

Ella Kallio

# ENERGIAPAALUJEN TEHOKKUUDEN MITTAUS JA ANALYYSI

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Työelämäprofessori Tero Joronen

Maaliskuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Ella Kallio: Energiapaalujen tehokkuuden mittaaminen ja analyysi  
Energy pile efficiency measurement and analysis  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Maaliskuu 2022

---

Ilmastonmuutoksesta johtuen hiilineutraaliuden ja ympäristöystävällisten energiantuotantomuotojen ja lämmitysratkaisujen merkitys on korostunut. Maalämpö on kestävä rakennusten lämmitystapa. Erilaisia maalämpöratkaisuja ovat maalämpökaivot, pintakeräysputkistot ja energiapaalut. Tässä työssä on keskitytty tarkastelemaan energiapaaluja. Työn tarkoituksena on selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat energiapaalujen tehokkuuteen ja miten paalujen toimintaa voidaan tutkia. Tutkittavana oli myös energiapaalujen käyttö korkeanlämmön varastona.

Energiapaalu on eräs maalämpöratkaisuista, jota käytetään usein useamman paalun muodostamien energiapaalukenttien avulla vastaamaan rakennuksen lämmitys- ja viilennystarpeisiin. Energiapaalut sijoitetaan maan pintakerrokseen ja tyypillisesti ne ulottuvat 10–30 m syvyyteen. Energiapaaluja voidaan luokitella niissä käytettyjen materiaalien ja niissä olevan lämmönkeruupiirin mukaan. Yleisin energiapaalutyyppi on U-putkipaalu, jossa keruusilmukka muistuttaa U-kirjainta. Muita energiapaalutyyppiä ovat esimerkiksi kaskadiputkipaalu ja spiraalinen paalu.

Energiapaalujen toimintaan vaikuttavat paalussa käytetyt materiaalit sekä paalun dimensiot. Lisäksi vaikutusta on paalussa kiertävän lämpöaineen virtausmäärällä sekä paalua ympäröivällä maa-aineksella. Paalun dimensiot vaikuttavat suoraan lämmönsiirtopinta-aloihin ja materiaalien vaikutus näkyy niiden lämmönjohtavuuksien ja muiden termisten ominaisuuksien kautta.

Paalujen toimintaa pyritään arvioimaan erilaisten pilottimittausten avulla. Paljon käytetty mittaus tyyppi on TRT-mittaus (eng. thermal response test). TRT-mittauksessa ollaan kiinnostuneita energiapaalun termisestä vasteesta. TRT-mittauksessa usein syötetään vakiovirtauksista ja -lämpöistä nestettä ja tutkimalla virtauksen paluulämpötilan muutosta arvioidaan paalussa tapahtuvaa lämpötilan muutosta. Energiapaalumittauksissa voidaan tutkia lämpötilavasteen lisäksi myös esimerkiksi virtausmäärän vaikutusta saatavaan lämpötehoon. Osassa energiapaaluille tuotetuissa tutkimuksissa on oltu kiinnostuneita myös siitä, miten maan lämpötila muuttuu energiapaalun käytön seurauksena.

Osana tätä kandidaatintyötä suoritettiin pilottimittaus yksittäiselle U-putkipaalulle kahdessa eri mittausympäristössä. Toinen mittausympäristö oli kostea savimaa ja toinen kuivempi harju. Mittaus koostui molemmissa ympäristöissä kahdesta vaiheesta. Ensimmäisenä paaluille suoritettiin latausjakso, jonka aikana paaluun syötettiin noin 60 asteista vettä. Latausjakson aikana tarkasteltiin sitä, miten nopeasti paluuvirtauksen lämpötila tasaantuu ja saavutetaan lämmönsiirrolinen tasapainotila. Paalua ladattiin noin viikon verran. Molemmissa ympäristöissä ero meno- ja paluuvirtauksen välillä jäi noin 20 asteeseen.

Latausjakson jälkeen virtaavan veden lämmittäminen lopetettiin, mutta virtausta pidettiin edelleen käynnissä. Tässä vaiheessa mittausta oltiin kiinnostuneita siitä, miten nopeasti paluu- ja menovirtauksen arvot asettuvat samaan vakioarvoon. Molemmissa ympäristöissä tämä tasoittuminen tapahtui hyvin nopeasti, mutta paalun lämpötila oli yli 5 astetta korkeampi kuin lämpötila ennen latausjaksoa.

Jos suoritettu pilottimittaus haluttaisiin toistaa, kannattaisi sitä hieman muokata. Mittauksessa käytetty mittalaitteisto oli hyvin alkeellinen, erityisesti virtausmittari. Jos haluttaisiin saada tarkempia tuloksia, tulisi käyttää luotettavampia mittalaitteita. Mittauksen kesto voisi myös pidentää, jotta saataisiin paremmin näkyviin, miten pitkällä aikavälillä lämmönvarastointi paaluun onnistuu. Kolmas muutettava seikka mittauksessa on käytetty virtausmäärä. Toteutetussa mittauksessa se oli keskimäärin noin 20 l/h. Parempia tuloksia haluttaessa voisi sen nostaa, jopa 2 l/min.

Avainsanat: Energiapaalu, TRT-mittaus, maalämpö, lämmönvarastointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ENERGIAPAALUJEN RAKENNE JA TOIMINTA .....	3
2.1 Paalujen rakenne .....	3
2.2 Eri paalutyypit .....	4
2.3 Lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät .....	5
3. ENERGIAPAALUN TOIMINNAN JA SUORITUSKYVYN ANALYSOINTI .....	7
3.1 TRT-tutkimuksen toteuttaminen ja mittalaitteisto .....	7
3.2 Toteutettuja TRT-tutkimuksia .....	9
4. TESTAUS PILOTTILAITTEISTOLLA .....	11
4.1 Mittausjärjestely ja laitteisto .....	11
4.2 Mittaustulokset .....	14
4.3 Suorituskyvyn analyysi .....	17
4.3.1 Paalun tehon laskenta .....	17
4.3.2 Lämpövaraston mallinnus .....	19
4.4 Tulokset ja pohdinta .....	21
5. YHTEENVETO .....	22
LÄHTEET .....	23

# 1. JOHDANTO

Ympäristöystävällisyys ja hiilineutraalius ovat nykyään tärkeitä arvoja. Energian- ja lämmöntuotannon päästöjä tulisi tulevina vuosina vähentää, jotta YK:n ilmastosopimuksessa asetetut päästövähennystavoitteet saavutettaisiin. Suomessa rakennusten lämmityksestä aiheutuu noin neljännes kaikista hiilidioksidipäästöistä (Ilmasto-opas.fi, 2018). Yksi tapa vähentää lämmityksen päästöjä on siirtyä käyttämään kestävämpiä lämmitysmuotoja, kuten maalämpöä.

Maalämpö on ympäristöystävällinen lämmöntuotantotapa, joka perustuu maahan varastoituneeseen auringon lämpöenergiaan. Maalämpöä voidaan nykyteknologialla hyödyntää kolmella eri tavalla. Eniten käytetty tapa on maalämpökaivot, joita on noin 60 % maalämpöratkaisuista. (Motiva, 2020) Lämpökaivot voivat syvimmillään olla jopa 300 metrin syvyisiä. Lämpökaivojen etu on niiden vaatiman maapinta-alan vähyyys, mutta niiden rakentaminen on kallista. (Juvonen ja Lapinlampi, 2013) Toiseksi yleisin maalämpöratkaisu on pintakeräysputkisto eli maapiiri; niitä on noin 30 % maalämpöratkaisuista (Motiva, 2020). Maapiiri kaivetaan noin 1,5 metrin syvyyteen. Pientalon lämmittämiseen tarvitaan noin 500 metriä lämmitysputkea ja putkimetriä kohden vaaditaan 1,5 neliometriä maapinta-alaa. (Juvonen ja Lapinlampi, 2013) Pientalon lämmittämiseen vaadittu maapinta-ala on siis 750 neliometriä, joten kyseisen ratkaisun käyttäminen vaatii ison tontin.

Kolmas maalämmön hyödynnystapa on lämpöaktiiviset perustukset (eng. thermoactive foundation) eli energiapaalut. Energiapaaluissa on paljon yhtäläisyyksiä perinteisiin lämpökaivoihin, mutta ne eivät ulotu yhtä syväälle kuin perinteiset maalämpökaivot. Energiapaalujen halkaisija osassa ratkaisuista on suurempi kuin maalämpökaivolla. (Krarti, 2015) Jos rakennus vaatii perustuksikseen paalutuksen, tulevat energiapaalut yleisesti paljon halvemmaksi rakentaa kuin lämpökaivo, sillä niitä varten ei tarvitse porata erillistä sijoituspaikkaa. Energiapaalut ulottuvat yleensä vain noin kahdenkymmenen metrin syvyyteen ja yhdessä rakennuksessa paaluja on useampia niin sanottuna energiapaalukenttänä.

Tässä työssä energiapaalulla tarkoitetaan halkaisijaltaan noin 400–1000 mm olevia ja noin 10–30 m syvyyteen meneviä maalämmönvaihtimia. Energiapaalut ovat yleensä osana rakennuksen perustuksia, mutta tässä työssä energiapaalutermiä käytetään myös erillisistä paalukentistä, joiden dimensiot ja rakenne ovat samanlaiset kuin aiemmin esitetty.

