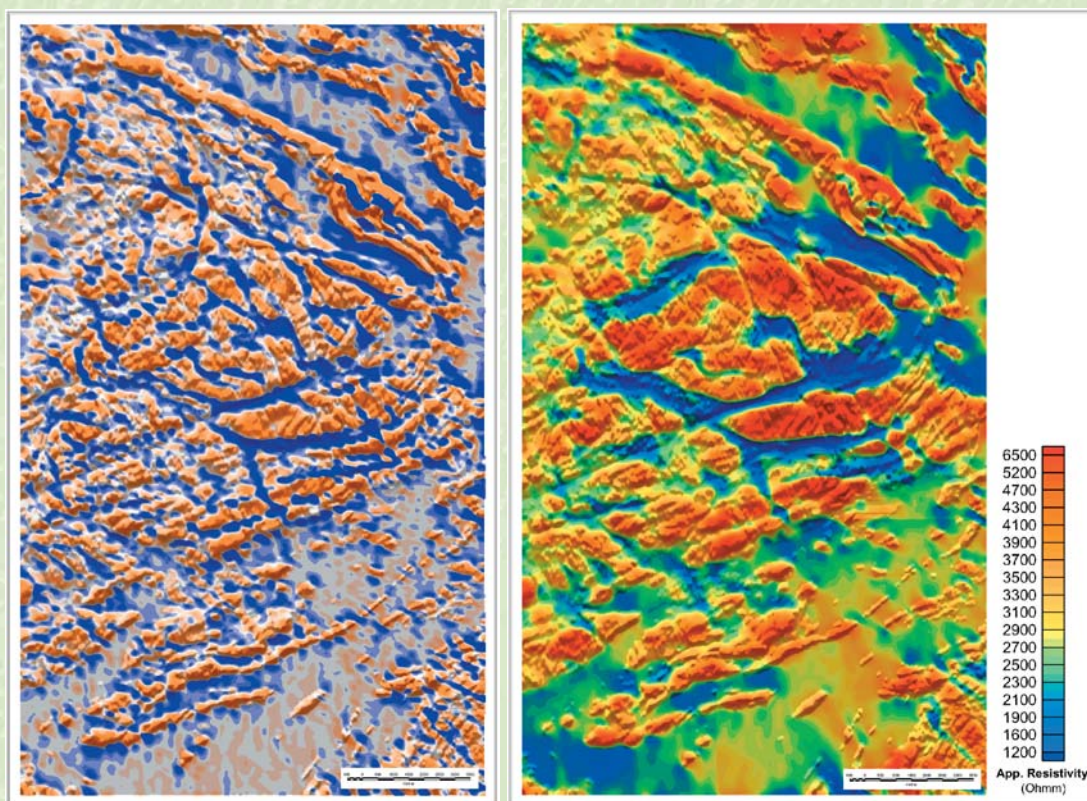




Sveriges geologiska undersökning

Utveckling av tolkningsmetoder för VLF-data

Slutrapport



Lena Persson & Johan Daniels
Enheten för geofysik & maringeologi

Utveckling av tolkningsmetoder för VLF-data. Slutrapport

SGU-rapport
2002:41

SGU-rapport
2002:41

Innehåll

Sammanfattning	2
1. Inledning	3
2. Bakgrund.....	4
3. Den riktningsoberoende Peakerkartan	5
...ett exempel på den riktningsoberoende Peakerkartan.....	6
4. Den yttäckande resistivitetskartan	7
Skenbar resistivitet och fas.....	7
Bestämning av resistivitet och fas ur befintliga flygdata	8
...ett exempel på den yttäckande resistivitetskartan	9
Approximativ bestämning av resistivitet och fas ur VLF-data uppmätt med en sändare.....	11
5. Metoder för två-dimensionell tolkning av VLF-data.....	13
...några exempel på två-dimensionell inversion av VLF-data	14
Sparvguld	15
6. Referenser	17
Appendix A: Utveckling av programrutiner i OasisMontaj™	18
Appendix B: Korrektion av fasmusfel på VLF-data	21

Sammanfattning

Vi har under tre år bedrivit ett forskningsarbete främst för att utveckla olika kvantitativa tolkningsmetoder för VLF-data samt för att förbättra visualiseringen och öka tillgängligheten av dessa data. Målsättningen med projekten kan grovt delas upp i två viktiga delar. Den ena delen består av utveckling av olika tolkningsmetoder för VLF-data medan den andra delen omfattar implementering av dessa nya metoder i den programvara som används av bla tolkningsgeofysiker vid SGU. Arbetet har främst varit inriktat på utveckling av nya tolkningsmetoder för moderna VLF-data uppmätt med två radiosändare, vilket medför att en riktningsoberoende respons kan beräknas. Flera av tolkningsmetoderna kan även användas på äldre VLF-data uppmätt med en sändare, samt markmätta VLF-data.

De nya metoder/produkter som har tagits fram inom projektet är:

❖ DEN RIKTNINGSOBEROENDE PEAKERKARTAN

En nackdel med VLF-informationen är att den tidigare har varit beroende av riktningen till VLF-sändarna. Genom att beräkna "peaker-funktionen" från VLF-data uppmätt från två sändare erhåller man en riktningsoberoende respons. Därigenom är det möjligt att framställa VLF-kartor där elektriska ledare kan identifieras oberoende av sändarnas riktning. Inom projektet har vi utvecklat en programrutin som avsevärt har förenklat framställningen av den riktningsoberoende Peakerkartan. Detta har medfört att den riktningsoberoende Peakerkartan nu kan tas fram rutinmässigt vilket ökat tillgängligheten av dessa data

❖ DEN YTTÄCKANDE RESISTIVITETSKARTAN

En metod för att beräkna skenbar resistivitet och fas ur VLF-data har utvecklats vid Uppsala Universitet, Institutionen för Geovetenskaper. Vi har implementerat denna metod i programvaran Oasis montaj. Metoden har testats på flera områden och våra resultat visar att det är möjligt att på resistivitetskartan urskilja resistiva bergartsenheter från mer konduktiva bergartsled (som grafit och sulfidförande meta-sediment) och vattenförande sprickzoner. Inom områden med stora jorddjup, till exempel inom Mälardalsområdet, återspeglar resistivitetskartan även variationen inom de kvartära avlagringarna. Tillsammans med andra geofysiska data kan den nya produkten användas som underlag både vid berggrundskarтерingen, jordartskarтерingen och grundvattenkarтерingen vid SGU.

❖ TVÅ-DIMENSIONELL INVERSION AV VLF-DATA

Två-dimensionell inversion av VLF-data ger information om hur resistiviteten varierar i djupled längs en vald profil. Inom projektet har vi testat flera tolkningsprogram utvecklade för inversion av elektromagnetiska data. En metod för två-dimensionell tolkning av VLF-profiler har vidareutvecklats och anpassats för att passa våra ändamål. Även detta program har implementerats i vår standardprogramvara. Ett plot-program har utvecklats i Matlab för att snabbt kunna visualisera resultatet av inversionen. Metoden gör det möjligt att separera ytnära elektriskt ledande strukturer som tex. leror från djupare anomalier orsakade av vatten i berggrunden.

1. Inledning

Vi har under tre år bedrivit ett forskningsarbete för att utveckla olika kvantitativa tolkningsmetoder för VLF-data. En annan viktig målsättning inom projektet har varit att förbättra visualiseringen och öka tillgängligheten av VLF-data. Projektet har drivits i nära samarbete med Prof. Laust Pedersen vid Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala Universitet. Nya forskningsresultat som tagits fram vid Universitetet har kontinuerligt testats och implementerats i vår verksamhet under projektets gång. Förutom Lena Persson och Johan Daniels har även Peter Hagthorpe, Sören Byström och Leif Kero deltagit i projektet.

Projektet har bedrivits som tre enskilda projekt under åren 2000-2002, finansierade genom den egenfinansierade FoU-verksamheten vid SGU. De olika projekten har haft ett nära samband med varandra varför denna slutrapport är en avrapportering av samtliga tre projekt. Nedan presenteras projekttitel och medarbetare i de olika projekten:

År 2000: Utveckling av tolkningsmetoder för VLF-data. *Lena Persson, Johan Daniels, Leif Kero, Peter Hagthorpe och Sören Byström.*

År 2001: Framställning av yttäckande resistivitetskartor ur VLF-data. *Lena Persson, Johan Daniels och Peter Hagthorpe.*

År 2002: Framställning av resistivitetskartor ur envägs VLF-data. *Lena Persson, Johan Daniels och Peter Hagthorpe.*

Resultaten från projekten har presenterats vid två olika tillfällen på SGU's FoU-seminarier, år 2001 och 2002.

I september 2001 presenterades resultaten som en posterutställning vid SEG-konferensen i San Antonio, Texas. (Persson, et.al., 2001)

I januari 2004 presenterades delar av resultaten vid ett föredrag vid Nordiska Geologiska vintermötet i Uppsala (Persson et. al. 2004).

