

Etelä-Suomen yksikkö
48/2011
Espoo

14.12.2011



Geofysikaalisten rasteriaineistojen rakennetulkintatyökaluja Geosoft Oasis Montaj -ohjelmistolle

Hanna Leväniemi



GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS • GEOLOGISKA FORSKNINGSCENTRALEN • GEOLOGICAL SURVEY OF FINLAND

PL / PB / P.O. Box 96
FI-02151 Espoo, Finland
Tel. +358 20 550 11
Fax +358 20 550 12

PL / PB / P.O. Box 1237
FI-70211 Kuopio, Finland
Tel. +358 20 550 11
Fax +358 20 550 13


PL / PB / P.O. Box 97
FI-67101 Kokkola, Finland
Tel. +358 20 550 11
Fax +358 20 550 5209

PL / PB / P.O. Box 77
FI-96101 Rovaniemi, Finland
Tel. +358 20 550 11
Fax +358 20 550 14

Y-tunnus / FO-nummer / Business ID: 0244680-7 • www.gtk.fi

Päivämäärä / Dnro

14.2.2011

Tekijät Leväniemi, Hanna		Raportin laji Arkistoraportti	
		Toimeksiantaja GTK	
Raportin nimi Geofysikaalisten rasteriaineistojen rakennetulkintatyökaluja Geosoft Oasis Montaj -ohjelmistolle			
Tiivistelmä Raportissa on esitelty erilaisia alueellisten geofysikaalisten rasteriaineistojen rakennetulkintatyökaluja GTK:ssa käytössä olevalle Geosoft Oasis Montaj -ohjelmistolle. Yksinkertaisimmillaan työkalut ovat erilaisia derivaattajohdannaisia, mutta tuloksien on mahdollista hyödyntää myös pidemmälle meneviä (semi-)automaattisia menetelmiä. Derivaattojen käyttö rakenneanalyysissä perustuu visuaalisen tulkinnan lisäksi litologisia ja rakenteellisia epäjatkuvuuksia kuvaavien kontakti-indikaattoreiden käyttöön. Tyypillisin indikaattori on derivaatan paikallinen maksimi, joka sijoittuu kontaktin yläpinnan kohdalle. Työssä käydään lyhyesti läpi erilaisia derivaattajohdannaisia sekä niiden ominaisuuksia. Automaattisista menetelmistä käsitellään pääasiassa U.S. Geological Surveyn tuottaman USGS GX -työkalupaketin kaarevuusanalyysejä ja sen tulosten käyttöä helpottamaan kehitetyn GTK:n työkalun tarjoamia mahdollisuuksia rakennetulkinnassa. Tuloksia verrataan kahteen muuhun menetelmään. Kaarevuusanalyysin tulokset ovat yleisesti ottaen stabiileja ja helppokäyttöisiä.			
Asiasanat (kohde, menetelmät jne.) Geofysiikka, potentiaalientäaineistot, derivaatat, rakennetulkinta, lineamenttitulkinta			
Maantieteellinen alue (maa, lääni, kunta, kylä, esiintymä)			
Karttalehdet			
Muut tiedot			
Arkistosarjan nimi		Arkistotunnus	
Kokonaissivumäärä 27	Kieli suomi	Hinta	Julkisuus Julkinen
Yksikkö ja vastuualue Espoon yksikkö / VA 215		Hanketunnus 7780062	
Allekirjoitus/nimen selvennys  Hanna Leväniemi		Allekirjoitus/nimen selvennys	



Sisällysluettelo

Kuvailulehti

1	JOHDANTO	1
2	RAKENNETULKINNASSA KÄYTETTYJÄ DERIVAATTOJA	2
2.1	Derivaattojen määritelmät	2
2.2	Sovelluksia ja mallinnusta	3
2.2.1	Derivaatat rasteriaineistossa	3
2.2.2	Derivaatat kontaktissa	5
2.2.3	Derivaatat erisyvyisten kappaleiden tapauksessa	7
2.2.4	Derivaatat heikkousvyöhykkeessä	8
3	KAAREVUUSANALYYSI	9
3.1	Ääripisteiden paikantaminen	9
3.2	Pisteiden yhdistäminen	11
4	KÄYTTÖESIMERKKEJÄ	13
4.1	Lähdekappaleiden rajaaminen	13
4.2	Ruhjetulkinta	15
4.3	Kaarevuusanalyysin vertailu Intrepid Worming –työkaluun	16
4.4	Kaarevuusanalyysin vertailu CET-työkaluun	17
5	YHTEENVETO	18

KIRJALLISUUSLUETTELO

LIITTEET:

Liite 1. GTK-työkalu kaarevuusanalyysipisteiden yhdistämiseksi

1 JOHDANTO

Rasterimuotoisia geofysikaalisia potentiaalitenttäaineistoja (magneettikenttä- ja painovoimamittaauksia) voidaan hyödyntää geologisessa rakennetulkinnassa erityisesti heikkousvyöhykkeiden ja lähdegeometrioiden selvittämisessä. Tulkinta perustuu yleensä erilaisten derivaattajohdannaisten kvalitatiiviseen tai kvantitatiiviseen analysointiin. Mittausaineistoja tai niiden derivaattoja voidaan käyttää myös syöteaineistona erilaisille (semi-)automaattisille rakennetulkinta-analyysille, jotka voivat olla esim. kuvankäsittelyn periaatteisiin pohjautuvia hahmontunnistusalgoritmeja tai aineiston potentiaalitenttälunonteen huomioivia spesifisempiä algoritmeja. Vaikka automatisoidulla tulkinnalla ei voida korvata asiantuntijan tekemää tulkintaa, sitä voidaan pitää vähintäänkin tärkeänä esiaistena manuaaliselle tulkinnalle.

Tuloksia voidaan hyödyntää esim. litologisessa kartoituksessa ja ruhjetulkinnassa. Viime vuosina magneettisten ja painovoimamittausten automatisoidut rakennetulkintamenetelmät ovat osoittautuneet hyviksi työkaluiksi myös prospektiivisuusanalyyseissä (esim. Lahti et al., 2010).

Viime vuosikymmenten aikana on kirjallisuudessa esitetty lukuisia määriä erilaisia rakennetulkintaan tarkoitettuja derivaattajohdannaisten ja automatisointityökaluja perinteisempien menetelmien tueksi tai niitä korvaamaan. Menetelmäkirjon laajuuden huomioiden on tärkeää saada jokapäiväiseen tulkintakäyttöön työkaluja, joka on tutkijoiden helposti saatavilla. GTK:ssa geofysiikan aineistoja käsitellään yleisimmin Geosoft Oasis Montaj™ -ohjelmistoa (raportissa ohjelmistoa kutsutaan tästä eteenpäin Oasis Montaj'ksi). Oasis Montaj sisältää kattavan paketin geofysikaalisia toimintoja aina aineiston alkuprosessoinnista tulkintaan saakka. Geosoftin tuottamien työkalujen lisäksi ohjelmistoon on saatavilla vapaita ja kaupallisia lisäosia, ja niitä on myös mahdollista kirjoittaa itse.

Tässä työssä pyritään käymään läpi Oasis Montaj'n ja sille löytyvien lisäosien tarjoamia mahdollisuuksia rakennetulkintaan. Työ ei ole millään muotoa kattava, vaan keskittyy potentiaalitenttien rasteriaineistoihin ja erityisesti kontakti- ja ruhjetulkinnan automatisointiin liittyviin työkaluihin. Työssä ei käsitellä rasteriaineistojen kvantitatiivisia syvyysanalyysejä (joita myös on lukuisia), vaan keskitytään rakenteiden 2D-tulkintaan. Työn painopiste on alueellisessa tulkinnassa. Laskennassa ja esimerkeissä käytetään magneettista aineistoa, mutta menetelmät ovat luonnollisesti sovellettavissa myös painovoima-aineistolle.

Raportin ensimmäinen kappale sisältää yhteenvedon erilaisista derivaattajohdannaisten sekä niiden ominaisuuksista. Tämän jälkeen esitellään lyhyesti USGS GX –työkalupaketin kaarevuusanalyysi, joka osoittautui erittäin hyväksi kontakti- ja lineamenttitulkinnan automatisointityökaluksi. (Käyttäjän kannattaa huomata, että USGS GX-paketti tarjoaa huomattavasti laajemman valikoiman tulkintatyökaluja kuin mitä tässä raportissa on esitelty.) Työkalut on julkaistu julkisohjelmana (*public domain*), eikä sen käyttöön liity mitään rajoituksia esim. kaupallisten töiden suhteen (Jeffrey D. Phillipsin sähköposti tekijälle 24.10.2011). Työkalulle on GTK:ssa kehitetty tulosten hyödyntämistä helpottava jatkotyökalu, joka myöskin esitellään lyhyesti (yksityiskohtat liitteessä 1). Kappaleessa 4 esitellään esimerkkien avulla derivaattojen ja työkalujen käyttömahdollisuuksia sekä vertaillaan muutamia erilaisia työkaluja keskenään.

Työ on tehty GTK:n Geofysiikan tulkinta- ja mallinnusmenetelmät -kehittämisalueen puitteissa. Erityiskiitokset kehittämisalueessa toimineille geofyysikoille Markku Paanaselle USGS GX –työkalujen ja niille kirjoitetun jatkotyökalun testaamisesta sekä Ilkka Lahdelle wavelet-analyysin (kpl 4.3) ajamisesta. Aimo Ruotsalainen on soveltanut ja vienyt eteenpäin rakennetulkintamenetelmiä erityisesti GTK:n ulkomaanprojekteissa (esim. Ruotsalainen, 2008).



2 RAKENNETULKINNASSA KÄYTETTYJÄ DERIVAATTOJA

Erilaisia derivaattoja voidaan käyttää rakenteiden kontaktien määrittämiseen ja syvyyden estimointiin. Menetelmien soveltaminen rakennetulkintaan perustuu yleensä kontakti-indikaattoreihin: derivaatan paikalliset ääriarvot tai nollakohta sijaitsevat magnetoituma- tai tiheyskontrastin kohdalla. Kontrastien voidaan olettaa kuvaavan rakenteellisia epäjatkuvuuskohtia tai rajapintoja kuten siirroksia, litologisia kontakteja tai litologisten yksiköiden sisäisiä ominaisuusvaihteluita. Painovoima-aineiston yhteys litologisiin vaihteluihin on selkeämpi kuin magneettisen aineiston, joka kuvaa enemmänkin aksessoristen mineraalien (yl. magnetiitti) jakautumista kallioperässä (Pilkington & Keating, 2009).

Suurin osa menetelmistä toimii ideaalilla tavalla silloin, kun magnetoituman suunta ja kappaleen asento ovat vertikaaleja (ks. Pilkington & Keating, 2009, Table 1). Tämän vuoksi aineiston napa-reduktiota (RTP-muunnos) on aina syytä harkita ennen derivaattalaskentaa. Myös alueen kaadesuunnat ja mahdollinen remanentti magnetoituma kannattaa arvioida ennen tulkinnan tekemistä.

Tässä on käsitelty vain osa rakennetulkinnassa mahdollisista derivaatoista. Pilkington & Keating vertailevat muutamien derivaattojen ominaisuuksia (2004) sekä esittävät kattavan vertailun erilaisista mahdollisuuksista (2009). Derivaattojen tarkempia ominaisuuksia löytyy myös muista seuraavan kappaleen kirjallisuuslähteistä.

2.1 Derivaattojen määritelmät

Seuraavissa kaavoissa T tarkoittaa mitattua totaalikenttää. Derivaatat on esitetty siinä muodossa kuin niitä voidaan soveltaa rasteriaineistolle. Derivaatat ovat johdannaisia ensimmäisen asteen horisontaali- ja vertikaaliderivaatoista dx , dy ja dz .

Analyttinen signaali (AS)

Derivaatan maksimit sijoittuvat kontaktin kohdalle. AS ei riipu magnetoituman suunnasta tai kappaleen kaateesta. Herkkä kohinalle ja tasovirheille. Resoluutio saattaa kärsiä kapeiden tai syvien kappaleiden tapauksessa: erilliset kontaktimaksimit sulautuvat yhdeksi maksimiksi. (Pilkington & Keating, 2004).

$$AS = \sqrt{dx_T^2 + dy_T^2 + dz_T^2} \quad (1)$$

Totaaliorisontaaliderivaatta (TF-HGM)

Maksimi sijoittuu kontaktin kohdalle. Kappaleen ympärillä saattaa esiintyä virheellisiä maksimeita. Riippuvainen magnetoituman suunnasta ja kappaleen kaateesta. (Pilkington & Keating, 2004)

$$THDR = \sqrt{dx_T^2 + dy_T^2} \quad (2)$$

Tilt-derivaatta (TDR)

Nollakohta sijoittuu maksimin kohdalle, positiiviset arvot kappaleen päällä, negatiiviset arvot kappaleen ulkopuolella. Riippuvainen magnetoituman suunnasta ja kappaleen kaateesta. Arvot välillä $-\pi/2 \dots \pi/2$. Toimii eräänlaisena AGC-filtterinä eli korostaa alkuperäisen aineiston kaikkien aallonpituuksien piirteitä ja tasoittaa amplitudivaihteluita (Verduzco et al., 2004).

$$TDR = \tan^{-1}\left(\frac{dz_T}{THDR}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{dz_T}{\sqrt{dx_T^2 + dy_T^2}}\right) \quad (3)$$

(Miller & Singh, 1984; Verduzco et al., 2004)

Tilt-derivaatan totaalihorisontaaliderivaatta (TDR-HGM)

Maksimi sijoittuu kontaktin kohdalle. TDR-HGM ei riipu magneitoituman suunnasta tai kappaleen kaateesta. Matalan gradientin alueella kappaleen ympärillä saattaa esiintyä virheellisiä maksimeita ja kappaleiden välisestä vuorovaikutuksesta johtuvia häiriöitä. (Pilkington & Keating, 2004).

$$TDR - HGM = \sqrt{dx_{TDR}^2 + dy_{TDR}^2} \quad (4)$$

(Verduzco et al., 2004)

Theta-derivaatta (θ)

Wijns et al. (2005) esittelivät analyyttiseen signaaliin pohjautuvan θ -derivaatan. Riippuvainen magneitoituman suunnasta ja kappaleen kaateesta. Maksimi sijoittuu kontaktin kohdalle. Arvot välillä 0...1.

$$Theta = \frac{THDR}{AS} = \frac{\sqrt{dx_T^2 + dy_T^2}}{\sqrt{dx_T^2 + dy_T^2 + dz_T^2}} \quad (5)$$