Työn tarkoituksena on suorittaa kirjallisuuskatsaus, jolla selvitetään energiapaalujen toimintaa. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi osana työtä suoritetaan mittaus yksittäiselle energiapaalulle. Mittauksessa on tarkoitus selvittää, miten paalu toimisi kausittaisena korkeanlämmönvarastona. Työssä tarkastellaan paalujen termisiin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä. Työssä perehdyttiin myös mittausmenetelmiin, joilla näitä ominaisuuksia analysoidaan. Keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat:

- Mitkä tekijät vaikuttavat energiapaalujen suorituskykyyn?
- Miten paalujen suorituskykyä mitataan?
- Miten savimaa ja hiekkaharju eroavat toisistaan paalujen sijoitusalueina?
- Voidaanko energiapaaluja käyttää korkeanlämmönvarastoina?

Työn rakenne on seuraava. Aluksi luvussa 2 kerrotaan energiapaalujen rakenteesta sekä toimintamekanismista. Paaluja verrataan perinteisiin maalämpökaivoihin, sillä näiden rakenne on samantapainen ja mallintamista suoritetaan välillä maalämpökaivojen mallintamisen tapaan. Luvussa 2 esitellään myös energiapaalujen toimintaan vaikuttavat tekijät. Luku 3 keskittyy esittelemään, miten energiapaaluja voidaan tutkia ja millaisia aiempia mittauksia paaluihin liittyen on toteutettu. Luvussa 4 esitellään tehdyt energiapaalumittaukset pilottilaitteistolla.

## 2. ENERGIAPAALUJEN RAKENNE JA TOIMINTA

Tässä luvussa käsitellään energiapaalujen rakennetta sekä paalujen toimintaperiaatteita. Alaluvussa 2.1 esitellään paalujen rakenne ja perusosat. Luvussa 2.2 selitetään, millaisia erilaisia paalutyyppejä on käytössä. Viimeisessä alaluvussa kerrotaan paalun toimintaan vaikuttavista tekijöistä.

### 2.1 Paalujen rakenne

Energiapaalut vastaavat rakennuksen lämmitys- ja viilennystarpeisiin. Energiapaalujen toimintamekanismi on hyvin samanlainen kuin tavanomaisissa maalämpökaivoissa. Merkittävin ero on näiden maalämpöjärjestelmien erilainen koko (esimerkiksi paalun ja keruuputkiston halkaisijat) sekä asennussyvyys. Lisäksi merkittävänä erona näiden kahden maalämpöratkaisun välillä on se, että energiapaaluja on yleensä useampia niin kutsuttuna energiapaalukenttänä. Maalämpökaivoja on yleensä vain yksi tai muutama. Energiapaaluja voidaan käyttää myös osana rakennuksen perustuksia, josta johtuen uuteen paalutuksen vaativaan rakennukseen tulevat energiapaalut usein maalämpökaivoa halvemmaksi, sillä ne eivät tarvitse erillistä kaivuuta tai poraustyötä. (Krarti, 2015)

Energiapaalussa on yleensä betoniin valettu teräsputkisilmukka, jonka sisällä lämpöaine kulkee. (Krarti, 2015) Lämpöaineena käytetään tyypillisesti vettä, johon voidaan sekoitettu jäätymisenestoainetta. Eniten käytetään veden ja glykolin liuosta. Sen lisäksi, että glykoli madaltaa jäätymislämpötilaa, se myös estää korroosiota putkessa. Energiapaalu liitetään yhteen lämpöpumpun kanssa. Lämpöpumpulla nostetaan maasta saatavaa lämpötilaa korkeammaksi, jotta sitä voidaan käyttää sisäilman lämmittämiseen. (Suryatriyastuti, Mroueh ja Burlon, 2012)

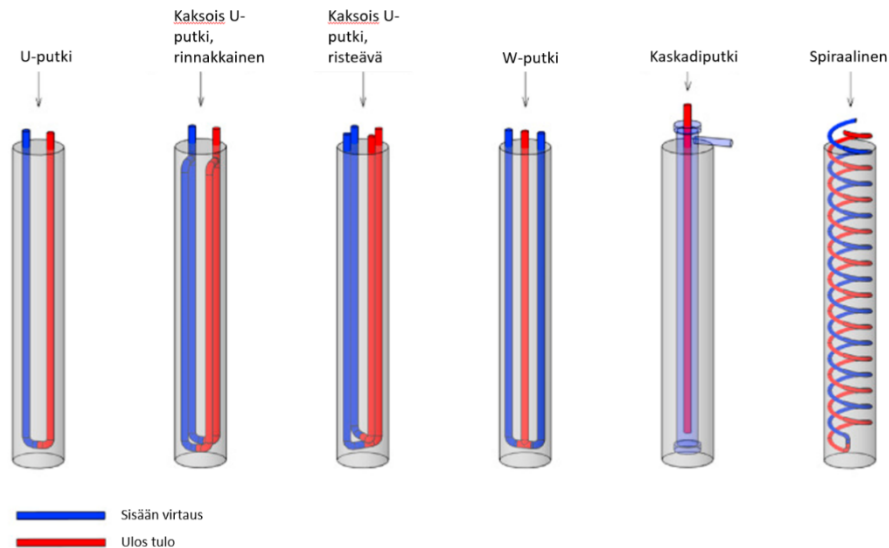
Energiapaalut eroavat mitoiltaan aika paljon maalämpökaivoista. Betoniin valetut energiapaalut ovat tyypillisesti noin 10–30 metriä pitkiä ja paalujen halkaisijat ovat noin 400–1000 millimetriä. Betoniset paalut ovat huomattavasti maalämpökaivoja lyhyempiä (30–150 m), mutta paalut ovat leveämpiä kuin lämpökaivot (100–200 mm). (Luo *ym.*, 2016) Betonisten energia paalujen lisäksi on olemassa myös teräksisiä energiapaaluja. Näissä paaluissa on pelkkä teräksinen keruuputkisto upotettuna maahan. Paalua ei ole siis täytetty betonilla, jolloin sen koko riippuu ainoastaan keruuputkiston mitoista. Keruuputkiston halkaisijat ovat tyypillisesti 20–100 mm (Krarti, 2015).

Kuten sanottua, energiapaalut sijaitsevat maan pintakerroksissa, jolloin niitä ympäröivä maa-aines on pehmeämpää ja kosteampaa kuin syvemmillä. Kosteassa maassa on korkeampi lämmönjohtavuus kuin kuivassa, mikä tehostaa energiapaalujen lämmönsiirtoa.

(Ghuman ja Lal, 1985) Betonisissa paaluissa betoni itsessään tehostaa lämmönsiirtoa sillä betonin lämmönsiirtokerroin on 1,73 W/mK kun taas maan lämmönsiirtokerroin on tyypillisesti vain noin 1 W/mK luokkaa (Krarti, 2015).

## 2.2 Eri paalutyypit

Energiapaaluja jaotellaan lämmönkiertosilmukoiden muotojen ja määrien mukaan. Eri-laisia paalutyyppejä on esitetty kuvassa 1. Yleisimmin tutkittu ja käytetty paalutyyppi on U-putkipaalu, joka on esitetty kuvassa vasemmalla. U-putkipaalussa on yksinkertainen lämmönkeruusilmukka. Paalun yleisyys johtuu, paalun rakenteen yksinkertaisuudesta ja helposta asennuksesta (Zhao, Chen ja Liu, 2016). U-putkipaalun yleisyyden takia se on myös tämän työn keskiössä, ja luvussa 4 esitetty pilottimittaus on tehty U-putkipaalulle.



**Kuva 1 Eri paalutyypien rakenteet (Fadejev ym., 2017) (selitteet käännetty suomeksi)**

Kaskadiputkipaalu (eng. indirect double pipe) on esitetty kuvassa 1 toisena oikealta. Kuten kuvasta nähdään, kaskadiputkipaalussa ulostuloputki on sisäänmenoputken sisällä. Kaskadiputkipaalun yksi eduista on se, ettei se vaadi kovin suurta halkaisijaa. Kaskadiputkipaalun rakenteen takia se ei välttämättä vaadi ulkoista pumppausta, koska lämmin neste nousee luonnollisen konvektion vaikutuksesta kapeammassa putkessa ylöspäin. Osassa kaskadiputkipaaluista virtaus voi olla myös toteutettu toisin päin.

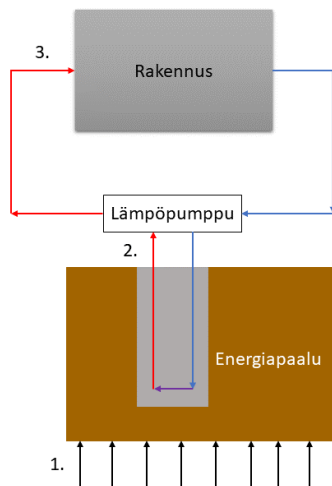
Kolmas tarkemmin esiteltävä paalutyyppi on spiraalinen paalu. Se on esitetty kuvassa 1 oikealla. Spiraalinen paalu ei ole kovin yleisesti käytetty. Sitä on lähinnä tutkittu ja mallinnettu matemaattisesti. Spiraalisessa paalussa lämmönsiirtopinta-ala keruuputken

ja paalun välillä on suurin ja spiraalisella paalulla on mahdollista saada eripaalutyypeistä suurin lämpömäärä siirrettyä. (Fadejev *ym.*, 2017)

Kuvassa 1 on edellä mainittujen paalujen lisäksi esitetty kaksi erilaista mahdollista kaksois-U-putkipaaluja sekä W-putkipaalu. Kyseisiä paalutyyppejä ei tässä työssä juurikaan käsitellä, mutta niiden rakenne on hyvä tietää, sillä osassa luvussa 4 käsitellyissä energiapaalumittauksissa on tutkittu niitä.

