

Helsinki

Helsingin geo- energiapotentiaali

Tilaaja: Helsingin kaupungin maa- ja kallioperäyksikkö

Työnumero GEO 8009

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS

GNR Geoenergia

Espoo 29.03.2019 / luonnos

Sisällysluettelo

Toimeksianto	3
Johdanto	4
1 Helsingin kallioperän yleispiirteet	5
1.1 Pintasyntyiset kivet	5
1.2 Syväkivet	7
2 Näytteenotto	9
2.1 Näytteenoton suunnittelu	9
2.2 Näytteenotto	9
3 Kohdekuvaukset	11
3.1 Graniitit	11
3.2 Granodioriitit	21
3.3 Tonalitit	25
3.4 Kvartsidioriitti	28
3.5 Dioriitti	29
3.6 Biotiittigneissi	30
3.7 Protomyloniittinen biotiitti-maasälpagneissi	34
3.8 Biotiitti-plagioklaasigneissi	35
3.9 Kvartsimaasälpagneissit	38
3.10 Amfiboliitit	41
4 Yhteenveto Helsingin kallioperän ominaisuuksista	48
4.1 Kiven lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä	48
4.2 Helsingin kallioperän ominaisuuksista	49
5 Geoenergiapotentiaalin laskenta	51
5.1 Yleistä	51
5.2 Esitetyt asiat	56
5.3 Mitoitusparametrikartat	57
5.3.1 Lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys	57
5.3.2 Tilavuuslämpökapasiteetti ja terminen diffusiviteetti	60
5.3.3 Maanpinnan keskilämpötila	62
5.3.4 Geoterminen lämpövuoto	63
5.3.5 Geoterminen gradientti	65
5.3.6 Maapeitteen paksuus	66
5.3.7 Geoenergiapotentiaaliin laskentaan vaikuttavat parametrit	67

5.4 Geoenergiapotentiaalin arviointi	68
5.4.1 Helsingin kallioperän teoreettisen geoenergiapotentiaalin arviointi	68
5.4.2 Helsingin kallioperän teknisen geoenergiapotentiaalin arviointi	70
5.4.3 Tilastollinen yhteenveto geoenergiapotentiaalista pinta-alaa kohden	76
5.5 Yksittäisen kaivon geoenergiapotentiaali	77
5.6 Jäähdytyksen vaikutus.....	80
6 Yhteenveto.....	83
7 Lähdeluettelo	86
Liitteet	88
Liite 1: Laboratoriomittausten tulokset	89
Liite 2: Tulosaineistojen kuvaukset	90

Toimeksianto

Tämä toimeksianto liittyy sekä vuonna 2017 aloitettuun uuteen maanalaisen yleiskaavaan, että kiinteistöviraston samana vuonna perustamaan maalämpöryhmään. Maalämpöryhmän tehtävänä oli ehdottaa täydennyksiä kiinteistöviraston vuonna 2010 julkaistuu raporttiin ”Lainsäädäntöön, lupa-käytäntöön, kaa-voitukseen ja tontinluovutukseen ehdotettavat muutokset”.

Maalämpökaivojen avulla tuotetun energian toimintaympäristö on muuttumassa – viime aikoina kiinnostus suurien maalämpökaivokenttien sekä poikkeuksellisen syvien maalämpökaivojen poraamiseen on merkittävästi lisääntynyt. Samanaikaisesti kaupunki on teettänyt geoenergiaan liittyviä selvityksiä, jotka ovat osoittaneet ja lisänneet yhteistyötarpeita kaupungin eri yksiköiden välillä sekä laajemmin alan toimijoiden keskuudessa.

Tässä toimeksiannossa Geologian tutkimuskeskus (GTK) on mallintanut Helsingin kallioperän soveltuvuutta geoenergian (tuttavallisemmin maalämmön) hyödyntämiseen kivilajialueittain. Geoenergiapotentiaalit on laskettu 150, 300 ja 1000 metriä syville maalämpökaivoille. Raportissa esitetään myös arviot maalämpökaivojen vaikutussäteistä sekä viilennyksen vaikutuksesta lämmönottoon ja kalliolämpöjärjestelmien elinkaaren pituuteen.

Nyt esillä oleva mittausparametreihin perustuva ja koko kaupungin kattava mallinnus on laatuaan ensimmäinen Suomessa. Mitoitusparametrit perustuvat maastonäytteistä tehtyihin laboratoriomittauksiin sekä olemassa oleviin GTK:n aineistoihin.

Helsingin geoenergiapotentiaali –projektin ohjauksesta vastasi työryhmä, johon kuuluivat:

Ilkka Vähäaho	Kaupunkiympäristö, Maa- ja kallioperäyksikkö
Risto Niinimäki	Kaupunkiympäristö, Maa- ja kallioperäyksikkö
Pekka Leivo	Kaupunkiympäristö, Maankäytön yleissuunnittelu
Jutta Peura	Kaupunginkanslia, Auerakentaminen, asuminen ja investoinnit

Tässä toimeksiannossa ei ole käsitelty geotermiseen energiaan liittyviä ratkaisuja, joissa energian tuotanto perustuu pääosin Maan sisuksissa tapahtuvien radioaktiivisten aineiden hajoamiseen ja jotka Suomen oloissa edellyttävät kallioperän rakojen ja ruhjeiden avaamisen voimakkaan ylipaineistuksen avulla.

* * *

Ensimmäinen vaihe tästä projektista julkaistiin syyskuussa 2017, jolloin valmistui GTK:n raportti ”Geoenergiapotentiaalilin selvitys Pohjois-Pasilan alueelta”. Selvitystyötä on sen jälkeen jatkettu nykyiseen koko kaupunkia kattavaan laajuuteen. Nyt maalämpökaivojen mitoittamiseen tarvittavat parametrit ovat myös kaikkien tarvisijoiden käytössä, joten maalämpöjärjestelmien mitoitus voi tapahtua aikaisempaa luotettavammin.

Johdanto

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää Helsingin kaupungin alueen kallioperän soveltuvuutta ja potentiaalia geenergian hyödyntämiseen. Tilausneuvottelujen yhteydessä sovittiin, että selvitystyössä käytetään pohjana Helsingin kaupungin kallioperäkarttaa mittakaavassa 1:10 000. Selvityksessä koordinaattijärjestelmä on Helsingin kaupungin käyttämä ETRS-GK25FIN (EPSG:3879).

Alueelta otettiin näytteet vallitsevista kivilajeista ja mitattiin niiden lämpöominaisuudet. Mittaustuloksia käytettiin geenergiapotentiaalin laskennassa. Näytteenoton suunnittelussa ja geenergiapotentiaalin laskennassa hyödynnettiin myös Geologian tutkimuskeskuksen ja Helsingin kaupungin olemassa olevia kartta- ja havaintoaineistoja.

Raportti on kaksiosainen. Ensimmäisessä osassa kuvataan maankamaran ominaisuudet ja koostumus. Toisessa osassa keskitytään geenergiapotentiaalin laskentaan ja arviointiin. Kallioperäosiossa kuvataan Helsingin kallioperän yleispiirteet, näytteenoton suunnittelu ja näytteenotto. Vallitsevista kivilajeista kustakin kuvataan tarkemmin 2–3 kohdetta kivilajin osalta valokuvoin ja paikkatiedoin.

Kivien lämpöominaisuuksien mittaustulokset esitetään liitetaulukkona ja pohditaan tuloksia yleensä ja erityisesti tavanomaisista arvoista poikkeavia tuloksia kivilajeittain. Näytteet 4-MHW\$-2017 ja 5-MHW\$-2017 ovat lisätty aiemmasta Pohjois-Pasilan geenergiaselvityksestä ja -tutkimuksesta vuodelta 2017.

Raportin työstämiseen ja kirjoittamiseen ovat osallistuneet geologit Marit Wennerström, Olli Sallasmaa, Isa Witick ja geofyysikko Kimmo Korhonen (geenergiapotentiaalin laskenta ja arviointi). Näytteenoton ovat suorittaneet tutkimusassistentit Tuure Nyholm ja Juha Vuohelainen. Petrofysiikan laboratoriomittaukset teki tutkimusapulainen Satu Vuoriainen. Neuroverkkolaskennassa käytettiin filosofian tohtori Matvei Pashkovskiin ohjelmakoodia. Hankepääällikkö oli erikoisasiantuntija Jarmo Kallio, joka myös osallistui raportin kirjoittamiseen geenergia- ja kallioperäasiantuntijana.

1 Helsingin kallioperän yleispiirteet

Helsingin alueen kallioperä on osa Etelä-Suomen 1.9–1.8 miljardia vuotta vanhaa maankuorta. Kallioperän syntyhistoria on monivaiheisten geologisten prosessien tulosta, mikä näkyy moninaisena vaihteluna kivilajeissa ja rakenteissa ja vaikeuttaa pääkivilajin yksiselitteistä määrittelyä. Kukin kivilajimäärittys perustuu vallitsevaan kivilajiin kussakin havaintopisteessä. Geologisten prosessien synnyttämä muinainen vuorijono on ehtinyt kulua ja tasoittua juuriaan myöten. Tämän päivän kalliopinnan leikkaus edustaa 15–20 km syvyyttä maankuoresta (Laitala 1991) ja edustaa siten vuorijonon syviä juuriosia.

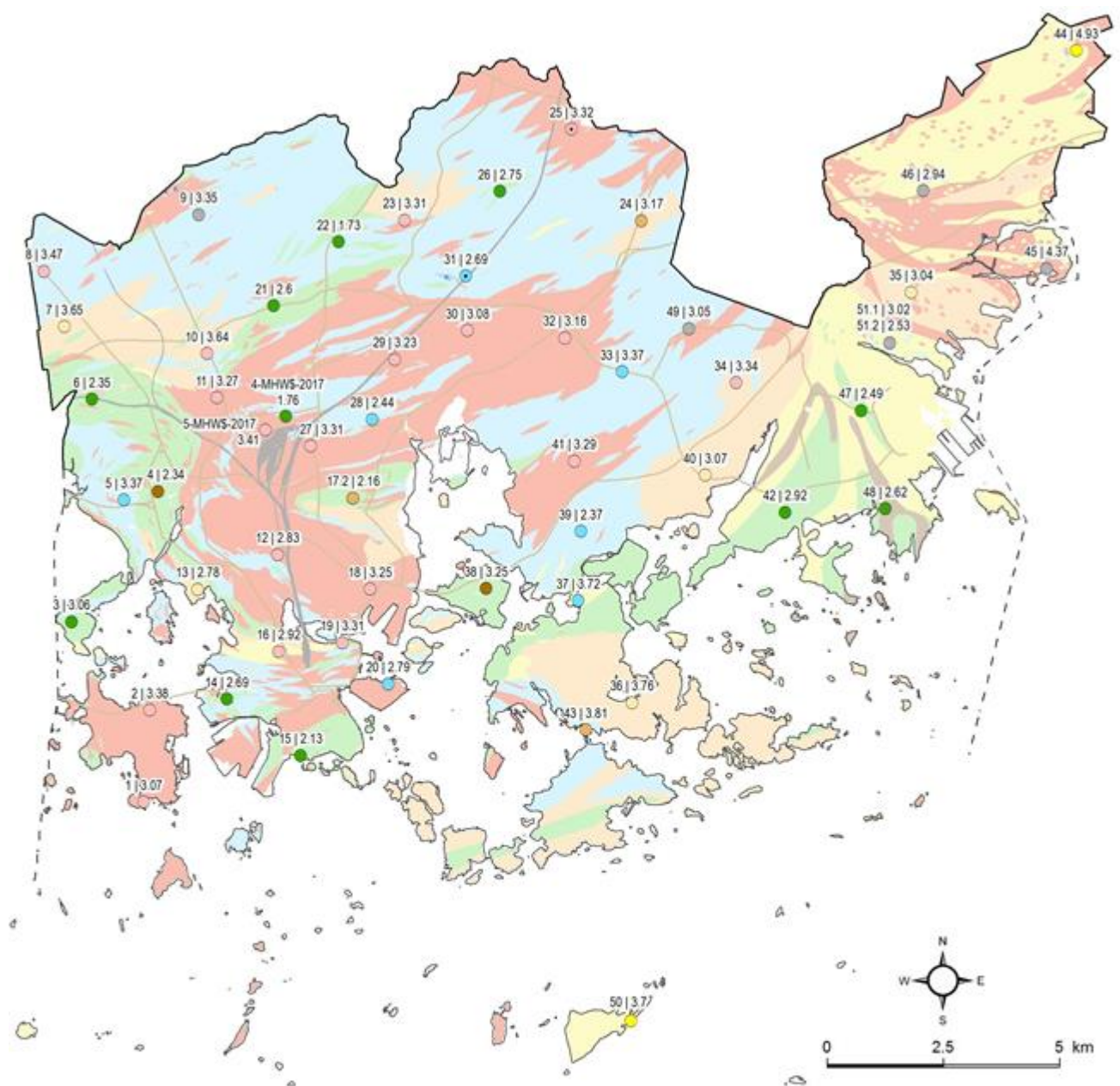
Helsingin alueella kalliopaljastumia ja kalliroleikkauksia on runsaasti. Etenkin rannikkoalueilla ja saarissa kallioperä on hyvin paljastunutta. Keskusta-alue on taas tiiviisti rakennettua ja siksi luontaisia kalliopaljastumia on siellä vähän. Helsingin alueen kivet jakaantuvat pintasyntyisiin kivilajeihin ja syväkiviin. Pintasyntyiset kivet ovat alun perin vulkaanisten saarikaarien rinteille ja vesialtaisiin kerrostuneita tuhkerrostumia, laavavirtoja, tuffeja, silttejä, savia, jotka ovat syvällä maankuoressa kiteytyneet ja sulaneet nyt nähtävissä oleviksi liuskeiksi, gneisseiksi, migmatiteiksi. Syväkivet ovat taas maankuoren sisällä kivisulasta kiteytyneitä kivilajeja. Kivilajien jakautuminen Helsingin alueella on esitetty Helsingin kaupungin kivilajikartalla kuvassa 1.

1.1 Pintasyntyiset kivet

Helsingin alueella tavattavat pintasyntyiset kivet ovat kiillegneissejä, kvartsi-maasälpagneissejä ja amfiboliitteja. Alueella on myös jokunen kalkki- ja karsikiviesiintymä. Pintasyntyiset kivet peittävät yli puolet Helsingin kallioperän pinta-alasta (kuva 1).

Valtaosa pintasyntyisistä kivistä on kiillegneissejä ja merkitty kivilajikartalle sinisellä värillä. Alueen kiillegneissit ovat biotiittigneissejä ja biotiitti-plagioklaasigneissejä. Kiillegneissit esiintyvät kaartelevina vyöhykkeinä etenkin Helsingin pohjoisosissa. Lisäksi kiillegneissiiä esiintyy välikerroksina muiden pintasyntyisten kivien joukossa sekä murskaleina ja jäänteinä syväkivi-intruusioissa. Kiillegneissit ovat yleensä väriltään harmahtavia ja koostuvat pääasiassa biotiitista, kvartsista ja plagioklaasista. Biotiitin ja kvartsin ohella kivessä esiintyy myös kalimaasälpää. Joissakin kiillegneissiyksiköissä saattaa esiintyä porfyroblastista granaattia, kordieriittia ja sillimaniittia. Kiillegneissit ovat hienorakeisia (< 1 mm) tai keskirakeisia (1-5 mm), suuntautuneita sekä koostumusvaihtelun vuoksi juovaisia ja vyöhykkeellisen raitaisia. Vaihtelevassa määrin ne ovat myös syväkivi-intruusioiden suonittamia suonigneissejä, joissa suoniaines on yleensä graniittista (Laitala 1991).

Kvartsimaasälpagneissi on merkitty kivilajikartalle keltaisella värillä. Kivilajikartan yleistyksen vuoksi tähän kivilajiryhmään on liitetty myös happamat liuskeet, pyrokseenigneissit sekä muuttuneet happamat ja intermediääriset tuffit. Valtaosa tämän ryhmän kivilajeista sijoittuu Itä-Helsingin ja Östersundomin alueille. Kvartsimaasälpagneissien mineraalikoostumus on biotiittigneissiiä felsisempi, sisältäen enemmän maasälpää. Kvartsin, plagioklaasin ja biotiitin lisäksi kvartsi-maasälpagneississä on joskus myös kalimaasälpää. Paikoin kvartsimaasälpagneissi vaihettuu biotiittigneissiksi, jolloin kivessä maasälpäen osuus laskee ja biotiitin ja kvartsin osuudet kasvavat. (Laitala 1991).



Näytteet

- Graniitti
- Granaattigraniitti
- Granodioriitti
- Tonaliiitti
- Kvartsidioriitti, dioriitti
- Kvartsimaasälpagneissi
- Biotiittigneissi
- Granaatti-biotiittigneissi
- Biotiitti-plagioklaasigneissi
- Amfiboliitti, amfiboligneissi

Kivilajit

- Graniitti
- Grano- ja kvartsidioriitti
- Gabro
- Kvartsi-maasälpagneissi
- Kiillegneissi
- K Kalkkikivi, karsikivi
- Amfiboliitti
- Osakivilaji: linssi/ suoni/ välikerros/ sulkeuma

Kuva 1. Helsingin alueen kivilajikartta, näytteenottopaikat ja näytteiden lämmönjohtavuudet [W/m·K]. Näytteenottopaikat, jotka on otettu tätä selvitystä varten, on numeroitu lyhyellä näyttenumerolla eli näytteenumeruksen etuliite on jätetty pois. Merkittävimmät liikenneväylät on merkitty karttaan hiekanruskealla ja harmaalla värillä. Liikenneväylät ja rantaviiva © MML & Haltik.

Amfiboliitti on merkitty kivilajikartalle vihreällä värillä. Sitä esiintyy Länsi-, Etelä- ja Itä-Helsingissä laajahkoina rannikon muotoja seuraavina vyöhykkeinä. Amfiboliitit ovat muuttuneita mafisia kivilajeja, yleensä alkuperältään vulkaniitteja. Päämineraalit koostuvat plagioklaasista, sarvivälkeestä ja kvartsista. Raekoko on yleensä hienoa, mutta metamorfista reagoon karkenemista esiintyy. Amfiboliitti on yleensä liuskeinen. Kivilajikontaktien läheisyydessä amfiboliittiin on usein tunkeutunut syväkiviaineista suonina ja juonina, mikä tekee amfiboliitista raitaisen. Laitala on kutsunut tällaisia seoskiviä sarvivälkegneisseiksi. (Laitala 1991).

Helsingin pohjoispuolella on muutamia pieniä ja kapeita kalkki- ja karsikiviesiintymiä. Nämä on merkitty kivilajikartalle tummansinisellä värillä. Alueen kalkkikivet on kuvattu epäpuhtaiksi kalkkikiviksi, missä pääosin kalkki-silikaattimineraaleista koostuvat kerrokset vuorottelevat happamien vaaleitten gneissikerrosten tai kiillegneissikerrosten kanssa. Puhdasta kalkkiveä esiintyy vain satunnaisesti rakotäyteinä. Kalkkikivien yhteydessä saattaa esiintyä sivukiven mineraalien muuttumista (metasomatoosia), jolloin syntyy karsikiviä. Karsikivien mineraaleihin kuuluu granaatti, diopsidi, sarvivälke ja joskus tremoliitti-aktinoliittia (Laitala 1991).

1.2 Syväkivet

Helsingin alueen yleisin syväkivi on graniitti, joka muodostaa erityisesti Helsingin länsiosissa laajoja yhtenäisiä alueita (kuva 1). Graniittiset alueet on merkitty kivilajikartalle punaisella värillä. Suuri osa graniittiesiintymistä muodostaa seoskiviä eli migmatiitteja. Graniittiesiintymien muodot ja sisäiset mineraalisuuntaukset seuraavat kallioperän yleisiä suuntauksia. Graniitit ovat yleensä punertavia, mutta myös vaaleita graniitteja esiintyy. Kiven raekoko vaihtelee keskirakeisesta karkearakeiseen. Päämineraalit ovat kalimaasälpä (mikrokliini), plagioklaasi, kvartsi ja biotiitti. Granaattipitoisia muunnelmia esiintyy paikoin (Laitala 1991).

Graniittinen kiviaines esiintyy paikoin myös pienehköinä pegmatiittisina osueina ja raitoina syväkivissä ja pintasyntyisissä kivilajeissa. Pegmatiittitermi viittaa kiven raekokoon, joka on pegmatiiteilla hyvin karkea ja yksittäisen mineraalitekien läpimitta on jopa yli 3 cm. Pegmatiittien päämineraalit koostuvat kalimaasälvästä, kvartsista ja biotiitista, joskus myös plagioklaasista. (Laitala 1991).

Grano- ja kvartsidioriitti on merkitty kivilajikartalle beigellä värillä. Tähän kivilajiryhmään on yhdistetty kaikki intermediääriset syväkivet eli granodioriitit, tonaliitit, trondhemiitit sekä kvartsidioriitit. Tämän ryhmän syväkiviä esiintyy lännessä Konalan ja Kannelmäen tienoilla, ja idässä Laajasalon, Vartiokylän sekä eteläisen Östersundomin tienoilla (kuva 1). Intermediääriset kivet esiintyvät usein yhdessä vaihettuen toisiinsa. Maastossa kivilajien erottaminen toisistaan on toisinaan hankalaa.

Kuten graniitit, intermediääriset syväkivet muodostavat paikallisen kallioperän rakenteita myötäileviä intruusioita. Intruusiot sisältävät usein murskaleita pintasyntyisistä kivistä. Raekoko vaihtelee keskirakeisesta (1-5 mm) karkearakeiseen (>5 mm). Kivissä on yleensä heikko suuntaus, mutta myös voimakkaasti suuntautuneita variaatioita esiintyy. Kivien päämineraalit ovat plagioklaasi, kvartsi, sarvivälke ja biotiitti. Granodioriiteissa on myös kalimaasälpää ja joissakin tonaliiteissa myös pyrokseenia. (Laitala 1991).

Gabrot on merkitty kivilajikartalle ruskealla värillä. Kivilajikartan mukaan ne muodostavat kapeahkoja intruusioita Itä-Helsingin Vuosaaressa ja jatkuvat Vuosaaren eteläpuolella sijaitseville saarille (kuva 1). Gabroja esiintyy myös pienempinä välikerroksina ja intruusioina muiden kivilajien joukossa. Tällaiset pienet esiintymät ovat kivilajikartan yleistyksen myötä jääneet pois kar-

talta. Helsingin gabrot ovat pääasiassa keskikarkeita, joskus karkearakeisia ja heikosti suuntauneita. Päämineraaleihin kuuluvat sarvivälke, plagioklaasi sekä pyrokseeni tai biotiitti. Gabrojen yhteydessä esiintyy kvartsigabroja. Kvartsigabrojen mineraaliseurueeseen kuuluu sarvivälkkeen ja plagioklaasin lisäksi biotiittia ja kvartsia (Laitala 1991), mikä saattaa aiheuttaa poikkeavaa, korkeampaa lämmönjohtavuutta.

2 Näytteenotto

2.1 Näytteenoton suunnittelu

Näytteenoton suunnittelun lähtökohtana oli Helsingin kaupungin kallioperäkartta mittakaavassa 1:10 000, joka oli saatu käyttöön MicroStation 3D CAD –formaattissa. Aineisto muunnettiin GTK:ssa ArcGIS file geodatabaseksi. Siitä poimittiin kivilajipolygonit kartaksi, joka esitettiin kohdassa Helsingin kallioperän yleispiirteet (kuva 1). Helsingin kaupungilta saatiin myös Östersundomin alueen kartoitushavainnot vuosilta 2010 ja 2011 (Helsingin kaupunki Kiinteistövirasto 2011).

GTK:n aineistoista näytteenoton suunnittelussa käytettiin karttatietokantaa (Kallioperä mittakaavan/BEDROCK.Bedrock_Map_FDS, © Geologian tutkimuskeskus 2018) ja havaintoaineistoa (Kallioperähavaintotiedot/KP.Bedrock_FDS, © Geologian tutkimuskeskus 2018).

Näytteenottopaikkojen valinnassa käytettiin geologisia perusteita ja koska mittaustuloksia käytetään geoenergiapotentiaalin laskennan lähtötietoina niin tavoitteena oli mahdollisimman tasainen ja kattava alueellinen jakauma. Kivilajikartalla (kuva 1) samaksi kivilajiksi merkityjä muodostumia esiintyy Helsingin eri puolilla. Esimerkiksi etäällä toisistaan sijaitsevat graniittiset kivet eivät välttämättä vastaa koostumukseltaan toisiaan. Näytteitä otettiin siksi useammasta graniittimuodostumasta. Ja samoin toimittiin muidenkin kivilajien suhteen. Helsingin kaupungin kallioperäkartalla esitetyt kivilajit muodostuvat yleensä useammasta kuin yhdestä kivilajista, jotka kallioperäkartalle joudutaan yleistämään pääkivilajin mukaan. Tasainen näytepistejakauma on tällöinkin eduksi lämpöominaisuuksien mallinnuksessa.

Kivilajien rajauksessa apuna käytettiin GTK:n lentogeofysiikan aineistoja. Niissä ominaisuuksiltaan yhteneväisen kuvion muodostama alue arvioitiin yhteneväiseksi kivilajistoksi. Tämän seurauksena esimerkiksi Villinki ja Melkki jätettiin näytteenoton ulkopuolelle, sillä ne sijoittuvat lähellä mantereella vallitsevan kivilajin alueelle.

2.2 Näytteenotto

Helsingin alueelta kerättiin viidestäkymmenestä yhdestä (51) kohteesta vasaranäytteet kivien lämpöominaisuuksien selvittämiseksi. Yhdestä kohteesta (TIN\$-2018-17) otettiin kaksi kivilajinäytettä, muista kohteista yksi näyte. Näytteet ovat tyyppikivilajinäytteitä, joiden tarkoituksena on kuvata kohteella esiintyvää pääkiveä. Tavoitteena oli kerätä Helsingin kaupungin kallioperäkartan mittakaavassa 1:10 000 kyseiselle kohteelle nimetystä kivilajista sitä edustava näyte. Näytteenottopaikka jouduttiin tapauskohtaisesti siirtämään, mikäli nimettyä kivilajia ei suunnitellussa kohteessa esiintynyt tai paikka ei ollut näytteenotolle sopiva. Uusi näytteenottopaikka valittiin kartalla esiintyvän saman kivilajin alueelta, mahdollisimman läheltä alkuperäistä kohdetta. Lähes kaikki näytteet otettiin kallioleikkauksista. Niissä kivi on yleensä rapautumispinnaltaan tuoreempaa ja näytteen irrottaminen vasaralla tai lekalla on yksinkertaisempaa kuin silottuneelta kalliopinnalta.

Kerätyistä vasaranäytteistä porattiin läpimitaltaan noin 40 mm ja paksuudeltaan noin 7 mm kiekot (kuva 2). Kiekot kyllästettiin hanavedessä kaksi vuorokautta, jonka jälkeen näytteistä mitattiin tiheys D (kg/m^3), ominaislämpökapasiteetti c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) ja lämmönjohtavuus λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$). Mittaustulosten perusteella laskettiin diffusiviteetti a ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Selvityksessä lähtökohtana ollut kivilajikartta on yleistetty esitys mittakaavassa 1:10 000 (Helsingin kaupungin kallioperäkartta), josta syystä kartalla oleva kivilaji saattaa poiketa paikoin maastossa esiintyvistä kivilajista. Helsingin alueelle luonteenomaiset migmatiittiset eli seoskivet muodostavat kivilajiryhmiä, joiden sisäinen koostumusvaihtelu ja tulkinnallisuus tulevat esille maastossa. Kivien lämpöominaisuuksien tutkimiseen käytettiin pientä kiviäytettä (kuva 2). Vaikka tavoitteena oli ottaa näyte kohteiden tyypikivilajeista, näytteen koko rajoittaa laaja-alaisemman kivilajiseurueen tutkimisen. Näytteiden lämpöominaisuudet ovat listattuna liitteessä 1.



Kuva 2. Näytekiekot kerätyistä kallioperänäytteistä. Näytteiden TIN\$-2018-51.1 ja TIN\$-2018-51.2 kiekkokuvat on esitetty kuvassa 52.

3 Kohdekuvaukset

Seuraavassa kuvataan jokaisesta kivilajista 2–3 näytteenottokohdetta. Kuvaukseen on valittu parhaiten nimettyä kivilajia edustavat kohteet. Jokaisen kivilajin osalta esitetään myös muut vastaavan kivilajin kohteet valokuvoin ja paikkatiedoin.

3.1 Graniitit

TIN\$-2018-002. Havainto on tehty kalliopaljastumalla Lauttasaaren pohjoisosassa, Taivaanvuohentien pohjoispään tuntumassa. Havainnon paljastuma koostuu punertavan harmahtavasta graniittisesta kivistä (kuva 3). Rapautumispintaan verrattuna kiven tuore pinta on väriltään tummempi. Kivi on suuntautunut ja on pääasiassa keskirakeinen. Päämineraalit koostuvat kalimaasälvästä, plagioklaasista, kvartsista ja biotiitista. Kivessä on nähtävissä raitaisuutta, mikä ilmenee vyöhykkeellisenä koostumusvaihteluna eteenkin tummien mineraalien määrän vaihteluna vyöhykkeestä toiseen. Tummat mineraalit ja kiven raitaisuus ilmentävät kiven melko pystyä suuntausta.

Vallitsevan kivilajin sisällä, liuskeisuuden suuntaisesti esiintyy karkearakeisia, jopa pegmatiittisen karkeitä vaaleanpunertavia juonia (kuva 3). Myöskin epämääräisiä pegmatiittisiä osioita esiintyy paljastuma-alueella satunnaisesti. Noin 100 m havainnosta kaakkoon löytyy kaksi aikaisempaa havaintoa GTK:n tietokannasta. Kivi on kuvattu lähinnä homogeeniseksi ja siinä on havaittu paikoin juovaista suuntausta.



Kuva 3. Havainnon TIN\$-2018-002 suuntautunut graniitti, jota leikkaa karkearakeinen vaaleanpunertava graniittinen juoni. Kynän pituus on 14 cm. Lauttasaari, Taivaanvuohentie (P = 6672260 m, I = 25493346 m).

