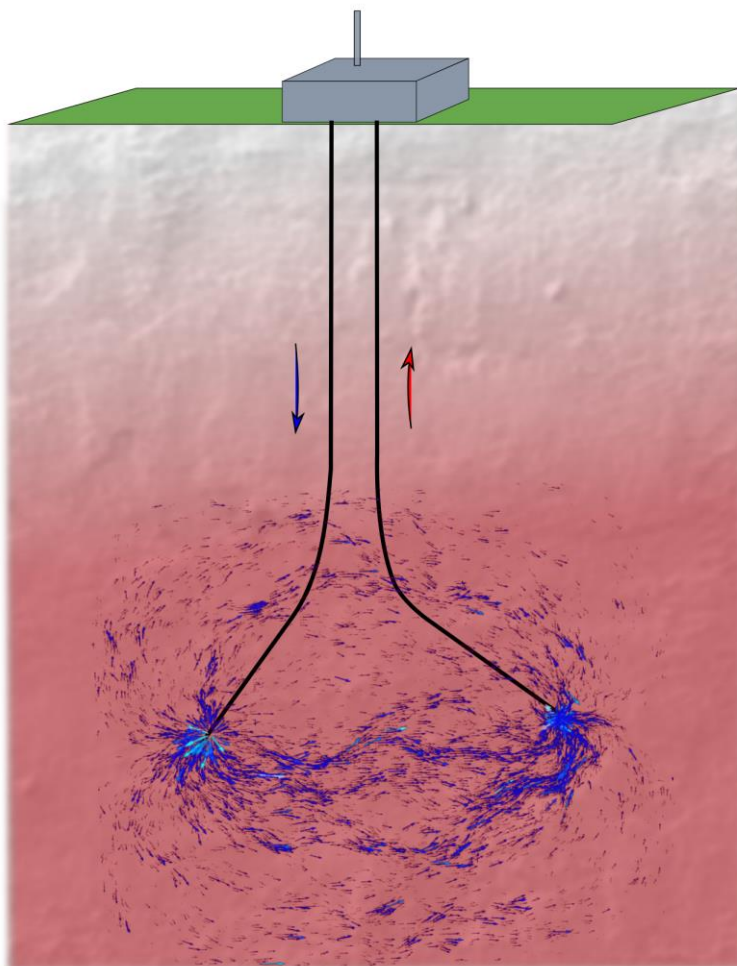


# Selvitys geotermisen energian syväreikäpوراamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta

Opastavaa tietoa lupaviranomaisille



Marja Uski ja Kaiu Piipponen (toim.)

Series Editor-in-Chief: Timo Tiira

Publisher: Institute of Seismology  
P.O. Box 68  
FI-00014 University of Helsinki  
Finland  
Phone: +358-294-1911 (switchboard)  
<http://www.helsinki.fi/geo/seismo/>

ISSN 0357-3060  
ISBN 978-952-10-9596-2 (PDF)  
Helsinki 2019



---

## Tiivistelmä

Tämä selvitys on tarkoitettu viranomaistyön taustatiedoksi geotermisen energian voimalaitoksista ja niiden ympäristövaikutuksista. Geotermisen energia on kasvava uusiutuvan energiatuotannon ala ja Suomen viileä kiteinen kallioperä on haastava alusta, joka vaatii uusia teknologisia avauksia. Syväpóraaminen on geotermisen voimalan edellytys, ja usein voimalan rakennusvaiheeseen kuuluu myös hydraulinen stimulointi, johon liittyvä seisminen riski vaatii erityisiä toimenpiteitä. Lisäksi on huomioitava mm. vesistöjen ja pohjavesialueiden turvallisuus sekä poraus- ja tuotantovaiheen jätteenkäsittely.

Selvitys on Ympäristöministeriön tilaama ja rahoittama, ja työhön on osallistunut asiantuntijoita Seismologian instituutista sekä Geologian tutkimuskeskuksesta. Tarkoituksena on kuvata geotermisen energian hankkimiseksi käytettävään syväreikäpóraamiseen liittyvää problematiikkaa sekä mahdollisia riskejä. Selvityksessä annetaan lupaviranomaille suosituksia hyvistä käytännöistä ja näkemyksiä siitä, mitä maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) mukaista rakennuslupaa tai toimenpidelupaa haettaessa valvontaviranomaisen tulisi edellyttää hakijalta hankkeen eri vaiheiden osalta tai mitä muita toimia tulisi ottaa huomioon. Suositukset eivät ole velvoittavia.

Aluksi raportissa esitellään Suomen seismisyyttä ja seismistä valvontaa, geotermisen energian eri muotoja sekä kokemuksia Suomen hankkeista vuoteen 2019 mennessä. Raportin neljäs osio käsittelee indusoidun seismisyyden riskinhallintaa. Se sisältää perustietoa indusoidun seismisyyden mekanismeista, maanliikkeistä, riskianalyyseista sekä voimaloiden seismisestä valvonnasta. Geotermisen energialaitoksen maanjäristysriski on suurimmillaan silloin kun voimalan rakennusvaiheessa parannetaan kiven vedenläpäisevyyttä hydraulisella stimuloinnilla. Tällöin toimintaa tulisi valvoa erityisen tarkasti.

Raportin viidennessä ja kuudennessa osiossa annetaan suosituksia lupahakemuksen sisältöön, viestintään sekä toiminnan seurantaan. Lupahakemuksen yhteydessä selvitetään voimalan alueen seisminen riski ja voimalan muut mahdolliset ympäristövaikutukset, ja lupahakemukseen sisältyvät suunnitelmat seismisestä valvonnasta, ympäristövalvonnasta, työmaajärjestelyistä, poraustekniikasta, toteutuksen seurannasta sekä viestinnästä. Toiminnan valvonnan suositukset on eroteltu voimalan elinkaaren mukaan rakennusvaiheeseen (sisältäen porauksen ja stimuloinnin), tuotantovaiheeseen ja jälkivalvontaan. Jokainen vaihe jakautuu edelleen seismiseen valvontaan ja muuhun ympäristövalvontaan.

Lopun yhteenvedossa lupahakemuksen suositukset ovat tiiviinä listana.

## Sisällys

Tiivistelmä .....	i
Sisällys .....	ii
Käytetyt lyhenteet .....	iv
Sanastoa ja käsitteitä .....	v
Maanjäristysterminologiaa .....	v
Maanjäristyksen voimakkuus .....	vi
Maapallon rakenteeseen liittyvät käsitteet .....	vi
Lämpökaivo-, stimulointi ja porausteknologiaan liittyvät käsitteet .....	vii
1. Johdanto .....	1
2. Seismisyys ja seisminen valvonta Suomessa .....	3
2.1 Seismologian instituutin viranomaistehtävät .....	3
2.2 Suomen seismisyys .....	3
2.3 Seisminen valvonta Suomessa .....	5
3. Geotermisen energian eri muodot .....	7
3.1 Matalan geotermisen energian sovellukset .....	8
3.2. Syvä geotermisen energia .....	9
3.3 Tehostettu geotermisen lämmöntuotanto, EGS .....	10
3.4. Geotermiset hankkeet Suomessa (2019) .....	13
4. Syvien geotermisten voimaloiden seisminen riskinhallinta .....	14
4.1 Indusoitu seismisyys .....	14
4.2 Sallitut maanliikkeet .....	18
4.3 Seismisen hasardin määrittäminen ja seisminen riskiarvio .....	20
4.3.1 Taustaseismisyyden kartoitus ja luonnollinen seisminen hasardi .....	21
4.3.2 Indusoidun seismisyyden hasardi .....	22
4.4 Seisminen valvontajärjestelmä .....	23
4.4.1 Liikennevalojärjestelmä .....	25
4.4.2 Otaniemen voimalahankkeen stimulointivaiheesta saatuja kokemuksia .....	27
5. Suositukset syvien geotermisten voimaloiden lupahakemuksiin .....	30
5.1. Taustaselvitykset .....	30
5.1.1 Alueen seismisen riskin kartoitus .....	31
5.1.2 Sallittujen maanliikkeiden kartoitus .....	31
5.1.3 Ympäristövaikutusten arviointi .....	31
Maankäyttö .....	32

---

Luontokohteet .....	33
Geologia.....	33
Vesi.....	33
Pohjavesi.....	33
Porausjäte.....	34
Radioaktiivinen aine ja säteily .....	35
Pöly.....	36
Rakennusvaiheen melu ja värinä.....	36
Liikenne .....	37
Kemikaalien käsittely.....	37
Laitoksen energiatehokkuus ja ilmastokestävyys .....	38
5.2 Valvonta ja varautumissuunnitelma .....	38
5.3 Työmaasuunnitelma, selvitys poraustekniikasta .....	39
5.4 Viestintäsuunnitelma .....	40
6. Suositukset voimalan toiminnan seurantaan ja valvontaan.....	42
6.1 Rakennusvaihe .....	42
Seisminen valvonta .....	42
Ympäristötekniinen valvonta.....	43
6.2 Tuotantovaihe.....	43
Seisminen valvonta .....	43
Ympäristötekniinen valvonta.....	43
6.3 Jälkivalvonta.....	44
Seisminen valvonta .....	44
Ympäristötekniinen valvonta.....	44
7. Yhteenvedo .....	45
Lähteet .....	47
Liitteet.....	52
Liite 1: Havaintoraporttiaineistoa.....	52
Liite 2: GRID .....	55

---

## Käytetyt lyhenteet

ATLS – Adaptive Traffic Light System, Mukautuva liikennevalojärjestelmä

BAT - Best Available Techniques, Paras käytettävissä oleva tekniikka

BREF – Best available techniques Reference Document, Parhaan käytettävissä olevan tekniikan vertailuasiakirja

CO<sub>2</sub> – Hiilidioksidi

DSHA – Deterministic Seismic Hazard Analysis, Deterministinen seisminen hasardianalyysi

EGS – Enhanced Geothermal System, Tehostettu geoterminen järjestelmä

ELY-keskus – Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

FENCAT – Fennoskandian maanjäristyskatalogi

GRID – Geothermal Risk of Induced seismicity Diagnosis, Indusoidun seismisyyden riskinhallintatyökalu

GTK – Geologian tutkimuskeskus

MRL – Maankäyttö- ja rakennuslaki

PGA – Peak Ground Acceleration, Maanliikkeen maksimikihti

PGV – Peak Ground Velocity, Maanliikkeen maksiminopeus

PSHA – Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Todennäköisyyspohjainen seisminen hasardianalyysi

RIL – Rakennusinsinööriliitto

STUK – Säteilyturvakeskus

TLS – Traffic Light System, Liikennevalojärjestelmä

YSL – Ympäristönsuojelulaki

---

## Sanastoa ja käsitteitä

### Maanjäristysterminologiaa

**Atsimuuttiaukko:** Suurin atsimuuttikulma, joka jää episentristä katsottuna kahden havaintoaseman väliin. Atsimuutit ilmoitetaan asteissa ja mitataan myötöpäivään pohjoissuunnasta. Atsimuuttiaukon tulla olla mahdollisimman pieni (alle  $90^\circ$ ), jotta järistykseen lähdetiedot (hyposentri, siirrostasoratkaisu) voidaan laskea luotettavasti.

**Episentri:** Suoraan maanjäristyskeskuksen yläpuolella maan pinnalla sijaitseva kohta. Sen koordinaatit ilmoitetaan leveys- ja pituusasteina.

**Hyposentri:** Maanjäristyksen keskus, josta jännityksen purkautuminen alkaa. Sisältää koordinaattien lisäksi tiedon, millä syvyydellä maanjäristys tapahtui.

**Indusoitu maanjäristys:** Järitys, joka syntyy täysin ihmisen aiheuttamasta jännitystilan muutoksesta eikä olisi tapahtunut ilman sitä. Esimerkiksi maanalainen louhinta, vesimassojen paino suurten patoalaiden lähistöllä, sekä vedensyöttö kallioperään muuttavat jännitystilaa ja voivat siten indusoida järistyksiä.

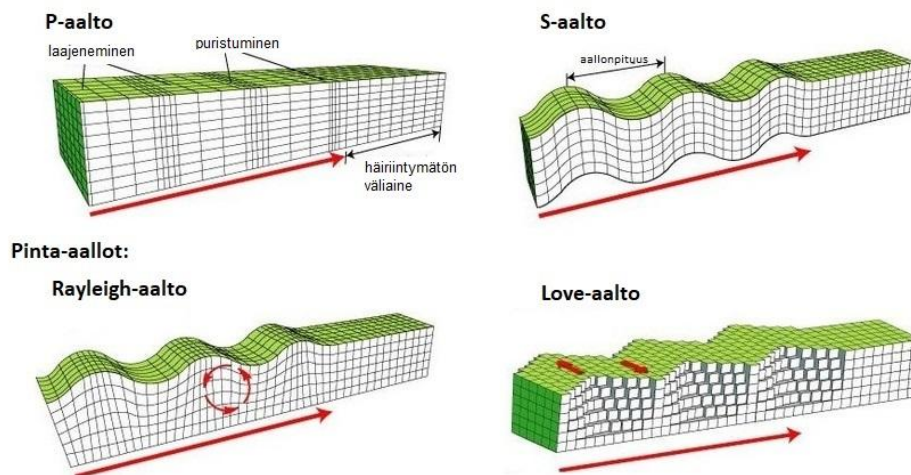
**Jälkijäritys:** Voimakasta maanjäristystä seuraava heikompi järitys samalla alueella. Jälkijärityksiä saattaa olla useita, jopa useita satoja.

**Luonnollinen/tektoninen maanjäristys:** Kallioperään varastoituneen jännitysenergian äkillisen vapautumisen aiheuttama maanpinnan vavahtelu.

**Mikromaanjäritys:** Pieni maanjäristys, joka havaitaan yleensä vain seismisillä mittalaitteilla. Maanjäristysseismologiassa mikromaanjäritys tarkoittaa järistystä, jonka voimakkuus (magnitudi) on pienempi kuin M 2-3, hydraulisen stimuloinnin yhteydessä rajana on usein M 0.

**Seisminen aalto:** Impulssin, kuten maanjäristyksen tai räjäytyksen aiheuttama aaltoliike maan sisällä (P- ja S-aallot) tai pintakerroksessa (Rayleigh- ja Love-pinta-aallot). P-aalto on pitkittäistä aaltoliikettä, kuten ääniaalto. S- ja Love-aalto ovat poikittaista aaltoliikettä ja hitaampia kuin P-aalto. Rayleigh-aalto koostuu sekä pitkittäisestä että poikittaisesta aaltoliikkeestä ja se on hitain aalto. Aaltojen nopeuseroja käytetään hyväksi tapausten paikannuksessa. Kuva i.

**Siirrostasoratkaisu:** Mallintaa maanjäristystä kahden toistensa suhteen liukuvan siirrostason avulla. Siirrostasoratkaisu kertoo maanjäristyksessä liikahtaneen siirroksen kulkusuunnan (engl. strike) myötöpäivään pohjoissuunnasta mitattuna, kaateen (engl. dip) maanpinnan suhteen ja liukuvektorin suunnan siirrostasolla (engl. rake). Ratkaisu sisältää myös arvion järistyslähdettä ympäröivän jännityskentän suunnista ja luonteesta.



© The University of Waikato | www.sciencelearn.org.nz

Kuva i: Havainnekuva seismisistä aaltotyypeistä

## Maanjäristyksen voimakkuus

**Intensiteetti**, tai täydellisemmin makroseisminen intensiteetti, kuvaa maanjäristyksen vaikutusten voimakkuutta. Se on kokonaisluku, joka tiivistää maanjäristyksen seurausten suuruuden tietyssä paikassa. Intensiteettiä ilmaistaan 12-portaisella asteikolla, jonka asteita merkitään perinteisesti roomalaisin numeroin. Pienin ihmisen havaittavissa oleva intensiteetti on II ja korkein aste XII vastaa täydellistä tuhoa. Kosmeettisia vaurioita alkaa esiintyä intensiteetin ollessa V tai VI.

**Magnitudi** kuvaa maanjäristyksen voimakkuutta itse järjestyslähteessä. Magnitudi perustuu seismisen aseman rekisteröimään maanliikkeen maksimiarvoon ja se ilmoitetaan lukemana jollakin logaritmisella magnitudiasteikolla. Kun magnitudi kasvaa yhden yksikön verran, maanliike kasvaa noin kymmenkertaiseksi ja purkautuvan seismisen energian määrä noin 30-kertaiseksi. Käytössä olevat magnitudiasteikot on suhteutettu keskenään, joten eri magnitudille suositellaan käytettäväksi yhteistä symbolia M, ellei ole tarpeen määrittellä kuinka mittaus on tehty.

**Seisminen hasardi** kuvaa kohdealueen luontoperäisen seismisyyden tason. Tilastollisessa seismisen hasardin arvioinnissa on tavanomaista esittää todennäköisyyksiä, jolla alueella sattuu tietynsuuruisia maanjäristyksiä tai niistä johtuvia tietynsuuruisia maanliikkeitä annetussa ajassa. Luontoperäiseen seismisen hasardin tasoon ei ihmisen toiminta vaikuta.

**Seisminen riski** ilmaisee kohdealueen seismisyyden vaikutusta rakennettuun ympäristöön ja arvioi vahinkoja ja kustannuksia, joita suurehko maanjäristys aiheuttaisi siellä. Seismisen riskin tasoa voi laskea esimerkiksi rakentamalla tietynsuuruiset järistykset kestäviä taloja.

## Maapallon rakenteeseen liittyvät käsitteet

**Akviferi:** Maanalainen pohjavesiesiintymä.

---

**Maankuori:** Maan uloin kerros. Se on ohuin valtamerten ja paksuin mannerten vuoristoalueiden alla. Suomen alueella kuori on 40-60 kilometrin paksuinen.

**Maankuoren jännityskenttä:** Jännityskenttä on 3-ulotteinen ja sitä kuvataan kolmen toisiinsa nähden kohtisuoran pääjännityskomponentin  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  (suurin, keskimmäinen, pienin) suuruuden, suunnan ja kaateen avulla. Suomessa suurin komponentti on tyypillisesti lähes vaaka-asentoinen ja luode-kaakko – suuntainen. Mittaustuloksissa on suurta hajontaa etenkin kallion pintaosissa.

**Siirros:** Maankuoren heikkouskohta, jossa kallioperä on murtunut ja liikahtanut. Siirros luokitellaan aktiiviseksi, jos se on osoittanut havaittavaa liikettä tai seismisyyttä kuluneiden 10 000 vuoden aikana.

**Postglasiaalinen siirros:** Viimeisen jääkauden jälkeen muodostunut aktiivinen siirros.

### **Lämpökaivo-, stimulointi ja porausteknologiaan liittyvät käsitteet**

**Matala geoterminen energia = geoenergia = maalämpö:** Tässä raportissa kaikkia termejä käytetään samaan tarkoitukseen kuvaamaan alle 500 m syviä lämmönsiirtojärjestelmiä.

**Syvä geoterminen energia tai geoterminen energia:** Tässä raportissa termejä käytetään kuvaamaan yli 500 m syviä lämmönsiirtojärjestelmiä.

**Lämpökaivo = energiakaivo:** Poranreikään sijoitettu lämmönsiirtoputkisto. Termiä kaivo käytetään sekä matalien että syvien geotermisten voimaloiden poranrei'ille.

**Porasoija:** Porauksen aikana muodostunutta kiviä tai –palasia, (engl. *cutting, chipping*).

**Stimulointi:** Rakojen avartaminen, tavoitteena kiven vedenläpäisevyyden eli permeabiliteetin parantaminen halutulla syvyydellä. Kattotermi erilaisille avartamismekanismeille, kuten hydraulinen stimulointi, johon kuuluu särötys (engl. *fracturing*) ja indusoitu hiertoliikunto (engl. *shearing*) sekä kemiallinen stimulointi.

**Hydraulinen stimulointi:** Rakojen avartaminen pumpaamalla poranreikään suuria määriä vettä.

**Säröttäminen:** Käytetään samaan tarkoitukseen kuin käsitettä *hydraulinen stimulointi*, mutta teknisesti säröttäminen tarkoittaa vain **tensiorakojen** avartamista (kts kuva 6, osio 4.1).

**Tensiorako = vetorako:** Tensiojännityksen (pienintä jännityskomponenttia vastaan kohtisuoran jännityksen) muodostama rako, joka ensin ”pullistuu” kohtisuorassa raon seinämiä vastaan ja sen jälkeen etenee raon suuntaisesti (kts kuva 6, osio 4.1).



## 1. Johdanto

Geotermisen lämmön hyödyntäminen on vaihtoehto fossiilisia polttoaineita korvaavaksi uusiutuvaksi ja vähäpäästöiseksi energiantuotantomuodoksi. Syvällä maankuoressa on käytännössä ehtymätön varanto lämpöenergiaa, jota voi Suomessa hyödyntää lämmitykseen. Suomen oloissa riittävän lämpöenergian tavoittamiseksi on porattava syvälle maankuoreen. Ala kasvaa, ja lämpövarannon hyödyntämiseksi kehitetään uudenlaisia ratkaisuja. Suomessa on käynnissä useita voimalahankkeita, joista pisimmälle edennyt on energiayhtiö St1:n Deep Heat-hanke Espoon Otaniemessä.

Geotermisen energian hyödyntäminen jaetaan matalan ja syvän geotermisen energian tuottamistapaan. Toimintaperiaatteena on kierrättää vettä maa- tai kallioperässä. Syvässä geotermisessä lämpövoimalassa poranreiät voivat ulottua jopa 8 kilometrin syvyyteen. Niin kutsutussa tehostetussa geotermisessä järjestelmässä (Enhanced Geothermal System, EGS) poranreikien välistä vedenvirtausta pyritään parantamaan suurentamalla kallioperässä olevia rakoja. Kovalla paineella pumpattu vesi muuttaa kallioperän jännitystilaa ja saa kivien rajapinnat liikahtamaan. Tämä liikahdus ilmenee pieninä maanjäristyksinä, joita voidaan havaita seismisillä mittalaitteilla. EGS-lämpövoimaloiden toiminta saattaa aiheuttaa myös suurempia maanjäristyksiä. Ne aiheuttavat pääasiassa häiritsevää ääntä ja tärinää voimalan lähiympäristössä, mutta myös lievät omaisuus- ja rakennusvauriot ovat mahdollisia. Tämän vuoksi alueen maanjäristysriski tulisi kartoittaa ennen toiminnan aloittamista ja tietoa tulisi päivittää koko voimalan elinkaaren ajan. EGS-voimalan rakennusvaiheen reaaliaikainen seisminen valvonta on yleisen turvallisuuden vuoksi välttämätöntä. Lisäksi se on eduksi toiminnanharjoittajalle, sillä kattavan valvontajärjestelmän avulla pystytään paremmin seuraamaan rakovyöhykkeiden kehittymistä ja erottamaan voimalan indusoimat järjestykset muusta haittoja aiheuttavasta seismisyydestä.

Geotermisen energiavoimalan ympäristöriskejä ei ole aiemmin tarkasteltu Suomen kaltaisessa geologisessa ympäristössä. Geotermistä voimalaa ei ole listattu EU:n teollisuuspäästädirektiivin (2010/75/EU) liitteen 1 mukaiseksi direktiivilaitokseksi eikä geotermisen energian tuotantoa ympäristönsuojelulain (527/2014, YSL) liitteessä 1 tai valtioneuvoston asetuksessa ympäristönsuojelusta 713/2014 kuvatuksi ympäristöluvanvaraiseksi toiminnaksi. Geotermisen energian tuotantoa varten ei ole laadittu EU-tasolla parhaan käyttökelpoisen tekniikan ns. BAT tai BREF dokumentaatiota. Geotermisen energian 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.

Nykylainsäädännössä geotermisen energian tuotantoa ei siis ole ainakaan kaikissa tapauksissa katsottu ympäristölle vaaraa tai haittaa aiheuttavaksi toiminnaksi. Mahdollisiin ympäristövaikutuksiin on kiinnitettävä erityistä huomiota lupaa myönnettäessä ja tapauskohtaisesti olisi pohdittava, edellyttääkö

hanke ympäristövaikutusten arviointimenettelyä tai ympäristölupaa. Otaniemen voimalan lupahakemuksen yhteydessä Ympäristöministeriö velvoitti ELY-keskukset hoitamaan ohjeistuksen kaupungeille. Espoon kaupunki sovelsi voimalan luvitukseen maalämpö- ja energiakaivojen perustamiseen laadittua ohjeistusta (Ympäristöministeriö 2013) ja lisäksi valtuutti Seismologian instituutin arvioimaan ST1:n toteuttamaa indusoidun seismisyyden hallintajärjestelmää sekä seuraamaan sen toimintaa.

Geotermisen voimalateknologian yleistyminen vaatisi asiaa koskevan lainsäädännön läpikäymistä sekä mahdollisia tarkistuksia geotermisen energian rakentamisen ja tuotannon osalta sekä viranomaisosaimista, yhteistyötä ja tarvittavaa resursointia. Lainsäädännöllisesti tärkeitä asioita geotermisten voimaloiden kohdalla ovat erityisesti indusoitu seismisyys sekä maankäyttö- ja pohjavesikysymykset. Raportin kirjoitushetkellä geotermisen energialaitoksen lupamenettely on tapahtunut maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999, MRL) 126 §:n mukaisen toimenpideluvan tai 125 §:n mukaisen rakennusluvan kautta. Jos sijainti tai muut seikat kuitenkin laukaisevat ympäristövaikutusten arviointimenettelyn ja/tai ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan tarpeen, tulee tämä huomioida lupahakemusten käsittelyssä. Tässä tekstissä puhutaan yleisellä tasolla luvista ja niiden käsittelijöistä, jotka hakija selvittää ennen lupahakemuksen jättämistä.

Tämän raportin tavoitteena on antaa Suomen viranomaisille perustietoa geotermisestä energiasta ja siihen liittyvästä indusoidusta seismisyydestä sekä muista syväreikäporaamisen ympäristövaikutuksista. Raportissa on suositus toimenpiteistä, joilla lievennetään indusoidun seismisyyden riskiä laitoksen rakennus- ja toiminta-aikana. Ohjeet on koottu käyttäen hyväksi tarjolla olevaa kansainvälistä kirjallisuutta ja soveltaen sitä Suomen geologisiin ja seismisiin olosuhteisiin. Lisäksi ohjeissa on sovellettu Ympäristöhallinnon palvelusta saatavaa yleistä ympäristölupaohjeistusta lupamenettelyn tueksi. Raportissa on myös hyödynnetty Seismologian instituutin kokemuksia St1:n laitospaikan ensimmäisen poraus- ja stimuloituvaiheen seismisestä valvonnasta. Ohjeissa on erillinen viestintäosuus, jotta paikallisilla päättäjillä ja väestöllä olisi selkeä käsitys hankkeen taustasta, toteutuksesta ja sen eteen tehtävistä turvallisuustoimenpiteistä.

Selvitys on laadittu ympäristöministeriön toimeksiannosta ja rahoituksella. Työhön on osallistunut asiantuntijoita Seismologian instituutista sekä Geologian tutkimuskeskuksesta. Seismologian instituutissa raportti on laadittu FL Marja Uskin johdolla. Työhön ovat osallistuneet FM Kaiu Piipponen, FM Katriina Arhe ja FM Kati Oinonen. GTK:ssa työstä on vastannut FT Teppo Arola. Työhön ovat lisäksi osallistuneet FT Jaana Jarva, FT Jussi Mattila ja FM Hannu Lahtinen.

