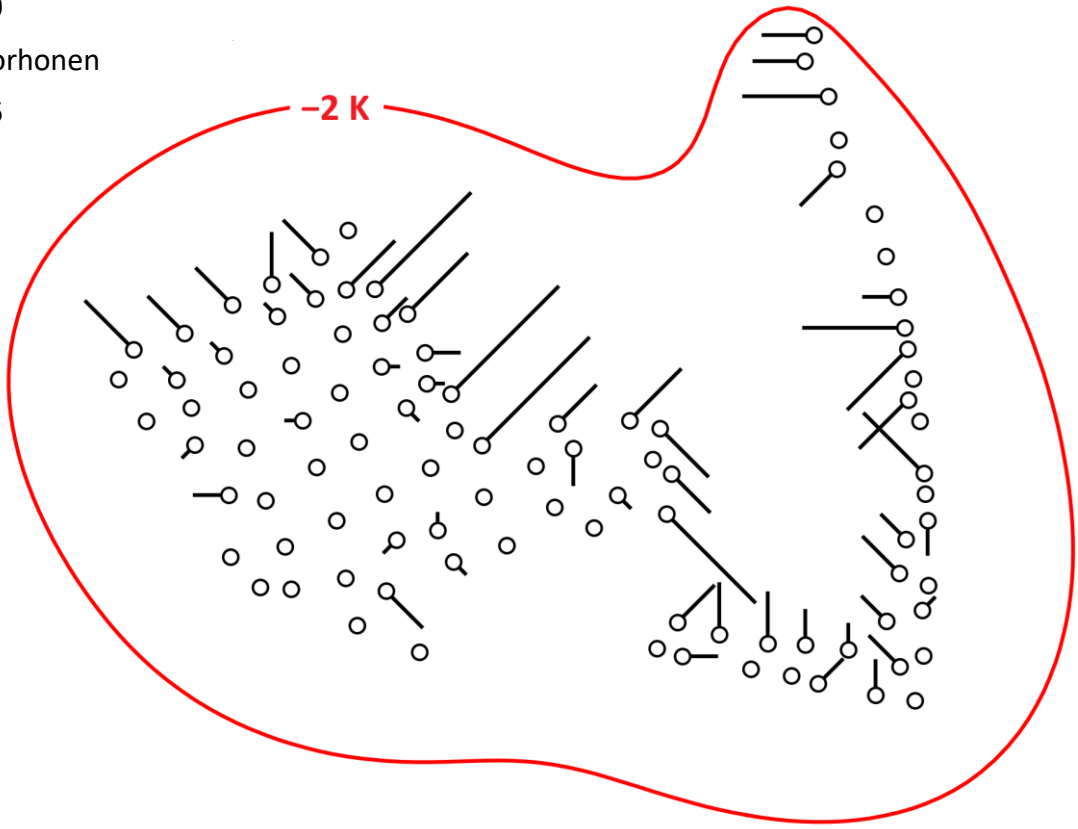
GTK/209/03.05/2024

eVala
Käyttöopas

Versio 1.0

Kimmo Korhonen

16.9.2026



Geologian tutkimuskeskus | Geologiska forskningscentralen | Geological Survey of Finland
Espoo • Kokkola • Kuopio • Loppi • Outokumpu • Rovaniemi
www.gtk.fi • Puh/Tel +358 29 503 0000 • Y-tunnus / FO-nummer / Business ID: 0244680-7

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto 2
2 Käyttöopas 3
2.1 Johdanto 3
2.2 eValan aloitussivu 3
2.3 Rekisteröityminen 4
2.4 Kirjautuminen 6
2.5 Tunnistetiedot-vaihe: projektin tunnistetietojen syöttäminen eValaan 7
2.6 Kaivokenttä-vaihe: energiakaivojen syöttäminen eValaan 8
2.6.1 Kaivojen lisääminen 8
2.6.2 Kaivotaulukko 10
2.6.3 Karttanäkymä 11
2.7 Kuormat-vaihe: lämmitys- ja viilennyskuormien syöttäminen eValaan 12
2.7.1 Lämpöpumpun kertoimien syöttö 12
2.7.2 Kuukausikuormien syöttö 13
2.7.3 Kuormakaavio 15
2.8 Yhteenveto-vaihe: laskennan käynnistäminen 16
2.9 Laskentatulos 17
2.10 Erikoistilanteet 18
3 Laskennallinen malli 21
3.1 Syöttötiedot 21
3.2 Periaate 21
3.3 Vinoon poratut kaivot 22
3.4 Maakuorman laskenta 23
3.5 Mallin yksinkertaistukset 23
4 Mallinvertailu 24
4.1 Kymmenen kaivon kenttä 25
4.2 Seitsemäntoista kaivon kenttä 27
4.3 Yhdeksänkymmentäseitsemän kaivon kenttä 29
4.4 Yhteenveto 31
5 Koordinaattimuunnos 32
5.1 Teoria 32
5.2 Esimerkki 34
6 Kirjallisuusviitteet 38

1 JOHDANTO

eVala on lyhenne sanoista energiakaivokentän vaikutusalueen laskentatyökalu. eVala on verkkosovelluksena toteutettu työkalu, joka laskee arvion energiakaivokentän ympäristöönsä aiheuttaman lämpötilavaikutuksen laajuudesta. Tämän laskennan tuloksen eVala lähettää käyttäjälle sähköpostilla PDF-muotoisen raportin, joka on tarkoitus liittää kaivokentän rakentamislupahakemukseen (kts. Maalämpöohje suunnittelijoille).

eValan tarkoituksena on edistää geoenergian kestävää ja yhdenvertaista käyttöä Helsingin alueella. Tällä tarkoitetaan sellaista käyttöä, jossa suunniteltu energiakaivokenttä ei kuluta naapuritonttien geoenergiaresursseja liiallisesti, vaan kaikille tontinomistajille jää yhtäläinen mahdollisuus käyttää tonttiensa maankamaran geoenergiaresurssia hyväkseen.

Yhdenvertaisen käytön mahdollistaminen osin tiiviistikin rakennetussa Helsingissä on hankala tehtävä, koska lämpö on resurssi, joka siirtyy maankamarassa lämpötilaerojen määräämänä ja pohjaveden mukana kulkeutuen, eikä sen liikkumista pysty rajoittamaan tontin rajojen sisäpuolelle. Energiakaivokentän liiallista vaikutusta naapuritonttien geoenergiaresursseihin voidaan kuitenkin rajoittaa asettamalla enimmäisarvo kentän aiheuttamalle lämpötilan laskulle tonttien rajalla.

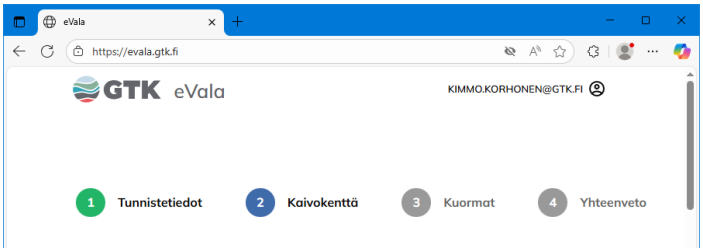
eValan sähköpostilla käyttäjälle lähettämän raportin merkittävin sisältö on esitetty karttakuvissa, joissa kuvataan −1, −2 ja −3 celsiusasteen lämpötilan pudotuksen rintamia 25 ja 50 vuoden kuluttua energiakaivokentällä tehtävän lämmönoton aloittamisesta. Tähän tulokseen perustuen rakentamislupaa hakevan tahon on esitettävä oma lausunto geoenergian riittävyydestä naapuritonttien alueella. Lausunto on liitettävä mukaan rakentamislupahakemukseen. Helsingin kaupungin lupaviranomainen tekee päätöksen rakentamisluvan myöntämisestä muiden asiaan vaikuttavien seikkojen lisäksi myös tähän lausuntoon ja eVala-raportissa esitettyyn laskentatulokseen perustuen.

Tässä dokumentissa käsitellään ensisijaisesti eValan käyttöä, laskennan perusteita ja niihin liittyvää käsitteistöä. Lisäksi dokumentissa esitetään koordinaattimuunnos, jonka avulla suunnittelukoordinaatistossa määritellyt lämpökaivot voidaan muuntaa Helsingin kaupungin käyttämään ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmään.

2 KÄYTTÖOPAS

2.1 Johdanto

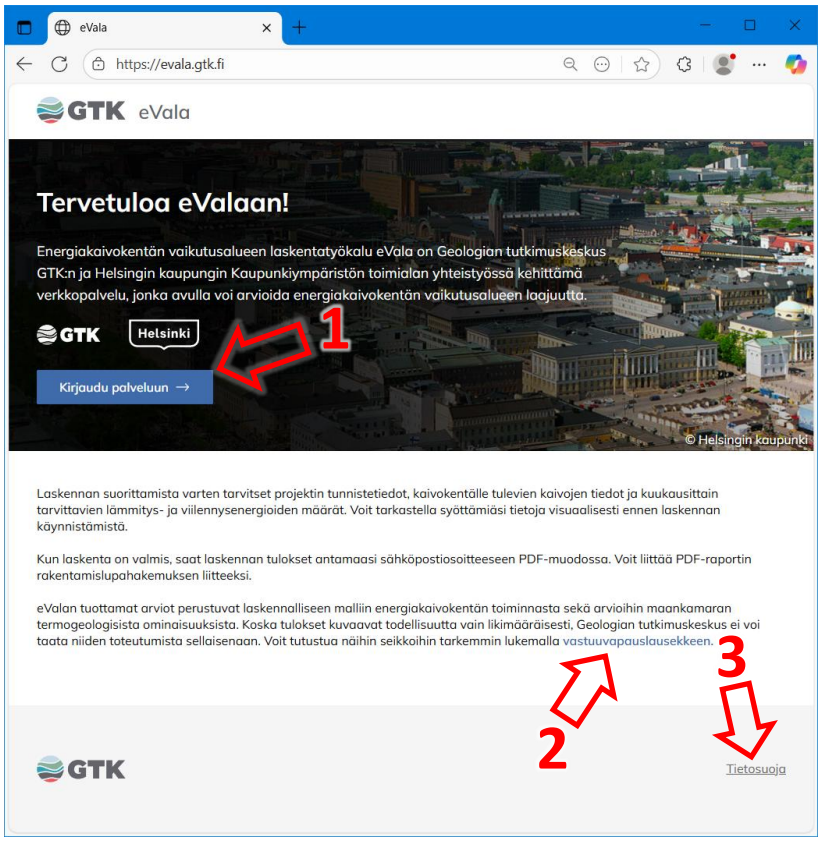
eValan käyttöliittymä on tehty nelivaiheiseksi (kuva 1). Ensimmäiset kolme vaihetta käsittävät tarvittavien tietojen syöttämisen: projektin tunnistetiedot, energiakaivokentän kaivot ja energiakaivokentästä otettavat kuormat. Viimeinen vaihe on yhteenveto ja laskennan käynnistys. Käyttöliittymässä pääsee aina liikkumaan takaisinpäin, mutta ei työn alla olevaa vaihetta edemmäs.



Kuva 1. *eValan vaiheet. Vihreät pallot esittävät valmiiksi tehtyjä vaiheita (tässä esimerkissä vaihe 1). Sininen pallo esittää työn alla olevaa vaihetta (tässä esimerkissä vaihe 2). Harmaat pallot esittävät vielä läpikäymättömiä vaiheita (tässä esimerkissä vaiheet 3 ja 4).*

2.2 eValan aloitussivu

eVala on osa Geologian tutkimuskeskuksen sivustolla https://geo.fi tarjoamia paikkatietotuotteita ja verkkopalveluita. Se löytyy URL-osoitteesta https://evala.gtk.fi. eValan etusivu on esitetty kuvassa 2. Ennen eValan käytön aloittamista käyttäjän täytyy kirjautua eValaan. Käyttäjän on hyvä tutustua eValan vastuuvapauslausekkeeseen ja tietosuojaselosteeseen, joihin molempiin löytyy linkit etusivulta (kuva 2).



Kuva 2. *eValan etusivu. Nuoli 1 osoittaa nappia, jota klikkaamalla kirjaudutaan eValaan. Nuoli 2 osoittaa linkkiä, jota klikkaamalla pääsee lukemaan eValan vastuuvapauslausekkeen. Nuoli 3 osoittaa linkkiä, jota klikkaamalla pääsee tutustumaan GTK:n verkkopalveluiden tietosuojaan.*

2.3 Rekisteröityminen

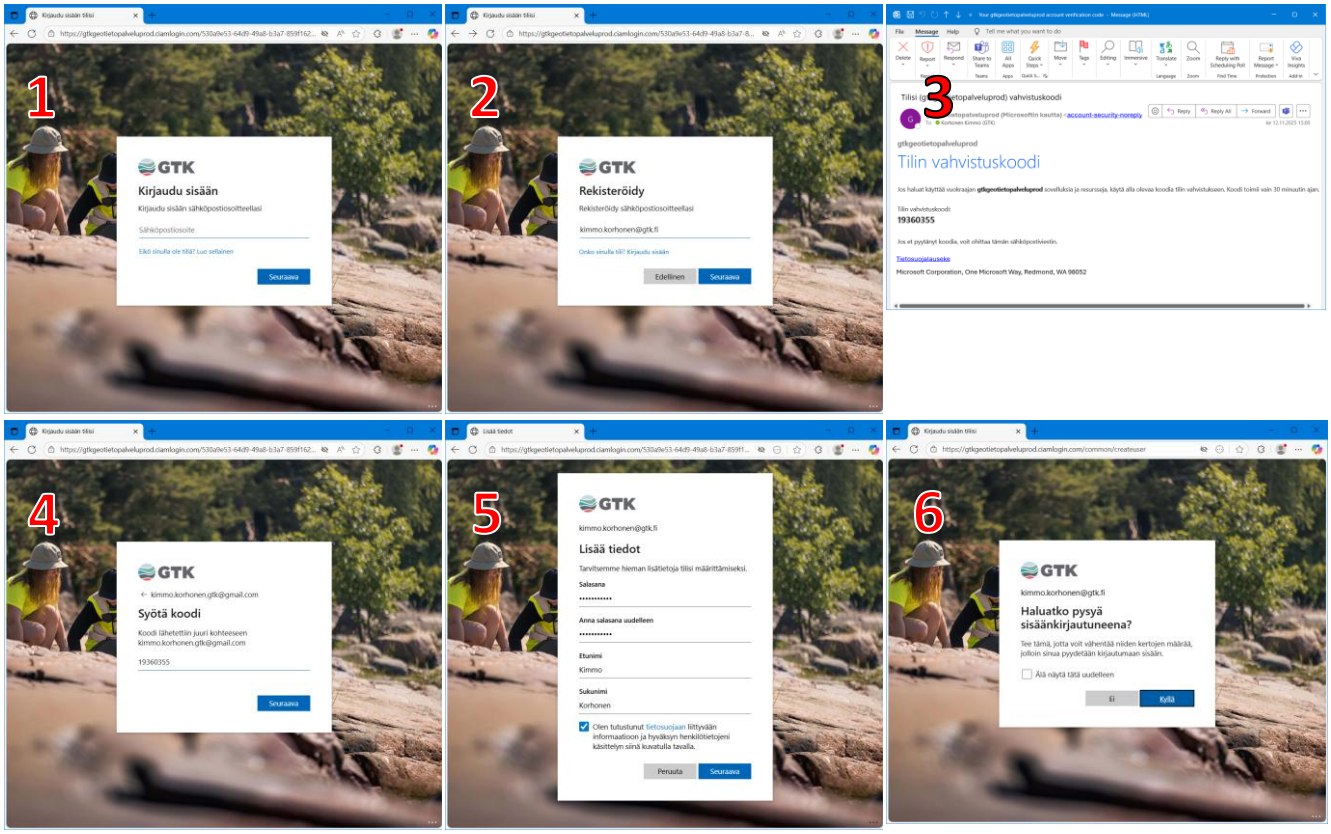
Ensimmäistä kertaa eValaa käytettäessä täytyy rekisteröityä. Rekisteröitymisen tarkoituksena on estää sovelluksen väärinkäyttö esimerkiksi käyttäen tietokoneohjelmaa (bottia), joka automaattisesti käynnistäisi suuren määrän laskentoja ja saisi näin aikaan palvelun ruuhkautumisen (DDoS-hyökkäys).