TIN\$-2018-29. Havaintoalue Veräjämäessä koostuu Maaherrantien varressa olevista alle 4 metriä korkeista kallioleikkauksista, jotka ovat heterogeenista, paikoin pieniä biotiittikasumia sisältävää, karkeahkorakeista graniittia (kuva 4). Sen seassa on leveydeltään vaihtelevina suonina esiintyvää pegmatiittia, jonka osuus on vain noin 5 prosenttia kiviaineksesta (kuva 5).



Kuva 4. Kallioleikkaukset betoniseinämässä Maaherrantien varressa Veräjämäellä (P = 6679825 m, I = 25498631 m).



Kuva 5. Veräjämäen graniitti (P = 6679825 m, I = 25498631 m).

Kohde TIN\$-2018-20 sijaitsee Katajanokalla pohjoisrannan tuntumassa. Paljastuma on matala louhittu kallio. Kivi on pääosin melko tummaa, pienirakeista, granaattipitoista biotiittigneisiä (mitattu näyte). Graniittinen osuus kivessä kuitenkin vaihtelee ollen paikoin vallitsevana (kuva 6). Biotiittigneissi on suuntautunutta ja suuntaus seuraa kiven koostumusraitaisuutta.



Kuva 6. Kohde TIN\$-2018-20, graniittivaltainen biotiittigneissi, Katajanokka (P = 6674871 m, I = 25498099 m).

TIN\$-2018-25 havaintoalue Puistolassa, koostuu Sirkkalabacken länsiosan kallioalueesta, joka on Suuntimotien varressa Puistolassa (kuva 7). Alueen kivi on granaattipitoista graniittia ja pegmatiittia. Karkearakeista pegmatiittia on lähes puolet alueen kivistä. Granaattikiteet ovat pienikokoisia, yleensä alle 2 mm halkaisijaltaan, mutta niitä on runsaasti (kuva 8). Kivessä on myös runsaasti täytteellisiä mikrorakoja.



Kuva 7. Sirkkalabacken länsiosan kallioalue Puistolassa (P = 6684792 m, I = 25502437 m).



Kuva 8. Kohteen TIN\$-2018-25 granaattigraniitin rapautumaton lohkopinta, jossa pienet tummat mineraalit ovat granaattia. Puistola (P = 6684792 m, I = 25502437 m).



Kuva 9. Pyöristynyt graniittinen kallioalue Lauttasaaren eteläosassa havainnolla TIN\$-2018-001 (P = 6670277 m, I = 25493211 m). Uppokuva on märästä näytekiekosta. Kivilekan pituus on 89 cm.



Kuva 10. Konalan pohjoisosassa, Vihdintien varressa havainnolla TIN\$-2018-008 on pääosin graniittinen tieleikkaus, jossa näkyy haamumaista breksiarakennetta (P = 6681724 m, I = 25491064 m). Geologivasaran pituus on 63 cm.



Kuva 11. Havainnon TIN\$-2018-010 suuntautunut gneissimäinen graniittinen kivi. Kynän pituus on 14 cm. Pirkkola, Pohjois-Haagassa Hämeenlinnanväylän varressa (P = 6679950 m, I = 25494587 m).



Kuva 12. Havainnon TIN\$-2018-011 graniittinen kivi. Tieleikkauksen graniitti on pääasiassa harmahtavan vaaleanpunaista (kuvassa vasemmalla), mutta muuttuu vähitellen punertavampaan variaatioon (kuvan keskellä). Oikealla leikkaava tumma mafinen juoni. Kivilekan pituus on 89 cm. Pohjois-Haaga, Nuijamiestentie (P = 6678998 m, I = 25494797 m).



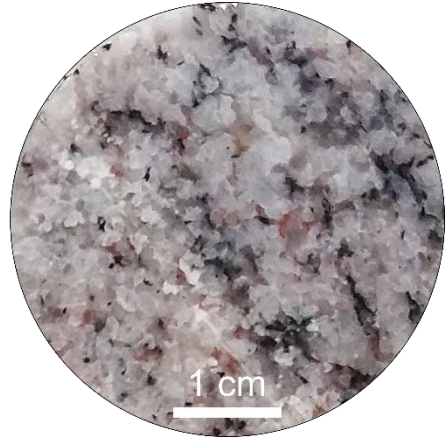
Kuva 13. Havainnon TIN\$-2018-012 tieleikkaus, jossa graniittisessa kivessä on havaittavissa haamumaisia biotiitti- rikkaampia osueita. Kuvassa näkyvät tummemmat laikut kivessä on pääasiassa pintalikaa. Pasila, Veturitie (P = 6675609 m, I = 25496096 m).



Kuva 14. Havainnon TIN\$-2018-012 Helsinkiitti. Pasila, Veturitie (P = 6675609 m, I = 25496096 m).



Kuva 15. TIN\$-2018-16. Graniittipaljastuma Töölössä (P = 6673522 m, I = 25496122 m). Up-pokuva on märästä näytekiekosta.



Kuva 16. TIN\$-2018-18. Graniittipaljastuma Sörnäsissä (P = 6674871 m, I = 25498100 m). Uppokuva on määrstä näytekiekosta.



Kuva 17. TIN\$-2018-19. Pääasiassa graniittia kallioleikkauksessa Kruunuhaassa (P = 6673713 m, I = 25497501 m). Kivi on kuvattu kvartsimaasälpägneissiksi kivilajikartalla. Uppokuvassa on suurennus kiven tuoreesta pinnasta.



Kuva 18. TIN\$-2018-23. Graniittia ja pegmatiittia Tapaninvainiolla (P = 6682824 m, I = 25498841 m).



Kuva 19. TIN\$-2018-27. Graniittia tieleikkauksessa Länsi-Käpylässä (P = 6677953 m, I = 25496816 m). Uppokuva on märestä näytekiekosta.



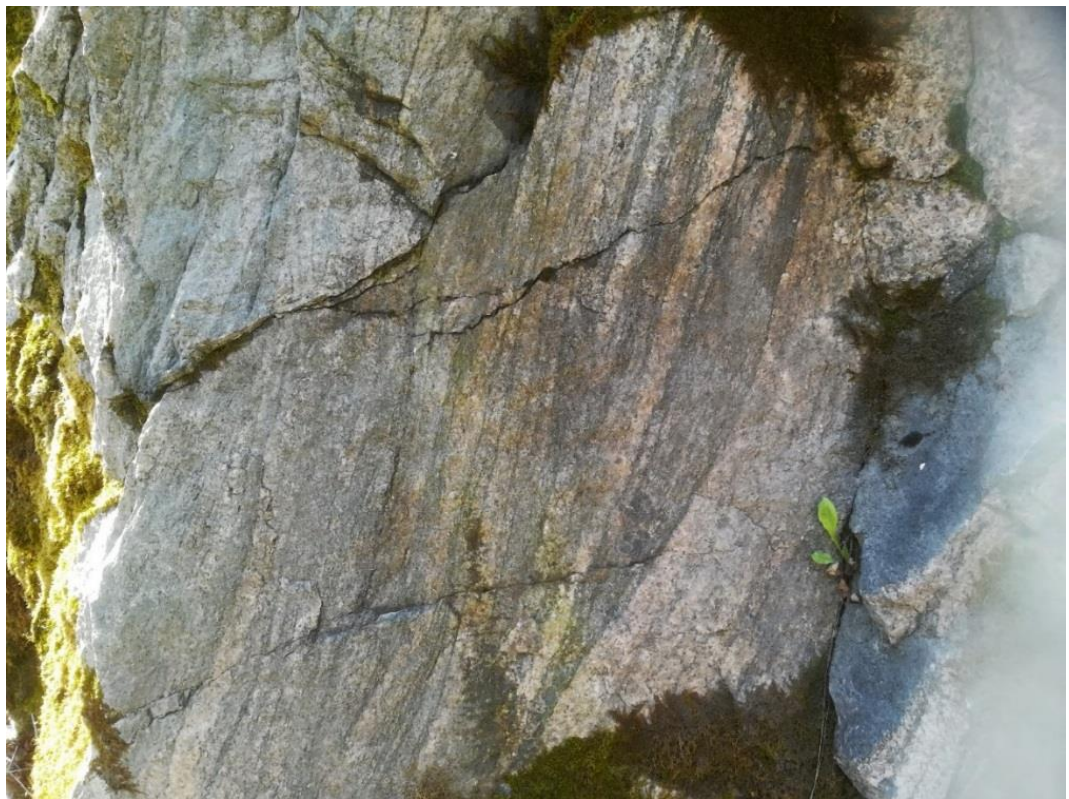
Kuva 20. TIN\$-2018-30. Graniittia ja kiillegneissijäänteitä tieleikkauksessa Pihlajamäessä (P = 6680446 m, I = 25500193 m).



Kuva 21. TIN\$-2018-32. Graniittia, jossa on haamumaisia kiillegneissijäänteitä Latokartanossa (P = 6680287 m, I = 25502291 m).



Kuva 22. TIN\$-2018-34. Graniittia Vartioharjussa (P = 6679317 m, I = 25505988 m). Uppokuvassa suurennus paljastuman graniitista.



Kuva 23. TIN\$-2018-41. Tieleikkaus Roihupellossa (P = 6677628 m, I = 25502497 m). Kivi on raitaista graniittia.

3.2 Granodioriitit

Kohteen TIN\$-2018-013 granodioriitti-havainto on tehty Meilahdessa, Seurasaarentien ja Mäntyniemientien risteyksen läheisyydessä olevalla paljastumalla ja kallioleikkauksella. Kyseessä on tummahko, punertava suuntautunut granodioriitti, jota leikkaavat punertavat graniittiset juonet

(kuva 24). Juonten raekoko vaihtelee keskirakeisesta karkearakeiseen ja juonten leveys 2 ja 20 cm välillä. Myöskin pegmatiittisia graniittisia leikkaavia juonia esiintyy paikoin. Granodioriitin mineraalit koostuvat maasälvistä, kvartsista, biotiitista ja neulamaisista amfiboleista. Maasälvät muodostavat paikoin silmäkkeistä (augen) tekstuuria.



Kuva 24. Havainnon TIN\$-2018-013 granodioriitti, jota leikkaa punertavat karkearakeiset tai pegmatiittiset juonet. Vasaran pituus on 63 cm. Uppokuvassa on esitetty granodioriitin tuore pinta vasaranäytteestä. Meilahti, Seurasaarentie (P = 6674862 m, I = 25494382 m).

Kohde TIN\$-2018-36 sijaitsee Jollaksessa. Kallio muodostaa pitkän tieleikkauksen Jollaksentien varrella (kuva 25). Kivi on keskirakeinen, vaaleanpunertavan harmaa granodioriitti. Se on paikoin voimakkaasti suuntautunut ja suuntaus näkyy biotiitin muodostamina yhdensuuntaisina raitoina. Pääosin granodioriitti on homogeenista ja heikosti suuntautunutta (kuva 26).



Kuva 25. Kohteen TIN\$-2018-36 tieleikkaus Jollaksessa (P = 6672419 m, I = 25503747 m). Uppokuva on märästä näytekiekosta.



Kuva 26. Kohde TIN\$-2018-36, granodioriitti, Jollas (P = 6672419 m, I = 25503747 m).



Kuva 27. Havainnon TIN\$-2018-007 granodioriitti, jossa näkyy koostumusraitaisuutta. Konala (P = 6680527 m, I = 25491508 m).



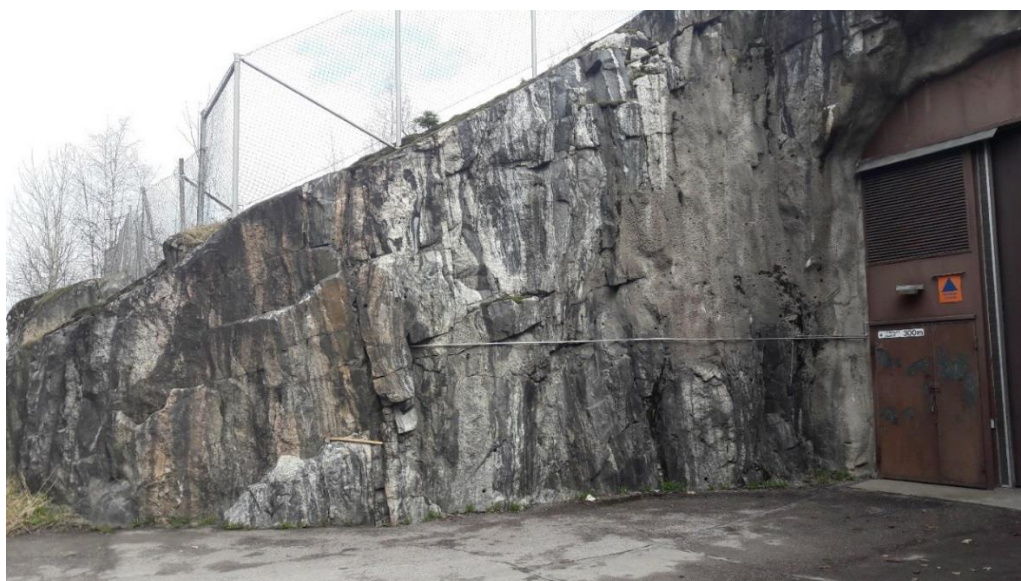
Kuva 28. TIN\$-2018-35. Granodioriittia Kärrissä (P = 6681270 m, I = 25509758 m).



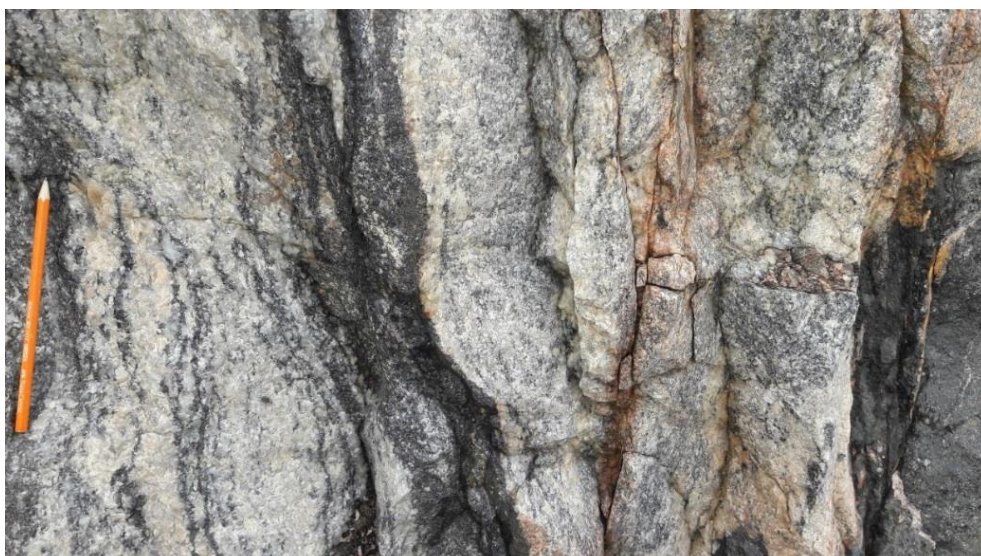
Kuva 29. TIN\$-2018-40. Vaaleanharmaa granodioriitti Puotilassa (P = 6677326 m, I = 25505323 m).

3.3 Tonaliiitit

TIN\$-2018-24. Havainto on tehty tienleikkauksista Jakomäentien varressa (kuva 30). Kallioperäkartan mukaan ollaan graniittialueella. Kallioalueella on pääasiassa tonaliittia, graniittia ja pegmatiittia, mutta myös granodioriittia, biotiittigneissiiä ja vähemmässä määrin kvartsi-maasälpagneissiiä. Myös amfiboliittia esiintyy kapeina linsseinä tai vyöhykkeinä. Tässä granaatteja sisältävässä migmatiittisessa kivessä on neosomiainesta runsaasti (kuva 31).



Kuva 30. Kalliroleikkaus väestönsuojan oven edustalla havaintoalueen eteläosassa. Jakomäki (P = 6682815 m, I = 25503944 m).



Kuva 31. Migmatiittisessa kivessä on runsaasti vaaleaa suoniainesta. Jakomäki (P = 6682815 m, I = 25503944 m).

Kohde TIN\$-2018-43 sijaitsee Hevossalmessa, lähellä Santahaminaan kulkevaa siltaa. Kallion reunassa on pieni leikkaus (kuva 32). Kivilaji on pienirakeinen gneissimäinen tonaliitti (kuva 33), jossa on paikoin graniittia suonina ja amfiboliittia ohuina raitoina. Näyte TIN\$-2018-43 on melko runsaasti kvartsia sisältävästä osasta.



Kuva 32. Pieni kallioleikkaus Hevossalmessa (P = 6671831 m, I = 25502750 m). Uppokuva on mörstä näytekiekosta. Kohde TIN\$-2018-43.



Kuva 33. Kohde TIN\$-2018-43, gneissimäinen tonaliitti, Hevossalmi (P = 6671831 m, I = 25502750 m).



Kuva 34. TIN\$-2018-17. Laaja tonaliittipaljastuma Kumpulassa (P = 6676835 m, I = 25497728 m). Kohde on kivilajikartan amfiboliittialueella. Siksi kohteelta mitattiin 2 näytettä (uppokuvat): 17.1 amfiboliitti ja 17.2 tonaliitti. Uppokuvat ovat märistä näytekiekoista. Uppokuvissa valotusta on hieman nostettu, jotta kiven tekstuuri näkyisi selkeämmin. Amfiboliittia on vain noin 10 % paljastumasta.

3.4 Kvartsidioriitti

Kohde TIN\$-2018-38 Kulosaarella sijaitsee asuintalojen välissä, pienen paikoitusalueen reunalla. Se on kalliorinne, jossa on pieni leikkaus (kuva 35). Kivi on tummanharmaa, paikoin mustavalko-, pystyraitainen kvartsidioriitti (kuva 36). Raitaisuus muodostaa selkeän suuntauksen. Kivessä on amfiboliittisia raitoja.



Kuva 35. Pieni, raitainen kvartsidioriitti-kallioleikkaus Kulosaaren keskusta-alueella (P = 6674878 m, I = 25500597 m), kohde TIN\$-2018-38.



Kuva 36. TIN\$-2018-38, raitainen kvartsidioriitti, Kulosaari (P = 6674878 m, I = 25500597 m).

3.5 Dioriitti

Kohteen TIN\$-2018-004 tieleikkaus sijaitsee Niemenmäellä Niemenmäentien varressa. Helsingin kaupungin kallioperäkartan (1:10 000) mukaan havaintopaikka on amfiboliittialueella, mutta näytettä tarkasteltaessa stereomikroskoopilla ja tiheysmittausten perusteella kivi on dioriitti. Yleispiirteisesti kallioperä on alueella hyvin heterogeenista, mikä ilmenee kiven mineralogian ja/tai tekstuurin vaihteluna vyöhykkeittäin antaen kallioperälle raitaisen olemuksen. Pääasiassa kalliopaljastuma koostuu tummanharmaasta ja suuntautuneesta mafisesta kivistä (amfiboliittia ja dioriittia). Suuntauksen myötäisesti on tunkeutunut graniittista ainesta, jonka raekoko on karkeaa tai jopa pegmatiittisen karkeaa. Leikkauksella rakenteet ovat melko pystyjä. Dioriitin päämineraalit ovat amfiboli, biotiitti ja plagioklaasi. Kvartsia kivessä ei ole paljoa, mikä näkyy kiven alhaisena lämmönjohtavuutena. Raekoko on keskikarkea (kuva 37).



Kuva 37. Dioriittinäyte havainnolta TIN\$-2018-004 Niemenmäeltä (P = 6676978 m, I = 25493521 m). Kivi on suuntautunut mutta karkeamman raekoon vuoksi syväkivimäinen. Kynän pituus on 14 cm.

3.6 Biotiittigneissi

TIN\$-2018-28 havaintoalue Koskelassa, koostuu Juhana-Herttuan tien varressa olevista alle kaksi metriä korkeista kallioleikkauksista (kuva 38). Kivi on keskirakeista biotiittigneissiiä, jossa on runsaanlaisesti pieniä granaatteja. Biotiittigneissin seassa on liuskeisuuden suuntaisina suonina ja juonina karkeahkorakeista pegmatiittia, jonka osuus on noin kolmasosa alueen kiviaineksesta (kuva 39).



Kuva 38. TIN\$-2018-28 havaintoalueen kallioleikkaus Koskelassa (P = 6678529 m, I = 25498143 m).



Kuva 39. Biotiittigneissin seassa on liuskeisuuden suuntaisina suonina karkeahkorakeista pegmatiittia. Koskela (P = 6678529 m, I = 25498143 m).

TIN\$-2018-33. Noin 40 m x 30 metrin laajuinen havaintoalue Myllypurossa koostuu Latokartanonkaaren ja sen viereisen kevytliikenneväylän välissä olevasta alle 4 metriä korkeasta kallioiselänteestä (kuva 40) ja sen molemmin puolin olevista kallioleikkauksista. Alueella on keskirakeista biotiittigneissiiä, jossa on pieniä granaatteja. Biotiittigneissin seassa on liuskeisuuden suuntaisina

suonina karkeahkorakeista pegmatiittia ja keskirakeista graniittia. Tämä migmatiittinen kivi näyttää monin paikoin suonigneissimäiseltä (kuva 41).



Kuva 40. TIN\$-2018-33. Latokartanonkaaren viereisiä kalliopaljastumia Myllypurossa (P = 6679559 m, I = 25503533 m).



Kuva 41. Biotiittigneissin seassa on liuskeisuuden suuntaisina suonina karkeahkorakeista pegmatiittia ja keskirakeista graniittia. Myllypuro (P = 6679559 m, I = 25503533 m).

TIN\$-2018-31. Havaintoalue Malmilla koostuu Malmin kauppätien viereisen kävelytien varressa olevista alle 6 metriä korkeista kallioleikkauksista (kuva 42), joita on noin 60 metrin pituisella alueella. Alueella on pieni-keskirakeista granaatti-biotiittigneissiiä, joka sisältää noin puoli senttimetriä kapeita granaatti-rikkaita kerroksia (kuva 43). Paikoin kivessä on noin 20 cm leveinä vyöhykeinä erittäin biotiittirikkaita kasaumia, joissa ei juuri muita mineraaleja esiinny.



Kuva 42. TIN\$-2018-31. Malmin kauppaticien viereisen kävelytien varressa olevat kalliioleikkaukset (P = 6681620 m, I = 25500165 m).



Kuva 43. Granaatti-biotiittigneissii, joka sisältää noin puoli senttimetriä leveitä granaatti-rikkaita raitoja. Malmi (P = 6681620 m, I = 25500165 m).



Kuva 44. Biotiittigneissiä Munkkivuoren havainnolla TIN\$-2018-005 (P = 6676794 m, I = 25492792 m). Uppokuvana on suurennus kiven tuoreesta pinnasta. Kivilekan pituus on 89 cm.



Kuva 45. TIN\$-2018-37; hienorakeinen biotiittigneissi kivilajikartan amfiboliittialueella. Uppokuva on märästä näytekiekosta. Uppokuvan valotusta on hieman nostettu, jotta ki-ven tekstuuri näkyisi selkeämmin. Iso-Heikkilä, Vuosaari (P = 6674623 m, I = 25502583 m).



Kuva 46. TIN\$-2018-39. Migmatiittinen, pääasiassa graniittinen leikkaus Roihuvuoressa (P = 6676117 m, I = 25502639 m). Kohde on biotiittigneissialueella. Näyte on biotiittigneisistä. Uppokuva on märkestä näytekiekosta.

3.7 Protomyloniittinen biotiitti-maasälpagneissi

Havainto TIN\$-2018-9 on tehty tieleikkauksella Paletinkierron liikenneympyrän läheisyydessä Hakuninmaalla. Tieleikkaus koostuu hyvin raitaisesta kivistä, jossa pääkivilaji on tumma biotiitti-maasälpagneissi ja sitä raidoittaa lukuisat suonet liuskeisuuden suunnassa (kuva 47). Pääkivessä maasälvät muodostavat myloniittista silmäkerakennetta (kuva 47 uppokuva). Kiven perusmassa on hienorakeista ja voimakkaasti suuntautunutta. Kyseessä on protomyloniitti, jonka rakenne, raitaisuus ja silmäkerakenteet ovat kallioperässä tapahtuneen siirroksen aiheuttaman hierron tulosta.

Pääkivilajin suoniaines koostuu maasälvästä ja kvartsista. Maasälpä on joko kalimaasälpävaltaista, jolloin suonien pigmentti on punertavaa, tai se on plagioklaasivaltaista ja silloin väriltään vaaleaa. Suoniaines on usein pienoispöimuttunut. Leikkauksella esiintyy myös tiiviitä tummia raitoja, jotka koostuvat pääasiassa biotiitista ja maasälvät puuttuvat kokonaan.



Kuva 47. Biotiitti-maasälpagneissiä Hakuninmaalla, havainnolla TIN\$-2018-9 (P = 6682945 m, I = 25494409 m). Kivi on raitainen, missä tummat raidat koostuvat pääosin biotiitista ja vaaleat raidat tai juonet koostuvat maasälvästä ja kvartsista. Kuvassa vasemmalla suoniaineksessa on kalimaasälpää, jolloin suoniaines on punertavaa. Vaaleissa raidoissa maasälpä on pääosin plagioklaasia. Uppokuvassa näkyy kiven protomyloniittinen rakenne.

3.8 Biotiitti-plagioklaasigneissi

Kohde TIN\$-2018-46 sijaitsee Porvoon väylän levähdyspaikalla Itäsalmen pohjoispuolella (kuva 48). Se sijoittuu kivilajikartalla kvartsimaasälpagneissin ja graniitin kontaktivyöhykkeelle. Kivi on raitaista biotiitti-plagioklaasigneissiä (kuva 49). Siinä on melko runsaasti graniittista suoniainesta.



Kuva 48. TIN\$-2018-46. Noin 50 m pitkä kalliroleikkaus Porvoon väylän varrella (P = 6683460 m, I = 25510026 m). Uppokuva on märestä näytekiekosta. Uppokuvassa valotusta on hieman nostettu, jotta kiven tekstuuri näkyisi selkeämmin.



Kuva 49. TIN\$-2018-46. Biotiitti-plagioklaasigneissi. Porvoon väylä, Itäsalmen pohjoispuolella (P = 6683460 m, I = 25510026 m).



Kuva 50. TIN\$-2018-45. Pieni tieleikkaus Karhusaassa (P = 6681784 m, I = 25512676 m). Kohteessa on runsaasti pegmatiittia. Näyte on biotiitti-plagioklaasigneissistä. Uppokuva on mörästä näytekiekosta.



Kuva 51. TIN\$-2018-49. Tieleikkaus Kontulassa (P = 6680489 m, I = 25504960 m), biotiitti-plagioklaasigneissi. Uppokuva on m \ddot{a} r \ddot{a} st \ddot{a} n \ddot{a} ytekiekosta.



Kuva 52. TIN\$-2018-51. Pieni kalliopaljastuma Sundbergissa (P = 6680182 m, I = 25509300 m). N \ddot{a} yte on raitaisesta biotiitti-plagioklaasigneissist \ddot{a} . N \ddot{a} ytteest \ddot{a} tehtiin kaksi n \ddot{a} ytekiekkoa (uppokuvat) kiven termisen anisotropian selvitt \ddot{a} miseksi (kts. liite 1). Uppokuva on m \ddot{a} r \ddot{a} st \ddot{a} n \ddot{a} ytekiekosta. Uppokuvissa valotusta on hieman nostettu, jotta kiven tekstuuri n \ddot{a} kyisi selke \ddot{a} mmin.

3.9 Kvartsimaasälpägneissit

Kohde TIN\$-2018-44 on itäisin kohde Helsingissä, Östersundomin Ängskullassa. Se on hiekkaisen ajotien reunassa oleva pieni kallioleikkaus (kuva 53). Kivilaji on kallioperäkartan mukaan laajalla alueella kvartsimaasälpägneissiiä. Kallioleikkauksessa on pääasiassa hyvin kvartsirikasta, pieni-hienorakeista kiveä, jossa on myös runsaasti pegmatiittia (kuva 54).

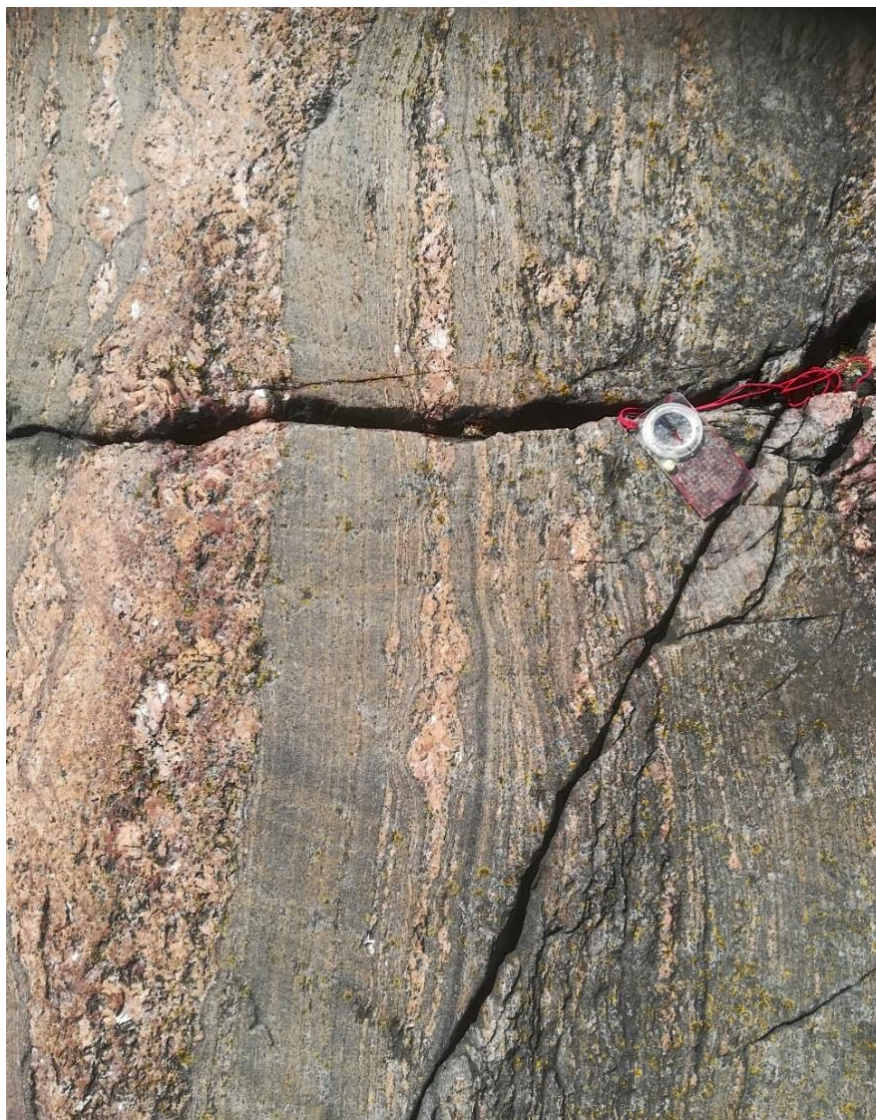


Kuva 53. Pieni kallioleikkaus hiekkatien varressa Ängskullassa, Östersundomissa, kohde TIN\$-2018-44 (P = 6686489 m, I = 25513315 m).

