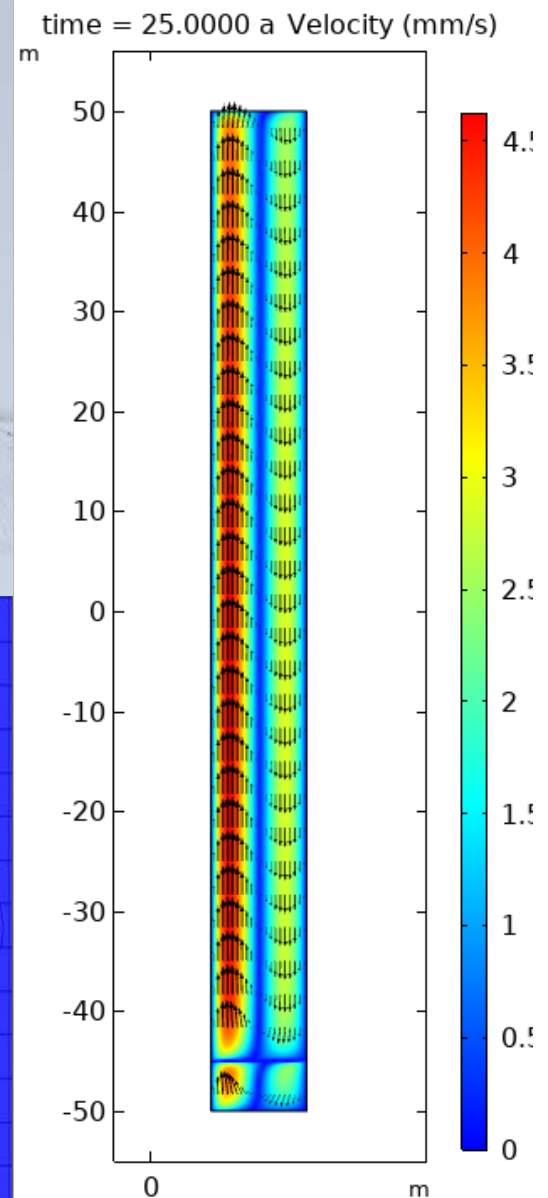
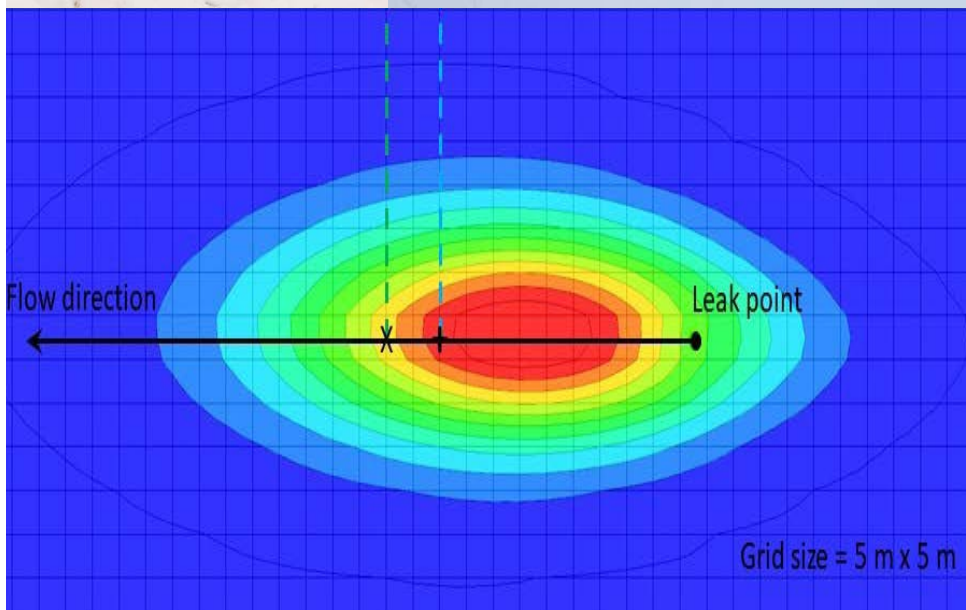


# Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu

Teppo Arola, Samrit Luoma, Kimmo Korhonen, Jaana Jarva, Nina Leppäharju ja  
Markku Hagström

## GTK:n tutkimustyöraportti 17/2021



Teppo Arola, Samrit Luoma, Kimmo Korhonen, Jaana Jarva, Nina Leppäharju ja Markku Hagström

## **Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu**

Ne kuvat, joissa ei mainita tekijää, ovat julkaisun kirjoittajien tekemiä.

Kannen kuvat: Samrit Luoma, Kimmo Korhonen, Ilkka Martinkauppi ja Teppo Arola, GTK.

Taitto: Elvi Turtiainen Oy

Espoo 2021

**Arola, T., Luoma, S., Korhonen, K., Jarva, J., Leppäharju, N. & Hagström, M. 2021.**  
Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 17/2021*, 33 sivua, 19 kuvaa ja 3 taulukkoa.

Tässä raportissa tarkastellaan ympäristöriskejä, jotka liittyvät energiakaivon asennus- ja käyttövaiheeseen. Riskejä on tarkasteltu sekä kvantitatiivisesti että kvalitatiivisesti. Riskejä arvioidaan kahdessa vaiheessa: energiakaivon porauksen aikana ja geoenergisysteemin käytön aikana.

Riskitarkastelun perusteella energiakaivo tai -kaivot eivät muodosta hallitsematonta ympäristöriskiä, kun energiakaivot asennetaan asianmukaisesti ja käytönaikaiset riskit tiedotetaan jo suunnitteluvaiheessa ja niihin varaudutaan. Kaikkiin todettuihin riskitapahtumiin on olemassa teknisiä ja toiminnallisia riskien vähentämis- ja hallitsemismahdollisuuksia. Lisäksi riskit toteutuessaankin ovat paikallisia ja pienialaisia. Näin ollen energiakaivojen nykyiseen lupamenettelyyn ei tämän tutkimuksen perusteella todettu muutostarpeita. Alueelisiin eroihin lupamenettelyssä tulisi kuitenkin kiinnittää huomiota ja mahdollisuuksien mukaan yhtenäistää menettelyt eri kuntien ja alueiden välillä.

Suurimmat riskit liittyvät kaivon porausvaiheeseen ja siinä polttoaineena käytettävän diesel- tai kevyen polttoöljyn mahdollisiin pintamaavuotoihin. Energiakaivoissa käytetyn lämmönsiirtonesteen ei tässä raportissa tehtyjen laskentojen perusteella todettu leviävän missään 16 mallinnusskenaariossa 60 m:ä pidemmälle vuotopaikasta pohjaveden virtaussuunnassa. Mahdollisessa vuototilanteessa tapahtuvan lämmönsiirtonesteen leviämisen lisäksi tässä tutkimuksessa mallinnettiin suolaisen veden sekoittumista maaperän pohjaveteen. Tehdyssä mallinnuslaskelmassa suolaisen veden ei todettu sekoittuvan makeaan veteen energiakaivon käytön aikana.

Energiakaivot asennetaan maakerrosten läpi kallioon. Maakerrokseen asennetaan suojaputki, joka kiinnitetään ja tiivistetään kallioon. Suojaputki tulee aina asentaa riittävän pitkältä osalta ehjään kallioon, jossa ei todeta ruhjeita tai muita heikkouksrakenteita kallion pinnassa. Kallion rikkonaisuus voi vaihdella merkittävästi kohdekohtaisesti ja suojaputken riittävä kiinnityssyvyys tulee selvittää kaivokohtaisesti. Erityisesti pohjavesialueilla tulee huolehtia, että maa- ja kallioperän väliin tehtävä suojaus on ehdottoman riittävä ja asianmukaisesti tehty. Suojaputken kallioon asennuksella ja tiivistämisellä pyritään estämään maaperän vesien ja hienoaineksen pääseminen energiakaivoon, mutta myös kallioperässä olevan veden pääsy maaperään ja sekoittuminen maaperän pohjaveteen.

Riskitarkastelun perusteella ei ole tarpeen antaa uusia rajoitteita energiakaivojen asentamiselle ja käytölle pohjavesialueella. Ympäristöministeriön julkaisemassa oppaassa esitetty 500 m suojaetäisyys energiakaivojen ja pohjavedenottamon välissä on raportissa esitetyn mallinnuksen perusteella asianmukainen. Riskitarkastelussa ei todettu sellaisia riskejä, jotka yllä olevaa etäisyyttä vedenottamoille lukuun ottamatta rajoittaisivat energiakaivojen asentamista ja käyttöä pohjavesi- tai muulla ympäristönkannalta herkällä alueella.

Eri toimijoiden eli suunnittelijoiden, porareiden sekä rakennusvalvonta- ja ympäristöviranomaisen keskinäinen tiedonjako ja avoin keskustelu sujuvoittavat lupaprosessia ja edesauttavat energiakaivojen rakentamiseen ja käyttöön liittyvien riskien tunnistamista ja hallintaa. Erityisesti pohjavesialueilla tai muilla ympäristön kannalta herkällä alueilla toimittaessa suositellaan myös erillistä riskinhallintasuunnitelmaa ja sen toteuttamisen ulkopuolista valvontaa. Tässä raportissa annetaan myös suosituksia mm. energiakaivojen mitoittamiseen ja poraussoijan käsittelyyn.

Asiasanat: geoenergia, energiakaivo, ympäristöriskitarkastelu

*Teppo Arola, Samrit Luoma, Kimmo Korhonen, Jaana Jarva, Nina Leppäharju ja Markku Hagström*  
Geologian tutkimuskeskus  
PL 96  
02151 Espoo

Sähköposti: [teppo.arola@gtk.fi](mailto:teppo.arola@gtk.fi)

## SISÄLLYSLUETTELO

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | JOHDANTO.....                                                                     | 4  |
| 1.1   | Yleistä .....                                                                     | 4  |
| 1.2   | Geoenergiaan liittyvä ympäristölainsäädäntö.....                                  | 5  |
| 1.3   | Energiakaivon rakentaminen.....                                                   | 5  |
| 1.4   | Energiakaivon ja lämmönsiirtonesteen ympäristöriskeihin liittyviä julkaisuja..... | 6  |
| 1.5   | Suomen pohjavesiolosuhteista.....                                                 | 7  |
| 2     | ENERGIAKAIVON PORAUKSEN AIKAiset YMPÄRISTÖRISKIT .....                            | 9  |
| 2.1   | Lähteet.....                                                                      | 9  |
| 2.2   | Kulkeutumisreitit .....                                                           | 10 |
| 2.3   | Vastaanottajat ja riskien hallintatoimenpiteet.....                               | 12 |
| 2.4   | Lämmönsiirtonesteen leviäminen pohjavedessä -mallinnuslaskenta .....              | 13 |
| 2.4.1 | Laskennan perusteet .....                                                         | 13 |
| 2.4.2 | Lähtötiedot .....                                                                 | 13 |
| 2.4.3 | Tulokset ja tulkinta .....                                                        | 17 |
| 2.4.4 | Isopropanolin vertailu MIBK:iin .....                                             | 19 |
| 2.4.5 | Mallinnuksen rajoitukset.....                                                     | 20 |
| 2.4.6 | Kulkeutumismallinnuksen johtopäätökset.....                                       | 20 |
| 3     | ENERGIAKAIVON KÄYTÖN AIKAiset YMPÄRISTÖRISKIT .....                               | 21 |
| 3.1   | Lähteet.....                                                                      | 21 |
| 3.2   | Kulkeutumisreitit .....                                                           | 22 |
| 3.3   | Suolaisen pohjaveden sekoittuminen energiakaivossa .....                          | 23 |
| 3.3.1 | Laskennan lähtökohdat.....                                                        | 23 |
| 3.3.2 | Mallinnus ja simulointi.....                                                      | 23 |
| 3.3.3 | Tulokset .....                                                                    | 25 |
| 3.3.4 | Mallin rajoitukset .....                                                          | 26 |
| 3.4   | Vastaanottajat ja riskinhallintatoimenpiteet.....                                 | 28 |
| 4     | ENERGIAKAIVON SULKEMINEN .....                                                    | 29 |
| 5     | PORAUSJÄTTEEN LUOKITTELU.....                                                     | 29 |
| 6     | YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....                                                | 30 |
| 7     | SUOSITUKSIA YMPÄRISTÖRISKIEN VÄHENTÄMISEKSI.....                                  | 31 |
|       | LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO .....                                              | 32 |

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Yleistä

Geoenergia on noussut viimeisen 20 vuoden aikana merkittäväksi uusiutuvan energian muodoksi Suomessa. Geoenergian nousua ovat vauhdittaneet energiakaivon porauksen kehitys kustannustehokkaaksi, kokemukseen ja tutkimukseen perustuvan teknisen tiedon laaja omaksuminen sekä lämpöpumppualan kehitys. Ala on kasvanut markkinoiden ohjaamana, jolloin alan tekninen kehitys on ollut tehokasta.

Energiakaivojen asentamiseen ja käyttöön liittyvä ympäristöasioiden osaaminen ja kehitys niin alan toimijoilla kuin ympäristöviranomaisillakaan ei ole edennyt samassa suhteessa kuin alan tekninen kehitys (Majuri ym. 2020). Näin ollen ympäristöasioiden ymmärtämisellä ja huomioimisella sekä ympäristöön kohdistuvien riskien hallinnalla on kokonaisvaltainen tarve.

Kaikissa geoenergiasysteemeissä pitää maankamaran lämpö saada siirrettyä nesteeseen tai päinvastoin, jotta energiaa voidaan hyödyntää. Yleisin geoenergian hyödyntämismuoto Suomessa on porata maaperän läpi kallioperään 200–400 m syvä energiakaivo, johon asennetaan suljetun kierron lämmönsiirtoputkistot. Lämmönsiirtoputkistoissa kiertää lämmönsiirtoneste, johon maa- ja kallioperästä kerättävä energia siirretään tai jonka mukana maaperään tai kallioon voidaan ladata energiaa. Koska lämmönsiirtonesteen lämpötila on lämmitysvaiheessa alhainen, normaalisti noin  $-2...+10$  °C, lämmönsiirtonesteestä hyödynnettävä lämpö on nostettava korkeammaksi, jotta sillä voidaan lämmittää rakennuksia. Tämä lämmön nosto toteutetaan lämpöpumpulla.

Tässä raportissa on esitetty ympäristöriskitarkastelu liittyen geoenergian hyödyntämiseen kallioon porattavista 200–400 m syvistä energiakaivoista. Raportti on tehty osana Business Finlandin rahoittamaa Smart Otaniemi -projekti-kokonaisuutta Novel integration of prosumers and hybrid energy system -pilotissa. Raportti kokoaa yhteen olemassa olevaa sekä Smart Otaniemi -projektissa tuotettua uutta tietoa geoenergian hyödyn-

tämiseen liittyvistä ympäristöriskeistä ja niiden hallintamenetelmistä. Raportti on myös tarkoitettu avuksi energiakaivojen porauslupien laatimiseen ja niiden viranomaiskäsitelyyn. Raportissa on arvioitu energiakaivon porauksessa syntyvän porausjätteen jäteluonnetta. Lisäksi raportissa on tarkasteltu energiakaivon poistamiseen liittyviä mahdollisia ympäristöriskejä.

Raportin kirjoitushetkellä geoenergiakohteen lupamenettely tapahtuu maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999, MRL) 126 §:n mukaisen toimenpideluvan (vanhan lämmitysjärjestelmän vaihtaminen maalämpöjärjestelmäksi) tai 125 §:n mukaisen rakennusluvan (uuden rakennuksen lämmitysjärjestelmän rakentaminen) kautta. Kunta voi myös ohjata maalämpöjärjestelmien rakentamista rakennusjärjestyksen tai asemakaavan avulla ja soveltaa lupien sijaan ilmoitusmenettelyä (Juvonen & Lapinlampi 2013). Pohjavesialueilla lämpökaivon rakentaminen saattaa vaatia vesilain (587/2011, VL) 3 luvun 2 §:n 1 momentin mukaisen vesitalousluvan. Tässä raportissa annetaan lupaviranomaisille suosituksia hyvistä käytännöistä ja näkemyksiä siitä, mitä maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) mukaista rakennus- tai toimenpidelupaa käsitellessä tulisi ottaa huomioon.

Tämän raportin ympäristöriskitarkastelu perustuu sekä kvantitatiiviseen että kvalitatiiviseen arviointiin. Kvantitatiivisesti mallinnettiin kahta riskiskenaariota: lämmönsiirtonesteen vuotamista ja kulkeutumista pohjavedessä sekä suolaisen veden sekoittumista energiakaivossa. Muut raportissa esitetyt riskinarvioinnit ovat kvalitatiivisia. Riskejä arvioidaan kahdessa vaiheessa: energiakaivon porauksen aikana ja geoenergiasysteemin käytön aikana. Arviointi tehdään lähteet-kulkeutumisreitit-vastaanottajat-tarkasteluna.

Julkaisun tekemisestä on vastannut FT Teppo Arola. Julkaisun kirjoittamiseen ja mallintamiseen ovat osallistuneet FT Samrit Luoma, DI Kimmo Korhonen, FT Jaana Jarva, TkT Markku Hagström ja FM Nina Leppäharju. Tämä raportti on esitetty ja

hyväksytty BF Smart Otaniemi –projektin ohjausryhmässä ennen sen julkaisemista.

Tekijät esittävät kiitokset seuraaville henkilöille, joista oli merkittävää asiantuntija-apua raportin laatimisessa: Kristian Dahlbom / Kaivonporaus Dahlbom Oy, Heli Keurulainen ja Katja Raatikainen

/ Altia Oyj, Kari Kauppila / EnersysCM Oy, Jimmy Kronberg / Saariston Kaivonporaus Oy, Taina Nysten ja Sirkku Tuominen / Suomen ympäristökeskus, Timo Rajala / Poratek ry, Esko Tuomala / Talman Energiaporaus Oy ja Sami Vallin, GTK.

## 1.2 Geoenergiaan liittyvä ympäristölainsäädäntö

Geoenergian hyödyntämislaitosta ei ole listattu EU:n teollisuuspäästädirektiivin (2010/75/EU) liitteen 1 mukaiseksi direktiivilaitokseksi eikä geoenergian tuotantoa ympäristönsuojelulain (527/2014, YSL) liitteessä 1 tai valtioneuvoston asetuksessa ympäristönsuojelusta (713/2014) kuvatuksi ympäristöluvanvaraiseksi toiminnaksi. Geoenergian tuotantoa varten ei ole laadittu EU-tasolla parhaan käyttökelpoisen tekniikan ns. BAT- tai BREF-dokumentaatiota. Geoenergian tuotantolaitokset eivät myöskään sisälly ympäristövaikutusten arviointimenettelystä annetun lain (252/2017, YVA-laki) liitteessä 1 olevan hankeluettelon piiriin, eivätkä ne näin ollen automaattisesti edellytä ympäristövaikutusten arviointimenettelyä.

Nykyllä lainsäädännöllä geoenergian tuotantoa ei ole katsottu ympäristölle vaaraa tai haittaa aiheuttavaksi, ympäristöluvanvaraiseksi toiminnaksi. Tämä ei kuitenkaan poista toiminnanharjoittajan vastuita ja velvollisuutta olla selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista, ympäristöriskeistä ja niiden hallinnasta sekä haitallisten vaikutusten vähentämismahdollisuuksista (YSL 6 § Selvillä olovelvollisuus). Mahdollisiin ympäristövaikutuksiin on kiinnitettävä erityistä huomiota rakennus- tai toimenpidelupaa haattaessa ja lupaa myönnettäessä. Vesilain mukaan vesitaloushankkeelle on oltava aluehallintoviranomaisen lupa, mikäli se voi muuttaa pohjaveden laatua tai määrää, ja tämä muutos voi aiheuttaa pohjavesiesiintymän tilan huononemista tai olennaisesti vähentää tär-

keän tai muun vedenhankintakäyttöön soveltuvan pohjavesiesiintymän antoisuutta tai muutoin huonontaa sen käyttökelpoisuutta taikka muulla tavalla aiheuttaa vahinkoa tai haittaa vedenotolle tai veden käytölle talousvetenä (VL 3:2 §). Mikäli suunniteltu geoenergiakohte sijaitsee vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä annetun lain (1299/2004) 2 a luvussa tarkoitettulla 1- tai 2-luokan pohjavesialueella, vesilain mukaisen lupatarpeen arvioinnista tulee pyytää lausunto kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselta. Kunta voi tarvittaessa pyytää ELY-keskuksen lausunnon lupatarpeesta. Vesilupa haetaan aluehallintovirastosta (AVI). Alueellisena valvontaviranomaisena ELY-keskus voi myös vaatia vesiluvan hakemista, vaikka kunta ei tätä olisi toiminnanharjoittajalta edellyttänyt.

