

ENERGIAPAALUKENTÄN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Tässä RT-ohjeessa käsitellään energiapaalukentän suunnittelua ja mitoitusta sekä näihin vaikuttavia tekijöitä kuten maaperän olosuhteita, energiakuormia ja paaluperustusta. Ohje on tarkoitettu rakennus-, geoenergia- ja LVI-suunnittelijoille sekä muille hankkeessa toimiville asiantuntijoille.

SISÄLLYSLUETTELO

- 1 JOHDANTO
 - 2 VESILAIN MUKAINEN LUPA
 - 3 ENERGIAPAALUJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATE
 - 4 MAAPERÄ
 - 4.1 Ominaisuuksia
 - 4.2 Lämmön palautuminen ja häviöt
 - 4.3 Termogeologisia mittausmenetelmiä
 - 5 ENERGIAKUORMAT
 - 6 ENERGIAPAALUKENTÄN SUUNNITTELU JA MITOITUS
 - 6.1 Paalukenttä
 - 6.2 Virtausdynamiikka
 - 6.3 Tehon mitoitus
 - 6.4 Mallinnukset
 - 6.5 Riski- ja herkkyystarkastelu
- KIRJALLISUUTTA

1 JOHDANTO

Paaluperustukseen sijoitettavat energiapaalut ovat yksi geoenergian teknologioista, jotka hyödyntävät maaperän olosuhteita lämmityksessä ja viilennyksessä. Energiapaalut ovat sijoitettuna tavallisten tukipaalujen tapaan maaperään kantamaan rakennekuormia ja toimivat samalla energian siirtäjinä. Energiapaaluilla hyödynnetään maaperässä olevaa matalalämpöistä maalämpöä. Lisäksi ne soveltuvat lämmön varastointiin, missä lämpöä varastoidaan paaluperustusta ympäröivään maaperään viilennys- tai erillisellä varastointiapplikaatiolla.

Energiapaalut soveltuvat erilaisiin rakennus- ja infrakohteisiin, esim.

- pien- ja kerrostaloihin
- halli-, toimisto- ja liikerakennuksiin
- infrakohteisiin kuten ajoväylille.

Laajan soveltuvuuden lisäksi niillä on useita käyttöhyötyjä, joita ovat

- rakennuksen CO₂-päästöjen ja ostoenergian määrän alentaminen
- energiatehokas viilennys
- kaukolämpökohteisiin energia- ja kustannustehokas täysimitoitteinen viilennys- sekä osamitoitteinen maalämpöratkaisu.

Dokumenttia tai sen osia ei saa kopioida, jakaa, välittää, muunnella eikä ladata tekoälysovelluksiin. Dokumentti on tarkoitettu lausunnon antamista varten.

Energiapaalukentän suunnittelu on monitahoinen prosessi, jossa huomioidaan mahdollisten lupa-asioiden lisäksi maaperän tutkimukset, paaluperustus sekä rakennuksen energiamallinnus. Energiapaalukentän mitoittamiseen vaikuttavat monet tekijät, joita ovat maaperän olosuhteet, ilman lämpötilat, rakennuksen energiatarpeet, virtausdynaamiset tekijät, kentän tiheys sekä maapiirien lukumäärä ja pituus.

Tässä ohjeessa käsitellään energiapaalukentän mitoittamiseen liittyviä asioita yleisluonteisesti. Kohteet mitoitetetaan aina mallinnuksiin perustuen, missä käytetään soveltuvia laskentaohjelmistoja. Dynaamisesti muuttuvia olosuhteita ja järjestelmän pitkäaikaista toimintakykyä voidaan tarkastella vain virtaukseen perustuvalla laskentaohjelmistolla. Ennen mallinnusta esisuunnitteluvaiheessa kohteesta voidaan laatia karkea arvio järjestelmän kannattavuudesta, missä tarkastellaan järjestelmän suorituskykyä laskennallisesti käyttäen maaperän tutkittuja geoteknisiä ja termogeologisia ominaisuuksia sekä lämpötilaolosuhteita.

2 VESILAIN MUKAINEN LUPA

Energiapaalujärjestelmän esisuunnitteluvaiheessa tulee tarkistaa vesilain mukaisen luvan tarpeellisuus kunnan ympäristöviranomaiselta ja tarvittaessa lupa- ja valvontavirastolta erityisesti hankkeissa, joissa järjestelmää suunnitellaan pohjavesialueelle tai muulle ympäristön kannalta herkälle alueelle. Maaperän ja pohjaveden pilaamiskiellosta säädetään ympäristösuojelulain (527/2014) pykälissä 16 ja 17 ([RT 104009](#)).

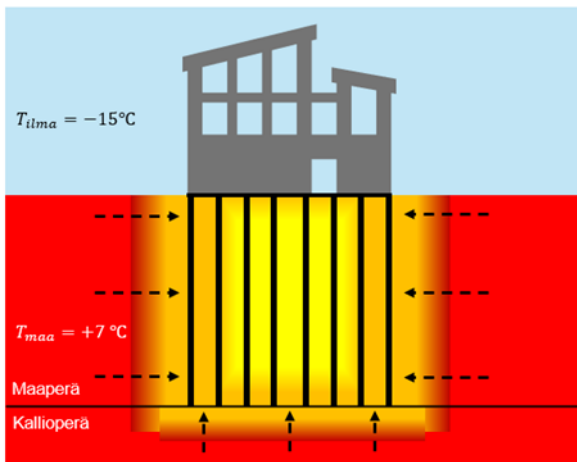
Lämmönsiirtonesteinä tulee pohjavesialueen ulkopuolellakin käyttää ympäristölle mahdollisimman haitatonta nestettä kuten korroosionestoaineetonta, laimennettua etanolia. Kiellettyjä nesteitä ovat ainakin etyleeni- ja propyleeniglykoli sekä metanoli.

Ennakoivana toimenpiteenä on suositeltavaa, että jo valmisteluvaiheessa tehdään selvitys energiapaalujärjestelmän mahdollisista vaikutuksista pohjaveteen ja vaikutusten seurannasta käytön aikana.

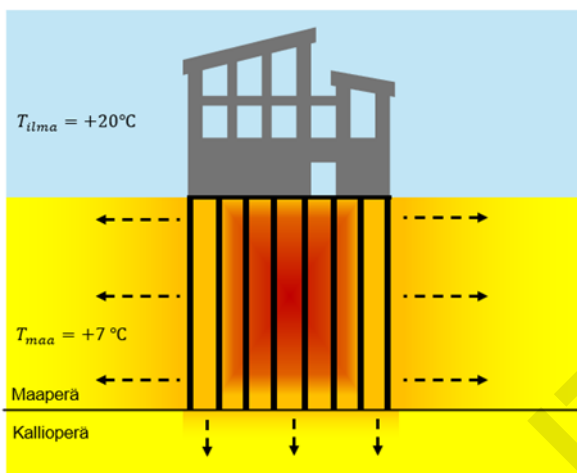
3 ENERGIAPAALUJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATE

Energiapaalujärjestelmän toiminta voidaan jakaa lämmitys- ja viilennyskauteen. Lämmityskaudella energiapaaluilla hyödynnetään matalalämpöistä maalämpöä muun muassa lämpimän käyttöveden ja tilojen lämmityksessä. Lämmönotto alentaa paaluja ympäröivän maaperän lämpötilaa, jolloin lämpö alkaa siirtyä paaluperustuksen reunamilta ympäröivästä maaperästä ja kallioperästä. *Kuva 1.*

Viilennyskaudella (kesäaika) energiapaaluilla hyödynnetään maaperän alhaista lämpötilaa lämmön varastoinnissa. Maaperän matalaa lämpötilaa voidaan hyödyntää muun muassa rakennuksen sisäilman viilentämisessä varastoimalla lämpöä perustuksen alaiseen maaperään. Lämpötilaeron kasvaessa alkaa lämpö siirtymään perustuksen alta aina paaluperustusta ympäröivään maaperään ja vähäisessä määrin kallioperään. Varastoitunutta lämpöä pystytään uusiokäyttämään tulevilla lämmityskaudella, mikä vähentää ostetun energian määrää alentaen energiakustannuksia ja päästöjä madaltaen rakennuksen käytönaikaista hiilijalanjälkeä. Varastoitaessa lämpöä uusiokäyttöön lämmityskautta varten, on kyseessä maanalainen lämmönkausi-varastointi (*underground thermal energy storage, UTES*). *Kuva 2.*



Kuva 1. Periaatekuva lämmityskauden aikaisesta maalämmön käytöstä.

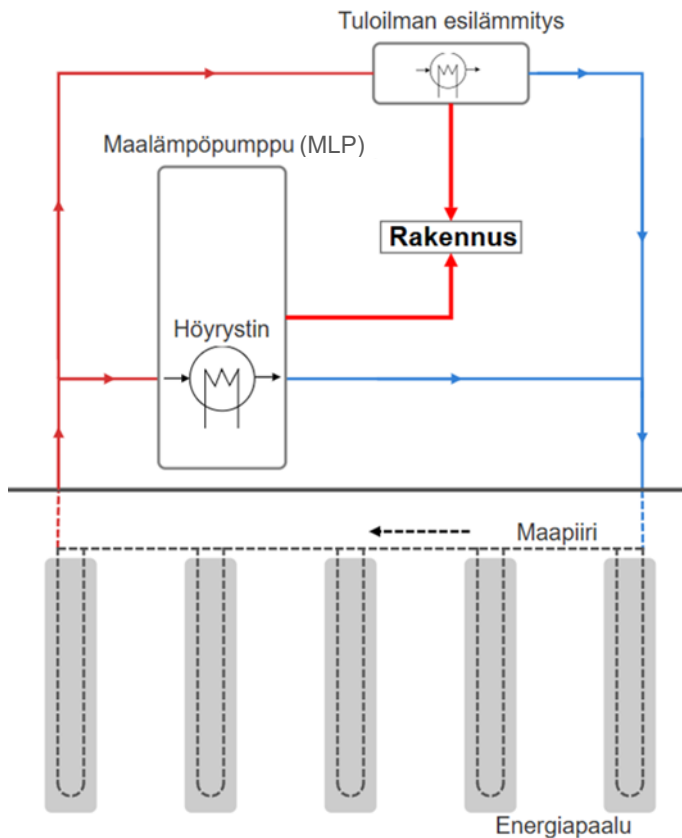


Kuva 2. Periaatekuva viilennyskauden aikaisesta lämmön varastoinnista.

Energiapaalujärjestelmää käytetään lämmityksen ja lämmön varastoinnin yhteiskäyttöön, missä lämpöä varastoidaan joko viilennyksellä tai erillisellä varastointiapplikaatiolla kuten aurinkolämpöjärjestelmällä.

Maapiirin ja laitteistojen väliset kytkennät toteutetaan jakotukilla. Jakotukin tarkoituksena on yhdistää kaikki maapiirin piirit rinnankytkentänä lämmitys- ja viilennysapplikaatioiden kytkentää varten. Jakotukkia käytetään sekä tulo- että lähtöpuolella.

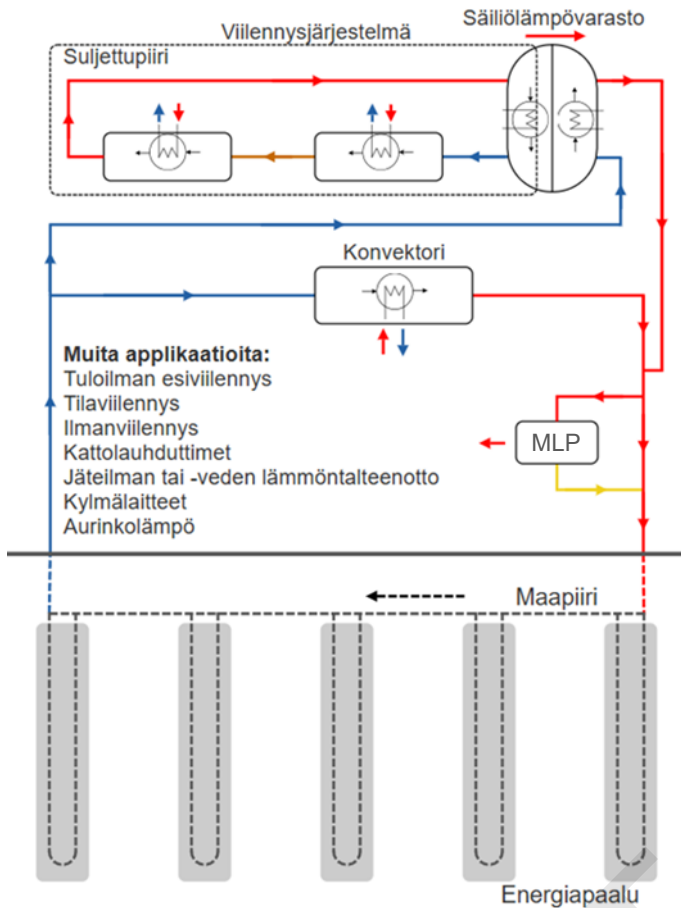
Matalalämpöinen maalämpö soveltuu niin tuloilman esilämmityksen kuin maalämpöpumpun lämmönlähteeksi. Hyödynnettäessä matalalämpöistä maalämpöä tuloilman esilämmityksessä pystytään alentamaan ostetun energian määrää madaltaen kustannuksia ja hiilijalanjälkeä sekä ehkäisemään laitteiden kylmettymistä/jäätymistä kasvattaen järjestelmän tehokkuutta. Maalämpöpumpulla (MLP) pystytään rikastamaan maalämpö lämmityskäyttöön sopivaksi ottamalla osa tuotetusta energiasta sähköverkosta kompressorin avulla. Kuva 3.