### 2.3 Lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät

Energiapaalujen toiminta voidaan jakaa kolmeen lämmönsiirrolliseen kiertoon, jotka on näkyvissä kuvassa 2. Ensimmäinen kierrosta on maa-aineksessa tapahtuva. Tässä kierrossa lämpöä siirtyy maasta paaluihin tai päinvastoin ja maan lämpötila muuttuu maanalaisten virtausten ja ilman lämpötilojen muutoksen seurauksena. Toinen kierto on itse paalussa tapahtuva. Tässä kierrossa lämmönkeruunesteeseen siirtyy lämpöä paalusta tai päinvastoin. Kolmas kierto on lämmönsiirto rakennuksen ja lämpöaineen välillä. Lämpöpumppu on toisen ja kolmannen kierron välissä. (Suryatriyastuti, Mroueh ja Burlon, 2012) Tässä työssä keskitytään ensimmäiseen ja toiseen kiertoon.



**Kuva 2 Eri lämmönsiirrolliset kierrot energiapaalussa**

Ensimmäiseen vaiheeseen vaikuttaa suuresti maa-aineksen ominaisuudet. Lämmönsiirron ja paalujen toiminnan kannalta tärkeitä suureita ovat lämpökapasiteetti ja lämmönjohtokyky. Lämpökapasiteetti kuvaa materiaalin kykyä varastoida lämpöenergiaa. Mitä suurempi materiaalin lämpökapasiteetti on, sitä enemmän sillä on potentiaalia luovuttaa/vastaanottaa lämpöä samalla lämpötilan muutoksella. Maa-aines koostuu kiinteistä par-



tikkeleista, kaasusta ja vedestä. Veden määrällä on suuri vaikutus maa-aineksen lämpökapasiteettiin. Hyvin märällä maalla lämpökapasiteetti voi olla jopa viisikertaa kuivaa maata korkeampi. (Suryatriyastuti, Mroueh ja Burlon, 2012)

Toisessa kierrossa paalun rakenteella ja ominaisuuksilla on merkitystä. Lämmönsiirtoon vaikuttavia paalun ominaisuuksia on: käytetty paalutyyppe (U-putkipaalu, kaskadiputki-paalu yms.), paalun ja keruuputken materiaali, paalun dimensiot kuten syvyys ja halkaisija, käytetty lämpöaine, lämpöaineen virtausmäärä sekä sisäänmeno lämpötila. (Fadjev *ym.*, 2017)

Paalun keruuputkiston rakenne vaikuttaa suoraan virtaavan nesteen kosketuspintaan maa-aineksen kanssa, sekä virtausmäärään. Suurempi virtausmäärä ja lämmönsiirto-pinta-ala tehostavat lämmönsiirtoa. Paalussa käytettävät materiaalit vaikuttavat lämmönsiirtoon niiden termisten ominaisuuksien kautta. Eri materiaaleilla on eri lämmönjohtavuuksia, kuten jo luvussa 2.1 todettiin.

### 3. ENERGIAPAALUN TOIMINNAN JA SUORITUSKYVYN ANALYSOINTI

Tässä luvussa esitellään erilaisia energiapaalujen mallintamiseen käytettäviä mittauksia. Erityisesti keskitytään tarkastelemaan TRT-tutkimuksia (eng. thermal response test). Alaluvussa 3.1 on esitetty yleisesti mittausmenetelmiä ja luvussa 3.2 esitellään muutama yksittäinen toteutettu mittaus ja niiden keskeisimpiä tuloksia.

#### 3.1 TRT-tutkimuksen toteuttaminen ja mittalaitteisto

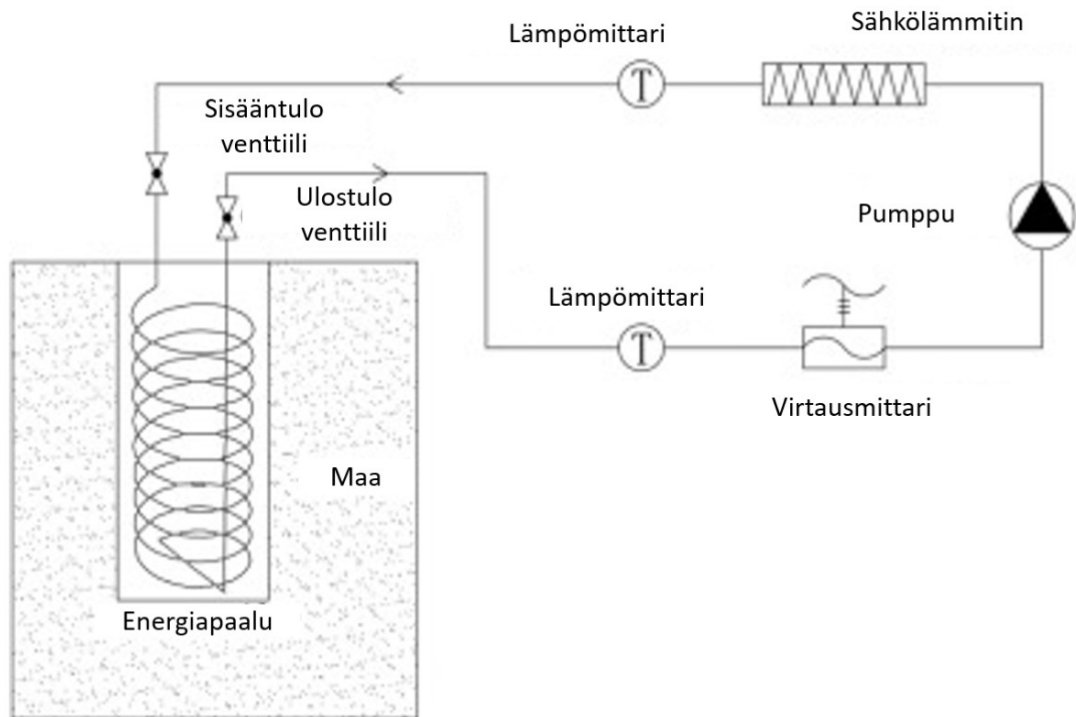
Jotta energiapaalujen lämmitystehoja pystytään arvioimaan, rakennetaan usein aluksi testipaaluja. Testipaaluille tehdään mittauksia, joiden avulla arvioidaan paalun lämmitys- tai viilennystehoa. Mittauksilla voidaan myös tutkia maa-aineksessa tai paalussa tapahtuvia lämpötilan muutoksia, jotka johtuvat paalujen käytöstä. Viilentäminen lämmittää maa-ainesta ja paalua, kun taas lämmitysjakson aikana paalu viilenee. Kun paalua käytetään viilennys tarkoitukseen, voidaan puhua myös latausjaksosta, sillä paaluun ja maahan varastoituu tällöin lämpöä, jota voidaan hyödyntää lämmitysjakson aikana. Lämmitysjaksolle voidaan vastaavasti käyttää myös nimitystä purkujakso.

Energiapaalujen lämmitystehoja tutkittaessa mitattavia suureita on usein paalussa kulkevan nesteen sisäänmeno- ja ulostulolämpötila sekä virtauksen suuruus. Mittausta, jossa kyseisiä suureita mittaamalla, tutkitaan maalämpöjärjestelmän lämmitystehoa tai lämmönvastusta, kutsutaan TRT-tutkimukseksi. TRT-tutkimus on terminä laaja ja välillä puhutaan TRT-mittauksesta myös silloin, kun on mitattu esimerkiksi lämpötiloja tietyillä syvyyksillä ja etäisyyksillä paalusta, kun on tutkittu energiapaalun käytön vaikutuksia maan lämpötilaan. (Zhao, Chen ja Liu, 2016; Park *ym.*, 2017) Olennaisinta TRT-tutkimukselle on kuitenkin se, että siinä tutkitaan, miten paalu ja maa-aines reagoivat siihen aiheutettuihin lämpötilan muutoksiin.

TRT-mittauksille tyypillistä on se, että paalun menovirtauksen lämpötilaa ja virtausmäärää pidetään vakiona. Mittauksessa ollaan kiinnostuneita siitä, miten lämpötila muuttuu paalussa eli millainen lämmönvaste paalulla on. Paalun lämpötilaa tutkitaan usein mittaamalla meno- ja paluuvirtauksen lämpötilaa. TRT-mittauksen kesto tulee olla sellainen, että paalun lämpökapasiteetilliset ominaisuudet tulevat ilmi. Yleensä riittävä ajanjakso tähän on 72 h. (Fadejev *ym.*, 2017)

Kuvassa 3 on esitetty TRT-mittauksen kannalta tärkeimmät osat, joita on lämpömittarit, virtausmittari, pumppu ja lämmityslaitte. Lämpömittarit on asetettu mitaamaan nesteen sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja. Lämmityslaitteen tarkoituksena on pitää paalussa

kiertävän nesteen sisäänmenolämpötilaa haluttuna. Kyseisessä mittalaitteistossa on käytetty sähköistä lämmitintä, mutta sen tilalla voisi käyttää myös esimerkiksi riittävän suurta vesiallasta tasaamaan lämpötilaa. Kuvassa 3 tutkittavana on ollut spiraalinen paalu, mutta vastaavanlainen mittausjärjestelmä toimii myös muille energiapaalutyypeille. Kyseisessä tutkimuksessa on laitteistossa ollut myös venttiilit ennen ja jälkeen paalun. Venttiilien avulla pystytään säätämään virtauksen suuruutta. (Zhao, Chen ja Liu, 2016)



**Kuva 3 TRT mittaussysteemi (Zhao, Chen ja Liu, 2016) (selitteet kuvassa suomenneetu)**

TRT-mittausta suunniteltaessa on otettava huomioon, mitä sen avulla halutaan tutkia. Jos esimerkiksi halutaan tutkia eri keruuputkityyppisten paalujen eroja, on tärkeää minimoida kaikki muut muuttujat. Tällaisessa mittauksessa paalujen mittojen kannattaa olla mahdollisimman pitkälle samoja (paalun syvyys, halkaisija, keruuputken halkaisija). Samoin eri paalut kannattaa valmistaa samasta materiaalista ja suorittaa mittaukset samoissa ympäristöolosuhteissa. (Zhao, Chen ja Liu, 2016) Jos taas tutkinnan alla on virtausmäärän vaikutus paalun toimintaan, kannattaa käyttää samaa paalua ja vaihdella siinä kulkevaa virtausmäärää.

