Rakenneanalyysin ja geostatistiikan synteesi

JYRKI PARKKINEN

Tiedonanto tutkimusprojektista "Taivaljärven hopea-sinkki-lyijykultaesiintymän uuden geologisen 3D-rakennemallin kehittäminen ja hyödyntäminen"

alle Taipaleen vetämä Oulun yliopiston opiskelijaryhmä löysi Taivaljärven esiintymän identifiointiin johtaneet lohkareet 1980. Seuraavat kymmenen vuotta Kajaani Oy, myöhemmin Yhtyneeet Paperitehtaat Oy, ja loppuvaiheessa sen kanssa Outokumpu Oy kartoittivat esiintymää systemaattisin kairauksin sekä maan päältä että 2,5 km pitkästä vinotunnelista. Esiintymän geologiaa tutkivat pääasiassa Timo Kopperoinen ja Ilkka Tuokko sekä heidän kanssaan yhteisjulkaisun kirjoittanut Heikki Papunen. Tutkijaryhmän tulkinnassa esiintymä sijoittuu stratigrafiassa Tipasjärven vihreäkivivyöhykkeen felsisistä metavulkaniiteista koostuvan Koivumäki-muodostuman alaosaan. Mineralisoitumalle ei ole havaittu selkeää litologista kontrollia.

Tämän projektin työryhmään kuuluvat allekirjoittaneen lisäksi FM Jouko Jylänki, FT Kalle Taipale sekä TkT Timo Lindborg. Renlund-säätiö myönsi hankkeelle apurahan 2010. Työn taustatukena ovat julkaisut (mm. Papunen et al. 1989 ja Papunen et al. 2001) sekä esiintymää tutkineiden kaivosyhtiöiden raportit. Materiaalina ovat kairansydänten analyysi- ja loggaustiedot sekä Kajaani Oy:n louhimasta vinotunnelista tehdyt rakennehavainnot. Tähän mennessä hanke on koostunut pääosin kirjallisuustutkimuksesta, metodiikan kehittelystä ja sopivien työkalujen etsimisestä. Tärkeimmiksi työkaluiksi ovat valikoituneet ohjelmistot Surpac V.6.1, MapInfo V.10, Discover V.12, DIPS, Fabric8 ja Stereo32. Alla kuvataan rakennemallinnuksen ensi tuloksia. Rakenteet on sidottu kansalliseen KKJ-koordinaatistooon kaistalle 4. Kaikkiin rakennemittauksiin on otettu huomioon eranto + 8 astetta.

Tilastollinen rakenneanalyysi

Taivaljärven vinotunnelista tehtiin 1990–91 kaikkiaan 1713 luokiteltua rakennehavaintoa Clar-menetelmällä siten, että jokaiseen havaintoon on liitettävissä alueellinen XYZ-koordinaatti (Kopperoinen 1991, Tuokko 1991). Havaintoaineisto vaikuttaa laadultaan ja käyttökelpoisuudeltaan erinomaiselta. Kenttäluokittelussa on huomioitu erikseen kerroksellisuus, liuskeisuus 1, liuskeisuus 2 (tässä S3), raitaisuus, kvartsi-, karbonaatti- sekä kvartsikarbonaattiraidat ja -juonet, sulfidijuonet, lineaatiot ja pienoispoimuakselit. Analyysin aikana on ollut mahdollista edelleen trimmata luokitusta ja ryhmittelyä geometrisin perus-



