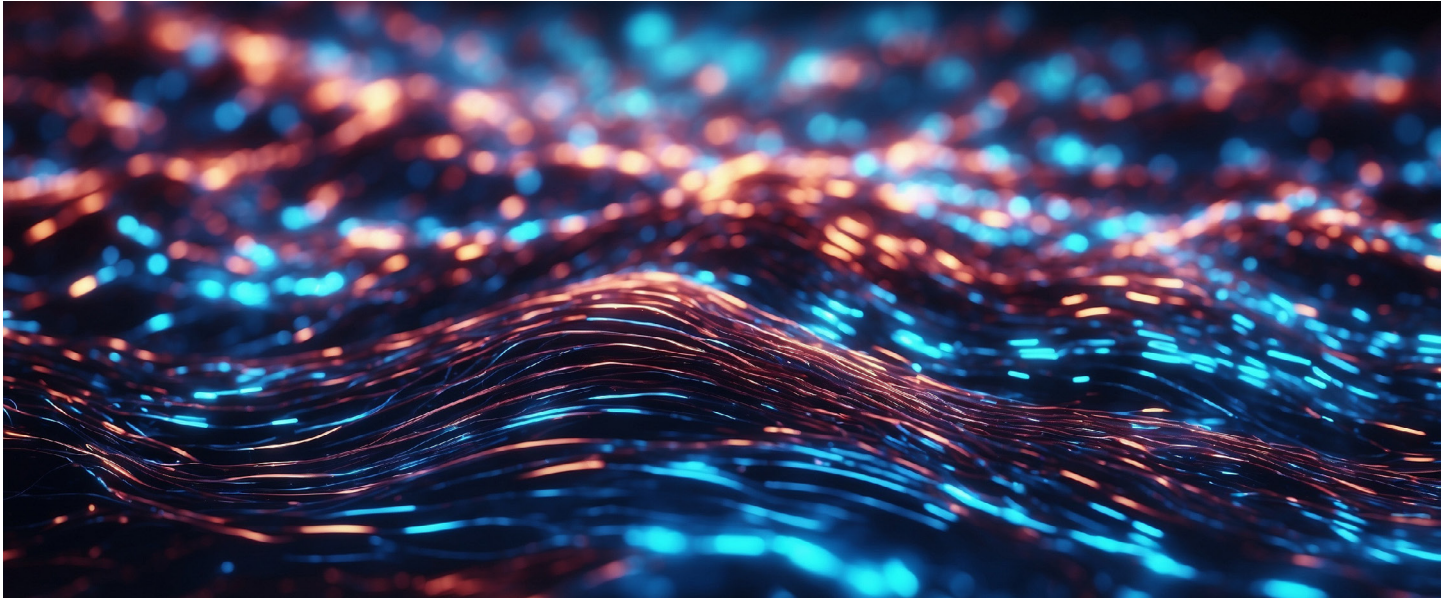




Geotieteet luovat vakaan perustan energiasiiirtymälle

Energiantuotantojärjestelmän siirtymä kohti puhdasta energiaa edellyttää toimia useilla aloilla. Geologisella tutkimuksella on tässä ratkaiseva merkitys, sillä se mahdollistaa esimerkiksi geotermisen energian hyödyntämisen ja sen avulla voidaan löytää uusia puhtaan energian lähteitä, kuten luonnonvety. Geologisella osaamisella varmistetaan myös, että tarvittava infrastruktuuri, kuten uudet voimalaitokset, energian maanalainen varastointi ja ydinjätteen loppusijoituspaikat rakennetaan vankalle pohjalle.

Miksi maanalaisen ympäristön tuntemus on tärkeää?

Suomella on vuosikymmenten kokemus maanalaisen ympäristön hyödyntämisestä energiateollisuuden tarpeisiin. Geologinen asiantuntemus on avainasemassa, kun optimoidaan luonnonvarojen käyttöä ja hyödynnetään maanalaisia resursseja eri tarkoituksiin. GTK:n toiminta edistää energiasiiirtymää keskittymällä seuraaviin toimintoihin:

- **Geoterminen energia ja kaasuvarojen etsintä**
- **Maanalaiset energiavarastot**
- **Ydinvoimalaitosten turvallinen sijoittelu sekä radioaktiivisen jätteen loppusijoitus**
- **Geologisten energiaratkaisujen suunnittelu ja kehittäminen**
- **Kriittisten raaka-aineiden saatavuus ja kiertotalous (Katso erilliset politiikkasuositukset)**