Denna rapport är organiserad på följande sätt:

I avsnitt 2 presenteras bakgrunden och historiken kring de flygburna VLF-mätningarna vid SGU. Den riktningsoberoende peakerkartan och den yttäckande resistivitetskartan beskrivs i avsnitt 3 respektive avsnitt 4, tillsammans med exempel från några olika områden. I avsnitt 4 introduceras även en approximativ metod att beräkna resistivitet ur VLF-data uppmätta med endast en sändare. Metoden för två-dimensionell tolkning av VLF-data längs utvalda profiler beskrivs i avsnitt 5. I appendix A presenteras kortfattat de programrutiner som utvecklats i programvaran Oasis MontajTM och i appendix B redovisas en undersökning av nollnivåeffekter på VLF-data.

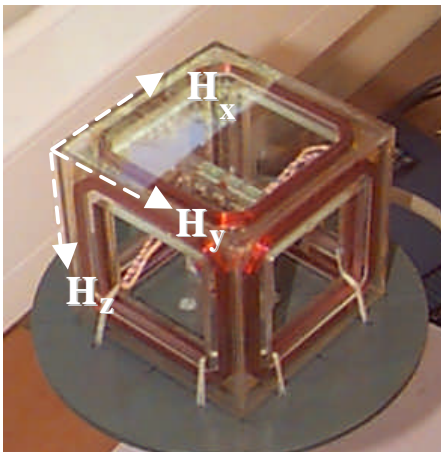
2. Bakgrund

Vid VLF mätning utnyttjas avlägsna radiosändare i frekvensområdet 10 till 30 kHz (VLF, Very Low Frequency). VLF-sändarna finns på olika platser över hela världen och utnyttjas för militära ändamål, främst ubåtskommunikation. I början av sextioalet upptäckte man vid SGU att VLF-signalen även kunde användas för geofysiska ändamål. De första fältmätningarna utfördes under åren 1963-64 (Paál, 1965 och 1968) över kända sulfidmineraliseringar i södra Lappland. Senare har metoden visat sig användbar bland annat vid detektering av vattenfyllda sprickzoner i berggrunden.



SGU har registrerat VLF-information med flyg sedan början av sjuttioalet och idag är större delen av landet täckt med flygelektromagnetiska VLF-mätningar. VLF-informationen används idag i första hand för att lokalisera vattenförande sprickzoner och deformationszoner i berggrunden samt för att identifiera elektriskt ledande zoner som till exempel grafit- och sulfidförande horisonter i berggrunden.

Det elektromagnetiska fältet från en VLF-antenn består av ett vertikalt elektriskt fält och ett horisontellt magnetiskt fält. Vid närvaro av till exempel en sprickzon med lägre resistivitet än omgivande berggrund så genereras även ett vertikalt magnetiskt fält. Det mätsystem som används vid SGU registrerar real- och imaginärkomponenten av det magnetiska fältet i tre ortogonala riktningar H_x , H_y och H_z (fig. 1). Data insamlas på ca. 60 meters flyghöjd, med ett linjeavstånd på 200 meter och med ett punktavstånd på ca. 17 meter.



Figur 1. Flygmätning vid SGU (överst), mätsensorn som registrerar VLF-fältet i tre ortogonala riktningar (underst).

Under de första åren registrerades VLF-fältet från endast en sändare. En nackdel med dessa data är att responsen från till exempel en sprickzon är beroende av riktningen av zonen i förhållande till sändaren.

Vid presentation och visualisering av VLF-data används ofta totalfältet som beräknas enligt:

$$VLF_{tot} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} .$$

Flygmätning där VLF-fältet uppmäts från två sändare påbörjades 1987 vid SGU och har därefter utförts regelbundet sedan 1995.

3. Den riktningsberoende Peakerkartan

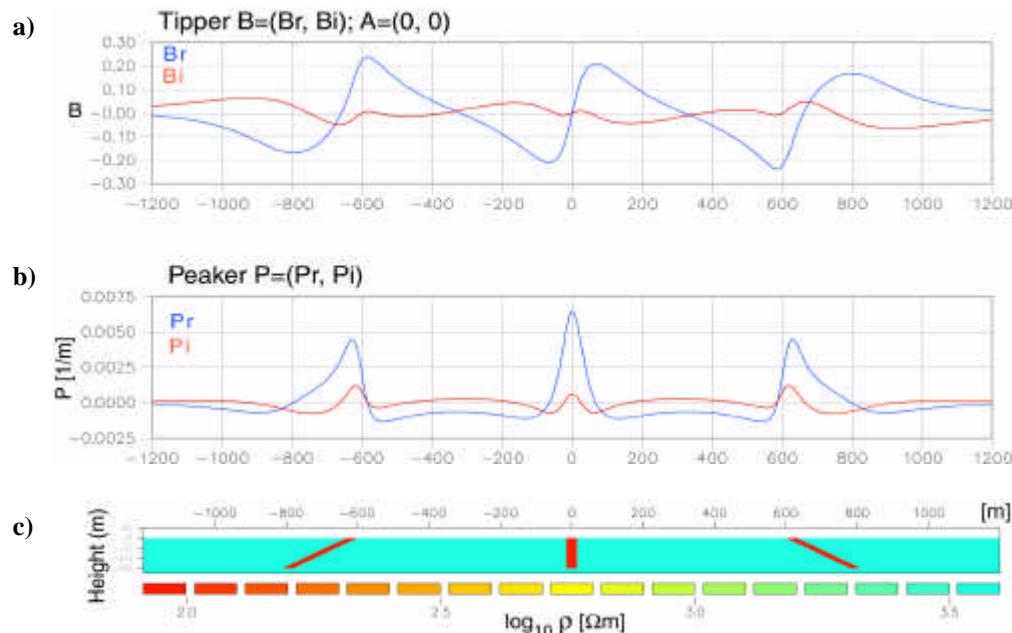
Under de första åren registrerades VLF-fältet från endast en sändare. En nackdel med dessa data är att responsen från till exempel en sprickson är beroende av riktningen av zonen i förhållande till sändaren. Tekniken har kontinuerligt utvecklats och idag används ett instrument, utformat vid SGU, som mäter den elektromagnetiska vektorn från två valda sändare. Genom att använda två sändare, där skillnaden i riktningen är minst 20 grader, kan en riktningsberoende respons beräknas (Pedersen et. al., 1994). Det vertikala magnetfältet är relaterat till de horisontella magnetfältskomponenterna vid en given frekvens (f) enligt:

$$H_z(f) = A(f)H_x(f) + B(f)H_y(f).$$

Tillsammans bildar riktningarna H_x , H_y och H_z den komplexa magnetfältsvektorn. $A=A(f)$ och $B=B(f)$ bildar den så kallade tippervektorn $[A, B]$. Genom att mäta från två VLF-sändare samtidigt kan två linjära ekvationer erhållas och tippervektorn kan beräknas för varje mätpunkt.

Fig. 2a visar tippervektorn över en enkel två-dimensionell struktur ($A=0, B \neq 0$) med tre konduktiva zoner. Tippervektorn är antisymmetrisk med nollgenomgång precis ovanför en vertikalstående elektrisk ledare. För att bättre framhäva läget av goda ledare har den så kallade peakerfunktionen definierats (Pedersen, 1998). Peakerfunktionen uppvisar ett maximum mitt över en god ledare (fig. 2b) och beräknas som den horisontella divergensen av tippervektorn enligt:

