Geotieto tukee kestävää luonnonvarojen kartoitusta ja hallintaa

Ajantasainen ja korkealaatuinen geotieto on ratkaisevassa asemassa vastattaessa ilmastonmuutoksen, luonnonvarojen kestävän käytön ja hallinnan, ympäristön seurannan ja maankäytön suunnittelun tapaisiin maailmanlaajuisiin haasteisiin. Paikkatiedot ja niihin liittyvät digitaaliset ratkaisut luovat pohjan tietoon perustuvalle päätöksenteolle ja kustannustehokkaille prosesseille. Geotiedon kerryttäminen ja käyttö rikastavat aiemmin kerättyä aineistoa ja luovat uutta tietoa. Mitkä ovat keskeiset painopisteet geotiedon edistämiseessä, joiden avulla Suomi voi vahvistaa asemaansa globaalien edelläkävijöiden joukossa paikkatietoon perustuvien innovaatioiden ja huipputeknologian tarjoamien uusien lähestymistapojen tuottajana?

Innovatiiviset geotiedon ratkaisut hyödyttävät yhteiskuntaa

Suomessa on pitkää kokemusta ja osaamista geotiedon keräämisestä, geotietoinfrastruktuurin kehittämisestä ja ylläpidosta sekä digitaalisesti käytettävästä ja hallinnoitavasta geotiedosta. Näiden ansiosta Suomella on maailmanlaajuisesti vahva asema erityisesti mineraalisektorilla, mutta myös vesihuollossa, maankäytön suunnittelussa ja ympäristön tilan seurannassa.

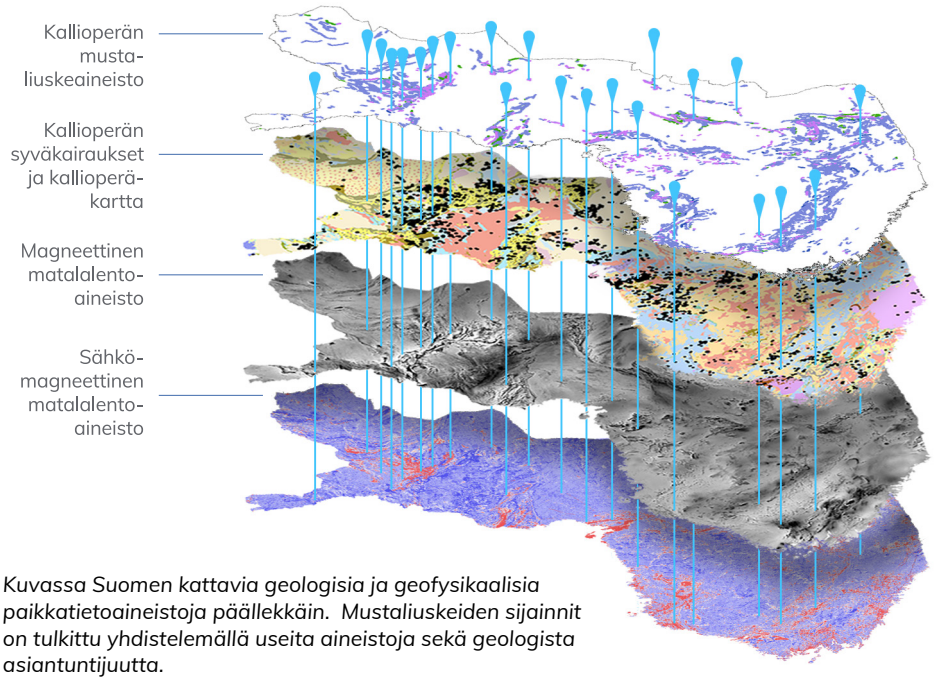
Julkinen geotieto mahdollistaa tietoon perustuvat päätökset ja suunnittelun, mikä tukee kestävää kehitystä, entistä turvallisempaa infrastruktuuria ja talouskasvua.