Energiakaivojen rakentamiseen liittyvien lupien myöntämisessä on Suomessa merkittäviä alueellisia eroja, erityisesti ympäristönsuojelun näkökannalta (Majuri 2020). Geoenergiakohteiden lupien käsittely vaatisi lainsäädännön selkeyttämistä sekä nykyistä vahvempaa ja monipuolisempaa viranomaisosaamista, yhteistyötä eri toimijoiden välillä ja viranomaistyön resursointia. Lainsäädännöllisesti tärkeitä asioita ovat erityisesti pohjavesikysymykset. Suomessa ei myöskään ole voimassa säädöksiä, joilla ohjattaisiin energiakaivon rakentamismenetelmiä, tai säädöksiä, jotka liittyisivät energiakaivon suunnittelijoiden tai tekijöiden pätevyysvaatimuksiin. Tehtyjen tutkimusten perusteella (Majuri 2020) näille säädöksille näyttäisi olevan tarvetta.

## 1.3 Energiakaivon rakentaminen

Tässä raportissa on esitetty tiivistetysti energiakaivon rakennus. Tarkempi kuvaus ja energiakaivon rakennustapaselostus leikkauskuvineen on saatavilla veloitusetta esimerkiksi Poratek ry:ltä (<http://poratek.fi/normikaivot-ja-poraukset/normienergiakaivo-17/>)

Energiakaivo tehdään porakoneella (kuva 1). Useimmiten porausreiän halkaisija on 4,5 – 6,5 tuumaa. Reiän poraus aloitetaan maakerroksen

läpäisyllä kohteissa, joissa kallion päällä on irtainta maata. Maakerrosten läpi asennetaan useimmiten halkaisijaltaan 140 mm:n suojaputki, joka yleisen ohjeistuksen mukaisesti kiinnitetään ja tiivistetään kallioon vähintään 2 m:n matkalta. Pohjavesialueilla on suositeltu, että suojaputki upotetaan kallioon vähintään 6 metriä. Suojaputken kallioon asennuksella ja tiivistämisellä pyritään estämään maaperän vesien ja hienoaineksen pääseminen energiakaivoon

mutta myös kallioperässä olevan veden pääsy maaperään ja sekoittuminen maaperän pohjaveteen. Suojaputken asennuksen jälkeen porataan reikä suunnitellulle syvyydelle kallioon. Porauksen yhteydessä syntyvä hienoaines, ns. poraussoija, poistetaan reiästä ilmanpaineen avulla ja kerätään talteen sitä varten varattuun umpinaiseen keräyskonttiin. Tarvittava ilmanpaine tuotetaan kompressoreilla. Mikäli porauksessa käytetään huuhteluvettä, tulisi huuhteluveden olla puhdasta vesijohto- tai

kaivovettä. Syntyvä liete tulisi kerätä talteen kuivan poraussoijan tavoin. Poraussoijan raekoko on  $< 0,1-0,3$  mm. Reiän porauksen jälkeen sinne asennetaan lämmönsiirtoputkisto, joka täytetään lämmönsiirtonesteellä. Mikäli porakaivoon ei tule tarpeeksi vettä luonnostaan, se täytetään vedellä. Lopuksi kaivoon asennetaan suojahattu ja kaivo suojataan maanpäälliseltä muulta kulutukselta esim. erillisellä suojakaivolla.



Kuva 1. Energiakaivon porausta. Etualalla on porakone ja sen vieressä poraussoijan umpinainen keräyslava. Koneen takana, kuorma-auton lavalla on kompressorit. Kuva: Timo Rajala, TimFoto ystävällisellä luvalla.

#### 1.4 Energiakaivon ja lämmönsiirtonesteen ympäristöriskeihin liittyviä julkaisuja

Kallioon porattavien 200–400 m syvien energiakaivojen asennukseen, käyttöön ja poistamiseen liittyviä ympäristöriskejä ei ole aiemmin tarkasteltu kokonaisvaltaisesti Suomen kaltaisessa geologisessa ympäristössä. Turun yliopistossa julkaistussa väitöskirjassa (Majuri 2020) ja sen jälkeen julkaistussa tutkimuksessa (Majuri ym. 2020) on tarkasteltu geoenergiaprojektien vaatimien lupien käsittelyprosesseja ja viranomaiskäsittelyä. Geotermisen energian syväreikäporaamisen riskeistä julkaistiin selvitys vuonna 2019 (Uski & Pipponen 2019). Selvitys keskittyy syvien geotermisten reikien (esim.

2–7 km) poraus- ja energiasysteemin seismisen tehostamisvaiheen riskeihin, eikä selvitystä siten voida käyttää eri lämmönsiirtotekniikkaa hyödyntävään matalien energiakaivojen riskitarkasteluun. Suomen ympäristökeskus on julkaissut vuonna 2013 Energiakaivo-opiaan (Juvonen & Lapinlampi 2013), jossa on kuvattu energiakaivon rakentamiseen liittyvä lainsäädäntö ja annettu ohjeistus turvallisesta energiakaivon rakentamisesta.

Ruotsissa tilanne on Suomen kaltainen: vaikka matalia energiakaivoja on porattu ja käytetty vuosikymmeniä, systemaattista tutkimusta niiden

ympäristöriskeistä ei juuri ole tehty. Andersson ja Gehlin (2018) ovat koonneet state-of-the-art-dokumentin Ruotsin porareikäjärjestelmien laadunhallinnasta niiden suunnittelussa, rakentamisessa ja käytössä. Raportissa on kuvailtu porareikäjärjestelmien ongelmakohtia kokemuspohjalta niiden elinkaaren eri vaiheissa ja sivuttu myös ympäristöriskejä. Samantyyppisen katsauksen Suomessa teki Majuri (2018) perustuen alan toimijoiden haastattelututkimukseen. Saksassa alan ympäristö- ja muihin riskeihin liittyvää tutkimusta on tehty laajemmin, koska siellä on sattunut merkittäviä vahinkotapahtumia tietyillä geologisesti ja hydrogeologisesti haastavilla alueilla (Fleuchaus & Blum 2017). Omaisuudelle (erityisesti rakennuksille) on tietyissä tapauksissa koitunut merkittäviä vahinkoja poraamisesta aiheutuneen maan kohoamisen, vajoamisen tai tulvimisen seurauksena. Pohjaveden laatuun vaikuttaneista vahingoista artikkeleissa ei kuitenkaan mainita konkreettisia esimerkkejä.

Dakhl ym. (2003) tutkivat metyyli-tert-butyylietterin (MTBE), etanolin, bentseenin ja muiden öljyhiilivetyjen käyttäytymistä ja kulkeutumista 2,3 m paksussa ja kuivassa alluviaalihiekkakerroksessa, jonka alla on pohjavettä sorakerroksessa. Haitta-aineiden imeytysjärjestelystä eli vuotokenaarioista riippuen kaikki liukoiset yhdisteet, mukaan lukien etanoli, virtasivat kuivan hiekkakerroksen läpi pohjavesikerrokseen 30–41 vrk:n aikana. Yli 99,6 % etanolista hävisi kuivasta hiekkakerroksesta ja katosi pohjavedestä biohajoamisen vuoksi. Etanolista ei todettu muodostuvan haittaa pohjavesivarastoille verrattuna muihin tutkittuihin aineisiin, kuten MTBE:hen, jota oli edelleen todettavissa merkittäviä pitoisuuksia kuivassa hiekassa kuuden kuukauden jälkeen vuodosta.

Zhang ym. (2006) tutkivat etanolin käyttäytymistä ja kulkeutumista hiekka- ja sora-akvifereissä 2,5 kuukauden seurannan ajan. Tulokset osoittivat, että etanoli hajosi nopeasti anaerobisten prosessien,

kuten käymisen ja metanogeneesin, vaikutuksesta. Etanoli ei kulkeutunut merkittävästi vuotokohtaa laajemmalle. Noin 97 % alkuperäisestä etanolista hajosi biologisesti kuukauden kuluttua. Etanolin arvioitun keskimääräisen puoliintumisajan todettiin olevan 2,2 päivää.

Spalding ym. (2011) raportoivat pitkäaikaisseurannan tuloksia E95:n (95 % etanolia, 5 % bensiniä) vuotoalueilta. Heidän lopputulemana oli, että etanolia ei todettu pohjavedessä. Korkeita etanolipitoisuuksia (1 %) ja bentseeniä todettiin pohjaveden kapillaarikerroksessa viiden vuoden vuotojen jälkeen. Tämä johtuu todennäköisesti etanolin säilymisestä öljyhiilivetyjen takia kapillaarikerroksessa.

Schmidt ym. (2016) ovat tutkineet lämpökaivoissa käytettävien kaupallisten lämmönsiirtonesteiden biohajoavuutta ja ekotoksisuutta. Heidän mukaansa kaupallisten lämmönsiirtonesteiden ekotoksisuus on huomattavasti suurempi kuin niiden sisältämien orgaanisten pääkomponenttien. Pohjavesien suojelemiseksi he suosittelivat ensisijaisesti puhtaan veden käyttämistä lämmönsiirtonesteinä, toissijaisesti puhtaiden glykolin, ilman lisäaineita. Toisaalta Struß ym. (2020) ovat tehneet numeerisia simulointeja, joiden perusteella lämmönsiirtonesteiden vuoto porareikästä pohjavedestä saatavan juomaveden tuotantoalueellakin on vain pieni riski, koska useimpien lämmönsiirtonesteiden komponenttien pitoisuudet ovat alle raja-arvojen jopa 100 metrin päässä vuotokohdasta. Varoetäisyys Saksassa on nykyisin 1 000 metriä. Zhu ym. (2017) nostivat esiin porareikäjärjestelmien termisen saastuttavuuden: lämpötilan muutokset maaperässä muuttavat mm. mikrobiaktiivisuutta, kemiallisten reaktioiden tasapainoja ja happitasapainoa, ja ne voivat esimerkiksi kylmillä seuduilla edistää kasvihuonekaasujen (metaanin ja typpioksiduulin) vapautumista maaperästä. Hekin toteavat kuitenkin tutkimustiedon vähyyden ja tarpeen perusteellisille tutkimuksille.

### 1.5 Suomen pohjavesiolosuhteista

Tässä riskitarkastelussa tarkoitetaan ilmaisulla ”pohjavesi” maaperässä virtaavaa pohjavettä, ellei toisin todeta. Suomessa lähes kaikki kunnalliset vedenottamot hyödyntävät maaperässä eli kallioperän päällä olevassa irtomaakerroksessa virtaavaa pohjavettä. Maaperä muodostuu erilaisista maalajeista, joita ovat savi, siltti, hiekka, sora, kivet ja moreeni. Maaperän pohjavesi muodostuu sadannan tai pintaveden imeytyessä maakerros-

ten läpi. Maaperän pohjavesi tulee erottaa kallioperässä virtaavasta pohjavedestä. Kallioperässäkin on ns. meteorista vettä, joka muodostuu sadannasta alueilla, joissa kallioperässä on rikkonaisuuksia. Meteorinen vesi virtaa kallioperän ruhjeissa ja rikkonaisuusvyöhykkeissä, ja se myös purkautuu rikkonaisuusalueilta esimerkiksi maaperään ja/tai pintavesistöön. Ehjä kallioperä pidättää vettä tehokkaasti. Usein kallioperän pohjavesi on erillinen



## 2 ENERGIKAIVON PORAUKSEN AIKAiset YMPÄRISTÖRISKIT

Energiakaivon porauksen aikaisia riskejä tarkastellaan seuraavassa sekä kvalitatiivisesti että yhtä erityisriskitapausta myös kvantitatiivisesti. Porauksen aikana riskit liittyvät porauksessa käytettäviin ympäristölle haitallisiin kemikaaleihin ja porauksen aikaisiin maanalaisten paineolojen muutoksiin. Erityisriskitapauskana on tarkasteltu lämmönsiirtonesteen vuotamista maahan hyvin vettä johtavalla alueella eli harjulla. Suomessa on satoja

öljytuotteilla pilaantuneita alueita, joista on tehty laadukkaita riskimallinnuslaskelmia kunnostamisen tueksi (esim. Pyy ym. 2013, Pyy & Jylhä 2020). Näin ollen öljyhiilivetyjen kulkeutuminen erilaisissa geologisissa ympäristöissä tunnetaan erittäin hyvin ja siihen ei tässä raportissa keskitytä perusteita ja aiemmista mallinnoista tehtyjä yhteenvedoja enempää.

### 2.1 Lähteet

Energiakaivon porauksen aikana työmaalla on porakone, kompressorin ja usein myös noin 1 m<sup>3</sup>:n polttonestesäiliö, josta konetta ja kompressorin voidaan tankata työn aikana. Polttonestesäiliötä voidaan myös säilyttää muualla kuin porauspaikalla. Tällöin polttoneste siirretään työmaalle pienemmissä astioissa. Lisäksi kaivonporauksen jälkeen lämmönsiirtoputkistoihin asennetaan lämmönsiirtoneste.

Seuraavassa on esitetty yhdellä porakoneella tehtävään tyypillisen energiakaivon asennukseen liittyvien työmaalla käsiteltävien haitallisten aineiden määräarviot. Määräarviot perustuvat neljän eri energiakaivoihin erikoistuneiden porausfirmojen edustajien haastatteluun ja ne edustavat siten hyvin keskimääräistä energiakaivokohdetta.

Porakone:

- moottoriöljy (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>), ei biohajoava: n. 10 l
- hydraulikkaöljy (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>), biohajoava mahdollinen: n. 100 l
- hydraulikkaöljy (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>) vasarassa, biohajoava mahdollinen: n. 20 l
- kevyt polttoöljy (hiilivetyjakeet C<sub>10</sub>-C<sub>21</sub>): 80–100 l
- glykoli: n. 20 l.

Kompressorin:

- kompressorinöljy (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>): n. 200 l
- moottoriöljy (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>): n. 300 l
- kevyt polttoöljy (hiilivetyjakeet C<sub>10</sub>-C<sub>21</sub>): n. 1 000 l
- glykoli 50–100 l.

Lämmönsiirtoputkiston lämmönsiirtoneste\* (28 % etanoli, 0,8 % metyyli- isobutyliketoni\*\* (MIBK) ja 0,6 % metyylietyliketoni\*\* (MEK)):

- 200 m syvän energiakaivon lämmönsiirtimien (40 mm:n kollektoriputket ja 10–15 m:n vaaka-

asennus) lämmönsiirtonestemäärä on noin 430 l, joka sisältää etanolia 120,4 l, MIBK:a 3,44 l ja MEK:a 2,58 l.

- 300 m syvän energiakaivon lämmönsiirtonestemäärä on noin 630 l, joka sisältää etanolia 176,4 l, MIBK:a 5,04 l ja MEK:a 3,78 l.

\* Suomessa käytetään yleisimmin Altia Oyj:n valmistamia lämmönsiirtonesteitä. Perustuotteena on olemassa nestettä, joka ei sisällä korroosioinhibiittoriaineita (myyntinimi: Naturet Geosafe). Tämä riskitarkastelu on suoritettu Naturet Geosafe lämmönsiirtonesteellä.

\*\*MIBK ja MEK ovat denaturointiaineita.

Yhteen laskettuna yhdellä porakoneella tehtävässä energiakaivon asennuksessa on haitta-aineita läsnä kaiken kaikkiaan seuraavasti:

- voiteluöljytuotteet (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>), ei biohajoava: n. 500 l
- voiteluöljytuotteet (hiilivetyjakeet C<sub>22</sub>-C<sub>40</sub>), biohajoava mahdollinen: n. 120 l
- kevyt polttoöljy (hiilivetyjakeet C<sub>10</sub>-C<sub>21</sub>): n. 1 100 l
- glykoli: n. 50–100 l
- etanoli: 120–175 l
- MIBK: 3,5–5 l
- MEK: 2,5–4 l.

Muita ympäristön kannalta vaarallisia tai haitallisia aineita ei todettu käytettävän tyypillisessä energiakaivon asennuksessa.

Energiakaivot porataan pääasiassa ns. ilmahuuhtelutekniikalla, jolloin porareikään työnnetään ilmaa paineella. Ilma huuhtelee porauksen aikana syntyvän hienorakeisen kallioaineksen, ns. poraussoijan, pois reiästä. Periaatteessa on mahdollista myös käyttää vesihuuhtelua, jossa reikään työnnetään paineella puhdasta vesijohto- tai kaivovettä.

## 2.2 Kulkeutumisreitit

Haitta-aineita voi päästä maaperään lähinnä energiakaivon porauksen aikaisen onnettomuuden, huolimattomuuden tai koneiden rikkoutumisen seurauksena. Haitta-aineet voivat päästä vuotamaan porareikää ympäröivään maaperään pintavuotona. Pintavuodosta iso osa haihtuu ilmaan ja haihtuminen alkaa heti vuodon tapahduttua. Ainoastaan poravasaran kautta voiteluöljyä voi päästä vuotamaan suoraan porareikään.

Haitta-aineet leviävät veden välityksellä syvemmälle maaperään. Todetuista haitta-aineista kevyt polttoöljy ja voiteluöljytuotteet ovat heikosti veteen liukenevia ja heikosti maaerässä kulkeutuvia. Öljytuotteet myös hajoavat ajan kuluessa maaperässä ja sitoutuvat orgaaniseen materiaaliin. Kevyen polttoöljyn pääkomponentit eivät kulkeudu orgaanista ainesta sisältävässä maaperässä erityisen helposti, mutta vedellä kyllästyneessä sora- ja hiekka-alueella kulkeutuminen voi sen sijaan olla huomattavaa. Voiteluöljy on maaperässä hyvin pysyvää. Savikkoalueilla maaperässä olevat rakennelmat, kuten viemäri-, kaapeli- ja vesijohtokaivannot, mahdollistavat veden ja myös haitta-aineiden kulkeutumisen laajemmalle horisontaalisuunnassa. Muutoin savi pidättää veden ja haitta-aineiden kulkeutumista maaperässä vertikaali- ja horisontaalisuunnassa. Savialueilla todetaankin haitta-ainevuodon jäljiltä usein korkeita konsentraatioita mutta pilaantuneen maan tilavuus on pieni. Hyvin vettä johtavissa maakerroksissa, kuten hiekka- ja sora-alueilla, haitta-aineet pääsevät helpommin leviämään sekä vertikaalisesti että horisontaalisesti ja haitta-ainevuodon seurauksena pilaantuneen maan tilavuus voi kasvaa suureksi. Toisaalta näillä alueilla todetaan usein pienempiä konsentraatioita savialueisiin verrattuna.

Mikäli energiakaivoja porataan pilaantuneen maaperän alueelle, voi poraus aiheuttaa maaperässä helposti liikkuvien tai veteen helposti liukenevien haitta-aineiden paikallisia muutoksia. Poraus voi jopa aiheuttaa haitta-aineiden lisäleviämistä porauksen vaikutusalueella. Porauksen ei ole kuitenkaan arvioitu aiheuttavan muutoksia huonosti liikkuvien haitta-aineiden (kuten alkuaineet tai öljyhiilivedyt) leviämiseen. Poraus ei vaikuta haitta-aineiden määriin tai niiden laatuun. Kunnostetulla tai vielä kunnostamattomalla pilaantuneella maa-alueella energiakaivon poraamisen mahdolliset esteet on syytä selvittää kunnan viranomaisen tai ELY-keskuksen kanssa ennen hankkeeseen ryhtymistä.

Lämmönsiirtonesteen sisältämät orgaaniset yhdisteet (etanoli, MIBK, MEK) ovat biologisesti helposti hajoavia ja erittäin haihtuvia. Ne ovat veden mukana erittäin helposti kulkeutuva ja liukenevat ja hajoavat vedessä nopeasti.

Lämmönsiirtonesteen sisältämien orgaanisten yhdisteiden hajoaminen kuluttaa happea ja voi aiheuttaa pohjaveden lyhytaikaista happipitoisuuden alenemista. Lämmönsiirtonesteen etanoli ei sitoudu orgaaniseen ainekseen vastaavasti kuin öljyhiilivedyt (Dakheh ym. 2003). Jos maaperään pääsee sekä öljyhiilivetyjä että etanolia, etanoli todennäköisesti kuluttaa hajotessaan happea tehokkaasti ja siten hidastaa öljyhiilivetyjen hajoamista. Tässä tutkimuksessa ei ole mallinnettu lämmönsiirtonesteen biologisen hajoamisen aiheuttamaa happipitoisuuden muutosta pohjavedessä. Orgaanisten yhdisteiden puoliintumisaika on kuitenkin otettu huomioon kulkeutumismallinnuksessa.