---

## 2. Seismisyys ja seisminen valvonta Suomessa

### 2.1 Seismologian instituutin viranomaistehtävät

Seismologian instituutti perustettiin vuonna 1961, ja se on siitä lähtien vastannut seismisestä valvonnasta Suomessa. Instituutilla on sopimuksiin ja säädöksiin perustuvia viranomaistehtäviä, jotka liittyvät seismisen riskin hallintaan ja ydinkoekieltosopimuksen valvontaan. Seisminen havaintotoiminta ja kansallisen seismisen verkon ylläpito ovat näiden toimintojen perusedellytys. Ihmiset ottavat yhteyttä instituuttiin mm. erilaisten tärinä- ja äänihavaintojen vuoksi sekä suurten maanjäristysten sattuessa maailmalla. Nykyään suurin osa kyselyistä tulee verkkosivuilla olevan havaintokaavakkeen kautta.

Geotermisten voimaloiden toimintaan liittyvä lainsäädäntö- ja ohjeistustyö on vasta alussa. Otaniemen voimalahankkeen yhteydessä oli epäselvyyttä Seismologian instituutin valtuuksista ja vastuista valvovana tahona sekä siitä, miten uuden tehtävän vaatimat laite- ja työvoimaresurssit kustannetaan. Seismologian instituutti näkee tehtävänsä ensisijaisesti valvonta-, lupa- ja sääntelyviranomaisten tukijana, mutta se voi myös ottaa vastuun hankkeiden seismisestä valvonnasta ja seismologisesta analyysistä, jos näillä tehtävillä on merkittäviä synergiahyötyjä nykyisten tehtävien ja kansallisen havaintoverkon kanssa. Jokaisessa yksittäisessä tapauksessa on tärkeää määrittää kunkin osallistujan roolit ja vastuut sekä rahoitusjärjestelyt heti hankkeen alussa.

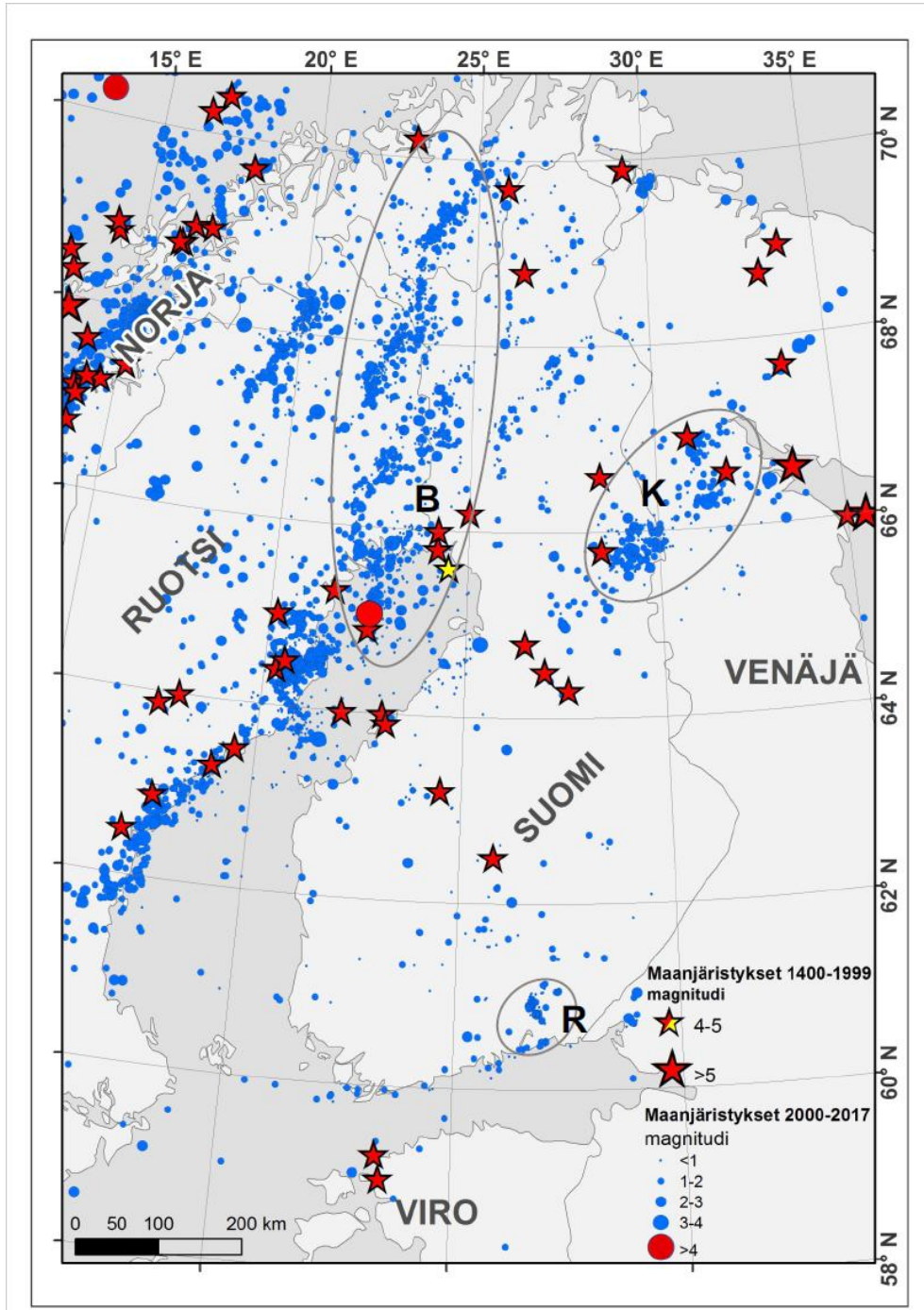
### 2.2 Suomen seismisyys

Suomi sijaitsee Euraasian mannerlaatan sisäosassa kaukana aktiivisista laattareunoista. Luonnollinen seismisyys on vähäistä maailman mittakaavassa ja maanjäristykset yleensä magnitudia M 4 pienempiä. Valtaosa järistyksistä sattuu maankuoren yläosissa, noin 1-15 kilometrin syvyydellä. Seismisyyden taustalla on sekä laattarajoilla että laatan sisällä tapahtuvia prosesseja, kuten Atlantin keskiselänteen avautuminen, jääkauden jälkeinen maannousu ja kuoren rakenne-eroihin liittyvä jännitystilän vaihtelu. Suomen kallioperässä jännityskentän suurin komponentti on yleensä vaaka-asentoinen ja noin luode-kaakko-suuntainen (Heidbach ym. 2016). Siirrosten syvärakenne vaikuttaa siihen, mitkä siirrokset reagoivat herkimmin paikallisen jännitystilän muutoksiin (Koskinen, 2013; Mattila 2015; Kaisko 2018).

Kuvassa 1 on yhteenveto Suomessa ja lähialueilla 2000-luvulla havaituista maanjäristyksistä sekä seismisesti aktiivisimmat vyöhykkeet. Eniten maanjäristyksiä esiintyy Suomen pohjoisosissa koillis-lounais tai luode-kaakko-suuntaisilla siirrosvyöhykkeillä. Perämereltä Suomen ja Ruotsin rajaa pitkin Pohjois-Norjaan ulottuvalla seismisyysvyöhykkeellä (Kuva 1, B) järistykset liittyvät pääasiassa post-glaciaalisiin, eli viimeisen jääkauden jälkeen muodostuneisiin siirroksiin. Toinen seismisesti aktiivinen vyöhyke ulottuu Kuusamosta Luoteis-Venäjälle (Kuva 1, K). Se koostuu laajasta koillis-lounais-suuntaisesta siirrosvyöhykkeestä ja sitä eri suuntiin halkovista pienemmistä siirroksista. Eteläosissa maata seismisyys on hajanaisempaa. Poikkeuksena on Kaakkois-Suomen rapakivigraniittialue (Kuva 1, R),

jossa on ollut koko kirjoitetun historian ajan matalia (1-2 km syviä) maanjäristysparvia. Viimeisin suuri parvi vuosina 2011–12 koostui yli 200 tapauksesta, joista suurimman magnitudi oli M 2,9.

Historiallisen ajan suurin tiedetty maanjäristys Suomessa tapahtui 23. heinäkuuta 1882 Perämerellä (Kuva 1, keltainen tähti). Sen voimakkuudeksi on arvioitu M 4,6, ja se aiheutti lieviä vaurioita raken-



Kuva 1: Nykyinen seismisyys Suomessa ja lähialueilla. Ympyröillä on merkitty havainnot vuosilta 2000-2017. Tähdillä on merkitty  $M > 4$  maanjäristykset vuosilta 1400-1999. Keltainen tähti - vuoden 1882  $M = 4,6$  maanjäristys. Seismisesti aktiivisimmat alueet Perämeri-Pohjois-Norja (B), Kuusamo-Kandalaksha (K) ja Kaakkois-Suomen rapakivigraniitti (R) on rajattu harmaalla. Lähde: Fennoskandian maanjäristyskatalogi (FENCAT, [www.seismo.helsinki.fi/fi/bulletiinit/catalog\\_northeurope.html](http://www.seismo.helsinki.fi/fi/bulletiinit/catalog_northeurope.html))

nuksiin rannikkokaupungeissa (Mäntyniemi ja Wahlström 2013). Laiterekisteröintikauden suurin järitys (M 3,6) sattui 17. helmikuuta 1979 Lappajärvellä. Kuvasta 1 nähdään, että suurimmat järitykset eivät keskity pelkästään tunnetuille seismisyysvyöhykkeille. Useat niistä ovat tapahtuneet alueilla, joita on aiemmin pidetty jopa ei-seismisinä. (Korja ym. 2015.)

Suomen kaltaisilla matalan seismisyyden alueilla yksittäisten siirrostien aktiivisuutta on vaikea todentaa ennakolta, sillä maanjäristyksiä sattuu harvoin ja suurimpien järitysten toistumisajat ovat jopa kymmeniä tuhansia vuosia. Kallioperämme on varsin rikkonaista, joten pääasiassa siirrokset ovat lyhyitä. Suomessa on kuitenkin suuriakin siirroksia, ja eräiden arvioiden mukaan suurimmissa siirroksissa on hypoteettinen riski jopa lähes M 7 maanjäristykseen (Korja ym. 2015; Ojala ym. 2018).

### 2.3 Seisminen valvonta Suomessa

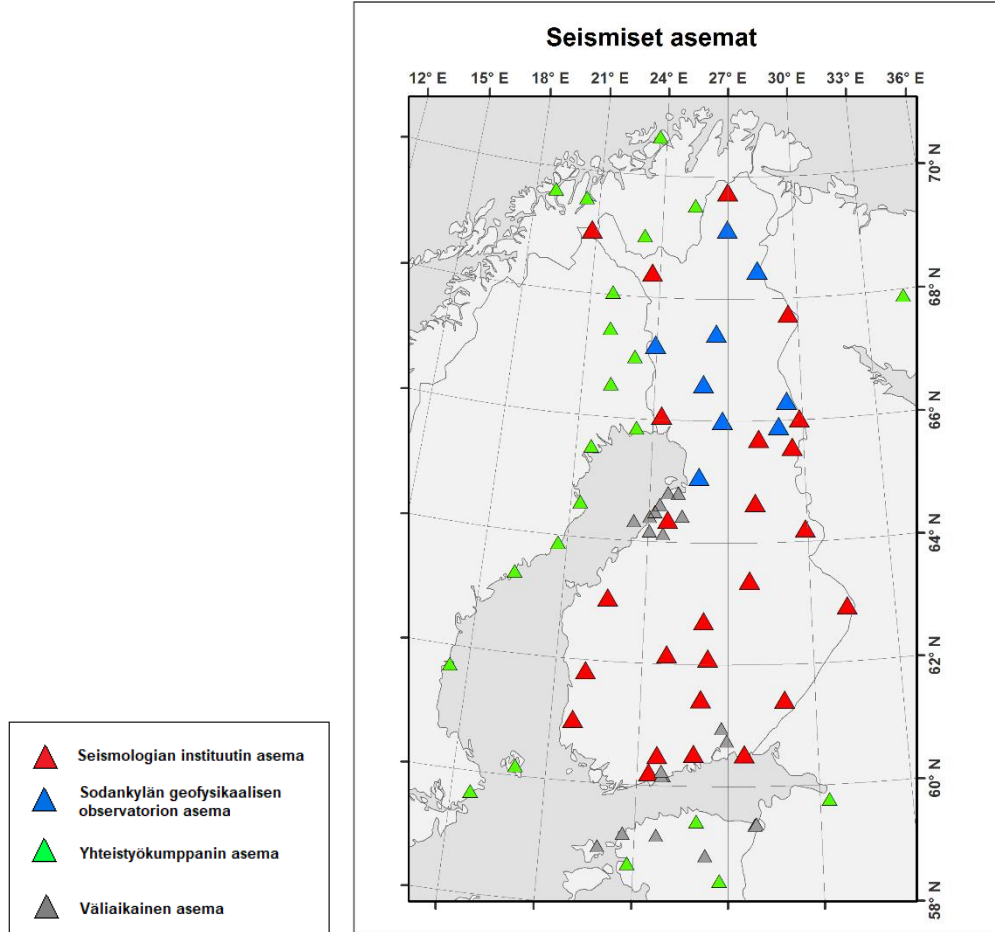
Tällä hetkellä Suomessa on yli 30 pysyvää seismistä asemaa sekä väliaikaisia asemia tarkempaa tutkimusta vaativilla alueilla (Kuva 2). Miltei kaikilta asemilta on reaaliaikainen tietoliikenneyhteys Seismologian instituutin datapalvelimille, joista rekisteröinnit siirtyvät normaaleihin analysointi- ja arkistointijärjestelmiin. Reaaliaikaista rekisteröintiaineistoa saadaan myös yhteistyökumppaneiden ylläpitämillä seismisillä asemilla naapurimaissa (Kortström ym. 2018).

Seismologian instituutissa on kehitetty automaattinen, lähes reaaliaikainen paikannusjärjestelmä, joka perustuu seismisten signaalien erottamiseen taustakohinasta, signaalin tulosuunnan määrittämiseen kolmikomponenttisten rekisteröintien avulla ja usean aseman havaintojen yhdistämiseen. Järjestelmä sisältää myös tekoälyyn perustuvan automaattisen tapausten tunnistusmenetelmän (Kortström ym. 2016), joka erottelee todennäköiset maanjäristykset muista havainnoista. Kansallisen asemaverkon kynnysmagnitudi on M 1. Tämä tarkoittaa, että asemaverkko pystyy havaitsemaan kaikki verkon sisällä sattuneet seismiset tapaukset, joiden magnitudi on 1 tai suurempi (Kortström ym. 2018). Tiheiden, väliaikaisten verkkojen sisällä kynnysmagnitudi on merkittävästi pienempi, jopa M 0.

Seismologian instituutti rekisteröi vuosittain noin 16000 seismistä tapausta Suomessa ja lähialueilla. Niistä 1-2 % on maanjäristyksiä ja loput ovat pääasiassa rakennus- ja kaivostoimintaan liittyviä räjäytyksiä tai sortumia. Päivittäisanalyysin yhteydessä automaattiset tulokset tarkistetaan ja maanjäristykset analysoidaan uudelleen käsin. Räjäytysten ja sortumien kohdalla keskitytään ensisijaisesti suurimpien, ihmisten havaitsemien tai vahinkoa aiheuttaneiden tapausten analysointiin.

Seismologian instituutti ylläpitää Fennoskandian maanjäristyskatalogia (FENCAT; Ahjos ja Uski 1992 [www.seismo.helsinki.fi/fi/bulletiinit/catalog\\_northeurope.html](http://www.seismo.helsinki.fi/fi/bulletiinit/catalog_northeurope.html)), johon on koottu maanjäristyshavaintoja yli kuudelta vuosisadalta. FENCAT on alueen kattavin avoin maanjäristyskatalogi ja laajalti käytetty viite seismisyystutkimuksissa. Instituutin havaintotoiminta on julkista ja läpinäkyvää: seismiset tapaustiedot

ja raportit julkaistaan kotisivuilla, ja lähes kaikkien pysyvien asemien rekisteröintiaineisto löytyy myös verkosta (Seismologian instituutti 2019).



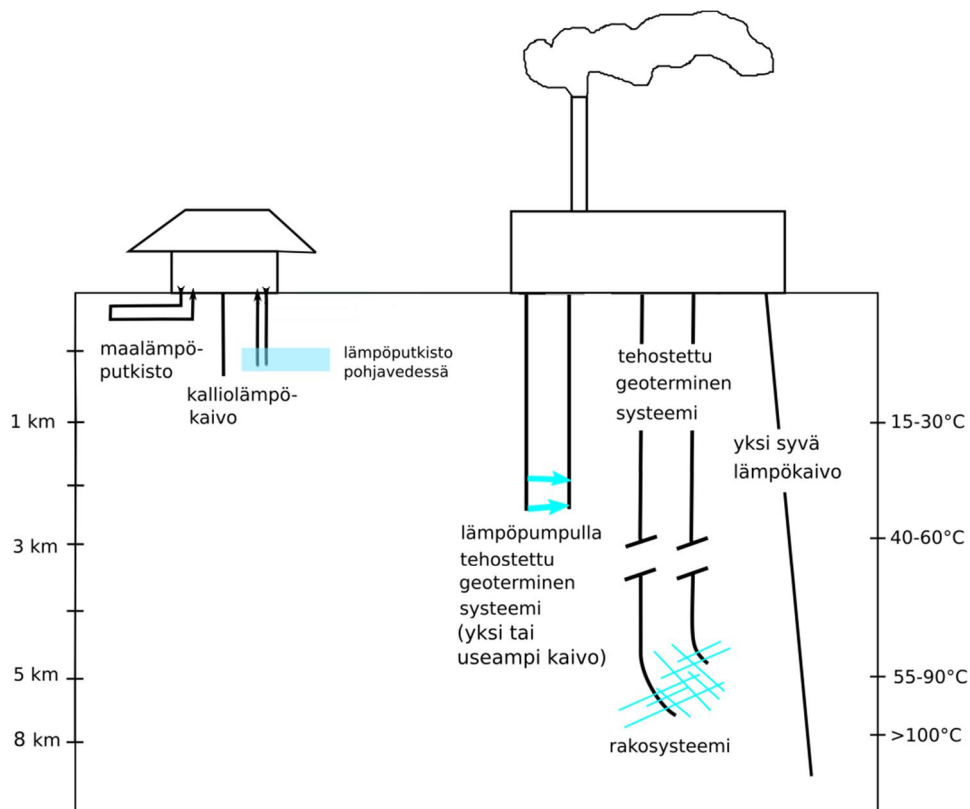
*Kuva 2: Suomen seisminen asemaverkko 2018*

### 3. Geotermisen energian eri muodot

Geotermisen energian hyödyntäminen jaetaan matalan ja syvän geotermisen energian tuottamistapaan. Pohjoismaissa käytetään termejä *geoenergia* tai *maalämpö* kuvaamaan matalaa geotermistä energiaa ja termiä *geoterminen energia* kuvaamaan syvää geotermistä energiaa. Matalaa geotermistä energiaa voidaan hyödyntää lämmitys- ja viilennystarkoituksiin ja syvää geotermistä energiaa näiden lisäksi sähköntuotantoon. Suomessa määritelmien rajapinnaksi on vakiintunut noin 300 – 500 metrin syvyys maanpinnasta.

Kuvassa 3 on yhteenveto erilaisista matalan ja syvän geotermisen energian järjestelmistä Suomen oloissa. Järjestelmät voivat olla joko avoimia tai suljettuja, ja niissä käytetään lämmönsiirtoon vettä tai muuta nestettä, esimerkiksi denaturoitua etanolia. Avoimessa järjestelmässä tavoitteena on hyödyntää lämmönsiirtoon ympäröivää kiveä tai vesistöä, kun taas suljetussa järjestelmässä lämmönsiirtoaine kiertää putkissa eikä ole kosketuksissa ympäröivään kiveen tai vesistöön.

Varsinkin syvän geotermisen energian hyödyntäminen on kehittyvä ala, joten kuvassa esitetyt järjestelmät eivät ole ainoita mahdollisia vaihtoehtoja. Tässä osiossa esitellään yleisimpiä käytössä olevia sovelluksia.

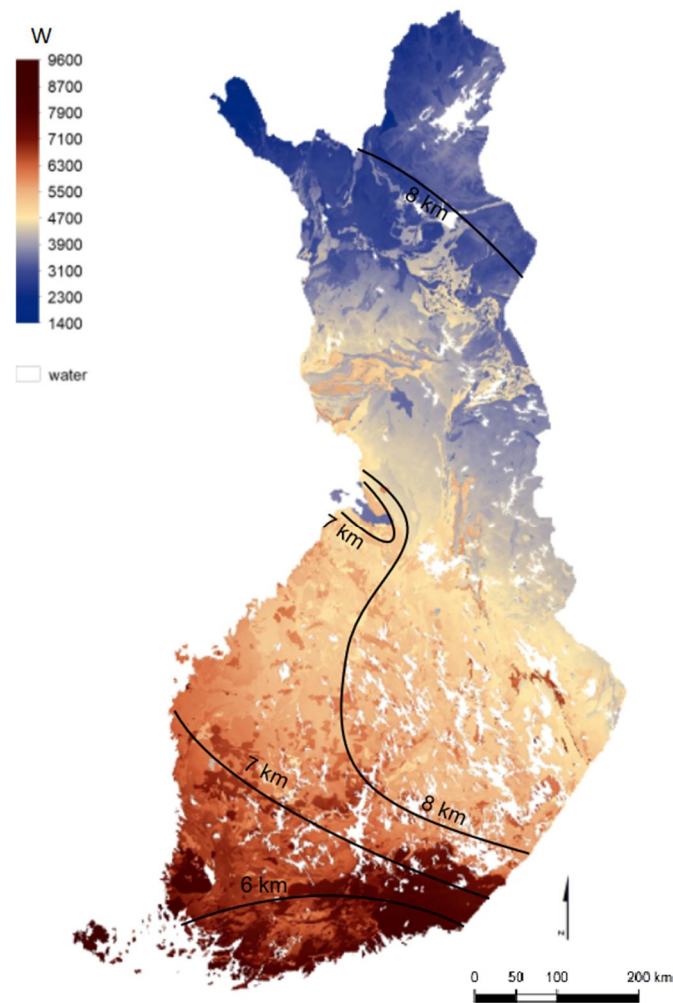


Kuva 3: Erilaisia geotermisen energian sovelluksia, jotka ovat mahdollisia Suomen oloissa.

### 3.1 Matalan geotermisen energian sovellukset

Yleisimmin käytetyt matalan geotermisen energian sovellukset ovat maalämpöputkistot ja kallioliämpö- eli energiakaivot. Ne hyödyntävät auringon ja maan sisäisen lämmön lämmittämää maa- tai kallioperän pintakerrosta. Maalämpöputkisto on maaperään asennettu horisontaalinen lämmönsiirtoputkisto, joka kiertää maan pintakerroksissa tai vesistöissä. Energiakaivo on kallioon porattu pystyputki, joka voi olla koteloitu U-putki tai koaksiaaliputki. U-putkessa kylmä neste syötetään kaivon putken yhdestä päästä ja lämmennyt neste nousee toisesta päästä. Koaksiaaliputkessa kylmä neste syötetään kaivon ulkolaitoja pitkin ja pumpataan ylös sisemmässä lämpöeristetyssä putkessa. Koaksiaalikaivo voi olla osin avoin, esimerkiksi alalaidastaan, jolloin se voi hyödyntää myös kallion vettä johtavia rakenteita.

Energiakaivolla voidaan tuottaa yhden pientalon tarvitsema määrä lämpöä, ja käyttämällä useita kaivoja voidaan lämmittää suuria komplekseja. Suomen suurin ja toistaiseksi Euroopan kolmanneksi suurin energiakaivojärjestelmä on SOK:n Sipoon logistiikkakeskus, jossa on 300 noin 300 metrin syvyistä energiakaivoa. Matalaa geotermistä energiaa voidaan hyödyntää myös ns. avoimilla järjestelmillä, joissa



Kuva 4: Suomen maankamaran uusiutuva teho 300 metrin syvyydelle asti sekä vaadittu poraussyvyys  $100^{\circ}\text{C}$  saavuttamiseksi. Lähteet: GTK, [gtkdata.gtk.fi/maankamara/](http://gtkdata.gtk.fi/maankamara/) ja Kukkonen, 2000

pohjavettä pumpataan suoraan kaivosta lämmönvaihtolaitteistoon. Tällöin maa- tai kallioperässä ei ole erillisiä lämmönsiirtoputkistoja ja lämmönsiirtoaineita vaan pohjavesi on itsessään energiankantaja. Yksinkertaisimmillaan pohjavettä pumpataan yhdestä kaivosta ja palautetaan hyödyntämisen jälkeen takaisin pohjavesimuodostumaan toisen kaivon kautta. Suomen pohjavesissä on todettu olevan merkittävä paikallinen ja lähes hyödyntämätön uusiutuva lämmitys- ja viilennysenergiapotentiaali (Arola 2015).

Viime aikoina on myös Suomessa otettu käyttöön muutamia kohteita, joissa hyödynnetään geoenergiaa rakennuksen perustuspaaluihin asennettujen lämmönvaihtimien kautta (Lautkankare ym. 2017). Tällöin energian lähde on maan pintaosan savikerros.

Maa- ja kallioperän lämpö on hyvä paikallinen energialähde, joka laskee lämmityskustannuksia: maa-lämpöpumpun toimintaan kuluu sähköä noin 1/3 sähkölämmitteisen talon lämmittämiseen kuluva sähköstä (Pokki ym. 2014). Ruotsissa energiakaivot lämmittävät 20 prosenttia maan pientaloista, enemmän kuin missään muualla Euroopassa (Gehlin ja Andersson 2016). Suomessa paras potentiaali matalan geotermisen energian tuottamiseen on maan eteläosissa (Kuva 4).

### 3.2. Syvä geoterminen energia

Maanpinnan vuodenaikariippuvaisen lämpötilan vaikutusalue ulottuu noin 15 metrin syvyyteen. Sen alapuolella lämpötila nousee syvyyden myötä vuodenaikasta riippumatta. Tätä vakaata maankuoren lämpöä kutsutaan geotermiseksi ja se on peräisin pääasiassa Maan radioaktiivisten isotooppien, mm. uraanin, toriumin ja kaliumin, hajoamisesta, planeetan kasautumisen aikana muodostuneesta lämmöstä sekä maan ytimen rajalla tapahtuvasta mineraalien faasinmuutoksesta. Vähintään 70°C vettä voidaan hyödyntää lämmitykseen, ja sähköntuotantoon tarvitaan yli 150°C vettä. Alle 70°C vettä voidaan hyödyntää, kun sen lämpötila nostetaan riittäväksi lämpöpumpulla. Kuoren lämpötilan nousu (geoterminen gradientti) on alueellisesti erittäin vaihtelevaa. Siinä missä vulkaanisilla alueilla kuumaa vettä esiintyy jopa maanpinnan tuntumassa, Etelä-Suomen kallioperässä geoterminen gradientti on noin 2°C/100 m, ja arkeisessa Itä- ja Pohjois-Suomessa alimmillaan 1.2°C/100 m (Kukkonen 2000). Tämä tarkoittaa, että 100°C lämpötila saavutetaan alueesta riippuen vasta 6-9 kilometrin syvyydellä (Kuva 4).

