

3D-modellering av IP och resistivitet vid Grängsbo



Lena Persson, Virginie Leroux & Mehrdad Bastani

www.sgu.se

SGU-rapport 2026:04

Författare: Lena Persson, Virginie Leroux & Mehrdad Bastani
Granskad av: Cecilia Brolin
Ansvarig enhetschef: Mats Wedmark
Redaktör: Lina Rönnåsen

Omslagsbild: Mätområdet vid Grängsbo.
Fotograf: Julia Fridlund

April 2026

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

Innehåll

Sammanfattning	4
Inledning	5
Mätssystemet	6
Datainsamling	9
Förberedelser	9
Fältarbete	10
Databearbetning och modellering	11
Resultat	13
Inversion av enbart resistivitetsdata	13
Kombinerad inversion av IP- och resistivitetsdata	14
Jämförelse med andra data/modeller	15
Slutsatser och rekommendationer	17
Tack	18
Referenser	18

Sammanfattning

Sveriges geologiska undersökning (SGU) har fått i uppdrag av regeringen att under 2024–2026 förstärka arbetet med kartläggning av malmpotentiella områden (KN2024/00164). Denna rapport beskriver det arbete som under 2024 genomfördes som en del av metodutvecklingen inom regeringsuppdraget. Syftet med arbetet var att utvärdera en relativt ny metod där man genom resistivitets- och IP-mätningar (inducerad polarisation) kan utföra 3D-kartläggning av mineraliseringar på djupet. Möjligheten att kartlägga i 3D är viktig för att öka kunskapen om berggrunden och om mineralförekomster, vilket i förlängningen kan vara avgörande för en effektiv prospektering efter nya fyndigheter.

Inom projektet utfördes en fullskalig 3D-mätning och för ändamålet hyrde SGU ett mätsystem från Iris instruments i Frankrike. För mätningarna valdes ett område vid Grängsbo, ca 5 km sydost om Edsbyn. Platsen valdes eftersom området har en tidigare känd sulfidmineralisering och för att det fanns tidigare geofysiska markundersökningar och borrhningar som visade på förutsättningar för att resistivitets- och IP-mätningar skulle kunna lyckas. Dessutom ingår området omkring Grängsbo i en pågående kartläggning av malmpotentiella områden.

Utifrån mätresultaten togs olika 3D-modeller fram. En togs fram från enbart resistivitetsdata och visar en 50 till 100 m bred lågresistiv struktur som sträcker sig ca 800 m i sydvästlig till nordostlig riktning ned till ett djup av ca 200 till 300 m under markytan. Resultatet överensstämmer väl med andra geofysiska data från området och den lågresistiva zonen sammanfaller även med de ytnära sulfidförekomsterna i området. Resultatet indikerar att mineraliseringarna fortsätter längre mot sydväst än vad som tidigare har varit känt.