No:	AzimDip/Plunge:		Type:	Mark:		Comment:		
1:	201.60	55.83	Linear	6: ▲	0	//great circle// Eigenvector 3		
2:	314.00	14.48	Linear	6: 🔺	0	//great circle// Eigenvector 1		
3:	52.65	30.19	Linear	6: 🔺	0	//great circle// Eigenvector 2		
4:	140.00	72.30	Planar	3: •		Foliation S1 / Mean vector		
5:	129.80	77.50	Planar	5: 🔷		Bedding S0 / Mean vector		
6:	241.60	64.00	Planar	4:		Foliation S3 /Mean vector		
7:	196.70	55.10	Linear	3:0		Fold axes F1 / Mean vector		
8:	307.10	7.40	Linear	8: 🖈	0	//great circle// ag1 a_axis (F1)		
9:	41.20	28.90	Linear	8: 苯	0	//great circle// ag1 c_axis (F1)		
10:	200.00	60.00	Linear	8: 🖈	0	//great circle// ag1 b_axis (F1)		
11:	220.00	30.00	Linear	8: 🖈	0	//great circle// ag2 b_axis (F2)		
12:	68.20	56.80	Linear	8: 🖈	0	//great circle// ag2 c_axis (F2)		
13:	317.60	13.00	Linear	8: 🆈	0	//great circle// ag2 a_axis (F2)		

Taulukko 1. Kuvan 1 selite.

Table 1. Legend to figure 1.

tein. Tässä keskitytään kerroksellisuuteen ja liuskeisuuteen.

Geometrisessa tarkastelussa osoittautui, että lähes kaikki "pyörii yhden akselin ympäri" (kuva 1, taulukko 1). Liuskeisuus- ja kerroksellisuushavaintojen kautta löytyvät myös ominaisvektorit ja -arvot (eigenvectors, eigenvalues) kuvaamaan esiintymän geometriaa. Suurin osa havainnoista asettuu isoympyrälle, jonka keskipiste on poimuakselihavaintojen keskellä. Kuvassa 1 on esitetty kerroksellisuusja liuskeisuushavainnot (S0, S1) ja näiden ominaisvektorit (Eigenvectors 1–3) sekä poimuakselihavainnot (F1) ja S3-liuskeisuushavainnot. Rakennepiirteiden numerointi kertoo vain paikallisesta aikajärjestyksestä, eikä sitä ole kytketty alueellisiin rakenteisiin.

Taulukossa 2 on yhteenveto rakennestatistiikasta. Keskimääräinen poimuakselin asenKuva 1. Stereograafinen projektio Taivaljärven kerroksellisuus-, liuskeisuus- ja poimuakselihavainnoista (SO, S1, S3, F1) sekä S0-S1-statistiikasta (Eigenvector). Projektioon on myös lisätty geostatistiikan kahden hakuellipsoidin geometriat (ag1 ja ag2), jotka vastaavat rakennestatistiikkaa poimutusvaiheille F1 ja F2. Nuorimpaan liuskeisuuteen S3 ei ole havaittu liittyvän poimutusta. Poimutukseen F2 liittyvää liuskeisuutta ei ole kyetty erottelemaan.

Figure 1. Stereographic projection of Taivaljärvi bedding, foliation, and fold axis observations (S0, S1, S3, F1) and of the S0-S1 statistics. In the projection, geometry features of two search ellipsoids (ag1 and ag2), defined by variography, were added. They correspond to the folding phases F1 and F2. The youngest foliation S3 has not been related to any folding phase. On the other hand, foliation related to F2 has not been identified.

to on 197/55. Kerroksellisuudessa samoin kuin liuskeisuudessa on eroteltu kaksi klusteria keskiarvovektoreineen sekä totaalikeskiarvot. Kerroksellisuus- ja liuskeisuushavainnot ovat osaksi päällekkäiset mutta liuskeisuus S1 näyttäisi leikkaavan kerroksellisuutta S0 keskimäärin 10 asteen kulmassa myötäpäivään. Leikkauskulmasta päätellen poimutus on esiintymän kohdalla vasenkätistä.

Muiden rakenne-elementtien analysointi on vielä kesken samoin kuin kaikkien rakenne-elementtien 3D-visualisointi.

Geostatistinen analyysi

Taivaljärven hopea esiintyy pääosin sulfideina mutta myös pelkkänä hopeana. Esiintymistapa näyttäisi kaikissa mittakaavoissa olevan "hippumainen", ts. hopeayhdisteet eivät muo-

Mean vectors	F1	S0	S1	S2 ?	\$3
Linear Planar 1st cluster Planar 2nd cluster	197 / 55	123 / 83 140 / 70	128 / 78 159 / 65		
Planar summary		130 / 78	140 / 72	128 / 78 ?	244 / 63

Taulukko 2. Vektorikeskiarvot poimuakseleille, kerroksellisuudelle ja liuskeisuuden eri faaseille ja klustereille.