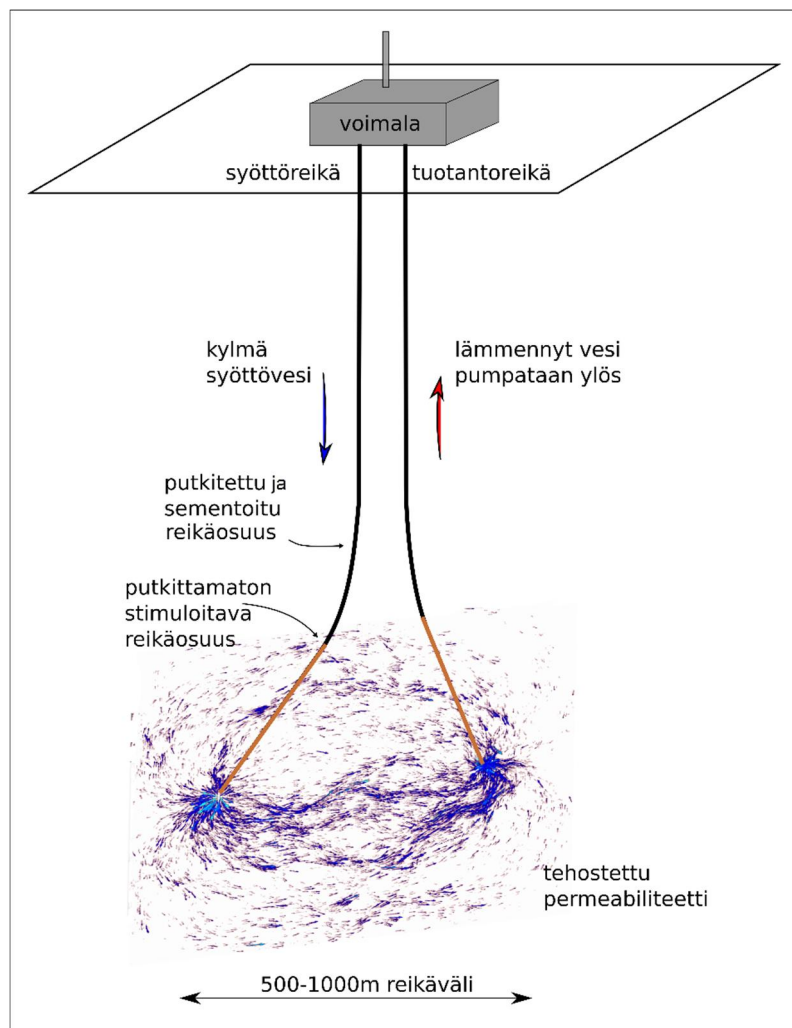
Kiteisen kiven vedenläpäisevyys (permeabiliteetti) laskee syvyyden kasvaessa, joten sitä on tehostettava keinotekoisesti. Mitä syvemmältä lämpöä halutaan kerätä, sitä haastavampaa on permeabiliteetin tehostaminen. Matalammat porakaivot ovat syvempiä edullisempia, mutta toimintaa on tehostettava lämpöpumpulla. On mahdollista porata toimintaperiaatteeltaan matalaa lämpökaivoa vastaava, mutta tuhansia metrejä syvä yksittäinen porakaivo. Se voi olla täysin tai vain osin putkitettu, ja se kerää sitä enemmän lämpöä, mitä syvempi se on. Alaosastaan avoin kaivo saattaa hyödyntää kallioperän vettä johtavia rakenteita, jolloin siihen voi liittyä samoja riskejä kuin muihinkin vettä kallioperässä kierrättäviin järjestelmiin (osio 4.1). (Doelling ja Schulte 2010; Raymond ym. 2015.)

### 3.3 Tehostettu geoterminen lämmöntuotanto, EGS

Enhanced Geothermal System (EGS) tarkoittaa vapaasti käännettynä paranneltua tai tehostettua geotermistä järjestelmää. EGS-tyyppisiä voimalaitoksia rakennetaan alueille, joissa luonnollinen maankuoren permeabiliteetti on liian pientä geotermisen energian hyödyntämiseen. Permeabiliteettia parannetaan nk. hydraulisella stimuloinnilla eli pumpaamalla poranreikään suuria määriä vettä. Stimuloinnin tavoitteena on avartaa kiven olemassa olevia rakoja. Stimulointi indusoi seismisyyttä, mutta se on oleellinen osa EGS-voimalan rakennusta. Hydraulisen stimuloinnin mekanismit selitetään osiossa 4.1.

Kallioperän rakojen avartamista voi myös tehostaa kemiallisesti. Kiteisessä kivessä kemiallisella käsittelyllä suurennetaan kallioperässä olevia rakoja liuottamalla raoissa olevia ns. sekundaarimineraaleja, mikä synnyttää lisää tilaa nesteen virtaukselle.

Poranreikä putkitetaan haluttuun syvyyteen saakka ja viimeiset 500 – 1000 metriä reistä eli osuus, jossa veden on tarkoitus kiertää syöttöreikästä tuotantoreikään, jätetään avoimeksi (Kuva 5). Stimulointi teh-



Kuva 5: Tehostetun geotermisen energiavoimalan konsepti.

dään ensin yhdelle reiälle, ja indusoituja järjestyksiä paikantamalla selvitetään veden virtausreitit eli rakenteet, joissa on suurin permeabiliteetti. Rakoilusuunta riippuu kallioperän jännitystilasta (Majer ym. 2007). Toinen reikä porataan suunnatusti, kun tiedetään, mihin suuntaan valtaosa raoista on auennut.

Oleellista on, että kallioperän rakoverkko on sopivan kokoinen ja vesi virtaa siinä mahdollisimman tasaisesti, jotta lämpö siirtyy tasaisesti kivistä veteen. Ongelmaksi voi koitua yhden tai useamman laajemman virtausreitin aukeaminen, jolloin suuri osa vedestä virtaa nopeasti ulosottoreiälle eikä ehdi lämmitä tarpeeksi. Voi myös olla, että osa vedestä virtaa pienissä raoissa kaukana ulosottoreiästä eikä saavuta tuotantoreikää vaan jää kallioperään.

Veden kierto poranreikien välillä on nopeampaa kuin lämmön siirtyminen ympäröivässä kivessä, joten veden kierrättäminen kallioperässä jäädyttää kiveä. Kiven lämpötilasta ja lämpöominaisuuksista sekä maanalaisen lämpövarannon rakenteesta ja veden virtausnopeudesta riippuen voimalalla on tietty rajattu käyttöikä, jonka jälkeen vesi ei enää ehdi lämmitä tarpeeksi matkalla syöttöreiästä tuotantoreikään.

Maailmalla on runsaasti EGS-tyyppisiä voimaloita, mutta suurin osa niistä on sijoitettu sedimenttikiveen tai lähelle maanpintaa, missä kallioperän vedenläpäisevyys on useita kertaluokkia parempi kuin kiteisessä kivessä. Suomen geologisen ympäristön kanssa vertailukelpoisia kohteita on vähän. Suomen viileässä kalliiossa tarvittavan 100° C lämpötilan saavuttamiseksi on porattava yli 5 kilometrin syvyyteen. EGS-hankkeita voi toteuttaa myös matalammalla (esim. 2-3 km) tehostamalla niitä lämpöpumpuilla. Taulukossa 1 on esimerkkejä kiteiseen kallioperään rakennetuista voimaloista ja niiden parametreista.

- Soultz-sous-Forêts sijaitsee Ranskan itäosassa, Reinin hautavajoamassa. Graniitin päällä on keskimäärin 1,4 kilometriä paksu sedimenttikerros. Soultzin voimala oli käynnistyessään 1987 Euroopan ensimmäinen tutkimushanke. Tällä hetkellä (2019) voimala tuottaa lämpöä ja sähköä. (Evans ym. 2012; Feder 2018.)
- Baselin voimala Sveitsissä, Reinin hautavajoaman eteläpäässä, on hanke, joka keskeytettiin vuonna 2006 voimakkaan indusoidun maanjäristyksen vuoksi. Järitys sattui sen jälkeen, kun pumppaus oli keskeytetty kohonneen seismisyytason takia. Väestöllä oli jo alun perin hyvin matala toleranssi indusoiduille maanjäristyksille, sillä kaupunki oli vaurioitunut pahoin maanjäristyksessä (M 6,7) vuonna 1356. Indusoidut järjestykset aiheuttivat yhtiölle yhteensä 7 miljoonan Sveitsin frangin korvauskulut, ja alueen seisminen riski on pysynyt koholla vuosia toiminnan alasajon jälkeen. (Majer ym. 2007; Häring ym. 2008.)
- Landaun voimala läntisessä Saksassa sijaitsee myös Reinin hautavajoamassa, lähellä Soultzia. Alueen kaksi suurinta maanjäristystä (M 2,7 ja M 2,4) tapahtuivat voimalan huoltotauon aikana vuonna 2009. Alueella on tapahtunut myös huomattavaa maannousua. Voimala on edelleen toiminnassa ja tuottaa lämmön lisäksi sähköä. (Hagag ja Obermeyer 2017.)

- Cooper Basinin voimala sijaitsi Australian itäosassa sisämaassa. Graniittisen kalliopohjan päällä oli 3,6 kilometrin sedimenttikerros, joten graniittiin porattiin vain 700 metriä. Koska voimala oli kaukana asutuksesta, särötyksen indusoimat maanjäristykset eivät aiheuttaneet yhtä suurta huolta kuin tiheästi asutussa Euroopassa. Voimala ei saavuttanut toivottua 50 MW:n tuotantoa, ja se suljettiin 2016. (Asanuma ym. 2004; Hogarth ja Holl 2017; Feder 2018.)
- Pohangin voimalan rakentaminen Etelä-Koreassa aloitettiin 2012. Vuosina 2016-17 suoritettujen stimuloitien aikana suurimman indusoidun järjestyksen magnitudi oli M 3,2. Marraskuussa 2017, kaksi kuukautta stimuloinnin lopettamisen jälkeen, alueella tapahtui M 5,4 maanjäristys. Järjestyksessä loukkaantui 135 ihmistä, rakenteellisia vaurioita havaittiin 57000 kohteessa, ja kokonaiskustannukset nousivat yli 300 miljoonaan Yhdysvaltain dollariin. Juuri ilmestynyt, Etelä-Korean hallituksen toimesta tehty selvitys on vahvistanut syy-yhteyden EGS-toiminnan ja järjestyksen välillä. Täten järjitys on tähän asti suurin ja tuhoisin EGS-hankkeiden indusoima tapaus. (Grigoli ym. 2018; Kim ym. 2018; Korean Government Commission 2019.)

*Taulukko 1: Esimerkkejä maailman EGS-voimaloista ja niiden avainparametreista: poraussyvyys, syöttö- ja tuotantoreiän välinen etäisyys reikien pohjalla, tavoitelämpötila, stimuloinnin aikaiset kokonaispumppausmäärä ja maksimivirtausmäärä, lämmön tuotantoteho sekä suurimman indusoidun järjestyksen magnitudi ( $M_{max}$ ).*

Voimala status	Syvyys (km), reikäväli (m)	Lämpötila (° C)	Pumppausmäärä (m <sup>3</sup> )	Virtaus max (l/s)	Tuotettu teho	$M_{max}$
Soultz-sous-Forêts toiminnassa	5 650	200	39800	90	30 MW lämpöä 3 MWe sähköä	2,9 stimuloinnin jälkeen
Basel keskeytetty	5	190	11500	55		3,4 stimuloinnin aikana
Landau toiminnassa	3 1500	160		80	3 MW lämpöä 3,8 MWe sähköä	2,7 toimintatauon aikana
Cooper Basin suljettu	4,3 700	260	2500	25	1 MW lämpöä	3,7 stimuloinnin aikana
Pohang keskeytetty	4,3 600	140	12800	48		5,4 stimuloinnin jälkeen
Otaniemi rakenteilla	6,4	100	18160	30		1,8 stimuloinnin aikana

---

### 3.4. Geotermiset hankkeet Suomessa (2019)

Suomessa on tähän mennessä haettu lupaa kahden geotermisen lämpölaitoksen perustamista varten. Toinen kohteista sijaitsee Espoon Otaniemessä (kaksi noin 7 km syvää reikää) ja toinen Tampereella (yksi noin 8 km syvä reikä). Molemmissa kohteissa lupa on haettu MLR:n mukaisilla lupahakemuksilla kaupungin rakennusvalvonnasta. Espoossa on myönnetty laajennettu toimenpidelupa 20.8.2015 ja Tampereella rakennuslupa 16.9.2015.

Espoossa toimenpidettä on verrattu nyt jo kumottuun maankäyttö- ja rakennusasetuksen (895/1999, MRA) 62 §:n mukaiseen maalämpökaivon poraukseen. Nykyisin maalämmön hyödyntämiseen tarkoitettuna lämpökaivon poraaminen on säädetty MRL:n 126a §:ssä 12 kohdassa toimenpideluvanvaraisena toimenpiteenä, jolloin rakennusluvan sijaan voidaan rakentamiseen hakea toimenpidelupaa. Maalämpökaivojen osalta on tarkennettu, että toimenpidelupaa ei tarvita, jos toimenpide perustuu oikeusvaikutteeseen kaavaan. Maalämpökaivojen osalta kunta voi rakennusjärjestyksessä myös määrätä, että toimenpidelupaa ei kunnassa tai sen osassa tarvita, jos toimenpidettä voidaan pitää vähäisenä. MRL:ssa ei oteta kantaa maalämpökaivojen syvyyteen.

Sekä Espoon että Tampereen lupahakemuksiin on haettu lausunto vastaavalta ELY-keskukselta (Uusimaa ja Pirkanmaa). Lisäksi Espoossa on pyydetty kannanotto kaupungin ympäristökeskukselta. Pirkanmaan ELY-keskus on tuonut omassa lausunnossaan esille, että esitettyjen tietojen perusteella syväreian poraus ei vaadi ympäristönsuojelulain eikä vesilain (587/2011, VL) mukaisia lupia eikä YVA-lain mukaista ympäristövaikutusten arviointimenettelyä. Pirkanmaan ELY-keskus kuitenkin toteaa, että toiminta voi tulla ympäristölupavelvolliseksi mm. naapureihin kohdistuvan melu- tai pölyhaitan vuoksi YSL 27§:n 3 kohdan ja eräistä naapuruussuhteista annetun lain (26/1920) 17§:n 1 momentin perustella. Sekä Espoon että Tampereen luvissa on huomioitu MRL:n 133§:n mukainen naapurien kuuleminen. Pirkanmaan ELY-keskus huomioi lausunnossaan myös kohteen sijainnin pohjavesialueisiin nähden ja totesi ettei hanke sijoitu pohjavesialueelle.

Kokemuksia Espoon Otaniemen voimalan ensimmäisestä stimuloinnista on osiossa 4.4.2.

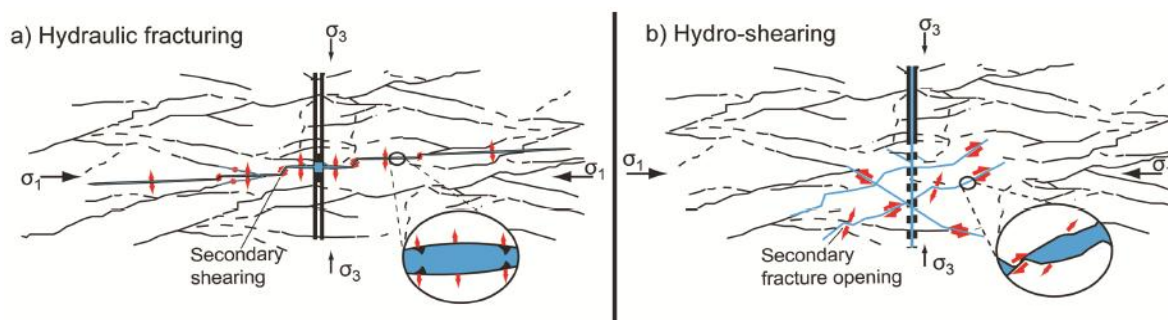
## 4. Syvien geotermisten voimaloiden seisminen riskinhallinta

Vedensyöttö kallioperään muuttaa kallioperän jännitystilaa, mikä saattaa aiheuttaa maanjäristyksiä. Ihmistoiminnan aiheuttamia maanjäristyksiä kutsutaan indusoiduiksi maanjäristyksiksi, ja niitä voi aiheuttaa geotermisen toiminnan lisäksi öljyn- ja kaasuntuotanto, maanalainen louhinta, vesimassat suurten patoaltaiden lähistöllä sekä jäteveden syöttö. Indusoidun seismisyyden riskiä pyritään hallitsemaan tutkimalla, mitkä seikat siihen vaikuttavat ja valvomalla seismisyyttä indusoivaa toimintaa. Tämä osio toimii taustatietona geotermisen energialaitoksen lupahakemussuosituksille (osio 5). Osiossa kuvataan indusoidun maanjäristyksen mekanismit, alueen maanliikkeiden kartoitus, seismisen hasardin ja riskin määrittäminen sekä seismisen valvonnan periaatteet.

### 4.1 Indusoitu seismisyys

Indusoitu eli ihmistoiminnan aiheuttama maanjäristys ei syntyvaltaan juuri eroa luonnollisesta. Luonnollinen eli tektoninen maanjäristys syntyy, kun maankuoreen kertynyt jännitys jossakin pisteessä ylittää kiviaineksen lujuuden ja jännitysenergia purkautuu maanliikkeinä. Kiteisessä kivessä on runsaasti erikokoisia rakoja ja siirroksia, jotka muodostavat kiveen heikkouskohtia. Osa siirroksista on kriittisessä jännitystilassa, mikä tarkoittaa, että pienikin lisäys jännitystilaan riittää laukaisemaan maanjäristyksen (Zoback ym. 2002; Gischig ja Preisig 2015). Luonnollisia syitä jännityksen kertymiseen ovat mannerlaattojen liike ja esimerkiksi mannerjäätikön aiheuttaman maankuoren painuman palautuminen. Indusoitu järistys syntyy, jos ihmistoiminnan aiheuttama jännityksen muutos on niin suurta, että se aiheuttaa siirtymän, vaikka kallioperä ei olisi alun perin kriittisessä jännitystilassa.

EGS-hankkeissa kiven luontaista permeabiliteettia kasvatetaan syöttämällä kallioon vettä kovalla paineella. Tämä säröttää kiveä kahdella eri tavalla. Ensimmäinen, hydraulinen särötys (engl. hydraulic fracturing; Kuva 6a) edellyttää niin suurta paineen kasvua, että se ylittää pienimmän pääjännityksen ( $\sigma_3$ ) suuruuden. Tällöin kalliossa avautuu ns. tensio- eli vetorakoja, jotka ensin ”pullistuvat” kohtisuorassa raon seinämiä ja  $\sigma_3$ :a vastaan ja sen jälkeen etenevät raon suuntaisesti. Syötettyyn veteen voidaan lisätä



Kuva 6: Hydraulisen särötyksen mekanismeja: a. hydraulinen särötys, tensioraot, b. hydraulisesti indusoitu hiertoliikunto, rakojen suuntainen liike.  $\sigma_1$  ja  $\sigma_3$  ovat kallion suurin ja pienin pääjännityskomponentti. (Gischig ja Preisig 2015)

hiekanjyviä tai vastaavia synteettisiä aineita, jotka estävät tensorakoja sulkeutumasta paineistuksen loputtua. Murtumat voivat myös syntyä ehjään kiveen. Tensiojännityksen aiheuttamat murtumat kasvavat hitaasti ja korkeintaan satojen metrien pituisiksi. Tämän tapahtumasarjan on arvioitu vapauttavan niin vähän seismistä energiaa, ettei sillä ole vaikutusta alueen seismiseen hasardiin. (Foxall ym. 2015.)

Toinen, hydraulisesti aiheutettu hiertoliikunto (engl. hydro-shearing; Kuva 6b) edellyttää paineen ylittävän kivessä olevan murtumapinnan kitkan, jolloin pinnan eri puolet liikahtavat toistensa suhteen. Muutos on pysyvä, sillä pintojen epätasaisuus estää rakoja sulkeutumasta uudelleen (Kraft ym. 2009; Gischig ja Preisig 2015). Tämä murtumapintojen hiertoliikunto (engl. shear slip) voi seurata tensiorakojen muodostumista, sillä hydraulinen särötys muuttaa kokonaisjännitystilaa. Hiertoliikuntoja on vaikeampi kontrolloida vedensyöttöparametrien avulla, ja niiden on arvioitu aiheuttaneen suurimmat indusoidut järjestykset (Gischig ja Preisig 2015).

Pääasialliset mekanismit, jotka indusoivat seismisyyttä geotermisen voimalan eri toimintavaiheissa ovat:

- **Paineen muutokset:** Kiven huokokset ovat täynnä vettä, mikä tuottaa niihin tietyn paineen. Kun kiveen syötetään nestettä, sen jännitystila muuttuu ja raot voivat aueta kuvan 6 mukaisesti. Vastaavasti jos nestettä pumpataan ulos kivistä enemmän kuin sitä syötetään, paine laskee ja seisminen aktiivisuus vähenee. Hyvin huokoisessa kivessä huokospaineen laskeminen saattaa aiheuttaa maan vajoamista. Ilmiötä tavataan ainoastaan voimaloissa, joissa vesi otetaan läheltä maan pintaa eikä sitä syötetä takaisin.
- **Maanjäristysten vuorovaikutukset:** Maanjäristyksistä vapautuva energia voi laukaista uusia maanjäristyksiä, varsinkin jos lähistöllä on kriittisessä jännitystilassa olevia heikkousvyöhykkeitä, jotka tarvitsevat vain pienen jännitystilan muutoksen liikkuaan.
- **Kemialliset muutokset:** Eri mineraalit reagoivat eri tavalla syöttöveden kanssa, joten kivessä tapahtuu kemiallista muuttumista, saven muodostumista, mineraalien kiteytymistä ja rakojen sidosten heikkenemistä, mikä edelleen muuttaa rakopintojen kitkakerrointa. Kaikki nämä muutokset tapahtuvat olemassa olevissa raoissa eli kiven heikoissa kohdissa. Heikkouskohtien pettäminen indusoi maanjäristyksiä.
- **Lämpötilamuutokset:** Tuotantovaiheessa kivi jäähtyy vähitellen, ja kiven supistuminen saattaa avata uusia rakopintoja. Niitä pitkin vesi pääsee etenemään, eli permeabiliteetti kasvaa, virtausnopeus sekä paine muuttuvat ja seismisyyttä saattaa ilmetä kauempana reiästä. Lämpötilan tasaantuminen kestää vähintään yhtä kauan kuin kiven lämpötilaa muuttanut toiminta. Porausvaiheessa taas kivi lämpenee ja lämpölaajeneminen kasvattaa jännitystilaa. Tämä lämpötilan aiheuttama paineen muutos on niin pientä, ettei se yleensä indusoi seismisyyttä.

---

Vedensyötön vaikutuksia voi karkeasti arvioida etukäteen alueen geologian ja voimalan toimintaparametrien perusteella. Indusoidusta seismisyydestä on olemassa vähän havaintoaineistoa. Monet arviot perustuvat teoreettisiin malleihin ja saattavat muuttua lisätutkimuksen myötä:

- **Kallioperän kivilaji:** Kiteinen kivi on tyypillisesti alttiimpi maanjärityksille kuin sedimenttikivi (Evans ym. 2012). Tiedot kivilajeista ja niiden ominaisuuksista ovat tärkeitä myös porauksen kannalta ja ne saadaan selville porauksen aikana talteen otetusta kivimateriaalista.
- **Alueen siirrokset:** Vedensyöttö seismisesti aktiivisten siirrostien lähistöllä nostaa selkeästi indusoidujen maanjäritysten todennäköisyyttä (Wiemer ym. 2017), ja yleisenä sääntönä on, että EGS-hankkeiden tulisi välttää laajoja, seismisesti aktiivisia siirrosvyöhykkeitä. Siirrostien aktivoituminen riippuu niiden syvärakenteesta sekä suuntautumisesta alueen jännityskentän suhteen. Siirrostien syvärakenteesta ja liikepotentiaalista saadaan tietoa mm. jännitystila- ja painovoimamittauksilla sekä vertaamalla siirrostien suuntia ja mekaanisia ominaisuuksia paikalliseen jännitystilaan.
- **Siirrosalueen laajuus:** Maanjärityksen voimakkuus riippuu siitä, kuinka laaja alue siirroksista aktivoituu kerralla ja kuinka suuri on siirrosliike. Laajemmissa siirroksissa on enemmän potentiaalia suureen maanjäritykseen. Suuri järitys saattaa aiheuttaa enemmän vauriota, sillä siirtymä on suurempi, se kestää pidempään ja vapauttaa enemmän energiaa. Tietoa kallioperän yksiköistä ja siirrostien laajuudesta saadaan paikkakohtaisilla geofysikaalisilla tutkimuksilla ja mallinnuksilla.
- **Syötettävän nesteen määrä:** Mitä suurempi tilavuus kallioperästä altistuu jännitystilan muutoksille, sitä enemmän indusoiduja maanjärityksiä on odotettavissa (osio 4.3.2).
- **Huokospaine:** Kiven huokospaine on usein lähellä kriittistä, joten pienikin muutos voi laukaista järityksen. Mitä nopeampi muutos on, sitä todennäköisempiä seismiset tapaukset ovat (Majer ym. 2007).
- **Lämpövarannon syvyys:** Maankuoren lujuusprofiilin perusteella on arvioitu, että syvällä kallioperässä tehtävät jännitystilan muutokset saattavat indusoida suurempia järityksiä (Gischig ja Wiemer 2013). Kuoren jännitystila kasvaa aina n. 10-15 kilometriin asti, joten syvä siirros voi liikahtaessaan vapauttaa enemmän energiaa kuin lähellä maanpintaa oleva. Tämä syvyysriippuvuus perustuu teoreettiseen mallinnukseen, mutta siitä on vähän empiirisiä todisteita (Wiemer ym. 2017).
- **Taustaseismisyys:** On esitetty, että matalan taustaseismisyyden alueilla ei olisi alttiutta suurelle indusoidulle järitykselle (Evans ym. 2012). Laajempien tutkimusten mukaan indusoidujen tai luonnollisten maanjäritysten magnitudi ei korreloi alueen taustaseismisyyden kanssa (Wiemer

---

ym. 2015). Taustaseismissyys on syytä selvittää osana luonnollisen hasardin kartoitusta (osio 4.3.1).

Indusoitu seismissyys keskittyy pääosin noin 500 metrin säteelle paineistetusta reiästä, mutta vedensyötön tiedetään laukaisseen järjestyksiä myös kauempana tuotantoreiästä (Goebel ja Brodsky 2018). Näiden järjysten todentaminen ihmistoiminnan aiheuttamiksi on vaikeaa: ne tapahtuvat yleensä siirroksissa, jotka muutenkin aktivoituvat herkästi paikallisen jännityskentän vaikutuksesta.

Toiminnassa, joka indusoi maanjärjestyksiä, on tärkeää pystyä objektiivisesti ja läpinäkyvästi erottamaan indusoidut maanjärjestykset muusta seismissyydestä (räjäytykset, luonnolliset maanjärjestykset). Yleisön suhtautuminen indusoituihin ja luonnollisiin maanjärjestyksiin on erilainen. Ensimmäisiä kohtaan ollaan vähemmän suvaitsevaisia ja heikkokin seisminen havainto voi saada rakennuksistaan vaurioita löytäneitä hakemaan vahingonkorvauksia, ovatpa vauriot aiheutuneet havaitusta tapauksesta tai jostakin muusta syystä. Räjäytysten ja maanjärjysten erotteluun on nykyään olemassa tehokkaita, mm. spektrianalyysiin perustuvia menetelmiä (Kortström ym. 2016). Indusoitujen ja luonnollisten järjysten erotelussa käytetään apuna nk. siirrostaso- tai momenttitensoriratkaisuja. Ratkaisujen perusteella saadaan arvio järjistylähteessä tapahtuneesta siirrosliikkeestä sekä järjistyksen aiheuttaneesta jännityskentästä. Momenttitensoriratkaisu antaa tarkimman kuvauksen maanjärjistyksen lähdemekanismista, sillä siirroksen liikesuuntien lisäksi se mallintaa mm. tilavuuden muutoksen osuutta maanjärjistyksen syntytapauksissa (Foulger ja Julian 2015). Kummankin menetelmän käyttö edellyttää riittävän tiheää seismistä havaintoverkkoa voimalan ympärille (osio 4.4).

