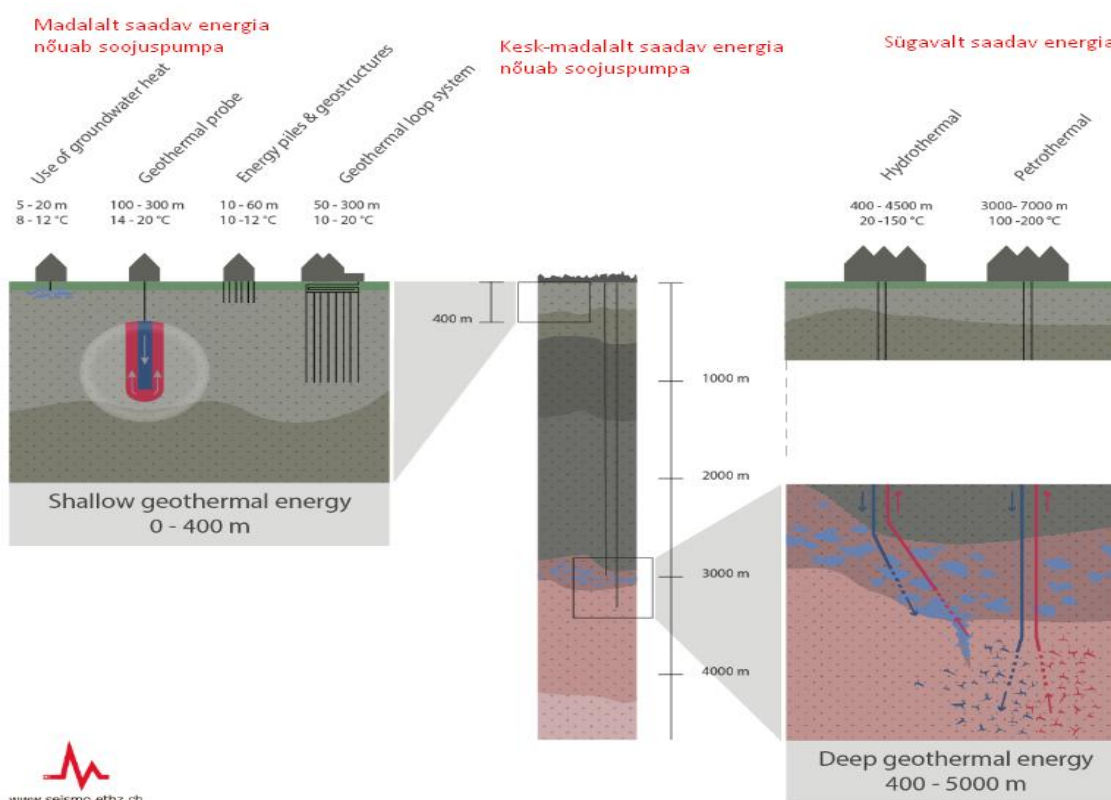
## 2. Geotermaalenergia definitsioon ja olemus

Geotermaalenergiat peetakse taastuvenergia vormiks, mis tekib päikeseenergia salvestumisel maapinda või pärineb Maa sügavuses leviva soojusena. Pinnalähedane soojusenergia pärineb Päikeselt, sügavamal kihtides olev soojusenergia aga Maa sisemusest. Maapõueenergia on kohalik ressurss, mille tõttu peab tootmine toimuma tarbijate lähedal. [9]

Eestis ei ole geotermaalenergia – maasoojuse kasutus mitte midagi uut. Viimaste aastate jooksul on puuritud tuhandeid kaeve ammutamiseks maasoojust meie maapõuest. Hetkel ulatuvad need kaevud mõnesaja meetri sügavusele pealiskorra settekivimitesse ja on mõeldud peamiselt üksikehitiste kütmise tarbeks. [10]

Eesti geotermaali potentsiaali kaardistamise uuring käsitleb maapõueenergiana energiat, mis on salvestunud pinnasesse, kivimitesse, põhja- ja pinnavette ning mida on võimalik võtta kasutusele. [11]

Üldiselt on kolme liiki maapõueenergiat madalalt saadav energia, kesk-madalalt saadav energia ja sügavalt saadav energia.

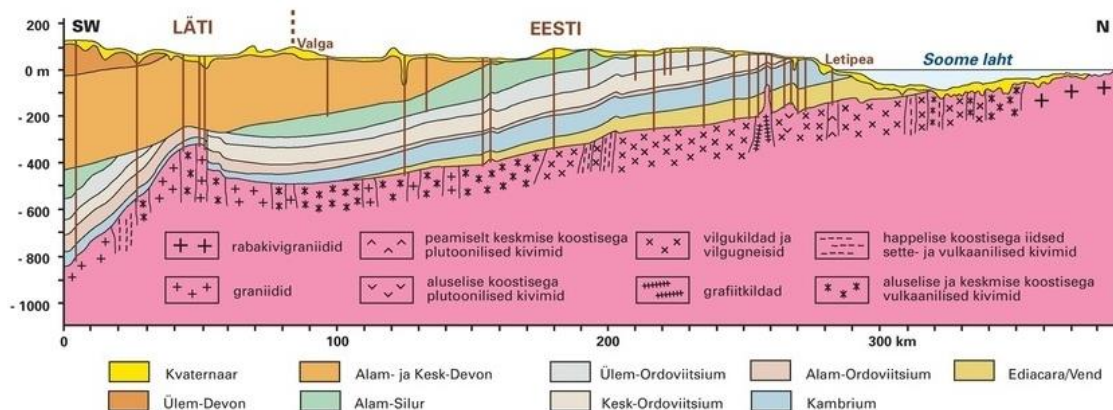


Joonis 2 Maapõueenergia liigid [12] (Autori poolt kohandatud)

## 2.1 Eesti maapind, geoloogiline ehitus

Eesti paikneb Ida-Euroopa platvormi loodeosas. Platvormiks nimetatakse geoloogias mandrilist ala, mis koosneb kahest erineva koostisega ja ehitusega osast. Aluskorra ehk platvormi alumise osa moodustavad kristalsed magma- ja moondekivimid, pealiskorra ehk ülemise osa horisontaalsed või kerge kallakusega settekivimid ja neil lasuvad setted kuni maapinnani. [13]

Pealiskorra alla arvatakse ka settekivimite peal lasuv pudedast setenditest koosnev pinnakate ehk Kvaternaari setted. Olemuselt on tegu liiva, savi, kruusa, moreeni ja turbaga, mis tekkisid viimase jääaja ja sellele järgnenud aja jooksul. [10]



Joonis 3 Eesti geoloogiline läbilõige. [13]

### 2.1.1 Aluskord

Kristalne aluskord on Ida-Euroopa platvormi maakoore osa, millel Eesti seisab. Aluskorra pealispind ei ole ühtlaselt sile, selle kogu ulatuses esinevad suuremad või väiksemad tõusud ja langused – need on tingitud kulutusest, murenemisest ja tektoonilisest liikumisest. Aluskorra pind jääb Eestis maapinnast 100m (Juminda poolsaare tipus) kuni 780 (Ruhnu saarel) sügavusele. Peale ligi 1,3 miljardi aasta pikkust kulutusperioodi ehk u 600 miljoni aasta eest, mil kõik mäed olid maatasa kulutatud, jõudis meri Eesti alale ning hakkas kujunema settekivimite pealiskord. [13]

### 2.1.2 Pealiskord

Ediacara ajastu kivimid on kujunenud 630-541 miljonit aastat tagasi. Ediacara kivimid Eestis ei paljandu ning neid on võimalik näha ja uurida ainult puursüdamikes. Eelmainitud ajastu alguseks jõudis ka meri Eesti alale. [13]

Eesti alal ei ole säilinud kivimeid ligi 370 miljoni aasta pikkuse perioodi kohta. Tõenäoliselt kujundasid settimisprotsesside asemel maapinda ulatuslikud kulutusprotsessid. Nii katavadki erineva vanusega aluspõhjakeivimeid Eestis suure ajalise lüngaga Kvaternaari ajastu setted. Kvaternaari tähtsamateks maavaradeks on liiv, kruus, turvas ja ravimuda. Samuti on see laialt levinud ehitusalus ja tähtis põhjavee allikas. [13]

Tabel 1 Eesti aluspõhjakeivimid ja pinnakattesetted. [13]

PINNAKATE	PEALISKORD	SETTED	LADESTU	Ladestu vanus (mln aastat)	Ladestu max teadaolev paksus	Iseloomulikud setted ja kivimid
			KVATERNAAR	0 – 0,126	210	liiv, kruus, savi, moreen, turvas
ALUSPÕHI	PEALISKORD	SETTEKIVIMID	DEVON	375 – 416	450	liivakivi, aleuroliit
			SILUR	416 – 443	455	lubjakivi, dolokivi, mergel
			ORDOVIITSIUM	443 – 488	180	lubjakivi, dolokivi, mergel
			KAMBRIUM	488 – 542	150	savi, liivakivi, aleuroliit
			EDIACARA	542 – 630	120	liivakivi, aleuroliit, savi
	ALUSKORD	MAGMAKIVIMID MOONDEKIVIMID	KALYMMA STATHER OROSIR	1540 – 1930	450+	rabakivigraniit, plagioklassporfüriit, kvartsporfüür, gneiss, migmatiit, amfiboliit, kvartsiit

### 2.1.3 Geotermiline gradient

Oluline aspekt on geotermiline gradient, mis näitab, mitu kraadi tõuseb maakoore temperatuur sügavale minnes iga 100m kohta. [13]

Võrdluseks, temperatuur 200 m sügavusel madalas kaevus on ligikaudu 6-8°C, keskmise sügavusega kaevu puhul 2000 m peal 30°C ja ülisügava kaevu puhul ligi 5000 m peal 65°C. [10]

Ei saa väita, et Eesti aluskord oleks geotermaalenergia potentsiaali poolest ühtlane. Selgelt eristub Kirde-Eesti, kus temperatuuride gradiendid on anomaalselt kõrgenenud. Seal on temperatuurid 200m sügavusel madalas kaevus ligikaudu 10-14°C, keskmise

sügavusega kaevu puhul 2000m peal 45°C ja ülisügava kaevu puhul ligikaudu 5000m peal 100°C. [10]

Kokkuvõttes, liikudes sügavale Eesti aluskorda on ühest puuraugust võimalik kätte saada kordades rohkem soojusenergiat kui tavapäraste madalate settekivimitest pealiskorda ulatuvate kaevude korral. See teave võimaldab rakendada vastavat lahendust palju mastaapsemate tarbijate nagu näiteks asulate teenindamiseks. [10]

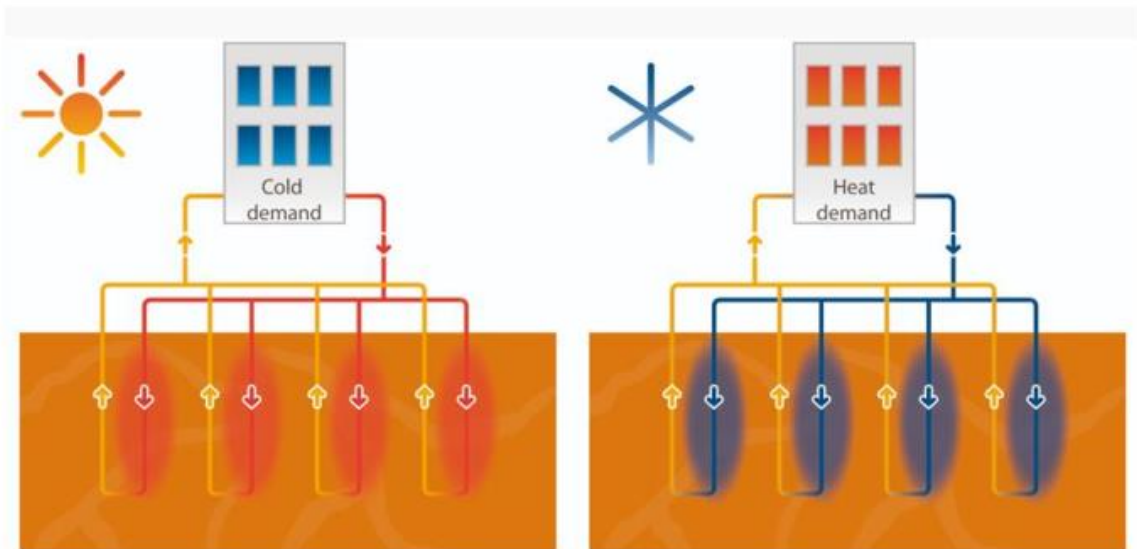
## 2.2 Tehnoloogia

Põhjamaades põhineb geotermaalenergia kasutus enamasti kuni 3km sügavusel lahendustel. Rakendusi määratletakse kui madalaid (<500m), keskmise sügavusega (500–3000m) ja sügavaid (>3000m) süsteeme. Süsteemid jagunevad suletuks ja avatuks. Suletud süsteemis kasutatakse soojuspumpa, mis tsirkuleerib energiakandjana vett või muud sobilikku vedelikku, omandab maa sees oleva energia ning toob selle pinnale. Avatud süsteemides kasutatakse kas põhjavett, pinnasevett või vanades kaevandustes olevat vett ning kasutatakse soojuse tootmiseks. [14]

Madala temperatuuriga allikatest soojuse tagasivõtmiseks on vaja soojuspumpasid. Üle 70°C vett on võimalik kasutada otse kütmiseks, kui sellised tingimused leiduvad nii Eestis kui ka lähipiirkondades mitme kilomeetri sügavusel. Madala geoenergia puhul kasutatakse horisontaalseid maakütte torustikke või vertikaalseid energiakaevusid. Kaevud võivad olla U-kujulised või koaksiaalse torustikuga. Enamasti piisab ühe maja kütmiseks ühest energiakaevust ent suuremate komplekside kütmiseks on võimalus kasutada kas sügavamaid kaevusid või energiakaevuvälja. [14]

Energiat saab ka salvestada maapinnas, kasutades maa-aluseid puurauke ehk soojuspuuraukude. Rakenduse nimetus on soojuspuuragu energia salvestamise süsteem (ingl k *Borehole thermal energy storage - BTES*). BTES koosneb maa all paiknevatest torude rühmast. [14]





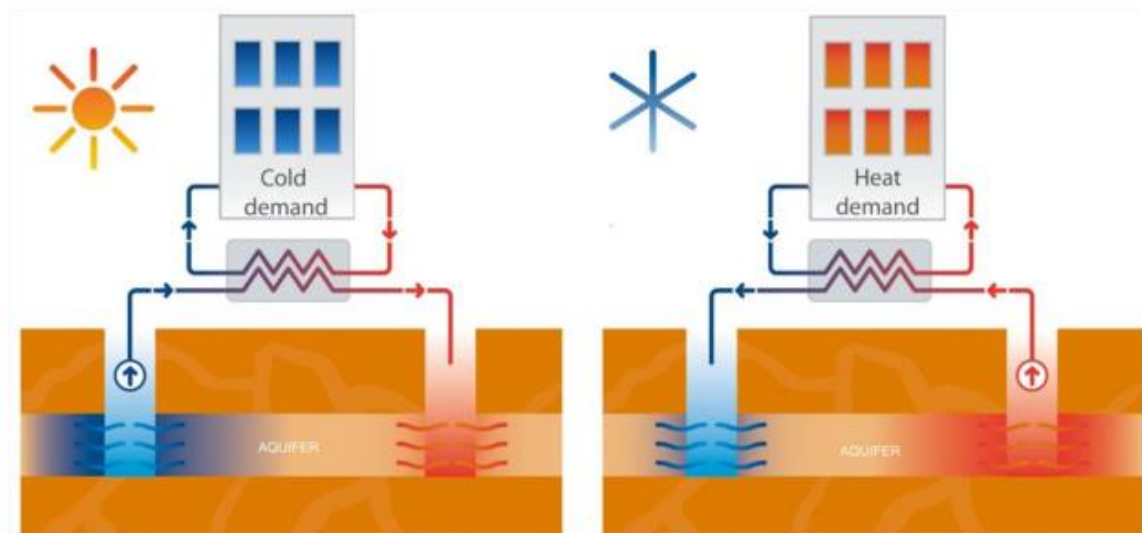
Joonis 4 Soojuspuuraugu põhimõtteline skeem. [14]

Täiustatud geotermilise süsteemi kasutamise korral (ingl k *Enhanced or engineered geothermal systems – EGS*) puuritakse auke kristalliinse aluskorra mittepoorsetesse kivimitesse, mis asuvad mitme kilomeetri sügavusel ning mida nimetatakse „kuumad kuivad kivimid ehk ingl k „*Hot Dry Rock*“. Vee temperatuur võib tõusta üle 100°C, mis on võimalik piisavalt sügaval ning tänu nendele samadele kuumadele kuivadele kivimitele. Läbi kivis olevate pragude surutakse külm vesi läbi ning selle abil võetakse kaasa sealne soojus. Soe vesi juhitakse pinnasele läbi teise puuraugu. [14]

Põhjavee geotermaalenergiat saab settekivimitest, kuna need kivimid juhivad hästi vett erinevate põhjaveekihtide vahel. Põhjaveekihid võivad paikneda madalatel või kuni mõne kilomeetri sügavusel. Pumbates ühest puuraugust külma vett alla ning teisest puuraugust sooja vett üles, on võimalik ära kasutada temperatuuride erinevusi. Sellist tehnoloogiat saab kasutada soojendamiseks, jahutamiseks kui ka salvestamiseks. [14]

Lisaks põhjaveele on võimalik kasutada ka pinnavett või vanades kaevandamisõõnsustes paiknevat vett. ATES (ingl k *Aquifer Thermal Energy Storage*) tehnoloogia töötab sesoonselt. Suvel ekstraheeritud/kaevandatud põhjavett kasutatakse jahutamiseks kandes samal ajal üle hoone soojust põhjavette. Järgnevalt suunatakse kuumendatud põhjavesi läbi pritsesüsteemi põhjaveekihti tagasi ning ladestatakse. Talvisel perioodil on võimalik kasutada tehnoloogiat samal põhimõttel, ainult voolusuund on pööratud ümber ehk kuumutatud põhjavesi ammutatakse ja kasutatakse kütmiseks (sageli koos soojuspumbaga). Seega kasutab ATES süsteem maa-alust ruumi ajutise salvestina, et tasakaalustada hooajalisi kõikumisi kütmise ja jahutamise nõudluses. [14]

Traditsiooniliste fossiilkütuseid kasutavate kütte- ja jahutussüsteemide asendamisel võib ATES olla kulutõhus tehnoloogia, mis vähendab hoone primaarenergia tarbimist ja sellega seotud CO<sub>2</sub> heitmeid. [14]



Joonis 5 ATES tehnoloogia skeem. [14]

### **3. Maasoojus kaugküttevõrkudes ja maapõueenergia**

Maasoojust saab kasutada kaugküttes mitmel viisil. Kasutusviis sõltub suuresti kättesaadavast temperatuurist, maapinna geoloogilistest omadustest ning soojuse kasutamise eesmärkidest. Olulisemaks parameetriks peetakse geotermilist gradienti. Geotermiline gradient on enamasti suurem aladel, kus esineb maakoos murranguid ning lõhesid, näitena saab tuua laamade piiralad, vulkaanilised piirkonnad ning geoloogilised murranguvööndid. [15]

