



Bestämning av elektriska egenskaper hos vulkaniter från Skellefte- och Arvidsjaurgrupperna



Carl-Axel Triumpf, Hans Thunehed
& Ildikó Antal

Bestämning av elektriska egenskaper hos vulkaniter från Skellefte- och Arvidsjaurgrupperna

Carl-Axel Triumf^{*}, Hans Thunehed^{**}, Ildikó Antal^{***}

Januari 2000

^{*}Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala

^{**}Luleå Tekniska Universitet, Luleå

^{***}Sveriges Geologiska Undersökning, Malå

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. PROJEKTBEKRIVNING	3
2. ALLMÄNT OM ELEKTRISKA EGENSKAPER.....	3
Elektrisk resistivitet.....	3
Inducerad polarisation	5
Fysikalisk- kemisk modell för elektrod-polarisation	6
Cole-Cole- modellen	9
3. UNDERSÖKNINGSMETODIK	10
Provurval och provberedning	10
Mätutrustning	12
Mätförfarande	17
Bearbetning	17
Analysmetodik	18
4. ANALYSRESULTAT	19
Observerade samband mellan parametervariabler	19
5. IDENTIFIERING AV GRUPPERINGAR I PARAMETERDATA	24
Allmänt	24
Faktoranalys för identifiering av grupperingar i materialet	25
Generella kommentarer	27
6. SLUTSATSER	28
7. LITTERATUR	30

SAMMANFATTNING

Projektets huvudsyfte var att undersöka Skellefte- och Arvidsjaurvulkaniternas petrofysiska skillnader med betoning på bergarternas elektriska egenskaper samt att genom detta projekt höja kunskapen och erfarenheten om elektriska egenskaper hos bergarter.

Sveriges Geologiska Undersökning bedriver idag inte någon systematisk undersökning av de elektriska egenskaperna hos jord och berggrund. Det är dock känt sedan länge att elektriska egenskaper ger värdefulla upplysningar bl.a. för malmprospektören och bergbyggaren. Elektriska egenskaper efterfrågas också allt mer av kraftindustrin och militären. Detta forsknings- och utvecklingsprojekt är en av aktiviteterna som bereder möjligheter för framtida rikstäckande undersökningar av de elektriska egenskaperna i marken.

Drygt 60 bergartsprov från det s.k. Skelleftefältet har undersökts med avseende på de elektriska egenskaperna resistivitet och inducerad polarisation. Mätningarna utfördes i tre riktningar (X, Y och Z) och i tre frekvensintervall där det totala frekvensintervallet blev 0.1 till 32 Hz. Även om antalet prover är något lågt så kan vissa klara indikationer ges. Resultaten har kommenterats i relation till litologi och påverkan av tektonik och omvandlingar. Grupperingar i materialet har undersökts varvid minst en faktor identifierats innehållande information som indikerar ett provs möjliga hemvist i Skellefte- eller Arvidsjaurgruppen.

Arbetet visar att de elektriska egenskaperna varierar inom det utvalda bergartspopulationen och att denna variation är stor. De stora variationerna och de i viss mån överraskande resultaten är uppmuntrande.

Som ett indirekt resultat av projektet finns nu en utrustning i Sverige för bestämning av elektriska egenskaper i frekvensdomän i laboratorium. Instrumentering för fältmätningar finns tillgänglig kommersiellt. Mätteknik för fältmätningar och analysteknik har utvecklats bl.a. inom andra SGU-finansierade projekt samt för SKB. Förutsättningar finns nu för att inleda systematiska undersökningar av geoelektriska egenskaper i såväl fält som laboratorium och föreslås härmed påbörjas snarast.

Projektet har till större delen finansierats av Sveriges Geologiska Undersökning Projekt nummer 5260. Finansieringen av utvecklingsarbetet med mätutrustningen för laboratoriemätningar ligger emellertid utanför projektet, denna har bekostats av Luleå Tekniska Universitet. Flera personer har deltagit, där Hans Hedström berett proven, Benno Kathol kodat dem, Roger Lindfors utfört mätningar på proven, Johan Friborg delat med sig av sina kunskaper om IP-fenomen och mätteknik, Arne Enström deltagit i instrumentuppbyggnaden, stort tack till dem alla. Vi tackar också Zonge Engineering & Research Organisation för att utan kostnad ha utfört mätningar av de fem referensproven.

1. PROJEKTBEKRIVNING

Tolkningen av geofysiska data syftar i sitt första steg till att beskriva marken under oss i termer av fysikaliska egenskaper. När arbetet lyckats erhålls en närmast kontinuerlig beskrivning av variationerna i exempelvis densitet och magnetisk susceptibilitet i de ytära delarna av berggrunden. Målet med karteringsprocessen är dock att beskriva bergmassan i geologiska termer. Länken som kan överföra geofysisk information till geologisk är bestämningar av bergarters fysikaliska egenskaper. Ju fler parametrar som kan användas dess större blir sannolikheten att hitta karakteristiska skillnader i bergarters fysikaliska egenskaper som i sin tur med framgång kan användas för klassificering av bergarter. Idag sker en systematisk mätning av fysikaliska egenskaper såsom susceptibilitet, remanent magnetisering, densitet samt gammastrålningsegenskaper på bergartsprov i SGUs laboratorium. Genom att mäta de elektriska egenskaperna skulle klassificeringen av olika bergarter underlättas.

Målsättningen med detta projekt var främst att:

- Höja kunskapen och erfarenheten om bergarternas elektriska egenskaper
- Bereda möjligheter att utöka antalet fysikaliska parametrar
I den så kallade baskarteringen i Sverige används regelmässigt geofysiska parameterdata i karteringsarbetet. Parameterdata innehåller idag uppgifter om bergarters densitet, magnetiska egenskaper samt innehåll av kalium, uran och torium. Det är önskvärt att utöka gruppen med elektriska egenskaper.
- Utröna petrofysiska skillnader mellan Arvidsjaurgruppen och bergarter i Skelleftegruppen som ej är mineraliserade eller sulfidomvandlade

Den malmrika provinsen Skelleftefältet har haft och har en stor betydelse för utvecklingen av Sveriges välstånd. Malmerna är knutna till submarint avsatta vulkaniter inom den s.k. Skelleftegruppen vilka i norr möts av terrestriska vulkaniter inom den s.k. Arvidsjaurgruppen vars malmpotential är lägre. Att skilja dem okulärt i fält är ofta svårt. I delar av gränsområdet mellan de två vulkanitgrupperna är berggrunden dessutom till stor del dold under mäktiga moränackumulationer. Geofysiken kan bidra i klassificeringsarbetet under förutsättning att de två vulkanitgrupperna uppvisar karakteristiska skillnader i petrofysiska egenskaper. De olika fysikaliska parametrarna bör studeras och analyseras. Detta arbete syftar bl. a. till att prova om skillnader existerar i fysikaliska parametrar mellan de två bergartsgrupperna. I datamängden som analyserats ingår dels data som redan insamlats inom den reguljära baskarteringen, dels nya data som beskriver de elektriska egenskaperna.

De två största problemen vid genomförandet av FoU-projektet var:

- Geologiska kriterier saknas för entydig klassificering av Skellefte- och Arvidsjaurgrupperna
Ett av problemen vid arbetet är avsaknaden av goda kriterier för geologen att lita sig mot vid klassificeringen av de ovannämnda vulkaniterna. Det innebär att det kan ifrågasättas om det idag går att klassificera tillhörigheten i varje enskild lokal. Detta introducerar givetvis ett problem i analysen eftersom det därmed inte finns någon "absolut sanning" att stödja sig mot.
- Finna pålitlig utrustning för bestämningar av komplex resistivitet i laboratorium

2. ALLMÄNT OM ELEKTRISKA EGENSKAPER

De elektriska egenskaperna som behandlas här är resistivitet och inducerad polarisation.

Elektrisk resistivitet

Den elektriska resistiviteten är den materialparameter som beskriver ett materials oförmåga att leda elektrisk ström. Resistiviteten (ρ) är inversen av konduktiviteten (σ)

$$\rho=1/\sigma \quad (1)$$

I de flesta svenska bergarter är andelen elektriskt välledande mineral i regel mycket låg och deras inverkan på bergvolymens resistivitet kan helt försummas. I stället bestäms bergarternas bulkresisti-

vitet huvudsakligen av porvolym, sprickfrekvens, sprickfyllningens resistivitet (exempelvis lågresistiva lermineral), sprickvidd, por- och grundvattnets resistivitet samt skalan som man studerar bulkresistiviteten i. En vattenmättad bergvolym med förhöjd porositet eller sprickfrekvens har därför en sänkt resistivitet jämfört med en motsvarande sprickfattig. Vid mätning på små prover i laboratorium saknas emellertid de större sprickorna, i de små proven ökar därför inverkan av porositet och mikrosprickighet.

En av de första modellerna som beskriver samspelet mellan bulkresistiviteten, porvolym och porvätskans resistivitet presenterades av Archie (1942)

$$1/\rho = a\phi^m/\rho_w \quad (2)$$

där

ρ = bulkresistiviteten för hela volymen

ρ_w = porvätskans resistivitet

ϕ = porositet, d.v.s. volymsandel porvätska i förhållande till totalvolymen

a = dimensionslös parameter, för salina lösningar ungefär 1 (Olsson et al., 1987)

m = en parameter vars värde är beroende av mineralkornens form, som varierar mellan 1 till 2,2. Enligt Sen et al. (1981) ungefär 1.5 för bergarter utan uttalad anisotropi.

Archies lag bestämdes ursprungligen för sedimentära bergarter, men anses av många vara applicerbar också på kristallina bergarter. Det är därför av intresse att studera hur väl den kan beskriva resistiviteten som funktion av porositeten i data från svensk kristallin bergart.

I kristallina bergarter är porositeten i regel under 1 % (Olsson et al. 1987). Den andel ström som via ytledning flyter längs tunna vattenskikt och på korngränser påstås då kunna bli betydande i förhållande till den andel ström som flyter genom porerna. För att beskriva detta tillförs ibland en term till Archies lag enligt i formel (2) där $a = 1$.

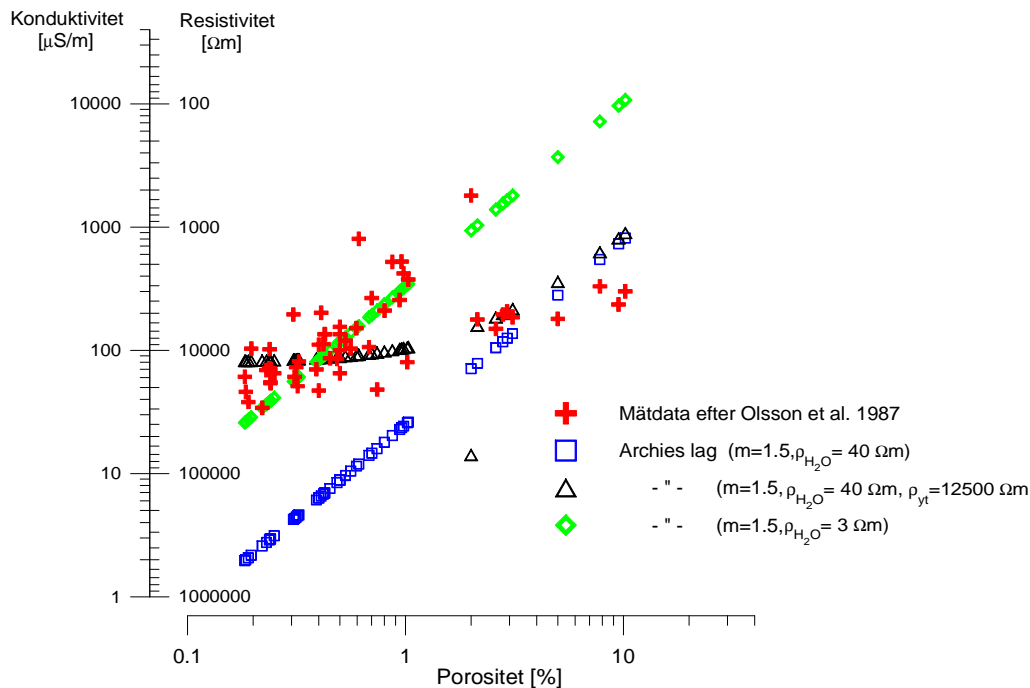
$$1/\rho = 1/\rho_s + 1/\rho_w\phi^m \quad (3)$$

där

ρ_s = ytresistiviteten

Olsson et al. (1987) visar i en figur sambandet mellan porositeten i en tektoniskt påverkad bergart och dess resistivitet. Vi presenterar deras data i figur 1 i form av resistivitet som funktion av porositet. Författarna vill införa en ytledningsterm som är 0.03 S/m, vilket motsvarar en ytresistivitet av cirka 33 Ω m. Med en så låg ytresistivitet blir emellertid anpassningen inte god mellan uppmätta och modellerade data. Som ett alternativ visas Archies lag med en införd ytresistivitet av 12500 Ω m. Vi ser att anpassningen är relativt god för huvuddelen av data. Avvikande värden som ej passar in i modellen förekommer emellertid och tolkas vara orsakade av sprickor.