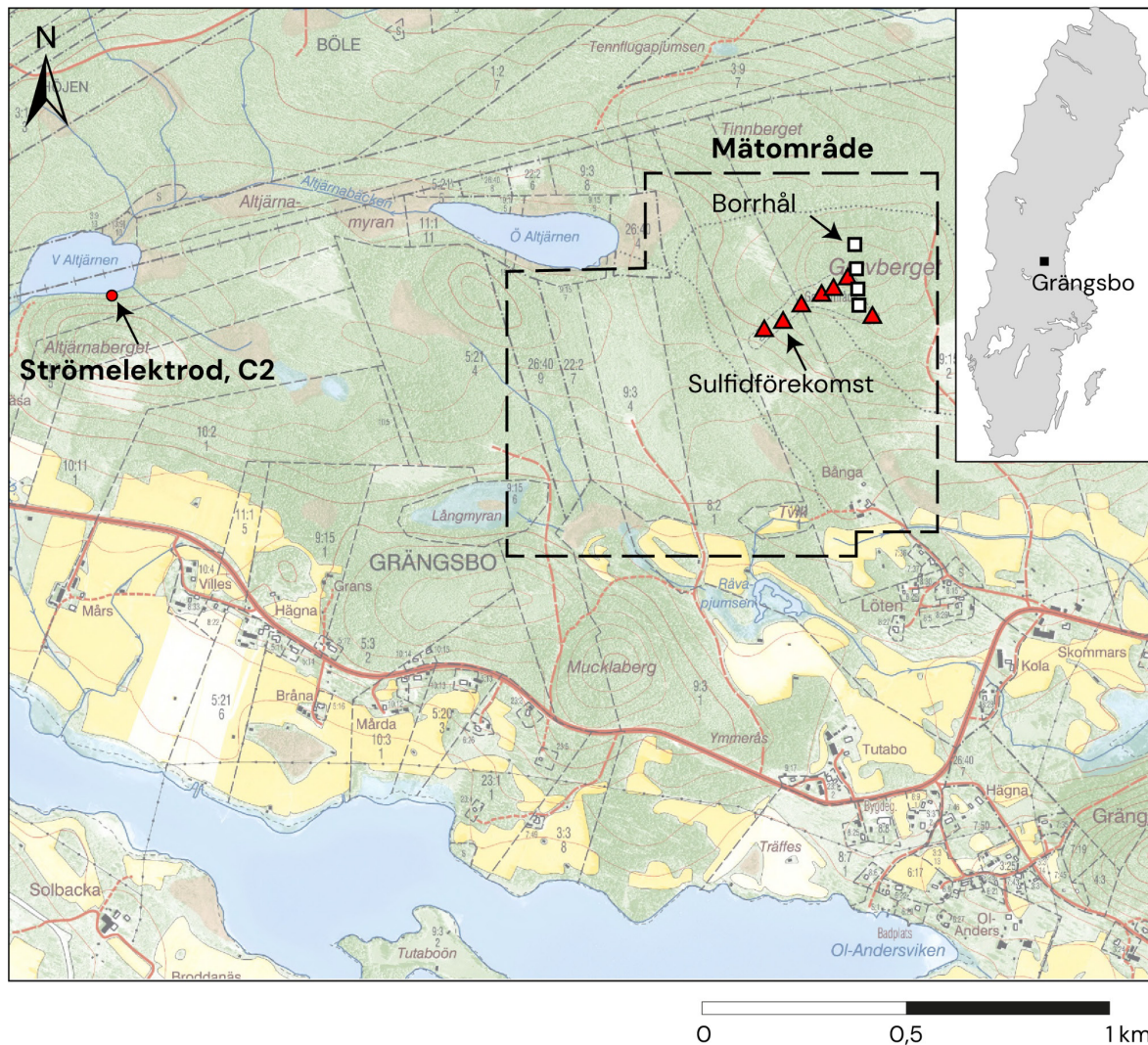
För modellerna som baserades på både IP-data och resistivitetsdata var det svårare att erhålla en bra anpassning till uppmätta data. Modellen som visar markens laddningsbarhet är dessutom något svårtolkad. Den visar förhöjd laddningsbarhet i den norra delen av området, vilket inte sammanfaller med läget för sulfidförekomsterna på ytan men däremot följer den sydvästliga–nordostliga trenden som observerats i andra mätningar och i förekomsterna på ytan.

En slutsats är att denna metodik och mätsystem är mycket användbar för kartläggning av sulfidmineraliseringar på större djup. Fältinsatsen är tidskrävande och personalintensiv, men fördelen är att man erhåller en detaljerad 3D-modell över markens elektriska egenskaper. En rekommendation för framtiden är att testa andra programvaror för 3D-modelleringen än de som använts i detta projekt.

Inledning

Under september 2024 utförde Sveriges geologiska undersökning (SGU) resistivitets- och IP-mätningar (IP = inducerad polarisation) i ett område vid Grängsbo, ca 5 km sydost om Edsbyn i Ovanåkers kommun (fig. 1). Arbetet utfördes som en del av metodutvecklingen inom regeringsuppdraget *Kartläggning av malmpotentiella områden*. Inför mätningen hyrde SGU avancerad mätutrustning från den franska tillverkaren, Iris Instruments. Syftet med mätningen var att bestämma markens elektriska egenskaper, men framför allt att testa och utvärdera metoden och specifikt den typ av instrument som vi använde.

Fördelen med detta mätsystem jämfört med andra liknande mätsystem är att mottagarna är fysiskt fristående från varandra. Tidssynkronisering mellan mottagarna sker med hjälp av GPS. På så sätt minimerar man kabelutlägg och mottagarna kan enkelt placeras ut i ett rutnät. Långa kabelutlägg kan orsaka betydande störningar på IP-mätningar och de är även tunga att hantera i fält. Detta mätsystem gör det möjligt att göra undersökningar i 3D ned till stora djup, flera hundra meter till en kilometer har rapporterats i litteratur (se tex Kim m.fl. 2025 och Nind m.fl. 2023), och att erhålla en 3D-modell över markens elektriska egenskaper.



Figur 1. Mätområdet vid Grängsbo, markerad med svart streckad linje.

