

Itseorganisoituva kartta prospektiivisuuskartoituksessa – sovellusesimerkki Sodankylän alueelta, Pohjois-Suomesta

MARKUS RAATIKAINEN JA PERTTI SARALA

Uusien mineraaliesiintymien kartoittaminen on tärkeää etenkin nykyisessä maailmantilanteessa, jossa raaka-aineiden tarve kasvaa koko ajan. Erityisesti tämän vuoksi uusien malminetsintämenetelmien hyödyntäminen ja tutkiminen on tarpeellista.

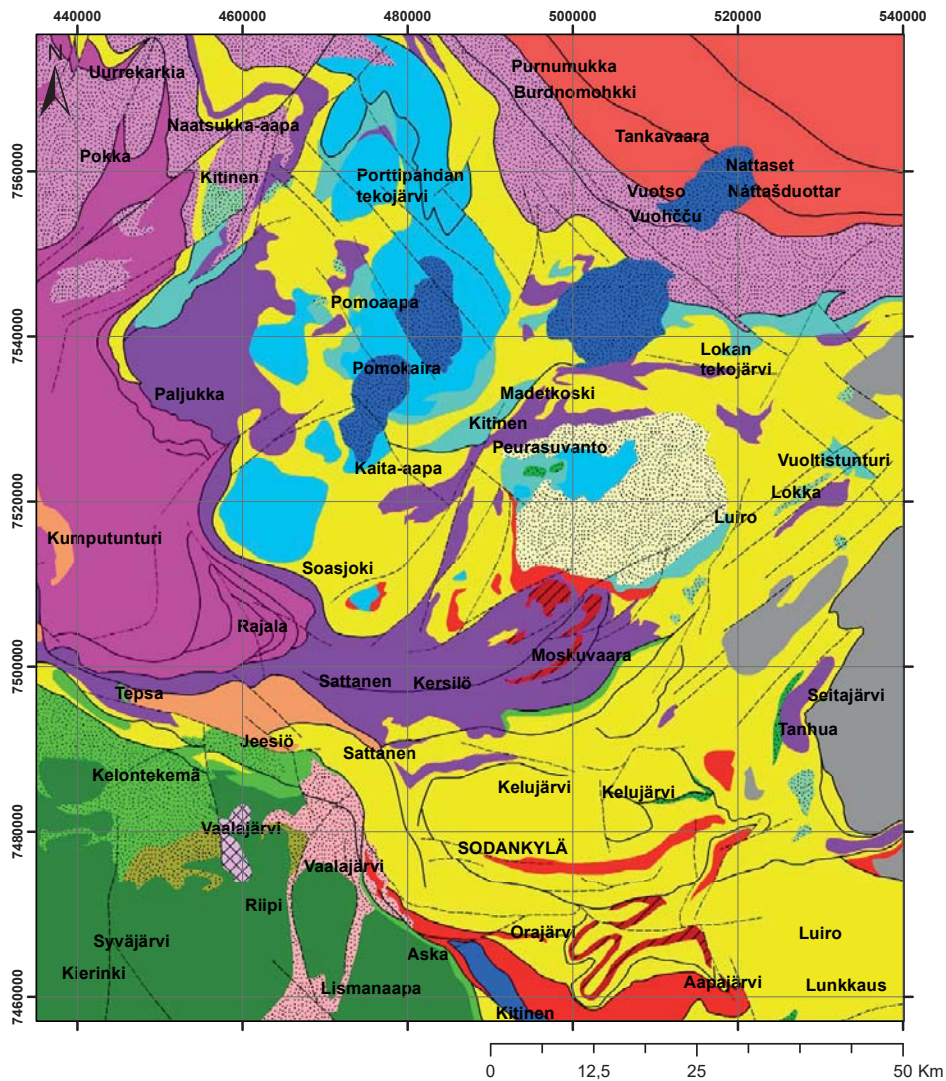
Suomessa on yksi maailman parhaimmaksi luokitelluista geotietoaineistoista ja malminetsintäinfrastruktura (Yunis & Aliakbari 2021). Geotietoaineisto sisältää koko maan kattavat geologiset, geofysikaaliset ja geokemialliset aineistot. Esimerkiksi moreenigeokemiallisia analyysiaineistoja on käytetty paljon jo 1970–1980-luvulta lähtien malminetsinnässä, ja ne ovat osoittautuneet tehokkaiksi jäätiköityneillä alueilla mineralisoituneen aineksen lähtöalueen selvittämisessä. Olemassa olevia aineistoja analysoimalla ja yhdistelemällä muihin geologisiin materiaaleihin saadaan arvioitua uusien, aiemmin vähemmälle huomiolle jääneiden alueiden malminpotentiaalia. Tämä mahdollistaa kokonaan uusien mineraaliesiintymien paikantamisen. Tässä artikkelissa tarkastellaan sitä, kuinka itseorganisoituvaa karttaa (SOM, *self-organizing maps*) ja sumeaa logiikkaa (*fuzzy logic*) voidaan hyödyntää malminetsinnässä – erityisesti kullin tapauksessa – alueelta, josta on olemassa jo runsaasti aiemmin tuotettua aineistoa.