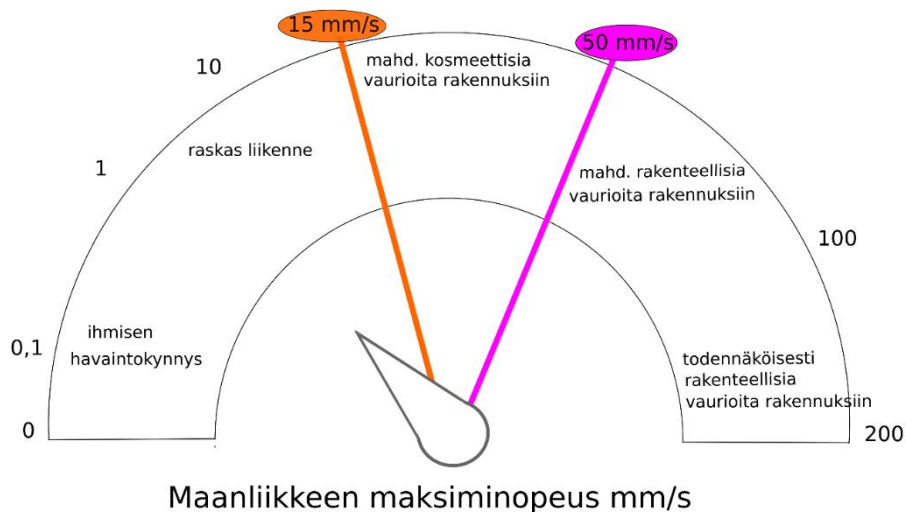
Maanjärjistyksen ympäristövaikutukset riippuvat voimakkuuden lisäksi sen syvyydestä ja sijainnista. Lähellä maanpintaa sattunut järjitys on tuhoisampi kuin samansuuruinen syvä järjitys. Voimakaskin maanjärjitys keskellä aavikkoa saattaa jäädä huomiotta, kun taas vähemmän voimakas järjitys tiheästi rakennetulla alueella voi olla tuhoisa. Asutuilla alueilla ihmiset voivat havaita hyvin heikkoja maanjärjestyksiä ja kokea ne häiritseviksi. Indusoidun seismissyyden riskejä arvioitaessa suositellaan käytettäväksi järjysten magnitudin lisäksi maanliikkeen nopeus- tai kiihtyvyyssarvoja (PGV/PGA, osio 4.2). Ajatus perustuu siihen, että PGV ja PGA kuvaavat maanliikettä mittauspisteessä ja magnitudi järjistylähteessä. Tietynsuuruisen maanjärjistyksen vaikutus maanpinnalla riippuu tapauksen syvyydestä ja etäisyydestä sekä alueen geologiasta. Monien rakenteiden ja laitteiden värinäkestävyys ilmoitetaan nimenomaan nopeus- tai kiihtyvyyssarvoina. Seismissen riskin arviointi, joka tehdään ennen jokaista stimuloitihanketta, sisältää suurimpien maanliikkeiden ennustemallin. Ennustemalleja voidaan päivittää vedensyötön aikana ja sen jälkeen keräämällä tietoa indusoidun seismissyyden aiheuttamista maanliikkeistä sekä niiden vaikutuksista. (Bommer 2017.)

Koska tehostetut geotermiset voimalat väistämättä aiheuttavat seismissyyttä, kannattaa laitosten sijainti optimoida siten, että seismissyyden aiheuttamat haitat jäävät mahdollisimman pieniksi ja että laitokset

sijaitsevat riittävän lähellä lämmityskohdetta lämpöhävikin pienentämiseksi. Voimalalle tulisi asettaa turvaetäisyys rakennetuista alueista. Sopiva etäisyys on määriteltävä tapauskohtaisesti, sillä se riippuu alueen siirrostien laajuudesta ja jatkuvuudesta. Kiven mekaanisista ominaisuuksista johtuen suurimmat indusoidut järjestykset keskittyvät stimuloitun alueen ulkolaidoille (nk. Kaiser-efekti) ja riski on olemassa aiheutetun jännityksen hiipumisen ajan, jopa useita vuosia (Baisch ja Harjes 2003, Zang ym 2014).

## 4.2 Sallitut maanliikkeet

Maanjäristysten ja räjäytysten aiheuttaman maanliikkeen vaikutuksia ihmisiin ja rakenteisiin arvioidaan yleensä maanliikkeen maksimikihtyvyyden (PGA) tai maksiminopeuden (PGV) avulla. Rakennustöissä ja niihin liittyvässä suunnittelussa PGV-kynnysarvot ovat yleisempiä. Kuvassa 7 on havainnollistettu



Kuva 7: Esimerkkejä maanliikkeen vaikutuksista ihmisiin ja rakenteisiin. Mukailtu: Bommer 2017 ja RIL 253-2010

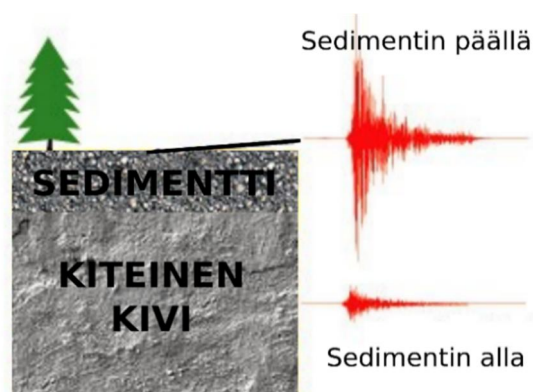
maanliikkeen maksiminopeuden mahdollisia vaikutuksia ihmisiin ja rakennuksiin. Ihmisen havaintokynnys on alhaisimmillaan 0,05 mm/s (RIL 253-2010) ja Bommerin (2017) mukaan pienin PGV, joka saattaa aiheuttaa vähäisiä vaurioita heikkoihin rakenteisiin on 15 mm/s (raja-arvot ovat viitteellisiä). Suomen rakennusinsinööriliitto ry:n julkaisemien ohjeiden (RIL 253-2010) mukaiset PGV-kynnysarvot räjäytystöissä eri maaperätyypeille on listattu taulukossa 2. Taulukko on laadittu louhintaräjäytyksille eivätkä sen arvot ole suoraan sovellettavissa maanjäristyksen aiheuttamien maanliikkeiden valvontaan. Räjäytykset tehdään aikataulutetusti, toisin kuin indusoidut järjestykset, jotka voivat sattua mihin kellonaikaan tahansa. Räjäytysten tuottamat seismiset aallot kulkevat maankuoren rikkonaisessa pintaosassa, jossa seisminen energia vaimenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Järjestyksaallot taas syntyvät syvemällä maankuorella, ja ne vaimenevat hitaammin kulkiessaan suurimman osan ajasta kovassa kiteisessä

kivessä. Räjähdyksien ja maanjäristysten energia- ja taajuussisällössä on myös eroja: Räjähdyksien lähde säteilee seismistä energiaa tasaisesti joka suuntaan, kun taas maanjäristyksen säteilykuviot riippuvat siirrokseen geometriasta ja liikkeen suunnasta siirrosuunnalla. Lisäksi järistyksen taajuusspektri on laajempi kuin räjähtäytysten (Kortström ym. 2016).

*Taulukko 2: Suomen rakennusinsinööriliiton ry:n julkaisemien ohjeiden mukaiset maanliikkeen maksiminopeuden (PGV, mm/s) kynnyksarvot eri rakenneluokille erilaisilla maa- ja kalliopohjilla 1 m ja 2000 m (sulussa) päässä räjähtäytyspaikasta tehdylle mittaukselle (RIL 253-2010 rakentamisen aiheuttamat värähtelyt). Taulukon arvot eivät suoraan sovellu syväporaamiseen*

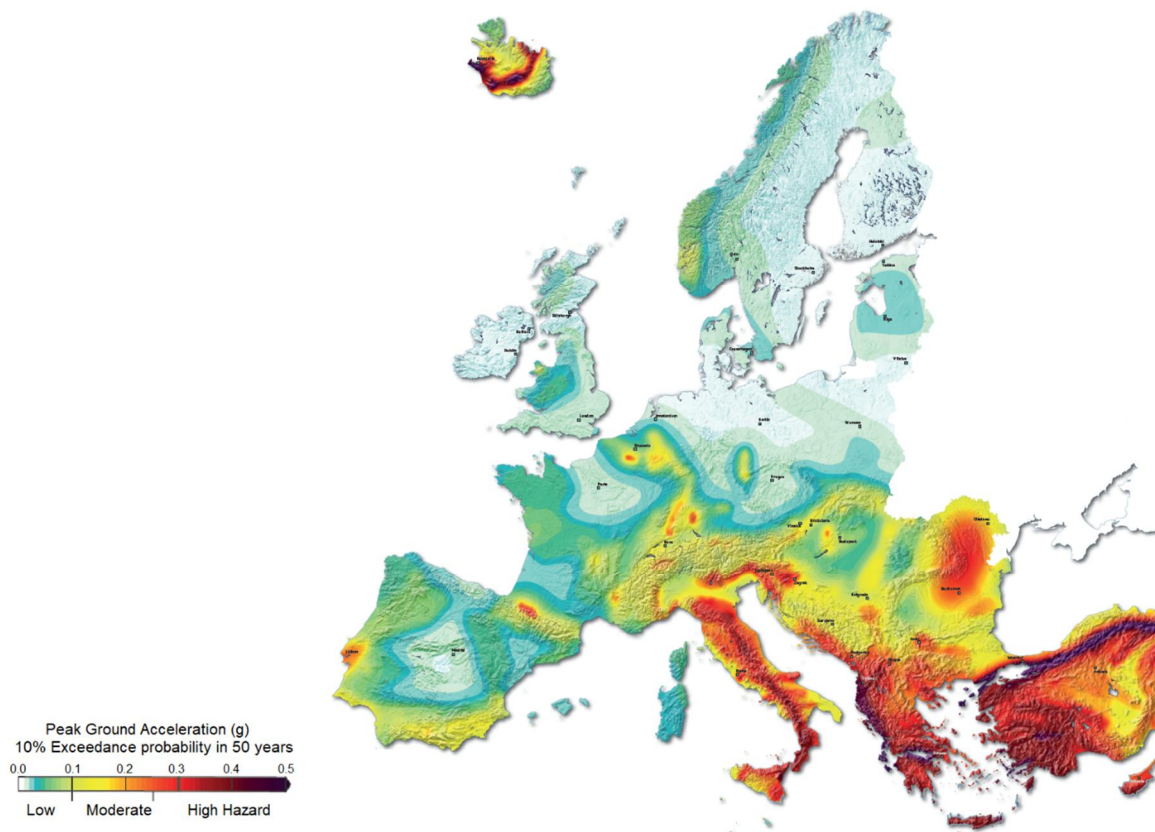
Maaperätyyppi	Pehmeä savi	Siltti, hiekka	Moreeni, sora	Kiinteä kallio
Raskaat teräsbetoni- ja teräsrakenteet, sillat, laiturit jne.	15,75 (5,25)	31,5 (8,75)	61,25 (12,25)	245,00 (15,75)
Teräs- ja betonirakenteet, teolliset	11,25 (3,75)	22,5 (6,25)	43,75 (8,75)	175,00 (11,25)
Teräs- ja betonirakenteet, asunnot	9,00 (3,00)	18 (5,00)	35 (7,00)	140,00 (9,00)
Tiilirakenteet ja vastaavat	7,65 (2,55)	15,3 (4,25)	29,75 (5,95)	119,00 (7,65)
Kevytrakenteiset ja värähtelyherkät rakennukset	4,95 (1,65)	9,9 (2,75)	19,25 (3,85)	77,00 (4,95)

Voimalan lähialueen maaperää kartoitettaessa paksut, pehmeät irtomaasiintymät (mm. savikot) luokitellaan myös mahdollisesti värähtelyherkiksi alueiksi. Maanjäristyksen synnyttämät seismiset aallot hidastuvat ja samalla vahvistuvat siirtyessään kiteisestä kivistä maanpinnalla olevaan pehmeään maakerrokseen (Kuva 8). Ilmiötä kutsutaan amplifikaatioksi. Maanpinnan muoto voi vielä entisestään vahvistaa aaltoa. Näin käy esimerkiksi sedimenttialtaassa, jossa seisminen aalto moninkertaistuu heijastuessaan useita kertoja rakenteen laidoilta ja pinnasta.



Kuva 8: Amplifikaatio: pehmeä pintakerros vahvistaa maanliikettä

Seismiset hasardikartat perustuvat usein PGA-arvoihin, jotka ilmoitetaan prosentteina gravitaatiokiihtyvyydestä  $g$  ( $=9,81 \text{ m/s}^2$ ). EU-standardien mukaan (EN 1998:1 2004) maanjäristyksiä ei ole tarpeen ottaa huomioon alueilla, joilla PGA on arvioitu pienemmäksi kuin  $0,04g$  ( $=0,39 \text{ m/s}^2$ ). Suomessa PGA on n.  $0,02\text{-}0,03g$  (Kuva 9), joten maanjäristyskuormia ei oteta huomioon tavanomaisten rakennusten mitoituksessa. Herkille mittausjärjestelyille on määritelty suurimmat sallitut värähtelynopeudet, ja niille on yleensä käytössä ympäristön mukaan mitoitettuja värähtelyn vaimentimia. Mikäli seismisyystaso muuttuu, voivat mitoitukset ja vaimentimet olla riittämättömiä. Tällöin paitsi herkät laitteistot, myös tavanomaiset rakennelmat ovat vaarassa vahingoittua.



Kuva 9: Euroopan luonnollinen seisminen hasardi PGA-arvoina. Väriskaala on PGA-arvo ( $g$ ), joka ylittyy keskimäärin kerran 500 vuodessa. Suomi on matalan hasardin aluetta. Lähde: Giardini ym. 2013

### 4.3 Seismisen hasardin määrittäminen ja seisminen riskiarvio

Seisminen hasardi eli uhka tarkoittaa todennäköisyyttä, että annettu maanjäristysmagnitudi tai jokin muu maanliikkeen parametri ylittyy tarkasteltavalla alueella tietyssä ajanjaksona. Seisminen hasardi määritellään tilastollisesti (probabilistic seismic hazard analysis, PSHA) ja/tai alueen lähdeparametreista (deterministic seismic hazard analysis, DSHA). Geotermisen voimalatoiminnan tapauksessa alueen hasardimäärittäminen on kaksiosainen: alueen luonnollinen seisminen hasardi tulee pohjaksi vedensyötön indusoiman seismisyyden aiheuttamalle hasardille.

Hasardimäärityksen askeleita ovat alueen taustaseismissyyden kartoitus, siirrosten ja aluegeologian kartoitus, maanliikettä ennustavan mallin luominen sekä arvio siirrosten aktiivisuudesta, maanjäristysten esiintymistiheydestä eri magnitudiarvoilla ja maksimimagnitudista. Indusoidun seismissyyden hasardiarvio pohjautuu voimalan toimintaparametreihin (mm. vedensyötön määrään ja paineeseen). Arviointi on vaikeaa, sillä kokemusta siitä on vain vähän (Majer ym. 2012).

Seisminen riskianalyysi arvioi vahinkoja ja kustannuksia, joita maanjäristys mahdollisesti aiheuttaa tapahtuma-alueella. Riskianalyysissä käytetään syöttötietoina hasardianalyysin tuloksia ja huomioidaan myös maaperän vahvistava vaikutus, maanjäristyksille altistuvat rakennukset ja väestö sekä maanjäristyksestä seuraavat toissijaiset hasardit, kuten maanvyöryt ja tsunamit (Bormann 2002, Wiemer 2017). Esimerkkejä lähestymistavoista ja menetelmistä, jotka soveltuvat indusoidun seismissyyden hasardi- ja riskilaskuihin löytyy mm. julkaisuista Bommer ym. (2015) ja Walters (2015). Seismissen riskin määrittämiseen on kehitetty myös erilaisia riskianalyysityökaluja, esimerkiksi GRID (Trutnevyte ja Wiemer 2017) ja SELENA (SELENA 2018).

#### **4.3.1 Taustaseismissyyden kartoitus ja luonnollinen seisminen hasardi**

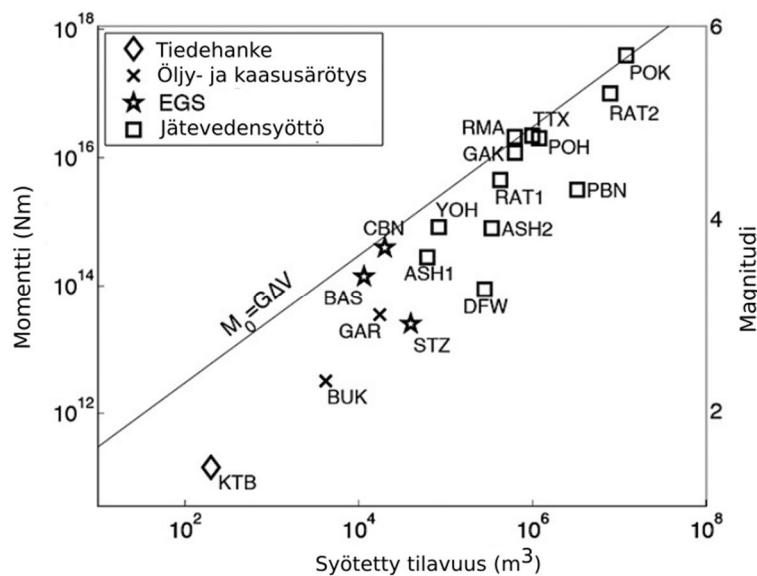
Taustaseismissyyden tason määrittämiseen tarvitaan alueen seismistä historiaa kuvaava, mahdollisimman kattava maanjäristysluettelo. Luettelon avainparametreja ovat maanjäristyksen tapahtuma-aika, sijainti, syvyys ja voimakkuus (intensiteetti, magnitudi). Luettelo yhtenäistetään niin, että eri aikoina tapahtuneiden järistysten voimakkuudet ovat keskenään vertailukelpoisia. Hasardianalyysissä käytettävät tilastolliset menetelmät perustuvat olettamukseen, että maanjäristykset ovat toisistaan riippumattomia. Siksi luettelo on puhdistettava ihmistoiminnan aiheuttamista järistyksistä sekä jälki- ja esijäristyksistä.

Maanjäristysaineistosta lasketaan tapausten esiintymistiheys ja maksimimagnitudi sekä todennäköisyys tietyn magnitudin ylittymiselle alueella tietyn ajanjakson sisällä (Kijko ja Sellevoll 1989, 1992; Kijko 2004; Kijko ja Singh 2011; Kaisko 2018). Arvio alueen maksimimagnitudista voi olla myös deterministinen, jolloin se määritellään siirroksen pituuden, pinta-alan, siirtymän maksimin ja keskiarvon empiirisistä suhteista.

Tammikuussa 2019 päättyneen EVOGY-projektin yhteydessä luotiin Fennoskandian alueelle uusi maanliikettä ennustava yhtälö ja verrattiin sitä vanhempiin yhtälöihin (Fülöp ym. 2019). Sitä voidaan hyödyntää Suomen alueelle tuotetun hasardikartan luomisessa.

### 4.3.2 Indusoidun seismisyyden hasardi

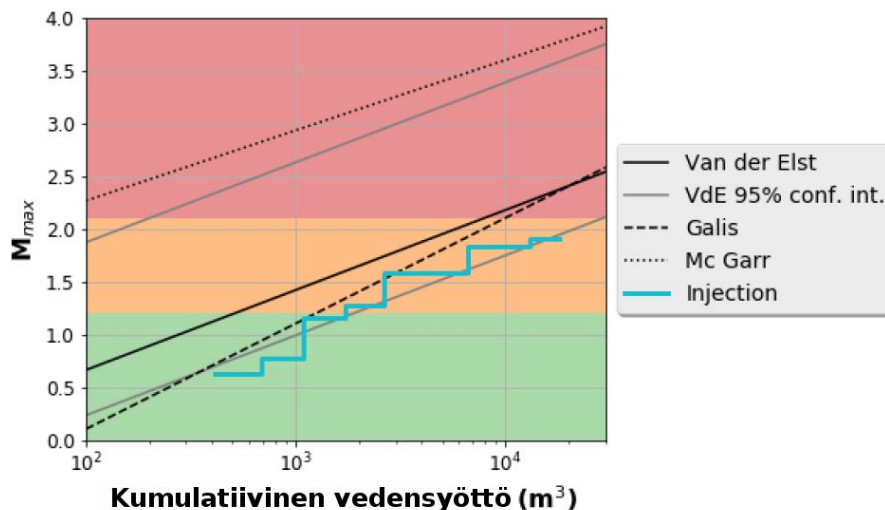
Vedensyötön indusoiman maksimimagnitudin on havaittu korreloivan vedensyötön kanssa, joten maksimimagnitudia pyritään ennustamaan mallintamalla. Lähtöparametreina käytetään syötetyn veden tilavuutta sekä lämpövarannon ominaisuuksia, kuten kokoa tai hydraulista diffusiviteettia (miten nopeasti vesi kulkeutuu huokoisen tilavuuden läpi). Mallit hyödyntävät myös taustaseismisyydestä johdettuja tilastollisia parametreja. Kuva 10 havainnollistaa yksinkertaisinta McGarrin (2014) mallia, jossa maanjäristysmagnitudi riippuu syötetyn veden tilavuudesta sekä säiliön kiven ominaisuuksista. Kuvasta nähdään, että mitä enemmän vettä syötetään, sitä suurempia tapauksia kohteissa on sattunut. (Shapiro ym. 2007, 2010; McGarr 2014; Van der Elst ym. 2016)



Kuva 10: Vedensyötön ja maanjäristysmomentin/magnitudin korrelaatio eri kohteissa. Viiva on momentin teoreettinen yläraja. Lähde: McGarr (2014)

Kuvassa 11 on verrattu Otaniemessä syötetyn vesimäärän indusoimaa maksimimagnitudia kolmen eri mallin (McGarr 2014; Van der Elst ym. 2016; Galis ym. 2017) ennustamiin maksimimagnitudiarvoihin. Otaniemen tapauksessa kaikki mallit ennustivat pumppausmäärään perustuen liian suurta maksimimagnitudia (St1 2018b; Saarno 2018). Toisaalta, Pohangin maanjäristyksen (kts Taulukko 1) magnitudi ylittää selkeästi kuvan 10 teoreettisen ylärajan.

Yksikään edellä kuvatuista malleista ei huomioi kaikkia tarpeellisia parametreja, joten ennusteet ovat vain suuntaa-antavia. Indusoidun seismisyyden hasardiarvio tehdään parhaiten alueelle sopivien fyysikaalisten ja tilastollisten mallien mukaan, ja malleja päivitetään toiminnan aikana.



Kuva 11: Vedensyöttötilavuuden ja maksimimagnitudin suhde Otaniemessä (sinisellä) verrattuna kolmeen eri ennustemalliin: McGarr (2014), Van der Elst (2016) ja Galis (2017). Harmaalla Van der Elstin mallin 95 % luottamusväliä. Lähde: St1, 2018b

#### 4.4 Seisminen valvontajärjestelmä

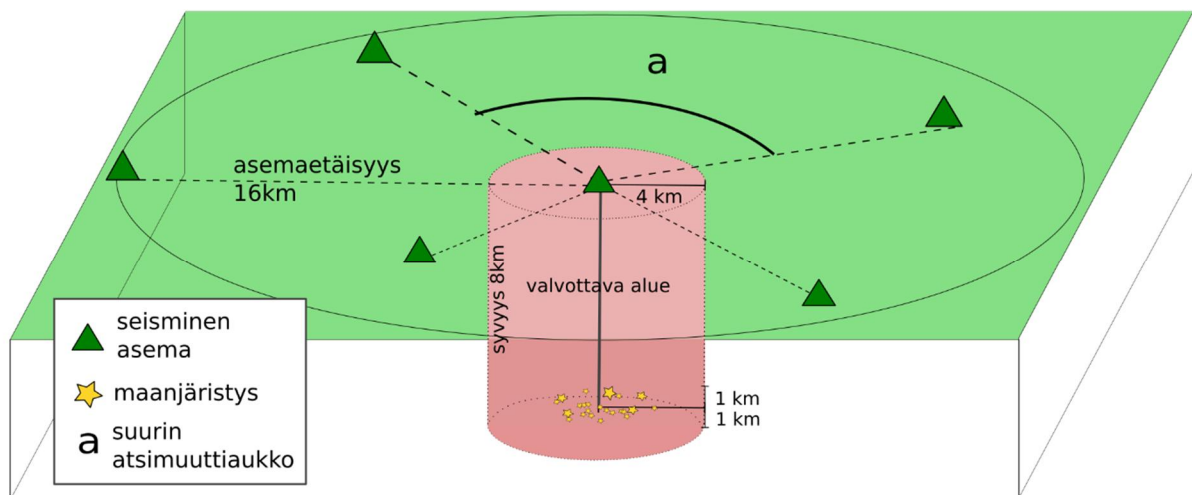
Lämpövoimalan seismisen valvonnan tavoitteena on havaita ja paikantaa laitoksen läheisyydessä mahdollisesti syntyvien seismisten havaintojen ja vaurioiden aiheuttaja, erottaa indusoidut maanjäristykset muista tapauksista ja seurata seismisyystason kehitystä sekä seismisyyden mahdollista siirtymistä lämpövoimalan toiminta-alueelta ympäröivään kallioperään (Majer ym. 2007; Ungemach ja Antics 2015). Indusoidun seismisyyden valvontaan käytetään tiheää paikallista asemaverkkoa ja siihen kytkettyä reaaliaikaista analyysijärjestelmää. Seismisen valvontajärjestelmän toteuttaminen on toiminnanharjoittajan vastuulla.

Seismisiä tapauksia rekisteröidään laitteilla, jotka mittaavat maanliikettä kolmessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa (esim. pystysuora, itä-länsi, pohjoinen-etelä). Kiihtyvyydenturrit mittaavat maanliikkeen kiihtyvyyden aikasarjoja ja ne sopivat parhaiten maanliikkeiden seurantaan. Seismometrit ja geofonit tuottavat maanliikkeen nopeuden aikasarjoja ja niitä käytetään yleensä tapausten tunnistamiseen, paikannukseen ja koonmääritykseen. Voimala-alueen seisminen valvontaverkko pitää asentaa hyvissä ajoin ennen syväporauksen aloittamista, sillä asemien toiminnan testaaminen ja taustaseismisyyden tason selvitys vaativat 1-6 kuukauden mittaisen valvontajakson. Alueen taustaseismisyys asettaa vertailukohdan toimenpiteiden aikana syntyneille seismisille tapauksille.