Geologian tutkimuskeskus GTK hallinnoi laajoja geologisia aineistokokonaisuuksia, kuten:

- **Geologiset tiedot**. Tiedot kallioperästä, maaperästä, litologisista ja jäätikkösyntyisistä muodostumista ja rakenteista sekä mineraaliesiintymistä.
- **Geofysikaaliset tiedot.** Esimerkiksi seismiset, magneettiset ja gravimetriset mittaukset.
- **Ympäristötiedot ja geokemialliset tiedot**. Tiedot kallioperän, maaperän, turpeen sekä veden kemiallisesta koostumuksesta.
- **Kaukokartoitus-, lähikartoitus- ja seurantatiedot**. Tiedonkeruu satelliiteilla, ilmakuvauksilla, drooneilla ja maa-antureilla.

Tässä politiikkasuosituksessa esitellään GTK:n tutkimusta, joka edistää YK:n kestävän kehityksen tavoitteita.

Tietoon perustuva päätöksenteko paikkatietoaineistoja ja asiantuntijuutta yhdistämällä



Kuvassa Suomen kattavia geologisia ja geofysikaalisia paikkatietoaineistoja päällekkäin. Mustaliuskeiden sijainnit on tulkittu yhdistelemällä useita aineistoja sekä geologista asiantuntijuutta.

Paikkatietoaineistojen saatavuus, geologinen asiantuntemus ja digitaaliset ratkaisut luovat alustan, joka mahdollistaa tietoon perustuvan päätöksenteon ja kustannustehokkaan luonnonvarojen hallinnan.

Geologisen tiedon kartuttaminen ja hyödyntäminen rikastavat olemassa olevia aineistoja ja luova uutta tietoa.

Tietoaineistojen yhdistäminen ja tekoälyyn perustuva data-analyysi luovat uusia mahdollisuuksia sekä edistävät innovaatioita ja tehokkuutta. GTK:n tutkimustoiminnan painopisteitä geotiedon saralla ovat:

- Geotiedon keräämisen, hallinnan ja jakelun nykyaikaiset ratkaisut
- Uudet tiedonkeruun ja tulkinnan menetelmät
- Globaaleja geostandardeja ja tietomalleja hyödyntävien kansallisten geologisten aineistokokonaisuuksien tuottaminen
- Innovatiivisten ratkaisujen kehittäminen data-analyysiin ja mallinnukseen
- Tekoälypohjaisten koneoppimisen ja data-analyysin menetelmien kehittäminen ja hyödyntäminen.

Laadukas tutkimustoiminta edellyttää vahvoja kumppanuuksia, yhteisiä ponnisteluja tiedon tuottamiseksi ja osaamisen kehittämiseksi, tehokkaita ja turvallisia tiedonhallinnan ja jakelun järjestelmiä, suurteholaskentaympäristöjen käyttöä ja korkeatasoista osaamista. Geologisen tiedon elinkaari on pitkä, ja siksi kansallisen geotietovarannon kartuttaminen, pitkäaikainen säilyminen, ja pitkäjänteinen jatkojalostaminen on elintärkeää.

Kehittyneiden geotieteellisten ratkaisujen tarve

Kehittyvät teknologiat, entistä tarkemman geotiedon tarve sekä laatu- ja turvallisuusstandardien tiukentuminen edellyttävät olemassa olevien tiedonkeruu-, hallinta- ja analyysimenetelmien jatkuvaa kehittämistä. Tekoälyyn ja koneoppimiseen tukeudutaan data-analyysissä ja tiedon tuottamisessa yhä enemmän. Tämän vuoksi on otettava käyttöön myös uusia tiedonkeruun teknologioita, hyödynnettävä kaukokartoituksen ja etätunnistuksen menetelmiä, kuten hyperspektriskannausta (ks. tietolaatikko) sekä kehitettävä geotietoinfrastuktuuria. Nämä työkalut mahdollistavat entistä tarkemman ja tehokkaamman kartoituksen ympäristö-, maankäyttö ja mineraalisektoreiden tarpeisiin.

Tekoäly ja koneoppiminen. Tekoälyyn perustuvan data-analyysin hyödyntäminen mahdollistaa laajamittaisen paikkatietojen käsittelyn ja tulkinnan entistä tarkemmin ja tehokkaammin. Nämä sovellukset auttavat esimerkiksi geologeja ja tutkijoita analysoimaan geotietoa merkittävän mineraalipotentiaalin omaavien alueiden tunnistamiseksi.