Kuva 3. Periaatekuva lämmityskäyttötilanteesta.

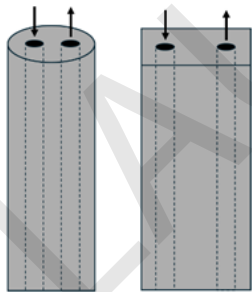
Viilennyksessä konvektorit ja tuloilman esiviilennys kytketään suoraan maapiiriin, kun taas IV-järjestelmä koostuu useista eri rakennuksen sisäisistä ilmanvaihtolaitteista, jotka kytketään rakennuksen sisällä kiertävään suljettuun nestekiertoiseen järjestelmään siirtäen lämpöä säiliölämpövarastoon. Muita soveltuvia applikaatioita lämmönvarastointiin ovat muun muassa tilaviilennys, ilmanviilennys, kattolauhduttimet, jäteilman tai -veden lämmöntalteenotto, kylmälaitteet sekä aurinkolämpö. Applikaatiot voidaan kytkeä rinnan maalämpöpumpun (MLP) kanssa, jolloin lämmennyt nestettä voidaan hyödyntää maalämpöpumpun lämmönlähteenä esimerkiksi lämpimänkäyttöveden lämmityksessä. Kuva 4.

Edellä mainittujen lämmitys- ja viilennysapplikaatioiden lisäksi, energiapaalujärjestelmään voidaan integroida muitakin soveltuvia applikaatioita kuten vastaavasti energiakaivoihin.



Kuva 4. Periaatekuva viilennyskäyttötilanteesta.

Lämmönsiirron mahdollistamiseksi paaluihin on asennettu lämmönsiirtoputkisto, jonka sisällä virtaa lämmönsiirtoneste. Kuva 5. Lämmönsiirtoputkena voidaan käyttää HDPE- tai PEX-putkea. Geoenergiajärjestelmien lämmönsiirtonesteenä käytetään muun muassa vesi-etanolisekoitusta, jotta saadaan nesteen jäätymispistettä alennettua jäätymisvaaran estämiseksi. On kuitenkin huomattava, että lämmönsiirtonesteillä on vaihtelevia ominaisuuksia muun muassa viskositeetissa ja ominaislämpökapasiteetissa, jotka vaikuttavat virtauksen dynamiikkaan ja lämmönsiirtoon.



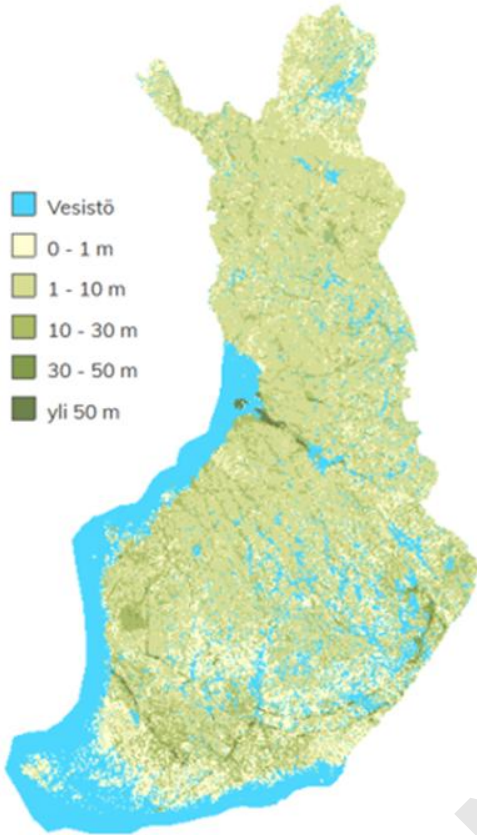
Kuva 5. Paaluun asennettava lämmönsiirtoputkisto ja virtaussuunnat.

4 MAAPERÄ

Maaperää hyödynnettäessä maalämmön käytössä ja lämmön varastoinnissa on huomioitava useita vaikuttavia tekijöitä, jotka määrittävät geoenergiajärjestelmän suorituskykyä. Vaikuttavia tekijöitä

ovat muun muassa ulkoilman vuotuinen lämpötila sekä maalajien geo- ja lämpötekniset ominaisuudet.

Suomessa maaperän syvyys vaihtelee nolasta metristä yli sataan metriin, missä syvimät alueet sijaitsevat pääasiassa Etelä-Suomen ja Pohjanmaan alueilla. Kuva 6.



Kuva 6. Maaperän paksuus (GTK).

Maanpinnan lämpötila on riippuvainen maantieteellisestä sijainnista. Mitä pohjoisemmaksi ja pois päin rannikolta siirrytään, niin sitä viileämmäksi maanpinnan vuotuinen keskilämpötila laskee. Lämpötilan vuodenaikavaihtelun syvyys tasoittuu noin 10...20 metrin syvyydessä (häiriintymätön syvyys). Maanpinnan lämpötila voidaan määrittää laskennallisesti kaavalla 1.

$$T_{maa} = (T_{ilma} * 0,71) + 2,93 \quad (\text{kaava 1})$$

missä

T_{maa} on maanpinnan lämpötila [°C] ja
 T_{ilma} ilman vuotuinen keskilämpötila [°C].

Laskennallista maanpinnan lämpötilakaavaa voidaan hyödyntää yleisessä tarkastelussa alueen häiriintymättömästä lämpötilasta. Laskentakaava soveltuu energiapaalukentän mallinnuksen maaperän lämpötilaolosuhteiden lähtötilan arviointiin, mutta vain sellaisilla alueilla, joissa ei ole rakennettua ympäristöä.

Rakennetussa ympäristössä perustuksen alaisen maaperän kausittainen lämpötilavaihtelu eroaa rakentamattomasta ympäristöstä. Alueiden urbanisoituminen vaikuttaa ympäröivän maaperän häiriintymättömään lämpötilaan. Energiapaalukentän päälle asennettava perustus vaikuttaa maaperän olosuhteisiin kuten lämpötilavaihteluihin ja routimiseen eivätkä

olosuhteet ole enää yhteneväisiä rakentamattoman ympäristön kanssa. Rakennetun ympäristön ja perustuksen vaikutukset maaperän häiriintymättömään lämpötilaan tulee tarkastella kohteittain, missä luotettavimpana toimenpiteenä on tehdä maaperän lämpötilamittaus.

Ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (1010/2017) ([RT RakMK-21763](#)) liitteen 1 mukaan Suomen alue jaetaan neljään säävyöhykkeeseen: I, II, III ja IV. [Kuva 7. Taulukossa 1](#) esitetään laskennalliset maanpinnan häiriintymättömät lämpötilat vyöhykkeittäin perustuen Ilmatieteen laitoksen julkaisemaan TRY 2020 ulkoilman lämpötilatietoihin.



Kuva 7. Suomen säävyöhykkeet ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (1010/2017) mukaan.

Taulukko 1. Laskennallinen maanpinnan häiriintymättömän lämpötila vyöhykkeittäin perustuen Ilmatieteen laitoksen TRY 2020 energialaskennan testivuosiainestien keskiarvoihin.

Vyöhyke	Sijainti	Ilma	Maa
I	Vantaa	5,9	7,1
II	Jokioinen	5,1	6,5
III	Jyväskylä	3,7	5,5
IV	Sodankylä	0,5	3,3

4.1 Ominaisuuksia

Maalajit jaetaan geo- ja rakennusteknisiin maalajiluokkiin, missä maalajiluokittelut tehdään maalajin ja raekoon mukaan. Maalajiluokittelut on esitetty [taulukoissa 2 ja 3](#). Taulukoissa ei esitetä moreenimaalajeja (Mr) tai eloperäisiä maalajeja kuten turvetta (Tv) ja liejua (Lj). Turvealueilla energiapaalujen hyödyntäminen on haasteellista, koska turpeen kuivuuessa sen vesipitoisuus ja lämpöominaisuudet heikkenevät merkittävästi.

Taulukko 2. Geotekninen maalajiluokittelu.

Maalaji	Lyhennys	Raekoko, mm
Savi	Sa	≤ 0,002
Siltti	Si	> 0,002...0,06
Hiekka	Hk	> 0,06...2,0
Sora	Sr	> 2,0...60,0
Kivet	Ki	> 60,0...600
Lohkareet	Lo	> 600

Taulukko 3. Rakennustekninen maalajiluokittelu.

Maalaji	Lyhennys	Raekoko, mm
Savi	Sa	< 0,002
Hiesu	Hs	0,002...0,02
Hietä	Ht	0,02...0,2
Hiekka	Hk	0,2...2,0
Sora	Sr	2,0...20,0
Kivet	Ki	20,0...60,0
Lohkareet	Lo	60,0...200,0

Lisäksi maalajien ominaisuudet voidaan jakaa geoteknisiin ja termogeologisiin ominaisuuksiin, missä geotekniset ominaisuudet kuvastavat maalajien koostumukseen ja termogeologiset lämpöominaisuuksiin liittyviä tekijöitä.

Geotekniset ominaisuudet

Rakeisuus kuvaa maalajin hiukkasten kokojakaumaa. Mitä suurempi raekoko, sitä suurempi veden läpäisevyys ja alhaisempi tiiviys.

Huokoisuus kuvaa maalajin sisältäviä huokostiloja, jotka sisältävät ilmaa ja/tai vettä. Mitä suurempi huokoisuus, sitä suurempi osuus kokonaistilavuudesta koostuu huokostiloista.

Vesipitoisuus kuvaa maalajin veden massan ja kuivan massan suhdetta. Mitä suurempi vesipitoisuus maalajilla, sitä suurempi määrä maalajin huokostiloista on täyttynyt vedellä ilman sijasta. Korkeampi vesipitoisuus nostaa maalajin lämpöominaisuuksia kuten lämmönjohtavuutta ja lämpökapasiteettia. Maalajien vesipitoisuudella on olennainen vaikutus energiapaalujärjestelmän suorituskyvyssä.

Termogeologiset ominaisuudet

Lämmönjohtavuus λ kuvaa maalajin ja materiaalin kykyä johtaa lämpöä ja määritetään Fourierin lain mukaisesti kaavalla 2. Mitä suurempi on lämmönjohtavuus, sitä paremmin lämpö johtuu maalajissa ja materiaalissa.

$$\lambda = - \frac{\Phi}{A \frac{\Delta T}{\Delta x}} \quad (\text{kaava 2})$$

missä

λ lämmönjohtavuus [W/m°C],

Φ lämmönsiirtoteho [W],

A pinta-ala [m²],

ΔT lämpötilan muutos [°C],

Δx siirtymä [m].

Lämpökapasiteetti Q_{maa} kuvaa maalajin kykyä sitoa lämpöä ja määritetään kaavalla 3. Mitä korkeampi on lämpökapasiteetti, sitä suurempi lämmön luovutus- tai sitomiskyky ja hitaampi lämpötilan muutos. Maan lämpökapasiteetin esimerkkilaskenta liitteessä 2.

$$Q_{maa} = C_{v,maa}V\Delta T = \rho_{maa}c_{p,maa}V\Delta T \quad (\text{kaava 3})$$

missä

Q_{maa} [J] on maan lämpökapasiteetti,
 $C_{v,maa}$ maan tilavuuslämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{m}^3\text{°C}$],
 V maan tilavuus [m^3],
 ΔT maan lämpötilan muutos [°C],
 ρ_{maa} maan tiheys [kg/m^3] ja
 $c_{p,maa}$ maan ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg}\text{°C}$].

Terminen diffusiviteetti α kuvaa maalajin reagoitinopeutta lämpötilamuutoksiin ja määritetään kaavalla 4. Mitä korkeampi termien diffusiviteetti, sitä nopeammin lämpötila voi muuttua.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho_{maa}c_{p,maa}} \quad (\text{kaava 4})$$

missä

α on termien diffusiviteetti [m^2/s],
 λ on lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m}\text{°C}$],
 ρ_{maa} maalajin tiheys [kg/m^3] ja
 $c_{p,maa}$ maalajin ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg}\text{°C}$].

Maalajit ja niiden ominaisuudet vaihtelevat kohteittain ja tulee aina määrittää geoteknisellä tutkimuksella ja soveltuvalla termogeologisella mittausmenetelmällä. Maalajikohtaiset ominaisuusarvojen vaihteluvälit ovat suurempia kuin Suomen kiteisissä kivilajeissa.

Taulukossa 4 esitetään maalajien yleisohjeellisia ominaisuusarvoja tiheydestä ρ_{maa} [kg/m^3], ominaislämpökapasiteetista $c_{p,maa}$ [$\text{J}/\text{kg}\text{°C}$] ja tilavuuslämpökapasiteetista C_v [$\text{kJ}/\text{m}^3\text{°C}$]. Yleisohjeellisia ominaisuusarvoja voidaan käyttää vain suuntaa antavina arvoina esisuunnitteluvaiheessa.

Taulukko 4. Maalajien yleisohjeellisia lämpöominaisuusarvoja.