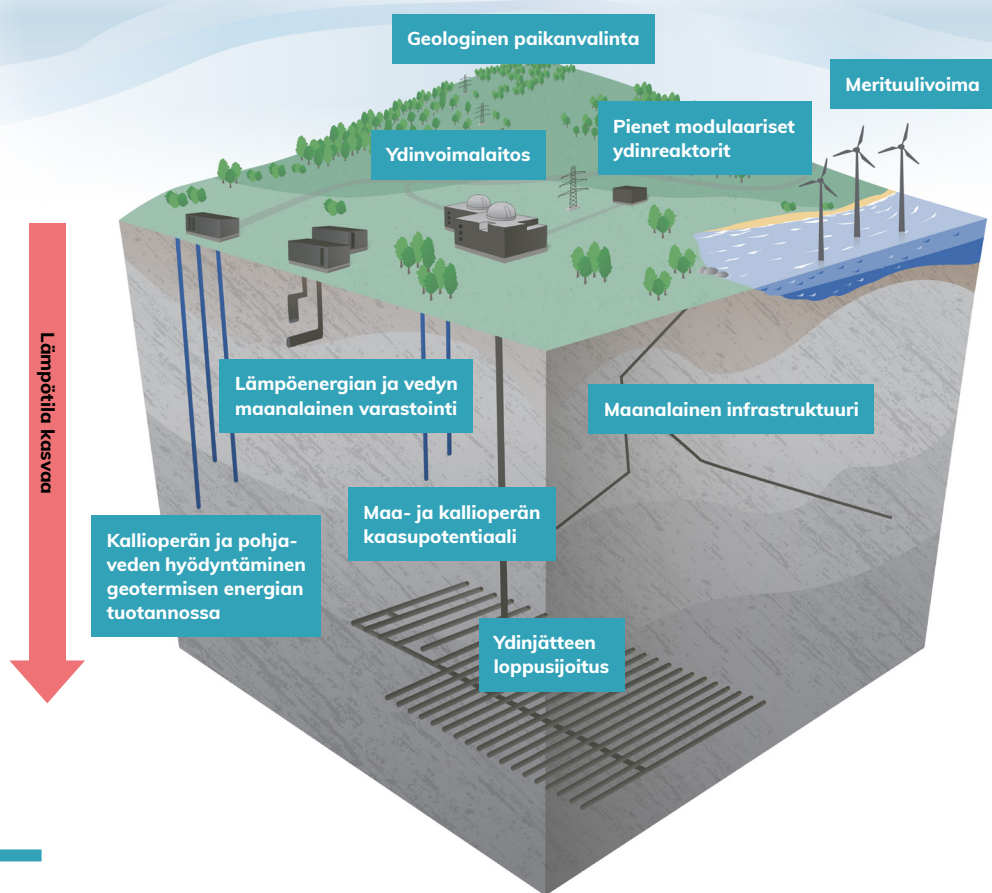
Keskeinen haaste on saada tarkkaa tietoa maanalaisista olosuhteista, usein jopa kilometrien syvyydestä.

Eri ominaisuuksien, kuten kallioperän rakoilun, pohjaveden kierron ja lämpötilan vaihtelun, tutkiminen pintakerroksissa ja syvemmillä kallioperässä voi olla monimutkaista ja vaikeatulkintaista. Myös Suomen ikivanha ja monimuotoinen kallioperä vaikeuttaa tutkimuksia. Edellä mainittu toiminta edellyttää, että perehdymme yhä paremmin maanlaiseen ympäristöön, tutkimme geologisia muodostumia, kivilajeja, sedimenttejä ja pohjavettä. Lisäksi on tärkeää pystyä mallintamaan maankamaraa ja siinä tapahtuvia prosesseja, jotta voidaan arvioida uusien energiainfrastruktuurihankkeiden toteuttamiskelpoisuutta tai optimoida jo olemassa olevia rakenteita.

Tässä politiikkasuosituksessa esitelty GTK:n tutkimus edistää näitä YK:n kestävän kehityksen tavoitteita.



Energia ja maanalainen ympäristö



Nykytilanne

Geotermisen energia ja kaasuvarojen etsintä

Geotermisen energia on ollut tärkeä osa Suomen energijärjestelmää 1990-luvun lopulta lähtien. Varhaisesta käyttöönotosta huolimatta **Suomen geotermisestä potentiaalista on** hyödynnetty vain murto-osa. Esimerkiksi Suomen maaperän ylimmät 300 metriä voisivat nykyisellä lämmitysenergian kulutuksella tuottaa riittävästi lämmitysenergiaa seuraavaksi 25 000 vuodeksi. Geotermisen energian hyödyntämisessä on siis valtavasti potentiaalia, mikä on ratkaisevan tärkeää maan energiatulevaisuuden kannalta.