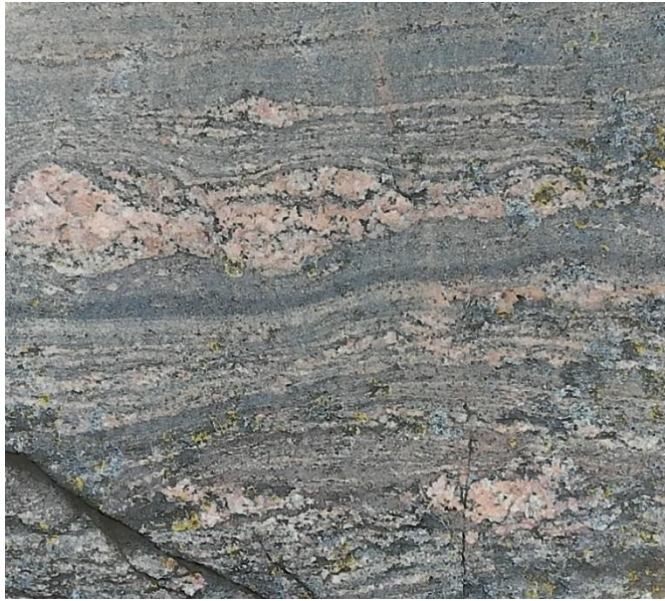


Kuva 54. Kohde TIN\$-2018-44. Kivi on hyvin kvartsirikasta kvartsimaasälpägneissiiä. Ängskulla (P = 6686489 m, I = 25513315 m).

Kohde TIN\$-2018-50 sijaitsee Isosaaren kaakkoisrannan keskivaiheilla. Kivilaji on laajalla alueella, kaakkoisrannalla, migmatiittista (=seoskivi), pääosin hienorakeista biotiitti-plagioklaasigneissiiä, jossa on vaihteleva määrä kvartsimaasälpagneissiiä ja graniittista suoniainesta (kuva 55). Osa harmaista raidoista on kvartsimaasälpagneissiiä. Kivi on raitaista, voimakkaasti venyntyttä plastisessa tilassa, josta seurauksena pegmatiittis-graniittiset juonet ovat budinoituneet (kuva 56). Rantakalliopaljastumalla on paikoin myös runsaasti pegmatiittisen karkeaa graniittia (kuva 57). Näyte TIN\$-2018-50 on migmatiittisesta biotiitti-plagioklaasigneissistä.



Kuva 55. Tyypillinen kivilajiseurue Isosaaren kaakkoisrannan kalliolla. Väriltään harmaa kivilaji on kvartsimaasälpagneissiiä ja vaaleanpunertava graniittia. Kohde TIN\$-2018-50 (P = 6665559 m, I = 25503723 m).



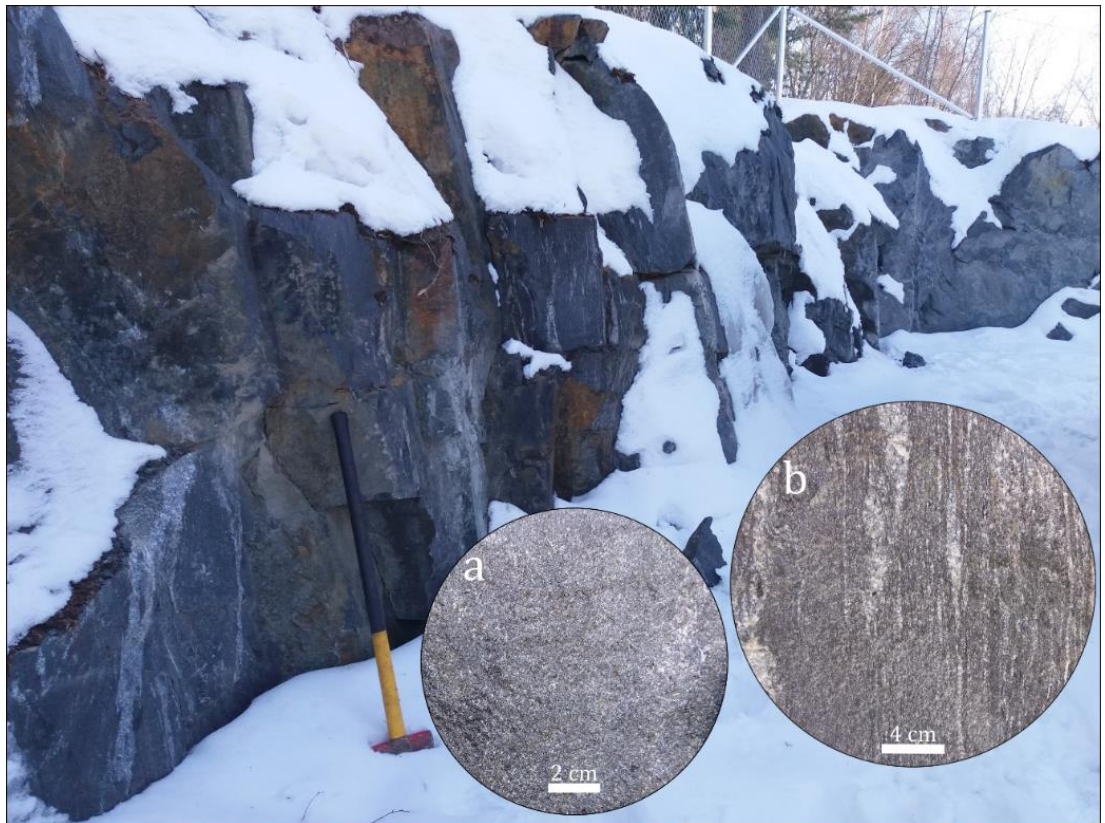
Kuva 56. Lähikuva Isosaaren migmatiittisesta gneissistä (P = 6665559 m, I = 25503723 m). Ganiittiset vaaleanpunertavat suonet ovat venyessään budinoituneet.



Kuva 57. Isosaaren kaakkoisrannalla (P = 6665559 m, I = 25503723 m) on myös runsaasti vaaleanpunertavaa karkeaa pegmatiittista graniittia (kuvan yläosa). Harmaa osa kalliosta on kvartsimaasälpagneissia.

3.10 Amfiboliitit

Lehtisaaren havainto TIN\$-2018-003 on tehty kallioleikkauksella, Lehdesniityntien ja Tykistökapteenintien risteyksen tuntumassa. Kiven ulkoasu on tummanharmaa, paikoin rapautumispinnalta ruosteensuskea. Päämineraalit ovat amfiboli, biotiitti, kvartsi ja plagioklaasi. Kiven hienorakeisuuden vuoksi mineraalien jakautumista on vaikea silmämääräisesti arvioida. Tektuuriltaan kivi on hienorakeinen ja suuntautunut. Tekstuuri vaihtelee vyöhykkeellisesti enemmän heterogeenisestä kivistä pieniraitaiseen muunnelmaan (kuva 58 a ja b). Vaaleat juovat koostuvat maasälvästä ja kvartsista. Aikaisemman kartoituksen yhteydessä lähistön kivilajit on kuvattu muuttuneiksi vulkaaniiteiksi, joiden koostumus vaihtelee intermediäärisestä mafiseen.



Kuva 58. Havainnon TIN\$-2018-003 kallioleikkaus kahdella uppokuvalla. Kallioleikkauksella on havaittavissa vyöhykkeistä vaihtelua hienorakeisista ja verrattain massiivisista vyöhykkeistä (a) pieniraitaisiin, selkeästi suuntautuneisiin vyöhykkeisiin (b). Kivilekan pituus on 89 cm. Lehtisaari (P = 6674166 m, I = 25491663 m).

Kohde TIN\$-2018-006 sijaitsee Pitäjänmäen teollisuusalueella. Kyseessä on kallioleikkaus, jossa kivi vaihtelee tumman harmaasta amfiboliitista punertavampaan granodioriittiin, ja edelleen graniittiseen -/ pegmatiittiseen kiveen. Graniitin sukuisia kivilajeja leikkauksella on arviolta alle 20 %. Leikkauksella on lisäksi syväkivimäinen, noin metrin levyinen gabromainen osue. Amfiboliitti on rapautumispinnalta ruskehtava ja tuoreelta pinnalta hyvin tummanharmaa (kuva 59). Amfiboliitissa esiintyy raitaisen vyöhykkeellistä koostumusvaihtelua, jossa osa vyöhykkeistä näyttäisi sisältävän litistyneitä vulkaanisperäisiä, laavan heitteitä. Tektuuriltaan amfiboliitti on hienorakeinen ja pieniraitainen, joissa vaaleat juovat koostuvat kvartsista ja plagioklaasista. Leikkauksen rakenteet ovat lähes pystyjä.



Kuva 59. Pitäjänmäen teollisuusalueella tavattava pienraitainen amfiboliitti havainnolla TIN\$-2018-006 (P = 6678964 m, I = 25492103 m). Uppokuvassa suurennos amfiboliitista. Kiven tummalta tuoreelta pinnalta pienet vaaleat lamellit erottuvat selkeämmin kuin kiven ruskehtavalta rapautumispinnalta. Vasaran on 63 cm.

Kohde TIN\$-2018-42 sijaitsee Merirastilassa sillan ali kulkevan kävelytien reunalla (kuva 60). Kyseessä on hyvin hienorakeinen, lähes tiivis tummanharmaa amfiboliitti (kuva 61). Kivessä on muutamia hyvin ohuita kvartsijuonia.



Kuva 60. Kohde TIN\$-2018-42, kävelytien leikkaus Meri-Rastilassa (P = 6676523 m, I = 25507041 m). Kivilaji on hyvin hienorakeinen amfiboliitti.



Kuva 61. Kohde TIN\$-2018-42, amfiboliitti, Meri-Rastila (P = 6676523 m, I = 25507041 m).



Kuva 62. TIN\$-2018-14, Granaattipitoinen amfiboliitti migmatiittisessa tieleikkauksessa Ruoholahdessa (kuva 63) (P = 6672499 m, I = 25495008 m).



Kuva 63. TIN\$-2018-14. Migmatiittinen tieleikkaus Ruoholahdessa (P = 6672499 m, I = 25495008 m). Leikkauksessa on n. 15 % pegmatiittia lähes yhdensuuntaisina, valkoisina ja vaaleanpunaisina n. 1 m leveinä juonina. Selkeää vaakarakoilua nähtävissä.



Kuva 64. TIN\$-2018-15. N. 100 m pitkä amfiboliittinen kallioleikkaus Kaivopuistossa (P = 6671282 m, I = 25496597 m).



Kuva 65. TIN\$-2018-21. Amfiboliittia ja pegmatiittia tieleikkauksessa Länsi-Pakilassa (P = 6680979 m, I = 25496023 m).



Kuva 66. TIN\$-2018-22. Amfiboliittia tieleikkauksessa Tuomarinkylässä (P = 6682356 m, I = 25497416 m). Uppokuvassa amfiboliitin tuore pinta.



Kuva 67. TIN \$-2018-26. Amfiboliittia ja pegmatiittia Tapaninkylässä (P = 6683450 m, I = 25500890 m).



Kuva 68. Kohde TIN\$-2018-47, amfiboliitti Vuosaassa (P = 6678722 m, I = 25508678 m). Uppokuva on märästä näytekiekosta.



Kuva 69. TIN\$-2018-48. Amfiboliitti Uutelassa (P = 6676605 m, I = 25509199 m). Karttamerkintä on gabro. Uppokuva on märästä näytekiekosta. Uppokuvan valotusta on hieman nostettu, jotta kiven tekstuuri näkyisi selkeämmin.

4 Yhteenveto Helsingin kallioperän ominaisuuksista

4.1 Kiven lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Kiven lämmönjohtavuuteen vaikuttavat pääasiassa kiven mineraalikoostumus, rakenne/tekstuuri ja kiven huokoisuus (Clauser & Huenges 1995) sekä rikkonaisuus. Kirjallisuudesta on saatavilla kivilajien lämmönjohtavuuksista mitattuja keskiarvoja. Esimerkiksi Peltoniemi ja Kukkonen (1995) ovat koonneet kattavan aineiston Suomen kivistä mitatuista lämmönjohtavuuksista. Kirja-arvoja käytettäessä on kuitenkin muistettava että samanimitiset kivilajit voivat olla mineraalikoostumukseltaan ja tekstuurltaankin hyvinkin erilaisia mikä näkyy kiven lämpöominaisuuden vaihteluna. Lisäksi eri kivilajit ovat harvoin homogeenisia, tasalaatuisia. Ne voivat sisältää esimerkiksi sulkeumia jostain toisesta, koostumukseltaan täysin toisen tyyppisistä kivilajeista. Tällä on luonnollisesti vaikutusta kiven kokonaislämpö-ominaisuuteen parantavasti tai heikentävästi. Yhteisvaikutus tulee esille TRT-mittauksissa, jotka edustavat koko kiven tehollisia lämpöominaisuuksia. Kallioperän kokonaislämmönjohtavuuteen ja energian siirtymiseen (lämpö/viilennys) vaikuttaa mineraalikoostumuksen rinnalla, jopa merkittävästi, kalliopohjaveden määrä ja liikkeet. Viilennyskäytössä pohjavesi siirtää lämpöenergiaa kallioperään laajemmalle alueelle mahdollistaen tilojen tehokkaamman viilennyksen. Lämpöenergian otossa pohjavesi taas kerää lämpöenergiaa laajemmalta alueelta mahdollistaen paremman tuoton.

Kvartsi on yksi parhaiten lämpöä johtavista mineraaleista ja kallioperässämme yleensä määräänvin tekijä kiven lämmönjohtavuudelle. Sitä esiintyy päämineraalina vaaleissa, graniittisissa kivilajeissa ja runsaasti myös vaaleissa liuskeissa kuten kvartsi-maasälpäliuskeissa ja –gneisseissä. Näillä kivilajeilla onkin usein hyvät lämmönjohtavuus- ja siirto-ominaisuudet. Suomessa mitattujen graniittien lämmönjohtavuuskeskiarvo on 3,55 W/(mK) (Peltoniemi ja Kukkonen, 1995). Tummien kivilajien kuten amfiboliitti kvartsipitoisuus taas on marginaalista ja lämmönjohto-ominaisuudet vastaavasti alhaisia. Suomessa mitattujen amfiboliittien lämmönjohtavuuskeskiarvo on 2,59 W/(mK).

Useimmat mineraalit ovat termisesti anisotrooppisia, mikä tarkoittaa sitä, että niiden lämmönjohtavuus on kiteen suunnasta riippuvainen. Kiven koostumus ja erityisesti sen suuntautuneisuus vaikuttavat myös kallioperän lämmönjohtavuuteen siten, että lämmönjohtavuus vaihtelee eri suunnista mitattuna. Kiven huokoisuus taas vähentää kiven lämmönjohtavuutta, paitsi jos huokokset ovat täynnä vettä ja yhteydessä toisiinsa. Muuttumattomat sedimenttiperäiset ja vulkaaniset kivet ovat yleensä huokoisia, mutta niitä ei esiinny Suomessa siinä muodossa kuin keskisessä Euroopassa. Meillä, kuten Helsingin alueella, pintasyntyisten kivien huokoisuus on käytännössä hävinnyt kivien voimakkaan uudelleenkitetytymisen ja eriateisen sulamisen seurauksena syvällä maankuoressa, korkeassa lämpötilassa ja paineessa tapahtuneesta puristumisesta ja metamorfosisista ja vieläpä useiden geologisten syklien aikana.

Kuitenkin lähellä pintaa, josta geoenergiaa ammennetaan, kallioperä voi olla hyvinkin rikkonaista ja rakoillutta (kuvat 12, 13, 44, 49, 57, 63, 64, 65, 68), mikä mahdollistaa pohjaveden liikkumisen kallioperässä ja tehokkaamman geoenergian lämmöntuoton. Erityisesti graniittisissa kivilajeissa rakoilu voi olla hyvinkin säännöllistä.

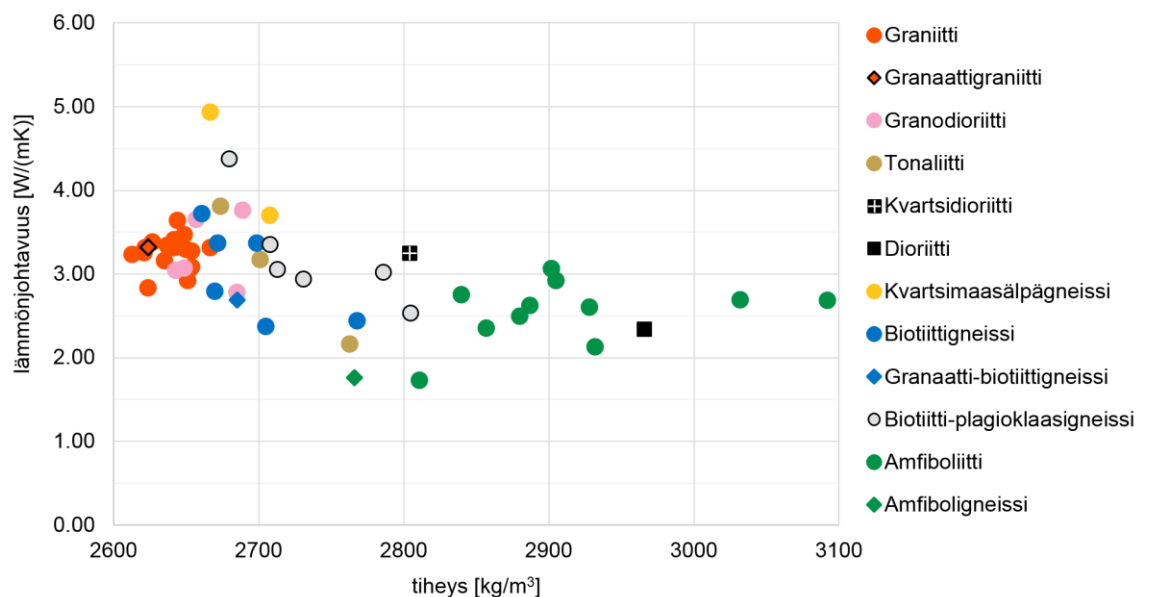
4.2 Helsingin kallioperän ominaisuuksista

Kallioperänäytteistä GTK:n geofysiikan laboratoriossa mitatut lämpöominaisuudet esitetään taulukossa 10 (liite 1) ”Laboratoriomittausten tulokset”. Lämmönjohtavuuden suhde tiheyteen esitetään kuvassa 70.

Graniitin tiheys on yleensä alhainen ja lämmönjohtavuus korkeahko. Näin on Helsingin näytteistäkin. Poikkeuksena ovat Töölön graniittinäyte (näyte TIN\$-2018-16) ja helsinkiitti (näyte TIN\$-2018-012) Pasilan eteläosassa. Helsinkiitti on ruskean ja valkoisen kirjava graniitin muunnos, jota esiintyy Helsingin alueella ja lähialueilla erityisesti juonina (Hytönen 1999). Helsinkiitti koostuu albitista, epidootista ja kvartsista. Näytteessä on kvartsia niukasti.

Granodioriitit eivät näytä eroavan graniiteista lämmönjohtavuuden perusteella. Tiheys niissä on hieman korkeampi. Tonalitiin tiheys on selkeästi edellisiä korkeampi, mutta lämmönjohtavuus vaihtelee heijastaen kvartsin määrää. Hevossalmen näytteen (TIN\$-2018-43) korkea arvo johtuu vaaleiden mineraalien, erityisesti kvartsin suuresta määrästä.

Kvartsidioriittinäyte (TIN\$-2018-38) on asultaan raitainen ja vaaleiden raitojen kvartsipitoisuus kasvattaa näytteen lämmönjohtavuusarvoa.



Kuva 70. Kallioperänäytteiden lämmönjohtavuuden suhde tiheyteen. Kuvassa on havaittavissa ryhmittymistä kivilajeittain, selvimmin graniiteissa ja toisaalta suurta hajontaa kuten amfiboliittikivilajeissa ja gneisseissä.

Mafisissa, tummissa syväkivissä kuten dioriitissa (näyte TIN\$-2018-004) lämmönjohtavuus on alhainen.

Biotiittigneississä lämmönjohtavuuden vaihtelu on melko suurta. Kolmessa näytteessä se on huomattavan korkea, Munkkivuoressa (näyte TIN\$-2018-005), Myllypurossa (näyte TIN\$-2018-33) ja Laajasalossa (näyte TIN\$-2018-37). Munkkivuoren biotiittigneissi on tiivis ja hienorakeinen. Sen mineraalikoostumusta on vaikea selvittää mutta terävän lohkeamistavan perusteella se sisältää paljon kvartsia. Myllypurossa kvartsin osuus näytteestä on huomattava, mikä nostaa lämmönjohtavuutta. Laajasalon näyte on raekooltaan tiivis, jolloin mineraalikoostumusta on vaikea selvittää. Näytteen tiheyden (D=2661) perusteella on kyse biotiittigneissistä eikä amfibolitista, joksi kivilaji on kartalla tälle alueelle merkitty.

Biotiitti-plagioklaasigneississä eli intermediäärissä gneississä tiheys on yleensä jonkin verran korkeampi kuin biotiittigneississä. Tällaista vaihtelua ei Helsingin mitatuissa näytteissä esiinny. Myös lämmönjohtavuus on näillä näytteillä verrattain korkea, Karhusaaren näytteessä (näyte TIN\$-2018-45) jopa huomattavan korkea. Mitatussa näytepalassa on huomattavan paljon kvartseja. Näyte TIN\$-2018-009 on kiinteä siirroskivi protomyloniitti, joka on mineraalikoostumukseltaan biotiitti-plagioklaasigneissi. Myös siinä lämmönjohtavuus on korkea.

Amfiboliiteissa lämmönjohtavuus on pääasiassa selkeästi alle 3. Lehtisaaren näytteessä kvartseja runsaasti sisältävät juovat kohottavat lämmönjohtavuusarvoa.

Helsingin alueen kallioperä kokonaisuutena on geoenergia ominaisuuksiltaan hyvää tasoa johtuen paljolti granitoideista ja kvartsipitoisista liuskeista ja gneisseistä sekä voimakkaasta uudelleen kiteytymisestä ja vaaleitten mineraalien (maasälvät ja etenkin kvartsin) rikastumisesta ja tunkeutumisesta plastiseen maankuoreen. Tuloksena on syntynyt seoskilajeja, migmatiitteja, joiden nimeäminen tiettyyn kivilajiluokkaan on paljolti näkemyksellistä, ja makuasiakin, kun vaihtoehtoja on kaksi tai useampiakin. Tämä johtaa myös siihen, että geotermisiä ominaisuuksia ei voida ennustaa kivilajiluokituksen perusteella saatikka kirja-arvoilla vaan tarvitaan paikkakohtaisia mittauksia.

5 Geoenergiapotentiaalin las- kenta

5.1 Yleistä

Maankamaraa voidaan pitää ehtymättömänä lämpöenergian lähteenä. Maankamaraan varastoituneesta ja siinä syntyvästä lämpöenergiasta käytetään nimitystä geoterminen energia. Suurin osa geotermisestä energiasta on peräisin maapallon syntyajoilta ja maankuoressa tapahtuvasta radioaktiivisesta hajoamisesta (esim. Eppelbaum et al., 2014). Maapallon kuumen sisuksen ja kylmän pinnan välinen lämpötilaero saa aikaan jatkuvan lämmön virtauksen pintaa kohti. Tätä virtausta kutsutaan geotermiseksi lämpövuoksi ja sen keskimääräinen suuruus on Suomessa noin 42 milliwattia neliömetriltä (esim. Veikkolainen and Kukkonen, 2018).

Auringon lyhytaaltoista säteilyä saapuu maanpinnalle Suomessa maantieteellisestä sijainnista ja vuodesta riippuen noin 800–1100 kWh/m² vuodessa (esim. Hakkarainen ja muut, 2015). Se on yli 2000-kertainen määrä energiaa verrattuna geotermisen lämpövuon maanpinnalle tuoman lämpöenergian määrään. Maankamara absorboi suurimman osan maanpinnalle saapuvasta auringonsäteilyä (esim. Trenberth et al., 2009). Auringon säteilyn merkitys syvemmillä sijaitsevien maakerrosten lämmittäjänä ei kuitenkaan ole yksikäsitteinen, koska absorptio suora vaikutus ei ulotu syvälle (Eppelbaum et al., 2014).

Maanpinnan ja ilmakehän välisen rajapinnan energiatasapainoon vaikuttavat merkittävästi myös maanpinnan ja ilmakehän lämpötilat. Maanpinta säteilee pitkäaaltoista säteilyä kohti ilmakehää ja ilmakehä vastaavasti säteilee pitkäaaltoista säteilyä kohti maanpintaa. Lisäksi mm. veden haihtuminen ja tuuli viilentävät maanpintaa. Lämpöä siirtyy myös johtamalla maanpinnan ja ilmakehän välisen rajapinnan läpi. Näistä tekijöistä koostuva maanpinnan energiatasapaino voidaan ilmaista yhtälöllä

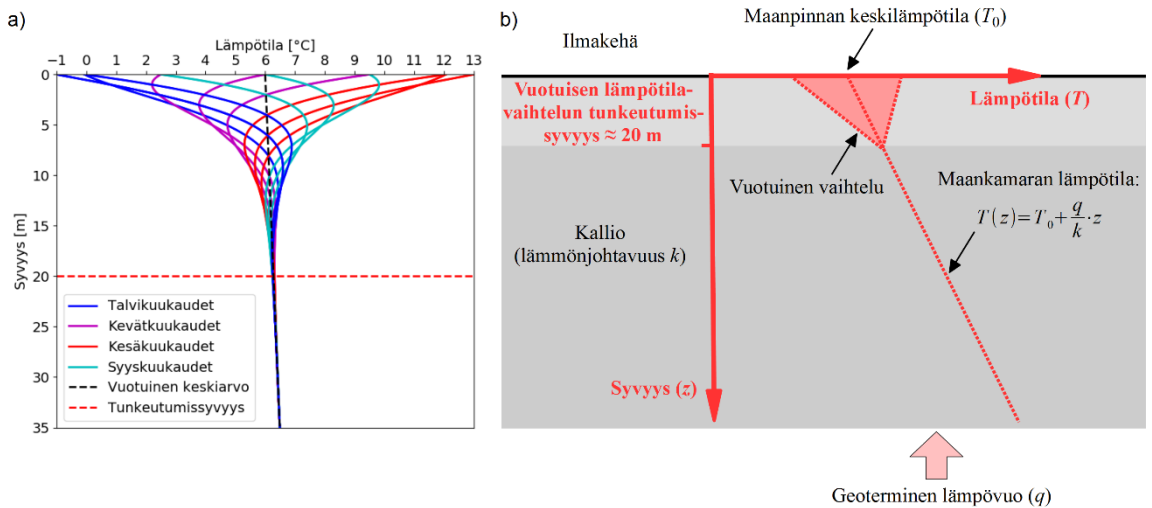
$$S_{\downarrow} - S_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} + H + LE + G = 0 \quad (1)$$

jossa S_{\downarrow} [W/m²] on maanpinnalle tuleva lyhytaaltainen säteily (auringon säteily), S_{\uparrow} [W/m²] on maanpinnan pois heijastama osuus pitkäaaltoisesta säteilystä, L_{\downarrow} [W/m²] on maanpinnalle tuleva lyhytaaltainen säteily (ilmakehän lämpösäteily), L_{\uparrow} [W/m²] on maanpinnan lämpösäteily, H [W/m²] on havaittavan lämmön vuo (tuulen pois viemä lämpö) ja LE [W/m²] on latentin lämmön vuo (veden olomuotojen muutosten lämmittävä tai viilentävä vaikutus) ja G [W/m²] on rajapinnan läpi johtamalla siirtyvän lämmön vuo (esim. Ohmura and Rasche, 2005). Näiden tekijöiden tasapainotila määrää maanpinnan lämpötilan, joka muuttuu jatkuvasti vuorokauden- ja vuodenajasta riippuen. Muutokset vaimentuvat kuitenkin syvemmälle mentäessä. Noin 20 metrin alapuolella lämpötila on käytännössä muuttumaton ja verrannollinen ilman lämpötilan pitkäaikaiseen keskiarvoon.