Maalaji	luokittelu	ρ_{maa}	$c_{p,maa}$	C_v
Savi/Siltti	Kuiva	1800...2000	800...830	1500...1600
Savi/Siltti	Märkä	2000...2200	1000...1270	2000...2800
Hiekka	Kuiva	1800...2200	720...730	1300...1600
Hiekka	Kostea	1900...2200	1000	1900...2200
Hiekka	Märkä	1800...2300	1000	1800...2300
Sora	Kuiva	1800...2200	1000	1800...2200
Sora	Märkä	1900...2300	1000	1900...2300

Taulukossa 5 esitetään maalajien lämmönjohtavuuksia mitatuissa keskimääräisissä lämpötilaolosuhteissa Norjassa ja Ruotsissa sisältäen tiheyden ja vesipitoisuuden.

Taulukko 5. Maalajien lämmönjohtavuuksia eri vesipitoisuudessa ja lämpötilassa.

T_{ka}	Maalaji	ρ_m	w	λ
1	HkMr	2090	7,5	2,12
2	Hk	1520	4,5	1,08
2	Hk	1610	4,6	1,52
4	SiSa	1200	51,4	1,37
4	HkSi	1670	22,8	1,94
4	HkMr	1780	13,6	1,66
5	Sa	1030	65,0	1,03
5	SiSa	1630	0,0...14,0	0,29...1,72
5	Hk	1580	1,0...21,7	0,25...1,52
5	HkSr	1800	2,4...15,0	0,71...1,58
5	Sr	1550	0,0...28,4	0,33...1,73
9	HkMr	2020	14,0	2,36
12	Hk	1600	9,4	1,33
15	Hk	1610	4,2	1,04

4.2 Lämmön palautuminen ja häviöt

Energiapaalujärjestelmää hyödynnettäessä maalämmön käytössä ja lämmön varastoinnissa aiheutuu näistä joko lämmön palautumista tai lämpöhäviöitä. Maalämpöä hyödynnettäessä maaperän lämpötila laskee, jolloin lämpötilaltaan alhaisempaan alueeseen alkaa siirtymään lämpöä muualta ympäristöstä, jota kutsutaan luonnollisesti palautuvaksi lämmöksi. Luonnollisesti palautuva lämpö voidaan jakaa seuraaviin tekijöihin:

- auringon säteilystä maanpinnan kautta siirtyvään lämpöön (aurinkolämpö)
- perustusaluetta ympäröivään ympäristöön (maa- ja kallioperään varastoitunut aurinkolämpö)
- syvälämpöön (geoterminen lämpövuoto).

Auringon säteilystä suoraan aiheutuva lämmön kulkeutuminen maanpinnan läpi perustukseen vaihtelee kohteittain sijoittuen ajallisesti suurin piirtein termiselle kasvukaudelle. Rakennuskohteissa, joissa on esteettömämmät alueet, lämpöä siirtyy tehokkaammin maanpinnan läpi kuin niissä kohteissa, joissa auringon säteilyn pääsy perustuksen välittömään läheisyyteen on estynyt (rakenteet, eristeet yms.). Auringon säteilyn tuottamaan lämmön määrään vaikuttaa kohteen sijainti. Mitä eteläisemmässä Suomessa kohde sijaitsee, niin sitä suurempi on auringon säteilyn määrä ja sen tuottaman palautuvan lämmön osuus.

Maa- ja kallioperään varastoituneen aurinkolämmön kulkeutumiseen vaikuttaa erityisesti maa- ja kivilajien lämmönjohtavuudet muiden termogeologisten ominaisuuksien lisäksi. Varastoitunut lämpö kulkeutuu lämpötilaltaan kohti viileämpää aluetta samalla tasolta lämpöolosuhteita. Syvälämmön osuus luonnollisesti palautuvasta lämmöstä on vähäinen energiapaalukohteissa.

Lämpöhäviöt rakennuksen alle sijoitetussa energiapaalujärjestelmässä voidaan arvioida olevan noin 30...50 % ja aiheutuvat pääasiassa

- pohjavesivirtauksista (karkeampi maalaji)
- lämpötilaeroista suhteessa muuhun ympäristöön.

Pohjavesivirtaukset, joita esiintyy merkittävässä määrin karkearakeisissa maalajeissa, ovat lämmönvarastoinnin kannalta haasteellisia, koska ne siirtävät lämpöä tehokkaammin pois perustuksen välittömästä

läheisyydestä. Maaperän geoteknisten ja termogeologisten ominaisuuksien lisäksi maaperässä vallitsevat lämpötilaerot vaikuttavat lämmön poistumisen tehokkuuteen. Lämpöhäviöiden määrään vaikuttaa myös maalajien lämmönjohtavuudet. Korkeammilla maalajien lämmönjohtavuuden arvoilla lämpöä häviää tehokkaammin ympäristöön, jolloin uusiokäytettävän lämmön määrä alenee. Esimerkiksi ADTS-mittauksessa voidaan havaita maakerroksissa pohjavesivirtauksia normaalia korkeammilla lämmönjohtavuuden arvoilla.

4.3 Termogeologisia mittausmenetelmiä

Termogeologisilla mittausmenetelmillä selvitetään maaperän lämpöominaisuuksia, joiden mittaustulokset antavat tärkeää tietoa energiapaalujärjestelmän mitoitusta varten.

TRT

Terminen vastetesti (*Thermal Response Test, TRT*) on yksi mittausmenetelmistä termogeologisten parametrien määrittämiseksi. TRT-testillä pystytään selvittämään maaperän keskimääräinen lämmönjohtavuus, lämpötila sekä tutkimuspaalun lämpövastus, missä lämpövastuksella tarkoitetaan lämmönsiirtonesteen ja tutkimuspaalun välistä vastusta. Menetelmän käytössä on kuitenkin huomioitava, että mittaus esittää maaperän homogeenisenä ja pohjavesivirtaukset muuttavat lämmönsiirtokerrointa, jolloin mittaustulokset lämpöominaisuuksista voivat olla epätarkkoja.

ADTS

ADTS-mittauksella (*Active Distributed Temperature Sensing*) saadaan määritettyä eri maalajikerrosten lämmönjohtavuudet ja niiden lämpötilat alle metrin tarkkuudella yli kilometrin pituisella syvyydellä. ADTS-menetelmä perustuu valokuidulla tehtävään mittaukseen ja voidaan jakaa passiiviisiin (DTS) ja aktiiviisiin (ADTS) menetelmiin, missä aktiivisessa menetelmässä hybridivalokuitukaapelin sähkövirtaa käytetään lämmittämiseen ja valokuitua mittausten suorittamiseen.

Tarkemmilla maaperän mittaustuloksilla saadaan luotettavampaa tietoa energiapaalujärjestelmän mitoitusta varten sekä maaperän kyvystä luovuttaa ja varastoida lämpöä. Liitteessä 1 on esitettyä ADTS-mittausten tuloksia Helsingin Kyläsaaresta GTK:n toimittamana. Maalajien termogeologisia ominaisuuksia voidaan määrittää myös laboratoriomittauksilla edustavista maanäytteistä tai arvioida laskennallisesti geoteknisten tulosten perusteella.

5 ENERGIAKUORMAT

Energiapaalujärjestelmän hyödyntäminen rakennuksen lämmityksessä ja viilennyksessä vaikuttaa maaperän lämpöolosuhteisiin. Suomen kaltaisessa viileässä ilmastossa lämmitysenergian tarve on yleensä huomattavasti suurempi kuin viilennysenergian, mikä aiheuttaa haasteita energiapaalujärjestelmän mitoitukselle, suorituskyvylle ja toiminnalle. Tasapainoisen järjestelmän toiminnan kannalta on välttämätöntä, että järjestelmää hyödynnetään lämmityskäytön lisäksi myös lämmön varastointiin, jolloin pystytään palauttamaan käytettyä lämpöä ja näin vakauttamaan maaperän lämpötilaolosuhteita. Lämpöä voidaan varastoida joko viilennyksellä tai muulla varastointiin soveltuvalla applikaatiolla kuten aurinkolämpöjärjestelmällä.

Perustuksen alaista maaperän energiatasetta voidaan tarkastella kaavalla 5. Energiatasekaava kuvaa systeemissä vaikuttavia tekijöitä ja niistä muodostettavaa summaa. Energiatase on summa maaperästä käytettävästä ja varastoitavasta energiasta, luonnollisesti palautuvasta energiasta sekä häviöistä, missä energiankäyttö sekä häviöt ovat negatiivisia ja varastointi sekä luonnollinen palautuminen positiivisia arvoja. Kaavalla pystytään analysoimaan järjestelmän vuotuista tasetta ja toteutettavan järjestelmän pitkäaikaista toimintakykyä. Pitkäaikaisen toimintakyvyn varmistamiseksi negatiivista tasetta tulee välttää.

$$E_{tase,maa} = -E_{käyttö} + E_{varastointi} + E_{luon.pal.} - E_{häv.} \quad (\text{kaava 5})$$

missä

$E_{tase,maa}$ on maaperän vuotuinen energiatase [kWh],

$E_{käyttö}$ maaperästä otettava energia [kWh],

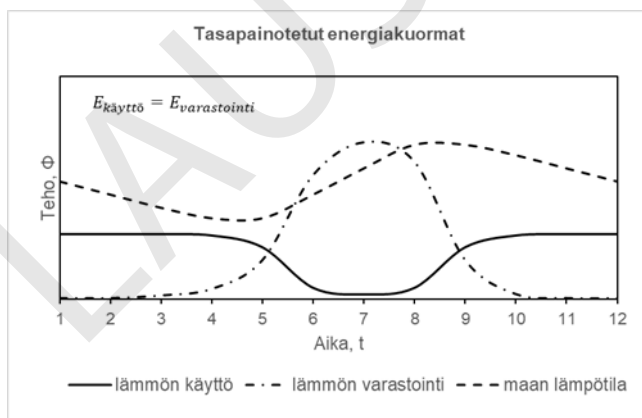
$E_{varastointi}$ maaperään varastoitava energia [kWh],

$E_{luon.pal.}$ maaperässä luonnollisesti palautuva energia [kWh] ja

$E_{häv.}$ järjestelmän häviöt maaperässä [kWh].

Energiapaalujärjestelmä tulee toteuttaa siten, että lämmityksestä ja varastoinnista aiheutuvat energiakuormat ovat tasapainossa. Maaperän vakaampien lämpötilaosuhteiden saavuttamiseksi, järjestelmän maalämmön käyttö tulee mitoittaa vastaamaan varastoituneen energian määrää, jolloin vuositasolla käytetyn ja varastoidun lämmön määrä on samassa suhteessa. Näin varmistetaan pitkäaikainen ja vakaa järjestelmän toimivuus. Lämmön varastoinnissa on otettava huomioon maaperässä aiheutuvat lämpöhäviöt.

Kuvassa 8 esitetään kalenterivuoden aikainen periaatekuvaus tasapainoisista energiakuormaprofiileista, missä lämmön käytöstä ja lämmön varastoinnista syntyvät energiakuormien määrät ovat yhtä suuret. Maaperän lämpötila laskee lämmityskauden aikana sijoittuen vuoden alku- ja loppupuolelle ja nousee viilennyskauden aikana lämmön varastoinnin vaikutuksesta. Viilennyskaudella varastoitava lämpö stabiloi maaperän lämpöolosuhteita. Mitä enemmän lämpöä saadaan palautettua maaperään, sitä paremmin pystytään turvaamaan pitkäaikainen järjestelmän toimivuus ja lämmityskauden aikainen energiatehokkaampi maalämmön käyttö.

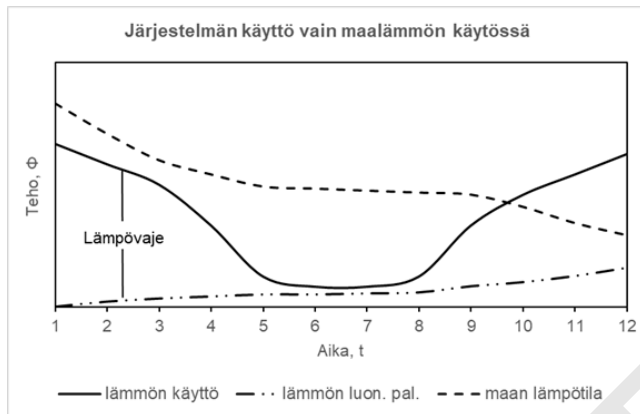


Kuva 8. Periaatekuvaus tavoitetilan mukaisesta tasapainotetusta lämmönkäytöstä ja -varastoinnista.

Energiapaalujärjestelmän käyttöä ainoastaan lämmitykseen tai varastointiin tulee välttää. Järjestelmää käytettäessä vain lämmitykseen, maalämmön määrä vähenee nopeasti ja järjestelmä kylmettyy johtuen heikommasta maalämmön palautumisesta suhteessa sen käyttöön.

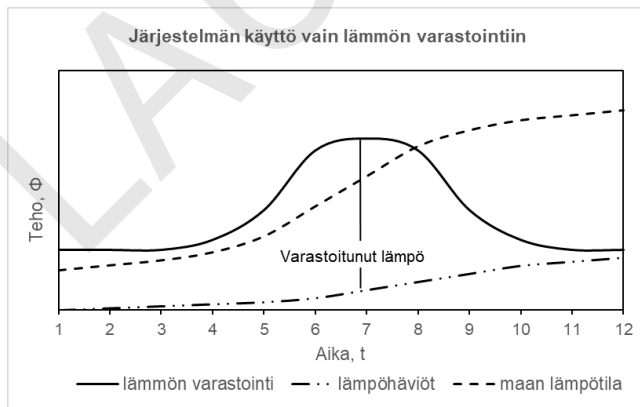
Järjestelmää käytettäessä vain lämmön varastointiin, maan lämpötila pääsee kasvamaan liian suureksi aiheuttaen järjestelmän varastointikapasiteetin alentumisen ja lopulta järjestelmän toiminnan loppumisen.