Resistivitets- och IP-mätningar tillämpas särskilt inom mineralprospektering. Med hjälp av kompletterande petrofysiska mätningar på bergartsprov kan IP-responsen i vissa fall relateras till kvantitativt metallinnehåll och man har sedan länge undersökt möjligheten att även karaktärisera fyndigheter kvalitativt, det vill säga typ av mineralisering (Revil m.fl. 2022). Metoden är dock relativt kostsam på grund av tidskrävande fältinsatser och möjligheten att göra djupa 3D-mätningar är relativt ny.

Vid Grängsbo har man brutit koppar och guld ytligt redan på 1600-talet (Claesson m.fl. 1986). Vad som finns på större djup är fortfarande okänt. Platsen valdes för att området ingår i en pågående kartläggning av malmpotentiella områden, dessutom finns det fyra borrhningar samt detaljerade geofysiska markmätningar (slingram) i området utförda på 1980-talet (Persson & Thelander 1982, Claesson m.fl. 1986). Petrofysiska mätningar utförda på borrhkärnorna visade hög IP-effekt och låg resistivitet inom de mineraliserade zonerna (Claesson m.fl. 1986).

I denna rapport beskriver vi erfarenheter från själva mätförloppet, instrumentering samt bearbetning och modellering av data. Ytterligare tolkningar från mätningen med koppling till områdets geologi kommer att redovisas i en kommande SGU-rapport över kartläggningen i Grängsbo med planerad publicering 2026.

Mätsystemet

Principen för resistivitets- och IP-mätningar är att man skickar ström i marken mellan två strömelektroder (C1 och C2) och mäter responsen mellan ett stort antal par av potential-elektroder (P1 och P2). För så kallad tidsdomän-IP mäter man hur den elektriska potentialen avtar efter att man har brutit strömmen, generellt under några sekunder. IP-responsen anges i laddningsbarhet (eng. *chargeability*) med enheten mV/V. Den elektriska potential som utgör IP-responsen är betydligt mindre (ca 10 till 1 000 gånger mindre) än den som utgör resistivitets-responsen.

Det vedertagna sättet att mäta resistivitet och IP är att använda sig av multielektrodsystem, där man sätter ut ett stort antal elektroder längs en linje som alla är kopplade till en central enhet via en multiledarkabel. Den centrala enheten innefattar oftast både strömsändare (generator) och potentialmätare (mottagare). Med sådana system är det svårt att erhålla både stor djupkänning och bra datakvalité för IP-mätningar, och även i vissa fall för resistivitetsmätningar.

Den maximala djupkänningen begränsas av kabellängden och markens ledningsförmåga vilket, för en kabellängd på 400 m ger en djupkänning på ca 70 m till 100 m. För djupare undersökningar (till exempel 300 m till 1000 m) där syftet är mineralprospektering, behövs en annan typ av utrustning eftersom det inte blir praktiskt hanterbart med mycket långa kabelutlägg (se t.ex. Loke 2024). Med både stora elektrodavstånd och långa kablar ökar även storleken på störningar i IP-mätningar. För att kunna nå större djup krävs mätbara signaler även för långa elektrodavstånd, vilket fordrar en kraftig strömsändare. Ofta använder man 1 till 10 A i sådana tillämpningar, ibland ännu högre.

Vid undersökningen i Grängsbo använde vi ett mätsystem från Iris instruments som går under benämning R-DAS (eng. *Resistivity Distributed Automated System*). I systemet är sändar- och mottagardel helt åtskilda och oberoende från varandra. De uppmätta signalerna synkroniseras i efterhand med hjälp av GPS-signalen. Vi använde en strömsändare av modell TIPIX 3000 (fig. 2) som drivs av en bensindriven generator (fig. 3). Denna sändare har en valbar pulslängd från 0,5 upp till 8 s och maximal utsänd ström på 13 A. Dessutom krävs ett instrument (I-FullWaver) för noggrann loggning (100 Hz) av utsänd ström samt för att korrelera och synkronisera strömsignalen med uppmätt potential från mottagarenheterna (fig. 2).



