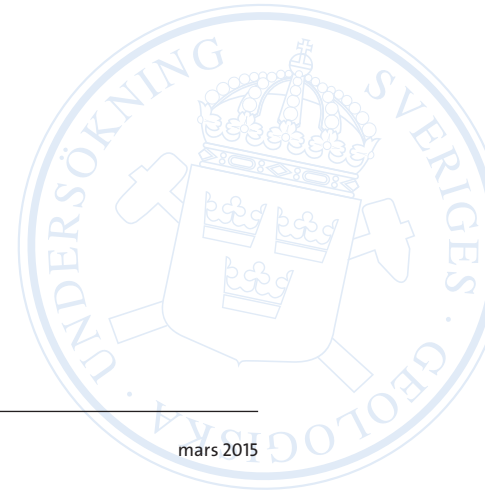


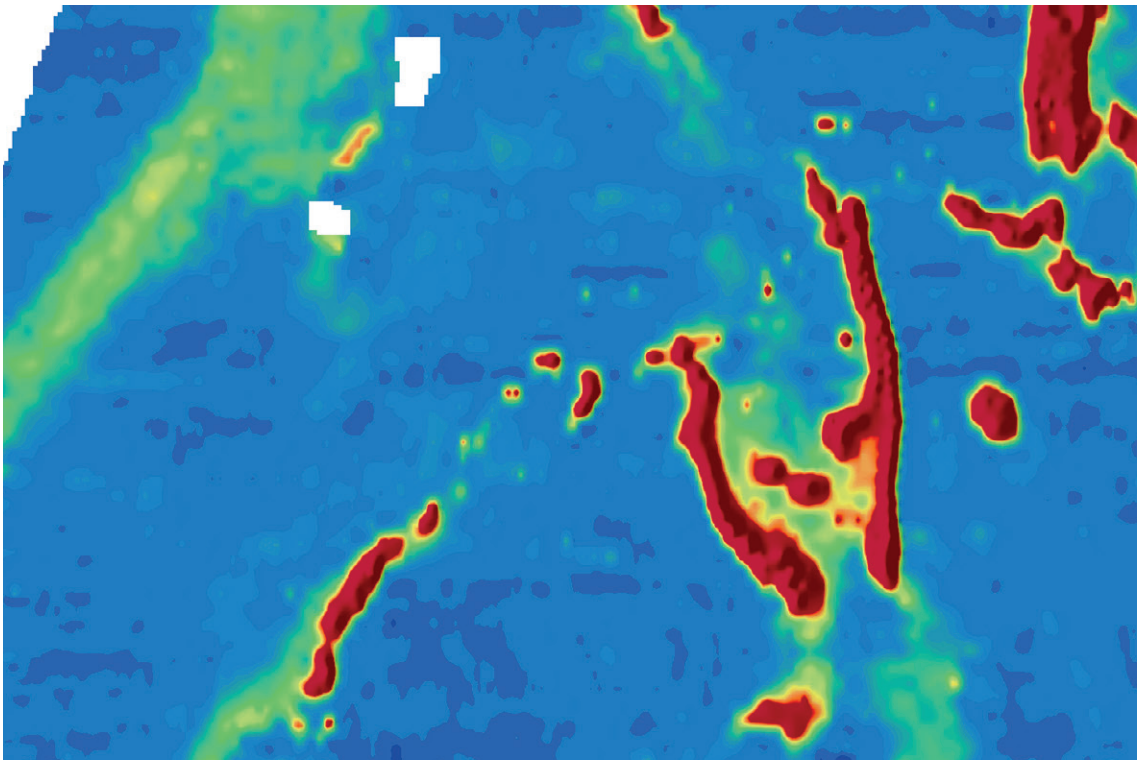
BARENTSPROJEKTET 2014

Modellering av TEM-data över området Kiruna–Soppero

Lena Persson



SGU-rapport 2015:11



SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Omslagsbild: Utsnitt av karta som visar TEM-data över området Kiruna–Soppero.

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

INNEHÅLL

| | |
|---------------------------------------------------|-----------|
| Sammanfattning | 5 |
| Inledning | 5 |
| Mätområdet Kiruna–Soppero | 6 |
| Inversion av data i Aarhus Workbench | 8 |
| Lannavaara | 9 |
| Akkiskera–Kuormakka | 10 |
| Vittangivaara | 11 |
| Referenser | 13 |

SAMMANFATTNING

Denna rapport visar några resultat från de transientelektromagnetiska (TEM) data som samlades in med helikopter i området Kiruna-Soppero under 2013. Flera intressanta anomalier har kommit fram i data. Många av dem sammanfaller med tidigare kända stråk med t.ex. grafit-skiffer men flera av anomalierna ligger inom områden som karterats som granit i tidigare undersökningar.

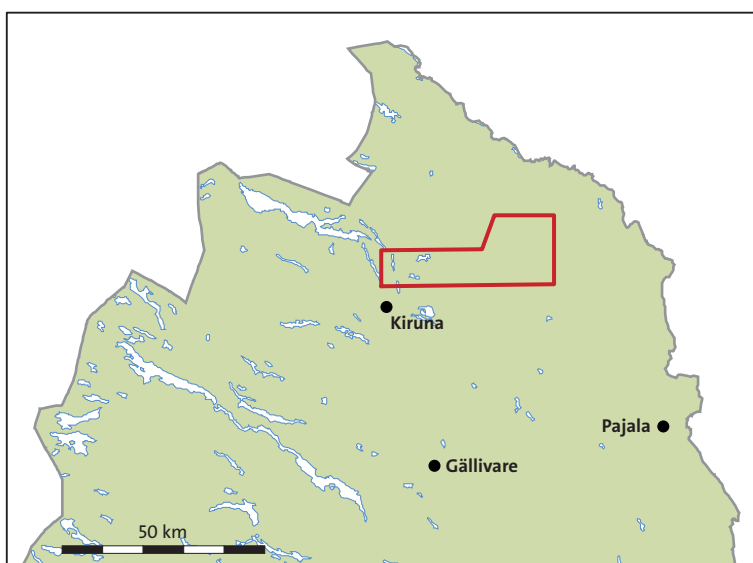
Några olika typer av anomalier har valts ut och data har sedan modellerats med 1D-inversion i programvaran Aarhus Workbench. Resultatet visar att 1D-inversion fungerar bra över bredare strukturer med måttliga resistivitetsvariationer, t.ex. i områden med stora jorddjup och breda deformationszoner. Över konduktiva strukturer orsakade av brantstående grafitförande bergarter ger inversionen i bästa fall information om djupet till överytan av ledaren. För att bättre bestämma strukturernas geometriska utbredning, t.ex. stupning, krävs modellering med två- eller tredimensionella program.