Kuvassa 9 esitetään periaatekuvaus vain lämmitykseen hyödynnettävästä järjestelmästä, missä tarkasteltavana jaksona on kalenterivuosi. Maaperän lämpötila laskee koko vuoden aikana, missä suurimmat laskut ovat vuoden alkupuolella ja loppupuolella johtuen suuremmasta lämmityksen tarpeesta. Luonnollisesti palautuvan lämmön osuus kasvaa vuoden loppua kohden, mihin vaikuttaa kasvavat lämpötilaerot. Palautuvan lämmön määrään vaikuttaa myös maaperän geotekniset ja termogeologiset ominaisuudet. Lämpövajeen kumuloituessa vuosien yli, aiheuttaa se järjestelmän kylmettymisen.



Kuva 9. Periaatekuvaus järjestelmän käytöstä vain maalämmön käyttöön kalenterivuoden aikana.

Kuvassa 10 esitetään periaatekuvaus ainoastaan varastointiin hyödynnettävästä järjestelmästä, missä tarkasteltavana jaksona on kalenterivuosi. Jatkuva lämmön varastoinnista johtuen maan lämpötila kasvaa koko vuoden aikana, missä suurin kasvu tapahtuu kesäaikana, jolloin lämmönvarastointi on korkeimmillaan johtuen suuremmasta viilennystarpeesta. Lämpöhäviön määrä maaperässä kasvaa vuoden aikana, missä suurin häviön määrä on vuoden lopussa johtuen suuremmasta lämpötilaerosta perustuksen ja muun ympäristön välillä. Lämpöhäviön määrään vaikuttaa myös maaperän geotekniset ja termogeologiset ominaisuudet. Liian suuri varastoituneen lämmön kumuloituminen vuosien yli aiheuttaa järjestelmän lämpenemisen.



Kuva 10. Periaatekuvaus järjestelmästä, jota käytetään vain lämmön varastointiin kalenterivuoden aikana.

6 ENERGIAPAALUKENTÄN SUUNNITTELU JA MITOITUS

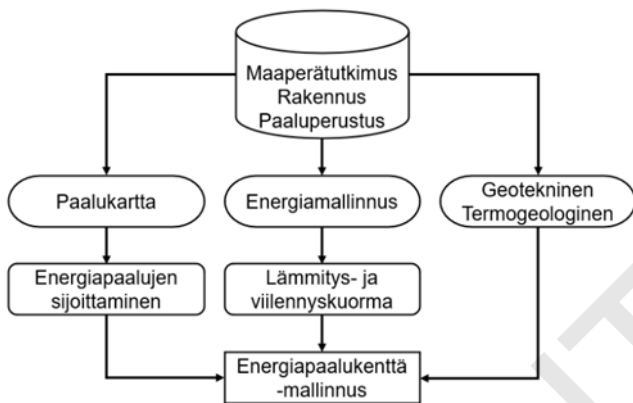
Energiapaalukentän suunnittelua ja mallinnusta varten tarvitaan tietoja rakennettavan kohteen maaperätutkimuksista, rakennuksesta ja paaluperustuksesta.

Geoteknisillä tutkimuksilla selvitetään kohteen syvyysvaihtelu ja eri maakerrosten maalajit sekä niiden ominaisuuksia kuten paksuus, tiheys ja vesipitoisuus.

Termogeologisilla tutkimuksilla selvitetään maalajien lämmönjohtavuudet, häiriintymätön lämpötila sekä mahdolliset pohjavesivirtaukset.

Rakennuksen sijainti-, materiaali- ja käyttötiedoilla pystytään laatimaan energiamallinnus, jossa määritetään lämmitys- ja viilennystehojen tarve.

Paalukartan avulla valitaan soveltuvat energipaalujen pisteet samalla arvioiden kentän tiheyttä. *Kuva 11.*



Kuva 11. Energiapaalukentän suunnittelun prosessikuvaus.

Taulukossa 6 on esitetty listaus suunnittelussa huomioitavista tekijöistä.

Taulukko 6. Suunnittelussa huomioitavat tekijät.

Aihe	Tekijä
Energiapaalu	pituus
	määrä
	asennustiheys
	materiaali
Maapiiri	alin toimintalämpötila 0 °C
	lämmönsiirtonesteen riittävä lämpötilanmuutos
	rinnan- ja sarjaankytkentä
	painehäviöt
	lämmönsiirtonesteen virtaama
	lämpö- ja tekniset ominaisuudet
Lämmönsiirtoneste	luvallisuus
	jäätymispiste
	ominaisuudet (viskositeetti, ominaislämpökapasiteetti, tiheys)
Maaperä	geotekniset ja termogeologiset ominaisuudet
	alin mitoitettava paaluja ympäröivän maaperän keskilämpötila + 3 °C (alle tämän arvon lämmönsiirtoneste ei lämpene enää riittävästi)
	häiriintymätön lämpötila
Rakennus	vaadittu energia ja teho lämmitykseen ja viilennykseen
	energiapaalujärjestelmän tuottama energia- ja teho-osuus (primaari / sekundaari)

6.1 Paalukenttä

Rakennuksen lämmitykseen ja viilennykseen suunnitellussa energiapaalukentässä käytettävien energiapaalujen määrä, tiheys, pituus ja kytkentä vaikuttavat järjestelmän suorituskykyyn. Optimaalinen energiapaalujen määrä, asennustiheys ja kytkennät suunniteltavalle kentälle saadaan määritettyä luotettavimmin mallinnuksella, jossa käytetään maaperän mitattuja geoteknisiä ja termogeologisia ominaisuuksia sekä rakennuksen lämmitys-, viilennys- ja varastointiapplikaation tehoprofiileja.

Energiapaalukenttä mallinnetaan rakennuksen lämmityksen ja viilennyksen sekä varastointiapplikaation teho-/energiaprofiileja vasten riittävän pitkällä aikavälillä 25...50 vuotta.

Energiapaalukentän mallinnuksen tavoitteena on:

- varmistaa järjestelmän pitkäaikainen toimivuus
- tarkastella lämmönsiirtonesteen ja maaperän lämpötilanmuutoksia
- mitoittaa soveltuva lämmitys-, viilennys- ja varastointiapplikaatio
- määrittää paalujen määrä, tiheys ja kytkennät

Mallinnuksesta saadaan tietoa lämmönsiirtonesteen ja maaperän lämpötilan muutoksista käytön aikana ja varmistetaan, ettei

lämmönsiirtoneste tai maaperä mene liian kylmäksi tarkasteltavalla jaksolla. Mallinnuksen perusteella pystytään mitoittamaan lämmitykseen soveltuva maalämpöpumppu ja viilennyksen lisäksi tarvittava erillinen varastointiapplikaatio maaperän lämpöolosuhteiden palauttamiseksi. Energiapaalukentän paalujen määrä, tiheys ja kytkennät riippuvat kohteittaisista tarpeista ja maaperän olosuhteista. Mallinnusta käsitellään laajemmin [luvussa 6.4](#).

Energiapaalukentän suunnittelussa tulee huomioida niin varastoitavan lämmön määrä kuin varastoituneen lämmön käyttö. Lämmityskautta varten viilennyskaudella varastoitava lämmön määrä määrittää järjestelmän tehoa sekä saatavaa energiaa.

Kentän tehoon ja energian saatavuuteen vaikuttaa myös energiapaalujen kytkennät ja tiheys. Energiapaalujen sarjaankytkentä riittävän lämpötilanmuutoksen saavuttamiseksi laskee kokonaistehoa ja energian saatavuutta suhteessa täysin rinnankytkettyyn kenttään johtuen kokonaisvirtaaman alentumasta. Kentän tiheyksillä on erilaisia vaikutuksia järjestelmän toimintaan ja soveltuvat erilaisiin käyttötarpeisiin. Kentän tiheydet voidaan jakaa seuraavasti: tasapainotettu, tiheä ja harva.

Energiataseen näkökulmasta voidaan tarkastella tilannetta, jossa hyödynnetään perustuksen alaiseen maaperään varastoitunut lämmityskauden aikainen käytettävä energiapotentiaali. Kentän tiheyden vaikutukset samalle määrälle mitoitetusta energiasta ovat seuraavat

- Tasapainotetussa kentässä paalujen määrä on optimoitu käytettävään energiapotentiaaliin nähden (ideaali)
- Liian tiheään asennetussa kentässä paalujen määrä on liian suuri käytettävään energiapotentiaaliin nähden, ja kasvattaa turhaan järjestelmän kustannuksia (ylimitoitus).
- Liian harvaan asennetussa kentässä paalujen määrä on liian vähäinen tuottamaan tarvittava energiamäärä, ja riskinä on paaluja ympäröivän maaperän jäätyminen (alimitoitus).

Tehon näkökulmasta tarkasteltuna, mitä tiheämpi energiapaalukenttä on, niin sitä suurempi hetkellinen teho. Tiheämpi energiapaalukenttä ei kuitenkaan kasvata energian saatavuutta, ellei tiheämmällä kentällä pystytä varastoimaan enemmän energiaa.

Järjestelmä voidaan suunnitella käyttöajallisesti erilaisiin tarpeisiin

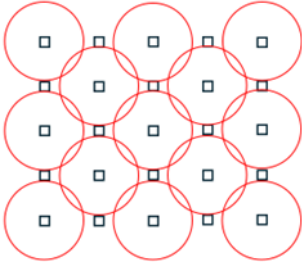
- tasaiseen käyttöön koko kauden ajaksi,
- lyhytaikaiseen käyttöön sijoittuen kauden alkuun, puoliväliin tai loppuun tai
- hetkelliseen käyttöön.

Tasaisessa käytössä järjestelmä hyödyntää varastoituneen lämmön koko lämmityskauden aikana. Riippuen varastoituneen lämmön määrästä, järjestelmän käyttö voidaan optimoida tietylle lämmityskauden ajanjaksolle. Hetkellisessä käytössä järjestelmällä voidaan alentaa energiakustannuksia korkean sähkön hinnan aikana tai käyttää järjestelmää huippupakkasjaksoilla.

Tasapainotettu energiapaalukenttä

Tasapainotetussa kentässä teho ja energiankäyttö on optimoitu koko lämmityskaudelle tai kauden aikaisille lyhyemmille ajanjaksoille. [Kuva 12](#). Viilennyskaudella varastoitunutta energiaa käytetään tasaisesti

lämmityskauden ajan tai niin kauan kuin energiaa on saatavilla. Järjestelmä soveltuu tilanteisiin, joissa lämmitetään tasaisesti koko lämmityskauden ajan tai niin kauan kuin varastoitunutta lämpöä on saatavilla.

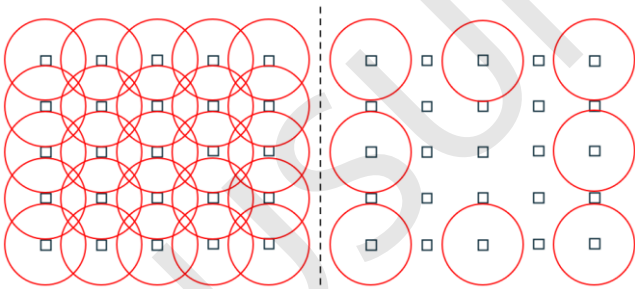


Kuva 12. Tasapainotettu energiapaalukenttä.

Tiheä ja harva energiapaalukenttä

Tiheään asennetussa kentässä suurin osa paaluista, elleivät kaikki, on vaihdettu energiapaaluiksi. Järjestelmä on optimoitu saavuttamaan korkeampia hetkellisiä tehoja niin lämmitys- kuin viilennyskauden aikana. Korkeammilla tehoilla pystytään käyttämään ja varastoimaan energiaa nopeammin kuin väljemmissä kentissä. Järjestelmä soveltuu erityisesti tilanteisiin, joissa tarvitaan hetkellisesti suurempaa lämmitystehoa kuten huippupakkasjaksot tai maksimoida korkean sähköhinnan aikainen kustannushyöty.

Harvaan asennetussa kentässä pieni osa paaluista on vaihdettu energiapaaluiksi. Järjestelmä on optimoitu matalalle käyttö- ja varastointiteholle sekä energiankäytölle ja varastoinnille niin lämmitys- kuin viilennyskauden aikana. Järjestelmä soveltuu erityisesti tilanteisiin, joissa on tarpeen hyödyntää maalämpöä vähäisesti ja matalalla teholla suhteessa kohteen kokonaistarpeeseen.



Kuva 13. Periaatekuvaus tiheään (vasen) ja harvaan (oikea) asennetusta energiapaalukentästä.

Kausittainen virtaussuuntien optimointi

Energiapaalukenttä voidaan toteuttaa kolmella erilaisella virtaussuunnalla sarjaan kytketyillä paaluilla:

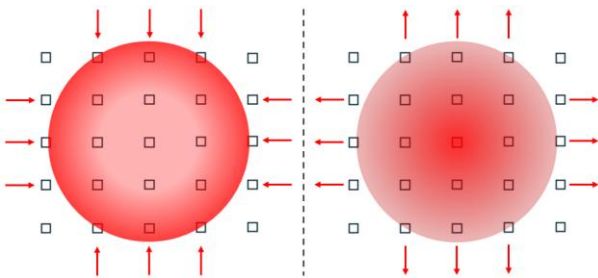
- **kumpaankin suuntaan:** optimaalinen sekä lämmön käytössä että lämmön varastoinnissa (tavoitetila)
- **keskeltä reunoille:** optimaalisin lämmön varastoinnissa
- **reunoilta keskelle:** optimaalisin lämmön käytössä.