### 3.2 Toteutettuja TRT-tutkimuksia

Ensimmäinen esiteltävä tutkimus käsittelee spiraalisen energiapaalun termisten ominaisuuksien mallinnusta. Mittauksella oli tarkoitus selvittää lämmitys- ja viilennysajan vaikutusta lämpötilavasteeseen. Mittaus toteutettiin kuvan 3 mukaisella kytkennällä. Mittausta tehtiin kolmen vuoden ajan. Tänä aikana oli kolme viilennys- ja lämmityskautta. (Zhao, Chen ja Liu, 2016)

Mittauksen alussa vettä pumpattiin paaluun ilman, että sähkölämmitin oli päällä. Sisäänmeno- ja ulostulolämpötilan odotettiin asettuvan samaan arvoon, jonka oletettiin olevan maan häiritsemätön lämpötila. Kun tasapainolämpötila oli saavutettu, lämmitin kytkettiin päälle, jolloin paalussa kiertävän veden ja paalun välillä alkoi siirtyä lämpöä. (Zhao, Chen ja Liu, 2016)

Mittauksissa huomattiin, että paalussa kiertävän nesteiden lämpötila oli korkeimmillaan viilennyskauden lopussa. Silloin menovirtauksen lämpötila oli 27,92 °C ja paluuvirtaus 24,00 °C. Matalimmillaan lämpötilat olivat lämmityskauden lopussa, jolloin menovirtauksen lämpötila oli 3,08 °C ja paluuvirtaus 7,00 °C. (Zhao, Chen ja Liu, 2016) Tämä selittyy sillä, että viilennyskaudella yleisesti ilman lämpötila on korkea ja tämä nostaa myös maan lämpötilaa. Viilennyskauden lopussa maahan on siirretty viilennettävästä kohteesta lämpöä ja tämä nostaa maan lämpötilaa vielä lisää. Vastaava ilmiö tapahtuu toisin päin lämmityskauden aikana. Tämän lämmitys- ja viilennyskauden aikana tapahtuvan lämpötilamuutoksen takia rakennuksen lämmittäminen ja viilentäminen on tehottominta kausien loppupuolella.

Sangwoo Park yhdessä muiden kanssa tutki toisessa TRT-mittauksessa puolestaan W-putkipaalun avulla virtauksen vaikutusta paalun termisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksessa W-putkipaalua käytettiin aluksi kahden viikon jakson ajan lämmitystarkoitukseen ja sen jälkeen kahden viikon ajan viilennystarkoitukseen. Mittausjärjestelmä oli hyvin samanlainen kuin Zhaon ym. toteuttamassa spiraalisen paalun mittauksessa [Kuva 3]. Merkittävin ero mittaussysteemissä oli se, että W-putkipaalun mittauksessa ei käytetty sähköistä lämmitintä vaan vesi allasta, jonka avulla sisäänmeno lämpötila saatiin pidettyä vakiona. (Park ym., 2017)

Mittauksessa virtaus pidettiin aluksi viikon verran 2,56 l/min. Tällä virtauksella saatiin sisäänmeno- ja paluuvirtauksen väliseksi lämpötilaeroksi 4,2 °C ja lämpötehoksi laskettiin keskimäärin 766 W. Viikon jälkeen virtaus pienennettiin 1,86 l/min. Tällöin mitattu lämpötilaero kasvoi 4,8 °C, mutta samalla keskimääräinen lämpöteho pieneni 623 W. Lämpötehon pieneneminen selittyy suoraan pienemmällä virtausmäärällä. Samassa tutkimuksessa

havaittiin myös, että paalun sisällä lämpötila laskee lämmitysjakson aikana. Lämpötilan muutos oli keskimäärin  $0,75\text{ °C}$  viikossa. (Park *ym.*, 2017)

Kolmannessa esiteltävässä tutkimuksessa Luo yhdessä muiden kanssa tutki perinteisen maalämpökaivon ja energiapaalun eroja. Mittauksessa tutkittiin myös maalämpöratkaisujen vaikutusta maan lämpötilaan. Mittauksessa oli useampi lämpötilan mittaus maassa eri syvyyksillä ja etäisyyksillä maalämpökaivosta ja paalusta. Tutkimuksessa maalämpökaivoa ja paalua lämmitettiin samalla  $6000\text{ W}$  teholla. (Luo *ym.*, 2016)

Mittauksessa havaittiin, että maalämpöratkaisun käytöstä johtuva lämpötilan muutos maalämpöjärjestelmän reunalla oli energiapaalun tapauksessa keskimäärin  $2,0\text{ °C}$  vähemmän kuin lämpökaivon tapauksessa. Työssä laskettiin myös siirtyvä lämpö kaivon maahan kosketuspintaa kohden. Lasketusta arvosta käytettiin termiä lämpövuoto. Energiapaalulle lämpövuoksi saatiin  $78,03\text{ W/m}^2$  ja maalämpökaivolle  $139,18\text{ W/m}^2$ . Maalämpökaivolla lämpövuoto on lähes kaksi kertaa suurempi. Tämä selittää myös suurempaa lämpötilan muutosta kaivon reunalla. Tulosten perusteella maalämpökaivolla on potentiaalia muuttaa maan lämpötilaa voimakkaammin lämmityksen ja viilennyksen seurauksena kuin energiapaalulla. (Luo *ym.*, 2016)

## 4. TESTAUS PILOTTILAITTEISTOLLA

Tässä luvussa esitellään osana kandidaatintyötä tehty TRT-mittaus yksittäiselle U-putki-paalulle. Mittaus suoritettiin samanlaisella paalulla kahdessa eri ympäristössä. Ensimmäinen mittausympäristö oli kostea savimaa ja toinen mittaus suoritettiin kuivemmalla soraharjulla. Mittauksissa keruuputken ympärillä ei ollut varsinaista paalua vaan se oli vain upotettuna maa-ainekseen.

### 4.1 Mittausjärjestely ja laitteisto

Molemmissa mittausympäristöissä lämmönkeruuputkisto ja mittalaitteisto olivat samanlaiset. Ainut ero oli keruuputkea ympäröivässä maa-aineksessa. Mittauskohteissa ei tehty tarkkaa maalajitutkimusta vaan maan koostumuksesta tehtiin olettaus, jonka uskotaan olevan riittävä tehtyjen mittausten ja niiden analysoinnin kannalta. Keruuputken dimensiot on esitetty taulukossa 1. Putkimateriaalina käytettiin sisäpuolelta rihlattua 40 mm putkea. Putken rihlauksen tarkoituksena oli parantaa lämmönsiirtoa.

**Taulukko 1 Paalujen tietoja ja oletuksia**

Mittaus	Mittausympäristö	Putken halkaisija [mm]	Keruusyvyys [m]	Arvioitu alkulämpötila [°C]
1	Kostea savimaa	40	6	14
2	Soraharju	40	6	11

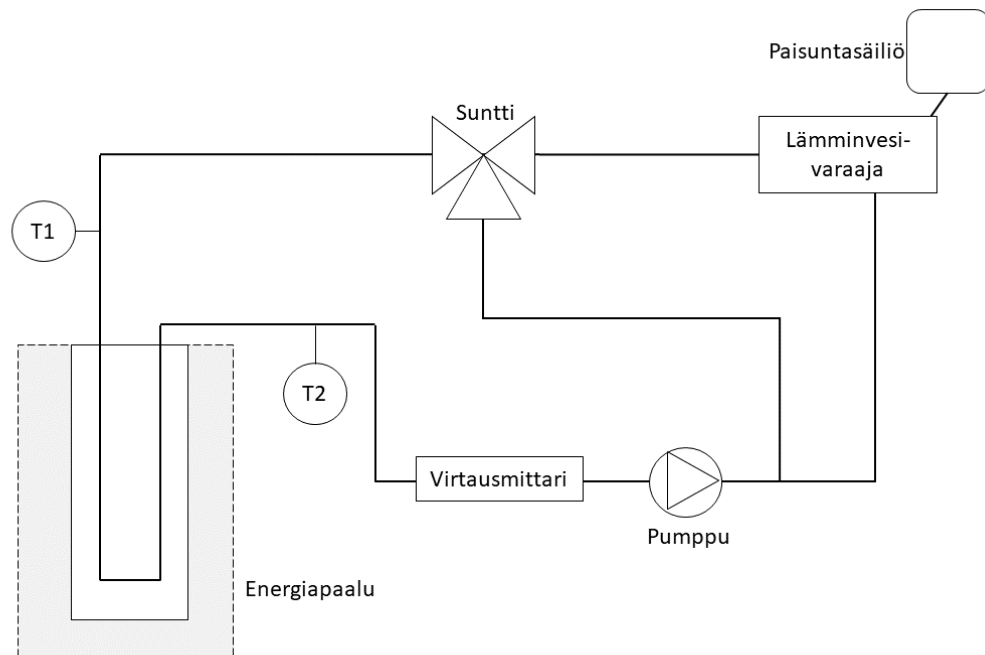
Taulukossa 1 esitetyt maan alkulämpötilat on selvitetty kierrättämällä paalussa vettä ilman lämmitystä. Lämpötila, johon virtaava vesi asettui, katsottiin olevan maan alkulämpötila. Savimaan tapauksessa tämä lämpötila oli hieman korkeampi.