Maanpinnalta alaspäin mentäessä lämpötila kasvaa. Kasvunopeuden määräävät maankamaraan lämmönjohtavuus ja geoterminen lämpövuoksi. Jos maankamara oletetaan homogeeniseksi, voidaan maankamaraan keskilämpötila noin tuhannen metrin syvyyteen asti laskea kaavalla

$$T(z) = T_0 + \frac{q}{k} \cdot z, \quad (2)$$

jossa T [°C] on maankamaran lämpötila, z [m] on syvyys, T_0 [°C] on maanpinnan keskilämpötila, q [W/m²] on geoterminen lämpövuoto maanpinnalla ja k [W/m·K] on maankamaran lämmönjohtavuus (kuva 71). Kaavan (2) kertoimesta q/k käytetään myös nimitystä geoterminen gradientti Γ [K/m]. Se ilmaisee lämpötilan kasvun metriä kohden. Geoterminen gradientti on Suomessa tyypillisesti 1,0–1,5 astetta sataa metriä kohden (Helsingissä se on keskimäärin 1,3 K/hm).



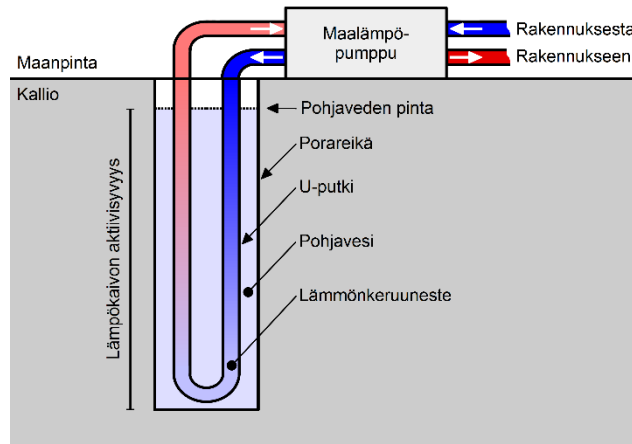
Kuva 71. Yksinkertainen maankamaran lämpötilan malli. (a) Maankamaran lämpötila vaihtelee vuotuisen keskiarvon ympärillä noin 20 metrin syvyyteen asti vuodenajasta riippuen. (b) Maankamaran vuotuista keskilämpötilaa (T) voidaan kuvata funktiolla, joka riippuu syvyydestä (z), maanpinnan lämpötilan pitkäaikaisesta keskiarvosta (T_0), kalliion lämmönjohtavuudesta (k) ja geotermisestä lämpövuosta (q), joka tuo jatkuvasti lämpöä syvemmältä maankamarasta kohti maanpintaa.

Suomessa maankamaran lämpötilat ovat matalia verrattuna esimerkiksi Keski-Eurooppaan. Maanpinnan lämpötila vaihtelee välillä 0,5–7,6 °C (Helsingissä se on keskimäärin 6,8 °C). Neljänkymmenen celsiusasteen lämpötiloja löytyy vasta 2–3 kilometrin syvyydeltä ja 100 celsiusasteen lämpötiloja 6–8 kilometrin syvyydeltä (Kukkonen, 2002). Näin ollen, korkeiden lämpötilojen geotermistä energiaa ei Suomessa ole saatavilla läheltä maanpintaa.

Maalämpöpumpun avulla hyödynnettävää matalien lämpötilojen geoenergiaa sen sijaan löytyy kaikkialta Suomesta läheltä maanpintaa. Suomessa suurin osa asennetuista geoenergiajärjestelmistä on kalliolämpöjärjestelmiä. Ne siirtävät kallioon varastoitunutta lämpöä maalämpöpumpun avulla rakennuksen lämmitysjärjestelmään (kuva 72). Kalliosta lämpöä kerätään yleensä pystysuoraan porattuun reikään asennetulla keruupiirillä (lämpökaivolla). Keruupiiri koostuu tyypillisesti yksinkertaisesta U-putkesta, jossa virtaa lämmönkeruunestettä. Lämmönkeruuneste on vesi-alkoholiseos, jonka jäätymispiste on noin –18 °C. Lämpöpumpulta keruupiiriin virtaavan nesteen lämpötilan ollessa kalliion lämpötilaa matalampi, virtaa kalliosta lämpöä nesteeseen. Maalämpöpumppu nostaa sähköenergiaa hyväksi käyttäen kalliosta nesteeseen siirtyneen lämmön tasoa ja siirtää sen rakennuksen lämmitysjärjestelmään. Lämpöpumpun hyötysuhteen mitataan käytetään lämpökerrointa (engl. Coefficient of Performance eli COP). Se kertoo kuinka monta kilowattia lämpöenergiaa lämpöpumppu tuottaa yhdellä kilowatilla sähköenergiaa. Geoenergian ja lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian suhde voidaan ilmaista kaavalla

$$Q_{\text{lämpöpumppu}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1} \cdot Q_{\text{geoenergia}}, \quad (3)$$

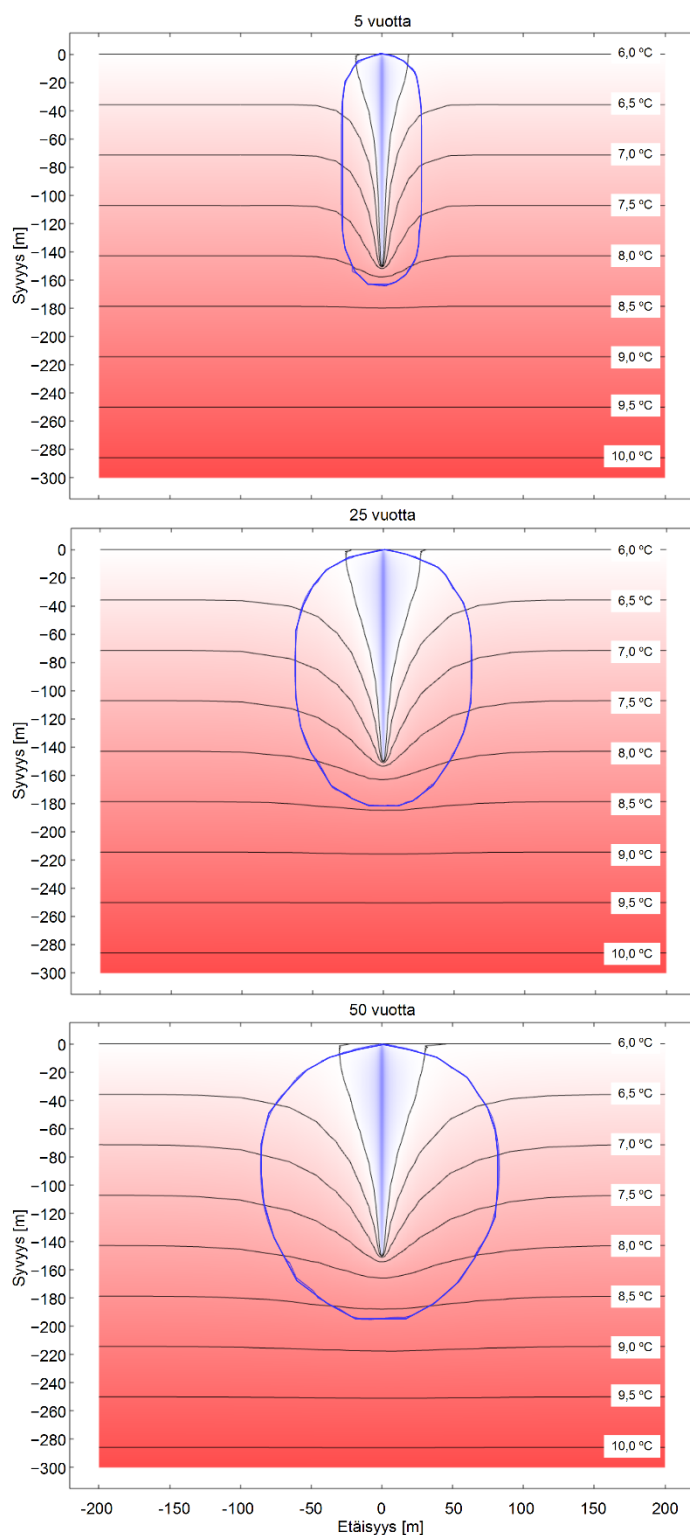
jossa $Q_{\text{lämpöpumppu}}$ [W·h] on lämpöpumpun tuottama lämmitysenergia, $Q_{\text{geoenergia}}$ [W·h] on kalliopö-
rätstä otetun geoenergian määrä ja COP on lämpöpumpun lämpökerroin. Maalämpöpumpun
lämpökertoimen vuosikeskiarvo on tyypillisesti noin 3 (Motiva, 2012).



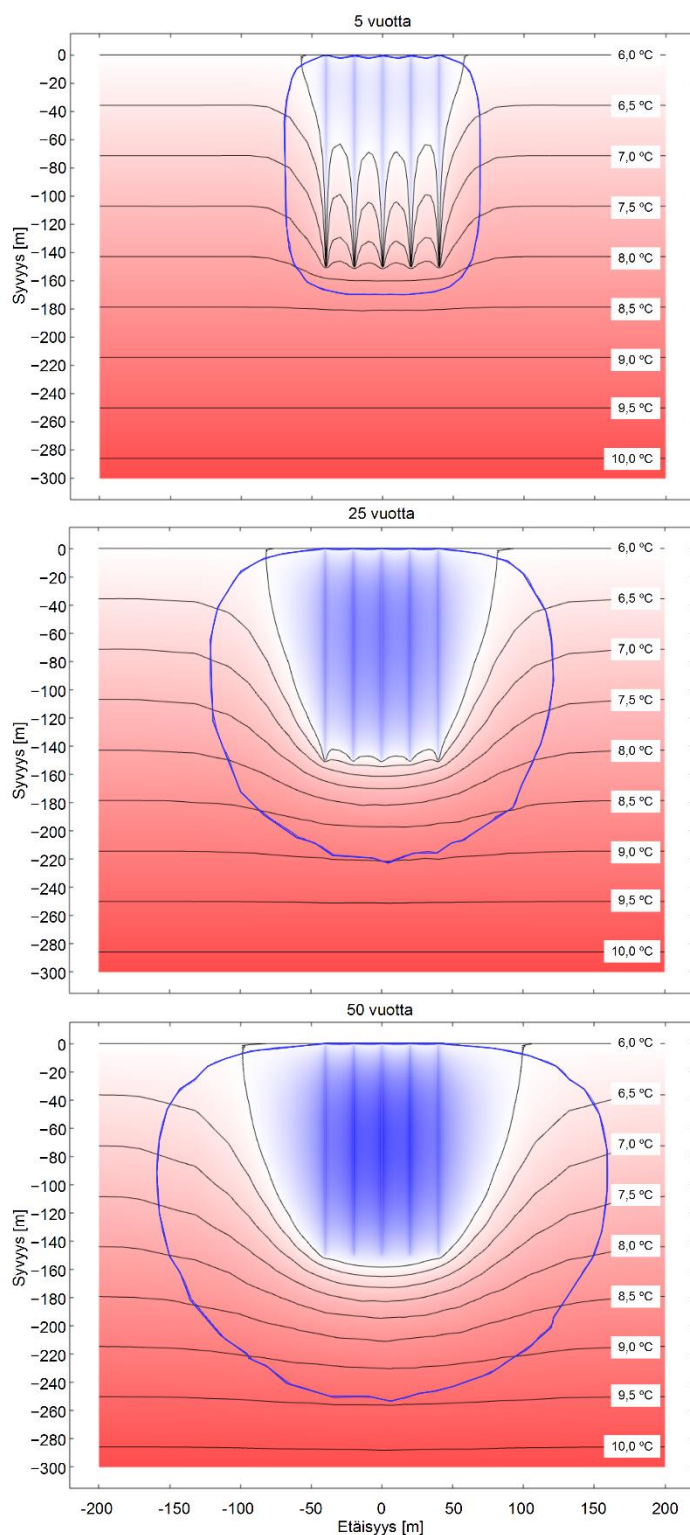
**Kuva 72. Kalliolämpöjärjestelmän periaatekuva. Lämpökaivo on kallioon pystysuuntaan porattuun reikä, johon on asennettu muovinen lämmönkeruuputkisto. Helsingissä lämpö-
kaivojen keskimääräinen syvyys on 177 m. Putkiston ja porareian seinämän välinen tila
täyttyy luonnollisesti pohjavedellä. Putkisto on tyypillisesti yksinkertainen U-putki. Put-
kistossa kiertää kalliota viileämpi lämmönkeruuneste, joka virtaa toista haaraa pitkin alas-
päin ja toista ylöspäin, lämmeten matkalla. Lämmönsiirto nesteen ja kallion välillä tapah-
tuu siinä osassa porareikää, joka sijaitsee pohjavedenpinnan alapuolella, koska kallion ja
putken haarojen välinen ilma toimii lämmöneristeenä. Kaivon pohjavedenpinnanalaista
syvyyttä kutsutaan aktiivisyvyudeksi. Lämpöpumppu nostaa kallioista nesteeseen virran-
neen lämmön tasoa ja siirtää sen rakennuksen lämmitysjärjestelmään.**

Lämpökaivolla suoritettava lämmönkeruu laskee kallion lämpötilaa (kuva 73). Jos kallion lämpö-
tila porareian seinämällä laskee alle nollan celsiusasteen, alkaa reikää täyttävä pohjavesi jäätyä.
Jäätyessään pohjavesi saattaa puristaa lämmönkeruuputket lyttyyn tai rikkoa ne. Tällöin kal-
liolämpöjärjestelmän toiminta vaarantuu. Tästä syystä järjestelmän mitoituksella on varmistet-
tava se, että lämpötila kalliossa ei laske liikaa, jolloin toiminnan vaarantuminen voidaan estää.

Kalliolämmöllä toteutetaan yhä useammin myös suurten rakennusten lämmitys. Tällöin yksi läm-
pökaivo ei riitä kattamaan rakennuksen koko lämmitystarvetta ja lämpökaivoja joudutaan poraa-
maan useita. Tyypillisesti kaivot porataan säännölliseen hilaan, jossa kaivojen välimatka on va-
kio. Tällaista kaivomuodostelmaa kutsutaan lämpökaivokentäksi (kun kaivoja on 10 tai enem-
män). Lämpökaivokentällä voidaan hyödyntää maankamaraan varastoitunutta lämpöä huomatta-
vasti yksittäistä kaivoa tehokkaammin. Lämpökaivokenttä myös laskee kallion lämpötilaa enem-
män kuin yksittäinen kaivo, koska samaa lämpövarantoa hyödynnetään usealla lämpökaivolla
(kuva 74). Tämä tekee lämpökaivokentän mitoitukselta yksittäisen lämpökaivon mitoitusta vaike-
amman tehtävän. Kentän mitoituksessa joudutaan ottamaan huomioon siinä olevien kaivojen vä-
linen vuorovaikutus, mikä riippuu niin maankamaraan fysikaalisista ominaisuuksista kuin kentän
geometriasta. Tällaisen tehtävän ratkaiseminen vaatii monimutkaista laskentaa. Jokaiselle läm-
pökaivokentälle tulee aina tehdä yksilöllinen mitoitus käyttäen ohjelmistoa, joka on laadittu kaivo-
kenttien mitoitusta varten.



Kuva 73. Esimerkki lämpökaivosta tehtävän lämmönoton vaikutuksesta kallion lämpötiloihin. Kuvissa esitetään miten yhdestä 150-metriä syvästä lämpökaivosta tehtävä lämmönotto on vaikuttanut kallion lämpötiloihin 5, 25 ja 50 vuoden kuluttua kaivon käytön aloittamisesta. Lämpöä otettiin suurin mahdollinen määrä, millä kaivon seinämän lämpötila ei vielä laskenut alle nollan asteen. Energiaa saatiin tässä tapauksessa 18 MWh/a (120 kWh/m vuodessa). Kuvat esittävät poikkileikkausta maankamarasta. Kaivo sijaitsee kuvien keskellä. Maanpinnan keskilämpötila oli 6,0 °C, kallion lämmönjohtavuus oli 3 W/m·K ja geoterminen gradientti oli 1,333 °C sataa metriä kohden. Mustat käyrät esittävät maankamaran lämpötilan tasa-arvokäyriä ja sininen käyrä esittää kaivon aiheuttaman lämpötilamuutoksen etenemistä. Sinisen viivan esittämän alueen sisäpuolella lämpötila on laskenut lämmönoton vaikutuksesta enemmän kuin 0,1 °C.

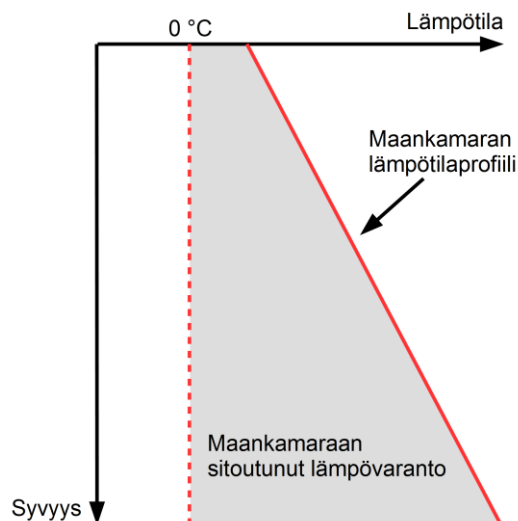


Kuva 74. Esimerkki lämpökaivokentästä tehtävän lämmönoton vaikutuksesta kallion lämpötiloihin. Kuvissa esitetään miten 25 kaivon kentästä (5x5-muodostelma) tehtävä lämmönotto on vaikuttanut kallion lämpötiloihin 5, 25 ja 50 vuoden kuluttua kaivon käytön aloittamisesta. Kaivojen syvyydet olivat 150 metriä ja välimatkat 20 metriä. Lämpöä otettiin suurin mahdollinen määrä, millä yhdenkään kaivon seinämän lämpötila ei vielä laskeutunut alle nollan asteen. Kentästä saatiin energiaa tässä tapauksessa 187,5 MWh/a (50 kWh/m vuodessa). Kuvat esittävät kentän läpi piirrettyä poikkileikkausta maankamarasta. Maanpinnan keskilämpötila oli 6,0 °C, kallion lämmönjohtavuus oli 3 W/m·K ja geotermien gradientti oli 1,333 °C sataa metriä kohden. Mustat käyrät esittävät maankamaran lämpötilan tasa-arvokäyriä ja sininen käyrä esittää kaivon aiheuttaman lämpötilamuutoksen etenemistä. Sinisen viivan esittämän alueen sisäpuolella lämpötila on laskenut lämmönoton vaikutuksesta enemmän kuin 0,1 °C.

5.2 Esitetyt asiat

Tässä raportin osassa esitetään ensin kalliolämpöjärjestelmien mitoittamiseen ja kallioperän lämmönsiirto-ominaisuuksiin vaikuttavien parametrien kartat. Kartat luotiin maastonäytteistä tehtyjen laboratoriomittausten sekä jo olemassa olevien aineistojen perusteella. Lisäksi esitetään kartta maapeitteen paksuudesta, joka on kalliolämpöjärjestelmien rakennettavuuteen vaikuttava tekijä.

Tämän jälkeen esitetään kartat, jotka kuvaavat Helsingin kallioperän geoenergiapotentiaalia. Geoenergiapotentiaali laskettiin kahdella tavalla. Ensimmäinen laskettiin teoreettinen geoenergiapotentiaali, joka kuvaa maankamaraan sitoutuneen lämpövarannon suuruutta yhdellä hehtaarilla (kuva 75). Sitten laskettiin tekninen geoenergiapotentiaali, joka laskettiin olettamalla Helsinki yhdeksi suureksi lämpökaivokentäksi, jossa kaivojen välimatka on 20 metriä. Tekninen geoenergiapotentiaali kuvaa suurinta mahdollista Helsingin kokoisen lämpökaivokentän yhdeltä hehtaarilta saatavan lämpöenergian määrää. Molemmat geoenergiapotentiaalit laskettiin kolmelle tarkastelusyvyydelle: 150, 300 ja 1000 metrin syvyyksille. Geoenergiapotentiaaleja laskettaessa lämmönoton kestoksi oletettiin 50 vuotta.



Kuva 75. Maankamaraan sitoutunut lämpövaranto. Maankamaraan lämpötila laskee otettaessa siitä lämpöä. Maankamaraan lämpötila voidaan laskea nolnaan celsiusasteeseen vaarantamatta vielä kalliolämpöjärjestelmien toimintaa. Maankamaraan lämpötilaprofiilin ja nollian celsiusasteen viivan väliin jäävä pinta-ala vastaa sitä lämpöenergian määrää, jonka ottaminen maankamarasta laskisi sen lämpötilan nolnaan celsiusasteeseen. Tätä energiamäärää voidaan ajatella maankamaraan sitoutuneeksi lämpövarannoksi.

Lopuksi esitetään arviot yksittäisten 150-, 300- ja 1000-metriä syvien lämpökaivojen geoenergiapotentiaaleista ja vaikutussäteistä sekä viilennyksen vaikutuksesta lämmönottoon ja kalliolämpöjärjestelmien elinkaaren pituuteen. Yksittäisellä lämpökaivolla tarkoitetaan tässä sellaista kaivoa, jonka vaikutuspiirissä ei ole muita lämpökaivoja. Viilennyksellä ladataan lämpökai-voa ympäröivään kallioon rakennuksen huoneilmasta kerättyä lämpöä. Kallioon ladatulla lämmöllä voidaan parantaa kalliolämpöjärjestelmien toimintaa ja pidentää niiden elinkaarta.

5.3 Mitoitusparametrikartat

Tämän työn yhtenä päämääränä oli tuottaa kartta-aineistot geoenergiajärjestelmien mitoituksessa käytettävistä kallioperän termogeologisista ominaisuuksista. Maastonäytteistä tehtyjen mittausten perusteella luotiin kartat Helsingin kallioperän lämmönjohtavuudesta, tiheydestä, ominaislämpökapasiteetista, tilavuuslämpökapasiteetista ja termisestä diffusiviteetista. Nämä parametrit kuvaavat kallion lämmönsiirto- ja lämmönvarastointiominaisuuksia. Kallion lämmönjohtavuus kuvaa sen kykyä johtaa lämpöä. Mitä suurempi kallion lämmönjohtavuus on, sitä paremmin lämpö johtuu siinä. Kallion ominais- ja tilavuuslämpökapasiteetti sen sijaan kertovat sen kyvystä varastoida lämpöä. Mitä suurempi kallion lämpökapasiteetti on, sitä enemmän se kykenee varastoimaan lämpöä. Termien diffusiviteetti riippuu kallion lämmönjohtavuudesta ja tilavuuslämpökapasiteetista ja kuvaa sitä, miten nopeasti kallio reagoi lämpötilamuutoksiin. Mitä suurempi kalliion termien diffusiviteetti on, sitä nopeammin lämpötila kalliiossa voi muuttua.

Kallioperän termogeologisten ominaisuuksien lisäksi kalliolämpöjärjestelmien suunnitteluun vaikuttavat oleellisesti maanpinnan lämpötila ja geotermisen lämpövuon suuruus. Ne vaikuttavat maankamaraan varastoituneen lämpöenergian määrään. Myös näitä parametreja kuvaavat kartta-aineistot tuotettiin Helsingin alueelle.

Edellä mainittujen aineistojen lisäksi luotiin kartta-aineistot Helsingin alueen maapeitteen paksuudesta ja maankamaran geotermisestä gradientista, joka kertoo sen, miten nopeasti maankamaran lämpötila nousee syvemmälle mentäessä. Maapeite vaikuttaa erityisesti geoenergiajärjestelmien rakennettavuuteen ja rakennuskustannuksiin. Lämpökaivon maankamarasta hyödyntämä lämpö pyritään ottamaan yksinomaan kalliosta, jonka termogeologiset ominaisuudet ovat oleellisesti maapeitteen ominaisuuksia paremmat. Lisäksi maaosuus joudutaan putkittamaan, jotta maa ei sortuisi porattuun reikään eikä lämmönkeruuputkien rikkoutuessa vuotamaan pääsevä lämmönkeruuneste pääsisi sekoittumaan maaperän sisältämään pohjaveteen. Paksulla maapeitteellä on siis kustannuksia kasvattava vaikutus. Maapeitteellä voi kuitenkin olla myös hyödyllinen vaikutus. Maapeitteen paksuuden ollessa suuri, se saattaa oleellisesti nostaa kallion lämpötilaa, jolloin se vaikuttaa parantavasti kalliolämpöjärjestelmän toimintaan. Helsingissä maapeite on suurimmalta osin kuitenkin hyvin ohut (keskimäärin 5,1 metriä) eikä sillä ole merkittävää vaikutusta kallioperän lämpötilaan.

5.3.1 Lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys

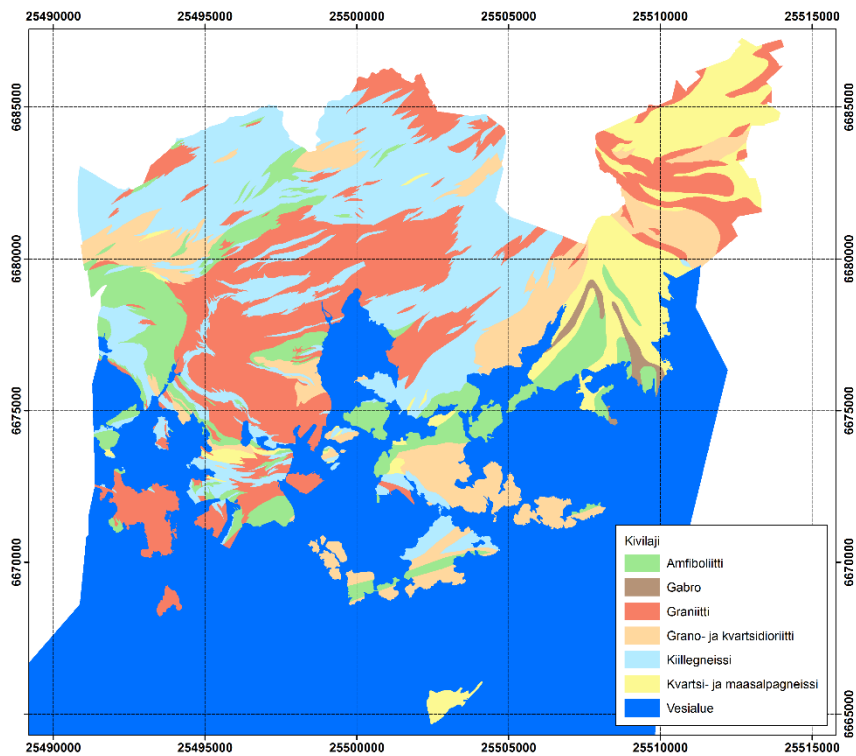
Lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys mitattiin GTK:n geofysiikan laboratoriossa viidellekymmenelleyhdelle (51) maastosta otetulle näytteelle (kuva 2). Kullekin näytteelle tehtiin myös kivilajimääritys. Näytteet luokiteltiin ensin niistä määritetyn kivilajin perusteella niitä parhaiten kuvaaviin Helsingin kivilajikartan (kuva 1) kuuteen kivilajiin kuuluvaksi.

Tämän jälkeen kunkin kivilajin lämmönjohtavuuksille, ominaislämpökapasiteeteille ja tiheyksille tehtiin tilastollinen analyysi, jolla etsittiin aineistoista spatiaalista korrelaatiota. Tilastollisesti merkitsevää spatiaalista korrelaatiota ei löydetty yhdestäkään aineistosta 95 %:in merkitsevyydellä. Näin ollen, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys oletettiin vakioiksi kunkin kivilajin alueella. Kivilajien lämmönjohtavuuksille, ominaislämpökapasiteeteille ja tiheyksille laskettiin arvot mittaustulosten keskiarvoina (taulukko 1).

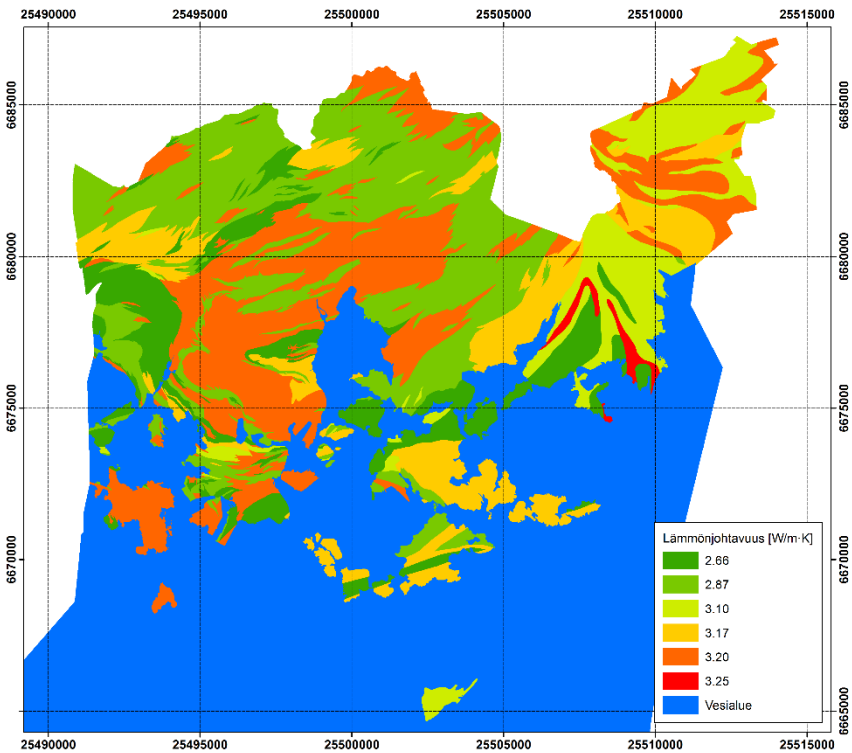
Taulukko 1. Maastonäytteille tehtyjen laboratoriomittausten tulokset. Taulukossa esitetään kivilajikohtaiset keskiarvot lämmönjohtavuudelle (k), ominaislämpökapasiteetille (C_p) ja tiheydelle (ρ). Suluissa olevat luvut esittävät Peltoniemen ja Kukkosen (1995) koko Suomen kattavalle aineistolle laskemia keskiarvoja. N ilmaisee otannan suuruuden.