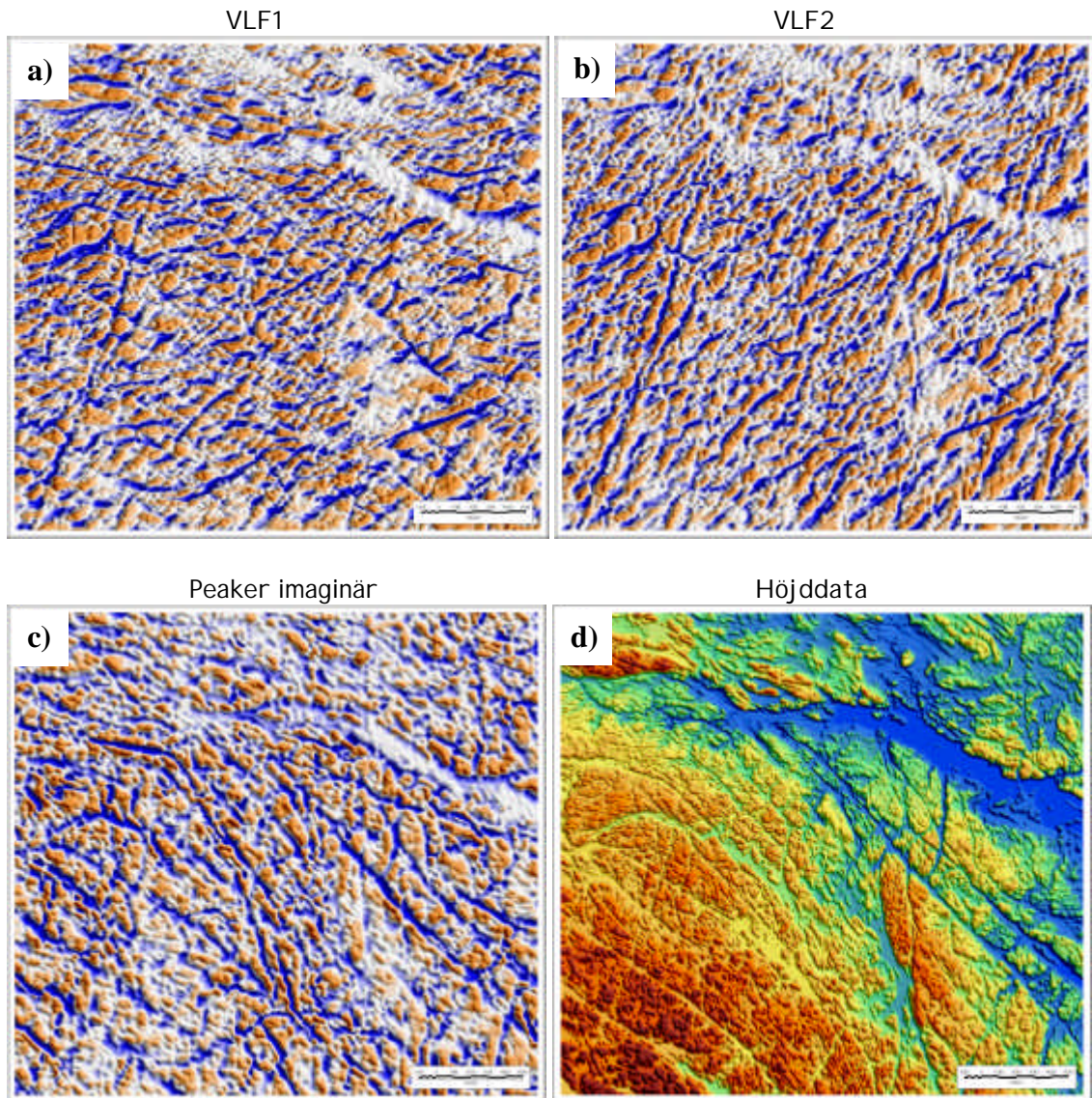
$$P = \nabla_h \cdot (A, B).$$



Figur 2. Tipper- (a) och peaker- (b) responsen (real- och imaginärkomponent) över en enkel tvådimensionell modell (c) med tre konduktiva zoner.

...ett exempel på den riktningsoberoende Peakerkartan.

Exemplet nedan visar ett område (ca. 27×30km²) inom kartbladsområdet 8G Norrköping. VLF-mätningen utfördes 1999 och VLF-fältet uppmättes från två sändare. Fig. 3a och b visar totalfältet från respektive VLF-sändare (VLF1 och VLF2). Blå färg indikerar goda ledare. De aktuella VLF-sändarna ligger i väst-sydvästlig respektive sydvästlig riktning. Figurerna visar tydligt att riktningen till sändaren avspeglar sig i anomalimönstret och att elektriska ledare som ligger i sändarens riktning framhävs.



Figur 3. VLF-data över ett område inom kartbladet 8G Norrköping. Blå färg i figur a-c indikerar elektriskt ledande zoner. a) VLF1, b) VLF2, c) den riktningsoberoende peaker kartan (imaginärkomponent), d) höjddata över samma område från Lantmäteriets höjddatabank.

I fig. 3c har samma område vidarebearbetats och den riktningsoberoende peakerfunktionen har beräknats. På peakerkartan (imaginär komponent) framkommer ett flertal anomalier i syd-östlig riktning som inte kan identifieras på dom två tidigare VLF-kartorna (VLF1 och VLF2) eftersom båda sändarnas riktning är ofördelaktig i förhållande till anomaliernas strykningsriktning. Anomalierna indikerar vattenfyllda sprickzoner och spröd deformation i berggrunden. Höjddata över samma område (fig. 3d) visar en tydlig överensstämmelse mellan dalgångarna i området och de elektriskt ledande zonerna på peakerkartan.

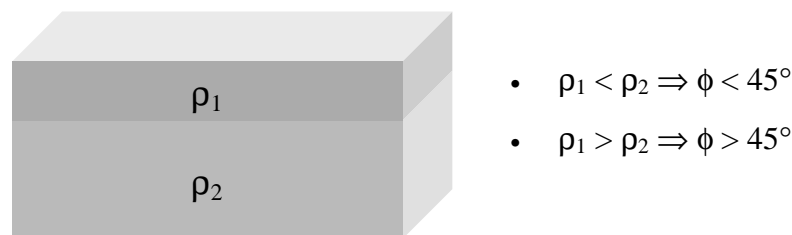
4. Den yttäckande resistivitetskartan

Skenbar resistivitet och fas

Det elektromagnetiska fältet från en VLF-sändare genererar även ett horisontellt elektriskt fält E_x på grund av att marken är elektriskt ledande. Vid RMT- (Radiomagnetotellurik-) metoden (se tex. Persson, 2001 och Bastani, 2001) uppmäts kvoten mellan det horisontella elektriska och magnetiska fältet, dvs. E_x/H_y . Ur denna kvot kan marken skenbara resistivitet ρ_a bestämmas enligt följande:

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\nu\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \text{där } \nu = \text{frekvens (Hz) och } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (}\Omega\text{sm}^{-1}\text{)}.$$

Dessutom uppmäts även fasskillnaden ϕ mellan E_x och H_y ur vilken man erhåller ytterligare information om strukturer i jordlager och berggrund. För homogen mark är fasan $\phi=45^\circ$. För horisontellt lagrad mark, enligt fig. 4, är $\phi < 45^\circ$ när tex. ett konduktivt jordtäckte överlagrar en mer resistiv berggrund och $\phi > 45^\circ$ när ett resistivt övertäckte överlagrar en mer konduktiv berggrund.



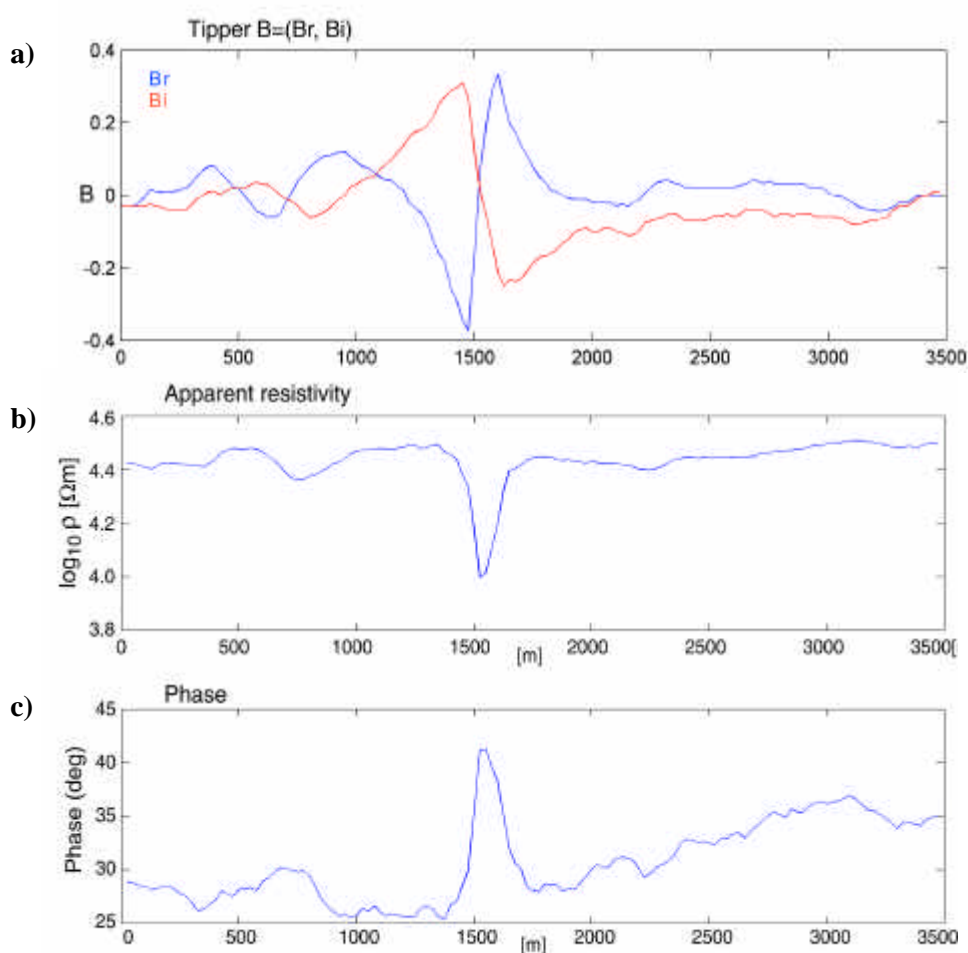
Figur 4. Fasskillnad vid horisontellt lagrad mark.

