



Eesti geotermaalenergia kasutuspotentsiaali analüüs

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Markus Maido (184857LARB)

Juhendaja: Alvar Soesoo, Phd

Õppekava: Maapõueressursid (LARB17)

Tallinn 2021

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Markus Maido

[allkirjastatud digitaalselt X]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Alvar Soesoo

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsekomisjoni esimees:

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Eesti maapõue geoloogiast.....	6
1.1 Geoloogiline asend ja ehitus	6
1.2 Aluskord.....	6
1.3 Pealiskord	7
2. Geotermika alused ja mõisted	8
3. Eesti maapõue geotermilised omadused	10
4. Energiamajandus Eestis 2021	14
4.1 Eesti energiamajanduse arengukava ja taastuvenergia eesmärgid ning roll	14
4.2 Euroopa Liidu (EL) nõuded ja rahvusvaheline mõju	15
4.2.1 Kliimanetraalsus, Euroopa roheline kokkulepe ja Pariisi kokkulepe	16
4.3 Soojusmajandus	17
4.4 Geotermaalenergia ja energiatootmise arengukava.....	17
4.4.1 Geotermaalse energia eelis teiste taastuvenergiate ees	17
5. Maasoojusega elektri- ja soojusetootmine	19
5.1 Soojusetootmine ja soojuspump.....	19
5.1.1 Soojus kaugkütteks ja jahutus	20
5.2 Elektritootmine.....	21
6. Mitte-konventsionaalne geotermaalenergia eksploatatsioon ja nende sobivus Eestile.....	23
6.1 Täiustatud geotermilised süsteemid	23
6.2 Ülikuuma kivi maasoojusenergia.....	24
6.3 Täiustatud suletud ahela geotermiline süsteem.....	24
6.4 Soojusetootmine soojuspumpade ja kesksügavate soojuskaevude abil	26
6.4.1 Soojusvahetite võrdlus	27
6.5 Koaksiaaltorud.....	29
6.5.1 Probleemid	31
7. Geotermaalse energia potentsiaal Eestis	32
8. Kokkuvõte	33
Tänuavaldused	34
Kasutatud kirjandus.....	34

Annotatsioon

Euroopa Liidu ja Eesti valitsuse eesmärgiks on 2050. aastaks jõuda kliimaneutraalsuseni, mille saavutamiseks tuleb uuendada meetmeid kõikides majandussektorites. Eesmärkidest tulenevalt on oluline uurida ning kaaluda kõikide taastuvenergia ja keskkonna eesmärke toetavate energia tootmise tehnoloogiate kasutusele võtmist ja väljatöötamist ning ühe sellisena ka geotermaalenergia potentsiaali. Kuna geotermaalenergia valdkond on kiiresti arenev ning Eestis vähe uuritud, peavad sellega seonduvad teemad ja ideed olema pidevas arutelus ja uuendamises. Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on uuendada ja üle vaadata teadmised Eesti geotermaalenergia kasutuspotentsiaalidest, tutvustades lühidalt vanemaid kasutusviise ning laiemalt uuemaid ja potentsiaalsemaid, toetudes olemasolevatele teadmistele maapõue geotermilistest tingimustest. Töö panuseks on koostatud analüüs, Eesti Geoloogiateenistuse ja Energiasalvel jagatud materjaliga graafikud ning andmete inglise-eesti tõlked. Võttes aluseks Lõuna-Soome arendused ning praegused tulemused ja asjakohased teadustööd, on kõige potentsiaalikumaks tehnoloogiaks kesksügavad soojuspuuraugud (medium deep boreholes). Järeldusena on välja pakutud ka sammud, kuidas võiks Eesti olla valmis vastavate uuringute läbiviimiseks ning taolise tehnoloogia vastuvõtmiseks.

Abstract

The goal of the European Union and the Estonian Government is to achieve climate neutrality by 2050, which requires renewed measures in all sectors of the economy. In view of the objectives, it is important to study and consider the introduction and development of all energy production technologies that support renewable energy and environmental objectives, and as such the potential of geothermal energy. As the field of geothermal energy is rapidly developing and little researched in Estonia, the related topics and ideas must be in constant discussion and renewal. The aim of this bachelor's thesis is to update and review the knowledge about the use potential of Estonian geothermal energy, briefly introducing older uses and, more broadly, newer and more potential ones, based on the existing knowledge of the geothermal conditions of the earth's crust. The contribution of the work is overall analysis, graphs constructed with material provided from the Estonian Geological Survey and Energiasalv, and English-Estonian translation of the data. Based on developments in southern Finland and current results and relevant research, the most potential technology is medium deep boreholes. In conclusion, steps have also been proposed on how Estonia could be prepared to conduct relevant research and adopt such technology.

Sissejuhatus

Töö tutvustab lühidalt Eesti aluspõhja geotermilisi tingimusi, analüüsib riigi energia arengukava ning annab ülevaate ja analüüsi konventsionaalsetest ning uuematest maasoojustehnoloogiast. Selle töö jaoks otsisin viimaste allikate põhjal välja mõned arendused maailmast, mis võiksid Eesti tingimuste jaoks kaalutlusele jõuda, kui mitte praegu, siis vähemalt tulevikus. Siiski, tasub mainida, et geotermikas on väga palju huvitavaid ideid ja ettepanekuid, eriti ühekaevuliste (*single-well*) ja kesksügavate soojuskaevude valdkonnas. Nendest kõike ei mahutanud siia töösse ära, kuid palju vajalikku informatsiooni leiab ajakirjast *Energy* 160-ndast väljaandest (Falcone, et al., 2018) või GRC Transactions perioodikast, näiteks väljaanne 44 (Van Horn, 2020).

USA Arenenud Uurimisprojektide Energeetika Agentuuri ARPA-E rahastatud Altarock Energy projekti hinnangul võiks „vaid 0,1% Maa soojusesisaldusest rahuldada inimkonna kogu energiavajadust kaheks miljoniks aastaks“ (ARPA-E, 2018). Kõik, mida me tegema peame, on seda lihtsalt kasutada. Kuid kuna inimkonna tegevusi juhib raha, finantstootlikkus ja konkureerivad ressursid, siis on vaja erilisi lahendusi, et seda ellu viia. Lihtsaim viis selleks on soojuse otsene kasutamine seal, kus see ilmub pinnal – kuumaveeallikates, geisrites ja fumaroolides (vulkaanilise tegevuse lähedal asuvad aurustusavad) või paikades, kus soojus asub maapinnale lähemal. Hetkel on Eestis kasutusel ainult maalähedased soojustootmis lahendused, kuid sügavalt energia ammutamine on siiani veel vähe kõneainet pakkuv teema. Seevastu maailm ning naaberriigid näitavad eeskujuga ja on näha arenemas huvitavaid projekte, mis võiksid ka meile huvi pakkuda. Lisaks on geotermiliste lahenduste elluviimist valmis toetama Euroopa Liit ja nüüdsest ka Eesti valitsus.

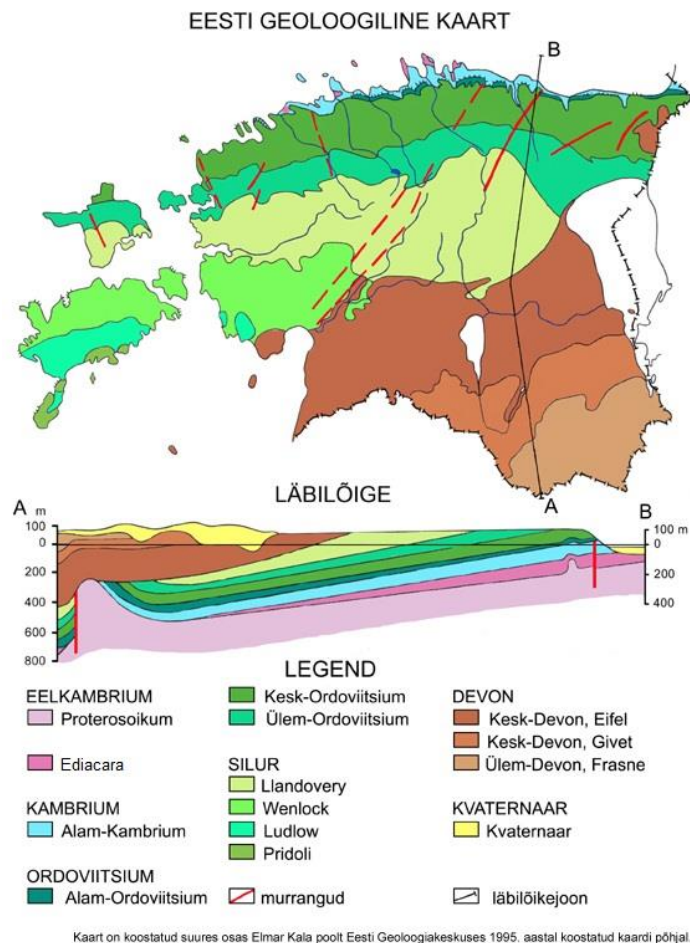
Huvipakkuvate näidete saamiseks ei pea kaugele vaatama – Soomes arendatavad Täiustatud Geotermiliste Süsteemide (TGS) projektid Espoos, Tampere, Muhosel ning Rootsis Malmös, kus geotermiliseks kaugkütteks planeeritud projektsügavused on 6-8 km. Lisaks on Vantaas käimas 2 km kesksügava soojuskaevu arendus. Nii Rootsi kui Soome projektid on maailmas esimesed, sellisele sügavusele pole varem maasoojuse energiat ammutama mindud (Richter, 2021).

See töö keskendub peamiselt soojuse tootmisele, kasutades selle saavutamiseks ära maasoojust otseselt, kuid tulevikus võib avaneda Eestile ka võimalus elektritootmiseks, seega selleks leiab viiendast peatükist ka lühikese ülevaade.

1. Eesti maapõue geoloogiast

1.1 Geoloogiline asend ja ehitus

Eesti maapõues eristub kolm kivimite kompleksi (joonis 1) – kristalliinsetest kivimitest aluskord Proterosoikumist (2500 – 541 milj. a. t.), settekivimiline pealiskord Paleosoikumist (541 – 251 milj. a. t.) ja Kvaternaari setetest koosnev pinnakate. Komplekside kujunemise vahel on pikad perioodid, kust meil puudub geoloogiline info, sest suure tõenäosusega oli Eesti ala siis maismaa. Meie aluskord koosneb tard- ja moondekivimitest, mida katavad settekivimid ja setted. Eesti aluskorra ja pealiskorra kivimid on lõuna poole kaldu, laskudes 2 meetrit ühe kilomeetri kohta. Kalle on tingitud maakoore tektoonilisest liikumisest ja asukohast Fennoskandia kilbi lõunanõlval. Aluskorda Eestis ei paljandu, kõige lähemale maapinnale ulatub see Hiiumaal. Põhja-Eestis on aluskorra sügavuseks rohkem kui 100 meetrit ning Lõuna-Eestis kuni 800 meetrit. (Raukas & Teedumäe, 1997)



Joonis 1. Eesti aluspõhja geoloogilise kaardi näidis (Mare Isakari kogu).

1.2 Aluskord

Aluskorra moodustavad Eestis 1,6 – 2 miljardit a.t. tekkinud moondekivimid ja tardkivimid – gneisid, kvartsiidid, migmatiidid ja graniidid. Eesti ja selle lähiümbruses hakkas arenema mandriline maakoore

umbes 1,9 – 2 miljardit aastat tagasi Proterosoikumis. Sealt algas Svekofennia orogenees – intensiivne mäetekkeprotsess, mis kurrutas ja deformeeris kivimeid. Selle protsessi lõpuks kokku surutud mikrokontinentide tagajärjel tekkis Ida-Euroopa kraaton. Eesti aluskorrakivimite ülemine murenenud osa, mis sisaldab savimineraale, on tõend sellest, et järgneva miljardi aasta jooksul tõusis Eesti ala maismaaks ning toimus Svekofenni mäestiku kulutus. Hiljem kurrutatud aluskorda tungisid rabakivi intrusioonid ca 1,5 – 1,6 miljardit aastat tagasi. (Raukas & Teedumäe, 1997)

1.3 Pealiskord

Ediacara (635 – 541 milj. a. t.) ajastu alguseks lõppes kulutus ning kuskil 580 miljonit aastat tagasi liikus Balti kraaton ekvaatorilt lõunapoolkerale ja hakkas seal vajuma, taas sai toimuda settimine. Ediacara veekogudes settisid nii savid kui jämedateralised liivad. Kambriumi (541 – 485 milj. a. t.) ajastu alguses toimus mere sügavnemine ning settis saviainet, kus kujunes Lontova sinisavi. Ordoviitsiumi (485 – 443 milj. a. t.) ajaks oli kogu Baltika kraaton madala mere all, kus oli rikkalik mereelustik. Ajastu alguses jätkub savide ja liivakivide kujunemine, sealt pärineb ka näiteks fosforiiti. Ordoviitsiumi keskpaigaks jõuab Baltika kraaton soojemale alale, kus algab karbonaatne settimine. Siluri (443 – 419 milj. a. t.) ajaks jõudis Eesti ekvaatorile, kus oli meretase vahelduv, kuid said tekkida siiski erinevad lubjakivid, keskordoviitsiumist on päris ka põlevkivi. Devoni (419 – 358 milj. a. t.) ajastul toimus Kaledoonia mäestiku kulutamine ning sealt sai tekkida peenemat materjali nagu liiv, savi ja aleuriit, millest moodustusid punased liivakivid. Selle ajastu meri oli jällegi vahelduv ning viimasena settisid lisaks liivakividega veel savid ja lubjakivid. Peale seda kadus meri Eesti alalt ning jäi maismaaks järgnevaks 350 miljoniks aastaks. Sellel ajal toimus kulutus ning moodustus aluspõhja reljeef. (Raukas & Teedumäe, 1997)

Aluspõhja katab pudedatest setetest pinnakate. Need on settinud Kvaternaari ajastul, mis algas 2,6 Ma tagasi. Sellele ajastule on iseloomulik suured temperatuuride vaheldumised, kus pikematel külmaperioodidel said tekkida jääkatted. Sealt on Eesti pinnakate ka tekkinud, viimase jääaja poolt kontinentaalse liustiku koosseisus põhjast kaasahaaratud eriteraline materjal. Eeldatakse, et vanimate pinnasetete vanus on umbes pool miljonit aastat.