Levinud on ka maasoojuse kasutamine soojuspumpade abil. Eeliseks on hea kättesaadavus ning ka maasoojuspumba efektiivsustegur (COP) on parem, kui võrrelda seda õhksoojuspumbaga. [15]

#### **3.1 Eelised ja puudused**

Võrreldes maapõueenergiat teiste taastuvate ressurssidega, on tegemist stabiilse energiaallikaga ning seda seetõttu, et ressurss on kättesaadav iga päev aastaringelt, erinevalt tuulest või päikeseenergiast, mis sõltuvad suuresti hooajalistest kliimatingimustest. Samuti ei tekita see CO<sub>2</sub> heitmeid ega õhusaasteid ning vähendab ka sõltuvust fossiilkütustest. Madala temperatuuriga geoenergiasüsteemid toodavad kohalikku energiat. [14]

Geotermaalenergia kasuks on ka madalad käituskulud, kuna antud juhul ei lisandu kütuse ostmiskulusi ning suuri hoolduskulusi. Geoloogilistes piirkondades nagu näiteks Eestis, on geoenergial potentsiaali vastata tuleviku soojuse, jahutuse ja hooajalise energia salvestamise nõuetele keskkonnasõbraliku lahendusena. [14]

Lisaks sellele on tegemist jätkusuutliku süsteemiga, võttes arvesse kohalike tingimusi on arvestatud tööeaks üle 30-50 aasta. Arvestama peab aga kohaspetsiifilisusega ning uuringud tuleb läbi viia igas piirkonnas, kus kavatakse geotermaalenergia süsteeme rakendada. [14]

See omakorda toob kaasa ka geotermaalenergia puudused. Suurimaks puuduseks on just asukohaspetsiifilisus. Nimelt tuleb arvestada kohaga, kus energiapotentsiaal on kasutamiseks majanduslikult ning tehniliselt teostatav ning samuti tuleb võtta arvesse ka tarbijate asukohta. Maksimaalne vahemaa, mille korral on võimalik energiat ülekanda

on vaid mõni kilomeeter. Teisalt ei ole vaja kavandada geotermaalenergia rakenduste jaoks suuri alasid, neid on võimalik paigaldada ka tiheasustusega aladele. [14]

Teise probleemina saab välja tuua algsed investeeringud. Süsteemide rajamiseks on vajalikud suured väljaminekud ning tasuvusaeg võib ületada 10 aastat. Kuigi esialgsed kulud on kõrged, on võimalik need pikaajalise investeeringu osana tagasi teenida. Samuti on näidanud keskkütte hinnad kasvavaid trende viimastel aastatel, mis on omakorda parandanud geotermaalenergia konkurentsivõimet. [14]

### 3.2 Põhjamaade näited

Geotermaalenergia on Skandinaavias aina enam populaarsust koguv energiaallikas ning sel on oma koht energiavarustuses. Põhjamaades installeeritud koguvõimsus on ligi 13GWh ja 2018. aastal varustati 40TWh maapõuest pärit kütte ja jahutusega, mis omakorda moodustab 34% kogu installeeritud võimsusest ning 43% kogu geotermaalse energia tarbimisest Euroopas. Peamine osa, 11 GWh ja 34 TWh, pärineb madalast (ingl k *shallow*) geotermilisest energiast. [16]

Kliima Skandinaavia riikides ei erine suuresti, küll aga on riikidel erinevused geotermilise energia rakendamisel. Sügavad maapõuesoojuse energiaressursid ning vastavad süsteemid on kasutusel Islandil ning vähesel määral ka Taanis. Soome, Rootsi ning Norra kasutavad hetkel ainult madalat geotermilist energiat. [16]



Joonis 6 Geotermaalenergia Põhjamaades. [16]

Antud töö raames on fookuses näited geotermaalenergia lahendustest, vajadusest ning kasutusest Soomes, Rootsis ja Norras.

Tabel 2 Kolme riigi võtmetegurite kokkuvõte. [16]

	SWEDEN	NORWAY	FINLAND
Population [Million people]	10.3	5.4	5.5
Area [km <sup>2</sup> ]	450 000	324 000	338 000
Energy consumption 2015 [Million tonnes oil equivalents, MTOE]	32	21	24
Geology	Mainly crystalline rock, and sedimentary rock in the south	Crystalline rock, sparsely covered with marine clay and quarternary deposits	Crystalline rock and smaller areas with sandstones
Geothermal gradient (C/100 m)	1.5-3	1.4-2.7	0.8-1.5
Number of GSHP systems 2018	580 000	55 000	140 000
Geothermal power	None	None	None
Geothermal direct use (heat) 2018	None	None	None
GSHP heating/cooling 2018	6 520 MWth 22 950 GWhth	1 023 MWth 4 103 GWhth	3 000 MWth 6 000 GWhth

### 3.2.1 Soome

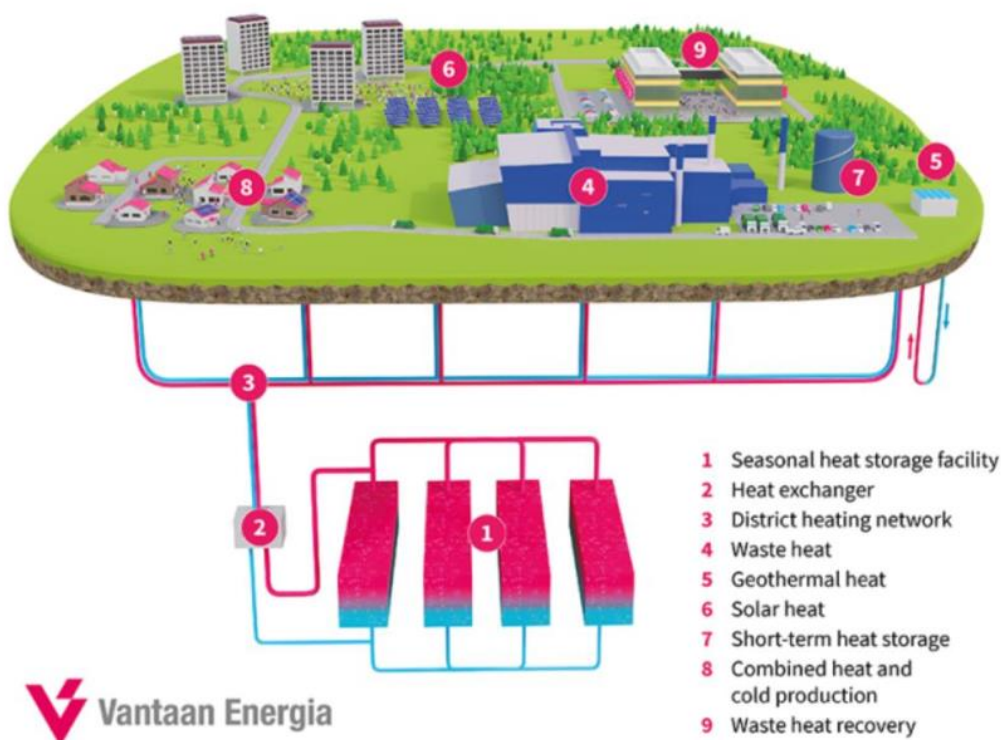
Soome geoloogiline ehitus koosneb kristalsest aluskorrast, liivakivimoodustistest ning glatsiofluviaalsetest (liustiku-ja järve) setetest. Sellistes tingimustes on sobiv kasutada madalaid maapõueenergia süsteeme. [16]

Alates 2005. aastast on soojuspumpade turg kiiresti kasvanud, enamasti õlipõletite asendamiseks ja otseseks elektrikütteks väikestes elamutes. Kuigi enamus Soomes paigaldatud soojuspumpadest on õhksoojuspumbad, on umbes 140 000 GSHP ( ingl k

Ground source heat pump) süsteemi kasutusel nii eramute soojustamiseks kui ka suurte äri- ja tootmishoonete kütte-ja jahutusvajaduse varustamiseks. [16]

Mitmetes uutes ja olemasolevates kaubanduskeskustes on kasutusele võetud suuremahulised BTES süsteemid. Paljud uued GSHP rajatised säilitavad varasemad kaugkütteühendused ning päikeseenergia süsteemid varusüsteemidena. [16]

Ettevõtte Vantaa Energy on otsustanud lõpetada fossiilkütuste kasutamise aastaks 2026 ning taastuvenergia jaoks tehtavad investeeringud ulatuvad järgnevatel aastatel umbes 200 miljoni euroni. Võtmerolli tuleviku süsinikuvabades energia süsteemides mängivad innovatiivsed energia salvestamise lahendused. Ettevõtte poolt on käivitatud hooajaline energiasalvestusprojekt VECTES (*Vantaa Energy Cavern Thermal Energy Storage*), mis võimaldab kasutada suve soojust külmal ajal talvepäevadel. Rajatisest saab maailma suurim koobas-energiasalvestus, mille suurus on 1 000 000 m<sup>3</sup>. Energiasalvestuse võimekus on 90 GWh, mis on omakorda keskmise suurusega linna aastane soojakulu. Antud projekt on oluline verstapost Vantaa fossiilkütuste vaba energia tootmise teel. Salvestatud energia asendab gaasi kasutamist talvel ning vähendab linna soojusenergia CO<sub>2</sub> heitmeid 26 000 tonni võrra aastas. Rajatise teostatavus põhineb kuuma vee salvestamisel erakordselt kõrgel temperatuuril 140°C. Projekti kavandatud lõpuleviimise aeg on 2028 ning hetkel ollakse planeerimisfaasis. [14], [17]



Joonis 7 VECTES süsteemi tööpõhimõte. [14]

Lisaks saab välja tuua eduka projekti Espoos Cityconi arendatud Lippulaiva kvartalis kasutusel hoonete kütmiseks ja jahutamiseks geotermaalenergia. Linnakeskuse alla on paigutatud enam kui 300 meetri sügavusele 170 geoenergia kaevu. [18]

2015. aastal algatas Soome eraettevõtte S1 Nordic Oy esimese sügava geotermaalenergia pilootprojekti Espoos. Idee oli puurida kaks puurauku sügavusel 6000-7000 m kaugküttevõrgu jaoks ning eeldatav võimsus oli 40MW. [16]

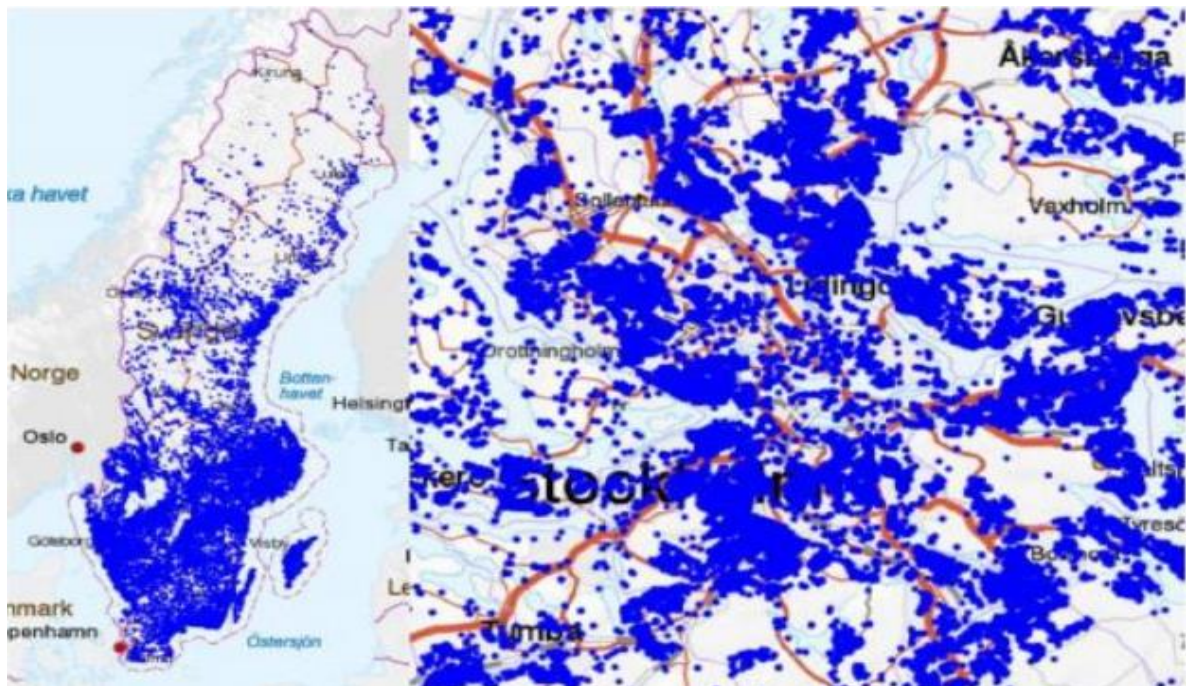
Planeeritava täiustatud geotermilise süsteemi (EGS) ekstreemne sügavus on tingitud madalast geotermilisest gradiendist uuringualal ning tehnilistest nõuetest kaugküttesüsteemis. Projekt näitas, et 6km sügavusel Lõuna-Soomes on maapõues piisavalt kõrge temperatuur, millega on tulevikus võimalik saavutada eesmärk tagada küttevajadus. [19]

Samuti andis uuring kogemuse ja andmekogumid mandrilise koore ja sügava puurimise kohta. Probleemaatiliseks osutus hüdrauliline juhtivus EGS-i arendamisel. Tänapäevaks on St1 Nordic Oy poolt algatatud sügava geotermaalenergia pilootprojekt peatatud. [19]

### **3.2.2 Rootsi**

Rootsi geoloogia sarnaneb Soome omaga, mida iseloomustab kristalne aluskord. Soomega sarnaselt on ka Rootsis sobilikud termilised omadused madalate geotermiliste süsteemide jaoks, eriti vertikaalsete maasoojuspumpade (GSHP) ning puuraugu soojusenergia salvestamise (BTES) jaoks. Riigi lõunaosas leidub jõeorgudes ning settekivimites sobilik põhjaveekiht, mida saab kasutada põhjaveepõhiste madalate geotermiliste rakenduste jaoks ehk põhjaveekihi soojusenergia salvestamiseks (ATES). [16]

Sarnaselt Soomega ei ole Rootsis geoloogiast tulenevaid võimalusi sügava geotermaalenergia tootmiseks kuigi tuleb lisada et peale Soome pilootprojekti käivitamist, on ka Rootsis tekkinud huvi sügava geotermaalenergia vastu kaugküttes.[16]



Joonis 8 Soojuspuuraugud Rootsisis.[14]

Alates 1970ndatest on olnud Rootsi väga aktiivne madala geotermaalse energia kasutamise ning arendamise poolest. Paigaldatud on üle poole miljoni madala maasoojusenergiast, millest enamus kasutab vertikaalseid puurauke eramute kütmiseks ning tarbevee soojendamiseks. [16]

2018.aasta statistika põhjal oli GSHP-süsteemid tootnud ligikaudu 23TWh soojust, millest 17TWh on tulnud maapõuest ning kogu paigaldatud GSHP küttevõimsus oli 6,5GW. [16]

Rootsis on kasutusel kaks kõrge temperatuuriga puuraugu soojussalvestussüsteemi – üks elamute päikesesoojuse salvestussüsteem Stockholmis ning tööstuslik rakendus Emmabodas. BTES-i rakendusi kavandatakse üha sügavamate puuraukude ning suurenevate võimsustega. [16]

Näidetena saab välja tuua Rootsi suurima BTES süsteemi, mis asub hetkel Volvo Powertraini tehases Köpingus. Süsteem koosneb kokku 215 puurkaevust, mille keskmine sügavus on 270m, andes puurkaevude pikkuseks kokku 58 200m. Süsteem ehitati aastatel 2015-2016. [20]

Rootsi suurim ATES süsteem on Stockholm Arlanda lennujaama ATES jaam, mida kasutatakse vaba jahutusena, ventilaatori eelsoojendamiseks ning värvate jäävabastamiseks. Võimsus on kavandatud 10MW ilma soojuspumpadeta. Süsteem annab aastas 22GWh soojust ja külma. [20]



### 3.2.3 Norra

Norra geoloogia on samuti võrreldav Rootsi ning Soome omaga ning samuti on ka Norras sobiv madal geotermiline süsteem ning ebasoodne sügava geotermaalse energia kasutamine. Madala geotermaalenergia süsteemid on üha levinumad ning aastal 2018. moodustasid umbes 4,1 TWh, mida on 28% rohkem võrreldes 2015. aastaga. [16]

Hinnanguliselt on paigaldatud Norras geotermaalenergia süsteeme 55000. Kuna Norras on odav ning puhas hüdroenergia, on geotermaalenergia kasutamine paras väljakutse, seda just süsteemide kalliduse tõttu. Enamus madalaid geotermaalenergia süsteeme on vertikaalsete puuraukudega GSHP-süsteemid. Nii nagu Rootsis, on ka Norras suundumus geotermaalsete rakenduste puhul keskenduda puuraugu sügavuse suurendamisele. [16]

Geotermaalenergia süsteemide kallidus ei ole siiski Norra puhul määrajaks, kuna maast pärineva energia osakaal Norras endiselt suureneb. Trendiks on varasemalt mainitud energiapuurkaevude pikkuse suurenemine, hetkel on keskmiseks pikkuseks 220m. Teine areng on Norra esimese HT-BTES asutamine Drammenis, mis käivitati testimise mõttes aastal 2019. Teine selline süsteem on kavandatud kaugkütteettevõtte poolt Furusetis Oslos. [16], [21]

Kasutuselolevate näidetena saab välja tuua Oslo Gardermoeni lennujaama geotermaalse rajatise, mida kasutatakse jäätõrjena ning see ei hõlma endas soojuspumpasi. Vastava rakenduse jaoks on kasutusel kaks 1500m sügavust puurauku. Üks kahest puuraugust on varustatud kiudoptilise kaabliga, et jälgida temperatuuriarengut puurkaevus. [16]



Joonis 9 Drammenis rajatav jaam kiudude paigaldamise ajal temperatuuri mõõtmiseks [21]

## **4. Maasoojusenergia alane seadusandlus ning Skandinaavia kogemused**

Euroopa Liidus puudub ühtne geotermaalenergia kasutamist reguleeriv direktiiv, mille tõttu on maasoojusenergia puuraukude puurimine ning maapõuest saadava energia kasutamine EL liikmesriikides reguleeritud erinevalt ja erineval tasemel. Nii riigi kui ka omavalitsuse tasemel võivad olla kehtestatud seadused, määrused, standardid või muud juhendid ja normatiivaktid. Sellegi poolest on aastast 2020 olemas maasoojuspuuraukude (*borehole heat exchanger, BHE*) rajamist käsitlev standard Euroopa Liidus: EN 17522 „*Design and construction of borehole heat exchangers*“. Antud standard kirjeldab maasoojuspuuraukude projekteerimise, puurimise, ehituse, opereerimise, monitooringu, hoolduse ja ka likvideerimise valdkondi. Lisaks on puuraukude rajamisele eelnevate geotehniliste uuringute läbiviimist käsitlev rahvusvaheline standard EVS-EN ISO 17628:2015, mis rakendatakse kuni 400m sügavuste ning kuni 200mm läbimõõduga maasoojuspuuraukude rajamiseks. [22]