Fån flygdata är det inte möjligt att direkt bestämma markens resistivitet eftersom endast det magnetiska fältet registreras. Försök har tidigare gjorts av bl.a. Finlands Geologiska Undersökning (GTK) att även mäta det elektriska fältet vid flygmätning. Svårigheterna har dock varit så stora att idag sker ingen mätning av det elektriska fältet i något flygsystem.

Bestämning av resistivitet och fas ur befintliga flygdata

Forskning vid Uppsala Universitet, institutionen för geovetenskaper, har under flera år bedrivits för att ta fram kvantitativa metoder för tolkning av VLF-data. Gharibi och Pedersen (1999) presenterade en ny rutin för att beräkna resistivitet och fas ur VLF-data längs en flyglinje. I fig. 5 har en bit av en flyglinje (3500 m) valts ut för att illustrera metoden. Överst ser vi real och imaginärkomponenten av tipper B som visar en typisk anomali från en elektrisk ledande zon vid koordinat 1500 m och därunder ser vi den beräknade skenbara resistiviteten och fasan längs samma profil. VLF-anomalin vid koordinat 1500 m sammanfaller med en lågresistiv zon (fig. 5b) och ett fasmaximum (fig. 5c).

Metoden har senare vidareutvecklats (Becken, 2000 samt Becken och Pedersen, 2003) för att även gälla i 3D-fallet. Det innebär att det nu är möjligt att beräkna den yttäckande resistiviteten och fasan från VLF-data. Resultaten kan sedan presenteras som resistivitets- och faskartor över valda områden vilket underlättar tolkningen och ökar utnyttjandegraden av dessa data.

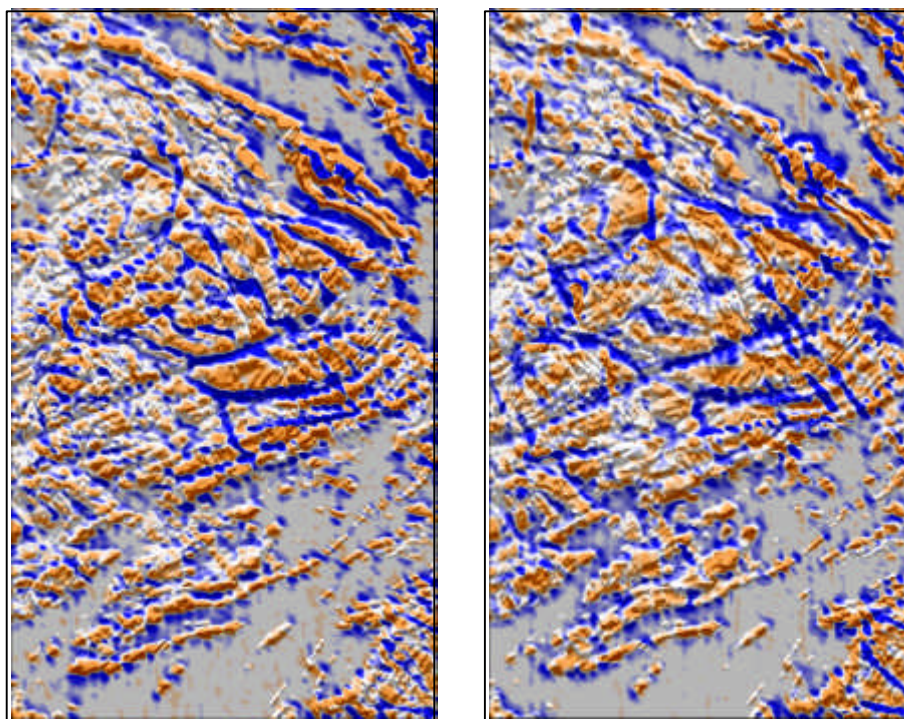


Figur 5. a) VLF-data (real och imaginärkomponent av tipper B) längs en flyglinje. b-c) Beräknad resistivitet och fas enligt en metod av Gharibi och Pedersen (1999).

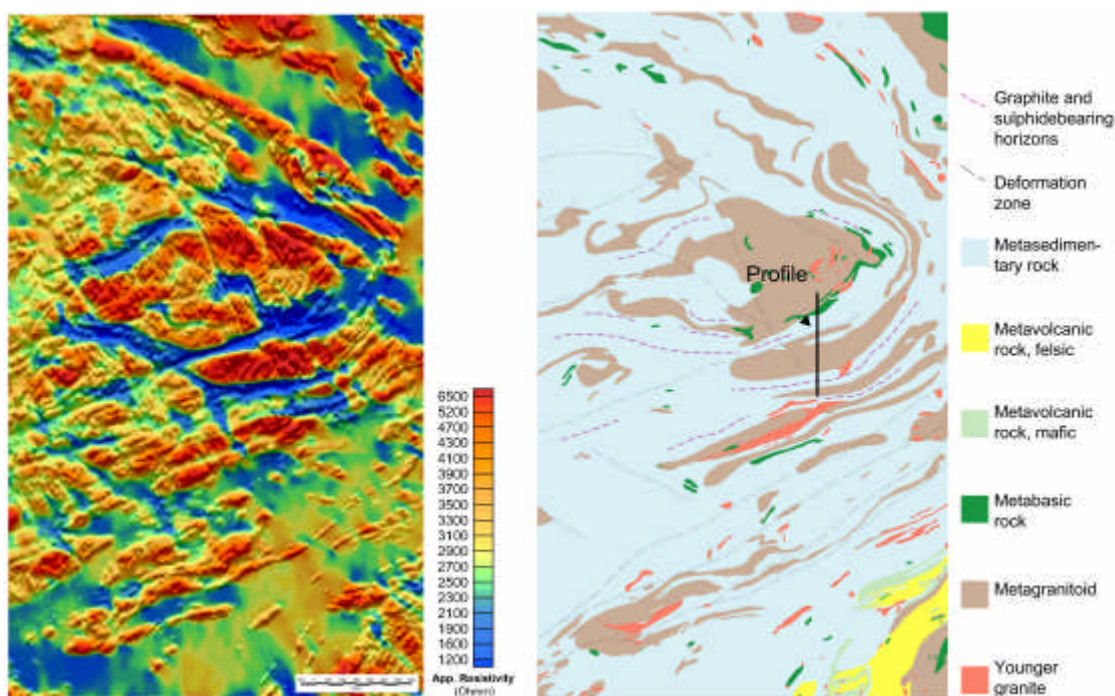
...ett exempel på den yttäckande resistivitetskartan

Exemplet nedan över ett 15×30 km stort område sydväst om Stockholm visar på ett illustrativt sätt skillnaden mellan Peakerkartan och Resistivitetskartan. Fig. 6 visar Peakerkartan över en del av kartbladet 10I Stockholm SO. Området är till viss del täckt av hav. Liksom tidigare indikerar blå färg elektriskt ledande zoner. Fältkontroll och hällobservationer har visat att inom detta område orsakas anomalierna både av vattenförande sprickzoner samt av grafit- och magnetkisförande horisonter i berggrunden (Persson, et. al., 2000). Några av anomalierna orsakas av kraftledning i området.

Fig. 7a visar resistivitetskartan över samma område som fig. 6. Röd färg visar områden med hög resistivitet (dålig elektrisk ledningsförmåga) och blå färg visar områden med låg resistivitet (bra elektrisk ledningsförmåga). Medan Peakerkartan främst visar långsträckta lågresistiva zoner, som sprickzoner i berggrunden, kan vi på resistivitetskartan i stället urskilja högresistiva berggrundsenheter från mer lågresistiva områden. Som jämförelse visar vi även berggrundskartan över samma område (fig. 7b). Utbredningen av metagranitoiden (brun färg på berggrundskartan) sammanfaller till stor del med högresistiva områden på resistivitetskartan medan metasedimentära bergarter (ljusblå färg på berggrundskartan), med grafitkiffer inlagring, sammanfaller med lågresistiva områden.



Figur 6. Peakerkartan, a) real- och b) imaginärkomponent över den östra delen av kartbladet 10I Stockholm SO. Blå färg indikerar elektriskt ledande zoner. En höjdreliëfkarta, baserad på Lantmäteriets höjddatabank, har använts som underlag till bilden.



Figur 7. a) Resistivitetskart beräknad ur VLF-data över samma område som i fig. 6. Röd färg visar områden med hög resistivitet och blå färg visar områden med låg resistivitet (bra ledningsförmåga). En höjdreliëfkarta, baserad på Lantmäteriets höjddatabank, har använts som underlag till bilden. b) Berggrundskartan över samma område. Notera överensstämmelsen mellan de båda kartorna. Området är till viss del täckt av hav.