Kaukokartoitus ja etätunnistus. Kehittyneet mittaus- ja kuvantamistekniikat yhdistettynä satelliiteissa, drooneissa ja laboratorioissa käytettäviin laitteisiin parantavat kykyä tuottaa reaaliaikaista ja tarkkaa geotietoa erilaisissa ympäristöissä ja eri mittakaavoissa. Tämä on tärkeää muun muassa kaivostoiminnan ja ympäristön tilan seurannan kannalta.

Yhdenmukaistetut geologiset tietomallit. Harmonisoitujen tietoaineistojen kehittäminen hyödyntäen globaaleja standardeja ja tietomalleja edistää geologisten tietojen yhteensopivuutta ja käytettävyyttä. Uudet geologiset 3D-mallit antavat tietoa entistä syvemmältä maankuoresta.

Hyperspektrikuvantaminen

Hyperspektrikuvantaminen mahdollistaa tietojen keräämisen erilaisista materiaaleista, kuten mineraaleista ja kivistä. Tiedot kerätään spektrometreillä, joiden koko vaihtelee käsikäyttöisistä laitteista satelliitteihin.

Teknologia perustuu pinnoista heijastuvan tai säteilevän valon havainnointiin. Hyperspektrikuvantamisessa tietoja kerätään sadoilla rinnakkaisilla kaistoilla, mikä mahdollistaa mineraalien erilaisten ominaisuuksien havaitsemisen.

Geologiassa hyperspektriteknologiaa voidaan käyttää kivien mineralogian ja mineraalikemian tunnistamiseen. Siksi tekniikka on erityisen hyödyllinen kairausnäytteiden tutkimisessa. Parhaassa tapauksessa teknologia mahdollistaa yleisten mineraalien tunnistamisen kairasydännäytteestä.

Kerättyjä aineistoja voidaan tulkita koneoppimisalgoritmeilla, jotka tarjoavat nopean ja kustannustehokkaan menetelmän kivien mineralogian ja mineraalikemian selvittämiseen.

Digitaalisen datan siirtäminen, käsittely ja jakaminen on helpompaa kuin fyysisten kivinäytteiden. GTK on kerännyt hyperspektrimenetelmällä tietoa kairausnäytteistä useissa tutkimusprojekteissa.

Askeleet kohti edistynyttä geotietoa ja innovointia

Geotiedon tuottaminen yhteiskunnan tarpeisiin on ollut yksi GTK:n päätehtävistä jo vuosikymmeniä, ja GTK:lla on pitkät perinteet geotietojen keräämisessä ja digitalisoinnissa. GTK:n hallinnoimat tietovarannot ovat ainutlaatuisia ja arvokkaita, mutta ne eivät yksinään riitä nykyajan tarpeisiin. Tarvitaan jatkuvaa kehittämistä, innovointia ja tutkimusta, ja rajallisten resurssien vuoksi yhteistyö on välttämätöntä.

GTK tuo geologisen näkökulman ja asiantuntemuksen yhteisesti tuotettuihin paikkatietoaineistoihin ja -ratkaisuihin. Olemassa olevia geotietovarantoja voidaan hyödyntää uusien ratkaisujen kehittämisessä. GTK:lla on pitkä kokemus geotietoihin liittyvän infrastruktuurin kehittämisestä ja ylläpidosta, geotiedon tulkinnasta ja analysoinnista sekä uusien tiedonkeruumenetelmien kehittämisestä.

Datan määrä kasvaa nopeasti, mikä haastaa perinteiset tavat hallinnoida ja analysoida dataa sekä käytettävissä olevat taloudelliset resurssit. GTK:n päämäärä on jatkossakin kehittää geotietoa sitä tarvitsevien käyttöön.

Innovatiiviset tiedonkeruu- ja analysointitekniikat. Tarvitaan entistä laajempaa tekoälyn, koneoppimisen, kaukokartoituksen ja muun huipputeknologian käyttöä. Tämä mahdollistaa tarkan ja skaalautuvan geotiedon tuottamista esimerkiksi mineraalipotentiaalin kartoitukseen, kaivosympäristöjen seurantaan, sekä maankäytön suunnitteluntueksi. Kartoitus- ja seurantatietojen parantamiseksi on ensiarvoista ottaa käyttöön esimerkiksi satelliittikuvia, sekä satelliitteja ja drooneja alustanaan käyttävien optisia antureita ja tutka-antureita.