Mikäli haitta-aineita kulkeutuu pohjavesikerrokseen, ne leviävät pohjaveden virtaussuunnassa ns. aineensiirtona (mass transport) ja muodostavat usein viuhkamaisen kulkeutumiskartion (pluumi). Kulkeutumisen laajuuden määrittelevät advektio, dispersio ja haitta-aineiden sitoutuminen maa-ainekseen. Advektio tarkoittaa prosessia, jossa veteen liennut aine leviää veden virtauksen mukana virtauksen keskimääräisen nopeuden mukaan. Pohjaveden pinnan yläpuolella advektioon perustuva kulkeutuminen määräytyy vajoveden perusteella ja kyllästyneessä vyöhykkeessä pohjaveden virtaaman perusteella (Ympäristöministeriö 2014). Hydrodynaaminen dispersio aiheutuu suurelta osin vedenjohtavuuden paikallisista vaihteluista. Dispersio levittää veteen liunneen aineen pitoisuusjakamaa ja pienentää enimmäispitoisuuksia (Ympäristöministeriö 2014). Molekulaarinen diffuusio on prosessi, jossa haitta-aine kulkeutuu suuremman pitoisuuden alueesta pienempään. Pitoisuusgradientin suuruus määrittelee diffuusion voimakkuuden. Kulkeutumisriskien ajallisen ulottuvuuden kannalta keskeisin prosessi on sorptio, joka hidastaa haitta-aineen kulkeutumista ainetta kuljettavan vajoveden tai pohjaveden virtaamaan verrattuna (Ympäristöministeriö 2014). Tietyt haitta-aineet, kuten öljyhiilivedyt, sitoutuvat maaperän orgaaniseen materiaaliin ja siten orgaanisen aineksen esiintymisellä on suuri vaikutus haitta-aineiden leviämiselle. Maa-ainekseen voimakkaasti pidättyvillä aineilla kulkeutumisnopeus voi olla jopa

useita kertaluokkia veden virtausnopeutta hitaampi (Ympäristöministeriö 2014). Etanolin leviämiseen maaperän orgaanisella materiaalilla ei ole niin suurta vaikutusta kuin öljyhiilivetyjen leviämiseen. Lähtökohtaisesti mitä voimakkaampi on pohjaveden virtaus, sitä pidemmälle ja laajemmalle haitta-aineet pääsevät leviämään. Lämmönsiirtonesteen kulkeutuminen pohjaveden mukana on tarkasteltu lähemmin raportin luvussa 2.4.

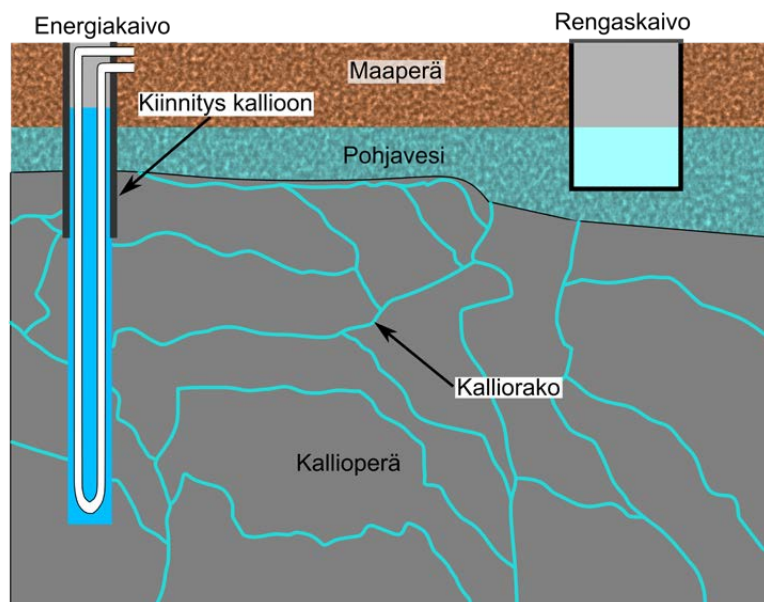
Energiakaivon poraus ei riko kallioperää siten, että se synnyttäisi uusia rakosysteemejä ja siten uusia veden virtausreittejä. Kaikki porauksen aikaansaamat vaikutukset kohdistuvat olemassa oleviin rakosysteemeihin. Kaivojen porauksessa käytettävä paine ei riitä murtamaan kalliota niin laajalta alueelta, että uusia rakosysteemiä voisi muodostua. Porausvaihe voi kuitenkin aiheuttaa kallioperässä mahdollisesti olevan suolaisen veden liikkumiseen muutoksia. Muutokset aiheutuvat porauksessa käytettävän paineistuksen vaikutuksesta. Suolaista vettä voi kulkeutua kallioperän rakosysteemeissä paineen vaikutuksesta laajemmalle ja levitä myös ei-suolaisen veden alueelle. Suolaista vettä voi porausvaiheessa päästä leviämään myös epäonnistuneen eristämisen vuoksi kallioperästä maaperään. Suolaisen veden leviäminen kalliorakojen myötä kallionpinnalle ja siitä maaperään on myös mahdollista. Suolaisen veden määrä on näissä skenaarioissa kuitenkin pieni. Näin ollen kulkeutumisreitit eivät pääse muodostumaan pitkiksi ja

vaikutusalue jää paikalliseksi. Porausvaiheen aikana mahdollisesti leviävän suolaisen pohjaveden muutosvaikutus on lyhytaikainen, koska porauksen jälkeen kallioperän paineolosuhde rupeaa palautumaan ennen porausta vallinneeseen tilanteeseen.

Energiakaivon porauksella voi olla vaikutuksia myös muuhun kalliopohjaveden laatuun kuin sen suolaisuuteen. Paineilmaporaus voi lyhytaikaisesti muuttaa kalliopohjaveden happipitoisuuksia ja hienoaines voi sakkautua kalliorakoihin ja siten rajoittaa kalliopohjaveden virtausta. Onnistuneella ja hyvin tehdyllä suojausputkituksella vaikutukset kohdistuvat vain kallioperän pohjaveteen (kuva 3). Mikäli porauksessa käytetään vesihuuhtelua, voi kallioperässä tapahtua myös pohjaveden laadun muutoksia. Makeaa vettä käytettäessä mahdollisesti suolainen kalliopohjavesi laimenee porauksen vaikutusalueella.

Porausvaiheen aikaisella paineistuksella voi olla myös kalliopohjavesikaivon antoisuuden kannalta positiivisia vaikutuksia. Paineistus voi avata tai puhdistaa olemassa olevia kalliorakojen ja mahdollistaa raoissa paremman vedenkulun eli parantaa läheisyydessä olevien kalliorakojen antoisuutta.

Energiakaivojen (syvyys 200–400 m) porauksen ei ole todettu aiheuttavan maa- tai kallioperässä liikuntoja, eli maanjäristyksiä. Kaivojen porauksessa käytettävä paine ei riitä muuttamaan kallion jännitystiloja.



Kuva 3. Periaatekuva kallioperään asennetusta energiakaivosta ja maaperään asennetusta rengaskaivosta. Mikäli kallion ja maaperän rajakohtaan asennettava suojausputki tehdään hyvin, porauksen aikaiset mahdolliset laatu- ja laatu- muutokset kohdistuvat vain kallioperän pohjaveteen. Kallioperän pohjaveden painetaso on kuvassa eritasolla kuin maaperän pohjaveden ja se ei pääse vuotamaan maaperän pohjaveteen.

### 2.3 Vastaanottajat ja riskien hallintatoimenpiteet

Mahdolliset porauksen aikaiset haitta-ainevuodot voivat aiheuttaa ympäristön pilaantumista ja näin ollen haittaa tai merkittävän riskin ympäristölle tai terveydelle, viihtyisyyden vähentymistä tai muuta niihin verrattavissa olevaa haittaa. Vuodot ovat kuitenkin helposti todettavissa ja nopeilla ja oikeilla toimenpiteillä hallittavissa siten, että niiden vaikutus jää lyhytaikaiseksi ja pienialaiseksi. Suoraan maaperään vuotanutta polttonestettä, voiteluöljyä tai lämmönsiirtonestettä voidaan ensi toimenpiteenä imeyttää imeytysaineeseen. Imeytysaineena voi käyttää esimerkiksi poraussoijaa, multaa tai hiekkaa, jollei työmaalla ole erillisiä imeytyspeitteitä tms. välineistöä. Pohjavesialueella toimiessa tulisi työmaalla aina varautua mahdollisiin haitta-ainevuotoihin asianmukaisella välineistöllä.

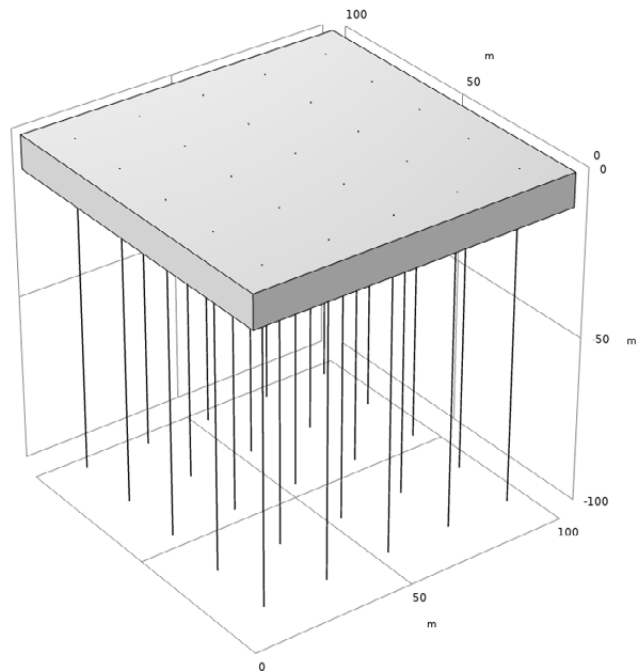
Mikäli haitta-aineita pääsee porauksen aikana pohjaveteen, ne voivat aiheuttaa pohjaveden laadun muutoksia. Suurimman riskin pohjaveden laadulle aiheuttavat ympäristön kannalta haitallisimmat aineet. Energiakaivon poraukseen liittyvä haitallisin aine on kevyt polttoöljy. Seuraavaksi haitallisin on voiteluöljy. Suomessa tapahtuneissa kevyt polttoöljy/dieselöljy tai voiteluöljy vuodoista saatujen kokemusten perusteella niiden haittavaikutukset pohjaveden laadulle ovat olleet paikallisia. Tämä käy ilmi esim. pilaantuneen maaperän ja pohjaveden puhdistuksen toimenpideraporteista. Merkittäviä ja laaja-alaisia kevyen polttoöljyn/dieselöljyn tai voiteluöljyjen aiheuttamia pohjaveden pilaantumistapauksia ei ole todettu, vaikka niiden vuotoja maaperään on tapahtunut sadoissa eri paikoissa. Tämä johtuu kyseisten haitta-aineiden heikosta liukenevuudesta veteen ja niiden huonosta kulkeutumispotentiaalista. Öljyhiilivedyt ovat vettä kevyempiä, mikä mahdollistaa niiden puhdistustoimenpiteet esim. suojapumppauksella huomattavasti tehokkaammin kuin vettä raskaampien haitta-aineiden tapauksessa. Lämmönsiirtoneste on ympäristövaikutusten kannalta merkittävästi vähemmän haitallinen haitta-aine kuin öljyhiilivedyt (ks. luku 2.4).

Energiakaivon poraus lähellä kallioperään porattuja talousvesikaivoja voi aiheuttaa talousvesikaivon veden laadun väliaikaisen huonontumisen paineistuksen aiheuttamien kalliopohjaveden virtauskentän muutoksien vuoksi. Koska poraus on lyhytaikainen ja paineolosuhteet tasoittuvat porauksen jälkeen, on myös haittavaikutus yleensä lyhytaikainen. Veden riittävä pumppaus häiriintyneestä

kaivosta yleensä palauttaa veden laadun ennen porausta vallinneeseen tilaan.

On myös mahdollista, että energiakaivon poraus aiheuttaa pysyvän haitan lähellä energiakaivoa olevalle kalliopohjavesikaivolle sen vuoksi, että suolaiselle vedelle muodostuu uusi virtausreitti olemassa olevaan makean veden kallioporakäivöön. Riski on mahdollinen erityisesti alueilla, jossa suolaista pohjavettä on lähellä maanpintaa, kuten merialueilla tai niiden välittömässä läheisyydessä rannikolla. Riskinhallintakeinona on porauksen aikainen jatkuva veden sähkönjohtavuuden seuranta, jolloin voidaan todeta, mikäli poraus ulottuu suolaisen kalliopohjaveden alueelle. Mikäli suolaisuutta todetaan, voidaan poraus lopettaa välittömästi. Lisäksi energiakaivo voidaan eristää suolaiselta vedeltä tulppaamalla reikä ja erottamalla suolainen ja makea vesi toisistaan ja näin fyysisesti rajoittaa suolaisen veden sekoittumista.

Energiakaivon porauksella ei ole merkittäviä vaikutuksia maaperän pohjavesiolosuhteisiin, mikäli maa- ja kallioperän eristys toteutetaan huolellisesti. Noin 100–150 mm paksu suojaputki ei vaikuta maa-



kuva 4. Kaaviokuva, missä 25 energiakaivoa on sijoitettu 5x5-muotoon 20 m:n välein. Päällimmäinen harmaa kerros esittää 10 metriä paksua maapeitettä kallion päällä. Kaivojen halkaisija on 140 mm eli piikit ja pisteet edustavat maaperän suojaputkitusosan halkaisijaa. Energiakaivot ovat oikeassa mittasuhteessa energiakaivokentän pinta-alaan. Energiakaivojen halkaisija ei ole riittävän suuri, jotta se pystyisi vaikuttamaan mitattavasti pohjaveden virtauskenttään.

perän pohjaveden virtauskenttään, vaikka kaivoja olisi useita ja ne olisi sijoitettu lähekkäin. Kaivojen suojaputket eivät pysty muodostamaan pohjaveden virtaukseen vaikuttavaa seinämää tms. rakennetta (kuva 4). Hyvin toteutettu maa- ja kallioperän välinen eristys estää myös mahdollisen suolaisen pohjaveden ”pulssin” pääsyn porausvaiheessa kallioperästä maaperään.

## 2.4 Lämmönsiirtonesteen leviäminen pohjavedessä -mallinnuslaskenta

Erillisenä riskiskenaariona tehtiin matemaattinen mallinnuslaskelma siitä, miten lämmönsiirtonesteen sisältämät aineet leviävät pohjaveden virtauksen mukana. Tässä luvussa olevien kuvien tekstit on esitetty englanniksi, koska mallinnusohjelma on englanninkielinen.

Lämmönsiirtonestettä on mahdollista päästä vuotamaan energiakaivosta ympäristöön myös energiakaivon käytön aikana (ks. kappale 3). Vuotoriski on kuitenkin suurin energiakaivon asennuksen aikana, jolloin lämmönsiirtoneste kaadetaan putkistoon ja putkisto koeponnistetaan. Tiedossa olevat vuotovahingot ovat syntyneet juuri asennusvaiheessa. Sen vuoksi lämmönsiirtonesteen vuotokenaariolaskenta esitetään tässä kappaleessa.

### 2.4.1 Laskennan perusteet

Laskennan tavoitteena oli arvioida lämmönsiirtonesteen sisältämien komponenttien, eli etanolin, metyyli-isobutyliketonin (MIBK) ja metyylietyliketonin (MEK) kulkeutumista pohjavesikerroksessa. Laskenta tehtiin vertailtavuuden lisäämiseksi kahdelle erilaiselle pohjavesimuodostumatyyppille, jotta mallinnuksen tuloksia voitiin tarkastella Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) määrittämille erityyppisille mallipohjavesimuodostumille (Suomen ympäristökeskus 2018).

Lisäksi lämmönsiirtonesteen valmistajalta saatujen mahdollisten tulevien reseptinmuutostietojen perusteella mallinnettiin pohjavesivaikutuksia yhdellä erillisellä simulointiskenaariolla tilanteessa, jossa MIBK korvataan isopropanolilla (IPA).

Mallinnus tehtiin käyttämällä kolmiulotteista numeerista pohjaveden virtausmallia ja liuenneiden aineiden leviämismallia. Mallinnuksessa tunnistettiin etanolin, MIBK:n ja MEK:n pitoisuudet vuotokohdassa ja aineiden leviämisen laajuus. Simulaatiot kehitettiin 16 erilaiselle skenaariolle. Hydrogeologiset olosuhteet yhdessä vuo-

Paras vuotojen hallintakeino on porauskaluston jatkuvan silmälläpito ja sen asianmukainen ja huolellinen käyttö ja huolto. Mikäli vuotoja tapahtuu, niihin tulee reagoida välittömästi. Haitta-aineiden ominaisuuksien vuoksi nopealla reagoinnilla voidaan helposti estää haitta-aineiden leviäminen laajemmalle maaperässä ja pohjaveteen.

tavan ainemäärän kanssa vaikuttavat etanolin, MIBK:n ja MEK:n pitoisuuksiin ja kulkeutumiseen pohjavedessä.

### 2.4.2 Lähtötiedot

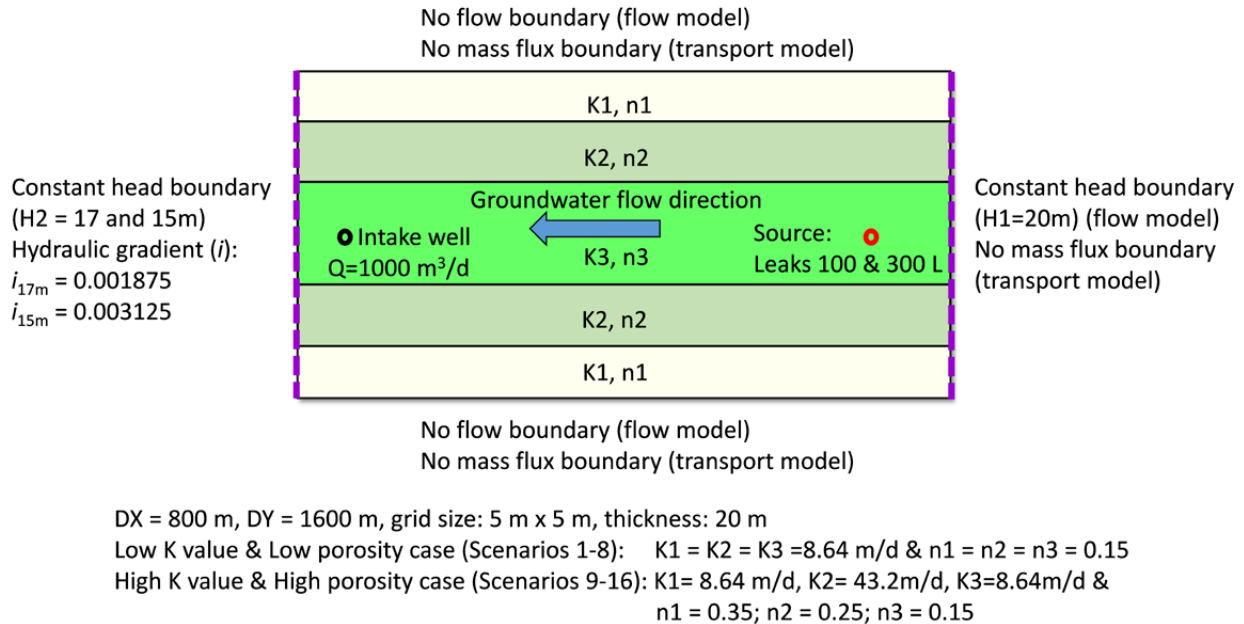
Kolmiulotteinen ns. steady state -pohjaveden virtausmalli laskettiin käyttämällä MODFLOW-koodia (Harbaugh ym. 2000). Mallissa on yksikerroksinen akviferi, jonka yhden laskentaruudukon koko on säännöllinen 5 m x 5 m ja paksuus 25 m. Mallialue on 1 600 m y-suunnassa (pohjaveden virtaussuunnassa) ja 800 m x-suunnassa. Virtausmallissa on kaksi geologista rakennetta: 1) pienen ja 2) suuren vedenjohtavuuden (K-arvo) omaavat pohjavesiolosuhteet.

Mallin ensimmäisessä rakenteessa pohjavesikerros on homogeeninen K-arvolla 8,64 m/d ja tehollisella huokoisuudella 0,15 (kuvat 5 ja 6). Tämä laskentamalli korreloi SYKEN esimerkkipohjavesimallin tyyppiin 4, joka on nimetty Salpausselän jäämarginaalimuodostumatyyppiksi. Tässä laskennassa malli yksinkertaistettiin yksikerroksiseksi malliksi, jolla oli jatkuvasti pieni K-arvo koko mallinnusalueella.