Rekisteröityminen aloitetaan sovelluksen etusivulta, klikkaamalla Kirjaudu palveluun → (kuva 2), josta pääsee kirjautumissivulle. Tämän jälkeen rekisteröityminen tapahtuu kuvan 3 mukaisesti seuraavasti:

1. Klikkaa linkkiä ”Eikö sinulla ole tiliä? Luo sellainen”.
2. Kirjoita tekstiriville sähköpostiosoitteesi ja klikkaa Seuraava.
3. Odota, kunnes saat vahvistuskoodin sähköpostiisi.
4. Kirjoita vahvistuskoodi tekstiriville ja klikkaa Seuraava.

5. Keksi salasana ja kirjoita se kahdesti lomakkeelle. Kirjoita myös etu- ja sukunimesi lomakkeelle. Varmista, että olet tutustunut tietosuojaehtoihin ja klikkaa rasti ruutuun sen merkiksi. Lopuksi klikkaa Seuraava.

6. Nyt voit päättää haluatko eValan muistavan sinut (eli ”Haluatko pysyä sisäänkirjautuneena?”) vai haluatko kirjautua joka kerta uudelleen. Klikkaa Ei, jos haluat kirjautua aina uudelleen, ja Kyllä, jos haluat eValan muistavan sinut. Jos et halua nähdä tätä ikkunaa uudelleen, niin rastita ”Älä näytä tätä uudelleen”.



Kuva 3. *eValaan rekisteröityminen.*

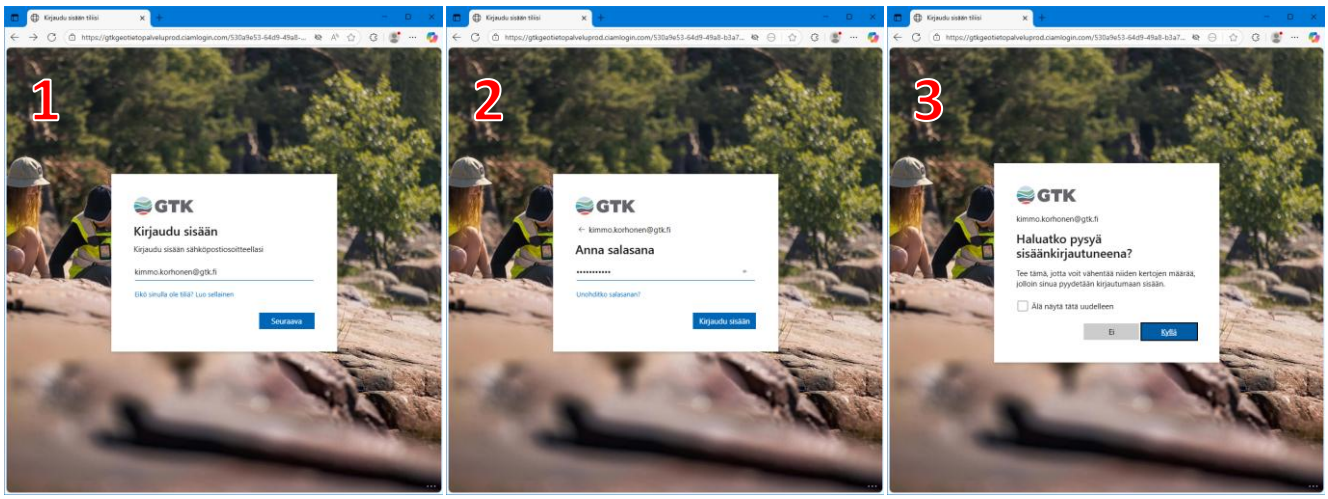
2.4 Kirjautuminen

Aiemmin rekisteröitynyt käyttäjä aloittaa eValan käytön kirjautumalla palveluun. Jos on valinnut aiemmalla käyttökerralla, että haluaa pysyä jatkossa sisään kirjautuneena, ohittaa sovellus tämän vaiheen.

Kirjautuminen tapahtuu sovelluksen etusivulla klikkaamalla Kirjaudu palveluun → (kuva 2), josta pääsee kirjautumissivulle. Tämän jälkeen kirjautuminen tapahtuu kuvan 4 mukaisesti:

1. Kirjoita tekstiriville sähköpostiosoitteesi, jota käytit rekisteröityessäsi, ja klikkaa Seuraava.
2. Kirjoita tekstiriville rekisteröityessä valitsemasi salasana ja klikkaa Seuraava.

Nyt voit päättää haluatko eValan muistavan sinut vai haluatko kirjautua joka kerta uudelleen (eli ”Haluatko pysyä sisäänkirjautuneena?”). Klikkaa Ei, jos haluat kirjautua aina uudelleen, ja Kyllä, jos haluat eValan muistavan sinut. Jos et halua nähdä tätä ikkunaa uudelleen, niin rastita ”Älä näytä tätä uudelleen”.



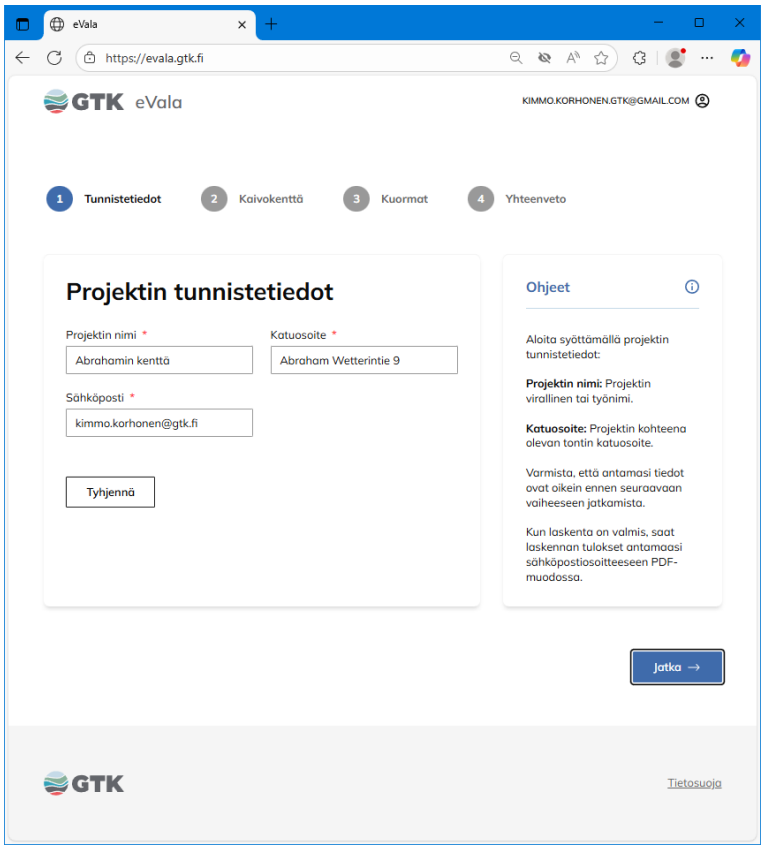
Kuva 4. *eValaan kirjautuminen.*

2.5 Tunnistetiedot-vaihe: projektin tunnistetietojen syöttäminen eValaan

eValan ensimmäinen vaihe on projektin tunnistetietojen syöttäminen (kuva 5). Tunnistetiedot tulevat eValan kirjoittaman laskentaraportin etusivulle ja niiden on tarkoitus yksilöidä projekti. Tunnistetiedot sisältävät:

- Projektin nimen, joka voi olla mielivaltainen.
- Katuosoitteen, joka yksilöi Helsingin kaupungin lupaviranomaista varten tontin, jolle energiakaivokenttä on suunniteltu porattavaksi.
- Sähköpostiosoitteen, johon eVala lähettää laskentaraportin, kun se on valmistunut. Tässä käytetyn sähköpostiosoitteen ei tarvitse olla sama kuin rekisteröityessä käytetty sähköpostiosoite.

Kun tiedot on syötetty, klikkaamalla Jatka → pääsee etenemään seuraavaan vaiheeseen, joka on energiakaivokentän määrittely.



Kuva 5. *Projektin tunnistetietojen syöttäminen eValaan.*

2.6 Kaivokenttä-vaihe: energiakaivojen syöttäminen eValaan

eValan toisessa vaiheessa sovellukseen syötetään energiakaivokentän kaivot.

2.6.1 Kaivojen lisääminen

Kaivojen lisääminen tehdään syöttämällä kaivojen tiedot yksitellen kaivotaulukkoon käyttäen kuvan 6 lomaketta. Jokaisella kaivolla on seuraavat ominaisuudet:

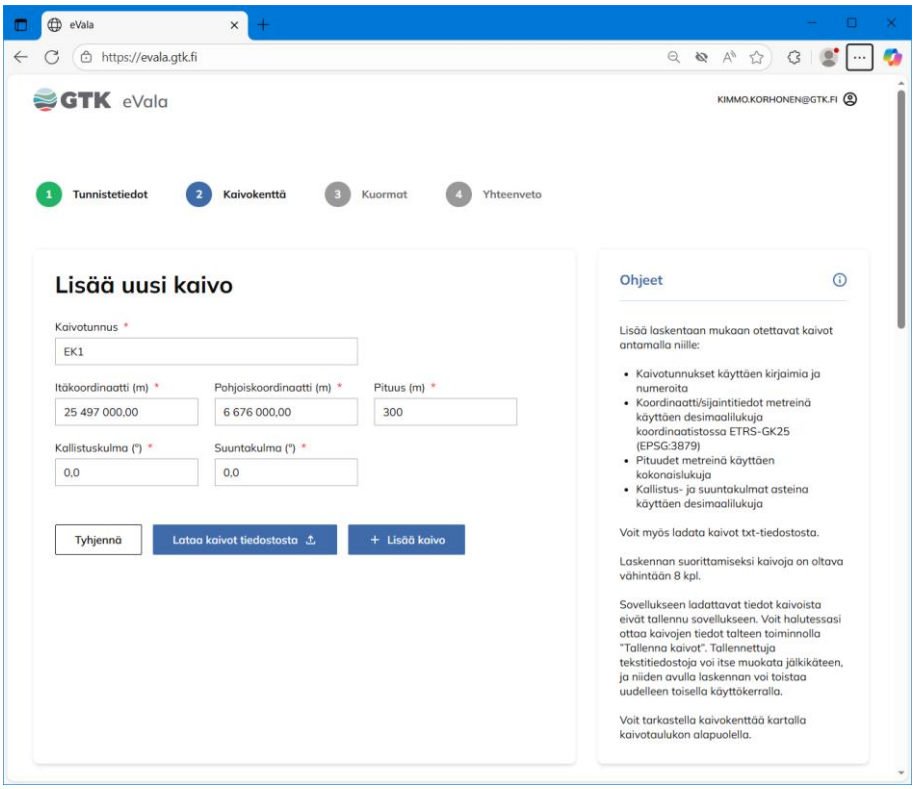
1. Kaivotunnus, joka muodostuu kirjainosasta ja numerosta. Kirjainosassa voi käyttää vain kirjaimia (ei muita merkkejä, kuten pistettä tai väliviivaa) ja niitä tulee olla vähintään yksi. Numero liitetään suoraan kirjainosaan. Esim. EK5, jossa kirjainosa on EK ja numero on 5. Jokaisen kaivon tunnuksen tulee olla yksilöllinen.

2. Itäkoordinaatti ja pohjoiskoordinaatti metreinä. Kaivon sijainti annetaan Helsingin kaupungin käyttämän ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmän (EPSG:3879) koordinaatteina. eVala tarkastaa kaivolle annetun sijainnin ja hyväksyy kaivon vain, jos sen sijainti on Helsingin kaupungin maarajan sisäpuolella.

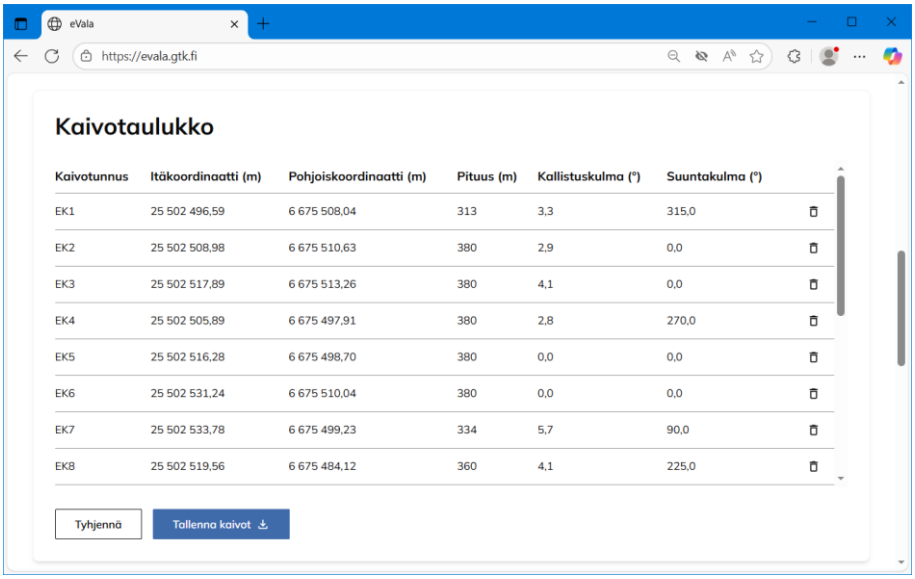
3. Pituus metreinä. Pituuden on oltava positiivinen ja välillä 50–1000 metriä.

4. Kallistuskulma ja suuntakulma desimaaliasteina. Kallistuskulma on 0° pystysuorille kaivoille ja 90° vaakasuorille (sallitut arvot ovat välillä 0–90 astetta). Suuntakulma kasvaa myötäpäivään pohjoisesta ja sen on oltava välillä 0–360 astetta (pohjoinen on 0°, itä on 90°, etelä on 180° ja länsi on 270°).

Kun kaivon tiedot on syötetty kuvan 6 lomakkeeseen, klikataan Lisää kaivo +. Tämän jälkeen eVala tarkistaa syötettyjen tietojen oikeellisuuden. Jos kaikki tiedot annettu hyväksyttävästi, eVala lisää uuden kaivon kaivotaulukkoon (kuva 7). Jos jokin tieto on annettu väärin, eVala ilmoittaa virheestä.