Kehittynyt geotietoinfrastruktuuri. GTK:n geotietoinfrastruktuuria on kehitetty pitkään ja kehitystyö jatkuu edelleen. Verkkopalvelujen, harmonisoitujen paikkatietoaineistojen ja geologisten 2D-/3D-tietomallien jatkokehittäminen hyödyttää kaikkia geotietojen käyttäjiä. Tietoaineistojen yhteensopivuutta ja käytettävyyttä parannetaan hyödyntämällä globaaleja standardeja ja tietomalleja. Ulkoisten tietovirtojen yhdistäminen tähän infrastruktuuriin luo lisäarvoa tiedolle.

Tekoälyyn ja koneoppimiseen perustuva tiedon tuottaminen. Tiedon määrä kasvaa jatkuvasti. Sen vuoksi tekoälyä, koneoppimista ja suurteholaskentaa hyödynnetään laajamittaisten paikkatietoaineistojen tarkempaan ja nopeampaan analysointiin. Koneoppimiseen perustuvien ennustemallien sisällyttäminen reaaliaikaista päätöksentekoa tukeviin geotieteellisiin työnkulkuihin parantaa tehokkuutta. GTK on kehittänyt tekoälyyn perustuvan geologisten aineistojen käsittelyn ja analysoinnin erityisosaamista ja tätä tietämystä tulee edelleen vahvistaa.

Tutkimuksen ja tiedonkeruun ekosysteemit. On tärkeää edistää kansallista ja kansainvälistä yhteistyötä innovaatio- ja tutkimusrahoituksen saamiseksi. Tutkimuslaitosten, yritysten ja korkeakoulujen välisiä kumppanuuksia vahvistamalla voidaan rajallisia resursseja keskittää yhteisten ratkaisujen luomiseksi, uusien tiedonkeruuohjelmien edistämiseksi, yhteismitallisten aineistojen tuottamiseksi sekä osaamisen kehittämiseksi.

Edistynyttä data-analyysiä mineraaliprospektiivisuusmallinnuksen (MPM) avulla

Paikkatietojärjestelmien (GIS) ja paikkatietoihin perustuvien tiedonlouhintamenetelmien kehittyminen sekä teholaskentaympäristöjen ja laajojen digitaalisten tietoaineistojen saatavuus mahdollistavat mineraalipotentiaalin kvantitatiivisen mallintamisen ja kartoittamisen.

Mineraaliprospektiivisuusmallinnus (MPM) on yksi spatiaaliseen data-analyysiin kehitetyistä menetelmistä.

MPM-menetelmä mahdollistaa erilaisten geologisten, geofysikaalisten, geokemiallisten sekä kaukokartoitusaineistojen yhdistämisen yksittäiseksi mineraaliprospektiivisuusmalliksi. Mineraaliprospektiivisuusmallinnukseen voidaan sisällyttää myös maankäytön suunnitteluun, luonnonsuojelualueisiin ja muihin rajoitusalueisiin liittyviä tietoja.

Tällä tavoin toteutettuna menetelmä mahdollistaa etsintäalueiden ja hankkeiden entistä tarkemman rajauksen ja ennustettavuuden. Näin malminetsintä on entistä nopeampaa, kustannustehokkaampaa ja ympäristöneutraalimpaa.

Menetelmän soveltaminen edellyttää geologista asiantuntemusta ja mineraalisysteemimallinnusta, joka antaa tietoa

- malmiesiintymän muodostumiseen johtaneista geologisista prosesseista ja
- malmiesiintymään liittyviä geologisista rakenteista sekä
- kiinnostuksen kohteena olevista raaka-aineista.

MPM-prosessiin soveltuvat aineistot ja parametrit valitaan mineraalisysteemimallinnuksen perusteella. Geotiedon korkea laatu on mallintamisen kannalta ratkaisevaa: se vaikuttaa suoraan mallin laatuun. GTK:lla on pitkä kokemus ja vahva asiantuntemus MPM-menetelmien ja –sovellusten kehittämisestä. Seuraavat työkalut ovat saatavilla GTK:n verkkosivustolla, GitHub:ssa tai pyynnöstä:

- **MPM Online Tool: Verkkopohjainen sumeaa logiikkaa hyödyntävä työkalu mineraalipotentiaalimallinnukseen**
- **ArcSDM: ArcGIS -ohjelmistossa toimiva työkalu mineraaliprospektiivisuusmallinnukseen**
- GisSOM: itseorganisoituvaan karttateknologiaan perustuva valvomaton koneoppiminen ja klusterointi (ei julkinen)
- **EIS Toolkit: avoimen lähdekoodin GIS-työkalut mineraalisysteemien mallintamiseen ja mineraaliprospektiivisuusmallinnukseen**

Näitä paikkatietoanalyysin työkaluja on kehitetty julkisella kotimaisella ja kansainvälisellä tutkimusrahoituksella yhdessä johtavien tutkimus- ja tiedelaitosten sekä teollisuuden kanssa.