Toiseen asteen tilt-derivaatta

Cooper & Cowan (2006) esittelivät toisen asteen tilt-derivaatan. Nollakohta sijoittuu maksimin kohdalle. Riippuvainen magneitoituman suunnasta ja kappaleen kaateesta. Arvot välillä $-\pi/2 \dots \pi/2$.

$$TDR_2 = \tan^{-1}\left(\frac{dz_{TDR}}{TDR - THDR}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{dz_{TDR}}{\sqrt{dx_{TDR}^2 + dy_{TDR}^2}}\right) \quad (6)$$

Normalisoitu totaalihorisontaaliderivaatta (TDX)

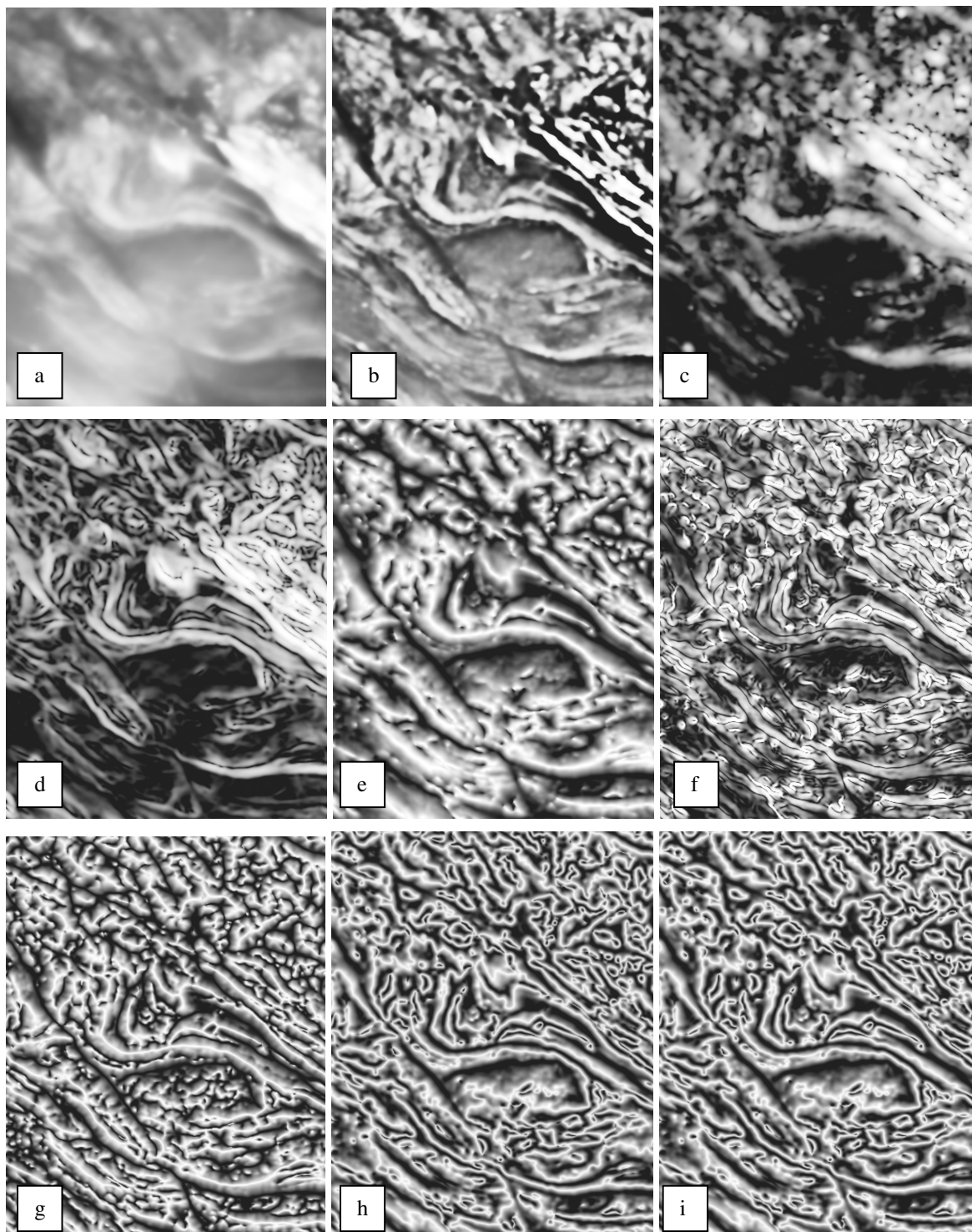
Cooper & Cowan (2006) esittelivät normalisoidun totaalihorisontaaliderivaatan. Maksimi sijoittuu kontaktin kohdalle. Verrattuna perinteiseen totaalihorisontaaliderivaataan antaa suuremman amplitudivasteen syvien lähteiden tapauksessa. Riippuvainen magneitoituman suunnasta ja kappaleen kaateesta. Arvot välillä 0 ... $\pi/2$.

$$TDX = \tan^{-1}\left(\frac{THDR}{|dz_T|}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{dx_T^2 + dy_T^2}}{|dz_T|}\right) \quad (7)$$

2.2 Sovelluksia ja mallinnusta

2.2.1 Derivaatat rasteriaineistossa

Derivaattoja on vertailtu kuvassa 1. Lähtöaineistona on magneettinen naparedukoitu totaalikenttä, jota on nostettu 200 m ylöspäin (kuva 1a). Totaalikenttään verrattuna kaikki derivaatat parantavat rakenteellista näkemystä alueesta. Ensimmäisen asteen vertikaaliderivaatta (1b), analyyttinen signaali AS (1c) sekä totaalihorisontaaliderivaatta TF-HGM (1d) korostavat rakenteellisia piirteitä säilyttäen kuitenkin samalla informaatiota alkuperäisen signaalin amplitudista ja aallonpituudesta. Näistä AS on rakenteelliselta resoluutioltaan kaikkein heikoin.



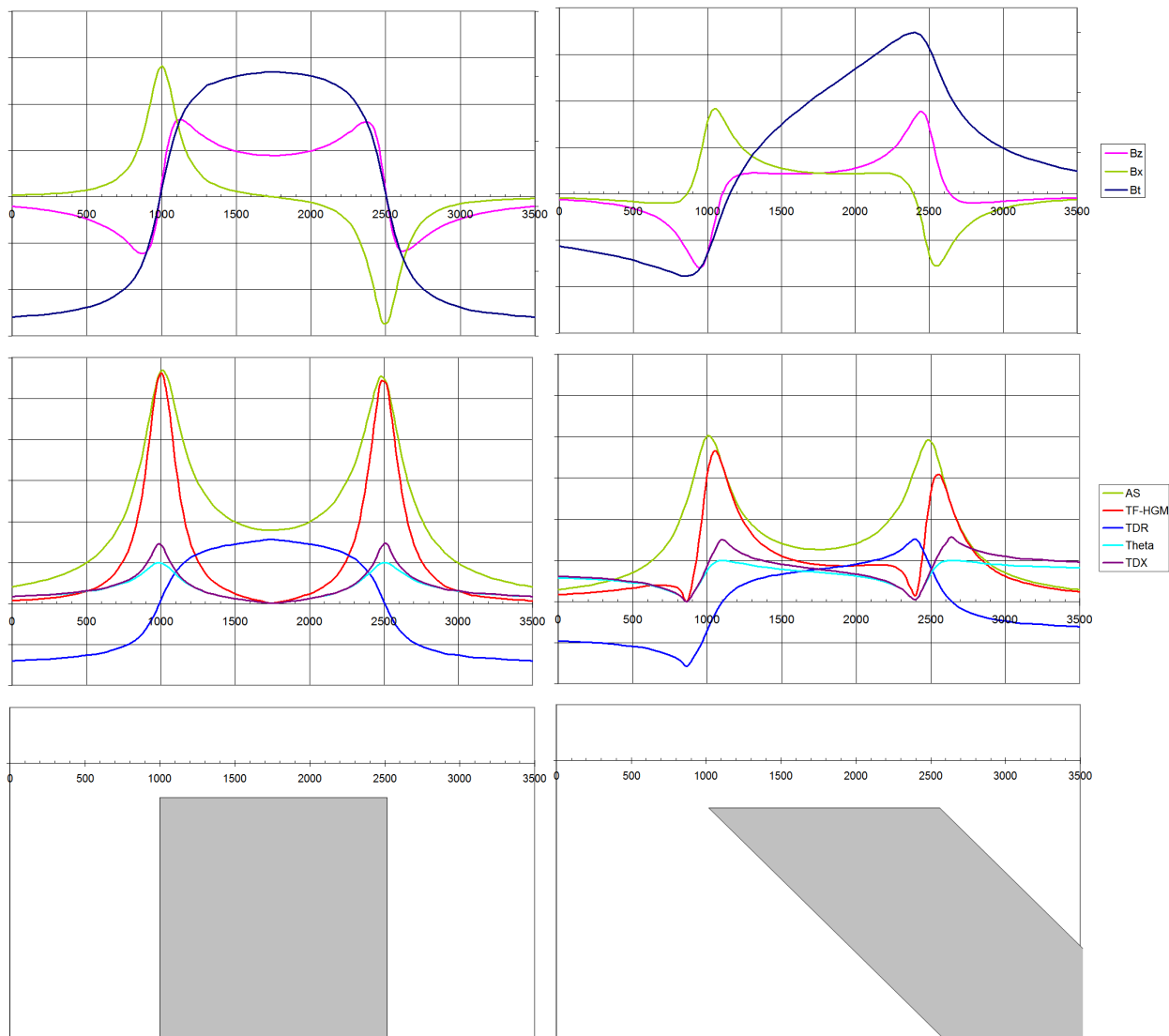
Kuva 1. Magneettisia derivaattoja. a) Totaalikenttä. b) Ensimmäisen asteen vertikaaliderivaatta (dz). c) Analyttinen signaali (AS). d) Totaalihorisontaaliderivaatta (TF-HGM). e) Tilt-derivaatta (TDR). f) Tilt-derivaatan totaalihorisontaaliderivaatta (TDR-HGM). g) Toisen asteen tilt-derivaatta (TDR_2). h) Theta-derivaatta. i) Normalisoitu totaalihorisontaaliderivaatta (TDX). Tumma väri esittää matalia arvoja, vaalea väri korkeita arvoja.

Normalisoidut derivaatat TDR (1e) ja sen johdannaiset TDR-HGM (1f) ja TDR_2 (1g), theta (1h) ja totaalihorisontaaliderivaatta TDX (1i) tasaavat aallonpituuseroja ja korostavat sekä pitkän että

lyhyen aallonpituuden signaaleja, mutta antavat vastapainoksi tarkkaa tietoa yksityiskohtaisista piirteistä. Theta-derivaatan ja TDX:n antamat tulokset ovat huomattavan samankaltaisia ja TDR-HGM:n tulos rakenteelliselta resoluutioltaan heikoin visuaalisesti tarkasteltuna.

2.2.2 Derivaatat kontaktissa

Kuvassa 2 on mallinnettu 1500 metriä leveää magneettista kappaletta, jonka susceptibiliteetti on korkeampi kuin ympäristössään. Mallinnus on tehty sekä vertikaalikappaleelle että kaatuvalle kappaleelle.

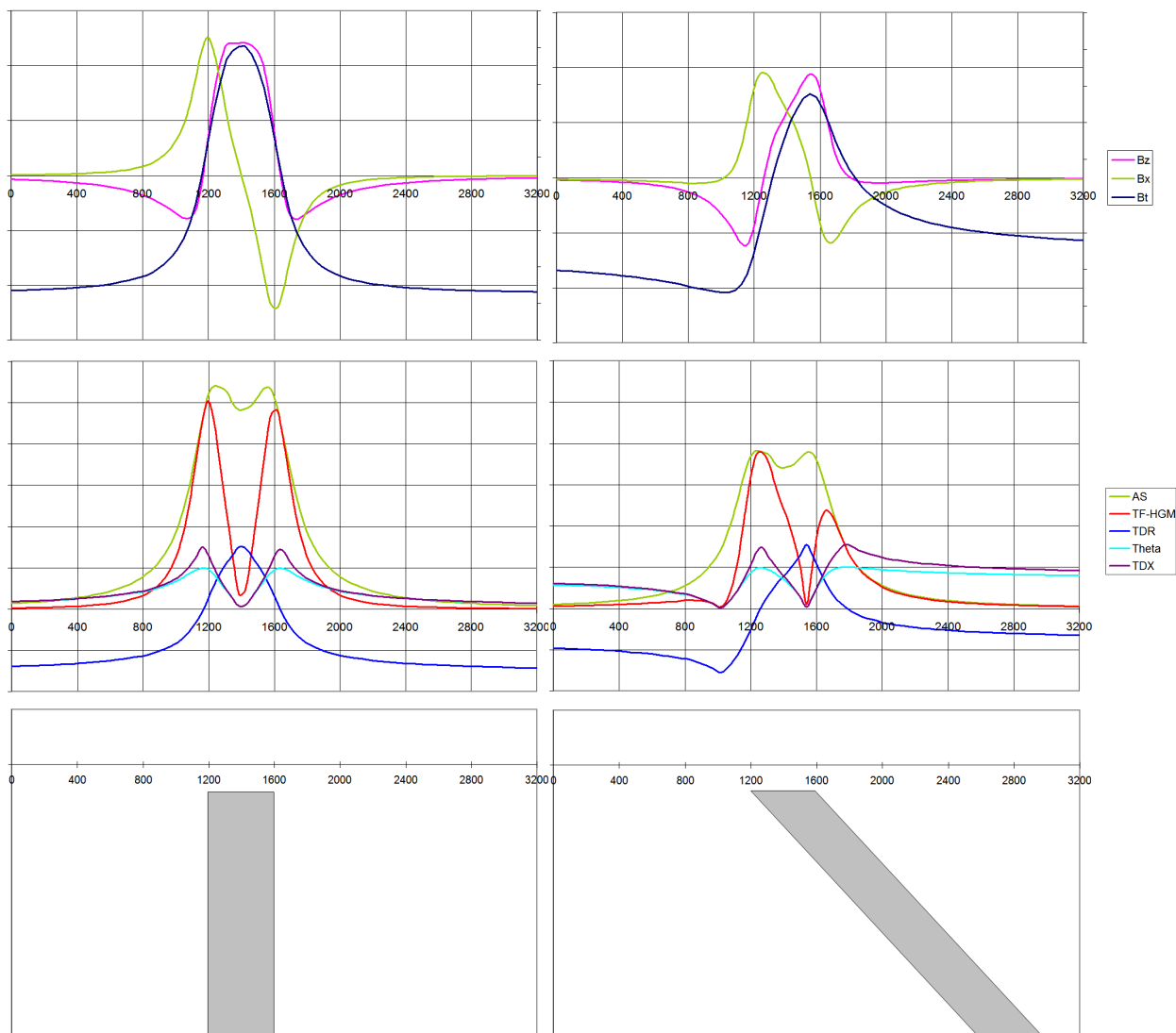


Kuva 2. Magneettikentän B_t ja ensimmäisen asteen vertikaali- ja horisontaaliderivaattojen B_z , B_x (ylimmät kuvat) ja derivaattajohdannaisien (keskimmäiset kuvat) käyttäytyminen pystyn kappaleen (vasemmalla) ja 45 asteen kulmassa kaatuvan kappaleen tapauksessa. Derivaattojen pystyakselin nollakohta vaakaa-akselin leikkauskohdassa. Kappaleen yläpinnan kontaktit kohdissa $x=1000$ ja $x=2500$. Kappaleen yläpinnan syvyys 90 m, mallinnettu mittauskorkeus 30 m. Magneettikentän inkliinaatio 90 astetta.