Kuva 6. *Kaivojen tietojen syöttämistä varten tarkoitettu lomake.*



Kuva 7. *Kaivotaulukko, johon lisätyt kaivot eVala huomioi laskennassa. Jokaisen taulukon rivin oikeassa päädyssä on roskakorisymboli, jota klikkaamalla saa poistettua kyseisen kaivon.*

Kaivojen syöttölomakkeessa (kuva 6) on myös nappi Lataa kaivot tiedostosta ↑, jota klikkaamalla pääsee valitsemaan paikalliselta tallennusmedialta tekstitiedoston, josta haluaa eValan lukevan kaivot. Tekstitiedoston tulee noudattaa kuvan 8 mukaista formaattia. Edellä mainitut kaivojen ominaisuuksia koskevat säännöt pätevät myös luettaessa kaivoja tekstitiedostosta. Kun tiedosto on valittu, eVala tyhjentää kaivotaulukon (kuva 8) sisällön ja lukee siihen tiedostossa määritellyt kaivot, tarkastaen samalla tietojen oikeellisuuden. Tämän jälkeen kaivojen lisäämistä kaivotaulukkoon voi jatkaa kuvan 6 syöttölomaketta käyttäen.

```
EK1 25502496,59 6675508,04 313 3,3 315,0
EK2 25502508,98 6675510,63 380 2,9 0,0
EK3 25502517,89 6675513,26 380 4,1 0,0
EK4 25502505,89 6675497,91 380 2,8 270,0
EK5 25502516,28 6675498,70 380 0,0 0,0
EK6 25502531,24 6675510,04 380 0,0 0,0
EK7 25502533,78 6675499,23 334 5,7 90,0
EK8 25502519,56 6675484,12 360 4,1 225,0
EK9 25502525,65 6675481,00 340 0,0 0,0
EK10 25502537,09 6675488,76 340 1,2 90,0
EK11 25502523,15 6675469,72 370 4,4 225,0
EK12 25502527,62 6675473,32 370 2,6 135,0
EK13 25502544,57 6675481,41 370 5,7 45,0
EK14 25502547,83 6675472,99 360 1,2 180,0
EK15 25502548,75 6675463,39 313 2,9 180,0
EK16 25502560,23 6675469,89 382 6,0 45,0
EK17 25502567,25 6675462,22 382 0,0 0,0
EK18 25502570,60 6675455,69 373 5,7 45,0
```

Kuva 8. *Tekstitiedostoesimerkki, joka demonstroi kaivotiedoston formaattia. Tiedostossa on määritelty 18 energiakaivoa. Ensimmäinen sarake sisältää kaivotunnukset. Toinen ja kolmas sarake sisältävät kaivojen sijaintien itä- ja pohjoiskoordinaatit metreinä ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmässä. Neljäs sarake sisältää kaivojen pituudet metreinä. Viides ja kuudes sarake sisältävät kaivojen kallistus- ja suuntakulmat desimaaliasteina. Desimaalierottimena voi käyttää joko pistettä tai pilkkua. Sarakkeet erotetaan vähintään yhdellä tyhjällä merkillä (välilyönti tai sarkain).*

2.6.2 Kaivotaulukko

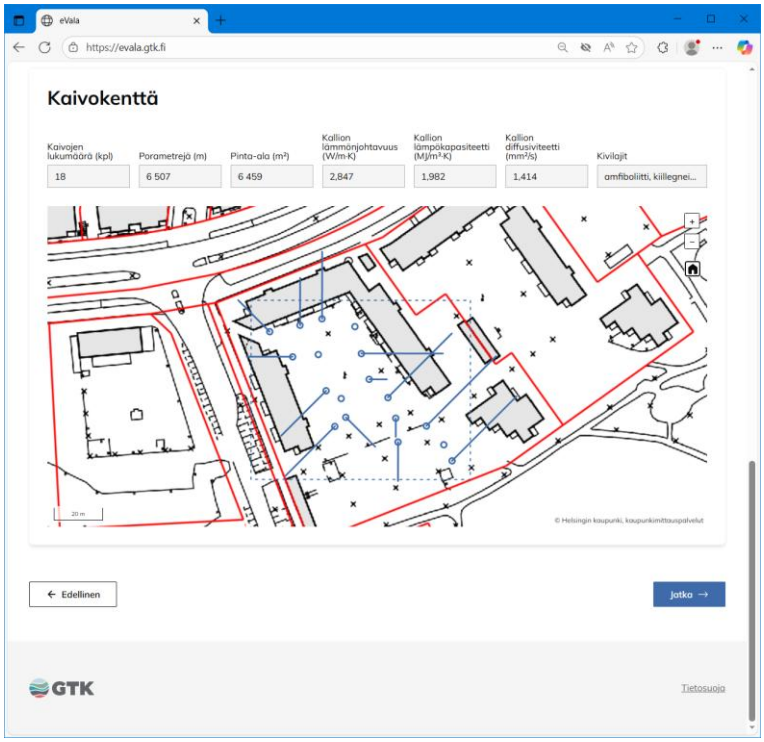
Kuvan 8 kaivotaulukko sisältää kaikki laskennassa huomioitavat energiakaivot. Kaivotaulukon voi tyhjentää kokonaan klikkaamalle Tyhjennä. Yksittäisiä kaivoja voi poistaa kaivotaulukosta klikkaamalla taulukon rivien oikeassa päädyssä olevia roskakorisymboleita. Klikkaamalla Tallenna kaivot ↓, eVala antaa käyttäjän valita tiedostonimen paikalliselta tallennusmediasta ja tallentaa siihen kaikki kaivotaulukon sisältämät kaivot. Tallentaessa kaivoja eVala käyttää kuvan 8 tiedostoformaattia.

Kaivotaulukon täytyy sisältää vähintään 8 energiakaivoa, ennen kuin eVala antaa käyttäjän siirtyä seuraavaan vaiheeseen. Maksimissaan kaivoja voi olla 400 kappaletta.

2.6.3 Karttanäkymä

Kaivokenttävaihe sisältää kaivojen syöttölomakkeen ja kaivotaulukon lisäksi vielä kuvassa 9 esitetyn karttanäkymän, jonka avulla voi varmistaa, että kaikki kaivot on syötetty oikein. Karttanäkymän yläpuolella on myös lisätietoja kaivokentästä ja maankamaran ominaisuuksista sen alueella. Nämä tiedot ovat näkyvissä, kunhan kaivotaulukkoon on lisätty vähintään 8 energiakaivoa.

Karttanäkymä näyttää kaivojen kaulusten sijainnit maanpinnalla sinisinä palloina, kaivojen projektiot maanpinnalle sinisinä viivoina ja kaivokentän jalanjäljen maanpinnalla sinisenä suorakulmiona (kuva 9). Karttanäkymän pohjakarttana käytetään Helsingin kaupungin karttapalvelun (https://kartta.hel.fi) tarjoilemaa pohjakarttaa, jossa rakennukset on esitetty harmaalla ja tonttien rajat punaisin viivoin.



Kuva 9. *Karttanäkymä, joka esittää kaivotaulukon kaivot karttapohjalla. Siniset pallot esittävät kaivojen kauluksia. Siniset viivat ovat kaivojen projektioita maanpinnalle. Sininen katkoviiva esittää suorakulmiota, joka sisältää kaivokentän kaulukset (lämpökaivokentän jalanjälki maanpinnalla). Rakennukset näkyvät karttapohjalla harmaina ja tonttien rajat ovat esitetty punaisin viivoin.*

Kun on lisännyt kaikki kaivot kaivotaulukkoon, pääsee jatkamaan seuraavaan vaiheeseen klikkaamalla Jatka →. Edelliseen vaiheeseen pääsee siirtymään klikkaamalla ← Edellinen. Jos seuraavaan vaiheeseen jatkaminen ei onnistu, tarkoittaa se sitä, että kaivoja ei ole syötetty riittävästi tai on tapahtunut jokin muu virhe, joka tulee korjata.

2.7 Kuormat-vaihe: lämmitys- ja viilennyskuormien syöttäminen eValaan

eValan kolmannessa vaiheessa syötetään energiakaivokentällä lämmitettävän rakennuksen tarvitsemat lämmitys- ja viilennyskuormat sekä lämpöpumpun lämmitys- ja viilennyskertoimet.

2.7.1 Lämpöpumpun kertoimien syöttö

Lämpöpumpun lämmitys- ja viilennyskertoimet syötetään kuvan 10 esittämään lomakkeeseen. eVala laskee nyt maasta otettavan lämmitysenergian kaavalla

$$\text{lämmitysenergia maasta} = (\text{SPF} - 1) / \text{SPF} \times \text{rakennuksen lämmitystarve}, \quad (1)$$

missä SPF on lyhenne sanoista Seasonal Performance Factor, jolla tarkoitetaan lämmitysjakson keskimääräistä lämpökerrointa, josta taasen käytetään lyhennettä COP, joka tulee sanoista Coefficient of Performance. Kaava (1) kertoo sen, että maasta otettava lämmitysenergian osuus rakennuksen lämmitystarpeesta on (SPF – 1) / SPF, jolloin lämpöpumppu käyttää osuuden 1 / SPF verran sähköenergiaa.

Maasta otettavan viilennysenergian määrän eVala laskee kaavalla

$$\text{viilennysenergia maasta} = (\text{SEER} + 1) / \text{SEER} \times \text{rakennuksen viilennystarve}, \quad (2)$$

missä SEER on lyhenne sanoista Seasonal Energy Efficiency Ratio, jolla tarkoitetaan viilennysjakson keskimääräistä viilennyskerrointa, josta taasen käytetään lyhennettä EER, joka tulee sanoista Energy Efficiency Ratio. Kaava (2) kertoo sen, että lämpöpumppu käyttää viilentämiseen sähköenergiaa osuuden 1 / SEER verran, jolloin maahan tulee tällöin ladatuksi kokonaisuudessaan (SEER + 1) / SEER osuus viilennysenergiaa.

Nyt eVala laskee kaivokentällä maasta otettavan geoenergian nettomäärän kaavalla

$$\text{geoenergia maasta} = \text{lämmitysenergia maasta} - \text{viilennysenergia maasta}. \quad (3)$$

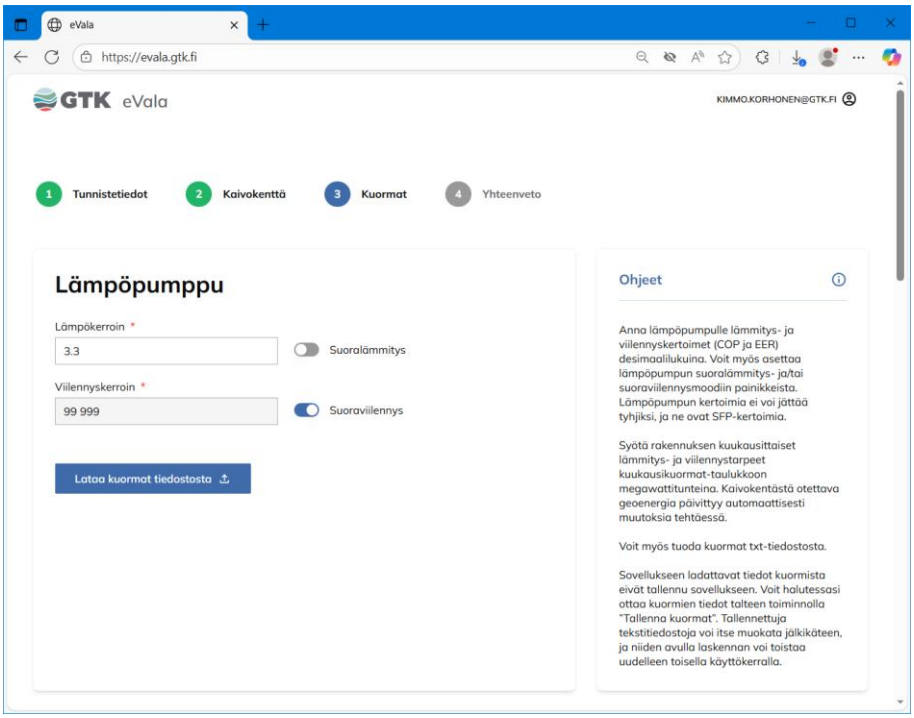
Etumerkit ovat vastakkaiset, koska lämmitysenergian ottaminen maasta viilentää sitä, kun taas viilennysenergian lataaminen maahan lämmittää sitä (kts. kohta 3.4).

Lämpöpumppu voidaan myös asettaa toimimaan suoralämmityksellä ja/tai suoraviilennyksellä. Tällöin lämmönkeruunestettä kierrätetään kentän kaivoissa pelkällä kiertopumpulla lämpöpumpun ollessa pois päältä. Tämä on toteutettu eValassa antamalla SPF- ja SEER-kertoimille arvo 99999, mikä yksinkertaistaa kaavat (1) ja (2) kaavoiksi

$$\text{lämmitysenergia maasta} = \text{rakennuksen lämmitystarve} \quad (4)$$

ja

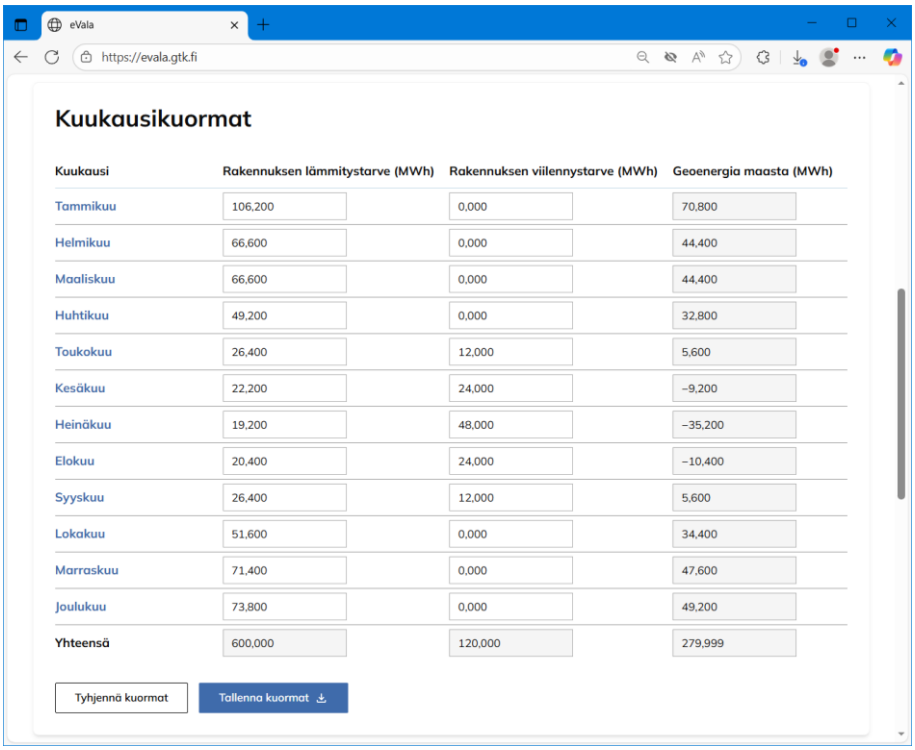
$$\text{viilennysenergia maasta} = \text{rakennuksen viilennystarve} \quad (5)$$



Kuva 10. *Lämpöpumpun lämmitys- ja viilennyskertoimien syöttäminen. Klikkaamalla nappeja saa lämpöpumpun asetettua toimimaan suoralämmityksellä ja/tai suoraviilennyksellä.*

2.7.2 Kuukausikuormien syöttö

Rakennuksen kuukausittaiset lämmitys- ja viilennystarpeet syötetään kuvan 11 kuormataulukkoon. Taulukossa on jokaiselle vuoden kuukaudelle kaksi tekstikenttää, joihin syötetään rakennuksen lämmitystarve (2. sarake) ja viilennystarve (3. sarake) megawattitunteina. Kuormat tulee syöttää positiivisina lukuina. eVala laskee automaattisesti maasta otettavan geoenergian jokaiselle kuukaudelle (4. sarake) megawattitunteina kaavoja (1) ja (2) käyttäen. eVala myös päivittää taulukon alimman rivin summia aina, kun taulukon arvoja muutetaan.