Suomessa valtaosa geotermistä energiaa lämmitykseen hyödyntävistä uusista rakennuksista tukeutuu tällä hetkellä perinteisiin maalämpöjärjestelmiin, ja syvemmät geotermiset hankkeet ovat harvassa.

Ala kehittyy kuitenkin kohti suurempia geoenergiakohteita ja alueverkkojärjestelmiä, mikä tulee tekemään geotermisestä energiasta nykyistä merkittävämmän tekijän Suomen lämmitysenergiantuotannossa.

Samanaikaisesti luonnonvedyn ja muiden kaasuvarojen etsintä lisääntyy. Toiveena on, että nämä luonnonvarat edistäisivät puhdasta energiantuotantoa. Maankamaran luonnonkaasujen tieteellinen tuntemus on olennaista energiasiirtymän kannalta mutta edellyttää perustutkimusta tietämyksen lisäämiseksi.

Maanalaiset energiavarastot

Maanalaiset energiavarastot ovat kriittisessä asemassa mahdollistaen **energian tuotannon ja kysynnän tasapainottamisen**.

Maanalaisia energiavarastoja kehitetään Suomessa nopeasti. Edistys näkyy uusina lämpöenergian varastointijärjestelminä, jotka tarjoavat kustannustehokkaita ratkaisuja mm. rakennusten jäähdytykseen ja hukkalämmön varastointiin. Maahan varastoitua lämpöä voidaan hyödyntää lämmitykseen kylminä vuodenaikoina. Lisäksi maanalaisia vetyvarastoja kehitetään parhailaan. Edistysaskeleet vaikuttavat merkittävältä Suomen energiastrategian kannalta, kun tehokkaiden energiavarastojen kysyntä kasvaa tulevaisuudessa.

Ydinvoimalaitosten turvallinen sijoittaminen ja ydinjätteen loppusijoitus

Suomi on ollut ydinjätteen maanalaisen loppusijoituksen tutkimuksen kärkimaita yli 40 vuotta. Loppusijoitus edellyttää huolellista hallintaa pitkällä aikavälillä.

Mahdollisten paikkojen geologisen vakauden tuntemus on ratkaisevan tärkeää jätteen loppusijoituksen lisäksi myös pintainfrastruktuurin sijoittelun kannalta. Tällaisia ovat muun muassa ydinvoimalaitokset.

Tällä hetkellä matala- ja keskiaktiivista jätettä loppusijoitetaan Loviisan ja Olkiluodon puolisyviin kallioluoliin. Käytetyn ydinpolttoaineen syvän geologisen loppusijoituksen odotetaan alkavan lähitulevaisuudessa Posiva Oy:n hallinnoimassa Olkiluodossa, mikä on merkittävä edistysaskel Suomen ydinjätehuollossa.

Myös keskustelu pienten modulaaristen ydinreaktoreiden (SMR) hyödyntämisestä osana hallituksen energiasiirtymän ratkaisuja kiihtyy. Tällaiset reaktorit edellyttävät kuitenkin huolellista suunnittelua, tietoa maanalaisista olosuhteista sekä maanalaisten tilojen suunnittelua. Laitosten sijoittamisen perusteiden kehittäminen sekä reaktoreiden tuottaman jätteen käsittelyyn ja loppusijoitukseen liittyvät kysymykset ovat edelleen haasteellisia. Geotieteen keinoin voidaan tehdä kustannustehokkaita ja seismisesti turvallisia suunnitelmia reaktoreiden sijoittamiseen esimerkiksi tunnistamalla vältettäviä kallioperän rakenteellisesti heikkoja alueita.