INLEDNING

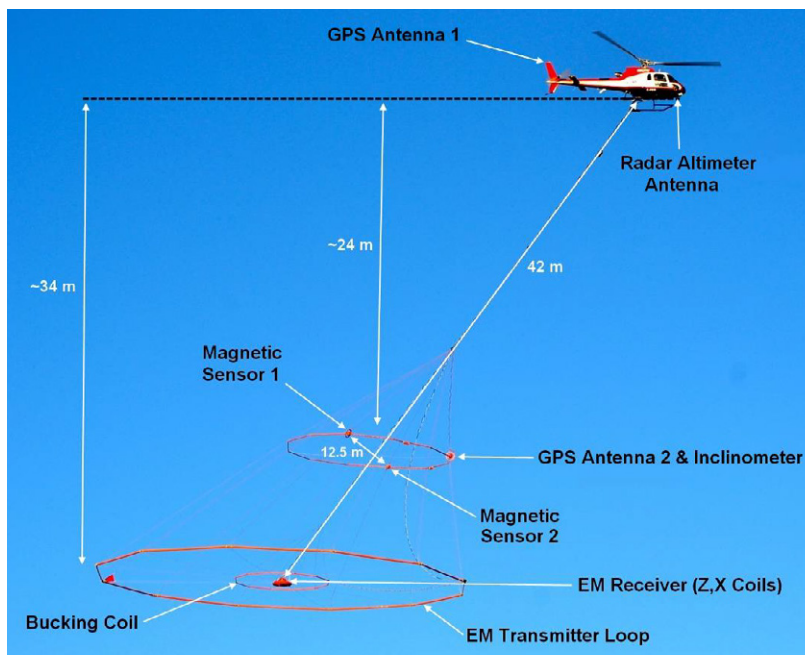
Geofysiska mätningar utfördes med ett helikopterburet TEM-system på uppdrag av SGU inom Barentsprojektet under juli och augusti 2013. Mätningarna startade redan året innan, i oktober 2012, men testflygningarna fick då avbrytas på grund av dåliga flygförhållanden. Mätområdet ligger 25 km norr om Kiruna och sträcker sig 170 km österut (fig. 1). Mätarean är drygt 2 000 km² och totalt insamlades 4 531 km data med ett linjeavstånd på 500 m. Flygriktningen var öst-västlig.

Mätningarna utfördes av det kanadensiska bolaget Geotech Ltd. Deras mätsystem heter VTEM^{plus} (Versatile Time Domain Electromagnetic) och består av en sändarslinga och en mottagarslinga som hänger nedanför helikoptern ca 56 m ovanför markytan (fig. 2). Utöver TEM-data insamlades även magnetfältdata.

TEM är en geofysisk mätmetod där man skickar ut en kraftig ström i en kabelslinga vilken sedan slås av momentant. Vid strömavslag induceras en ström i marken som utbreder sig nedåt och utåt likt en rökning. Strömmen i marken orsakar ett magnetiskt fält som uppmäts i en mottagarspole. Storleken på fältet och hur snabbt det avklingar beror av markens ledningsförmåga. Över en högresistiv markvolym är den uppmätta signalen i mottagarspolen svag jämfört med över en lågresistiv markvolym. Fördelen med TEM i jämförelse med andra elektromagnetiska metoder, t.ex. slingram, är den stora djupkänningen.



Figur 1. Undersökningsområdet.



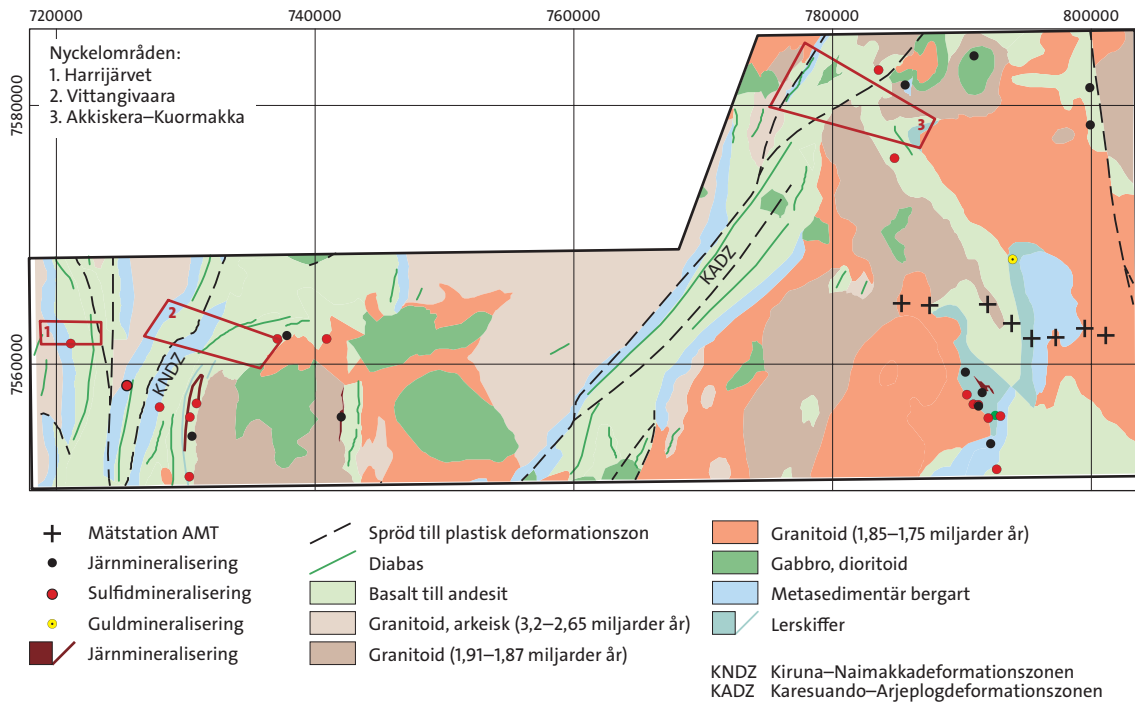
Figur 2. Systemkonfiguration för VTEM^{PLUS}.