Virtaussuunnan kausittainen vaihto mahdollistaa optimaalisemman lämmön varastoinnin ja maalämmön hyödyntämisen. Viilennyskaudella lämpö varastoidaan keskelle perustusta, jolloin lämpöhäviöt ympäristöön ovat alhaisemmat. Lämmityskaudella lämpö haetaan ensisijaisesti

perustuksen reuna-alueilta, jolloin lämpöä saadaan siirrettyä tehokkaammin myös perustusta ympäröivästä ympäristöstä. Kuva 14.

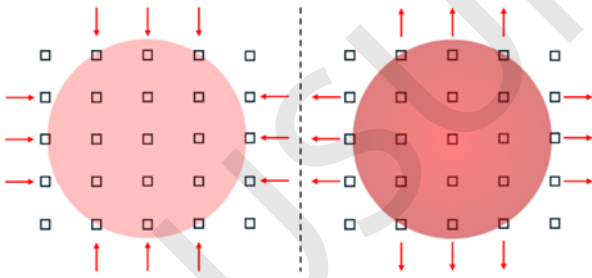
Keskeltä reunalle virtaussuunnalla hyödynnetään ensisijaisesti perustuksen keskellä sijaitsevaa maalämpöä lämmityskaudella, jolloin maalämpöä alkaa siirtymään perustuksen reunamilta kohti keskustaa. Viilennyskaudella lämpö varastoidaan ensisijaisesti perustuksen keskelle, jolloin järjestelmän lämpöhäviöt jäävät vähäisemmäksi kuin virtaussuunnalla reunoilta keskelle.

Reunoilta keskelle virtaussuunnalla hyödynnetään ensisijaisesti perustuksen reunamilla sijaitsevaa maalämpöä lämmityskaudella, jolloin maalämpö alkaa siirtymään ympäristöstä kohti perustusta. Viilennyskaudella lämpö varastoidaan ensisijaisesti perustuksen reunamille, jolloin lämpöhäviöitä syntyy enemmän lämmön siirtyessä perustuksesta ympäristöön.



Kuva 14. Periaatekuvaus sarjaan kytketystä energiapaalukentästä lämmitys- ja viilennyskaudella, missä nuolet kuvastavat lämmön liikkeen suuntaa. Lämmityskaudella lämpö otetaan perustuksen reunamilta (vasen) ja viilennyskaudella lämpö varastoidaan keskelle perustusta (oikea).

Energiapaalukentässä, jossa kaikki paalut ovat rinnankytkettyjä, on lämpötilanmuutos tasainen niin lämmitys- kuin viilennyskaudella, missä perustuksen alaisen maaperän lämpötila laskee tai nousee tasaisesti kauttaaltaan. Kuva 15.



Kuva 15. Periaatekuvaus kokonaan rinnan kytketystä energiapaalukentästä lämmitys- (vasen) ja viilennyskaudella (oikea), missä nuolet kuvastavat lämmön liikkeen suuntaa. Lämmitys- (vasen) ja viilennyskaudella (oikea) lämpö käytetään ja varastoidaan tasaisesti koko perustuksen alla.

Energiapaalukenttiä voidaan toteuttaa sekä vain rinnankytkennällä että yhdistelmänä rinnankytketyllä sarjaankytkennällä. Yhdistelmässä riittävä määrä paaluista on kytketty sarjaan riittävän lämmönsiirtonesteen lämpötilanmuutoksen saavuttamiseksi. Rinnan tai sarjaan kytkemistä on tarkkaan arvioitava ja mallinnettava, että nesteen lämpötilanmuutos on riittävä järjestelmän toiminnan kannalta.

6.2 Virtausdynamiikka

Maapiirin virtausdynaamiset tekijät kuten massavirtaus, nesteen ominaisuudet, maapiirin pituus, virtaustyyppi ja painehäviöt ovat tärkeitä tekijöitä järjestelmän suunnittelussa ja mitoittamisessa kuten kaikissa geoenergiajärjestelmissä.

Energiapaalukentän mallinnus tulee tehdä virtaukseen perustuvalla laskentaohjelmistolla eikä sitä voida mallintaa kiinteillä paalukohtaisilla kauden aikaisilla vakioehto- arvoilla. Virtaukseen perustuva laskentaohjelmisto ottaa huomioon virtauksen vaihtelevat olosuhteet sisältäen lämmönsiirtonesteen ominaisuudet, lämpötilan ja lämmönsiirtotehon, virtaustyyppin ja painehäviöt. Tässä luvussa esitetään kuitenkin laskentakaavoja massavirtauksen, painehäviön ja virtaustyyppin määrittämiseksi.

Massavirtaus on yksi virtauksellisista tekijöistä, joka vaikuttaa nesteen lämmönsiirtotehoon ja lasketaan kaavalla 6. Järjestelmän piirikohtainen massavirtaus tulee mitoittaa niin, että nesteen lämmönsiirtoteho ja palautuvan nesteen lämpötilan muutos on riittävä. Samalla huomioiden mahdollisimman korkea kokonaismassavirtaus. Virtausnopeus tulee asettaa sellaiselle tasolle, ettei painehäviöt kasva liian suureksi.

$$\dot{m} = \dot{V} \rho_{\text{neste}} = Av \rho_{\text{neste}} \quad (\text{kaava 6})$$

missä

\dot{m} on massavirtaus [kg/s],

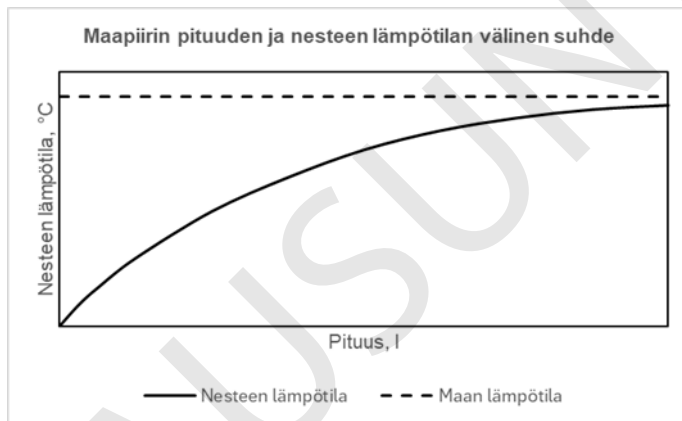
\dot{V} on tilavuusvirtaus [m³/s],

ρ_{neste} nesteen tiheys [kg/m³],

A putken sisäpuolen leikkauspinta-ala [m²] ja

v virtausnopeus [m/s].

Maapiiriä saadaan pidennettyä energiapaalujen sarjaankytkennällä ja näin kasvatettua muutosta palautuvan nesteen lämpötilassa. Kuva 16. Pidemmällä maapiirillä mahdollistetaan suurempi nesteen lämpötilanmuutos niin lämmitys- kuin viilennyskaudella.



Kuva 16. Periaatekuva maapiirin pituuden vaikutuksesta nesteen lämpötilan muutokseen.

Putken sisähalkaisija tai suositeltu virtausnopeus voidaan määrittää kaavalla 7.

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{V}}{\pi\bar{v}}} \quad (\text{kaava 7})$$

missä

D on putken sisähalkaisija [m],

\dot{V} tilavuusvirtaus [m³/s] ja

\bar{v} suositeltu virtausnopeus [m/s].

Maapiirissä, jossa syvyysmuutokset ovat yhtä suuret, painehäviöt määritetään kaavalla 8.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_{\text{neste}} v^2 \left(f \frac{l}{d} + \sum K \right) \quad (\text{kaava 8})$$

missä

Δp on virtauksesta aiheutuvat painehäviöt [kg/ms^2],

v virtausnopeus [m/s],

f kitkakerroin [-],

l putken pituus [m],

d putken sisähalkaisija [m] ja

$\sum K$ kertavastusten summa [-].

Kitkakerroin voidaan määrittää Moodyn diagrammista Reynoldsin luvulla Re ja putken sisäpinnan suhteellisella karheusluvulla ε , missä Reynoldsin luku määritetään kaavalla 9.

$$Re = \frac{\rho_{\text{neste}} v D}{\mu} \quad (\text{kaava 9})$$

missä

μ on nesteen dynaaminen viskositeetti [kg/ms] ja

D putken hydraulinen halkaisija [m].

Putken sisäpinnan suhteellinen karheus määritetään kaavalla 10.

$$\varepsilon = \frac{\epsilon}{d} \quad (\text{kaava 10})$$

missä

ϵ on putken sisäpinnan karheus [mm]. Putken sisäpinnan ominaisuudet vaikuttavat virtauksen luonteeseen.

Kertavastuksia muodostuu maapiirin venttiileistä, mutkista ja jakotukeista. Taulukossa 7 esitetään esimerkkiarvoja kertavastuksista maapiirissä muodostuvista mutkista niin paalujen alaosaan kuin maanpinnalla vaakavetojen kytkennästä.

Taulukko 7. Kertavastuksien esimerkkiarvoja.

Kääntöaste	Kertavastus
90° (loiva)	0,15
90° (jyrkkä)	0,30
180° (U-mutka)	0,20

Nesteen ja maaperän välisen sujuvan lämmönsiirron varmistamiseksi, virtauksen on oltava turbulenti. Virtaustyyppi määritetään Reynoldsin luvulla Re kaavalla 9, missä virtaustyypit ovat jaoteltu seuraavasti

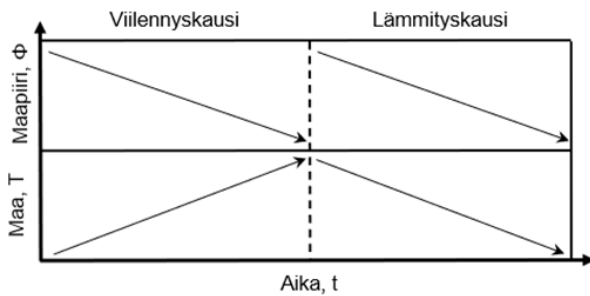
- laminaarinen virtaus $Re < 2\,100$
- transitoalue $Re\ 2\,100 \dots 4\,000$
- turbulenti $Re > 4\,000$

Virtauksen turbulentsuutta pystytään kasvattamaan rihlatulla lämmönsiirtoputkella samassa virtausnopeudessa, jolloin lämmönsiirto nesteen ja maan välillä tehostuu.

6.3 Tehon mitoitus

Energiapaalukenttä suunnitellaan ja mitoitetaan toteutettavan paalukentän puitteissa. Tämä asettaa toteutettavalle järjestelmälle reunaehdot, jotka tulee huomioida järjestelmän mitoituksessa. Mitoituksen tueksi tässä luvussa esitetään teoreettisia laskentakaavoja, jotka ovat suuntaa antavia eivätkä ota huomioon häviöitä tai muuttuvia olosuhteita.

Lämmitys- ja viilennyskauden alussa maapiirin teho on korkeimmillaan, koska lämmönsiirtotehot nesteen ja maaperän välillä ovat suurimmillaan johtuen lämpötilaerosta. Viilennyskauden kuluessa lämpöä varastoidaan perustuksen alle, jolloin maaperän lämpötila nousee. Lämpötilan nousu vaikuttaa maapiirin varastointitehoon alentavasti. Lämmityskauden kuluessa maaperän lämpötila perustuksen alla ja välittömässä läheisyydessä laskee, mikä vaikuttaa maapiirin tehoon alentavasti, jos luonnollinen maalämmön palautuminen ei ole riittävää. Kausien aikainen maapiirin tehon alentuminen tulee huomioida mitoituksen suunnittelussa erityisesti huipputehossa. Kuva 17.

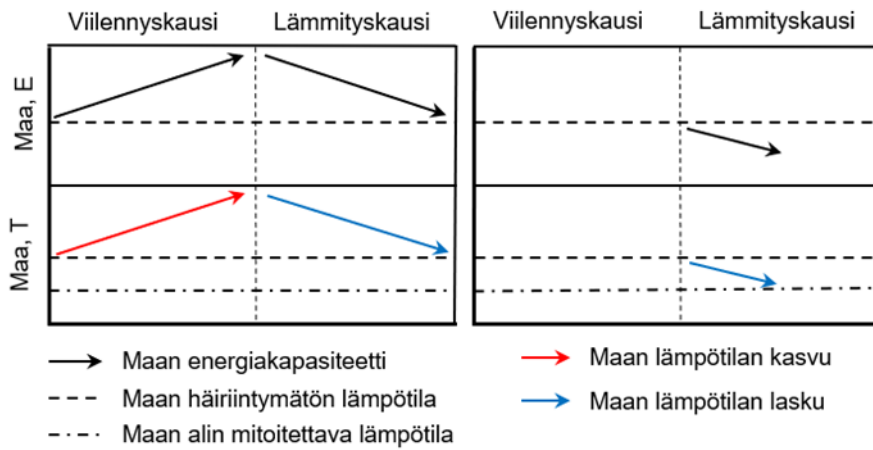


Kuva 17. Periaatekuva maaperän lämpötilan ja maapiirin tehon suhteesta.