Geologisten energiaratkaisujen suunnittelun ja kehittämisen tukeminen

Uusien energiainfrastruktuurihankkeiden suunnittelussa ei aina aseteta geologisia tekijöitä etusijalle niiden merkityksestä huolimatta. **Energiainfrastruktuurihankkeiden seurantaprosessiin on sisällytettävä enemmän geologisia kriteerejä, jotta voidaan optimoida kohteiden valintaa ja turvallisuutta sekä varmistaa Suomen energiajärjestelmien vakaus ja kestävyys.**

Tämä edellyttää myös älykkäämpää aluesuunnittelua, koska maanalaiset ympäristöt voivat vaihdella suuresti jopa suhteellisen pienellä alueella. Älykäs sijoittelu säästää lisäksi resursseja ja mahdollistaa sujuvamman rakentamisen. Nämä näkökohdat tulisi huomioida kunnissa suunnitteluvaiheessa sekä tilojen rakentamista ja käyttöä suunnittelevissa yrityksissä taloudellisen ja sosiaalisen toteuttamiskelpoisuuden arviointivaiheessa.

Esimerkiksi tuulipuistojen jatkuva kehitys on luonut painetta kriittisten infrastruktuurien kehittämiseen merellä.

Maanalaisten ominaisuuksien geologinen tuntemus on ratkaisevaa kestävän ja turvallisen rakennetun ympäristön varmistamiseksi niin merellä kuin maalla.

SMR

Monet suomalaiset kunnat pitävät pieniä modulaarisia ydinreaktoreita (SMR) mahdollisina tulevana kaukolämmön energianlähteenä. Myös sähköä tuottavia pieniä modulaarisia ydinreaktoreita suunnitellaan maailmalla, ja muutamia on jo rakennettukin. Tällaiset reaktorit voivat tuottaa energiaa lähempänä käyttäjiä perinteisiä ydinvoimalalaitoksia joustavammin. Reaktorien koko vaihtelee, ja niistä suurimmat tuottavat vastaavan määrän energiaa kuin pienimmät perinteiset voimalaitokset. Niiden mallit vaihtelevat, joten myös loppusijoitusta vaativaa ydinjätettä syntyy eri muodoissa. Erikokoisten polttoaineenippujen vuoksi osalle pienten modulaaristen ydinreaktoreita tuottamasta jätteestä harkitaan vaihtoehtoisia loppusijoitustapoja. Yksi esimerkki on radioaktiivisen jätteen loppusijoitus syvään porakaivoon (DBD). Tällaista loppusijoitusta on jo suunniteltu muun tyyppiselle radioaktiiviselle jätteelle esimerkiksi Male-siassa, mutta sen toteuttamiskelpoisuudesta korkea-aktiiviselle jätteelle ei ole varmuutta.