Valvottavan alueen säteen täytyisi olla vähintään kaksi kertaa kalliolämpövoimalan vaikutusalueen suuruinen tai tapauskohtaisesti laajempikin. Vaikutusalue tulisi arvioida ennakkoselvityksissä. Syviin kierteisen kallioperän porareikiin syötetyn veden on havaittu indusoidun seismisyyttä vaakatasossa 0,5-2 kilometrin etäisyydellä reiästä ja noin ± 1 kilometrin syvyydellä veden syöttötasosta. Täten valvottava

alue ulottuu ainakin 4 kilometrin etäisyydelle voimalasta ja syvyysuunnassa ainakin kilometrin syvemmälle kuin vedensyöttötaso. (Kuva 12)

Seismisen asemaverkon kokoonpano riippuu tavoiteltavasta paikannustarkkuudesta ja kynnymagnitudista. Stimulointia valvottaessa asemaverkon tulee olla niin tiheä, että se havaitsee kaikki alueen sisällä tapahtuvat voimakkuudeltaan  $M > 0$  olevat seismiset tapaukset ja kykenee paikantamaan ne noin 200 metrin tarkkuudella. Tämä paikannustarkkuus mahdollistaa myös kallioperän pintaosissa tapahtuvien maanjäristysten erottamisen maanpinnalla suoritettavista räjäytyksistä. Jotta syvimät maanjäristyslähteet voidaan paikantaa riittäväällä tarkkuudella, pitää asemaverkon säteen olla 1-2-kertainen valvottavan alueen syvyyteen verrattuna. Esimerkkinä, jos maanjäristyksiä halutaan paikantaa 8 kilometrin syvyyteen asti, on asemien oltava enintään 16 kilometrin säteellä lähteestä. Yksi asemista sijoitetaan verkon keskipisteeseen, mahdollisimman lähelle todennäköistä seismisyyskeskittymää. Keskusasema varustetaan seismometrin lisäksi kiihtyvyyssanturilla. Jos hankkeeseen kuuluu stimulointi, kiihtyvyyssanturit asennetaan myös kohteisiin, joissa on vaurioherkkiä laitteita. (Asanuma ym. 2004; Majer ym. 2007, 2012; Evans ym. 2010; Jung 2013)



Kuva 12: : Esimerkki asemaverkon kokoonpanosta. Kuvan numerot vastaavat tekstin esimerkkejä.

Seismiseen valvontaan liittyy myös maanjäristysten siirrostasoratkaisujen määrittäminen. Käytännön sääntönä järjestyksen siirrostasoratkaisun luotettavuudelle on, että tapauksen ympärillä olevien asemien väliset tyhjät sektorit (atsimuuttiaukot) ovat maanjäristyksestä katsottuna alle 90 astetta. Teoriassa tavoite saavutetaan viidellä asemalla, jos ne toimivat keskeytyksittä. Asemaverkon suunnittelussa on kuitenkin huomioitava asemien mahdolliset häiriöt ja niiden korjausaikataulu. Mikäli asemia on vähän, yhdenkin aseman toimintakatko heikentää verkon paikannuskykyä merkittävästi. Seismisyyden valvoja voi vaatia

voimalan toiminnan keskeyttämistä, jos riskinhallinnan kannalta välttämätön asemakonfiguraatio ei ole toimintakunnossa.

Asemaverkon kokoonpanon lisäksi seismisten tapausten paikannustarkkuus riippuu monesta muustakin tekijästä, kuten esimerkiksi asemien kohinasosta, käytetystä paikannusmenetelmästä ja maankuoren nopeusmallista. Näiden tekijöiden selvittäminen on osa asemaverkkosuunnitelmaa. Kairanreikiin sijoitetuilla seismometreillä on parempi signaali-kohinasuhde kuin maanpinnalla olevilla vastaanottimilla (Plenkens ym. 2015). Kairanreikäantureita kannattaa harkita varsinkin alueilla, joissa on paksu irtomaatai sedimenttikerros tai kaupunkialueilla, joissa taustakohina on korkea.

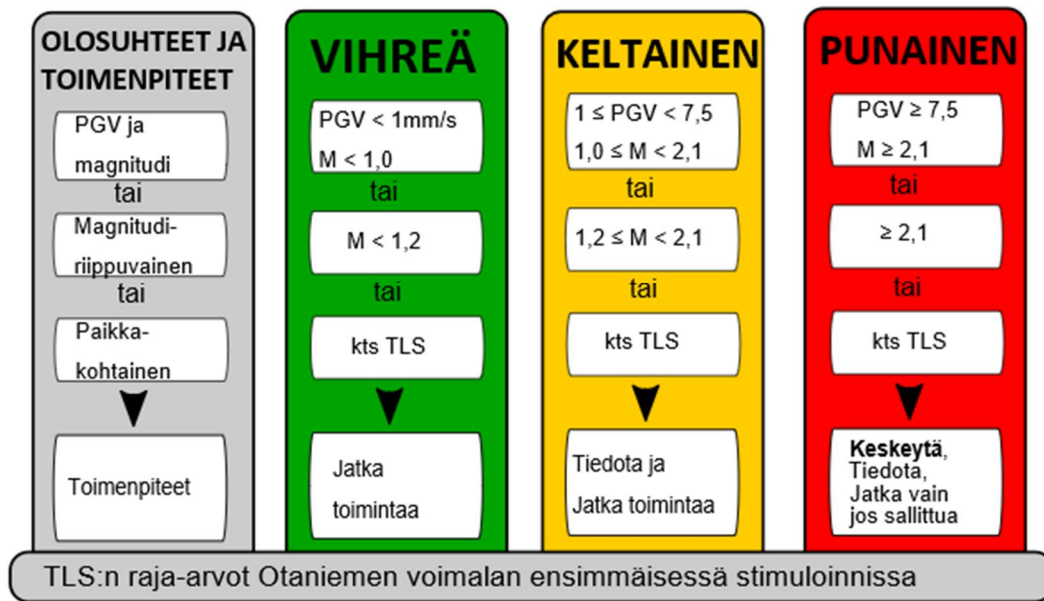
Seismisen valvontaverkon tulee perustua vakiintuneeseen tekniikkaan sekä yleisesti käytössä oleviin standardeihin ja viitejärjestelmiin, ja ne kuvataan asemaverkkosuunnitelmassa. Vaadittavia tietoja ovat esimerkiksi rekisteröintilaitteet metatietoineen, käytetty ajanmääritys- ja koordinaattijärjestelmä sekä digitaalisen aineiston tallennusformaatti.

Indusoidun seismisyyden riskien hallinta edellyttää reaaliaikaista valvontaa. Tätä varten on kehitetty useita kaupallisia sekä ei-kaupallisia automaattisia analyysijärjestelmiä, jotka on optimoitu lähietäisyydellä rekisteröityjen seismisten signaalien käsittelyyn. Automaattisen analyysijärjestelmän tuloksissa on kuitenkin paljon virheellisiä havaintoja, joten ne pitää tarkistaa ja tarvittaessa analysoida uudelleen käsin.

#### **4.4.1 Liikennevalojärjestelmä**

Toiminnanharjoittajan tulee toteuttaa analyysijärjestelmään liitettävä, toiminta-alueelle kalibroitu liikennevalojärjestelmä (Traffic Light System eli TLS). Se varoittaa seismisen aktiivisuuden lähestyessä seismisessä hasardiarviossa määritellyjä raja-arvoja. TLS asettaa erilaiset paikkasidonnaiset kynnsarvot maanjäristyksen magnitudille ja maanliikkeen maksiminopeudelle tai -kiihtyvyydelle, ja näyttää toiminnalle liikennevalojen tapaan värivaloja. Niin kauan kuin valo on vihreällä, toimintaa jatketaan. Keltainen valo tarkoittaa varoimenpiteitä vaativan kynnsarvon ylittymistä, jolloin otetaan käyttöön seismisen riskin lieventämistä ja tiedotusta koskeva ohjeistus. Jos tapauksesta ei aiheutunut vahinkoa eikä seismisyystaso jatka nousua, toimintaa voi jatkaa. Punainen valo tarkoittaa hälyttävän kynnsarvon ylittymistä ja toiminnan välitöntä, turvallista pysäyttämistä. Tapauksen ja tarpeellisten toimenpiteiden raportointi on välttämätöntä eikä toimintaa saa jatkaa ennen valvovan tahon lupaa. Kuvan 13 esimerkissä on esitetty Otaniemen voimalan ensimmäisen stimuloinnin aikainen liikennevalojärjestelmä.

Suomessa liikennevalojärjestelmässä käytettävän magnitudin on oltava vertailukelpoinen Seismologian instituutin käyttämän kansallisen asemaverkon magnitudin kanssa.



Kuva 13: Esimerkki liikennevalojärjestelmästä, St1 2018a

Liikennevalojärjestelmän kynnyksarvoina voidaan magnitudin ja maanliikkeen lisäksi käyttää esimerkiksi pienten seismisten tapausten määrän voimakasta kasvua. Uusi, niin kutsuttu mukautuva liikennevalojärjestelmä (Adaptive Traffic Light System, ATLS) on TLS:stä kehitetty toiminnan hallintajärjestelmä, joka - säännusteiden tavoin – pyrkii ennakoimaan indusoidua seismisyyttä. ATLS käyttää syöttötietoinaan mm. vakioina pysyviä ympäristöparametreja sekä reaaliaikaisia vedensyöttöparametreja ja seismisyytietoja (Mignan ym. 2018).

Liikennevalojärjestelmän kynnyksarvot määritetään alueen seismisen vasteen perusteella ja tarvittaessa niitä päivitetään toiminnan aikana saatujen kokemusten pohjalta. Kynnyksarvoja määriteltäessä olisi hyvä ottaa huomioon, että tiheään tapahtuvat ihmisaistein havaittavat maanjäristykset luovat hankkeelle ns. häiritsevyytekijän (engl. nuisance factor), joka vähentää hankkeen hyväksyttävyyttä ja voi hankaloittaa myös tulevien hankkeiden aloittamista. Jos kynnyksarvot asetetaan mataliksi, lievennystoimenpiteet aloitetaan aikaisemmin ja mahdollisesti vaurioita aiheuttavien tapausten todennäköisyys pienenee. Toisaalta liian varovaiset kynnyksarvot heikentävät hankkeen taloudellista kannattavuutta.

Seismisen riskin lievennystoimenpiteitä ovat mm. injektoidun nesteiden määrän ja paineen hallinta tai nesteiden syötön hallittu alasajo. Koska paikallinen kallioperän jännitystila muuttuu syötetyn nesteiden määrän vuoksi, välitön veden syötön lopettaminen ei pysäytä seismisyyttä, vaan saattaa jopa indusoida sitä enemmän. On esimerkkejä EGS-hankkeista, joissa suurimmat indusoidut maanjäristykset tapahtui-

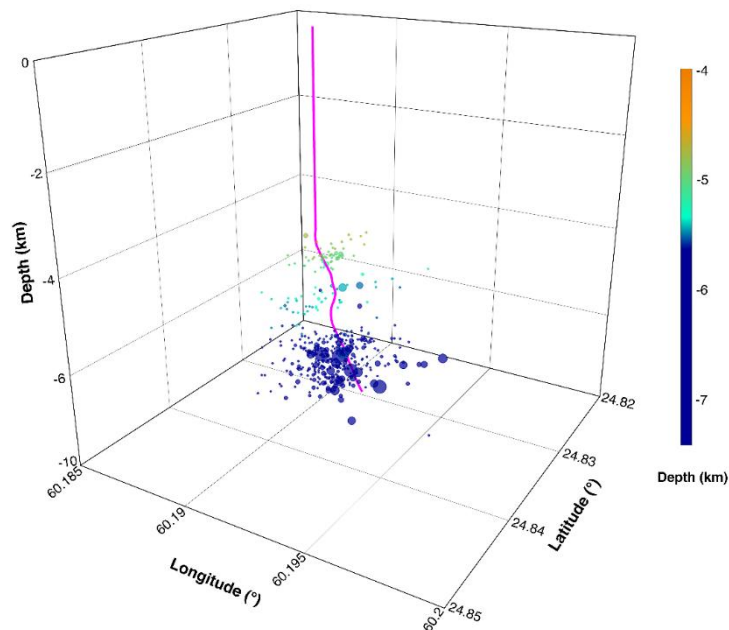
---

vat vedensyötön päätyttyä (Taulukko 1). Paineistusta on turvallisempaa laskea vähitellen, kunnes hyväksyttävä seismisyystaso saavutetaan. Näin ollen toimenpide ei anna välitöntä tulosta, vaan eliminoi seismisyyttä pitkällä aikavälillä.

#### **4.4.2 Otaniemen voimalahankkeen stimulointivaiheesta saatuja kokemuksia**

Otaniemen hankkeen ensimmäisen poranreiän stimulointi toteutettiin 4.6.-23.7.2018. Sitä edeltäneen porausvaiheen aikana St1 oli perustanut kaksi asemaverkkoa valvomaan toiminnan aiheuttamaa seismisyyttä ja maanliikkeitä. Ensimmäiseen ns. pintaverkkoon kuului 13 maanpinnalle sijoitettua kiihtyvyysanturia, joista kuusi oli asennettu herkkiä mittalaitteita sisältäviin kohteisiin Meilahden sairaalaan, Helsingin yliopiston Kiihdytinlaboratorioon, Teknologian tutkimuskeskukseen, Tieteen tietotekniikan keskukseen, Mittatekniikan keskukseen ja St1:n toimistoon porauspaikalla. Toinen ns. satelliittiverkko oli tarkoitettu tapausten reaaliaikaiseen paikannukseen ja koonmääritykseen ja käsitti 12 poranreihiin noin 300-1200 metrin syvyydelle asennettua seismometriä. Seismologian instituutti valvoi toimintaa pysyvien asemien, viiden väliaikaisen aseman ja St1:n satelliittiasemien muodostamalla verkollaan.

Reikien poraus ei aiheuttanut merkittävää, taustaseismisyydestä poikkeavaa aktiivisuutta. Sen sijaan stimulointivaiheen aikana Seismologian instituutin automaattinen paikannusjärjestelmä havaitsi yli 5000 seismistä tapausta viiden kilometrin säteellä porausalueesta. Kaikki tapaukset, joiden magnitudi oli M 0 tai suurempi tarkistettiin ja analysoitiin käsin uudelleen. Niistä indusoituja maanjäristyksiä oli lähes 500. Magnitudia M 1,0 suurempia eli varotoimenpiteitä vaativan kynnyksarvon ylittäviä tapauksia oli yhteensä 48. St1 tiedotti näistä tapauksista sekä käytetyistä seismisen riskin lievennystoimenpiteistä sopimuksen mukaisesti. Särötyksen loputtua alueen seismisyys hiipui: vuoden 2018 loppuun mennessä stimuloinnin jälkeen on havaittu vain yksi magnitudia M 1,0 suurempi järistys.



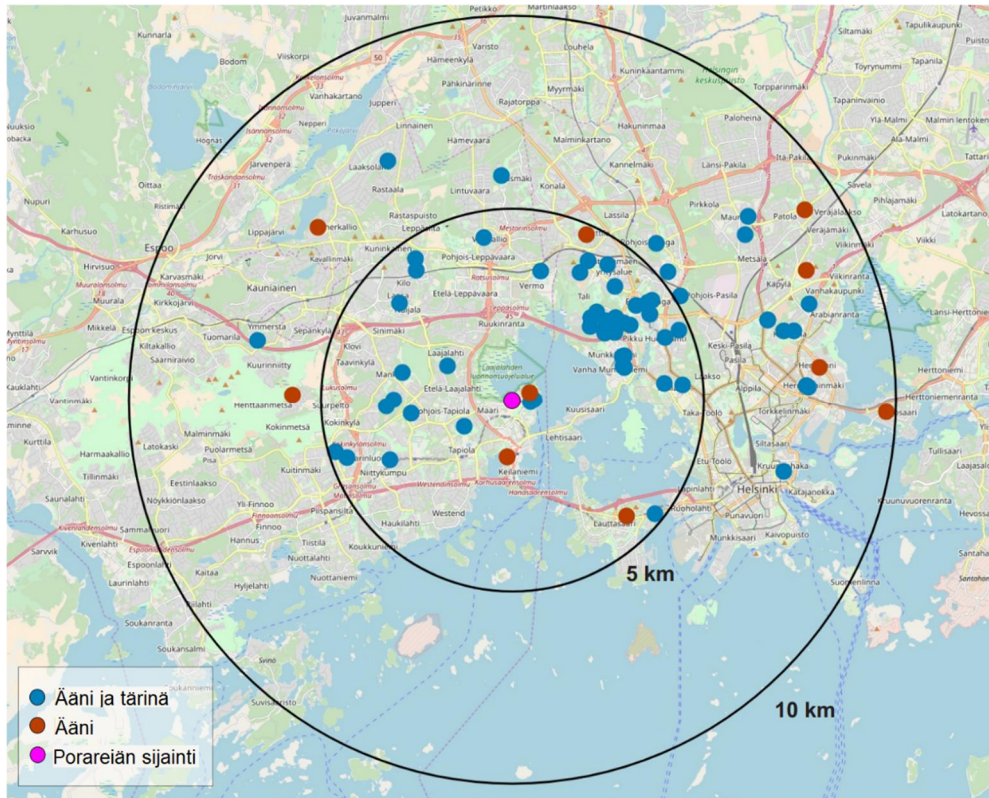
Kuva 14: 3D-havainnekuva Otaniemen poranreiän ympärillä havaituista järjestyksistä. Reikäkoordinaatit: St1 oy.

Käsin analysoiduista tuloksista nähdään, että järjityslähteet sijaitsevat 4-6 kilometrin syvyydellä ja jakautuvat noin 200 metrin etäisyydelle poranreistä (Kuva 14). Suurin maanliikkeen nopeus, 4,4 mm/s, mitattiin 16.7.2018 tapahtuneen M 1,8 järjityksen aikana, ja se jäi selkeästi alle yleisten ja paikkakohtaisten kynnyksarvojen (kuva 13). Kaikki muut indusoitujen järjitysten aiheuttamat maanliikkeen nopeudet olivat pienempiä kuin 3 mm/s.

Vaikka maanliikkeen arvot jäivät selvästi sallittujen kynnyksarvojen alapuolelle, Seismologian instituutille raportoitiin tärinä- ja äänihavaintoja 23 eri järjityksen yhteydessä (Liite 1: Taulukko 3 ja Kuvat 17-18). Yleensäkin Suomessa taajama-alueella sattuneet noin magnitudia M 1,5 suuremmat järjitykset tunnetaan laajalti. Tämä johtuu siitä, että Suomen kiteisessä kallioperässä seismisten aaltojen energia vaimenee hitaasti, joten niiden aiheuttama ääni- ja tärinä voidaan havaita hyvinkin kaukana tapahtumapaikasta.

Kuvassa 15 on kartta 8.7.2018 tapahtuneen M 1,7 maanjärjityksen tuntuushavainnoista. Tapaus havaittiin jopa 10 kilometrin etäisyydellä poranreistä. Havainnot ovat jakautuneet epätasaisesti: karkeasti jaoteltuna havaintopisteitä on enemmän laitospaikan itäpuolella kuin samalla etäisyydellä länsipuolella. Tämä saattaa johtua siitä, että maanjärjityslähde säteilee energiaa epätasaisesti eri suuntiin. Havaintojen jakaumaan vaikuttavat myös asukastiheys ja rakennuskanta sekä maaperä. Paksu irtomaata tai savikerros perustusten alla vahvistaa seismisiä aaltoja (osio 4.2, kuva 8) ja voi paikallisesti kasvattaa ääni- ja tärinähaittoja. Havaintoja on tullut runsaasti myös joistakin kallioperustaisista rakennuksista.

Yhteenvedona, Otaniemen ensimmäisen stimulointivaiheen aikana indusoitujen järjestysten aiheuttama maanliike jäi selvästi alle sallittujen rajojen. Siitä huolimatta suurimpien ( $M > 1,5$ ) indusoitujen järjestysten aiheuttamat ääni- ja värinähaitat olivat merkittäviä, ja ne on otettava huomioon myös tulevissa riskianalyseissä.



Kuva 15: Kartta 8.7.2018 tapahtuneen maanjäristyksen ( $M 1,7$ ) ääni- ja värinähavainnoista. Ympyrät ovat 5 ja 10 kilometrin säteellä poranreistä. Siniset ympyrät ovat ääni- ja värinähavainnoita, punaiset äänihavainnoita. Pinkki ympyrä on reiän sijainti maanpinnalla

## 5. Suositukset syvien geotermisten voimaloiden lupahakemuksiin

Geotermisen voimalan lupahakemuksen tulisi olla tukena teknisessä ja laillisessa kommunikoinnissa. Tarkoituksena on tunnistaa voimalan potentiaaliset ympäristövaikutukset ja riskit sekä esittää uskottava etenemissuunnitelma, jotta yhteisön ja säätelevän tahon hyväksyntä saavutetaan. Riskiarvion tekemistä suositellaan kaikille syville geotermisille voimalahankkeille. Jokaisen hankkeen riskinhallinta mitoitetaan arvion tulosten perusteella tapauskohtaisesti.

Seismisen riskinhallinnan osalta raportin suositukset perustuvat osin Yhdysvaltain Energiaministeriön ja Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) suosituksiin (Majer ym. 2012) sekä Sveitsin Seismologisen Palvelun (SED) ”hyvään käytäntöön” seismisessä riskinhallinnassa (Wiemer ym. 2017). Suosituksia on sovellettu Suomen oloihin käyttämällä Suomen rakennusinsinööriliitto ry:n Rakentamisen aiheuttamat tärinät -ohjetta (RIL 253-2010) sekä Seismologian instituutin kokemuksia St1:n ensimmäisen stimuloituvaiheen ajalta. Muiden ympäristöriskien osalta sovellettiin GTK:n ympäristögeologista kokemusta ja näkemystä.

Lupahakemukseen suositellaan sisällytettävien kuvaukset seuraavista:

1. Taustaselvitykset
  - Arvio seismisestä riskistä
  - Sallittujen maanliikkeiden kartoitus
  - Ympäristövaikutusten arviointi
2. Valvonta ja varautumissuunnitelma
3. Työmaasuunnitelma, selvitys poraustekniikasta
4. Viestintäsuunnitelma

### 5.1. Taustaselvitykset

Taustaselvityksen tavoitteena on selvittää, onko valittu sijainti sopiva geotermisen voimalan rakentamiselle. Lupahakemuksen taustaselvitystä varten riittää kirjallisuuskatsaus. Alueen arviointi tehdään koko voimalan arvioidulle vaikutusalueelle. Arvioinnissa tarkastellaan voimalan mahdollisesti aiheuttamaa seismistä riskiä sekä ympäristövaikutuksia.

Toiminnanharjoittajalla tulee olla kattavasti tietoa alueen seismisestä vasteesta. Osiossa 4.1 listatut indikaattorit antavat karkean kokonaiskuvan odotettavissa olevasta seismisyydestä:

- Voimalan toimintaperiaate: onko vesi kontaktissa kiven kanssa, ja kuuluuko voimalan rakennusvaiheeseen stimuloitua? Voimalan stimulointi- ja toimintaparametrit: pumpattavan nesteen määrä, virtausnopeus, paine ja lämpötila.

- Jännityskentän suunta ja suuruus suhteessa olemassa oleviin siirroksiin. Siirrostien laajuus ja kalliomekaaniset ominaisuudet.
- Aluegeologia, kivilaji sekä kivien mekaaniset ominaisuudet. Hydrogeologiset ominaisuudet, kuten kiven huokoisuus ja permeabiliteetti, huokospaine ja maanalaiset vesiesiintymät.

Hankkeen edetessä saadaan uutta tutkimustietoa, joten arvioita on hyvä päivittää. Poranreikämittauksilla voidaan selvittää mm. reikää leikkaavat rakovyöhykkeet ja rakennegeologia sekä kivien fysikaaliset ominaisuudet.

### **5.1.1 Alueen seismisen riskin kartoitus**

Valvonnan suositukset riippuvat siitä, tuleeko voimalassa lämmönkeruuseen käytettävä neste olemaan kontaktissa kallioperän kanssa. Täysin koteloidun reiän aiheuttama seisminen riski on pieni. Jos neste on kontaktissa kiven kanssa, seisminen riski on suurempi, joten toimintaa on valvottava tarkemmin. Jos kiveä stimuloidaan, seisminen riski on suurimmillaan, ja valvonta tulee mitoittaa sen mukaisesti. Tämän raportin ohjeistus vastaa pääasiassa tilannetta, jossa stimuloidaan tai lämmönkeruuseen käytettävä neste on kontaktissa kallioperän kanssa.

Seismisen hasardin ja riskiarvion määrittäminen on kuvattu osiossa 4.3. Riskianalyysityökaluista esimerkkinä on Sveitsissä kehitetty GRID-riskinhallintamalli (Trutnevyte ja Wiemer 2017), jota voidaan soveltaa laitospaikan valinnassa. Malli sisältää seismisen hasardin, altistuvat rakennukset ja väestön, alueen haavoittuvuuden (esimerkiksi aluegeologia, rakennusten kunto) sekä hankkeen sosiaalisen vastaanoton. Tuulosten perusteella geotermiset hankkeet voidaan jakaa eri riskiluokkiin, joille on erilaiset suositukset valvontaa varten. Liitteessä 2 on lisätietoa ja esimerkki GRID:sta. Malli ei ole suoraan verrattavissa Suomen olosuhteisiin, mutta siitä saa hyvän kuvan mihin asioihin riskinhallinnassa tulisi kiinnittää huomiota ja siitä voidaan räätälöidä Suomen olosuhteisiin sopiva malli.

### **5.1.2 Sallittujen maanliikkeiden kartoitus**

Alustavan paikkavalinnan jälkeen selvitetään vaikutusalueella sallittavat maanliikkeet rakennusten ja ympäristön kannalta sekä mahdollisesti herkkien kohteiden tapauskohtaiset suunnittelukriteerit. Herkkää infrastruktuuria on esimerkiksi lähistöllä olevissa sairaaloissa ja tutkimuslaboratorioissa. Lisäksi on huomioitava historiallisesti arvokkaat ja suojellut kohteet. Lupahakemuksessa rajataan alue, jolla vaikutukset tuntuvat ja määritellään maanliikkeen kynnyksarvot, joiden puitteissa toimitaan. Kartoitus tehdään osion 4.2 pohjalta.

### **5.1.3 Ympäristövaikutusten arviointi**

Geotermisen voimalan ympäristöön kohdistamat riskitekijät voidaan erotella rakennus- ja tuotantovaiheeseen. Rakennusvaiheeseen kuuluu poraus ja mahdollinen stimulointi. Porausvaihetta voidaan verrata

maa- ja kallioperään muutoksia aiheuttavaan rakennustoimintaan ja tuotantovaihetta stabiiliin, uusiutuvan energian tuotantolaitostoimintaan. Lähtökohtaisesti rakennusvaihe on ympäristövaikutuksiltaan merkittävämpi kuin varsinainen tuotantovaihe, vaikka sen kesto on rajallinen.

Raportin kirjoitushetkellä geotermisen energialaitoksen lupamenettely on tapahtunut MRL:n 126 §:n mukaisen toimenpideluvan tai 125 §:n mukaisen rakennusluvan kautta. Tapauskohtaisesti tulisi arvioida, aiheuttaako hankkeen sijainti tai muut seikat ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan tarpeen ja/tai YVA-lain mukaisen ympäristövaikutusten arviointimenettelyn. YSL:n 6 §:n mukaan toiminnanharjoittajalla on aina selvilläolovelvollisuus toimintansa ympäristövaikutuksista, ympäristöriskeistä ja niiden hallinnasta sekä haitallisten vaikutusten vähentämismahdollisuuksista.