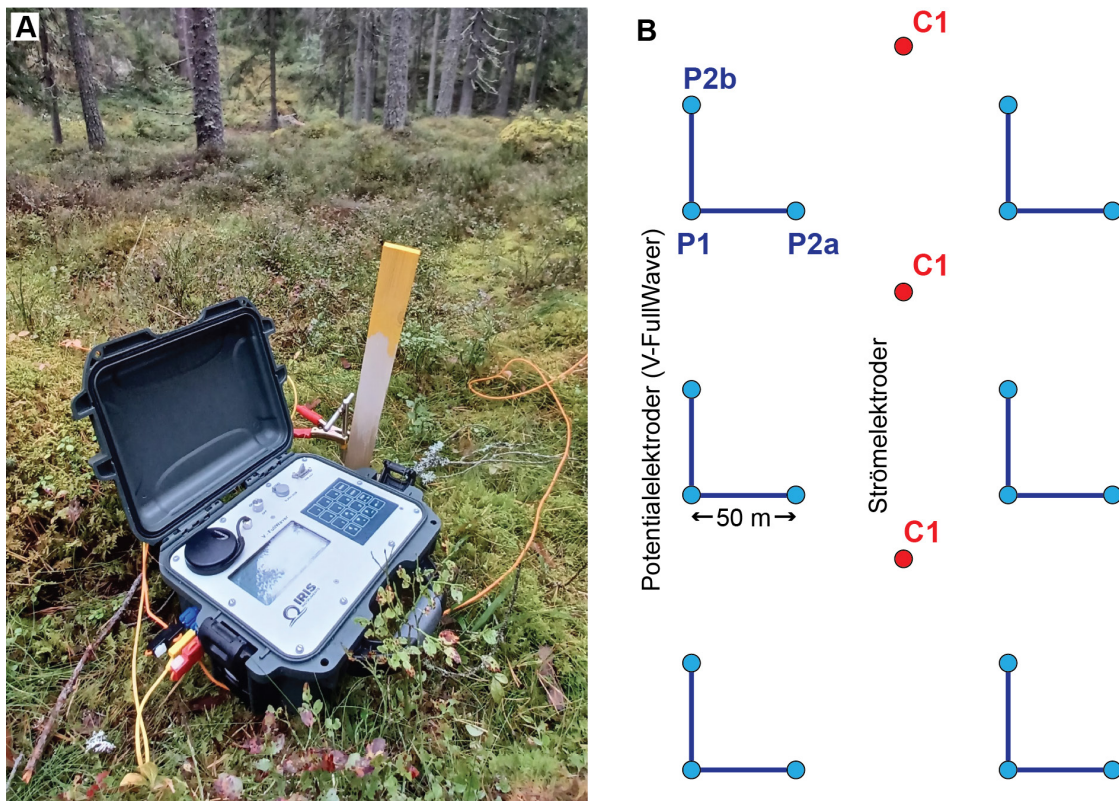
Figur 2. Sändarenhet TIPIX 3000 till vänster och I-Fullwaver till höger i bilden. Båda från Iris Instruments. Foto Mehrdad Bastani.



Figur 3. Generator som används för att driva sändaren TIPPIX 3000. Med på bilden Sajad Zarei, Johan Söderman och Fabrice Vermeersch. Foto: Mehrdad Bastani.

Varje mottagarenhet (V-FullWaver) är fristående med eget batteri, datainsamling och GPS (fig. 4A). Till varje V-Fullwaver kopplas tre elektroder som bildar två vinkelräta dipoler (fig. 4B). Vi använde en dipollängd på 50 m. Potentialen uppmäts i två vinkelräta riktningar; P1–P2a och P1–P2b i figur 4B (så kallad *vector array* konfiguration). Denna konfiguration säkrar att åtminstone en av dipolerna (eller de båda kombinerade) mäter en tillräckligt stark potentialskillnad oavsett var strömelektroden befinner sig.

Vid mätningen använde vi mätkonfigurationen pol-dipol, vilket innebär att en av strömelektrodena (C2) placeras på ett mycket stort avstånd från själva mätområdet. Denna konfiguration ger en större djupkänning. Dessutom blir det mycket enklare att hantera i fält eftersom man endast behöver flytta den ena elektroden (C1) under mätning (fig. 4B). Vi använde enbart stålelektroder vid mätningen, både som ström- och potentialelektroder. Totalt hade vi 20 mottagarenheter (V-FullWavers) som registrerade potentialen i två riktningar för varje ströminjektion.



Figur 4. A. Mottagarenhet; V-FullWaver från Iris instruments. Foto: Fabrice Vermeersch. **B.** Exempel på mätning med *vector array* och pol-dipol konfiguration. Strömelektroden (C1) flyttas mellan varje mätning/ströminjektion medan potentialelektrodena är fasta. Den andra strömelektroden (C2) är placerad på mycket stort avstånd (∞). Foto: Fabrice Vermeersch.