Üldiselt on Euroopa riikides reguleeritud maasoojusenergia kasutuselevõttu eelkõige vee- või kaevandamiseaadustega, kuid samuti võib maasoojuse temaatika olla käsitletud ka energia-, ehitus- ja keskkonnakaitse seadustes. [22]

### **4.1 Süsteemide rajamise kogemused, nõuded ja riskid Soomes**

Maasoojussüsteemidest kasutatakse Soomes peamiselt süsteeme:

- Energiapuurkaevud
- Horisontaalsed maasoojuskontuurid
- Pinnavee soojuskontuurid

Energiapuurkaevud on kristalse aluskorra kivimitesse puuritud soojuspuuraugud, mille sügavus varieerub 100 – 250m vahel ning nendesse on maasoojuse transpordiks installeeritud soojuskande vedelikuga täidetud U-kujuline 40-50mm läbimõõduga plasttoru. Puurimissügavus on aastate jooksul suurenenud ning Soomes puuritakse täna ka juba 400m sügavusi maasoojuspuurauke. Soojuskande vedelikuna kasutatakse U-kollektori plasttorudes enamasti 28% etanooli lahust, mille külmumistemperatuur on -

17°C. Maasoojussüsteeme, mis põhinevad soojuspuuraukudel on Soomes rajatud alates 1990ndatest aastatest. Maasoojuspuuraukude arv on täpselt teadmata kuna erinevalt Rootsist puudub Soomes üleriigiline puurkaevude register. [22]

Enamus maasoojuspuurauke puurivaid puurimisfirmasid kuulub Soome Kaevupuurijate Liitu, sealhulgas on aktiivseid puurimisfirmasid 70-80 vahel. Puurimisel järgitakse Soomes Keskkonnaministeeriumi poolt koostatud maasoojuspuurkaevude rajamise juhist ning ka Poratek poolt koostatud juhist. Mõlemas juhises on välja toodud maasoojuspuuraukude dimensioneerimise põhimõtted, soovituslike materjalide spetsifikatsioonid, puurimistöde läbiviimise tingimused (nt soovituslikud ohutuskaugused) ning samuti puurimistödega seotud dokumentatsioon. Tavapäraselt on järgitavad ohutuskaugused maasoojuspuuraukude rajamisel [22]:

- Ehitistest – 3m ning kinnistu piiridest 7,5m
- Maasiseste küttesüsteemide, kanalisatsiooni- ja veetrasside torustikest 2m
- Teisest energiakaevust (vastavalt planeeringule)
- Olemasolevast puurkaevust – 40m ning salvkaevust 20m

Energiakaevude planeerimisel üritatakse vältida teiste puuraukude termiliste omaduste mõjutamist ning sellest lähtuvalt on Soomes minimaalseks energiakaevude vahekauguseks võetud 15 meetrit. [22]

Enamik kinnise süsteemiga maasoojuspuurkaeve puuritakse Soomes läbimõõdus 4,5"/115mm, vähemal määral tehakse 5,5"/140mm läbimõõduga puurkaeve ning mõned firmad puurivad ka diameetriga 6,5"/165mm. Kuigi 115mm läbimõõduga puuraukude puurimine on odavam, võib tekkida probleem U-kollektortorustiku paigaldamisel, kuna tegemist on suhteliselt kitsa puurkaevuga. Selle lahendamiseks tuleb kas olemasolev puurauk laiemaks puurida või teha hoopis uus puurauk. Energiakaevust väljuva kollektortorustiku ühenduste hilisema kontrolli ja hoolduse võimaldamiseks eelistavad enamik Soome puurimisfirmasid paigaldada ümber energiakaevu ülaosa vaatluskaevu. Vaatluskaevu diameeter on vähemalt 50cm ning see on valmistatud kas plastikust või betoonist. [22]



Joonis 10 Energiapuurkaevu vaatluskaev [22]

Horizontaalseid maasoojuskontuure paigaldati Soomes peamiselt eelmise sajandi lõpupoolel ning tänapäeval tehakse seda vaid vähestel juhtudel. Üldiselt paigaldatakse horisontaalsed maasoojuskontuurid ridadena 1-1,5 meetri sügavusele, hoides ridadevaheliseks miinimumvaheks 1,5m. Vähesel arvul on ehitatud ka kinniseid pinnavee kontuure, mis paigutatakse vähemalt kahe meetri sügavusele järve või mere põhja. [22]

Soomes on maasoojussüsteemide rajamisel olulised nõuded ja riskid, mida reguleerib aastast 2011 kehtiv maakasutuse ja ehituse seadusandlus. Majaomanikud peavad enne maasoojuskollektori ehitamist taotlema planeeringuluba. Seadus annab kohalikele omavalitsustele õiguse mitte nõuda luba juhul, kui maasoojuskollektori rajamist peetakse vähetähtsaks. Sellisel juhul võib piirduda vaid teatise esitamisega. Juhul kui maasoojussüsteem soovitakse rajada olulisele põhjavee alale, tuleb taodelda täiendavat luba vastavalt Veeseadusele. Soome Keskkonnakaitseadus keelab küll põhjavee reostuse, kuid vastavad selgitavad määrused puuduvad. Lisaks on vajalik ka täiendav luba soojuspumba paigaldamiseks, mis pigem tulenevad paigaldamisega seotud elektritööde tegemisest. [22]

Planeeringuloaga kaasnevad mitmed eelised nagu näiteks [22]:

- piirnevate kinnistute soojusvajaduse arvesse võtmist maaküttesüsteemi mahamärgkimisel tiheasustusaladel;

- maaküttesüsteemi ehitust on võimalik vajadusel juhendada, märkides loale süsteemi väljaehitustingimused;
- võimalus keelata ehitust põhjaveetundlikel aladel ning põhjavett tarvivate kaevude läheduses;
- võimalus kanda rajatavate maaküttesüsteemide asukohad andmebaasidesse;

Murekohad planeeringulubade taotlemisel võivad olla aga [22]:

- erinevate omavalitsuste esitatavad nõuded;
- lubade pikk menetlusaeg;
- uute ehitusinspektorite vähesed teadmised maaküttesüsteemide rajamise osas ning täiendkoolituste vajadus;

Peamisteks keskkonnariskideks peetakse Soomes põhjaveekihtide reostumist maapinnalt lähtuva reostuse tõttu, soojakandevadeliku lekkimist kollektortorustikust, põhjaveekihtide segunemist ning maapõue geoloogilisest ehitusest tulenevaid riske. [22]

Põhjaveekihtide reostumine võib toimuda eelkõige puurimise käigus, kus puurimisel kasutatav diiselkütus võib lekkida maapinda või lausa imbuda põhjavette piki mittevettpidavalt paigaldatud manteltoru. Soojakandevadeliku lekkimise tõenäosus on tunduvalt suurem horisontaalsete maaküttesüsteemide kollektortorustikust võrreldes maasoojuspuurkaevudega. Torustiku vigastamine leiab enamasti aset kaevamistöde käigus. Soojakandevadelike puhul on keskseks küsimuseks Soomes nende keskkonnatoksilisus, biolagunemisvõime ning biolagunemise kiirus looduskeskkonnas. Peamiselt kasutatakse Anora Group Oy poolt toodetaviad Naturet soojuskandevadelikke. Etanoolipõhiste soojuskandevadelike eeliseks on looduses kiire biolagunemine. [22]

Põhjaveekihtide segunemist tuleks puurimistöde käigus vältida. Teisalt peab meeles pidama, et kahe sarnase keemilise koostisega reostumata põhjaveekihi vee segunemisel on tulemuseks endiselt kvaliteetne põhavesi ning selline segunemine on looduses geoloogiliste rikkevööndite alal tavaline. Siiski tuleb vältida maasoojussüsteemide rajamisel inimtekkelise reostuse kandumist maapinnalt põhjavette. [22]

Geoloogilisest ehitusest tulenevad puurimise riskid Soomes on seotud paksemate ning vähekonsolideerunud ent veerikaste kvaternaarsegete läbimisega. Kuna puurimisel

enamjaolt kasutatakse keerd-löökpuurimist, selle odavuse ja kõrgema puurimiskiiruse tõttu. Selles protsessis eemaldatakse purustatud kivimiosakesed puuraugust võimsate kompressorite abil. Probleem võib aga tekkida teatud sügavusastmel, kus veetase on kõrgenenud. Nendes tingimustes võivad kompressorid kaotada võime veega küllastunud puurhiiva puuraugu õõnest eemaldada. See omakorda aga võib viia vajaduseni puurimine katkestada või jätkata teises asukohas. [22]

Riskiks võib olla ka puurimiskoha läbilõikes lõhevööndite esinemine, mille tõttu võib puuraugu sein sissevariseda ning seetõttu ei ole võimalik paigaldada puurauku U-kollektortoru. [22]

## **4.2 Süsteemide rajamise kogemused, nõuded ja riskid**

### **Rootsis**

Rootsis on puuritud viimase 40 aasta jooksul maasoojuspuurkaeve, mida kasutatakse maasoojuspumpade abil kas kütmise või kütmise ja jahutamise eesmärgil ning tänapäeval on Rootsis kasutusel enam kui 500 000 maasoojuspuurauku. Neist umbes 400 000 on kristalsetesse kivimitesse puuritud vertikaalsed GSHP soojuspuuraugud. Enamus puurauke on rajatud eramajade kütteks ning enamasti koosnevad nad ühest või kahest energiakaevust. Nii energiakaevude kui ka joogiveekaevude asukohad on Rootsis hästi jälgitavad, seda tänu Rootsi geoloogiateenistuse (SGU) poolt hallatava puurkaevude andmebaasi abil. [22]

Rootsis on viimastel aastakümnetel kasvanud soojusenergia salvestusvõimekusega BTES maasoojussüsteemide rajamine, seda nii ärihoonete kui ka suuremate avaliku kasutusega ehitiste kütmiseks ning jahutamiseks. Detailne statistika BTES süsteemide osas puudub, kuid 2018. aasta seisuga arvati olevat Rootsis vähemalt 500 BTES süsteemi, milles igasse süsteemi kuulus enam kui 20 maasoojuspuurauku. [22]

Vähestel juhtudel on rajatud ka kõrgetemperatuurilise salvestusvõimekusega maasoojussüsteeme (HT-BTES), mis võimaldavad päikesepaneelide abil toodetud soojusenergia või tööstuslikul jahustusel tekkiva jäätmesoojuse salvestamist. [22]

Rootslastel on ka pikaajaline kogemus avatud soojussüsteemiga puurkaevude (ATES) kasutamisel nii suurte taristuprojektide kütmisel ja jahutamisel kui ka nende kaugküttesüsteemides rakendamisel. [22]

Maasoojuspuuraugud Rootsis on küll pika ajalooga, kuid paraku seadused ja regulatsioonid, mis antud valdkonda käsitlevad ja reguleerivad on kesised. [22]

Rootsi keskkonna- ja tervisekaitse seaduse kohaselt tuleb nii kinnise kui ka avatud süsteemiga maasoojuspuuraukude rajamise taotlused registreerida eelnevalt kohalikus keskkonnaametis. Kui puurkaevude baasil rajatud avatud süsteemis ei toimu põhjavee tarbimist, ei nõua Rootsi Keskkonnaseadus põhjavee loataotlemist avatud soojussüsteemi ehitamiseks ühe- ja kaheperekonna elamute jaoks. Rootsi Keskkonnaagentuur võib aga keelata põhja- ja pinnavee kasutuse maasoojuse ammutamiseks ning energiakaevude rajamise põhjavee kaitse aladel, kus kehtivad eraldi regulatsioonid. [22]

Puurimisfirmad peavad soojuspuuraugud ja puurkaevud registreerima Rootsi Geoloogiateenistuse hallatavas puurkaevude andmebaasis, mida tehakse juba alates aastast 1976. [22]

Rootsi ehitusseadus määratleb ehitise kütte- ja jahutuskulud. Maasoojuspuurauke käsitletakse ehitiste puhul elektrikütte all ning hoone energiatarbe arvutustes läheb maaküttesüsteemide puhul arvesse ainult soojuspumba poolt tarbitav elektrikulu. [22]

Üldiselt on määratletud soojuspuurkaevude täitematerjalidega täimise tingimused ja puurimisel tekkiva puurhiiva käsitlemine. Ka Rootsis erinevad kohalike omavalitsuste ja erinevate regioonide nõuded maasoojussüsteemide rajamise osas. [22]

Puuraukude puurmiseks on SGU väljatöötanud juhendi „Normbrunn-16“, kus on kirjas soovitused põhjavee kaitseks kinniste BTES süsteemide rajamisel. Maasoojussüsteemide dimensioneerimiseks vajaliku *Thermal Response Test* läbiviimiseks koos kasutatavate seadmete kirjelduse, tulemuste analüüsi ja aruandluse vormistuse osas kasutatakse Rootsi Geoenergia Keskuse poolt väljatöötatud juhendit, rahvusvahelist standardit „*Geothermal testing*“ EN ISO 17628:2015 sealjuures Rootsi ei aktsepteeri. [22]

Põhilised parameetrid BTES süsteemi dimensioneerimiseks on pinnase temperatuur (°C), kivimite soojusjuhtivus (W/m\*K), ehitise soojus- ja jahutuskoormuse vajadus kuude lõikes (kWh) koos miinimum- ja maksimumtemperatuuridega, BHE tüüp ning võimsus ja ka voolu kiirus maaküttekollektoris. Seda mitu puurkaevu rajatakse, mis sügavusel nad paiknevad ning mis on nende omavaheline vahekaugus määratakse väiksemate süsteemide puhul varasema kogemuse põhjal või kasutatakse modelleerimisprogrammi *Earth Energy Designer, EED*. Suuremate BTES süsteemide puhul tehakse ka tasuvusuuringud, mille käigus on ette nähtud katsepuurimistööd. [22]

Katsepuurauke dokumenteeritakse ning vastavas dokumendis kirjeldatakse puurimise käigus läbitud kivimeid, lõhevööndite esinemist, põhjavee taset, puuraugu seina

stabiilsust jne. Tasuvusuuringute käigus on võimalik hinnata maaküttesüsteemi maksumust kogu süsteemi eluea jooksul. Süsteemi tehniliste osade elueaks arvestatakse 20 aastat. [22]

Enamus soojuspuurkaevud Rootsis puuritakse keerd-löökpuurimisega, vastavalt eelmainitud *Normbrunn-16* juhendile. Suurem osa energiakaevudes on läbimõõduga 115mm, väiksem osa puuritakse läbimõõdus 140mm. [22]

Energiapuurkaevude soovituslikuks vahekauguseks on 20 meetrit ainult maasoojuse kasutamisel, BTES soojustagastusega süsteemide puhul on see aga vahemikus 5-10 meetrit. [22]

Soojuskollektorina energiakaevudes kasutatakse enamasti 40mm läbimõõduga U-kollektorit. Sügavamate, see tähendab suuremate kui 250m energiapuurkaevude puhul on kasutusel 45mm või 50mm läbimõõduga U-kollektorid. Kui tegemist on suure BTES süsteemiga on tavaliselt installeeritud kahene U-kollektor. U-kollektorites kasutatakse soojuskandvedelikuna bioetanooli vesilahust, milles etanooli kogus jääb alla 30%. [22]

Reeglina jäetakse nii kristalsetes kivimites kui ka kõvades settekivimites (lubjakivid, savikivimid) puuritud puurkaevud peale U-kollektorite paigaldamist täitmata ning puurkaevud suletakse vaid pealt tugevdatud kaanega. [22]

Rootsi Geoenergia Keskuse andmetel esineb neil maasoojussüsteemide rajamisel väga harva probleeme. Kui need aga juhtuvad tekkima, saab probleemid liigitada [22]:

- Puurimistöõde ohutus
- Puurimistöõde mõju puurmisalal ja selle läheduses
- Maaküttesüsteemi paigaldamisel tekkivad probleemid
- Maaküttesüsteemi paigaldamisjärgsed probleemid või kahjustused
- Keskkonnaprobleemid

Puurimistöõde suurimaks ohuallikaks Rootsis peetakse ootamatut survevoolikute ühedustest lahtitulekut võimsate kompressorite kasutamisel. Puurimisfirmad, mis tegelevad energiakaevude rajamisega kuuluvad Puurimisettevõtete Liitu *Borrföretagen*. Mainitud liidu veebilehel on mitmeid puuragregaatide kasutamist ja puurimistöõde läbiviimist käsitlevaid ohutusjuhendeid. [22]



Mis puudutab puurimistöde mõju puurimisalal ja selle läheduses, siis kindlasti on vajalik jälgida et geoloogilistest tingimustest lähtuvalt ei põhjustataks lähedal asuvate rajatiste vundamentide vajumist ning silmas tuleb pidada ka puurimistöde mõju läheduses olevatele kaevudele. [22]

Planeerimisfaasis tuleb ka välja selgitada, et puurkaevude ja horisontaalsete ühendustrasside alale ei jääks maasiseseid kaableid ja torustikke. Selle jaoks on Rootsil ka oma andmebaas, kus vatava päringu abil on võimalik saada informatsiooni. [22]

Tiheasustusaladel on vajalik jälgida, et puurimisel ei puuritaks sisse juba olemasolevasse puurkaevu. Seda tuleb silmas pidada eriti sügavamate kaldpuuraukude korral, kus kivimite geoloogiast tingituna võib puuraugu suund kalduda kõrvale algsest suunast puurimise käigus. [22]

Keevitustööd peavad olema teostatud sertifitseeritud keevitaja poolt. Seda just kollektortorustiku ühendamise puhul. Maasoojussüsteemi lekketestid võimaldavad välja selgitada ebakvaliteetseid keevitustöid. [22]

Paigaldusjärgsed kahjustused on enamasti seotud pinnase külmumisega, mis peamiselt kahjustab horisontaaltorustikke. Maasoojussüsteemide dimensioneerimisel Rootsis lähtutakse tavapraktikast, mille sisuks on et soojuskandvedeliku temperatuur ei tohiks alaneda  $-3^{\circ}\text{C}$ . Suurematel energiakaevude väljadel võib puurkaevude jäätumine toimuda maasoojussüsteemide pikaajalisel kasutamisel. Seda juhtudel kus energiapuurkaevud paiknevad liiga lähestikku või nende sügavus on ebapiisav. Soojuskandvedeliku lekkeid esineb Rootsis harva ning need mis tekivad on põhjustatud hilisemate kaevamistöde käigus energiakaevude ühendustrasside aladel. [22]

Aladel kus esineb arteesiavett nõutakse puurkaevu õõne täitmist peale U-soojuskollektori paigaldamist, vältimaks võimalikku ülevoolu puurkaevudest ning madalamate alade üleujutamist. [22]

Peamised keskkonnaalased probleemid maasoojussüsteemide rajamisel Rootsis on seotud põhjavee reostumisvõimalusega. Sellega seoses antakse põhjaveekaitse aladel energiakaevude rajamiseks lubasid ainult tingimusel, et valmiv maasoojussüsteem ei kujuta endast ohtu põhjavee kvaliteedile. Üldiselt hinnatakse keskkonnamõju maasoojussüsteemide rajamisel väga minimaalseks. [22]

## 4.3 Soovitused maasoojuspuuraukude rajamisel Eestis

Puurkaevude ning puuraukude rajamist käsitletakse Eestis [22]:

- Ehitusseadusikus (EhS §122–129)
- Veeseaduses
- Keskkonnaministri määruses nr. 43 (09.07.2015) „Nõuded salvkaevu konstruktsiooni, puurkaevu või – augu ehitusprojekti ja konstruktsiooni ning lammutamise ja ümberehitamise ehitusprojekti kohta, puurkaevu või -augu projekteerimise, rajamise, kasutusele võtmise, ümberehitamise, lammutamise ja konserveerimise korra ning puurkaevu või -augu asukoha kooskõlastamise, ehitusloa ja kasutusloa taotluste, ehitus- või kasutusteatis, puurimispäeviku, salvkaevu ehitus- või kasutusteatis, puurkaevu või -augu ja salvkaevu andmete keskkonnaregistrisse kandmiseks esitamise ning puurkaevu või -augu ja salvkaevu lammutamise teatise vormid“.