Pystyn kappaleen tapauksessa kappaleen reunat erotetaan hyvin kaikilla derivaatoilla (maksimi tai TDR:n tapauksessa nollakohta kontaktin kohdalla). Myös kaatuvan kappaleen kohdalla reunat

erottuvat hyvin, mutta muilla kuin AS:llä kontakti-indikaattorit ”valuivat” kaateen suunnassa sivuun yläpinnan kontaktikohdista. TDR-HGM ei ole tässä vertailussa mukana, mutta se on teoriassa AS:n lisäksi toinen derivaattajohdannainen, johon kaade ei vaikuta.

Kuvassa 3 mallinnettava kappale on kapeampi (leveys 400 metriä). Pystyn ja kaatuvan kappaleen tuloksia verrattaessa nähdään sama efekti kuin edellä, eli suurimmassa osassa derivaatoista kontakti-indikaattori siirtyy kaateen suunnassa sivuun yläpinnan kontaktikohdasta.



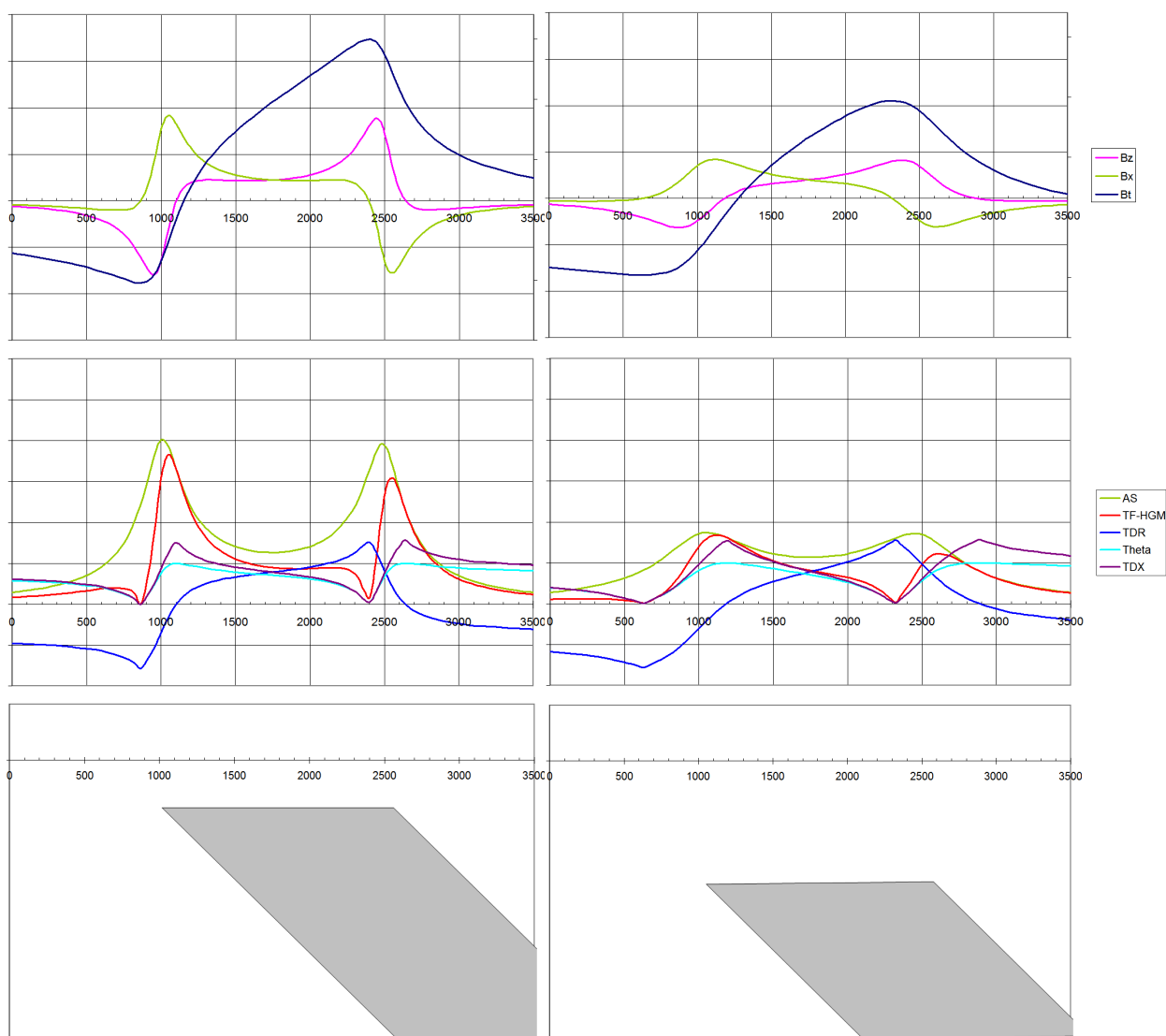
Kuva 3. Magneettikentän B_t ja ensimmäisen asteen vertikaali- ja horisontaaliderivaattojen B_z , B_x (ylimmät kuvat) ja derivaattajohdannaisten (keskimmäiset kuvat) käyttäytyminen pystyn kappaleen (vasemmalla) ja 45 asteen kulmassa kaatuvan kappaleen tapauksessa. Derivaattojen pystyakselin nollakohta vaakaa-akselin leikkauskohdassa. Kappaleen yläpinnan kontaktit kohdissa $x=1200$ ja $x=1600$, yläpinnan syvyys 90 m. Kappaleen yläpinnan syvyys 90 m, mallinnettu mittauskorkeus 30 m. Magneettikentän inkliinaatio 90 astetta.

Kaade-efektin lisäksi tuloksissa voidaan nähdä lähekkäisten kontaktipintojen keskinäisestä interferenssistä johtuvaa maksimien (TDR:n tapauksessa nollakohdan) siirtymistä myös pystyn kappaleen tapauksessa. Analyytisellä signaalilla maksimit siirtyvät hieman kontakteista sisään päin, kohti kappaleen keskipistettä, ja signaali alkaa sulautua yhdeksi maksimiksi kahden kontaktimaksimin sijaan. Myös muilla derivaatoilla nähdään hieman maksimin siirtymistä, mutta pois-

päin kappaleen keskipisteestä. Maksimien siirtyminen on suoraan johdettavissa ensimmäisen asteen vertikaali- ja horisontaaliderivaattojen käyttäytymisestä (Pilkington ja Keating, 2004).

2.2.3 Derivaatat erisyyvien kappaleiden tapauksessa

Kappaleen syvyyden vaikutusta tulokseen on mallinnettu kuvassa 4 (sama efekti nähtäisiin myös mittauskorkeutta nostamalla). Lähempänä pintaa sijaitsevan kappaleen tulokset ovat samat kuin kuvassa 2 kaatuvalle kappaleelle.



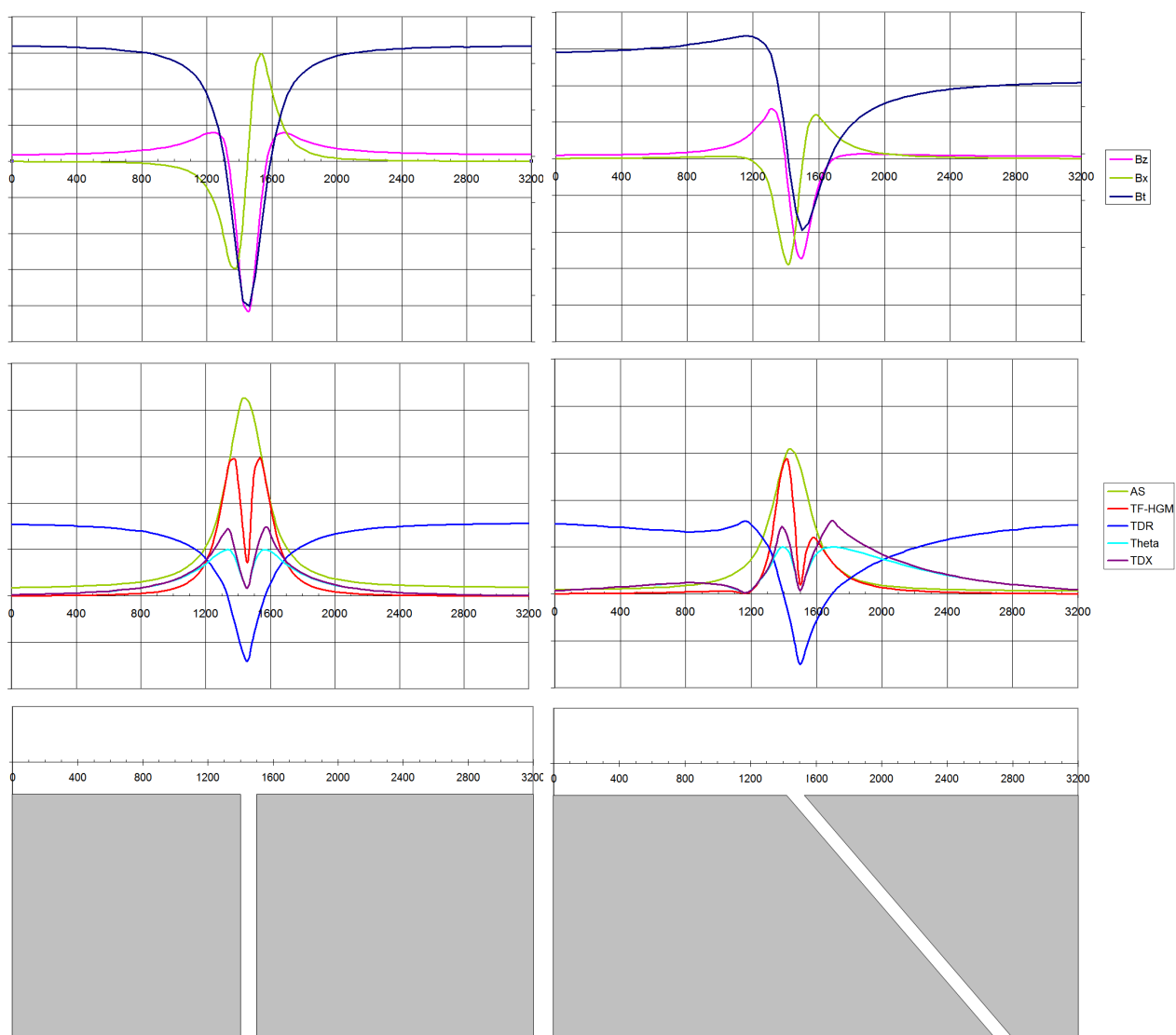
Kuva 4. Magneettikentän B_t ja ensimmäisen asteen vertikaali- ja horisontaaliderivaattojen B_z , B_x (ylimmät kuvat) ja derivaattajohdannaisten (keskimmäiset kuvat) käyttäytyminen kahden erisyyvien 45 astetta kaatuivan kappaleen tapauksessa. Derivaattojen pysty akselin nollakohta vaak akselin leikkauskohdassa. Kappaleen yläpinnan kontaktit kohdissa $x=1000$ ja $x=2500$. Kappaleen yläpintojen syvyydet 90 m ja 250 m, mallinnettu mittauskorkeus 30 m. Magneettikentän inkliinaatio 90 astetta.

Kappaleen ollessa syvemmällä normalisoidut derivaatat TDR, Theta ja TDX menettävät vähiten signaali amplitudistaan. AS:n ja TF-HGM:n maksimit pienenevät suhteessa eniten, ja jos kappale sijaitseisi vielä syvemmällä, varsinkaan AS ei enää erottaisi kappaleen reunoja.

Derivaattojen maksimit (TDR:n tapauksessa nollakohta) siirtyvät kaateen suunnassa, kuten edellä on jo todettu. Syvemmällä sijaitsevalla kappaleella siirtymä on suurempi.

2.2.4 Derivaatat heikkousvyöhykkeessä

Heikkousvyöhykettä voidaan mallintaa edellä esitettyjen kontaktianalyysien erikoistapauksena: mallissa on itse asiassa kaksi magneettista kappaletta, joiden välinen tila esittää heikkousvyöhykettä. Kuvassa 5 on esitetty kapea heikkousvyöhyke sekä pystynä että kaatuvana.



Kuva 5. Magneettikentän B_t ja ensimmäisen asteen vertikaali- ja horisontaaliderivaattojen B_z , B_x (ylimmät kuvat) ja derivaattajohdannaisten (keskimmäiset kuvat) käyttäytyminen pystyn ruhjeen (vasemmalla) ja 45 asteen kulmassa kaatuvan ruhjeen tapauksessa. Derivaattojen pysty akselin nollakohta vaaka-akselin leikkauskohdassa. Kappaleiden yläpinnan kontaktit kohdissa $x=1400$ ja $x=1500$ (ruhjeen leveys 100 m). Kappaleiden yläpinnan syvyys 90 m, mallinnettu mittauskorkeus 30 m. Magneettikentän inkliinaatio 90 astetta.