Kuva 4 on otettu savimaassa olevasta paalusta. Kuvasta näkyy kuinka keruuputkien sisäänmeno ja ulostulo ovat lähellä toisiaan. Lisäksi kuvasta huomataan, että varsinaista paalua ei ole vaan keruuputkea ympäröi pelkkä kostea maa-aines.



**Kuva 4 Savimaahan upotettu pilottipaalu**

Toteutetussa mittauksessa mittausjärjestelmä on hyvin samanlainen kuin luvussa 3 esitellyissä TRT-mittauksissa on käytetty. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistettu prosessikaavio mittausjärjestelmästä. Merkittävimpänä erona luvussa 3 esiteltyyn mittalaitteistoon on menoveden lämpötilansäätöjärjestelmä. Pilottimittauksessa tämä tapahtui suntin avulla, johon oli kytketty paisuntasäiliöön liitetty lämminvesivaraaja ja paalusta palaava vesivirtaus.



**Kuva 5 Pilottimittauksen mittalaitteisto**

Kuvassa 6 on mittauspaikalta otettu kuva mittalaitteistossa. Kuvassa ylempi putki on menovirtauksen putki, johon on kytketty analoginen lämpötilamittari. Alempana kuvassa on paluuvirtauksen putki, jossa on vastaavanlainen lämpötilamittari sekä virtausta mittaava

vedenkulutusmittari. Virtaus tässä työssä mitattiin siis laskemalla veden kulutusta ja jakamalla tämä mittaukseen käytetyllä ajalla.



**Kuva 6 Käytetty mittalaitteisto**

Paaluille toteutettu mittaus koostui molemmissa ympäristöissä kahdesta eri vaiheesta. Ensimmäisenä paaluihin syötettiin kuumaa vettä, sisäänmeno lämpötila pidettiin tällöin noin 60°C. Ensimmäisen vaiheen tarkoituksena oli havainnollistaa, kuinka maahan varastoituu lämpöä viilennyskauden aikana. Meno- ja paluuvirtauksen lämpötiloja seurattiin kolmen vuorokauden ajan. Tässä ajassa lämpötilaero meno- ja paluuvirtauksen välillä tasaantui ja lämmönsiirron voitiin katsoa saavuttaneen stabiilin tilan. Paalun lämmittämistä jatkettiin tämän jälkeen vielä noin viikon verran.

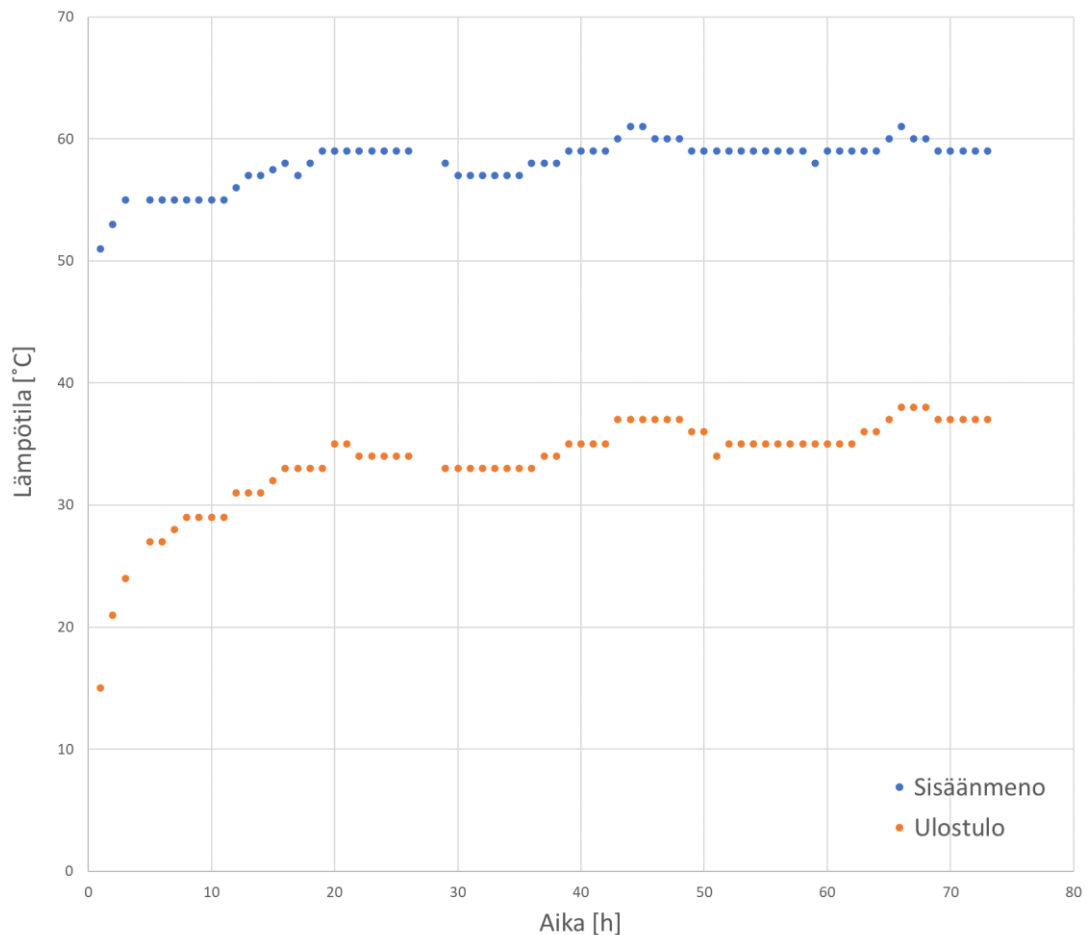
Lämmitysjakson jälkeen virtauksen lämmittäminen lopetettiin, mutta virtaus pidettiin päällä. Tämän jälkeen odotettiin, että meno- ja paluuvirtauksen lämpötilat tasaantuivat samaan arvoon. Tällöin saavutettiin lämmityksen jälkeinen uusi tasapaino ja pystyttiin näkemään, paljonko maan lämpötila paalun lähellä oli latauksen seurauksena noussut.



## 4.2 Mittaustulokset

Tässä luvussa esitellään savimaassa ja hiekkaharjulla tehtyjen mittausten mittaustulokset. Aluksi esitellään molemmissa ympäristöissä tehdyt paalun latausjaksot, joiden aikana maahan pumpattiin kuumaa vettä. Lopuksi esitellään, miten virtauksen lämpötila käyttäytyi lämmittämisen lopettamisen jälkeen.

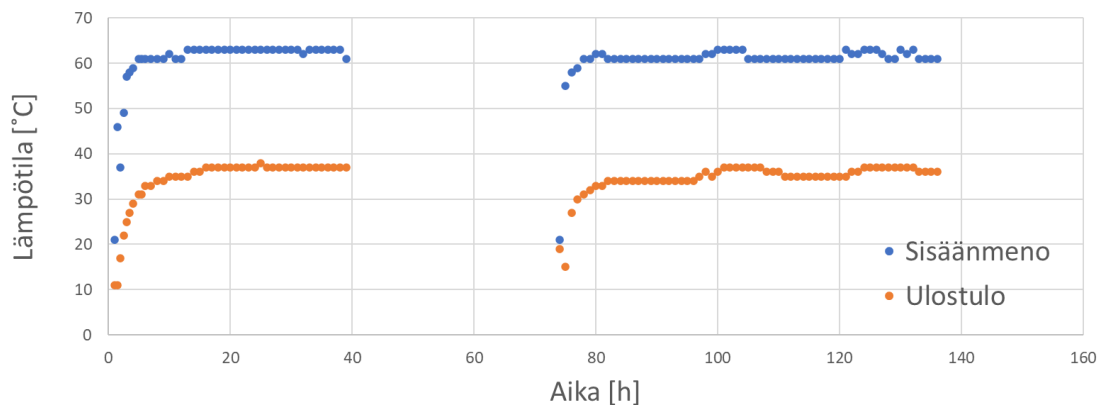
Kuvassa 7 on esitetty savimaassa tehdyn mittauksen ensimmäinen vaihe eli paalun latausjakso. Kuvaajasta huomataan, että paluuveden lämpötila tasoittuu noin 20 tunnin lämmittämisen jälkeen noin 36 asteeseen. Lämpötila ero on tällöin 22 astetta ja on saavutettu maksimi lämmölle, jota maahan voidaan siirtää kyseisissä olosuhteissa. Virtaus paalunlatauksen aikana oli keskimäärin 20,3 l/h. Virtaus on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi luvussa 3 esitetyssä Parkin yhdessä muiden kanssa tekemässä W-putkipaalumittauksessa (Park *ym.*, 2017). Virtauksen oletettiin olevan kuitenkin riittävä, sillä menovirtauksen lämpötila on tässä työssä niin korkea.