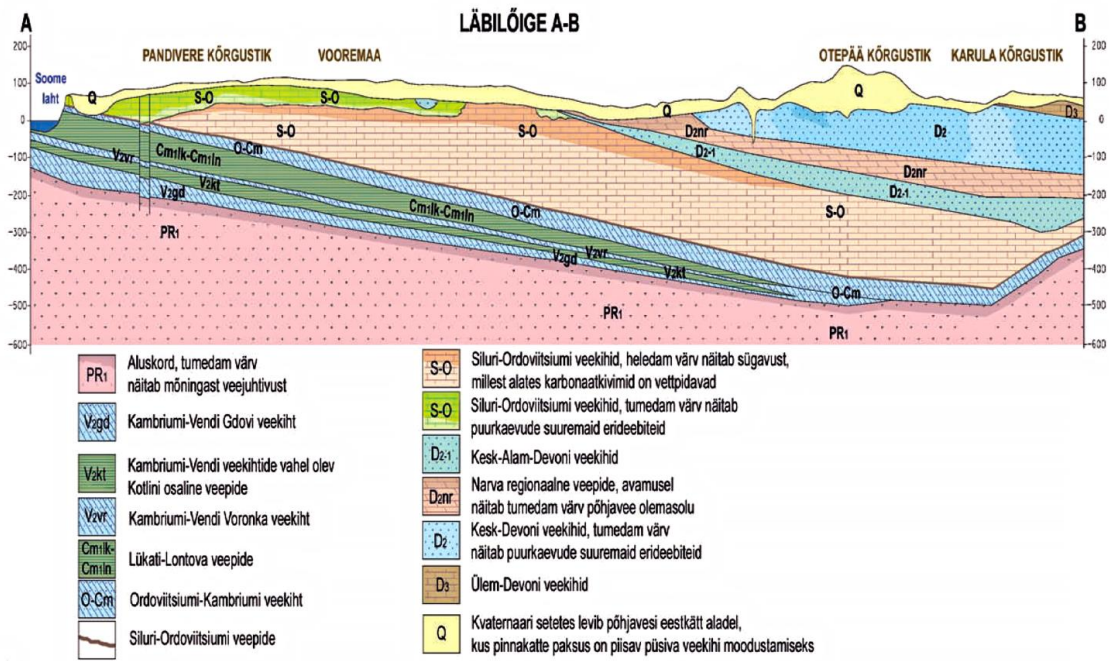
Need on kolm alusdokumenti, mis on põhjalikult refereeritud 2021. aastal SA Keskkonnainvesteeringute Keskuse tellimusel koostatud ülevaates „Maasoojussüsteemide rajamisega seotud seadusandlik regulatsioon ja selle muutmise vajadus“. [22]

Nii Soomes kui ka Rootsis ilmunud uuringutes ja ülevaadetes on märgitud probleemina maasoojussüsteemide rajamisel lubade taotlemisel erinevate nõuete varieerumine kohalikes omavalitsustes. Pidades siinkohal silmas Eesti väiksust ning geoloogilise ehituse lihtsust, oleks mõistlik koostada üle-eestiline energiapuurkaevude rajamise ja kasutamise monitooringu juhend, kus on energiapuurkaevudele esitatavad tingimused ning nõuded. Need omakorda ühtlustaks nii kohalike omavalitsuste kui Keskkonnaameti spetsialistide kooskõlastuste andmist energiapuurkaevude projektidele. [22]

Rootsis on soojuspuurkaevude õõnete tagasitäitmine nõutav juhul kui puurimistöödega läbitakse enam kui üks veekiht, mis võib tingida erinevate veekihtide segunemise. Puurimistööde käigus peetakse oluliseks et konduktori manteloru ulatuks vähemalt 2 meetrit kristalsesse kivimisse ning selle manteloru tagune osa oleks täidetud veekindla täitematerjaliga. Eestis kehtiv Keskkonnaministri määrus nr. 43 sätestab aga soojuspuuraugu kogu ulatuses täitmise nõude, sõltumata kas puurauk avab ainult ühe või mitu veekihti. [22]

Veeseaduse §15 määratleb Eestis et „Põhjaveekiht on üks või mitu maa-alust kivimkihti või muud geoloogilist kihti, mis on piisavalt poorsed ja läbilaskvad, et põhjavesi saaks

seal märkimisväärses ulatuses voolata, või millest saab olulises koguses vett võtta". Eesti maapõue läbilõikes määratletud põhjaveekihtid, mis on eraldatud vett mittejuhtivate veepidemete kivimitega on toodud joonisel 10: [22]



Joonis 11 Põhjaveekihtide ja veepidemete paiknemine Eesti maapõue põhja-lõunasuunalisel läbilõikel [22]

Jooniselt paistab, et maapinnalähedane Kesk-Devoni veekiht Lõuna-Eestis on enam kui 100m paksune ning Siluri-Ordoviitsiumi karbonaatkivimite kompleksi veekiht Kesk-Eestis üle 200m paksune. Kuna Eestis jäävad puurkaevude sügavused tavaliselt 80-150 meetri vahele, siis tihti avavadki need Kesk- ja Lõuna-Eestis vaid ühe veekihi. [22]

2021. aasta Keskkonnaregistri andmebaasis tehtud päringu alusel on Eestis registreeritud umbes 2400 kinnise süsteemi soojuspuurkaevu ning neist enamus on puuritud viimase paarikümne aasta jooksul. Nende puurkaevude rajamise ja kasutamise käigus ei ole teada soojuskandevedelike lekete esinemist. Seega lähtudes Rootsi pikaajalisest kogemusest tuleks Eestis kaaluda loobumist kinnise süsteemiga soojuspuurkaevu õõne täitmise nõudest kui puurimistööd toimuvad vaid ühe veekihi piires. [22]

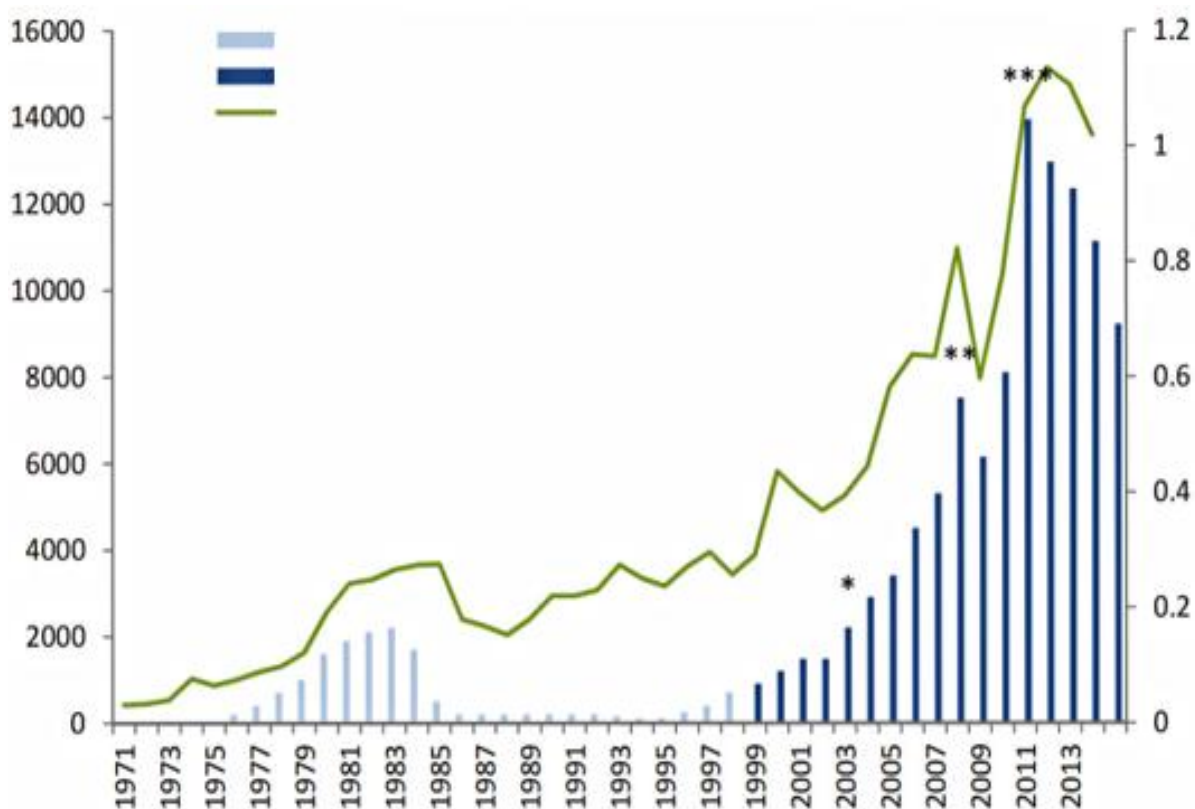
Silmas tuleb pidada et iga täiendava ettevaatusprintsipi rakendamise nõue suurendab energiakaevude rajamise maksumust, mis hetkel on Eestis kaks korda kallim kui

Soomes. Soomes on maasoojuskaevude rajamisel kuni 350m sügavuseni meetri maksumuseks 25€/m, sellele lisandub ka käibemaks. [22]

Tabel 3 Kinnise süsteemiga maasoojuspuurkaevu rajamise jooksva meetri maksumus [22] Autori poolt kohandatud

Puurimise sügavus	Puurimise hind (€/m)	Pakkujad
kuni 350 meetrit	25	Kõik
351-450 meetrit	50	Paljud
451-600 meetrit	75	Osad/natuke

Lisaks on näha, kuidas energiatõhususele suunatud riiklikud toetusmeetmed on näiteks Soomes viimase 20 aasta jooksul soodustanud maasoojuspumpade müüki. [22]



Joonis 12 Maasoojuspumpade müügitrend aastatel 1999-2014 [22]

2003. aastal rakendatud toetusmeede oli suunatud elektrikütte asendamisele maasoojusküttega ning 2008. aasta toetusmeede soodustas õlikütte asendamist maasoojusküttega. Kuna 2011. aastal vastavad toetusmeetmed Soomes lõppesid, vähenes järgnevatel aastatel oluliselt iga-aastaselt müüdavate soojuspumpade arv. [22]

Rootsi puhul ei ole olnud eraldi riiklikke meetmeid maasoojussüsteemide väljaehitamiseks. Küll aga on võimalik eraisikutel taotleda Rootsi Maksuametilt korterite ja eramajade renoveerimisel teostatud tööde eest iga-aastaselt maksusoodustust kuni 5000€ väärtuses. [22]

Soovituste koha pealt saab veel välja tuua et soojuspumbad on olulisel kohal hoonete energiatõhususe kohustuste saavutamisel ning maasoojuspumbad on soojuspumpadest kõige säästlikumad. Maasoojuse kasutamisel peaks kindlasti arvestama, et põhjavesi on oluline joogivee allikas ning horisontaalsete soojussüsteemide eelistamine vähendab survet puurimisel põhinevate lahenduste rajamiseks – ehk väheneb ka oht rikkuda põhjavett. [23]

Horisontaalseid maasoojussüsteeme tuleks käsitleda sarnaselt tehnovõrkudega kuna neil puudub oluline termiline mõju, mis ulatuks kontuurist kaugemale kui 1 meeter. Oluline on et kohalikul omavalitsusel oleks info soojuskontuuride olemasolu ja paiknemise kohta ning et oleks võimalik arvestada nendega tulevikus planeeringutel ja ehitustöödel. Rajamise tehnilistes küsimustes oleks mõistlik lähtuda Eesti Soojuspumba Liidu üldistest soojuspumba paigaldusnormidest või Riigi Kinnisvara AS Tehnilistest nõuetest mittelehoonetele. [23]

Kinnise soojussüsteemi puuraukudega seotud tegevused on enamasti hästi reguleeritud seaduste tasemel, et tagada olulisim – põhjavee kaitse. Olulised aspektid on kindlasti soojuspuuraukude täitmine ning soojuskontuuris keskkonnale ohutu soojuskandvedeliku kasutamine. Rajamisel on soovitatav lähtuda standardist EN17522. [23]

Avatud soojussüsteemide korral võiks eelistada maapinnalt esimest aluspõhjalist veekihti või sellel lasuvat pinnakatte põhjavett, uputatud kaevanduskäikude vett, sügavaid soolaseid veekihte (mida ei saa kasutada joogiveena), kristalses aluskorras kunstlike lõhesüsteemide vett. [23]

Ehitusaegne järelvalve tuleneb ehitusseadustikust. Soojuspump, mis paigaldatakse võib optimaalseks töötamiseks vajada järelseadistamist. Seega on soovitatav valida teenus, mis lubab pikema perioodi kohta maakontuuri ning kütteringi temperatuuride andmeid kuvada ja samuti analüüsida sõltumatul eksperdil soojuspumba tööd. [23]

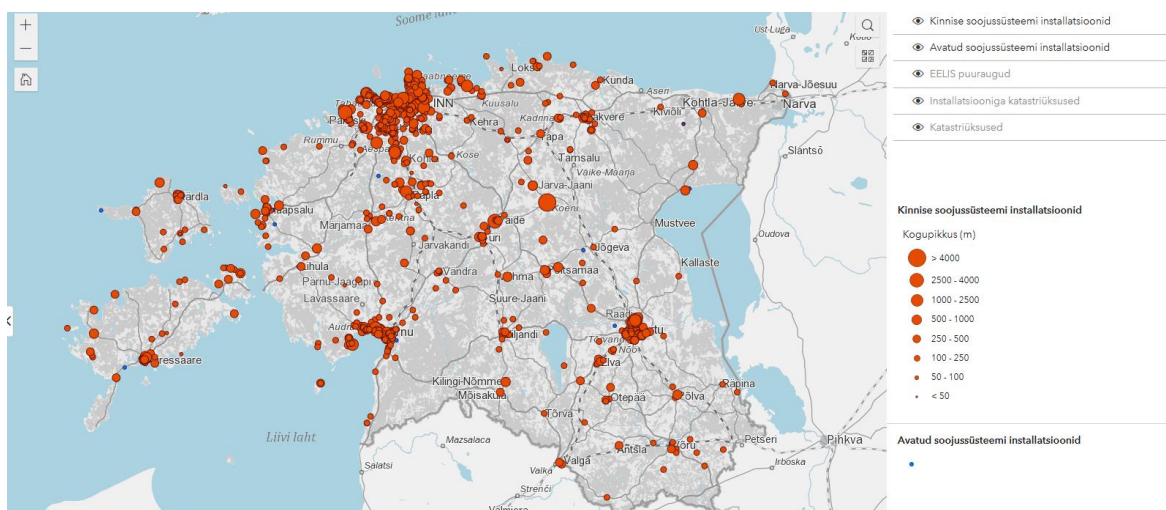
## 5. Potentsiaal Eestis

Maa-aluse soojusenergia potentsiaal Eestis on üldiselt piisav geotermilise soojuse kasutamiseks. Eestis on geotermaalset energiat võimalik kasutada hoonete kütmiseks ning sooja tarbevee tootmiseks. Potentsiaali hindamiseks on vajalikud geoloogilised uuringud.

Arvestama peab asukohaga, maapõuesoojuse potentsiaal sõltub konkreetsest geoloogilisest piirkonnast. Lisaks tuleb arvestada ka keskkonnanõuetega, et tagada keskkonnamõjude minimeerimine. [14]

Üldiselt võib öelda, et Eestis on geotermilise soojusenergia potentsiaal olemas, kuid nagu eelnevalt mainitud – varieerub piirkonniti. Maapõuesoojuse kasutamine võib olla ressursitõhus ning keskkonnasõbralik alternatiiv, küll aga nõuab põhjalikke uuringuid ning ka investeringuid infrastruktuuri väljaarendamiseks. [14]

Hea maapõueenergia potentsiaaliga alana saab välja tuua Põhja-Eesti, kus termogeoloogilised omadused on vähemalt sama head kui Lõuna-Soomes, kus juba töötavad mitmed majanduslikult efektiivsed soojusjaamad. Küll aga on Põhja-Eestis 150-200m paksust settekivimist moodustub „tekk“ põhjustanud temperatuuri kogunemise ülemisse kristalse aluskorra kihti ja madalamatesse settekihtidesse. See tähendab et võrreldes Soomega tuleb maapõueenergia kaevud puurida läbi settekivimite, mis suurendavad puurimiskulusid. [24]



Joonis 13 Kinnise ja avatud soojussüsteemi installatsioonid. [25]

Maapõueenergia aktuaalsust ning potentsiaali kinnitab veelgi varasemalt antud töös mainitud projekt GEOENEST, mis on Eesti riigi poolt tellitud laiaulatuslik

maapõueenergia kasutusviiside tehnilise ja majandusliku elujõulisuse uuring Põhja- ja Kesk-Eestis. Projekti uuringu eelduseks on maasoojuspuuraukude puurimistöde läbiviimine, et seejärel rajada kinnine soojussüsteem, kuhu paigaldada vertikaalsed U-soojuskollektorid. [7], [26]

Samuti on loonud käed Eesti Energia AS ja Geothermal Baltic OÜ, mille kohaselt alustab Geothermal Baltic Enefit Power-i kinnistule Narvas rajama geotermilist katsepuurauku. Juhul kui pilootprojekt õnnestub, varustab antud lahendus Narva linna roheline soojusenergiaga, konkurentsivõimeliste hindadega ning CO2 emissioonideta. [27]

## 5.1 Pilootprojektid

### 5.1.1 Roosna-Alliku

Roosna-Alliku vald asub Paide linnas Järva maakonna keskosas ning valla halduskeskuseks on Roosna-Alliku alevik, mis on ühtlasi ka valla suurim asula. Vald piirneb põhjast Albu vallaga, läänest ning lõunast Paide vallaga ning idast Järva-Jaani ja Kareda vallaga. [28]