Kivilaji	N	k [W/m·K]	C_p [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Amfiboliitti	10 (80)	2,66 (2,63)	731	2906 (2963)
Gabro	1 (105)	3,25 (2,71)	712	2804 (2937)
Graniitti	16 (272)	3,20 (3,61)	721	2640 (2670)
Grano- ja kvartsidioriitti	12 (270)	3,17 (3,61)	731	2675 (2699)
Kiillegneissi	9 (181)	2,87 (2,86)	725	2707 (2758)
Kvartsi-maasälpagneissi	2 (15)	3,10 (3,59)	723	2794 (2673)

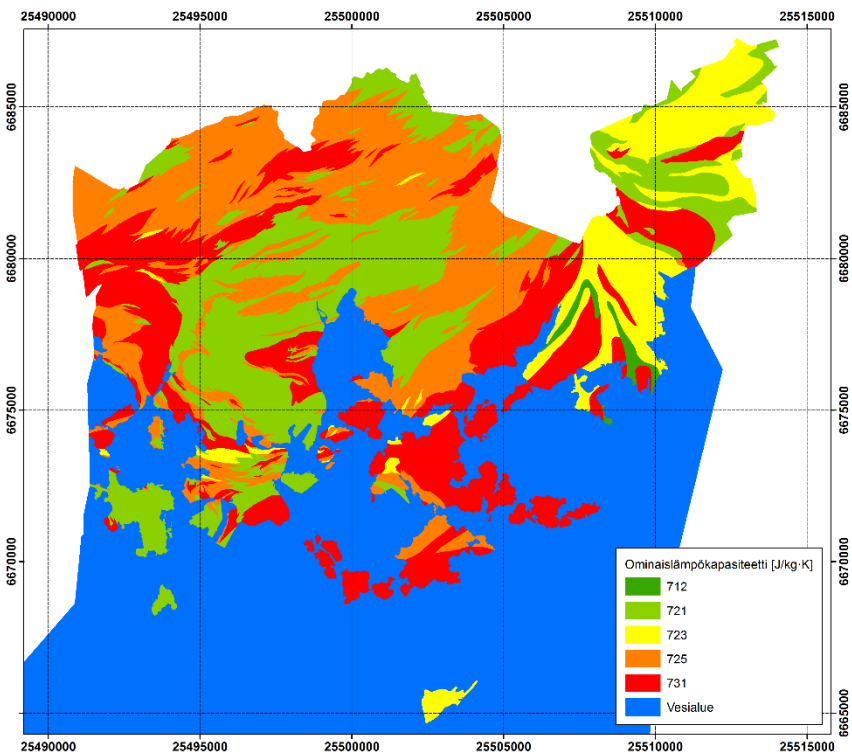
Lämmönjohtavuus-, ominaislämpökapasiteetti- ja tiheyskarttoja varten kuvan 1 kivilajikarttaa yksinkertaistettiin. Kartasta poistettiin pienimmät piirteet ja saatiin kuvan 76 esittämä vektorimuotoinen kartta, joka koostuu 239 kivilajipolygonista. Kullekin kartan polygonille annettiin kivilajin perusteella lämmönjohtavuudeksi, ominaislämpökapasiteetiksi ja tiheydeksi taulukon 1 keskiarvot ja saatiin kuvien 77–79 esittämät vektorimuotoiset kartat.



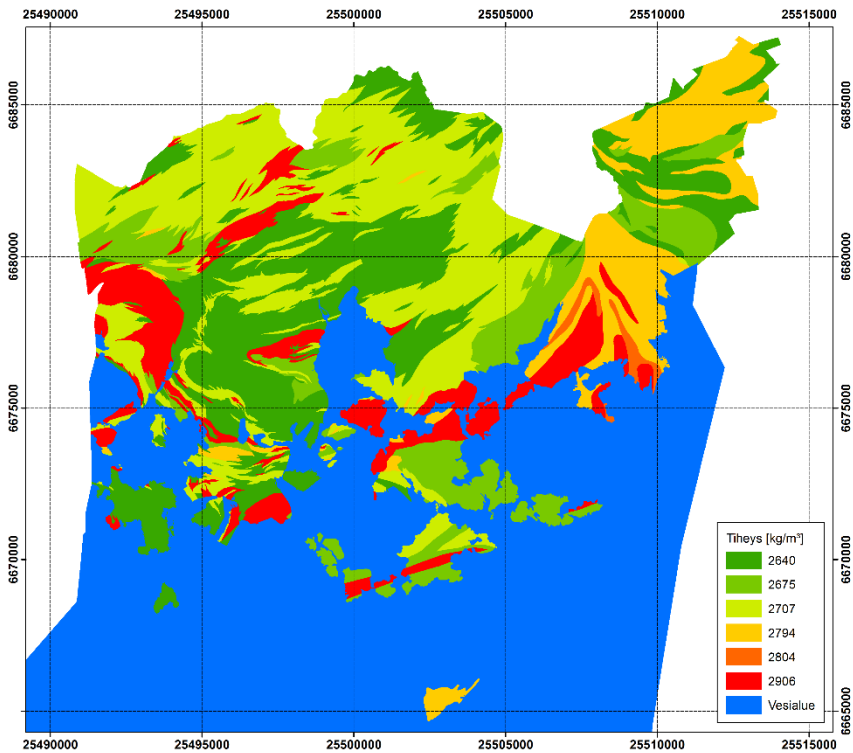
Kuva 76. Yksinkertaistettu Helsingin kivilajikartta. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN. © Helsingin kaupunki.



Kuva 77. Helsingin kallioperän lämmönjohtavuus. Kartassa suurimmat lämmönjohtavuudet ovat gabrolla ja graniitilla. Gabron lämmönjohtavuus perustuu vain yhteen mittaukseen eikä edusta tyypillistä gabron lämmönjohtavuusarvoa vaan on poikkeuksellisen korkea. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



Kuva 78. Helsingin kallioperän ominaislämpökapasiteetti. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



Kuva 79. Helsingin kallioperän tiheys. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

5.3.2 Tilavuuslämpökapasiteetti ja termien diffusiviteetti

Tilavuuslämpökapasiteettia ja termistä diffusiviteettia ei mitattu suoraan. Ne johdettiin mittaustuloksista laskemalla. Tilavuuslämpökapasiteetti laskettiin kaavalla

$$C = \rho \cdot C_p, \quad (4)$$

jossa C [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$] on tilavuuslämpökapasiteetti, ρ [kg/m^3] on tiheys ja C_p [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$] on ominaislämpökapasiteetti. Termien diffusiviteetti laskettiin kaavalla

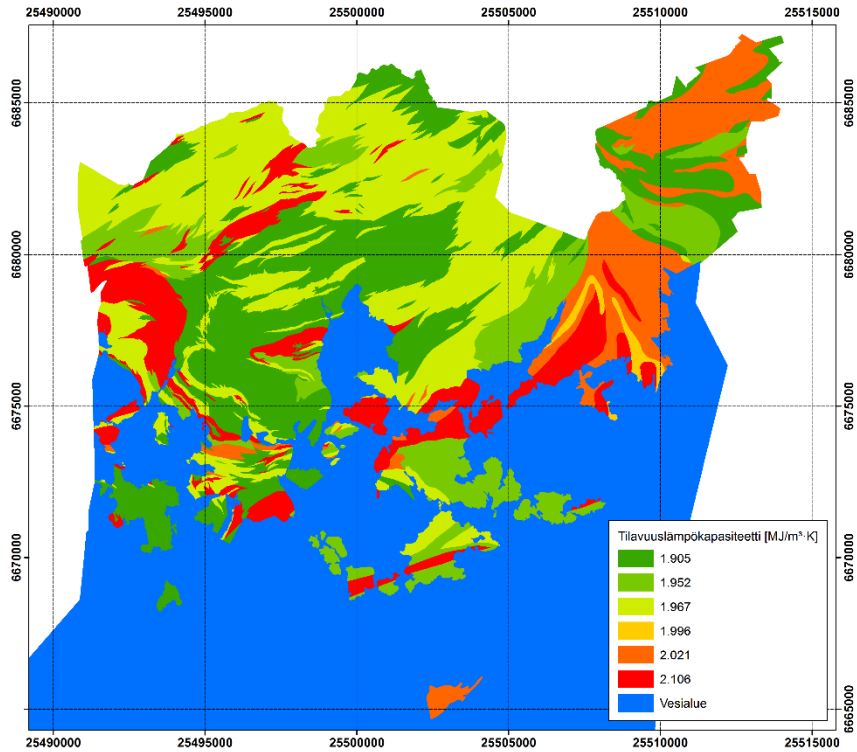
$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}, \quad (5)$$

jossa α [m^2/s] on termien diffusiviteetti ja k [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$] on lämmönjohtavuus. Laskujen tulokset on esitetty taulukossa 2.

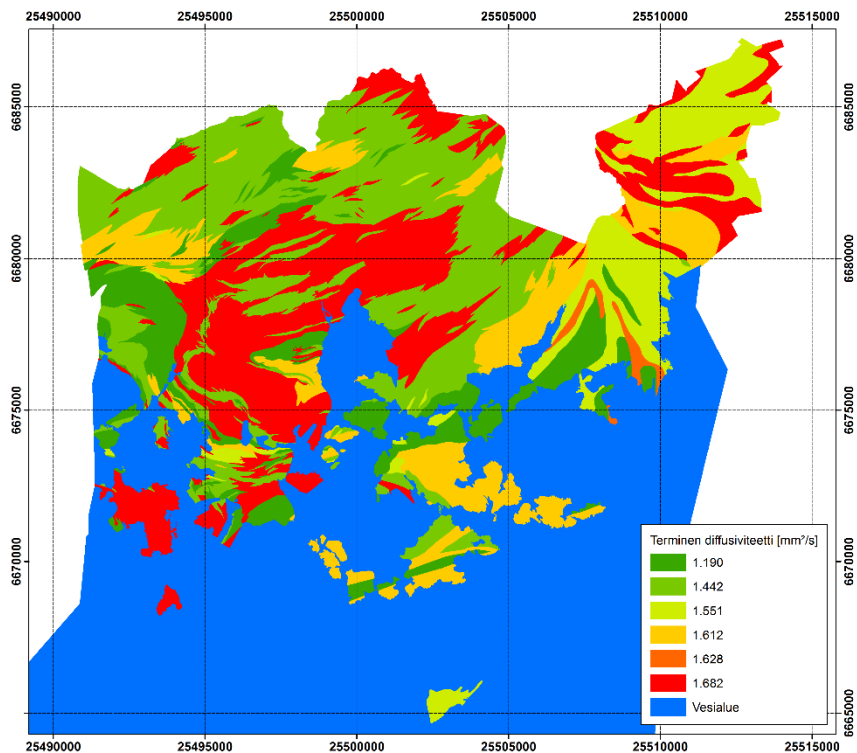
Taulukko 2. Maastonäytteille lasketut johdetut suureet. Taulukossa on esitetty kivilajikohtaiset keskiarvot tilavuuslämpökapasiteetille (C) ja termiselle diffusiviteetille (α).

Kivilaji	C [$\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$]	α [mm^2/s]
Amfiboliitti	2,106	1,190
Gabro	1,996	1,628
Graniitti	1,905	1,682
Grano- ja kvartsidioriitti	1,952	1,612
Kiillegneissi	1,967	1,442
Kvartsi-maasälpagneissi	2,021	1,551

Tilavuuslämpökapasiteetin ja termisen diffusiviteetin kartat luotiin antamalla kullekin kivilajikartan 239 polygonille (kuva 76) kivilajin perusteella taulukon 2 arvot. Tulokseksi saatiin kuvien 80 ja 81 esittämät vektorimuotoiset kartat.



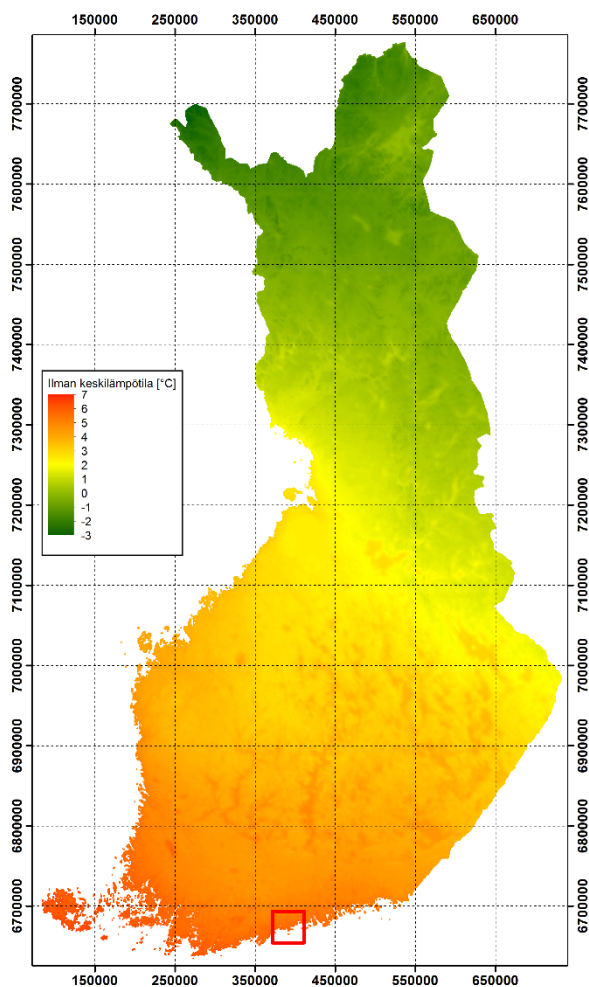
Kuva 80. Helsingin kallioperän tilavuuslämpökapasiteetti. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



Kuva 81. Helsingin kallioperän terminen diffusiviteetti. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

5.3.3 Maanpinnan keskilämpötila

Pirinen ja muut (2012) laskivat koko Suomen kattavan rasterimuotoisen kartan, joka kuvaa ilman vuotuista keskilämpötilaa vertailukaudella 1981–2010 (Kuva 82). He interpoloivat Kriging-menetelmää käyttäen säähavaintoasemien vuosikeskilämpötilan säännölliseen hilaan, jonka solukoko on 1 km x 1 km. Tähän aineistoon perustuen luotiin uusi kartta-aineisto, joka kuvaa maanpinnan keskilämpötilaa Helsingissä.

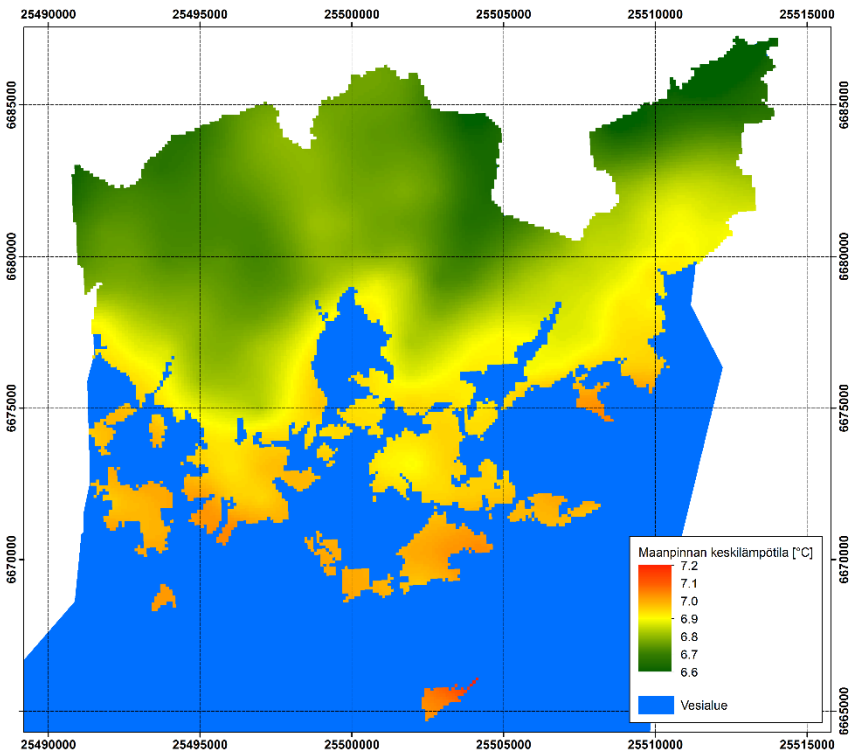


Kuva 82. Ilman vuotuinen keskilämpötila Suomessa vertailukaudella 1981–2010 (Pirinen ja muut, 2012). Punainen neliö esittää Helsingin aluetta. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-TM35FIN. Rantaviiva ja maaraja © Maanmittauslaitos.

Ensin Pirisen ja muiden (2012) kartasta leikattiin Helsingin ja sen lähialueen sisältämä osa, jonka koko oli 40 km x 40 km (kuvan 82 punainen neliö). Tämän jälkeen leikatusta osasta interpoloitiin Kriging-menetelmällä Helsingin ilman vuotuista keskilämpötilaa kuvaava rasterimuotoinen kartta, jonka solukoko oli 100 m x 100 m. Lopuksi ilman keskilämpötilarasterista laskettiin maanpinnan keskilämpötilarasteri (kuva 83) tekemällä sille Kukkosen (1987) esittämä korjaus

$$T_{\text{maanpinta}} = 0,71 \cdot T_{\text{ilma}} + 2,93, \quad (6)$$

jossa $T_{\text{maanpinta}}$ [°C] on maanpinnan vuotuinen keskilämpötila ja T_{ilma} [°C] on ilman vuotuinen keskilämpötila.



Kuva 83. Maanpinnan keskilämpötila Helsingissä. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

5.3.4 Geoterminen lämpövuoto

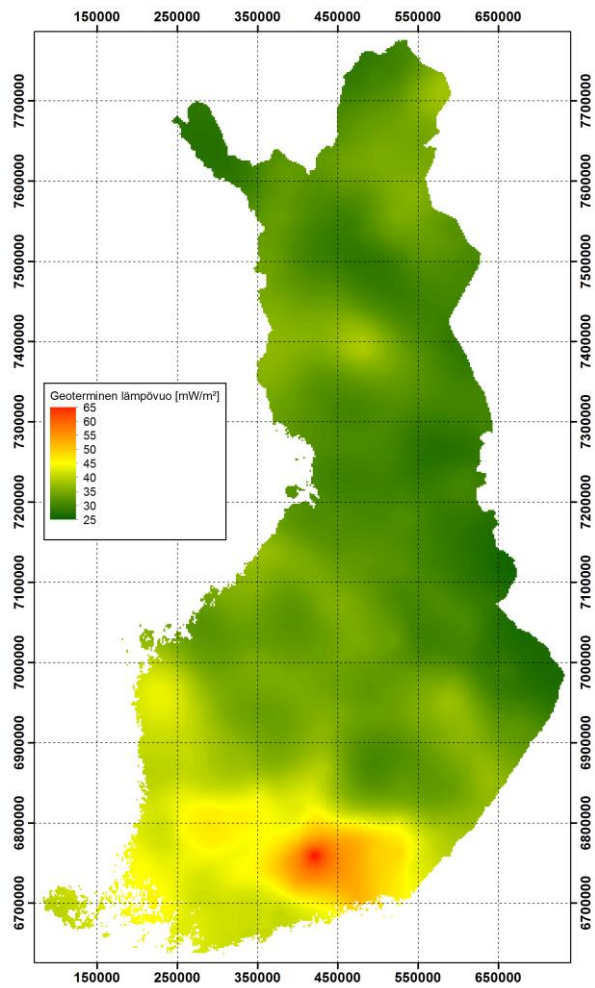
Geoterminen lämpövuoto laskettiin ensin koko Suomelle. Laskenta perustui Birch'in lakiin (Eppelbaum et al., 2014)

$$Q = q + D \cdot A, \quad (7)$$

jossa Q [W/m^2] on geoterminen lämpövuoto maanpinnalla, q [W/m^2] on redusoitu geoterminen lämpövuoto (lämpövuoto, josta on poistettu maankuoren radiogeenisen lämmöntuoton vaikutus), D [m] on sen kerroksen paksuus, jossa radiogeeninen lämmöntuotto tapahtuu, ja A [W/m^3] on maanpinnan kivien radiogeeninen lämmöntuotto.

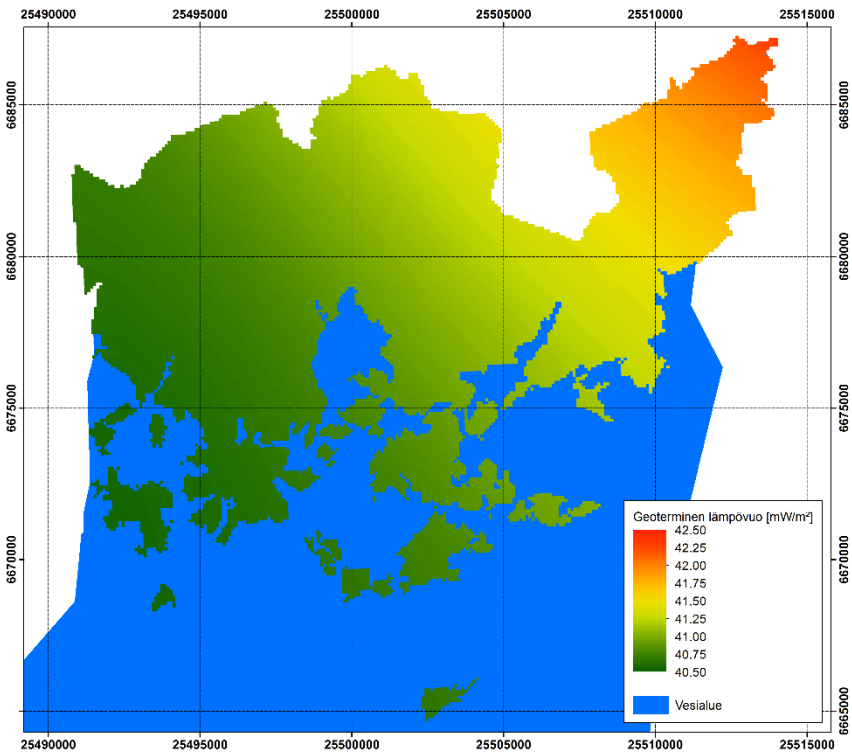
Aineistona käytettiin Kukkonen (1989) analysoimia 1054 moreenigeokemian näytteitä, joista hän arvioi maanpinnan kivien radiogeenisen lämmöntuoton, sekä Kukkonen (1989 ja 1993) ja GTK:n tekemiä arvioita maanpinnan lämpövuosta, jotka perustuivat yhteensä 54:lle porareijistä tehdyille lämpötilamittaukselle.

Ensin valittiin edellä mainittujen 1054 lämmöntuotopisteen joukosta ne, jotka sijaitsivat lähinnä niitä 54 porareikää, joille lämpövuoarvot oli laskettu. Sitten kaava (6) sovitettiin näin saatuihin 54:ään QA-pisteeseen käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää. Tulokseksi saatiin $q = 15,792 \text{ mW}/\text{m}^2$ ja $D = 10,491 \text{ m}$. Tämän jälkeen kaikille 1054 lämmöntuotopisteelle laskettiin arvio maanpinnan lämpövuosta käyttäen kaavaa (7) sekä ratkaistuja q - ja D -arvoja. Näin lasketuista 1054 lämpövuoarvosta interpoloitiin Kriging-menetelmää käyttäen rasterimuotoinen kartta, jonka solukoko oli 2 km x 2 km (kuva 84).



Kuva 84. Geoterminen lämpövuoto maanpinnalla Suomessa. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-TM35FIN.

Lopuksi Helsingin rasterimuotoinen lämpövuokartta (kuva 85) luotiin interpoloimalla Suomen lämpövuokartan arvoja hilaan, jonka solukoko on 100 m x 100 m. Tämä tehtiin käyttämällä bilineaarista interpolointia.



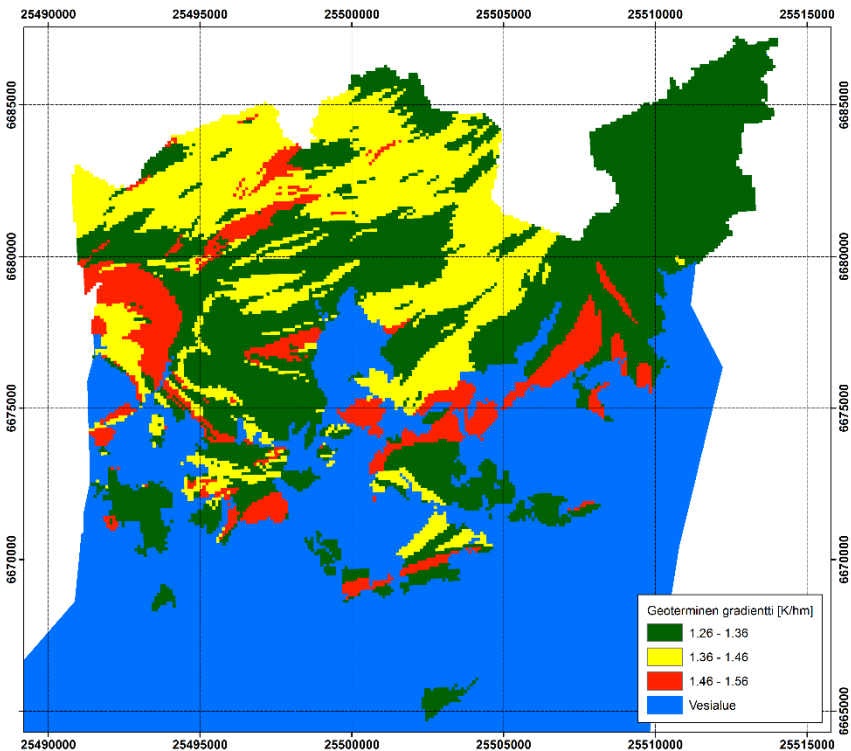
Kuva 85. Geoterminen lämpövuoto maanpinnalla Helsingissä. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

5.3.5 Geoterminen gradientti

Helsingin kallioperän geotermistä gradienttia kuvaava kartta luotiin etsimällä ensin geotermisen lämpövuorasterin jokaiselle hilapisteelle (kuva 85) lämmönjohtavuus lämpövuokartasta (kuva 77). Tämän jälkeen geoterminen gradientti laskettiin kaavalla

$$\Gamma = \frac{q}{k} \quad (8)$$

jossa Γ [K/m] on geoterminen gradientti, q [W/m²] on geoterminen lämpövuoto ja k [W/m·K] on lämmönjohtavuus. Kaavalla (8) lasketuista geotermisen gradientin estimaateista luotiin kuvan 86 rasterimuotoinen kartta, jonka solukoko on 100 m x 100 m.



Kuva 86. Helsingin kallioperän geoterminen gradientti. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

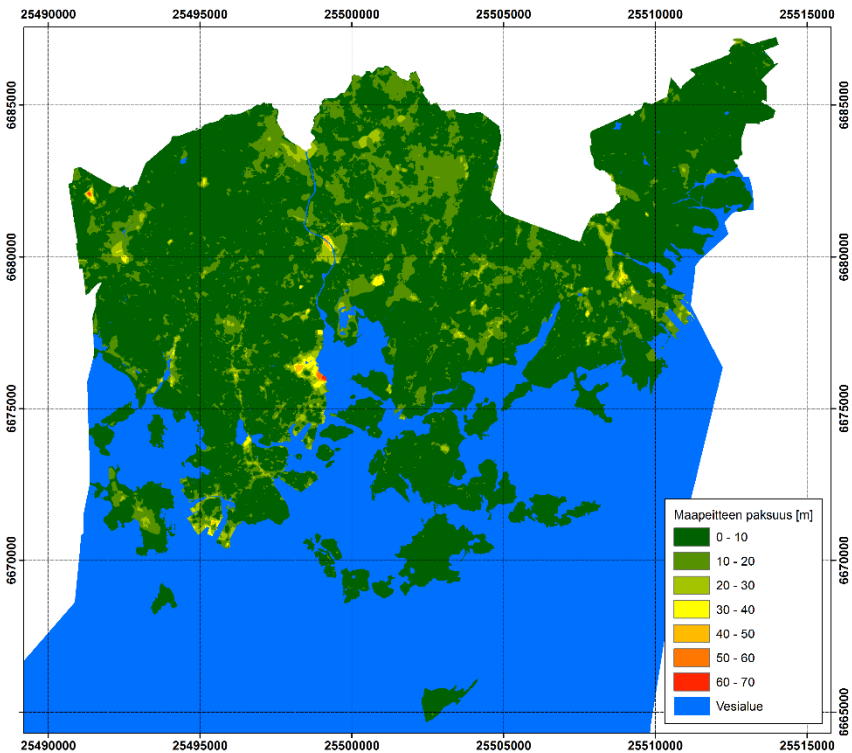
5.3.6 Maapeitteen paksuus

Maapeitteen paksuuden arvioimiseksi käytettiin Helsingin savialueiden syvyystietoja ja Helsingin kaupungin kairaustietoja. Lisäksi Maanmittauslaitoksen kartta-aineistosta käytettiin avokalliokuviotietoja ja Lidar-korkeusaineistoa.

Ensin vektorimuotoisesta savikkojen syvyysaineistosta interpoloitiin säännölliseen hilaan rasterimuotoinen syvyyskartta, jonka solukoko oli 10 m x 10 m. Näin luotu kartta ei kerro kalliopinnan syvyyttä, mutta se antaa sille minimiarvon.

Sitten kairauspisteistä interpoloitiin rasterimuotoinen syvyyskartta, jonka solukoko oli 10 m x 10 m. Kairausaineisto koostui 182 705 pisteestä. Kairauksista 70 630 kpl oli lopetettu varmistetusti kallioon. Sen sijaan 100 512 kpl oli lopetettu ennen kalliopintaa ja 11 563 kpl oli lopetettu siten, että päättymissyy oli varmistamaton kallio, jolloin päättymissyy saattaa tosiasiaassa olla iso kivi.

Tämän jälkeen savikkojen syvyyskartta ja kairaustiedoista laskettu syvyyskartta yhdistettiin siten, että rasteita verrattiin solu kerrallaan, ja syvempi arvo valittiin kalliopinnan syvyydeksi. Lopuksi Maanmittauslaitoksen Lidar-korkeusrasterista vähennettiin yhdistetty savikkojen ja kairaustietojen syvyysrasteri, jolloin erotuksena saatiin maapeitteen paksuus. Kuva 87 esittää tulosta.