I figuren visas också Archies lag med $m=1.5$ och med porvatten vars resistivitet ansatts till 40 Ω m, vilket var den som användes vid bestämningarna. Som synes blir anpassningen dålig. En bättre anpassning erhålls med ett porvatten vars resistivitet är cirka 3 Ω m, vilket dock är mer än en tiopotens lägre än hos det använda vattnet. Svårigheterna att få samstämmighet mellan modeller och verklighet är uppenbar, och kan tyda på att modellerna är ofullkomliga.



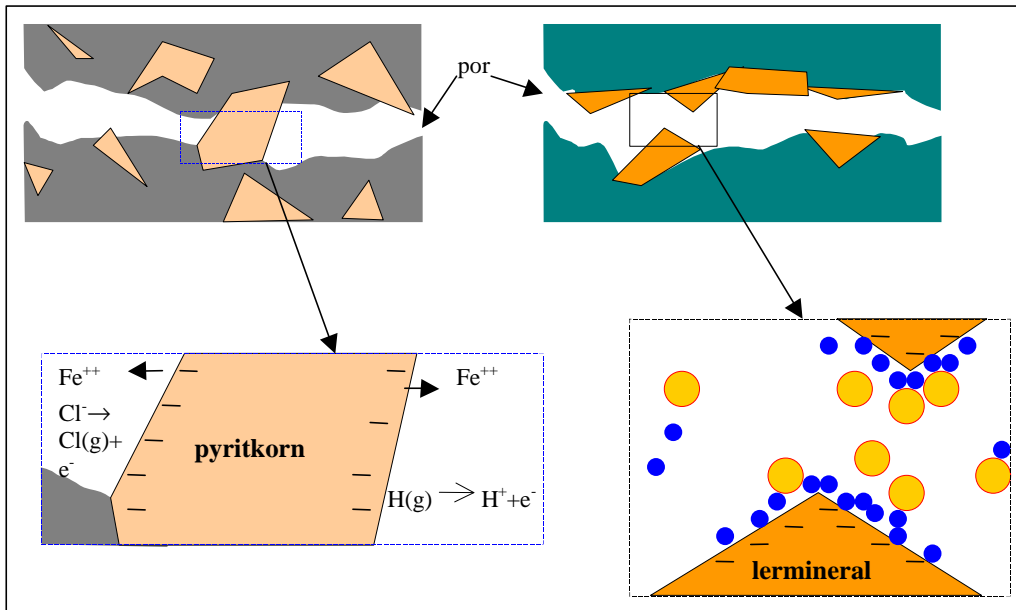
Figur 1. Resistiviteten som funktion av porositeten i prov från en tektoniserad zon i Stripa gruva, fritt efter Olsson et al. (1987). Jämförelse med Archie's lag, med och utan ytresistivitetsterm.

Inducerad polarisation

Den elektriska resistiviteten är även beroende av mätfrekvensen. Flera olika fenomen är orsak till detta men vi ska här endast behandla de som har störst effekt vid frekvenser i intervallet 0.01 till 1000 Hz. Resistiviteten sjunker här med ökande frekvens. Fenomenet kallas inducerad polarisation (IP) och orsakas främst av två olika mekanismer; elektrod polarisation och elektrolytisk polarisation.(fig. 2.).

Vid *elektrodpolarisation* sker elektrisk ledning som jonledning i porer och sprickor eller som elektronledning i t ex sulfidmineral och grafit. Det innebär att elektrokemiska processer är aktiva vid övergången mellan de två ledningsmekanismerna. Dessa processer sker inte momentant. En effekt av detta är att elektriska laddningar ansamlas vid gränsyterna mellan porer och elektronledande mineral när ström ska passera. Denna typ kallas för elektrod-polarisation.

Elektrolytisk polarisation uppkommer i bergarter där porerna är kantade av mineral med jonbytesförmåga, t.ex. lermineral med negativ ytladdning. Även andra silikatmineral besitter denna egenskap men i mindre omfattning. Den negativa ytladdningen fördröjer passagen av positiva joner i poren. Om en elektrisk ström drivs genom en bergart med sådana mineral i porväggarna kommer därför en obalans i laddning att uppstå mellan porens bägge ändar.



Figur 2. De två viktigaste mekanismerna bakom uppkomst av inducerad polarisation. T.v. uppkomst av elektrod-polarisation då ett sulfidmineral blockerar en por varvid elektrokemiska processer uppträder vid övergång mellan jonledning och elektronledning i gränsytan mellan elektrolyt och mineral. T.h. en av orsakerna bakom elektrolytpolarisation då negativt laddade lerpartiklar attraherar katjoner i elektrolyten varvid såväl fysisk som elektrisk "blockering" av passagen i poren uppstår. Fritt efter Keller och Frischknecht (1977).

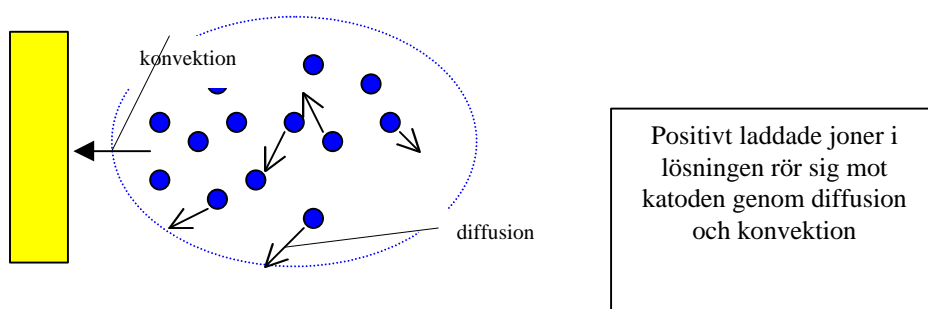
Flera olika makroskopiska och mikroskopiska teorier har presenterats för att förklara IP-fenomenet. En beskrivning av några orsaker bakom uppkomst av inducerad polarisation ges av Keller och Frischknecht (1977). I fortsättningen valde vi att behandla endast elektrodpolariationen.

Fysikalisk- kemisk modell för elektrod-polarisation

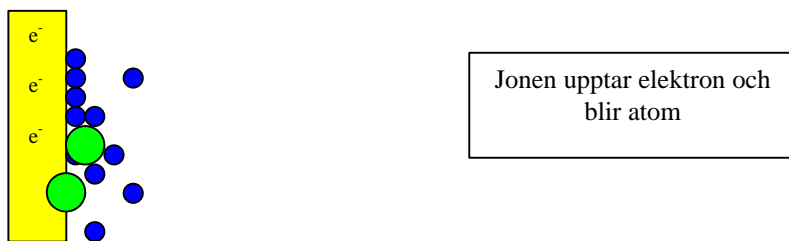
Luo och Zhang (1998) ger en generell fysikalisk-kemisk förklaring till uppkomst av inducerad polari-sation i det specifika fallet med elektrod-polarisation. Förloppet kan uppdelas i två delprocesser; ytpo-larisation och volympolarisation.

Den parameter som kvantifierar ytpolarisationen hos elektronledare kan kallas residualsänning (eng. overvoltage). Denna residualsänning orsakas av trögheten i elektrodprocessen när en ström flyter genom diskontinuitetsytan mellan en elektronledare och en jonlösning. Figur 3a-c visar schematiskt de olika delprocesserna när en positiv jon urladdas mot en katod. (den upptar n elektroner). I figur 3a rör sig jonen från lösningar till ett lager nära katoden genom diffusion och konvektion. Jonen upptar elektroner vid katoden och bildar en atom (fig. 3b.) som sedan migrerar till stabila sediment (fig. 3c).

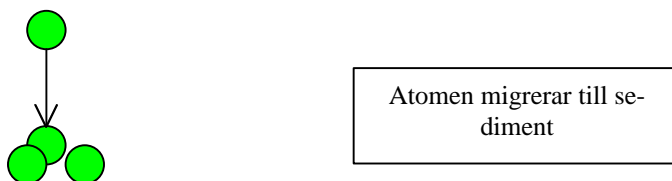
a.



b.



c.



Figur 3. De olika processerna i elektrod-polarisation. Fritt efter Luo och Zhang (1998).

Den långsammaste av de tre processerna som beskrivits ovan bestämmer hastigheten hos hela den elektrokemiska processen och därmed vilken typ av reaktion som ligger bakom residualspänningen. De tre reaktionerna kallas:

1. residualspänning av koncentration (concentration overvoltage) uppstår om jondiffusion är den långsammaste processen
2. residualspänning av migration (migration overvoltage) uppstår om jonupptagningen är långsammast
3. kemisk residualspänning (chemical overvoltage) uppstår om atommigrationen är den långsammaste processen

Residualspänningen Δf är linjär med strömtäthetens normalkomponent genom ytan av en polariserbar kropp j_n :

$$\Delta f = -kj_n \quad (4)$$

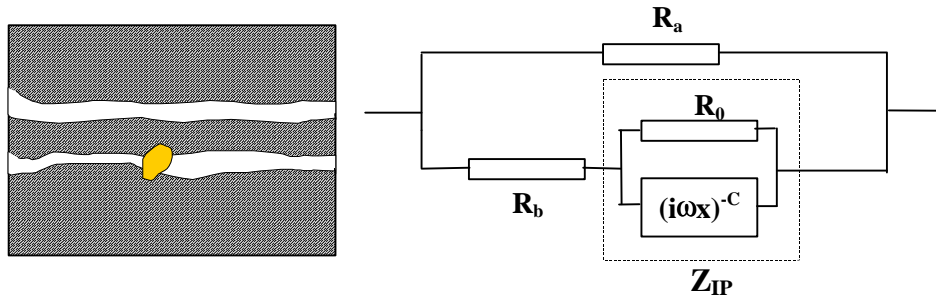
om $j_n \leq 1 \text{ mA/cm}^2$. Faktorn k är ytpolariserbarhetsfaktorn kallas även ytimpedansen.

Ytpolariserbarhetsfaktorn kan ses som den sammanvägda effekten av ytans resistans och kapacitans genom parallellkoppling. Den relativa storleken av dessa två är beroende av vilken av ovanstående tre processer som dominerar. Vid höga frekvenser kommer ytans impedans att sjunka eftersom kapacitansen då inte ger något bidrag. Ytpolariserbarhetsfaktorns frekvensberoende kan därmed skrivas:

$$k(i\omega) = \left[\frac{1}{k_0} + (i\omega x)^c \right]^{-1} \quad (5)$$

där k_0 är ytresistansen och x är ytkapacitansen. Värdet på faktorn c beror på relativa betydelsen av diffusion, jonupptagning respektive migration.

Vi ska nu studera vad som händer i en liten idealiserad volym av en bergart som innehåller porer och elektronledande mineralkorn, figur 4. Endast porerna och de elektronledande mineralkornen ger ett bidrag till ledningsförmågan. En ekvivalent strömkrets kan ses till höger i figuren där den inringade delen motsvarar ytimpedansen som beskrivits ovan.



Figur 4. Principskiss som beskriver bakgrunden till Cole-Cole-modellen. T.v. ett bergartsprov med porutrym- men där det ena blockeras av ett elektronledande mineralkorn (exempelvis magnetis eller pyrit). I porerna finns vatten med joner. T.h. den ekvivalenta krets som beskriver de elektriska reaktionerna i bergartsprovet.

Impedansen kan därmed genom serie- respektive parallellkoppling skrivas:

$$Z(i\omega) = \left[\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b + Z_{IP}} \right]^{-1} \quad (6)$$

där:

$$Z_{IP} = \left[\frac{1}{R_0} + (i\omega X)^c \right]^{-1} = \frac{R_0}{1 + (i\omega X)^c \cdot R_0} = \frac{R_0}{1 + (i\omega t_s)^c} \quad (7)$$

och

$$t_s = R_0^{1/c} \cdot X \quad (8)$$

Parametern τ_s har dimensionen tid och beskriver ytpolarisationsprocessens tids- eller frekvenskaraktäristika. Vi kan introducera en motsvarande parameter för hela volymen:

$$t = X \left[\frac{(R_a + R_b)R_0}{R_a + R_b + R_0} \right]^{1/c} \quad (9)$$

Impedansen för en ekvivalent krets blir då:

$$Z(i\omega) = Z(0) \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (10)$$

Genom att normalisera impedanserna $Z(i\omega)$ och $Z(0)$ med den geometriska faktorn för elektroduppställningen och beräkna resistiviteten med hjälp av

$$\mathbf{r} = K \frac{\Delta U}{I} = KZ \quad (11)$$

(där K är den geometriska faktorn) erhålls uttrycket för den komplexa resistiviteten enligt:

$$\mathbf{r}(i\omega) = \mathbf{r}(0) \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (12)$$

vilket är uttrycket för Cole-Cole modellen.