Datainsamling

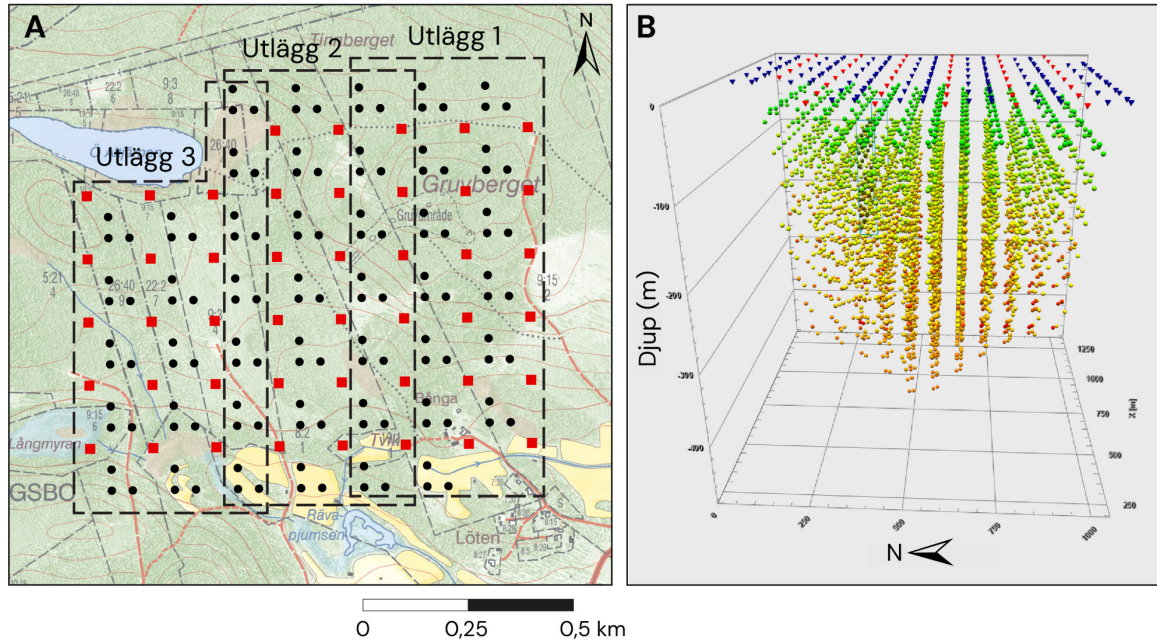
Förberedelser

Under våren 2024 gjorde vi rekognoscering i fält samt VLF-mätningar med instrumentet Wadi (ABEM) längs utvalda markprofiler. Utifrån resultaten från både fältbesök och tidigare utförda geofysiska mätningar avgränsade vi det geografiska mätområdet och planerade placeringen av mätdipoler och strömelektroder. Antalet mätdipoler var begränsat till de 20 V-FullWaver som vi hade hyrt och därför delade vi upp den totala uppsättningen i tre utlägg som delvis överlappade varandra (fig. 5).

Som hjälp vid planeringen av mätpunkter använde vi programvaran FullWave Designer från Iris instruments. Genom att lägga in koordinater för strömelektroder (injektionspunkter) och mätdipoler är det möjligt att få en ungefärlig uppskattning av undersökt volym och framför allt djupkänningen inom undersökningsområdet (fig. 5).

Det undersökta området täcker en yta på ca 1×1 km och är mestadels täckt av skog. Avståndet mellan varje mätdipol (V-Fullwaver) sattes till 150 m. Injektionspunkterna satte vi mitt emellan linjerna med mätdipoler, också med 150 m intervall (fig. 5).

Fjärrelektrodens slutgiltiga placering bestämdes när fältarbetet startade. Den behöver vara tillräckligt långt borta och kräver därför en viss kabellängd. Strömsändarutrustning och generator placerades vid en väg där man kan parkera och vistas en längre tid.



Figur 5. A. Planerade mätpunkter vid Grängsbo. Svarta punkter visar lägen för potenzialelektroder och röda fyrkanter visar lägen för strömelektroder. **B.** 3D-bild från programvaran FullWave Designer som visar teoretisk djupkänning inom undersökningsområdet.

Fältarbete

Fältarbetet utfördes under nio dagar från den andra till den tionde september 2024. Dag ett och nio var till största delen resdagar varför själva datainsamlingen utfördes under totalt sju dagar. Fabrice Vermeerch från Iris Instruments var med de tre första dagarna som instruktör. Totalt deltog sju personer från SGU i fältarbetet (Elis Uebel, Johan Söderman, Julia Fridlund, Mehrdad Bastani, Robert Berggren, Sajad Zarej och Virginie Leroux) varav sex av dessa stannade under hela fältperioden.