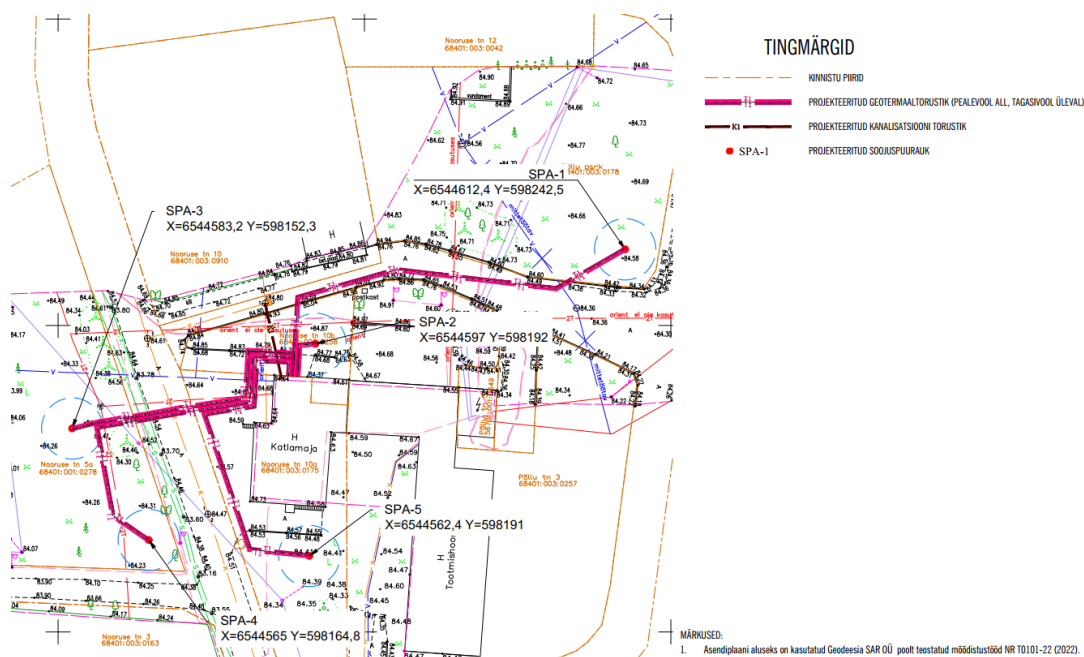
GEOENEST projekti raames luuakse Roosna-Alliku alevikku katsejaam, mille asukoht on valitud geoloogilisi tingimusi silmas pidades, kuid oluliseks aspektiks siinkohal on ka sobiva suurusega kaugküttevõrgu olemasolu antud piirkonnas. [29]

Antud piirkonda on kavandatud viis puurauku. Tänapäevaks on Inseneribüroo Steiger alustanud puurimistöid, mis ulatuvad ligi 500 meetri sügavusele, et rajada kinnine soojussüsteem. Puuraugu valmimisel paigaldatakse puuraukudesse vertikaalsed U-soojuskollektorid ning temperatuurimõõtmise andurid. [29]



Joonis 14 Roosna-Alliku puuraukude asukohad. [30]

Eesmärgiks on paigaldada kasutusvalmis maakütte põhjal soojuspumba ja maaküttekollektori torustik (puuraugust kuni katlamajani) ning integreerida rajatav soojuspumba süsteem olemasoleva kütteõlil töötava katlamajaga. [26]

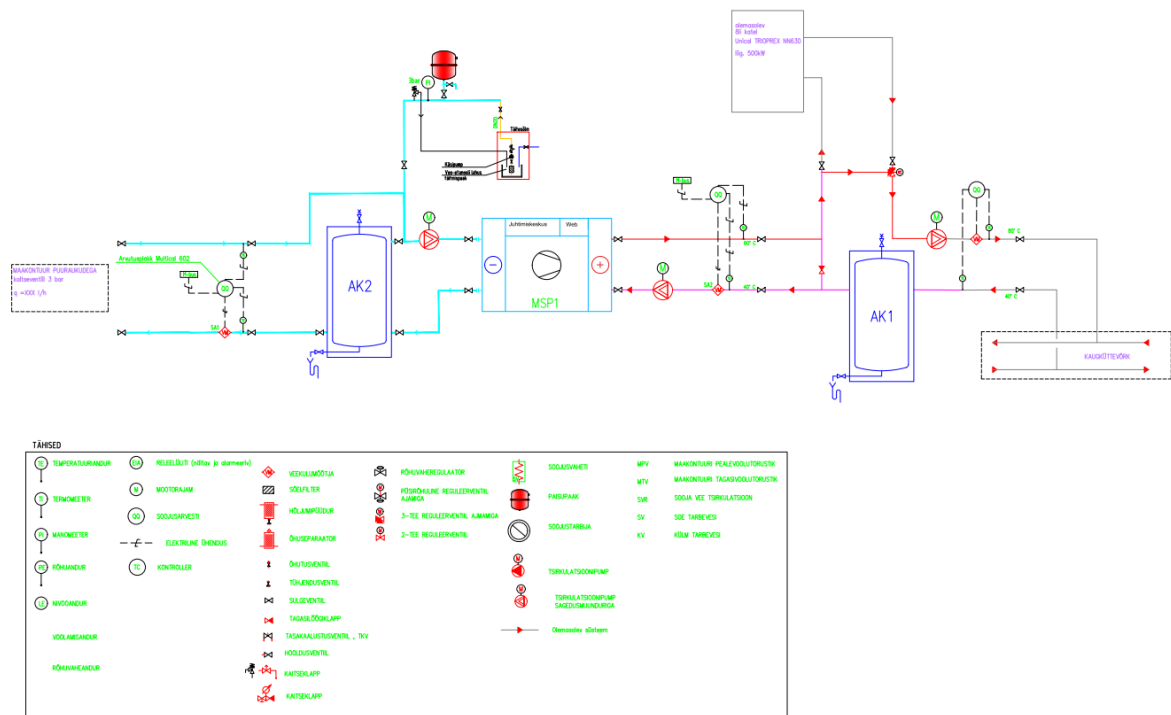


Joonis 15 Roosna-Alliku projekteeritud geotermaaltorustiku asendiplaan. [26]

Ettevõtte HeatConsult OÜ osaleb Roosna-Alliku pilootprojekti raames geotermaalse energia konsultandina. HeatConsult on panustanud projekti geotermaaltorustiku asendiplaaniga (vt. joonis 15).

Geotermaalenergia projekt koosneb torustiku asendiplaanist, tehnilistest tingimustest ning ka soojuspumbaskeemist.





Joonis 16 Soojuspumba ühendusskeem koos katlamajaga [26]

Projekti lisana on välja toodud Roosna-Alliku energia tarbimisandmed. Tarbimisandmetes on kogutud kokku 2021 ja 2022 aasta kütteõli soetamisandmed. Need sisaldavad endas nii ettevõtet, millest kütteõli pärineb, kogust ning ka hinda. Välja on toodud ka varasemalt mainitud aastate kütteõli kogused, kütteväärtused ning energiakulud küttesse kaupa. [26]

Projekti tehnilises kirjelduses on toodud välja tehnilised andmed, mis on eelkõige keskendunud soojuspumba parameetritele ja tingimustele. Hinnanguliselt on ammutav energia hulk voluhulgal 16000l/h 80kW ning see täpsustatakse puuraukude rajamise ja uuringu käigus. Küttevete pealevoolutemperatuur puuraukudest, mis jõuab soojuspumbani on 3 kuni 6,6°C ning maasoojuspumba soojusvõimsus minimaalselt 110kW ning maksimaalselt 130kW, juhul kui pealevoolutemperatuur on +60°C ning puuraukudest siseneva külmakandja temperatuur on 0°C juures. Maasoojuspumba töötamisel küttesse peab COP vastavalt standardile EVS-EN14511 temperatuuridel 0/60°C olema minimaalselt 3,5. [26]

Projekteerimistööd on ette nähtud teostada vastavalt EVS 932:2017 standardile, seda projekti osades nagu näiteks soojusvarustuse välisvõrk, soojusallikas ja hoone veevarustuse ja kanalisatsiooni paigaldus.[26]

Ehitustöödel tuleb rajada maa-alune magistraalitorustik rajatavast puuraugust (kokku 5 puurauku) kuni soojuspumbani, vastavalt asendiplaanile. Maaküttetorustiku paigaldamise järel on vajalikud pinnase tasandustööd ning samuti tuleb soojuspump tarnida ning paigaldada katlamaja ruumidesse. Lisaks on vajalikud elektritööd ja kanalisatsioonitööd. Soojuspump tuleb ka siduda olemasoleva õli baasil töötava katlamajaga, samuti on tuleb asendada katlamajas paisunõu uuema vastu ning ette on nähtud ka kaugküttevõrgu tsirkulatsioonipumba asendus uuema vastu. Lisanduvad ka olemasoleva katlamaja korrastusega seotud ehitustööd nagu siseviimistlus, põranda tasandus jne. [26]

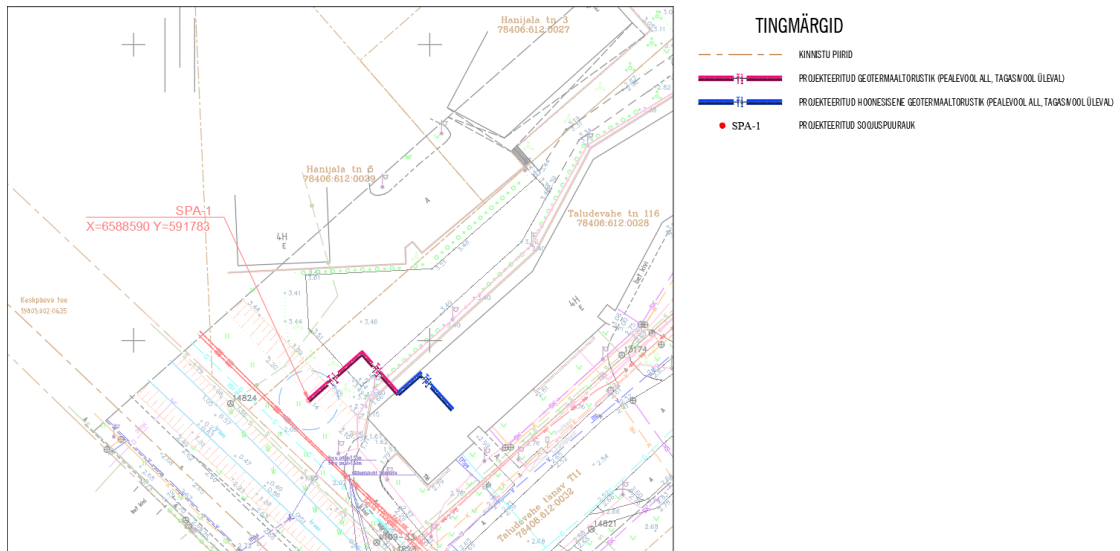
Töömahtu kuuluvad ka U-kollektortorustikud, mis paigaldatakse puuraukude sisse. U-maasoojuskollektori plasttoru peab vastama standardile EN12201 ning omama vastavat sertifikaati. Kollektortoru nõuded on järgmised [26]:

- Läbimõõt 50mm
- PN10
- SDR-17
- Materjal PE100

Kollektortorud peavad olema komplekteeritud ning ühendatud keevisliitmike teel valmistajatehases. Lisaks peab olema neile lisatud uputusraskus, mille kaal vastab U-kontuuri uputussügavusele puuraugus. U-kontuuriga paigaldatakse puurauku ka valguskaabel. [26]

### **5.1.2 Tiskre**

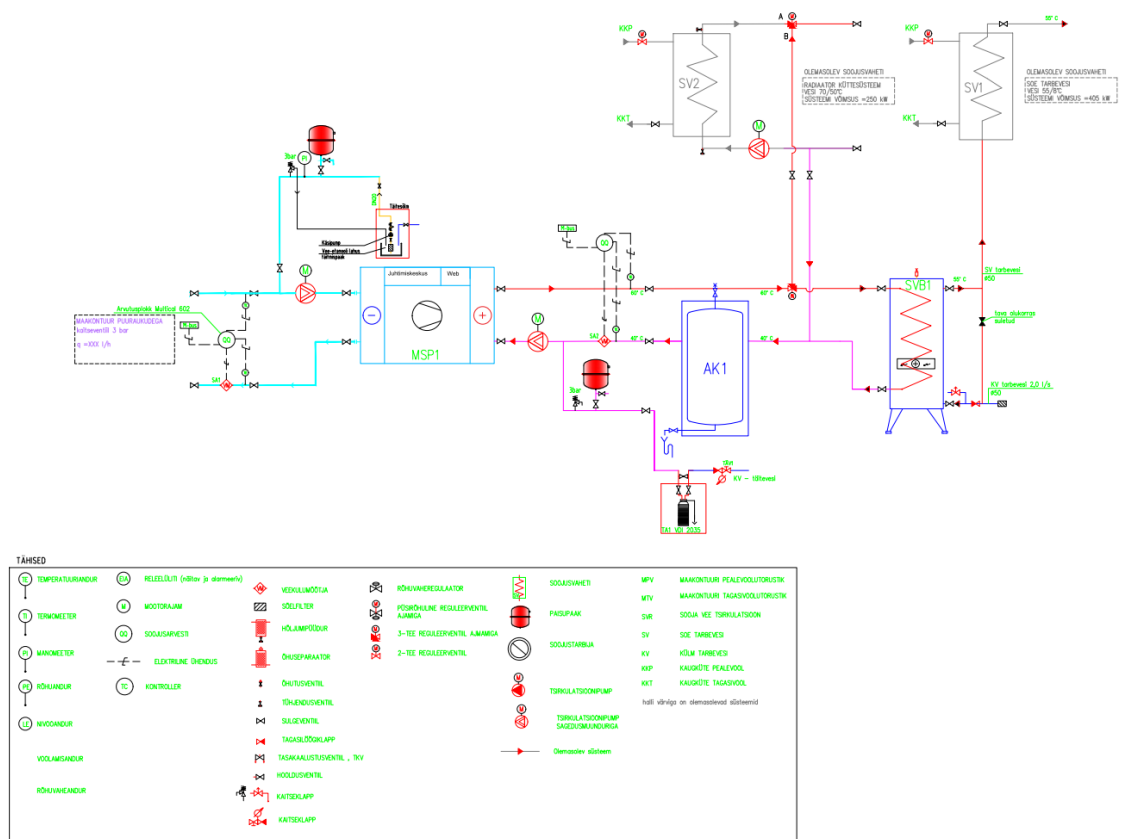
Antud pilootprojekti raames soovitakse projekteerida, soetada ja paigaldada kasutusvalmis maakütte põhjal töötav soojuspumba ja maaküttekollektori torustiku süsteem ning siduda süsteem olemasoleva korterelamuga. Korterelamu asub Tallinna linnas Haabersti linnaosas Taludevahe tänav 116. [26]



MÄRKUSED:  
1. Asendiplaani aluseks on kasutatud OÜ Amadee ANM poolt teostatud mõõdistusdöörid NRT-046-22 (2022).

Joonis 17 Taludevahe 116 projekteeritud geotermaalorustiku asendiplaan. [26]

Projekt koosneb tehnilisest kirjeldusest, geotermaalorustiku asendiplaanist, soojuspumba ühendusskeemist koos soojussõlmega, antud korterelamu tarbimisandmetest ning olemasoleva soojussõlme tehnilistest andmetest.



Joonis 18 Soojuspumba ühendusskeem koos soojussõlmega [26]

Pilootprojekti eesmärgiks on kavas rajada kinnine soojussüsteem, mis hõlmab U-soojuskollektoreid Taludevahe 116 kortermaja küttevajaduse rahuldamiseks kasutades süsinikneutraalset küttelehendust. [26]

Projekt hõlmab nii ehitustööde teostamist, vajalike tööprojektide koostamist, maa-aluse magistraalitoru rajamist, puuraugu rajamist ning ka soojuspumba soetamist. Projekteerimise etapis tuleb arvestada kehtivate õigusaktidega ning standarditega, lisaks peavad soojuspumbad vastama sertifikaatidele. [26]

Taludevahe 116 projekti tehniline kirjeldus näeb ette samuti soojuspumba tehnilisi andmeid, mis sarnanevad suures osas Roosna-Alliku tehniliste tingimustega, küll aga on hinnanguline ammutav energia hulk puuraukudest vooluhulgal 3200l/h 16kW, see täpsustatakse puuraukude rajamise ja uuringu käigus. [26]

Projekti mahtu kuulub maa-aluse torustiku ehitus rajatavast puuraugust soojuspumbani, vastavalt antud töös joonis 17-le. Samuti nähakse ette pinnase tasandustöid peale maaküttetorustiku paigaldust. Kortereelamu soojussõlme ruumidesse on ette nähtud soojuspumba paigaldus. Lisaks elektritööd ning vajalike kaabelduste ja ühenduste teostus. Soojuspump tuleb integreerida kortereelamu soojussõlmega ning vajadusel ka uuendada olemasolev soojussõlm. [26]

Paigaldada on vaja ka U-torud puuraukudesse. Plasttoru peab vastama varasemalt mainitud standardile EN12201 ning vastama nõuetele: läbimõõt – 50mm, PN10, SDR-17, materjal PE100. Plasttorud peavad olema komplekteeritud ning ühendatud keevisliitmike teel valmistajatehases. Sarnaselt Roosna-Alliku projektiga on ka siin nähtud ette valguskaabli paigaldus puurauku koos U-kontuuriga. [26]

Plaanis on rajada 505m sügavune puurauk ning kasutusele võtta 100kW maasoojuspump. Tänapäevaks on projekti ehitustöödega algust tehtud. [30]



Joonis 19 Taludevahe 116 katsejaama ehitustööd. [26]

### 5.1.3 Narva

Eesti Energia AS ning Geothermal Baltic OÜ koostöös on alustanud Geothermal Baltic Narvas geotermilise katsepuuraugu ehitust. Geothermal Baltic on Eavor Technologies Inc. Tehnoloogia arendaja ning esindaja. Eavor Technologies Inc. on omakorda Kanadast pärit rahvusvaheline ettevõtte. [31]

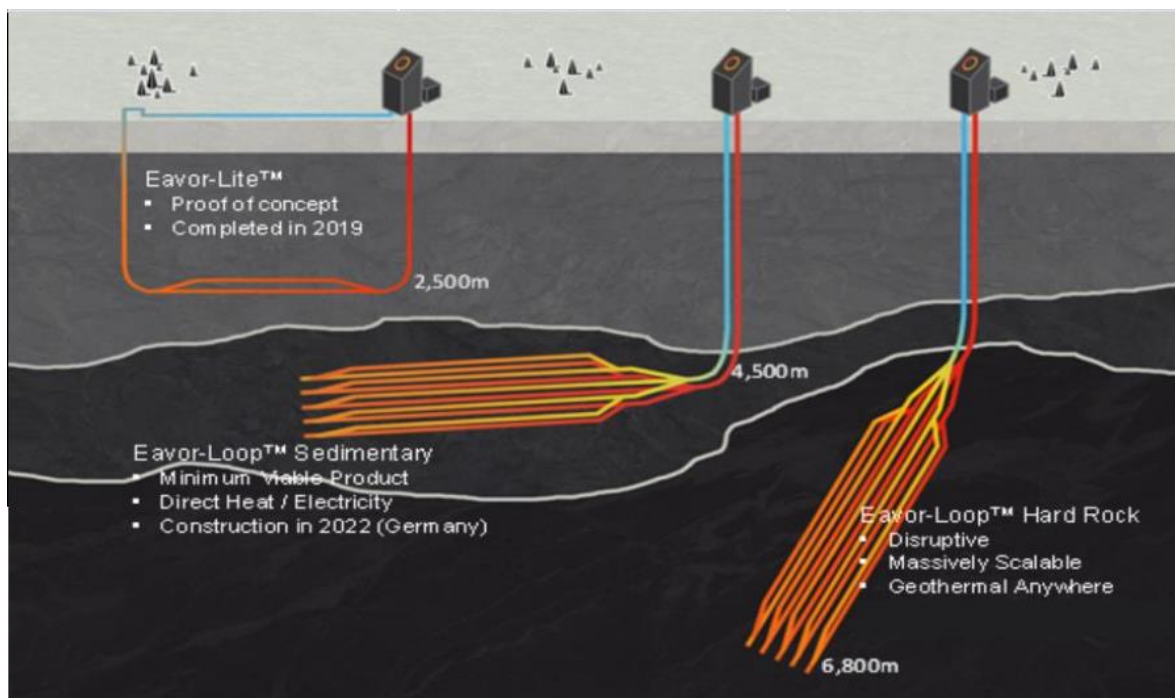
Eesti Energia juhatuse liikme Margus Valsi sõnul asub Narvas Eesti suuruselt teine kaugküttevõrk, mis varustab soojusega ligi 60 000 elanikuga piirkonda. Soojust toodetakse hetkel Narvas Enefit Power koostootmisjaamas Eesti soodsaima hinnaga 39,83€/megavatt-tund. [27]