2. Geotermika alused ja mõisted

Geotermika põhinäitajad on maapõue temperatuur, soojusvoog ning soojusjuhtivus. Nende parameetrite, ehk maapõues oleva maasoojuse potentsiaalse energia kirjeldamiseks kasutatakse tihti mõistet entalpia. Temperatuurid maapõues sõltuvad üldiselt maapinna temperatuurist ja soojusvoo tihedusest, kus temperatuuri mõõdetakse üldiselt puuraukudest, kuid soojusvoog arvutatakse kivimite temperatuuri gradiendi ja soojusjuhtivuse põhjal. Soojusvoog iseloomustab soojusenergiat, mis läbib vaadeldavat pindala ajaühikus, tähis W/m^2 . Kontinentaalsel alal jääb see keskmiselt $65 mW/m^2$, kust alates hakkab maapinna suunas kasvama, sest sügavalt tulevale soojusele lisandub kivimitest tulenev radioaktiivsest lagunemisest soojus. Mida maapinnale lähemale, seda rohkem on soojusvoogu mõjutavaid tegureid ning seda suuremad on hälbed. Sügavamate puuraukude puhul tuleb arvestada, et seal on soojusvoo tihedus väiksem ning sellest võib eeldada madalamat temperatuuri gradienti. (Soesoo, 2012).

Kaks olulist temperatuuride mõjutegurit on voolav põhjavesi ning minevikus toimunud kliimamuutused. Vee voolamine toimub kivimis, kus soojustasakaalu saavutamine toimub lühikestel vahemaadel ruttu ehk kivimi ja vee temperatuur ei erine teineteisest märkimisväärselt. Vee konvektiivse soojuskande efektiivsust mõjutab vee vooluhulk (Darcy kiirus), mis omakorda sõltub rõhu erinevusest ja kivimite veeläbilaskvusest. Soojusvoo tihedust mõjutab vee vertikaalne liikumine maksimaalse temperatuuri gradiendi suunas. Horisontaalselt asendub enamasti vesi sama temperatuuriga, kuid see võib tähtsust omada soojuskaevude puhul, sest kaevu ümbrus on jahutatud või soojendatud. (Jõelett, 2007)

Maapõues sügavusega kasvavat temperatuuri ning selle kasvu kiirust iseloomustab geotermiline gradient. Maailmas varieerub see teatud kohtades ning seda eelkõige laamade aktiivsetel äärealadel ning teistes vulkanismiga seotud piirkondades, kuid kontinentaalsel alal on keskmine gradient $25 - 30 ^\circ C/km$ kohta (Morgan, 2014). Sügavuti sõltub temperatuuri gradient peamiselt kivimite soojusjuhtivusest. Maa soojusväli püüdleb termilise tasakaalu poole, mille juhul peab soojusvoo tihedus olema konstante. Seega väikse kivimite soojusjuhtivuse korral peab olema temperatuuri gradient suurem, et kanda sama soojushulka edasi (Soesoo, 2012). Soojusjuhtivuse mõõtühikuks on $W/(m \cdot K)$.

Kivimite soojusjuhtivust saab mõõta nii laboratoorses kui välitingimustes, pannes tööle kütteleemendi ning sealt mõõtes temperatuuri tõusmist aja jooksul. Viimase näitajad sõltuvad erinevatest oludest, näiteks kivimite mineraloogilisest koostisest ehk keemilisest koostisest, fluidide sisaldusest poorides (vesi tõstab soojusjuhtivust), surve (kõrge surve surub kokku tühimike mis ei juhi nii hästi soojust) ja kivimi homogeens- ja isotroopsusest. (Morgan, 2014)

Mõned elemendid ja nende isotoobid, mis lagunevad ajaga ja soojust tekitavad – uraan, toorium ja vähesel määral ka teised, näiteks kaalium. Soojusenergia, mis sellistest kivimitest eraldub, on kivimi mineraalidest ja nimetatud elementide küllusest. Radioaktiivsed elemendid on rohkem kontsentreeritud ülemistes maakoore happelistes kivimites ehk kivimid, mis on rikkad näiteks kvartsi poolest. Kui savid välja jätta, siis settekivimitel on madal soojustootlikkus. Veel on teada, et kõrge moonde läbinud kivimid on radioaktiivsete elementide osas vaesemad, sest moondu mine kannab nad

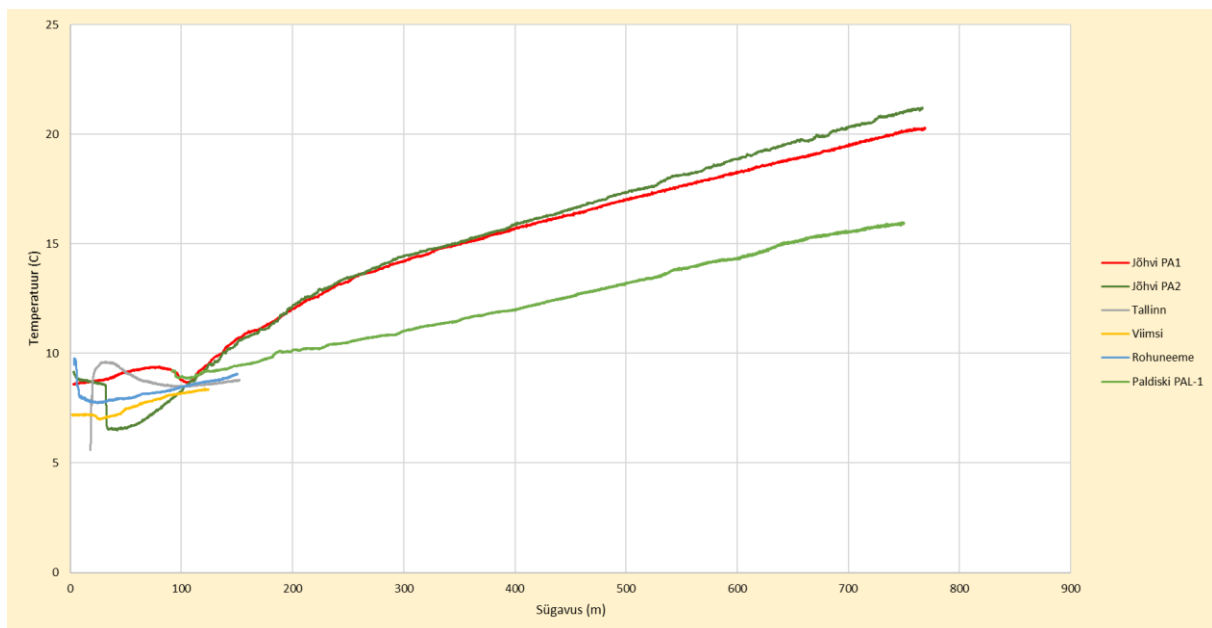
kivimist välja. Suurima soojustootlikkusega kivimiteks võib pidada savikivimeid ja granitoide. Aluskorras on reeglina suurem soojustootlikkus happelise koostisega kivimitel. (Soesoo, 2012)

3. Eesti maapõue geotermilised omadused

Eesti on sügavate puuraukude poolest vaene, kuid mõningad uuringuid termiliste omaduste kohta on olemasolevate aukudega tehtud. Ulatuslikumad temperatuuride mõõtmised said alguse 70ndatel tolaeegse Geoloogia Valitsuse (nüüd Geoloogiateenistus) ja TA Geoloogia Instituudi (nüüd TTÜ Geoloogia Instituut) poolt. Mõõtmised teostati peamiselt geoloogiliste ja hüdrogeoloogiliste eesmärkidega (Юрима, 1984; Юрима & Эрг, 1984). Soojusvoo ja soojusjuhtivuse andmed on vanad, puudulikud ning selleks tööks Geoloogiateenistuse viimastest mõõtmistest ei leidnud analüüsimiseks midagi.

Viimaste aastatega on Eesti saanud enda sügavate puuraukude hulka kolm üle 700 meetrist puurauku ja nendega koos ka kaasaegsemad temperatuuri mõõtmised (joonis 2). Nendeks on Jõhvi PA1 ja PA2 ning Paldiski PAL-1. Puuraukude mõõdetud temperatuurid annavad rahuldavad tulemused, kuid sügavusest jääb siiski natuke puudu, et arvestada neid tõsisemate projektide käivitamiseks. Temperatuurid on mõõdetud digitaalse termomeetriga ning 1 cm intervalliga. Lisaks tuleb arvestada, et nende puuraukude puhul polnud viimased mõõtmised piisavalt pika ajavahega puurimise lõpetamisest, seega nad ei kajasta täielikku reaalsust. Temperatuuride täpsemaks mõõtmiseks võiks vähemalt aasta oodata, sest peale puurimist ulatub soojendav efekt kuni 1500 meetrini (Yan & Deng, 2013). Nimetatud puuraukude kordusmõõtmised on kavas 2021. aasta suvel.

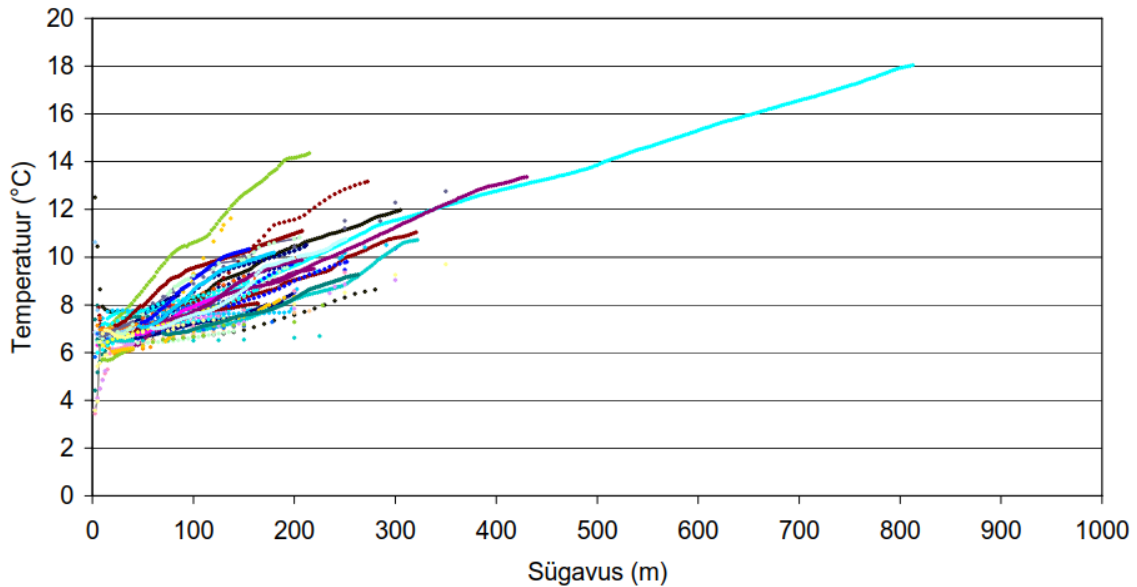
Joonisele 2 on veel lisatud temperatuurid Viimsi, Tallinna ja Rohuneeme madalamatest puuraukudest.



Joonis 2. Jõhvi, Paldiski jt puuraukudest mõõdetud temperatuurid, ajavahemikul aprill–juuli. Graafik koostatud Eesti Geoloogiateenistuse andmete põhjal. Temperatuurid on vees mõõdetud, andmete töötlusel oli näha, et peale vee pumpamist ulatuvad suuremad temperatuuri erinevused vees mõõdetud andmetega 70 meetrini.

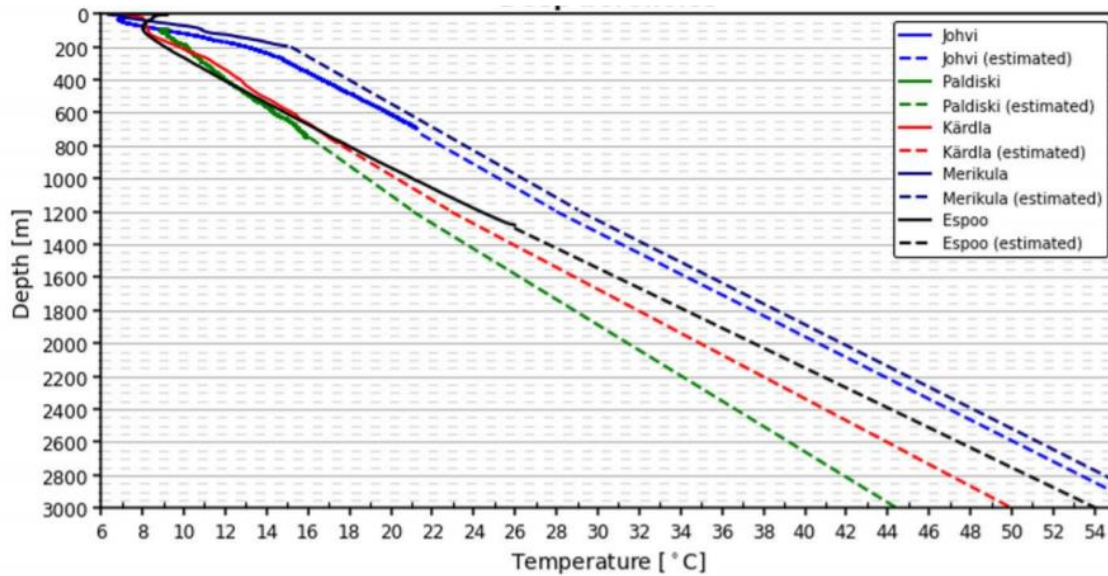
Varasemalt on küsimärgi alla seatud uuringud, mis on näidanud, et Kirde–Eestis esinevad kõrgemad temperatuurid, kui mujal. Hetkel võib öelda, et neid uuringuid toetavad Jõhvis teostatud mõõtmised – joonisel 2 on näha, et Jõhvi puuraugu gradient on suurem kui Paldiskis.