Resistivitetskartan (fig. 7a) visas tillsammans med en höjdreliëfkarta i gråskala och vi ser även en överensstämmelse mellan dalgångar och lågresistiva zoner respektive höjdområden och högresistiva områden. Sprickzoner i berggrunden medför en ökad vittringsbenägenhet, vilket även gäller elektriskt ledande mineral som grafit och magnetkis. Ökad vittring medför ofta lermineralbildning och/eller en ökad mäktighet av jordtäcket i området vilket ytterligare sänker resistiviteten. Det vi ser på resistivitetskartan som ett lågresistivt område är därför ofta en kombination av förhållanden både i berggrunden och i det överlagrande jordtäcket. Inom områden med stora jorddjup och lerförekomster, till exempel inom Mälardalsområdet, återspeglar resistivitetskartan främst variationen inom de kvartära avlagringarna. I kapitel 5, som behandlar metoder för två-dimensionell tolkning av VLF-data, visar vi att det är möjligt att skilja ut anomalier orsakade av ytnära elektriska ledare, som tex. leror från anomalier som härrör från större djup som tex. vattenförande sprickzoner i berggrunden.

Approximativ bestämning av resistivitet och fas ur VLF-data uppmätt med en sändare

Flygmätning där VLF-fältet uppmäts med två sändare har utförts regelbundet sedan 1995. Detta innebär att stora delar av landet är täckta av äldre VLF-data uppmätt med endast en sändare (fig. 8). En test har därför gjorts för att undersöka om det är möjligt att framställa resistivitetskartor från dessa äldre data.

För att beräkningen skall vara möjlig görs antagandet om två-dimensionalitet dvs att alla strukturer ligger i VLF-sändarens riktning. Tipper B kan då beräknas enligt

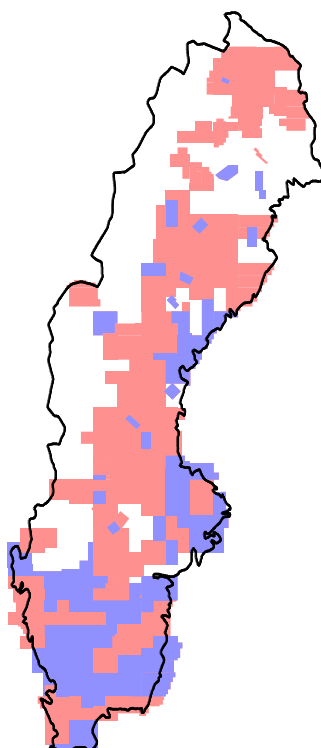
$$B(\mathbf{q}_s) = \frac{H_z}{-\sin(\mathbf{q}_s)H_x + \cos(\mathbf{q}_s)H_y},$$

där θ_s är riktningen till VLF-sändaren mätt från norr mot öster. Tipper A sätts till noll.

Vinkeln θ_s kan sedan beräknas genom att rotera koordinatsystemet så att maximum av amplituden erhålls enligt

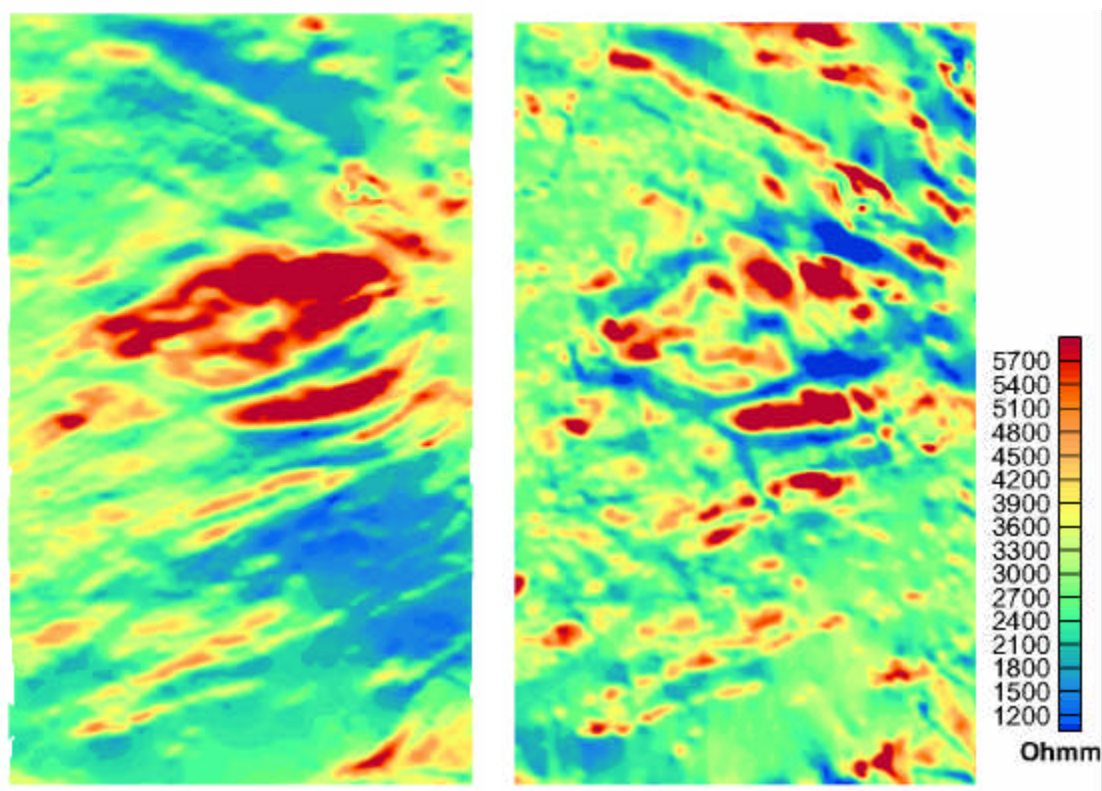
$$\mathbf{q}_s = \frac{k\mathbf{p}}{2} + 0.5 \tan^{-1} \left[\frac{2 \operatorname{Re}(S_{12})}{(S_{11} - S_{22})} \right], \quad k=0,1.$$

För beteckningar och ytterligare förklaringar se Bastani (2001).



Figur 8. Täckningsgrad av flygelektromagnetiska VLF-data över Sverige. Blå områden visar moderna VLF-data uppmätta från två sändare och rosa områden visar äldre VLF-data uppmätta från endast en sändare.

Exemplet nedan (fig. 9) visar beräknad resistivitet över den östra delen av kartblad 10 I Stockholm SO, dvs. samma område som visats tidigare i fig. 6 och 7. Bilden till vänster (fig. 9a) visar skenbar resistivitet beräknad från VLF-data med enbart en sändare medan bilden till höger visar den fullständiga beräkningen med två VLF-sändare (fig. 9b). Om vi jämför de båda resistivitetskartorna ser vi att strukturer i NV-SO-lig riktning är kraftigt underrepresenterade i den vänstra bilden jämfört med den högra. Trots det uppvisar bilderna stora likheter. Sändaren som använts i fig. 9a ligger i SV-lig riktning. Denna riktning sammanfaller med den dominerande strukturriktningen i området varför resultatet trots allt blir relativt tillfredsställande. I områden där den dominerande riktningen på sprickzoner och andra konduktiva strukturer ligger helt utanför sändarens riktning kan resultatet från resistivitetsberäkningen bli mycket dåligt. Det bästa vore därför att en ny flygmätning utfördes över de områden som saknar moderna VLF-data uppmätta med två sändare. Detta gäller naturligtvis även de områden som helt saknar flygelektromagnetiska VLF-data.



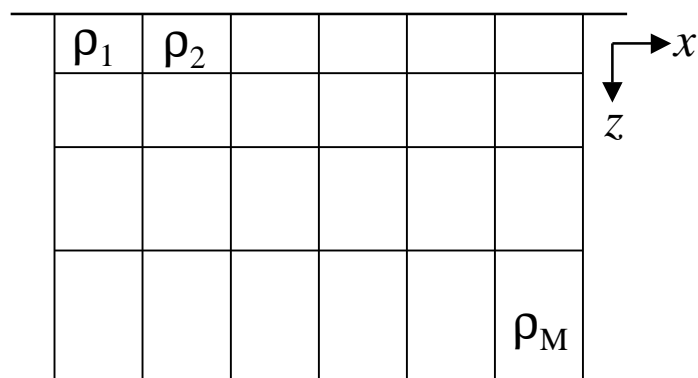
Figur 9. Skenbar resistivitet beräknad från VLF-data från enbart en sändare (till vänster) över den östra delen av kartbladet 10I Stockholm SO.

5. Metoder för två-dimensionell tolkning av VLF-data

Två-dimensionell tolkning av VLF-data ger information om hur resistiviteten varierar i djupled längs en vald profil. Indata består av real- och imaginärkomponenten av H_z/H_y (eg. tipper B) och kan vara antingen en utvald flyglinje eller en markmätt VLF-profil. Nackdelen med de tolkningsprogram som tidigare använts är att det inte funnits någon möjlighet att anpassa en modell till både real- och imaginärkomponenten samtidigt. Inom projektet har vi testat några olika tolkningsprogram utvecklade för inversion av elektromagnetiska data.