Tutkimusalue

Tutkimusalue on suurimmaksi osaksi Sodankylän alueella ja kattaa noin 12 600 km² kokoisen maa-alan. Kallioperä on pääosin peittyneet moreenilla, jonka päällä on paikoin laajasti suomaita (Johansson & Kujansuu 2005). Maaperän keskimääräinen syvyys on noin kahden metrin luokkaa, ja moreenille on

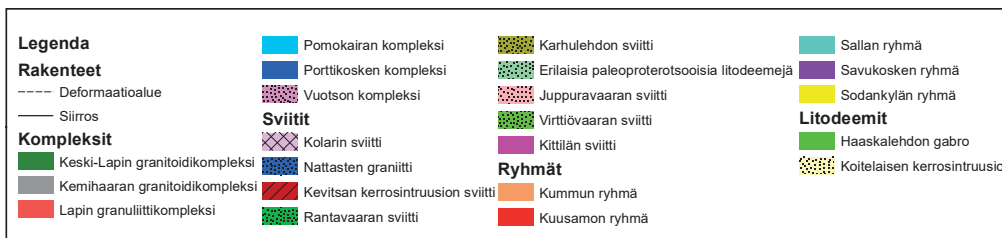
tunnistettu kuusi eri kerrosta (I–VI) (Hirvas 1991). Näistä kerrokset I–III on todettu kuuluvan viimeisimmän Veiksel-glasiatation muodostumiin (Hirvas 1991; Johansson ym. 2011). Kerrosta IV on kuvailtu Saale-jääkauden aikaiseksi (Johansson ym. 2011; Hirvas 1991). Kerrosten V ja VI on ehdotettu kuuluvan Elster- tai pre-Saalen muodostumiin (Hirvas 1991; Hirvas & Nenonen 1987) tai jopa Cromerin muodostumiin (Hirvas, 1991). Ennen jääkausiaikaa ja moreenipeitteen kerrostumista alueelle on syntynyt rapakallioita. Jatkuvasta eroosiosta huolimatta rapakallion jäänteitä esiintyy yhä alueella johtuen jäänjakajavyöhykkeen sijoittumisesta samaiselle alueelle useita kertoja viimeisten jääkausien aikana (Johansson ym. 2011). Koska jäänjakajan alueella jäätikönpohjan liike on jokseenkin olematonta, on rapakallio pysynyt lähes koskemattomana (Hirvas 1991). Otollisia ajanjaksoja rapakallioiden synnylle on esitetty useita, kuitenkin täysin yksiselitteistä rapautumisen ajankohtaa ei ole pystytty määrittämään (Hyyppä 1983). On täysin mahdollista, että rapautuminen on tapahtunut eri alueilla eri aikoina (Hirvas 1991).

Tutkimusalueen kallioperä kuuluu Keski-Lapin vyöhykkeeseen, joka koostuu paleoproterotsooisista pintakivistä (2,5–1,6 Ga), ultramafisista intrusiivisistä kivistä (2,44–2,05 Ga), felsisistä porfyry- ja lamprofyirisistä kivistä (1,92–1,88 Ga) sekä syn- ja postorogeenisista granitoideista (1,88–1,80 Ga) (Lehtonen ym. 1998; Hanski & Huhma 2005; Hölttä ym. 2007; Brownscombe ym. 2015; Köykkä & Luukas 2021). Keski-Lapin vyöhyke voidaan jakaa seitsemään ryhmään/yksikköön: Vuojärvi, Salla, Kuusamo, Sodankylä, Savukoski, Kittilä ja Kumpu (Niiranen ym. 2014) (kuva 1).