Mitoituksessa tulee huomioida alin mitoittettava paaluja ympäröivän maaperän keskilämpötilan raja-arvo $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Raja-arvo toimii mitoituksen lähtökohtana ja turvakeinona, ettei maata ajeta liian kylmäksi lämmityskauden aikana. Raja-arvo toimii myös lämmönsiirtonesteelle sääntelevänä tekijänä. Maaperän keskimääräisen lämpötilan alittaessa $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, lämmönsiirtoneste ei lämpene enää riittävästi.

Järjestelmän lämmitysteho ja energian käyttömäärä on riippuvainen maaperään varastoituneesta lämmön määrästä. Järjestelmän käyttöönotto tulee ajoittaa sellaiseen ajankohtaan, että varastoitu energian määrä vastaa lämmityskaudelle mitoittettua energiankäytön määrää. Tällä tavalla varmistetaan lämmityskauden aikaiset vakaat maaperän lämpöolosuhteet ja mitoitetun energian saatavuus.

Kuvassa 18 esitetään vertaileva tilanne järjestelmän käyttöönottoajankohdan vaikutuksista lämmityskauden aikaiseen maaperän lämpöolosuhteisiin ja energian saatavuuteen. Viilennyskauden alussa käyttöönotetussa järjestelmässä maaperän lämpöolosuhteet pysyvät vakaina koko lämmityskauden aikana, kun lämmityskauden aikainen käytettävä energia vastaa viilennyskaudella varastoitua energian määrää. Lämmityskauden alussa käyttöönotetussa järjestelmässä maaperän lämpöolosuhteiden alkutilanne on alhaisempi ja saatava energia vähäisempi. Tilanteessa maan alin mitoittettava lämpötila toimii raja-arvona ja määrittää energian saatavuuden.



Kuva 18. Periaatekuvaus viilennys- (vasen) ja lämmityskauden (oikea) käyttöönoton eroavaisuuksista ja vaikutuksista lämmityskauden aikaiseen energiansaantiin.

Geoenergiajärjestelmissä voi esiintyä suorituskyvyn heikentymistä, mikä tulee ottaa huomioon energiajärjestelmän mitoituksessa.

Energiapaalujärjestelmien suorituskyvyn alenema voi olla 20 %:n luokkaa. Suorituskyvyn alenema voi johtua maaperän heikentyvistä lämpöolosuhteista pitkällä aikavälillä. Mahdollista suorituskyvyn alenemaa pystytään tarkastelemaan mallinnusten avulla.

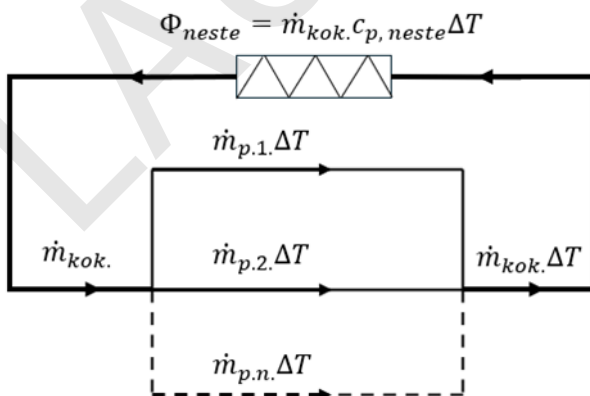
Energiapaalukentän maapiirin lämmönsiirtonesteen lämmönsiirtoteho lasketaan *kaavalla 11*, ja on riippuvainen kokonaismassavirtauksesta, nesteen ominaislämpökapasiteetista sekä nesteen lämpötilan muutoksesta

$$\Phi_{neste} = \dot{m}_{kok} \cdot c_{p,neste} \Delta T \quad (\text{kaava 11})$$

missä

Φ_{neste} on nesteen lämmönsiirtoteho [kW],
 \dot{m}_{kok} kokonaismassavirtaus [kg/s],
 $c_{p,neste}$ nesteen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C] ja
 ΔT nesteen lämpötilan muutos [°C].

Kuvassa 19 $\dot{m}_{p,1}$, $\dot{m}_{p,2}$ ja $\dot{m}_{p,n}$ kuvastavat maapiirin kokonaismassavirtauksen \dot{m}_{kok} jakautumista rinnan kytkettyihin piireihin, jotka muodostuvat joko yksittäisistä tai sarjaan kytketyistä energiapaaluista. Maapiirin tehon määrittämiseen esimerkkilaskentoja *liitteessä 3*.



Kuva 19. Periaatekuva massavirtauksen jakautumisesta piireihin.

Energiapaalukentän kokonaisteho on riippuvainen kaikista energiapaaluista muodostettavista piireistä. Jos osassa piirejä nesteen lämpötilanmuutos jää huomattavasti alhaisemmaksi, niin tämä vaikuttaa kokonaislämpötilan muutokseen ja kokonaistehoon.

Energiapaalumetrin teho maapiirin puolelta määritetään kaavalla 12. On kuitenkin huomattava, että laskentakaava keskimääräistää tehon kaikista energiapaaluista eikä huomioi mahdollisia paalujen tai piirien välisiä tehon vaihteluita.

$$\Phi_{ep} = \frac{\Phi_{maapiiri}}{l_{ep,kok.}} \quad (\text{kaava 12})$$

missä

Φ_{ep} on energiapaaluille määritetty metrikohtainen teho [W/m].

$\Phi_{maapiiri}$ maapiirin kokonaisteho [W] ja

$l_{ep,kok.}$ energiapaalukentästä muodostettavien energiapaalujen yhteispituus [m].

Energian määrä suhteutettuna perustuksen pinta-alaan määritetään kaavalla 13.

$$E_{ala} = \frac{E_{kok.}}{A_{perustus}} \quad (\text{kaava 13})$$

missä

E_{ala} on energian määrä suhteutettuna pinta-alaan [kWh/m²],

$E_{kok.}$ maasta otettu tai maahan siirretty kokonaisenergia [kWh] ja

$A_{perustus}$ perustuksen pinta-ala [m²].

Maalämpöpumppu

Maalämpöpumpun kompressorin käyttämä sähköteho määritetään kaavalla 14.

$$\Phi_{komp.} = \frac{\Phi_{höy.}}{COP-1} \quad (\text{kaava 14})$$

missä

$\Phi_{komp.}$ on kompressorin sähköteho [kW],

$\Phi_{höy.}$ höyrystimen teho [kW] ja

COP lämpöpumpun toimintapisteen hyötysuhde [-].

Maalämpöpumpun hyötysuhde määritetään kaavalla 15.

$$COP = \frac{\Phi_{lauh.}}{\Phi_{komp.}} \quad (\text{kaava 15})$$

missä

$\Phi_{lauh.}$ on lauhduttimen teho [kW].

Maalämpöpumpun tuottama kokonaisteho määritetään kaavalla 16.

$$\Phi_{lauh.} = \Phi_{höy.} + \Phi_{komp.} \quad (\text{kaava 16})$$

Maalämpöpumpun sujuvan ja tehokkaan toiminnan kannalta tulee ottaa huomioon nesteen vähimmäislämpötilan muutos höyrystimellä 3...5 °C. Maalämpöpumppujen höyrystinpiirin toiminta on optimoitu 4 °C muutokseen. Maapiirin menolämpötilan ollessa 0 °C, nesteen tavoiteltu lämpötilanmuutos on + 3...5 °C palatessaan maapiiriltä höyrystimelle lämmityskauden aikana. Myös liian korkeat lämpötilat aiheuttavat toiminnallisia ongelmia lämpöpumpulle. Lämpöpumpun korkein

toimintalämpötilaraja asettaa maksimilämpötilan palautuvalle nesteelle, mikä tulee huomioida mitoituksessa.

Lämpötasetarkastelu

Maapiirin lämmönsiirtonesteen ja tulo- tai poistoilman välillä tapahtuvaa tehon siirtoa esilämmityksessä, esiviilennyksessä tai lämmöntalteenotossa voidaan arvioida lämpötaseen kaavalla 17.

$$\Phi = \dot{m}_{neste} c_{p,neste} \Delta T = \dot{m}_{ilma} c_{p,ilma} \Delta T \quad (\text{kaava 17})$$

missä

Φ on tulo- tai poistoilman ja maapiirin välillä siirtyvä teho [kW],

\dot{m}_{neste} lämmönsiirtonesteen massavirtaus [kg/s],

\dot{m}_{ilma} tuloilman massavirtaus [kg/s] ja

$c_{p,ilma}$ ilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C].

Lämmönvaihdin

Vasta- tai myötävirtalämmönvaihtimen teho määritetään kaavalla 18 (esimerkiksi tuloilmajärjestelmässä).

$$\Phi_{lv} = UA\Delta T_{ln} \quad (\text{kaava 18})$$

missä

Φ_{lv} on lämmönvaihtimen teho [kW],

U on lämmönsiirtokerroin [W/m²°C],

A lämmönvaihtimen pinta-ala [m²] ja

ΔT_{ln} logaritminen lämpötilaero [°C]

Lämmönsiirtokerroin määritetään kaavalla 19.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{viileä}} + \frac{d_{vaihdin}}{\lambda_{vaihdin}} + \frac{d_{liika}}{\lambda_{liika}} + \frac{1}{\alpha_{lämmin}} \quad (\text{kaava 19})$$

missä

$\alpha_{viileä}$ on viileän puoleisen fluidin lämmönsiirtokerroin [W/m²°C],

$d_{vaihdin}$ vaihtimen paksuus [m],

$\lambda_{vaihdin}$ vaihtimen lämmönjohtavuus [W/m°C],

d_{liika} vaihtimen pintaan kertynyt likakerroksen paksuus [m],

λ_{liika} lian lämmönjohtavuus [W/m°C] ja

$\alpha_{lämmin}$ lämpimän puoleisen fluidin lämmönsiirtokerroin [W/m²°C].

Logaritminen lämpötilaero määritetään kaavalla 20.

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{lämmin\ puoli} - \Delta T_{viileä\ puoli}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{lämmin\ puoli}}{\Delta T_{viileä\ puoli}}\right)} \quad (\text{kaava 20})$$

missä

$\Delta T_{lämmin\ puoli}$ on lämmönvaihtimen lämpimän puolen fluidien lämpötilaero

[°C] ja

$\Delta T_{viileä\ puoli}$ viileän puolen fluidien lämpötilaero [°C].

6.4 Mallinnukset

Mallinnukset ovat välttämättömiä mitoituksessa, niiden perusteella selvitetään rakennuksen energiatarpeet ja tehoprofiilit, maaperän olosuhteet sekä energiapaalukentän toiminnallisuus. Mallinnusten aikaresoluutiona käytetään yhden tunnin aikajaksoa ja laskenta energiapaalukentästä tehdään 25...50 vuoden ajalta.

Rakennus

Rakennuksen vuotuiset energia- ja tehotarpeet niin lämmityksessä kuin viilennyksessä lasketaan siihen soveltuvalla ohjelmistolla. Rakennuksen energiamallinnuksen tuntikohtaiset teho-, lämpötila- ja virtausprofiilit toimivat syöttötietoina energiapaalukentän mallinnukselle.

Mallinnuksessa tulee huomioida seuraavat asiat:

- Rakennuksen pohja-, seinä-, katto- ja ikkunapinta-ala
- Rakennemateriaalit ominaisuustietoineen (sis. ikkunat ja ovet)
- Kylmäsilat
- Ilmanvaihto
- Käyttöajat ja muut kuormat (ml. auringon säteily)
- Sijoittuminen ilmansuuntiin
- Lämminkäyttövesi
- Vuotuiset sisä- ja ulkolämpötilat.

Energiapaalukenttä

Energiapaalukentän mallintaminen toteutetaan dynaamisella, virtaukseen perustuvalla mallinnusohjelmalla, jossa laskenta ottaa huomioon mallinnuksen aikaiset vaihtelevat virtausolosuhteet nesteessä sekä lämpöolosuhteet nesteessä, paalussa ja maaperässä. Mallinnuksen avulla pystytään tarkastelemaan lämmönsiirtonesteen ja maaperän lämpötilakäyttäytymistä.

Mallinnuksessa tulee huomioida seuraavat asiat

- Mallinnettava kenttä tulee olla 1:1 suunnitellun paalukentän kanssa, missä huomioidaan energiapaalujen pisteet paalukartan mukaisesti
- Energiapaalut vastaavat kohteeseen asennettavia paaluja
- Energiapaalun lämmönsiirtovastus
- Piirien sarjaan- ja rinnankytkennät
- Lämmönsiirtonesteen ominaisuudet ja virtaus
- Maaperätutkimuksen geotekniset ja termogeologiset ominaisuudet
- Kentän yläpuolinen perustus ja rakennuksen alapohja (vaikuttaa kentän pintalämpötilaan)
- Rakennuksen vuotuinen tuntikohtainen lämmitys- ja viilennystehoprofiili
- Erillisen varastointiapplikaation tuntikohtainen tehoprofiili (kuten aurinkolämpöjärjestelmä).

Mallinnuksessa tarvittavat paalun, maapiirin, lämmönsiirtonesteen ja maaperän maalajien ominaisuustiedot esitetään taulukossa 8.

Taulukko 8. Mallinnukseen tarvittavat ominaisuustiedot.