Võrdluseks on joonisel 3 välja toodud mõned varasemalt mõõdetud lühemate puuraukude temperatuurid.



Joonis 3. Eesti puuraukudes mõõdetud temperatuurid. Kõige sügavam puurauk on Kärdlas mõõdetud. Andmestik EGK ja A. Jõelett.

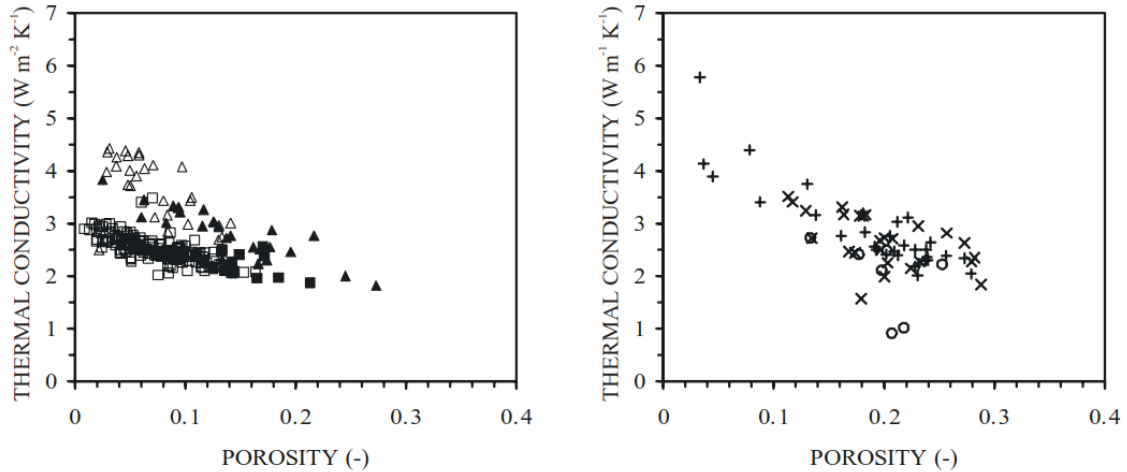
Joonis 3 jätab mulje nagu esimesed 100-200 meetrit on temperatuur väga muutlik. Selle gradiendi muutlikkuse põhjuseks on erandliku soojusjuhtivusega kivimid ning sellisel sügavusel esineb temperatuuri häireid kõige rohkem. Paraku ei leidu täpsemat informatsiooni joonisel välja toodud puuraukude kohta, see-eest saab siit kasulikku informatsiooni üldisema trendi kohta ning mõningaid võrdlusjooni tõmmata joonis 2 vahel. Kui jooniseid võrrelda, siis teise joonise Kärkla puurauk vastaks natuke üle Paldiski gradiendi ning punane ja roheline puurauk Jõhvi mõõtmistele. Kui trende nii andmetabelis või visuaalselt ekstrapoleerida, võib näha, et lineaarse sõltuvuse korral saaks Paldiski puuraugus 1400 meetri peal kätte peaaegu 24 °C kraadi ning Jõhvis 32 °C. Täpsema modelleerimise, mis rakendab paleokliimatilist korrigeerimist, on teinud sellest Soome Geoloogiateenistus (joonis 4).



Joonis 4. Mõõdetud (pidevad jooned) ja hinnangulised (katkendjooned) puuraukude temperatuurid Põhja-Eestis ja Espoos. Soome geoloogiateenistuse modelleerimine. Eesti ja Soome geoloogiliste uuringute andmed.

Joonis 4 toetab positiivselt uuringuid, mis on näidanud, et Ida-Eestis oleks natuke paremad geotermilised tingimused kui Lõuna-Soomes. Kindlasti tasub meeles pidada, et Espoos puuritakse pea 7 km sügavusele ning mingil hetkel saaks kasulikult ära kasutada selle puuraugu möödistsusi ka Eesti uuringutel. Hetkel on avaldatud mõõtmised 1200 meetri ulatuses.

Maapinna temperatuur on üldiselt 1-2 kraadi kõrgem kui õhutemperatuur, Eestis jääb see keskmiselt 6–8°C vahemikku. Perioodiliste (päevased ja aastased) temperatuuri muutustega võib arvestada, et nende mõju kaob 10-15 meetri sügavusel. Ühtlasi asume vanal kontinentaalsel alal ehk meie geotermiline gradient on alla 30 kraadi kilomeetri kohta, näiteks Soomes jääb gradient vahemikku 8–20 °C. Eesti kuulub ka siiski külmade maade hulka, kus erinevate uuringute kohaselt jääb soojusvoog maapõues vahemikku ligikaudselt 30–40 mW/m², kliimamuutuste suhtes parandatud väärtused on pisut kõrgemad 40–50 mW/m². Soojusjuhtivus Eestis veega küllastunud settekivimites on 2–3 W/(m*K), savikivimites 1–1,5 W/(m*K) (joonis 5).



Joonis 5. Eesti karbonaatkivimite (vasakul) ja terrigeensete kivimite (paremal) soojusjuhtivus. Kolmnurk – dolomiit, ruut – lubjakivi, täidetud kolmnurk – domeriit, t. ruut – mergel (Jõelet & Kukkonen, 2002).

Eestis ei ole tingimused piisavad, et põhjustada põhjavee vaba konvektsiooni, seega on peamine liikuma panev jõud surve erinevused. Selleks, et vee voolamine tekitaks olulisi soojusvoo häireid, peab vertikaalsuunaline Darcy kiirus olema suurem kui 10^{-7} m/s. Eestis pole põhjavee liikumiskiirus piisav, et konvektsioon kontrolliks soojuskannet. Küll aga võib kaasneda probleem soojuspuurkaevude ümbrusega, sest horisontaalsuunaline voolamine ületab enamus tingimustes vertikaalsuunalist (Jõelet, 2007).

4. Energiamaajandus Eestis 2021

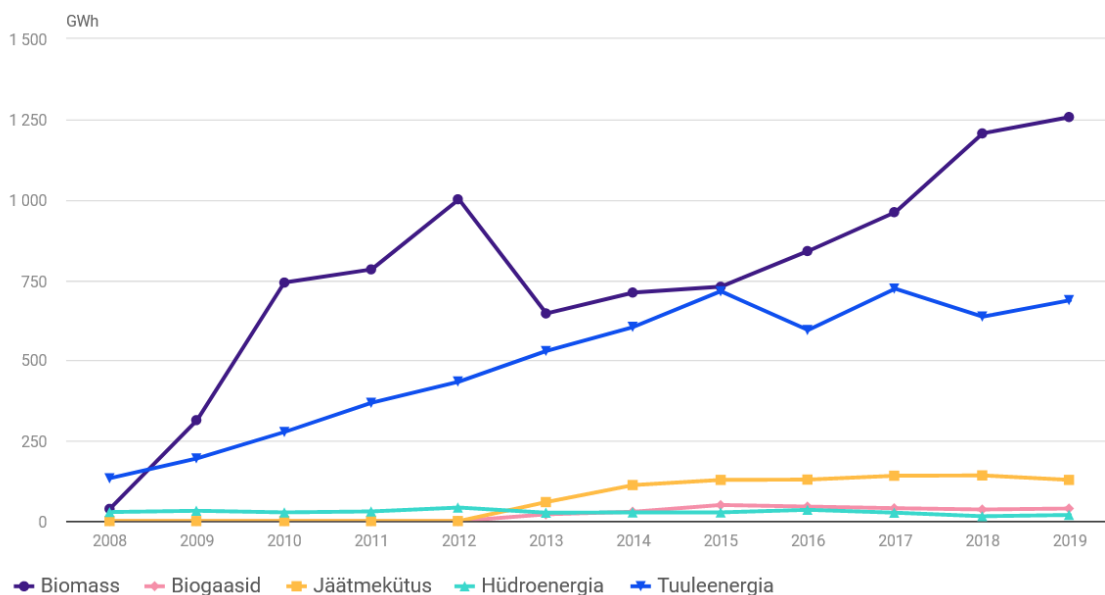
4.1 Eesti energiamaajanduse arengukava ja taastuvenergia eesmärgid ning roll

Eesti energiamaajanduse arengukava käsitleb elektri-, soojus- ja kütusemajanduse, transpordisektori energiakasutuse ja elumajanduse energiakasutusega seonduvaid tuleviku tegevusi. Üheks oluliseks eesmärgiks on võetud energiamaajanduse majandusharuga tagada tarbijatele energiat soodsalt ja keskkonnanõudeid ning tuleviku keskkonna eesmärgi arvestades.

Arengukavaga on seatud mitmeid eesmärgi, millest antud teema kontekstis toob välja järgmised:

- taastuvatest energiaallikatest elektritootmine moodustab 50% sisemisest elektri lõpptarbimisest ning uute taastuvelektri tootmiseseadmete rajamine toimub avatud elektrituru tingimustel ilma täiendavate siseriiklike toetusteta;
- 80% Eestis toodetud soojusest toodetakse taastuvate energiaallikate baasil, kohalike energiaallikate olulisust soojuse tootmisel suurendab veelgi turvas. Eesmärk saavutatakse valdavalt turupõhiselt;

Viimasel kümnendil on taastuvenergia kasutusele võtmine jõudsalt paremuse suunas, kuid seda peamiselt tuuleenergia ja biomassi kasutamisel (joonis 6). Biomassi kasutamise osas on küll viimastel aastatel ka kerkinud kriitikat ning kahtlusi selle jätkusuutlikkuse osas. Seda just metsade intensiivset raiumist arvestades.



Joonis 6. Elektrienergia tootmine taastuvatest allikatest, 2008–2019. (Statistikaamet, 2020)

Eelnimetatud punktide elluviimiseks plaanitakse ka riigipoolset tuge uute tehnoloogiate turule aitamisel just elektri ja kütte tootmisel. Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemine energiasektoris moodustab aastaks 2030 vähemalt 70% (võrreldes 1990 aastaga) ning aastaks 2050 on reaalne saavutada kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemine enam kui 80%. Lisaks nähakse ette, et kütusevabade energiaallikate osakaal transpordisektori lõpptarbimises moodustab aastal 2030 vähemalt 10%. Hüdroenergia potentsiaal on täna kasutusel, päikeseenergia kasutus väikelahendustes suureneb prognooside järgi kuni 100 MW võrra aastaks 2050, kattes riigi elektritarbimise vajadusest ligi 1%. Tuuleenergia võib aastal 2050 katta riigi elektritarbimise vajadusest kolmandiku (ENMAK, 2016). Seega on geotermaalenergia oluline lisavõimalus seatud eesmärkide saavutamisel.

Suuremaks eesmärgiks on seatud, et Eesti kasutab aastal 2050 oma energiavajaduse rahuldamiseks peamiselt kodumaiseid ressursse, mitte ainult elektri-, vaid ka soojuse tootmises ja transpordisektoris. Tänapäeval võrreldes on eesmärk, et energiasektoris oleks fossiilsete primaarkütuste kasutamise efektiivsus kahekordistunud võrreldes tänase tasemega ja CO₂ heitmete tase energiasektoris vähenenud enam kui 80% (võrreldes 1990. aasta tasemega). ENMAK 2030 dokumendis on rõhutatud tekstis välja toodud, et "Eestist on kujunenud Põhja-Balti energiaturul moodsaid ja keskkonnasõbralikke tehnoloogiaid kasutav energiat eksportiv riik" (ENMAK, 2016).

2050. aasta perspektiiviga on elektritootmise osas võetud kohustus täita rahvusvahelisel ja Euroopa Liidu tasandil elektri tootmise keskkonnamõjude vähendamine ja teiseks, et Eestisse rajatavad uued elektri tootmisvõimsused peavad olema Euroopa Liidu ühtsel energia siseturul pikaajaliselt konkurentsivõimelised. Arengukavas on olulise punktina välja toodud primaarenergia säästu eesmärgil maksimaalne elektri- ja soojuse koostootmispotentsiaali ära kasutamine kohalikel ja taastuvatel kütustel ning ressursitõhususe tagamine kohalike loodusvarade kasutamisel (ENMAK, 2016).

4.2 Euroopa Liidu (EL) nõuded ja rahvusvaheline mõju

Euroopa Liidu liikmena suunavad meie energiapoliitikat ja valikuid rahvusvahelised otsused ja kokkulepped ning võetud kohustused. Täna juba minevikku vaadates aastaks 2020 võetud eesmärgid ilmestavad hästi suunda, kuhu Eesti oma energiapoliitikaga on liikumas ning väljakutseid, mida võetud kohustused endas peidavad. Alljärgnevalt on välja toodud eelkõige taastuenergiat puudutavad eesmärgid (ENMAK, 2016):

- Taastuenergia osakaal energia lõpptarbimises peab olema 25%.
- Taastuenergia osakaal transpordisektori lõpptarbimises peab olema 10%.
- EL heitkoguste kauplemisüsteemi väliste sektorite summaarne kasvuhoonegaaside heitkogus atmosfääri võib aastaks 2020 kasvada kuni 11% (6,27 mln t CO₂ekv) võrreldes 2005. aastaga.

2030. aastaks oodatakse, et EL üleselt oleks vastavad näitajad aga järgmised:

- Taastuenergia osakaal energia lõpptarbimises peab olema 27%.
- ELi energiatõhususe seatud mittesiduv eesmärk suurendada aastaks 2030 energiatõhusust 27% võrra (võrreldes 2007. aastal PRIMES mudeli abil tehtud prognoosidega primaarenergia tarbimise kohta aastal 2030).

- EL-ülene eesmärk vähendada kasvuhoonegaaside heitkogust 40% aastaks 2030 võrreldes 1990. aastaga

Kui aga vaadata pikemat perspektiivi ja seatud eesmärke, siis on ambitsioonid juba oluliselt suuremad – vähendada aastaks 2050 heitkoguseid 80-95% võrreldes 1990. aasta heitkogusega (Euroopa Komisjon, 2011).