Table 2. Mean vectors of fold axes, bedding, foliation phases, and clusters.

dosta pitkiä tasapitoisina jatkuvia juonia tai kerroksia, vaan pitkulaisia ja litteitä pirotelinssejä. Tämä heijastui variografiassa melko lyhyinä, 5–50 m:n vaikutusmatkoina. Sen sijaan mineralisoitumakokonaisuuden eli 10 ppm:n cutoffin ylittävän domainin variografia tuotti pidemmät vaikutusmatkat, jopa 133 m (kuva 2). Geostatistiikan avulla on siis mahdollista ensinnäkin rajata mineralisoituma ("Domains interpolation", Parkkinen 2008) todennäköisyysarvoina ja toiseksi määrittää hopean pitoisuusrakenne mineralisoituman sisällä.

Kuvassa 1 on esitetty myös hopeapitoisuuksien geostatistinen geometria eli pääakselien suunnat (ag1). Ne osuvat lähelle rakennehavaintojen ominaisvektoreita mutta eivät tarkalleen. Variografian löytämät pisimmät jatkuvuudet voivat olla vinossa esiintymän pääsuuntiin, koska myös näytegeometria eli kairanreikien sijoittelu vaikuttaa lopputulokseen. Geostatistinen analyysi antoi siis blokkimalliin interpolointia varten hakuellipsoidin vaikutussuunnat ja -matkat.

Geostatistiikka toi esille myös mahdollisen toisen poimutuksen, F2 kuvassa 1. Sitä ei ole toistaiseksi havaittu geologisen kartoituksen yhteydessä eikä siihen mahdollisesti liittyvää liuskeisuutta ole identifioitu. Näyttäisi mahdolliselta, että ensimmäinen liuskeisuusklusteri (128/78, taulukko 1) edustaisi F2poimutusta. Viitteitä F2:n olemassa olosta on antanut rikastumalinssien jonomainen esiintymistapa (Parkkinen 2010, s. 64–68). Oletan, että kyseessä on ensimmäisen tiukan poimutuksen (185/60, kuva 1) loiva uudelleenpoimuttuminen 30 astetta loivemmin kaatuvan akselin (200/30) ympäri. F2-poimuakseli sijaitsee samassa akselitasossa kuin F1-akseli. Tästä syystä vastaavien liuskeisuusfaasien erottelu on vaikeaa.

Geostatistiset parametrit hyödynsin blokkimallissa, joka koostui 1*2*2 m:n blokeista (x*y*z). Mallia käänsin ja kallistin lähes muodostuman suuntaan 120/75. Tällainen malli ei kelpaa varantoarvioihin, mutta nyt tarkoitus olikin saada esille mahdollisimman paljon yksityiskohtia. Tähän malliin interpoloin ordinary krigingiä käyttäen ensinnäkin mineralisoituma-domainin todennäköisyysarvot erikseen molempien poimugeometrioiden mukaisesti. Näiden yhdistelmämallista vaakaleikkauksessa on esimerkki kuvassa 3. Värein on havainnollistettu eri todennäköisyysluokkia ja saatu esille viitteitä sisärakenteesta. Rakenteiden katkeaminen kuvan kaakkoisosassa viittaa siirrokseen, joka sekin on havainnollistettu katkoviivalla.

Toiseksi interpoloin vastaavasti hopeapitoisuudet alkuperäisanalyysien 1 m:n komposiiteista molempien poimumallien mukaisesti (F1 ja F2, kuva 1). Näiden yhdistelystä syntyi blokkimalli, josta on esimerkkinä vaakaleikkaus kuvassa 4. Kuvaan on lisätty oletettu siirros sekä kerroksellisuutta ja kahta liuskeisuutta kuvaavat suuntajanat.