Kuva 11. *Kuormataulukko, jolla vuoden jokaiselle kuukaudelle syötetään rakennuksen lämmitys- ja viilennystarpeet. eVala laskee automaattisesti maasta otettavan geoenergian määrät.*

Kuormataulukon voi nollata klikkaamalle Tyhjennä kuormat. Tällöin eVala nollaa kuormataulukon jokaiseen tekstikentän. Klikkaamalla Tallenna kuormat, eVala antaa käyttäjän valita tiedostonimen paikalliselta tallennusmedialta ja tallentaa siihen sekä lämpöpumpun kertoimet että kuormataulukon sisällön. Tallentaessa kuormia eVala käyttää kuvan 12 tiedostoformaattia.

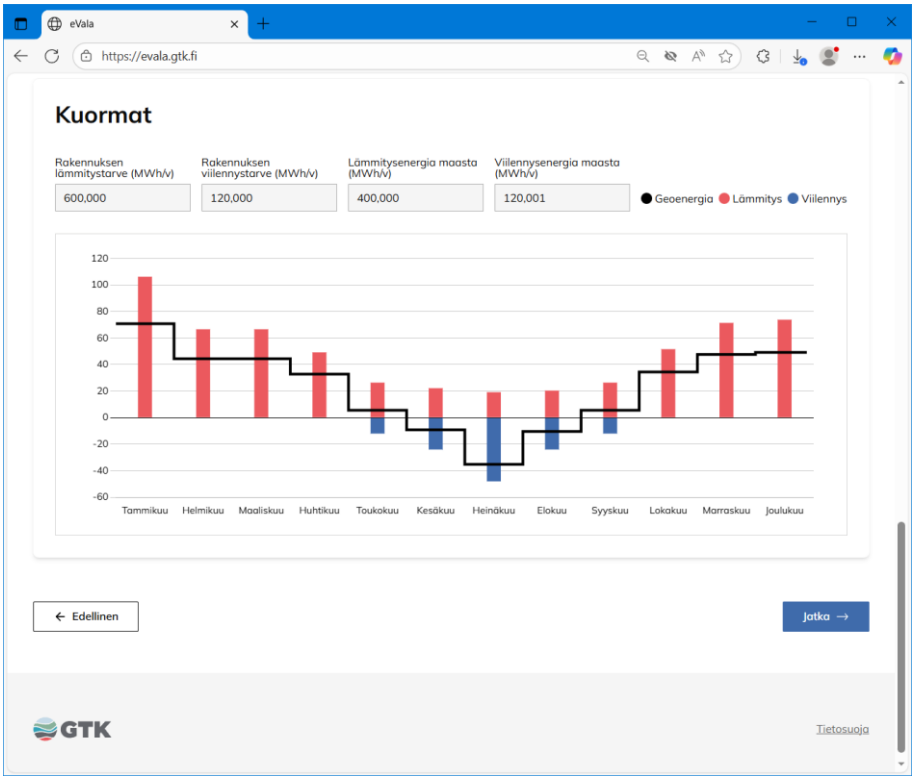
```
3,000 99999
106,200 0,000
66,600 0,000
66,600 0,000
49,200 0,000
26,400 12,000
22,200 24,000
19,200 48,000
20,400 24,000
26,400 12,000
51,600 0,000
71,400 0,000
73,800 0,000
```

Kuva 12. *Tekstitiedostoesimerkki, joka demonstroi kuormatiedoston formaattia. Tiedoston ensimmäisellä rivillä on lämpöpumpun lämmitys- ja viilennyskertoimet. Luku 99999 tarkoittaa suoralämmitystä tai suoraviilennystä. Seuraavat 12 riviä sisältävät kuukausittaiset lämmitys- ja viilennystarpeet megawattitunteina tammikuusta ja joulukuuhun. Desimaalierottimena voi käyttää joko pistettä tai pilkkua. Sarakkeet erotetaan vähintään yhdellä tyhjällä merkillä (välilyönti tai sarkain).*

Kuormataulukon sisällön voi myös ladata tekstitiedostosta, joka noudattaa kuvan 12 tiedostoformaattia. Tämän voi tehdä klikkaamalla Lataa kuormat tiedostosta ↑, joka löytyy lämpöpumpun kertoimien syöttölomakkeella (kuva 10). Tällöin pääsee valitsemaan paikalliselta tallennusmedialta tekstitiedoston, josta eVala lukee lämpöpumpun kertoimet ja rakennuksen kuormat. Ladatessa kertoimia ja kuormia, eVala varmistaa, että ne on annettu positiivisina lukuina.

2.7.3 Kuormakaavio

Kuormien syöttövaihe sisältää myös kaavion (kuva 13), joka esittää kuormataulukkoon syötettyjä kuormia ja eValan laskemaa maakuormaa. Kuvaajan avulla voi varmistaa, että kertoimet ja kuormat on syötetty oikein. eVala myös esittää kuvaajan yläpuolella rakennuksen lämmitys- ja viilennyskuormien kokonaissumat megawattitunteina ja maasta otettavan lämmitysenergian ja sinne ladattavan viilennysenergian summat megawattitunteina.

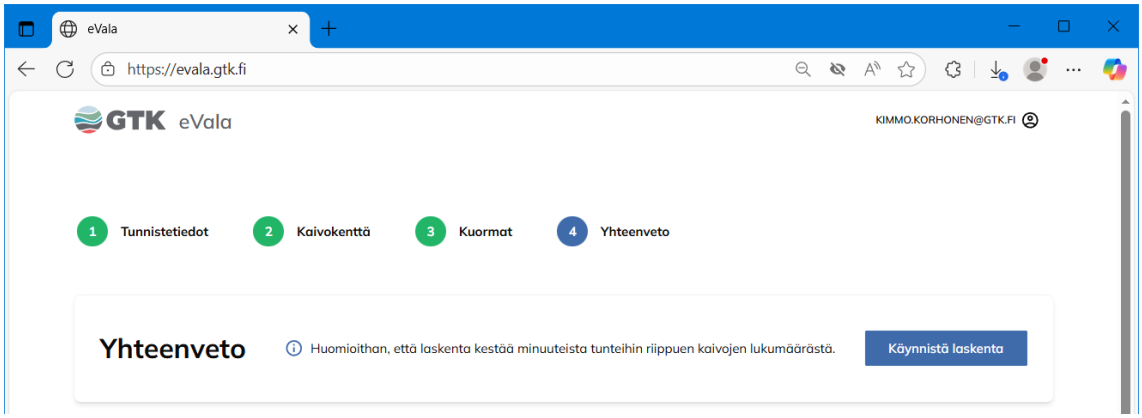


Kuva 13. *Kuvaaja, joka esittää kuormataulukkoon syötettyjä kuormia ja eValan laskemaa maakuormaa (geoenergia).*

Kun lämpöpumpun kertoimet ja rakennuksen energiantarpeet on syötetty, voi jatkaa seuraavaan vaiheeseen klikkaamalla Jatka →. Edelliseen vaiheeseen pääsee siirtymään klikkaamalla ← Edellinen.

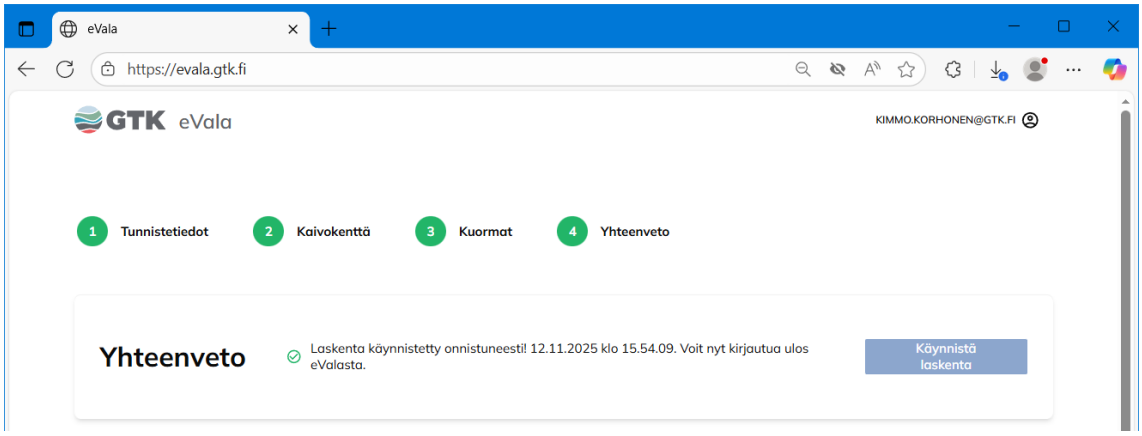
2.8 Yhteenveto-vaihe: laskennan käynnistäminen

Tämän vaiheen tarkoituksena on antaa käyttäjälle mahdollisuus ennen laskennan käynnistämistä tarkastaa vielä kerran syötettyjen tietojen oikeellisuus. Tältä sivulta löytyy uudelleen jo edellä esiintynyt kaivojen karttanäkymä ja edellisen vaiheen kuormakaavio. Näiden lisäksi sivulta löytyy nappi, jolla voi käynnistää laskennan: Käynnistä laskenta.

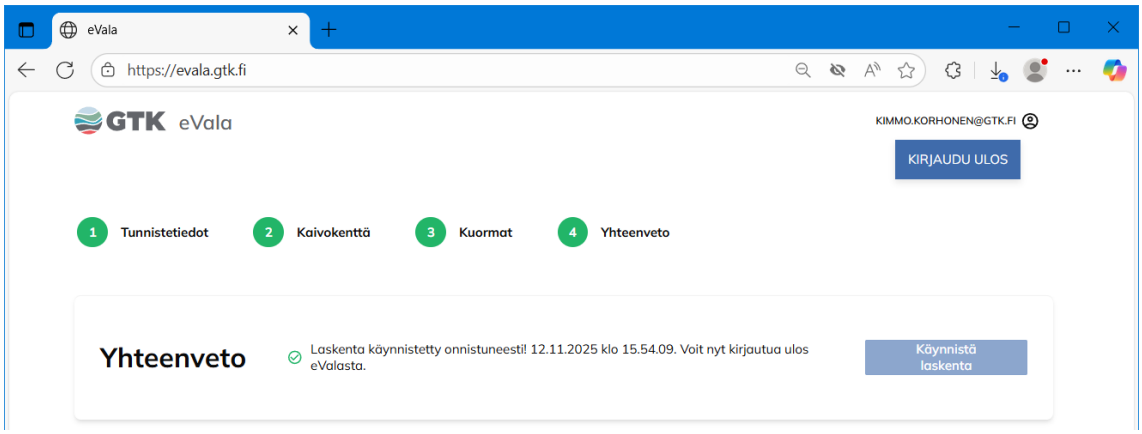


Kuva 14. *Laskennan käynnistysnappi.*

Onnistunut laskennan käynnistys näkyy kuvan 15 viestinä. Jos käynnistys epäonnistuu, eVala ilmoittaa siitä samaan kohtaan ilmestyvällä virheviestillä. Kun laskenta on käynnistynyt, ei eValaa voi käyttää viiteen minuuttiin. Tällä tavalla toimimalla eVala takaa sen, että useita laskentoja ei voi käynnistää peräjälkeen vahingossa tai tarkoituksella. Tässä vaiheessa voi esimerkiksi kirjautua ulos eValasta (kuva 16).



Kuva 15. *eVala kirjoittaa viestin, jos laskenta on käynnistynyt onnistuneesti.*



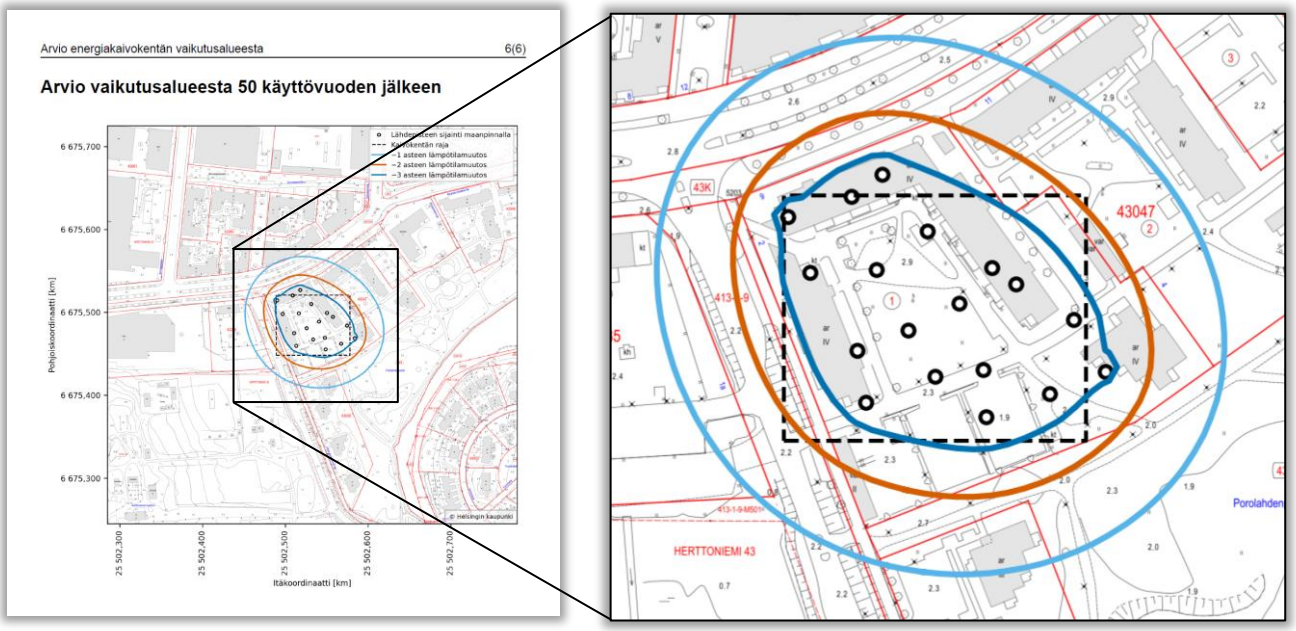
Kuva 16. *Uloskirjautuminen eValasta: klikkaa oikeassa yläkulmassa näkyvää sähköpostiosoitetta ja sen jälkeen klikkaa* KIRJAUDU ULOS.

2.9 Laskentatulos

Kun eValan suorittama energiakaivokentän vaikutusalueen arviointi on valmistunut, lähettää eVala sähköpostiviestin käyttäjälle. Sähköpostiviesti sisältää kaksi liitettä, jotka on molemmat tarkoitettu liitettäväksi rakentamislupahakemukseen. Liitteet ovat:

- Laskentaraportti, joka on PDF-tiedosto. Laskentaraportti sisältää kaikki eValaan syötetyt tiedot ja laskennan lopputuloksen, joka on esitetty kahtena kuvana raportin viimeisillä sivuilla: − 1, − 2 ja −3 asteen lämpötilan pudotuksen rintamat 25 ja 50 vuoden kuluttua lämmönoton aloittamisesta.
- Kaivokenttätiedosto, joka on CSV-formaatissa. Tämä tiedosto sisältää eValaan syötetyn lämpökaivokentän kaivot sellaisessa muodossa, jossa Helsingin kaupungin viranomainen voi ne syöttää omaan järjestelmäänsä.