Eavor-Loop toodab energiat sügavalt maapõuest pärit soojusest, mida saab kasutada ärilistel soojusrakendustel (nt kasvuhooned või linna küttevõrgud) või ka elektrienergia tootmiseks soojusmootorite abil. Tehnoloogia leevendab probleeme, mis on seotud traditsiooniliste geotermiliste süsteemidega, mis sõltuvad kaevudest, et toota vett maa-alusest veekihist. [32]

Eavor-Loop tehnoloogia on patenteeritud suletud ringist koosnev geotermiline tehnoloogia. Suletud süsteem sisaldab töövedelikku, mida hoitakse ringluses. Töövedelik ei ole pärit mahutist, voolates kaevudesse, vaid tegemist on vedelikuga, mis lisatakse suletud ringi, et luua nõ tõhus radiaator, paralleele võib tuua sõidukites olevate

radiaatoritega, kus sarnaselt tsirkuleeritakse vedelikku suletud ringis, et eemaldada soojust bensiinimootorist. [32]

Töövedelik liigub loomulikult ringi, ilma et oleks vaja välist pumbasüsteemi, tänu termosüfooniefektile, kus kuum vedelik tõuseb väljundkaevus ja jahe vedelik langeb sissevõtu kaevus. Suletud ringsüsteemis sisalduv töövedelik toob soojusenergia pinnale, kus seda saab kasutada otsekuumutamisel või muundada elektriks. Erinevalt soojuspumpadest, mis muudavad elektri soojuseks väga madalate kaevude abil, toodav Eavor-Loop tööstuslikus mahus elektrit või genereerib ühe paigaldusega piisavalt soojust 16 000 kodu jaoks. [32]



Joonis 20 Eavor tehnoloogiad. [33]

Narvas on plaanis võtta kasutusele uuenduslik Eavor-Loop tehnoloogia. Eavor tehnoloogia puhul on tegemist varasemalt mainitud suletud süsteemiga, see tähendab et töövedelik ringleb isoleeritult. Süsteem ei vaja põhjavega ega pumpa, töövedelik tsirkuleerib vabakonvektsiooni tõttu ise. Ehitamise aeg on umbes 2 aastat, lisaks ei vaja süsteem hooldust ning soojuse tootmisvõimsuse saavutamine on väikese riskiga. Tegemist on ka juhitava ja stabiilse tehnoloogiaga. Juhitavat võimsust on võimalik kasutada salvestina ja tipukoormuste katmisel. Samuti aitab süsteem stabiliseerida kaugkütte võrgu tööd ning vähendada kütuse kulu tipukoormustel. Narvas planeeritava Eavor-Loop sügavus on ca 5 – 6 km ning soojuslik võimsus 16MW. [33]

## **6. Geotermaalenergia konkurentsivõime võrreldes maasoojuspumbaga**

Geotermaalne energia konkureerib ka maasoojuspumbaga. Konkurentsivõimet mõjutavad mitmed tegurid sealjuures tõhusus, kulu ja piirkondlikud eripärad. Võrrelda on võimalik geotermaalenergia ja maasoojuspumba süsteemide soojuspumba soojustegurit ehk kasutegurit (COP). Lisaks saab võrrelda investeermiskulusid ning tasuvust. Investeermiskulude all on silmas peetud puurimiskulusid, seadmete maksumust ning paigalduskulusid, tasuvuse all tuleb hinnata süsteemide pikaajalist tasuvust võttes sealjuures arvesse energiasäästu ning hoolduskulusid. Samuti on võimalik tuua välja ka piirkondlikud erinevused ehk teisisõnu tuleb arvestada ka piirkondlike eripärasustega nagu geoloogiline ehitus ning maasoojuse kättesaadavus kuna need tegurid võivad mõjutada süsteemide sobivust ning tõhusust konkreetses piirkonnades.

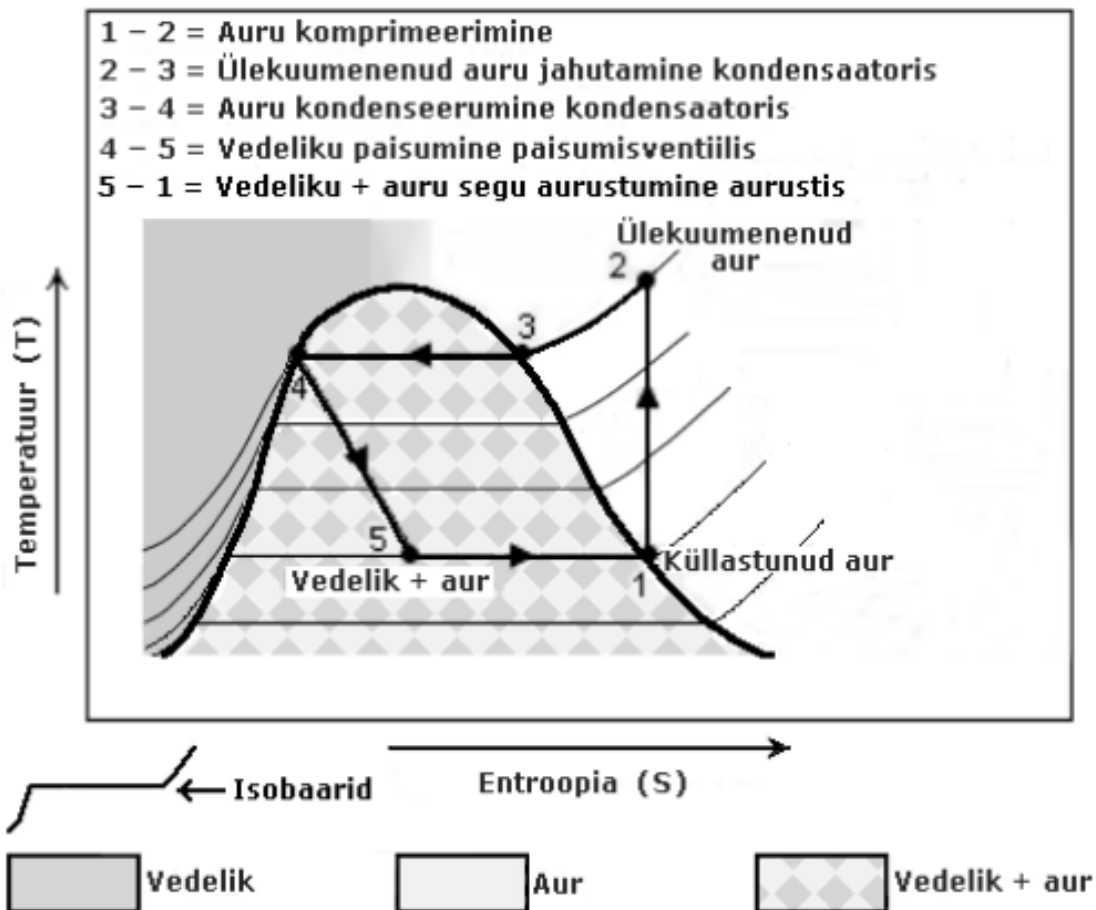
### **6.1 Soojuspumba tööpõhimõte ja valik**

Selleks et kasutada madala temperatuurilist maasoojust on vaja temperatuuri tõsta, mille jaoks võetakse kasutusele soojuspump. Termodünaamilises vaates töötab soojuspump jahutusprotsessina, kus soojus kantakse üle soojusallika ja soojusvaheti vahel Carnot' protsessi kohaselt. [34]

Soojuspump koosneb neljast põhiosast, milleks on aurusti, kondensaator, kompressor ja paisventiil. Aurustis hoitakse külmutusagensi temperatuur madalamal kui seda on soojusallika temperatuur, mis omakorda tagab soojuse ülekande soojusallikalt külmutusagensile. Külmutusagens aurustub ning liigub edasi kompressorisse, kus külmutusagensi kokkkusurumise teel tõstetakse temperatuuri ja rõhku. Külmutusagens kondenseerub soojuspumba kondensaatoris ning seal vabanev soojus liigub küttesüsteemi. Kondensaadil lastakse paisventiilis paisuda, mõttega et kondensaat jahtuks madalatemperatuurilise soojusallika temperatuurini. Kompressorit käitab soojuspumbas enamasti elektri-, ning vahel ka sisepõlemismootor. Juhul kui käitajaks on sisepõlemismootor, on võimalik lisaks külmutusagensi kondenseerumissoojusele kasutada ära ka mootori jahutusvedeliku ja lahkvate põlemisgaaside soojust. [35]

Juhul kui soojuspumba tüüp on valitud, on vaja otsustada kas on/off või inverter süsteemi kasuks. On-off süsteemiga maasoojuspump lülitab ennast sisse-välja vastavalt

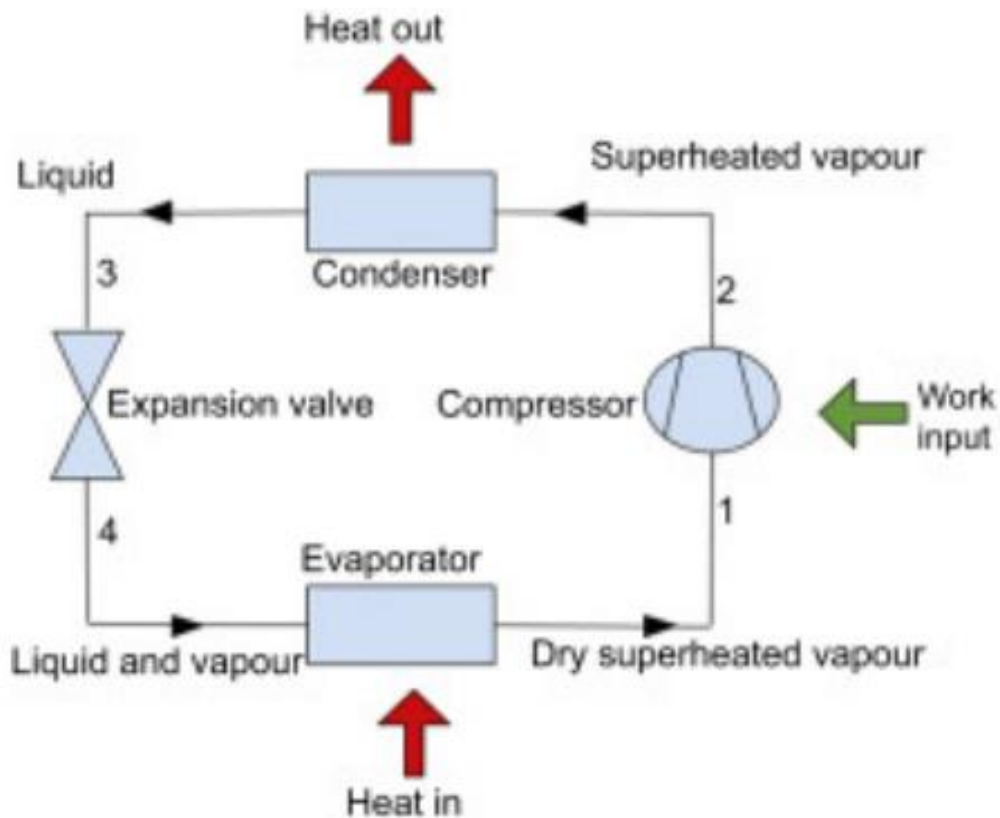
küttevajadusele. Inverter süsteemiga maasoojuspump reguleerib ennast automaatselt ning võrreldes on-off süsteemiga on kulukam, seda just esmainvesteeringus mõistes. Soojuspump, millel on inverter süsteem annab aga aastas suurema kütte kasuteguri. Eestis paigaldatakse enamasti soojuspumpasid, mis kasutab inverter tehnoloogiat. [36]



Joonis 21 Soojuspumba teoreetiline ringprotsess TS-diagrammil [35]

Komponendid on ühendatud torustiku abil suletud süsteemiks. Pump koosneb kahest ahelast: külmaaine ja soojuse eraldamise ahel, nendest viimane on ühendatud soojusallikaga. Geotermiliste süsteemide puhul kasutatakse veepõhiseid või vedelikul põhinevaid süsteeme. Soojuspump moodustab auru kokkusurumise tsükli, kus külmast ahelast pärit soojus uuendatakse külmaainetsüklis kvaliteetseks soojuseks. Soojuspumba kasulikkust määrab soojuspumba soojustegur ehk COP. [34], [37]





Joonis 22 Soojuspumba tööpõhimõte [34]

Soojuspumba soojustegur COP väljendab soojuspumba poolt toodetud energia ja tootmiseks kulutatud elektrienergia suhet. Näiteks COP=4 tähendab, et soojuspump tarvitab 4kWh soojuse tootmiseks 1kWh elektrienergiat. [15]

$$COP = \frac{\text{Toodetud soojusenergia (kWh)}}{\text{Kulutatud elektrienergia, sh ventilaatorid, pumbad ja juhtautomaatika (kWh)}} \quad (1)$$

Soojustegur on muutuv suurus ning sõltub oluliselt sisend- (maakontuur/põhjavesi) ja väljundtemperatuurist (põrandaküte, radiaator, tarbevesi). Seepärast tuleb erinevate

soojuspumpade võrdlemisel pöörata tähelepanu asjaolule, et toodud COP väärtused oleksid antud sama režiimi juures. [38]

Soojuspumpade aasta keskmised soojustegurid on välja toodud tabelis 4 ning seda vastavalt soojuspumba tüübi ja küttegaafikule. [39]

Tabel 4 Soojuspumpade aasta keskmine soojustegur [39]

Küttegaafik	Maasoojuspump, on/off	Maasoojuspump, inverter	Õhk-vesi soojuspump	Õhk-õhk soojuspump	Väljatõmbeõhu soojuspump
–				3,0	3,0
30/25	4,5	4,8	3,1		
35/28	4,3	4,7	3,0		
40/33	4,0	4,4	2,9		
45/35	3,8	4,3	2,9		
50/35	3,6	4,2	2,8		
55/40	3,4	4,0	2,7		
60/40	3,3	3,9	2,7		
Soe tarbevesi	2,6	2,7	2,0		

Lisaks COP-ile on võimalik arvutada ka soojuspumba SCOP-i. SCOP-i puhul on tegemist hooajalise soojusteguriga. Vastavalt standardile EVS-EN 14825:2022 on hooajalise soojusteguri SCOP arvutusvalem [40]:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad (2)$$

$Q_H$  – aastane küttevajadus (kWh)

$Q_{HE}$  – aastane energiakulu kütteks (kWh)

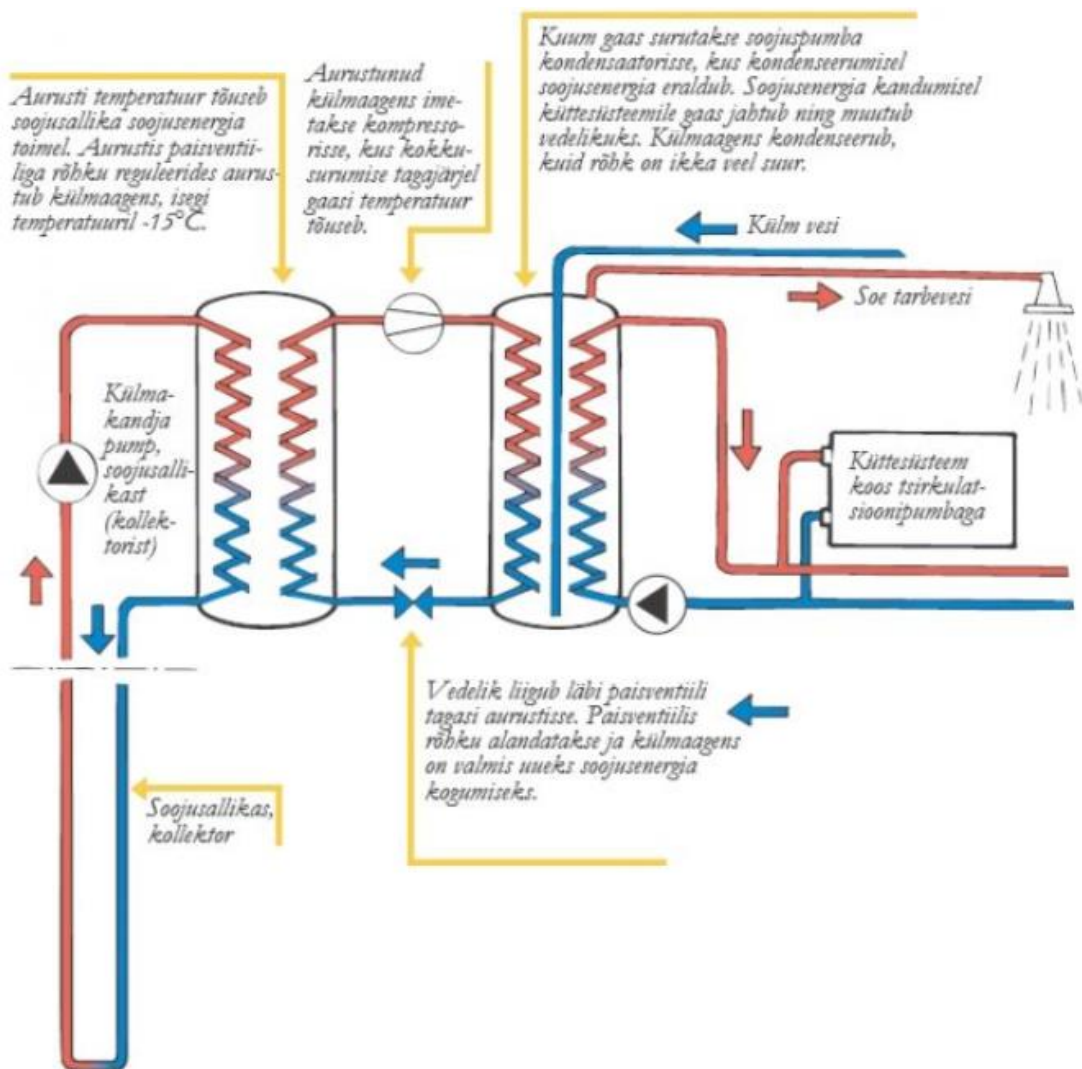
Teoreetiliselt on võimalik soojuspumba protsessi kirjeldada ka Carnot' ringprotsessi kontseptsiooniga, mis nõuab kahe erineva temperatuuriga keha olemasolu süsteemis. Võimalik on arvutada kasutegurit, võttes arvesse ainult jahuti ning soojendi temperatuure. Carnot' teoreem väidab, et Carnot' ringprotsessi termiline kasutegur sõltub ainult soojusallika temperatuurist  $T_1$  ning jahutaja temperatuurist  $T_2$  ega olene

sealjuures töötava keha omadustest. Carnot' ringprotsessi termiline kasutegur on arvutatav valemiga [41]:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3)$$

kus  $T_2$  ning  $T_1$  on soojusallika ning jahutaja absoluutsed temperatuurid.