Cole-Cole-modellen

Någon konsensus bland geofysiker finns inte för hur IP ska kvantifieras. I den geofysiska litteraturen dominerar dock den modell som beskrivits ovan och som först utarbetades för dielektrika av Cole & Cole (1941) och sedan modifierats av Pelton et al. (1978). Cole-Cole-modellen beskriver den elektriska resistiviteten som en komplex storhet som varierar med frekvensen enligt:

$$\mathbf{r}(i\omega) = \mathbf{r}_0 \cdot \left[1 - m \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (13)$$

där

ρ_0 = resistivitet vid nollfrekvens (Ωm)

ω = vinkelfrekvens (rad/s)

m = polariserbarhet

τ = tidskonstant (s)

c = formfaktor

$i = \sqrt{-1}$

ρ_0

betecknar resistiviteten vid nollfrekvens. I bergarter utan nämnvärt innehåll av elektriskt ledande mineral såsom grafit, kis- och lermineral bestäms ρ_0 främst av

- porositet
- sprickighet
- sprickorientering
- sprickors och porers ömsesidiga sammanbindning
- sprickvidd
- sprickfyllnad
- porvattnets resistivitet
- ytledning

För det svenska urberget ligger denna typiskt i intervallet 0,5 till 50 $\text{k}\Omega\text{m}$.

m

betecknar polariserbarheten vilken är skillnaden i impedans mellan nollfrekvens och oändligt hög frekvens normerad mot nollfrekvensimpedansen. Enligt Pelton et al (1978) minskar polariserbarheten med ökande kornstorlek hos sulfidmineralen, medan den ökar med ökande sulfidmineralhalt.

τ

betecknar tidskonstanten. Denna faktor varierar från 10^{-2} till 10^2 enligt Luo och Zhang (1998). Tidskonstanten anses öka med ökande kornstorlek hos de elektriskt ledande mineralen. Enligt Hallof et al (1979) är tidskonstanten alltid högre i grafitförande berggrund än i sulfidmineraliseringar. Tidskonstanten ökar med ökande halt av sulfidmineral enligt Pelton et al (1978).

c

formfaktorn anger till hur stor grad resistiviteten beror av frekvensen. Den antar värden mellan 0 och 1, typiskt omkring 0,5. Enligt Luo och Zhang (1998) ger elektriskt ledande mineralkorn av homogen storlek i bergarten högre värden på c, i regel 0,5-1. Likaså anses god galvanisk koppling mellan sulfidmineralkorn ge högre värden. I kraftigt mineraliserad berggrund med stor variation i kornstorlek ligger ofta c i intervallet 0,2 - 0,4. Motstridiga resultat påträffas dock i Luo och Zhang (1998).

Den komplexa resistiviteten beskrivs alltså av de fyra storheterna ρ_0 , m, τ och c. Resistiviteten vid nollfrekvens, ρ_0 påverkas främst av polariserbarheten m, tidskonstanten τ och formfaktorn c. Det har gjorts försök med att relatera t.ex. tidskonstanten med olika typer av mineraler. Ett problem är dock att framförallt texturrella egenskaper som kornstorlek och kornform påverkar IP-signalen kraftigt.

Inducerad polarisation beskrivs ofta med hjälp av parametrarna m, τ och c i Cole-Cole-modellen. Detta innebär att den skenbara resistiviteten måste mätas upp som funktion av frekvens. Eftersom mätningar i frekvensdomän är direkt relaterade till tidsdomänmätningar genom Fourier-transformen kan mätningarna även utföras i tidsdomän. Den avklingande transienten efter ett strömavslag mäts då upp i ett antal tidsfönster.

IP-mätningar görs vanligen med samma typer av elektrodkonfigurationer som används vid resistivitetmätning. Eftersom berggrunden är inhomogen bör man betrakta uppskattade Cole-Cole-parametrar som skenbara och beteckna dem med m_a , τ_a och c_a .

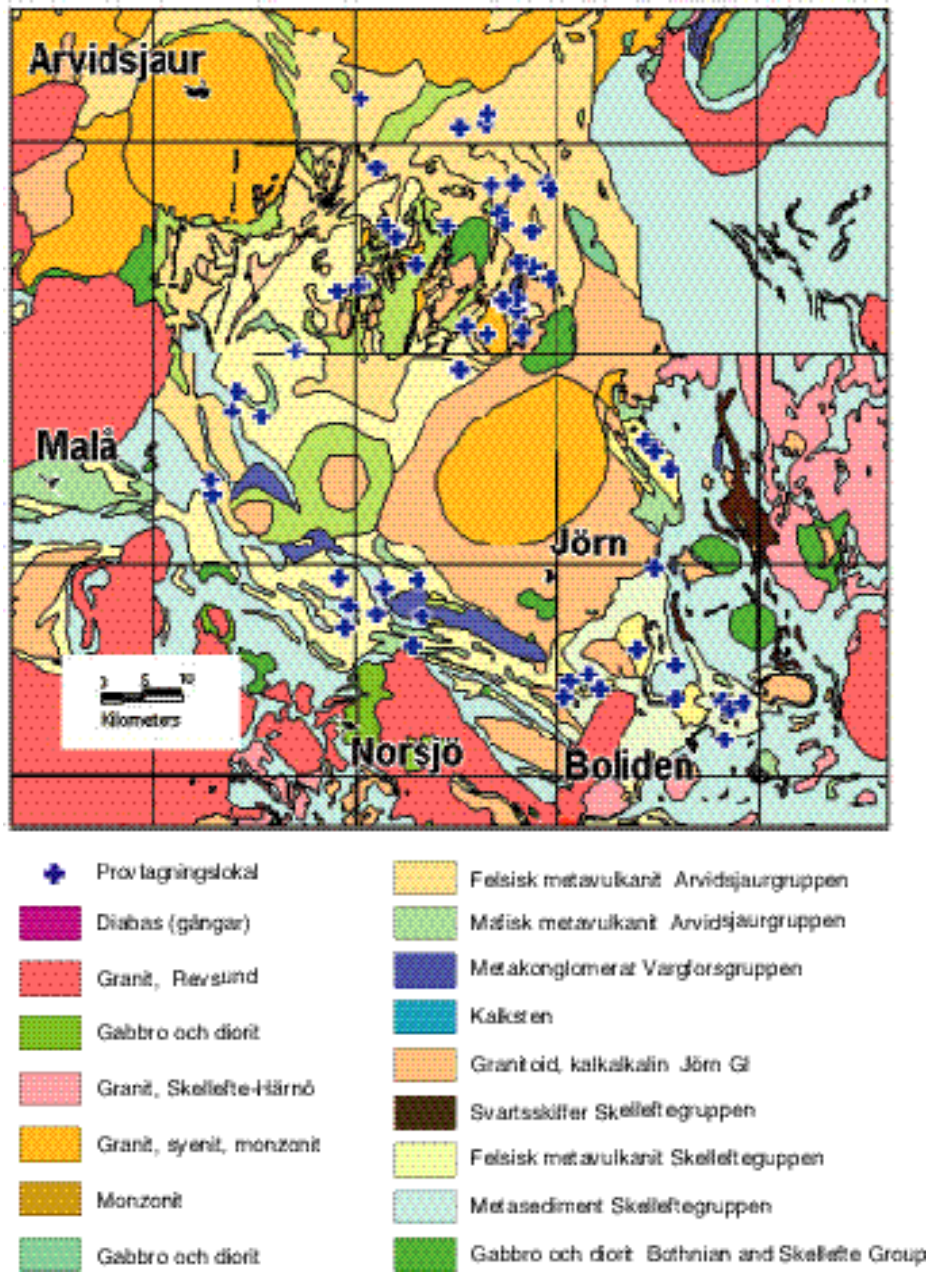
Äldre eller enklare IP-utrustningar mäter ofta vid bara en frekvens eller ett tidsfönster. I sådana fall är det omöjligt att göra anpassningar till Cole-Cole-modellen.

3. UNDERSÖKNINGSMETODIK

Provurval och provberedning

I samband med pågående baskarteringar inom kartbladen 23J Norsjö, 23K Boliden och 24 J Arvidsjaur har ett stort antal prov insamlats för bestämning av fysikaliska egenskaper. Bland dessa valdes 64 prov ut för denna undersökning. Provlokalerens läge framgår av figur 5.

Proverna utgörs av olika typer av vulkaniter från bägge grupperna, Skelleftegruppen och Arvidsjaurgruppen.



Figur 5. Läget av de prov som uttagits för projektet markerade på arbetsversionen av den geologiska synteskartan över Skelleftefältet.

Proverna utgörs av olika typer av vulkaniter från bägge grupperna, Skelleftegruppen och Arvidsjaurgruppen. I urvalet av prov från Skelleftegruppen eftersträvades icke mineraliserade eller sulfidomvandlade prov eftersom tekniken för att detektera sulfidmineraliserade bergarter med geofysiska mätmetoder är välkänd. Ett av de få prov som representerar denna grupp är ett mineraliserat och omvandlat bergartsprov (Ila9334) från Skelleftegruppen. Provets anomala karaktär är lätt att identifiera. Arbetet koncentrerades på de besvärligare icke sulfidförande delarna av Skelleftegruppen. Klassifikationen av proverna utfördes av en berggrundsgeolog enligt BG-data-systemet och presenteras i *Bilaga 1*. Proverna sågades till kuber med sidlängder inom intervallet 20-50 mm, figur 6.



Figur 6. Exempel på kuber som sågats ur insamlade bergartsprov. Sidlängderna varierar i intervallet 20 – 50 mm.

Mätutrustning

En inventering av företag som erbjöd tjänster för bestämningar av efterfrågade elektriska egenskaper gjordes på Internet. Utfallet var begränsat, inom Europa hittades bara ett laboratorium i England som gjorde bestämningar i tidsdomän med det instrument som tidigare tillverkades i Sverige (SGU RIPS). Förfrågningar i Sverige resulterade i uppgifter om instrument som antingen mätte enbart i tidsdomän eller i frekvensdomän på enbart en frekvens. Vidare fanns enligt uppgift en utrustning i Finland som utförde mätningar i frekvensdomän, enligt uppgift dock bara på tre frekvenser.