Inversionsprogrammet Rebocc (Siripunvaraporn and Egbert, 2000) visade sig vara det tolkningsprogram som var bäst anpassat för våra ändamål. Med detta program är det möjligt att relativt snabbt skapa modeller över flera tiotals kilometer långa profiler. Möjligheten att både anpassa real- och imaginärdelen av H_z/H_y innebär dessutom att vi kan separera yt nära elektriskt ledande strukturer som tex. leror från djupare anomalier orsakade av vattenfyllda sprickzoner i berggrunden (Persson, 2001). Programmet, som ursprungligen är utvecklat för tolkning av magnetotellurikdata, där man till skillnad från våra VLF-data uppmäter det elektromagnetiska fältet inom ett betydligt större frekvensområde, har implementerats i programvaran Oasis MontajTM och anpassats till våra ändamål.

Inversionsprogrammet fungerar på så sätt att man delar in marken i ett rutnät med celler av okänd resistivitet (fig. 10). Storleken på cellerna är tex. 10 m längs profilen (x) och 10 m i vertikalled (z) i de översta lagren och ökar sedan successivt mot djupet. Programmet försöker sedan anpassa resistiviteten i varje cell så att responsen från modellen överensstämmer med uppmätta data. På grund av att antalet celler är mycket större än antalet mätdata så finns det ett oändligt antal modeller som kan anpassas till våra mätdata. Därför inför man en begränsning i modellen som säger att resistivitetsvariationen mellan två närliggande celler skall vara så liten som möjligt, dvs. man söker den ”mjukaste” modellen som kan anpassa mätdata. En nackdel med denna metod är att vi aldrig kan återskapa några skarpa resistivitetskontraster i våra inversionsmodeller.

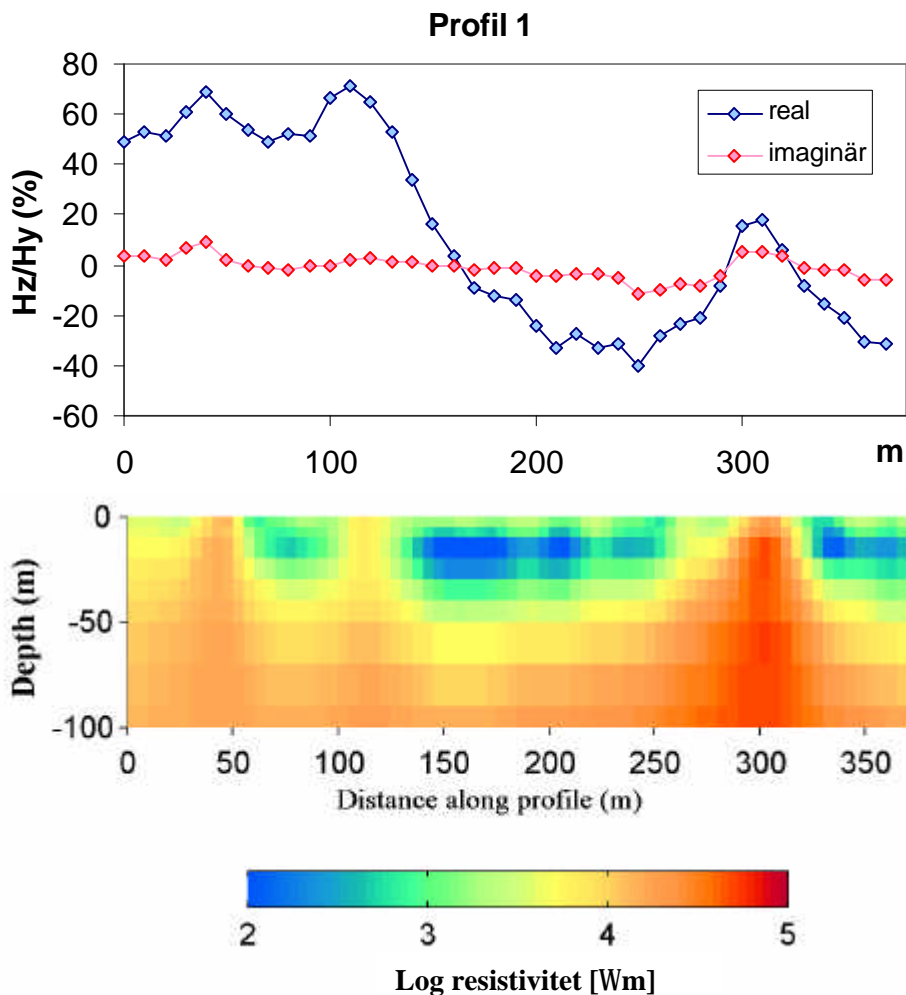


Figur 10. Inversionsmodell med celler av okänd resistivitet.

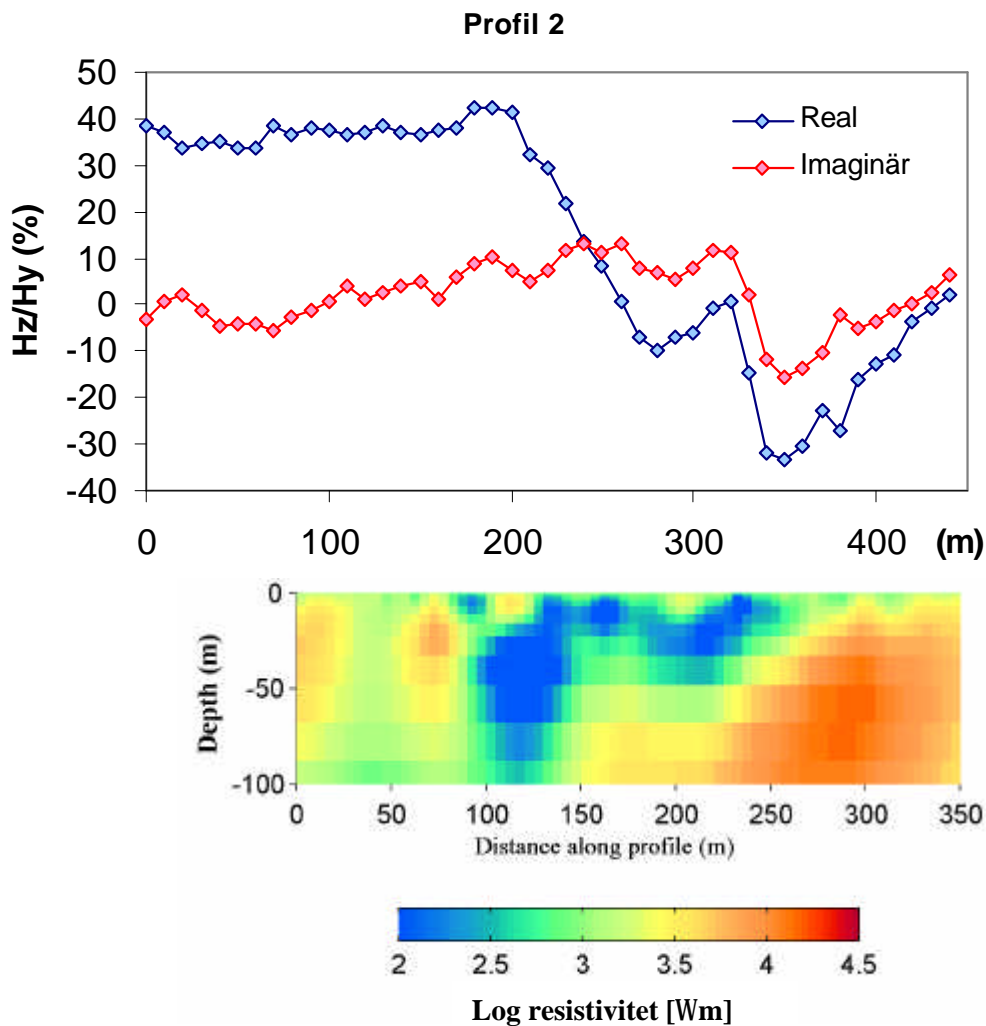
...några exempel på två-dimensionell inversion av VLF-data

Profil 1 nedan (fig. 11a) visar en markmätt VLF-profil inom Västerås kommun. Profilen visar en typisk anomali på realdelen, med en amplitud på ca. 100%, vid koordinat 150 m. Motsvarande anomali saknas helt på imaginärdelen. Fig. 11b visar resultat från inversionen. Modellen visar en relativt ytlig lågresistiv zon på ca. 20 m djup vid koordinat 150–220 m. Anomalin kan tex. vara orsakad av en lokal förekomst av lera och/eller en ökning av jordtäckets mäktighet.