Suomen kansallinen geologinen viitekehys (NGFF)

GTK:n perustehtävänä on ylläpitää ja kehittää geologista tietoa kallio- ja maaperästä sekä mineraaliesiintymistä. GTK ylläpitää valtakunnallisia alueelliseen geologiaan liittyviä moniulotteisia (2D/3D/4D) tietoaineistoja ja tietokantoja sekä yhtenäistää uusia tietoja osaksi yleisesti hyväksyttyjä kansainvälisiä tietomalleja. Nämä keskeiset kansalliset geologiset aineistot ja tietomallit muodostavat Suomen kansallisen geologisen viitekehyksen (NGFF).

Yhteiset tietomallit varmistavat tietojen soveltuvuuden yhteiseen käyttöön, helpottavat tietojen keräämistä ja sisällyttämistä kansainvälisiin tietoinfrastruktuureihin. Alueellisten geologisten aineistojen ylläpitäminen edellyttää vuosikymmenten aikana kertynyttä geologista tietoa ja asiantuntemusta.

GTK kehittää uusia menetelmiä geologisten tietojen keräämiseen ja tulkitsemiseen yhdistämällä ja analysoimalla useista eri lähteistä saatujen aineistojen, kuten laserkeilausaineistot (LIDAR) ja uudet maastosta kerätyt havainnot. Tietojen tulkitsemiseen kehitetään myös tekoälypohjaisia algoritmeja. Tavoitteena on tuottaa entistä parempaa, ajantasaista geotietoa.

Perinteisten digitaalisten 2D-karttatietokantojen lisäksi GTK tarjoaa asiantuntemusta maankuoren 3D-mallintamiseen. Maankuoren ylimmän kerroksen 3D-malli julkaistiin vuonna 2023, ja tällä hetkellä GTK viimeistelee koko Suomen maankuoren 3D-mallia. Tämä on olennainen osa NGFF:ää. GTK tuottaa ja kerää tietoa myös julkaistuista kallioperän ikämäärityksistä, jotka perustuvat mineraalien sisältämien radioaktiivisten isotooppien analysointiin. Suomen kallioperän tärkeimmät kehitysvaiheet ovat suurimmaksi osaksi tapahtuneet 2800–2700 miljoonaa ja 1900–1800 miljoonaa vuotta sitten.

Alueellisen geologian asiantuntemus yhdistettynä kivilajiyksiköiden ikämäärityksiin mahdollistaa alueella vaikuttaneiden geologisten prosessien, kallioperän kehityksen ja stratigrafisen tulkinnan suuremmassa mittakaavassa. Tiettyä kivilajiyksikköä voidaan seurata maantieteellisesti laajallakin alueella.

Prekambrikallioperän rakenteen, sedimentaatioaltaiden kehityksen ja kerrostumien tutkiminen erityisesti Pohjois-Suomessa on tärkeää suurten mineraaliesiintymien vuoksi, ja se onkin nykyisin merkittävä tutkimusalue. Kansallisen geologisen viitekehyksen aineistot löytyvät Hakku-palvelusta.

Miten maksimoida julkisten paikkatietojen hyödyt?

Innovatiivisten teknologioiden, strategisen yhteistyön ja hyvien tiedonhallintakäytäntöjen avulla Suomi voi tarjota korkealaatuista geotietoa sekä siihen linkittyviä ratkaisuja julkisen sekä yksityisen sektorin toimijoille. Tämä vahvistaa omalta osaltaan kestävää kehitystä ja talouskasvua. Tämän edistämiseksi suositellaan seuraavia toimenpiteitä:

Tekoälyn ja koneoppimisen käyttö data-analyysissä ja geotietojärjestelmissä. Edistetään käytäntöjä, jotka kannustavat tekoälyn ja koneoppimisen integroimista data-analyysiin ja tiedonkeruuseen päätöksenteon tueksi.