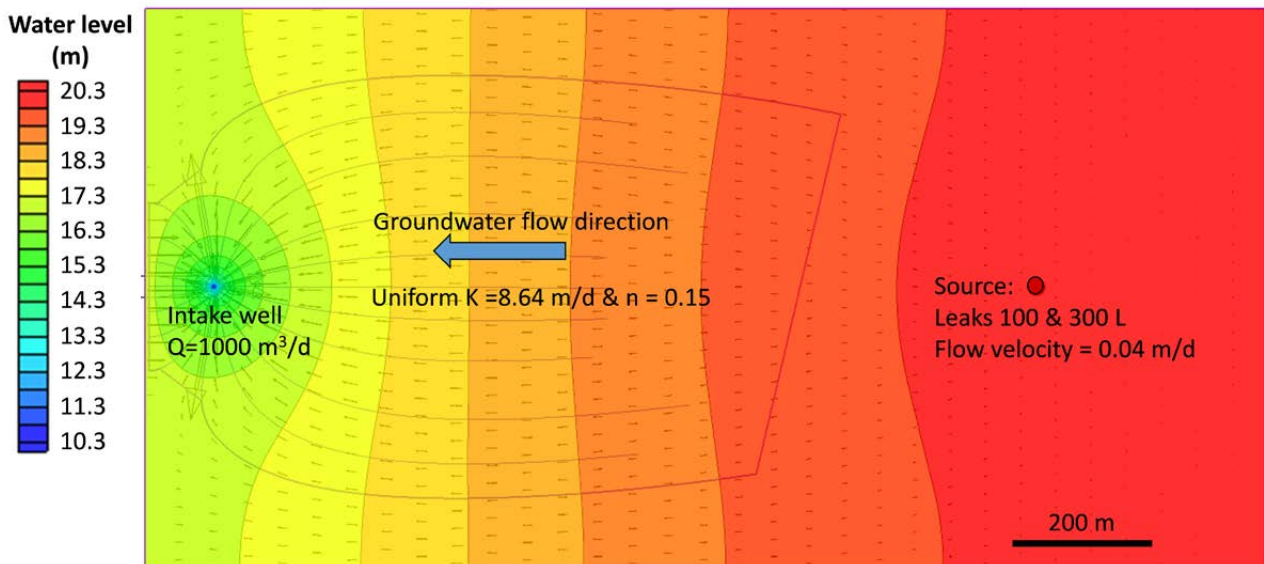
Mallin toisessa rakenteessa akviferi suunniteltiin edustamaan harjumaista pohjavesialuetta, joka korreloi SYKEN pohjavesimallityyppien 1–3 (harjutyypin) kanssa. Akviferi yksinkertaistettiin yksikerroksiseksi pohjavesivarastoksi, jonka suurin K-arvo oli 86,4 m/d harjun ydinalueen keskellä ja pienin K-arvo 8,64 m/d harjun reuna-alueilla (kuvat 5 ja 6). Teholliset huokoisuudet vaihtelivat välillä 0,35 suuren K-arvon alueella ja 0,15 pienen K-arvon alueella. Molemmissa olosuhteissa pohjavedenpinnan reunaehdoiksi asetettiin 20 metrin taso ylävirran puolella. Alavirran puolella pohjaveden korkeusaseman reunaehdoksi asetettiin 17 metriä ja 15 metriä. Näin ollen hydrauliseksi gradientiksi muodostui 0,001875 (matala gradientti)

ja 0,003125 (korkea gradientti). Veden virtauksen lisäämiseksi mallialueelle lisättiin vedenotto-kaivo, jonka pumppausteho on jatkuva 1 000 m<sup>3</sup>/d. Mallissa lämmönsiirtonestettä vuotaa akviferiin sen keskiosassa yhdestä pisteestä, joka sijaitsee 1 200 m

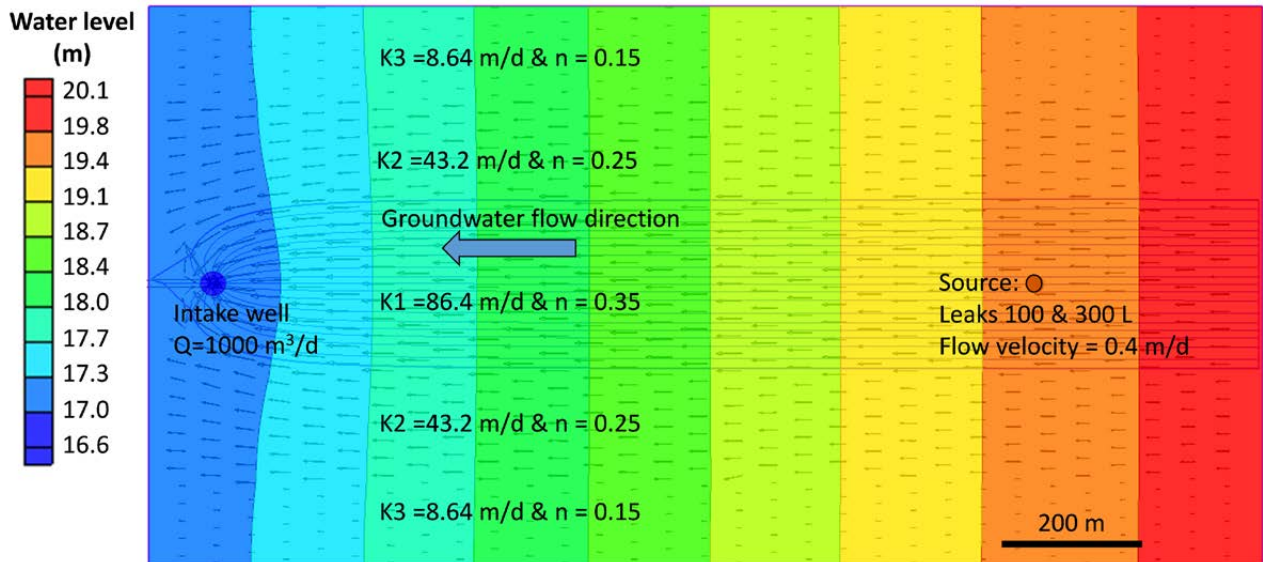
vedenottamolta vastavirtaan. Pohjaveden virtaus-simulaation perusteella pohjaveden virtausnopeus vuotopisteessä vaihtelee välillä 0,04 ja 0,40 m/d olosuhteissa 1 (pienin K-arvo) (kuva 6) ja olosuh-teissa 2 (suurin K-arvo) (kuva 7).



Kuva 5. Konseptuaalinen esitys pohjaveden virtausmallista.



Kuva 6. Pohjaveden virtausmallin periaatekuva heikossa virtausolosuhteessa (laskentaskenaariot 1-8). Mallinnuksessa käytetty K-arvo on 8,64 m/d, tehollinen huokoisuus 0,15 ja pohjaveden virtausnopeus 0,04 m/d. Simuloinnit tehtiin kahdelle eri vuotomäärälle, 100 ja 300 litraa.



Kuva 7. Pohjaveden virtausmallin periaatekuva hyvissä virtausolosuhteissa (laskentaskenaariot 9–16). Mallinnuksessa simuloitiin harjurakennetta, jossa harjun ydin on hyvin karkearakeinen ja aines muuttuu hienorakeisemmaksi reuna-alueille mentäessä. Mallinnuksessa käytetty K1-arvo on 86,4 m/d ja tehollinen huokoisuus 0,35, K2-arvo on 43,2 m/d ja tehollinen huokoisuus 0,25 ja K3-arvo on 8,64 m/d ja tehollinen huokoisuus 0,15. Pohjaveden virtausnopeus 0,4 m/d. Simuloinnit tehtiin kahdelle eri vuotomäärälle, 100 ja 300 litraa.

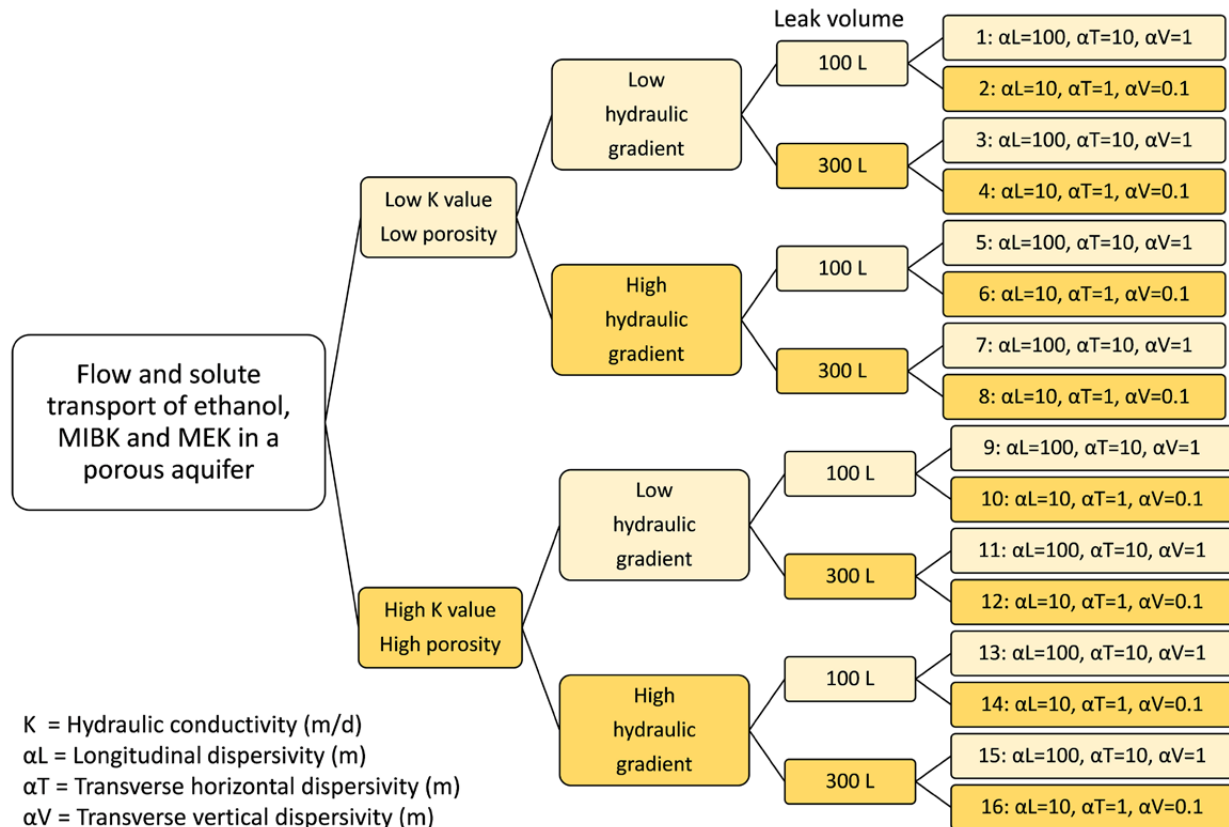
MODFLOW'n mallinnustuloksia käytettiin liuenneen aineen leviämismalliin hyödyntämällä MT3DMS-koodia (Zheng & Wang 1999). Pohjaveden virtaussimulaatio oli vakaan tilan malli (steady state), mutta kulkeutumissimulaatio oli muuttuva malli (transient). Mallinnuksen aika-askeleet vaihtelivat yhdestä 30 vuoteen. Ensimmäisen 10 vuoden kulkeutumisen aika-askeleeksi määritettiin päivä ja yli 10 vuoden ajalle vuosi. Kulkeutumismalli koostuu advektiosta (kulkeutuminen pohjaveden virtauksen mukana), dispersiosta (aineen leviäminen viuhkamaisesti virtauksen mukana) ja aineen hajoamisesta sen radioaktiivisen puoliintumisaikan mukaisesti. Dispersion vaikutukset kulkeutumismalliin arvioitiin jakamalla parametrit kahteen sarjaan:

- 1) suuri dispersio, jolloin  $\alpha_L=100$ ,  $\alpha_T=10$ ,  $\alpha_V=1$
- 2) pieni dispersio, jolloin  $\alpha_L=10$ ,  $\alpha_T=1$ ,  $\alpha_V=0.1$

jossa  $\alpha_L$ ,  $\alpha_T$  and  $\alpha_V$  edustavat pitkittäistä, horisontaalista ja vertikaalista leikkaussuuntaa.

Energia- ja ympäristöasennus koostuu paineenvalvontajärjestelmästä, joka lähettää hälytyksen mahdollisista vuotoista. Näin ollen pumppu ei jatka pumppausta niin kauan, kunnes putkisto on tyhjä. Tässä tutkimuksessa mallinnuksessa käytettiin 100 ja 300 litran kertaluontoista vuotoskenaariota. Seoksen alkupitoisuudet olivat 220 920 mg/l etanolille, 6 416 mg/l MIBK:lle ja 4 830 mg/l MEK:lle.

Pitoisuuksien reunaehdoksi asetettiin ns. PNEC-arvot, jotka kuvaavat eliöstölle arvioitua haitatonta pitoisuutta vedessä. PNEC-arvo on etanolille 0,96 mg/l, MIBK:lle 0,6 mg/l ja MEK:lle 55,8 mg/l. Huomioiden yllä esitetyt muuttujat mallinnus tehtiin 16 eri skenaariolle (kuva 8). Taulukossa 1 on esitetty mallinnuksessa käytetyt lähtöparametrit.



Kuva 8. Haitta-aineiden kulkeutumismallinnuksessa käytettyjen muuttujien mukaan määritetyt laskentaskenaariot.

Taulukko 1. Pohjavesimallinnuksessa ja haitta-aineiden kulkeutumismallinnuksessa käytetyt parametrit.

| Parametri <sup>a</sup>                                                                       | Etanoli                    | Metyyli-isobutyylitoni (MIBK) | Metyylietyyliketoni (MEK) | Isopropanoli (IPA)    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Molekyylipaino (g/mol)                                                                       | 46,07                      | 100,16                        | 72,11                     | 60,10                 |
| Vesiliukoisuus @ 20-25 °C (g/l)                                                              | 295,91                     | 19,00                         | 240,00                    | 197,00                |
| Höyrynpaine @ 20-25 °C (kPa)                                                                 | 4,34                       | 1,93                          | 12,13                     | 2,96                  |
| Haihtuvuus vesiliuoksesta, Henryn lain vakio @ 20 °C (atm·m <sup>3</sup> /mole) <sup>b</sup> | 0,000005                   | 0,00014                       | 0,00006                   | 0,000008              |
| Orgaaninen hiili – vesi -jakautumiskerroin, K <sub>oc</sub> (log l/kg)                       | 0,0768                     | 1,1761                        | 0,2788                    | 0,53                  |
| n-oktanoli-vesi -jakaantumiskerroin, K <sub>ow</sub> (log l/kg)                              | -0,002                     | 1,1648                        | 0,2561                    | 0,50                  |
| Diffuusiokerroin ilmassa (cm <sup>2</sup> /s)                                                | 0,1150                     | 0,0750                        | 0,0808                    | 0,0959                |
| Diffuusiokerroin vedessä (cm <sup>2</sup> /s)                                                | 0,000012                   | 0,000008                      | 0,000010                  | 0,000010              |
| Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )                                                                  | 789,0                      | 802,0                         | 805,0                     | 785                   |
| Haitta-aineen osuuden tilavuus (l) kokonaistilavuudesta (650 l)                              | 182,0                      | 5,2                           | 3,9                       | 5,2                   |
| Haitta-aineen pitoisuus (g/l)                                                                | 220,9                      | 6,4                           | 4,8                       | 6,28                  |
| Puoliintumisaika (half lives - days)                                                         | 2.2 (2.0-3.0) <sup>c</sup> | 14,0                          | 14,0                      | 0.1-0.33 <sup>d</sup> |
| Haitta-aineen hajoamisnopeus, $\lambda$ (1/day)                                              | 0,3150                     | 0,0495                        | 0,0495                    | 2,079                 |
| PNEC arvo <sup>e</sup> :                                                                     |                            |                               |                           |                       |
| Makea vesi (mg/l)                                                                            | 0,96                       | 0,60                          | 55,80                     | 140,9                 |
| Merivesi (mg/l)                                                                              | 0,79                       | 0,06                          | 55,80                     | 140,9                 |
| Maaperä (mg/kg)                                                                              | 0,63                       | 1,30                          | 22,50                     | 28                    |
| Lähdetiedot:                                                                                 |                            |                               |                           |                       |
| a. : GSI Environmental (2021)                                                                |                            |                               |                           |                       |
| b. : National Center for Biotechnology Information (2021)                                    |                            |                               |                           |                       |
| c.: Zhange et al. (2006)                                                                     |                            |                               |                           |                       |
| d.: INCHEM (2021)                                                                            |                            |                               |                           |                       |
| e.: Altia industrial (2017)                                                                  |                            |                               |                           |                       |

### 2.4.3 Tulokset ja tulkinta

Mallinnettujen yhdisteiden leviäminen ja niiden konsentraatiot pohjavedessä ajan suhteen vaihtelevat vuotomäärän ja hydrogeologisten ominaisuuksien (pohjaveden virtausnopeus, hydraulinen gradientti, dispersioparametrit, K-arvo ja huokoisuus) mukaan. Hyvien pohjaveden virtausolosuhteiden simulaatioissa konsentraatioita kuvaavat käyrät ovat matalahuippuisia, kun taas huonoissa virtausolosuhteissa konsentraatiokäyrät näyttävät terävämpihiippuisina. Tämä selittyy sillä, että hyvissä virtausolosuhteissa aineet kulkeutuvat nopeammin ja leviävät dispersion vaikutuksesta laajemmalle ja näin ollen niiden konsentraatio myös laskee nopeammin.

Jokaisen laskentaskenaarion yksityiskohtaiset tulokset toimitetaan pyynnöstä erikseen. Tässä kappaleessa esitetään tärkeimmät havainnot ja yhteenveto tuloksista.

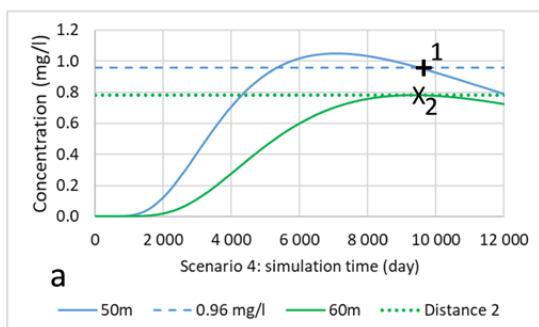
Etanolin pisin simuloitu säilymisaika pohjavedessä eli aika, jolloin sen pitoisuus tippuu alle PNEC-arvon 0,96 mg/l, todettiin skenaariosta 4, jossa vuotomäärä on 300 l ja pohjaveden kulkeutumisominaisuudet ovat huonot. Tässä skenaarios-

sa kestää vuotokohdassa 18,41 vuotta ja 50 m:n etäisyydellä vuotokohdasta 26,01 vuotta, ennen kuin etanolin pitoisuus pohjavedessä laskee alle 0,96 mg/l (kuva 9).

Vastaavasti etanolin lyhyin simuloitu säilymisaika pohjavedessä todettiin skenaariosta 13, jossa vuotomäärä on 100 l ja pohjaveden kulkeutumisominaisuudet ovat hyvät. Tässä skenaariossa etanolipitoisuudet pohjavedessä olivat alle 0,96 mg/l 10 m:n etäisyydellä vuotopaikasta 2,5 vuorokaudessa.

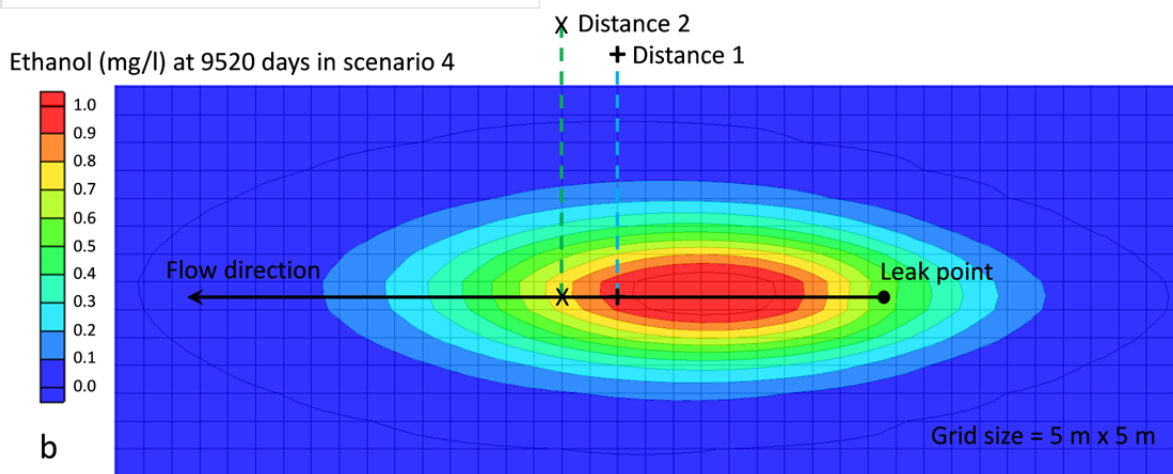
Missään mallinnusskenaariossa etanolia ei todettu yli 0,96 mg/l olevia pitoisuuksia 60 m:n etäisyydellä vuotopaikasta pohjaveden virtaussuuntaan (taulukko 2). Taulukkoa 2 luetaan esimerkiksi skenaarion 1 kohdalta seuraavasti:

- vuotokohdassa kestää 178 vrk, kunnes etanolipitoisuus on laskenut PNEC arvon alapuolelle.
- 10 metrin etäisyydellä vuotokohdasta pitoisuus laskee alle PNEC arvon 154 vrk:n kuluttua vuodosta.
- 15 metrin etäisyydellä vuotokohdasta saavutetaan maksipitoisuus 0,71 mg/l 80 vrk:n kuluttua vuodosta.