Profil 2 visar en liknande markmätt VLF-profil men här kan anomalin urskiljas både på real- och imaginärkomponenten. Realkomponenten visar en tvådelad anomali, med en amplitud på ca. 70%, vid koordinat 250–350 m. Imaginärdelen uppvisar ett liknande mönster som realdelen men amplituden är betydligt mindre. Fig. 12b visar resultat från inversionen. Till skillnad från föregående exempel visar denna modell en lågresistiv zon på ett något större djup i berggrunden (minst 50 m). Anomalin är troligtvis orsakad av flera vattenförande sprickzoner i berggrunden.



Figur 11. a) VLF-profil b) Inversionsmodell längs samma profil.



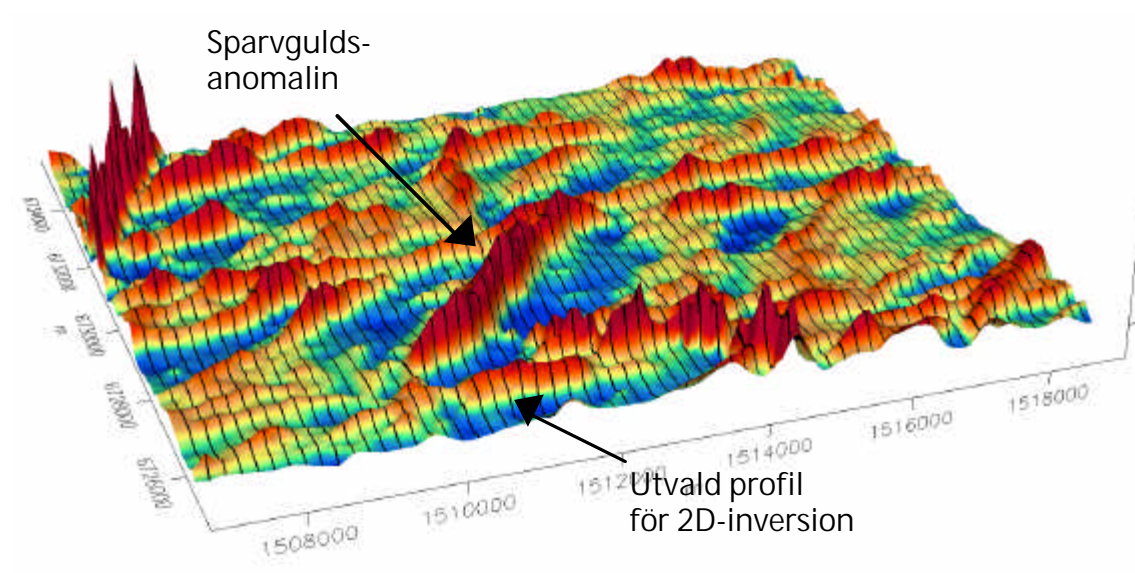
Figur 12. a) VLF-profil b) Inversionsmodell längs samma profil.

Sparvguld

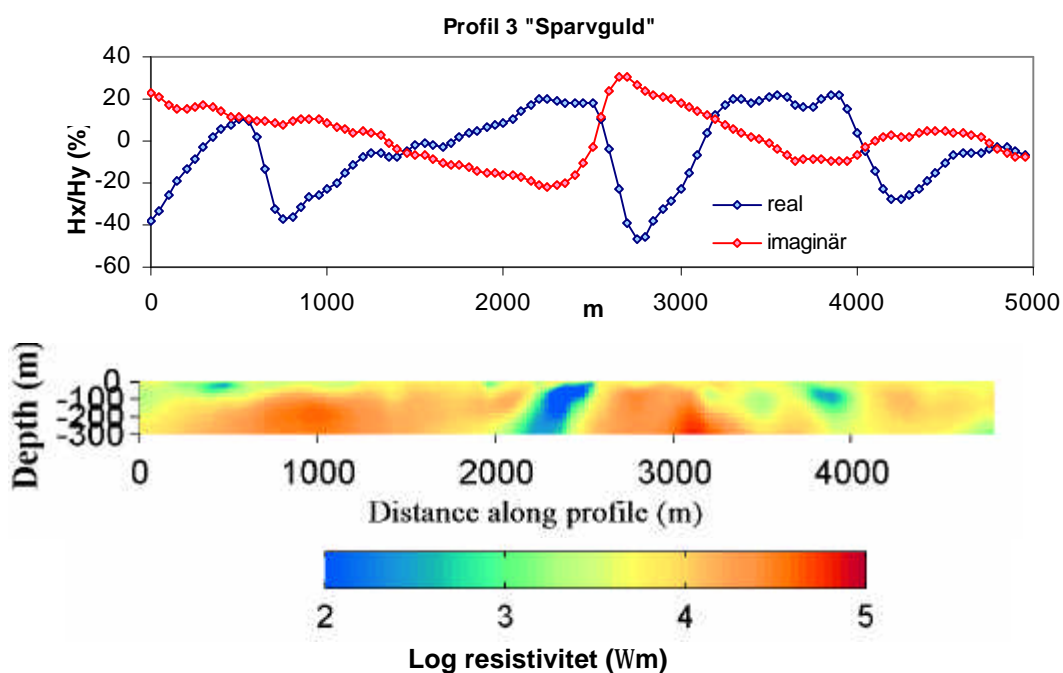
År 1977 utfördes geofysisk flygmätning över kartbladsområdet Hofors 31 G NV. En kraftig VLF-anomali upptäcktes i närheten av Sparvguldsberget och objektet kom senare att döpas till "sparvguld" (fig. 13). Anomalin undersöktes med omfattande markmätningar och borrhningar vilket finns dokumenterat i (Granar, et.al. 1981 samt Hammergren, 1982). I den senare rapporten kan vi bl.a. läsa att: "I avsikt att på djupet undersöka de geofysiska anomalierna sänktes ett 203 m djupt borrhål. Det gick ej att borra längre pga. en kraftigt vattenförande krosszon i slutet av hålet. På en sträcka av 10 m erhöles 8 m kärnförlust. Denna krosszon tillsammans med ytterligare zoner längs kärnan, torde vara förklaringen till den genom flygmätning erhållna VLF-anomalien."

Från flygdata har en av profilerna valts ut som skär över anomalin. Profil 3 (fig. 14) visar VLF-data och resultatet från 2D inversion längs profilen. Inversionsmodellen visar en tydlig lågresistiv struktur med en resistivitet ned till ca. 100 Ω m vid koordinat 2200-2300. Zonen stupar mot norr vilket även överensstämmer med tidigare tolkningar av markgeofysiska mätningar. Att zonen så tydligt kan karakteriseras med avseende på bredd och stupning enbart från flygdata beror till stor del på anomaliens amplitud och

bredd. Till skillnad från profil 1 och 2 ser vi att imaginärkomponenten uppvisar en väldigt kraftig och långsträckt anomali längs denna profil (fig. 14). Den har en utbredning på ca. tre kilometer och en amplitud av samma storleksordning som realkomponenten. Den uppmätta anomalin kan därför inte förklaras av någon yttlig konduktiv zon. Vi ser även på inversionsmodellen att den lågresistiva zonen är tydligt urskiljbar även på ett djup ned till 200-300m.



Figur 13. a) VLF-mätning (totalfält) över sparvguldsanomalin.



Figur 14. VLF-profil (flygdata) samt resultat från 2D-inversion.

6. Referenser

- Bastani, M. 2001, EnviroMT – a New Controlled Source /Radio Magnetotelluric System. Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 32. 179 pp. Uppsala. ISBN 91-554-5051-2.
- Becken, M., 2000. Interpretation of Magnetic Transfer Functions from Airborne Tensor-VLF Measurements. Diploma Thesis. Technical University of Berlin.
- Becken, M. and Pedersen, L.B. 2003. Transformation of VLF anomaly maps into apparent resistivity and phase, *Geophysics* 68, 497-505.
- Gharibi, M. and Pedersen, L.B., 1999. Transformation of VLF-data into apparent resistivities and phases. *Geophysics*, 64, 1393-1402.
- Granar, L. Petersson, G. och Eriksson, L. 1981. Geofysisk markmättningsrapport över objekt Sparvguld. GDA:BRAP81502. Sveriges Geologiska Undersökning.
- Hammergren, P. 1982. Sparvguld. Rapport. GDA:BRAP82523. Sveriges Geologiska Undersökning.
- Paal, G., 1965. Ore prospecting based on VLF-radio signals. *Geoexploration*, 3, 139-147.
- Paal, G., 1968. Very low frequency measurements in northern Sweden. *Geoexploration*, 6, 141-149.
- Pedersen, L.B., Qian, W., Dynesius, L. and Zhang, P., 1994. An airborne tensor VLF system. From concept to realization. *Geophysical Prospecting*, 42, 863-883.
- Pedersen, L.B., 1998. Tensor-VLF measurements: Our first experiences. *Exploration Geophysics. The Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists*, 29, 52-57.
- Persson, L., Daniels, J., Sohlenius, G. and Pedersen, L.B. 2004. Apparent resistivity maps derived from airborne VLF data applied to geological mapping. The 26th Nordic Geological Winter Meeting, January 6-9, 2004 Uppsala, Sweden.
- Persson, L. 2001. Plane Wave Electromagnetic Measurement for Imaging Fracture Zones. Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 30. 132 pp. Uppsala. ISBN 91-554-5028-8.
- Persson, L., Becken, M., Daniels, J. and Antal, I., 2001. New Developments in the Processing and Interpretation of Airborne VLF-EM data. Technical Program Expanded Abstracts. SEG International Exposition and Seventy-First Annual Meeting, San Antonio, Texas.
- Persson, L., Antal, I., Lundqvist, S. and Sträng, M., 2000. Bedrock map 10I Stockholm SO. Geological Survey of Sweden, Af 209.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 65, 791-803.