Kuva 17 esittää eValan laskentaraportin karttakuvaa, jossa kuvataan energiakaivokentän vaikutusaluetta 50 käyttövuoden jälkeen. Vastaava kuva esitetään raportissa myös 25 käyttövuoden jälkeiselle tilanteelle. Karttakuvat auttavat arvioimaan geoenergian riittävyyttä naapureille. Kuvassa esitetään erivärisillä viivoilla alueet, joissa lämpötilan pudotuksen rintama 50 lämmönottovuoden jälkeen on −1, −2 ja −3 astetta.



Kuva 17. *Esimerkki eValan tuottaman raportin karttakuvasta, joka esittää arviota lämpökaivokentän vaikutusalueesta 50 käyttövuoden jälkeen.*

2.10 Erikoistilanteet

eVala ilmoittaa virheellisistä syötteistä jo käyttöliittymää käytettäessä, eikä anna käyttäjän edetä laskentaan, ennen kuin virheet on korjattu. Käyttöliittymä ei kuitenkaan tarkista käyttäjän antamien energiamäärien fysikaalista realistisuutta. Tämä tarkistus tehdään vasta laskentavaiheessa. Realistisuuden kriteerinä käytetään lämpökaivometriä kohti laskettua vuotuista kokonaiskuormaa, jonka tulee olla välillä −1 000 ja +1 000 kWh/m. Jos kokonaiskuorma jää tämän vaihteluvälin ulkopuolelle, eVala ei suorita laskentaa. Tällöin eVala ilmoittaa tilanteesta käyttäjälle lähettämällä sähköpostitse kuvan 18 mukaisen PDF-dokumentin.



GTK

Helsinki

Energiakaivokentän vaikutusalueen arviointi epäonnistui

Syy

Kokonaisominaiskuorma 1 373,541 kWh/m ylittää sallitun maksimiarvon 1 000,000 kWh/m.

Toimintaohjeet

Tarkasta antamasi tiedot. Jos ne on annettu oikein, mutta virhe toistuu siitä huolimatta, ota yhteyttä Geologian tutkimuskeskukseen lähettämällä sähköpostia osoitteeseen support@gtk.fi.

Geologian tutkimuskeskus
Energia ja rakentamisen ratkaisut

Helsingin kaupunki
Kaupunkiympäristön toimiala

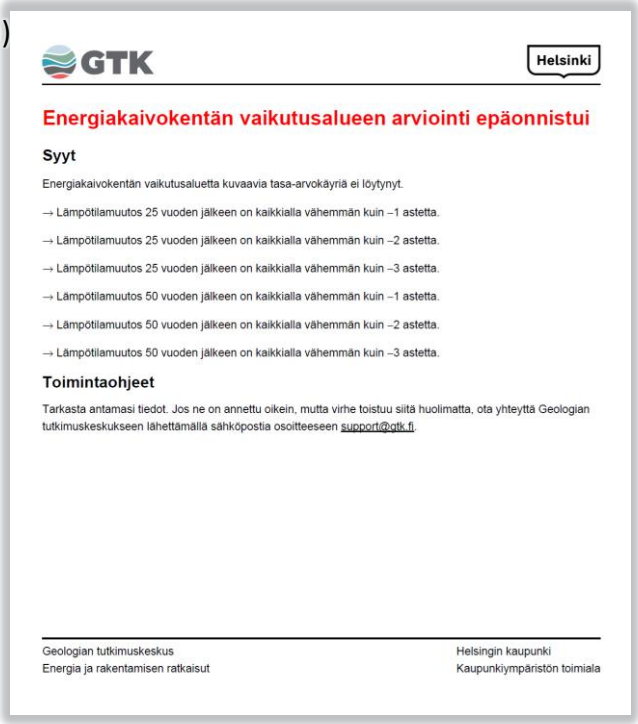
Kuva 18. *eValan lähettämä PDF-dokumentti tilanteessa, jossa lämpökuormien realistisuuskriteeri ei täyty eikä laskentaa suoriteta.*

Vaikka kokonaiskuorma olisi edellä mainitun vaihteluvälin sisällä, kuormitus ei välttämättä laske maankamaran lämpötilaa niin paljon, että kaikki −1, −2 ja −3 asteen lämpötilan pudotuksen rintamat muodostuisivat. Tämä ei välttämättä ole virhetilanne. Kenttää on voitu esimerkiksi tasapainottaa lämmön latauksella, mikä vähentää pitkällä aikavälillä tapahtuvaa maankamaran viilentymistä. Kuva 19a esittää tuloksen tapauksessa, jossa maankamara ei ole 25 vuoden lämmönoton jälkeen ehtinyt viilentyä vielä kolmea astetta, jolloin −3 asteen rintamaa ei myöskään ole muodostunut. Kuva 19b esittää tapauksen, jossa lämmönotto on ollut hyvin vähäistä tai kenttä on likimain lämpötasapainossa, esimerkiksi silloin kun lämmön lataus ja lämmönotto ovat samaa suuruusluokkaa.

(a)



(b)



Kuva 19. *Esimerkkejä tilanteista, joissa kaikkia lämpötilan pudotuksen rintamia ei muodostu. (a) Tapaus, jossa 25 vuoden lämmönoton jälkeen vain −1 ja −2 asteen lämpötilan pudotuksen rintamat ovat muodostuneet. (b) eValan lähettämä PDF-dokumentti tilanteessa, jossa maankamaran lämpötila ei ole 50 vuoden kuluessa laskenut edes yhtä astetta.*

Kuvissa 18 ja 19b esitetyt PDF-dokumentit kuvaavat eValan tapaa raportoida erikoistilanteista. Myös muita erikoistilanteita voi esiintyä. Tällöin PDF-dokumentin Syy/Syyt-kohdassa esitetään kuvaus tilanteesta. Jos eVala ei lähetä käyttäjälle vastausta esimerkiksi vuorokauden kuluessa, kyseessä on todennäköisesti virhetilanne, jota eVala ei ole pystynyt käsittelemään normaalilla tavalla. Tällöin käyttäjän kannattaa ottaa yhteyttä osoitteeseen support@gtk.fi.

3 LASKENNALLINEN MALLI

3.1 Syöttötiedot

eValan tarkoituksena on laskea käyttäjän syöttämien tietojen perusteella lämpökaivokentän maankamaraan aiheuttama lämpötilan muutos riittävällä tarkkuudella. Syötettävät tiedot sisältävät:

1. Lämpökaivokentän lämpökaivojen kaulusten sijainnit (x ja y) metreinä, pituudet (H) metreinä ja kaivojen kallistus- ja suuntakulmat (θ ja φ) asteina. Lämpökaivoja täytyy olla vähintään 8 kpl mutta ei enempää kuin 400 kpl.

2. Rakennuksen kuukausittaiset lämmöntarpeet (E_H) ja viilennystarpeet (E_C) megawattitunteina (MWh).

3. Lämpöpumpun lämmityskerroin (ε_H) ja viilennyskerroin (ε_C) kausikeskiarvoina (Seasonal Performance Factor eli SPF ja vastaavasti Seasonal Energy Efficiency Ratio eli SEER).

3.2 Periaate

Arvio yksittäisen lämpökaivon ympäristöönsä aiheuttamalle lämpötilan muutokselle voidaan laskea käyttäen äärettömän viivalähteen mallia (esim. Gil et al., 2022). Äärettömän viivalähteen malli voidaan esittää kaavalla

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \tag{6}$$

missä ΔT on lämpötilan muutos väliaineessa, q on viivalähteen väliaineeseen luovuttama ominaislämpöteho (W/m), k ja α ovat väliaineen lämmönjohtavuus ja terminen diffusiviteetti, r on laskentapisteen etäisyys viivalähteestä, t on aika, joka on kulunut lämmityksen aloittamisesta, ja E_1 on erikoisfunktio (eksponentiaalinen integraali). Kaava (6) kuvaa ideaalista yksiulotteista tapausta, jossa väliaine on ääretön, homogeeninen ja isotroppinen. Kaava (6) on yleisesti käytössä myös TRT-mittausten tulkinnassa (esim. Eklöf and Gehlin, 1996), jolloin sillä lasketaan lämpökaivon seinämän lämpötila, asettamalla laskentapiste etäisyydelle $r = r_b$ (missä r_b on kaivon säde).

Lämpökaivokentissä on kuitenkin useita kaivoja ja lämmönottokin muuttuu ajassa. Kaavan (6) ratkaisua summaamalla sekä ajassa että paikassa superpositioperiaatteen mukaisesti voidaan johtaa kaava kokonaisen lämpökaivokentän ympäristöönsä aiheuttamalle lämpötilan muutokselle ajan funktiona (esim. Bayer et al., 2014, ja Gil et al., 2022). Tämä tekee mallista kaksiulotteisen ja aikariippuvan, mutta muutoin se sisältää samat oletukset äärettömästä, homogeenisesta ja isotrooppisesta väliaineesta sekä äärettömistä viivalähteistä.

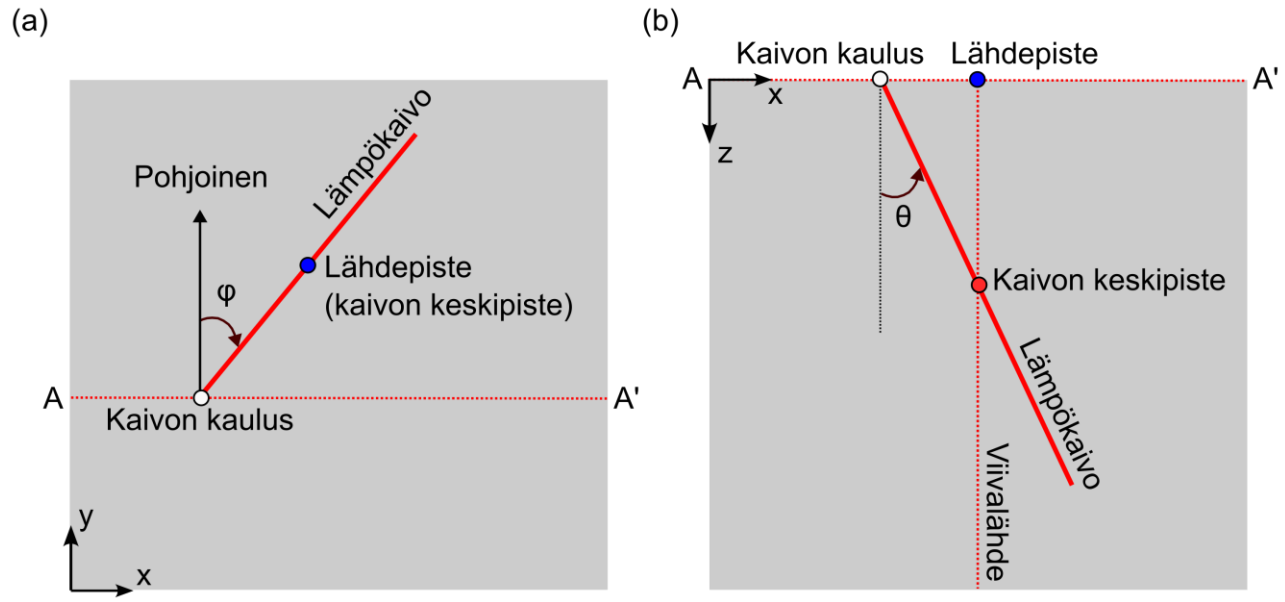
Lämmönsiirtoa kuvaavat parametrit kaavassa (6) ovat lämmönjohtavuus k ja terminen diffusiviteetti α. Arviot näille lasketaan Helsingin geoenergiapotentiaalin laskentaan käytettyyn paikkatietoaineistoon perustuen (Kallio ja muut, 2019). Jokaiselle kentän lämpökaivolle haetaan ensin aineistosta lämmönjohtavuus ja terminen diffusiviteetti. Tämän jälkeen ne yleistetään koskemaan koko lämpökaivokenttää laskemalla niille keskiarvot.

3.3 Vinoon poratut kaivot

eValan käyttämä laskennallinen malli ei kykene ottamaan huomioon vinoon porattuja lämpökaivoja, koska mallissa kaivot oletetaan pystysuoriksi ja äärettömiksi. Vinoon porattujen kaivojen vaikutus voidaan eValassa kuitenkin ottaa karkeasti huomioon siten, että sijoitetaan viivalähde kaivon keskipisteeseen kuvan 20 mukaisesti. Lähdepisteen sijainti lasketaan nyt kaavoilla

$$\begin{cases} x_{lp} = x_0 + \frac{H}{2} sin\,\theta\, cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \text{(7a)} \\ y_{lp} = y_0 + \frac{H}{2} sin\,\theta\, sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \text{(7b)} \end{cases}$$

missä x_{lp} ja y_{lp} ovat laskentapisteen (kaivon keskipisteen) koordinaatit maanpinnalle projisoituina, x_0 ja y_0 ovat kaivon kauluksen koordinaatit, H on kaivon pituus, ja θ ja φ ovat kaivon kallistuskulma (pystysuoran kaivon tapauksessa 0°) ja suuntakulma (myötäpäivään kasvava pohjoisen ollessa 0°).



Kuva 20. *Vinoon porattujen kaivojen huomiointi eValassa. (a) Lämpökaivo ylhäältäpäin katsottuna. (b) Lämpökaivo itä-länsisuuntaisessa pystyleikkauksessa A–A'. Kaivon kallistuskulma on θ ja suuntakulma on φ. Kuvassa x osoittaa itään, y osoittaa pohjoiseen ja z osoittaa alaspäin. Viivalähde sijoitetaan kaivon keskipisteeseen.*

Kallistuskulman ollessa 0°, lähdepiste ja kaivon kaulus ovat samassa pisteessä. Viivalähteen sijoittaminen vinon kaivon keskipisteeseen on neutraali tapa ratkaista vinojen kaivojen ongelma eValassa. Lähdepisteen sijoittaminen kaivon keskipisteeseen ei pitäisi ainakaan aiheuttaa vaikutusalueen yliarviointia.

3.4 Maakuorman laskenta

Maakuormat lasketaan rakennuksen lämmitys- ja viilennyskuormien sekä lämpöpumpun lämmitys- ja viilennyskertoimien avulla kaavalla

$$E_{G,j} = \frac{\varepsilon_H - 1}{\varepsilon_H} \cdot E_{H,j} - \frac{\varepsilon_C + 1}{\varepsilon_C} \cdot E_{C,j} \quad (8)$$

missä $E_{G,j}$ on maakuorma (MWh) kuukautena j, $E_{H,j}$ ja $E_{C,j}$ ovat rakennuksen lämmityskuorma (MWh) ja viilennyskuorma (MWh) kuukautena j, ja ε_H ja ε_C ovat lämpöpumpun lämpö- ja viilennyskerroin. Nämä ovat SPF- ja SEER-lukuja, jotka ovat kausitasolla määritettyjä hyötysuhdelukuja, joista SPF kuvaa lämmityskauden keskimääräistä COP-lukua ja SEER viilennyskauden keskimääräistä EER-lukua. Kaavaa (8) tarkasteltaessa on huomattava, että positiivinen maakuorma tarkoittaa lämmönottoa ja negatiivinen lämmön latausta.