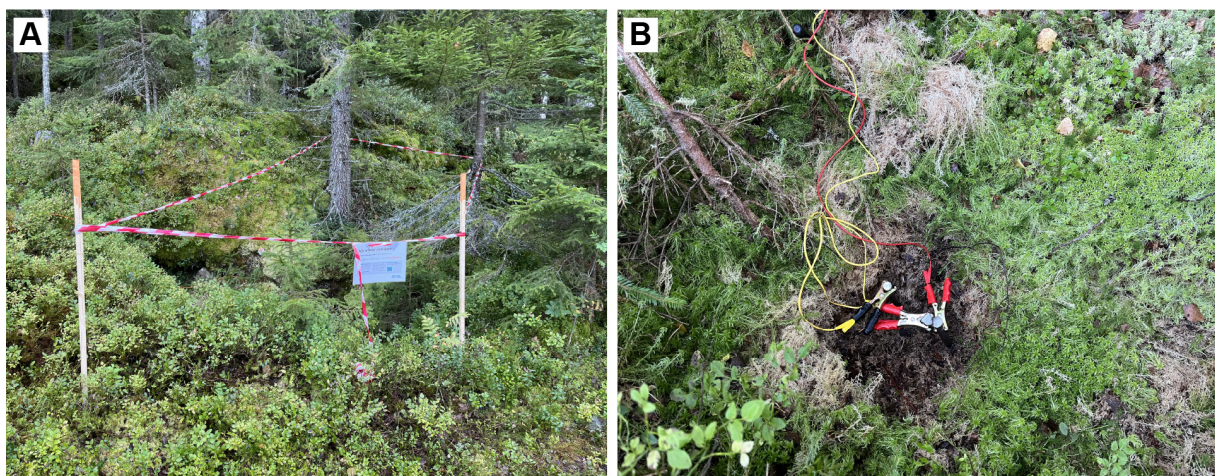
Mätningen följde i stort sett planen från figur 5. Några potenzialelektroder som låg på åkermark fick plockas bort i den sydligaste delen av området. Under första fältdagen installerades fjärrelektroden C2, på ett avstånd av ca 1,5 km från mätområdet (fig. 1). Denna flyttades vid två tillfällen något längre västerut för att bibehålla avståndet på 1,5 km när hela utlägget flyttades västerut (fig. 1 och 5).

Varje utlägg kunde utföras inom ca 2 dagar och tidsåtgången per injektionspunkt var ca 30 min i slutet av fältperioden. Alla V-FullWaver-enheterna (samt sändare och generator) plockades in varje kväll för nedladdning av data och laddning, medan de elektroder och kablar som skulle användas nästkommande dag lämnades kvar på sina platser. Koordinaterna för samtliga ström- och potenzialelektroder mättes in med GPS (GNSS).

Fjärrelektroden, C2 placerades på fuktiga ställen för att optimera dess elektriska kontakt. Kontaktresistansen var större och varierande vid den mobila strömelektroden, C1. För att minska kontaktresistansen och öka den maximala strömstyrkan använde vi upp till 6 stålektroder vid både fjärrelektrod och den mobila elektroden. Vi vattnade även med saltvatten vid den mobila elektroden. Av säkerhetsskäl hade vi alltid en person som vaktade vid fjärrelektroden, och kommunicerade med alla i fält innan vi skickade ut ström.

Kontaktresistansen var även hög vid mätdipolerna på grund av markens höga resistivitet (torr morän). Utskickad ström varierade mellan 0,5 och 1,5 A. Vi använde så kallad 50 % *duty cycle* d.v.s strömmen skickas först ut i positiv riktning under två sekunder sedan slås strömmen av under två sekunder för att sedan skickas ut i negativ riktning under två sekunder och återigen slås av under två sekunder (fig. 7A). Varje mätcykel varade alltså i åtta sekunder och I-FullWave-enheten registrerade totalt under 5 minuter då sändaren skickade ut ström vilket motsvarar ca 40 stacks.

Vi noterade ibland höga bakgrunds nivåer på uppmätt potential d.v.s. självpotential (SP) vid mätstationerna som också varierade tydligt med tiden. De nådde i vissa fall upp till över 200 mV.