Ehk teoreetiline kasutegur sõltub ainult temperatuuridest. Järelikult ei ole võimalik temperatuuride korral konstruktsiooniliste meetoditega kasutegurit suurendada. Kasuteguri parandamiseks on vaid kaks võimalust, kas tõsta soojusallika temperatuuri või alandada jahutaja oma. Soojusallika tõstmise puhul seab piiri materjalide vastupidavus ning jahutaja alandamisel töökeskkonna temperatuur. [42]



Joonis 23 Soojuspumba tööpõhimõtte maasoojuspumba näitel [37]

Hinnanguliselt võib arvestada et maasoojus paari meetri sügavusel on ligikaudu 5°C. Kui vaadata Eestis hetkel teostatavaid pilootprojekte, kus puurimissügavus on 500m sügavusel, on võimalik saada sealt soojust umbes 15°C. Ehk temperatuuride vahe on 10°C.

Maapõueenergia kasutuselevõtu uuringus on ka mainitud, et maapõueenergia süsteemid on üle kahe korra tõhusamad kui seda on tavapärased õhksoojuspumbad ning aastaringne kasutegur (SCOP) on tavalisel maakontuuriga soojuspumbal 2-3, aga 600-700m energiapuuraugu puhul juba 3-4. [24]

## 6.2 Investeeringud

Ühe suurima kuluna saab maapõueenergia süsteemide rajamise puhul välja tuua soojuspuuraugu puurimishinna. Puurimise maksumuse kohta Eestis on soovi korral võimalik küsida hinnapakumist puurimissettevõtelt. Kuna puurimine sõltub erinevatest tingimustest ja parameetritest, suudab täpse hinna selgitada välja vastav ekspert ehk puurimissettevõtte. Puurimise hinna määrajaks võivad olla asukoht, puurkaevu sügavus, asukohast tingitud geoloogiline ehitus jne.

Soomes on viidud läbi uuring kahes erineva geoloogiaga piirkonnas Espoos ja Muhos. Mõlema vaadeldava asukoha puhul on tegemist sügavate soojuspuuraukudega, kuni 5km. Uuringus on koostatud ka majanduslikud arvutused, mis annavad aimduse sügava geotermaalsüsteemi kallidusest. [43]

Arvutused näitavad ka selgesti, et suurim osa maksumusest kulub soojuspuuraugu puurimisele.

Toonane majanduslik võrldus oli tehtud vastavalt 2019. aastal olevatele ühikuhindadele ja seda nii energiatootmises kui ka geotermiliste investeeringute osas. Küll aga on autor maininud, et võib eeldada fossiilkütuste hindade tõusu tulevikus ning seega suureneb ka taastuenergia tootmise majanduslik tähtsus. Samamoodi võib ka eeldada, et sügavate puuraukude puurimise kogemus suurendab puurimise tõhusust ning vähendab sealjuures puurimise kulusid. [43]

Tabel 5 Majanduslikud arvutused Soome näitel [43] Autori poolt kohandatud

Kulud	Espoo	Muhos
<b>1.0 Investeeringud</b>	<b>49 800 000 €</b>	<b>49 800 000 €</b>
Puurimine	48 000 000 €	48 000 000 €
Jaama ehitus	1 800 000 €	1 800 000 €
<b>2.0 Tegevuskulud / aastas</b>	<b>250 000 €</b>	<b>250 000 €</b>
<b>3.0 Investeeringu intress / aastas</b>	<b>996 000 €</b>	<b>996 000 €</b>
<b>Kulud kokku</b>	<b>51 046 000 €</b>	<b>51 046 000 €</b>
<b>Kokkuhoid / aastas</b>	<b>Espoo</b>	<b>Muhos</b>
<b>1.0 Kaugkütte hinnad</b>	<b>3 656 221 €</b>	<b>4 878 070 €</b>
<b>Tagasimakse periood</b>	<b>Espoo</b>	<b>Muhos</b>
Kulud	51 046 000 €	51 046 000 €
Kokkuhoid	3 656 221 €	4 878 070 €
<b>Tagasimakse periood aastates</b>	<b>14</b>	<b>10,5</b>

Eestisse kavandatavad puuraugud ei ole küll nii sügavad, kuid sellegi poolest annab eelnev Soome näide indikatsiooni võimalikust puurimishinnast meetri kohta.

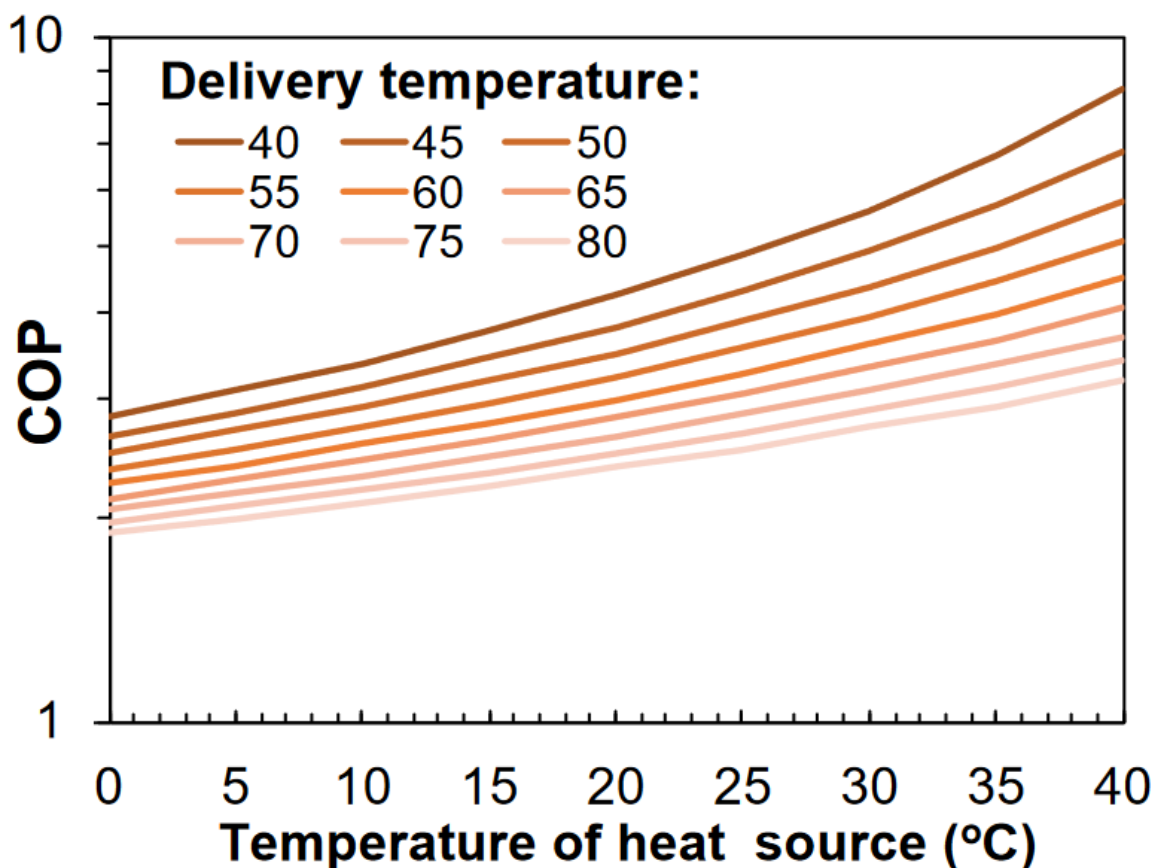
Näitena saab tuua, et kinnise süsteemi soojuspuuraugu rajamise hind Eestis on 40-60€ jooksva meetri kohta. Reeglina tuleb 10kW soojuskoormuse katmiseks puurida ca 150-200 meetri sügavusele, horisontaalset kollektorit on vaja paigaldada ca 500m. Keskmise maakollektori paigaldamise hind on 3,6€/meeter. Seega 150meetrise puuraugu rajamine läheb maksma umbes 6000€ aga maakollektori paigaldamine 1850€. [44]

Samuti peab arvestama investeeringute all ka asukohta ja sellele vastavaid uuringuid. Varasemalt korduvalt mainitud põhjalikud uuringud, mis tuleb iga projekti puhul läbi viia on vajalikud, et selgitada välja kas antud piirkonnas on maasoojuse potentsiaali. Seega on vajalikud ka geoloogilised uuringud, mis on taaskord kulu.

Hoolduse poole pealt peetakse maasoojussüsteeme pikaajalisteks ning vähese hooldusnõudlusega süsteemideks. Põhjuseks on väheste liikuvustega osad ning need vähesed osad, mis liiguvad on varjualustes tingimustes. Rootsis on hinnatud puuraukude tehnilise seisundi garanteeritud elueaks vähemalt 30-50 aastat ning sealjuures soojuspumpade elueaks 15-20 aastat. Rootsi praktikas on see ka kinnitust leidnud, kus tänaseks juba mitukümmend aastat toimunud küttesüsteeme renoveeritakse ning vahetatakse välja soojuspumpasid tõhusamate mudelite vastu. Puuraukudes olevaid kontuure sealjuures ei vahetata. [38]

## 6.3 Järeldused

Sügavamalt saadava maasoojuse temperatuur on kõrgem ning sellel tundub olevat teatud eelis. Nimelt mida madalam on algtemperatuur võrreldes temperatuuriga, mis on vaja saavutada – seda rohkem peab soojuspump tööd tegema, kulub rohkem elektrit ning COP on madalam. Väidet kinnitab ka joonisel 24 toodud graafik, kus on selgelt näha trend - et saavutada vajalik lõpptemperatuur, on pumba soojustegur COP seda kõrgem, mida kõrgem on soojusallika algtemperatuur.



Joonis 24 Näide soojuspumba soojustegurist (COP) erinevate soojusallika ja saavutatava temperatuuri korral [34]

Selleks et arvutada COP-i peavad olema antud teatud parameetrid. Nii toodetud soojusenergia kui ka kulutatud elektrienergia. Antud töös on keeruline teha arvutusi ning võrrelda maapõueenergia pumba ning maasoojuspumpa, põhjusel et puuduvad konkreetsed andmed ning lisaks mõjutavad süsteeme erinevad faktorid nagu näiteks süsteemi komponendid, konkreetne valitud pump ning samuti ka maja või hoone, kus soojuspumpa rakendatakse.

Küll aga on teada pilootprojektide puhul minimaalne COP temperatuuridel 0/60°C ning see on 3,5 ning see omakorda on sätestatud standardis EVS-EN14511. Arvestama peab aga asjaoluga, et reaalsuses on COP-id alati väiksemad võrreldes teoreetiliselt saadud COP-iga.

Süsteemipaigaldusel tuleb ka arvestada, et mida sügavamale süsteem paigaldatakse seda stabiilsem keskkond on. Ehk kui liikuda maapõues sügavamale, pilootprojektide puhul 500 meetri sügavusele näiteks, on seal stabiilsem keskkond võrreldes paari meetri sügavuse maakollektoriga.

Sügavale maapõue puurimisel on aga oma hind. Nimelt tuleb välja, et kõige kulukam komponent geotermiaalenergia puhul on just puurimishind, mis Soome näite kohaselt moodustab lausa 96% kogu projekti kuludest. Puurimise puhul tuleb arvesse võtta ka asukohta. Näiteks võib Lõuna-Eestis puurimine osutuda veel kallimaks kui Põhja-Eestis puurimine ning seda seetõttu, et puurimiseks vajalikud seadmed on vaja transportida ühest Eesti otsast teise. Samuti on reaalne variant, kus seadmeid on vaja rentida näiteks naaberriikidelt ning ka see kajastub hiljem töö lõpphinnas. Täna on Eestis kaks puurmasinat näiteks ettevõttel Steiger Inseneribüroo, kes on ka pilootprojektides puurimise eestvedaja. [45]

Antud pilootprojektide raames on hetkel vara teha veel majanduslikke arvutusi, kuna kõikide kulude andmeid ei ole esitatud ning ilmselt lisandub veel kulusid paari aasta jooksul. Kuid siiski saab juba praegu eeldada, et suurim kulu saab olema puurimiskulu. Samuti saab hinnata kas süsteem on majanduslikult mõistlik alles paari aasta pärast peale käitamist, et saada aimdust tegelikest parameetritest ning kasust või kahjust, mida süsteem tekitab.

Paljudes uurimustes selgub, et majanduslikud tegurid räägivad soojussüsteemide pikaajalise kasutamise poolt. Nimelt on puuraukude ning -kaevude rajamine suhteliselt kulukas ent hilisem kasutamine on vähemalt 3 korda odavam kui näiteks gaasi-, elektri- või õliküte. [38]

Samas on võimalik eeldada, et puurimistööde läbiviimine erinevate sügavustega puuraukude puurimisel tekitab kompetentsi ning paraneb ka puurimistõhusus, mille tõttu väheneb tulevikus ka puurimiskulu.

Võrreldes teiste süsteemidega on maasoojussüsteemid vähese hooldusvajadusega. Tööiga on hinnatud võrdlemisi pikaks ning võrreldes teiste süsteemidega ei lisandu maasoojussüsteemidele ka jooksvaid kulusid hiljem näiteks nagu kütuse ostmiskulu.

Tulevikus sõltub maasoojussüsteemide rajamine suuresti fossiilkütuste hinnast. Kuna Euroopa Liit ning sealhulgas kaasaarvatud Eesti on liikumas taastuenergiaallikate kasutamise suunas, vähendamaks sõltuvust fossiilkütustest, on võimalus et geotermiaalenergia on üks variantidest, mida tulevikus tihedamini kasutusele võetakse. Kasutuselevõtt võib suureneada tänu madalatele käituskuludele, vähesele hooldusvajadusele ning lisaks võimalusel, kus ka tarbija võidab küttehinnas. Ka tänane suurim kulu, milleks on puurimishind võib tehnoloogia arengu ning taastuenergiaallikate suureneva kasutuselevõtu tõttu langeda.

Ehk geotermiaalsete kaugküttesüsteemide peamised kulud tekivad algsetest investeeringutest, seda just puuraukude puurimisel, torustike rajamisel, jäglimis- ja juhtimisseadmete paigaldamisel. Käituskulud süsteemil on aga palju madalamad võrreldes teiste süsteemidega, hõlmates endas süsteemi hoolduskulusid, käitamist ning juhtimist. [46]

Uurimisel selgus, et geotermilistele lahendustele leidub rahastust, kuid seda on raske saada kuna tegemist peab olema väga läbimõeldud projektiga, mida soovitakse rahastada. Lisaks tähendab geotermiaalenergia rajamine suuri algkulusid ning seetõttu on ettevõtted nõus pigem finantseerima ettevõtmisi, millel on madalamad algkulud ehk mida on odavam ehitada, kuid mis võivad olla käitamisel kallid just kütusekulu tõttu. [47]

Hetkel tundub mõistlikum kasutada maasoojuspumpa ning just horisontaalset maakollektorit eramu tarbeks, seda seetõttu et süsteem on majandusliku poole pealt otstarbekam ning samas on ka tarbija küttekulude hind endiselt soodne. Väidet kinnitab ka aastal 2022 ilmunud artikkel, kus mainitakse, et horisontaalsete maakollektorite osakaal Eestis on tunduvalt suurem võrreldes vertikaalsete maasoojussüsteemidega ning seda just põhjusel, et viimane neist on tunduvalt kallim paigalduskulude tõttu. [48]

Teisalt on horisontaalsel maakollektoril ka miinuseid, nimelt peab olema arvestatava alaga maapind, kuhu kollektor paigaldada. Lisaks on nõuded kõrghaljastusele ning vahel peab sellest ka loobuma või tellima ümberistutuse, mis on samuti üsna kulukas protsess. [49]

Seega on ruumi mõttes mõistlikum puurida vertikaalselt maa alla ning ammutada sealt soojust, kui luua horisontaalselt kulgevaid kollektoreid. Vertikaalse puurkaevu kasuks on ka fakt, et neid on võimalus rajada ka tiheasustusega aladele.

Omamoodi rolli mängib ka tarbijate arv. Kui maakollektor paigaldatakse nõ üksikelamu tarbeks siis geotermiaali puhul nagu seda on Roosna-Alliku ning Taludevahe on



tegelikkuses mitmeid tarbijaid. Taludevahe puhul näiteks võidab süsteemi olemasolust terve kortermaja.

Ehk tulevikus peaks mõtlema ka sellele, et suurendada tarbijate osakaalu ning liita võimalikult palju tarbijaid ning kas see on kasumlikum kui variant, et iga kasutaja ostab endale isiklikuks tarbeks maasoojuspumba ning rajab horisontaalse maakollektori või puuraugu.

Piirkonna mõistes on Eestis potentsiaali maasoojuse kasutamise poolest ning seda paljudes asukohtades. Kasuks tuleb ka tänaste kaardistamisuuringute raames koostatud andmebaasid, mis annavad hea ülevaate ning lihtsustavad tulevikus maasoojusenergia süsteemide rajamist.

Lisaks on Eestil palju õppida Skandinaavia näidetest ning ka need annavad aimduse, milliste süsteemide rajamist võiks jätkata ning millistest võiks loobuda. Samuti on olnud Põhjamaad heaks eeskujuks seadusandluse poole pealt ja Eestil on võimalus arendada ja teha muudatusi vastavalt ka enda seadusandluses, mis puudutavad süsteemide rajamist ja nende nõudeid.

## KOKKUVÕTE

Maapõuesoojus on Eestis perspektiivikas taastuenergiaallikas, mis võimaldab tagada stabiilse ning jätkusuutliku energiavarustuse. Sellel on potentsiaal vähendada meie sõltuvust fossiilset päritolu kütustest, mitmekesistades sealjuures energeetikasektorit.

Eestis on soodsad tingimused geotermaalenergia rakendamiseks. Meie maapinna geoloogilisest ehitusest ning geotermilisest gradiendist tulenevalt on võimalus rajada Eestis uuritud piirkondadesse maapõuesoojussüsteeme, mis omakorda suudavad toota stabiilselt ning jätkusuutlikult energiat. Küll aga tuleb arvestada, et tegemist on asukohaspetsiifilise energiaallikaga ning uuringud on vajalikud iga piirkonna kohta, kuhu soovitakse rajada geotermaalenergiat põhinevaid süsteeme. Samuti nõuab maapõuesoojuse rakendamine märkimisväärsed investeeringud infrastruktuuri väljaarendamiseks.