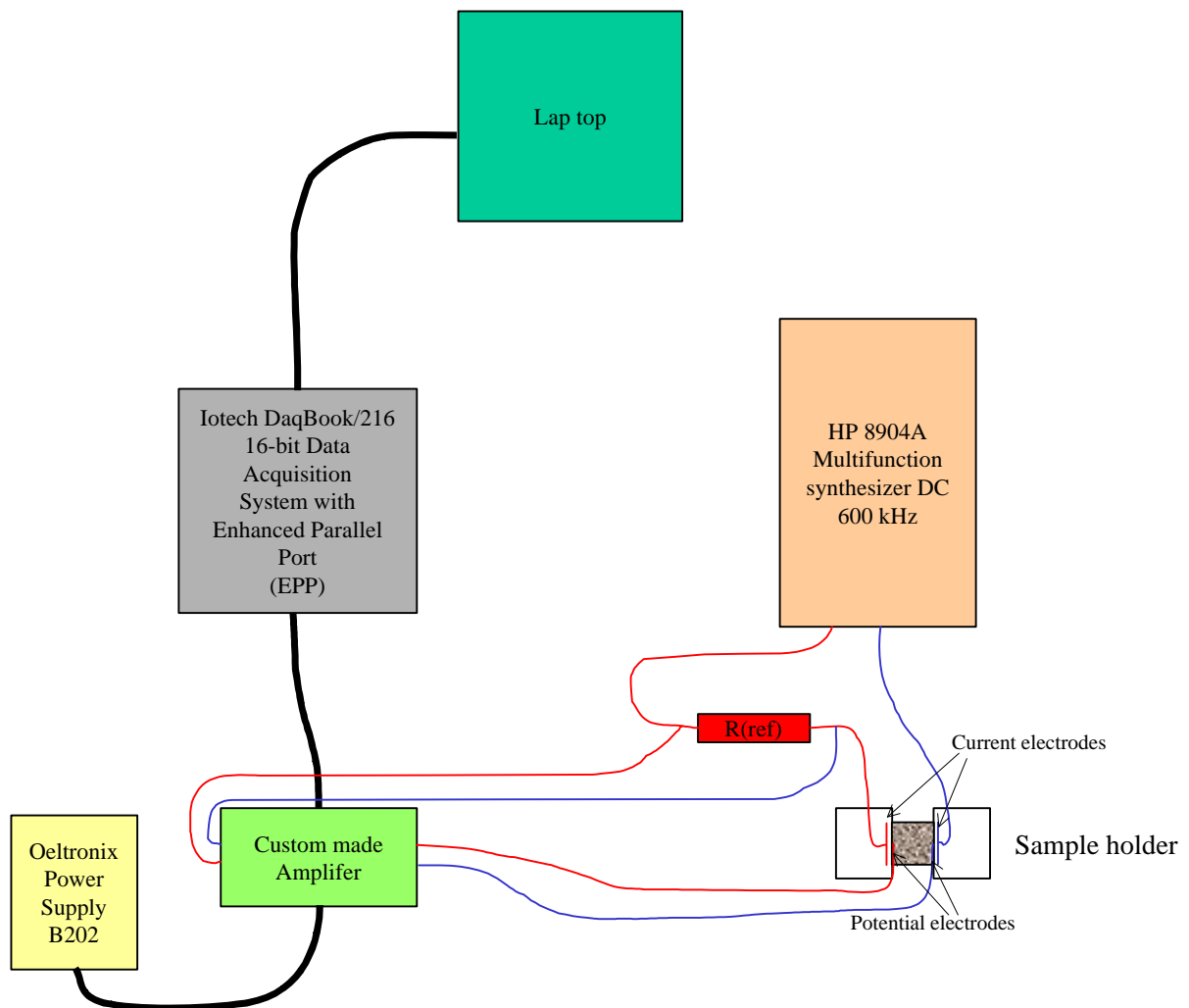
Det intressantaste alternativet hittades i USA där Zonge Engineering & Research Organisation erbjöd mätningar av elektriska egenskaper inom både tidsdomän och frekvensdomän.

En serie om fem prov skickades till Zonge Engineering & Research Organisation i USA av främst två anledningar

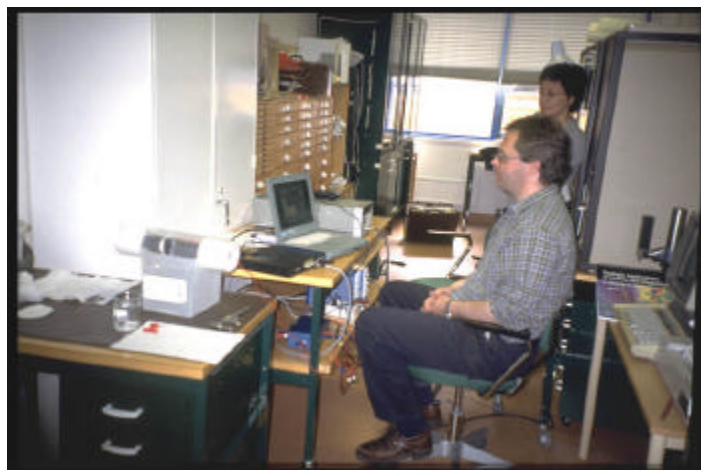
- för att prova laboratoriet för eventuella senare mätningar av hela provserien
- för att erhålla något referensmaterial till eventuella jämförande mätningar med andra utrustningar

Som en följd av det kläna resultatet av inventeringen beslöt Luleå Tekniska Universitet att finansiera och bygga en laborietrustning för bestämningar av elektriska egenskaper i frekvensdomän. Arbetet påbörjades i början av april 1999.

Utrustningen baseras i sin helhet på användning av komponenter som kan köpas på marknaden vilka kompletterats med ett fåtal specialkonstruktioner som ritats och konstruerats på universitetet. Mätupställningen visas i en principskiss i figur 7 och vid användning i figurerna 8 - 10.



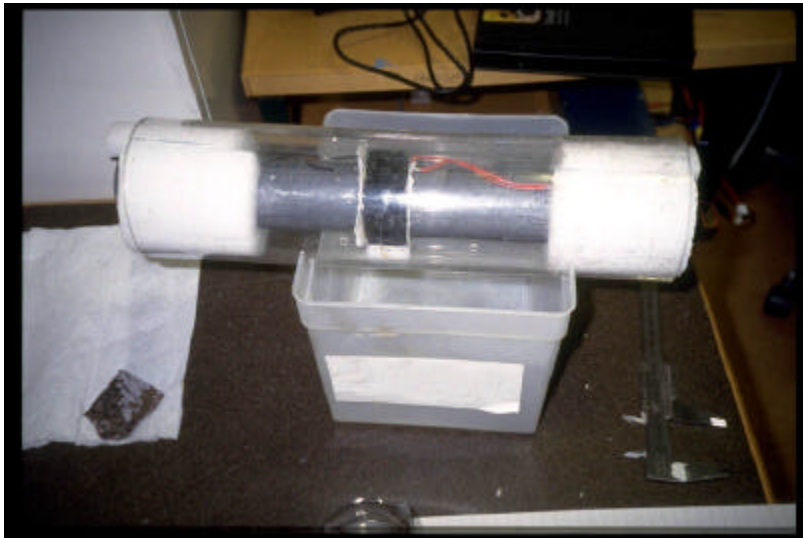
Figur 7. Mätuppställning för bestämningar av elektriska egenskaper i frekvensdomän på Luleå Tekniska Universitet.



Figur 8. Mätning av elektriska egenskaper i frekvensdomän på Luleå Tekniska Universitet med den utrustning som utvecklats vid universitetet.



Figur 9. Detaljbild av utrustningen.

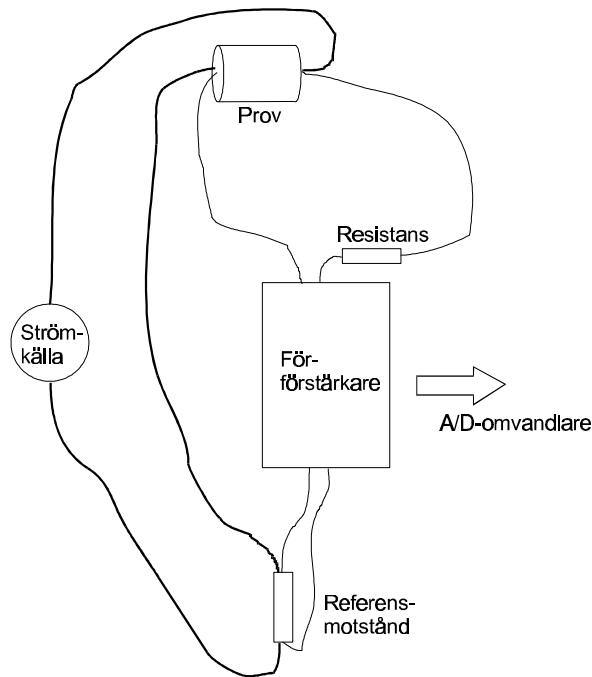


Figur 10. Detaljbild av provhållaren.

En provhållare av tvåelektrodotyp valdes för att en så stor del av provet som möjligt skulle ingå i mätningen. Nackdelen med denna typ av elektrod är att repeterbarheten kan bli sämre än i fallet med fyra elektroder. Hållaren kan dock lätt göras om till att passa fyra elektroder.

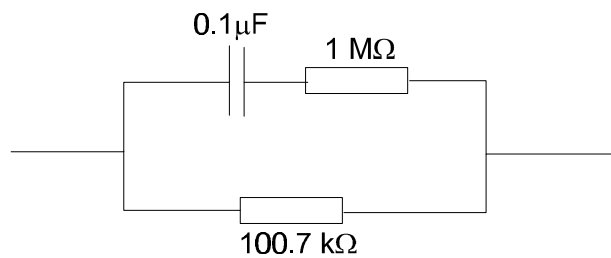
Mätutrustningen klarar av att mäta i frekvensintervall från 0.1 Hz till ca. 200 Hz. Den nedre gränsen bestäms av sändaren medan den övre gränsen bestäms av A/D-omvandlarens samplingsfrekvens och dataöverföringshastigheten mellan A/D-omvandlaren och datorn. Vid ännu högre frekvenser än 200 Hz kan elektromagnetiska kopplingseffekter bli besvärande.

Förstärkarens ingångsimpedans måste vara mycket hög eftersom vissa prover kan vara mycket högre-sistiva. Ingångsimpedansen mättes med hjälp av uppställningen i figur 11. En resistans kopplades i serie med ingången till förstärkaren och potentialelektroden över provet. En spänningsdelning sker härvid mellan resistansen och impedansen i förstärkarens ingång. Mätning skedde med flera olika värden på resistansen. Ingångsimpedansen bestämdes till ca. 2000 M Ω .

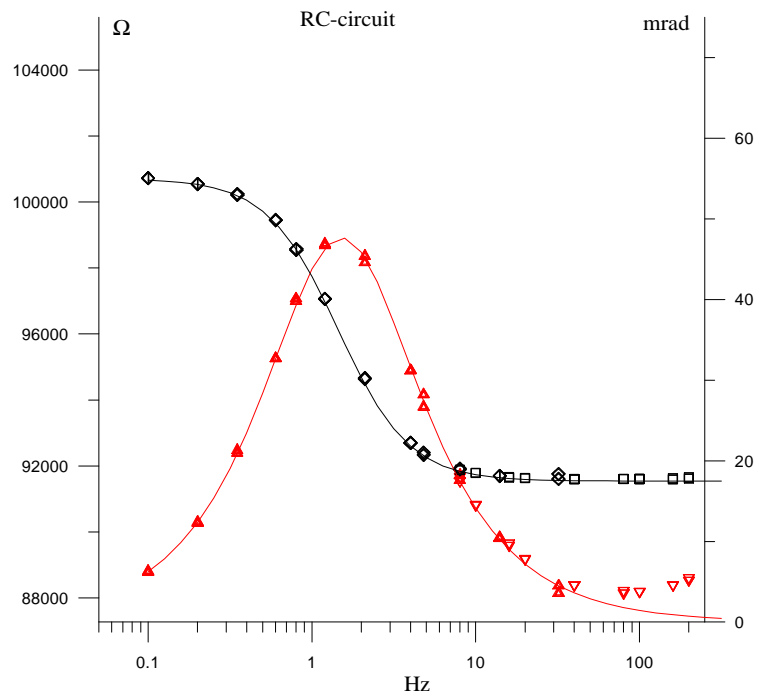


Figur 11. Uppställningen vid bestämning av ingångsimpedansen hos mätutrustningen.

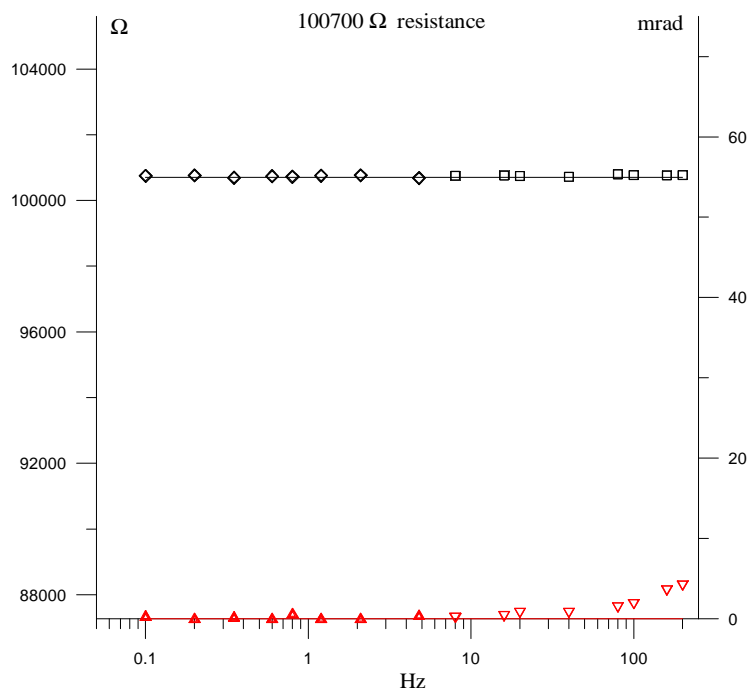
Inga analoga filter finns i förstärkaren utan aliasingeffekter undviks med höga samplingsfrekvenser på upp till 1000 Hz. Kablage och provhållare utformades med tanke på att minimera strökapacitanser i systemet. En test av mät- och beräkningsnoggrannhet gjordes genom att en RC-krets (figur 12) monterades på en plastbit och placerades i provhållaren. Mätning gjordes också över enbart 100.7 k Ω -motståndet. Resultatet (figurerna 13 – 14) visar att mät- och beräkningstekniken ger pålitliga resultat upp till omkring 100 – 200 Hz.