Appendix A: Utveckling av programrutiner i Oasis montaj™

För att förenkla alla nya metoder inom processering, kartframställning och tolkning av VLF-data som tagits fram inom detta projekt har ett stort antal olika programrutiner utvecklats och sedan implementerats i programvaran Oasis montaj™.

Nedan följer en lista över alla menyer:

VLF_Processing

VLF_Processing är en samling med verktyg i OASIS montaj miljö för att processera SGUs VLF-data.

Verktygen är samlade i en meny som beskrivs var för sig nedan.

Programmen är skrivna i OASIS gx kod C, OASIS skript, Matlab samt Visual Basic.

Utdrag ur källkod medföljer bilaga XX.

Import VLF_Data

Hjälpmedel för att importera VLF-data samt att beräkna den sk Tipper vektorn.

Run Metaflyg

Startar programmet Metaflyg, vilket talar om vilka flyggeofysiska data vi har.

Run Ipoltext

Startar programmet Ipoltext, vilket gör om komprimerade Ipol filer till rena Ascii XYZ-filer.

Merge VLF Files

Startar programmet MergeVLF, vilket slår ihop VLF filer från olika sändare. Detta behövs inte göras på filer nyare än år 2000. Programmet tar bort data från områden där det bara finns data från en sändare.

Create Database and Import data

Skapar en ny Oasis databas. Läser in data från XYZ-fil.

Create tipper vector 2 transmitters

Beräknar tippervektorn från de 12 VLF komponenterna från 2 sändare. Fyra nya kanaler bildas i databasen, kallade Areal, Breal, Aimag och Bimag.

Create tipper vector 1 transmitters

Beräknar tippervektorn från de 6 VLF_komponenterna från 1 sändare. Fyra nya kanaler bildas i databasen, kallade Areal, Breal, Aimag och Bimag. Här kommer Breal och Bimag att vara noll.

Window Database

Här finns samlat databasverktyg, tex. för att göra databasen mindre.

Peaker

Tippervektorn roteras från flygplanets koordinatsystem. Om flyglinjerna är i Nord-Syd, så sker ingen rotation. Om flyglinjerna är öst-västliga kommer tippervektorn att roteras 90 grader. Fyra nya kanaler bildas och de kallas Arealrot, Brealrot, Aimagrot samt

Bimagrot. Peakervektorn kallas den horisontella derivatan av tippervektorn. Realdelen av Peakern kommer att ”Peka”, ha sitt maximum, över en god ledare.

$P_{real} = dA_{real}/dx + dB_{real}/dy$

$P_{imag} = dA_{imag}/dx + dB_{imag}/dy$

Calculate Peaker

Tipperkanalerna Arealrot, Brealrot, Aimagrot samt Bimagrot griddas. Ett filter för att beräkna den horisontella derivatan används på griddarna. Griddarna adderas. Realdelen av Peakern plottas med SGU färgskalan VLF.tbl medan Imaginär delen plottas med SGU färgskalan VLF_INV.tbl.

Random gridding

Griddar tippern med random gridding.

Line gridding

Griddar tippern med Line gridding

Pekaer Up cont 100m

Här körs ett ”upward continuation” filter vilket tar bort en del brus.

Create VLF TOT

Griddar kanalen VLF_tot och plottar den. Totalen är rotenur kvadratsumman av VLF komponenterna.

Apparent Resistivity

Ett program för att beräkna den skenbara resistiviten ur Tipper-data.

Make nice tipper

Här görs griddar iordning för att passa ett visst format.

Run resistivity

Ett matlab program beräknar den skenbara resistiviten samt dess fas. Programmet är ursprungligen skrivet av Michael Becken. Omskrivet av Johan Daniels för att passa SGU data.

Import resistivity

Importerar resultatet från resistivitetsprogrammet ovan. Plottar de två griddarna app_resistivity samt app_phase.

VLF Inversion

Hjälpmiddel för att tolka VLF profiler. Antingen från flygdata eller WADI-data.

Export profile

Wadi

Läser in en original WADI fil till en OASIS databas

Flightline

Läser in en profil från VLF-databasen.

Grid

Läser in en profil från en grid.

Create profiles and input files

Ett matlab program förbereder in-filer till programmet rebocc.
Rebocc kör inversion på VLF-data.

Plot inversion models

Ett matlab program som ritar modellerna som gjorts i programmet rebocc.

MapInfo Exchange

Import MapInfo TAB SGU

Läser in flera TAB-filer åt gången.

Import ArcInfo Shape SGU

Läser in flera Shape-filer åt gången.

Export

Fix MapInfo TAB SGU

Gör om OASIS-exporterade TAB-filer till korrekt koordinatregistrerade MapInfo TAB-filer.

Update

Ett försök att göra uppdateringen fullkomligt enkel.

Rutin som kopierar VLF_processing mappen från Johan Daniels hemkatalog till mappen SGU i användarens OASIS-katalog.

Help

Appendix B: Undersökning av nollnivå effekter på VLF-data

Bakgrund

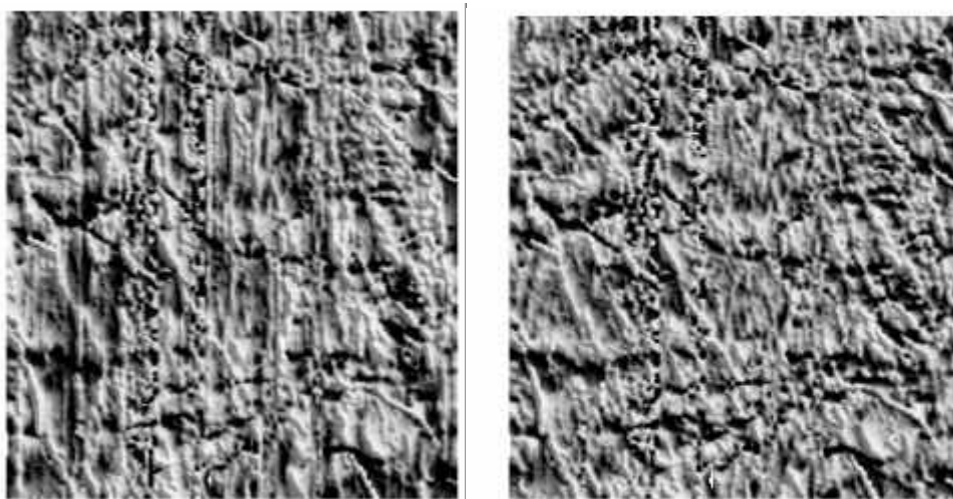
De data som finns tillgängliga har brister i nollnivån. Detta syns främst på de imaginära komponenterna. Orsaken till detta finns i mätsystemet i flygplanet. Inom projektet genomfördes en utredning för att undersöka vilka effekter nollnivåavvikelserna har för beräkning av tipper och peaker information.

För att skala bort bearbetningseffekter på data användes som ingångsdata för försöket den information som kommer direkt från flygplanet. Den programvara som användes för undersökningen var OASIS/Geosoft. Efter att rådata justerats för effekter av flygriktning etc. provades olika metoder för att justera nollnivån.

Resultat

För VLF systemets imaginära komponenter, syntes en viss förbättring i en yttäckande grid efter nollnivåjustering (fig B1). VLF systemets reella komponenter påverkades inte alls. I tipperdata syntes marginella förbättringar. Generellt blev förändringen för peaker informationen (Peaker reell och peaker imaginär) försumbar.

Efter en utvärdering av effekterna, med hänsyn till arbetsinsats och resultat, togs beslutet att inom ramen för detta projekt inte satsa resurser på justering av nollnivå i processerade data. Programvaror och datorer utvecklas i snabb takt och det kommer nya möjligheter att förbättra kvaliteten på befintliga data. Det är därför möjligt att nya försök kommer att göras inom en snar framtid för att förbättra nollnivåeffekterna.



Figur B1. Imaginärdelen av den horisontella komponenten i flygplanets riktning. Före nollnivå korrektion (tv.) och efter nollnivå korrektion (th.). Generellt syntes störst förändring på denna komponent. På motsvarande peaker information syns i praktiken inga förändringar.