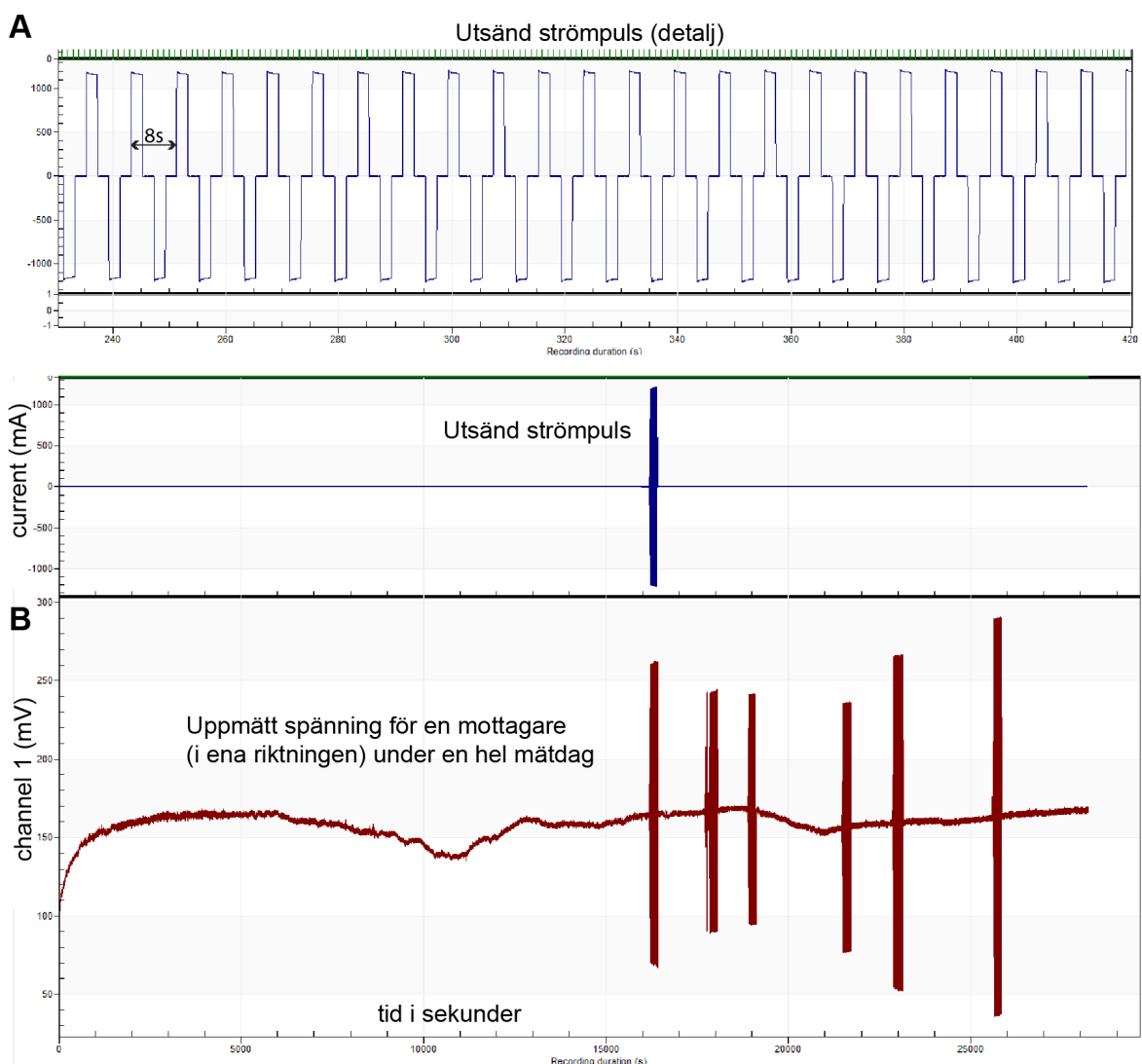


Figur 6. A. Ströminjektionspunkt C2 (fjärrelektrod). **B.** Detaljbild som visar anslutna stålektroder. Foto: Julia Fridlund.

Databearbetning och modellering

Vid databearbetningen har vi använt två programvaror från Iris instruments, FullWave Viewer och Prosys. I FullWave Viewer synkroniseras sändarsignalen och mottagarsignalen med varandra (fig. 7). Det är även möjligt att inspektera och bedöma kvalitén på mätdata och beräkna skenbar resistivitet, SP och laddningsbarhet. Vi valde 0,05 s som initial tidsfördröjning och en total integrationstid på 1,74 s i IP-bearbetningsdelen.