Figur 12. Uppställningen för kontroll av mät- och beräkningsnoggrannhet.



Figur 13. Resultat från kontroll av mät- och beräkningsteknik. De heldragna kurvorna visar i rött den teoretiskt beräknade fasvinkeln som funktion av frekvensen över RC-kretsen i figur 12, i svart impedansen över motsvarande krets. Röda och svarta symboler markerar resultat från utförda mätningar/beräkningar från testmätningen.



Figur 14. Resultat från kontroll av mät- och beräkningsteknik. De heldragna kurvorna visar i rött den teoretiskt beräknade fasvinkeln som funktion av frekvensen över motståndet 100.7 kW i figur 12, i svart impedansen över motståndet. Röda och svarta symboler markerar resultat från utförda mätningar/beräkningar från testmätningen

Mätförfarande

Inför mätning blötlades de sågade proven i minst 24 timmar i vanligt kranvatten. Provet som skulle mätas plockades upp ur vattnet och torkades av på ytan med papper och fästes därefter i provhållaren. Provhållaren var placerad inuti ett plexiglasrör vilket bedömdes minimera torkning av provets ytära skikt. Kontakten mellan elektroder och prov åstadkoms med blött papper.

Provet fick sitta i provhållaren i ca. en till två minuter innan mätning påbörjades för att vätning av kontaktytan mot elektroderna skulle hinna ske. Mätning utfördes sedan i en riktning (x-axeln) i tre på varandra följande frekvensintervall omfattande vardera en dekad, varefter provet kopplades loss och lades tillbaka i vatten. Frekvensintervallen överlappade varandra varför det totala frekvensintervallet för mätningen blev 0.1 till 32 Hz. På så vis fortsatte mätningarna genom hela provserien för x-axeln, för att sedan övergå till nästa riktning y-axeln och slutligen z-axeln. Detta förfarande bedömdes minska felaktiga värden orsakade av torkning av provet.

Mätning av alla tre riktningarna i ett prov tog cirka 20 minuter, inkluderande all hantering.

Mätning på så låga frekvenser som 0.1 Hz krävde relativt långa integrationstider. Detta innebar att resistiviteten av provet ibland ändrades under mätningens gång. Detta berodde antingen på att provets ytskikt hann torka eller att kontaktytan mot elektroderna inte var tillräckligt fuktiga vid mätningens början. Det var därför viktigt att mätningen genomfördes snabbt när den startats och att alla prover behandlades korrekt och likartat. Trots detta förekom på vissa prover språng i resistivitet i de överlappande frekvensintervallen. Sprången var med något enstaka undantag små och korrigerades genom att intervallen parallellförsköts så att en jämn kurva erhöles.

Samtliga mätningar upprepades en extra gång, utan att ta ur provet ur provhållaren, för att kontrollera repeterbarheten. Några prover mättes också om helt och hållet. I allmänhet var repeterbarheten mycket god. Det förekom dock att resistiviteten ändrades när provet tagits ur provhållaren och monterats in igen. Detta berodde förmodligen på att proverna var något oregelbundna till formen och dessutom inhomogena varför kopplingen till elektrodsystemet kunde variera. Effekten tycktes vara vanligare på högresistiva prover och kunde då vara så stor som ca. 40%.

Sex prover valdes ut och mätningar gjordes i ett större frekvensintervall, från 0.1 Hz till 200 Hz. Dessa mätningar gjordes bara i en riktning.

Bearbetning

Mätningarna gjordes med tre grundfrekvenser (0.1, 0.6 resp. 4 Hz) och med en rampformad vågform. Den samplade tidserien (6 till 10 hela perioder) sparades undan och transformerades till frekvensdomän. Amplitud och fas för grundfrekvensen och ett antal övertoner jämfördes med motsvarande mätning över ett referensmotstånd (figur 7). Övertoner upp till ca. 10 gånger grundtonen gav acceptabel kvalitet. Medelvärdesberäkningar gjordes för tredje och fjärde respektive femte till nionde övertonen. Resistansen över provet räknades om till resistivitet genom att provets dimensioner angavs. En felkälla på några procent introducerades här eftersom proverna inte var helt regelbundna till formen.

För högre frekvenser utfördes mätning och bearbetning på i princip likartat sätt men med en sinusformad signal och en frekvens åt gången.

Ett program skrevs som utförde de parallellförskjutningar av data i olika frekvensintervall som beskrivits ovan. Förfarandet krävde att mätresultatet först inspekterades i diagramform för att bedöma vilket värde som skulle ansättas som resistivitet i ena ändan av det totala frekvensintervallet.

I de ursprungliga planerna ingick att den komplexa resistiviteten skulle inverteras till en Cole-Colemodell. Detta skulle vara relativt okomplicerat med till exempel en Monte Carlo-procedur. Eftersom nästan alla prover visade sig ha mycket korta tidskonstanter bedömdes dock detta som olämpligt efter-

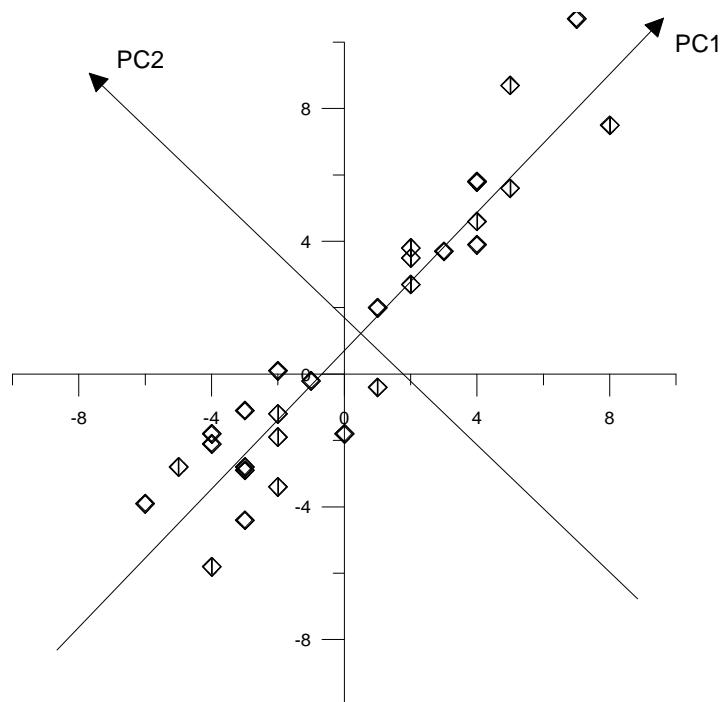
som den maximala fasvridningen hamnade utanför det uppmätta frekvensintervallet. Några prover valdes dock ut där parametrarna i Cole-Cole-modellen bestämdes med Monte-Carlo-inversion.

Zonge utförde testmätningar på fem prov med en fyrelektrodkonfiguration. Vi genomförde mätningar på samma prov men med vår tvåelektrodkonfiguration. Skillnaden var att en större volym av provet engagerats vid våra mätningar. Jämförelserna visar dock att resultaten överensstämmer tillräckligt väl.

Analysmetodik

Förutom en allmän analys baserad på enkel statistik och studier av korrelationer mellan olika parametrar i plottar användes faktoranalys för identifiering av eventuella grupperingar i materialet.

Faktoranalys eller principalkomponentanalys är en metod för att analysera datamängder med flera variabler. Syftet med analysen är ofta att detektera vilka bakomliggande orsaker som finns till att variabler är mer eller mindre korrelerade med varandra. Metoden har inom geovetenskapen använts flitigt på geokemiska data och på multispektrala satellit- och flygbilder. Metoden grundar sig på att data läggs in i en multidimensionell "rymd" som spänns upp av de olika variabelaxlarna. Nya koordinat-axlar skapas sedan genom att de gamla axlarna roteras i rymden. Villkoret för de nya axlarna (principalkomponenterna) är att de ska hamna i ortogonala riktningar som är sådana att data uttryckta i de nya variablerna blir helt okorrelerade (figur 15).



Figur 15. Diagram över två variabler som är korrelerade med varandra. Om dessa räknas om till principalkomponenter hamnar den första komponenten i den riktning där datamängden har störst varians och den andra variabeln ortogonalt mot denna. Resonemanget blir likartat för fler variabler men är svårt att åskådliggöra grafiskt. När data uttrycks i de nya "variablerna" PC1 och PC2 är de okorrelerade med varandra.

Omräkning från de ursprungliga variablerna till de nya principalkomponenterna sker genom en linjärkombination. Ursprungsvärdena multipliceras alltså med faktorer och summeras. Ofta kan man relatera faktorernas storlek och tecken till någon känt samband. För petrofysiska data över magmatiska bergarter förväntar vi oss t.ex. negativ korrelation mellan densitet och gammastrålning orsakat av var på skalan surt-basiskt respektive prov befinner sig. Den komponent som har stora faktorer med motsatta tecken för densitet och gammastrålning kommer alltså att beskriva hur surt eller basiskt provet är. Eftersom de andra principalkomponenterna är okorrelerade med surhets-komponenten kommer de

förhoppningsvis att visa på helt andra fenomen som t.ex. omvandling, sprickighet, mineralisering eller bildningsmiljö.

4. ANALYSRESULTAT

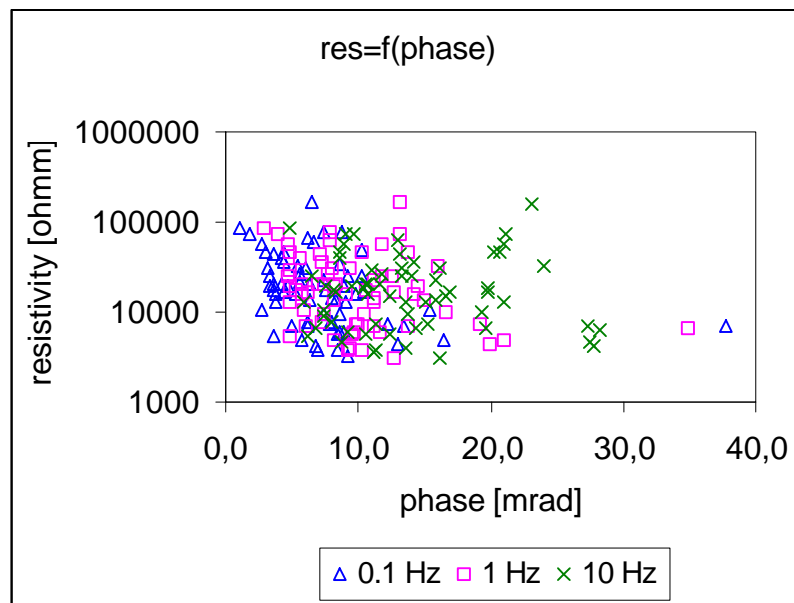
Observerade samband mellan parametervariabler

Resultaten från bestämningar av elektriska egenskaper hos provserien presenteras i Bilaga 1. För analysarbetet användes resistiviteten och fasvinkeln vid tre frekvenser 0.1, 1 och 10 Hz. Nedan följer ett antal iakttagelser som gjorts gällande sambanden mellan parametervariabler. Följande kommenteras:

- resistiviteten som funktion av fasvinkeln för hela provmaterialet
- densiteten bland prov från Skellefte- kontra Arvidsjaursgruppen visar relativt homogen medelsammansättning och spridning i de två grupperna
- resistivitet och fasvinkel för Skellefte- respektive Arvidsjaursgruppen, eventuell indikation på något högre formfaktor i Arvidsjaursgruppen
- fasvinkeln ökar mer som funktion av frekvensen i prov med hög magnetisk susceptibilitet
- en svag negativ korrelation finns mellan densitet och resistivitet vilken tolkas indikera förhöjd porositet eller mikrosprickighet bland basiska vulkaniter
- anisotropi i resistivitet
- sulfidmineral
- bestämning av Cole-Cole-parametrar

Resistiviteten som funktion av fasvinkeln för hela provmaterialet

En plottning av resistiviteten som funktion av fasvinkeln för samtliga prover för de tre frekvenserna visas i figur 16. Generellt ökar fasvinkeln med ökande frekvens.



Figur 16. Resistivitet som funktion av fasvinkel för samtliga prov vid tre frekvenser. För populationen som helhet ökar fasvinkeln vid ökande frekvens.