Ruhjevyyhykettä reunustavien kappaleiden kontakteista saadaan selvät kahden maksimin indikaatiot TF-HGM-, TDX- ja Theta-derivaatoilla, mutta ilmeisesti kontaktien läheisyyden takia mallinnustulokseen syntyy kappaleiden välistä interferenssiä, ja maksimit siirtyvät hieman si-

vuon varsinaisista kontaktikohdista (kohti kappaleiden keskipisteitä). Kaatuvan ruhjeen tapauksessa maksimit siirtyvät myös kaateen suunnassa sivuun kontaktista. Analyyttisen signaalin erotuskyky ei riitä erottelemaan mallista kahta maksimia, vaan kontaktien maksimit sulautuvat yhteen.

TDR antaa ruhjeen kohdalla selkeän minimin, jonka ääripiste sijoittuu pystyrühjeen tapauksessa ruhjeen keskiakselille, mutta kaatuvan ruhjeen tapauksessa siirtyy kaateen suunnassa sivuun ruhjeen keskipisteestä. TDR:n nollakohdat eivät myöskään vastaa kontakteja vaan kuten muissakin derivaatoissa siirtyvät pystynkin ruhjeen tapauksessa hieman pois päin yläpintakontakteista.

3 KAAREVUUSANALYYSI

U.S. Geological Survey (USGS) tuottama USGS GX –työkalupaketti (Phillips, 2007) koostuu Oasis-työkaluiksi muunnetuista geofysikaalisista algoritmeista, jotka USGS on viime vuosikymmenten aikana kehittänyt ja käyttänyt. Paketti on ilmaiseksi ladattavissa internetistä USGS:n verkkosivuilta osoitteesta <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1355/>.

Työkalupaketti sisältää mm. kaarevuusanalyysityökalun, jonka avulla voidaan paikantaa potentiaalienten tai sen johdannaisten paikallisia ääripisteitä (minimi- tai maksimikohtia) pinnan kaarevuusanalyysin avulla (Phillips et al., 2007). Tuloksista on mahdollista laskea myös lähteiden arvioituja syvyyksiä, mutta syvyyyslaskentaoptiota ei käsitellä tässä raportissa.

Kaarevuusanalyysin tuloksena on ääripisteet sisältävä pistejoukko, joka piirrettynä kuvaa jatkuvia minimi- tai maksimijonoja. Jonon pisteiden yhdistäminen viivaksi helpottaa tulosten käsittelyä. Yhdistelyalgoritmi on toteutettu GTK:ssa jatkotyökaluksi kaarevuusanalyysitulosten käsitteilyyn.

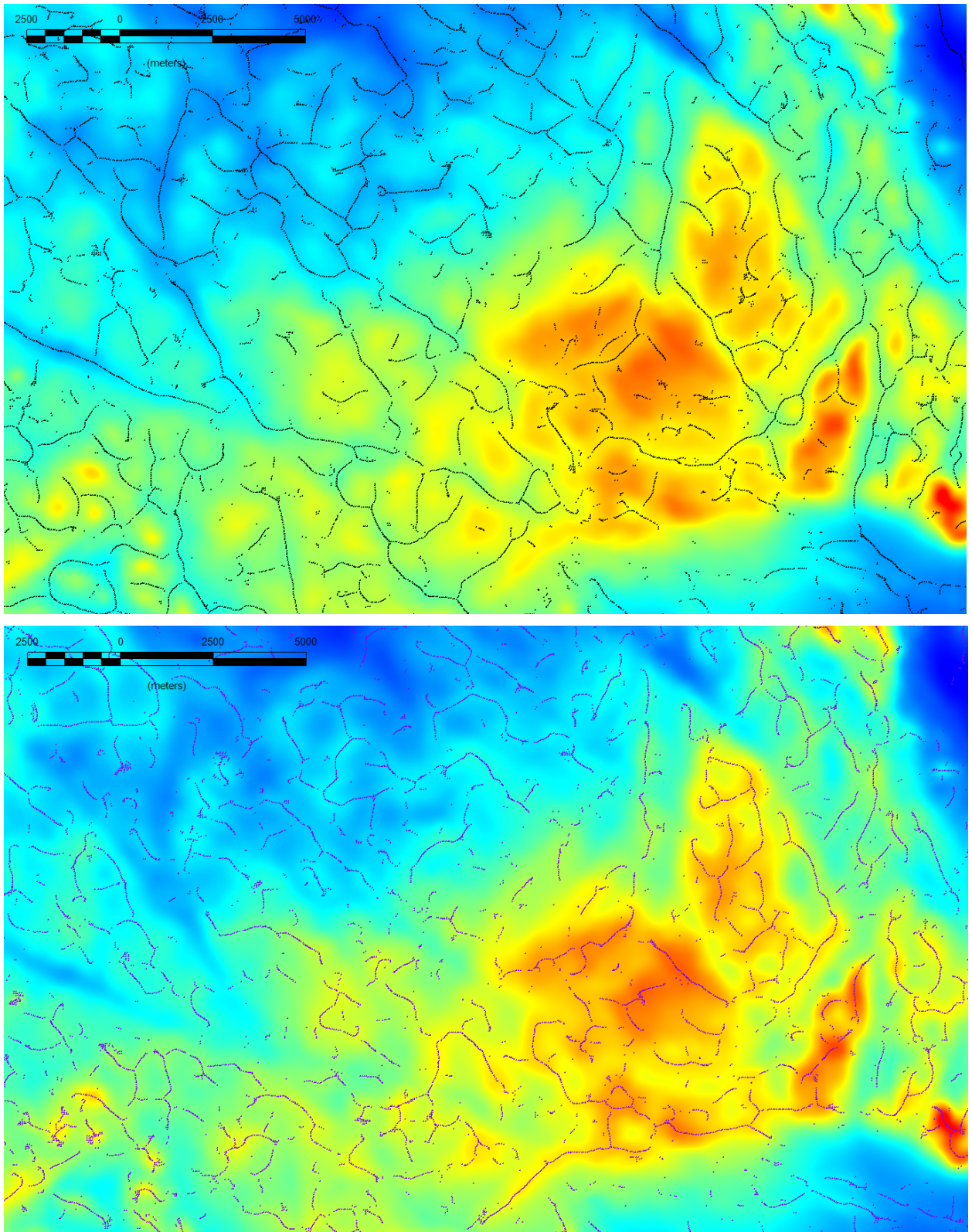
3.1 Ääripisteiden paikantaminen

USGS-GX käyttää kaarevuusanalyysissä Blakelyn & Simpsonin (1986) menetelmää. Lähtöaineistona on interpoloitu rasteriaineisto. Algoritmissa liu'utetaan rasterin pisteiden yli 3 x 3 kokoista pisteikkunaa, johon sovitetaan toisen asteen pinta. Pinnan ominaisuusparametrien avulla tutkitaan, onko pinnalla kaarevuuden ääripisteitä ja mikä niiden tyyppi on (minimi/maksimi).

Pinnan parametrien avulla voidaan myös tutkia pinnan muotoa. Ääripisteiden tapauksessa kiinnostavaa on se, onko pinta venyneempi (*elongation*) jossakin suunnassa muihin suuntiin verrattuna. Venymisellä on yhteys piirteen jatkuvuuteen (esimerkiksi korkeusmallissa näkyvän harjun päälle sovitettu pinta olisi venyneempi harjun suunnassa kuin harjun kylkiä kohti, ja venymissuunnassa voidaan olettaa olevan myös jatkuvuutta). Mikäli pinnalle löytyy ääripiste ja myös venymissuunta, pyritään löytämään pinnan sovitukseen käytetyn pistejoukon keskipistettä lähinnä oleva piste, joka on ääripisteen kanssa samassa venymissuunnassa. Lopulliseen ratkaisuun otetaan mukaan tämä ns. kriittinen piste ja sen amplitudiarvoksi pintasovituksen arvo tässä pisteessä. Tulokseen tallennetaan mukaan myös venymissuunta, jota voidaan pitää piirteen kulkusuuntana. Kun pintasovitusta liu'utetaan yli koko rasteripinnan, saadaan tuloksena pistejoukko, joka koostuu kriittisistä pisteistä ja niiden kulkusuunnista.

Kuvassa 6 on esitetty yksinkertainen esimerkki algoritmin lopputuloksesta. RTP-muunnetun ja 200 metriä ylöspäin jatkettun magneettisen totaali-intensiteetin minimipisteet osuvat väripintakarttaan verrattuna hyvin minimijaksoille ja parhaimmillaan kuvaavat erittäin hyvin alueen kaakko-luode –suuntaisia suuria magneettisia heikkousvyöhykkeitä. Magneettiset maksimijaksot taas paikantavat voimakkaat positiiviset anomaliajaksot. Koska analyysi tehdään pieni pistejoukko kerrallaan, paikannetaan algoritmilla myös paikalliset, amplitudiltaan pienet anomaliat.





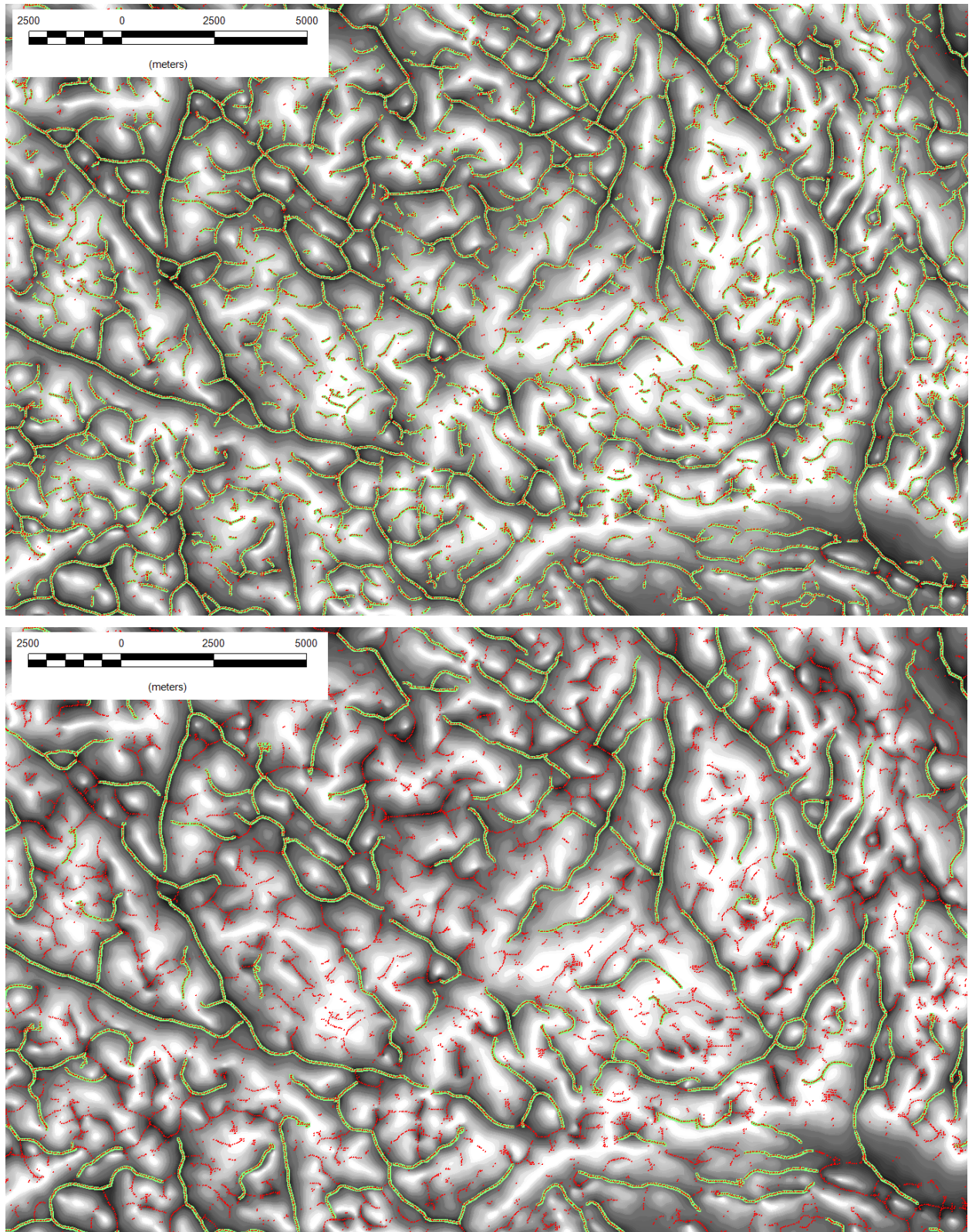
Kuva 6. Magneettisen totaali-intensiteetin (RTP-muunnettu ja 200 m ylöspäin jatkettu kenttä) minimietsinnän tulospisteet (ylhäällä) ja maksimietsinnän tulospisteet (alhaalla).

3.2 Pisteiden yhdistäminen

GTK:n toteuttama pisteiden yhdistelyalgoritmi noudattaa Phillips et al.:in (2007) ehdotusta. Algoritmissa etsitään kullekin pisteelle lähin piste siten, että pisteiden kulkusuunnat vastaavat toisiaan, ja merkataan lähipisteen löydyttyä molemmat pisteet linjaan kuuluviksi. Pisteet ketjutetaan linjoiksi (l. viivoiksi) siten, että kukin piste kuuluu vain yhteen linjaan. Lisätietoja toteutuksesta löytyy liitteestä 1.

Pisteitä yhdistettäessä käyttäjällä on mahdollisuus säädellä yhdistämiseen liittyviä parametreja. Näitä ovat kulkusuunnan maksimivaihtelu (paljonko peräkkäisten pisteiden kulkusuunnilla saa olla eroa, että ne vielä katsotaan samalle linjalle kuuluviksi), peräkkäisten pisteiden välinen maksimietäisyys sekä viivan minimipituus pisteinä.

Kuvassa 7 on ajettu kaksi hieman erilaista yhdistämisajoa samasta lähtöaineistosta (alue sama kuin kuvassa 6). Magneettisesta totaalikentästä on laskettu tilt-derivaatta (TDR), joka korostaa aineiston paikallisia muutoksia. TDR-muunnoksen minimipisteet on yhdistetty viivoiksi kahdella erilaisella viivan minimipituuden arvolla. Minimipituuden arvoa kasvattamalla saadaan lyhimpiä piirteitä karsittua tuloksesta.



Kuva 7. Magneettisen totaali-intensiteetin (RTP-muunnettu ja 200 m ylöspäin jatkettu kenttä) tilt-derivaatan minimipisteiden yhdistäminen viivoiksi. Ylhäällä: viivan minimipituus kaksi pistettä. Alhaalla: Viivan minimipituus 30 pistettä. Alkuperäiset minimipisteet punaisella, viivayhdistelyn tulos vihreällä.