Lämpökaivokentän kaivoista otettava ominaislämpöteho voidaan nyt laskea kaavalla

$$q_j = -\frac{E_{G,j}}{\sum_{i=1}^{N} H_i} \cdot \frac{10^6}{730\ h} \quad (9)$$

missä q_j on kuukauden j ominaislämpöteho (W/m), $E_{G,j}$ on kuukauden j maakuorma (MWh), H_i on kaivon i pituus, N on kaivojen määrä kentässä ja 730 h on kuukauden kesto tunteina. Kaavassa (9) on miinusmerkki, jotta kaavasta (6) laskettu lämpötilan muutos olisi negatiivinen, kun kalliosta otetaan lämpöä, ja positiivinen, kun kallioon ladataan lämpöä.

3.5 Mallin yksinkertaistukset

eValan käyttämä laskennallinen malli on tarkoitettu nopeaan ja riittävän tarkkaan laskentaan. Malli sisältää seuraavat laskentaa nopeuttavat yksinkertaistukset:

- Malli ei ota huomioon geotermistä gradienttia.
- Malli ei ota huomioon pohjaveden virtauksen vaikutusta.
- Malli olettaa maankamaran olevan homogeeninen ja isotrooppinen.
- Malli olettaa maankamaran olevan ääretön.
- Malli olettaa lämpökaivojen olevan pystysuoria ja äärettömän pitkiä.
- Vinot kaivot huomioidaan sijoittamalla lähdepiste kaivon keskipisteeseen.
- Malli huomioi kuormat kuukausitasolla.

4 MALLINVERTAILU

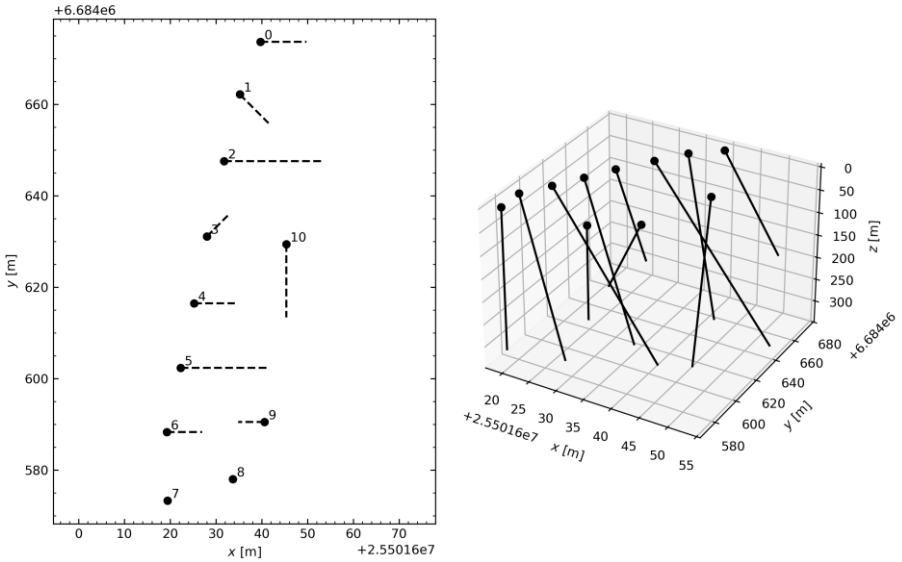
eValan on tarkoitus toimia nopeana ja helppokäyttöisenä menetelmänä lämpökaivokentän vaikutuksen arvioimiseksi. Tästä syystä eValassa on käytetty yksinkertaista laskennallista mallia, joka sisältää useita yksinkertaistuksia. Tarkempi menetelmä lämpökaivokentän vaikutuksen laskemiseksi olisi esimerkiksi elementtimenetelmä. Elementtimenetelmä kuitenkin vaatii käyttäjältään paljon ja sillä suoritettu laskenta saattaa olla hyvinkin hidasta.

Seuraavassa arvioidaan kolmen erilaisen lämpökaivokentän vaikutusalueita sekä eValalla että elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmälaskut tehtiin COMSOL Multiphysics® -ohjelmistolla. Laskennassa käytetyt elementtimallit ottivat huomioon lämpökaivojen äärellisen geometrian kolmiulotteisessa avaruudessa, kaivojen kallistukset ja suuntakulmat, lämmönkeruunesteen virtauksen kaivoissa sekä kallion lämpötilaprofiilin. Näin ollen elementtimallit kuvaavat todellisuutta huomattavasti yksityiskohtaisemmin kuin eValan laskennallinen malli.

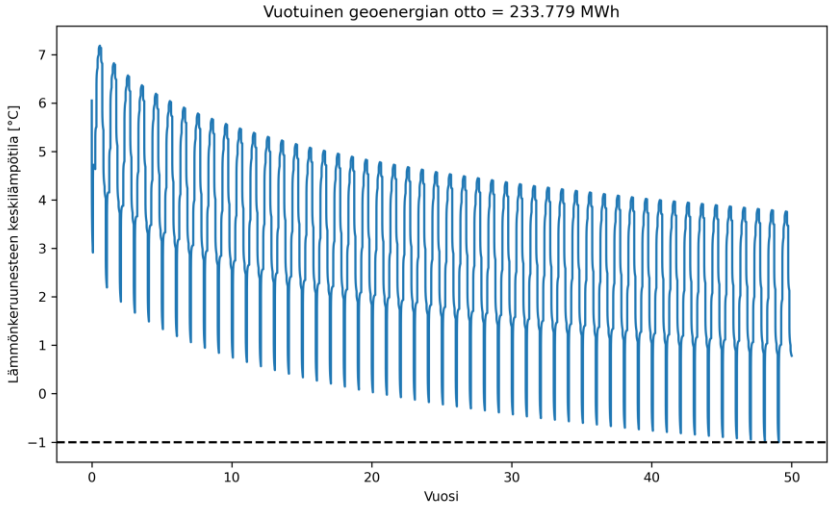
Kaikki esimerkkikentät poimittiin Helsingin kaupungin karttapalvelusta (https://kartta.hel.fi), jossa ne on julkaistu. Kenttien todellisia lämpökuormia ei kuitenkaan tunnettu, joten ne arvioitiin laskennallisesti. Kaivoissa virtaavan lämmönkeruunesteen keskilämpötiloja simuloitiin pygfunction-kirjastolla (Cimmino, 2018) laskettujen g-funktioiden avulla. Matemaattisella optimoinnilla määritettiin kullekin kentälle sellainen lämpökuorma, jolla nesteen keskilämpötila saavutti arvon −1 celsiusasstetta 50 vuoden käyttöajan lopussa.

4.1 Kymmenen kaivon kenttä

Ensimmäinen vertailu tehtiin kymmenen kaivon kentälle, joka on esitetty kuvassa 21. Optimoinnin perusteella kentän maksimaaliseksi maakuormaksi saatiin 233,779 MWh/v. Kuva 22 esittää lämmönkeruunesteen keskilämpötilaa g-funktioihin perustuvassa simulaatiossa, jossa maakuormana käytettiin edellä mainittua maksimaalista kuormaa.

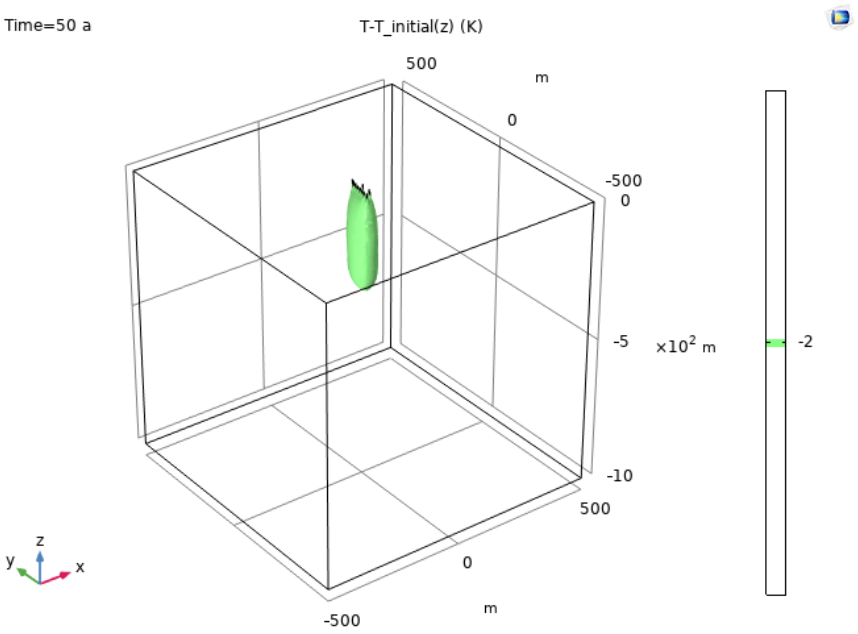


Kuva 21. *Kymmenen kaivon kenttä. Vasemmalla kaivot on esitetty maanpinnalle projisoituina ja oikealla kolmiulotteisessa näkymässä.*

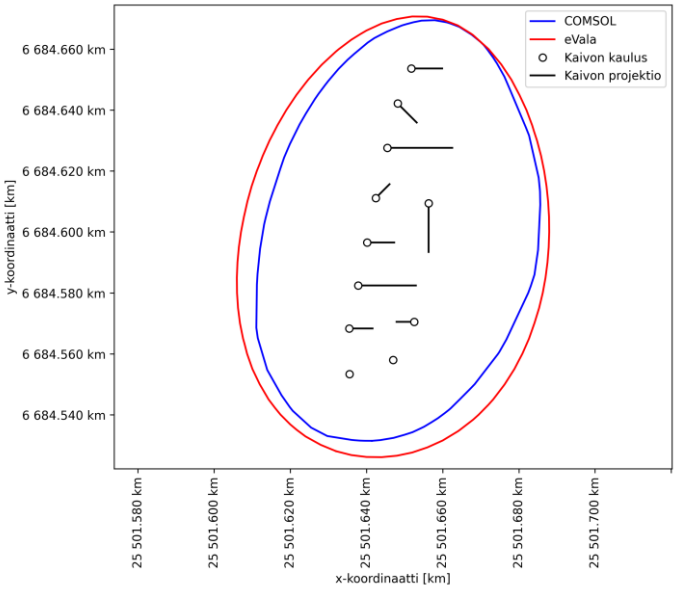


Kuva 22. *Lämmönkeruunesteen keskilämpötila kuvan 21 lämpökaivokentässä 50 vuoden aikana, kun kentän maakuormana käytetään optimoitua maksimaalista arvoa 233,779 MWh/v.*

Kuva 23 esittää COMSOL-simulaatiotuloksesta laskettua −2 asteen lämpötilapudotusta vastaavaa tasa-arvopintaa 50 vuotta lämmönoton aloittamisen jälkeen. Kuva 24 esittää kuvan 23 tasa-arvopinnan suurinta horisontaalista laajuutta sekä eValan arvioimaa −2 asteen lämpötilapudotuksen rintaman laajuutta 50 vuotta lämmönoton aloittamisen jälkeen.



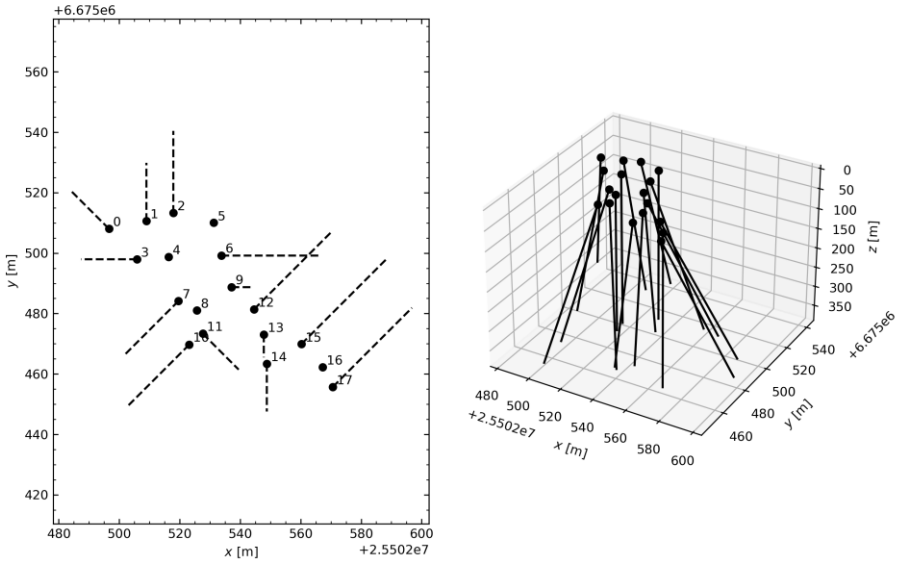
Kuva 23. *COMSOL-simulaatiotulos kuvan 21 kentälle kuvan 22 mukaisella maakuormalla. Vihreä pinta esittää tasa-arvopintaa, jolla lämpötilapudotus on −2 astetta.*



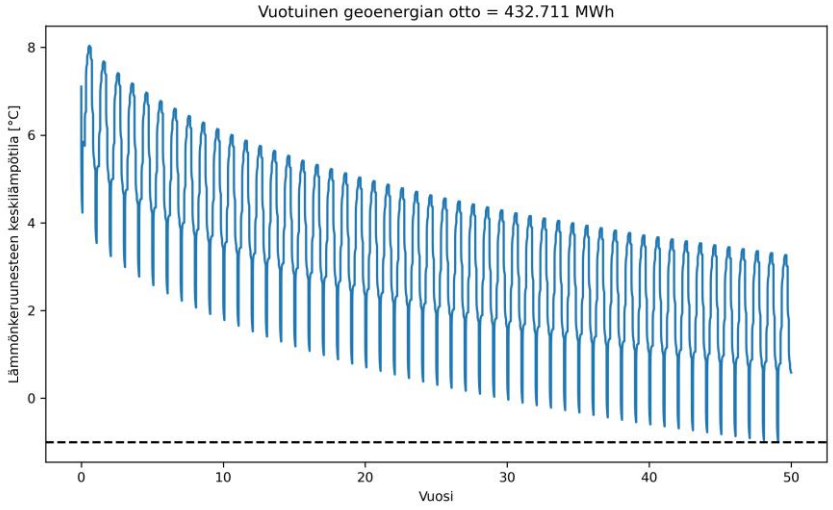
Kuva 24. *Tulosten vertailu kuvan 21 kentälle kuvan 22 mukaisella maakuormalla. Kuvassa esitetään lämpökaivot sekä eValalla ja COMSOL:illa arvioidut kahden asteen lämpötilan pudotuksen rintamat.*

4.2 Seitsemäntoista kaivon kenttä

Toinen vertailu tehtiin seitsemäntoista kaivon kentälle, joka on esitetty kuvassa 25. Optimoinnin perusteella kentän maksimaaliseksi maakuormaksi saatiin 432,711 MWh/v. Kuva 26 esittää lämmönkeruunesteen keskilämpötilaa g-funktioihin perustuvassa simulaatiossa, jossa maakuormana käytettiin edellä mainittua maksimaalista kuormaa.