Üheks oluliseks näidikuks on Eesti paiknemine maailmas. Maailma energeetikanõukoguga koostöös hindab Energy Trilemma Index riike nende võimest pakkuda jätkusuutlikku energiat kolme dimensiooni kaudu: energiapuudus, energia võrdsus (kättesaadavus ja taskukohasus), keskkonnasäästlikkus. 2020. aasta statistikas paiknes Eesti seal 26. kohal. Energiapuduliku osas asume 38, võrdse kättesaadavuse osas 23 ja keskkonnasäästlikkuse osas 52. kohal. Kokku on võrdlustabelis 108 riiki. Oluline on siin ehk ka märkida, et tabelis on Leedu 16. ja Läti 22. kohal (Energy Trilemma Index, 2020).

Arengukavas on ka rõhutatud, et ELi jaoks on oluline liikuda imporditud energia sõltuvuselt EL leiduvate primaarenergia allikate suurema kasutamise poole.

4.2.1 Kliimaneutraalsus, Euroopa roheline kokkulepe ja Pariisi kokkulepe

ELi siht on jõuda 2050. aastaks kliimaneutraalsuseni. See eesmärk on Euroopa roheline kokkulepe keskmes ja kooskõlas Pariisi kokkuleppe alusel võetud ELi kohustusega võtta ülemaailmseid kliimameetmeid. Selle eesmärgi täitmiseks on ka Eesti oma allkirjad andnud ning osaleb nendes kokkulepetes. Euroopa Komisjon esitles oma nägemuse (Euroopa Komisjon, 2018) kliimaneutraalsest EList 2018. aasta novembris, käsitledes kõiki põhilisi sektoreid ja üleminekuvõimalusi. ELi liikmesriigid peavad välja töötama riiklikud strateegiad eesmärkide täitmiseks, kuidas nad plaanivad saavutada kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamise.

Euroopa rohelises kokkuleppes on märgitud vajalikud investeeringud, olemasolevad rahastamisvahendid ja energianõuded. Tegevuskava näeb ette ressursside tõhusa kasutamise edendamist liikumisel puhta ringmajanduse suunas, bioloogilise mitmekesisuse taastamist ning saaste vähendamist.

Selle saavutamiseks tuleb võtta meetmed kõikides majandussektorites, sealhulgas (Euroopa Komisjon, 2019):

- investeerida keskkonnasõbralikesse tehnoloogiatesse;
- toetada tööstuse innovatsiooni;
- võtta kasutusele puhtamad, odavamad ja tervislikumad era- ja ühistranspordi vormid;
- vähendada energiasektori süsinikuheidet;
- tagada hoonete energiatõhusamaks muutmine;
- teha koostööd rahvusvaheliste partneritega ülemaailmsete keskkonnastandardite parandamiseks.

4.3 Soojusmajandus

Eestis tarbitakse aastas alla 6300 GWh soojusenergiat, millest 2018. aastal moodustas 70% kaugküte, sest ligikaudu 30% elanikest kasutab individuaalseid kütelahendusi, tootes soojusenergiat valdavalt puidust ja maagaasist ahikütte või lokaalsete katelseadmetega. (MKM, 2019). Näidiseks võib välja tuua, et sada korterit kasutab aastas ligikaudu 0,7 GWh kaugkütte teel edastatud soojusenergiat.

Samamoodi on kaugküttesektoril tähtis osa Eesti taastuvenergiaga seotud eesmärkide saavutamisel. MKM-i poolt on toonitatud: „Propageerime soojuse ja elektri koostootmist seal, kus see on majanduslikult ja tehniliselt otstarbekas, vähendab soojusvarustuse keskkonnamõjusid ning on energiasäästlikum kui elektrienergia ja soojusenergia tootmine eraldi elektrijaamas ja katlamajas“ (MKM, 2019).

4.4 Geotermaalenergia ja energiatootmise arengukava

Eesmärkidest tulenevalt on oluline uurida ning kaaluda kõikide taastuvenergia ja keskkonna eesmärke toetavate energia tootmise tehnoloogiate kasutusele võtmist ja väljatöötamist ning ühe sellisena ka geotermaalenergia potentsiaali.

Siin toetab võimalikku kasutust ka EL valmidus rakendada siduvate taastuvenergia eesmärkide täitmiseks vajaduspõhist energia siseturu ning EL üleste riigiabi andmise reeglitega kokkusobivaid turuhinna põhiseid toetuskeeme, mille abil taastuvenergia tootmisüksusi arendada.

Arvestades Eesti soovi rajada uusi energia tootmisvõimsusi eelkõige turupõhiselt ning paindlike koostöömehhanismide rakendamise abil, samuti Eesti soovi suurendada eelkõige kodumaiste primaarenergiaressursside kasutamisel põhinevate või kütusevabade elektritootmisvõimsuste Eestisse rajamisega energiajulgeolekut, toetatakse eelnimetatud põhimõtetele vastavate projektide realiseerimist.

Uute tehnoloogiate kasutusele võtmise olulisust seatud eesmärkide saavutamisel rõhutab ka “Energiatehnoloogia programm” ehk ETP (ETP, 2008). Dokumendis leitakse, et oluline on valdkonnas arendada teadus- ja arendustegevuse rolli ning nn tehnoloogiasirde toetamist ettevõtlusesse.

4.4.1 Geotermaalse energia eelis teiste taastuvenergiate ees

Peamine probleem taastuvenergia ees seisneb selles, et suurimad allikad, tuul ja päike, on muutlikud. Elektrisüsteemi ehitamine tuule ja päikese ümber tähendab lünkade täitmist – allikate, tehnoloogiate ja viiside leidmist, mis võiksid sisse hüpata, kui tuult ja päikest ei ole. Suuremad vaidlused taastuvenergia maailmas kipuvad seisnema selles, kui kaugele tuul, päike ja patareid iseseisvalt jõuavad ehk kui kõrge protsendini kogu energiatarbest ning milliseid allikaid tuleks nende täiendamiseks kasutada. Puhta energia pooldajate vastus on rohkema energia salvestamine, kuid vähemalt praegu on ladustamine kogu töö tegemiseks liiga kallis. Tuumaenergia või fossiilenergia koos süsiniku kinni püüdmisega on paljulubavad, kuid sarnaselt teistega, ei eksisteeri probleemideta.

Geotermiline energia, kui seda saaks säästlikumalt kasutada kuumemas, kuivemas ja sügavamas kivimis, oleks tuule ja päikese täiendus. See on taastuv, ammendamatu ja võib töötada baaskoormusel

ööpäevaringselt või ka koormuse jagamisel, seda ilma reostamata või kasvuhoonegaasideta. Lisaks on see saadaval kõikjal maailmas ning vastupidav enamiku ilmastiku või katastroofide korral.

5. Maasoojusega elektri- ja soojusetootmine

5.1 Soojusetootmine ja soojuspump

Maasoojuse otsekasutus on üks vanimaid ja mitmekülgsemaid viise, kuidas maasoojust ära kasutada. Geotermilise otsekasutuse varajast ajalugu on uuritud enam kui 25 riigis, kus on dokumenteeritud kasutust üle 2000 aasta (Cataldi, et al., 1999). Enamus juhtudel tuleb otsekasutuses abiks soojuspump, mis võimaldab keskkondade vahel temperatuuri tõsta ja soojust üle kanda.

Maasoojuspump on üks kõige energiasäästlikumaid lahendusi kütteks, jahutuseks ja vee soojendamiseks, seetõttu on see leidnud laia kasutuse kogumaailmas. Lühidalt võib tema töö põhimõtet kirjeldada järgmiselt. Fluid, mis tsirkuleeritakse maapinda külmana, kogub seal soojust ning liigub pumba soojusvahetisse. Soojusvahetis võtab energia endale külmutusagens ehk külmutusaines ning peale soojuse loovutamist liigub fluid tagasi maapinda. Külmutusagens, mis on enamasti gaasilises olekus, liigub soojusvahetist kompressorisse. Seal surutakse see kokku ning aine temperatuur tõuseb mitmekordselt. Viimaseks, kui soojendatakse näiteks õhku, liigub külmutusagens peale kompressorit edasi õhksoojusvahetisse. Siin ringleb soojuspumba puhur õhku üle õhumähise, tõstes õhu temperatuuri. Pärast seda kui külmutusagens oma soojusenergia vabastab, liigub see tagasi tsükli uuesti alustamiseks soojusvahetisse.

Üldiselt on terminiline efektiivsus otsekasutuse puhul kõrge, sest ei toimu energia konverteerimist, kuid efektiivsusvõimsuse koefitsient madal, sest soojus läheb kasutuseks talvel. Seevastu rakendust leidub otsekasutusel laialt nii riikide kui valdkondade vahel. Soojusenergia kasutuse poolest järjestatud valdkonnad (Lund & Toth, 2020):

- Ruumide kütmine – kasutab 29 riiki, maasoojuse otsekasutuse poolest ka kõige mahukam
- Kasvuhooned, maakütmine – 32 riiki
- Vesiviljelus – 21 riiki.
- Põllumajanduskultuuride kuivatamine – 15 riiki
- Tööstusprotsessid – 14 riiki. Kõige suurema võimsusteguriga, st valdkond kus tarbitakse soojusenergiat ilma pausideta
- Suplemine ja ujumine – antud valdkonna kohta on kõige raskem andmeid koguda ja töödelda, kuid siin kategoorias on enim riike (53), mis kasutavad otsekasutust vee soojendamiseks.
- Lume sulatamine – üksikud riigid
- Jahutus – 7 riiki
- Muu – siin kategoorias teatavad endast 14 riiki, mille valdkonnad on loomakasvatus, spirulina kasvatamine, pudelite magestamine ja steriliseerimine, niisutamiseks, külmakaitseks ja geotermiliseks turismipargiks, toiduvalmistamine ja vee keetmiseks.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et ruumide kütmine, põllumajanduslikud rakendused, vesiviljelus ja tööstusprotsessideks soojusetootmine on kõige paremini tuntud ja laialdasemalt levinud kasutusviisid.

5.1.1 Soojus kaugkütteks ja jahutus

Geotermiline kaugküte on kapitalimahukas. Peamised kulud on esialgsed investeerimiskulud, mille kuluallikateks on tootmis- ja tagasivoolukaevud, soojuskaevu- ja ülekandepumbad, torujuhtmed, jaotusvõrgud, seire- ja juhtimiseaded ning mahutid. See-eest on tegevuskulud tunduvalt väiksemad kui konventsioonilistes süsteemides ning koosnevad pumpamise võimsusest, süsteemi hooldusest, juhtimisest ja haldamisest. Süsteemi maksumuse hindamisel on otsustavaks teguriks soojusvajadus jagatud linnaosa maapinnaga ehk soojuskoormuse tihedus. Suur soojuskoormuse tihedus määrab kaugküteprojekti majandusliku teostatavuse, kuna jaotusvõrk on kallis. Teatavat majanduslikku kasu on võimalik saavutada kütte ja jahutuse kombineerimisega piirkondades, kus kliima seda võimaldab. Kuid kombineeritud kütte ja jahutusega süsteemi koormustegur oleks suurem kui üksi kütmise tegur ja selle tulemusena suureneks energiaühiku hind. Järgmises peatükis on tutvustatud tehnoloogiad, mis võimaldaks eemaldada investeerimiskuludest tagasivoolukaevud ning muud kuluallikad, teadaolevalt on ka maasoojusprojektide suurim kuluallikas just puurimine. Tabel 1 on näide Muhose ja Espoo projektide majanduslikest arvutustest, kus on näha, et 95% eeldatust projektimaksumusest on puurimine.

Kulud	Espoo	Muhos
Investeeringud	49 800 000 €	49 800 000 €
Puurimine	48 000 000 €	48 000 000 €
Jaama ehitus	1 800 000 €	1 800 000 €
Tegevuskulud aastas	250 000 €	250 000 €
Investeeringu intress aastas	996 000 €	996 000 €
Kõik kulud kokku	51 046 000 €	51 046 000 €
Tulud	Espoo	Muhos
Kaugkütte maksumused aastas	3 656 221 €	4 878 070 €
Tagasimakseperiood	Espoo	Muhos
	51 046 000 €	51 046 000 €
	3 656 221 €	4 878 070 €
Tagasimakseperiood (aastates)	14	10,5

Tabel 1. Espoo ja Muhose majanduslike arvutuste tulemused (Arola, 2019).

Ruumi jahutamine on teostatav võimalus, kus absorptsiooni saab kohandada geotermiliseks kasutamiseks. Nende masinate tehnoloogia on hästi teada ja need on turul hõlpsasti kättesaadavad. Absorptsioonitsükkel on protsess, kus energiaallikana kasutatakse elektri asemel soojust. Külmutusefekt saavutatakse kahe vedeliku kasutamisega: külmutusagens, mis tsirkuleerib, aurustub ja kondenseerub, ja sekundaarne vedelik või absorbent. Üle 0 ° C kasutamisel kasutab tsükkel absorbendina liitiumbromiidi ja külmutusagensina vett. Kui temperatuur on alla 0 ° C, kasutatakse ammoniaagi / vee tsükli, kusjuures külmutusagensiks on ammoniaak ja absorbendiks vesi. Maasoojuslikud vedelikud annavad soojusenergiat nende masinate juhtimiseks, kuigi nende

efektiivsus langeb madalamate temperatuuride kui 105 ° C juures. (The geothermal communities project, 2019)

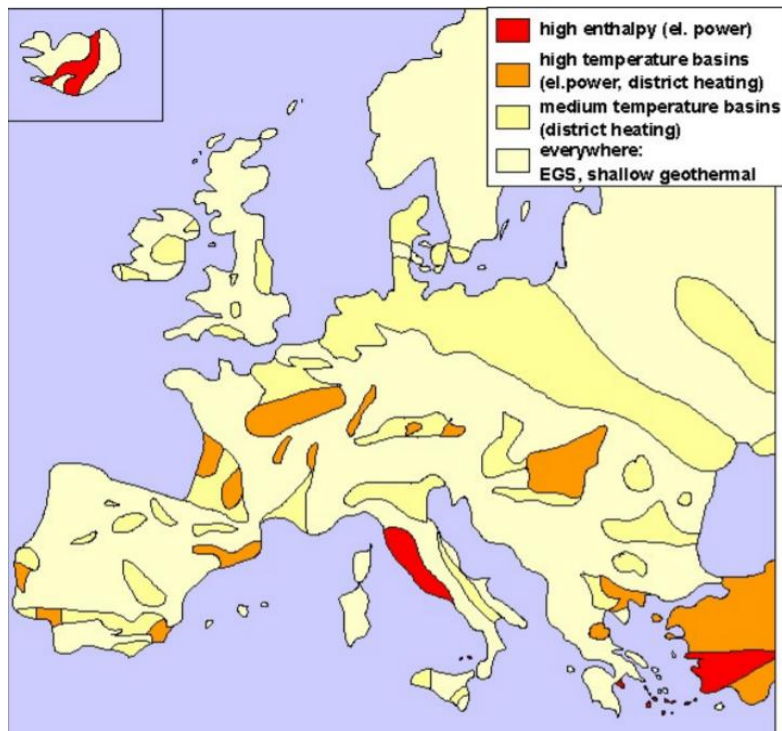
5.2 Elektritootmine

Geotermaalne elektritootmine sai alguse 20. sajandil Itaalias Larderellos, kus 1911. aastal ehitati sinna maailma esimene geotermiline elektrijaam (Tiwari & Ghosai, 2004). Nüüdseks teatavad endast 29 riiki, kes toodavad aastas maasoojusega kokku 95 000 GWh elektrienergiat (Huttrer, 2020).