Geotermisen energian tuotantolaitokset eivät sisälly ympäristönvaikutusten arviointimenettelystä annetun lain (252/2017, YVA-laki) liitteessä 1 olevan hankeluettelon piiriin eivätkä ne näin ollen automaattisesti edellytä ympäristövaikutusten arviointimenettelyä. Geotermisen energian tuotantolaitokset voivat kuitenkin tulla menettelyn piiriin YVA-lain 3 §:n 2 momentin mukaisesti, jos ne todennäköisesti voivat aiheuttaa laadultaan ja laajuudeltaan, myös eri hankkeiden yhteisvaikutukset huomioon ottaen, hankeluettelossa lueteltuihin hankkeisiin rinnastettavia merkittäviä ympäristövaikutuksia. Toisaalta esimerkiksi kaivannaisteollisuuden geotermiset syväkairaukset on mainittu ympäristövaikutusten arviointimenettelyä koskevan direktiivin (2011/92/EU) liitteessä II, jonka sisältämien hankkeiden ympäristövaikutukset tulee direktiivin mukaan tapauskohtaisesti arvioida, mikäli niillä on laatunsa, kokonsa ja sijaintinsa vuoksi todennäköisesti merkittäviä ympäristövaikutuksia.

### **Maankäyttö**

Raportin kirjoitushetkellä Suomessa ei ollut varsinaista lainsäädäntöä kolmiulotteisesta kiinteistöstä tai siitä, kenellä on omistus- ja käyttöoikeus useiden kilometrien syvyydessä maan pinnan alla (pois lukien kaivoslain (621/2011) mukainen kaivoslupa kaivosmineraalien hyödyntämiseen). Maalämmön hyödyntämiseen tarkoitettua lämpökaivon poraamisesta on säädetty MRL:n 126a §:n 12 kohdassa toimenpideluvanvaraisena toimenpiteenä.

Geotermisen energian tuotantolaitoksen rakentaminen ei saisi olla ristiriidassa alueelle hyväksytyyn kaavan kanssa (maakunta-, yleis- tai asemakaava). Mahdollisten riskitekijöiden tunnistamiseksi alueen ja sen lähiympäristön maankäyttötilanne tulisi selvittää riittävällä tarkkuudella. Laitoksen mahdollinen vaikutusalue rajataan riittävän laajaksi ja maankäyttötarkastelu tehdään koko tälle alueelle. Tarkastelussa kiinnitetään huomiota myös lähiympäristön maanalaisiin rakenteisiin ja toimintoihin sekä mahdolliseen maanalaiseen kaavaan. Geotermisen energian tuotantolaitokselle voitaisiin kaavassa myös varata alue, kuten esimerkiksi tuulivoimaloiden osalta nykyään usein tehdään. Tällöin tuotantolaitoksen rakentaminen kytkeytyisi osaksi kaavoitusprosessia ja sen lupakäytäntöjä.

---

## **Luontokohteet**

Geotermisen voimala ja sen rakentaminen eivät saa vaarantaa alueen tai sen lähiympäristön maisemaa, luonnonarvoja tai kulttuuriperintöä. Jos alueella tai sen lähiympäristössä on luonnonsuojelun kannalta merkittäviä alueita tai alueita, jotka kaavassa on varattu virkistys- tai suojelualueeksi, hankkeen toteutuksesta pyydetään ELY-keskuksen lausunto (luonnonsuojelulaki (1096/1996) 6 §). Mikäli alueella on luonnonsuojelulain tarkoittamia luontokohteita, tulee toiminnanharjoittajan selvittää mahdolliset vaikutukset sekä porauksen että varsinaisen lämpölaitoksen tuotantovaiheen aikana.

## **Geologia**

Geotermisen voimalan ja sen lähiympäristön maa- ja kallioperäolosuhteet kuvataan riittäväällä tarkkuudella. Selvityksessä käy ilmi alueen kallioperä sekä kallioperän päällä olevan maapeitteen paksuus, maajajite ja laatu. Maaperäselvityksissä tulisi kiinnittää erityistä huomiota maaperän geoteknisiin ominaisuuksiin (tärinästä kohdassa Rakennusvaiheen melu ja tärinä). Mikäli maaperää voidaan epäillä pilaantuneeksi esimerkiksi aiempien mahdollisten likaavien toimintojen vuoksi, tulee maaperän pilaantuneisuus ja puhdistustarve arvioida ympäristönsuojelulain 14 luvun mukaisesti ennen poraushankkeen aloittamista. Kallioperästä arvioidaan vallitseva kivilaji (myös ns. syvyysuunnassa) sekä kallioperän rikkonaisuus ja mahdolliset ruhjevyöhykkeet. Kallioperän osalta on erityisen tärkeää tunnistaa mahdollisten radioaktiivisten mineraalien esiintyminen (porausjätteen käsittelystä kohdassa Porausjäte).

## **Vesi**

Geotermisen voimala ja sen rakentaminen eivät saa vaarantaa alueen vesistöjen tilaa. Alueen pinnanmuotojen perusteella voidaan arvioida alueella syntyvien hulevesien kulkusuunnat ja mahdolliset yhteydet ympäristön vesistöihin. Mikäli toiminta saattaa aiheuttaa vesistön pilaantumista, sille on haettava ympäristölupa (YSL 27 §).

## **Pohjavesi**

Geotermisen voimala ja sen rakentaminen eivät saa vaarantaa alueen pohjaveden määrää ja laatua tai pohjavedestä riippuvaisia luonnon tai rakennetun ympäristön kohteita (pohjaveden pilaamiskielto, YSL 17 §). Pohjavedellä tarkoitetaan tässä sekä maaperässä olevaa pohjavettä että kalliopohjavettä. Mikäli hanke sijoittuu pohjavesialueelle, tulee mahdollisiin vaikutuksiin kiinnittää erityistä huomiota. Pääsääntöisesti pohjavesialueella sijaitsevaan kohteeseen tulee hakea vesilain (587/2011) 3 luvun 2 §:n 1 momentin mukainen lupa, koska hanke saattaa muuttaa pohjaveden laatua tai määrää. Lupahakemusta varten tehdään selvitykset alueen hydrogeologiasta, pohjaveden tilasta, pohjaveden pinnankorkeuksista ja virtaussuunnista sekä pohjaveden viipymästä kohteelta kaivoihin tai vedenottamolle. Lisäksi arvioidaan voimalan rakentamisen ja tuotannon aikaisia vaikutuksia pohjaveden laatuun ja määrään sekä tehdään suunnitelma pohjaveden suojaustoimenpiteistä. Porauksen ja tuotannon aikana huolehditaan, että syvällä olevaa suolaista kalliopohjavettä ei joudu maaperän akviferiin.

## **Porausjäte**

Jätelain (646/2011) 5 §:n mukaan aine tai esine ei ole jäte, vaan sivutuote, jos se syntyy sellaisessa tuotantoprosessissa, jonka ensisijaisena tarkoituksena ei ole tämän aineen tai esineen valmistaminen. Jotta syntyvä aine voidaan katsoa sivutuotteeksi, sen jatkokäytölle pitää olla varmuus. Jäteasetuksen (179/2012) 16 §:n mukaan rakennusjätteen haltijan on huolehdittava syntyvän jätteen uudelleenkäytöstä, kierrättämisestä tai hyödyntämisestä. Tehostetun geotermisen lämpövoimalan porauksessa syntyvä porausjäätös ei lähtökohtaisesti täytä sivutuotteelle annettuja perusteita, joten se on jätettä. Porausjäätös koostuu maa- ja kallioperästä kairauksen aikana syntyvästä maa-aineksesta ja kivijauheesta, kairausreikään syötetystä vedestä ja mahdollisista veteen lisätyistä kemikaaleista, joilla säädetään nesteen viskoosia porauksen aikana. Käytettyjä kemikaaleja käsitellään tarkemmin kappaleessa Kemikaalien käsittely.

Geotermisen laitoksen porausvaiheesta ja toiminnasta syntyvä porausjäte on vesipitoista liejua eli nk. porasoijaa, joka on yhdistelmä kairanreiästä nousevaa kivipölyä (kairauksen alussa myös maa-ainesta, kun kairataan irtaimen maakerroksen läpi) sekä porauksessa käytettävää vettä ja mahdollisia lisättyjä kemikaaleja. Porasoijan kemiallinen koostumus riippuu siis kairatusta kivilajista ja käytetyistä kemikaaleista. Jätelain 8 §:n mukaan toiminnanharjoittajan, jonka tuotannossa jätettä syntyy, on mahdollisuuksien mukaan noudatettava etusijajärjestystä eli vähennettävä syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta, valmistettava jäte uudelleenkäyttöä varten, kierrätettävä se, hyödynnettävä muulla tavoin tai viime kädessä loppukäsiteltävä jäte. Jätelain 12 §:n mukaan tuotannon harjoittajan on oltava selvillä tuotannossa syntyvästä jätteestä, sen ympäristö- ja terveysvaikutuksista ja mahdollisuuksista vähentää jätteen määrää ja haitallisuutta. Jäteluonteen arvion tekee ensisijaisesti se, jonka toiminnasta aines syntyy.

Jätelain mukaisesti toiminnanharjoittajan on huolehdittava porausjätteen asianmukaisesta käsittelystä. Poraamisesta syntyvä käsittelemätön porausjäte ei saa päätyä vesistöön tai muualle ympäristöön porauksen, varastoinnin tai kuljetuksen aikana. Syntyvä porausjäte on käsiteltävä asianmukaisesti joko paikan päällä tai se on toimitettava muualle käsiteltäväksi. Porausjätteen loppukäsittely tulee olla selvillä ennen porauksen aloittamista.

Porauksen aikana vesi voidaan suodattaa, puhdistaa ja käyttää uudelleen poraushankkeessa paikan päällä. Porauksessa käytettävää vettä ei saa kuitenkaan päästää sellaisenaan ympäristöön tai viemäriverkostoon, vaan tarvittavasta vedenkäsittelystä pitää tehdä erillinen selvitys ja suunnitelma, joka esitetään lupahakemuksen yhteydessä. Veden suodattamisesta ja puhdistamisesta syntyvä jäte tulee käsitellä vastaavalla tavalla kuin varsinainen porausjäte. Arvio syntyvän porausjätteen määrästä perustuu porattavien kairanreikien lukumäärään sekä niiden halkaisijaan ja syvyyteen.

Tuotantovaiheessa kairanreikiä voidaan joutua huuhtelemaan aika ajoin. Ylläpitoon liittyvästä kairanreiän huuhtelusta syntyvä kivijauhe tulee käsitellä vastaavalla tavalla kuin porauksen aikana syntynyt porausjäte.

### **Radioaktiivinen aine ja säteily**

Suomen yleisin kivilaji, graniitti sisältää pieninä pitoisuuksina radioaktiivisia mineraaleja. Ko. mineraaleista ei aiheudu vaaraa tai haittaa porauksen aikana. Tuotantovaiheessa on raportoitu radioaktiivisten mineraalien konsentroitumista ja sakkautumista putkistoihin graniittialueilla (Cuenot ym. 2015). Noin 70 °C nesteen kierrätyksen kallioperässä on todettu saostavan sulfaatteja baryytistä ( $\text{BaSO}_4$ ) selestiiniin ( $\text{SrSO}_4$ ) sekä sulfideja lyijyhohde (PbS) mineraaleina. Em. mineraaleista sulfidit sitovat itseensä lähinnä radonia, sulfaattit radiumia ja lyijyhohde lyijyä. Säteilyaltistuksen kannalta on merkittävää, että sulfaatteihin kiteytyy radiumin isotooppeja Ra-226 ja Ra-228, joista erityisesti Ra-226 on pitkäikäinen. Sulfaattien, sulfidien ja muiden saostumien lisäksi geotermisen energian tuotannossa voi esiintyä sähkökemiallisten reaktioiden kautta esimerkiksi metallisen lyijyn muodostumista putkiin ja suodattimille riippuen veden ja kallioperän koostumuksesta. Lyijypitoisiin sakkoihin ja reaktiotuotteisiin voi rikastua luonnon radioaktiivisia aineita Pb-210 ja Po-210 (Päivi Kurttio, kirjallinen tiedonanto 18.1.2019). Radioaktiivisten mineraalien esiintymismahdollisuus tulee huomioida ja tehdä riittävät selvitykset porausjäätännöksen mahdollisesta radioaktiivisuudesta ja aktiivisuuspitoisuuksista.

Geotermisen energian tuotannossa avoimella järjestelmällä esiintyy erilaisia kemiallisia olosuhteita, jotka voivat veden ja kallioperän koostumuksesta riippuen johtaa saostumien tai sähkökemiallisten reaktiotuotteiden kertymiseen esimerkiksi putkiin, venttiileihin, suodattimiin tai lämmönvaihtimiin. Näissä materiaaleissa voi esiintyä kohonneita pitoisuuksia luonnon radioaktiivisia aineita. Näin ollen geotermisen energian tuotannosta aiheutuva säteilyaltistus tulisi selvittää. Selvityksessä otetaan huomioon myös toiminnassa syntyvät jätteet. Säteilyaltistuksen selvitysvastuu koskee lähtökohtaisesti vain geotermisen energian tuotantoa, joka tapahtuu avoimella järjestelmällä. Luonnonsäteilyaltistuksen viitearvot työperäiseen tai rakennustuotteista aiheutuvaan väestöön altistukseen (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä (1044/2018) 23 § ja 26 §) ovat kuitenkin voimassa riippumatta käytetystä järjestelmästä. Porausvaihe ja siinä syntyvä jäte tulee ottaa myös huomioon (Päivi Kurttio, kirjallinen tiedonanto 18.1.2019).

Säteilylain (859/2018) 22 §:n mukaan toiminnanharjoittaja vastaa toimintansa säteilyturvallisudesta eikä tätä vastuuta voi siirtää. Lähtökohtaisesti radioaktiiviset jätteet kuuluvat säteilylain piiriin, koska jätelaki (646/2011) rajaa radioaktiiviset jätteet pois soveltamisalastaan. Radioaktiivisella jätteellä tarkoitetaan säteilylain mukaan radioaktiivista ainetta, joka on tehtävä radioaktiivisuutensa puolesta vaarattomaksi. Hallituksen esityksessä (HE 28/2018) tuodaan esiin, että on kuitenkin tarkoituksenmukaista rajata säteilylain soveltamisalaa vain sellaiset jätteet, joissa radioaktiivisten aineiden määrä on niin

suuri, että säteilyturvallisuus edellyttää muista jätteistä poikkeavia jätehuoltoratkaisuja. Näin ollen jätteet, joissa radioaktiivisten aineiden määrä on säteilylain 85 §:n 2 momentin vapauttamisrajaa pienempi, voidaan uudelleenkäyttää, kierrättää, hyödyntää tai loppukäsitellä jätelain perusteella. Luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta ei synny säteilylain mukaista radioaktiivista jätettä (säteilylaki 78 § 3 ja 4 momentti ja Valtioneuvoston asetus 1034/2018 31 §). Säteilylain 78 §:n 3 momentin mukaisesta jätteestä tulee kuitenkin huolehtia asianmukaisesti säteilysuojelunäkökohdat huomioiden. Hajoamistuotteidensa kanssa pitkäaikaisesti tasapainottuneille, kiinteissä materiaaleissa oleville luonnon radioaktiivisille aineille, on asetettu vapauttamisrajat STUK:n määräyksessä vapaarajoista ja vapauttamisrajoista (SY/1/2018). Muissa tapauksissa vapauttamisrajat tulevat STUK määräykseen liittyen luonnonsäteilylle altistavaan toimintaan. Vapaarajoja sovelletaan luonnon radioaktiivisiin aineisiin ainoastaan, jos niitä käytetään säteilylähteinä (Päivi Kurttio, kirjallinen tiedonanto 18.1.2019).

Säteilylain 78 §:n 3 momentissa väestön ja työntekijöiden säteilysuojelu ulotetaan koskemaan myös jätteeseen, joka ei ole säteilylaissa tarkoitettua radioaktiivista jätettä, mutta jonka jätehuollossa säteilyturvallisuus on tarpeen huomioida. Toiminnanharjoittajan on huolehdittava, että radioaktiivisista aineista ei aiheudu haittaa terveydelle tai ympäristölle. Toiminnanharjoittaja on myös vastuussa työntekijöidensä säteilysuojelusta. (STUK 2017.)

### **Pöly**

Laki eräistä naapuruussuhteista (26/1920) edellyttää, että kiinteistöä ei saa käyttää siten, että naapurille tai lähistöllä asuvalle aiheutuu kohtuutonta räsitusä ympäristölle haitallisista aineista, noesta, liasta, pölystä, hajusta, kosteudesta, melusta, tärinästä, säteilystä, valosta, lämmöstä tai muista vastaavista vaikutuksista. Näin ollen poraus järjestetään niin, että siitä ei pääse leviämään pölyä ympäristöön. Lisäksi huolehditaan, että kohteen liikenne ei lisää alueen pölykuormaa.

### **Rakennusvaiheen melu ja tärinä**

Geotermisen voimalan rakentaminen, stimulointi ja tuotanto aiheuttavat lähiympäristöön melua ja tärinää. Ennen porausosan alkua on selvitettävä sen aiheuttama työaikainen melu ja järjestettävä porausolosuhteet niin, että Valtioneuvoston päätöksessä (993/1992) esitetyt melutason ohjearvot eivät ylitä. Tarvittaessa poraustyöstä on tehtävä ympäristönsuojelulain 118 §:n mukainen meluilmoitus vastaavalle lupaviranomaiselle. Porauksen aikainen tärinä saattaa aiheuttaa merkittävää haittaa lähiympäristön asukkaille, kiinteistöille tai alueen muulle toiminnalle. Tärinäkartoitusta ja tärinäalueiden rajausta käytetään yleisesti uusien väylien suunnittelun tukena (Talja ja Törnqvist 2014) ja niitä voi soveltuvien osin käyttää myös geotermisen voimalan rakennushankkeen suunnittelussa. Tärkeää on tunnistaa, voiko porauksen ja tuotannon aikainen tärinä aiheuttaa vaurioita rakennuksille tai voiko tärinä resonoida vaikutusalueella sijaitsevista rakenteista niin, että se vaikuttaa asumismukavuuteen. Talja ja Törnqvist (2014) mukaan tärinän leviäminen on merkittävästi pehmeissä ja vesipitoisissa maalajeissa eli lähinnä

savissa, silteissä, liejuissa ja turpeissa. Tärinällä voi olla myös vaikutusta maaperän rakenteelliseen lujuuteen ja luiskavakavuuteen. Pahimmassa tapauksessa tärinä voi aiheuttaa maaluiskien sortumia. Asu-  
mismukavuuden arviointiin on annettu ohjeistusta ja suosituksia mittausten tekemiselle sekä ohjeavot  
värähtelyn enimmäisarvoille (Talja 2011). Indusoidun seismisyyden aiheuttama tärinä käsitellään erik-  
seen osiossa 4

## **Liikenne**

Hankkeen vaatimat liikenteen määrät, kuljetusreitit, ajoitukset sekä paikoitus-, lastaus-, purku-, huolto-  
ja pesupaikat tulisi selvittää osana työmaasuunnitelmaa (osio 5.3). Etenkin porausjärjestelyjen aikana  
voidaan tarvita erityisiä liikennejärjestelyjä, kun kalustoa tuodaan paikalle. Lisäksi porausjätettä saate-  
taan siirtää paikalta muualle käsiteltäväksi ja hyödynnettäväksi. Porausjäte voi olla märkää, joten kulje-  
tuskaluston on oltava tähän tarkoitukseen soveltuva. Liikennejärjestelyt suunnitellaan ennen hankkeen  
aloittamista.

## **Kemikaalien käsittely**

Kaivon tuottavuutta voidaan parantaa kemiallisella käsittelyllä. Kemiallinen käsittelymalli tulee aina  
valita kohteen kallioperän geologisten ja pohjaveden ominaisuuksien perusteella. Siten kemiallista kä-  
sittelyä ei saa tehdä monistamalla käsittelytapaa kohteelta toiselle. Erityisesti tämä koskee erilaisen kal-  
lioperän alueen toimintatavan monistamista Suomen olosuhteisiin. Geokemiallisilla tutkimuksilla tulisi  
selvittää etukäteen käytettävien kemikaalien aiheuttamat kemialliset reaktiot, niiden lopputuotteet ja  
vaikutukset luonnontilaisiin olosuhteisiin.

Suomen kallioperän nuoremmissa muodostumissa, kuten Satakunnan hiekkakiven ja/tai Muhoksen sa-  
vikiven alueella kemiallista käsittelyä voidaan käyttää lisäämään kivilajin huokoisuutta ja/tai poista-  
maan kaivon käyttöä estäviä ns. sementoivia mineraaleja. Porausvaiheessa kemiallisilla seoksilla  
tehostetaan rikkoutuneen kiviaineksen (porasoija) liikkumista ja siten ”puhdistetaan” reikää. Yleisim-  
min kemiallisessa käsittelyssä käytetty kemikaali on ns. mutahappo, joka koostuu suolahapon (HCl) ja  
fluorivetyhapon (HF) laimeasta seoksesta. Happojen seossuhde riippuu kivilajin mineralogiasta ja kal-  
lioperän permeabiliteetista (Crowe ym. 1992). Myös korroosioinhibiittoreita ja raudan saostumista es-  
täviä happoja voidaan käyttää estämään nesteen siirtoputkistojen hajoamista ja tukkeutumista.

Mikäli porauksessa tai tuotantovaiheessa käytetään kemikaaleja, tulee näiden osalta huolehtia kemikaalin  
luonne huomioiden asianmukaisesta kuljetuksesta, lastauksesta, purkamisesta, käytöstä ja varastoinnista  
(Kemikaalilaki 599/2013) Kemikaalien merkintä, luokitus, käyttö ja pakkaaminen tulee toteuttaa EU:n  
REACH- ja CLP-asetusten mukaisesti (REACH-asetus (EC 1907/2006) kemikaalien rekisteröinnistä,  
arviointista, lupamenettelyistä ja rajoituksista ja CLP-asetus (EC 1272/2008) kemikaalien luokituk-  
sesta, merkinnöistä ja pakkaamisesta). Käytettävien kemikaalien laatu ja määrä ratkaisevat kemikaalien  
varastointiin ja käsittelyyn liittyvien lupien tarpeellisuuden.

Erityistä huomiota tulee kiinnittää työturvallisuuteen ja noudattaa kemikaalikorttien ohjeistusta.

### **Laitoksen energiatehokkuus ja ilmastokestävyys**

Lupahakemuksessa suositellaan kuvattavaksi hankkeen hyödyt energiantuotannon näkökulmasta. Geotermisen energian käytöstä syntyneet hiilidioksidipäästöjen säästöt voidaan esittää lupahakemuksessa kohdekohtaisesti. Olennaista on tunnistaa, mitä perinteistä energiamuotoa geotermisellä energialla korvataan ja kuinka paljon CO<sub>2</sub>-päästöjä saadaan kohdekohtaisesti. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet voi laskea esimerkiksi Motivan oppaan 12/2012 ”Yhteenvetojen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet” perusteella. CO<sub>2</sub>-päästöjen säästöjä verrattuna fossiiliseen energiantuotantoon suositellaan seurattavaksi ja päivitettäväksi koko laitoksen toiminnan aikana.

Geotermisen laitoksen kokonaishiilijalanjälkilaskelmia voidaan myös tehdä ja verrata kivihiilellä tuotettuun kaukolämpöön ja/tai bioenergiantuotantoon. Hiilijalanjälkilaskennat tulisi tehdä huomioiden laitoksen käyttö suunnitellulla aikavälillä, esimerkiksi 50 vuodeksi. Kokonaishiilijalanjälkilaskelmiin sisältyisi siten myös laitoksen ylläpito ja siihen liittyvät liikenne- ym. vaikutukset.

## **5.2 Valvonta ja varautumissuunnitelma**

Lupahakemuksessa esitetään arvio toimintaan liittyvistä ympäristöriskeistä, miten niitä valvotaan ja miten niihin varaudutaan sekä suunnitelma siitä, miten mahdollisissa onnettomuustilanteissa toimitaan. Lupahakemuksessa arvioidaan myös muiden lupien tarvetta tapauskohtaisesti. Tarvittaessa laaditaan YSL 15 §:n mukainen varautumissuunnitelma porauksen, stimuloinnin ja varsinaisen toiminnan ajalle. Lupahakemuksessa tulee olla suunnitelma voimalan seismisestä valvonnasta (ks. osio 4.4). Valvonnan suositukset koskevat lähinnä EGS-hankkeita, mutta niitä suositellaan sovellettavaksi myös syväporaus-hankkeisiin, joihin ei kuulu stimulointia. Viimeksi mainituista hankkeista ja niiden seismisestä riskistä ei toistaiseksi ole kokemusta Suomen oloissa.

Voimalan toiminta-alueen lupaviranomaisten on hyvä nimittää hankkeelle riippumaton seismisyyden valvoja. Valvojalle toimitetaan seismisen valvontaverkon reaaliaikaiset rekisteröinnit, voimalan toimintaraportit, sekä automaattisen ja manuaalisen analyysin tulokset. Esimerkiksi Espoon kaupunki valtuutti Seismologian instituutin valvomaan Otaniemen Deep Heat-hankkeen liikennevalojärjestelmän toteutusta. Vaikka Seismologian instituutti ei olisikaan valtuutettu valvoja, se tulee joka tapauksessa pitää tiedotettuna hankkeen toimintavaiheista, sillä instituutin tehtävänä on valvoa Suomen alueella tapahtuvaa seismisyyttä ja se on usein ensimmäinen taho, johon otetaan yhteyttä ääni- ja värinähavainnoista.

Vähintään yhden aseman reaaliaikainen aineisto on liitettävä mukaan Seismologian instituutin ylläpitämään kansalliseen valvontaverkkoon. Tämä vastaa kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n ohjeistusta ydinvoimala-alueiden seismisestä valvonnasta (IAEA, 2010). Se mahdollistaa myös indusoitujen järjestysten magnitudien kalibroinnin kansallisen verkon magnitudiasteikkoon.

Liikennevalojärjestelmän kynnysarvojen ylityksistä tulisi tiedottaa hankkeen projektipäällikköä, lupaviranomaista, valvonnasta ja viestinnästä vastaavia tahoja sekä Seismologian instituuttia (osio 5.4.). Tilanneraportin valmistelee toiminnanharjoittaja ja raportti toimitetaan seismisestä valvonnasta vastaavalle taholle sekä Seismologian instituutille.

Hankkeelle suositellaan myös vakuutta tai vakuutusta, joka korvaa voimalan eri toimintavaiheiden mahdollisesti aiheuttamia vahinkoja.

### **5.3 Työmaasuunnitelma, selvitys poraustekniikasta**

Työmaasuunnitelma suositellaan laadittavaksi erikseen porauksen ja stimuloinnin sekä laitoksen toiminnan ajaksi. Työmaasuunnitelmassa kuvataan työalueen käyttö ja siellä tapahtuvat toiminnot. Alueen käytön suunnittelussa pitää huomioida naapurusto (laki eräistä naapuruussuhteista (26/1920)) ja työmaaliikenne. Työmaasuunnitelma tulee osaksi lupahakemusta ja sen tulee täyttää mahdolliset kuntakohdaiset erityisvaatimukset esimerkiksi porausreiän sijainnista suhteessa naapurikiinteistön rajaan. Työmaasuunniteluun liittyy erillinen riskitarkastelu, jossa käydään läpi, tunnistetaan ja esitetään suunnitelma työturvallisuuteen liittyvistä riskitekijöistä ja niiden minimoinnista.

Työmaasuunnitelman pitäisi kattaa koko voimalan elinkaari, joten siinä kuvataan myös työalueen käyttö voimalan toiminnan aikana sekä alasajon jälkeen. Suunnitelmassa kuvataan, mitä reiälle tehdään voimalan toiminnan jälkeen, miten reikä mahdollisesti suljetaan ja minkälaisia riskejä siihen liittyy.