**Distance 1** edustaa aineen konsentraation kehittymistä ajan suhteen maksimietäisyydellä, jolloin vielä PNEC arvo ylittyy. Esim. kuvan skenaariossa etanolipitoisuus laskee alle 0,96 mg/l 50 m etäisyydellä 9520 vuorokaudessa.

**Distance 2** kuvaa pistettä ja aikaa vuotokohdasta, jossa ainepitoisuus ei ylitä missään vaiheessa PNEC arvoa. Kuvassa maksimietanolipitoisuus on 0,78 mg/l 60 m etäisyydellä vuotokohdasta



Kuva 9. Kulkeutumismallinnuksen tulokset etanolille skenaariossa 4, missä on heikot virtausolosuhteet (K-arvo 8,64 m/d, tehollinen huokoisuus 0,15). Kuvassa a) on esitetty pitoisuuksien kehitys ajan suhteen 50 m:n ja 60 m:n etäisyydellä vuotopaikasta. Kuva b) esittää saman asian tasokuvana, jossa näkyy haitta-ainepluumin levinneisyys aikapisteessä 9 520 päivää (eli noin 26 vuotta).

Taulukko 2. Etanolin simuloidut kulkeutumismatkat ja -ajat vuotopaikasta pohjaveden virtaussuuntaan. Taulukossa on esitetty distance 1 ja 2 tulokset esimerkkikuvan 9 mukaisesti.

| Scenarios                                                      | Time to reach 0.96 mg/L of ethanol |                |      | Max. plume at concentration < 0.96 mg/L |      |                      |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|------|-----------------------------------------|------|----------------------|
|                                                                | at leak point (days)               | Distance 1 (m) | Days | Distance 2 (m)                          | Days | Concentration (mg/L) |
| Scenarios 1-4 : Low K, Low n & Low i                           |                                    |                |      |                                         |      |                      |
| 1. Leak 100 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$  | 178                                | 10             | 154  | 15                                      | 80   | 0.71                 |
| 2. Leak 100 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$  | 3740                               | 25             | 4260 | 30                                      | 3160 | 0.89                 |
| 3. Leak 300 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$  | 490                                | 20             | 270  | 25                                      | 300  | 0.60                 |
| 4. Leak 300 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$  | 6720                               | 50             | 9520 | 60                                      | 9345 | 0.78                 |
| Scenarios 5-8 : Low K, Low n & High i                          |                                    |                |      |                                         |      |                      |
| 5. Leak 100 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$  | 70                                 | 10             | 58   | 20                                      | 80   | 0.32                 |
| 6. Leak 100 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$  | 1580                               | 30             | 1340 | 40                                      | 2100 | 0.59                 |
| 7. Leak 300 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$  | 195                                | 20             | 90   | 30                                      | 200  | 0.38                 |
| 8. Leak 300 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$  | 3100                               | 50             | 4840 | 30                                      | 4040 | 0.90                 |
| Scenarios 6-12: High K, High n & Low i                         |                                    |                |      |                                         |      |                      |
| 9. Leak 100 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$  | 5                                  | 15             | 3    | 20                                      | 2    | 0.53                 |
| 10. Leak 100 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$ | 181                                | 20             | 221  | 30                                      | 160  | 0.87                 |
| 11. Leak 300 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$ | 22                                 | 20             | 5    | 30                                      | 22   | 0.31                 |
| 12. Leak 300 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$ | 381                                | 50             | 583  | 60                                      | 511  | 0.87                 |
| Scenarios 13-16: High K, High n & High i                       |                                    |                |      |                                         |      |                      |
| 13. Leak 100 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$ | 2.5                                | 10             | 2.5  | 20                                      | 1    | 0.63                 |
| 14. Leak 100 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$ | 110                                | 20             | 133  | 30                                      | 95   | 0.86                 |
| 15. Leak 300 L & $\alpha L=100$ , $\alpha T=10$ , $\alpha V=1$ | 12                                 | 20             | 3.5  | 30                                      | 2    | 0.46                 |
| 16. Leak 300 L & $\alpha L=10$ , $\alpha T=1$ , $\alpha V=0.1$ | 231                                | 50             | 354  | 60                                      | 306  | 0.87                 |

taulukossa K on veden johtavuus (m/d), n on tehokas huokoisuus, i on hydraulinen gradientti ja  $\alpha L$ ,  $\alpha T$ ,  $\alpha V$  ovat pitkittäinen, poikittainen ja vertikaalinen dispersio.

Denaturointiaineista MIBK:n ”säilyvyysaika” pohjavedessä on vuotokohdassa 1–12 vrk ja leviämisalue (eli PNEC-arvon 0,6 mg/L ylittävä pitoisuus) ei missään laskentaskenaariossa ylittänyt 20 m:n etäisyyttä vuotokohdasta (taulukko 3). MEK:n pitoisuudet eivät missään vuotoskenaariossa ylittäneet PNEC-arvoa 55,8 mg/l. Pienet MIBK- ja

MEK-pitoisuudet johtuvat aineiden ominaisuuksien lisäksi siitä, että näiden denaturointiaineiden määräosuudet ovat lämmönsiirtonesteessä pienet. MIBK on denaturointiaineista selvästi ympäristön kannalta haitallisempi kuin MEK. Suurissa vuoto-määrissä MIBK muodostuu lämmönsiirtonesteen haitallisemmaksi yhdisteeksi.

Taulukko 3. MIBK:n simuloidut kulkeutumismatkat ja -ajat vuotopaikasta pohjaveden virtaussuuntaan. Taulukossa on esitetty distance 1 ja 2 tulokset esimerkkikuvan 9 mukaisesti.

| Scenarios                                                      | Times to reach 0.60 mg/L of MIBK |                |      | Max. plume at concentration < 0.60 mg/L |      |                      |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------|------|-----------------------------------------|------|----------------------|
|                                                                | at leak point (days)             | Distance 1 (m) | Days | Distance 2 (m)                          | Days | Concentration (mg/L) |
| Scenarios 1-4 : Low K, Low n & Low i                           |                                  |                |      |                                         |      |                      |
| 1. Leak 100 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$  | 4.5                              |                |      | 10                                      | 2    | 0.50                 |
| 2. Leak 100 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$  | 8.5                              |                |      | 10                                      | 3    | 0.19                 |
| 3. Leak 300 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$  | 6.5                              | 10             | 4.5  | 15                                      | 3    | 0.24                 |
| 4. Leak 300 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$  | 12                               |                |      | 10                                      | 3    | 0.59                 |
| Scenarios 5-8 : Low K, Low n & High i                          |                                  |                |      |                                         |      |                      |
| 5. Leak 100 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$  | 2.5                              |                |      | 10                                      | 1    | 0.58                 |
| 6. Leak 100 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$  | 6                                |                |      | 10                                      | 3    | 0.42                 |
| 7. Leak 300 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$  | 5                                | 10             | 3.5  | 15                                      | 2    | 0.41                 |
| 8. Leak 300 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$  | 11                               | 10             | 8    | 15                                      | 4    | 0.12                 |
| Scenarios 9-12: High K, High n & Low i                         |                                  |                |      |                                         |      |                      |
| 9. Leak 100 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$  | 1.5                              |                |      | 10                                      | 1    | 0.22                 |
| 10. Leak 100 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$ | 5                                |                |      | 10                                      | 3    | 0.56                 |
| 11. Leak 300 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$ | 2                                | 10             | 1.5  | 20                                      | 2    | 0.11                 |
| 12. Leak 300 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$ | 10                               | 10             | 10   | 20                                      | 8    | 0.23                 |
| Scenarios 13-16: High K, High n & High i                       |                                  |                |      |                                         |      |                      |
| 13. Leak 100 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$ | 1                                |                |      | 10                                      | 1    | 0.19                 |
| 14. Leak 100 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$ | 4                                | 10             | 3    | 20                                      | 6    | 0.12                 |
| 15. Leak 300 L & $\alpha_L=100$ , $\alpha_T=10$ , $\alpha_V=1$ | 1.5                              |                |      | 10                                      | 1    | 0.42                 |
| 16. Leak 300 L & $\alpha_L=10$ , $\alpha_T=1$ , $\alpha_V=0.1$ | 7.5                              | 10             | 7.5  | 20                                      | 6    | 0.36                 |

taulukossa K on veden johtavuus (m/d), n on tehokas huokoisuus, i on hydraulinen gradientti ja  $\alpha_L$ ,  $\alpha_T$ ,  $\alpha_V$  ovat pitkittäinen, poikittainen- ja vertikaalinen dispersio.

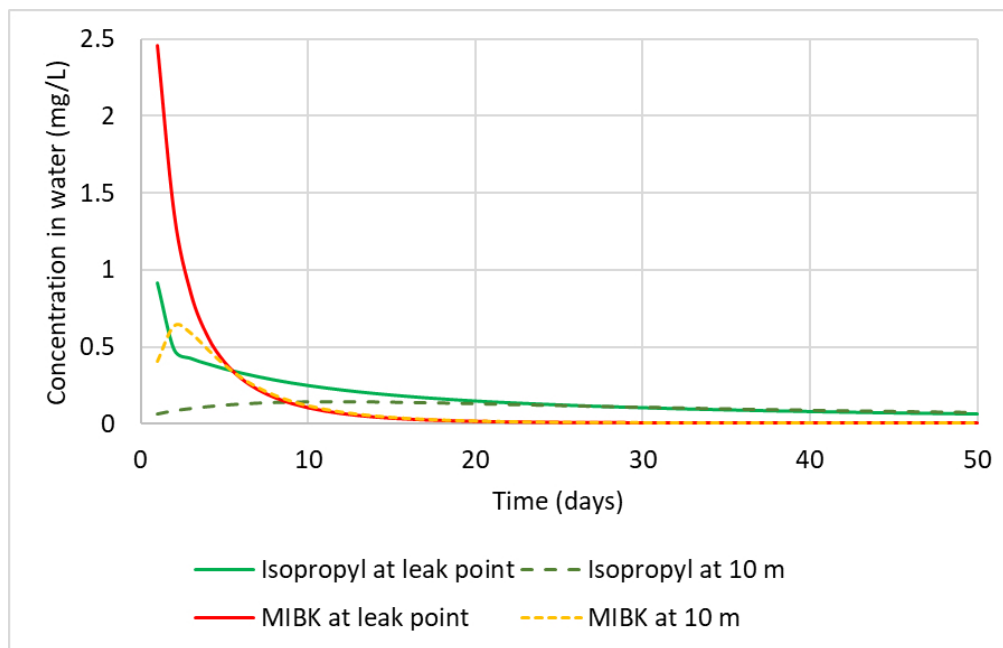
#### 2.4.4 Isopropanolin vertailu MIBK:iin

Tämän työn raportoinnin aikana alustavia mallinnustuloksia esiteltiin myös lämmönsiirtoneste valmistajalle, Altia Oyj:lle. Tulosten perusteella Altia Oyj harkitsee MIBK:n korvaamista isopropanolilla (IPA). Sen vuoksi mallinnukseen otettiin mukaan myös isopropanolin vertailu MIBK:iin.

Mikäli isopropanoli korvattaisiin samassa määräsuhteessa (0,8 %) kuin MIBK, olisi sen konsentraatio lämmönsiirtonesteessä 6 280 mg/l, kun se MIBK:lla on 6 416 mg/l. Konsentraatioero johtuu eri tiheydestä. Verrattaessa IPA:n fysikaalisia ominaisuuksia MIBK:iin voidaan todeta, että IPA:n liukoisuus on yli kymmenkertainen ja sen PNEC-arvo on 140,9 mg/l, kun se MIBK:lla on 0,6 mg/l (taulukko 1).

IPA:n puoliintumisaika vedellä kyllästyneessä maaperässä on myös todennäköisesti lyhyempi kuin MIBK:n. IPA:n puoliintumisajalle pohjavesiympäristössä ei löydetty kirjallisuusviitettä. Sen biologinen hajoamisaika ihmisessä on 2,5 – 8 tuntia (Slaughter ym. 2014). Mallinnuksessa käytettiin 8 tunnin puoliintumisaikaa.

Skenaariolle 14, 100 litran vuoto ja hyvät pohjaveden kulkeutumisominaisuudet, tehtiin vertailumallinnus MIBK:n ja IPA:n välillä. Mallinnuksen tuloksena voidaan todeta, että IPA:n pitoisuus tippuu alle PNEC-arvon alle yhdessä vuorokaudessa, kun MIBK:n pitoisuuden lasku kestää vuotopäivästä 4 vrk. MIBK:n pitoisuus on 10 m:n päässä vuokohdassa laskenut alle PNEC-arvon 3 vrk:n kuluessa (kuva 10).



Kuva 10. IPA:n ja MIBK:n kulkeutumismallinnuksen vertailu. Tässä on mallinnettu skenaarion 14 mukainen tilanne.

#### 2.4.5 Mallinnuksen rajoitukset

Pohjaveden virtausmallit ovat aina yksinkertaistetuja kuvauksia todellisista tilanteista. Epävarmuutta pyrittiin poistamaan käyttämällä erilaisia laskentaskenaarioita sekä mittauksiin perustuvaa tietoa hydrogeologisista ominaisuuksista. Mallilaskennat antoivat käsityksen eri parametrien vaikutuksista lämmönsiirtonesteen kulkeutumiseen. Tässä tutkimuksessa mallinnus tehtiin yksikerrosmallilla ja haitta-aineen oletettiin päätyneen suoraan pohjavedellä kyllästyneeseen kerrokseen. Kohdekohtaisella mallinnuksella, joka perustuu tutkittavan kohteen mitattuihin hydrogeologisiin parametreihin ja jossa huomioidaan maaperän eri kerrokset, saadaan tarkempi kuva haitta-aineen kulkeutumisesta kohteessa.

Simulaatioista puuttuvat todelliset pohjaveden kemialliset olosuhteet, kuten raudan, sulfaatin, orgaanisten aineiden ja muiden suomalaisessa pohjavedessä yleisesti esiintyvien alkuaineiden ja

yhdisteiden esiintyminen. Saatavilla ei ollut kenttätutkimuksiin perustuvia tietoja etanolin, MIBK:n ja MEK:n käyttäytymisestä suomalaisessa maaperässä ja pohjavesissä. Simuloinnissa ei huomioitu vuodenaikojen mahdollista vaikutusta haitta-aineiden biologiseen hajoamiseen ja leviämiseen.

Mallinnus tehtiin yhdestä vuotopisteestä. Teoriassa on mahdollista, että usean kaivon geoteknisen kentästä voi vuotaa samanaikaisesti useampi kaivo, jolloin maahan pääsevä nestemäärä voi olla suurempi kuin tässä mallinnuksessa käytetyt 100 litraa ja 300 litraa. Monesta eri putkesta tapahtuva vuoto on kuitenkin erittäin epätodennäköinen ja ei ole tiedossa, että yhtäaikaista vuotoa olisi tapahtunut asennetuissa järjestelmissä.

#### 2.4.6 Kulkeutumismallinnuksen johtopäätökset

Yhteenvedon voidaan todeta, että lämmönsiirtoneste ei muodosta merkittävää riskiä pohjavedelle, vaikka sitä pääsisi vuotamaan suoraan pohjavesi-

kerrokseen. Lämmönsiirtonesteen vuoto vaikuttaa pohjaveden happipitoisuuteen sillä alueella, minne lämmönsiirtoneste leviää. Mallinnus tehtiin konservatiivisesti, koska haitta-aine päätyi suoraan pohjavedellä kyllästyneeseen maakerrokseen, pohjaveden liikkumista tehostettiin mallissa pohjavedenotolla ja vuotomääräksi valittiin mahdollisiin realistisiin vuotoskenaarioihin nähden 2 – 30 kertaisia lämmönsiirtonestemääriä.

Lämmönsiirtonesteen vaikutusalue jäi kaikissa mallinnusskenaarioissa alle 60 m:n kokoiseksi pohjaveden virtaussuunnassa ja oli 100 litran vuotoske-

naariossa 30–40 m. Kohdekohtaisilla geologisilla olosuhteilla on merkittävä vaikutus erityisesti lämmönsiirtonesteen kulkeutumiseen maaperässä ja viipymäaikaan pohjavedessä.

Denaturointiaineista ja sellaisessa tapauksessa, jossa lämmönsiirtonestettä pääsisi jatkuvasti vuotamaan suuria määriä, MIBK on lämmönsiirtonesteen sisältämistä yhdisteistä haitallisoin aine pohjavedelle. Se on haitallisempi kuin isopropanoli. Näin ollen korvaamalla MIBK isopropanolilla pienennetään lämmönsiirtonesteen aiheuttamaa mahdollista riskiä pohjavedelle vuototilanteissa.

### 3 ENERGIKAIVON KÄYTÖN AIKAiset YMPÄRISTÖRISKIT

Energiakaivon tai kaivojen käytön aikaista riskiä tarkastellaan sekä kvalitatiivisesti että yhdessä erityistapauksessa kvantitatiivisesti. Erityistarkasteluna

tarkastellaan suolaisen pohjaveden sekoittumista makeaan pohjaveteen energiakaivon käytön aikana.

#### 3.1 Lähteet

Energiakaivon käytön aikana ympäristön kannalta ainoa mahdollinen haitta-aine on lämmönsiirtoneste. Kuten kappaleessa 2.1 on todettu, noin 200 m syvässä energiakaivossa ja 10–15 m:n vaakaputkitusosuudella on noin 430 litraa lämmönsiirtonestettä ja 300 m syvässä kaivossa vastaavasti noin 630 litraa. Kappaleessa 2.1 on myös esitetty lämmönsiirtonesteen sisältämien denaturointiaineiden määrät.

Mikäli lämmönsiirtoputkisto rikkoutuu käytön aikana, vain osa siinä olevasta lämmönsiirtonesteestä vuotaa maaperään (kuva 11). Putken rikkoutuessa lämpöpumpun liuospiirin paine laskee ja lämpöpumpun varolaitteet pysäyttävät liuoskierron automaattisesti.

Suurin riski putken rikkoutumiselle on liitoskohta, jossa energiakaivosta tuleva putki liitetään vaakatasossa lämpöpumpulle lähtevään putkeen. Tällöin putkistosta vuotaa maaperään maksimissaan vuotokohdan yläpuolinen osuus. Tässä tapauksessa vuotomäärä riippuu vaakaputkiston asennuspituudesta. Jos vaakaputkistoa on asennettu 10–15 metriä, vuotomäärä on 10–15 l.

Mikäli vuoto tapahtuu pohjaveden pinnan alapuolisella osalla, vuotamaan pääsee ainoastaan pohjavedenpinnan yläpuolinen osuus putkistosta. Tämän selittää nestefysiikka. Kun kaksi eri nestepintaa pääsee kosketuksiin toistensa kanssa, ne hakeutuvat tasapainoon eli samapintaisiksi. Jos pohjavedenpinta on energiakaivossa 10 m:n syvy-

dellä putkistosta ja vaakavedon osuus on 10–15 m, putken rikkoutuessa pohjavedenpinnan alapuoliselta osalta lämmönsiirtonestettä pääsee vuotamaan energiakaivoon maksimissaan 40–60 litraa.

Pohjavedenpinnan alapuolisessa vuodossa tapahtuu myös konsentraatioiden tasaantumista, joka on erittäin hidas prosessi (lämmönsiirtoneste on jo yli 70 % vettä), ja siksi sillä ei ole vaikutusta riskitarkasteluun.