Geotermaalsed elektrijaamad kasutavad auru ja kõrge temperatuuriga fluide, et toota elektrit ning hetkel asuvad enamus sellistest jaamadest geotermiliselt soodsatel aladel, kus suuremad temperatuurid on maapinnale lähemal (joonis 7). Joonisel 7 on veel näha, et tektooniliselt ja seismiliselt stabiilsetel aladel, kus asub ka Eesti, puudub elektritootmine. Ent lõuna poole vaadates on Euroopal ette näidata nii geotermaalseid projekte kui ressursse – näiteks Kesk-Euroopa riigid on leidnud oma maapõuest kõrge entalpiaga ressursid ning seismiliselt aktiivses Lõuna-Euroopas leiduvad Euroopa kõrgeima temperatuuriga ressursid (joonis 8).



Joonis 7. Geotermaalelektrijaamade maailmakaart (*Think Geoenergy, 2021*).



Joonis 8. Euroopa peamised settekompleksid ja geotermaalressursid (*Antics & Sanner, 2007*).

Erinevate allikate sõnul peaks jääma optimaalseks elektritootmiseks maapõues oleva fluidi või auru temperatuur vähemalt vahemikku 90–160 °C, kuid eksisteerivad ka jaamad kus suudetakse elektrit toota vähemaga kui 90 kraadi. Üks selline näide oleks Alaskal asuv Chena Hot Springs kommuun, kus suudeti toota elektrienergiat 57 °C fluidiga (Erkan, et al., 2008), kuid selliste geotermaalelektrijaamade probleemiks on nende madal efektiivsus ning „külmematele“ maadele laienemisega püsib suur põrumisrisk.

Elektritootmises on katsetamisel viimastel aastatel välja pakutud uued ja põnevad tehnoloogiaid, kuid konventsionaalne ja tuntud viis on maapõues paikneva fluidi või auru otserakendus ning sellest tulenevalt on välja kujunenud kolm elektrijaama tüüpi – kuiva ja kiire auruga ning binaarse tsükliga jaamad. Kuiva auruga süsteemid olid ühed esimesed maailmas ning selle tehnoloogiaga eraldatakse aur otse turbiini. Seevastu kiire auruga jaamad on praeguseks kõige levinumad, kus fluid pumbatakse maapõuest madalama survega paaki, mis paneb fluidi kiirelt aurustuma. Nende jaamadega elektritootmiseks on vaja fluidi või auru temperatuure mis ületavad 160 °C (erinivate allikate toetusel võib selle miinimum temperatuuri paigutada vahemikku 150–170 °C. Binaarse tsükliga süsteem on elektritootmises kõige uuem arendus ja erineb viimastest sellega, et seal ei puutu eraldatud aur või fluid turbiiniga kokku ning energiat saab toota maapõuest, kus leidub madalamaid temperatuure. Selleks kasutatakse soojusvahetit. Soojusvahetis eraldatakse geotermaalsest fluidist soojus ning aurustatakse sekundaarne fluid, mis paneb omakorda turbiini pöörlema.

Soojusega elektritootmise uue põlvkonna tehnoloogiaid on hetkel Eestile kaalumiseks liiga värsked ning tavapärase lähenemisega peaks sihtima sügavusi, mis algavad tõenäoliselt 8+ kilomeetrist.

6. Mitte-konventsionaalne geotermaalenergia eksploatatsioon ja nende sobivus Eestile

Kõik geotermaalsed süsteemid kasutavad maapõues ära lõhesid või torustike, et püüda kinni maa taastuvat ja säilivat temperatuuri. Energia ärakasutamiseks on erinevad lähenemisviisid, kuid kokkuvõtlikult jaotuvad nad kas avatud või suletud süsteemideks. Suletud süsteem tsirkuleerib fluidi maapõuest pinnale või soojusvahetisse ning selline kasutusviis vajab fluidiga torustike täitmist ühekorra. Avatud süsteem kasutab kas juba maapinnal või maapõuest lähedal olevat vett ning üldiselt peale vee kasutust see suunatakse sobival kaugusel tagasi maapinda sisse. Sellise süsteemi eelis on, et peale tagasivoolu- ja tootmiskaevu ei vaja see lisatöid torustike matmiseks ning seega on tunduvalt odavam. See-eest on suletud ahela eelisteks: kestvus (võib vastu pidada 100 aastat), keskkonnasõbralikkus ja ei vaja lähedal olevat veekogu. Viimast eelist peetakse oluliseks eelkõige põhjaveekaitstuse kohalt, sest avatud süsteem võib kokku segada erinevaid põhjaveekihte ja erinevaid setteid, mis muudaksid vee kvaliteeti.

Maasoojustehnoloogia poolelt on otsekasutuses levinud suletud ja elektritootmises avatud ahelad.

6.1 Täiustatud geotermilised süsteemid

Tavapärased geotermilised süsteemid piirduvad enamasti aladega, kus soojus, vesi ja poorsus omavahel sobituvad. Tavalises, tahkes ja mittepoorses kivimise on salvestatud samamoodi palju soojust. Täiustatud geotermiline süsteem (TGS) või *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) on lühidalt öeldes maasoojuslik tehnoloogia, millega tehakse oma reservuaar. Puuritakse monoliitsesse kivimisse, süstitakse kõrgsurvega fluidi läbi ühe kaevu, mille tulemusel tekivad lõhed. Seejärel saab lõhedest fluidi läbi lasta soojuse kogumiseks. TGS on üldiselt kahe süvapuuraugu süsteem.

TGSi põhiideeks on olnud alustada olemasolevatest hüdrotermilistest reservuaaridest, kus ressurside olemasolu on juba hästi iseloomustatud. Kuigi see tehnoloogia on mõeldud kasutamiseks peaaegu kõikjal maailmas, nõuab see „külmematel“ maadel väga sügavale minemist. Ehk seal on takistuseks saanud tõsiasi, et kui ressurss muutub sügavamaks ning kuumaks ja vähem poorseks, suureneb selle juurdepääsul inseneriraskus ja kapitalinõue. Soome Espoo St1 katsetatav pilootprojekt oleks heaks näiteks, kus esimese taolise ja omanäolise projektikulud läksid viitamata allika sõnul finantsprognoosist pea kaks korda kallimaks, väidetavalt lisapuurimiste tõttu. Tabelil 1 on näha, et Espoo prognoosiks oli arvatud ca 50 miljonit eurot. Siinkohal jääb arusaamatuks, kuidas on Malmö projekt, mis on analoogne Espooga, eelarve 5 miljoni euro ringis (Richter, 2020). Ülemaailmne laienemine on olnud TGSi eesmärk juba aastakümneid, nagu on sätestatud USA energeetikaministeeriumi geotermilist uuringut käsitlevas 2019. aasta Geovisioni uuringus (U.S. Department of energy, 2019). Sellele vaatamata on TGSi tööstusel olnud raskusi edu saavutamiseiga. 2010. aasta paiku oli tööstuses palju aktiivust, mis põhines USA toetusrahadel ja binaarelektrijaamad, kuid selleks ajaks kui kildagaasi revolutsiooni puurimistehnoloogia tahtis liikuda üle geotermilisse, olid 2015. aastaks toetusmeetmed ja ärihuvide tähelepanu mujal. Praeguseks on antud valdkonnas probleemid lahendatud ning näeb taas arendusi: investorite ja avalikkuse huvi; turunõudlus, mis on saavutatud tänu taastuvenergia eesmärkidele ning TGSi idufirmad, mis kasvavad kiiresti ja loovad kasumlikke projekte.

Vedelike sisestamine maapinda maapinna purustamiseks on gaasi- ja naftaäris tuntud kui „frakkimise“ all. See meetod on kogunud ajajooksul negatiivset mainet ning teatud kohtades maailmas ka keelatud. Tänapäevaks on kasutatavad vedelikud healoomulised ning veereostuse oht väike, kuid siiski püsivad muud ohud. Näiteks Eesti põhjaveekihtide komplekskuse ja olulise tõttu oleks frakkimine ja avatud süsteemiga vee tsirkuleerimine raskendatud. Mured indutseeritud seismilise aktiivsuse pärast on mõnevõrra üle puhutud – frakkimise maine tuli gaasi- ja naftapuurimisel seismilisusega seotud suuremahulistest veekõrvaldus kaevudest ja TGSil neid pole. Lisaks on viimasel väiksemad ja paremini kontrollitavad lõhed ning palju väiksema rõhu all kui gaasi ja nafta frakkimisel. Loomulikult ka erinevalt gaasi frakkimisest, ei toimu liini lõpus fossiilkütuste põletamist.

6.2 Ülikuumade kivi maasoojusenergia

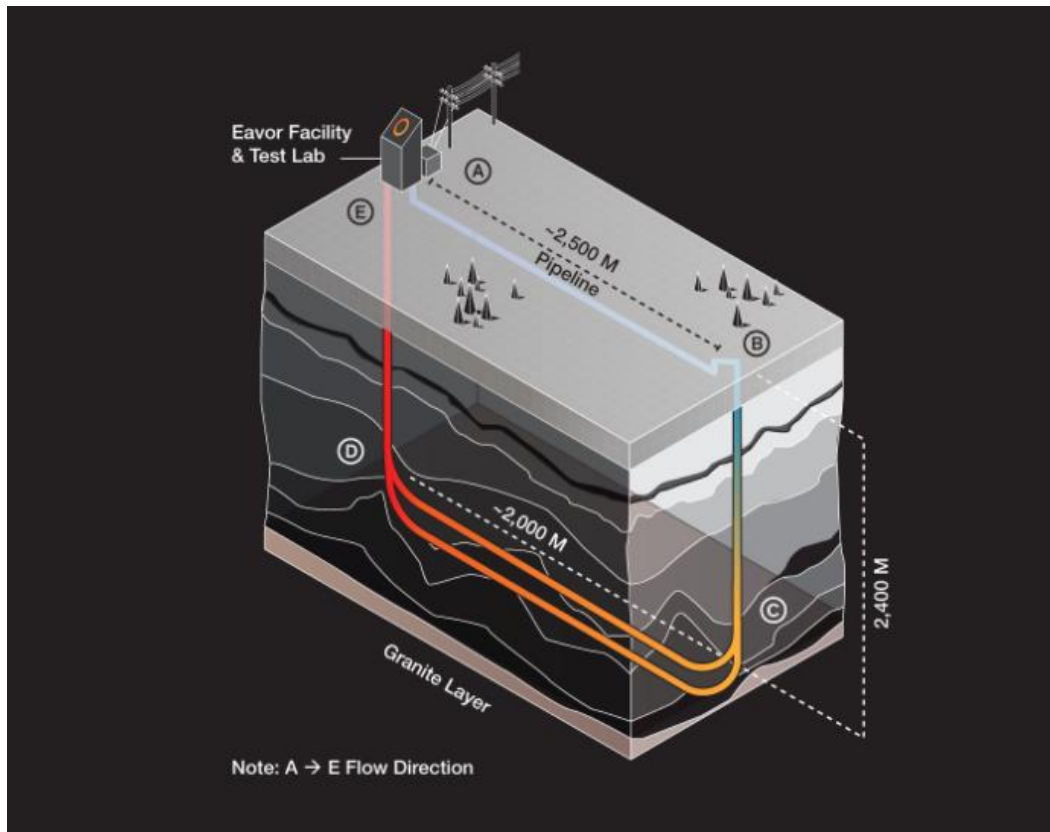
Selle tehnoloogia eesmärk põhineb TGSi horisondil mõningate erinevustega, mille peamine idee seisneb energia kättesaamises kõige kuumematest ja sügavamatest kivimitest.

Väga kõrgetel temperatuuridel tõuseb maasoojusega energiatootmise efektiivsus. Kui vesi ületab teatud temperatuuri ja surve, siis muutub see superkriitiliseks. Selles olekus on vee entalpia kordades kõrgem kui tavalisel veel või aurul ning võib hoida 4 kuni 10 korda rohkem energiat massiühiku kohta. Ja teisels, tema Carnot' tsükli efektiivsus elektrienergia muundamiseks kahekordistub. (Makuc & Chimowitz, 2020).

Hetkel veel ei tooda maailmas mitte keegi superkriitilise veega elektrit, kuid leidub uurimisprojekte nii Jaapanis, Itaalias ja näiteks Mehhikos (Reinsch, et al., 2017).