Resultatet har levererats som processerade data (z- och x-komponent) för totalt 44 tidskanaler (gate 4-48; 0,021 till 10,6 ms) tillsammans med en rapport (Geotech 2013). I leveransen ingick även beräkning av tidskonstant (τ) samt en approximativ beräkning av resistivitet för olika djup, s.k. resistivity depth image (RDI). Tidskonstanten τ , som är beroende av konduktansen, förstärker responsen från goda ledare oberoende av deras djup. RDI är en snabb, approximativ metod för att beräkna resistivitet från TEM-data och ger en bild av resistivitetsfördelningen i marken.

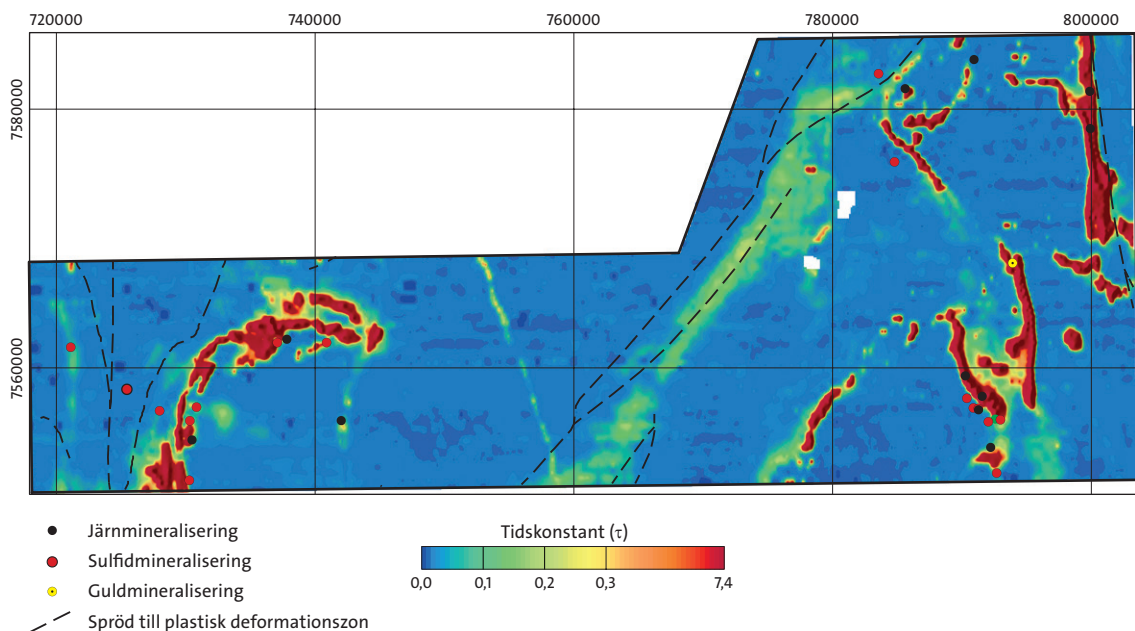
MÄTOMRÅDET KIRUNA–SOPPERO

Berggrunden i undersökningsområdet (fig. 3) består av intrusivbergarter av olika ålder samt flera stråk av bergarter tillhörande grönstensgruppen. Huvudbergarterna inom grönstensgruppen består av metabasalt, grafitförande metasedimentära bergarter och ultramafiska bergarter (Bergman m.fl. 2001). Flera större, spröda till plastiska deformationszoner skär genom området. Längst i väster finns Kiruna-Naimakka-deformationszonen (KNDZ), i den centrala delen av området finns Karesuando-Arjeplog-deformationszonen (KADZ) och i den nordöstra delen av området finns ytterligare en deformationszon. Inom området finns ett flertal järn- och sulfidmineraliseringar. De flesta av dem ligger inom grönstensgruppens bergarter. Tre av Barentsprojektets nyckelområden ligger inom det undersökta området: Harrijärvet, Vittangivaara och Akkiskera–Kuormakka (Luth & Berggren 2013, Luth m.fl. 2014). Geofysisk markmätning med audiomagnetotellurik (AMT) utfördes inom den östra delen av området under sommaren 2013 (fig. 3, Bastani 2015).