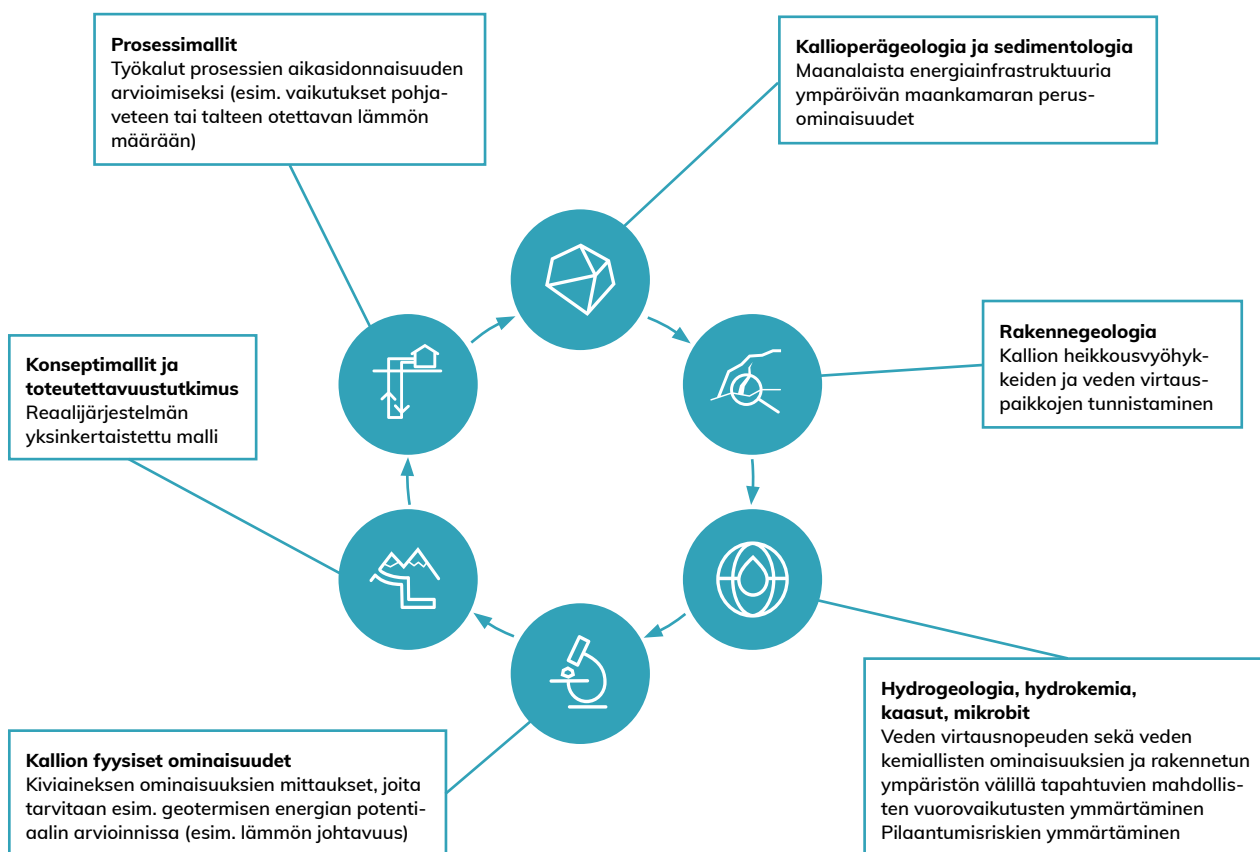
Luonnonvety

Luonnonvetyä (molekulaarinen vety, H₂) esiintyy Suomen kallioperässä pääasiassa syvään pohjaveteen liuenneena kaasuna, joka sisältää myös muita liuenneita kaasuja, kuten metaania, heliumia ja typpeä. Vetyä voi muodostua joko rautaa sisältävien mineraalien reaktioissa (jotka vaativat lämpöä) tai veden radiolyysistä (prosessi, joka liittyy kallioperässä luonnostaan esiintyvien radioaktiivisten alkuaineiden hajoamiseen). Toistaiseksi Suomessa tai maailmalla ei ole tehty erillisiä kartoituksia, ja potentiaalisten resurssien todellinen luonne on pitkälti tuntematon.

Maanalaisen ympäristön tutkimuksen merkitys kasvaa sekä maalla että merellä

Geotieteet ovat olennainen osa maanalaisten ympäristöjen ymmärtämistä mallinnusta varten, jonka avulla saadaan kokonaisnäkemyks energiajärjestelmistä ja voidaan arvioida energiantuotannon, turvallisuuden ja energainfrastruktuurin pitkän aikavälin suorituskykyä. Tähän tarvitaan mallintamista, joka ottaa huomioon

vaihtelut lämpötiloissa, kallion mekaanisissa ominaisuuksissa, veden liikkeissä, sekä kemiallisessa koostumuksessa (ja joskus jopa mikrobiologisissa prosessissa).



Esimerkki työnkulusta geologisten muodostumien tutkimiseksi, mukaan lukien niiden fyysiset ja kemialliset ominaisuudet, jota käytetään prosessimallien kehittämiseen. Prosessimalleja käytetään dynaamisen mallinnuksen perustana energiasiirtymähankkeissa.

Merkittäviä uusia sovelluksia yhä syvemmällä maankamarassa

Geotermisen energia: hyödyntämätön potentiaali

GTK:n geotermisen energian potentiaalikarttojen perusteella Suomen maankamara tarjoaa käytännössä rajoittamattoman energialähteen, minkä vuoksi on tärkeää tehostaa tutkimusta ja optimoida geotermisen energian käyttöä. Tällä hetkellä tutkitaan erityisesti mahdollisuuksia kasvattaa maankamaran lämmitystehon määrää, jolla voitaisiin tulevaisuudessa tukea lämmön tuottamista aluelämpöverkkoihin. Ymmärrys ja osaaminen

syvän kallioperän geotermisen energian hyödyntämisestä on kasvanut viime vuosina merkittävästi.

Luonnonvety uutena energiaratkaisuna

Luonnonvety on kansainvälisesti lupaava energialähde. GTK on myös koonnut maakaasumittauksista alustavan yhteenvedon, mutta Suomen maanalaisen ympäristön luontaisen vetypotentiaal kokonaisvaltaiseen arviointiin tarvitaan kiireellisesti lisätutkimuksia.

Pienten modulaaristen ydinreaktoreiden (SMR) mahdollinen käyttöönnotto

Käyttöönnotto edellyttäisi sijoituspaikkojen määrittelyä niin, että ne täyttävät erilaiset sosioekonomiset ja tieteelliset kriteerit, mukaan lukien geologisten olosuhteiden ja alueen yleisen vakauden tuntemus. Suomessa voidaan hyödyntää olemassa olevaa osaamista, kun seulotaan sopivia kalliomassoja.