6.3 Täiustatud suletud ahela geotermiline süsteem

Täiustatud suletud ahela geotermiline süsteem (TSAGS) on uue põlvkonna tehnoloogia, kus puudub frakkimine ning ei toimu vedelike eraldamist ega sisestamist. Inglise keeles – *Closed Loop Geothermal (CLG)* või *Advanced Geothermal Systems (AGS)*. Suletud ahelaga süsteemid on olnud pikalt kasutusel, kuid mõned ettevõtted on neid hiljuti märkimisväärselt täiendanud. Üks selline ettevõtte on Albertas asuv Eavor. Eavori kavandatud TSAGS, mida nimetatakse “Eavor-Loopiks”, erineb tavapärasemast suletud ahelast tema sügavamale ja horisontaalselt pikendatud torude ahela poolest. Eavor ühendab omavahel kaks vertikaalset kaevu, mis asuvad üksteisest umbes 2-3 km kaugusel (joonis 9), horisontaalselt paigutatud külgmiste kaevude seeriaga. Selline konstruktsioon annab võimaluse maksimeerida pinda ja ammutada nii palju soojust kui võimalik.

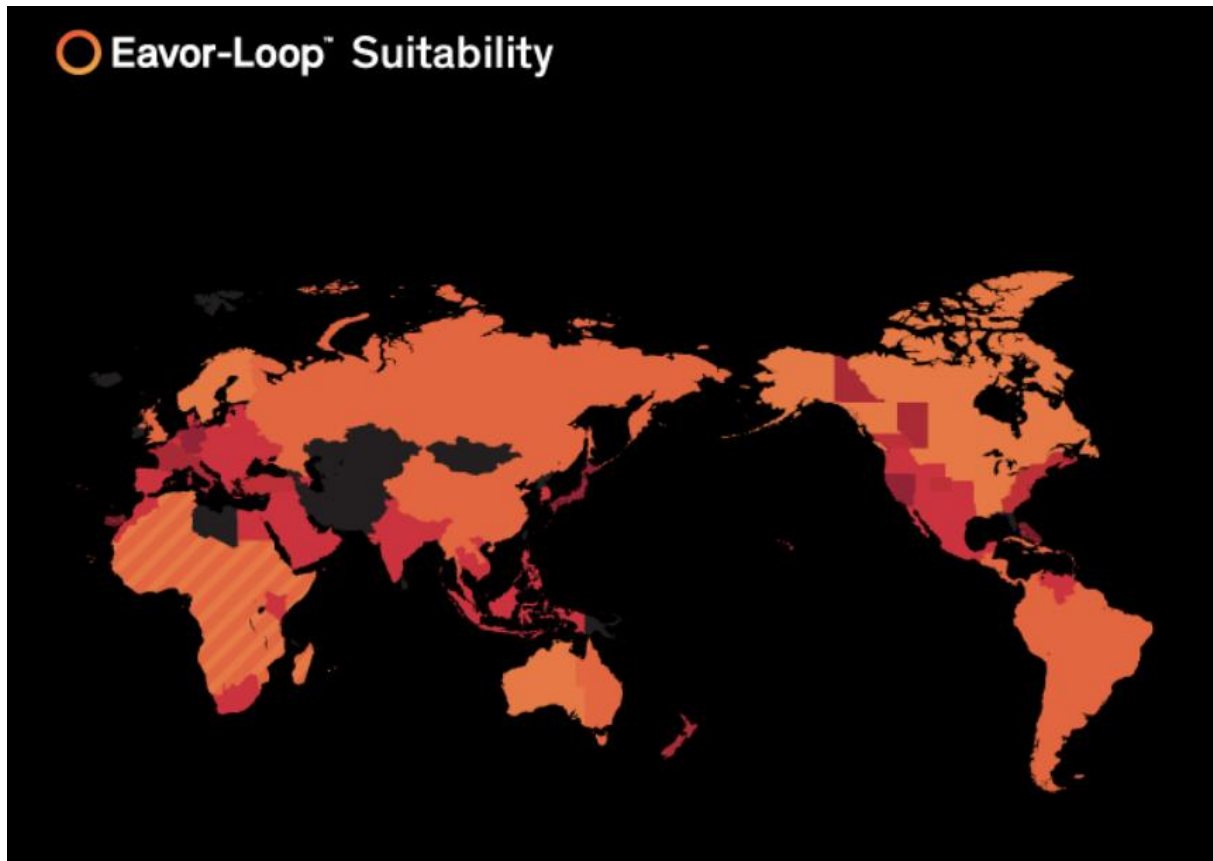


Joonis 9. Eavori ahel (Van Horn, 2020).

Teatud suletud süsteemidega, kuhu kuulub ka Eavor, saab tekitada termosifoonefekti, mis paneb sooja vee tõusma ning tekib loomulik veeringlus, ilma et oleks vaja pumpa. Ilma pumba parasiitkoormuseta saab Eavor kasulikult kasutada umbes 150 °C soojust, mis on saadaval peaaegu et kõikjal.

Siiani on Albertas ehitatud näidisprojekt põhikontseptsioonide tõestamiseks, mis on näidanud, et külgmised kaevud saab täpselt suunata, termosifooni efekt töötab ning toodangut ja kulusid saab eelnevalt usaldusväärsetl ennustada. Projektimaksumuseks tuli natuke alla 7 miljoni euro. (Van Horn, 2020)

Eavori kodulehelt ja uuringute kohaselt on ka Eesti märgitud sobivaks riigiks kus tehnoloogiat rakendada (joonis 10). Mõeldes Eesti tingimustele ja võimalustele on Eavor meile kindlasti huvipakkuv ning potentsiaalne projekt.



Joonis 10. Eavori ahela sobivus maailmas (Eavor, 2020).

6.4 Soojusetootmine soojuspumpade ja kesksügavate sojuskaevude abil

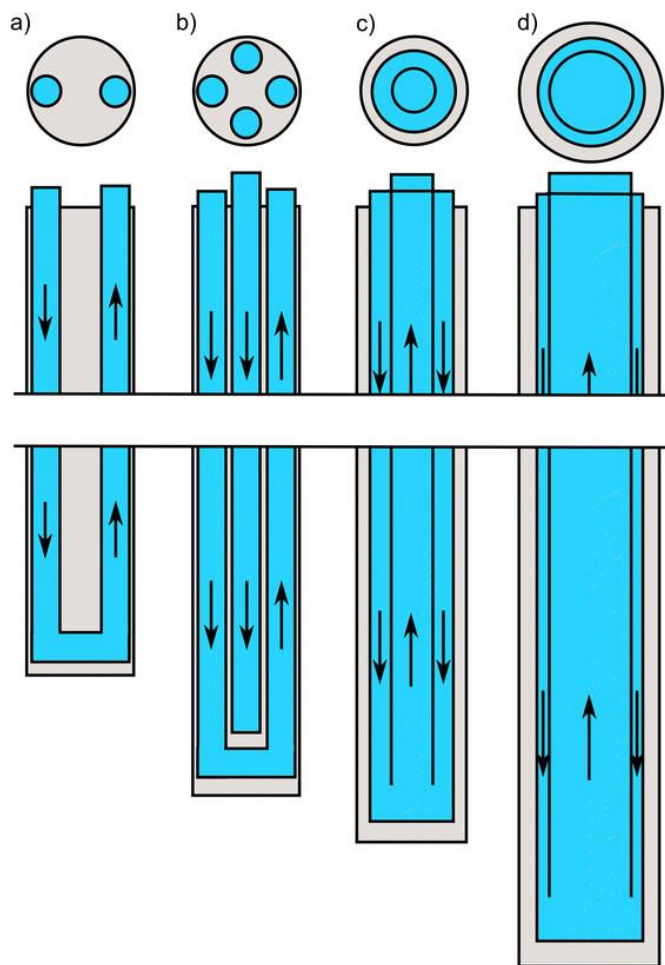
Madalad geotermilised maasoojuspumbad ei vaja tutvustust, nad on levinud ning nende efektiivsus tõestatud, kuid järgmine samm roheline ja puhtama energia poole püüdlemiseks oleks minna sügavamale. Lundi magistritöö (Lund, 2019) ning teiste uuringute kohaselt on energiasäästlikum kasutada ühte sügavat geotermaalist puurkaevu kui mitut madalat.

Kesksügavate geotermaalkaevude (*medium deep boreholes*) alla kuuluvad 1-3 km sügavad tootmiskaevud, kuid mis antud kontekstis vajavad ka soojuspumpa.

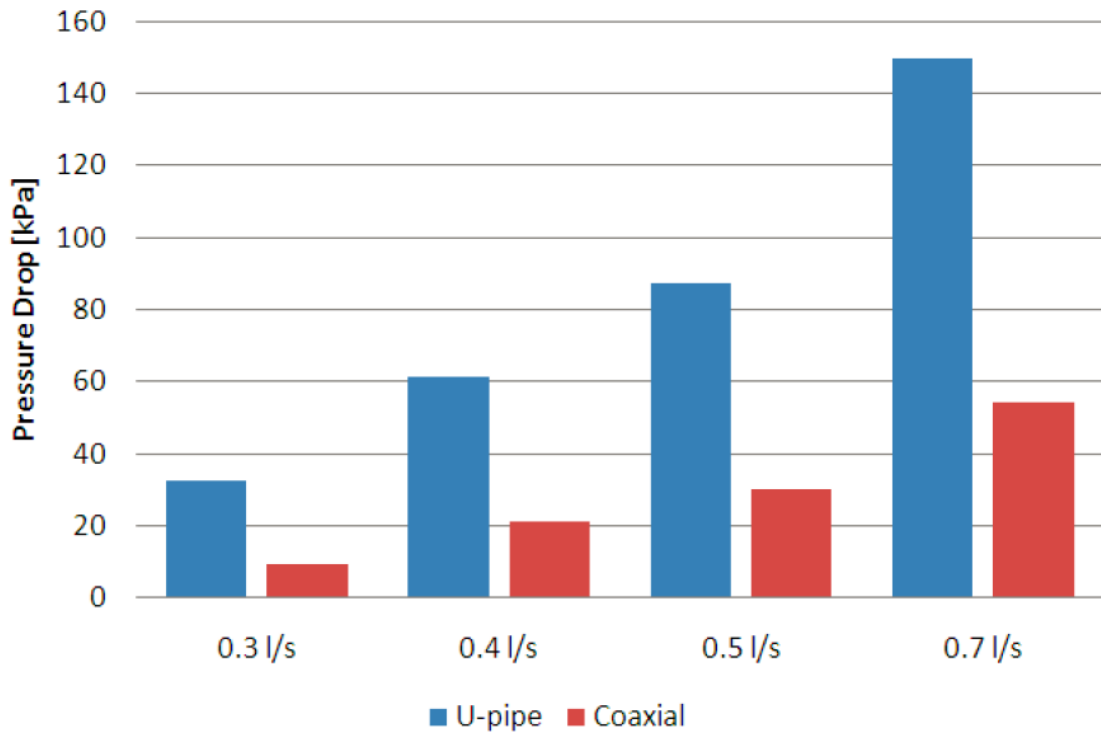
Täpsustuseks on eesolevas tekstis soojusvaheti all mõeldud sojuskaevu sisemust, mitte soojuspumba soojusvahetit. Kesksügavate tootmiskaevude peamine eelis maalähedaste maasoojuspumpade ees on seotud suurema soojusefektiga pikkuse kohta ning kõrgemad temperatuurid, mis vähendavad vajalike puuraukude arvu, et kätte saada sama soojusenergiat. See osutub väga kasulikuks linnapiirkondades, kus teatud kohtades ei ole võimalik kasutada ära nii suurt pindala nagu nõuavad seda maalähedaste maasoojuspumpade ahelad. Kesksügav sojuskaev võimaldab ka suvekuudel soojuse nn „laadimist“ või jahutust. Paraku vajavad selliste kaevudega lahendusi uued väljakutsed, näiteks suurenenud soojusvahetus kaevu edasi- ja tagasivoolu vahel (nn terminiline lühis). Samuti ei pruugi traditsiooniline soojuse kogumise ja ringlustorude süsteem olla sel juhul täielikult rakendatav, näiteks selliste süsteemide jaoks tuleks välja töötada asjakohased kontrollstrateegiad. Plastikust U-torud ei pruugi sobida ning kasumlikud oleks hoopis koaksiaaltorud (Lund, 2019).

6.4.1 Soojusvahetite võrdlus

Soojuskaevude soojusvaheti jaoks võiks kasutada kahte põhilist lähenemist, nimelt U-toru kollektor või koaksiaaltoru (joonis 11). U-torud on levinud ning sobivad teatud tingimustes hästi, kuid sügavuse kasvades tuleb soojuskandja vedeliku voolukiirust suurendada, et kaevust soojust tõhusalt eraldada ning vältida edasi- ja tagasivoolude termilist segunemist. U-toruga võrreldes kasutab koaksiaaltoruga puurkaev voolupinnana suuremat osa puurkaevu ristlõikepinnast ja sobib seega paremini suuremate massivooluhulkadega. Joonis 12 näitab surveangust koaksiaaltorus ja U-torus erinevatel voolukiirustel, kõrgetel voolukiirustel on vahe peaaegu kolmekordne (Holmberg, et al., 2016). Survelangus saab probleemiks U-torude puhul, kus voolukiiruse hoidmiseks peaks suurendama toru diameetrit.