Figur 4 visar resultat från VTEM-mätningen i form av tidskonstant (τ). De flesta större anomalier kan kopplas till stråk med grafitkiffer och bandade järnmalmförekomster inom grönstensgruppen. För dessa anomalier är tidskonstanten τ oftast högre än 1 ms vilket indikerar mycket goda ledare. I den västra delen av området finns en tydlig anomali som svänger av mot nordost vid nyckelområdet Vittangivaara. I den sydöstra delen av området vid Lannavaara finns en nord-sydlig antiklinal veckstruktur (Bergman m.fl. 2000) med en v-formad anomali som även den är orsakad av grafitförande bergarter. Den östra delen av strukturen fortsätter mot nordväst där den framträder som en tydlig linjär anomali inom nyckelområdet Akkiskera–Kuormakka.



Figur 3. Berggrundskarta över mätområdet Kiruna–Soppero. Modifierad efter SGUs databas Sveriges berggrund 1:1 miljon.



Figur 4. VTEM, beräknad tidskonstant, τ .

I den södra delen av området (vid koordinat 780 000 E) finns en smal, linjär anomali med nordöstlig riktning som till största delen ligger inom områden med granitoid enligt berggrundskartan. Här finns få hällar.

I den nordöstra delen av området förekommer en nord–sydligt strykande anomali med en bredd på upp till 2 km. Även den sammanfaller i den norra delen med grönstensgruppens bergarter medan den södra delen sammanfaller med granitiska bergarter enligt berggrundskartan.

Det finns även några mindre anomalier strax söder om denna struktur som ligger inom området med granit samt en kraftig cirkulär anomali längre söderut med en diameter på ca 1,5 km.

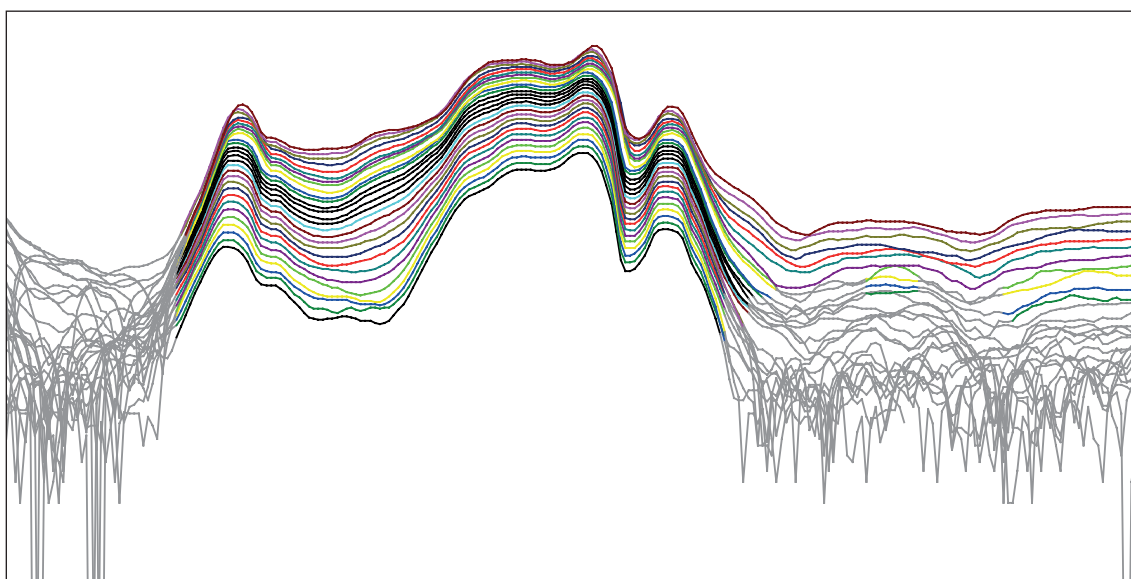
Utöver dessa anomalier förekommer även svagare anomalier ($\tau < 0,3$ ms) inom området. Den tydligaste är den upp till 4 km breda, nordöstligt strykande anomalin som skär genom hela området. Anomalin sammanfaller till stora delar med grönstensgruppens bergarter och Karesuando–Arjeplogdeformationszonen (KADZ). Längst i väster finns även en nord–sydlig, svag anomali som sammanfaller med grönstensgruppens bergarter. En smal, linjär anomali i nordvästlig riktning vid koordinat 753 000–760 000 E är orsakad av ett renstängsel.

INVERSION AV DATA I AARHUS WORKBENCH

Några olika typer av anomalier inom området har valts ut för inversion med programvaran Aarhus Workbench (Aarhus Geophysics 2011). Aarhus Workbench utvecklades vid Århus Universitet för inversion av SkyTEM-data. Programmet kan även användas för inversion av TEM-data som samlats in med andra mätsystem, t.ex. VTEM.

Geotech levererade även en datafil, en s.k. geo-fil som definierar själva mätsystemet och som används för att inläsningen av data i Aarhus Workbench ska bli korrekt. För att inversionen skulle fungera och ge en rimlig dataanpassning fick vi hjälp av Jesper Bjergsted Pedersen vid Århus Universitet med vissa ändringar av geofilen. De tidiga tidskanalerna (nr 1–10) plockades bort (de är troligtvis påverkade av sändarströmmen) och beskrivningen av själva vågformen gjordes mer detaljerad. Före själva inversionen har data dessutom processerats manuellt, dvs. data som har varit störda har plockats bort (fig. 5).

Data inverterades med s.k. utjämnande inversion (*smooth inversion*) genom att resistiviteten kontinuerligt ändras från lager till lager. Startmodellen innehöll 30 lager där tjockleken på det översta lagret var 5 m och ökade sedan logaritmiskt mot djupet till ett maximalt djup på 500 m. I programvaran finns även möjlighet att använda s.k. LCI (*laterally constrained inversion*) vilket innebär att man begränsar variationen av resistivitetsmodellerna mellan närliggande mätpunkter för att erhålla en mjukare modell även längs flyglinjen. Någon sådan begränsning har inte använts utan alla mätpunkter har tolkats oberoende av varandra.