**Kuva 7 Savimaassa tehdyn paalun latausjakson mittausdata, menevän- ja palaavavirtauksen lämpötila ajanfunktiona**

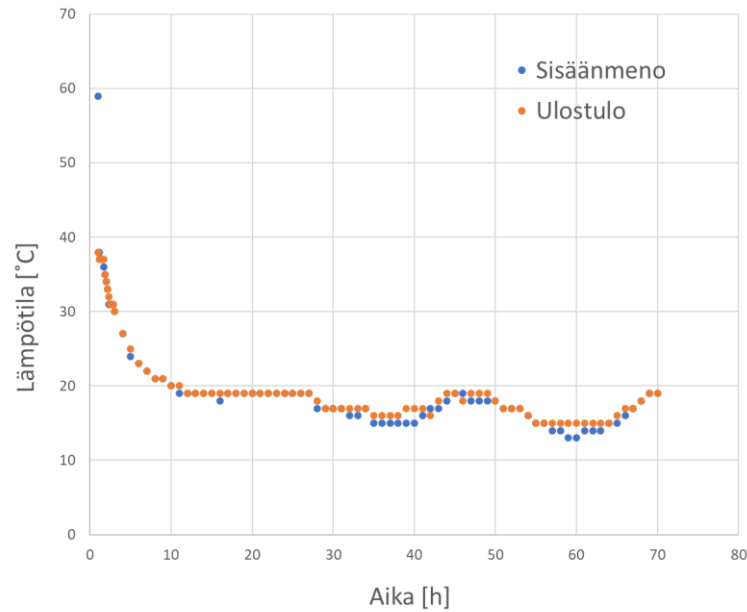
Hiekkaharjulla tehty lämmitysjakso on esitetty kuvassa 8. Kesken hiekkaharjulla tehdyn mittauksen tapahtui sähkökatko ukkosmyrskyn takia, mistä johtuen mittaus keskeytyi ja jouduttiin aloittamaan uudelleen. Tämän takia kuvaaja katkeaa kesken ja lämmitysjakso alkaa uudelleen vuorokauden jälkeen tästä. Sähkökatkolla ei ollut kuitenkaan merkittävää vaikutusta mittaustuloksiin sillä lämpötilaero meno- ja paluuvirtauksen välillä ehti tasoittua ennen katkosta.

Huomattavaa tässä mittauksessa on se, että lämpötilat tasoittuivat savimaata nopeammin. Lämpötila ero tasoittuu 16 tunnissa 26 asteeseen. Lämmittämisen uudelleen käynnistämisen jälkeen lämpötila tasoittui jo noin kymmenessä tunnissa. Sen lisäksi, että hiekkaharjulla lämpötilat tasoittuivat nopeammin, lämpötila ero jäi hieman suuremmaksi kuin savimaan tapauksessa. Virtaus mittauksen aikana oli keskimäärin 17 l/h, mikä on noin 10 % vähemmän kuin savimaan tapauksessa. Virtaus oli tarkoitus asettaa samaksi kuin savimaan tapauksessa, mutta mittauksista tehtiä tapahtui virhe.



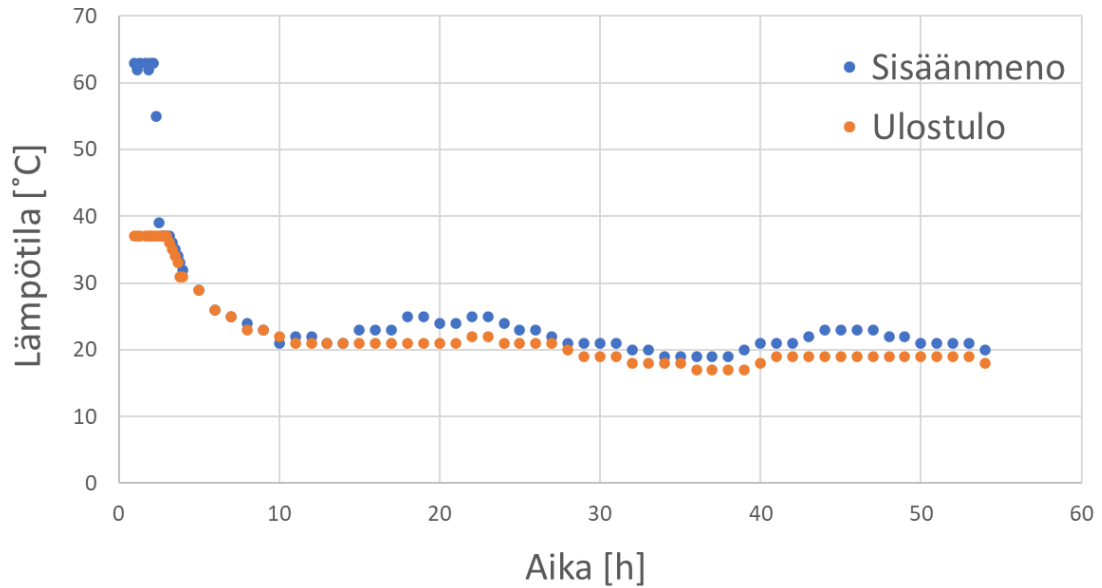
**Kuva 8 Hiekkaharjulla tehdyn mittauksen paalun latausjakso, menevän ja palaavan virtauksen lämpötilat ajanfunktiona**

Kuvassa 9 on esitetty savimaassa olevan paalun lämpötilakäyttäytyminen lämmittämisen lopettamisen jälkeen. Huomattavia havaintoja kuvaajasta on se, miten nopeasti lämpötila romahti. Kymmenen tuntia lämmittämisen lopettamisesta paalussa kiertävän veden lämpötila oli jo romahtanut 20 asteeseen. Tämä on kuitenkin 6 astetta korkeampi kuin paalun alkulämpötila. Paalun lämpötilaa on siis onnistuttu latausvaiheen aikana nostamaan. Virtaus oli tämän vaiheen aikana keskimäärin 21,4 l/h.



**Kuva 9 Savimaassa tehdyn mittauksen purkukäyrä, meno- ja paluuvirtauksen lämpötila ajanfunktiona**

Kuvassa 10 on esitetty hiekkaharjulla olevan paalun käyttäytyminen lämmittämisen jälkeen. Hiekkaharjun paalu käyttäytyi lähes samoin kuin savimaalla ollut paalu. Lämpötila jäi kuitenkin muutaman asteen korkeammaksi savimaahan verrattuna. Hiekkaharjulla paalun alkulämpötila oli matalampi kuin savimaassa, joten hiekkaharjun tapauksessa latausjakson aikana paalua onnistuttiin lämmittämään jopa 10 astetta. Paalun lämpötilan muutokseen saattoi vaikuttaa myös mittausajankohta kesäkuussa, kun maaperä lämpeni myös auringon lisääntyneen lämpösäteilyn seurauksena. Virtaus oli tämän mittausvaiheen aikana keskimäärin 17,2 l/h



**Kuva 10 Hiekkaharjulla tehdyn mittauksen purkujakso, meno- ja paluuvirtauksen lämpötila ajanfunktiona**

Mittausdatassa ei ole siis huomattavissa juurikaan eroja mittauslaitteiston antaman tarkkuuden puitteissa eri ympäristöissä tehtyjen mittausten välillä. Yleisenä huomiona mitaustuloksista voidaan sanoa se, että paalun latausjakson aikana lämpötila ero sisäänmeno- ja ulostulovirtauksen välillä jäi suureksi, noin 20 °C. Mittausta suunnitellessa odotettiin, että palaavan veden lämpötila nousisi lopulta lähes menevän veden tasolle. Tämä virhe saattaa osin johtua siitä, että virtaus latausjakson aikana oli niin pieni. Toinen yllättävä huomio oli se, miten nopeasti kiertävän veden lämpötila romahti lämmittämisen lopettamisen jälkeen. Ja miten alhaiseksi paalun lämpötilan muutos lämmittämisen seurauksena jäi.

## 4.3 Suorituskyvyn analyysi

### 4.3.1 Paalun tehon laskenta

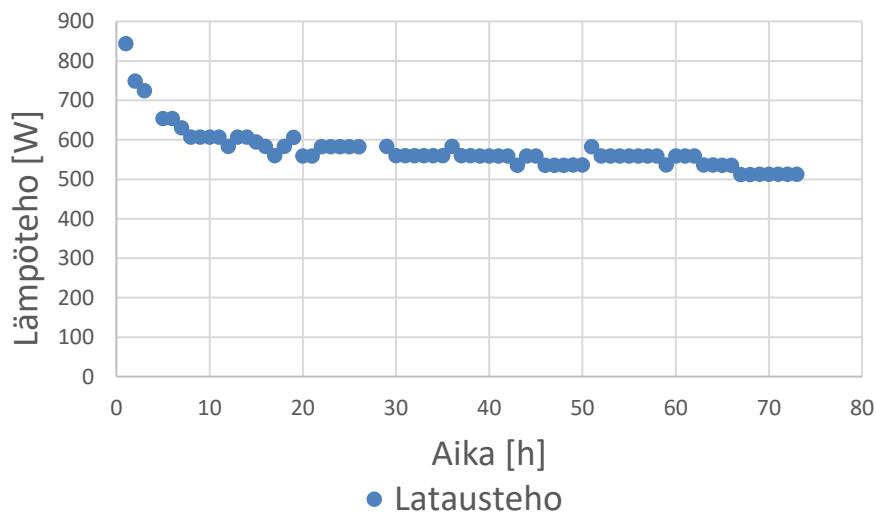
Tässä luvussa esitellään paalujen latausjaksoille toteutettua tehokalkentaa. Eri ympäristöissä toteutetuille mittauksille laskenta on suoritettu käyttäen samoja kaavoja. Lataus-  
tehon avulla lasketaan lopuksi latausjakson aikana maahan siirtyvä lämpö.