Kuva 2. Variogrammimalli domainista Ag >/= 10 ppm. Malli antaa interpoloinnin hakuellipsoidin pisimmälle akselille suunnan 204/50 ja mittaa 125 m. Vieressä variogrammikartta, josta näkyy tuon domainin yleissuunta ja paksuus kohtisuoraan akselia vasten (n. 100 m). Tämä malli poikkeaa hieman Ag-pitoisuusgeometriasta (ag1) kuvassa 1.

Figure 2. Variogram model of domain Ag >/= 10 ppm. According to it the main axis of search ellipsoid has the azimuthal direction of 204/50 and it is 125 m long. Variogram map shows the general direction and the thickness of the domain perpendicular to the axis (about 100 m). This model slightly differs from the geometry of ag1 in figure 1.



Kuva 3. Vaakaleikkaus domainin Ag >/= 10 ppm blokkimallista. Värein vihreä-keltainen-punainen on eroteltu todennäköisyysarvot 30– 50–75 % sille, että pitoisuus ylittää 10 ppm Ag. Katkoviiva kuvaa hypoteettista siirrosta, joka näyttäisi katkaisevan pitoisuusrakenteen. Ruudukon sivupituus on 100 m.

Figure 3. Horizontal section of the combined block model for the domain Ag >/= 10 ppm. Probability values 30-50-75 % are visualized by colours green-yellow-red, respectively. Brown broken line shows the hypothetical fault that seems to cut the deposit structure. Grid cells are 100*100 m.

GEOLOGI 62 (2010)



Kuva 4. Vaakaleikkaus blokkimallista hopealle. Harmaa sama-arvoviiva rajaa mineralisoituman ja keltaiset-punaiset blokit näyttävät 50 ppm ylittävän hopeajakauman. Magenta viiva havainnollistaa hypoteettista poimurakennetta F1-F2. Suuntajanat kuvaavat keskimääräisiä rakenteita: S0 vihreällä, S1 punaisella ja S3 keltaisella värillä.

Figure 4. Horizontal section where grey isoline outlines the mineralization and where yellow and red blocks stand for Ag >/= 50 ppm. Magenta line illustrates the hypothetical fold structure F1-F2. Directions of S0, S1 and S3 are shown by green, red and yellow lines, respectively.

Synteesi

Mineralisoituma-domainin blokkimallista tein sama-arvopinnat kahdelle eri todennäköisyydelle, 50 % ja 100 %, joiden avulla hahmotin esiintymän päärakenteet. Tähän kuvioon toivat tarkennuksia F1, F2-mallien sama-arvopinnat erilaisille pitoisuuksille. Pääpoimuakselia vasten kohtisuoriin leikkauksiin yhdistelin pienoispoimumaiset mineralisoitumalinjat, joiden yleistetyistä keskilinjoista muotoutui selkeä poimurakenne. Tuloksista on kaksi esimerkkiä kuvissa 4–5. Niiden perusteella Taivaljärven esiintymää kontrolloi tiukka poimurakenne, toistaiseksi hypoteettinen F1, jota F2 on loivasti uudelleenpoimuttanut. Hopea on keskittynyt tuon F1-rakenteen keskiosien pienoispoimupinkkoihin, joita F2 on edelleen muotoillut "pinch & swell" -tyyliin. Nämä poimurakenteet ja niiden jatkuvuudet pääpoimuakselien suunnissa ovat malminetsinnällisiä kohteita. Samaten olisi etsinnällinen kohde mikä tahansa havaittu kyseisen rakenteen kertauma.

Tutkimus ei jää tähän. Rakenneanalyysin täydentämisen lisäksi on selvitettävänä ja vertailtavana kuparin, sinkin, lyijyn ja mangaanin pitoisuusgeometriat. Ennakkokäsitykseni mukaan (Parkkinen 2010) ne poikkeavat hopean vastaavasta.