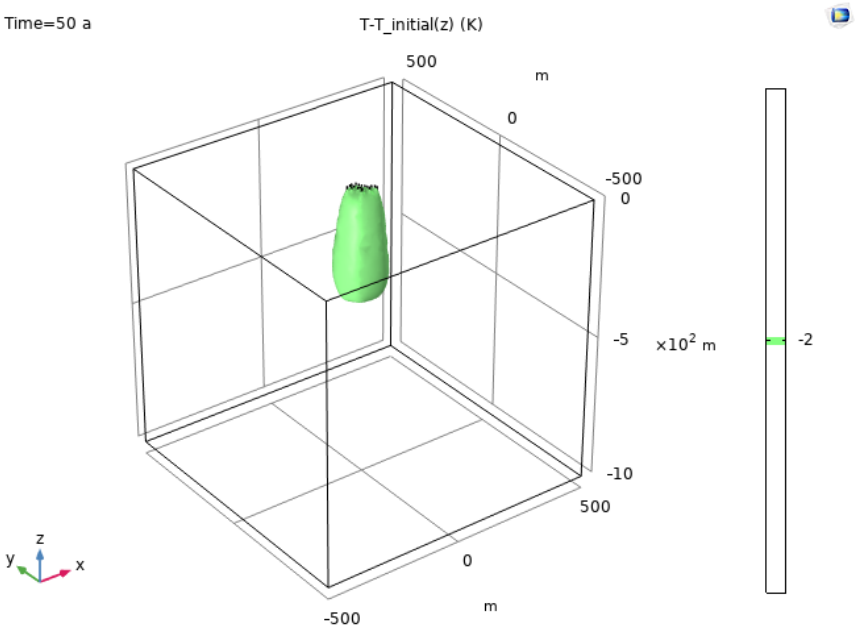


Kuva 25. *Seitsemäntoista kaivon kenttä. Vasemmalla kaivot on esitetty maanpinnalle projisoituina ja oikealla kolmiulotteisessa näkymässä.*

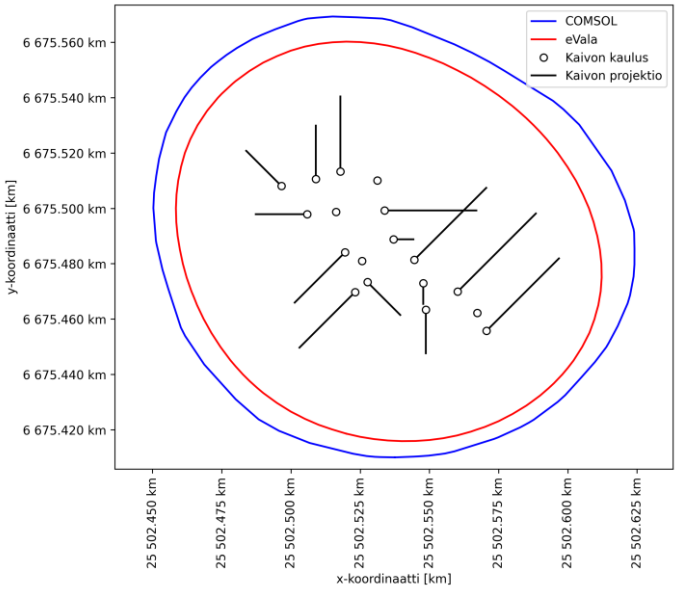


Kuva 26. *Lämmönkeruunesteen keskilämpötila kuvan 25 lämpökaivokentässä 50 vuoden aikana, kun kentän maakuormana käytetään optimoitua maksimaalista arvoa 432,711 MWh/v.*

Kuva 27 esittää COMSOL-simulaatiotuloksesta laskettua −2 asteen lämpötilapudotusta vastaavaa tasa-arvopintaa 50 vuotta lämmönoton aloittamisen jälkeen. Kuva 28 esittää kuvan 27 tasa-arvopinnan suurinta horisontaalista laajuutta sekä eValan arvioimaa −2 asteen lämpötilapudotuksen rintaman laajuutta 50 vuotta lämmönoton aloittamisen jälkeen.



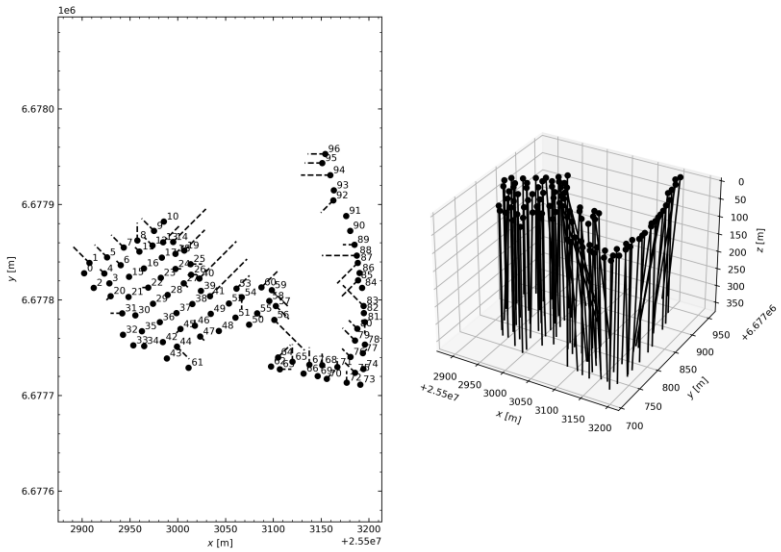
Kuva 27. *COMSOL-simulaatiotulos kuvan 25 kentälle kuvan 26 mukaisella maakuormalla. Vihreä pinta esittää tasa-arvopintaa, jolla lämpötilapudotus on −2 astetta.*



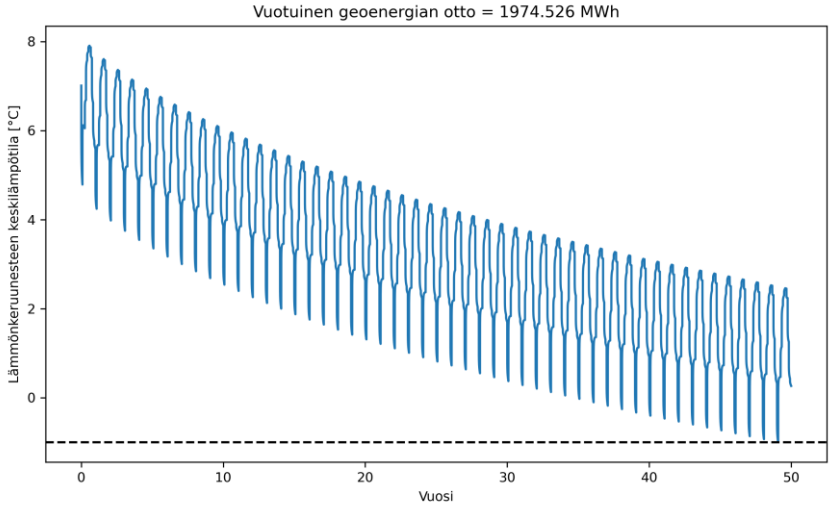
Kuva 28. *Tulosten vertailu kuvan 25 kentälle kuvan 26 mukaisella maakuormalla. Kuvassa esitetään lämpökaivot sekä eValalla ja COMSOL:illa arvioidut kahden asteen lämpötilan pudotuksen rintamat.*

4.3 Yhdeksänkymmentäseitsemän kaivon kenttä

Kolmas vertailu tehtiin yhdeksänkymmentäseitsemän kaivon kentälle, joka on esitetty kuvassa 29. Optimoinnin perusteella kentän maksimaaliseksi maakuormaksi saatiin 1974,526 MWh/v. Kuva 30 esittää lämmönkeruunesteen keskilämpötilaa g-funktioihin perustuvassa simulaatiossa, jossa maakuormana käytettiin edellä mainittua maksimaalista kuormaa.

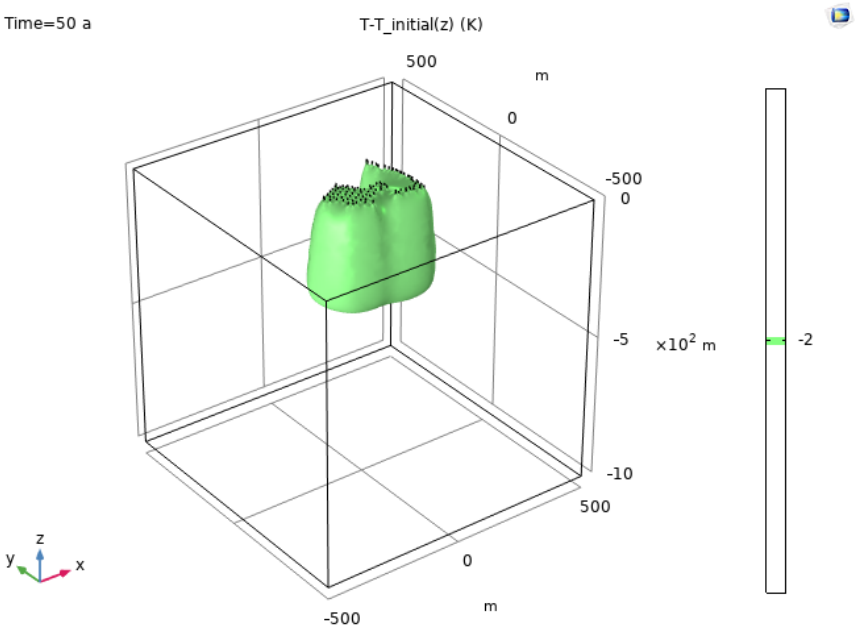


Kuva 29. Yhdeksänkymmentäseitsemän *kaivon kenttä. Vasemmalla kaivot on esitetty maanpinnalle projisoituina ja oikealla kolmiulotteisessa näkymässä.*

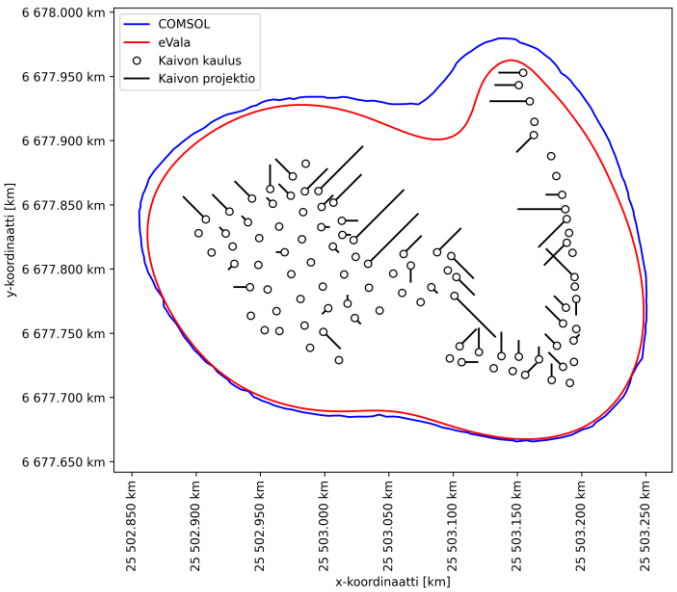


Kuva 30. *Lämmönkeruunesteen keskilämpötila kuvan 29 lämpökaivokentässä 50 vuoden aikana, kun kentän maakuormana käytetään optimoitua maksimaalista arvoa 1974,526 MWh/v.*

Kuva 31 esittää COMSOL-simulaatiotuloksesta laskettua −2 asteen lämpötilapudotusta vastaavaa tasa-arvopintaa 50 vuotta lämmönoton aloittamisen jälkeen. Kuva 32 esittää kuvan 31 tasa-arvopinnan suurinta horisontaalista laajuutta sekä eValan arvioimaa −2 asteen lämpötilapudotuksen rintaman laajuutta 50 vuotta lämmönoton aloittamisen jälkeen.



Kuva 31. *COMSOL-simulaatiotulos kuvan 29 kentälle kuvan 30 mukaisella maakuormalla. Vihreä pinta esittää tasa-arvopintaa, jolla lämpötilapudotus on −2 astetta.*



Kuva 32. *Tulosten vertailu kuvan 29 kentälle kuvan 30 mukaisella maakuormalla. Kuvassa esitetään lämpökaivot sekä eValalla ja COMSOL:illa arvioidut kahden asteen lämpötilan pudotuksen rintamat.*

4.4 Yhteenveto

eValan laskentatuloksia verrattiin COMSOL-ohjelmistolla tehtyihin laskuihin kolmen esimerkkikentän tapauksessa. Vertailun perusteella eValan ja COMSOL-ohjelmiston laskemat −2 asteen lämpötilan pudotuksen alueet ovat samaa suuruusluokkaa, vaikka mallien välillä esiintyy odotetusti eroja. Erot johtuvat eValan käyttämän laskentamallin yksinkertaistuksista, kuten oletuksista homogeenisesta ja isotrooppisesta maankamarasta, äärettömistä viivalähteistä sekä kaivojen pystysuoruudesta. Yksinkertaistukset ovat tarpeen nopean laskennan mahdollistamiseksi.

Tulosten perusteella eVala soveltuu lämpökaivokentän vaikutusalueen arviointiin lupamenettelyn tarpeisiin. Tuloksia tulee kuitenkin pitää vaikutusaluearvioina, ei yksityiskohtaisina fysikaalisina simulaatiotuloksina. Esitettyjen vertailutapausten perusteella eVala ei systemaattisesti yliarvioi −2 asteen lämpötilan pudotusalueen laajuutta.

5 KOORDINAATTIMUUNNOS

5.1 Teoria

Kun kaivokenttiä suunnitellaan CAD-ohjelmistoilla, kaivojen koordinaatit ilmaistaan usein paikallisessa suunnittelukoordinaatistossa. eVala kuitenkin olettaa koordinaattien olevan annettu Helsingin kaupungin käyttämässä ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmässä (EPSG:3879), jotta ne pystytään sijoittamaan oikeille paikoilleen Helsingin alueelle. Tällöin vaaditaan koordinaattimuunnos suunnittelukoordinaatistosta ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmään.

Kaivojen koordinaattien muuntaminen suunnittelukoordinaatistosta ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmään voidaan tehdä kaksiulotteisella Helmert-tasomuunnoksella, joka on matriisiyhtälönä ilmaistuna

$$\begin{bmatrix} E \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + s \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{10}$$

jossa E ja N ovat itä- ja pohjoiskoordinaatit (Easting ja Northing) ETRS-GK25-järjestelmässä, x ja y ovat koordinaatit suunnittelukoordinaatistossa, t_x ja t_y ovat siirtoparametrit, s on skaalaustekijä ja ϕ on kiertokulma. Yhtälö (10) voidaan kertoa auki, jolloin sille saadaan neliparametrinen muoto

$$\begin{cases} E = a + cx - dy & \text{(11a)} \\ N = b + dx + cy & \text{(11b)} \end{cases}$$

jonka parametrit ovat $a = t_x$, $b = t_y$, $c = s\cos\phi$ ja $d = s\sin\phi$.