Kuva 87. Maapiteen paksuus Helsingissä. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

5.3.7 Geoenergiapotentialiin laskentaan vaikuttavat parametrit

Taulukko 3 esittää tilastollista yhteenvetoa edellä esitetyistä yhdeksästä kartasta. Vektorimuotoisten karttojen tapauksessa tilastolliset suureet ovat pinta-alalla painotettuja.

Taulukko 3. Tilastollinen yhteenveto kartoista. Taulukko esittää kartoissa esitettyjen suureiden minimi- ja maksimi-arvot sekä keskiarvot, mediaanit ja moodit. *N* ilmaisee otannan suuruuden.

Suure	<i>N</i>	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Mediaani	Moodi
Kivien lämmönjohtavuus [W/m·K]	239	2,66	3,25	3,01	3,10	2,87
Kivien ominaislämpökapasiteetti [J/kg·K]	239	712	731	725	725	725
Kivien tiheys [kg/m ³]	239	2640	2906	2719	2707	2707
Kivien tilavuuslämpökapasiteetti [MJ/m ³ ·K]	239	1,90	2,12	1,97	1,96	1,96
Kivien termien diffusiviteetti [mm ² /s]	239	1,25	1,68	1,53	1,53	1,46
Maanpinnan keskilämpötila [°C]	20 517	6,610	7,120	6,820	6,802	6,764
Geoterminen lämpövuoto [mW/m ²]	20 517	40,545	42,289	41,040	40,947	40,548
Geoterminen gradientti [K/hm]	20 517	1,27	1,56	1,37	1,34	1,27
Maapiteen paksuus [m]	2 091 338	0,0	67,0	5,1	3,4	0,0

5.4 Geoenergiapotentialin arviointi

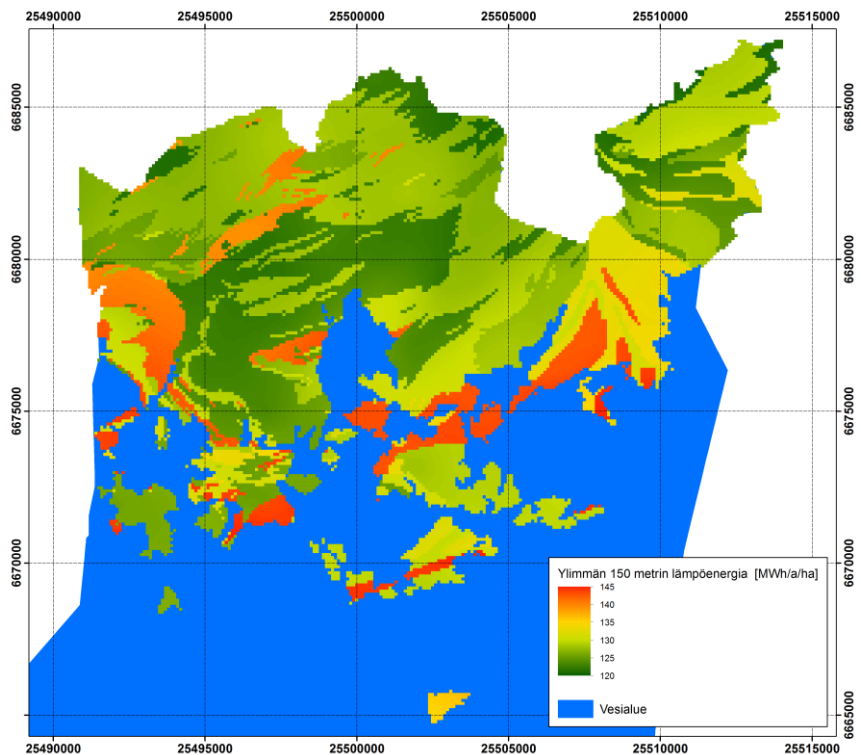
5.4.1 Helsingin kallioperän teoreettisen geoenergiapotentialin arviointi

Kalliotilavuuden lämpötilan muuttamiseen tarvittavan energian määrä saadaan kaavasta

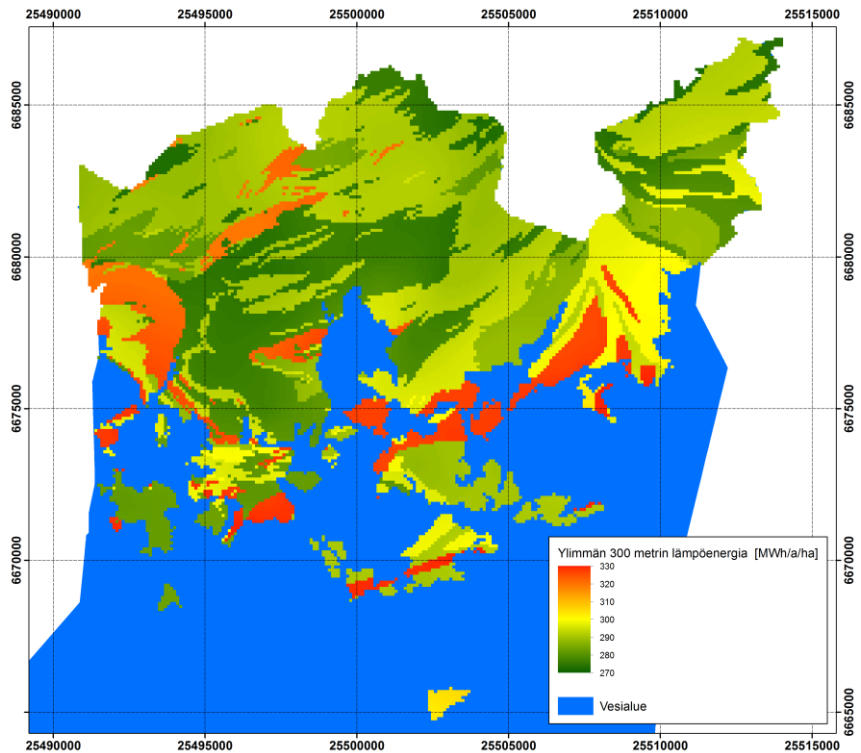
$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T_2 - T_1), \quad (9)$$

jossa Q [J] on energiamäärä (1 MWh = 3 600 000 000 J), ρ [kg/m³] on kallion tiheys, C_p [J/kg·K] on kallion ominaislämpökapasiteetti, V [m³] on kalliotilavuus, T_1 [°C] on kallion alkulämpötila ja T_2 [°C] sen loppulämpötila. Kaavaa (9) käyttäen laskettiin ensin kuinka paljon Helsingin ylimmät 150, 300 ja 1000 metriä sisältävät lämpöenergiaa (engl. Heat Content, esim. Blackwell, 2007). Tämän jälkeen lämpöenergioiden määrät jaettiin 50 vuoden lämmönottojaksolla. Tulokseksi saatiin Helsingin kallioperän teoreettinen geoenergiapotentiali.

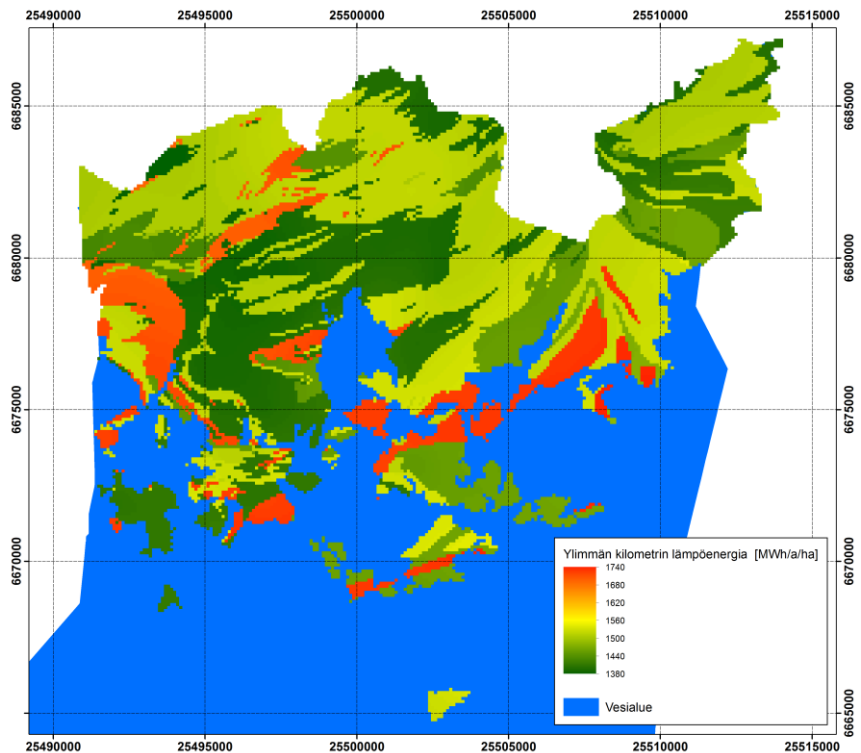
Laskenta aloitettiin jakamalla Helsinki säännölliseen hilaan, jonka solukoko oli 100 m x 100 m (1 hehtaari). Tämän jälkeen kullekin solulle haettiin kallion lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys kuvien 77, 78 ja 79 vektorikartoista. Lisäksi soluille haettiin maanpinnan keskilämpötila ja geoterminen lämpövuoto kuvien 83 ja 85 rasterikartoista. Sitten kullekin solulle laskettiin ylimpien 150, 300 ja 1000 metrien keskilämpötila kaavalla (2). Lopuksi kaavalla (9) laskettiin kuinka suuri määrä lämpöenergiaa kustakin solusta saataisiin, jos kallioperän ylimpien 150, 300 ja 1000 metrien lämpötilat laskettaisiin noltaan celsiusasteeseen 50 vuoden aikana. Tulokseksi saatiin kuvien 88, 89 ja 90 rasterikartat, jotka esittävät teoreettista geoenergiapotentialia megawattitunteina vuodessa hehtaarille.



Kuva 88. Helsingin kallioperän ylimmän 150 metriin teoreettinen geoenergiapotentiali. Kartta esittää kuinka paljon yhdestä hehtaarista voitaisiin saada geoenergiaa, jos ylimpien 150 metrin lämpötila laskettaisiin noltaan celsiusasteeseen 50 vuoden aikana. Kaikkien solujen summa on 2,65 TWh/a. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



Kuva 89. Helsingin kallioperän ylimmän 300 metriin teoreettinen geoenergiapotentiaali. Kartta esittää kuinka paljon yhdestä hehtaarista voitaisiin saada geoenergiaa, jos ylimpien 300 metrin lämpötila laskettaisiin nolnaan celsiusasteeseen 50 vuoden aikana. Kaikkien solujen summa on 5,98 TWh/a. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



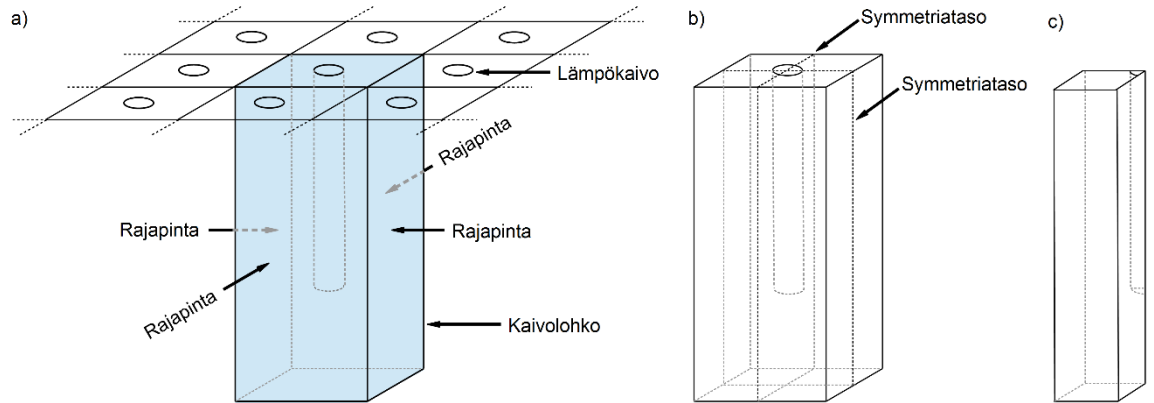
Kuva 90. Helsingin kallioperän ylimmän kilometriin teoreettinen geoenergiapotentiaali. Kartta esittää kuinka paljon yhdestä hehtaarista voitaisiin saada geoenergiaa, jos ylimpien 1000 metrin lämpötila laskettaisiin nolnaan celsiusasteeseen 50 vuoden aikana. Kaikkien solujen summa on 30,71 TWh/a. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

Jos kallioperän ylimpien 150, 300 ja 1000 metrien lämpötilat voitaisiin laskea tasaisesti nollian celsiusasteeseen 50 vuoden aikana koko Helsingin alueella, vastaisi se noin 2,65, 5,98 ja 30,71 TWh/a lämpöenergiämääriä (Helsingin vuotuinen lämpöenergian tarve on noin 7 TWh/a). Tämä ei kuitenkaan ole teknisesti mahdollista, koska lämpöä otetaan maankamarasta lämpökaivoilla, joilla ei pystytä laskemaan kalliotilavuuden lämpötilaa tasaisesti.

5.4.2 Helsingin kallioperän teknisen geoenergiapotentialin arviointi

Helsingin kallioperän tekninen potentiaali laskettiin olettamalla Helsinki yhdeksi suureksi lämpökaivokentäksi, jossa kaivojen välimatka on 20 metriä. Tämä vastaa tilannetta, jossa Helsinki on jaettu 400 m² tontteihin ja jokaisen tontin keskellä on lämpökaivo. Jokaisesta kaivosta oletettiin otettavaksi 50 vuoden ajan mahdollisimman suuri määrä energiaa laskematta kuitenkaan kaivon seinämän lämpötilaa alle nollian celsiusasteen. Tekninen potentiaali kuvaa siis sitä, miten paljon kallioperästä voidaan ottaa lämmitysenergiaa lämpökaivoilla laskematta kallion lämpötilaa jäätympisteeseen alapuolelle. Näin tehty laskenta ottaa myös huomioon lämpökaivojen keskinäisen vuorovaikutuksen.

Koska kaivoja mahtuisi Helsinkiin 20 metrin välein noin 522 000 kappaletta, voidaan kentän kooka pitää käytännössä äärettömänä. Jos tällainen kenttä on sijoitettu homogeeniseen väliaineeseen ja kentän jokaista kaivoa kuormitetaan samalla tavalla, muuttuu lämpötila jokaisen kaivon välillä symmetrisesti. Tästä syystä riittää, että laskennassa otetaan huomioon vain yksi 20 m x 20 m kaivolohko, koska lämpöä ei siirry lohkojen välisten rajapintojen läpi (kuva 91a). Lisäksi lämpötila laskee jokaisen lohkon sisällä kahden kaivoa leikkaavan pystytason suhteen symmetrisesti (kuva 91b). Näidenkään tasojen läpi ei siirry lämpöä. Näin ollen laskenta voidaan suorittaa yksinkertaistaen, ottamalla huomioon vain yhden kaivolohkon yhden neljänneksen (kuva 91c).



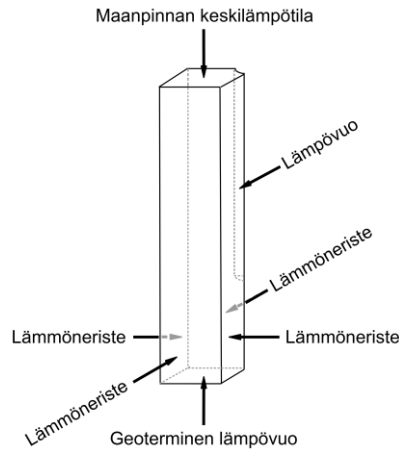
Kuva 91. Äärettömän suuren lämpökaivokentän mallintamisessa käytetyt yksinkertaistukset. (a) Koska lämpökaivokenttä on säännöllinen ja väliaine homogeeninen, lämpötila kaivojen välillä muuttuu symmetrisesti eikä lämpöä siirry kaivolohkojen rajapintojen läpi. (b) Lämpötila kaivolohkossa muuttuu symmetrisesti kahden kaivon keskipisteen läpi kulkevan pystytason suhteen, minkä takia niiden läpi ei siirry lämpöä. (c) Äärettömää kaivokenttää mallinnettaessa riittää yhden kaivolohkon yhden neljänneksen mallintaminen.

Ratkaisumenetelmäksi valittiin elementtimenetelmä, jolla ratkaistiin numeerisesti lämpöyhtälö

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \nabla^2 T, \quad (10)$$

jossa ρ [kg/m³] on kallion tiheys, C_p [J/kg·K] on kallion ominaislämpökapasiteetti, k [W/m·K] on kallion lämmönjohtavuus, T [K] on kallion lämpötila ja t [s] on aika. Elementtimallin geometria

muodostettiin kuvaamaan kaivolohkon yhtä neljänestä (kuva 91c), josta lämpökaivo on kaiverrettu pois. Kuva 92 esittää mallin geometriaa ja sen pinnoille asetettuja reunaehtoja. Lämpökaivoa mallinnettiin rajapintana, jolle asetettiin reunaehdoksi lämpövuoto, joka laskettiin vuotuisen kaivosta otettavan energiamäärän ja kuukausittaisen kulutusprofiilin avulla. Maanpintaa mallintavalle pinnalle asetettiin reunaehdoksi maanpinnan keskilämpötila ja kaivolohkon alapinnalle asetettiin reunaehdoksi geoterminen lämpövuoto. Koska kaivolohkojen välisten rajapintojen ja kahden kaivoa leikkaavan symmetriatason läpi ei siirry lämpöä, asetettiin niitä kuvaaville pinnoille reunaehdoiksi lämmöneriste (ei lämpövuotoa kyseisten pintojen läpi).

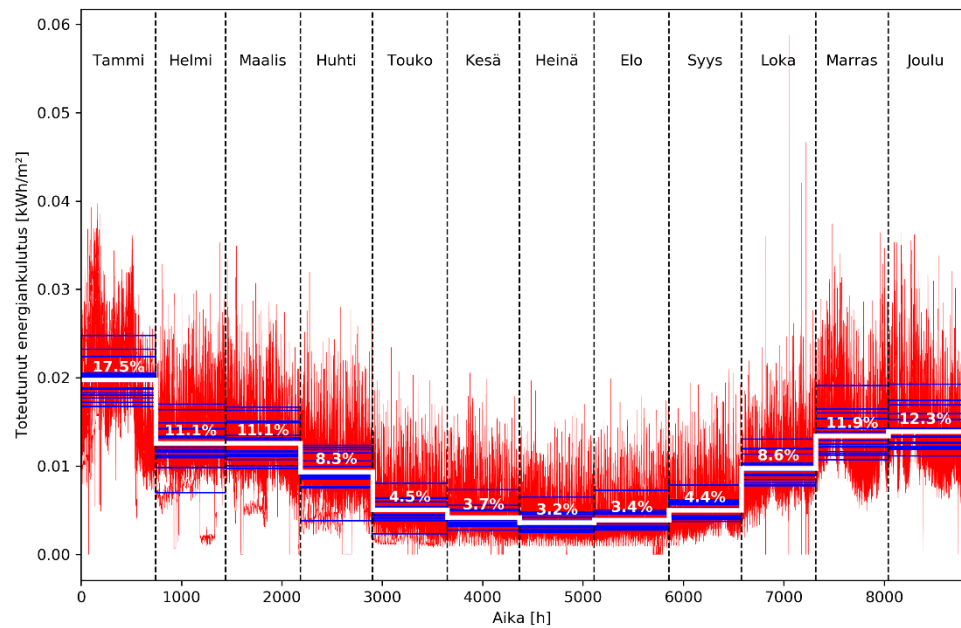


Kuva 92. Elementtimallin geometria ja reunaehdot. Maanpintaa kuvaavalle pinnalle asetettiin reunaehdoksi maanpinnan keskilämpötila ja kaivolohkon alapintaa kuvaavalle pinnalle geoterminen lämpövuoto. Kaivon seinämää kuvaavalle pinnalle asetettiin reunaehdoksi lämmöneriste riippuva lämpövuoto. Muille pystypinnoille asetettiin reunaehdoksi lämmöneriste (lämpöä ei siirry pintojen läpi).

Kuukausittainen kulutusprofiili laskettiin Helen Oy:ltä saadun aineiston perusteella. Aineisto sisälsi 16 rakennuksen toteutuneet tunnitaiset energiankulutukset vuonna 2016 (kuva 93). Ensin laskettiin kunkin 16 rakennuksen kuukausittainen energiankulutus. Sen jälkeen laskettiin jokaiselle vuoden 12 kuukaudelle keskimääräinen kulutus. Lopuksi laskettiin kulutusprofiili jakamalla kunkin kuukauden keskimääräinen kulutus koko vuoden kulutuksella. Tulokseksi saatiin kuvassa 93 esitetty profiili. Kaivon seinämälle reunaehdoksi asetettava lämpövuoto laskettiin kulutusprofiilin avulla kaavalla

$$q_i = \frac{1}{A} \cdot \frac{p_i \cdot E}{H_i}, \quad (11)$$

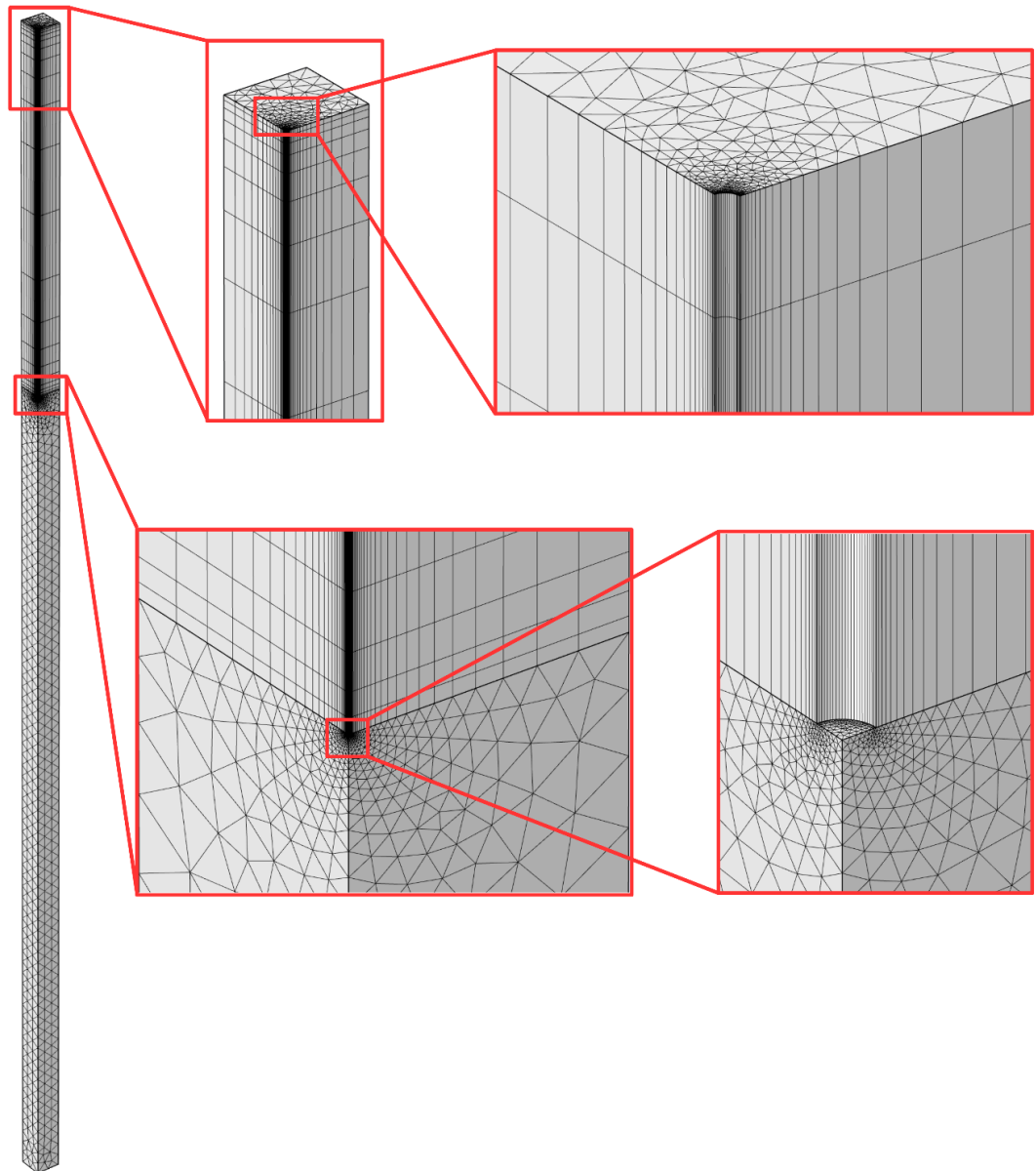
jossa q_i [W/m²] on lämpövuoto kaivon seinämän läpi kuukautena i , p_i [%] on prosenttiosuus, joka vuotuisesta energiamäärästä E [W·h] kulutetaan kuukautena i , H_i [h] on kuukauden i pituus tunteina ja A [m²] on kaivon seinämän pinta-ala.



Kuva 93. Kuukausittainen energiankulutusprofiili. Punaiset viivat esittävät Helen Oy:ltä saatujen 16 rakennuksen vuonna 2016 toteutuneita tunnitaisia energiankulutuksia kilowattitunteina neliölle. Siniset viivat esittävät kunkin rakennuksen keskimääräistä kuukausittaista kulutusta. Paksu valkoinen viiva esittää kaikkien rakennusten keskimääräistä kuukausittaista energiankulutusta kilowattitunteina neliölle. Prosenttiluvut esittävät sitä, kuinka suuri osuus vuotuisesta kokonaiskulutuksesta on keskimäärin käytetty kunkin kuukautena.

Elementtimalleja luotiin kolme kappaletta (kuva 94). Niillä mallinnettiin lämpökaivokenttiä, joissa reikäpituudet olivat 150, 300 ja 1000 metriä. Mallien alapinnat vietiin niin kauas kaivon pohjasta, jotta niillä ei ollut vaikutusta mallin ratkaisuun. Kunkin kolmen mallin tapauksessa kaivojen läpimitat olivat 140 millimetriä (5,5 tuumaa). Mallit olivat parametrisoitu siten, että niissä oli 6 muuttujaa:

1. kallion lämmönjohtavuus,
2. kallion ominaislämpökapasiteetti,
3. kallion tiheys,
4. maanpinnan keskilämpötila,
5. geoterminen lämpövujo ja
6. vuotuinen energiankulutus.

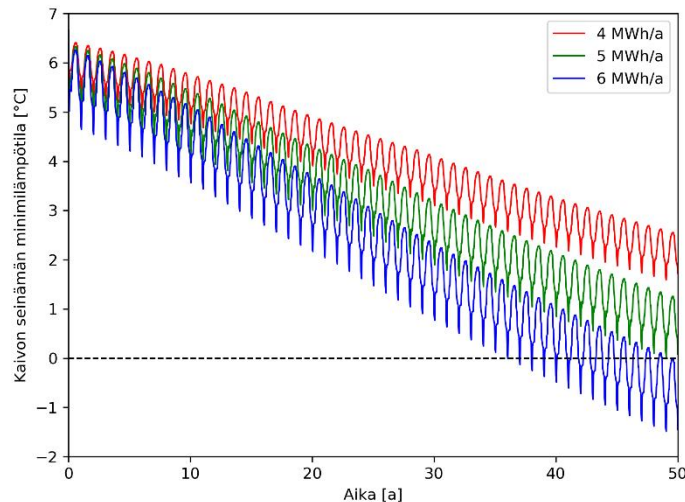


Kuva 94. Esimerkki elementtimallista. Kuvassa on esitetty 150 metriä syvää lämpökaivoa kuvaava malli ja sen elementtiverkko. Lähikuvissa on esitetty mallin yksityiskohdat tarkemmin.

Kallion lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys sekä maanpinnan keskilämpötila ja geoterminen lämpövuoto ovat paikkariippuvia muuttujia. Kun niille on mallissa asetettu arvot, voidaan vuotuiselle energiankulutukselle etsiä suurin arvo, jolla kaivon seinämän lämpötila ei mallissa vielä alita nollaa celsiusastetta (kuva 95). Etsintäalgoritmi voidaan esittää seuraavasti:

1. Asetetaan vuotuiselle energiamäärälle alkuarvaus.
2. Simuloidaan mallilla kallion lämpötiloja 50 vuotta tulevaisuuteen.
3. Lasketaan kaivon seinämän minimilämpötila simulaation viimeisenä vuotena.
 - 4a. Jos minimilämpötila on riittävällä tarkkuudella nolla celsiusastetta, on löydetty maksimaalinen energiamäärä, joka kaivosta voidaan ottaa, ja lopetetaan etsintä.
 - 4b. Jos minimilämpötila on yli nollan asteen, nostetaan kaivosta vuosittain otettavan energian määrää ja palataan kohtaan 2.
 - 4c. Jos minimilämpötila on alle nollan asteen, lasketaan kaivosta vuosittain otettavan energian määrää ja palataan kohtaan 2.

Etsintäalgoritmi tuottaa arvion yhdestä kaivosta saatavasta maksimaalisesta vuotuisesta energiamäärästä. Kun kaivojen välinen etäisyys kentässä on 20 metriä, sisältää yksi hehtaari 25 kaivoa, jotka ovat 5x5-hilamuodostelmassa. Näin ollen, yhdestä hehtaarista saatava maksimaalinen vuotuinen energiamäärä laskettiin kertomalla yhden kaivon energiamäärä 25:llä.