Paikkatietostandardien yhdenmukaistaminen. Kansallisten ja globaalien standardien johdonmukainen edistäminen ja käyttö tiedonkeruussa ja –jakelussa tekee paikkatietotuotteista luotettavampia ja hyödyllisempiä.

Julkisten geotietoalustojen tukeminen. Investoiminen dynaamisiin ja reaaliaikaisiin tiedon jakelun alustoihin helpottaa ja nopeuttaa tarvittavan tiedon löytymistä ja sen käyttöön saamista.

Monialaisten kumppanuuksien edistäminen. Vahvistetaan sidosryhmien välistä yhteistyötä kestävien geotietoratkaisujen innovoinnin vauhdittamiseksi.

Geotiedon käytön edistäminen kestävässä kehityksessä. Kannustetaan kehittyneiden geotietojen käyttöön päätöksenteossa ympäristövaikutusten vähentämiseksi ja resurssien käytön optimoimiseksi.

Lähteet ja lisätiedot

GTK:n tutkimuksen painopisteet ja politiikkasuositukset

Geotiedon ratkaisut – tietoa tutkimuksesta ja tutkimusprojektit

Tekijät

Vesa Nykänen, tutkimusprofessori
vesa.nykanen@gtk.fi

Maarit Middleton, tutkimusprofessori
maarit.middleton@gtk.fi

Katja Lalli, yksikön päällikkö
katja.lalli@gtk.fi

GTK:n tutkimusuutiset

- **Kaukokartoituksen käyttö raaka-aineteollisuudessa-työpajan kuulumiset**
- **Ensimmäinen suotyyppien paikkatietoaineisto kattaa koko Suomen suot ja turvemaat**
- **Yhteiskunnan geotietohuolto on Geologian tutkimuskeskuksen perustehtävää**
- **Suomalainen tutkimuskonsortio tavoittelee tekoälyn läpimurtoa kestävässä malminetsinnässä 5,6 M€:n hankkeen avulla**
- **Hyperspektriteknologia tehostaa kairasydänten raportoinnin laatua ja tarkkuutta**
- **Kaukokartoitus- ja koneoppimisratkaisuja kehitetään kriittisten raaka-aineiden löytämiseen ja kaivosten ympäristövaikutusten tarkkailuun**
- **Uuden teknologian työkaluja ja innovaatioita malminetsintään**
- **GisSOM-ohjelmisto monimuuttuja-aineiston klusterointiin – GisSOM**
- **Euroopan komissio luokitteli uuden, ympäristöystävällisen malminetsintämenetelmän korkean tason innovaatioksi**
- **GisSOM-ohjelmisto monimuuttuja-aineiston klusterointiin – Itseorganisoituvat kartat**
- **GisSOM-ohjelmisto monimuuttuja-aineiston klusterointiin – Katsaus klusterointiin ja itseorganisoituviin karttoihin**