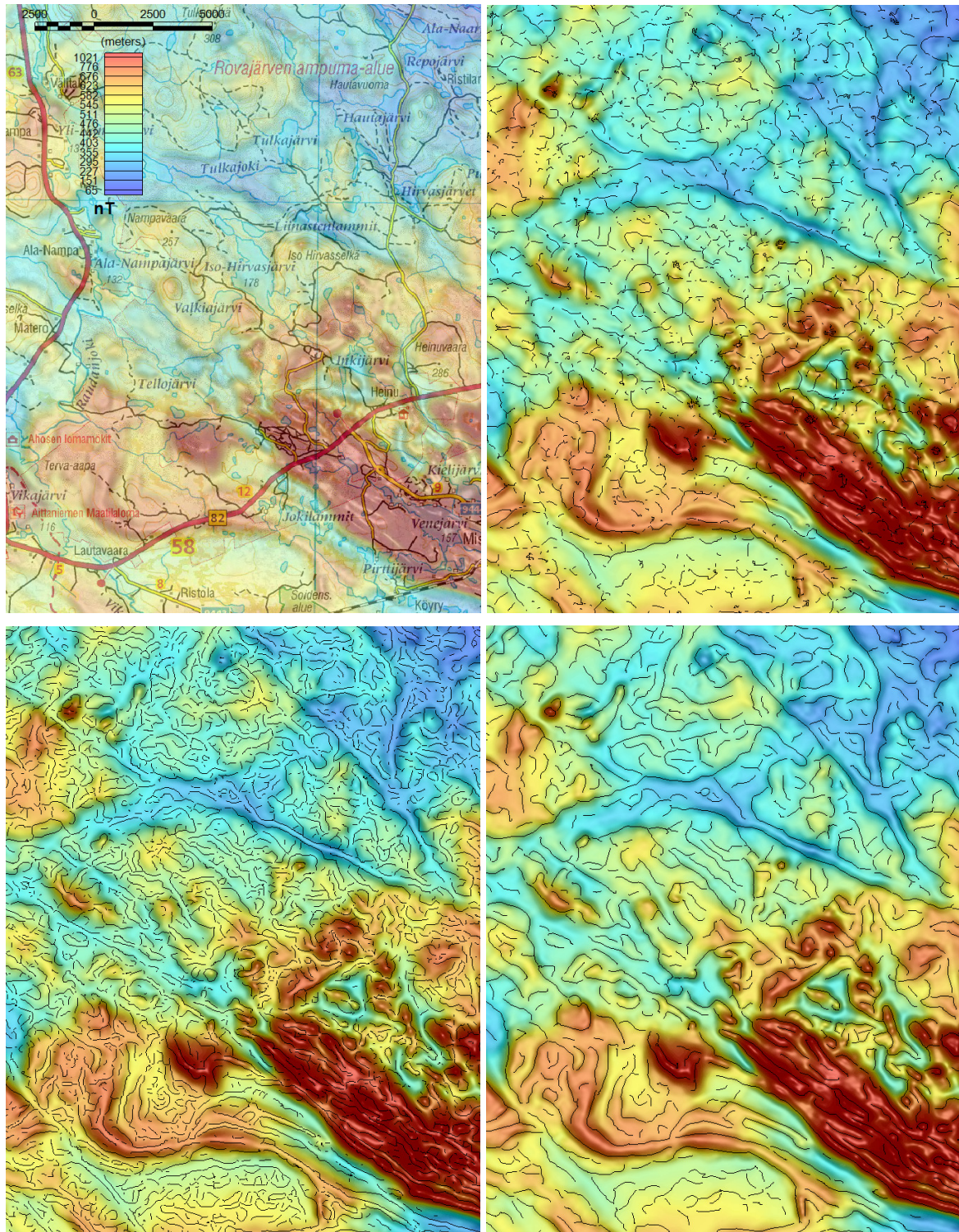
4 KÄYTTÖESIMERKKEJÄ

4.1 Lähdekappaleiden rajaaminen

Potentiaalikenttäaineistojen derivaattajohdannaisia (ks. kpl 2) voidaan käyttää epäjatkuvuuskoh-
tien etsimiseen ja lähdekappaleiden rajaamiseen ja sitä kautta rakennetulkintaan. Menetelmät pe-
rustuvat yleensä siihen, että derivaatan paikalliset maksimit sijoittuvat rakenteellisen kontrastin
kohdalle. Kontrasti voidaan painovoima-aineiston tapauksessa usein tulkita liittyväksi litologi-
seen kontaktiin, mutta magnetoitumavaihtelut kuvaavat enemmänkin kiven aksessorisia mineraa-
leja ja niiden tapauksessa tulkinta on usein monimutkaisempaa (Pilkington & Keating, 2009).

Pilkington & Keating (2004) vertailevat viittä erilaista kontaktien tulkintamenetelmää ja käyttä-
vät työssään derivaattamaksimien tunnistamiseen myös Blakelyn ja Simpsonin (1986) kaare-
vuusanalyysimenetelmää (samaa mitä USGS GX –paketin kaarevuusanalyysialgoritmikin käyt-
tää). Kuva 8 esittää samantyyppisen vertailun vertailun kolmesta USGS GX –menetelmällä tuo-
tetusta derivaatta-analyysistä Pohjois-Suomesta Misin alueelta. Lähtöaineistona on käytetty
RTP-muunnettua 200 m ylöspäin jatkettua magneettista totaali-intensiteettiä (TMI), josta on las-
kettu analyttinen signaali (AS), tilt-derivaatan horisontaaliderivaatta (TDR-HGM) ja totaalikan-
tän horisontaaliderivaatta (TF-HGM).

Kuten Pilkingtonin & Keatingin vertailussakin, analyttisen signaalin maksimi tulkitsee kontak-
tit kaikkein huonoiten ja vaikuttaa menetelmistä epätarkimmalta. TF-HGM -maksimit ja TDR-
HGM -maksimit korreloivat yleisesti ottaen hyvin suurten linjojen suhteen, mutta horisontaalide-
rivaattojen lähtöaineistojen välinen ero (totaalikenttä vs. normalisoiva tilt-derivaatta) aiheuttaa
sen, että TDR-HGM antaa paljon pienipiirteisemmän tuloksen kuin TF-HGM. TF-HGM on
myös herkempi rakenteiden kaateen ja remanenssin suhteen, mikä saattaa aiheuttaa tulokseen
epätarkkuutta. Pilkington & Keating ovat kuitenkin sitä mieltä, että matalan gradientin alueilla
TF-HGM antaa luotettavamman tuloksen kuin TDR-HGM, jonka ongelmana ovat epätodet mak-
simit ja muut häiriöt. Paras tulos saataneen eri menetelmien yhteiskäytöllä.

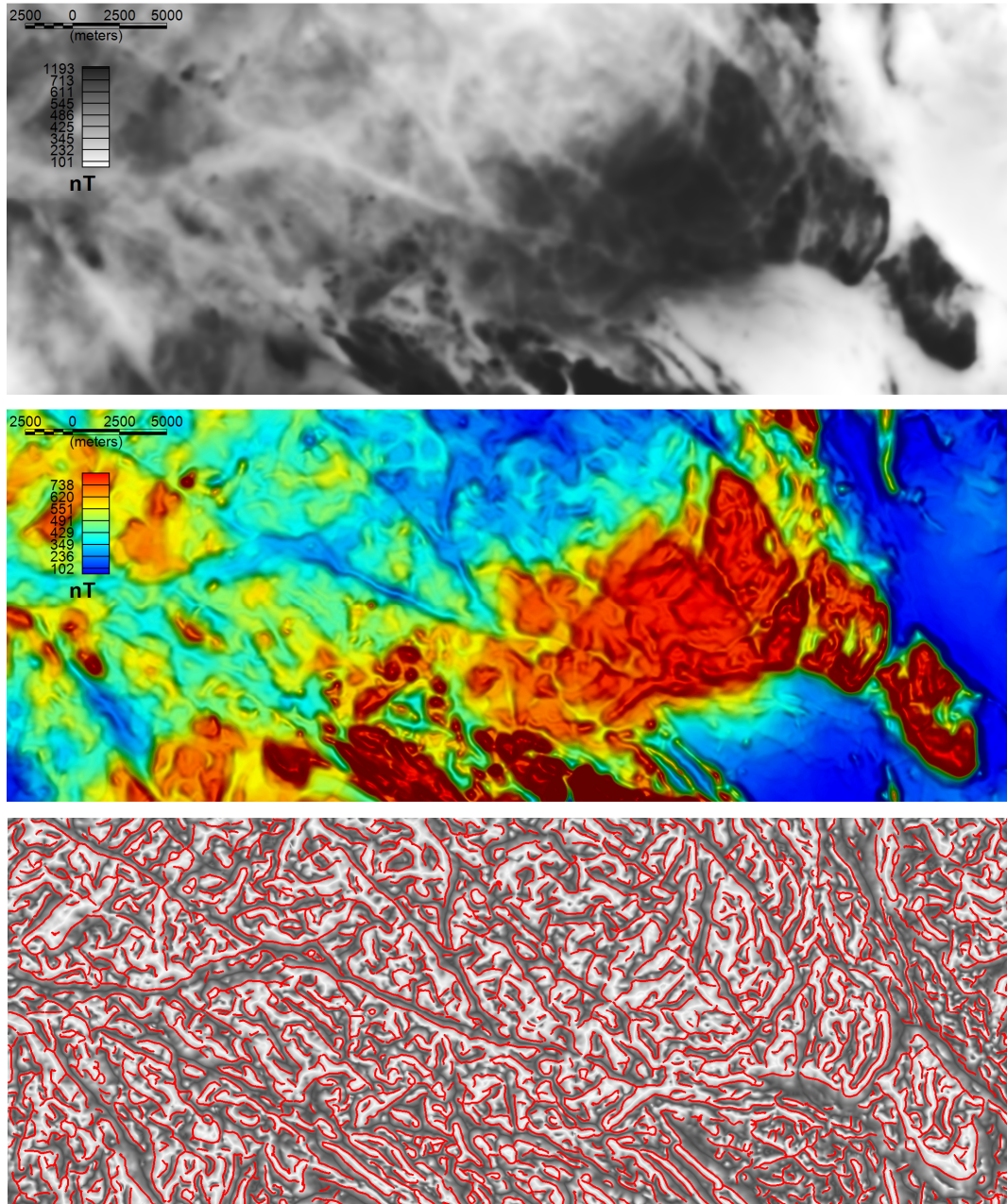


Kuva 8. Erilaisten kontaktintulkintamenetelmien vertailua. Ylhäällä vasemmalla: TMI. Ylhäällä oikealla: AS-maksimit (mustat viivat). Alhaalla vasemmalla: TDR-HGM -maksimit. Alhaalla oikealla: TF-HGM -maksimit. Pohjakartta: © Maanmittauslaitos, lupanro 13/MML/11.

4.2 Ruhjetulkinta

Derivaattajohdannaisia voidaan käyttää kappaleiden kontaktien määrittämisen lisäksi myös lineamenti- ja ruhjetulkintaan. Tulkinnassa tehdään oletus, että ruhjeeseen liittyy potentiaalientäminimi.

Kuvassa 9 on esitetty magneettinen totaali-intensiteetti TMI harmaasävykarttana, keski-ikkunassa TMI varjostettuna väripintana ja alimmassa ikkunassa toisen asteen TDR (TDR_2) sekä lähdekappaleiden kontakteja kuvaava totaalihorisontaaliderivaatan maksimikäyrä. Varjostus antaa jo hyvän kuvan alueen ruhjevyöhykkeistä, mutta derivaattojen yhdistelmäkuva selkeyttää kuvaa vielä huomattavasti ja toimisi erinomaisesti apuna lineamenttitulkinnassa.



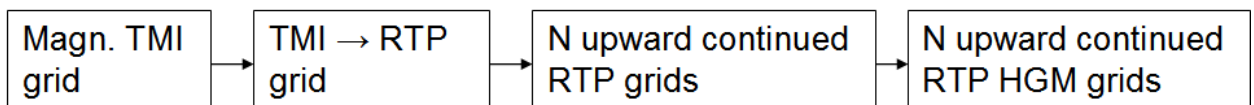
Kuva 9. Ylhäällä: TMI. Keskellä: TMI ylhäältä varjostettuna. Alhaalla: TF-HGM -maksimit punaisella viivalla, toisen asteen TDR harmaasävykarttana.

4.3 Kaarevuusanalyysin vertailu Intrepid Worming –työkaluun

Multiscale edge analysis (Hornby et al., 1999, Archibald et al., 1999, Holden et al., 2000) on menetelmä, jossa etsitään wavelet-laskentatekniikan avulla totaalihorisontaaliderivaatan maksimeita vastaavia pistejonoja (”matoja”). Analyysi toteutetaan usealla eri korkeustasolla (kenttää jatketaan ylöspäin), ja eri korkeustasoja vertailemalla saadaan tietoa kappaleiden kaateista ja geometriasta. Menetelmä pohjautuu painovoimateoriaan, ja magneettisen aineiston kanssa suositellaan pseudogravimetristä muunnosta.

Lahti & Karinen (2010) esittivät helppokäyttöisen ja stabiilin TDR:n nollakohtiin ja ylöspäin jatkettuihin kenttiin perustuvan kontaktianalyysimenetelmän. Vertailussa wavelet-tekniikkaan menetelmä tuotti samankaltaisia tuloksia. Tämän työn innoittamana testattiin myös USGS-GX:n avulla tuotettuja totaalihorisontaaliderivaattamaksimien jonoja wavelet-analyysin tuloksiin. Wavelet-tulokset laski geofyysikko Ilkka Lahti Intrepid Worming -ohjelmistolla.

Kuvassa 10 on esitetty totaalihorisontaaliderivaattoihin perustuvan laskennan vaiheet. Magneettiset mittaukset naparedukoidaan ja tämän jälkeen lasketaan ylöspäin jatkettu kenttä usealle eri tasolle. Näistä ylöspäin jatketuista kentistä lasketaan totaalihorisontaaliderivaatat. Tämän jälkeen määritetään USGS GX –työkalulla horisontaaliderivaattojen maksimikohdat ja yhdistettiin pisteet GTK:n työkalulla viivoiksi.