Kuva 1. Tutkimusalue sekä alueella olevat geologiset yksiköt. Geologinen info © GTK.

Figure 1. Study area together with geological units. Geological info © GTK.



Tutkimusalueella näistä tärkeimmäksi oletettiin Savukosken ryhmä (2,15–2,05 Ga), jonka alimmat osat koostuvat metasedimentteistä (grauvakka ja mustaliuske) ja ylimmät osat ultramafisista vulkaanisista kivistä sekä mafisesta tuffista. Savukosken ryhmän metasedimentit toimivat isäntäkivenä Rantavaaran gabrolle sekä Kevitsan kerrosintruusiolle. Kevitsan kerrosintruusioalueella sijaitsee Kevitsan Ni-Cu-PGE-kaivos. Savukosken ryhmän ylempi osa toimii isäntäkivenä Pahtavaaran kultaesintymälle, jossa on myös kaivos. Aiemmin isäntäkiveksi on tulkittu Sattasvaa-

ran komatiittikompleksi, mutta nykyään se on luokiteltu kuuluvan osaksi Savukosken ryhmää (Saverikko 1985). Kulta esiintyy juonien yhteydessä, mutta sen on ajateltu saostuneen kahdessa eri vaiheessa.

Materiaali ja menetelmät

Tässä esimerkkitutkimuksessa käsiteltiin moreenigeokemiallista analyysiainestoa Geologian tutkimuskeskuksessa (GTK) tehdyllä GisSOM-ohjelmalla (Torppa ym. 2021), joka pohjautuu itseorganisoituvaan karttaan

eli SOM-menetelmään (Kohonen 2001). SOM on itsenäisesti toimiva johdannaismenetelmä neuroverkosta (*neural network*), jossa klusterointimetodia hyödyntäen samankaltaiset pisteet (tai näytteet) ryhmittyvät toistensa lähelle (Kohonen 2001). Täten pisteiden arvot muodostavat neuroverkkokartan. Lisäksi itseorganisoituvien karttojen yhteydessä voidaan käyttää k-ryhmäytämistä (*k-means clustering*), jolloin SOM-kartan samankaltaisista noodeista (*node*) muodostetaan haluttu määrä klustereita eli ryhmiä. Näitä klustereita voidaan hyödyntää joko sellaisenaan tai ryhmitellä niitä edelleen. Ryhmät voidaan nimetä esimerkiksi alkuaineassosiaatioiden mukaan (Bierlein ym. 2008).

Data-analyysissä käytettiin myös sumeaan logiikkaan perustuvia menetelmiä, joita verrattiin SOM-tuloksiin. Sumea logiikka on joukko-oppiin kuuluva matemaattinen malli, jossa datapisteelle määritetään totuusarvo (Zadeh 1965). Toisin kuin perinteisissä joukko-opin teorioissa, joissa totuusarvo on joko 0 tai 1, on sumeassa logiikassa liukuva totuusarvo ($0 \leq x \leq 1$) (Bonham-Carter 1994). Nolla vastaa täysin epäkuuluvaa ja yksi täysin kuuluvaa joukon jäsentä: 0,5 vastaa tällöin täysin sattumanvaraista arvoa. Tällaista lähestymistapaa käytetään esimerkiksi prospektiivisuuskartoituksessa, jossa halutaan arvioida tutkimusalueen malmipotentialisimpia alueita tietylle alkuaineelle tai alkuaineryhmälle (Nykänen ym. 2008).

Tutkimusalueelta on saatavissa runsaasti moreeni- ja rapakalliogeokemian aineistoja GTK:n geodatapalvelusta. Tutkimukseen valittiin 1970–1980-luvuilla kerättyä moreeni-geokemian aineistoa eli niin sanottua linjamoreenidataa (Gustavsson ym. 1979). Tarkempana mielenkiintona aineistosta olivat moreenin ja rapakallion alkuainepitoisuudet, joita oli analysoitu 17 (Ag, Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Ti, V ja Zn). Tästä datasta oli laskettu valmiiksi myös kaksi rapautumisindeksiä: WIP (*Parker's weathering*