Geotermisessä porauksessa käytetään paljon perinteistä kiertoporaustekniikkaa sekä erilaisia vasarointitekniikoita. Geotermisissä hankkeissa porauksen hintaa nostaa kovaan, kiteiseen kiveen poraus sekä poraussyvyys ja suuntautuvat poranreiät. Porattavat reiät ovat suuria halkaisijaltaan ja niissä on paljon virtausta. Reiät putkitetaan ja sementoidaan sortumisen estämiseksi. Koska tavoitteena on tuottaa lämpöä, käytettävien poraus- ja reikäluotauskaluston sekä putkimateriaalin tulee kestää korkeita lämpötiloja ja paineita sekä poranreiässä mahdollisesti kierrätettäviä kemikaaleja. Toiminnanharjoittaja vastaa siitä, että putkitus ja sementointi ovat riittäviä ja ehjiä. (Finger ja Blankenship 2010; Hirschberg ym. 2015.)

Kiertoporausta tehokkaampia poraustekniikoita ovat ilmavasara ja vesivasara, joissa käytettävä kaasu tai neste viilentää porantereää, nostaa porausjätettä reiästä ja estää putkittamatonta reikää sortumasta. Nimityksestään huolimatta tekniikoissa ei yleensä käytetä ilmaa eikä vettä, vaan kemiallisesti paranneltuja seoksia, joilla on porattavan kiven ja poraustekniikan kannalta optimaaliset ominaisuudet, kuten tiheys ja viskositeetti (Hirschberg ym. 2015). Vasaratekniikoiden lisäksi on otettu käyttöön myös uudempiä mahdollisuuksia, kuten plasman käyttöä porauksessa. Ala on kasvussa, joten tässä esitetyt tekniikat eivät ole ainoita mahdollisia.

Työmaasuunnitelmassa kuvataan suunniteltu poraustekniikka, käytettävä porauskalusto ja sen vaatimukset, poranreian putkituksen materiaalit ja koot, käytettävät pumput ja suunnitellut pumppausmäärät, porauspaineet, porauksessa mahdollisesti käytettävät kemikaalit ja niiden käsittely sekä porauksessa syntyvän jätteen käsittely. Lisäksi suunnitelmassa tulee esittää porareian yläosan mahdollisesti tarvitsemat ”kellaritilat” sekä muut tuotantokaivon yläosan suunnitellut rakenteet.

Suunnitelmiin työaikana tehdyt päivitykset, kuten esimerkiksi ylimääräiset sementoinnit tai heikkousvyöhykkeiden kiertoporaukset tulee toimittaa työn jälkeen valvovalle viranomaiselle.

#### 5.4 Viestintäsuunnitelma

Geotermisen energiantuotannon hyödyt ja mahdolliset riskit eivät ole yleisesti hyvin tiedossa, ja julkinen hyväksyntä on merkittävä haaste toiminnalle: mitä vähemmän laaja yleisö tietää hankkeesta, sitä negatiivisempi on mielikuva (Wiemer ym. 2017). Tieto viranomaisyhteistyöstä ja yhteistyökumppaneiden taustoista lisää luottamusta, joten toiminnanharjoittajan on hyvä tiedottaa siitä, kuka hanketta valvoo ja keitä turvallisuudesta vastaavia tahoja on informoitu.

Lupahakemukseen on hyvä sisällyttää viestintäsuunnitelma, josta käy ilmi eri sidosryhmille suunnatun tiedottamisen aikataulut sekä käytettävät viestintäkanavat. Viestintävastuun määrittely on osa suunnitelmaa, ja viestinnästä tulee huolehtia koko hankkeen ajan. Suunnitelmassa arvioidaan indusoidun seismisyyden todennäköinen vaikutusalue, ja tiedotus ulotetaan koko alueelle, tarvittaessa yli kuntarajojen. Suunnitelmaan voidaan liittää aikajana, josta nähdään, miten tiedotus eri tahoille tapahtuu hankkeen edetessä. Viestintäsuunnitelmassa huomioidaan mm. seuraavat sidosryhmät/tahot:

- **Lupaviranomaisten** kanssa on sovittava viestinnän taso hankkeen edetessä, mm. tarkemmat aikataulut, hankesuunnitelmat (mm. veden pumppauksista) tai informaatio hankkeen aikana tapahtuvista poikkeustiloista.
- **Seismisyyden valvojan** kanssa sovitaan tiedotusaikataulu ja -kanavat ennen hankkeen alkua. Aktiivisessa rakennusvaiheessa (poraus ja stimulointi) valvojalle tiedotetaan poikkeustilanteista, kuten kynnyksarvojen ylityksestä, heti seismisen analyysin valmistuttua. Valvojalle tiedotetaan myös toimintaparametrien ja aikataulujen muutoksista ja pidempiaikaisista häiriöistä seismisessä verkossa.
- **Seismologian instituutti** valvoo seismisyyttä Suomessa ja instituuttiin otetaan yhteyttä maanjäristys- ja muiden tärinähavaintojen yhteydessä. Tämän vuoksi Seismologian instituuttia on informoitava hankkeesta. Tietoja hankkeesta olisi hyvä antaa jo ennen rakennusvaihetta. Instituutille ilmoitetaan viestinnästä vastaavan henkilön/ryhmän yhteystiedot ja tieto siitä, mihin indusoiduista seismisistä tapauksista tulleet kyselyt ohjataan (esimerkiksi hankkeen verkkosivut).

- 
- **Herkkiä laitteistoja käyttävät toimijat** (sairaalat, tutkimuslaitokset, yms) sekä **historiallisesti arvokkaat tai muuten vaurioherkät kohteet** (osio 5.1) huomioidaan ja niihin ollaan yhteydessä jo voimalan paikkaa suunniteltaessa. Suunnitelmaan kirjataan, miten heidän kanssaan kommunikoidaan kynnsarvojen ylittyessä.
  - **Paikalliset turvallisuusviranomaiset:** Voimakkaimpien seismisten tapausten jälkeen alueen väestö saattaa ottaa yhteyttä myös hätäkeskuksiin. Pelastusviranomaisia ja tarvittaessa poliisia tiedotetaan hankkeesta ennen porausta ja stimulointia sekä sovitaan, miten ja missä tilanteissa kynnsarvoja ylittävistä, mahdollisesti maan päällä havaittavista seismisistä tapauksista tiedotetaan.
  - **Vaikutusalueen asukkaille ja alueella työskenteleville** tiedotetaan hankkeesta ennen porausta ja stimulointia. Viestintäsuunnitelmassa määritellään alue, jolle tiedotus suunnataan ja mitä eri kanavia käytetään, esimerkiksi yleisötilaisuudet, lehdistö, internet. Ainakin stimulointivaiheen aikana tulee hankkeella olla aktiivinen kanava (esimerkiksi verkkosivut tai sosiaalinen media) viestintään hankkeen etenemisestä ja poikkeustiloista, kuten seismisten kynnsarvojen ylityksistä.

## **6. Suositukset voimalan toiminnan seurantaan ja valvontaan**

Voimalan toimintatapa määrittää suositukset valvontaan. Täysin koteloidun kaivon, jossa kiertävä neste ei ole kontaktissa kiveen, aiheuttama seisminen riski on pieni. Tällaiselle voimalalle ei edellytetä riskianalyysejä eikä seismistä valvontaa. Valvonta voi kuitenkin lisätä luottamusta ja läpinäkyvyyttä, erityisesti jos voimalahanke on herättänyt vastustusta tai huolta. (Wiemer ym. 2017.)

Jos voimalan lämmönkeruussa neste on kontaktissa kiven kanssa, seisminen riski on suurempi, joten toimintaa on valvottava. Rakennusvaiheen sisältäessä stimuloinnin seisminen riski on suurimmillaan, ja seisminen valvonta tulee mitoittaa sen mukaisesti. Oikein mitoitettuna seismisen valvonnan avulla pystytään paikantamaan mahdolliset indusoidut maanjäristykset ja osoittamaan, ovatko ne voimalan aiheuttamia. Asemaverkon tulisi olla toimintakykyinen kaikissa voimalan toimintavaiheissa sekä toiminnan alasajon jälkeen.

Tämän osion valvontasuositukset on jaettu voimalan elinkaaren eri vaiheiden mukaan seismiseen riskinhallintaan sekä muuhun ympäristövalvontaan.

### **6.1 Rakennusvaihe**

Rakennusvaiheeseen kuuluu reikien poraus sekä mahdollinen stimulointi.

#### **Seisminen valvonta**

Kuten osiossa 4.4 kuvattiin, seisminen valvontaverkko tulisi pystyttää hyvissä ajoin ennen rakennusvaihetta, sillä asemien toiminnan testaamiseen ja taustaseismissyyden tason selvittämiseen tarvitaan 1-6 kuukauden mittainen valvontajakso. Tiedonsiirtoyhteyksien seismissyyden valvojan ja Seismologian instituutin palvelimille on oltava toimintakunnossa ennen porauksen aloittamista. Suositellaan, että seismometrin lisäksi verkon keskusasemalle asennetaan kiihtyvyyssanturi. Jos hankkeeseen sisältyy stimulointi, kiihtyvyyssanturit asennetaan myös kohteisiin, joissa on herkkää laitteistoa tai muita erityisvaatimuksia.

Poraamisen aikana reaaliaikaisen valvontaverkon, automaattisen analyysijärjestelmän ja tiedonsiirtoyhteyksien on oltava toiminnassa. Seismisten tapausten manuaalinen analyysi tehdään normaalin työajan puitteissa.

Stimuloinnin aikana seisminen riskinhallinta edellyttää seismissyyden reaaliaikaista valvontaa, sujuvia tiedonsiirtoyhteyksiä hankkeen eri tahojen välillä ja nopeaa tiedotusta eri viranomaisille sekä, analyysin valmistuttua, suurelle yleisölle. Valvonta ja päivystys ovat ympärivuorokautisia, ja manuaalinen analyysi tehdään heti kynnsarvot ylittävän tapauksen sattuessa. Toiminnanharjoittaja vastaa asemien ja tiedonsiirron toimintavarmuudesta myös mahdollisten ongelmatilanteiden aikana.

Stimuloinnin jälkeen hankkeessa seuraa paineistuksen hallittu alasajo, jonka aikana joissakin voimaloissa on tapahtunut kyseisen voimalan historian suurin järjestyks (ks. Taulukko 1). Paineen laskeminen laskee maanjäristysten määrää ja voimakkuutta, mutta paineen purkautuminen ei ole tasaista, joten se saattaa myös indusoida järjestyksiä. Tämän vuoksi reaaliaikainen valvontaverkko tiedonsiirtoyhteyksineen sekä automaattinen analyysijärjestelmä on pidettävä toimintakunnossa paineistuksen alasajon jälkeen aina siihen asti, että seismisyys palautuu luonnontilaiselle tasolle, kuitenkin vähintään 6 kuukautta. Toiminnanharjoittaja huolehtii liikennevalojärjestelmän kynnsarvot ylittäneiden tapausten manuaalisesta analyysistä ja tiedotuksesta normaalin työajan puitteissa.

### **Ympäristötekniinen valvonta**

Toimintoja, joiden on tunnistettu tai voidaan epäillä aiheuttavan ympäristöriskejä tai merkittäviä muutoksia ympäristöolosuhteisiin, on seurattava porausvaiheen aikana. Seurantasuunnitelma lisätään lupahakemukseen. Erityisesti seurattavia asioita ovat melu, säteily, jätteiden käsittely, kemikaalien kulutus ja pohjaveden tila. Seurantasuunnitelmassa tulisi kuvata seurannan toteutus sisältäen toteutusaikataulut ja tulosten raportoinnin.

## **6.2 Tuotantovaihe**

Voimalatoiminnalle laaditaan seurantakirja, jonka mukaan toimintaa seurataan ja voimalaa huolletaan. Seurantasuunnitelman päivityksessä otetaan huomioon rakennusvaiheen seurannan tuloksista saatu informaatio.

### **Seisminen valvonta**

Tuotantovaiheessa seismisyys yleensä hiipuu, mutta seisminen riski on edelleen koholla. Seismissyiden valvontaan käytetään samaa asemaverkkoa ja automaattista analyysijärjestelmää kuin stimulointivaiheessa. Liikennevalojärjestelmän kynnsarvot ylittäneistä tapauksista tehdään manuaalinen analyysi ja tiedotetaan normaalin työajan puitteissa. Seurantasuunnitelmaa päivitetään tarvittaessa. Vaikka valvontaverkkoa karsittaisiin, yksi kansalliseen verkkoon liitetty seisminen asema olisi hyvä pitää toiminnassa.

### **Ympäristötekniinen valvonta**

Seurantasuunnitelmaa päivitetään tarvittaessa tai ympäristötekniinen seuranta voidaan lopettaa tuotannon aikana, mikäli merkittäviä ympäristövaikutuksia ei todeta tai aiemmin todetut vaikutukset ovat palautuneet lähelle luonnontilaista tasoa. Lupaviranomainen ratkaisee seurannan muutokset ja sen lopettamisen toimijan esityksestä.

### **6.3 Jälkivalvonta**

Voimalan alasajosta tehdään suunnitelma, jossa huomioidaan, mitä poratuille rei'ille sekä syötetylle nesteelle tehdään. Jälkivaiheeseen kuuluu myös kohteen purku ja sen ympäristön palauttaminen kiinteistön maankäytön edellyttämään tilaan.

#### **Seisminen valvonta**

On jonkin verran kokemusta, että porareian sulkeminen voimalan alasajon jälkeen on nostanut huokospainetta, mikä on indusoinut seismisyyttä. Tuotantovaiheen seisminen asemaverkko suositellaan pidettävän toiminnassa ainakin 6 kuukautta voimalan toiminnan lopettamisen ja paineistuksen alasajon jälkeen. Jos seisminen aktiivisuus jatkuu, seismistä valvontaa tulisi jatkaa tarpeen mukaan.

#### **Ympäristötekniinen valvonta**

Mikäli tuotantovaiheen seurannassa ei ole todettu merkittäviä ympäristövaikutuksia tai seuranta on perustelluin syin lopetettu tuotantovaiheen aikana, jälkivalvontavaiheessa ei ole tarvetta ympäristötekni- selle seurannalle. Mikäli tuotantovaihe on aiheuttanut ympäristöllisen seurantaveloitteen, tulee seurantaa jatkaa tuotannon jälkeen, kunnes ympäristövaikutus on palautunut hyväksyttävälle tasolle. Asiasta sovitaan erikseen lupaviranomaisen kanssa.

---

## 7. Yhteenveto

Tässä raportissa on esitetty perustiedot geotermisen energian eri muodoista ja niihin liittyvistä mahdollisista riskeistä. Lisäksi on esitetty suositukset voimalan lupahakemuksen sisältöä sekä eri toimintavaiheiden seuranta varten.

Lupahakemuksessa tulisi esittää:

1) Taustaselvitykset, joissa arvioidaan alueen sopivuus voimalan käyttöön ja kuinka laajalle alueelle voimalan vaikutukset ulottuvat:

- Voimalan toimintaperiaate: onko vesi kontaktissa kiven kanssa, ja kuuluuko voimalan rakennusvaiheeseen stimulointia? Voimalan toimintaparametrit: pumpattavan nesteen määrä, virtausnopeus, paine ja lämpötila.
- Jännityskentän suunta ja suuruus suhteessa olemassa oleviin siirroksiin. Siirrosten laajuus ja kalliomekaaniset ominaisuudet.
- Aluegeologia, kivilaji sekä kivien mekaaniset ominaisuudet. Hydrogeologiset ominaisuudet, kuten kiven huokoisuus ja permeabiliteetti, huokospaine ja maanalaiset vesiesiintymät.

2) Indusoituun seismisyyteen liittyvät selvitykset

- Sallittujen maanliikkeiden kartoitus

Selvitetään alueen rakennusmääräykset ja säädökset sallituista maanliikkeistä. Kartoitetaan alueen maalaji sekä infrastruktuuri, jolla on erityisvaatimuksia maanliikkeen suhteen.

- Seismisen hasardin määrittäminen ja seisminen riskiarvio

Määritellään alueen luonnollinen seisminen hasardi ja toiminnan indusoiman seismisyyden hasardi: kartoitetaan alueen taustaseismisyys, tehdään hasardiarvio (PSHA ja/tai DSHA), arvioidaan vedensyötön indusoima seismisyys.

Tehdään seisminen riskiarvio hasardin pohjalta, kartoitetaan maanjäristyksille alttiit alueet, rakennukset ja asutus.

3) Ympäristövaikutusten arviointi

- Maankäyttö, vaikutus alueen geologiaan ja mahdollisiin luontokohteisiin
- Vaikutus pintavesistöihin ja pohjaveteen
- Porausjätteen ja pölyn käsittely sekä mahdollisen radioaktiivisen aineksen käsittely

- Rakennusvaiheen meluhaitat ja tärinä
  - Liikennejärjestelyt
  - Kemikaalien käsittely
  - Laitoksen energiatehokkuuden ja ilmastokestävyyden selvitys
- 4) Valvonta ja varautumissuunnitelma laitoksen elinkaaren ajaksi
- Suositellaan, että voimalan toiminta-alueen viranomainen nimittää hankkeelle riippumattoman valvojan, joka valvoo seismisen valvontajärjestelmän toteutumista. Seismologian instituutti tulee pitää tiedotettuna hankkeen toimintavaiheista.
  - Kuvaus seismisestä valvontaverkosta, analyysi- ja liikennevalojärjestelmästä sekä reaaliaikaisen aineiston toimittamisesta valvovalle taholle.
  - Arvio toimintaan liittyvistä ympäristöriskeistä, niihin varautumisesta sekä suunnitelma siitä, miten mahdollisissa onnettomuustilanteissa toimitaan.
- 5) Työmaasuunnitelma erikseen porauksen ja laitoksen toiminnan ajaksi.
- Kuvataan työalueen käyttö ja siellä tapahtuvat toiminnot sekä tunnistaa työterveydelliset riskit ja esittää suunnitelma riskien vähentämiseksi.
  - Kuvataan suunniteltu poraustekniikka ja sen vaatimukset sekä porauksessa mahdollisesti käytettävät kemikaalit ja niiden käsittely.
- 6) Viestintäsuunnitelma viestintään eri viranomaisten ja yhteisön kanssa
- Eritellään tahot, joihin ollaan yhteydessä: eri lupaviranomaiset, seismisyyden (sekä tarvittaessa muut) valvojat, Seismologian instituutti, turvallisuusviranomaiset, paikalliset asukkaat ja toimijat, sekä tärinäherkät kohteet.
  - Eritellään, millä keinoin eri sidosryhmille kommunikoidaan, miten kommunikoidaan yleisesti ja miten poikkeustilanteissa.
  - Huomioidaan tiedotustarpeen vaikutusalue ja kuntarajat.

---

## Lähteet

### Verkkolähteet

FINLEX, ajantasainen Suomen lainsäädäntö: [www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa](http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa)

Motivan CO<sub>2</sub>-laskentaohje: [www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-laskentaohje\\_energiankulutuksen\\_hiilidioksidipaastojen\\_laskentaan](http://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan)

St1 Deep Heat-hankkeen verkkosivu, [www.st1.fi/geolampo](http://www.st1.fi/geolampo), viitattu 15.8.2018

Pacific Northwest Seismic Network: Site Effects, [www.pnsn.org/outreach/earthquakehazards/site-effects](http://www.pnsn.org/outreach/earthquakehazards/site-effects), viitattu 13.11.2018

Seismologian instituutin verkkosivu, [www.helsinki.fi/fi/seismologian-instituutti](http://www.helsinki.fi/fi/seismologian-instituutti)

SELENA-riskianalysityökalu, [www.norsar.no/r-d/safe-society/earthquake-hazard-risk/the-selena-open-risk-software/](http://www.norsar.no/r-d/safe-society/earthquake-hazard-risk/the-selena-open-risk-software/)

### Artikkelit, kirjat ja raportit

Ahjos, T. and Uski, M., 1992. Earthquakes in Northern Europe in 1375-1989. *Tectonophysics*, 207, 1-2, 1-23. Saatavilla: [doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90469-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90469-M).

Arola, T. 2015. Groudwater as an Energy Resource in Finland. 2015. University of Helsinki – A36. Doctoral thesis. Unigrafia. Helsinki Finland.

Asanuma, H., Kumano, Y., Izumi, T., Soma, N., Kaieda, H., Tezuka, K., Wyborn, D. ja Niitsuma, H. 2004. Passive seismic monitoring of a stimulation of HDR geothermal reservoir at Cooper Basin, Australia. SEG Technical Program Expanded Abstracts: pp. 556-559, [doi.org/10.1190/1.1845264](https://doi.org/10.1190/1.1845264).

Baisch, S. ja Harjes, H. 2003. A model for fluid-injection-induced seismicity at the KTB, Germany, *Geophysical Journal International*, Volume 152, Issue 1, Pages 160–170, . Saatavilla: [doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01837.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01837.x)

Bommer, J., Crowley, H. and Pinho, R., 2015. A risk-mitigation approach to the management of induced seismicity, *Journal of Seismology*, 19, 623—646.

Bommer, J. 2017. Predicting and Monitoring Ground Motions Induced by Hydraulic Fracturing. OGA-commissioned paper. Saatavilla: [www.ogauthority.co.uk/media/3693/pgv-thresholds-for-control-of-induced-seismic-hazard\\_v5.pdf](http://www.ogauthority.co.uk/media/3693/pgv-thresholds-for-control-of-induced-seismic-hazard_v5.pdf)

Bormann, P. 2002: New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), Potsdam: GeoForschungsZentrum Potsdam, IASPEI, Vol. 1-2 p.

Crowe, C., Masmonteil, J., Thomas, R. 1992. Trends in matrix acidizing. *Oilfield review* 4, 24-40.

Cuenot, N., Scheiber, J., Moeckes, W., Genter, A. 2015. Evolution of the Natural Radioactivity on the Soultz-sous-Forêt EGS Power Plant and Implication for Radiation Protection. *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia*.

Doelling, R ja Schulte, I. 2010, Deep Groundsourced Heat Exchanger with Coaxial Pipe, Closed Water Circuit – Improvement Proposals in Project Development and Technical Pipe Conception, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*.

EN 1998-1 (2004) (English): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC

- 
- Evans, K., Zappone, A. S., Kraft, T., Deichmann, N. ja Moia, F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO<sub>2</sub> reservoirs in Europe, *Geothermics* 41
- Feder, T. 2018. Engineered geothermal systems have wide potential as a renewable energy source, *Physics today*, vol 71 (9). . Saatavilla: [physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.4017](https://doi.org/10.1063/PT.3.4017)
- Finger, J. ja Blankenship, D. 2010. Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling, Sandia Report. Saatavilla: [www.energy.gov/eere/geothermal/downloads/handbook-best-practices-geothermal-drilling](http://www.energy.gov/eere/geothermal/downloads/handbook-best-practices-geothermal-drilling)
- Foulger, G.R. ja Julian, B.R. (2015) Non-double-couple earthquakes. Julkaisussa: *Encyclopedia of earthquake engineering*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 1-31. DOI 10.1007/978-3-642-36197-5\_290-1.
- Foxall, B., Lindsey, N ja Bachmann, C., 2015. Seismic Impacts Resulting from Well Stimulation, an Independent Scientific Assessment of Well Stimulation in California, Volume II: Potential Environmental Impacts of Hydraulic Fracturing and Acid Stimulations
- Fülöp, L., Jussila V., Aapasuo R., Vuorinen T., Mäntyniemi P (2019) Evolving the Fennoscandian GMPEs, (EVOGY) Final report of the SAFIR2018 project.
- Galis M, Ampuero JP, Mai PM, Cappa F (2017). Induced seismicity provides insight into why earthquake ruptures stop. *Science Advances* 3: eaap7528. Saatavilla: [dx.doi.org/10.1126/sciadv.aap7528](https://doi.org/10.1126/sciadv.aap7528)
- Gehlin, S. ja Andersson, O., 2016. Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 19-24 Sept 2016.
- Giardini D., Woessner J., Danciu L., Crowley H., Cotton F., Grünthal G., Pinho R., Valensise L. and the SHARE consortium, 2013. European Seismic Hazard Map for Peak Ground Acceleration, 10% Exceedance Probabilities in 50 years, doi: 10.2777/30345.
- Gischig, V. ja Preisig, G., 2015. Hydro-fracturing versus hydro-shearing: A critical assessment of two distinct reservoir stimulation mechanisms, *Proceedings to the 13th International Congress of Rock Mechanics, ISRM 2015*, May 10-13 2015, Montréal, Canada
- Gischig, V. ja Wiemer, S., 2013. A stochastic model for induced seismicity based on non-linear pressure diffusion and irreversible permeability enhancement, *Geophysical Journal International* 194. Saatavilla: [doi.org/10.1093/gji/ggt164](https://doi.org/10.1093/gji/ggt164)
- Goebel, T ja Brodsky, E., 2018. The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences. *Science* 361
- Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A. P., Manconi, A., López-Comino, J. A., Clinton, J. F., Westaway, R., Cauzzi, C., Dahm, T. ja Wiemer, S. 2018. The November 2017  $M_w$  5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science* Vol. 360, Issue 6392, pp. 1003-1006. DOI: 10.1126/science.aat2010
- Hagag, W. ja Obermeyer, H., 2017. Active Structures in Central Upper Rhine Graben, SW Germany: New Data from Landau Area using Electromagnetic Radiation (EMR) Technique and Cerescope, *Journal of Geology and Geophysics* VOL. 6 (5). DOI: 10.4172/2381-8719.1000303
- Häring, M.O., Schanz, U., Ladner, F. and Dyer, B.C., 2008. Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, Vol. 37, 469-495.
- Heidbach, O.; Rajabi, M.; Reiter, K.; Ziegler, M.; WSM Team (2016): World Stress Map Database Release 2016. GFZ Data Services. . Saatavilla: [doi.org/10.5880/WSM.2016.001](https://doi.org/10.5880/WSM.2016.001).