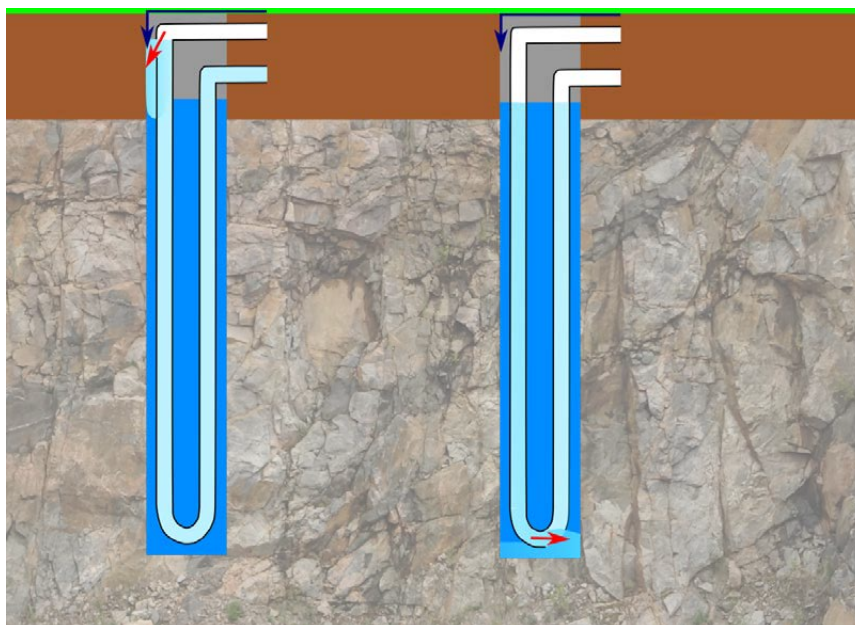
Virheellisesti tehty mitoitus, jossa maankamarasta otetaan energiaa liikaa sen tuottoon nähden, aiheuttaa niin lämmönsiirtonesteen, sitä ympäröivän veden kuin kaivon seinämienkin lämpötilan laskun. Näin ollen lämmönkeruuputkisto voi rikkoutua myös liiallisen energianoton ja sitä seuraavan pohjaveden jäätymisen vaikutuksesta. Tällaisissa tapauksissa putkisto tyypillisesti pusertuu ruttuun ja vaikeuttaa lämmönsiirtonesteen virtausta ja pumppaustyötä, jolloin jäätyminen huomataan. Tällöin lämpöpumpun liuoskierron pieneminen kasvattaa liuospiirin lämpötilaeroa (mitoitusarvosta n. 3 K -> esim. 5–6 K), jolloin samalla höyrystimen lämpötila ja lämpöpumpun teho ja tehokkuusluku (COP) laskevat (Kari Kauppila, suullinen tiedonanto 16.3.2021). Putkiston kasaan painuminen näkyy käyttäjälle viimeistään paisunta-astian täyttymisenä ja varoventtiilin laukeamisena (Kari Kauppila, suullinen tiedonanto 16.3.2021). Näissäkin tapauksissa putkisto ei välttämättä rikkoudu puhki, jolloin

lämmönkeruuneste ei pääse vuotamaan maa- tai kallioperään.

Muina lähteinä mahdolliselle ympäristöriskille voidaan pitää suolaisen veden esiintymistä energiakaivossa ja pintavesien pääsyä energiakaivoon. Mikäli suolaista vettä pääsee virtaamaan pohjaveteen, se vaikuttaa makean pohjaveden laatuun

paikallisesti. Samoin mikäli pintavettä pääsee valumaan energiakaivoon, se voi vaikuttaa kaivossa olevan pohjaveden laatuun.

Yhtenä käytön aikaisena riskiskenaariona voidaan pitää myös lämpötilan muutoksista aiheutuvia mikrobiologisia muutoksia energiakaivossa ja sen välittömässä läheisyydessä olevaa pohjaveteen.



Kuva 11. Lämmönsiirtoputkiston rikkoutumisen eri skenaariot ja niistä maa- tai kallioperään pääsevän lämmönsiirtonesteen vuotokohtat. Punainen nuoli kuvaa vuotokohtaa ja sininen lämmönsiirtonesteen kiertosuuntaa kaivon ollessa käytössä. Valkoinen osuus lämmönsiirtoputkessa kuvaa energiakaivoon vuotavaa osuutta koko kaivon lämmönsiirtonesteestä (vaalean-sininen väri). Kuva ei ole mittakaavassa. Kuva: Sami Vallin, GTK.

### 3.2 Kulkeutumisreitit

Geologiasta johtuvat kulkeutumisreitit ovat käyttö-vaiheessa paikallisesti samat kuin porausvaiheessa, koska energiakaivon sijainti ei käytön aikana muutu. Näin ollen kappaleessa 2.4 esitetyt lämmönsiirtonesteen kulkeutumisen skenaariot pohjavedessä pätevät myös käyttövaiheeseen.

Lämmönsiirtonesteen vuotoja energiakaivosta kallioperän pohjaveteen voidaan rajoittaa myös teknisin keinoin kaivojen tekovaiheessa. Energiakaivo voidaan ”sukittaa”, jolloin lämmönsiirtoputket ovat suojatussa ”pussissa”, joka rajoittaa lämmönsiirtonesteen pääsyä kaivoon. Kaivo voidaan myös täyttää bentoniittimassalla. Bentoniittitäyttö vaaditaan yleisesti energiakaivoihin Pohjoismaiden ulkopuolella. Täytön vaatimus perustuu erilaiseen geologiaan, ja siksi se ei Suomessa ole vastaavasti tarpeellinen kuin esim. Keski-Euroopassa. Bentoniittimassa täyttää ener-

giakaivon, jolloin kaivo ei ole suorassa kontaktissa kallioperän pohjaveteen. Molempia yllä esitettyjä riskien rajoitusmenetelmiä on käytetty varsinkin pohjavesialueilla sijaitsevien energiakaivojen rakentamisessa erityisesti Ruotsissa, Suomessa ja Norjassa. Sekä sukitukseen että bentonointiin liittyy kuitenkin asennusaikaisia teknisiä riskejä, ja siksi ne eivät toistaiseksi ole muodostuneet 100-prosenttiseksi riskinhallintakeinoiksi. Molempien menetelmien suojavaikutukset eivät ole käytännössä olleet samalla tasolla kuin suunnitteluvaiheessa on arvioitu (Lutz & Reduth 2020, Reuss 2020).

Mikrobiologiset muutokset kohdistuvat lähinnä energiakaivossa olevaan pohjaveteen tai kaivon välittömässä läheisyydessä olevaan maa- tai kallioperään. Mahdolliset muutokset rajoittuvat lämpötilan muutosalueelle.

### 3.3 Suolaisen pohjaveden sekoittuminen energiakaivossa

#### 3.3.1 Laskennan lähtökohdat

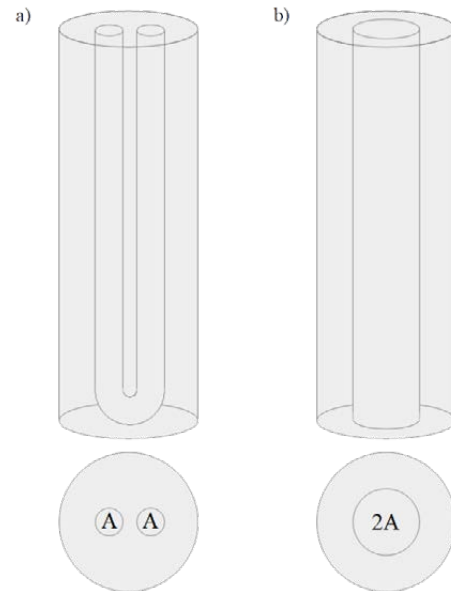
Lämpötilaero lämmönsiirtonesteen ja kallion välillä aiheuttaa vedellä täytettyyn energiakaivoon virtausliikkeen, jota kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi tai lämpölapoksi.

Tässä esitetyn tarkastelun lähtökohtana on 100 metriä syvä porareikä, jonka ylimmät 95 metriä ovat täyttyneet makealla vedellä ja jonka pohjalla on 5 metriä paksu suolaisen veden kerros. Porauksen jälkeen suolainen vesi painuu raskaampana energiakaivon pohjalle. Tarkastelun pyrkimyksenä oli selvittää, sekoittuuko porareian pohjalla oleva suolavesi sen yllä olevaan makeaan veteen, kun porareikään on asennettu lämmönkeruuputkisto, jolla otetaan lämpöä reikää ympäröivästä kalliosta. Tarkastelua varten luotiin elementtimalli, jota käyttäen simuloitiin lämmönsiirtoa lämpökaivoa täyttävässä pohjavedessä sekä pohjaveden luonnollista konvektiota ja suolapitoisuutta. Mallinnus ja simulointi suoritettiin COMSOL Multiphysics® -ohjelmistolla. Mallinnus perustuu Gustafsson ym. (2010) julkaisemaan tutkimukseen.

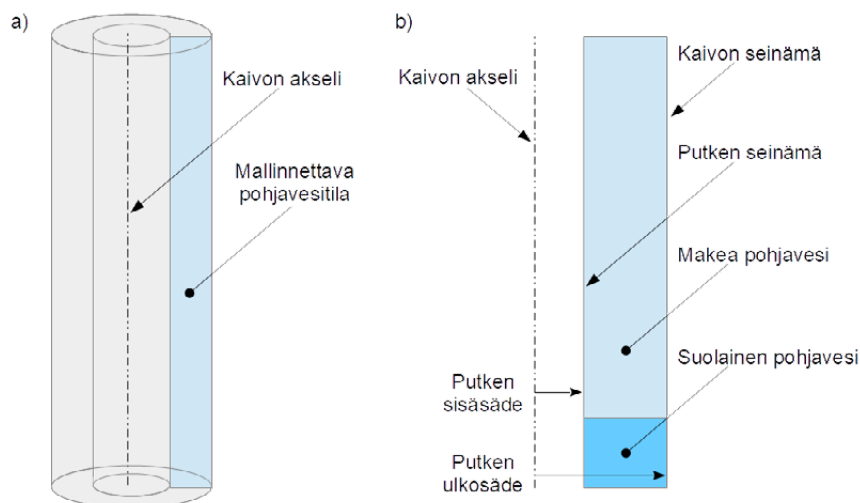
#### 3.3.2 Mallinnus ja simulointi

Lämpökaivoksi oletettiin tyypillinen porareian ja U-putken muodostama järjestelmä, jossa putken ja porareian seinämien välinen tila on pohjaveden täyttämä (kuva 12). Koska tällaisen järjestelmän mallintaminen olisi ollut laskennallisesti liian ras-

kasta, käytettiin lämpökaivon yksinkertaistusta, jossa U-putken haarat yhdistettiin yhdeksi ekvivalenttiputkeksi (kuva 12). Koska ekvivalenttimallin geometria on pyörähdysymmetrinen, rakennettiin kaksikulotteinen elementtimalli, jolla kuvataan ekvivalenttimallin pohjavesitäytteen pystyleikkausta (kuva 13).



Kuva 12. Lämpökaivon geometria. (a) Lämpökaivo on porareian ja U-putken muodostama järjestelmä. (b) Laskennallisista syistä geometria yksinkertaistettiin ekvivalenttimalliksi, jossa U-putken haarat on yhdistetty yhdeksi ekvivalenttiputkeksi, jonka poikkileikkauksen pinta-ala ( $2 \cdot A$ ) on sama kuin U-putken haarojen poikkileikkausten pinta-alojen summa ( $A + A$ ).



Kuva 13. Elementtimallin geometria. (a) Ekvivalenttimalli on pyörähdysymmetrinen kaivon akselin suhteen, joten pohjavesitilaa voidaan mallintaa (b) kaksikulotteisella mallilla, joka on pyörähdysymmetrinen kaivon akselin suhteen.

Elementtimallilla simuloitiin pohjavedessä tapahtuvia fysikaalisia prosesseja ratkaisemalla pohjavesitilassa lämpötilakenttä  $T$  [K], virtauskenttä  $u$  [m/s] ja suolapitoisuus  $c$  [mol/m<sup>3</sup>]. Näistä lämpötila- ja virtauskenttä vaikuttivat toisiinsa.

Myös virtauskenttä ja suolapitoisuus vaikuttivat toisiinsa. Nämä fysikaaliset kytkökset otettiin huomioon laskennassa, joka tehtiin kytkettynä mallinnuksena. Pohjaveden tiheys  $\rho_{\text{saltwater}}$  [kg/m<sup>3</sup>] mallissa riippui suolapitoisuudesta ja lämpötilasta kaavan

$$\rho_{\text{saltwater}}(T, r, z) = \rho_{\text{water}}(T) + c(r, z) \cdot 58,44 \text{ g/mol} \quad (1)$$

mukaan ( $r$  on radiaalinen koordinaatti ja  $z$  on pystykoordinaatti). Kaavassa (1) makean veden tiheys  $\rho_{\text{water}}$  [kg/m<sup>3</sup>] riippui lämpötilasta relaation

$$\rho_{\text{water}}(T) = 6,3 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 6,0 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 19 \cdot T - 950 \text{ K} \quad (2)$$

mukaan.

Mallin reunaehdot olivat seuraavat:

a) Lämpötilakenttä:

- lämpötilareunaehto putken ja kaivon seinämille lämmöneriste mallin ylä- ja alareunoille (mallin vaakareunat)

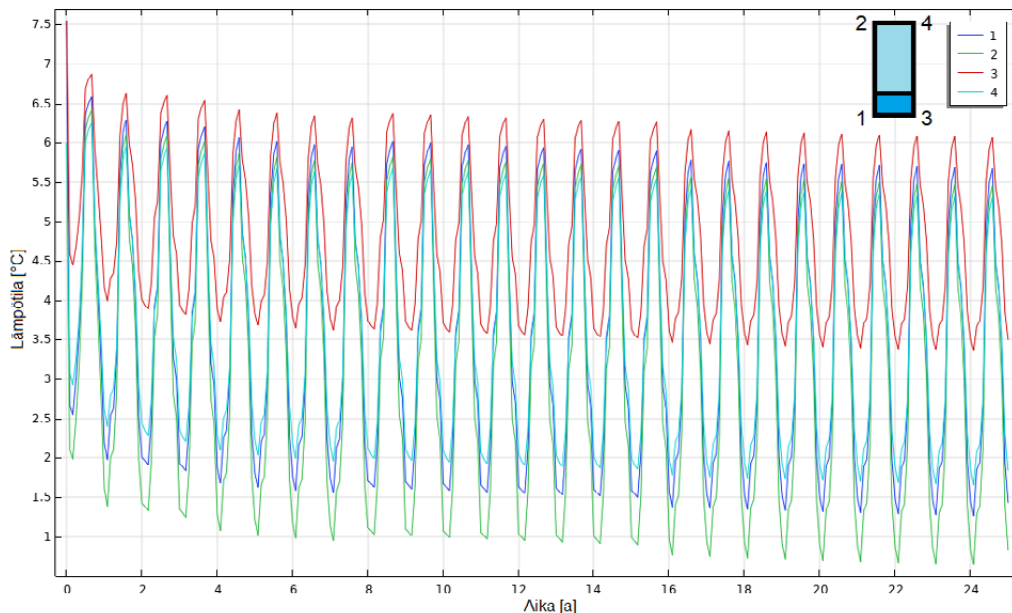
b) Virtauskenttä:

- liukumaton seinä ( $u = 0$ ) mallin kaikille reunoille

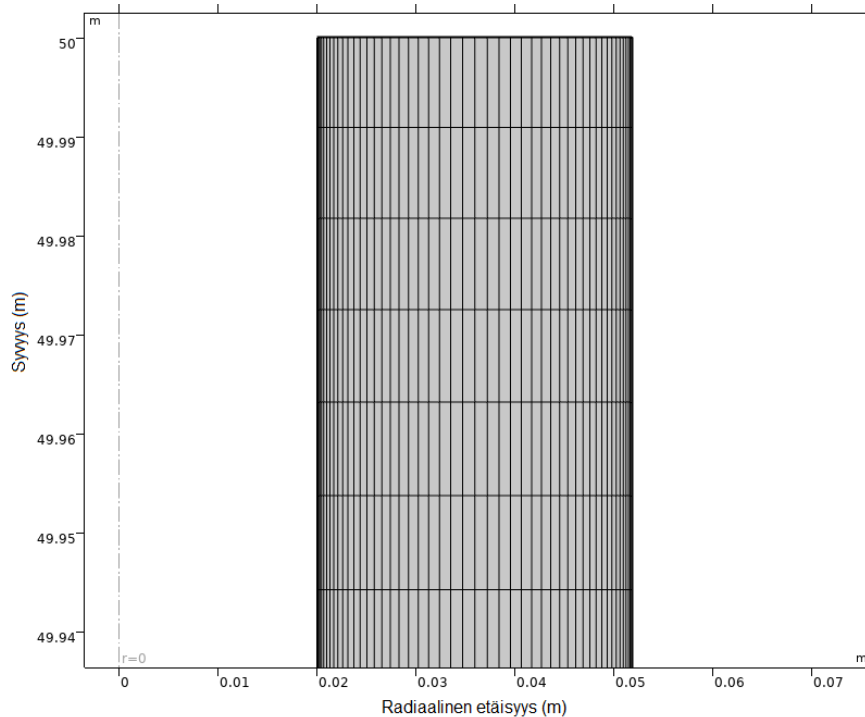
c) Konsentraatiokenttä:

- nolla-massavuo makean veden reunoille
- vakiosuolakonsentraatio 200 mol/m<sup>3</sup> suolaisen veden reunoille

Edellä kuvatulla mallilla simuloitiin pohjaveden lämpötilakenttää, virtauskenttää ja suolapitoisuutta 25 vuotta. Pohjavesi oli simulaatioiden alkuhetkellä seisovassa tilassa ( $u = 0$ ). Mallin viiteen alimpaan metriin asetettiin suolakonsentraation alkuarvoksi 200 mol/m<sup>3</sup>, ja ne pysyivät koko simulaation ajan vakiosuolapitoisuudessa 1,17 prosenttia, joka vastaa Suomen syvistä kalliokaivoista mitattua noin 12 g/ℓ:n TDS-arvoa (Total Dissolved Solids).



Kuva 14. Elementtimallin lämpötilareunaehdoissa käytetty lähtöaineisto, jonka avulla laskettiin mallin pystyreunoille asetetut muuttuvat lämpötilat. Aineisto laskettiin erillisellä kolmiulotteisella U-putkimallilla, jossa kalliosta otettiin 100 metriä syvällä lämpökaivolla lämpöenergiaa 7,5 MWh vuodessa 25 vuoden ajan. Pikkukuva oikealla ylhäällä esittää lämpötilapisteiden sijaintia mallissa. Pisteet 1 ja 2 kuvaavat putkea reiän pohjalla ja yläreunalla ja pisteet 3 ja 4 kalliota, eli reiän reunaa vastaavissa paikoissa. Pystyreunalle 1→2 asetettiin lämpötila, joka muuttui lineaarisesti pisteen 1 lämpötilasta pisteen 2 lämpötilaksi eli ajasta  $t$  ja syvyydestä  $z$  riippuva funktio  $T_{1 \rightarrow 2}(t, z) = (0,5 \cdot L - z)/L \cdot T_1(t) + (z + 0,5 \cdot L)/L \cdot T_2(t)$ . Samoin pystyreunalle 3→4 asetettiin lämpötila, joka muuttui lineaarisesti pisteen 3 lämpötilasta pisteen 4 lämpötilaksi eli funktio  $T_{3 \rightarrow 4}(t, z) = (0,5 \cdot L - z)/L \cdot T_3(t) + (z + 0,5 \cdot L)/L \cdot T_4(t)$ .



Kuva 15. Mallin verkotus. Malli verkotettiin siten, että verkko tiheni vasenta ja oikeaa pystyreunaa kohden (50 elementtiä vaakasuunnassa) sekä ylä- ja alapäästä kohden (2 000 elementtiä pystysuunnassa). Suorakulmaisia elementtejä syntyi 100 000 kappaletta. Huom. ylä- ja alapäästä kohden tihenevän verkotuksen esittäminen kuvassa ei onnistu (tuloksena olisi pelkkä musta suorakaide, koska elementtejä on liikaa esitettäväksi pienessä kuvassa).

Malli verkotettiin käyttäen suorakulmaisia elementtejä (kuva 15). Pystysuunnassa elementtejä oli 2 000 kappaletta ja horisontaalisuunnassa 50 kappaletta eli yhteensä 100 000 kappaletta. Elementtien korkeus pieneni ylös- ja alaspäin mentäessä, ja korkeus oli suurin keskellä mallia. Vaakasuunnassa elementtien leveys pieneni mentäessä kohti vasenta ja oikeaa reunaa, ja leveys oli suurin keskellä mallia. Näin siksi, että verkotus olisi tihein siellä, missä ratkaisu vaatii suurinta resoluutiota. Vapausasteiden lukumääräksi tuli 818 464. Simulaation laskeminen vei noin 33,5 tuntia 8-ytimisellä pöytäkoneella, jossa on 64 GB RAM-muistia.

### 3.3.3 Tulokset

Kuva 16 esittää pohjavesitäytteen lämpötilakenttää viimeisen simulaatiovuoden aikana. Kaivon seinämän lämpötila (oikea reuna) on putken seinämän (vasen reuna) lämpötilaa korkeampi. Tämä johtuu siitä, että lämmönkeruuputkistossa kierrätetään kalliota kylmempää nestettä, jotta saadaan aikaan lämmön siirtyminen lämpimämmästä kalliosta kylmempään lämmönkeruunesteeseen. Tällöin pohjaveden lämpötilakenttään syntyy horisontaalinen lämpötilaero, joka saa aikaan luonnollisen konvek-

tion kaivoa täyttävässä pohjavedessä. Pohjaveden tiheys riippuu lämpötilasta, ja painavampi eli kylmempi pohjavesi pyrkii laskeutumaan kaivon pohjalle, kun taas kevyempi eli lämpimämpi pohjavesi pyrkii nousemaan kohti pintaa.