Figur 5. VTEM-data (kanal 11–45) längs en ca 5 km lång flyglinje. Grå linjer visar data som tagits bort manuellt före inversion på grund av höga brusnivåer.

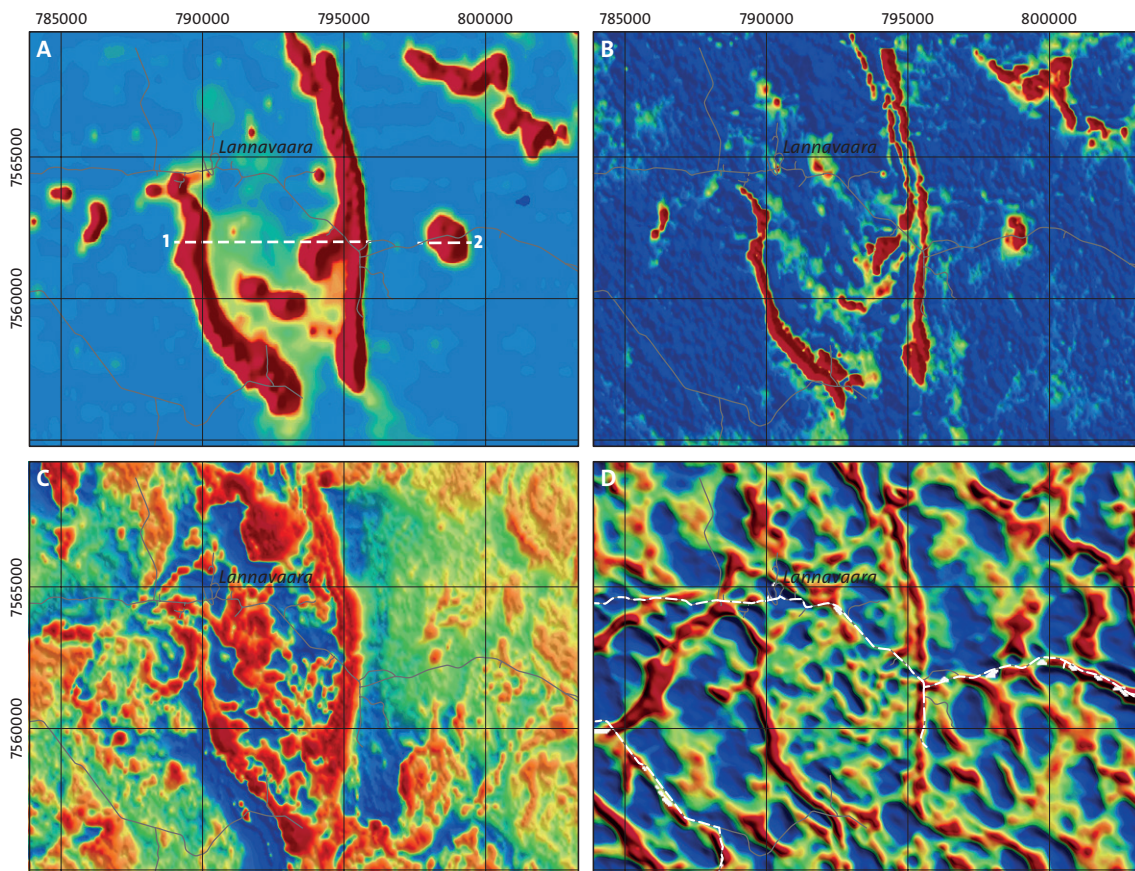
Programvaran bygger på 1D-inversion, dvs. varje datapunkt inverteras separat. För att inversionen ska ge ett tillförlitligt resultat bör marken vara mer eller mindre horisontellt lagrad i området omkring själva mätpunkten. Många anomalier inom detta område är orsakade av två- till tredimensionella strukturer med liten lateral utsträckning och med mycket låg resistivitet och därför erhålls inte en helt korrekt resistivetsmodell med enbart 1D-inversion. För att kunna bestämma t.ex. bredd och stupning på de konduktiva strukturerna fordras modellering i 2D- eller 3D-program.

Nedan kommenteras resultaten för några utvalda profiler i områdena Lannavaara, Akkisero-Kuormakka och Vittangivaara.