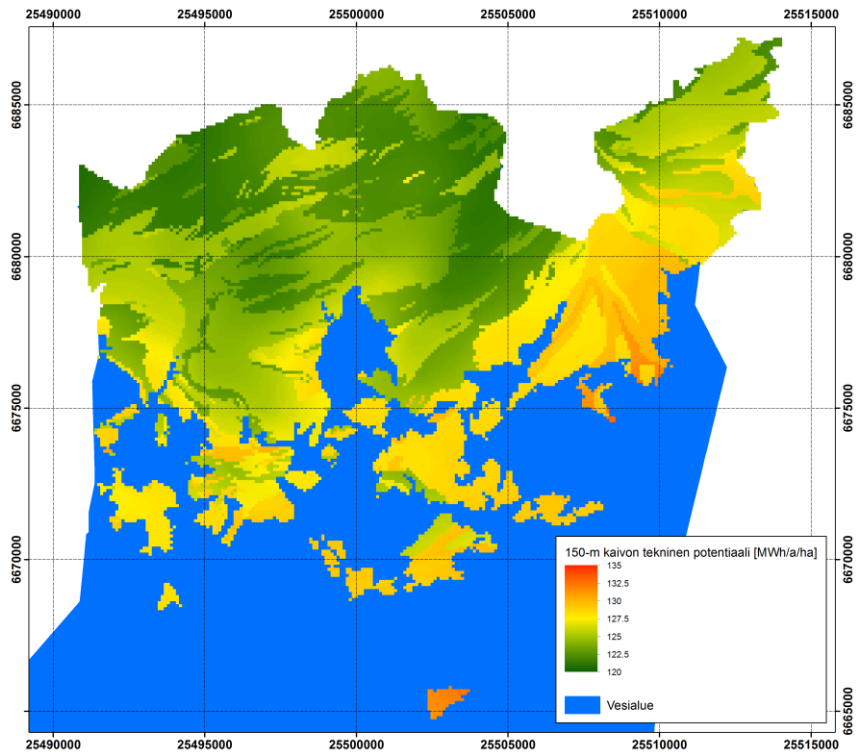


Kuva 95. Esimerkki yhdestä lämpökaivosta saatavan maksimaalisen vuotuisen energiamäärän etsimisestä. Käyrät esittävät kolmella erilaisella vuotuisella energiamäärällä simuloituja kaivon seinämän minimilämpötiloja. Simulaatiot tehtiin käyttäen 150-metriä syvän kaivon mallia. Neljä megawattituntia vuodessa voidaan ottaa turvallisesti, koska kaivon seinämän minimilämpötila on yli nollan celsiusasteen. Viisi megawattituntia vuodessa on kaivosta saatava maksimaalinen vuotuinen energiamäärä, koska kaivon seinämän minimilämpötila on tällöin noin nolla celsiusastetta. Kuusi megawattituntia vuodessa on liikaa, koska kaivon seinämän lämpötila laskee alle nollan celsiusasteen.

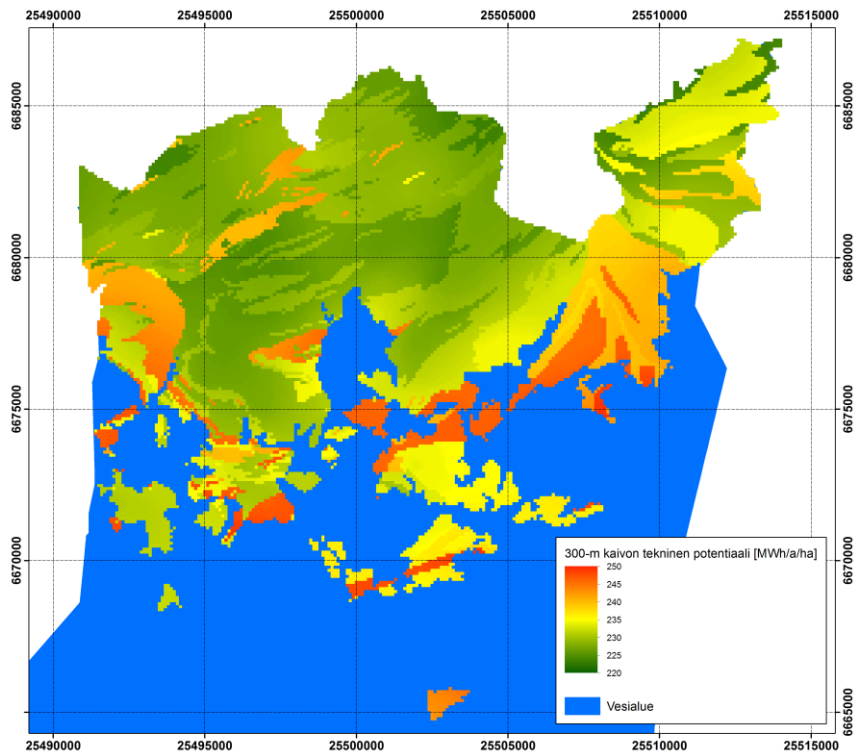
Teknisen geoenergiapotentialin karttojen laskenta aloitettiin jakamalla Helsinki säännölliseen hilaan, jonka solukoko oli 100 m x 100 m (1 hehtaari). Tämän jälkeen kullekin solulle haettiin paikkariippuvien muuttujien (edellä mainitut muuttujat 1–5) arvot kuvien 77, 78, 79, 83 ja 85 kartoista. Soluja syntyi yhteensä 20 517 kappaletta. Edellä esitetyn etsintäalgoritmin suorittaminen yhdelle solulle vei 10–30 minuuttia riippuen käytetystä mallista (150, 300 tai 1000 metriä syvän kaivon malli). Näin ollen, jos kaikille soluille olisi etsitty vuotuinen maksimaalinen energiamäärä käyttäen etsintäalgoritmia, olisi se vienyt aikaa 1–2 vuotta. Tästä syystä laskenta tehtiin kahdessa vaiheessa.

Ensimmäisessä vaiheessa valittiin satunnaisesti 392 solun joukko edellä mainitusta 20 517 solun joukosta. Tälle joukolle laskettiin maksimaaliset vuotuiset yhdestä kaivosta saatavat energiamäärät käyttämällä etsintäalgoritmia. Tämä vei aikaa noin 3 päivää kullekin kolmelle eri kaivopi-tuudelle.

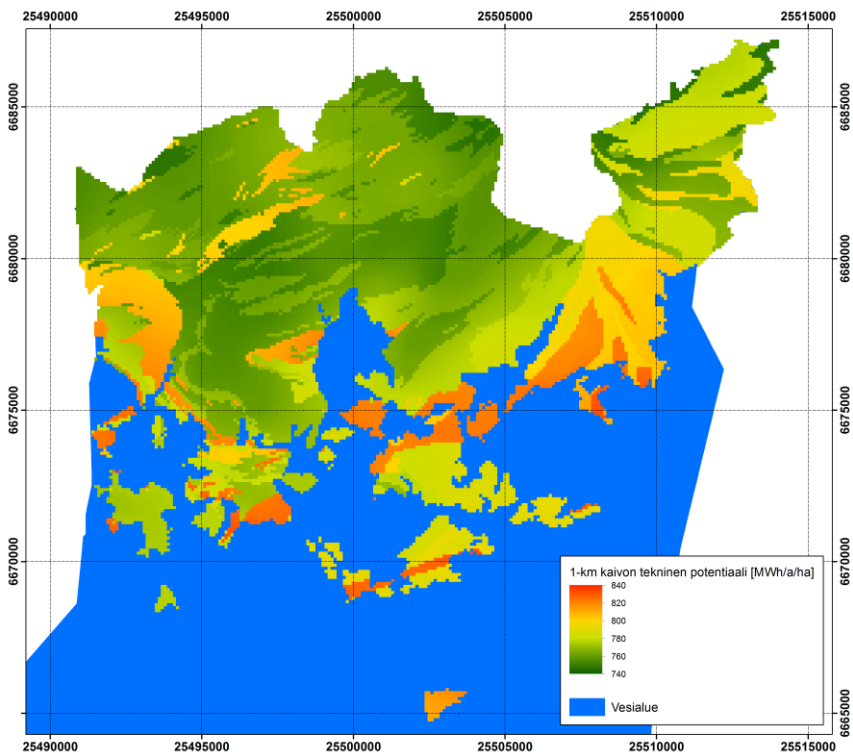
Seuraavassa vaiheessa käytettiin neuroverkkoja arvioimaan maksimaalinen vuotuinen yhdeltä hehtaarilta saatava energiamäärä koko Helsingin alueelle. Neuroverkot opetettiin ensin laskemaan yhdestä kaivosta saatavat maksimaaliset vuotuiset energiamäärät kullekin 392 satunnaisesti valitulle solulle. Tämän jälkeen neuroverkoilla laskettiin yhdestä kaivosta saatavat maksimaaliset vuotuiset energiamäärät kaikille 20 517 soluille 150, 300 ja 1000 metriä syvien kaivojen tapauksille. Lopuksi yhdestä kaivosta saatavat maksimaaliset energiamäärät kerrottiin 25:llä ja saatiin maksimaaliset yhdeltä hehtaarilta saatavat vuotuiset energiamäärät. Kuvat 96, 97 ja 98 esittävät tuloksia.



Kuva 96. Tekninen geoenergiapotentiaali 150-metriä syville lämpökaivoille. Kartta kuvaa sitä, miten paljon geoenergiaa Helsingistä voitaisiin saada maksimissaan yhdeltä hehtaarilta 50 vuoden ajan jäädyttämättä kalliota, jos Helsinki olisi yksi suuri lämpökaivokenttä. Kaikkien solujen summa on noin 2,57 TWh/a. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



Kuva 97. Tekninen geoenergiapotentiaali 300-metriä syville lämpökaivoille. Kartta kuvaa sitä, miten paljon geoenergiaa Helsingistä voitaisiin saada maksimissaan yhdeltä hehtaarilta 50 vuoden ajan jäädyttämättä kalliota, jos Helsinki olisi yksi suuri lämpökaivokenttä. Kaikkien solujen summa on noin 4,76 TWh/a. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.



Kuva 98. Tekninen geoenergiapotentiaali 1000-metriä syville lämpökaivoille. Kartta kuvaa sitä, miten paljon geoenergiaa Helsingistä voitaisiin saada maksimissaan yhdeltä hehtaarielta 50 vuoden ajan jäädyttämättä kalliota, jos Helsinki olisi yksi suuri lämpökaivokenttä. Kaikkien solujen summa on noin 15,91 TWh/a. Koordinaattijärjestelmä on ETRS-GK25FIN.

5.4.3 Tilastollinen yhteenveto geoenergiapotentiaalista pinta-alaa kohden

Taulukko 4 esittää tilastollista yhteenvetoa geoenergiapotentiaalia kuvaavista kartoista. Tulosten perusteella 150-metriä syvistä kaivoista saadaan tehokkaimmin hyödynnettyä ylimpään 150 metriin sitoutunut lämpöenergia (97 prosenttia teoreettisesta potentiaalista). Sen sijaan 300 ja 1000 metriä syvillä kaivoilla saadaan hyödynnettyä selvästi pienempi osuus ylimpiin 300 ja 1000 metriin sitoutuneista lämpöenergioista (80 ja 52 prosenttia).

Taulukko 4. Tilastollinen yhteenveto geoenergiapotentiaalikartoista. Taulukko esittää kartoissa kuvattujen geoenergiapotentiaalien minimi- ja maksimiarvot sekä keskiarvot, mediaanit ja moodit. Lisäksi taulukossa on esitetty Helsingin alueelta saatavat kokonaisenergiamäärät.

Syvyys [m]	Potentiaali	Minimi [MWh/a/ha]	Maksimi [MWh/a/ha]	Keskiarvo [MWh/a/ha]	Mediaani [MWh/a/ha]	Moodi [MWh/a/ha]	Kokonais [TWh/a]
150	Teoreettinen	121	145	129	128	128	2,65
150	Tekninen	121	133	125	125	122	2,57
300	Teoreettinen	272	332	292	290	292	5,98
300	Tekninen	223	250	232	230	234	4,76
1000	Teoreettinen	1 381	1 744	1 498	1 507	1 518	30,71
1000	Tekninen	745	833	776	768	765	15,91

Kun lämpökaivoilla otetaan maankamarasta lämpöenergiaa, korvaavaa lämpöä virtaa sekä maanpinnan kautta että kaivojen alapuolelta. Tästä syystä teoreettinen ja tekninen potentiaali eivät ole täysin vertailukelpoisia toistensa kanssa. Vertailu antaa kuitenkin viiteen siitä, että

vaikka syvemmistä kaivoista saadaan kokonaisuudessaan enemmän lämpöenergiaa, niin lyhemmillä kaivoilla saadaan maankamaraan sitoutunut lämpöenergia tehokkaammin käyttöön. Tämä johtuu siitä, että lyhemmillä kaivoilla voidaan laskea maankamaraan lämpötilaa tasaisemmin kuin pitkillä kaivoilla. Kaivojen pituudella ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta metriä kohden saataviin vuotuisiin energiamääriin (taulukko 5).

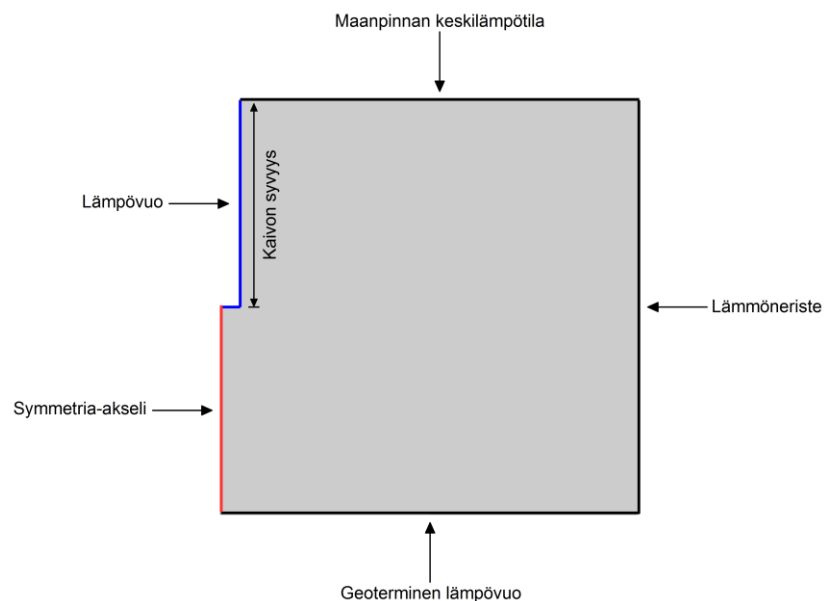
Taulukko 5. Tilastollinen yhteenveto teknisen geoenergiapotentiaalin avulla lasketuista metriä kohden saatavista vuotuisista energiamääristä.

Kaivojen syvyys [m]	Minimi [kWh/m/a]	Maksimi [kWh/m/a]	Keskiarvo [kWh/m/a]	Mediaani [kWh/m/a]	Moodi [kWh/m/a]
150	32	35	33	33	33
300	30	33	31	31	31
1000	30	33	31	31	31

5.5 Yksittäisen kaivon geoenergiapotentiaali

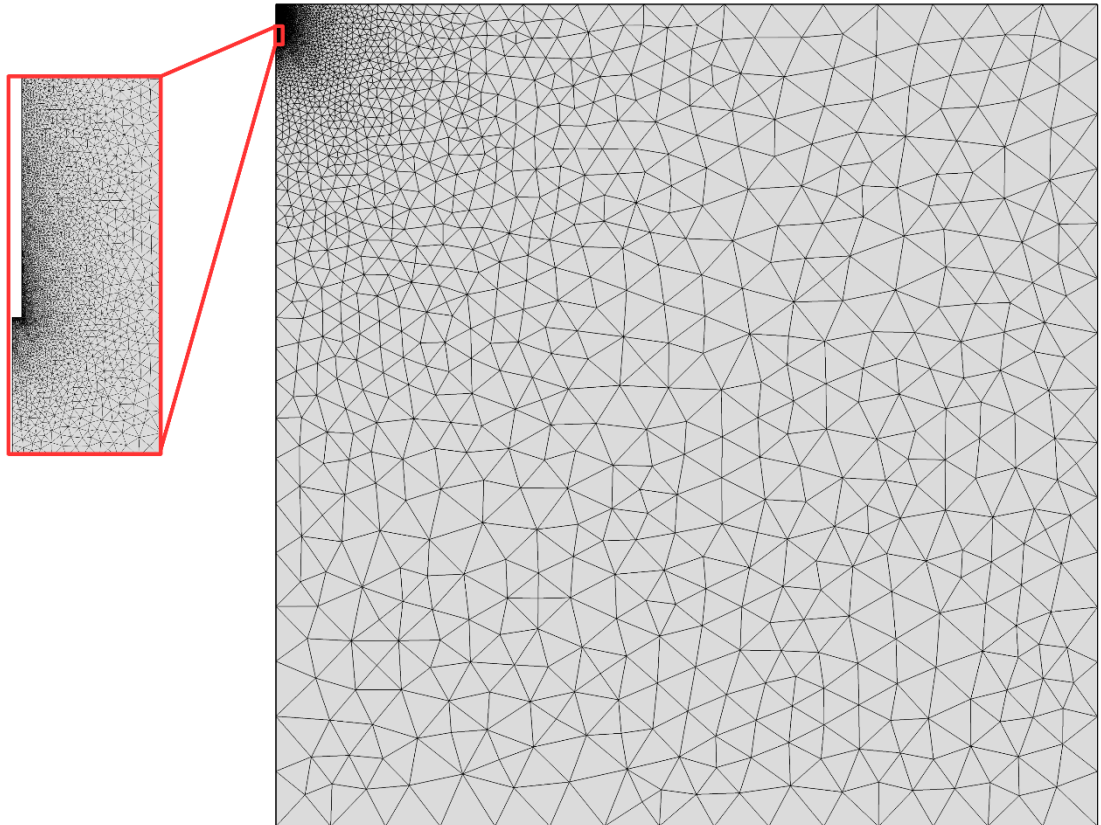
Edellä esitetty tekninen geoenergiapotentiaali kuvaa suuren lämpökaivokentän geoenergiapotentiaalia ja ottaa huomioon kentässä olevien kaivojen välisen vuorovaikutuksen. Seuraavassa tarkastellaan yksittäisen kaivon geoenergiapotentiaalia tapauksessa, jossa lähistöllä ei ole vuorovaikuttavia kaivoja.

Ratkaisumenetelmäksi valittiin jälleen elementtimenetelmä, jolla ratkaistiin yhtälö (10). Yksittäisen kaivon tapaus on aksiaalisymmetrinen, joten kaivoa mallinnettiin nyt kaksiulotteisessa geometriassa, jossa yksi mallin reuna toimii pyörähdysakselina. Kuva 99 esittää mallin geometriaa ja sen reunoille asetettuja reunaehtoja. Mallin vasen reuna toimii symmetria-akselina. Lämpökaivoa mallinnettiin reunana, jolle asetettiin reunaehdoksi lämpövuoto, joka laskettiin kaavalla (11). Mallin yläreunalle asetettiin reunaehdoksi maanpinnan keskilämpötila ja alareunalle geoterminen lämpövuoto. Mallin oikealle reunalle asetettiin reunaehdoksi lämmöneriste (lämpöä ei virtaa malliin eikä siitä pois) ja reuna vietiin riittävän kauas symmetria-akselista, jotta se ei vaikuttanut ratkaisuun.



Kuva 99. Yksittäisen lämpökaivon mallin geometria. Malli on kaksiulotteinen ja aksiaalisymmetrinen.

Elementtimalleja luotiin kolme kappaletta (kuva 100). Niillä mallinnettiin 150, 300 ja 1000 metriä syviä kaivoja, joiden läpimitat olivat 140 millimetriä. Mallit olivat parametrisoitu samalla tavalla kuin teknisen geoenergiapotentiaalin laskemisessa käytetyt mallit, joten niissä oli samat 6 muuttujaa.



Kuva 100. Esimerkki aksiaalisymmetrisestä elementtimallista. Kuvassa on esitetty 150 metriä syvää lämpökaivoa kuvaava malli ja sen elementtiverkotos. Lähikuvassa on esitetty tarkemmin lämpökaivoa mallintava reuna.

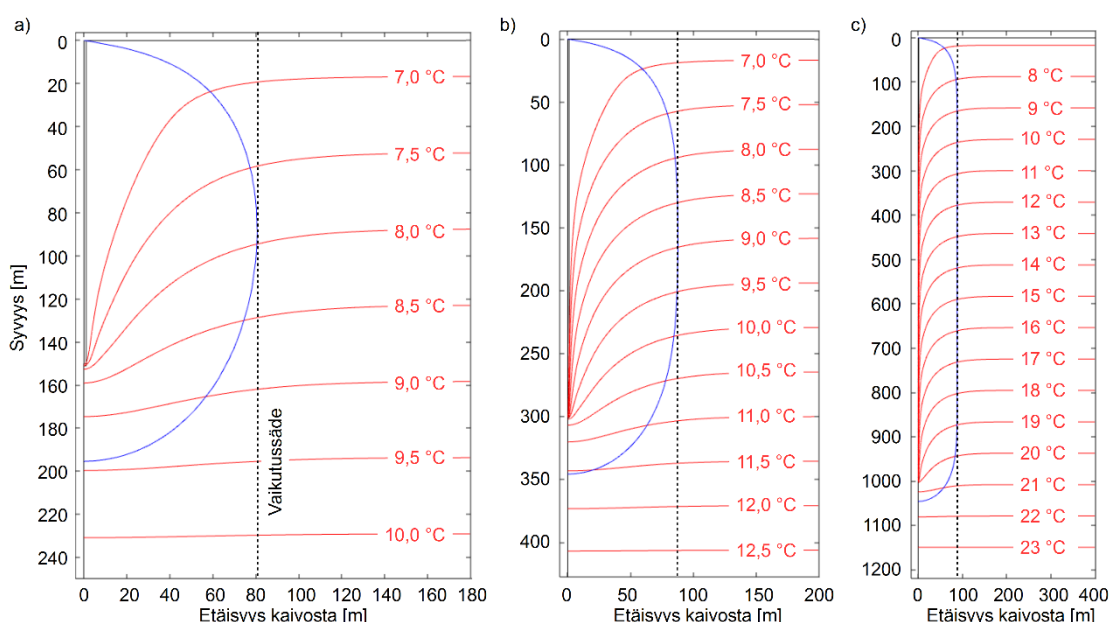
Kallion lämmönjohtavuudelle, ominaislämpökapasiteetille ja tiheydelle sekä maanpinnan keskilämpötilalle ja geotermiselle lämpövuolle asetettiin malleissa taulukon 3 yleisimmät Helsingin arvot (moodit). Tämän jälkeen etsittiin maksimaalinen vuotuinen energiamäärä, joka kaivoista voidaan ottaa laskematta kaivon seinämän lämpötilaa alle nollan celsiusasteen, käyttämällä aiemmin kuvattua etsintäalgoritmia. Laskut tehtiin vertailun vuoksi myös vastaavilla teknisen geoenergiapotentiaalin laskemiseksi käytetyillä malleilla asettaen muuttujille samat arvot kuin yksittäisten kaivojen tapauksissa. Taulukko 6 esittää simulaatioiden perusteella laskettuja tuloksia.

Taulukko 6. Yksittäisestä lämpökaivosta saatava maksimaalinen vuotuinen geoenergia. Suluissa on esitetty vastaava yhdestä kaivokentän kaivosta saatava maksimaalinen vuotuinen geoenergia.

Kaivon syvyys [m]	Yksittäisestä lämpökaivosta saatava geoenergia [MWh/a]	Yksittäisestä lämpökaivosta saatava geoenergia metriä kohden [kWh/m/a]
150	16.25 (4.87)	108 (32)
300	32.70 (9.14)	109 (30)
1000	109.00 (30.52)	109 (31)

Tulokset osoittavat sen, että yksittäisestä lämpökaivosta voidaan saada merkittävästi enemmän geoenergiaa kuin kaivokentän yhdestä kaivosta. Tämä johtuu siitä, että yksittäisellä kaivolla voidaan ottaa energiaa mielivaltaisen suuresta kalliotilavuudesta. Sen sijaan kaivokentän yksi kaivo ottaa energiaa vain yhden kaivolohkon tilavuudesta.

Yksittäisen kaivon vaikutus kallion lämpötilaan ulottuu 150-metriä syvän kaivon tapauksessa noin 81 metrin etäisyydelle kaivosta lämmönoton 50. vuotena, kun vaikutuksen rajana-arvona pidetään 0,1 kelvinin muutosta häiriintymättömään tilaan verrattuna (kuva 101a). Vastaavasti 300- ja 1000-metriä syvien kaivojen tapauksissa lämmönoton vaikutus kallion lämpötilaan ulottuu 88 metrin etäisyydelle kaivosta 50. vuotena (kuvat 101b ja 101c). Näin ollen, jos kaivojen ei haluta vaikuttavan toisiinsa, tulee niiden olla vähintään 162 metrin päässä toisistaan 150-metriä syvien kaivojen tapauksessa ja 176 metrin päässä 300- ja 1000-metriä syvien kaivojen tapauksessa.



Kuva 101. Yksittäisen kaivon vaikutussäde. Punaiset käyrät esittävät maankamaran lämpötilan tasa-arvokäyriä ja sininen käyrä esittää kaivon aiheuttaman lämpötilamuutoksen etäisyyttä 50 vuoden kuluttua lämmönoton aloittamisesta. Sinisen viivan esittämän alueen sisäpuolella lämpötila on laskenut lämmönoton vaikutuksesta enemmän kuin 0,1 °C. Musta katkoviiva esittää vaikutussädettä. (a) 150-metriä, (b) 300-metriä ja (c) 1000-metriä syvän kaivon tapaus.

Jos Helsinkiin tehtäisiin koko sen maa-alueen kattava lämpökaivokenttä poraamalla Helsinki täyteen toisiinsa vaikuttamattomia lämpökaivoja, mahtuisi kenttään 7 970 kpl 150-metriä syviä kaivoja. Kentästä saataisiin maksimissaan 0,13 TWh/a geoenergiaa 50 vuoden ajan. Vastaavasti, jos kentän kaivot olisivat 300- tai 1000-metriä syviä kaivoja, mahtuisi kenttään 6 747 kpl tällaisia kaivoja. Kolmesataa metriä syvien kaivojen kentästä saataisiin maksimissaan 0,22 TWh/a ja yhden kilometrin syvyisten kaivojen kentästä 0,74 TWh/a geoenergiaa 50 vuoden ajan.

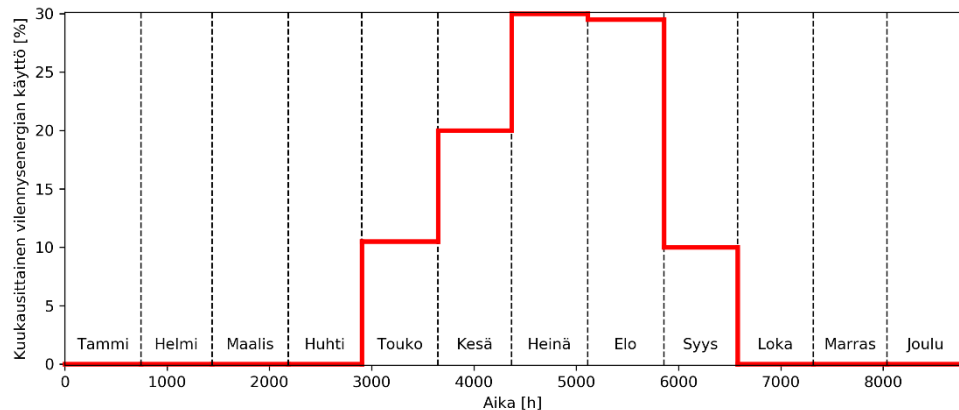
5.6 Jäähdytyksen vaikutus

Kalliolämpöjärjestelmiä voidaan käyttää myös rakennusten huoneilman viilennykseen. Tällöin huoneilmasta kerätty hukkalämpö siirretään lämpökaivoa ympäröivään kallioon. Viilennyksellä voidaan parantaa kalliolämpöjärjestelmän toimintaa tai pidentää sen ikää, koska kallioon siirretty lämpö on uudelleenkäytettävissä lämmitykseen.

Viilennyksen vaikutusta lämmönottoon simuloitiin teknisen geoenergiapotentialin laskemiseksi käytetyillä malleilla. Kaivojen seinämille reunaehdoksi asetettavat lämpövuot laskettiin näissä tapauksissa kaavan (11) sijaan kaavalla

$$q_i = \frac{1}{A} \cdot \frac{p_i \cdot E_{\text{lämmitys}} - P_i \cdot E_{\text{viilennys}}}{H_i}, \quad (12)$$

jossa q_i [W/m²] on lämpövuoto kaivon seinämän läpi kuukautena i , p_i [%] on prosenttiosuus, joka vuotuisesta lämmitystarpeesta $E_{\text{lämmitys}}$ [W·h] kulutetaan kuukautena i , ja P_i [%] on prosenttiosuus, joka vuotuisesta viilennystarpeesta $E_{\text{viilennys}}$ [W·h] kulutetaan kuukautena i , H_i [h] on kuukauden i pituus tunteina ja A [m²] on kaivon seinämän pinta-ala. Lämmitysenergian kulutusprofiili oletettiin kuvan 93 mukaiseksi ja viilennysenergian kulutusprofiili kuvan 102 mukaiseksi.



Kuva 102. Viilennysenergian kulutusprofiili. Profiili kertoo kuinka monta prosenttia vuotuisesta viilennysenergian tarpeesta käytetään kunakin kuukautena.

Ensin tarkasteltiin sitä, kuinka paljon enemmän lämmitysenergiaa maankamarasta voitaisiin ottaa, jos viilennys olisi osa kalliolämpöjärjestelmän toimintaa. Kallion lämmönjohtavuudelle, ominaislämpökapasiteetille ja tiheydelle sekä maanpinnan keskilämpötilalle ja geotermiselle lämpövuolle asetettiin malleissa taulukon 3 yleisimmät Helsingin arvot (moodit). Tämän jälkeen etsittiin maksimaalinen vuotuinen hehtaarilta saatava energiamäärä, käyttämällä aiemmin kuvattua haualgoritmia, kun malleissa lämpökaivon reunaehto on asetettu kaavan (12) mukaiseksi. Taulukko 7 esittää simulaatioiden perusteella laskettuja tuloksia. Tulokset osoittavat sen, että jos kalliota ladataan lämpimänä vuodenaikana huoneilmasta kerätyllä lämmöllä, on noin 80 prosenttia ladatusta lämmöstä käytettävissä lämmitykseen kylmänä vuodenaikana. Noin 20 prosenttia ladatusta viilennysenergiasta kuluu maankamarassa tapahtuviin lämpöhäviöihin.