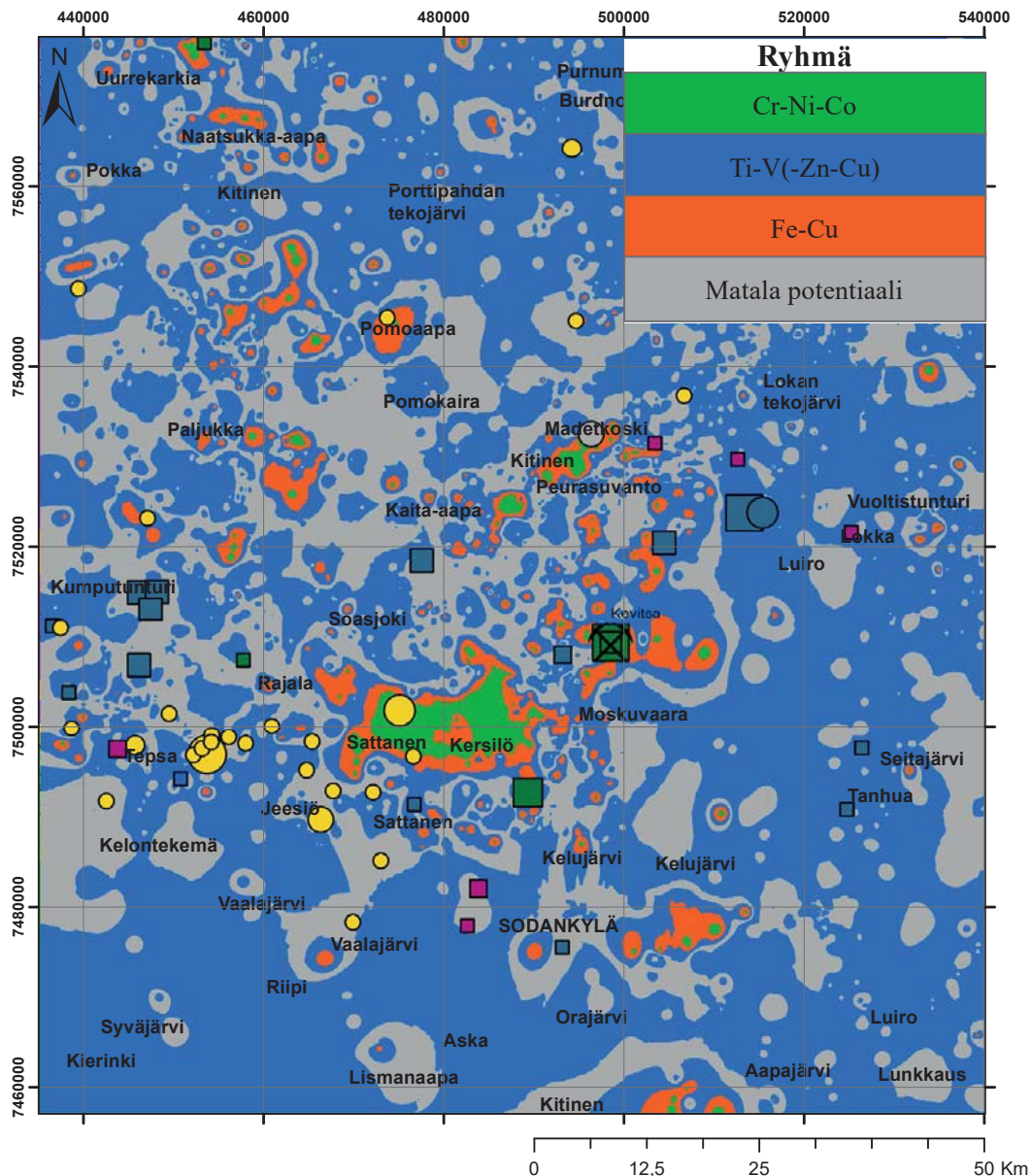
index) ja CIA (*chemical index of alteration*). Kaikkia näitä hyödynnettiin tutkimuksessa. Johtuen näytteiden analysointimenetelmästä (kvantometri), tätä aineistoa ei ole kovin paljon käytetty historiassa, mutta hiljattain sitä on alettu hyödyntää malminetsinnässä (Täivälkoski 2017, 2019; Raatikainen 2021).

Koska aineistoja on kerätty eri aikoina, analysoitu eri menetelmillä ja aineistoissa on saatavissa myös stratigrafiaan sidottua dataa, sopii itseorganisoituva kartta näiden aineistojen analysointiin ja malminetsinnälliseen soveltamiseen.