Viittaukset

Kopperoinen, T. 1989. Tutkimustyöseloste Oulun läänin Sotkamon kunnan Tipasojan kylässä sijaitsevan Taivaljärven hopea-sinkki-kulta-lyijyesiintymän tutkimuksista. Silver Resources Oy.



Kuva 5. Korkeustasojen -40 ja -140 välisessä 3D-kuvassa hypoteettinen poimu F1-F2 (vihreä), malmiluokan linssejä kuvaavat sama-arvopinnat (ruskea) ja kairanreiät.

Figure 5. 3D image between elevations -40 and -140 of the hypothetical fold F1-F2 (green), ore class isosurfaces (brown), and drill holes.

- Kopperoinen, T. 1991. Tutkimusseloste Sotkamon Taivaljärven tutkimusvinotunnelin rakentamisesta ja tunnelista käsin suoritetuista tutkimuksista ajalta 1.9.1988–15.5. Silver Resources Oy.
- Papunen, H., Kopperoinen, T. ja Tuokko, I. 1989. The Taivaljärvi Ag-Zn deposit in the Achaean greenstone belt, eastern Finland. Economic Geology 84, 1262–1276.
- Papunen, H., Halkoaho, T., Liimatainen, J. ja Luukkonen, E. 2001. Metallogeny of the Achaean Tipasjärvi-Kuhmo-Suomussalmi greenstone belt, Fin-

Summary

Taivaljärvi Ag-Zn-Pb-Au deposit, Synthesis of structural analysis and geostatistics

The Silver Resources Oy owned Taivaljärvi Ag-Zn-Pb-Au deposit is hosted by siliceous quartz porphyritic rocks belonging to the metamorphosed and chemically altered volcaniclastic rocks of the stratigraphic Koivumäki Formation which is the lowermost part of the Tipasjärvi Section of the Suomussalmi-Kuhmo Greenstone Belt.

Present structural analysis is focused to the geometry of bedding, foliation and fold axis and it is based on observations by geologists in the 2.5 km long mine decline in 1990–91. According to the analysis, above elements and eigenvectors give a uniform and simple geometry illustrated in a stereographic projection. It seems that foliation, while also overlapping with bedding, forms a 10 degree angle clockwise to bedding on an average. This might indicate that folding within the deposit is sinistral.

Geostatistical analysis of spatial grade distributions gave a result very similar to the structural one. Besides main axial directions, it also gave lengths of search ellipsoid axes for block model interpolation. In addition, a second folding geometry was recognized, earlier indicated by the arrangement of single ore bodies in lines. Four successive interpolations were run in the block model with 1*2*2 m blocks and rotated and tilted to the azimuthal direction 120/75. Two of them were "domains interpolations" that handled the samples equal to or above the cut-off grade of 10 ppm of silver as a unit against those below the same grade. These interpolations, according to the two structure geometries, gave limits to the mineralization resulting blocks with probability values 0 to 100. A combination model of those two interpolations was then used to outline the deposit.

land. AGSO - Geoscience Australia, Record 2001/

publication. www.elisanet.fi/jyrki.parkkinen/2008/

Resource Estimates. Silver Resources Oy. Electro-

nic publication. www.silver.fi/pdf/statements/

Parkkinen, J. 2008. Domains Interpolation. Electronic

Parkkinen, J. 2010. The Taivaljärvi Ag-Zn-Pb-Mn Deposit, Finland; Review and Update of Mineral

taivaljarvini431014042010parkkinen.pdf

Tuokko, I. 1991. Taivalhopea, geologiset tutkimukset ja mineraalivarantoarvio. Silver Resources Oy.

37, 456-458.

Domains3.pdf

Another set of interpolations, this time concerning 1 m composites of original silver assays, was similarly run according to the two geometries. A combined model was then used to digitize "mineralization lines" like parasitic folds on sections perpendicular to the fold axis at 25 m intervals. This procedure was complemented by drawing generalized centre lines to the former. These appeared to form a coherent structure of tight folds with silver enriched in the parasitic stacks inside.

According to this description, best targets for exploration would be the extensions of axial plunges and any structural repetition.