Densitet bland prov från Skelleftegruppen kontra Arvidsjaursgruppen visar relativt homogen medelsammansättning och spridning i de två grupperna

Medeldensiteter med standardavvikelser i de två grupperna presenteras nedan:

Skelleftegruppen $n=30$, $\text{dens}_{\text{medel}}=2693 \text{ kg/m}^3$, $\text{st.avv.}=69 \text{ kg/m}^3$
Arvidsjaursgruppen $n=33$, $\text{dens}_{\text{medel}}=2719 \text{ kg/m}^3$, $\text{st.avv.}=75 \text{ kg/m}^3$

Medeldensiteten i Arvidsjaurgruppen är alltså knappt 30 kg/m^3 högre än i Skelleftegruppen, vilket skulle kunna innebära att proven i Arvidsjaurgruppen har något mer basisk medelsammansättning om inverkan av magnetit försummas. Skillnaden är emellertid relativt liten mot bakgrund av att den normala variationen i densitet bland vulkaniska bergarter spänner över drygt 400 kg/m^3 . Iakttagelsen att medelsammansättningarna är ungefär lika i de två jämförda grupperna är viktig då man jämför skillnader i andra parametrar mellan grupperna.

Resistivitet och fasvinkel för Skelleftegruppen respektive Arvidsjaurgruppen. Indikation på något högre formfaktor c i Arvidsjaurgruppen.

En jämförelse av genomsnittsresistiviteten för samtliga prov i de två grupperna visade följande:

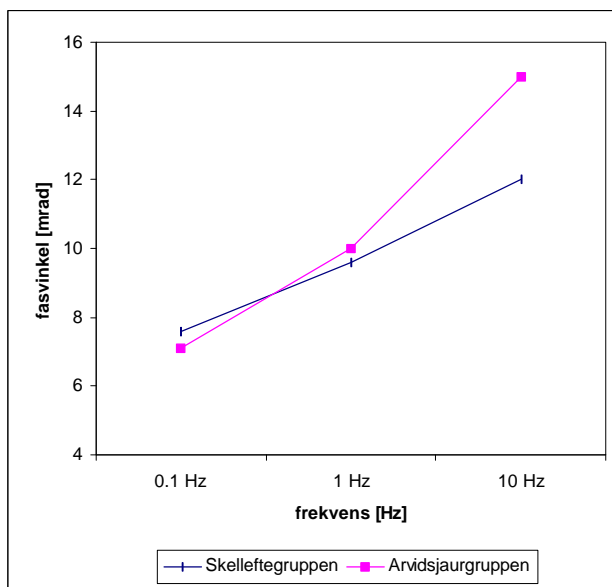
Skelleftegruppen, $n=30$ $15.3 \text{ k}\Omega\text{m} \pm 0.38$ dekader

Arvidsjaurgruppen, $n=33$ $18.8 \text{ k}\Omega\text{m} \pm 0.41$ dekader

De medelvärden som presenteras är beräknade på 10 logaritmen av resistiviteten vid 1 Hz. Skelleftegruppens resistivitet ligger något lägre även om skillnaden är relativt obetydlig. Här bör man observera kriterierna för provurvalet från Skelleftegruppen, där sulfidmineraliserade prov ej medtagits, med några få undantag. Om även sulfidmineraliserade prov och grafitförande prov skulle ha ingått då skulle resistiviteten i Skelleftegruppen varit avsevärt lägre i genomsnitt.

Beträffande medelvärden för fasvinklar för frekvenserna 0.1, 1 och 10 Hz sker en kraftigare ökning inom Arvidsjaurgruppen jämfört med Skelleftegruppen (figur 17). Fasvinkeln mer än fördubblas i den förra medan ökningen i den senare är knappt 60 %. Flera orsaker kan finnas till detta:

- Formfaktorn c är högre i Arvidsjaurgruppen. Högre formfaktor kan ha flera orsaker där bl.a. jämn kornstorlek bland polariserande mineral generellt ger högre värden på c .
- En annan möjlig och kanske troligare förklaring kan vara att det generellt högre magnetitinnehållet i Arvidsjaurgruppen påverkar fasdifferensen; detta utreds närmare nedan.

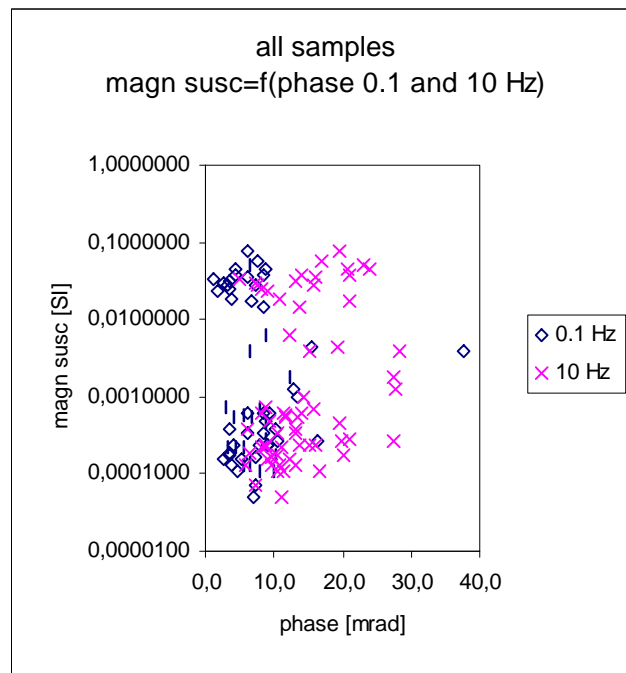


Figur 17. Medelvärdet av fasvinkel som funktion av frekvensen för de två bergartsgrupperna. Samtliga prov ingår. Fasvinkeln i Arvidsjaurgruppen ökar med drygt 110 % jämfört med knappt 60 % i Skelleftegruppen.

Fasvinkeln ökar mer som funktion av frekvensen i prov med hög magnetisk susceptibilitet

Av figur 18 framgår att fasvinkelförhöjningen från låg till hög frekvens är något större bland prov med högre magnetisk susceptibilitet. En jämförelse av förändringen presenteras nedan där det framgår att den absoluta ökningen i gruppen med hög susceptibilitet är cirka 9 mrad mot mellan 5-6 mrad i gruppen med lägre magnetisk susceptibilitet. En korrelationsanalys av differensen i fasvinkel mot magnetisk susceptibilitet visar på en korrelation av cirka 0.5, vilket är ganska lågt men ändå indikerar ett samband mellan förändring i fasvinkel och magnetitnehåll.

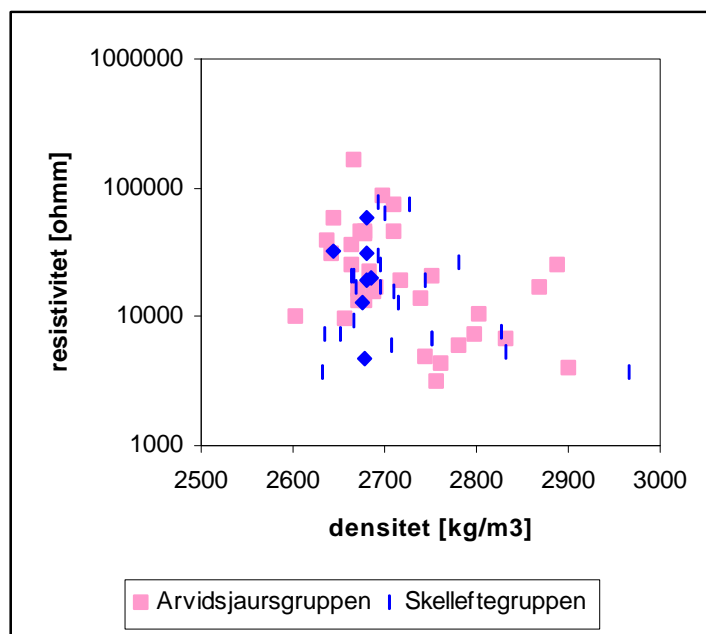
Medelvärde ± standardavv. (0,1 Hz, susc.>0,00175 SI)	6,0 ± 3,2	anm. ett högt värde borttaget
Medelvärde ± standardavv. (10 Hz, susc.>0,00175 SI)	14,9 ± 5,6	anm. ett högt värde borttaget
Medelvärde ± standardavv. (0,1 Hz, susc.<0,00175 SI)	7,2 ± 3,1	anm. ett högt värde borttaget
Medelvärde ± standardavv. (10 Hz, susc.<0,00175 SI)	12,8 ± 5,1	anm. ett högt värde borttaget



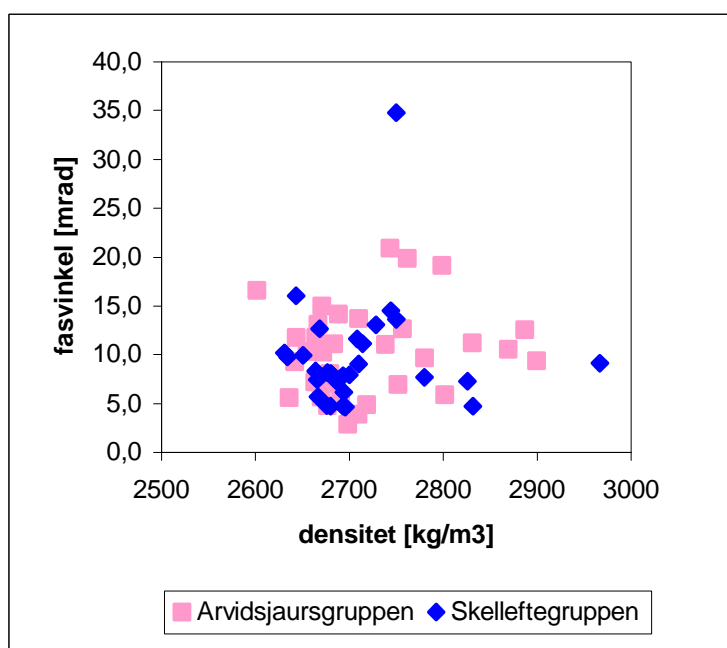
Figur 18. Den magnetiska susceptibiliteten som funktion av fasvinkel vid två olika frekvenser. Det finns en tendens till att fasvinkeln stiger mer från låg till hög frekvens i gruppen med hög magnetisk susceptibilitet.

En svag negativ korrelation mellan densitet och resistivitet tolkas indikera förhöjd porositet eller mikroprickighet bland de basiska vulkaniterna

Ett svagt samband (korrelationskoefficient -0.4) finns mellan sjunkande resistivitet och ökande densitet (figur 19). Orsaken ligger knappast i en svagt ökad vittring hos de basiska leden eftersom de lermineral som skulle kunna bli produkter av vittringsprocessen borde påverka polarisationsegenskaperna. Detta motsägs av figur 20 där korrelation mellan fasvinkel och densitet knappast existerar (korrelationskoefficient ca 0.1). Ett tilltalande alternativ blir då att porositeten bland de basiska vulkaniterna generellt är något högre än i de surare och att resistiviteten därför minskar.



Figur 19. Resistiviteten som funktion av densiteten visar att resistiviteten minskar något när kiselhalten sjunker. En möjlig förklaring är en viss ökning av porositeten i de basiska leden.



Figur 20. Fasvinkeln som funktion av densiteten visar att fasvinkeln är okorrelerad till densiteten, varför det är sannolikt att resistivetsminskningen i basiska prov orsakas av högre relativ porositet jämfört med surare led.