Paalun latausteho voidaan laskea yleisesti tunnetulla termodynamiikan kaavalla

$$H = \rho q c \Delta T, \quad (1)$$

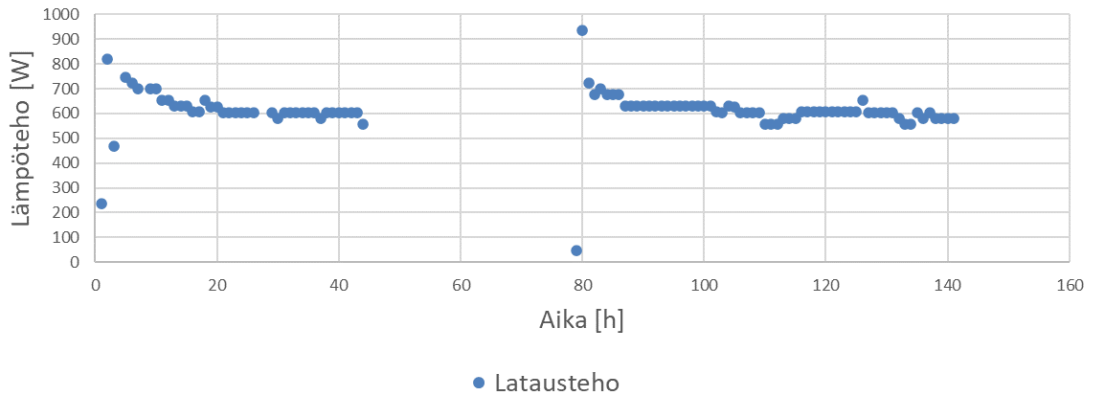
jossa tässä työssä  $H$  on paalun latausteho,  $\rho$  veden tiheys,  $q$  veden massavirta,  $c$  veden ominaislämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  meno- ja paluuvirtauksen välinen lämpötilaero. Laskennassa on hyödynnetty Excel -ohjelman lisäohjelmaa XSteam (versio 2.6). XSteamin avulla saadaan otettua veden aineominaisuudet halutuissa lämpötiloissa. Kyseinen sovellus käyttää pohjana IAPWS IF97 -standardin määritelmiä.

Lataustehon laskenta on suoritettu jokaisella mittaushetkellä. Veden massavirran arvona on käytetty laskettua keskiarvoa virtaukselle (5,6 ml/s). Veden aineominaisuuksiksi on otettu kyseisen hetken paluu- ja menoveden aineominaisuuksien keskiarvot. Savimaassa tehdyn mittauksen latausteho on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11 Savimaahan sijoitetun paalun latausteho eri mittaushetkillä**

Lataustehon kuvaajasta huomataan, että paalu ottaa aluksi hieman suuremman tehon ennen kuin paluuvirtauksen lämpötila saavuttaa maksimiarvonsa ja meno- ja paluuvirtauksen välinen lämpötilaero tasoittuu, jonka jälkeen tehokin pysyy lähes vakiona. Lämpötilaeron tasaannuttua siirtyvä lämpöteho on noin 558 W (laskettu keskiarvona ajanhetken 10 h jälkeen). Hiekkaharjulla tehdyn mittauksen vastaava lataustehon kuvaaja on esitetty kuvassa 12. Hiekkaharjulla latausteho on hieman korkeampi. Lataustehon arvo tasoittuu noin 605 W (laskettu keskiarvona ajanhetken 87 h jälkeen).



**Kuva 12 Hiekkaharjulle sijoitetun paalun latausteho eri mittaushetkillä**

Latausjaksojen aikana siirtyneisiin lämpömääriin päästään käsiksi integroimalla lataustehton kuvaajia. Tämä on tässä työssä toteutettu numeerisesti puolisuunnikasmenetelmää käyttäen. Savimaamittauksen latausjakson aikana siirtyväksi lämpömääräksi saadaan noin 150 MJ. Jakson kesto oli 72 tuntia. Hiekkaharjumittauksen aikana tapahtui sähkökatko, ennen katkosta siirtynyt lämpömäärä oli 96 MJ. Tällöin latausta oli tehty 44 tunnin ajan. Katkon jälkeen aloitetussa uudessa latausjaksossa lämpöä siirtyi noin 140 MJ. Katkon jälkeisen latausjakson kesto oli 62 tuntia. Koska latausjaksot olivat ajallisesti erimittaiset ei niitä voi suoraan verrata keskenään.

### 4.3.2 Lämpövaraston mallinnus

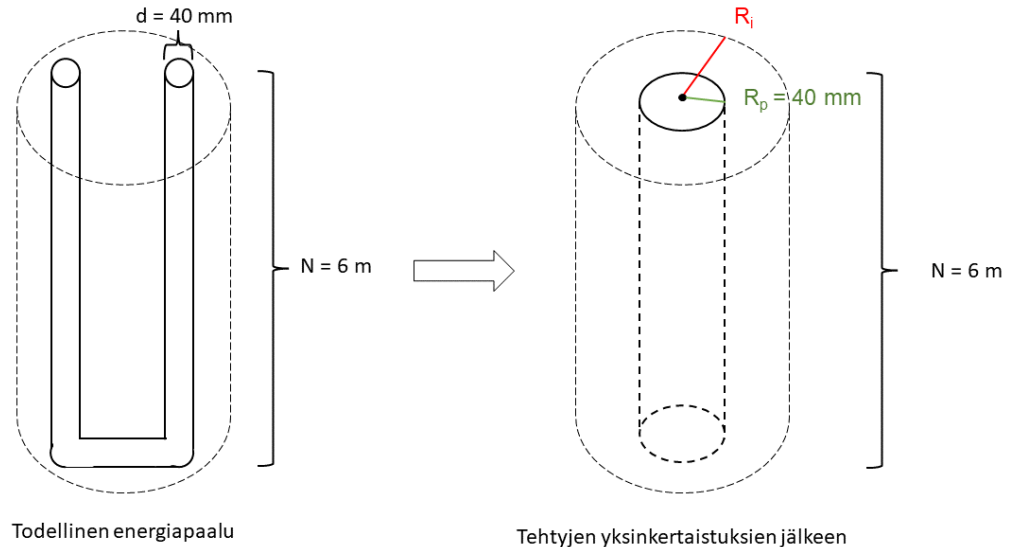
Laskettuja lataustehoja ja taulukossa 1 esitettyjä paalun tietoja hyödyntäen pystytään laskemaan niiden alueiden säteet, jolle lämpö maassa varastoituu. Lämpövirta putkessa voidaan laskea myös kaavalla

$$Q = 2\pi kN \frac{T_p - T_i}{\ln\left(\frac{R_i}{R_p}\right)}, \quad (2)$$

jossa  $k$  maan lämmönjohtavuus,  $N$  putken pituus,  $T_p$  virtauksen lämpötila,  $T_i$  maan lämpötila lämpövaraston reunalla (maan alkulämpötila),  $R_p$  putken halkaisija,  $R_i$  lämpövaraston säde (The Piping Engineering World, 2021).

Kyseinen kaava on tarkoitettu laskemaan eristererrosta putkivirtaukselle. Jotta sitä voisi käyttää energiapaalulle, tulee tehdä muutamia yksinkertaistuksia ja oletuksia. Tässä kohtaa energiapaalu oletetaan siis yksittäiseksi putkivirtaukseksi, jossa putken halkaisija on kaksi kertaa paalussa menevän virtausputken paksuus eli 80 mm. Putken pituutena

on käytetty paalun syvyyttä 6 m. Kuvassa 13 on havainnollistettu tehtyjä yksinkertaistuksia. Kuvassa oikealla näkyy selkeämmin, mitä kaavassa 2 käytetyillä arvoilla tässä yhteydessä tarkoitetaan.



**Kuva 13 Energiapaalulle tehdyt yksinkertaistukset ja kaavassa 2 esitetyt mitat**

Taulukossa 2 on esitetty laskennassa käytetyt paalujen arvot. Koska tutkimuksessa ei tehty maaperäanalyysia on ensimmäisen mittauksen kohdalla maa-aineksen oletettu olevan savea, josta noin puolet on vettä. Kyseiselle maa-ainekselle lämmönjohtavuus on luettu Ghumanin ja Lalin toteuttamasta tutkimuksesta, jossa tutkittiin eri maa-ainesten termisiä ominaisuuksia. Jälkimmäisessä mittauksessa maa-aineksen oletettiin olevan hiekkaista savea, jossa ei juurikaan ole kosteutta. Tälle saatiin luettua arvo samaisesta tutkimuksesta. (Ghuman ja Lal, 1985) Latausteho on lämpötilaeron tasoittumisen jälkeinen keskiarvo. Virtauksen lämpötila on otettu tasapainotilassa paluu- ja menoveden lämpötilan keskiarvona.