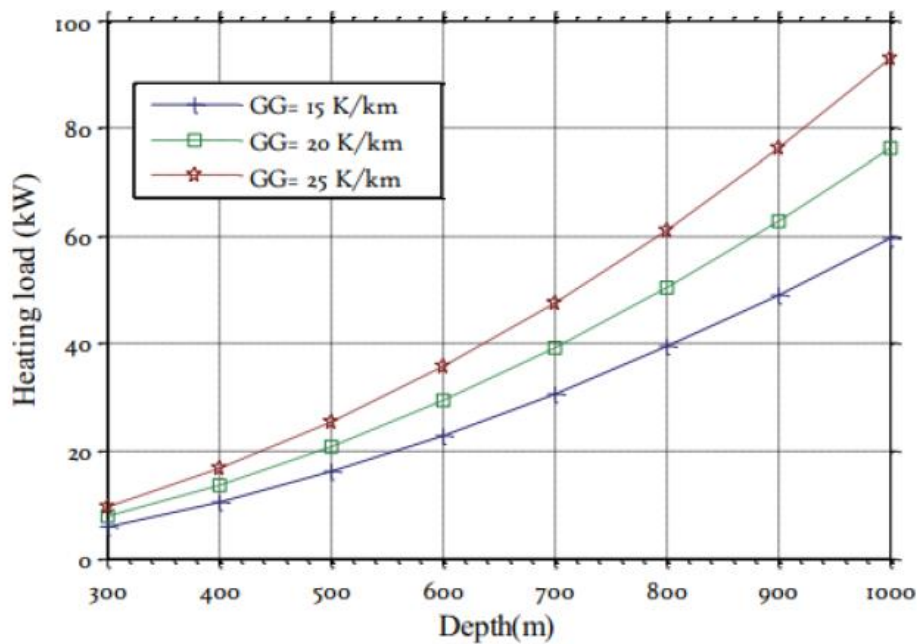


Joonis 11. U-toru (a, b) ja koaksiaaltoru (c, d) soojusvaheti skeem (Raymond, et al., 2015).



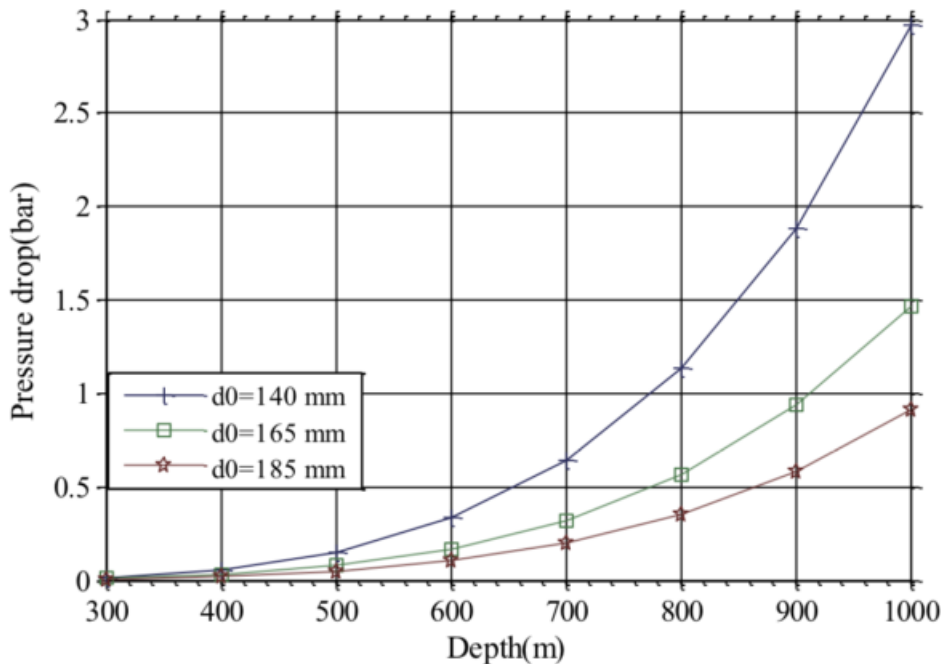
Joonis 12. Survelangus koaksiaal- ja U-torus (Lund, 2019).

Joonis 13 näitab kui kõrget soojusenergiat saab toota koaksiaalse lahendusega sobiva sügavuse ja gradiendiga. Toru diameetris 140mm. Graafikult on veel näha, et kui kahekordistada kaevu sügavust 300 meetrilt 600 m-ni, siis soojuslik efekt suureneb 3,5 korda, edasine samm 900 meetrile toob kaasa peaaegu 8-kordse kasvu.



Joonis 13. Soojuskoormus sõltuvalt sügavusest ja geotermilisest gradiendist (Holmberg, et al., 2016).

Rõhu langus soojusvahetis sõltub nii kaevu läbimõõdust ja pikkusest kui ka voolukiirusest. Joonis 14 illustreerib koaksiaaloru rõhulangust. Võrdluseks võib öelda, et ühe 40 x 2,4 mm U-toru kollektori rõhulangus 300 meetrises puurkaevus on umbes 1,2 baari, st palju suurem kui koaksiaalorul. Teine huvipakkuv aspekt on vajalik pumpamise energia versus kaevu läbimõõt ja pikkus. Tundub, et sügavamal kui 500 m, hakkab vedeliku ringluse vajadus kasvama, see tähendab, et laiematest torudest oleks kasu, et vältida soojuspumba süsteemi efektiivsusvõimsuse koefitsienti vähenemist. (Holmberg, et al., 2016)



Joonis 14. Rõhulangus puurkaevu sügavuse ja läbimõõdu funktsioonina. Simulatsiooni aeg on 5000 h, GG = 20 K / km. (Holmberg, et al., 2016)

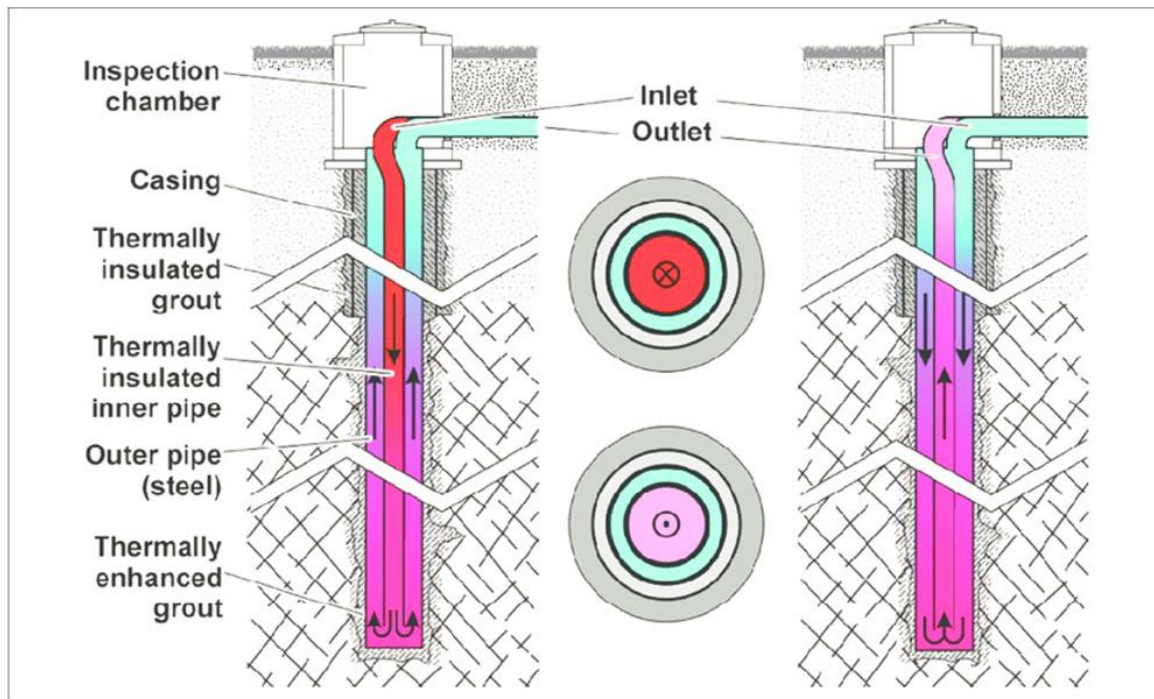
Kokkuvõtteks võib öelda, et allikate ja andmete põhjal on selles töös pealejääja koaksiaalne lahendus, mis näib olevat sobivam soojuse eraldamises.

6.5 Koaksiaalorud

Koaksiaalorude jaoks on erinevaid kujundusi, näiteks kuidas sisemine ja välimine toru ehitatakse. Sisemine toru, mis on sageli valmistatud polüpropüleenist, tasub eraldada, et vähendada soojusülekanne voogude vahel. Praktikas on kasutatud lahendusi, millel on nii terasest toru ja vaakumisulatsiooniga keskitoru (Sliwa, et al., 2017), kuid katsed on näidanud, et isoleeritud süsteem parandab jõudlust selgelt. Vaakumisulatsiooniga torude (VIT) tehnoloogia on huvitav võimalus sügavate kaevude jaoks. See koosneb kahest koaksiaalsest terastorst, mille vahel on vaakum, mis vähendab soojusülekanne sisetoru ja seina vahel. Soojusjuhtivust saab langetada tasemele 0,006–0,0008 W/(mK), võrreldes tavaliste terastorudega 40 W/(mK). (Sliwa, et al., 2018) ning värskemad

tulemused näitavad, et praktilistes projektides võiks soojustakistus 0,02 kuni 0,03 Km/W olla teostatav (Lund, 2019).

Tootmiskaevu eesmärk on tagada soojuspumba jaoks piisavalt stabiilne ja piisavalt kõrge temperatuur. Stabiilse töö tagamiseks on oluline, et soojuskaev oleks tasakaalus, see tähendab, et kaevu kantakse sama palju energiat kui aasta jooksul eraldatakse. Negatiivselt tasakaalus süsteemis jahutab maapind kaevu ümbrust ehk kaevust tulev soojus ei ole piisav, mis omakorda vähendab maasoojuspumba efektiivsust. Sellist olukorda saab vältida, kui kaevu laadida, kasutades ära päikeseenergiat, muud taastuvenergiat või suvesoojust. Sellisel juhul toimib maapind ka pikaajalise soojushoidlana. Teine võimalus on vähendada soojuse ammutamise määra (Holmberg, et al., 2016). Kuna voolusuund tuleb süstimise ajal ümber pöörata, siis tuleb arvestada, et soojus ei ole enam välimiste toruseinadega kontaktis ning see mõjutab koaksiaalkaevu termilist jõudlust. Seetõttu võib mõlemal juhul olla vaja voolutingimusi eraldi reguleerida. Eraldus- ja laadimisstrateegia on illustreeritud joonisel 15.



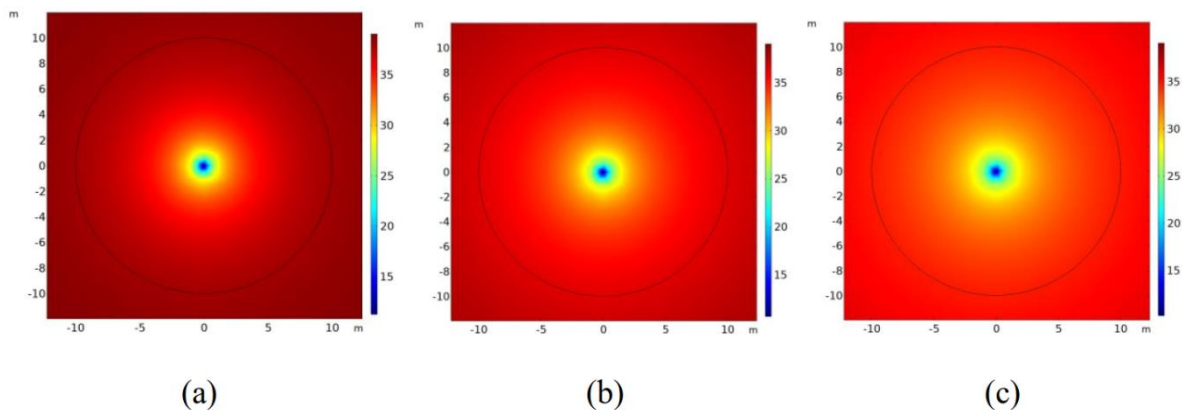
Joonis 15. Koaksiaalse soojusvaheti illustratsioon. Laadimisrežiim, vasak pool ja tühjendusrežiim, parem külg. (Homuth, 2015)

Lisa voolusuundade katsetused on näidanud, et koaksiaalkaevu potentsiaal jahutuse kasutamiseks jääb 500 meetri juurde ehk sügavamate kaevude puhul jahutuspotentsiaal langeb. Seetõttu sobivad sügavad puuraugud pigem soojuse eraldamiseks (Lund, 2019).

6.5.1 Probleemid

Kuna sügavamad maasoojussüsteemid sisaldavad suuri temperatuuride erinevusi, siis väärivad kaalumist temperatuurist põhjustatud ülesvoolud ja põhjavee voolamine. Näiteks konvektiivsed voolud aluskorras on teoreetiliselt võimalikud, kui kivim sisaldab vett ja sobivaid vooluteid. Lisaks veel rõhu erinevused, mis on põhjustatud hüdraulilisest gradientist või temperatuuri erinevusest. Mõju sügavamatel soojuskaevudel, mis ulatuvad siin töös 1-2 km, on see, et looduslike voolude mõju võib piirduda peamiselt suurema poorsusega puuraugu ülemise osaga, kus põhjavee massivoolud ja voolukiirused on suuremad. Eesti tingimustes tuleks arvesse võtta aluspõhja suured kompleksid, mis ulatuvad Lõuna-Eestis 500 meetri sügavusele ning kus võib aktiivne vee liikumine langetada kaevude termilist jõudlust. Seetõttu võiks esimeseks potentsiaaliks maasoojusprojektide paigaks olla Põhja-Eesti, kus need kompleksid lõppevad 200-300 meetri juures. Vett võib veel leida aluskorra mõnekümne meetri paksuse pealmise osa lõhedes ning kohati ka murenemiskoorikus. Näiteks on teada, et kõrge põhjaveetasemega tekivad soojuskaevudes soojusladustamisel lisa energiakaod, kuid kui maapõud kasutada ainult energia eraldamiseks, võib kõrge tase abistada (Homuth, et al., 2016).

Lund simuleeris koaksiaalitorudega oma magistrیتöös (Lund, 2019) nelja erinevat soojuseraldus olukorda: ainult eraldus, eraldus koos taastumisperiodidega, eraldus soojuse süstimistsüklitega ning eraldus ettemääratud võimsusega (joonis 16). Sealt on näha, et probleemiks saab näiteks esimese juhtumi puhul kaevu ümbruse jahenemine ja võimsuse langemine – 25 aasta jooksul konstantsel soojuseraldamisel langeb temperatuur 10 meetri raadiuses ca 10 kraadi.