Anisotropin i resistivitet

Den egentliga anisotropin hos proverna kan inte bestämmas. Resistiviteten mäts visserligen i tre riktningar men dessa behöver inte sammanfalla med foliations- eller lagringsstruktur. En skenbar anisotropi λ av resistiviteten ρ kan ändå definieras som:

$$I = \sqrt{\left(\frac{\max r}{\min r}\right)} \quad (14)$$

I den geologiska kodningen har några prov urskiljts med folierad eller lagrad struktur. I samtliga dessa ligger den skenbara anisotropin i elektrisk resistivitet över genomsnittet enligt nedan:

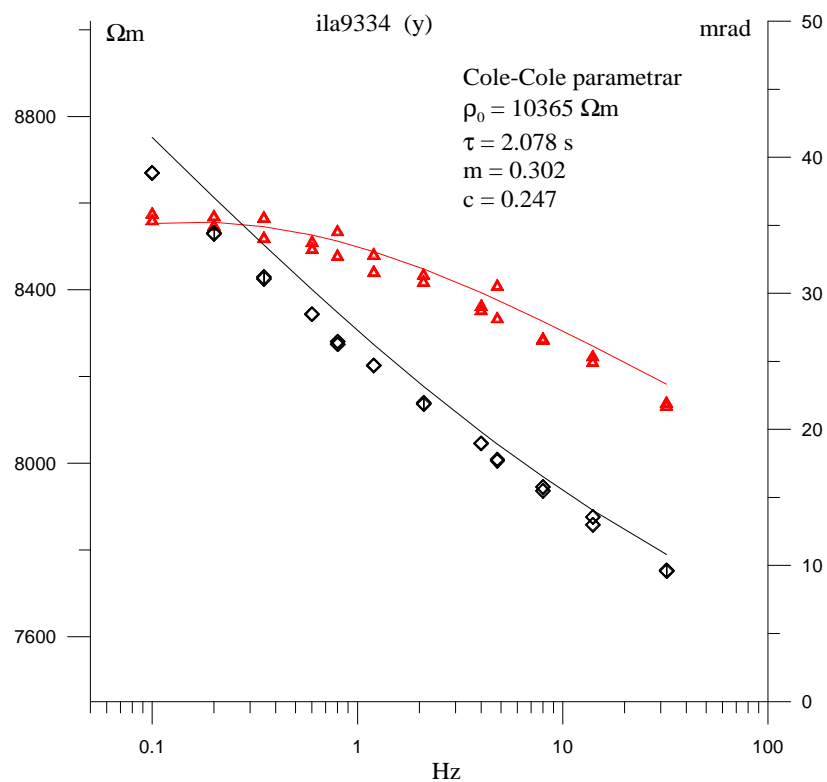
medelvärde anisotropi i grupp med kodad struktur folierad eller lagrad	1.51 ± 0.29
medelvärde resterande	1.27 ± 0.17

Sulfidmineral

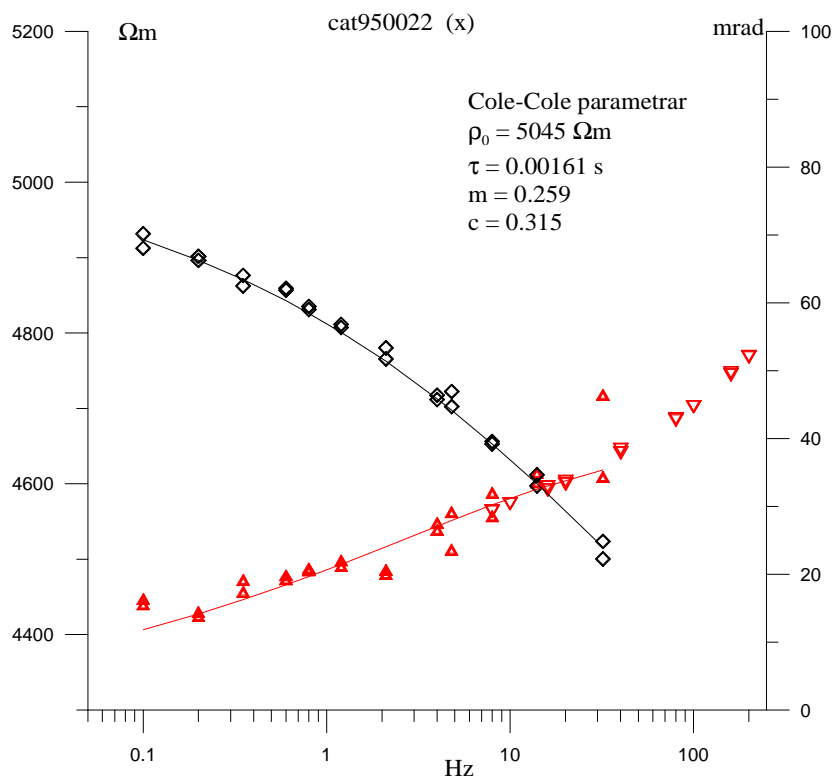
I ett fåtal prov rapporterar den geologiska kodningen förekomst av sulfidmineral. Sulfidmineralhalten hos dessa sex prov är dock för låg för att ge en signifikant förhöjning i fasvinkeln, en förhöjning som i regel uppträder vid förekomst av många vanliga sulfidmineral med halter över 0.5 vol-%.

Bestämning av Cole-Cole parametrar

Bestämning av Cole-Cole-parametrar gjordes på några prover. I figurerna 21 - 22 presenteras resultaten från två av bestämningarna där provet *ila 9334* (figur 21) kommer från Skelleftegruppen och provet *cat950022* (figur 22) från Arvidsjaurgruppen. Den höga tidskonstanten i *ila9334* är anomal i hela proverserien och tolkas höra samman med omvandling och sulfidmineral.



Figur 21. Resultat från mätning över provet ILA9334 med beräknade Cole-Cole-parametrar.



Figur 22. Resultat från mätning över provet CAT950022 med beräknade Cole-Cole-parametrar. Tidskonstanten är väsentligt mycket lägre än i ILA9334.

5. IDENTIFIERING AV GRUPPERINGAR I PARAMETERDATA

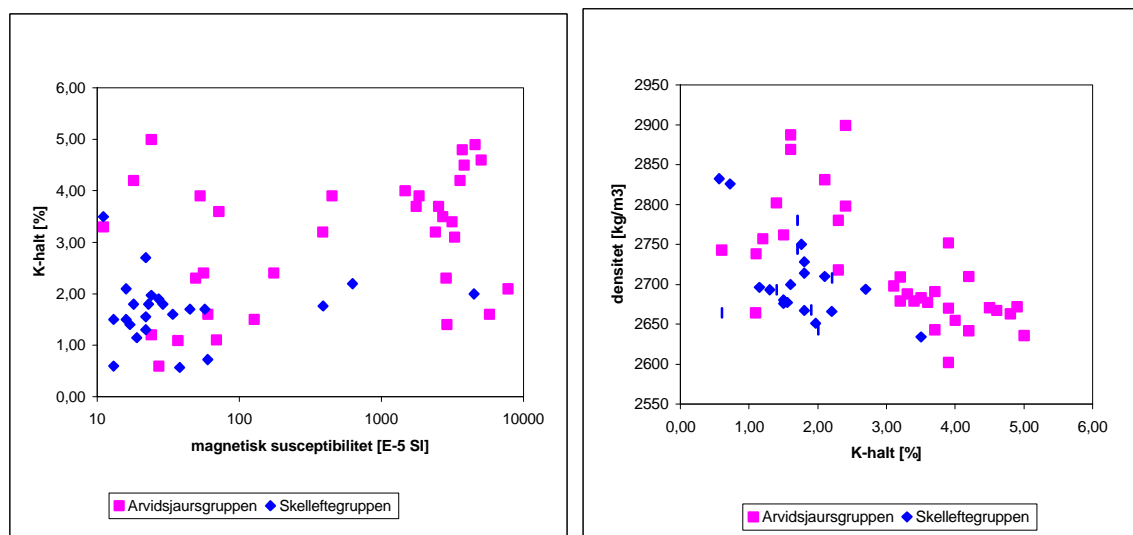
Allmänt

En av frågeställningarna som avsågs bli belyst i projektet är identifiering av eventuella skillnader i petrofysiska egenskaper hos Skelleftegruppen kontra Arvidsjaurgruppen. Under de år som arbeten har bedrivits med baskarteringen i norra delarna av Skelleftefältet har SGUs geofysiker kommit fram till en rad skillnader i petrofysiska egenskaper mellan dessa två grupper. De mest entydiga skillnaderna är enligt erfarenheten:

- generellt högre magnetitinhåll i Arvidsjaurgruppen (figur 21)
- generellt högre kalium innehåll i Arvidsjaurgruppen vid en viss silikatdensitet (figur 21)
- generellt högre uran- och toriuminhåll i Arvidsjaurgruppen vid en viss silikatdensitet

Dessa skillnader är ofta till stor hjälp i karteringsarbetet men ännu entydigare skillnader liksom skillnader i andra parametrar önskas. Orsakerna till detta är:

- Kalium-, uran och toriumhalter kan endast bestämmas på hälltytor eller på insamlad bergartsprovprov. Det går inte att använda gammastrålningsdata för att ”se” vad som finns under moränen, annat än indirekt genom att studera moränens innehåll av kalium
- kaliumhalter kan höjas eller sänkas i samband med omvandlingar, specifikt har detta rapporterats från Skelleftegruppens vulkaniter bl.a. av Antal et. al (1999)
- i basiska led är ofta både magnetit- samt kalium, uran och toriumhalterna så låga att Arvidsjaur- och Skelleftegrupperna tycks överlappa varandra



Figur 23. Skillnader i magnetit- och kaliumhalt är utpräglade mellan vulkaniter i Arvidsjaurgruppen och Skelleftegruppen.

Vidare finns annat som intresserar kartörer vid sidan av att klassificera litologin rätt. Då en stor del av karteringsverksamheten är inriktad mot att stödja prospektörer är också omvandlingsprocesser synnerligen viktiga att detektera. Exempelvis är massiva sulfidmalmer ofta kopplade till kraftiga förhöjningar i kalium enligt Shives, Ford, Charbonneau (1995). Omvandlingsprocesser som driver bildning av guldmineraliseringar medför ej sällan viss sulfidmineralanrikning, se bl.a. Corbett & Leach (1995). Bägge dessa förändringar lämpar sig väl för detektion med geofysiska metoder. Det finns en förhoppning bland geofysiker att kunna bidra till arbetet med detektering av omvandlingsprocesser just genom kombinationen av fältmätningar och laboriemätningar. I ett sådant arbete gäller det att detektera grupperingar i en multiparameterrymd – vilket dock är svårt! I detta projekt har vi gjort ett mindre försök att genom faktoranalys finna grupperingar i det stora materialet. Vi har valt att inte stödja oss mot den geologiska klassificeringen av prover för denna specifika del av analysarbetet utan nöjt oss med att kommentera resultatet i perspektivet av den geologiska klassificeringen.

Faktoranalys för identifiering av grupperingar i materialet

Vid faktoranalysen användes följande parametrar:

- kaliumhalt
- uranhalt
- toriumhalt
- magnetisk susceptibilitet (¹⁰logaritmen)
- densitet
- resistivitet
- fasvinkel

Faktoranalysen utfördes med fyra faktorer där matrisen *Factor loadings* redovisas i tabell 1.

Tabell 1 Matris över *Factor loadings* i faktoranalysen

	F1	F2	F3	F4
Densitet	-0.46	0.48	0.67	-0.07
magn susc (¹⁰ log)	0.66	0.45	0.31	-0.16
Kaliumhalt	0.88	0.07	-0.17	0.08
Uranhalt	0.92	0.17	0.06	0.12
Toriumhalt	0.94	0.12	-0.08	0.12
Resistivitet	0.50	-0.47	0.20	-0.69
Fasvinkel	-0.29	0.62	-0.59	-0.42

F1

Prover som erhåller de högsta positiva principalkomponentvärdena (PC-värdena) i F1 utmärks av:

1. relativt låg densitet
2. relativt hög magnetisk susceptibilitet
3. höga K-, U- och Th-halter
4. måttligt hög resistivitet
5. låg fasvinkel

Prover med de mest extrema negativa PC-värdena har egenskaper som är diametralt motsatta mot de ovan uppräknade. En tolkning blir att prov med höga positiva värden sannolikt utgörs av sura vulkaniter i Arvidsjaurgruppen, medan prov med starkt negativa värden tillhör basiska bergarter möjligen med tyngdpunkten förskjutet mot Skelleftegruppen.

Tre prov med de högsta positiva PC-värdena är:

Cat980138, Cat950009, Cat950081

Tre prov med de mest extrema negativa PC-värdena är:

Mlu95503, Cat950002, Ila95530

Kommentar:

Cat980138 är en ryodacit i Arvidsjaurgruppen. *Cat950009* och *Cat950081* är bägge typiska ryoliter i Arvidsjaurgruppen. *Cat950002* är en intermediär vulkanit med ovanligt låg magnetisering och kaliumhalt för att tillhöra Arvidsjaurgruppen, där den anses höra hemma idag. *Mlu95503* har egenskaper som skulle kunna vara typiska för basiska vulkaniter i Skelleftegruppen med bl.a. extremt lågt kaliuminnehåll, den anses idag också höra till denna grupp. Studium av hur den av geolog utförda klassificeringen mellan Skellefte- kontra Arvidsjaurgruppen utfaller bland prov med de åtta högsta respektive åtta lägsta PC-värdena visar att vulkaniter i Arvidsjaurgruppen besätter alla platser bland de positiva. Bland negativa besätts tre platser av Arvidsjaurvulkaniter och fem av Skelleftevulkaniter.