Ydinjätteen vaihtoehtoiset loppusijoitusmenetelmät (esim. loppusijoitus kilometrejä syvään porakaivoon)

Pieniä modulaarisia ydinreaktoreita kehittävä yritys ovat esittäneet vaihtoehtoisia ratkaisuja ydinjätteen loppusijoittamiseen. Tavoitteita on arvioitava tarkastelemalla perusteellisesti tällaisten laitosten toteutettavuutta ja vertaamalla niitä perinteiseen geologiseen ydinjätteen loppusijoittamiseen. Tämä vaatii geologisia tutkimuksia aiempaa syvemmällä ja uusien mallintamistapojen kehittämistä. Lisäksi on otettava huomioon pitkän aikavälin turvallisuuskäsitteet.

Ydinjätteen geologisen loppusijoituksen optimointi

Loppusijoitusohjelmien kehittämisen kannalta tämä on kansainvälisesti nouseva tutkimusala. Tarvitaan uudenlaisia geologisia tutkimuksia, jotka selvittävät esimerkiksi mahdollisten uudenlaisten tiivistemateri-

aalien toimivuutta. Tällaisia voisivat olla esim. erilaiset savi/kiviainesmateriaalit tai uudenlaiset vähähiilidioksidiset betonit.

Vuorovaikutus muun infrastruktuurin kanssa

Maanalainen toiminta on aina vuorovaikutuksessa muun suunnitellun maanlaisen infrastruktuurin, kuten kaivostoiminnan tai malminetsinnän kanssa.

Vuorovaikutusta on hallittava huolellisesti, jotta voidaan välttää ristiriidat ja hyödyntää luonnonvaroja kestäväällä tavalla. Esimerkkinä mahdollisia päällekkäisiä intressejä sisältävästä tutkimusalueesta on syvemmällä sijaitsevat pohjavesivarannot. Maanalaista toimintaa harjoittavia yhdistää tarve kehittää menetelmiä syvän kallioperän karakterisointiin, joten tutkimuksen yhteydessä voi syntyä merkittäviä synergiaetuja.

Kokonaisvaltainen ymmärrys Suomen maankamarasta maalla ja merellä on ratkaisevan tärkeää puhtaan energian siirtymisessä ja geologisten luonnonvarojen vastuullisessa käytössä. On pystyttävä hankkimaan monialaista tietoa maankamaran tutkimuksen eri osa-alueilta (työnkulun esimerkkikuva). Hankittua tietoa voidaan hyödyntää edelleen niin Suomessa kuin muualla maailmassa esimerkiksi malleissa, joilla pyritään kuvaamaan energiajärjestelmien käyttäytymistä vuosikymmenien (esim. energian varastointi) tai jopa vuosituhansien (esim. ydinjätteen loppusijoitus) aikaväleillä.

Miten geotieteillä voidaan edistää energiasiirtymää tehokkaimmin?

Maankamaran tehokkaaseen hyödyntämiseen suositellaan seuraavia toimia:

Kehitetään geotieteellistä asiantuntemusta. Vahvistetaan tutkimusta ja asiantuntemusta kriittisillä aloilla, kuten geotermisen energian ja maanalaisen varastoinnin tutkimuksessa. Varmistetaan, että Suomi on edelleen edelläkävijä kestävässä energiaratkaisuissa.

Tuetaan innovatiivisia energian varastointiratkaisuja. Keskitytään energian maanalaisten varastointimenetelmien kehittämiseen erityisesti lämmön ja vedyn osalta, jotta voidaan taata vakaa energiahuolto.

Panostetaan edistyneisiin geologisiin arviointeihin liittyen energiainfrastruktuurin paikan valintaan. Käytetään ja kehitetään alueellisen geologian uusimpia tekniikoita turvallisuuden arviointiin, etenkin valitessa paikkoja ydinvoimaan liittyen (sekä muihin tiukoja turvallisuusstandardeja edellyttäviin energiahankkeisiin).

Investoidaan luonnonkaasuvarojen etsintämenetelmiin, kartoitukseen ja mahdolliseen mallinnukseen. Systemaattiset tutkimukset ja kartoitukset ovat kriit-

tisen tärkeitä, jotta Suomen luonnonvetypotentiaalia voidaan hyödyntää.