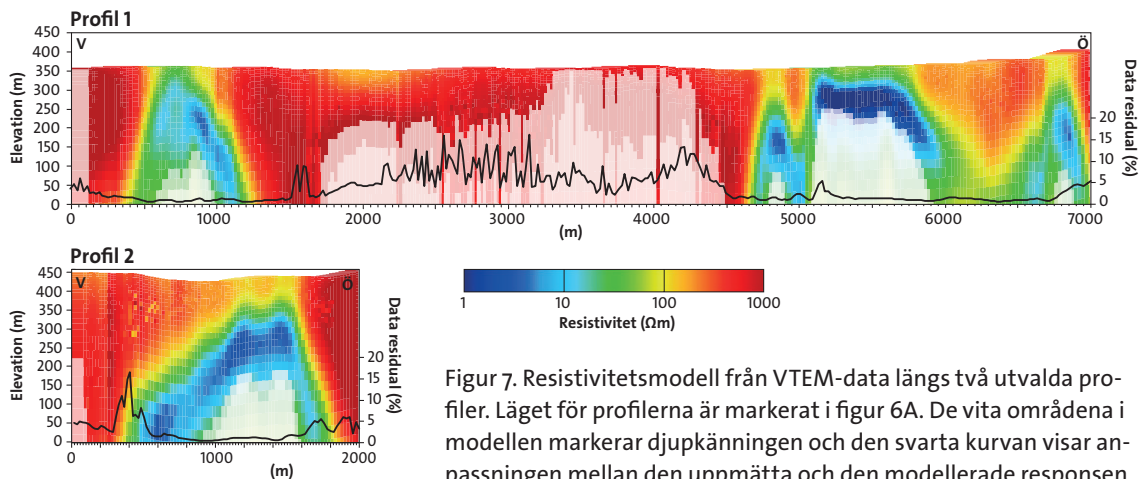
Lannavaara

Figur 6 visar olika typer av flygmätta data över ett område vid byn Lannavaara i den sydöstra delen av mätområdet. VLF- och slingramdata samlades in 1985 med 200 m linjeavstånd. De flesta anomalier i TEM-data (fig. 6A) kommer även fram i slingramdata (fig. 6B) vilket indikerar att anomaliorsaken är relativt ytnära (<100 m), eftersom slingrammetoden generellt har betydligt mindre djupkänning i jämförelse med TEM-metoden. De finns dock några mindre anomalier i TEM-data som inte uppträder i slingramdata.

Magnetfältet (fig. 6C) visar ett liknande mönster som TEM- och slingramdata. De nord-sydligt strykande anomalierna med hög magnetisering sammanfaller dock inte exakt med ano-



Figur 6. Området Lannavaara. A. VTEM (τ) samt läget för tolkade profiler. B. Slingramdata 3,72 kHz (realkomponent). C. Magnetiskt residualfält som förstärker inverkan från ytnära delar. D. VLF-data (strömtäthet). Vit streckad linje markerar väg.



Figur 7. Resistivetsmodell från VTEM-data längs två utvalda profiler. Läget för profilerna är markerat i figur 6A. De vita områdena i modellen markerar djupkänningen och den svarta kurvan visar anpassningen mellan den uppmätta och den modellerade responsen.

malierna från de elektromagnetiska mätningarna. De magnetiska anomalierna är sannolikt orsakade av tunna stråk med högt magnetiserade basiska bergarter som inte är elektriskt ledande. Även VLF-data (fig. 6D) visar ett liknande mönster men här kommer även andra strukturer fram som sannolikt är orsakade av sprickzoner i berggrunden.

Figur 7 visar resultat från inversion längs två profiler i området vid Lannavaara. Profil 1 är 7 km lång och passerar tre anomalier vid koordinat 800 m, vid 5 000–6 000 m samt vid 6 800 m. Resistivetsmodellen visar, speciellt över den första anomalin, de kanteffekter som uppstår vid 1D-inversion av en utpräglat tvådimensionell struktur, dvs. att den konduktiva strukturen blir bredare med djupet. Mitt över anomalin kan dock 1D-inversion ge ett mer tillförlitligt resultat, speciellt över en bredare struktur som den vid 5 000–6 000 m. Här visar modellen en mycket konduktiv struktur (ca 1 Ωm) på ett djup av ca 50 m under markytan.

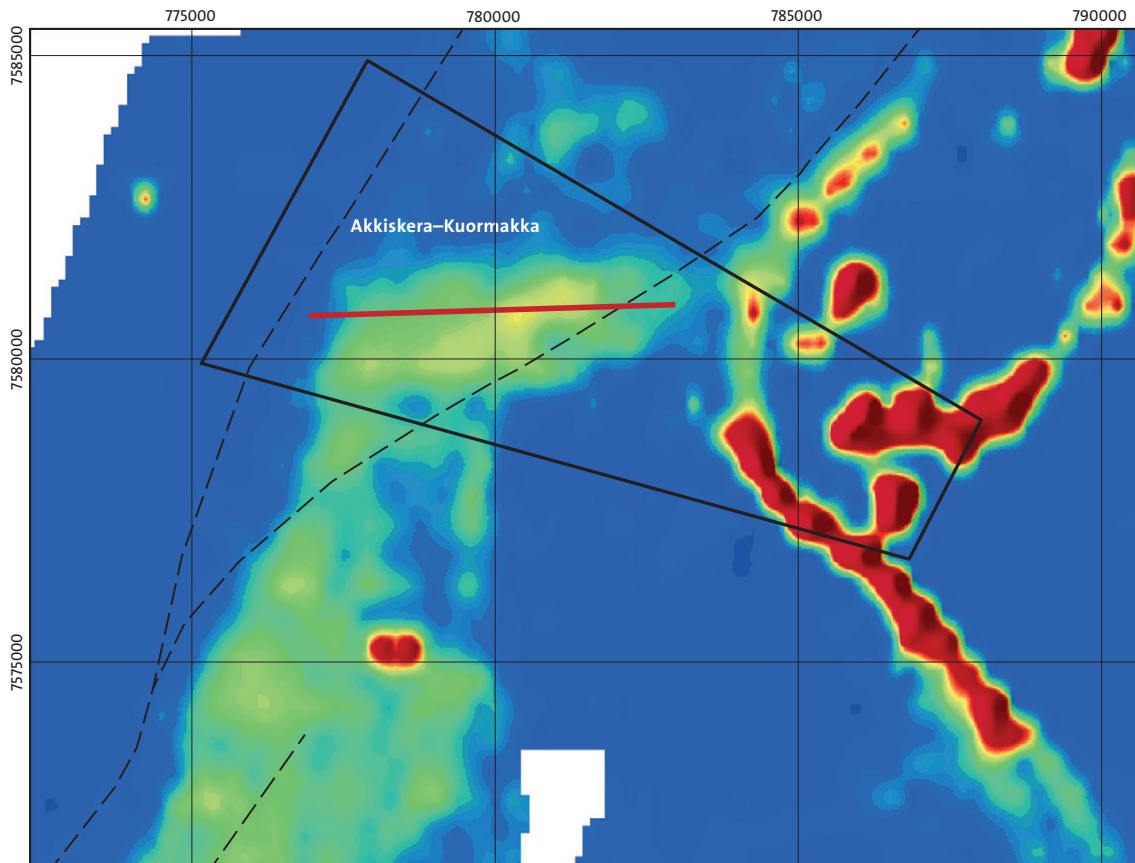
TEM-metoden är speciellt bra för att detektera överytan på mycket goda ledare. I de centrala delarna av profilen är resistiviteten mycket hög (>1 000 Ωm) och inom dessa områden erhålls mycket lite information.