Joonis 16. Kivimitemperatuur puurkaevu ümbruses juhtumis 1 pärast 1, 5 ja 25 aastat soojuse ammutamist. (a) - (c) näitavad temperatuuri 2 km sügavusel x-y-tasapinnal. (Lund, 2019)

Teiste juhtumite puhul, kus optimeeriti eraldust, jäi siiski probleemiks madalam võimsus. Antud töös küll nendest olukordadest parimat lahendust välja ei pakutud, sest sealkohal tuleb arvestada juurde veel maapõue tingimusi, tarbijanõudlust jms.

7. Geotermaalse energia potentsiaal Eestis

Peamine järeldus seisneb selles, et aluspõhjakihtides olevast põhjaveest ei ole võimalik kõrgematemperatuurilist ressursi rakendada, sest veetemperatuurid ei ületa 15 kraadi. See-eest soojuspumpade kasutuseks sobib vesi hästi ning hetketeadus pakub ka võimalusi nende kasutamiseks tunduvalt sügavamatel projektidel, kus meie tingimustes ei leidu üldse vett.

TSAGS, TGS, ülikuuma kivi maasoojusenergia ja muud süvapuuraugude abil elektri- ja soojuse tootmisviisid võimaldaksid ammutada tunduvalt suuremat energiat kui madalamad (kuni 2 km) puuraugud. Nimetatud tehnoloogiad on juba naaberriikidel ja kaugematel maadel testimisel, kuid konkreetsed edulood veel puuduvad. Seega tundub Eestile mõistlikum vaadata kesksügavate soojuspuuraugude suunas, mis on sarnaselt süvaprojektidega veel algfaasis, kuid omavad tunduvalt vähem riski ja kapitalinõuet. Hetkel eraldatakse Eestis maasoojus maalähedaste maasoojuspumpadega. Kesksügavad puurkaevud oleks järgmine samm, kus temperatuurid on 20–40 °C vahemikus. Sealt oleks saadud energia suurem, sobiks suurtematele kogukondadele ja kasutust saaks rakendada juba tööstuslikult. Olemasolevate andmete põhjal on tõenäoliselt sügaval Põhja–Eesti maapõues kas sarnased või isegi paremad geotermilised tingimused kui meie põhjanaabritel. Ehk Lõuna-Soomes tehtud simulatsioonid ja soojusmäärangud peaksid maasoojusprojektide maaletoomiseks sobima ilusti ka Põhja-Eestile. Teadaolevalt toetub Vantaa kesksügava soojuspuurkaevu projekt põhiliselt Lundi magistritöö (Lund, 2019), Homuth, et al., (2015, 2016) ja Holmberg, et al., (2016) uurimistöodele. Mis tähendab, et projekti õnnestumisel oleks kõik eeldused olemas, et viia läbi vastavaid uuringuid ning liikuda nimetatud tehnoloogia suunas.

Antud töös oli kesksügava koaksiaaltoruga soojuskaevu võimekus lühidalt analüüsitud, kuid kokkuvõtlikult näitavad Lundi ja Holmbergi koostatud andmed, et üks 800 m taoline soojuskaev võib anda rohkem soojust kui 6 tavalist 300 m U-toru. Vantaas Qheati poolt arendatava kesksügava soojuskaevu projektiesitlus lubab 2 km sügavuse koaksiaaltoruga toota soojust ja jahutust 20000 ruutmeetrile ning energiat, mis on võrdeline 40ne tavalise 300 meetrise kaevuga (Clicinnovation, 2019).

8. Kokkuvõte

Andmete poolest on Eestis probleemiks soojusvoogude ja soojusjuhtivuse ebatäpsed uuringud, mis ei anna üldist pilti katsekaevude valikuks. Teatud tehnoloogiliste lähenemiste korral on kõrgenenud soojusvooga alade lokaliseerimine eelduseks, et leida aluskorras kasutamist väärivaid geotermaalseid ressursse. Lisaks on Eestis uurimata aluskorrakivimite temperatuurivälja sõltuvus graniitsete kivimite massidest ja nende radioaktiivsusest põhjustatud kõrgemad temperatuurid. Eesti aluskorra geoloogia, eriti riigi põhjaosas, on sarnane Lõuna–Soomes paljanduva aluspõhjaga. Teave Eesti aluskorra kohta põhineb ainult laiali paigutatud puuraukudel ja piirkondlikel geofüüsikalistel uuringutel. Seetõttu geotermilised ja struktuursed omadused pole üksikasjalikult teada.

Vaadates Eesti geoloogilisi tingimusi kus settekivimite paksus on põhjas 100–200 meetri ulatuses ning lõunas 700–800 m, oleks olemasolevate geotermiliste tehnoloogiatega kõige kulutõhusam alustada uuringuid ja projekte Põhja–Eestis.

Põhjavesi on Eestis peamine joogivee allikas ning selle kvaliteedi säilitamine esmatähtis, seega igasuguste maapõue projektide puhul, kuhu kuulub ka maasoojuse eraldamine, peavad põhjavett mõjutavad tegurid olema arvestatud. Vaadates neid esitletud tehnoloogiaid, siis võib öelda, et Eesti tingimused põhjaveereostuse vältimiseks on väga head. Alumiste põhjaveekihtide piir lõpeb soodsal sügavusel, et saaks soojust eraldada nii lõhedega kui ka lõhedeta ilma, et see mõjutaks veekihtide survet või veekvaliteeti. Kindlasti peab kaevude puhul vee voolamise vältimiseks olema paigaldatud vastupidav ja kvaliteetne mantelatoru. Põhjavee enda mõjuga peab silmas pidama, et soojuskaevu ülemise osa ümbruses asetsevad voolud ei mõjutaks tema termilist jõudlust.

Analüüsitud tehnoloogiatega puhul on hetkel Eestile geotermilise soojuste eraldamiseks kõige potentsiaalikumaks lahenduseks kesksügavad soojuskaevud. Nende teoreetiline efektiivsus on hetkel tugevalt põhjendatud küll paberil, kuid pilootprojektid on käivitatud ning loodetavasti saab ka tõestatud nende praktiline efektiivsus.

Arutelus võiks olla ka kaevandamiseseadus, kus võiks käsitleda maasoojust kui riigivara, mida sarnaselt tuule- või päikeseenergiale võivad maaomanikud kasutada selle eest maksu maksmata.

Praeguses olukorras oleks edasiminekuks eeskätt vaja:

1. Jätkata puuraukudes soojusvoogude korrektset määramist ning temperatuuride mõõtmist.
2. Luua Eesti maapõues paremad temperatuurijaotuse mudelid.
3. Rajada sügavpuurauke sügavusega vahemikku 1000–2500 meetrit.
4. Jälgida Soomes kesksügavate soojuskaevude arendusi ning edu korral modelleerida tema sobivus vastavasse asukohta.

Sarnaselt soojustootmisega tasub tulevikuperspektiivis kaaluda maasoojusega elektritootmist, kuid ka selle tehnoloogia kasutushinnangu koostamiseks on vaja ennekõike süvapuuraukude puurimist.

Tänuavaldused

Täna oma juhendajat Alvar Soesood nõuannete eest töö koostamisel ja Eesti Geoloogiateenistust ning Energiasalve andmete ja kasutusloa jagamisel.

Kasutatud kirjandus

Antics, M. & Sanner, B., 2007. *Status of geothermal energy use and resources in Europe*. Unterhaching, Saksamaa, Proceedings of the European Geothermal Congress 2007.

Arola, T., 2019. *Deep geothermal energy utilisation in Finland - total madness or possibility for successful business*, s.l.: s.n.

ARPA-E, 2018. *ARPA-E*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/millimeter-wave-technology-demonstration-geothermal-direct-energy-drilling>
[Kasutatud 28 5 2021].

Cataldi, R., Hodgson, S. F. & Lund, J. W., 1999. *Stories from a Heated Earth – Our Geothermal Heritage*. Sacramento, California: Geothermal Resources Council, International Geothermal Association, p. 569.

Clicinnovation, 2019. *Clicinnovation*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://clicinnovation.fi/wp-content/uploads/2019/04/QHeat.pdf>
[Kasutatud 15 5 2021].

Eavor, 2020. *Eavor*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://eavor.com/about/technology>
[Kasutatud 1 5 2021].

Energy Trilemma Index, 2020. *World Energy Council*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://trilemma.worldenergy.org/>
[Kasutatud 25 3 2021].

ENMAK, 2016. *Energiamajanduse arengukava aastani 2030*, Tallinn: Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium.

Erkan, K., Gwen, H., Walter, B. & David, B., 2008. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data from exploration boreholes. *Geothermics*, 37(6), pp. 565-585.

ETP, 2008. *Eesti energiatehnoloogia programm (ETP)*, Tallinn: Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus.

Euroopa Komisjon, 2011. *Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja Sotsiaalkomiteele ning Regioonide Komiteele*, Brüssel: Euroopa Komisjon.

Euroopa Komisjon, 2018. *Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Euroopa ülemkogule, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja Sotsiaalkomiteele, Regioonide Komiteele ning Euroopa Investeerimispannangale*, Brüssel: Euroopa Komisjon.

Euroopa Komisjon, 2019. *Euroopa roheline kokkulepe*, Brüssel: Euroopa Komisjon.

Falcone, G. et al., 2018. Assessment of deep geothermal energy exploitation methods: The need for novel single-well solutions. *Energy*, Köide 160, pp. 54-63.

Holmberg, H., Acuna, J., Naess, E. & Sonju, O., 2016. *Thermal evaluation of coaxial deep borehole exchangers*, s.l.: Department of energy and process engineering, Norwegian University of Science and Technology.

Homuth, S., 2015. *Coupled renewable energy systems for seasonal high temperature heat storage via medium deep borehole heat exchangers*. Melbourne, Australia, World Geothermal Congress.

Homuth, S., Hornich, W. & Bär, K., 2016. *Down-the hole water powered hammer drilling for medium deep geothermal energy systems*. Strasbourg, European Geothermal Congress.

Huttrer, W. G., 2020. *Geothermal power generation in the world 2015-2020 update report*, Reykjavik: s.n.

Jõelet, A., 2007. *Soojuspuuraukude mõju keskkonnale*. Tartu: Aruanne, Tartu Ülikool.

Jõelet, A. & Kukkonen, T., 2002. Physical properties of Vendian to Devonian sedimentary rocks in Estonia. *GFF*, 124(2), p. 65-72.

Lund, A., 2019. *Analysis of deep-heat energy wells for heat pump systems*, Espoo: Aalto University.

Lund, J. W. & Toth, A. N., 2020. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. pp. 4,5,6.

Makuc, S. & Chimowitz, E. H., 2020. *Process waste heat recovery with a supercritical carnot engine*, s.l.: s.n.

MKM, 2019. *Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium*. [Võrgumaterjal] Available at: <https://www.mkm.ee/et/tegevused-eesmargid/energeetika/soojusmajandus> [Kasutatud 10 4 2021].

Morgan, P., 2014. Continental Heat Flow.

Pirrus, E., 1999. *Maavarade geoloogia*. Tallinn: TTÜ Kirjastus.

Raukas, A. & Teedumäe, A., 1997. *Geology and Mineral Resource of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers, pp. 1-436.

Raymond, J., Mercier, S. & Nguyen, L., 2015. Designing coaxial ground heat exchangers with a thermally enhanced outer pipe. *Geothermal Energy*, Köide 3.

Reinsch, T. et al., 2017. Utilizing supercritical geothermal systems: a review of past ventures and ongoing research activities. *Geothermal Energy*, 5(16).

Richter, A., 2020. *Think geoenergy*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://www.thinkgeoenergy.com/e-on-plans-geothermal-district-heating-project-in-malmo-sweden/>
[Kasutatud 10 5 2021].

Richter, A., 2021. *Think Geoenergy*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-heat-for-malmo-sweden-from-a-depth-of-7000m/>
[Kasutatud 13 5 2021].

Sliwa, T. et al., 2018. Potential application of vacuum insulated tubing for deep borehole heat exchangers. *Geothermics*, Köide 75, pp. 58-67.

Sliwa, T., Kruszewski, M., Sapinska-Sliwa, A. & Assadi, M., 2017. The application of vacuum insulated tubing in deep borehole heat exchangers. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 34(2), pp. 597-617.

Soesoo, A., 2012. Ülevaade Eesti geotermilisest. pp. 1-45.

Statistikaamet, 2020. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://www.stat.ee/et/uudised/eesti-elektritootmine-liigub-keskkonnasobralikus-suunas>
[Kasutatud 20 3 2021].

The geothermal communities project, 2019. *The geothermal communities project*. [Võrgumaterjal]
Available at: https://geothermalcommunities.eu/assets/presentation/6.Course_GT.pdf
[Kasutatud 15 04 2021].

Think Geoenergy, 2021. *Think Geoenergy*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://www.thinkgeoenergy.com/map/>
[Kasutatud 25 4 2021].

Tiwari, N. G. & Ghosai, K. M., 2004. *Renewable Energy Resources: Basic Principles and Applications*. s.l.: Alpha Science International, Limited.

U.S. Department of energy, 2019. *Geovision: Harnessing the heat beneath our feet*, s.l.: s.n.

Van Horn, A. J., 2020. *New opportunities and applications for closed-loop geothermal energy systems*, s.l.: s.n.

Yan, C. & Deng, J., 2013. Borehole stability in high-temperature formations. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(6).

Юрима, М. & Эрг, К., 1984. *Геотемпературное поле Эстонии на мелкомасштабных*. Tallinn: Академия наук ЭССР, Институт геологии, р. 44.

Юрима, М. Х., 1984. Применение методов геогидротермии для изучения водовмещающей толщи Эстонии. *Методы анализа и обработки гидрогеологических данных для прогноза ресурсов подземных вод*. Tallinn: L.K. Wallner, pp. 216-221.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Markus Maido

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Eesti geotermaalenergia kasutuspotentsiaali analüüs, mille juhendaja(d) on Alvar Soesoo

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.

/Digiallkirjastatud/

/ 05.06.2021 /

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.