Tulokset

GisSOM-ohjelmalla käsitellyistä moreeni- ja rapakallioaineistosta muodostetut ryhmät edelleen ryhmiteltiin metalliriippuvuuksien mukaan. Tässä hyödynnettiin ohjelmalla muodostettuja SOM-karttoja, laatikkokuvaajia (*boxplot*) sekä hajaumakuvaajia. Tunnistetuista riippuvuuksista saatiin muodostettua sekä moreenille että rapakalliolle neljä ryhmää: rapakalliolle ryhmät Cr-Ni-Co, Ti-V(-Zn-Cu), Fe-Cu ja niin sanottu matalan potentiaalinen ryhmä (kuva 2) sekä moreenille ryhmät Cr-Ni-Co, Fe-Ti-V, Cu-Zn ja matalan potentiaalinen ryhmä.

Tutkimuksessa käytettyjen sumean logiikan menetelmien avulla moreeni- ja rapakallioaineistoa ryhmiteltiin liukuvien totuusarvojen mukaan ja saatiin muodostettua kaksi pääryhmää: niin kutsutut korkean rapautumisen kartta ja metallien esiintymispotentiaalikartta. Korkean rapautumisen kartassa käytettiin moreeni- ja rapakallionäytteiden WIP- ja CIA-rapautumisindeksejä, jotka yhdistettiin matemaattisesti Boolean operaattoria (OR) käyttäen. OR-operaattori yhdistää datan huomioiden korkeimmat totuusarvot ja käytetään tilanteessa, jossa mikä tahansa korkea arvo voi todistaa oletuksen. Metallien esiintymispotentiaalikartta muodostettiin näytteiden alkuainepitoisuusarvoista (Co, Ag,



Kuva 2. Rapakallion SOM-tuloksista muodostettu prospektiivisuuskartta. Kartta sisältää ryhmät: Cr-Ni-Co (vihreä), Ti-V(Zn-Cu) (sininen), Fe-Cu (punainen) ja matala potentiaali (harmaa). Kuvassa näkyvät myös tunnetut mineraaliesiintymät (pallot ja neliöt). Näiden värit edustavat eri metalleja: keltainen Au, vihreä Ni, sininen Zn, violetti Cu, harmaa platinaryhmän metallit sekä sinisenharmaat neliöt Fe ja Cr, kuin myös ympyrät V ja Ti. Karttaan on merkitty toiminnassa oleva Kevitsan monimetallikaivos (vihreä neliö kaivos-symbolilla) ja Pahtavaaran kultakaivos (keltainen iso ympyrä Sattasen pohjoispuolella).

Figure 2. Prospectivity map formed from SOM results of weathered bedrock. Map includes groups: Cr-Ni-Co (green), Ti-V(Zn-Cu) (blue), Fe-Cu (red) and low potential (gray). Known mineral occurrences can be seen as circles and squares. The colors represent different metals: yellow Au, green Ni, blue Zn, violet Cu, gray PGE, blue-gray Fe and Cr (square) as well as V and Ti (circle). Furthermore, the Kevitsa multi-metal mine (a green square with a mine symbol) and the Pahtavaara gold mine (a big yellow circle north of Sattanen) can be detected.

Cu, Cr, Au), jotka yhdistettiin AND-operaattorilla. AND-operaattori huomioi alhaisimmat totuusarvot ja käytetään tilanteessa, jossa jokaisen arvon täytyy indikoida olettamusta.

Täytyy tosin huomioida, että Au-arvoja voitiin käyttää vain moreeniaineistolle, koska Au-aineiston data oli peräisin GTK:n alueellisesta moreenigeokemian aineistosta (niin sanottu

harvapistemoreeni). Korkean rapautumisen kartta ja metallien esiintymispotentiaalikartta yhdistettiin γ -operaattorilla. Näin muodostunut sumean logiikan kartta osoittaa korkean totuusarvon alueet, joita voi käsitellä potentiaalisina mineraaliesiintyminä.

Päätelmät

SOM-menetelmä sopii todistettavasti niin kyllä kuin muidenkin metallien malminetsintään analysoitaessa moreeni- ja rapakalliogeokemian aineistoja. Tämä johtuu SOM-menetelmän kyvystä käsitellä monimuuttujadataa. Muuttujien määrä olisi kuitenkin hyvä pitää suppeana, jolloin muodostuvia ryhmiä olisi mahdollisesti vähemmän ja tulosten tulkinta helpompaa. Tällöin myös laatikkokuvaajien arvojen vaihteluväli oletettavasti pienenesi, joka helpottaisi lisäksi myös hempää ryhmittelyä.