Profil 2 är 2 km lång och går över den runda strukturen strax öster om profil 1. Resistivetsmodellen visar en mycket lågresistiv struktur (ca 1–10 Ωm) på ett djup av ca 100 m. Modellen ger även en indikation om en stupning mot väster. Det skulle även förklara varför anomalin i slingramdata (fig. 6B) har en något mindre utsträckning i öst–västlig riktning, i jämförelse med anomalin från TEM-data och att den huvudsakligen sammanfaller med den östra delen av TEM-anomalin (fig. 6A).

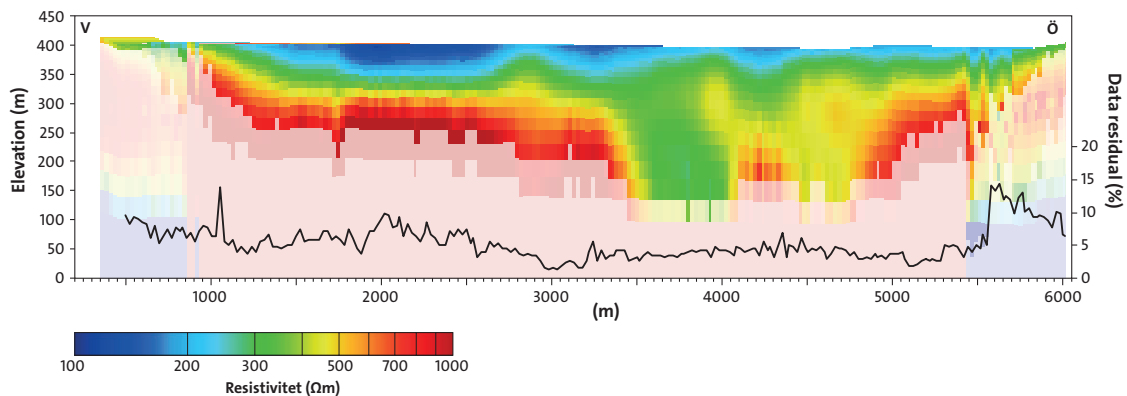
Akkiskera–Kuormakka

En profil har valts ut inom nyckelområdet Akkiskera–Kuormakka. Profilen är 6 km lång och går över den norra delen av den nordöstligt strykande anomalin som delvis sammanfaller med Karesuando–Arjeplogdeformationszonen (KADZ, fig. 8).

Figur 9 visar resistivetsmodellen från inversion av TEM-data (observera att resistivitetsskalan varierar från 100 till 1 000 Ωm). Modellen visar ett relativt lågresistivt lager i ytan (omkring 100–300 Ωm) med en mäktighet på upp till 50 m. Resistiviteten ökar sedan mot djupet. Vid koordinat 3 500–4 000 visar modellen en lågresistiv zon som stupar mot öster och som sannolikt är orsakad av en spröd deformationszon i berggrunden. En förklaring till de låga resistiviteterna i ytan kan vara att området till stor del består av myrmark och att jorddjupen är stora här. Denna profil visar ett exempel på där 1D-inversionen fungerar relativt bra, dvs. över ett brett område med måttliga resistivetsvariationer.



Figur 8. Området Akkiskera–Kuormakka. VTEM (τ) samt läget för den tolkade profilen.