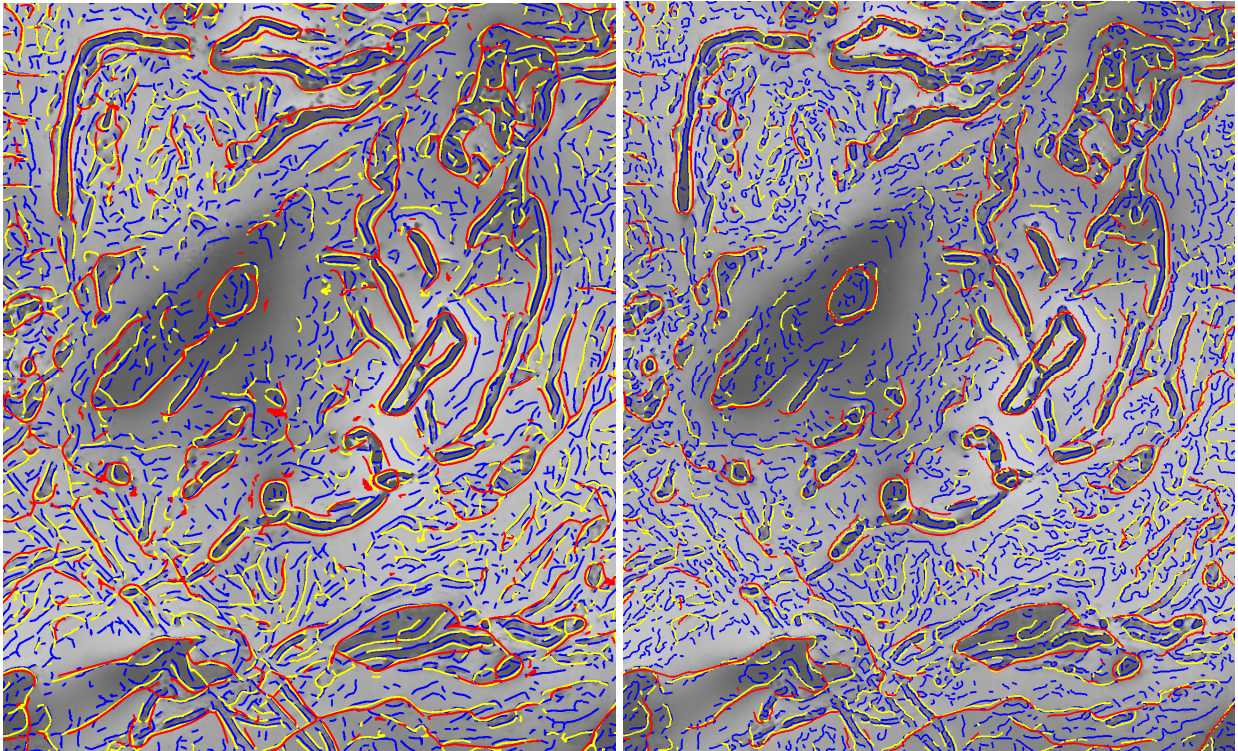


Kuva 10. Laskennan työkaavio (mukaeltu lähteestä Lahti & Karinen, 2010).

Kuvassa 11 on esitetty tulokset USGS GX –analyysiin perustuvalla menetelmällä sekä wavelet-analyysillä kolmelle eri kentän korkeustasolle. Tulokset ovat hyvin toisiaan vastaavat. Lähinnä alimmalla kentän tasolla tuloksissa esiintyy jonkin verran eroa: USGS GX –analyysi esittää piirteet hieman suoraviivaisempana kuin wavelet-analyysi, mikä toimii useissa kohdissa hyvin, mutta toisaalta saattaa pienipiirteisessä geometriassa hukata pienimpiä piirteitä. Menetelmien vertailu tällä tasolla perustuu kuitenkin lähinnä visuaaliseen mielikuvaan, ja on mahdotonta sanoa, kumpi menetelmästä kuvaa rakenteita todenmukaisemmin. Erot ovat käytännössä hyvin pieniä.

USGS GX –tuloksessa esiintyy ylimmällä tasolla pieniä viivatihentymiä, jotka johtuvat pisteiden yhdistelytyökalun tämänhetkisestä algoritmista. Viivatihentymät eivät kuitenkaan haittaa tulkin-

Kuten kappaleessa 2.2 todettiin, totaalihorisontaaliderivaatan maksimit siirtyvät kontaktin yläpinnasta sivuun kaateen suunnassa, ja siirtymä on sitä suurempi, mitä suurempi on kappaleen yläpinnan ja mittauskorkeuden välinen erotus. Tästä seuraa, että eri korkeuksille laskettujen totaalihorisontaaliderivaatan maksimien keskinäisiä paikkoja vertailemalla voidaan päätellä kappaleen kaadesuunta. Tämä pätee luonnollisesti myös wavelet-tekniikkaan, samoin TDR-nollakohtaan perustuvaan analyysiin (Lahti & Karinen, 2010).



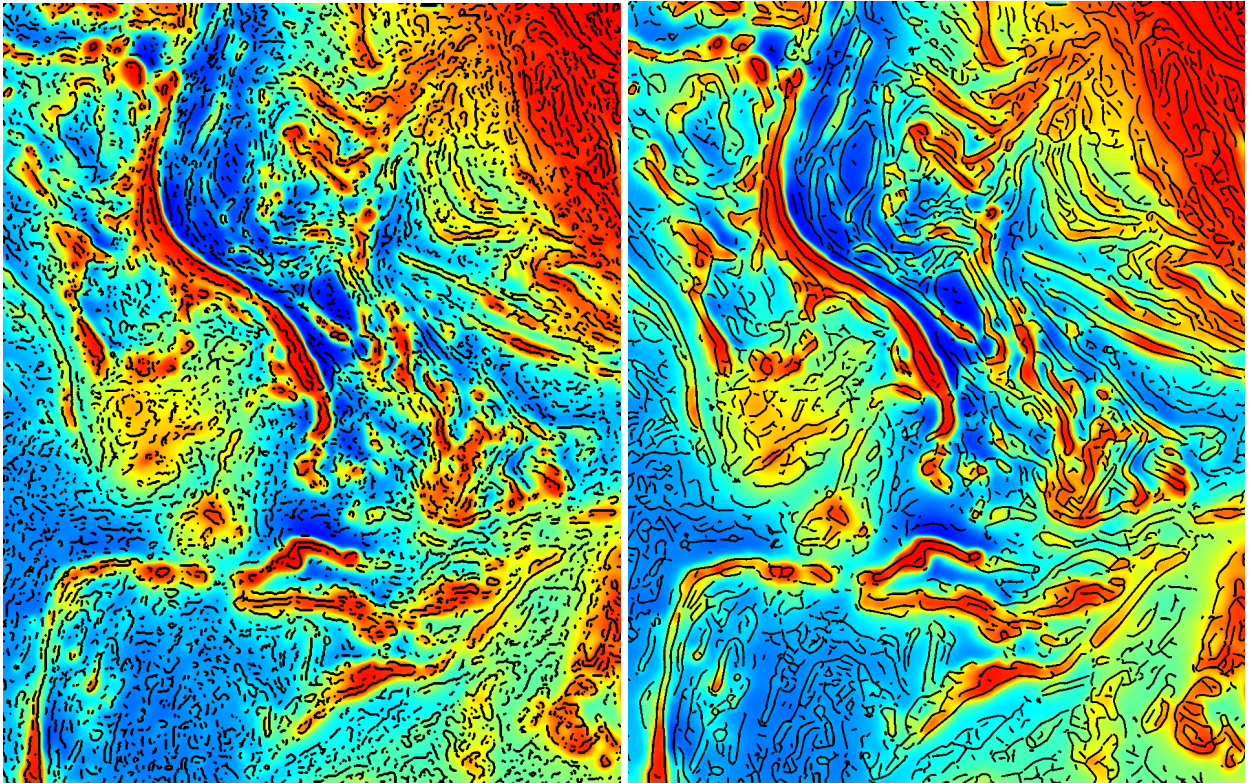
Kuva 11. Vasemmalla: Horisontaaliderivaatan maksimit USGS-GX –algoritmilla tasoille 200 m (sininen), 500 m (keltainen) ja 1000 m (punainen) laskettuna. Oikealla: Intrepid Worming- työkalun wavelet-analyysitulokset tasoilla 196 m (sininen), 538 m (keltainen) ja 1054 m (punainen). Kartan koko 39 x 48 km.

4.4 Kaarevuusanalyysin vertailu CET-työkaluun

Geosoftin tarjoama kaupallinen CET Grid Analysis –työkalupaketti on University of Western Australia –yliopiston Centre for Exploration Targeting –yksikön (CET) tutkima ja tuottama. Työkalupaketti tarjoaa useita työkaluja sekä malliprosessit, joiden avulla voidaan tehdä joko trendianalyysiä (ks. Holden et al, 2008) tai kontaktianalyysiä. Analyysit perustuvat kuvankäsittelyalgoritmeihin, joten ne soveltuvat muillekin aineistoille kuin potentiaalitentille.

GTK:ssa testattiin CET Grid Analysis –paketin trendianalyysiä rakennetulkintatarkoituksiin. Trendianalyysissä on kolme vaihetta: tekstuurianalyysi, jossa etsitään rasterikuvasta kompleksisia rakenteita, rakenteiden jatkuvuuden analyysi sekä havaittujen rakenteiden ohentaminen trendiivoiksi.

Kuvassa 12 on esitetty yksityiskohta CET-paketin trendianalyysin tuloksesta testatulle magneetikenttäaineistolle. Magneetikenttä jatkettiin 200 m ylöspäin kohinan minimoimiseksi. Testiä aloitettaessa ei ollut varsinaisesti selvillä, millaista tulosta voitaisiin odottaa, mutta verrattaessa tulosta saman lähtöaineiston totaalihorisontaaliderivaattojen maksimianalyysiin nähdään, että tulokset ovat melko vastaavia (joskin CET suoriutuu tehtävästä hieman huonommin). Tämä on sikäli yllättävää, että nimen perusteella olisi voinut paremminkin olettaa CET-paketin toisen osion, kontaktianalyysin, vastaavan horisontaaliderivaatan maksimianalyysiä. Valitettavasti ajanpuutteen vuoksi tätä toista osaa CET-työkalupaketista ei kuitenkaan päästy testaamaan.



Kuva 12. Vasemmalla: CET Grid Analysis –paketin trendianalyysi. Oikealla: Totaaliorisontaaliderivaatan maksimit (USGS GX + GTK:n jatkotyökalu). Alueen koko 28 x 36 km.

5 YHTEENVETO

Raportissa on esitelty erilaisia rakennetulkintatyökaluja Geosoft Oasis Montaj –ohjelmistolle. Yksinkertaisimmillaan työkalut ovat erilaisia derivaattajohdannaisia (kpl 2), mutta myös pidemmälle meneviä (semi-)automaattisia menetelmiä kuten USGS GX –työkalut (kpl 3) sekä Geosoft CET Grid Analysis (kpl 4) voidaan käyttää.

Derivaattojen käyttö kontaktianalyysissä perustuu erilaisten litologisia ja rakenteellisia epäjatkuvuuksia kuvaavien kontakti-indikaattoreiden käyttöön. Tyypillisin indikaattori on derivaatan paikallinen maksimi, joka sijoittuu kontaktin yläpinnan kohdalle. Kirjallisuuden ja suoran mallinnuksen perusteella on kuitenkin selvää, että tilanne ei ole aina näin yksinkertainen. Tulkintaan vaikuttaa mm. kappaleen koko ja syvyys, kaateen suunta sekä mahdollinen remanentti magnetoituma.

Analyttinen signaali (AS), joka on immuuni kaateen ja magnetoituman suunnalle, kärsii derivaatoista eniten kontaktien keskinäisistä häiriövaikutuksista ja huonosta syvyysresoluutiosta. Menetelmä on lisäksi erittäin herkkä tasovirheille ja kohinalle (Pilkington & Keating, 2004, 2009). Tilt-derivaatan totaali-orisontaaliderivaatta (TDR-HGM) on myöskin immuuni kaateen ja magnetoituman suunnalle, mutta aineistossa saattaa esiintyä virheellisiä maksimeita ja häiriöitä, joiden johdosta tulkinta vaikeutuu (Pilkington & Keating, 2009). Normalisoidut derivaatat kuten tilt-derivaatta (TDR) ja normalisoitu totaali-orisontaaliderivaatta (TDX) tasoittavat aineiston amplitudeja ja erottelevat signaalilähteitä hyvin, mutta samalla menetetään informaatiota anomalioiden aallonpituuksista. Derivaatta-analyysien antama informaatio saattaa olla päällekkäistä (Pilkington & Keating, 2009), joten käytettävät derivaatat on syytä valita käyttötarkoituksen mukaan. Useamman derivaatan yhteiskäyttö lienee kuitenkin suositeltavaa.

USGS:n tuottamat ja julkaisemat USGS GX –työkalut tarjoavat useita laajojen geofysikaalisten aineistojen tulkinnassa hyödyllisiä menetelmiä. Tässä työssä on käytetty työkalupaketin kaarevuusanalyysimenetelmää, joka paikallistaa rasteriaineistosta jatkuvia paikallisia minimi- tai maksimijaksoja. Työkalulle on GTK:ssa kehitetty jatkokäsittelyalgoritmi, jonka avulla tulokset saadaan helppokäyttöisemmiksi. Kaarevuusanalyysiä voidaan käyttää mm. rakenneanalyysissä erilaisten derivaattojen maksimien tai minimien paikallistamiseen. Raportissa on esitetty tästä useita esimerkkejä. Maksimi- ja minimijaksoja voidaan edelleen käyttää lähdekappaleiden geometrioiden tai heikkousvyöhykkeiden analysointiin. Myös kaateiden kvalitatiivinen tulkinta on mahdollista. Analyysin tulokset ovat yleisesti ottaen stabiileja ja helppokäyttöisiä.

Erilaiset rakennetulkintatyökalut tarjoavat hyvän lisän tulkitsijan työkalupakettiin, mutta toimivat enemmänkin asiantuntijan tekemän alueesta ja aineistosta riippuvan tulkinnan tukena kuin sen korvaajana.