Muuttuja	Yksikkö	Paalu	Maapiiri	Neste	Maaperä
pituus	m	X			
halkaisija	m	X			
sisähalkaisija	m		X		
ulkohalkaisija	m		X		
lämmönjohtavuus	W/mK	X	X	X	X
ominaislämpökap.	J/kgK	X	X	X	X
tiheys	kg/m ³	X	X	X	X
dyn. viskositeetti	kg/ms			X	
pintalämpötila	°C				X
häiriintymätön lämp.	°C				X

6.5 Riski- ja herkkyystarkastelu

Riski-, virhe- ja herkkyystarkastelun vaikutukset on otettava huomioon jokaisessa toteutettavassa energiapaalujärjestelmässä.

Riskitarkastelu

Energiapaalujärjestelmän käyttöön liittyviä riskejä ja niiden hallintakeinoja esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Riskienhallinta.

Riski	Hallintakeino
Maaperän liiallinen lämpeneminen (varastointi)	Aktiivijäähdytys- ja aurinkolämpöjärjestelmän liian korkeiden lämpötilojen rajoittaminen. Maahan menevän lämmönsiirtonesteen rajoittaminen ennen maapiiriä (shunttaus).
Maaperän ja perustuksen jäätyminen	Nesteen lämpötila oltava vähintään 0 °C ja paluulämpötila plussalla. Mallinuksissa tarkastella vaikutuksia paalujen ja maaperän lämpötiloihin nesteen lämpötilan ollessa 0 °C pitkäaikaisesti.
Järjestelmän ylikuormitus	Maalämpöpumpun, viilennysapplikaation ja varastointiapplikaation tehon mitoitus energiapaalukentän suorituskyvyn mukaisesti. Lämmön varastoinnissa ja käytössä huomioitava maaperän lämmönsiirron vastaanotto- ja siirtokyky.
Järjestelmän tehon aleneminen	Lämmityksessä huomioitava lisä- tai varalämmityskapasiteetti, kuten suurempi sähkövastus maalämpöpumpulle tai ilmalämpöpumppu. Viilennyksessä huomioitava erillisenä applikaationa kuten ilmalämpöpumppu.
Lämmönsiirtonesteen jäätyminen tuloilman esilämmityksessä	Teknisillä järjestelmillä estää lähtevän nesteen joutumista alle 0 °C. Vaihtoehtoisesti palaava neste ei saa laskea alle + 3 °C.
Maapiirin liitosten rikkoutuminen	Rakenteisiin kiinnitys, niin että perustuksen paikallinen vajoaminen ei irrota putkia liitoksista.
Asennuksen aikainen maapiirin rikkoutuminen paalussa	Maapiirin eheys testataan paineistamalla putkisto paalutuksen jälkeen.
Lämmönsiirtonesteen vuotaminen toiminnan aikana	Neste oltava säännösten mukainen ja ympäristöystävällinen. Jokaiselle piirille tulee olla oma sulkuventtiili, jolloin rikkoutunut piiri saadaan eristettyä.

Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelu on tärkeä vaikutustenarviointimenetelmä, millä saadaan tarkasteltua mahdollisten olosuhteiden vaihteluiden vaikutuksia järjestelmän mitoitettuun suorituskykyyn. Mallinuksissa on hyvä tehdä herkkyystarkastelua sellaisistakin olosuhteista, jotka ovat mahdollisia ja heikentävät järjestelmän suorituskykyä. Näin pystytään ennakoimaan mahdollisia suorituskyvyn heikentämiseen vaikuttavia tekijöitä.

Näitä ovat

- maaperän ominaisuuksien vaihtelut
- rakentamisen jälkeiset lämpötilaolosuhteet maaperässä
- ilmataskut
- energiapaalukentän asennustiheyden vaikutukset mitoitukseen
- piirin pituuden vaikutus lämmönsiirtonesteen lämpötilaan
- lämmönsiirtonesteen lämpötilapoikkeamat
- lämmitys- ja viilennyskuormien vaihtelut

Maaperän ominaisuudet voivat vaihdella tutkituista arvoista paaluperustuksen alueella. Mittaukset suoritetaan tietyistä kohdista ja voi erota tutkimattomasta alueesta. Ominaisuuksien vaihtelut voivat näkyä maalajien geoteknisten ja termogeologisten ominaisuuksien vaihteluna kuten vesipitoisuudessa ja lämmönjohtavuudessa. Mallinnuksessa on vältettävä liian suopeita arvoja, jos joudutaan yleistämään mitattuja arvoja. Rasitustestin kaltainen mallinnus on kannatettavaa välttääkseen mitoitusvirheet, missä maalajien lämpöominaisuuksille annetaan alempia arvoja mitatuista arvoista.

Perustuksen alaisen maaperän kausittainen lämpötilavaihtelu tasoittuu rakentamisen myötä. Tämä näkyy erityisesti häiriintymättömän lämpötilan ja maanpinnan yläosan kausilämpötilavaihteluiden kaventumisena. Alapohjan alaisen maan ja maaperän häiriintymättömän lämpötilan välillä vallitseva eroavaisuus on otettava huomioon mallinnuksen alkutilanteessa.

Energiapaalujen pinnalla ja maaperässä sijaitsevat ilmataskut toimivat eristeen kaltaisesti ja estävät tehokkaasti lämmönsiirtoa. Erityisesti lohkaraita sisältävät maaperät voivat aiheuttaa tämänkaltaisia tilanteita, kun lohkareet liikkuvat maan sisällä paalutuksen aikana. Kohteissa, joissa tiedetään maaperän sisältävän suhteellisen paljon lohkaraita, voidaan tilannetta kompensoida lämmönjohtavuusarvon madaltamisella, kuitenkin vähäisessä määrin.

Energiapaalukentän asennustiheys vaikuttaa järjestelmän toimintaan. Asennustiheyden vaikutuksia mitoitukseen voidaan analysoida tekemällä mallinnuksia energiapaalukentän eri asennustiheyksistä perustuen toteutettavaan paaluperustukseen. Asennustiheyden tarkastelun avulla saadaan määritettyä optimaalisin kentän tiheys.

Energiapaaluista muodostettava lämmönsiirtoputken pituuden vaikutusta lämmönsiirtonesteen lämpötilanmuutokseen pystytään tarkastelemaan mallinnuksessa piirien rinnan ja sarjaan kytkennällä. Tarkastelun tarkoituksena on varmistua riittävästä nesteen lämpötilanmuutoksesta maapiirissä niin lämmitys- kuin viilennyskaudella.

Lämmönsiirtonesteen lämpötilojen mahdolliset toiminnanaikaiset poikkeamat mallinnukseen verrattuna. Toiminnan aikaiset liian alhaiset lämpötilat voivat johtua lämmön riittämättömyydestä paalun tuntumassa, mikä voi johtua maaperän odotetusta heikommasta lämmönjohtavuudesta tai alhaisemmasta lämpökapasiteetin määrästä. Korkeammat nesteen lämpötilat verrattuna mallinnukseen voivat johtua viilennys- tai varastointiapplikaation suuremmista lämmönsiirtotehoista kuin suunnittelussa huomioitu tai maaperän odotetusta heikommasta lämmön vastaanottokyvystä. Lämmönsiirtonesteen mahdollisia lämpötilapoikkeamia ja niiden vaikutuksia järjestelmän suorituskykyyn on syytä arvioida.

Rakennuksen lämmitys- ja viilennyskuormien muutokset voivat näkyä arvioitua lämpöisemmissä tai kylmemmissä talvissa ja kesissä. Myös poikkeuksellisen pitkät ja kuumat hellejaksot sekä kylmät pakkasjaksot vaikuttavat olennaisesti järjestelmän suorituskykyyn, ja on otettava huomioon mitoituksessa. Pitkäaikaisissa mallinuksissa lämpötilaennusteita voidaan käyttää arvioitaessa kuormien muutosvaikutuksia.

KIRJALLISUUTTA

Lait ja asetukset

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma 1010/2017. [RT RakMK-21763. 2018.](#)

Ympäristönsuojelulaki. Suomen säädöskokoelma 527/2014. [RT 104009. 2026.](#)

Rakennustiedon julkaisut

[RT 103137 Lämpöenergian kausivarastointi. 2020.](#)

[LVI 11-10624 Maalämpöpumput. Kiinteistöjärjestelmät. 2018.](#)

[LVI 11-10623 Maalämpöpumput. Pientalot. 2018.](#)

[RT 103692 Lämmitystarveluku. Rakennusten energiankulutuksen seuranta. 2023.](#)

Muu kirjallisuus

Maalajien lämpöteknillisistä ominaisuuksista. A. Aittomäki ja K. Saviharju. VTT. 1971.

A case study of the sizing and optimisation of an energy pile foundation (Rosborg, Denmark). M. AlberdiPagola, S. Poulsen, R. Jensen ja S. Madsen. 2020.

A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings. R. Cunha ja P. Bourne-Webb. 2022.

Heat storage in soft clay. Field tests with heating (70 °C) and freezing of the soil. A. Gabrielsson, M. Lehtmetts, M. Lovisa ja U. Bergdahl. Swedish Geotekniska Institut. 1997.

Maaperän lämmönjohtavuusmittaukset Helsingin Kyläsaarella. ADTS-mittausraportti. P. Hakala ja T. Arola. Geologian tutkimuskeskus. 2022.

Novel use of the enhanced thermal response test in crystalline bedrock. P. Hakala, S. Vallin, T. Arola ja I. Martinkauppi. 2022.

Thermal Conductivity of Soils. O. Johansen. 1977.

Maalämpöohje suunnittelijoille. Helsingin kaupunki. 2023.

Suomen maalajien ominaisuuksia. N. Ronkainen. Suomen ympäristökeskus. 2012.

Ground Energy. Technical information. Uponor GmbH. 2012.

Vertical variation of apparent and palaeoclimatically corrected heat flow densities in the central Baltic Shield. I. Kukkonen. 1987.

Verkkosivut

Energialaskennan testivuodet 2020. [Ilmatieteen laitos](#).

Vesilupa. [Lupa- ja valvontavirasto](#).

Pohjatutkimusmerkinnät. [Suomen geoteknillinen yhdistys](#).

Kuva- ja taulukkoluetelo

Uponor Suomi Oy / GF Building Flow Solutions. Taulukko 4.

Tekijät

Rakennustietosäätiö RTS sr:n toimikunta TK 492

Energiapaalukentän mitoitus

- Teppo Arola, Geologian tutkimuskeskus, toimikunnan puheenjohtaja
- Tomi Rantala, Helsingin kaupunki
- Marko Ewart, Sitowise Oy
- Riku Maidell, Sweco Finland Oy
- Timo-Mikael Sivula, Granlund Oy
- Nikolas Salomaa, nolla_E Oy
- Valteri Viitikko, Rakennustieto Oy, toimikunnan sihteeri

Käsikirjoittaja

- Patrick Yliluoto, Tilastokeskus
- Rauli Lautkankare, Turun ammattikorkeakoulu Oy

Projektipäällikkö

- Valteri Viitikko, Rakennustieto Oy

Liite 1. Helsingin Kyläsaaren ADTS-mittaustulokset

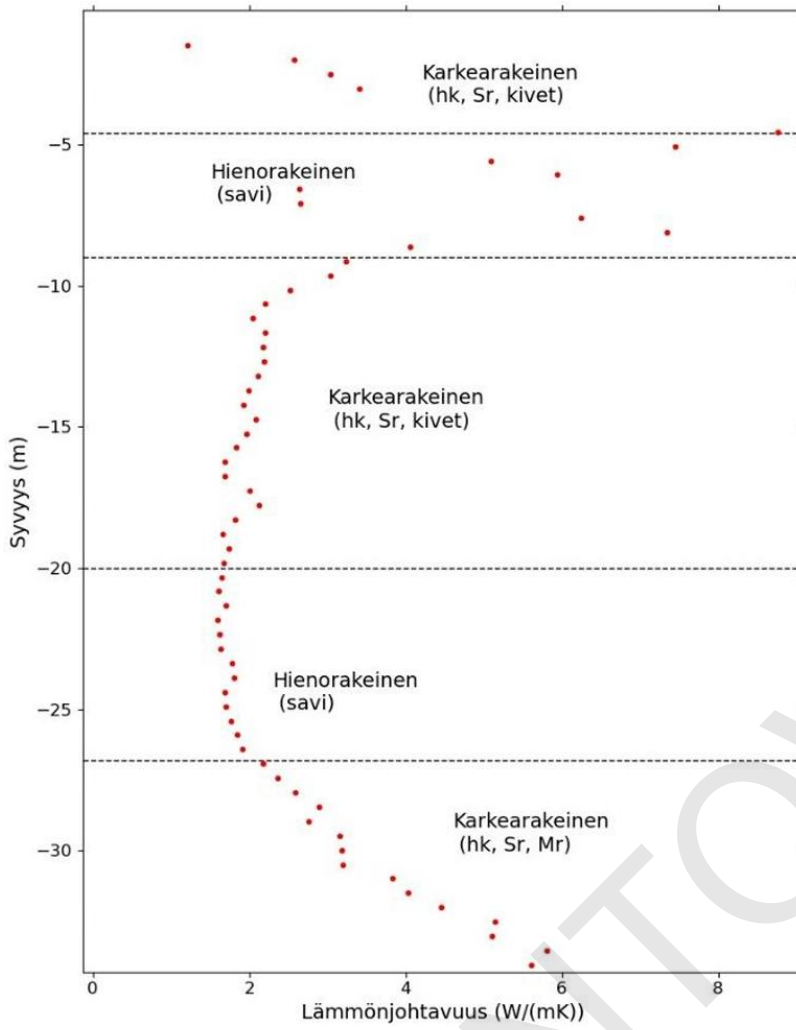
Tässä liitteessä esitetään Geologian tutkimuskeskuksen tekemiä ADTS-mittauksen tuloksia Helsingin Kyläsaaresta. Kuvassa 20 esitetään testikaivojen sijainnit karttakuvaan sijoitettuna. Taulukossa 10 esitetään testikaivojen mittaustuloksia lämmönjohtavuudesta, häiriintymättömästä lämpötilasta sekä maalajeista ja niiden paksuuksista. Kuvassa 21 esitetään testikaivon 2 lämmönjohtavuuden mittaukset syvyyden suhteen 0,5 m välein.