Maapõueenergia on võimalik liigitada kolmeks. Nendeks on madalalt saadav, kesk-sügavalt saadav ning sügavalt saadav energia. Eestis on hetkel kasutusel ainult madalalt saadava maasoojusenergia süsteemid. Põhjamaades aga on geotermaalenergia väga pika ajaloo energiaallikas. Rootsis on arendatud ning rajatud süsteeme juba mitukümmend aastat ning nende eeskujul on ka teised riigid hakanud järjest enam panustama maapõuesoojussüsteemide loomisesse ning täiustamisesse. Nii Rootsi, Soome kui ka Norra on tänaseks keskendunud aina enam puuraugu sügavusele ning soovivad uurida kõikvõimalikke variante, kuidas maapõuest aina kõrgemal temperatuuril soojust kätte saada.

Skandinaavia puhul võib ehk ka öelda, et tegemist on meie eeskujuga geotermaalenergia kasutuselevõttus. Neil on mitte ainult kogemused selles valdkonnas, vaid ka hästi väljatöötatud seadusandlus, mis omakorda toetab ja juhendab süsteemide rajamisel. Nende kogemuste põhjal on ka Eestile pandud kokku soovitused maasoojuspuuraukude rajamisel.

Eestis on hetkel käsil pilootprojektide realiseerimine. Nimelt on aastast 2021 alguse saanud põhjalik geotermaalenergia potentsiaali uuring, mille eesmärgiks oli uurida kas Eestis on loodud võimalused ammutamiseks maasoojust sügavamalt maa seest, lisaks luua kaks katsejaama ning edendada ka maapõuesoojuse alast teadlikkust ning kompetentsi. Projekt on olnud siiani edukas, läbi on viidud uuringud, mis kinnitavad geotermaalenergia võimalikkust Eestis, samuti on hetkel ehitusfaasis mõlemad katsejaamad, mille lõpptähtajaks on tänaseks 2026. aasta. Antud töös uuriti nii Roosna-Alliku kui Tiskre projekte. Sarnaselt eelnevatele on käivitatud ka Narvas

geotermaalenergia alase projektiga, kus ettevõtte Geothermal Baltic OÜ koostöös Eesti Energia AS-iga on alustanud geotermilise katsepuuraugu ehitusega. Narva puhul soovitakse kasutusele võtta Eavor-Loop tehnoloogia ning plaanis on puurida 5 kuni 6km sügavusele. Ehitamise ajaks on määratud ligikaudu 2 aastat.

Antud töös sai analüüsitud geotermaalenergia konkurentsivõimet maasoojuspumbaga. Nähtavasti on Eestis väga paljudel juhtudel üksikelanutesse paigaldatud maasoojuspump, mis rahuldab kütte- ning sooja tarbevee vajaduse. Kuna Eestis pilootprojektide käigus loodavad Roosna-Alliku ja Tiskre katsejaamad eeldavad samuti endas soojuspumba kasutust, saab ligikaudselt määrata nende eelised ja puudused võrreldes ainult maasoojuspumpa nõudvate lahendustega.

Eelisena saab välja tuua asjaolu, et kuna katsejaamade käigus puuritakse sügavamale, kui seda nõuavad endas maakollektori paigaldamisel rajatud süsteemid, seda stabiilsem on keskkond ning ka maast saadav temperatuur on kõrgem. Ligikaudu on võimalik määrata, et paarimeetri sügavusel on maasoojus 5°C, aga kui puurida sügavamale näiteks 500meetri sügavusele, on võimalik kätte saada juba 15°C, mis on 10°C rohkem. Seega kindlasti peab paika fakt, mida sügavamale minna, seda kõrgem on temperatuur ja stabiilsem keskkond. Töös on toodud välja ka soojuspumba parameetrid. COP-i puhul on keeruline tuua välja tulemused kuna puuduvad andmed, et neid vastavate olukordade puhul arvutada. Küll aga saab väita, et kuna sügavamal maa sees on kõrgem temperatuur, peab pump tegema vähem tööd, et tõsta algtemperatuur vajaliku temperatuurini. See omakorda mõjutab soojuspumba COP-i.

Analüüsitud on ka investeeringuid nii maasoojuspumba kui geotermaalse rajatise kohta. Selgelt saab öelda, et maapõuesoojussüsteemide rajamine on kulukas ning põhiliseks kuluartiklaks on puurimine. Puurimise kalliduse tõttu on täna selge eelis lihtsamatel üksikelanute jaoks mõeldud maasoojuspumbal põhinevatel süsteemidel. Töö järeldestes on toodud ka mitmeid erinevaid võimalusi, mis muudavad puurimise täna nii kulukaks nagu ta on.

Kokkuvõttes võib öelda, et geotermaalenergia tulevik sõltub paljuski fossiilkütuste kallidusest ning samuti tehnoloogia arengust. Juhul kui puurimise hinnad langevad, on ehk võimalus rajada rohkem geotermaaljaamasid. Kuid selleks, et saada maa seest täiendavad 10°C, ei tundu antud hetkel mõistlik juurde rajada Eesti mõistes sügavaid geotermaalrajatise. Aga sellegi poolest on tehtud siiani tänuväärt tööd ning juhul kui tulevikus ei ole tegemist enam majanduslikult nii ressursirohke ettevõtmisega, on tänaseks tehtud uuringutest palju kasu ka tulevikuks. Tegemist on kindlasti hea ja stabiilse taastuvenergiaallikaga, mille kasutuselevõttu toetab ka põhjanaabrite edulugu.

Käesoleva magistritöö järelduste kohasel on geotermaalenergia puhul tegemist perspektiivika taastuenergiaallikaga, kuid selle konkurentsivõime sõltub fossiilkütuste hindadest ja tehnoloogia edasiarendamisest ning hetkel on sügavamate geotermaalrajatiste rajamine majanduslikult keerukas. Siiski on senised uuringud ning pilootprojektid aidanud suurendada teadlikkust ja kompetentsi antud valdkonnas ning need toetavad Eesti püüdlusi jätkusuutliku energiatootmise suunas.

## SUMMARY

Geothermal heat is a promising source of renewable energy in Estonia, which makes it possible to ensure a stable and sustainable energy supply. It has the potential to reduce our dependence on fossil fuels, thereby diversifying the energy sector.

Estonia has favorable conditions for the implementation of geothermal energy. Due to the geological construction of our Earth's surface and the geothermal gradient, it is possible to establish geothermal systems in researched areas in Estonia, which in turn can produce energy consistently and sustainably. However it must be taken into account that this is a location-specific energy source and studies are necessary for each region where systems based on geothermal energy are planned. Also, the implementation of geothermal heat requires significant investments in infrastructure development.

Geothermal energy can be classified into three categories: shallow, moderately deep, and deeply available energy. In Estonia, only shallow geothermal energy systems are currently in use. However, in the Nordic countries, geothermal energy has a long history as an energy source. Sweden, for example, has been developing and implementing systems for several decades, serving as an example for other countries to increasingly invest in the creation and improvement of geothermal systems. Today, Sweden, Finland, and Norway are focusing more on the depth of boreholes and exploring various options to extract heat from the Earth at increasingly higher temperatures.

In the case of Scandinavia, it can also be said that they serve as an example for us in the adoption of geothermal energy. They not only have experience in this field, but also well-developed legislation, which in turn supports and guides the establishment of geothermal systems. Based on their experiences, recommendations for the construction of geothermal boreholes have also been compiled for Estonia.

In Estonia, pilot projects are currently underway. Since the beginning of 2021, a comprehensive study on the potential of geothermal energy has been initiated, aiming to explore whether opportunities exist in Estonia to extract geothermal heat from deeper layers of the earth. The project also involves establishing two test stations, promoting awareness and competence in geothermal energy field, and has been successful so far. Surveys confirming the feasibility of geothermal energy in Estonia have been conducted. Currently, both test stations are under construction, with an expected completion date by 2026. This study investigated the projects in Roosna-Alliku and Tiskre.

Similarly to the previous ones, a geothermal energy project has also been launched in Narva, where the company Geothermal Baltic OÜ, in cooperation with Eesti Energia AS, has initiated the construction of a geothermal test borehole. In Narva, the plan is to implement Eavor-Loop technology and drill to a depth of 5 to 6 km. The construction period is estimated to be approximately 2 years.

In this study, the competitiveness of geothermal energy with ground source heat pumps was analyzed. Apparently, in many cases in Estonia, ground source heat pumps have been installed in individual houses to meet the heating and hot water needs. As the pilot projects in Roosna-Alliku and Tiskre envisage the use of heat pumps, their advantages and disadvantages can be approximately determined compared to solutions that rely solely on ground source heat pumps.

An advantage, one can single out the fact that, as the test stations drill deeper than what is required for systems relying on ground collector installation, the environment becomes more stable, and the temperature from the ground is higher. It can be approximately determined that at a depth of a few meters, the ground temperature is 5°C, but if drilling deeper, for example, to a depth of 500 meters, it's possible to obtain temperatures of 15°C, which is 10°C higher. Therefore, the principle holds that the deeper you go, the higher the temperature and the more stable the environment.

The study also provides heat pump parameters. For COP (Coefficient of Performance), it's challenging to present results as there is a lack of data to calculate them for specific situations. However, it can be argued that since the temperature is higher deeper in the ground, the pump has to do less work to raise the initial temperature to the required level. This, in turn, affects the COP of the heat pump.

Investments in both ground source heat pumps and geothermal facilities have also been analysed. It can be clearly stated that the construction of geothermal systems is expensive, with drilling being the main cost component. Due to the high cost of drilling, simpler ground source heat pump systems designed for single-family houses currently have a clear advantage today. The conclusions of the study also state a number of different options that make drilling today as expensive as it is.

In conclusion, the future of geothermal energy depends a lot on the cost of fossil fuels and technological advancements. If drilling costs decrease, there may be an opportunity to establish more geothermal plants. However, in order to get an additional 10°C from the ground, doesn't seem reasonable at this moment to build additional geothermal

structures in the Estonian context. Nevertheless, valuable work has been done so far, and if in the future this becomes a less economically resource-intensive undertaking, the studies conducted today will prove beneficial. Geothermal energy is certainly a good and stable renewable energy source, and its adoption is supported by the success stories of our northern neighbours.

According to the conclusions of this master's thesis geothermal energy emerges as a promising renewable energy source. However, its competitiveness depends on fossil fuel prices and technological advancements, with the current economic complexity of establishing deep geothermal facilities. Nevertheless, existing research and pilot projects have contributed to raising awareness and competence in this field, supporting Estonia's efforts towards sustainable energy production.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Euroopa Liidu kliimaeesmärgid | Kliimaministeerium“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://kliimaministeerium.ee/euroopa-liidu-kliimaeesmaargid#top>
- [2] „Trends and Projections in Europe 2021 — European Environment Agency“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2021>
- [3] „Euroopa roheline kokkulepe“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/green-deal/>
- [4] „Kava ‘REPowerEU’: energiapoliitika ELi riikide taaste- ja vastupidavuskavades“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/eu-recovery-plan/repowereu/>
- [5] M. Laaniste, „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“.
- [6] „ENMAK 2035 koostamine | Energiatalgud“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://energiatalgud.ee/node/8906?category=1687>
- [7] „GEOENEST | Eesti Geoloogiateenistus“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.egt.ee/uuringud-ja-projektid/maapoueressursid/geoenest>
- [8] „Programmi ‘Energeetika ja maavarade programm 2022-2025’ kinnitamine“. Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, 11. märts 2022.
- [9] geothermal, „Maasoojusenergia“, EGA. Vaadatud: 3. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <http://geothermal.org.ee/>
- [10] „Rohepöördega maa alla“, Eesti geoloog. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://eestigeoloog.ee/kategooriad/uudis/rohepoordega-maa-alla>
- [11] „Eesti alustab maapõueenergia potentsiaali uurimist | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://mkm.ee/uudised/eesti-alustab-maapoueenergia-potentsiaali-uurimist>
- [12] „SED | Geothermal Energy in brief“. Vaadatud: 28. november 2023. [Online]. Available at: <http://www.seismo.ethz.ch/en/knowledge/things-to-know/geothermal-energy-earthquakes/geothermal-energy-in-a-nutshell/index.html>
- [13] „Puurija käsiraamat | DIGAR“. Vaadatud: 28. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.digar.ee/arhiiv/nlib-digar:318211>
- [14] P. A. Nurmi ja P. Oy, „Preliminary evaluation of the Estonian geoneergy potential and overview of available technologies, expert opinion for using those technologies in the Estonian geological conditions, suggestions for possible further actions and examples of case studies.“.
- [15] „4. Soojuse tootmine kaugkütte jaoks – Jätkusuutlik kaugküte“. Vaadatud: 30. detsember 2023. [Online]. Available at: [https://kaugkute.taltech.ee/soojuse-tootmine/?fbclid=IwAR0PTUno111HN4iXrsGXL5YPrb86CvfpGogu2WL\\_ptixICGSFA7BC69zpY](https://kaugkute.taltech.ee/soojuse-tootmine/?fbclid=IwAR0PTUno111HN4iXrsGXL5YPrb86CvfpGogu2WL_ptixICGSFA7BC69zpY)
- [16] „REHVA Journal Geothermal energy use in the Nordic countries“, REHVA. Vaadatud: 1. september 2023. [Online]. Available at: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/geothermal-energy-use-in-the-nordic-countries>
- [17] „Cavern Thermal Energy Storage“, Vantaan Energia. Vaadatud: 5. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.vantaanenergia.fi/en/front-page/carbon-negativity-2030/heatstorage/>
- [18] „Geotermaalenergia – kas võimalik ka Eestis?“, Roheportaal. Vaadatud: 20. november 2023. [Online]. Available at: <https://roheportaal.delfi.ee/artikkel/120234120/geotermaalenergia-kas-voimalik-ka-eestis>
- [19] I. Kukkonen *et al.*, *St1 Deep Heat Project: Geothermal energy from 5-6 km in the continental crust*. 2022.
- [20] S. Gehlin, O. Andersson, ja J.-E. Rosberg, „Country Update for Sweden 2020“.



- [21] K. Kvalsvik, K. Midttømme, ja R. Ramstad, „Geothermal Energy Use, Country Update for Norway”, juuni 2019.
- [22] H. Bauert, „Põhjamaade maasoojusenergia alane seadusandlus ja praktilised kogemused”. Eesti Geoloogiateenistus, 2022.
- [23] A. Jõelet ja R. Paat, „Maasoojussüsteemide rajamisega seotud seadusandlik regulatsioon ja selle muutmise vajadus”. 2021.
- [24] A. Auväart, „Maapõueenergia kasutuselevõtu uuring”,
- [25] „Maapõuesoojus”. Vaadatud: 6. november 2023. [Online]. Available at: <https://gis.egt.ee/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=70d17ffc9b61413d83a890bb54678111>
- [26] „HeatConsult OÜ asutusesisesed materjalid”. 3. oktoober 2023.
- [27] E. N. | ERR, „Eesti Energia, Geothermal Baltic pilot heat production capacity in Narva”, ERR. Vaadatud: 6. november 2023. [Online]. Available at: <https://news.err.ee/1608885818/eesti-energia-geothermal-baltic-pilot-heat-production-capacity-in-narva>
- [28] R.-A. Vallavolikogu, „Roosna-Alliku aleviku soojusmajanduse arengukava aastateks”.
- [29] „Roosna-Allikul hakkab soojus tulema 500 meetri sügavuselt | Eesti Geoloogiateenistus”. Vaadatud: 6. november 2023. [Online]. Available at: <https://egt.ee/uudised/roosna-allikul-hakkab-soojus-tulema-500-meetri-sugavuselt>
- [30] A. Auväart, „Geotermaalenergia rakenduste majandusliku mõju hindamine Põhja-Eestis ning esimeste geotermaalenergia pilootjaamade ehitamine (GEOENEST)”,
- [31] „Eesti Energia ja Geothermal Baltic alustavad pilootprojekti geotermaalenergiast soojuse tootmiseks Ida-Virumaa”. Vaadatud: 13. november 2023. [Online]. Available at: <https://www.energia.ee/uudised/avaleht>
- [32] „Technology - Eavor - Closed-loop Geothermal, Unlike Any Other”, Eavor. Vaadatud: 30. november 2023. [Online]. Available at: <https://www.eavor.com/technology/>
- [33] A. Veske, „Geotermaalenergia potentsiaal kaugküttevõrkudes”, 2. september 2023.
- [34] A. Lund, T. Karvinen, ja M. Lehtonen, „Analysis of deep-heat energy wells for heat pump systems”, *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands: IEEE, okt 2020, lk 574–578. doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248748.
- [35] „TTÜ.\_Mehaanikateaduskond.\_Soojuspumbad.pdf”. Vaadatud: 30. detsember 2023. [Online]. Available at: [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/5/59/TT%C3%9C.\\_Mehaanikateaduskond.\\_Soojuspumbad.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/5/59/TT%C3%9C._Mehaanikateaduskond._Soojuspumbad.pdf)
- [36] „Soojuspumbad”, Elektrihind.ee – elektripakettide võrdlusportaal. Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://elektrihind.ee/soojuspumbad/>
- [37] www.elitec.ee, „Soojuspumba tööpõhimõte |”. Vaadatud: 30. detsember 2023. [Online]. Available at: <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote>
- [38] A. Jõelet, M. Gaškov, ja M. Polikarpus, „Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes”, 2012.
- [39] „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika–Riigi Teataja”. Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/109062015021?leiaKehtiv>
- [40] „EVS-EN 14825:2022”, EVS. Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/evs-en-14825-2022>
- [41] „Talvari, Andres (2005). Soojusfüüsika alused: tehniline termodünaamika. Soojuslâbikanne. Tallinn: Sisekaitseakadeemia.” Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://dSPACE.ut.ee/server/api/core/bitstreams/9adf7c7f-563c-4726-b8e9-01aa8f705466/content>

- [42] „Jaaniste, Jaak. Loeng 10. Soojusmasinad“. Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.obs.ee/~jaak/loengud/esimene/loeng10/tryk10.pdf>
- [43] T. Arola, *Deep geothermal energy utilisation in Finland – total madness or possibility for successful business*. 2019.
- [44] „Maaküte, energiakaev ja soojuspuurauk: seadusandlus ja ülevaade“, Puurkaevude Infoportaal. Vaadatud: 30. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.puurkaev.eu/maakute-ja-energiakaev/>
- [45] „Puurimised | Inseneribüroo STEIGER“. Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://steiger.ee/teenused/puurimised/>
- [46] „GEODH | Geothermal District Heating“. Vaadatud: 3. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <http://geodh.eu/>
- [47] C. Mims, „Can Geothermal Power Compete with Coal on Price?“, *Scientific American*. Vaadatud: 3. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <https://www.scientificamerican.com/article/can-geothermal-power-compete-with-coal-on-price/>
- [48] A. Soesoo ja H. Bauert, „Geothermal Energy Use, Country Update for Estonia“, lk 17–21, okt 2022.
- [49] „Maaküte ehk Maasoojuspump“, *Elektrihind.ee – elektripakettide võrdlusportaal*. Vaadatud: 3. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <https://elektrihind.ee/maasoojuspumbad-ehk-maakute/>