Tässä tutkimuksessa ryhmittelyn voidaan katsoa onnistuneen, sillä tunnettuja kultaesiintymiä (kuva 2: keltaiset pallot) jäi Cr-Ni-Co- (kuva 2: vihreä alue) ja Fe-Cu-ryhmien (kuva 2: punainen alue) rajojen sisälle. Tätä tukee myös sumealla logiikalla tuotetut kartat: niistä käy ilmi, että korkean jäsenarvon omaavat alueet seurasivat Cr-Ni-Co- ja Cu-ryhmiä – niin moreenissa kuin rapakalliiossakin. Vaikka kultaa ei itsessään voinut käyttää mallinnuksessa hyväksi, niin ryhmittelyssä saatiin metalliassosiaatioihin liittyvät korkeat kulta-pitoisuusarvot ja siten ne toimivat kyllä seuralaisalkuaineina (vrt. Niiranen ym. 2015 ja siinä käytetyt lähteet).

Kiitokset

Kirjoittajat haluavat kiittää K. H. Renlundin säätiötä rahoituksesta ”*Edistyneet analyysi- ja mallinnusmenetelmät moreenigeokemiallisessa malminetsinnässä*” projektille sekä GTK:ta data-aineistosta ja Johanna Torppaa GisSOM-ohjelman tuesta.

FM MARKUS RAATIKAINEN
(markus.raatikainen@oulu.fi)

PROF. PERTTI SARALA
(perti.sarala@oulu.fi)

Kaivannaisalan yksikkö, Oulun yliopisto

Markus Raatikainen on geologian väitöskirjatutkija Oulun yliopiston kaivannaisalan yksikössä. Väitöskirjatyötä rahoittaa K. H. Renlundin Säätiö projektissa ”Edistyneet analyysi- ja mallinnusmenetelmät moreenigeokemiallisessa malminetsinnässä”.

Perti Sarala on sovelletun geokemian professori Oulun yliopiston kaivannaisalan yksikössä.

Summary

SOM modelling in prospectivity mapping – Utilization example from the Sodankylä area, northern Finland

Northern Finland has been interesting area for mineral exploration – especially for gold – for a long time. Here self-organizing maps (SOM) were tested for gold exploration, though analogues for other commodities can be derived. The used data set was gathered and analyzed in 1970–1980.

For the SOM method GTK’s (Geological Survey of Finland) GisSOM software was utilized. After SOM calculations, the software clustered these results with k-means clustering method. Subsequently, k-means clusters were grouped together. Based on the results, prospectivity maps were created, and further compared with fuzzy logic maps. It seems that the grouping was correctly done. Although gold itself could not be used in modeling, the metal associations (Cr-Ni-Co and Cu) obtained in the grouping were associated with high Au concentrations, indicating that they function as companion elements of gold.