Kuva 20. Testikaivojen sijainnit.

Taulukko 10. Testikaivojen mittaustulokset.

Testikaivo	Maalaji	Lyhenne	Paksuus [m]	Kum. paksuus [m]	Lämmönjohtavuus [W/m·K]	Häiriintymätön lämpötila [°C]
1	Sorainen hiekka ja Hiekka	HkSr ja Hk	1,2	1,2	2,4–4,6	8,5
	Savi	Sa	33,5	34,7	1,0–1,7	
	Hiekka	Hk	2,6	37,3	1,8–2,2	
	Sorainen hiekka tai Moreeni	HkSr tai Mr	3,7	41,0	3,2–4,6	
2	Sorainen hiekka	HkSr	1,0	1,0	1,6–2,4	8,2
	Hiekka tai Silttinen hiekka	Hk tai HkSi	0,6	1,6	3,0–3,2	
	Hiekka	Hk	0,6	2,2	3,0–3,2	
	Sorainen hiekka ja Kiviä	HkSr ja Ki	2,2	4,4	3,2–3,6	
	Savi	Sa	4,8	9,2	3,0–8,6*	
	Sorainen hiekka ja Kiviä	HkSr ja Ki	8,3	17,5	2,2–2,5	
	Kiviä	Ki	1,0	18,5	-	
	Savi	Sa	8,9	27,4	1,6–1,9	
3	Sorainen hiekka ja Moreeni	HkSr ja Mr	5,9	33,3	2,7–5,6	9,1
	Sorainen hiekka	HkSr	1,6	1,6	1,6–3,2	
	Hiekka	Hk	0,7	2,3	1,6–3,2	
	Savi	Sa	4,5	6,8	1,4–1,8	
	Hiekka	Hk	3,2	10,0	1,6–2,2	
Sorainen hiekka tai Moreeni	HkSr tai Mr	9,0	19,0	2,1–3,1		



Kuva 21. Maaperän tulkittu tehollinen lämmönjohtavuus syvyyden suhteen 0,5 m välein kaivosta 2 mitattuna.

Liite 2. Esimerkkilaskenta maaperän teoreettisesta lämpökapasiteetista

Esimerkkilaskennassa esitetään koostumukseltaan ja lämpöolosuhteiltaan oletetun maaperän teoreettinen maksimi lämpökapasiteetti. Laskentaa on yksinkertaistettu maaperän rajauksen, maalajien vaihtelun, lämpötilavaihtelun ja häviöiden osalta. **Rajattu systeemi oletetaan häviöttömäksi (adiabaattinen) ja vuorovaikutuksettomaksi muun ympäristön kanssa, missä lämpötila on kauttaaltaan tasainen ja maaperä koostuu neljästä oletetusta maalajista.** Maalajeissa käytetyt arvot ovat oletuksia ja soveltuvat vain arviointiin. Systeemin tiedot esitetään taulukossa 11.

Taulukko 11. Systeemin tiedot.

Tieto	Arvo	Yksikkö
Sivu a	20	m
Sivu b	50	m
Syvyys	20	m
Pinta-ala	1 000	m ²
Tilavuus	20 000	m ³
Alkulämpötila	7	°C

Maaperä koostuu neljästä maalajista: savesta, silttisestä savesta, hiekasta, ja hiekkaisesta sorasta, missä savi on ylimmäisin maakerros. Jokainen maakerros on kooltaan 20 x 50 x 5 (sivu a x sivu b x syvyys), missä tilavuus on 5 000 m³. Maalajien ominaisuustiedot tiheys ρ_{maa} [kg/m³] ja ominaislämpökapasiteetti $c_{p,maa}$ [J/kg°C], tilavuuslämpökapasiteetti $C_{v,maa}$ [kJ/m³°C] esitetään taulukossa 12. Tilavuuslämpökapasiteetti määritetään kaavan 3 mukaisena välisuureena tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin tulona:

$$C_{v,maa} = \rho_{maa} * c_{p,maa} \quad (\text{kaava 3})$$

Taulukko 12. Maalajit ja niiden ominaisuudet.

Maalaji	Lyhenne	ρ_{maa}	$c_{p,maa}$	$C_{v,maa}$
Savi	Sa	1 300	920	1 196
Silttinen savi	SiSa	1 500	920	1 380
Hiekka	Hk	1 600	840	1 344
Hiekkainen sora	HkSr	1 800	840	1 512

Maalajien lämpömäärä lasketaan jokaiselle maalajille erikseen soveltamalla kaavaa 3 muodossa:

$$Q_{maa} = C_{v,maa} V \Delta T \quad (\text{kaava 3})$$

Muunnos energiayksikköön (kWh) saadaan jakamalla lämpökapasiteetin arvo (kJ) muunnoskerroimella 3600. Maalajien lämpökapasiteetit yhden celsiusasteen muutoksella lasketaan seuraavasti

$$Q_{Sa} = C_{v,Sa} V \Delta T = 1 196 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{°C}} * 5 000 \text{ m}^3 * 1 \text{ °C} = 5 980 000 \text{ kJ} = 1 661 \text{ kWh}$$

$$Q_{SiSa} = C_{v,SiSa} V \Delta T = 1 380 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{°C}} * 5 000 \text{ m}^3 * 1 \text{ °C} = 6 900 000 \text{ kJ} = 1 917 \text{ kWh}$$

$$Q_{Hk} = C_{v,Hk} V \Delta T = 1 344 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{°C}} * 5 000 \text{ m}^3 * 1 \text{ °C} = 6 720 000 \text{ kJ} = 1 867 \text{ kWh}$$

$$Q_{HkSr} = C_{v,HkSr} V \Delta T = 1 512 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{°C}} * 5 000 \text{ m}^3 * 1 \text{ °C} = 7 560 000 \text{ kJ} = 2 100 \text{ kWh}$$

Maalajeista muodostuva teoreettinen energiakapasiteetti Q_{maa} on 7 545 kWh yhden celsiusasteen muutoksessa. Maaperän energiakapasiteetti ja energiatiheys esitetään taulukossa 13, missä maaperän alkulämpötila on 7 °C ja alhaisin loppulämpötila 3 °C lämpötilanmuutoksen ollessa enintään 4 °C. Energiatiheys lasketaan kaavalla 13, missä pinta-alana käytetään perustuksen alaa 1 000 m².

$$E_{ala} = \frac{E_{kok.}}{A_{perustus}} \quad (\text{kaava 13})$$

Taulukko 13. Energiakapasiteetti ja -tiheys lämpötilamuutoksittain.

Alkulämpötila °C	Loppulämpötila °C	Lämpötilanmuutos °C	Energiakapasiteetti kWh	Energiatiheys kWh/m ²
	6	1	7 545	7,5
7	5	2	15 090	15,1
	4	3	22 635	22,6
	3	4	30 180	30,2

Maaperän teoreettinen energiakapasiteetti maaperästä lämpötilanmuutoksella 4 °C on 30 180 kWh ja energiatiheydellä 30,2 kWh/m². Lämpöolosuhteiden vakauttamiseksi saman verran energiaa on palautettava takaisin maaperään.

On kuitenkin huomioitava, että **todellinen energiakapasiteetti on teoreettista energiakapasiteettia huomattavasti alhaisempi**, koska energiapaalut toimivat pistemäisinä energian siirtäjinä sijoittuen eri kohtiin maaperää eivätkä kykene hyödyntämään lämpöä kauttaaltaan tasaisesti maaperässä.

Todellisen energiakapasiteetin ja tarvittavan varastoitavan energian määrittämiseksi on määritettävä siihen soveltuvalle dynaamisella mallinnusohjelmistolla.

Liite 3. Esimerkkilaskenta maapiirin ja maalämpöpumpun tehon määrittämisestä teoreettisesti

Häviöttömään systeemiin perustuvissa esimerkkilaskennoissa esitetään kaksi erilaista kytkentäratkaisua energiapaalukentälle, missä toisessa ratkaisussa kytketään kaikki energiapaalut rinnan ja toisessa kytketään energiapaalut osittain sarjaan tarvittavan lämpötilanmuutoksen saavuttamiseksi. **Olosuhteet nesteen lämpötilassa, massavirtauksessa ja maalämpöpumpun hyötysuhteessa (COP) oletetaan muuttumattomiksi, mikä ei vastaa todellista tilannetta.** Laskenta antaa arviota siitä, että minkä suuruinen häviötön luovutusteho lämmönsiirtonesteellä on tietyssä tilanteessa.

Maalämpöpumpun lauhduttimen teho määritetään energiapaalukenttien lämmönsiirtonesteiden häviöttömillä luovutustehoilla ja oletetulla vakio COP-arvolla.

Kummassakin laskennassa tehdään seuraavat vakio oletukset

- nesteen ominaislämpökapasiteetti 3 600 J/kg°C
- massavirtaus 0,1 kg/s (piirikohtainen)
- nesteen lämpötilanmuutos 3 °C
- energiapaalun pituus 20 m
- energiapaalujen määrä 30 kpl
- COP 3 (MLP)

Lämmönsiirtonesteen luovuttama kokonaisteho lasketaan kaavalla 11.

$$\Phi_{neste} = \dot{m}_{kok} \cdot c_{p,neste} \Delta T \quad (\text{kaava 11})$$

Energiapaalun metrikohtainen teho lasketaan kaavalla 12.

$$\Phi_{ep} = \frac{\Phi_{maapiiri}}{l_{ep,kok}} \quad (\text{kaava 12})$$

Maalämpöpumpun kompressorin käyttämä sähköenergia lasketaan kaavalla 14.

$$\Phi_{komp.} = \frac{\Phi_{höy.}}{COP-1} \quad (\text{kaava 14})$$

Maalämpöpumpun lauhduttimen teho lasketaan kaavalla 16.

$$\Phi_{lauh.} = \Phi_{höy.} + \Phi_{komp.} \quad (\text{kaava 16})$$

Sarjaankytkentä

Sarjaan kytketyssä kentässä kolme energiapaalua sarjoitetaan tarvittavan lämpötilanmuutoksen saavuttamiseksi, jolloin yhden piirin pituus on 60 metriä ja rinnankytkettyjen piirien lukumäärä 10. Kokonaismassavirtaus piirien ja massavirtauksen perusteella on 1,0 kg/s.

Lämmönsiirtonesteen luovuttama kokonaisteho

$$\Phi_{neste} = 1,0 \frac{kg}{s} * 3 600 \frac{J}{kg^{\circ}C} * 3^{\circ}C = 10 800 W = 10,8 kW \quad (\text{kaava 11})$$

Energiapaalun metrikohtainen teho

$$\Phi_{ep} = \frac{10 800 W}{20 m * 30 kpl} = 18,0 \frac{W}{m} \quad (\text{kaava 12})$$

Maalämpöpumpun kompressorin käyttämä sähköteho

$$\Phi_{komp.} = \frac{10,8 kW}{3-1} = 5,4 kW \quad (\text{kaava 14})$$

Maalämpöpumpun lauhduttimen teho

$$\Phi_{lauh.} = 10,8 \text{ kW} + 5,4 \text{ kW} = 16,2 \text{ kW} \quad (\text{kaava 16})$$

Rinnankytkentä

Rinnankytketyn energiapaalukentän kokonaismassavirtaus piirien ja massavirtauksen perusteella on 3,0 kg/s.

Lämmönsiirtonesteen luovuttama kokonaisteho

$$\Phi_{neste} = 3,0 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3\,600 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 3^\circ\text{C} = 32\,400 \text{ W} = 32,4 \text{ kW} \quad (\text{kaava 11})$$

Energiapaalun metrikohtainen teho

$$\Phi_{ep} = \frac{32\,400 \text{ W}}{20 \text{ m} * 30 \text{ kpl}} = 54 \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad (\text{kaava 12})$$

Maalämpöpumpun kompressorin käyttämä sähköteho

$$\Phi_{komp.} = \frac{32,4 \text{ kW}}{3-1} = 16,2 \text{ kW} \quad (\text{kaava 14})$$

Maalämpöpumpun lauhduttimen teho

$$\Phi_{lauh.} = 32,4 \text{ kW} + 16,2 \text{ kW} = 48,6 \text{ kW} \quad (\text{kaava 16})$$

Piirien kytkennän toteutusta on arvioitava kohteittain. Tilanteissa, joissa massavirtaus on asetettu optimaaliselle alueelle, mutta nesteen lämpötilanmuutos on liian alhainen, tulee kytkeä energiapaaluja sarjaan riittävän lämpötilamuutoksen saavuttamiseksi. Optimaalinen piirien kytkentä saadaan määritettyä virtaukseen perustuvalla dynaamisella mallinnuksella, joka ottaa huomioon paalujen ja maaperän vaihtelevat lämpöolosuhteet.