Kuva 17 esittää pohjaveden virtauskenttää viimeisen simulaatiovuoden aikana. Kylminä talvi-kuukausina luonnollinen konvektio on selkeästi voimakkaampi kuin lämpiminä kesä- ja syyskuukausina. Tämä johtuu siitä, että talvella tarvitaan enemmän lämpöenergiaa, joten lämpöä otetaan suuremmalla teholla, mikä myös aiheuttaa suuremman horisontaalisen lämpötilagradientin, joka johtaa voimakkaampaan konvektioon.

Tulosten perusteella konvektiosoluja syntyy pohjavesitäytteeseen kaksi tai kolme kappaletta (ks. kuva 18) konvektion voimakkuuden (kuukauden) mukaan. Konvektion voimakkuudesta huolimatta suolainen pohjavesi ei näytä sekoittuvan makeaan veteen (ks. kuva 19). Toisin sanoen luonnollinen konvektio ei näyttäisi olevan riittävän voimakas jaksakseen nostaa alimman viiden metrin suolaista vettä ylöspäin ja sekoittaakseen sitä makeaan veteen. Näin ollen raskas suolainen vesi jää alimpaan viiteen metriin eikä sekoitu makeaan veteen lainkaan simuloitujen 25 vuoden aikana (kuva 19).

### 3.3.4 Mallin rajoitukset

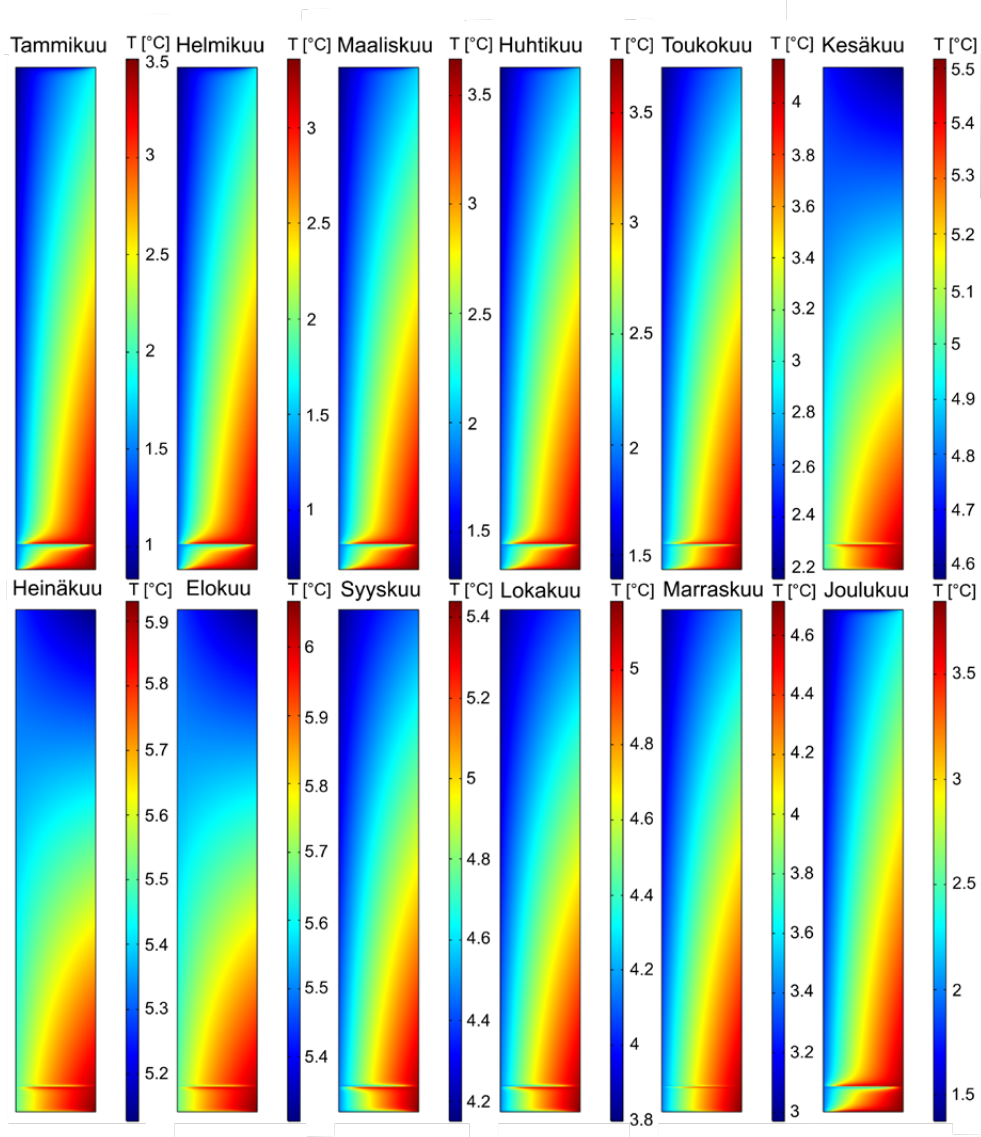
Laskentaesimerkki on teoreettinen ja ei siten edusta mitään todellista tapausta. Laskennan lähtöparametrit on kuitenkin valittu mitattujen tulosten perusteella.

Mallissa on jouduttu tekemään seuraavia yleistyksiä, jotka voivat poiketa todellisesta tilanteesta:

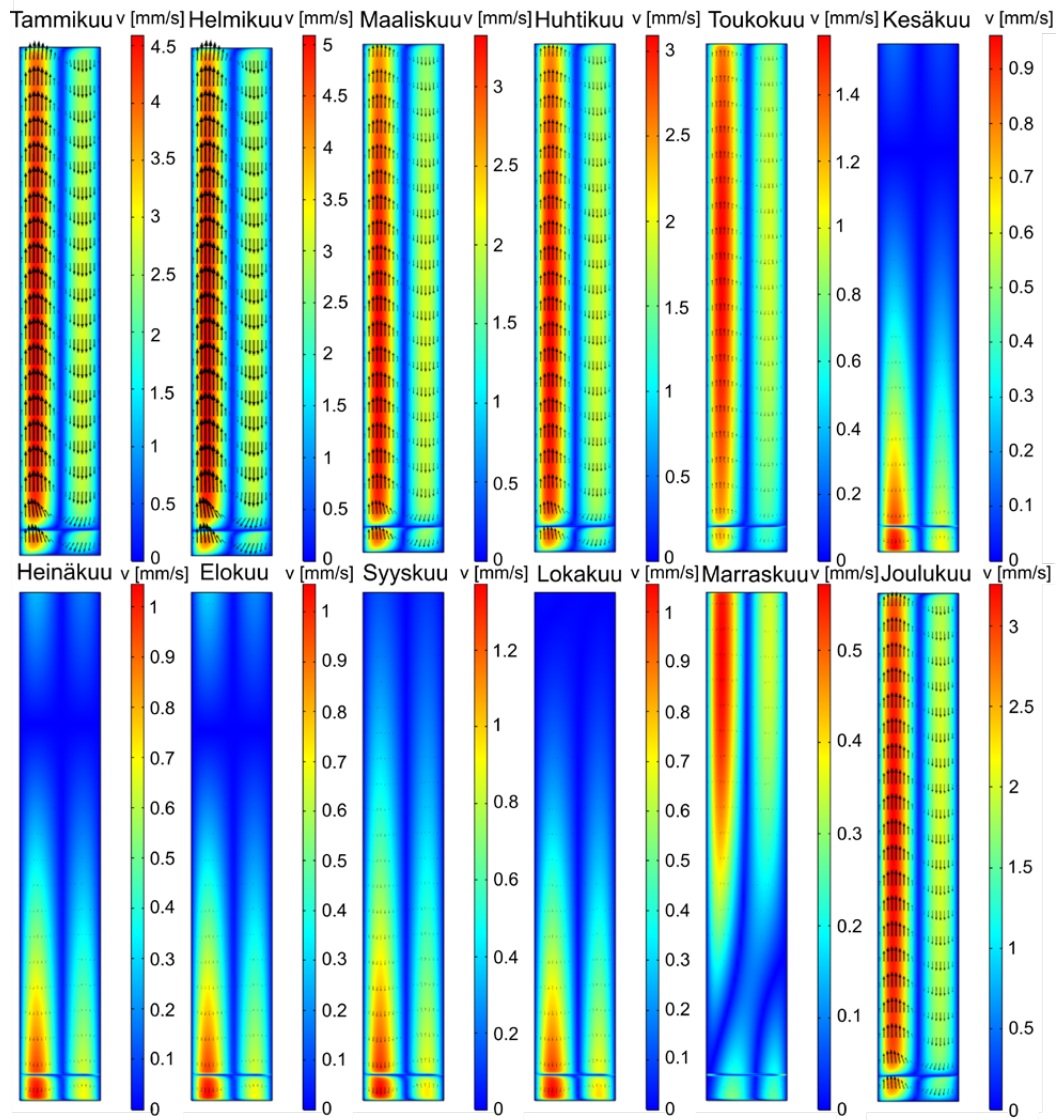
- lämmönsiirtoputket on sijoitettu tarkasti keskelle porareikää

- porareian seinämät on oletettu sileiksi
- konvektioratkaisu on yksinkertaistettu.

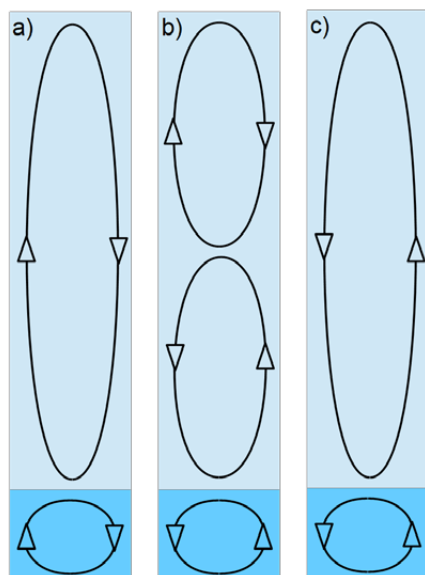
Mallinnuksessa on kuitenkin saatu syntymään havaintoja vastaava konvektio ja käytetty suolapitoisuus on mitattu suomalaisesta kallioperästä. Näin ollen mallin yleistyksillä ja teoreettisella lähtötilanteella ei arvioida olevan vaikutusta lopputulokseen ja johtopäätöksiin.



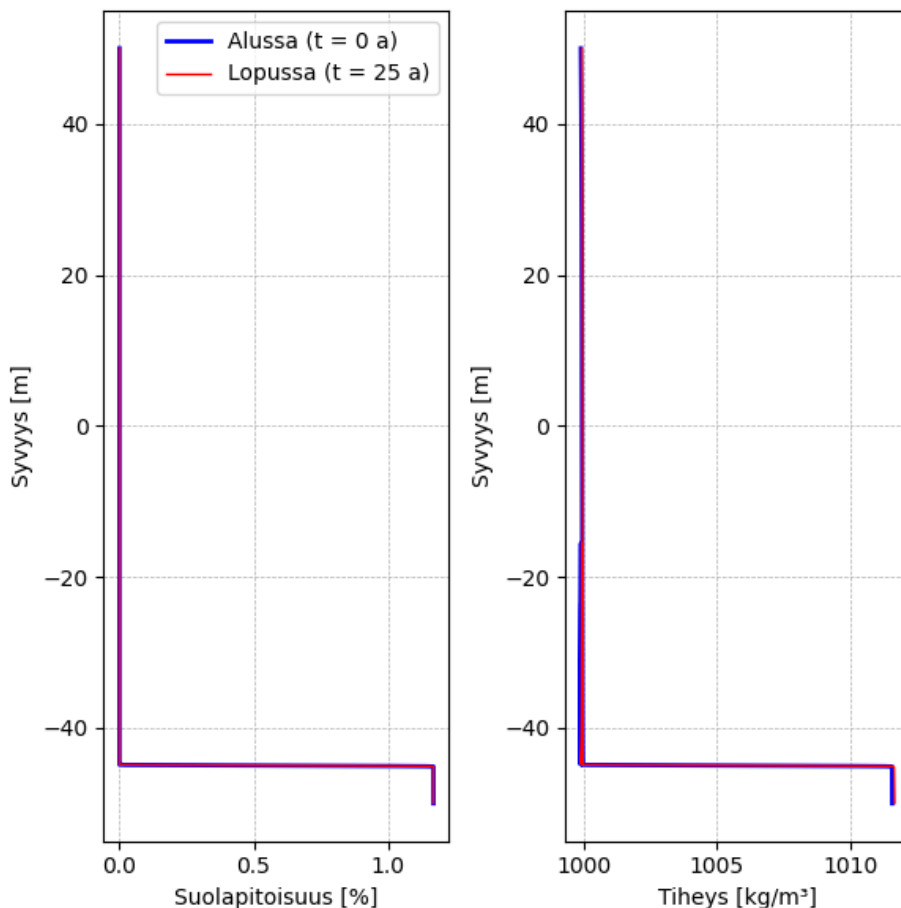
Kuva 16. Lämpötilakenttä kunkin kuukauden alussa viimeisenä simulaatiovuonna. Kullakin kuukaudella on oma väriskaalansa, jotta muutokset tulevat parhaiten esille.



Kuva 17. Virtausnopeuskenttä kunkin kuukauden alussa viimeisenä simulaatiovuonna. Virtausnopeuden suuruus on esitetty värinä ja virtausnopeusvektorit mustilla nuolilla. Kullakin kuukaudella on oma väriskaalansa, jotta muutokset tulevat parhaiten esille. Sen sijaan, virtausnopeusvektorien pituudet kunkin kuukautena ovat verrannollisia toisiinsa.



Kuva 18. Periaatteellinen esitys simulaatiossa syntyneistä konvektiosoluista. a) Joulukuu–toukokuu (suurimmat tehot). b) Kesäkuu–elokuu (pienimmät tehot) ja lokakuu–marraskuu. c) Syyskuu.



Kuva 19. Pohjaveden suolapitoisuus ja tiheys simulaation alussa ja lopussa. Erot ovat niin vähäisiä, että käyrät menevät päällekkäin.

### 3.4 Vastaanottajat ja riskinhallintatoimenpiteet

Koska geologia ja lämmönsiirtonesteen kulkeutumisreitit ovat kohdekohtaisesti samat käyttö- ja porausvaiheessa, myös vastaanottajatarkastelu on tältä osin sama. Porausvaiheessa tehty riskinhallintatoimenpiteet toimivat myös energiakaivon käyttövaiheessa.

Koska suolainen pohjavesi ei mallinnuslaskelman perusteella sekoitu makean veden kanssa, se ei muodosta kulkeutumisreittiä eikä näin ollen vastaanottajaa ympäristöriskille.

Mikrobiologisten muutosten haittavaikutukset liittyvät lähinnä korkeisiin lämpötiloihin (esim. yli 30 tai 60 °C:seen). Haittavaikutuksina on todettu

mm. levän muodostumista pohjaveteen ja haitallisten alkuaineiden liukoisuuden kasvamista (Bonte 2011, Iihola ym. 1988). Suomessa energiakaivojen käyttötarkoitus on pääasiassa lämmitykseen. Niistäkin kaivoista, joita käytetään viilennysenergian tuottamiseen, hyödynnetään lähtökohteisesti huomattavasti enemmän lämmitys- kuin viilennysenergiaa. Energian käyttö aiheuttaa siis lämpötilan laskua energiakaivossa ja sitä ympäröivässä kallioperässä. Näin mikrobien elinolosuhteet muuttuvat huonommiksi energiakaivon käytön yhteydessä eikä niistä voida arvioida muodostuvan haittavaikutuksia.

## 4 ENERGIKAIVON SULKEMINEN

Energiakaivojen suunniteltu käyttöikä vaihtelee kohteen ja energian hyödyntämisen intensiteetin mukaisesti, mutta hyvin optimoidun järjestelmän käyttöaikana voidaan pitää vähintään 50 vuotta.

Kaivon lopettamiseen ei liity uusia, aiemmin tunnistamattomia ympäristöriskejä. Lämmönsiirtoputkistot ovat erittäin pitkäkestoisia, joten niiden haurastuminen ja sitä kautta lämmönsiirtonesteen vuotojen mahdollistaminen maaperään ei ole realistinen riskitapahtuma.

Lämmönsiirtoneste voidaan järjestelmän sulkemisen yhteydessä imeä putkistosta pois ja toimittaa asianmukaiseen jatkokäsittelyyn.

Porattu kaivo, sen maaperän osalla oleva suoja-putkitus sekä kaivossa oleva lämmönsiirtoputkisto eivät aiheuta ympäristöriskiä energiakaivon käytön päätyttyä.

## 5 PORAUJSÄTTEEN LUOKITTELU

Kallioporauksen aikana syntyy hienorakeista, raekooltaan  $< 0,1\text{--}0,3\text{ mm}$ , kiviainesta. Geoteknisen maalajiluokittelun mukaisesti vastaavan raekoon omaava materiaali luokitellaan siltiksi (raekoko  $\leq 0,06\text{ mm}$ ) tai hiekaksi (raekoko  $0,06\text{--}2\text{ mm}$ ). Kallioporauksen aikana kairareiästä ylös tulevaa materiaalia kutsutaan yleisesti poraussoijaksi. Koska porauksen aikana saatetaan käyttää vettä tai porausreikään sekoittuu maa- tai kallioperän vettä, on poraussoija usein myös märkää eli lietemäistä. Poraussoijaa muodostuu noin  $1\text{ m}^3/100$  porausmetriä. Näin ollen yhden  $200\text{--}300\text{ m}$  syvän energiakaivon porauksessa muodostuu  $2\text{--}3\text{ m}^3$  kuivaa tai märkää poraussoijaa. Poraussoijan koostumus on sama kuin poratun kallioperän, joten se vastaa luonnontilaisen ympäristön koostumusta.

Jätelain (646/2011, JL) mukaan jätteellä tarkoitetaan ainetta tai esinettä, jonka sen haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä taikka on velvollinen poistamaan käytöstä. Jätelain perusteluiden (HE 199/2010 vp) mukaan sellainen rakentamistoimen aikana kaivettu pilaantumaton maa-ainese, joka hyödynnetään varmasti ja suunnitelmallisesti ilman merkittäviä muuntamistoimia, ei lähtökohtaisesti ole jätettä, eikä hyödyntäminen tällöin edellytä jätelain nojalla ympäristölupaa. Valtioneuvoston asetus kaivannaisjätteistä (VNa 190/2013) määrittelee pilaantumattoman maa-aineksen olevan kalliota tai maaperän pintakerroksesta irrotettua orgaanista tai epäorgaanista ainesta, joka on luonnontilaista tai joka ei sisällä haitallisia aineita, joista voi aiheutua ympäristön pilaantumista tai sen vaaraa. Vastaava määritelmä on esitetty Ympäristöministeriön muistiossa rakentamisen maa-ainesten hyödyntämistä koskevan sääntelyn kehittämisestä

(Ympäristöministeriö 2020). Maa-ainesta pidetään yleensä pilaantumattomana silloin, kun sen sisältämien haitallisten aineiden pitoisuudet alittavat maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista annetun valtioneuvoston asetuksen (214/2007, PIMA-asetus) mukaiset kynnsarvot tai alueelliset taustapitoisuudet. PIMA-asetuksen alemmaa ohjearvoa sovelletaan usein maa-ainesejätteen pilaantumattomuuden määrittelyssä mm. maankaatopaikoilla (Ympäristöministeriö 2020).

Mikäli energiakaivo porataan alueelle, jonka kallioperässä voi esiintyä luontaisesti kohonneita pitoisuuksia potentiaalisia haitta-aineita (esimerkiksi arseenia), poraussoijaa ei välttämättä voi hyödyntää kiinteistöllä sellaisenaan esimerkiksi maanparannusaineena, jos poraussoijan pitoisuudet ylittävät PIMA-asetuksen kynnsarvon tai maaperän alueellisen taustapitoisuuden. Veteen sekoituneena poraussoija voi olla myös lietemäistä, jota voi olla vaikea hyödyntää sellaisenaan. Kiviainesten sisältämän arseenin liukoisuuden on todettu kasvavan hienoainespitoisuuden kasvaessa (Ketola & Kuula 2013). Poraussoijan loppusijoittamisesta maankaatopaikalle säätelevät kunkin vastaanotto- paikan lupaehdot ja menettelytavat.