Vertaisarvioidut artikkelit

- Airola, A., Pohjankukka, J., Torppa, J., Middleton, M., Nykänen, V., Heikkonen, J., Pahikkala, T. 2018. **The spatial leave-pair-out cross-validation method for reliable AUC estimation of spatial classifiers**. Data Mining and Knowledge Discovery.
- Brandmeier, M., Cabrera Zamora, I.G., Nykänen, V., Middleton, M. 2020. **Boosting for Mineral Prospectivity Modeling: A New GIS Toolbox**. Natural Resources Research, 29 (1).
- Chudasama, B., Torppa, J., Nykänen, V., Kinnunen, J. 2022. **Target-scale prospectivity modelling for gold mineralization within the Rajapalot Au-Co project area in northern Fennoscandian Shield, Finland. Part 2: Application of self-organizing maps and artificial neural networks for exploration targeting**. Ore Geology Reviews. Volume 147, 104936.
- Chudasama, B., Torppa, J., Nykänen, V., Kinnunen, J., Lerssi, J., Salmirinne, H. 2022. **Target-scale prospectivity modeling for gold mineralization within the Rajapalot Au-Co project area in nort-hern Fennoscandian Shield, Finland. Part 1: Application of know-ledge-driven- and machine learning-based-hybrid- expert systems for exploration targeting and addressing model-based uncertainties**. Ore Geology Reviews. Volume 147, 104937.
- Farahnakian, F., Luodes, N., Karlsson, T. 2024. **Machine Learning Algorithms for Acid Mine Drainage Mapping Using Sentinel-2 and Worldview-3**. Remote Sensing. 16, 4680.
- Farahnakian, F., Zelioli, L.,Pitkänen, T., Pohjankukka, J., Middleton, M., Tuominen, S. 2023. **Multistream Convolutional Neural Network Fusion for Pixel-wise Classification of Peatland**. 26th International Conference on Information Fusion (FUSION), Charleston, SC, USA.
- Hamedianfar, A.; Laakso, K.; Middleton, M.; Törmänen, T.; Köykkä, J.; Torppa, J. 2023. **Leveraging High-Resolution Long-Wave Infrared Hyperspectral Laboratory Imaging Data for Mineral Identification Using Machine Learning Methods**. MDPI Remote Sensing (IF in 2023: 4.2) 15, 4806.
- Khammar, F., Nykänen, V., Beier, C., Niiranen, T. 2024. **Translating mineral systems criteria into a prospectivity model for IOCG deposits in the Kolari region, Finland**. Ore Geology Reviews, 174
- Kreuzer, O.P.; Yousefi, M.; Nykänen, V. 2020. **Introduction to the special issue on spatial modelling and analysis of ore-forming processes in mineral exploration targeting**. Ore Geology Reviews, 119.
- Minasny, B. et. al. 2023. **Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale**. Biogeochemistry (IF in 2023: 3.9).
- Mykrä, H., Kuoppala, M., Nykänen, V., Tolonen, K., Turunen, J., Vilmi, A., Karjalainen, S.M. 2021. **Assessing mining impacts: The influence of background geochemical conditions on diatom and macroinvertebrate communities in subarctic streams**. Journal of Environmental Management, 278, art. no. 111532.
- Niiranen, T., Nykänen, V., Lahti, I. 2019. **Scalability of the mineral prospectivity modelling – An orogenic gold case study from northern Finland**. Ore Geology Reviews, Volume 109, 2019.
- Nykänen, V., Törmänen, T., Niiranen, T. 2023. **Cobalt Prospectivity Using a Conceptual Fuzzy Logic Overlay Method Enhanced with the Mineral Systems Approach**. Natural Resources Research 32, 2387–2416.
- Torppa, J., Nykänen, V., Molnár, F. 2019. **Unsupervised clustering and empirical fuzzy memberships for mineral prospectivity modelling. Ore Geology Reviews**. Volume 107.
- Yeomans, C.M., Shail, R.K., Grebby, S., Nykänen, V., Middleton, M., Lusty, P.A.J. 2020. **A machine learning approach to tungsten prospectivity modelling using knowledge-driven feature extraction and model confidence**. Geoscience Frontiers, Volume 11, Issue 6, 2020, Pages 2067-2081, ISSN 1674-9871
- Yousefi, M., Carranza, E.J.M, Kreuzer, O.P., Nykänen, V., Hronsky, J.M.A., Mihalasky, M.J. 2021. **Data analysis methods for prospectivity modelling as applied to mineral exploration targeting: State-of-the-art and outlook**. Journal of Geochemical Exploration, 229, 106839.
- Yousefi, M., Kreuzer, O.P., Nykänen, V., Hronsky, J. M.A. 2019. **Exploration information systems—a proposal for the future use of GIS in exploration targeting**. Ore Geology Reviews. Volume 111.
- Yousefi, M., Nykänen, V., Harris, J., Hronsky, J.M.A., Kreuzer, O.P., Bertrand, G., Lindsay, M. 2024. **Overcoming survival bias in targeting mineral deposits of the future: Towards null and negative tests of the exploration search space, accounting for lack of visibility**. Ore Geology Reviews, 172.

Muut raportit ja julkaisut

- Lahtinen, R., Salminen, P., Laine, E. 2021. **3D crustal model of Finland based on conceptual 2D geological cross-section**. GTK Open File Work Report. 20/2021.
- Salminen, P., Luukas, J., Jokinen J., Laitala, J. 2023. **3D model of the upper crust of Finland**. GTK Open File Work Report. 10/2023.

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.