Taulukko 7. Viilennyksen vaikutus kalliolämpöjärjestelmän lämmönottoon.

Kaivojen syvyys [m]	Viilennysenergian määrä prosentteina lämmitysenergiasta	Yhdeltä hehtaarilta saatavan geenergian määrä [MWh/a/ha]	Kallioon ladatun viilennysenergian määrä [MWh/a/ha]	Viilennyksen aikaansaama parannus [MWh/a/ha]	Prosenttiosuus, joka ladatusta viilennysenergiasta saadaan uudelleen lämmityskäyttöön
150	10	132	13	10	77
150	20	145	29	23	78
150	30	160	48	38	80
150	40	179	72	57	80
150	50	203	101	81	80
300	10	248	25	20	79
300	20	272	54	44	81
300	30	301	90	73	80
300	40	340	136	111	82
300	50	386	193	158	82
1000	10	829	83	67	80
1000	20	909	182	148	81
1000	30	1006	302	244	81
1000	40	1134	454	372	82
1000	50	1289	644	527	82

Lopuksi tarkasteltiin edellä käytettyjen mallien avulla sitä, minkälainen vaikutus viilennyksellä olisi kalliolämpöjärjestelmän elinkaareen. Tässä elinkaarella tarkoitetaan sitä, miten kauan lämpötila kaivoa ympärivässä kalliossa pysyy niin korkealla tasolla, että järjestelmän toimintakyky ei vaarannu (eli kaivojen seinämien lämpötilat eivät laske alle nollan celsiusasteen). Laskuissa lämmitystarpeeksi valittiin se, mitä yhdeltä hehtaarilta voidaan maksimissaan ottaa ilman viilennystä (taulukon 4 yleisimmät arvot eli moodit). Taulukko 8 esittää simulaatioiden perusteella laskettuja tuloksia. Tulokset osoittavat, että viilennyksellä on huomattava vaikutus elinkaareen (olettaen, että lämmönoton määrää ei nosteta).

Taulukko 8. Viilennyksen vaikutus kalliolämpöjärjestelmän elinkaaren pituuteen.

Kaivojen syvyys [m]	Viilennysenergian määrä prosentteina lämmitysenergiasta	Elinkaaren pituus viilennyksen ollessa osa järjestelmää [a]	Viilennyksen aikaansaama elinkaaren pidennys [a]	Viilennyksen aikaansaama elinkaaren pidennys prosentteina
150	10	56	6	12
150	20	68	18	36
150	30	84	34	68
150	40	111	61	122
150	50	162	112	224
300	10	55	5	10
300	20	63	13	26
300	30	73	23	46
300	40	89	39	78
300	50	111	61	122
1000	10	55	5	10
1000	20	63	13	26
1000	30	73	23	46
1000	40	88	38	76
1000	50	109	59	118

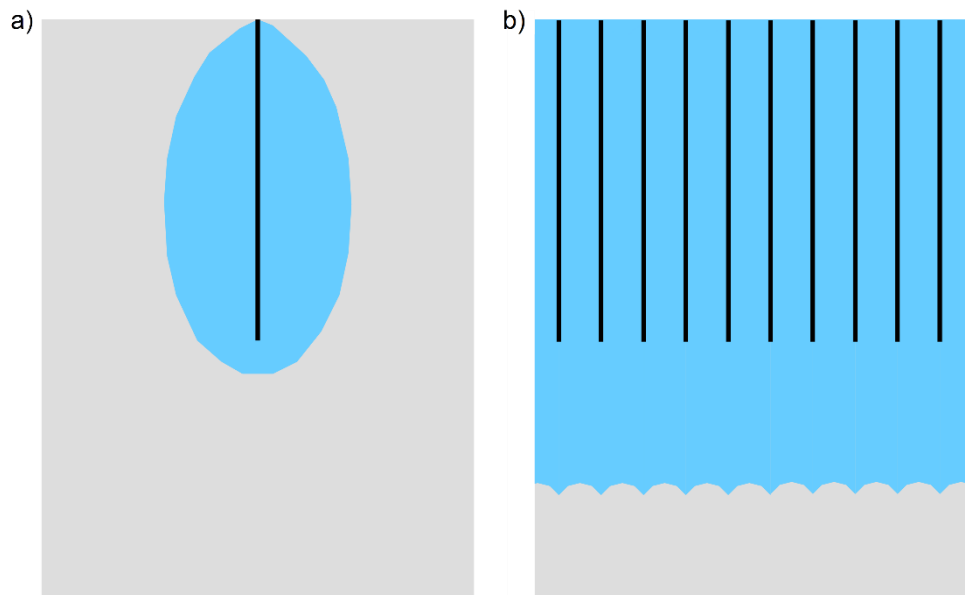
Systemaattisesti tilastoitua tietoa eri rakennustyyppien viilennysenergian kulutuksesta ei ole saatavilla, mutta tietoa löytyy joistakin yksittäisistä erityyppisistä kohteista. Esimerkiksi Ruotsissa erityyppisissä geenergiakohteissa viilennysenergian prosentuaalinen osuus lämmitysenergian tarpeesta vaihtelee paristakymmenestä prosentista aina sataan prosenttiin (Offentliga fastigheter,

2017). Suomen vuoden 2010 rakennusmääräysten mukaiselle normipientalolle viilennysenergian prosentuaalinen osuus lämmitysenergian tarpeesta on arviolta noin 25 prosenttia (Lappi, 2013). Lisäksi Suomessa leveysasteella on huomattava vaikutus viilennystarpeeseen. Jos kalliota ladataan lämpimänä vuodenaikana sellaisella viilennysenergian määrällä, joka vastaa 25:ttä prosenttia vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta, voidaan kalliolämpöjärjestelmän elinkaarta pidentää noin 24:llä vuodella 150-metriä syvien kaivojen tapauksessa. Sen sijaan, 300- ja 1000-metriä syvien kaivojen tapauksessa elinkaari pitenee noin 17 vuotta, kun kalliota ladataan energiamäärällä, joka vastaa 25:ttä prosenttia vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta.

6 Yhteenveto

Geoterminen energia on maankamaraan varastoitunutta ja siinä syntyvää lämpöenergiaa. Maankamaraan pintaosien (0–1 km) geoenergia on matalien lämpötilojen geotermistä energiaa. Maankamaraan pintaosien geoenergiaa hyödynnetään lämmöntuottoon maalämpöpumppujen avulla. Vaikka maan pintaosien lämpötilatasot ovatkin matalia verrattuna syvemmillä maankuoressa oleviin lämpötilatasoihin, on pintaosien geoenergiavaranto lämmitysenergian hyödyntämisen kannalta niin suuri, että sillä voitaisiin teoriassa kattaa esimerkiksi Helsingin lämmitystarve (noin 7 TWh/a) useiden vuosikymmenien ajan. Tämä tosin edellyttäisi sitä, että Helsingin koko maapinta-ala olisi porattu täyteen yli 300 metriä syviä maalämpökaivoja 20 metrin välein.

Geoenergian hyödyntäminen kallioperästä tapahtuu kalliolämpöjärjestelmien avulla. Ne koostuvat maalämpöpumpusta, lämpökaivoista ja rakennuksen sisäisestä järjestelmästä. Kalliolämpöjärjestelmä ottaa lämpöä kalliosta lämpökaivon avulla. Tämä asettaa haasteita geoenergiavarantojen tehokkaalle hyödyntämiselle. Lämpökaivo on kallioon pystysuoraan porattu reikä ja se ottaa lämpöä vain porareian seinämän läpi, mistä syystä kallioperän lämpövaranto saadaan hyödynnettyä tehokkaimmin kaivon välittömästä ympäristöstä. Näin ollen, yksittäinen lämpökaivo on tehottomin lämmönoton tapa, jos kallioperän geoenergiavarantoa halutaan hyödyntää maksimaalisesti. Sen sijaan, lämpökaivokenttä, jossa kaivoja on tasaisin välimatkoin, on huomattavasti tehokkaampi tapa, koska kaivokentän avulla lämmönotto tapahtuu tasaisemmin hyödynnettävän lämpövarannon tilavuudesta (kuva 103). Tosin yksittäisestä lämpökaivosta saatava geoenergia metriä kohden on noin kolme kertaa suurempi kuin kaivokentän yksittäisestä kaivosta saatava geoenergia.



Kuva 103. Lämmönoton laajuus yksittäisen lämpökaivon ja lämpökaivokentän tapauksessa. Kuva esittää esimerkinomaisesti sitä, miten laajalta alueelta (a) yksittäinen lämpökaivo ja (b) suuri lämpökaivokenttä ottavat lämpöä. Mustat viivat esittävät lämpökaivoja. Sininen väri esittää sitä osaa kalliosta, josta lämpöä on otettu ja jonka lämpötila on siitä syystä laskenut. Harmaa väri esittää sitä osaa kalliosta, josta lämpöä ei ole saatu otettua eikä lämpötila sen takia ole laskenut.

Lämpökaivojen ja lämpökaivokenttien käypä mitoitus vaatii tietoa paikallisesta termogeologiasta ja ilmastosta. Tarpeellisia tietoja ovat muun muassa maanpinnan lämpötila, kallion lämmönjohtavuus, kallion lämpökapasiteetti ja geotermisen lämpövuon tiheys. Tämän raportin ensimmäisen osan tulosten ja olemassa olevien aineistojen perusteella laadittiin kartta-aineistot, jotka kuvaavat mitoittamiseen vaikuttavia parametrejä Helsingin alueella. Lisäksi laadittiin kartta-aineisto maapinnan paksuudesta, koska se vaikuttaa lämpökaivojen rakennettavuuteen ja rakennuskustannuksiin. Laaditut aineistot antavat tutkittuun tietoon perustuvan pohjan kalliolämpöjärjestelmien käyvälle mitoitukselle.

Raportin tarkoituksena oli arvioida Helsingin alueen geoenergiapotentiaalia. Mitoitusparametrikarttoihin perustuen luotiin kaksi karttasarjaa, jotka kuvaavat geoenergiapotentiaalia kahdesta eri näkökulmasta. Teoreettisen geoenergiapotentiaalnin kartat kuvaavat sitä, kuinka paljon kunkin Helsingin hehtaarin ylämpiin 150, 300 ja 1000 metriin sitoutuneesta lämpöenergiasta voitaisiin ottaa vuosittain 50 vuoden ajan. Teknisen geoenergiapotentiaalnin kartat kuvaavat sitä, kuinka paljon kultakin Helsingin hehtaarilta voitaisiin ottaa puhdasta geoenergiaa 50 vuoden ajan, jos Helsinki olisi yksi suuri lämpökaivokenttä, jossa kaivojen etäisyys toisistaan on 20-metriä ja kaivot ovat 150-, 300- tai 1000-metriä syviä. Teoreettisen geoenergiapotentiaalnin laskuissa ei siis ole huomioitu lämmönoton teknistä toteutusta lämpökaivoilla kun taas teknisen geoenergiapotentiaalnin laskuissa se on huomioitu yksinkertaistettuna.

Taulukko 9 esittää yhteenvetona geoenergiapotentiaalnikartoista. Tulosten perusteella Helsingin alueen kallioperään on sitoutunut niin paljon lämpöenergiaa, että Helsingin vuotuinen lämmitystarve voitaisiin kattaa 50 vuoden ajaksi, jos Helsinkiin tehtäisiin sen maa-alueen kattava lämpökaivokenttä, jossa kaivojen syvyydet olisivat 300- tai 1000-metriä.

Taulukko 9. Yhteenveto geoenergiapotentiaalnikartoista. Taulukko esittää kolmeen eri syvyysväliin sitoutuneiden lämpöenergioiden määrät sekä niiltä lämpökaivoilla hyödynnettävissä olevien geoenergioiden määrät ja lämpöpumpuilta saatavien lämmitysenergioiden määrät. Esitetyt luvut ovat karttojen yleisimpiä arvoja (moodi). Lämpöpumpuilta saatavat lämmitysenergiat ovat laskettu sillä oletuksella, että lämpöpumpun lämpökerroin on 3. Suluissa esitetyt luvut ilmaisevat energian kokonaismääriä (karttojen kaikkien solujen summia).

Syvyysväli [m]	Kallioperään sitoutunut lämpöenergia	Lämpökaivoilla hyödynnettävä geoenergia	Lämpöpumpuilta saatava lämmitysenergia
0–150	128 MWh/a/ha (2.65 TWh/a)	122 MWh/a/ha (2.57 TWh/a)	183 MWh/a/ha (3.86 TWh/a)
0–300	292 MWh/a/ha (5.98 TWh/a)	234 MWh/a/ha (4.76 TWh/a)	351 MWh/a/ha (7.14 TWh/a)
0–1000	1518 MWh/a/ha (30.71 TWh/a)	765 MWh/a/ha (15.91 TWh/a)	1148 MWh/a/ha (23.87 TWh/a)

Tuloksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon, että laskut tehtiin käyttäen yksinkertaistettuja teoreettisia malleja. Mallintaminen on kuitenkin ainoa lähestymistapa, jolla geoenergiapotentiaalia voidaan arvioida näin suuressa mittakaavassa. Suurin epävarmuus tehdyissä laskuissa on se, että saarten ja rannikkoalueiden kallioperän lämpötilaprofiilia ei tunneta. Tästä johtuen tulokset ovat näillä alueilla epäluotettavimmat. Karttoja varten tehdyissä laskuissa ei myöskään otettu huomioon horisontaalista lämmönsiirtoa kaivolohkojen välillä, mikä saattaa olla merkittävässä roolissa nimenomaan saarilla ja rannikkoalueilla. Näistä seikoista johtuen tulosten epäluotettavuus on suurin näillä alueilla. Laskuissa ei myöskään huomioitu ilmastomuutosta tai urbaania lämpöä. Ilmakehän nouseva lämpötila, asvaltoituneet kaupunkialueet ja rakennuksista maahan vuotava lämpö nostavat maankamaraan lämpötilaa. Maankamaraan kohonnut lämpötila vaikuttaa geoenergiapotentiaalia kasvattavasti (esim. Rivera et al., 2017). Tulokset antavat kuitenkin arvion minimigeoenergiapotentiaalista.

Lisäksi lämpökaivokentästä tehtävää lämmönottoa verrattiin yksittäisestä lämpökaivosta tehtävään lämmönottoon. Yksittäisellä lämpökaivolla tarkoitetaan tässä kaivoa, jonka lähistöllä ei ole muita kaivoja, jotka kuluttaisivat samaa geoenergiavarantoa. Tulosten perusteella yksittäisestä 150-, 300- tai 1000-metriä syvästä kaivosta voidaan ottaa noin kolminkertainen määrä lämpöä verrattuna yhdestä lämpökaivokentän kaivosta saatavan lämmön määrään. Yksittäiset kaivot ovat kuitenkin tehoton tapa hyödyntää geoenergiavarantoa. Toisiinsa vaikuttamattomien 150-metriä syvien kaivojen välimatkan tulisi olla vähintään 162 metriä. Samoin toisiinsa vaikuttamattomien 300- tai 1000-metriä syvien kaivojen välimatkan tulisi olla vähintään 176 metriä. Näin ollen, Helsinkiin mahtuisi vain noin 7 000 toisiinsa vaikuttamattomia 150-metriä syviä kaivoja tai noin 8 000 kpl toisiinsa vaikuttamattomia 300- tai 1000-metriä syviä kaivoja. Toisiinsa vaikuttamattomilla kaivoilla voitaisiin siis kattaa maksimissaan vain noin 3–11 prosenttia Helsingin vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta.

Lopuksi tarkasteltiin sitä, miten viilennyksen huomioiminen vaikuttaisi kalliolämpöjärjestelmän toimintaan. Viilennettäessä huoneilmaa kalliolämpöjärjestelmällä, kallioon ladataan huoneilmasta kerättyä hukkalämpöä eli lämmitetään kalliota. Tulosten perusteella viilennyksen määrään verrannollinen määrä lämpöenergiaa on myöhempänä ajankohtana käytettävissä lämmitykseen eli kalliolämpöjärjestelmällä voidaan tässä tapauksessa siis kattaa suurempi lämmitystarve. Jos taas lämmönottoa ei nosteta viilennysenergian määrällä, voidaan viilennyksellä pidentää kalliolämpöjärjestelmän elinkaarta. Jos vuotuinen viilennysenergian määrä on 25 prosenttia vuotuisesta lämmitystarpeesta, voidaan kalliolämpöjärjestelmän elinkaarta pidentää noin 17–24 vuodella.

7 Lähdeluettelo

Blackwell, D.D., Negraru, P.T., and Richards, M.C., 2007. Assessment of the Enhanced Geothermal System Resource Base of the United States. *Natural Resources Research*, Vol. 15, pp. 283–308.

Clauser, C., and Huenges, E., 1995. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. In: Ahrens, T.J. (ed.), *AGU Reference Shelf 3: Rock Physics and Phase Relations – A Handbook of Physical Constants*, American Geophysical Union, Washington DC, pp. 105–126.

Eppelbaum, L., Kutasov, I., and Pilchin, A., 2014. *Applied Geothermics*. Springer, London, 751 p.

Helsingin kaupunki, maa- ja kallioperäyksikkö GEO, 2017. Pohjois-Pasilan geoenergiapotentialin selvitysraportti.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, 2011. Östersundomin liitosalueiden kallioperäkartoitusten työraportti.

Hytönen, K., 1999. Suomen mineraalit. *Geologian tutkimuskeskus, Erikoisjulkaisu 31*, 399 s.

Kukkonen, I.T., 1987. Vertical variation of apparent and palaeoclimatically corrected heat flow densities in the central Baltic Shield. *Journal of Geodynamics*, Vol. 8, pp. 33–53.

Kukkonen, I.T., 1989. Terrestrial heat flow and radiogenic heat production in Finland, the central Baltic Shield. *Tectonophysics*, Vol. 164, pp. 219–230.

Kukkonen, I.T., 1993. Heat flow map of northern and central parts of the Fennoscandian Shield based on geochemical surveys of heat producing elements. *Tectonophysics*, Vol. 225, pp. 3–13.

Kukkonen, I., 2002. National geothermal resource assessments – Finland. In: Hurter, S.J., and Haenel, R. (eds.), *Atlas of Geothermal Resources in Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Laitala, M., 1991. Helsingin kartta-alueen kallioperä. Suomen geologinen kartta 1:100 000, Kallioperäkarttojen selitykset, Lehti 2034, *Geologian tutkimuskeskus, Espoo*, 47 s.

Lappi, J., 2013. Maalämpöpumpun lämmönkeräysjärjestelmän kehittäminen pientalokohteessa ja maalämpöjärjestelmien teknistaloudellinen vertailu. *Opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu*, 189 s.

Motiva, 2012. Lämpöä omasta maasta. *Lämmitysjärjestelmät, Maalämpöpumput*, Motiva Oy, Helsinki, 14 s.

Offentliga fastigheter, 2017. *Geoenergiaopas*. Rototec Oy, 90 s.

Ohmura, A., and Raschke, E., 2005: Energy Budget at the Earth's Surface. In: Hantel, M. (ed.), *Observed Global Climate. Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology – New Series*, Vol. 6, Springer, Berlin Heidelberg, New York.

Peltoniemi, S., ja Kukkonen, I., 1995. Kivilajien lämmönjohtavuus Suomessa: yhteenveto mitauksista 1964–1994. *Geologian tutkimuskeskus, Arkistoraportti Q18/95/1*, 14 s.

Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J.-P., Karlsson, P., ja Ruuhela, R., 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. *Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1*, 83 s.

Rivera, J.A., Blum, P., and Bayer, P., 2017. Increased ground temperatures in urban areas: Estimation of the technical geothermal potential. *Renewable Energy*, Vol. 103, pp. 388–400.

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., and Kiehl, J., 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 90, pp. 311–324.

Liitteet

Liite 1: Laboratoriomittausten tulokset

Taulukko 10. Laboratoriomittausten tulokset. Koordinaatit (x ja y) ovat ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa. Mitatut suureet ovat lämmönjohtavuus (k), ominaislämpökapasiteetti (C_p) ja tiheys (ρ).

Näytetunnus	x [m]	y [m]	Kivilaji	k [W/m·K]	C_p [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
TIN\$-2018-1	25493212	6670277	Graniitti	3,07	724	2653
TIN\$-2018-2	25493347	6672260	Graniitti	3,38	739	2627
TIN\$-2018-3	25491663	6674166	Amfiboliitti	3,06	740	2902
TIN\$-2018-4	25493522	6676978	Tonaliitti	2,34	749	2966
TIN\$-2018-5	25492792	6676794	Biotiittigneissi	3,37	732	2699
TIN\$-2018-6	25492103	6678964	Amfiboliitti	2,35	750	2857
TIN\$-2018-7	25491509	6680527	Granodioriitti	3,65	721	2657
TIN\$-2018-8	25491064	6681724	Granodioriitti	3,47	733	2649
TIN\$-2018-9	25494409	6682945	Protomyloniitti	3,35	713	2708
TIN\$-2018-10	25494588	6679950	Granodioriitti	3,64	724	2644
TIN\$-2018-11	25494798	6678998	Graniitti	3,27	736	2654
TIN\$-2018-12	25496097	6675609	Graniitti	2,83	761	2624
TIN\$-2018-13	25494382	6674862	Graondioriitti	2,78	750	2685
TIN\$-2018-14	25495008	6672499	Biotiittiplagioklaasigneissi	2,69	708	3032
TIN\$-2018-15	25496597	6671282	Amfiboliitti	2,13	726	2932
TIN\$-2018-16	25496122	6673522	Graniitti	2,92	722	2651
TIN\$-2018-17.1	25497728	6676835	Amfiboliitti	2,68	752	3092
TIN\$-2018-17.2	25497728	6676835	Tonaliitti	2,16	751	2763
TIN\$-2018-18	25498100	6674871	Graniitti	3,25	726	2621
TIN\$-2018-19	25497501	6673713	Graniitti	3,31	722	2667
TIN\$-2018-20	25498486	6672821	Graniitti	2,79	723	2670
TIN\$-2018-21	25496023	6680979	Amfiboliitti	2,60	726	2928
TIN\$-2018-22	25497417	6682356	Amfiboliitti	1,73	732	2811
TIN\$-2018-23	25498841	6682824	Graniitti	3,31	723	2622
TIN\$-2018-24	25503945	6682815	Tonaliitti	3,17	730	2701
TIN\$-2018-25	25502438	6684792	Granaattigraniitti	3,32	742	2624
TIN\$-2018-26	25500891	6683450	Amfiboliitti	2,75	726	2840
TIN\$-2018-27	25496816	6677953	Graniitti	3,31	699	2642
TIN\$-2018-28	25498143	6678529	Biotiittigneissi	2,44	726	2768
TIN\$-2018-29	25498632	6679825	Graniitti	3,23	718	2613
TIN\$-2018-30	25500194	6680446	Graniitti	3,08	713	2654
TIN\$-2018-31	25500165	6681621	Granaatti-biotiittigneissi	2,69	729	2685
TIN\$-2018-32	25502291	6680288	Graniitti	3,16	709	2635
TIN\$-2018-33	25503534	6679559	Biotiittigneissi	3,37	705	2672
TIN\$-2018-34	25505989	6679317	Graniitti	3,34	704	2637
TIN\$-2018-35	25509759	6681270	Granodioriitti	3,04	715	2643
TIN\$-2018-36	25503748	6672419	Granodioriitti	3,76	720	2689
TIN\$-2018-37	25502583	6674623	Amfiboliitti	3,72	710	2661
TIN\$-2018-38	25500598	6674879	Dioriitti	3,25	712	2804
TIN\$-2018-39	25502639	6676117	Biotiittigneissi	2,37	737	2705
TIN\$-2018-40	25505323	6677326	Granodioriitti	3,07	734	2649
TIN\$-2018-41	25502497	6677628	Graniitti	3,29	717	2650
TIN\$-2018-42	25507042	6676523	Amfiboliitti	2,92	730	2905
TIN\$-2018-43	25502751	6671831	Tonaliitti	3,81	738	2674
TIN\$-2018-44	25513589	6677494	Granodioriitti	4,93	709	2667
TIN\$-2018-45	25512676	6681784	Biotiitti-plagioklaasigneissi	4,37	722	2680
TIN\$-2018-46	25510026	6683460	Biotiitti-plagioklaasigneissi	2,94	735	2731
TIN\$-2018-47	25508679	6678722	Kvartsi-maasälpagneissi	2,49	739	2880
TIN\$-2018-48	25509199	6676605	Amfiboliitti	2,62	722	2887
TIN\$-2018-49	25504960	6680489	Biotiitti-plagioklaasigneissi	3,05	727	2713
TIN\$-2018-50	25503724	6665559	Kvartsimaasälpagneissi	3,70	707	2708

Liite 2: Tulosaineistojen kuvaukset

Taulukko 11. Parametrikartta-aineistojen kuvaus.

Aineiston nimi	Aineiston tyyppi	Aineistoon kuuluvat tiedostot	Aineiston kuvaus
Termogeologiset parametrit	Polygoni	termogeologiset_parametrit.shp termogeologiset_parametrit.shx termogeologiset_parametrit.dbf termogeologiset_parametrit.prj	ESRI Shapefile –aineisto, joka sisältää 239 kivilajipolygonia ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa. Kukin polygoni sisältää seuraavat ominaisuustiedot: 1. kivilaji (Rock_Type), 2. pinta-ala (Area) [m ²], 3. tiheys (Density) [kg/m ³], 4. lämmönjohtavuus (Therm_Cond) [W/m·K], 5. ominaislämpökapasiteetti (Spec_Heat) [J/kg·K], 6. tilavuuslämpökapasiteetti (Vol_Heat) [MJ/m ³ ·K] ja 7. terminen diffusiviteetti (Therm_Diff) [mm ² /s].
Maanpinnan keskilämpötila	Rasteri	maanpinnan_keskilämpötila.tif maanpinnan_keskilämpötila.tfw maanpinnan_keskilämpötila.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 926 pikseliä, jotka kuvaavat maanpinnan keskilämpötilaa yksikön ollessa celsiusaste. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Geoterminen lämpövuoto	Rasteri	geoterminen_lämpövuoto.tif geoterminen_lämpövuoto.tfw geoterminen_lämpövuoto.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 921 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperän geotermistä lämpövuotoa yksikön ollessa milliwatti per neliömetri. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Geoterminen gradientti	Rasteri	geoterminen_gradientti.tif geoterminen_gradientti.tfw geoterminen_gradientti.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperän geotermistä gradienttia yksikön ollessa celsiusaste per sata metriä. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Maapeitteen paksuus	Rasteri	maapeitteen_paksuus.tif maapeitteen_paksuus.tfw maapeitteen_paksuus.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 2 091 338 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperän geotermistä gradienttia yksikön ollessa metri. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 10 m x 10 m.

Taulukko 12. Geoenergiapotentiaalikartta-aineistojen kuvaus.

Aineiston nimi	Aineiston tyyppi	Aineistoon kuuluvat tiedostot	Aineiston kuvaus
Teoreettinen geoenergiapotentiaali 150-metrin syvyydelle laskettuna	Rasteri	teoreettinen_geoenergiapotentiaali_150m.tif teoreettinen_geoenergiapotentiaali_150m.tfw teoreettinen_geoenergiapotentiaali_150m.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperän ylimpään 150 metriin sitoutuneen lämpöenergian määrää yksikön ollessa megawattitunti per vuosi per hehtaari. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Teoreettinen geoenergiapotentiaali 300-metrin syvyydelle laskettuna	Rasteri	teoreettinen_geoenergiapotentiaali_300m.tif teoreettinen_geoenergiapotentiaali_300m.tfw teoreettinen_geoenergiapotentiaali_300m.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperän ylimpään 300 metriin sitoutuneen lämpöenergian määrää yksikön ollessa megawattitunti per vuosi per hehtaari. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Teoreettinen geoenergiapotentiaali 1000-metrin syvyydelle laskettuna	Rasteri	teoreettinen_geoenergiapotentiaali_1000m.tif teoreettinen_geoenergiapotentiaali_1000m.tfw teoreettinen_geoenergiapotentiaali_1000m.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperän ylimpään kilometriin sitoutuneen lämpöenergian määrää yksikön ollessa megawattitunti per vuosi per hehtaari. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Tekninen geoenergiapotentiaali 150-metriä syvien kaivojen kentälle	Rasteri	tekninen_geoenergiapotentiaali_150m.tif tekninen_geoenergiapotentiaali_150m.tfw tekninen_geoenergiapotentiaali_150m.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperästä 150-metriä syvien lämpökaivojen kentällä hyödynnettävissä olevan lämpöenergian määrää yksikön ollessa megawattitunti per vuosi per hehtaari. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Teoreettinen geoenergiapotentiaali 300-metriä syvien kaivojen kentälle	Rasteri	tekninen_geoenergiapotentiaali_300m.tif tekninen_geoenergiapotentiaali_300m.tfw tekninen_geoenergiapotentiaali_300m.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperästä 300-metriä syvien lämpökaivojen kentällä hyödynnettävissä olevan lämpöenergian määrää yksikön ollessa megawattitunti per vuosi per hehtaari. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.
Teoreettinen geoenergiapotentiaali 1000-metriä syvien kaivojen kentälle	Rasteri	tekninen_geoenergiapotentiaali_1000m.tif tekninen_geoenergiapotentiaali_1000m.tfw tekninen_geoenergiapotentiaali_1000m.prj	GeoTIFF-aineisto, joka sisältää 20 517 pikseliä, jotka kuvaavat kallioperästä 1000-metriä syvien lämpökaivojen kentällä hyödynnettävissä olevan lämpöenergian määrää yksikön ollessa megawattitunti per vuosi per hehtaari. Aineisto on ETRS-GK25FIN-koordinaatistossa ja sen pikselikoko on 100 m x 100 m.

Helsinki