**Taulukko 2 Paalun termisiä ominaisuuksia (Ghuman ja Lal, 1985)**

Mittaus	Maa-aines	Lämmön- johtavuus $k$ [W/m <sup>2</sup> C]	Latausteho $Q$ [W]	Virtauksen lämpötila $T_p$ [°C]	Maan lämpötila $T_i$ [°C]
1	Savimaa	0,48116	558	49	10
2	Hiekkaharju	0,426768	605	49	15

Kyseisiä yksinkertaistuksia ja taulukon 2 arvoja käyttäen saadaan laskettua savimaassa lämmönvarastointialueen säteeksi noin 25 cm. Hiekkaharjun tapauksessa vastaavaksi säteeksi saadaan noin 22 cm. Käytetyn laskennan mukaan hiekkaharjulla lämpöä varastoituu pienemmälle alueelle. Tämä johtuu enimmäkseen siitä, että kyseisen maa-aineksen lämmönjohtavuus on pienempi. Molemmissa tapauksissa alue, jolle lämpöä varastoitui, on todella pieni.

#### 4.4 Tulokset ja pohdinta

Tässä luvussa kerrotaan päätelmiä, mitä mittaustuloksista voi tehdä. Lisäksi pohditaan tulosten luotettavuutta ja verrataan tuloksia muualla tehtyihin mittauksiin.

Ensimmäinen havainto, joka mittaustulosten perusteella voidaan tehdä, on se, että savi-  
maa ja hiekkaharju toimivat yhtä hyvin energiapaalujen käyttöympäristönä. Näiden kahden eri mittausympäristön välillä ei havaittu juurikaan eroja lämmönvarastointiin liittyen.

Pieniä eroavaisuuksia kuitenkin mittausympäristöjen välillä löytyi. Latausteho oli savi-  
maassa noin 8 % pienempi kuin hiekkaharjulla. Lisäksi savimaalla lämpötila lähellä paa-  
lua latauksen seurauksena muuttui 4 astetta vähemmän kuin hiekkaharjulla. Savimaalla  
käytetyn laskennan mukaan lämpö kuitenkin levittäytyi hieman laajemmalle alueelle.  
Lämmön leviäminen laajemmalle alueelle voi osittain selittää sitä, miksi lämpötila paa-  
lussa nousi hiekkaharjun tapausta vähemmän.

Tehdyn tutkimuksen perusteella energiapaalut eivät toimi korkean lämpötilan varastoina.  
Korkeasta latauslämpötilasta huolimatta paalun taikka maan lämpötila ei noussut kuin  
muutamia asteita. Lisäksi lämpö levittäytyi hyvin pienelle alueelle. Mittaushypoteesi ei  
toteutunut. Tehty mittausta oli kuitenkin hyvin karkea eikä sen perusteella voida tehdä  
yleistyksiä energiapaalujen käyttäytymiseen matalammilla lämpötiloilla tai suuremmilla  
virtausmäärillä.

Jos vastaavanlainen mittausta haluttaisiin toistaa, kannattaisi sitä ensin muokata. Mittauk-  
sessa käytettävää virtausmäärää voitaisiin nostaa noin 2 l/min. Tällöin lyhyelläkin mit-  
tausajalla saataisiin paremmin näkyviin paalun terminen vaste. Lisäksi paremmalla vir-  
tausmittarilla päästäisiin luotettavampiin tuloksiin. Virtausmäärän lisäämisen lisäksi voi-  
taisiin tehdä useampi paalu lähelle toisiaan, jolloin niiden välistä vaikutusta voitaisiin  
myös arvioida. Jos mittausta toistettaisiin, olisi myös tärkeää tehdä tarkka maaperän tutki-  
mus ja selvittää maa-aineksen lämmönjohtavuus mittaamalla. Tämä sen takia, että  
maan lämmönjohtavuudet vaihtelevat paljon ja niihin vaikuttaa hyvin paljon esimerkiksi  
kiintoaineksen raekoko ja kosteus. (Witte, van Gelder ja Spitler, 2002)



## 5. YHTEENVETO

Työssä tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella energiapaaluja voidaan jaotella niissä olevien keruupiirien perusteella, sekä käytettyjen paalumateriaalien mukaan. Yleisin paalutyyppi on U-putkipaalu, jossa lämmönkiertosilmukka on U-kirjaimen muotoinen. Materiaalien mukaan energiapaalut voidaan karkeasti jakaa betoniin valettuihin ja teräs-paaluihin, joissa paalu koostuu pelkästä keruuputkistosta. Energiapaaluja käytetään usein useamman paalun energiapaalukenttinä.

Energiapaalujen toimintaan vaikuttavia tekijöitä on paalun eri dimensiot (syvyys ja halkaisija), käytetty keruuputki tyyppi, materiaalit, joista paalu on valmistettu, käytetty lämpöaine sekä virtausmäärä. Paalun dimensiot ja keruupiirin tyyppi vaikuttavat lämmönsiirtopinta-alaan keruupiirin ja paalun välillä sekä paalun ja maa-aineksen välillä. Isommalla lämmönsiirtopinta-alalla lämmönsiirto on tehokkaampaa. Käytetyt materiaalit vaikuttavat puolestaan termisten ominaisuuksiensa kuten lämmönjohtavuuden kautta paalun toimintaan.

Energiapaalujen eri ominaisuuksia ja toimintaa arvioitaessa rakennetaan testipaaluja, joille suoritetaan mittauksia. Energiapaalujen tehokkuutta mitataan TRT-mittauksilla, joissa tutkitaan paalun lämmönvastetta. TRT-mittauksissa paaluihin syötetään valitun lämpöistä lämpöainetta vakio virtauksella ja tutkitaan virtauksen paluulämpötilan avulla, miten paalun lämpötila muuttuu.

Osana tätä työtä suoritettussa pilottimittauksessa yksittäiselle U-putkelle havaittiin, että energiapaalu ei toiminut korkeanlämmönvarastona. Käytettäessä 60 asteista vettä onnistuttiin lämmityksen aikana nostamaan paalun lämpötila lähes 40 asteiseksi, mutta lämmittämisen lopettamisen jälkeen paalun lämpötila laski voimakkaasti. Lämpötila jäi kuitenkin muutaman asteen aloitustilannetta korkeammaksi. Tehdyissä mittauksissa ei myöskään havaittu juurikaan eroa savimaan tai hiekkaharjun välillä energiapaalun käyttöympäristönä. Työssä tehtiin myös alustavaa laskentaa liittyen muodostuneen lämpövaraston kokoon. Laskennan perusteella lämpöä onnistuttiin varastoimaan vain noin 20 cm halkaisijalla olevan sylinterin alueelle.

Toteutetun pilottimittauksen tulokset näyttävät heikoilta mahdollisesti sen takia, että mittauksessa käytetty veden virtausnopeus oli niin alhainen. Mittauksen aikana vettä pumpattiin paaluun keskimäärin noin 20 l/h. Mittausta voisi kehittää myös pidentämällä sen kestoa. Näin maan lämpötilaa onnistuttaisiin mahdollisesti nostamaan enemmän. Parantamalla käytettyä mittalaitteistoa, pystyttäisiin pienentämään mahdollisia mittausvirheitä.

## LÄHTEET

Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J., Haghghat, F. (2017) "A review on energy piles design, sizing and modelling", *Energy*, 122. doi:10.1016/j.energy.2017.01.097.

Ghuman, B.S. ja Lal, R. (1985) "Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils", *Soil Science*, 139, ss. 74–80.

Ilmasto-opas.fi (2018) *Rakennusten lämmitys kuluttaa runsaasti energiaa*, *Ilmasto-opas*. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/73fa2827-42d1-4fd7-a757-175aca58b441/rakennusten-lammitys-kuluttaa-runsaasti-energiaa.html> (Viitattu: 7. lokakuuta 2021).

Juvonen, J. ja Lapinlampi, T. (2013) *Energiakaivo : maalämmön hyödyntäminen pientaloissa*. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Krarti, M. (2015) *Thermoactive Foundations for Sustainable Buildings*. New York: Momentum Press. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4013269>.

Luo, J., Zhao, H., Gui, S., Xiang, W. ja Rohn, J. (2016) "Comparison of ground temperature response of energy pile and borehole heat exchanger during thermal response tests", *Environmental Earth Sciences*, 75(22), ss. 1–10. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-016-6267-0>.

Motiva (2020) *Maalämpöpumppu, MLP, Motiva*. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodo/maalampopumppu\\_mlp](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodo/maalampopumppu_mlp) (Viitattu: 13. huhtikuuta 2021).

Park, S., Lee, D, Lee, S., Chauchois, A. ja Choi, H. (2017) "Experimental and numerical analysis on thermal performance of large-diameter cast-in-place energy pile constructed in soft ground", *Energy*, 118, ss. 297–311. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.045>.

Suryatriyastuti, M.E., Mroueh, H. ja Burlon, S. (2012) "Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), ss. 3344–3354. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.062>.

The Piping Engineering World (2021) "Calculation of Insulation Thickness for Pipes » The Piping Engineering World", *The Piping Engineering World*. Saatavissa: <https://www.pipingengineer.org/calculation-of-insulation-thickness-for-pipes/> (Viitattu: 7. lokakuuta 2021).

Witte, H.J.L., van Gelder, G.J. ja Spitler, J.D. (2002) "In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective", s. 21.

Zhao, Q., Chen, B. ja Liu, F. (2016) "Study on the thermal performance of several types of energy pile ground heat exchangers: U-shaped, W-shaped and spiral-shaped", *Energy and Buildings*, 133, ss. 335–344. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.055>.