Parametrit a, b, c ja d voidaan ratkaista kolmen vastinpisteen $(x_i, y_i) \Leftrightarrow (E_i, N_i)$ avulla. Kaavojen (11a) ja (11b) tulee toteutua kaikille kolmelle vastinpisteelle yhtäaikaisesti, jolloin ratkaistavaksi tulee yhtälöryhmä

$$\begin{cases} E_1 = a + cx_1 - dy_1 & \text{(12a)} \\ N_1 = b + dx_1 + cy_1 & \text{(12b)} \\ E_2 = a + cx_2 - dy_2 & \text{(12c)} \\ N_2 = b + dx_2 + cy_2 & \text{(12d)} \\ E_3 = a + cx_3 - dy_3 & \text{(12e)} \\ N_3 = b + dx_3 + cy_3 & \text{(12f)} \end{cases}$$

joka voidaan kirjoittaa matriisiyhtälöksi

$$\overbrace{\begin{bmatrix} E_1 \\ N_1 \\ E_2 \\ N_2 \\ E_3 \\ N_3 \end{bmatrix}}^{L} = \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 & -y_1 \\ 0 & 1 & y_1 & x_1 \\ 1 & 0 & x_2 & -y_2 \\ 0 & 1 & y_2 & x_2 \\ 1 & 0 & x_3 & -y_3 \\ 0 & 1 & y_3 & x_3 \end{bmatrix}}^{A} \cdot \overbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}}^{p} \tag{13}$$

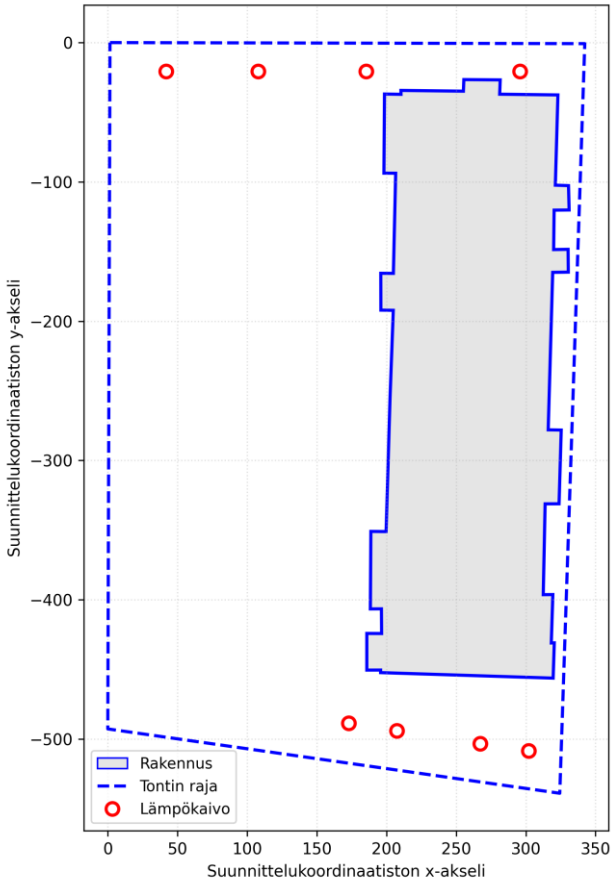
jolloin parametreille p saadaan ratkaisuksi

$$p = (A^T A)^{-1} A^T \cdot L \tag{14}$$

Edellä esitetyt kaavat on johdettu kolmelle vastinpisteelle. Kolmea pistettä käytettäessä matriisiyhtälön (13) ratkaisu tehdään pienimmän neliösumman menetelmällä, kaavalla (14), koska lineaarinen yhtälöryhmä, kaavat (12a) – (12f), on ylimäärätty. Mitä enemmän pisteitä käytetään, sitä vähemmän silmämääräisesti arvioitujen pisteiden koordinaattivirheet vaikuttavat ratkaistuihin muunnosparametreihin. Matriisiyhtälö (13) voidaankin yleistää mielivaltaiselle määrälle vastinpisteitä, jolloin muunnosvirhettä voidaan pienentää käyttämällä useampaa pistettä.

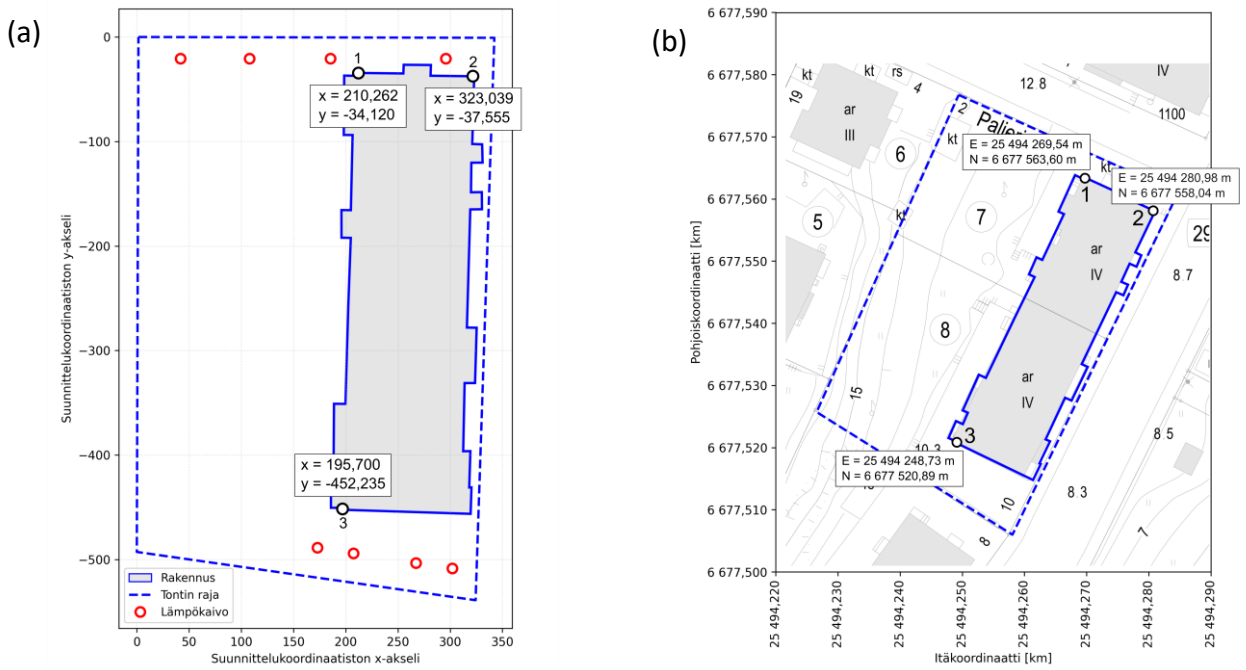
5.2 Esimerkki

Kuvassa 33 on esimerkki suunnittelukoordinaatistossa esitetystä rakennuksesta ja sen ympärille suunnitellusta lämpökaivokentästä.



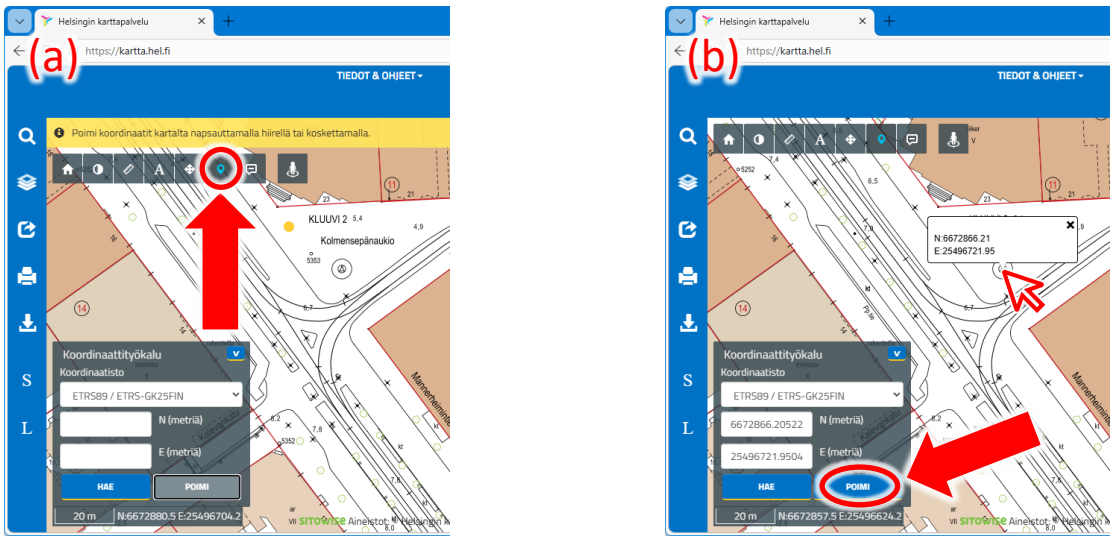
Kuva 33. *Esimerkkirakennus ja sen ympärille suunniteltu lämpökaivokenttä suunnittelukoordinaatistossa.*

Jotta muunnoksen parametrit voitaisiin ratkaista, tarvitaan kolme pistettä sekä suunnittelukoordinaatistossa että ETRS-GK25-koordinaatistossa. Kuva 34a esittää kolmea pistettä suunnittelukoordinaatistossa. Kuva 34b esittää näiden pisteiden ETRS-GK25-koordinaatteja, jotka on arvioitu käyttäen Helsingin kaupungin karttapalvelua (https://kartta.hel.fi). Pisteet on valittu sellaisista paikoista, joihin on helppo kohdentaa osoitin molemmissa koordinaatistoissa.



Kuva 34. *Kolmen vastinpisteen määrittely. (a) Kolme pistetä suunnittelukoordinaatistossa. (b) Samojen pisteiden ETRS-GK25-koordinaatit.*

Pisteiden koordinaatit Helsingin kaupungin käyttämässä ETRS-GK25-koordinaatistossa voidaan arvioida käyttämällä Helsingin kaupungin karttapalvelun koordinaattityökalua (kuva 35).



Kuva 35. *Pisteen koordinaattien arviointi Helsingin karttapalvelun avulla. (a) Aktivoidaan Koordinaattityökalu klikkaamalla nuolen osoittamaa työkalupalkin ikonia, jolloin Koordinaattityökalu avautuu. (b) Haetaan piste karttanäkymään, käynnistetään koordinaattien poiminta klikkaamalla Poimi-nappia, viedään osoitin pisteeseen ja klikataan, jolloin pisteen koordinaatit tulevat näkyviin.*

Kun vastinpisteet on määritetty, voidaan parametrit ratkaista Excel-kaavalla (koodi 1) kuvan 36 mukaisesti.

```
=LET(
    A;VSTACK(
        HSTACK(1;0;A3;-B3);
        HSTACK(0;1;B3;A3);
        HSTACK(1;0;A4;-B4);
        HSTACK(0;1;B4;A4);
        HSTACK(1;0;A5;-B5);
        HSTACK(0;1;B5;A5)
    );
    L;VSTACK(C3;D3;C4;D4;C5;D5); MMULT(MINVERSE(MMULT(TRANSPOSE(A);A));MMULT(TRANSPOSE(A);L))
)
```

Koodi 1. *Excel kaava kaksiulotteisen Helmert-muunnoksen parametrien ratkaisemiseksi. Huom. Funktioargumenttien erotin määräytyy Excelissä Windowsin erotinasetusten perusteella. Suomen oletusasetuksilla erotin on puolipiste, mutta käytössä voi myös olla pilkku. Jos kaava ei toimi sellaisenaan, kokeile vaihtaa kaavan puolipisteet pilkuiksi.*

	A	B	C	D
1	Paikallinen		ETRS-GK25FIN	
2	x [m]	y [m]	E [m]	N [m]
3	210,262	-34,120	25 494 269,54	6 677 563,60
4	323,039	-37,555	25 494 280,98	6 677 558,04
5	195,700	-452,235	25 494 248,73	6 677 520,89
6				
7	a	25494249		
8	b	6677577		
9	c	0,103693		
10	d	-0,04604		

Kuva 36. *Helmert-muunnoksen parametrien ratkaiseminen Excelissä. Koodin 1 kaava on kopioitu taulukon soluun B7.*

Koodi 2 esittää Helmert-muunnoksen parametrien ratkaisemista Python-kielisen skriptin avulla.

```
import numpy as np

# Paikallinen koordinaatisto
x1, y1 = 210.262, -34.120
x2, y2 = 323.039, -37.555
x3, y3 = 195.700, -452.235

# ETRS-GK25-koordinaatisto
E1, N1 = 25494269.54, 6677563.60
E2, N2 = 25494280.98, 6677558.04
E3, N3 = 25494248.73, 6677520.89

A = np.array([
    [1, 0,  x1, -y1],
    [0, 1,  y1,  x1],
    [1, 0,  x2, -y2],
    [0, 1,  y2,  x2],
    [1, 0,  x3, -y3],
    [0, 1,  y3,  x3],
])

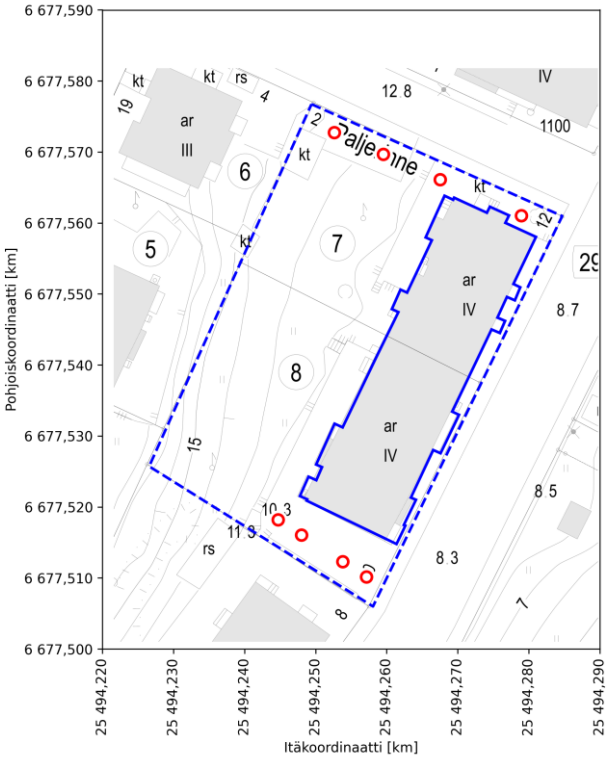
L = np.array([E1, N1, E2, N2, E3, N3])

a, b, c, d = np.dot(np.linalg.pinv(A), L)

print(f"a = {a:,.2f}")
print(f"b = {b:,.2f}")
print(f"c = {c:.6f}")
print(f"d = {d:.6f}")
```

Koodi 2. *Kaksiulotteisen Helmert-muunnoksen parametrien ratkaiseminen Python-skriptillä*

Kun muunnoksen parametrit on ratkaistu, voidaan suunnittelukoordinaatistossa ilmaistut lämpökaivot muuntaa ETRS-GK25-koordinaatistoon (kuva 37). Muunnos tehdään kaavoilla (11a) ja (11b).



Kuva 37. *Suunnittelukoordinaatistosta ETRS-GK25-koordinaatistoon muunnettu lämpökaivokenttä.*

6 KIRJALLISUUSVIITTEET

Bayer, P., de Paly, M., and Beck, M., 2014. Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling. Applied Energy, 136, pp. 445–453.

Cimmino, M., 2018. pygfunction: an open-source toolbox for the evaluation of thermal response factors for geothermal borehole fields. In Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA Canada, Montreal, pp. 492–501.

Eklöf, C., and Gehlin, S., 1996. TED – A Mobile Equipment for Thermal Response Test – Testing and Evaluation. Master's Thesis, Luleå University of Technology, 62 p.

Gil, A.G., Schneider, E.A.G., Moreno, M.M., and Cerezal, J.C.S., 2022. Shallow Geothermal Energy – Theory and Application. Springer Nature, 344 p.

Kallio, J., Korhonen, K., Wennerström, M., Sallasmaa, O. ja Witick, I., 2019. Helsingin geoenergiapotentiaali. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:25, Helsingin kaupunki, 97 s.