F2

Prover som erhåller de högsta positiva PC-värdena i F2 utmärks av:

1. måttligt hög densitet
2. måttlig till hög magnetisk susceptibilitet
3. låg resistivitet
4. relativt hög fasvinkel

Prover med de mest extrema negativa PC-värdena har egenskaper som är diametralt motsatta mot de ovan uppräknade. Bland prover med de högsta positiva PC-värdena torde intermediära till basiska vulkaniter i Arvidsjaurgruppen återfinnas, varav en del med möjlig sulfidrelaterad omvandling. Intermediära – basiska vulkaniter som varit utsatta för tektonik som ökat porositet eller enbart vittringspåverkan torde också återfinnas bland proven med de mest positiva värdena. I gruppen med de mest extrema negativa PC-värdena torde surare vulkaniter fattiga på omvandling och vittring återfinnas, främst Skelleftegruppens.

Tre prov med de högsta positiva PC-värdena är:

Ila9334, Cat950030, Cat950016

Tre prov med de mest extrema negativa PC-värdena är:

Ila95125, Cat950081, Jsn950107

Kommentarer: *Ila9334* är ett omvandlad och sulfidförande prov hörande till Skelleftegruppen. *Cat950030* är en basisk vulkanit som enligt fältobservationer innehöll kis såväl i form av fin impregnation som i form av enstaka sliror. *Jsn950107* anses tillhöra Skelleftegruppen och är en sur vulkanit

(klassificerad som ryolit). Studium av hur den av geolog utförda klassificeringen mellan Skellefte- kontra Arvidsjaurgruppen utfaller bland prov med de åtta högsta respektive åtta lägsta PC-värdena visar att vulkaniter i Arvidsjaurgruppen besätter alla platser utom en bland de positiva. Bland negativa besätts sju platser av Skelleftevulkaniter. Denna faktor tycks alltså vara utslagsgivande vad beträffar provets bildningsmiljö om man förutsätter att den geologiska kodningen är riktig.

F3

Prover som erhåller de högsta positiva PC-värdena i F3 utmärks av:

1. relativt hög densitet
2. relativt låg fasvinkel

Prover med de mest extrema negativa PC-värdena har egenskaper som är diametralt motsatta mot de ovan uppräknade. Här skiljs inte tillhörighet bland de två bergartsgrupperna ut.

Tre prov med de högsta positiva PC-värdena är:

Cat950030, Cat950029, Cat950016

Tre prov med de mest extrema negativa PC-värdena är:

Ila 9334, Jsn950028, Ila95123

Kommentarer:

Cat950016, 29 och 30 är samtliga typiska basiska vulkaniter i Arvidsjaursserien. Studium av hur den av geolog utförda klassificeringen mellan Skellefte- kontra Arvidsjaurgruppen utfaller bland prov med de åtta högsta respektive åtta lägsta värdena visar att vulkaniterna i Arvidsjaurgruppen respektive Skelleftegruppen besätter ungefär lika många platser bland såväl positiva som negativa extremvärden.

F4

Prover som erhåller de högsta positiva PC-värdena i F1 utmärks av:

1. låg -måttlig resistivitet
2. relativt låg fasvinkel

Prover med de mest extrema negativa PC-värdena har egenskaper som är diametralt motsatta mot de ovan uppräknade. I gruppen med de mest positiva PC-värdena torde relativt porösa eller uppspruckna bergarter återfinnas, dock utan nämnvärd leromvandling. I gruppen med de mest extrema negativa PC-värdena återfinns den effekt som sammanhänger med att hög resistivitet i matrix tvingar in en stor del av den polariserande strömmen genom de få polariserbara volymerna som finns i provet. Denna grupp är relativt ointressant vad beträffar litologi men ger möjligen indikationer om på spröd tektonik eller sprickighet inducerad av provberedning.

Tre prov med de högsta positiva PC-värdena är:

Cat970009, Cat980138, Jsn950035

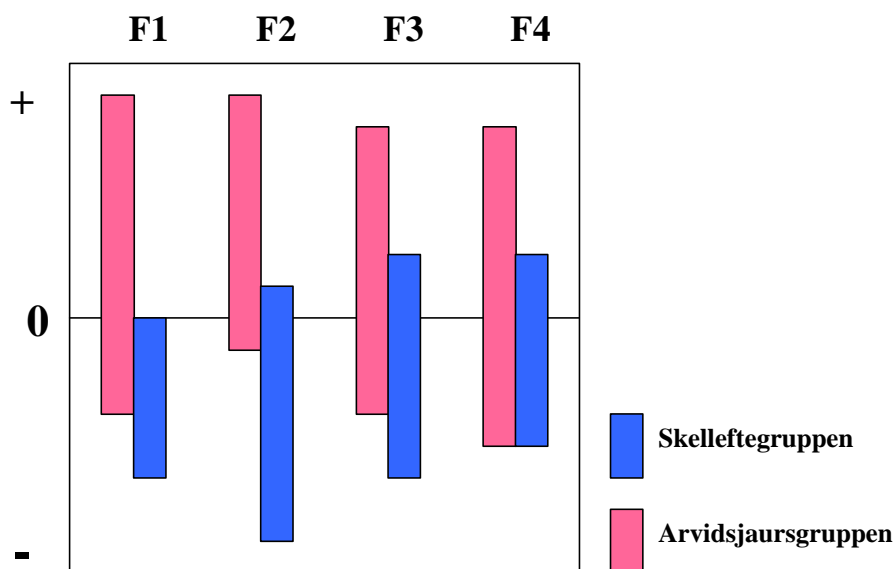
Tre prov med de mest extrema negativa PC-värdena är:

Cat950081, Ila9334, Mlu95120

Kommentarer: Studium av hur den av geolog utförda klassificeringen mellan Skellefte- kontra Arvidsjaurgruppen utfaller bland prov med de åtta högsta respektive åtta lägsta PC-värdena visar att vulkaniterna i Arvidsjaurgruppen respektive Skelleftegruppen besätter ungefär lika många platser bland såväl positiva som negativa extremvärden.

Generella kommentarer

Ovan demonstreras resultat av faktoranalysen med kommentarer om en liten del av materialet. Faktorerna 1 och 2 tolkas innehålla information om framförallt litologi och till viss del omvandling. Om den geologiska klassificeringen betraktas som riktig visar diagrammet i figur 22 att framförallt faktor F2 innehåller information om gruppstillhörighet. Faktorerna 3 och 4 tillför dock ingen väsentlig information för att skilja Skellefte- kontra Arvidsjaurvulkaniter från varandra.



Figur 24. Diagrammet visar gruppstillhörighet hos de åtta prov med de högsta respektive lägsta PC-värdena i varje faktorgrupp. Av diagrammet framgår att främst F2 men i viss mån även F1 kan användas för att särskilja Skelleftevulkaniter från Arvidsjaurvulkaniter.

Vad gäller faktoranalysen kan man diskutera vilka parametrar som bör ingå. Exempelvis ger kalium, uran och toriumhalterna ungefär samma upplysning varför möjligen endast en av dessa skulle användas. Vidare har påvisats viss koppling mellan Arvidsjaurgruppens vulkaniter och en förhöjd differens i fasvinkel mellan 10 Hz och 0.1 Hz, kanske skulle därför differensen ingått som en av parametrarna.

6. SLUTSATSER

Ett litet material omfattande drygt 60 prov från norra delarna av det s.k. Skelleftefältet har undersökts med avseende på de elektriska egenskaperna. Resultaten har kommenterats med avseende på litologi och påverkan av tektonik och omvandlingar. Försök till att finna grupperingar i materialet har genomförts med hjälp av modern analysteknik. Därvid har minst en faktor identifierats som tycks innehålla information som indikerar ett provs möjliga hemvist i Skellefte- eller Arvidsjaurgruppen.

Det är känt sedan tidigare att Skelleftegruppens vulkaniter uppvisar höga polariserbarheter på grund av ökat sulfidmineralinnehåll. Dessa bergvolymers anses inte vara någon svårighet att detektera med exempelvis inducerad polarisation och har därför inte ingått i studien. Urvalet koncentrerades istället på icke mineraliserade prov från Skelleftegruppen och ställde dessa mot Arvidsjaurgruppen som helhet. Resultatet visar att Arvidsjaurgruppen generellt uppvisar högre fasvinklar än Skelleftegruppen.

Om även sulfidmineraliserade och grafitförande prov från Skelleftegruppen skulle ha ingått skulle dessa ha fallit ut som en egen grupp. Det finns mycket som talar för att spektral IP, tillsammans med andra petrofysiska egenskaper, kan vara diagnostiska diskriminatorer mellan Skellefte- och Arvidsjaurgrupperna.

Systematisk undersökning av de elektriska egenskaperna hos material som provtogs för parameterbestämningar skulle helt säkert ge viktig information för exempelvis baskartering.

Som ett indirekt resultat av projektet finns nu en utrustning i Sverige för bestämning av elektriska egenskaper i frekvensdomän. Utrustningen, mät- och beräkningsrutinerna ger säkra värden för de eftersökta parametrarna i frekvensintervallet 0.1 Hz till drygt 100 Hz. Instrumentering för fältmätningar finns tillgänglig kommersiellt. Mätteknik och analysteknik har utvecklats inom andra SGU-finansierade projekt, Thunehed (1999) samt för SKB (Eriksson et al. 1998).

Förutsättningar finns nu för att inleda systematiska undersökningar av geoelektriska egenskaper i såväl fält som laboratorium och föreslås härmed påbörjas.

10. LITTERATUR

- Antal, I., Bergström, U., Billström, K., Björk, L., Daniels, J., Eliasson, T., Kathol, B., Kero, L., Kumpulainen, R., Lundström, I., Mellqvist, C., Sträng, T., Stölen, L.K., Triumph, C.-A., Weihed, P., Wikström, A., 1999: Synteskartor över Skelleftefältet. I C.-H. Wahlgren (red.): *Regional berggrundsgeologisk undersökning – sammanfattning av pågående undersökningar 1998*, 123 - 141. *Sveriges Geologiska Undersökning Rapport* och meddelanden nr 98.
- Archie, G. E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: *Trans. Am. Inst. Min., Metallurg., Petr.Eng.*, **146**, 54-62.
- Cole, K.S., Cole, R.H., 1941: Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current fields. *J. Chem. Phys.*, **9**, 341.
- Corbett, G.J., Leach, T.M., 1995: SW Pacific Gold-Copper Systems. Structure, Alteration and Mineralisation. *Workshop manual from the Pacrim Conference Auckland, New Zealand, 23-24 November, 1995*.
- Eriksson, L., Johansson, R., Thunehed, H., Triumph, C.-A., 1997: Metodtester ytgeofysik 1996. Bestämning av berggrundens bulkresistivitet och djupet till salint grundvatten med halvregional resistivetsmätning, elektrisk sondering samt transient elektromagnetisk sondering. *SKB Projekt Rapport PR D-98-01*.
- Hallof, P.G., Cartwright, P.A., Pelton, W.H., 1979: The use of the Phoenix IPV-2 Phase IP Receiver for Discrimination between Sulphides and Graphite. *Presented at SEG Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, November 4-8, 1979*.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1977: Electrical Methods in Geophysical Prospecting. *International Series in Electromagnetic Waves. Vol. 10. Pergamon Press. Third Edition*.
- Luo, Y., Zhang, G., 1998: Theory and Application of Spectral Induced Polarization. *Geophysical Monograph Series, Number 8. Society of Exploration Geophysicists*.
- Olsson, O., Falk, L., Forslund, O., Lundmark, L., Sandberg, E., 1987: Crosshole Investigations - Results from Borehole Radar Investigations. *Stripa Project Technical Report No: 87-11*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Parasnis, D.S., 1997: Principles of Applied Geophysics. *Chapman and Hall, London. 5th Edition*.
- Pelton, W. H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R., Nelson, P.H., 1978: Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency IP. *Geophysics*, **43**, 588-609.
- Sen, P. N., Scala, C., Cohen, M. H., 1981, A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beds. *Geophysics*, **46**, 781-795.
- Shives, R.B.K., Ford, K.L., Charbonneau, B.W., 1995: Applications of Gamma Ray Spectrometric/Magnetic/VLF_EM Surveys. *Workshop Manual, Geological Survey of Canada*.
- Sumner, J.S., 1976: Principles of induced polarisation for geophysical exploration. *Developments in Economic Geology, 5. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford - New York*.
- Thunehed, H., 1999: Semiregionala elektriska mätningar. Avdelningen för Tillämpad Geofysik, Luleå Tekniska Universitet.

Bilaga 1 Basdata
6 sidor