- 
- Hirschberg, S., Wiemer, S. ja Burgherr, P., 2015. Energy from the Earth, Deep Geothermal as a Resource for the Future? TA Swiss Geothermal Project Final Report, Paul Scherrer Institute, Villingen. Saatavilla: [biblio.parlament.ch/e-docs/378766.pdf](http://biblio.parlament.ch/e-docs/378766.pdf)
- Hogarth, R. ja Holl, H. 2017. Lessons Learned from the Habanero EGS Project, GRC Transactions 41
- IAEA, 2010. Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations. Specific safety guide. IAEA Safety Standards Series No. SSG-9, International Atomic Energy Agency, Vienna, 60 pp.
- Jung, R., 2013. EGS — Goodbye or Back to the Future, kirjassa Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, ed. Jeffrey, R. IntechOpen, DOI: 10.5772/56458. Saatavilla: [www.intechopen.com/books/effective-and-sustainable-hydraulic-fracturing/egs-goodbye-or-back-to-the-future-95](http://www.intechopen.com/books/effective-and-sustainable-hydraulic-fracturing/egs-goodbye-or-back-to-the-future-95)
- Kaisko, O., 2018. st1 Deep Heat Oy, Seismicity and possible fault structures at the Otaniemi geothermal plant site. ÅF-Consult Ltd, Report DSTCATF-5810.
- Kijko, A., 2004. Estimation of the Maximum Earthquake Magnitude, Pure App.Geophys., vol.161, 1655-1681. DOI: 10.1007/s00024-004-2531-4.
- Kijko, A. ja Sellevoll, M.A., 1989. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part I, Utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am. 79, 645-654.
- Kijko, A. ja Sellevoll, M.A., 1992. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 120-134
- Kijko, A. ja Singh, M., 2011. Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation, Acta Geophysica, vol.59, p.674-700
- Kim, K., Ree, J., Kim, Y., Kim, S., Kang, S. ja Seo, W. 2018. Assessing whether the 2017  $M_w$  5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. Science Vol. 360, Issue 6392, pp. 1007-1009 DOI: 10.1126/science.aat6081
- Korean Government Commission (2019). Summary Report of the Korean Government Commission on Relations between the 2017 Pohang Earthquake and EGS Project, March 20, 2019
- Korja, A. (ed), Kosonen, E. M. (ed), Hellqvist, N. M., Koskinen, P. H., Mäntyniemi, P. B., Uski, M. R., Valtonen, O. S., Airo, M-L., Huotari-Halkosaari, T., Nironen, M., Sutinen, R., Grigull, S., Stephens, M., Karin, H. & Lund, B., 2015. Seismotectonic framework and seismic source area models in Fennoscandia, Northern Europe. Report S-63, Institute of Seismology, University of Helsinki, 284 pp.
- Kortström, J., M. Uski ja T. Tiira (2016), Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network, Computers & Geoscience, 87, 22–30, doi.org/10.1016/j.cageo.2015.11.006.
- Kortström, J.T., Uski, M.R. ja Oinonen, K.J. (2018). Julkaisussa: Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. 52, 1, 41-52.
- Koskinen, P., 2013. Orientations of faults and their potential reactivation in the present stress field in Finland. Pro Gradu- tutkielma. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos
- Kraft, T., P. M. Mai, S. Wiemer, N. Deichmann J. Ripperger, Ph. Kästli, C. Bachmann, D. Fäh, J. Wössner, ja D. Giardini (2009). Mitigating Risk for Enhanced Geothermal Systems in Urban Areas. EOS Trans. Am. Geophys. Union 90 (32), 237–264.
- Kukkonen, I. 2000. Geothermal energy in Finland, Proceedings World Geothermal Congress.

- 
- Lautkankare, R., Salomaa, N., Arola, T., Lehtonen, J. 2017. Thermal energy storages below the building helping to reach the 0-energy targets by 2020. Holistic approach through the energy simulations. Proceedings of the International Foundation Congress and Equipment Expo (IFCEE) 2018. Conference publication.
- Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., ja Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36(3), 185–222.
- Majer, E., J. Nelson, A. Robertson-Tait, J. Savy, ja I. Wong, 2012. Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems, United States Department of Energy: Geothermal Technologies Program
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J. ja Wong, I., 2014. Best Practices for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems (EGS), Lawrence Berkeley National Library. Saatavilla: [escholarship.org/uc/item/3446g9cf](https://escholarship.org/uc/item/3446g9cf).
- Mäntyniemi, P. and Wahlström, R., 2013. Macroseismic reports and intensity assessments for the earthquakes in the Bay of Bothnia area, northern Europe on 15 and 23 June 1882. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-57, 88 pp.
- Mattila, J., 2015. Genesis and evolution of brittle structures in southwestern Finland and western South-Africa. Insights into fault reactivation, fluid flow and structural maturity in Precambrian craton, *Annales Universitatis Turkuensis AII 300*, Multiprint Oy, Turku, Finland, 32 pp.
- McGarr, A., 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1008-1019, [doi.org/10.1002/2013JB010597](https://doi.org/10.1002/2013JB010597)
- Mignan, A., Broccardo, M., Wiemer, S. ja Giardini, D. 2018, Autonomous decision-making against induced seismicity in deep fluid injections. International Symposium on Energy Geotechnics 2018, Lausanne, Switzerland – SEG2018
- Ojala, A.E.K., Mattila, J., Virtasalo, J., Kuva, J., Luoto, T.P., 2018. Seismic deformation of varved sediments in southern Fennoscandia at 7400 cal BP. *Tectonophysics* 744, 58–71. Saatavilla: [doi.org/10.1016/j.tecto.2018.06.015](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.06.015)
- Plenkens, K., Husen, S. ja Kraft, T. 2015. A Multi-Step Assessment Scheme for Seismic Network Site Selection in Densely Populated Areas, *Journal of Seismology* 19(4), DOI: 10.1007/s10950-015-9500-5
- Pokki, J., Aumo, R., Kananoja, T., Ahtola, T., Hyvärinen, J., Kallio, J., Kinnunen, K., Luodes, H., Sarapää, O., Selonen, O., Tuusjärvi, M., Törmänen, T. & Virtanen, K. 2014. Geologisten luonnonvarojen hyödyntäminen Suomessa vuonna 2012. Tutkimusraportti 210. Geologian tutkimuskeskus. Saatavilla: [tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr\\_210.pdf](https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_210.pdf)
- Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 253-2010 Rakentamisen aiheuttamat värähtelyt. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 121 pp.
- Raymond, J., Mercier, S ja Nguyen, L. 2015. Designing coaxial ground heat exchangers with a thermally enhanced outer pipe. *Geothermal energy*, Vol. 3 (7)
- Saarno, T., St1 Deep Heat Oy, personal communication in 2018
- Shapiro, S., Dinske, C. ja Kummerow, J., 2007, Probability of a given magnitude earthquake induced by a fluid injection, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22314, [doi:10.1029/2007GL031615](https://doi.org/10.1029/2007GL031615).
- Shapiro, S., Dinske, C. ja Langenbruch, C., 2010. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations, *The Leading Edge*, 29(3), 304-309. [doi.org/10.1190/1.3353727](https://doi.org/10.1190/1.3353727)

- 
- Schindler, M. 2007. Chronology of "holes and hints" in GPK4. Internal Report, GEIE.
- st1 Deep Heat, 2018(a). Otaniemi Geothermal Doublet, Traffic Light System for Seismic Monitoring, Ove Arup & Partners Ltd.
- st1 Deep Heat, 2018(b). Otaniemi Geothermal Doublet Implementation of Traffic Light System for Seismic Monitoring during OTN-III Well stimulation: Summary of Findings, Ove Arup & Partners Ltd.
- STUK 2017. Radioaktiivisten jätteiden ja päästöjen ryhmittely. Saatavilla: [www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/radioaktiivisten-jatteiden-ja-paastojen-ryhmittely](http://www.stuk.fi/aiheet/ydinjatteet/radioaktiivisten-jatteiden-ja-paastojen-ryhmittely)
- Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. VTT Tiedotteita 2569. Saatavilla: [www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2569.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2569.pdf)
- Talja, A., Törnqvist, J. 2014. Liikennetärinä: alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. Tutkimusraportti VTT-R-04703-14. Saatavilla: [www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf)
- Trutnevyte ja Wiemer, 2017. Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland, *Geothermics* 65. doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.006
- Ungemach, P. and Antics, M., 2015. Assessment of Deep Seated Geothermal Reservoirs in Selected European Sedimentary Environments. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Van der Elst, N. J., M. T. Page, D. A. Weiser, T. H. W. Goebel, S. M. Hosseini (2016), Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 4575–4590, doi:10.1002/2016JB012818
- Walters, R.J., Zoback, M.D., Baker, J.W. and Beroza, G.C., 2015. Characterizing and responding to seismic risk associated with earthquakes potentially triggered by fluid disposal and hydraulic fracturing. *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 86, 1110–8.
- Wiemer, S., Kraft, T. ja Lanftwing, D., 2015. Seismic risk, julkaisussa: Hirschberg, S., Wiemer, S. ja Burgherr, P. Energy from the Earth, Deep Geothermal as a Resource for the Future? TA Swiss Geothermal Project Final Report, Paul Scherrer Institute, Villingen, 263–295
- Wiemer, S., Kraft, T., Trutnevyte, E. ja Roth, P., 2017. Swiss Seismological Service: "Good Practice" Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland.
- Ympäristöministeriö. 2013. Energiakaivo – Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas.
- Ympäristöministeriö. 2014. Kaivosten ympäristöturvallisuus, Viranomaistyöryhmän loppuraportti,
- Zang, A, Oye, V., Jousset, P., Deichmann, N., Gritto, R., McGarr, A., Majer, E ja Bruhn, D., 2014, Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs – An overview, *Geothermics* 52
- Zoback, M.D., Townend, J., Grollmund, B., 2002. Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere. *Int Geol Rev*, 44:383–401.

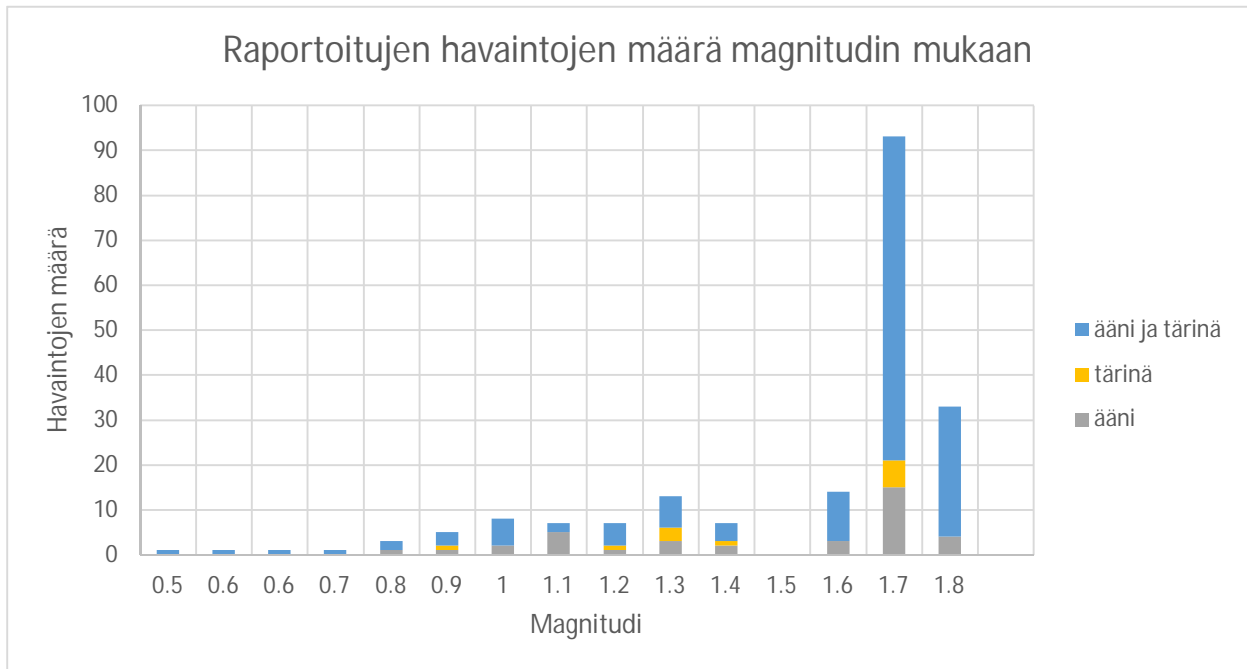
### Lisää aiheesta:

- Peura, J. 2017. Maanalaista Energiaa, Helsingin kaupungin Geoteknisen osaston julkaisu 97. Saatavilla: [www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf](http://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf)
- Tester, J., Jaerson, B., Batchelor, A., Blackwell, D., DiPippo, R., Drake, E., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M., Nichols, K., Petty, S., Toksöz, N., Veatch, R. (2006) "The Future of Geothermal Energy", Massachusetts Institute of Technology, ISBN: 0615134386, Saatavilla: [eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future\\_geo\\_energy.pdf](http://eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf)

## Liitteet

### Liite 1: Havaintoraporttiaineistoa

Otaniemen voimalahankkeen stimulointivaiheen ajalta Seismologian instituuttiin tulleita havaintoraportteja.



Kuva 16



Kuva 17

Taulukko 3: Otaniemen 1. reiän stimulointivaiheen maanjärityshavaintoraportit

Päivä	Aika	Magnitudi	Havaintojen yht. määrä	Ääni	Tärinä	Ääni ja tärinä
7.6.	23:42	1,0	1	0	0	1
9.6.	8:42	1,1	2	2	0	0
14.6.	3:22	1,0	1	1	0	0
20.6.	3:13	1,3	2	2	0	0
20.6.	2:27	1,6	14	3	0	11
21.6.	20:56	1,2	2	0	1	1
23.6.	9:21	1,1	1	0	0	1
23.6.	11:59	1,1	1	1	0	0
29.6.	7:02	1,7	8	1	0	7
29.6.	12:42	1,3	2	0	1	1
30.6.	9:53	1,4	2	1	0	1
3.7.	0:51	1,0	1	0	0	1
3.7.	23:11	1,0	3	1	0	2
3.7.	23:30	1,1	2	1	0	1
4.7.	3:14	1,0	1	0	0	1
4.7.	4:47	0,9	1	0	0	1
4.7.	6:46	1,0	1	0	0	1
5.7.	10:01	1,4	3	1	0	2
6.7.	11:49	1,4	2	0	1	1
7.7.	20:32	1,2	2	0	0	2
8.7.	10:09	0,6	1	0	0	1
8.7.	12:52	0,5	1	0	0	1
8.7.	20:36	1,7	81	13	6	62
12.7.	17:25	1,3	3	0	2	1
12.7.	23:36	0,9	1	0	1	0
13.7.	16:35	1,3	1	0	0	1
15.7.	23:05	0,7	1	0	0	1
16.7.	20:25	1,8	33	4	0	29
18.7.	20:09	0,8	2	0	0	2
19.7.	1:45	1,2	3	1	0	2
19.7.	13:55	1,7	4	1	0	3
21.7.	16:46	0,9	2	1	0	1
22.7.	6:10	0,8	1	1	0	0
22.7.	20:15	0,6	1	0	0	1
23.7.	1:03	0,9	1	0	0	1
24.7.	1:03	1,3	5	1	0	4
24.7.	2:48	1,1	1	1	0	0

## Liite 2: GRID

Geothermal Risk of Induced seismicity Diagnosis (GRID) on Sveitsissä kehitetty indusoidun seismisyyden riskinhallintatyökalu, joka on sovellettavissa kaikille geotermisen energian hankkeille hankkeille Sveitsin kaltaisissa olosuhteissa (Trutnevyte ja Wiemer 2017). GRID-prosessia voidaan käyttää hankkeen kaikissa vaiheissa, mutta suurin hyöty siitä saadaan suunnitteluvaiheessa. Järjestelmän periaatteena on pisteyttää geotermisiä hankkeita kolmen eri tekijän pohjalta: 1) **Indusoitu seisminen hasardi**, joka muodostuu voimalan toimintaparametreista sekä alueen seismisestä hasardista. 2) **Seisminen riskin muut osa-alueet**, eli alueen asutus, sen alttius maanjäristyksille, maaperän vahvistava vaikutus, infrastruktuurin herkkyys, sekä maanjäristyksestä seuraavat toissijaiset hasardit, kuten maanvyöryt ja tsunamit, tulipalot jne. Taulukoissa puhutaan tiiviyden vuoksi riskistä, vaikka tässä siihen ei sisälly seismistä hasardia. 3) **Yhteiskunnallinen vaste**, joka perustuu alueen asukkaiden ja toimijoiden vastaanottoon. Taulukossa 4 on esitetty GRID-pisteytyksen eri tekijät osa-alueineen alkuperäisen mallin mukaisena. Jokaisesta osa-alueesta annetaan 0-2 pistettä. Sveitsi on Suomea korkeamman seismisyyden aluetta ja seisminen riski on huomioitu maan rakennusohjeissa. Ohje ei siten ole suoraan sovellettavissa Suomeen. Esimerkiksi kivilajin perusteella arvioitava hasardi antaa aina suuren arvon, sillä Suomen kallioperän päällä oleva maakerros on lähes kaikkialla ohut.

Seismisen hasardin ja riskin saamat pisteet summataan ja pisteytystä verrataan kuvan 18 mukaisesti. Jokainen yhteiskunnallisen vasteen piste nostaa sekä seismisen hasardin että riskin pisteytystä 0,5 yksikköä. Kuvan 19 jana havainnollistaa, kuinka suuren merkityksen GRID-malli antaa yhteiskunnalliselle vasteelle.

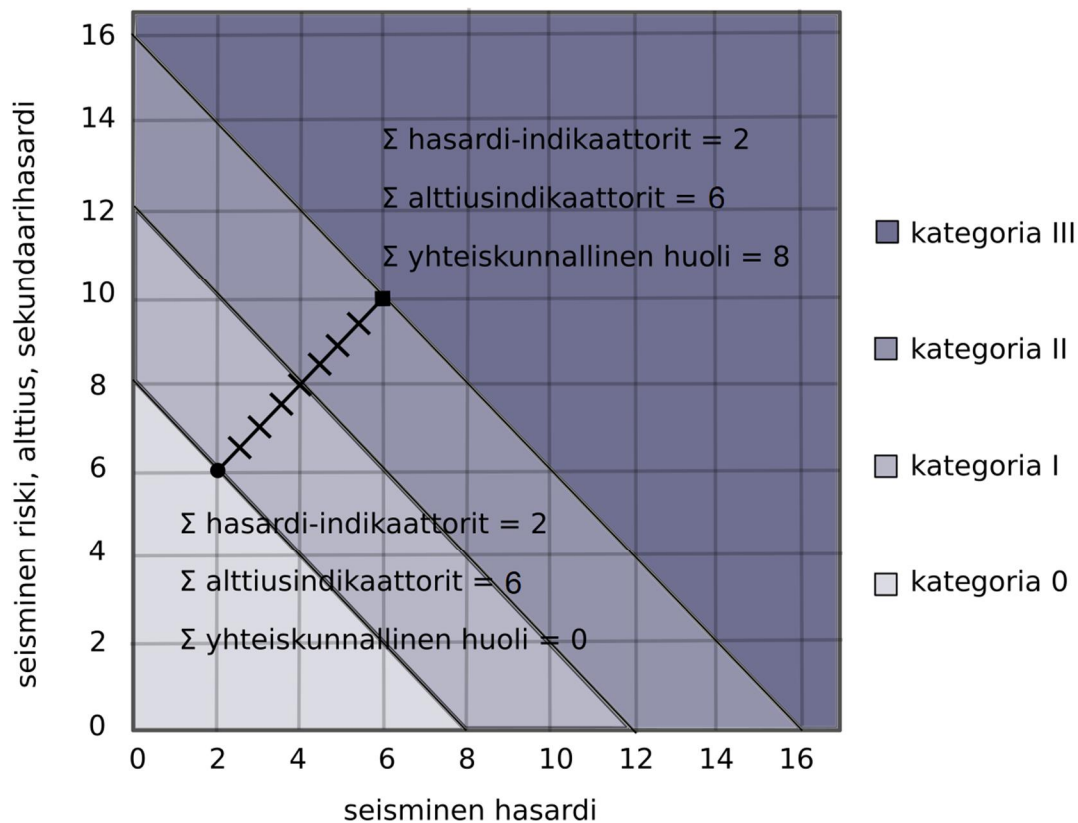
*Taulukko 4: Sveitsin GRID-pisteytyksen eri osa-alueet. \* Suomessa lähes kaikkialla 2. \*\* Luokitukset perustuvat Sveitsin standardiin, josta Suomessa ei ole vastaavaa. Taulukko on laadittu Sveitsin olosuhteiden mukaan eikä sellaisenaan sovellu suoraan Suomeen.*

pisteet	0 (pieni vaikutus)	1 (keskisuuri vaikutus)	2 (suuri vaikutus)
<b>Seisminen hasardi</b>			
Säiliön syvyys	<1 km	1–3 km	>3 km
Kokonaissyöttötilavuus stimuloinnin aikana	<1000 m <sup>3</sup>	1000–10000m <sup>3</sup>	>10000 m <sup>3</sup>
Toiminnan aikainen syöttö- tai poistopumpaus	<1000 m <sup>3</sup> /pv syöttö tai <5000 m <sup>3</sup> /pv poisto	1000–10000 m <sup>3</sup> /pv syöttö tai 5000–50000 m <sup>3</sup> /pv poisto	>10,000 m <sup>3</sup> /pv syöttö tai >50000 m <sup>3</sup> /pv poisto
Kivilaji	Sedimentti / maaperä	500 m kallioperästä	Kiteinen kivi / kallioperä *

<b>pisteet</b>	<b>0 (pieni vaikutus)</b>	<b>1 (keskisuuri vaikutus)</b>	<b>2 (suuri vaikutus)</b>
Ero tausta- ja indusoidun seismisyyden välillä **	$\leq 0,6 \text{ m/s}^2$ mitta-arvo	$0,6\text{--}1,3 \text{ m/s}^2$ mitta-arvo	$\geq 1,3 \text{ m/s}^2$ mitta-arvo
Nesteen syöttöpaine	$< 0,1 \text{ MPa}$	$0,1\text{--}1 \text{ MPa}$	$> 1 \text{ MPa}$
Etäisyys tunnetuista tai potentiaalisesti aktiivisista siirroksista	$> 5 \text{ km}$	$2\text{--}5 \text{ km}$	$< 2 \text{ km}$
<b>Seisminen riski, alueen altistuminen ja herkkyyt, toissijaiset hasardit</b>			
Paikallinen amplifikaatio 5 km säteellä	Ei rakennuksia tai infrastruktuuria pehmeällä maaperällä	$< 10 \%$ rakennuksista tai infrastruktuurista pehmeällä maaperällä	$\geq 10 \%$ rakennuksista tai infrastruktuurista pehmeällä maaperällä
Altistuva väestö 5 km säteellä	Harvaan asuttu: $< 100$ asukasta	Haja-asutusalue: $100\text{--}20000$ asukasta	Kaupunki: $> 20000$ asukasta
Teollisuus tai kaupallinen toiminta 5 km säteellä	Vähäinen	Keskisuuri: $\geq 1$ $100\text{--}499$ hengen yritystä tai $\geq 1$ teollista rakennusta	Aktiivinen: $\geq 5$ $100\text{--}499$ hengen yritystä tai $> 1$ yli $500$ hengen yritystä tai $\geq 2$ teollista rakennusta
Rakennusten ja infrastruktuurin tärkeys 5 km säteellä **	Ei luokkien II tai III rakennuksia ( <i>ei tärkeitä rakennuksia</i> )	Luokan II rakennuksia ( <i>tärkeitä rakennuksia</i> )	Luokan III rakennuksia ( <i>erittäin tärkeitä rakennuksia</i> )
Merkittävän ympäristöriskin infrastruktuuria	Ei ole	–	Yksi tai useampi
Vahvistamattomia historiallisesti arvokkaita rakennelmia	$< 5 \%$ rakennuksista	$5\text{--}10 \%$ rakennuksista	$> 10 \%$ rakennuksista tai kansainvälisesti tärkeä perintökohde
Alttius toissijaisille hasardeille 5 km säteellä	Erittäin matala	Olemassa	Korkea
<b>Yhteiskunnallinen vaste</b>			
Yhteiskunnan huoli	Ei lainkaan	Olemassa	Merkittävä
Sidosryhmien alttius tai vastustus	Ei lainkaan	Olemassa	Merkittävä
Negatiiviset kokemukset vastaavien hankkeiden parissa	Ei lainkaan	Olemassa	Merkittävä

pisteet	0 (pieni vaikutus)	1 (keskisuuri vaikutus)	2 (suuri vaikutus)
Luottamuksen puute toiminnanharjoittajaa tai viranomaisia kohtaan	Ei lainkaan	Olemassa	Merkittävä
Hyödyt paikalliselle yhteisölle	Suoria hyötyjä ilman rahallista korvausta	Vain korvausta vastaan	Ei hyötyjä

Ainakin kolmen tahon tulisi osallistua GRID-pisteelykseen: toiminnanharjoittajan, toiminta-alueen lupaviranomaisten sekä yhden tai useamman riippumattoman asiantuntijan. Pisteytyksen perustella hankkeet jaotellaan neljään riskikategoriaan, joissa kussakin on eritasoiset suositukset valvontaan ja viestintään.



Kuva 18: GRID-tulosten visualisointikaavio

- **Kategoria 0:** Indusoitu seisminen hasardi, riski ja sosiaalinen huoli ovat olemattomia tai erittäin matalia, eikä erityistä seismistä valvontaa vaadita. Tyypillisiä kategorian hankkeita ovat energiakaivot sekä suljetut systeemit, joissa lämmönkeruuneste ei ole kontaktissa kiveen.
- **Kategoria I:** Indusoituja maanjäristyksiä saattaa tapahtua, mutta vahinkoa aiheuttavat tapaukset ovat epätodennäköisiä ja sosiaalinen vastaanotto on hyvä. Tyypillisiä kategorian hankkeita ovat

erilaiset matalat (0,5 – 3 km) hankkeet olemassa olevissa akvifereissa kaukana aktiivisista seismisistä vyöhykkeistä tai siirroksista, matalan riskin alueella.

- **Kategoria II:** Indusoituja maanjärityksiä saattaa tapahtua, vahinkoa aiheuttavat tapaukset ja sosiaalinen huoli ovat mahdollisia. Tyypillisiä kategorian hankkeita ovat erisyvyiset hankkeet, joihin ei kuulu stimulointia, mutta jotka ovat riskialueilla tai niiden sosiaalinen vastaanotto on huono.
- **Kategoria III:** Indusoidut maanjäritykset ovat todennäköisiä, vahinkoa aiheuttavat tapaukset ja sosiaalinen huoli ovat mahdollisia ja vaativat hyvää riskinhallintaa. Tyypillisiä kategorian hankkeita ovat stimulointia sisältävät hankkeet, hankkeet syvällä tai kiteisessä kivessä sekä hankkeet seismisesti aktiivisella alueella tai aktiivisten siirrosten lähellä.

Kategorioiden perusteella Sveitsin alueelle tehty valvontasuositukset ovat yhteenvetona Taulukossa 5. Taulukkoa tulisi räätälöidä kunkin maan olosuhteita vastaavaksi.

*Taulukko 5: Yhteenvedo riskinhallintasuosituksista eri kategorioille. Riskiarvioista raportin osiossa 4.3. Viestinnästä raportin osiossa 5.4. Seismisestä valvonnasta ja liikennevalojärjestelmästä raportin osiossa 4.4. \* Kaksisuuntainen sitoumus tarkoittaa sidosryhmien kuulemista. Kaikista kohdista voi lukea tarkemmin alkuperäisestä julkaisusta.*

	<b>Kategoria 0</b>	<b>Kategoria I</b>	<b>Kategoria II</b>	<b>Kategoria III</b>
Alustava hasardi- ja riskiarvio	ei vaadita	empiirinen, skenaarioripohjainen arvio	empiirinen, skenaarioripohjainen arvio	todennäköisyyteen perustuva arvio
Sosiaalisen vasteen kartoittaminen	ei vaadita	vapaaehtoinen	vaaditaan	vaaditaan
Indusoidusta seismisyydestä tiedottaminen	ei vaadita	vaaditaan	vaaditaan	vaaditaan
Kaksisuuntainen sitoumus *	ei vaadita	vapaaehtoinen	vaaditaan	vaaditaan
Vakuutus ja vastuu	ei vaadita	vaaditaan	vaaditaan	vaaditaan
Rakenteiden vahvistus	ei vaadita	vapaaehtoinen	vapaaehtoinen	harkittava
Seisminen valvonta	ei vaadita	yksi asema	valvontaverkko	valvontaverkko
Liikennevalo-järjestelmä	ei vaadita	vapaaehtoinen	pakollinen TLS	pakollinen mukautuva ATLS

**ISSN 0357-3060**  
**ISBN 978-952-10-9596-2 (PDF)**  
**Helsinki 2019**