Kirjallisuus

- Archibald, N., Gow, P. and Boschetti, F., 1999. Multiscale edge analysis of potential field data. *Exploration Geophysics*, 30, 38-44.
- Blakely, R.J. and Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences* 32, 1585-1591.
- Holden, D., Archibald, N., Boschetti, F. and Jessell, M., 2000. Inferring geological structures using wavelet-based multiscale edge analysis and forward models. *Exploration Geophysics*, 31, 617-621.
- Holden, Eun-Jung, Dentith, Mike, Kovesi, Peter, 2008. Towards the automated analysis of regional aeromagnetic data to identify regions prospective for gold deposits. *Computers & Geosciences*, 34, 1505-1513.
- Hornby, P., Boschetti, F. and Horowitz, F.G., 1999. Analysis of potential field data in the wavelet domain. *Geophysical Journal International*, 137, 175-196.
- Lahti, Ilkka and Karinen, Tuomo, 2010. Tilt derivative multiscale edges of magnetic data. *The Leading Edge*, 29, 24-29.
- Lahti, Ilkka; Nykänen, Vesa; Niiranen, Tero 2010. Gravity worms in the prospecting of epigenetic gold deposits : example from the northern Fennoscandian Shield. In: EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, 2-7 May 2010. *Geophysical Research Abstracts* 12, 1p.
- Miller, H.G., and Singh, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Phillips, J.D., 2007. Geosoft eXecutables (GX's) developed by the U.S. Geological Survey, version 2.0, with notes on GX development from Fortran code: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1355.
- Phillips, J., Hansen, R.O., Blakely, R.J., 2007. The use of curvature in potential-field interpretation. *Exploration Geophysics* 38, 111-119.
- Pilkington, Mark and Keating, Pierre, 2004. Contact mapping from gridded magnetic data – a comparison of techniques. *Exploration Geophysics* 35, 306-311.
- Pilkington, M., and Keating, P.B., 2009. The utility of potential field enhancements for remote predictive mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35, S1-S11.
- Ruotsalainen, Aimo, 2008. Magneettisten lähteiden tunnistamisesta ja yläpinnan syvyyden arvioinnista Oasis-ohjelmistolla. Esitelmä GTK:n Kohteellisen geofysiikan päivillä, Vuokatti, 14.5.2008.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C., 2004. New insights to magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116-119.
- Wijns, Chris, Perez, Carlos, Kowalczyk, Peter, 2005. Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70, L39-L43.

Liite 1. GTK-työkalu kaarevuusanalyysipisteiden yhdistämiseksi

Toteutusympäristö

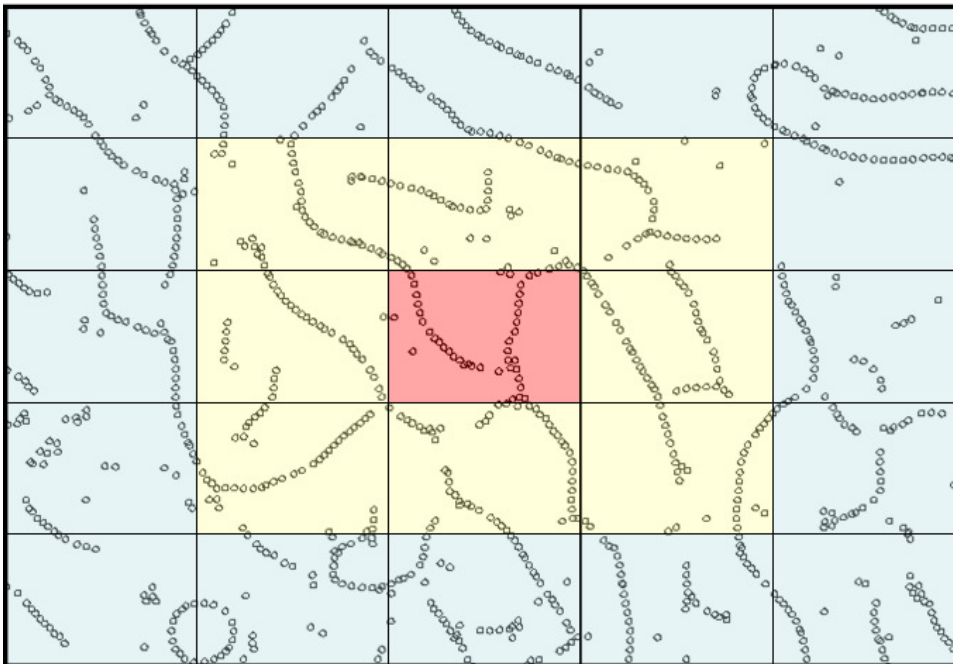
Pisteiden yhdistäminen viivaksi on toteutettu Geosoftissa käytettävänä DLL-kirjastona. Ohjelmointikielenä on C# ja ohjelmointiympäristönä .NET (Visual C# 2010 Express). Ohjelma käyttää hyväksi Geosoftin tarjoamia GX-kirjastoja.

Algoritmi

Alueen ja pisteiden sijaintien analysointi

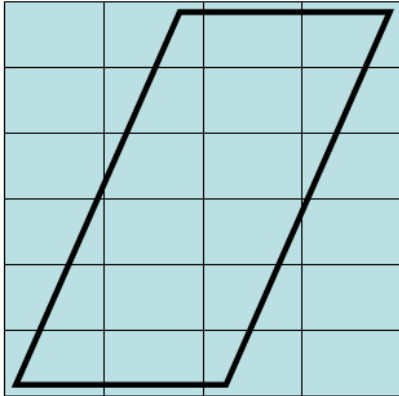
Koska kaikkien tiedoston pisteiden läpikäyminen joka kerta lähintä pistettä etsittäessä on raskas operaatio, pisteiden kattama alue jaetaan aluksi osa-alueisiin ja pisteet luokitellaan osa-alueiden mukaan. Pisteiden sijainti määrää sen, mihin osa-alueeseen se kuuluu, ja pisteen lähipisteitä etsitään ainoastaan sen omasta osa-alueesta sekä naapuriosaa-alueista. Tämän avulla voidaan vähentää laskenta-aikaa.

Alueen jakamista osa-alueisiin on selvennetty kuvassa 1. Kukin piste kuuluu johonkin osa-alueeseen, ja kullekin osa-alueelle on määritetty sen naapuriosaa-alueet. (Naapuruus määritellään ns. 8-naapuruutena, eli kulmittainen naapuruuskin huomioidaan). Kun etsitään pisteelle lähipistettä, käydään läpi ainoastaan pisteen oma osa-alue sekä sitä naapuroivat osa-alueet.



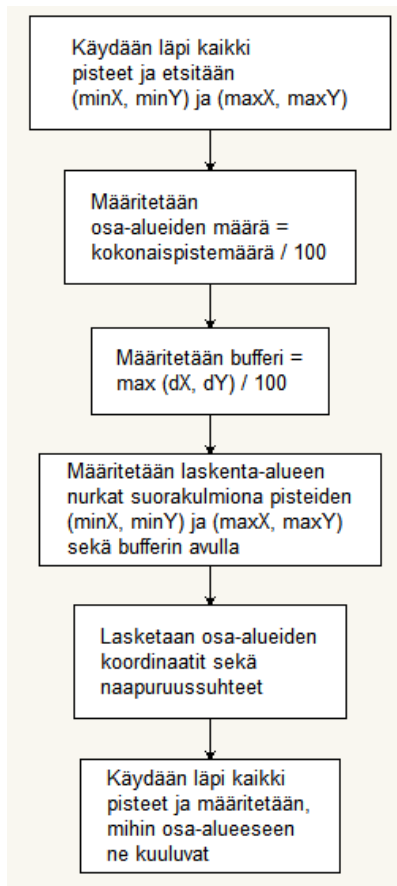
Kuva 1. Alueen jakaminen osa-alueisiin. Punainen = käsiteltävänä olevan pisteen osa-alue, keltainen = naapuriosaa-alue.

Aluejaossa laskenta-alue jaetaan säännöllisiksi suorakulmioiksi riippumatta alkuperäisen alueen muodosta (kuva 2). Näin ollen aluejakoon voi tulla mukaan myös osa-alueita, joihin ei kuulu yhtään pistettä. Tämä tuskin hidastaa laskentaa juurikaan – osa-alue käytännössä vain sivuutetaan, mikäli todetaan että sen pistemäärä on nolla. Symmetrisyys kuitenkin helpottaa huomattavasti osa-alueiden naapuruussuhteiden käsittelyä, joten sikäli tyhjien osa-alueiden pitäminen mukana algoritmissa on perusteltua.



Kuva 2. Epäsäännöllisen muotoisen alueen jakaminen osa-alueisiin. Alkuperäinen, pisteiden kattama alue esitetty vahvennetulla viivalla. Osa-alueiden kattama alue määrittää laskenta-alueen, joka voi siis olla huomattavasti suurempi kuin alkuperäinen alue.

Käytännössä osa-alueisiin jako tapahtuu siten kuvan 3 vuokaavion mukaisessa järjestyksessä. Aluksi määritetään erilaisia laskennassa käytettäviä parametreja. Alkuperäisestä pistejoukosta etsitään minimi- ja maksimipisteet (eli vasen alareuna, oikea yläreuna). Tämän jälkeen määritellään, kuinka moneen osa-alueeseen laskenta-alue jaetaan. Osa-alueiden määrä on algoritmista määritetty siten, että kuhunkin osa-alueeseen tulee yksi prosentti pisteistä. Lisäksi määritellään vielä pieni bufferi (sadasosa alueen maksimidimensiosta).



Kuva 3. Alueen ja pisteiden sijaintien analysoinnin vuokaavio.

Parametrimääritysten jälkeen määritetään laskenta-alue (kuvassa 2 osa-alueiden kattama suorakulmainen alue). Laskenta-alueen suuruus on yhtä kuin alkuperäisen pistejoukon kattama alue lisätynä joka suunnassa bufferiarvolla. (Bufferia käytetään siksi, että desimaalipyöristysten vuoksi reunoilla olevat pisteet eivät jää vahingossa pois laskenta-alueesta).

Laskenta-alueen määrittämisen jälkeen se jaetaan osa-alueisiin (tässä käytetään hyväksi parametrimääritysten yhteydessä määritettyä osa-alueiden lukumäärää sekä laskenta-alueen dimensiotietoja). Osa-alueille annetaan järjestyksessä juoksevat indeksinumerot, joiden perusteella niille määritetään naapuriosa-alueet.

Lopuksi käydään läpi kaikki pistejoukon pisteet ja määritetään koordinaattien perusteella, mihin osa-alueeseen ne kuuluvat.

Linjojen muodostaminen

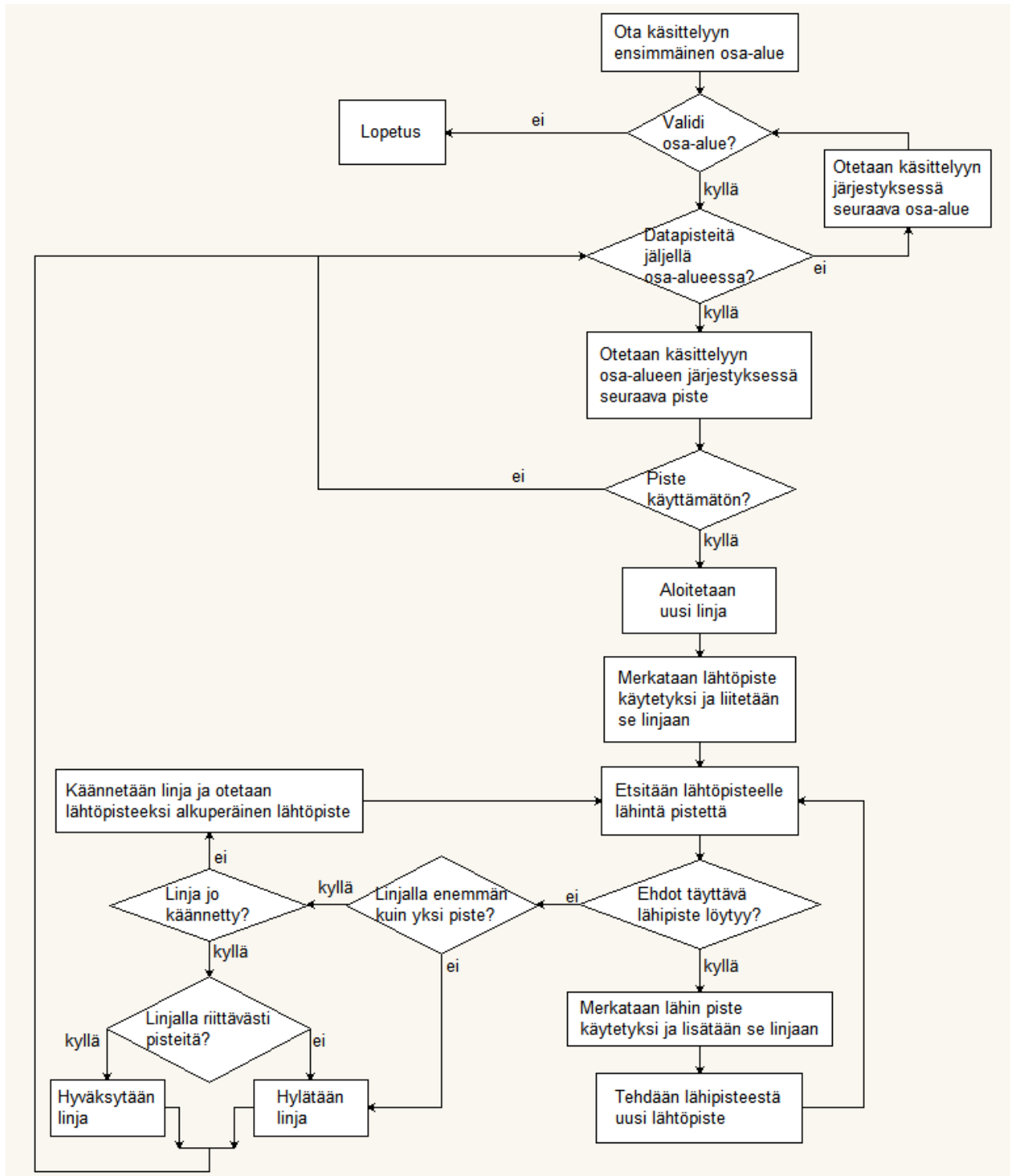
Linjojen muodostamisalgoritmin vuokaavio on esitetty kuvassa 4. Prosessi aloitetaan järjestysluvultaan ensimmäisestä osa-alueesta ja sen ensimmäisestä datapisteestä. Aluksi tarkistetaan, että käsiteltävänä oleva osa-alueen järjestysluku on validi (järjestyslukuindeksiä kasvatetaan prosessin edetessä, ja lopulta tullaan tilanteeseen, missä indeksi on suurempi kuin yhdenkään todellisen osa-alueen järjestysluku, jolloin prosessi on saatettu päätökseen).