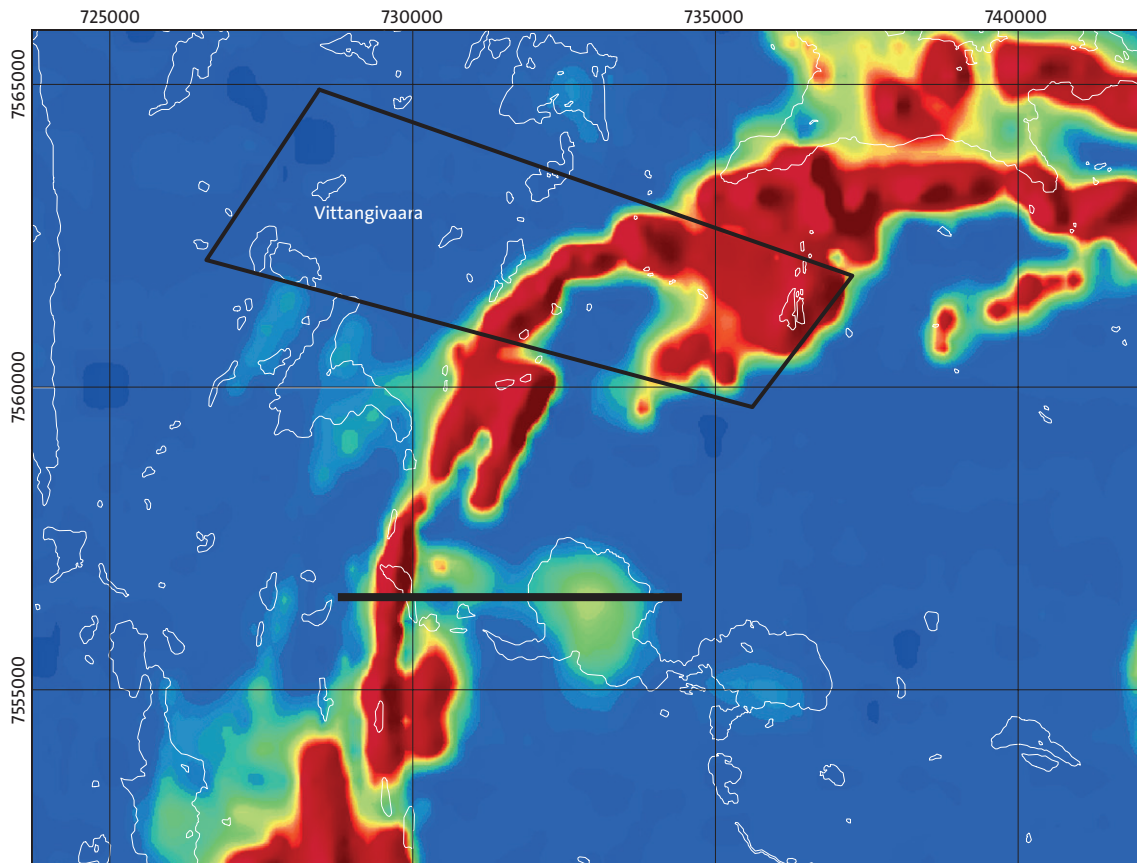


Figur 9. Resistivitetsmodell från TEM-data för profilen markerad i figur 8.

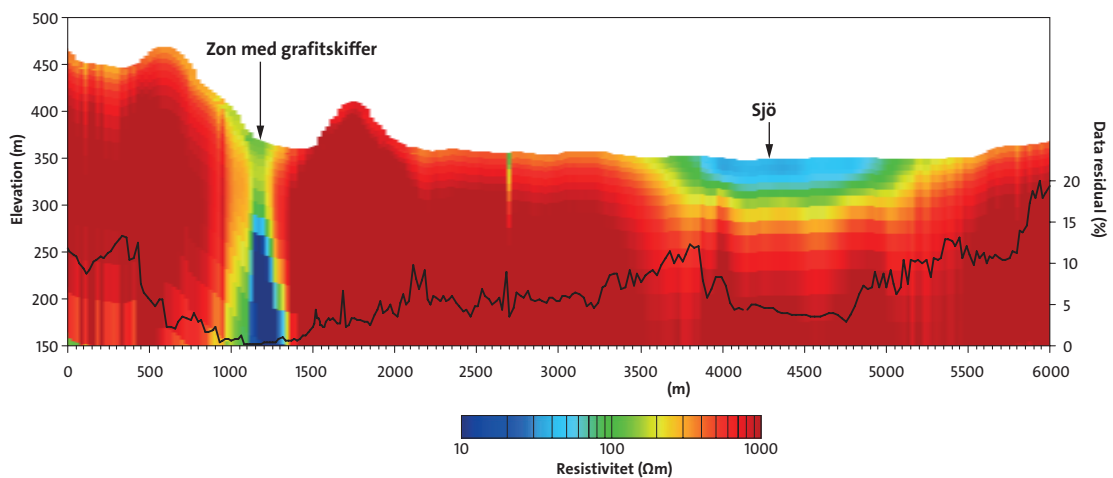
Vittangivaara

En profil valdes ut strax söder om nyckelområdet Vittangivaara (fig. 10). Profilen är 6 km lång och passerar i väster en tydlig nord-sydlig anomali orsakad av grafitförande bergarter och järn-mineraliseringar samt längre österut en svagare cirkulär anomali som sammanfaller med en sjö. Resistivitetsmodellen (fig. 11) visar en mycket konduktiv struktur ($<10 \Omega\text{m}$) som breddas mot

djupet vid koordinat 1200 m. Vid läget för sjön (koordinat 3 700–5 200) visar modellen i ytan ett lågresistivt område (ca 50 Ωm) med ett djup på ca 20–30 m, vilket troligtvis motsvarar djupet på sjön, följt av ett lager med något högre resistivitet (ca 100 Ωm) som troligtvis motsvarar bottenlagren i sjön. Detta indikerar att djupet till berg är ca 50 m inom detta område.



Figur 10. Området Vittangivaara. VTEM (τ) samt läget för den tolkade profilen.



Figur 11. Resistivitetsmodell från TEM-data för profilen markerad i figur 10.

REFERENSER

- Aarhus Geophysics, 2011: Aarhus Workbench guide to processing and inversion of SkyTEM data. <<http://www.aarhusgeo.com>>.
- Bastani, M., Antal Lundin, I., Savvaidis, A., Kamm, J. & Wang, S., 2015: Barentsprojektet 2014: audiomagnetotelluriska (AMT) mätningar i Kiruna- och Lannavaaraområdet, preliminära resultat. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2015:10*, 16 s.
- Bergman, S., Kubler, L. & Martinsson, O., 2001: Description of regional geological and geophysical maps of northern Norrbotten county (east of Caledonian orogen). *Sveriges geologiska undersökning Ba 56*, 110 s.
- Bergman, S., Kübler, L. & Martinsson, O., 2000: Regionala geologiska och geofysiska kartor över norra Norrbottens län: Berggrundskarta (öster om kaledoniska orogenen). *Sveriges geologiska undersökning Ba 56:1*.
- Geotech, 2013: Report on a helicopter-borne versatile time domain electromagnetic (VTEM plus) geophysical survey and horizontal magnetic gradiometer geophysical survey. Barents-Lanio TEM Kiruna, Sweden. Project AB1374.
- Luth, S. & Berggren, R., 2013: Summary report on the geological and geophysical characteristics of the Akkiskera–Kuormakka key area. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2013:12*, 35 s.
- Luth, S., Lynch, E.P., Grigull S., Thörnelöf, M., Berggren, R. & Jönberger, J., 2014: Geological and geophysical studies in the Harrijärvet, Vittangivaara and Akkiskera-Kuormakka key areas. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2014:09*, 24 s.