Edistetään ydinjätehuollon turvallisuutta ja toteutettavuutta. Pitkän aikavälin turvallisuutta, ymmärryksen lisäämistä ja ydinjätehuollon optimointia edistetään parhaiten tukemalla geologista tutkimusta.

Huolehditaan yhteistyöstä ja tietämyksen jakamisesta. Vahvistetaan tutkimuslaitosten, teollisuuden ja hallinnon kumppanuuksia edistämään innovaatioita ja ymmärrystä maankamaran geologisista sovelluskohteista.

Huomioidaan erilaiset yhteiskunnalliset intressit, joita maanalaiseen tutkimukseen liittyy. Yhteiskunnallinen kiinnostus maankamaran tutkimukseen kasvaa ja kohdistuu yhtä lailla maanpintaa lähellä oleviin kuin kallioperässä kilometrien syvyydessä sijaitseviin ympäristöihin. Tutkimus yhdistää ja edistää erilaisia luonnonvarojen hyödyntämistapoja liittyen esimerkiksi mineraaleihin, pohjaveteen ja energiaan. Tämä tarjoaa mahdollisuuksia niin synergiaan (esim. pohjavesienergia) kuin ristiriitoihin (esim. jätteen sijoittaminen ja raaka-aineiden louhinta) eri käyttötapojen välillä.

Lähteet ja lisätiedot

GTK:n tutkimuksen painopisteet ja politiikkasuositukset

Tietoa energiasiirtymästä ja energiasiirtymään liittyvät tutkimusprojektit

Tekijät

Heini Reijonen, johtava asiantuntija
heini.reijonen@gtk.fi

Teppo Arola, johtava asiantuntija
teppo.arola@gtk.fi

GTK:n tutkimusuutiset

- [GTK julkaisi ensimmäisen kartta-aineiston geologisen vedyn mittaustuloksista Suomessa](#)
- [Merenpohjan rakennettavuusominaisuuksien selvittäminen tukee meritulivoiman suunnittelua](#)
- [Geologinen osaaminen ydinenergiatuotannon mahdollistajana](#)
- [Geologia vetytalouden murroksessa](#)
- [Syvän geotermisen energian tutkimus ansaitsee uuden hankkeen, uskoo GTK:n tutkija Alan Bischoff](#)
- [Suomen maankamarassa on 300 metrin syvyyteen asti sitoutuneena niin paljon lämpöä, että siitä riittäisi kaukolämpöä yli 25 000 vuodeksi. Miksei tällä lämmöllä ole jo ratkaistu kaikkea tarvitsemaamme lämmöntuotantoa?](#)
- [Maankamaran tuntemus on energiaturvallisuuden ydin](#)

Vertaisaisarvioidut artikkelit

- Bischoff A., Heap M. J., Mikkola P., Kuva J., Reuschlé T., Jolis E. M., Engström J., Reijonen H. & Leskelä T. 2024. [Hydrothermally altered shear zones: A new reservoir play for the expansion of deep geothermal exploration in crystalline settings](#). Geothermics, 118, 102895.
- Chudasama B., Ovaskainen N., Tamminen J., Nordbäck N., Engström J. & Aaltonen I. 2023. [Automated mapping of bedrock-fracture traces from UAV-acquired images using U-Net convolutional neural networks](#). Computers & Geosciences, 105463.
- Hakala P., Vallin S., Arola T., Martinkauppi I. 2021. [Novel Use of the Enhanced Thermal Response Test in Crystalline Bedrock](#). Renewable Energy 182 (2022), 467–482.
- Korhonen K., Markó A., Bischoff A., Szijártó M. & Mádl-Szőnyi J. 2023. [Infinite borehole field model - a new approach to estimate the shallow geothermal potential of urban areas applied to central Budapest, Hungary](#). Renewable Energy, 208, 263–274.
- Malinowski M., Putkinen N., Brodic B., Laakso V., Koskela E., Heinonen S., Engström J. & Paananen M. 2023. [P- and S-wave Seismic Imaging of a Complex Aquifer System in Kurikka, Western Finland](#). First Break, 41(8), 67–72.
- Majuri P., Arola T., Kumpulainen A., Vuorisalo T. 2020. [Geoenery permits in the Finnish regional administration – Contradictory procedures caused by inadequate judicial regulation](#). Renewable Energy 168 (2021), 151–159.
- Nordbäck N., Ovaskainen N., Markovaara-Koivisto M., Skyttä P., Ojala A., Engström J. & Nixon C. 2023. [Multiscale mapping and scaling analysis of the censored brittle structural framework within the crystalline bedrock of southern Finland](#). Bulletin of the Geological Society of Finland, 95(1), 5–32.