Käsiteltävän pisteen osalta tarkistetaan, onko se käyttämätön (ts. ei kuulu vielä mihinkään linjaan). Mikäli piste on käytetty, siirrytään käsittelemään seuraavaa pistettä. Muussa tapauksessa jatketaan tämän pisteen kanssa.

Tässä vaiheessa alustetaan uusi linja. Lähtöpiste merkataan käytetyksi ja liitetään uuteen linjaan. Etsitään lähtöpisteelle lähipiste (ts. piste, johon se linjalla yhdistyy), joka täyttää annetut rajaehdot (etäisyys, suunta). Mikäli lähipistettä ei löyty, merkataan lähtöpiste uudestaan käyttämättömäksi ja hylätään tämä linja. Mikäli taas lähipiste löytyy, merkataan se käytetyksi ja lisätään linjaan. Tehdään tästä juuri löydetyistä lähipisteistä uusi lähtöpiste ja toistetaan etsintäoperaatio. Tätä jatketaan, kunnes lähipistettä ei enää löydy, eli linjan pää on saavutettu.

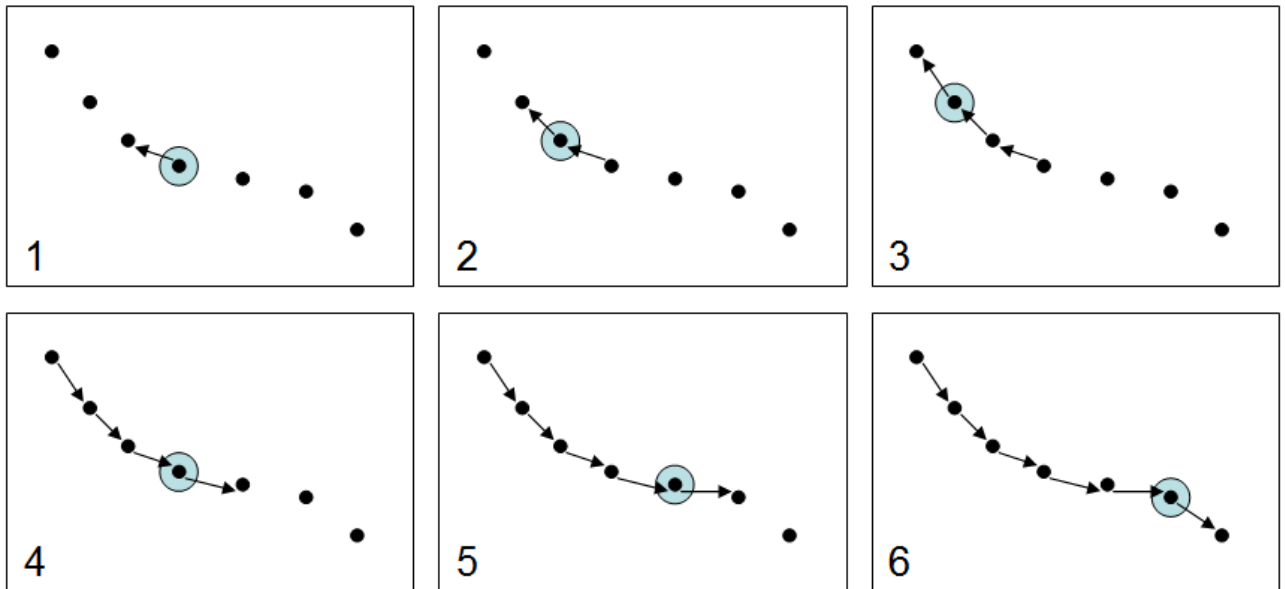
Tämän jälkeen pisteiden järjestys linjalla käännetään, ja alkuperäisestä lähtöpisteestä tehdään uudestaan lähtöpiste. Kun etsintäoperaatio nyt toistetaan, haetaan linjalle jatkuvuutta toiseen suuntaan. Etsintää jatketaan, kunnes linjan pää saavutetaan. Linja on tällöin valmis. Linja tarkistetaan, ja mikäli siinä on enemmän kuin yksi piste, hyväksytään linja. Mikäli linjalla on vain yksi piste, eli alkuperäinen lähtöpiste, hylätään linja. Pisteitä ei kuitenkaan merkata uudelleen käyttämättömiksi, vaan ne jätetään tähän hylättyyn linjaan kuuluviksi.

Näin jatketaan, kunnes osa-alueessa ei ole enää yhtään käyttämätöntä pistettä jäljellä. Tämän jälkeen siirrytään käsittelemään aina seuraavaa osa-aluetta, kunnes osa-alueitakaan ei ole enää jäljellä. Operaation suoritus päättyy.



Kuva 4. Linjojen muodostamisen vuokaavio.

Linjan muodostamista on tarkemmin havainnollistettu kuvassa 5. Aluksi (kohta 1) tarkastelussa on alkuperäinen lähtöpiste. Kohdissa 2-3 haetaan linjalle jatkuvuutta yhdessä suunnassa. Kun linjan pää on saavutettu, käännetään linjan järjestys ja lähdetään uudestaan liikkeelle alkuperäisestä lähtöpisteestä (kohta 4). Etsintää jatketaan (kohdat 5-6), kunnes linjan toinen pää on saavutettu.

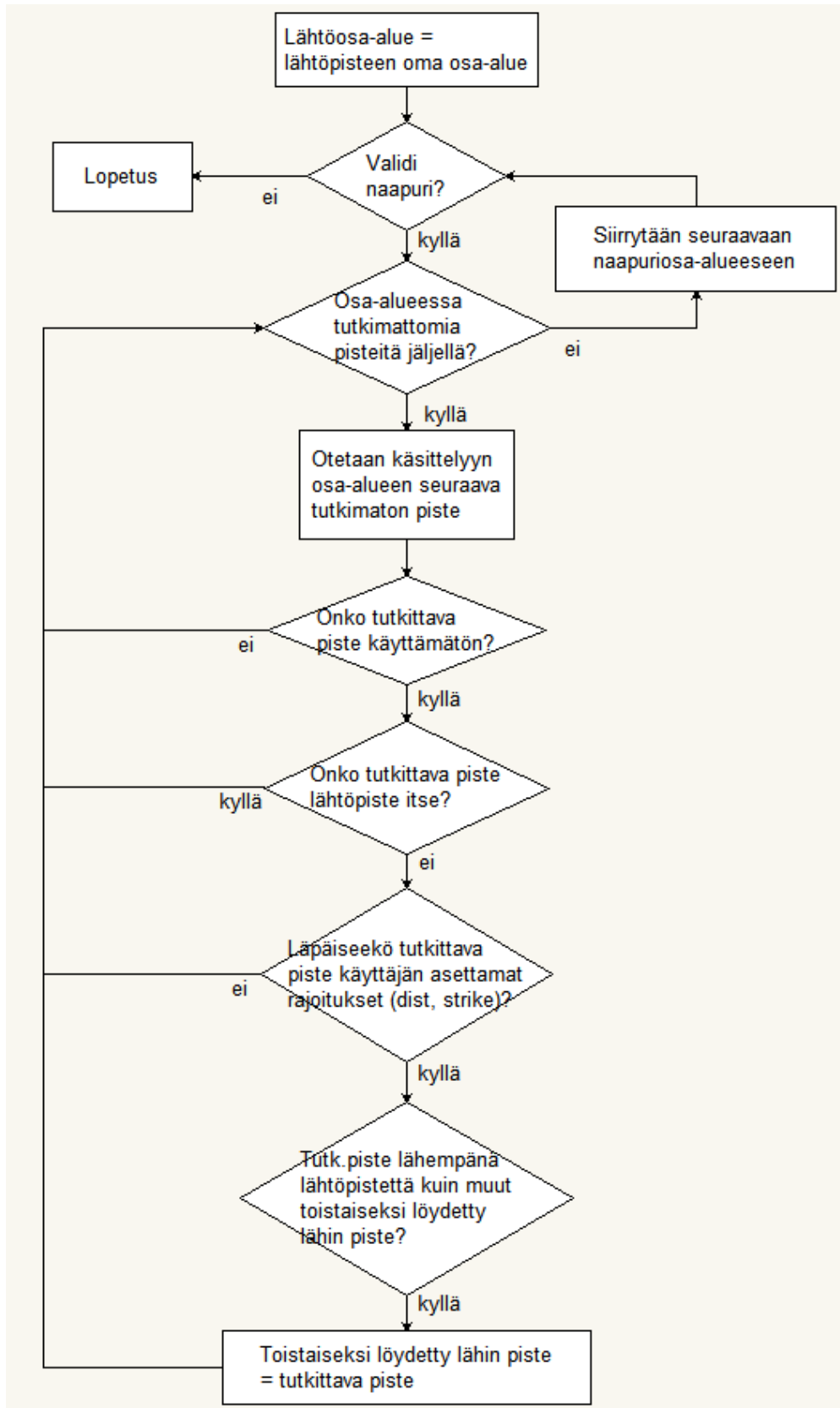


Kuva 5. Esimerkki linjan muodostamisesta. Kussakin vaiheessa käytetty lähtöpiste on merkattu sinisellä ympyrällä.

Lähimmän pisteen etsintä

Käsitellään tarkemmin vielä sitä, mihin lähimmän pisteen etsintä perustuu (kuva 6). Pistettä lähdetään etsimään pisteen oman osa-alueen naapurilistasta, johon kuuluvat pisteen oma osa-alue sekä ympäröivät osa-alueet (ks. kuva 1). Kustakin naapurilistan osa-alueesta tutkitaan järjestyksessä kaikki siihen kuuluvat pisteet ja verrataan niitä lähtöpisteeseen. Mikäli piste on käyttämätön (ts. ei kuulu mihinkään muuhun linjaan), ei ole lähtöpiste itse, läpäisee käyttäjän asettamat vaatimukset pisteiden väliselle maksimietäisyydelle sekä pisteiden kulkusuuntien maksimieroitukselle, piste on periaatteessa validi lähtöpisteen lähimmäksi pisteeksi. Tämän jälkeen tutkitaan vielä se, onko se lähempänä lähtöpistettä kuin lähin tähän asti löydetty validi piste. Mikäli näin on, tutkittava piste merkataan lähimmäksi pisteeksi.

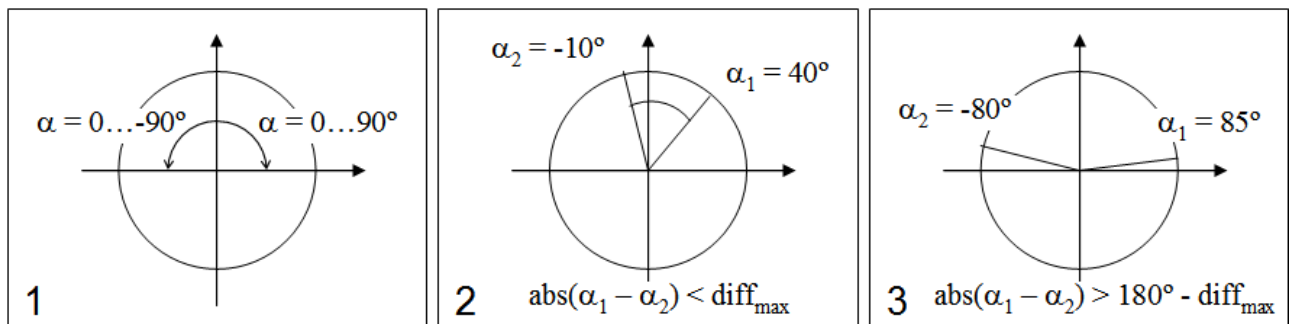
Kun piste on tutkittu, siirrytään lopputuloksesta riippumatta osa-alueen seuraavaan pisteeseen ja toistetaan tutkimusoperaatio, mikäli tutkimattomia pisteitä on vielä jäljellä. Kun osa-alueesta loppuvat tutkimattomat pisteet, siirrytään seuraavaan naapurilistan osa-alueeseen. Tätä jatketaan, kunnes koko naapurilista on käyty läpi.



Kuva 6. Lähimmän pisteen etsintäprosessin vuokaavio.

Pisteen etsinnässä käytetään hyväksi käyttäjän määrittelemiä maksimietäisyyden ja kulkusuunnan erotuksen raja-arvoja. Maksimietäisyys on hyvin suoraviivainen, eli ehto täyttyy, mikäli pisteiden välinen etäisyys on pienempi tai yhtä suuri kuin käyttäjän määrittelemä raja-arvo. Periaatteessa kulkusuuntien välinen erotus noudattaa samaa yksinkertaista kaavaa, mutta laskennassa täytyy ottaa huomioon muutama erityisessä.

Pisteiden kulkusuuntien arvot ovat välillä $-90^\circ < \alpha \leq 90^\circ$. Suunnat ovat suhteessa pohjoiseen, eli esimerkiksi 0° on pohjoiseen ja 90° itään päin. Kulkusuunnissa on kuitenkin huomioitava se, että näillä kulmamerkinnöillä itä ja länsi ovat ikään kuin sama suunta: itä-länsi -suunnassa kulkeva lineamentti voidaan merkitä kulkemaan joko itään tai länteen. Tämän vuoksi kulkusuunta saattaa vaihdella myös lineamentin koostavan pistejoukon sisällä. Joissakin tapauksissa täytyy siis puhua erotuskaavan lisäksi ottaa huomioon 180 asteen kulmasiirtymä (kuva 7).



Kuva 7. Kulkusuunnan kulmaerotuksen laskenta. $diff_{max}$ on käyttäjän määrittelemä maksimieroitus. 1) Kulkusuuntien arvoväli. 2) ”Normaalitapaus”: kulkusuuntien erotus voidaan laskea puhtaasti erotuksena. 3) Toisen pisteen kulku on ~kohti itää, toisen pisteen kulku ~kohti länttä.

Käytännössä kulmaerotusten laskenta tapahtuu siten, että kullekin tarkasteltavalle pisteparille lasketaan sekä kuvan 7 kohdan 2 että kohdan 3 kaavojen mukainen erotus. Mikäli jompikumpi kaavoista on tosi, kulmien välinen erotus on pienempi kuin käyttäjän määrittelemä maksimieroitus.

Lopputoimenpiteet

Lopuksi linjat kirjoitetaan linjoittain uuteen tietokantaan. Tiedoston sarakkeina ovat pisteiden X, Y ja STRIKE.