Muiden kallioperässä esiintyvien alkuaineiden tavoin poraussoija voi sisältää radioaktiivisia aineita, kuten uraania, mikäli energiakaivo osuu sellaiseen kohtaan kallioperässä, jossa on uraanimineralisaatiota. Energiakaivon poraus ei rikasta uraania poraussoijaan, joten mahdollisten radioaktiivisten aineiden pitoisuus poraussoijassa on maksimissaan sama kuin porauskohdan kallioperässä. Mahdolliset kallioperän uraanikonsentraatiot esiintyvät mineraalisaatioina vain osassa

porausreikää eivätkä siis koko porausreiän kattavana mineralisaationa. Näin ollen mahdollinen korkea paikallinen pitoisuus kallioperässä laime-

nee muuhun porausreiästä tulevaan poraussoijaan. Siten poraussoijasta ei voida arvioida muodostuvan säteilyriskiä sen jatkosijoittamista ajatellen.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä raportissa esitettyjen tutkimusten perusteella energiakaivo tai -kaivot eivät muodosta hallitsematonta ympäristöriskiä silloin, kun niiden asennus ja käyttö toteutetaan asianmukaisesti. Kaikkiin tässä raportissa todettuihin riskitapahtumiin on olemassa teknisiä ja toiminnallisia riskien vähentämis- ja hallitsemismahdollisuuksia. Lisäksi tässä raportissa tunnistetut riskit toteutuessaankin ovat paikallisia ja pienialaisia. Tämän perusteella energiakaivojen rakentamisen lupamenettelyyn ei ole tarpeen asettaa ympäristöllisiä lisävelvoitteita, kuten ympäristöluvanvaraisuutta.

Tässä tutkimuksessa tehdyn riskitarkastelun perusteella ei ole myöskään tarpeen antaa uusia rajoitteita energiakaivojen asentamiselle ja käytölle pohjavesialueella. Energiakaivo-oppaassa (Juvonen & Lapinlampi 2013) on esitetty 500 m:n suojaetäisyys pohjavedenottamoihin. Tämä etäisyys on noin 8-kertainen verrattuna tässä tutkimuksessa mallinnettuihin lämmönsiirtonesteen pahimpiin leviämiskenaarioihin. Tämän perusteella Energiakaivo-oppaassa esitetty suojaetäisyys on jopa konservatiivinen. Riskitarkastelussa ei todettu sellaisia riskejä, jotka tuota etäisyyttä vedenottamoille lukuun ottamatta rajoittaisivat energiakaivojen asentamista ja käyttöä pohjavesi- tai muulla ympäristön kannalta herkällä alueella.

Suurimmat ympäristöriskit liittyvät energiakaivojen porausvaiheeseen. Porausvaiheessa merkittävin riskiskenaario on kevyen polttoöljyn tai dieselöljyn vuotaminen energiakaivon ympäristön maaperään mahdollisen vahingon tai onnettomuuden seurauksena. Vuoto on tapahtuessaan kuitenkin pintavuoto, jossa haitta-aineiden leviäminen laajemmalle on helposti rajattavissa ja estettävissä, kun potentiaaliseen vuotoriskiin on varauduttu asianmukaisesti jo ennakolta.

Raportissa tarkasteltiin tilannetta, jossa 100 l ja 300 l lämmönsiirtonestettä pääsee vuotamaan maaperään. Tarkastelu sisälsi 16 erilaista simulaatiota, jotka eri vuotomäärän lisäksi sisälsivät erilaisia hydrogeologisia ominaisuuksia sekä kaksi eri pohjavesimuodostumatyyppiä. Tarkastelu on konservatiivinen, koska veden liikkumisen lisäämiseksi

malliin asennettiin pohjavedenottamo, vuoto pääsi suoraan pohjavesikerrokseen ja vuotomäärät arvioitiin 2–30-kertaisiksi realistisiin vuotomahdollisuuksiin nähden. Missään näissä 16 simulaatiossa etanolin PNEC-arvon ylittävän pitoisuuden alue ei levinnyt 60 m:ä kauemmaksi vuotokohdasta. Etanoli ja lämmönsiirtonesteen lisäaineet MIBK ja MEK liukenevat helposti pohjaveteen mutta myös hajoavat nopeasti. Simulaation tulokset vastaavat hyvin kirjallisuudessa raportoitujen mallinnusten ja seurantakokeiden tuloksia (mm. Dakhel ym. 2003, Zhang ym. 2006, Spalding ym. 2011, Struß ym. 2020).

Mikäli lämmönsiirtonestettä pääsee vuotamaan maaperään ja pohjaveteen sellaisella alueella, joka on aiemman toiminnan vuoksi pilaantunut öljyhiilivedyllä, erityisesti bensiinin lisäaineilla, lämmönsiirtonesteen sisältämä etanoli todennäköisesti hidastaa hapellisissa olosuhteissa esim. bentseenin ja MTBE:n hajoamista. Runsaasti orgaanista ainesta sisältävissä olosuhteissa öljyhiilivedyt kiinnittyvät orgaaniseen ainekseen. Etanolin kulkeutumisnopeuteen maaperän orgaanisella aineksella ei ole yhtä suurta vaikutusta.

Denaturointiaineista MIKB on ympäristön kannalta haitallisimman lämmönsiirtonesteen yhdiste, mikäli vuotomäärät ovat suuria. Tämän vuoksi Suomessa yleisimmin käytetyn lämmönsiirtonesteen valmistaja, Altia Oyj, valmistelee reseptin uusimista siten, että MIBK korvataan isopropanolilla. Korvaaminen pienentää entisestään lämmönsiirtonesteen pohjaveteen kohdistamaa riskiä mahdollisissa vuototapauksissa.

Myös suolaisen pohjaveden sekoittuminen lähi-alueella olevaan kallioperäkaivoon porauksen takia on mahdollinen ympäristöriski. Suolainen vesi ei kuitenkaan pääse vuotamaan energiakaivosta maaperän pohjaveteen, kun energiakaivo on asennettu huolellisesti ja asianmukaisesti ja tiivistetty suoja-putkella riittävän syvälle ehjään kallioperään. Pohjaveden suolapitoisuutta voidaan seurata porauksen aikana ja suolaisen veden leviämistä voidaan energiakaivossa rajoittaa tulppaamisratkaisulla.

Raportissa mallinnettiin energiakaivon käytön aikaista suolaisen kalliopohjaveden sekoittumista

kaivon vesitilavuuteen. Mallinnuslaskennan perusteella energiakaivon käytön aikainen lämpölappo tai luonnollinen konvektiovirtaus ei ole tarpeeksi voimakas, jotta se saisi ”nostettua” suolaista pohjavettä kaivon pohjalta ylöspäin ja saisi aikaan sekoittumisilmiön.

Energiakaivon porauksessa syntyvä poraussoija on luonnontilaista pilaantumaton maa-ainesta. Mikäli poraussoijan sisältämät luontaiset haitta-ainepitoisuudet voivat kuitenkin aiheuttaa vaaraa ympäristölle tai ihmisen terveydelle, se voidaan

luokitella maa-ainesjätteeksi, jolloin sen hyödyntämiskelpoisuus ja jatkosijoittamiskelpoisuus tulee selvittää. Mikäli poraussoijaa ei voida hyödyntää turvallisesti sen syntypaikassa liian korkeiden luontaisten haitta-ainepitoisuuksien vuoksi, se tulee käsitellä jätteenä. Jäteluokittelun perusteella poraussoija on maa-ainesjätettä, jota voidaan hyödyntää luvanvaraisesti esimerkiksi kaatopaikan rakenteissa. Viime kädessä se tulee loppusijoittaa luvanvaraiseen jätteen vastaanottoaikkaan.

## 7 SUOSITUKSIA YMPÄRISTÖRISKIEN VÄHENTÄMISEKSI

Energiakaivon asennuksen ja käytön aikaiset riskit tulee tunnistaa erityisesti porarien ja energia-alan suunnittelijoiden koulutuksessa ja nostaa ympäristöasiat nykyistä selkeämmin koulutukseen mukaan.

Ympäristöriskien tunnistaminen ja huomioiminen suositellaan otettavaksi rutiiniluontoiseksi toimenpiteeksi jokaisessa kohteessa. Ympäristöriskien tunnistamiseksi voidaan hyödyntää esimerkiksi ympäristölupakaavakkeen tai pima-ilmoituksen otsikointeja ja tarkastella mahdollisia riskejä näiden lupahakemusten otsikoinnin mukaisesti.

Erityistä tarkkuutta vaativille alueille, kuten pohjavesi- ja ympäristönsuojelualueille, suositellaan tehtäväksi erillinen ympäristöriskien tunnistus- ja hallintasuunnitelma, jonka noudattamista valvotaan energiakaivon asennuksen aikana. Tunnistus- ja hallintasuunnitelman periaate on vastaava kuin työturvallisuudessa. Suunnitelmassa tunnistetaan riskit, tehdään suunnitelma niiden poistamiseksi ja valvotaan, että toimitaan suunnitelman mukaisesti.

Mikäli kohdekiinteistöllä tai sen naapurikiinteistöllä on tai on ollut tiedossa sellaista maankäyttöä (esim. polttonesteiden jakelua, liuotinkemikaalien varastointia tai käyttöä), jonka seurauksena maaperään on voinut päästä haitta-aineita, tulee kiinteistön maaperän ja pohjaveden pilaantuneisuus ja puhdistustarve selvittää ennen energiakaivojen porauksen aloittamista.

Energiakaivon suojaputki tulisi asentaa jokaisella porauksella pysyvästi ehjään kallioperään. Ehjän kallioperän pystyy parhaiten määrittämään ammattitaitoinen porari. Suojaputken turvallinen asennussyvyys riippuu kulloisenkin porauspaikan kallioperän laadusta, ja se voi vaihdella kohdekohdista merkittävästi.

Poraussoijan hyödyntämiskelpoisuuden selvittämiseksi suositellaan tehtäväksi eri pääkivilajityypin alueilta tarkempi selvitys poraussoijan sisältämien haitta-aineiden keskimääräisistä pitoisuuksista, liukoisuudesta ja potentiaalisesta ympäristöriskistä (vrt. maaperän alueellinen taustapitoisuus). Näiden selvitysten perusteella voidaan saman kivilajialueen poraussoija hyödyntää tai loppusijoittaa yhtenäisin periaattein eikä jokaiselle jäte-erälle (= jokaisen energiakaivon poraussoijalle) tarvita erillistä sijoituskelpoisuuslausuntoa. Isommilla rakennuskohteilla, joissa poraussoijan määrä on yksittäistä energiakaivon porausta suurempi, voidaan suositella myös kohdekohtaista poraussoijan koostumuksen selvitystä.

Porausvasarassa suositellaan käytettäväksi biohajoavaa öljyä. Erityisesti tätä tulisi vaatia ympäristön kannalta herkemmillä alueilla (pohjavesi- ja ympäristönsuojelualueet) porattaessa.

Erityisesti suurempien geoenergiakohteiden mitoitusosaamisen vaatimusta. Oikealla mitoituksella ehkäistään kaivojen jäätymisriskiä ja siten myös lämmönsiirtoputkien rikkoutumisriskiä.

Eri toimijoiden eli suunnittelijoiden, porareiden sekä rakennusvalvonta- ja ympäristöviranomaisen keskinäinen tiedonjako ja avoin keskustelu sujuvoittavat lupaprosessia ja edesauttavat energiakaivojen rakentamiseen ja käyttöön liittyvien riskien tunnistamista ja hallintaa. Kaikkien toimijoiden yhteisenä tavoitteena tulisi olla ympäristöriskien tunnistaminen ja hallitseminen, jotta uusiutuvan energian käyttö pystyttäisiin maksimoimaan ja siten mahdollistaa hiilestä vapaan lämmitys ja viilennysenergian tuotto.

## LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO

- Altia industrial 2017.** Käyttöturvallisuustiedote Naturet –maalämpöneste / Naturet geosafe 60 %. Päiväys 4.5.2017. 10 s. Saatavissa: [https://www.altiaindustrial.com/sites/default/files/media/KTT\\_NATURET%20-maalämpöneste%20-%20NATURET%20Geo-Safe%2060%25.pdf](https://www.altiaindustrial.com/sites/default/files/media/KTT_NATURET%20-maalämpöneste%20-%20NATURET%20Geo-Safe%2060%25.pdf)
- Andersson, O. & Gehlin, S. 2018.** State-of-the-Art: Sweden, Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems. Geostrata ja Swedish Geoenergy Center. A work document prepared within IEA ECES Annex 27. 1–37.
- Bonte, M., Stuyfzand, P., Hulsmann, A. & van Beelen, P. 2011.** Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16(1):22.
- Dakhel, N., Pasteris, G., Werner, D. & Hohener, P. 2003.** Small-volume releases of gasoline in the vadose zone: impact of the additives MTBE and ethanol on ground water quality. *Environ. Sci. Technol.* 37:10, 2127–2133. Saatavissa: <https://doi.org/10.1021/es026442n>
- Fleuchaus, P. & Blum, P. 2017.** Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Geothermal Energy* (2017) 5:10. doi:10.1186/s40517-017-0067-y
- GSI Environmental. 2021.** GSI Chemical database. [Viitattu 26.3.2021]. Saatavissa: <https://www.gsi-net.com/en/publications/gsi-chemical-database/single/324-iso-propyl-alcohol.html>
- Gustafsson, A.-M., Westerlund, L. & Hellström, G. 2010.** CFD-modelling of natural convection in a ground-water-filled borehole heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, 683–691.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. & McDonald, M. G. 2000.** MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92, s. 121.
- Hänninen, P., Lintinen, P., Lojander, S. & Sutinen, R. 2000.** Suomen maaperän vedenjohtavuus. *Vesitalous* 41, 16–19.
- Iihola, T., Ala-Peijari, T. & Seppänen, H. 1988.** Aquifer thermal energy storage in Finland. *Water Science Technology* Vol. 20, No 3, 75–86.
- INCHEM 2021.** International Programme on Chemical Safety Poisons Information Monograph 290 Chemical – Isopropyl Alcohol. [Viitattu 26.3.2021]. Saatavissa: <http://www.inchem.org/documents/pims/chemical/pim290.htm>
- Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013.** Energiakaivo. Maa-lämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöministeriö, Ympäristöopas 2013, 1–49.
- Karro, E. & Lahermo, P. 1999.** Occurrence and chemical characteristics of groundwater in precambrian bed-rock in Finland. Julkaisussa: Autio, S. (toim.) Geological Survey of Finland, Current Research 1997–1998. Geological Survey of Finland, Special Paper 27, 85–96. Saatavissa: [http://tupa.gtk.fi/julkaisu/specialpaper/sp\\_027\\_pages\\_085\\_096.pdf](http://tupa.gtk.fi/julkaisu/specialpaper/sp_027_pages_085_096.pdf)
- Ketola, T. & Kuula, P. 2013.** ASROCKS-hankkeen Action 2 –vaiheen liukoisuustestien tulokset. Maa- ja pohjarakenteet. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, 1–29.
- Lutz, T. & Reduth, Y. 2020.** Grouting Quality of Borehole Heat Exchangers. Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik, Iceland, 1–10.
- Majuri, P. 2018.** Technologies and environmental impacts of ground heat exchangers in Finland. *Geothermics* 73 (2018), 124–132.
- Majuri, P. 2020.** Geoenergy and sustainable development – Perspectives on environmental challenges and governance of geoenergy installations. Turun yliopiston julkaisuja – Annales Universitatis Turkuensis. Sarja – Ser. A II Osa – Tom. 363. 113 s. (väitöskirja)
- Majuri, P., Arola, T., Kumpula, A. & Vuorisalo, T. 2020.** Geoenergy permits in the Finnish regional administration – Contradictory procedures caused by inadequate judicial regulation. *Renewable Energy* 168 (2021), 151–159. doi:10.1016/j.renene.2020.11.110.
- National Center for Biotechnology Information 2021.** PubChem Compounds. [Viitattu 26.3.2021]. Saatavissa: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>
- Peltonen, P. 1995.** Petrology, Geochemistry and Mineralogy of Ultramafic Rocks and Associated Ni-Cu Deposits in the Vammala Ni-Belt, Southwestern Finland. Geologian tutkimuskeskus. 108 s. (väitöskirja)
- Poratek ry. Energiakaivot.** [Viitattu 13.10.2020] Saatavissa: <http://poratek.fi/normikaivot-ja-poraukset/normienergiakaivo-17/>
- Pyy, O. & Jylhä, H. 2020.** Valtakunnallisen pilaantuneiden maa-alueiden riskienhallintastrategian ensimmäinen seurantaraportti. Ympäristöministeriön julkaisuja 2020:15. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-224-2>
- Pyy, O., Haavisto, T., Niskala, K. & Silvola, M. 2013.** Pilaantuneet maa-alueet Suomessa – Katsaus 2013. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 27/2013. 51 s.
- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 2009.** Geotekniikka. 22. painos. Helsinki: Otatieto Oy. 307 s.
- Reuss, M. 2020.** IEA ECES ANNEX 27: Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems. IEA Technology Collaboration Programme on Energy, 54–72.
- Schmidt, K. R., Körner, B., Sacher, F., Conrad, R., Hollert, H. & Tiehm, A. 2016.** Biodegradability and ecotoxicity of commercially available geothermal heat transfer fluids. *Grundwasser* 21, 59–67. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00767-015-0311-y>
- Slaughter, R. J., Mason, R. W., Beasley, D. M., Vale, J. A. & Schep, L. J. 2014.** Isopropanol poisoning. *Clinical Toxicology* 52 (5), 470–478. doi:10.3109/15563650.2014.914527
- Spalding, R. F., Toso, M. A., Exner Spalding, M., Hattan, G., Higgins, T. M., Sekely, A. C. & Jensen, S. D. 2011.** Long-Term Groundwater Monitoring Results at Large, Sudden Denatured Ethanol Releases. *Groundwater Monitoring & Remediation* 31(3), 69–81.
- Struß, J., Schäfer, D., Dahmke, A. & Köber, R. 2020.** Numerische Simulationen des Ausbreitungsverhaltens von Wärmeträgerfluid-Inhaltsstoffen aus Erdwärmesonden in Trinkwassereinzugsgebieten. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 25, 189–204. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00453-z>
- Suomen ympäristökeskus 2018.** Pohjaveden tyyppimallit. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavissa: <http://www.syke.fi/pohjavesityypimallit>
- Uski, M. & Piipponen, K. (toim.) 2019.** Selvitys geotermisen energian syväreikäporaamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta. Opastavaa tietoa lupaviranomaisille. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-68. 46 s.

- Wilson, C. R., Witherspoon, P. A., Long, J. C. S., Galbraith, R. M., DuBoi, A. O. & McPherson, M. J. 1983.** Large-scale hydraulic conductivity measurements in fractured granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 20(6), 269–276.
- Zhang, Y., Khan, I. A., Chen, X. & Spalding, R. F. 2006.** Transport and degradation of ethanol in groundwater. *J Contam Hydrol.* 10:82(3–4), 183–94. doi: [10.1016/j.jconhyd.2005.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2005.09.007)
- Zheng, C. & Wang, P. 1999.** A Two-Dimensional Application Sample in MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP). U.S. Army Corps of Engineers, Contract Report SERDP-99-1, 152–154. Saatavissa: <http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/mt3dmanual.pdf>
- Zhu, K., Fanga, L., Diaoa, N. & Fanga, Z. 2017.** Potential underground environmental risk caused by GSHP systems. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 1922 October 2017, Jinan, China. *Procedia Engineering* 205 (2017), 1477–1483.
- Ympäristöministeriö 2014.** Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta. Ympäristöhallinnon ohjeita 6/2014. 235 s.
- Ympäristöministeriö 2020.** Rakentamisen maa-aineisten hyödyntämistä koskevan sääntelyn kehittäminen. Muistio 8.9.2020. 8 s. Saatavilla: [https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/d80e737a-d426-42f9-9e5f-b5dc787c0fd7/77e38062-97c9-40ff-9ff9-9f7f40e91373/KIRJE\\_20200909100454.PDF](https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/d80e737a-d426-42f9-9e5f-b5dc787c0fd7/77e38062-97c9-40ff-9ff9-9f7f40e91373/KIRJE_20200909100454.PDF)
- Lista haastatteluista:**  
Kauppila, Kari. Suullinen tiedonanto 16.3.2021.
- Lainsäädäntö:**  
Hallituksen esitys Eduskunnalle jätelaiksi ja eräiksi siihen liittyviksi laeiksi (HE 199/2010 vp)  
Jätelaki (646/2011, JL)  
Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä (1299/2004)  
Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä (252/2017, YVA-laki)  
Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999, MRL)  
Teollisuuspäästödirektiivi (2010/75/EU). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen)  
Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007, PIMA-asetus)  
Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta (713/2014, YSA)  
Vesilaki (587/2011 VL)  
Ympäristönsuojelulaki (527/2014, YSL)



Kaikki GTK:n julkaisut verkossa [hakku.gtk.fi](https://hakku.gtk.fi)