- Nordbäck N., Skyttä P., Engström J., Ovaskainen N., Mattila J. & Aaltonen I. 2024. [Mesoproterozoic Strike-Slip Faulting within the Åland Rapakivi Batholith, Southwestern Finland](#). Tektonica, 2(1), 1–26.
- Ovaskainen N., Skyttä P., Nordbäck N. & Engström J. 2023. [Detailed investigation of multi-scale fracture networks in glacially abraded crystalline bedrock at Åland Islands, Finland](#). Solid Earth, 14(6), 603–624.
- Piipponen K., Soesoo A., Arola T., Bauert H. & Tarros, S. 2024. [Impacts of groundwater flow on borehole heat exchangers: lessons learned from Estonia](#). Renewable Energy.
- Piipponen K., Martinkauppi A., Korhonen K., Vallin S., Arola T., Bischoff A. & Leppäharju N. 2022. [The deeper the better? A thermogeological analysis of medium-deep borehole heat exchangers in low-enthalpy crystalline rocks](#). Geothermal Energy 10, 12.
- Reijonen H., Alexander W. & Norris S. 2023. [Resilience in knowledge management – the case of natural analogues in radioactive waste management](#). Process Safety and Environmental Protection.
- Reijonen H., Al-ani T., Elminen T., Kuva J., Issukka K. & Lamminmäki R. 2024. [Fracture smectite in bedrock at Kivetty and Romuvaara sites, Finland as natural analogues for nuclear waste repository buffer](#). Geoenergy, 2(1).

Muut raportit ja julkaisut

- Arola T., Martinkauppi A., Piipponen K., Vallin S. & Wiberg M. 2024. [Keskisyvän ja syvän geotermisen energian hankkeet Suomessa](#). Geologian tutkimuskeskus. Tutkimustyöraportti 20/2024.
- Cyz M., Arola T., Heinonen S. & Malinowski M. 2024. [AI-assisted seismic data analysis for geothermal site investigation in crystalline rock environment](#). Final report. Project report. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Arola T. & Wiberg M. 2022. [Geothermal Energy Use, Country Update for Finland](#). Conference: European Geothermal Congress 2022 Berlin, Germany. 17–21 October 2022.
- Arola T., Luoma S., Korhonen K., Jarva J., Leppäharju N. & Hagström M. 2021. [Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu](#). Geologian tutkimuskeskus. Tutkimustyöraportti 17/2021.
- Arola T. 2019. [Deep geothermal energy utilisation in Finland – total madness or possibility for successful business](#). UNINE- University of Neuchâtel. Technical report. Exploration & Development of Deep Geothermal Systems – CAS DEEGEOSYS 4th edition 2018–2019
- Arola T., Kauppila K. & Vallin S. 2020. [Pohjavesienergian hyödyntäminen – Turku Skanssin alue](#). Työraportti 66/2020. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Hietava J., Aaltonen I. & Reijonen H. 2023. [Geological siting considerations for small modular reactors and related nuclear waste disposal concepts in Finland](#).
- Hietava J. & Aaltonen I. 2024. [Deep borehole disposal scenario and spent nuclear fuel facility siting in the SMR framework in Finland](#).
- Neupauer R.M., Okkonen, J. & Tyson, E. 2023. [Prevention of Thermal Pollution of Groundwater near Open Loop Geothermal Energy Systems](#). World Environmental and Water Resources Congress 2023: Adaptive Planning and Design in an Age of Risk and Uncertainty, pp. 140–150.



Geologian tutkimuskeskus

Ratkaisuja vauhdittamaan siirtymää kestävään, hiilineutraaliin maailmaan.

[gtk.fi](#)

[Facebook](#) | [LinkedIn](#) | [Instagram](#)

Geologian tutkimuskeskus GTK tuottaa puolueetonta tutkimustietoa yhteiskunnalle ja yrityksille vauhdittamaan siirtymää kestävään, hiilineutraaliin maailmaan. GTK:n yli 400 asiantuntijaa ovat erikoistuneet mineraalitalouteen, kiertotalouteen, energia-, vesi- ja ympäristökysymyksiin sekä digitaalisiin ratkaisuihin. GTK on työ- ja elinkeinoministeriön alainen tutkimuslaitos, joka toimii Suomessa ja maailmalla.