Lähdeluettelo

- Bierlein, F. P., Fraser, S. J., Brown, W. M. & Lees, T., 2008. Advanced methodologies for the analysis of databases of mineral deposits and major faults. *Australian Journal of Earth Sciences* 55, 79–99. <https://doi.org/10.1080/08120090701581406>
- Bonham-Carter, G. F., 1994. *Geographic information systems for geoscientists: Modeling with GIS*. Elsevier, Kidlington, 398 s.
- Brownscombe, W., Ihlenfeld, C., Coppard, J., Hartshorne, C., Klatt, S., ym., 2015. The Sakatti Cu-Ni-PGE Sulfide Deposit in Northern Finland. Teoksessa: Maier, W. D., Lahtinen, R. & O'Brien, H. (toim.), *Mineral Deposits of Finland*. Elsevier Inc., Oxford, 211–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00009-1>
- Gustavsson, N., Noras, P. & Tanskanen, H., 1979. Seloste geokemiallisen kartoituksen tutkimusmenetelmistä. *Geologinen tutkimuslaitos, Tutkimusraportti* 39, 20 s.
- Hanski, E. & Huhma, H., 2005. Central Lapland greenstone belt. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. A. & Rämö, O. T. (toim.), *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier B. V., Amsterdam, 139–194. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(05\)80005-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(05)80005-2)
- Hirvas, H., 1991. Pleistocene stratigraphy of Finnish Lapland. *Geologian tutkimuskeskus, Bulletin* 354, 123 s.
- Hirvas, H. & Nenonen, K., 1987. The till stratigraphy of Finland. Teoksessa: Kujansuu, R. & Saarnisto, M. (toim.), *INQUA Till Symposium, Finland 1985*, *Geologian tutkimuskeskus, Special Paper* 3, 49–63.
- Hyyppä, J., 1983. Suomen kallioperän preglasiaalisesta rapautumisesta. Summary: Preglacial weathering of Precambrian rocks in Finland. *Geologian tutkimuskeskus, Raportti* 2899, 18 s.
- Hölttä, P., Väisänen, M., Väänänen, J. & Manninen, T., 2007. Paleoproterozoic metamorphism and deformation in central Lapland, Finland. Teoksessa: Ojala V. J. (toim.), *Gold in the Central Lapland Greenstone Belt, Finland*. *Geologian tutkimuskeskus, Special Paper* 44, Espoo, 7–56.
- Johansson, P. & Kujansuu, R. (toim.), 2005. Pohjois-Suomen maaperä: maaperäkarttojen 1:400 000 selitys. *Geologian tutkimuskeskus, Espoo*, 236 s.
- Johansson, P., Lunkka, J. P. & Sarala, P., 2011. The glaciation of Finland. Teoksessa: Ehlers, J., Gibbard, P. L. & Hughes P. D., (toim.), *Developments in Quaternary Science*. Elsevier, Amsterdam, 105–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00009-X>
- Kohonen, T., 2001. *Self-organizing maps*. Springer-Verlag, Berlin, 502 s.
- Köykkä, J. & Luukas, J., 2021. Keski-Lapin litostratigrafia ja paleoproterotsooisen Sodankylän ryhmän kivilajiyksiköiden määrittely. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti* 13/2021, 63 s.
- Lehtonen, M., Airo, M-L., Eilu, P., Hanski, E., Kortelainen, V., ym., 1998. Kittilän vihreäkivialueen geologia. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti* 140, 144 s.
- Niiranen, T., Lahti, I., Nykänen, V. & Karinen, T., 2014. Central Lapland Greenstone Belt 3D modeling project final report. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti* 209, 78 s.
- Niiranen, T., Lahti, I. & Nykänen, V., 2015. The Orogenic Gold Potential of the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Fennoscandian Shield. Teoksessa: Maier, W. D., Lahtinen, R. & O'Brien, H. (toim.), *Mineral Deposits of Finland*. Elsevier Inc., Oxford, 733–752. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00028-5>
- Nykänen, V., Groves, D. I., Ojala, V. J., Eilu, P. & Gardoll, S. J., 2008. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper - Gold deposits in the northern Fennoscandian shield, Finland. *Australian Journal of Earth Sciences* 55, 25–38. <https://doi.org/10.1080/08120090701581372>
- Raatikainen, M., 2021. An effect of pre-glacial weathered bedrock composition to till and different till units in the northeastern Kittilä, central Finnish Lapland – application potential to mineral exploration. *Julkaisematon pro gradu-tutkielma. Kaivannaisalan yksikkö, Oulun yliopisto*, 55 s.
- Saverikko, M., 1985. The pyroclastic komatiite complex at Sattasvaara in northern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 57, 55–87. <https://doi.org/10.17741/bgsf/57.1-2.005>
- Taivalkoski, A., 2017. Vanhojen moreenigeokemian analyysiaineistojen käytettävyyden arviointi-Itä-Lapin uusinta-analyysiin perustuva vertailu-tutkimus. *Pro gradu -tutkielma. Kaivannaisalan yksikkö, Oulun yliopisto*, 51 s.
- Taivalkoski, A., 2019. Tepsa ja Palojärvi: Kohteellisten moreeninäytteiden uudelleenanalysointi. *Geologian tutkimuskeskus, työraportti*, 14 s.
- Torppa, J., Chudasama, B., Hautala, S. & Kim, Y., 2021. GisSOM for clustering multivariate data. *Geologian tutkimuskeskus, Open File Research Report* 52/2021, 27 s.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Yunis, J. & Aliakbari, E., 2021. The Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2021. *Fraser institute*, 80 s.