Tillsammans med ett antal kvalitetsparametrar och koordinaterna kan man sedan exportera data till programvaran Prosys där den egentliga bearbetningen av data utfördes. Exporten kan göras genom en i stort sett automatiserad procedur för varje mätdag. Data för alla mätdagar och uppsättningar grupperas sedan i Prosys till en fil som innehåller alla mätningar.



Figur 7. Visualisering av data i programvaran FullWave Viewer. **A.** En del av utsänd strömpuls för en mätpunkt där 8 sekunder motsvarar en mätcykel. **B.** Registrering i en av mottagarna under en hel dag. Den första registreringen vid drygt 1 600 sekunder motsvarar den utsända strömpulsen i panelen ovanför.

I Prosys kan man kontrollera positionering ytterligare och filtrera bort data som är av dålig kvalitet. Vi filtrerade bort data enligt följande kriterier:

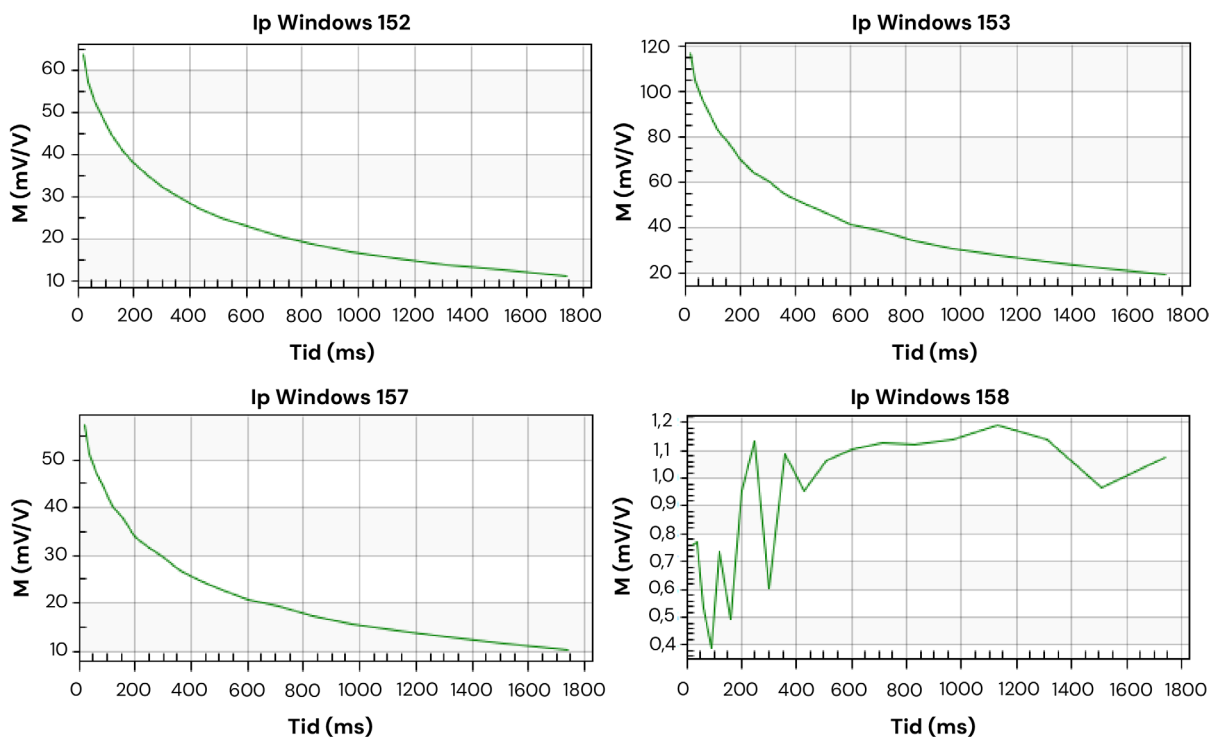
1. ”Overload” data, det vill säga data där uppmätt potential översteg 5 V (31 mätdata).
2. Dubletter av data.
3. Mätdata där uppmätt potential för resistivitet är mindre än 1 mV

Till sist inspekterades alla IP-avklingningskurvor och ytterligare data (laddningsbarhet) rensades bort (figur 8).

Från Prosys finns sedan möjlighet att exportera data för vidare modellering. Vi har använt programvaran Res3Dinv (Seequent) för att ta fram modeller som visar fördelningen av markens resistivitet och laddningsbarhet i 3D. Programmet skapar en 3D-modell som anpassas till uppmätta data på ett automatiskt iterativt sätt. I varje iteration ändras cellernas resistivitet och laddningsbarhet (om resistivitet och IP-data används samtidig). Data-anpassningen beräknas i form av RMS (eng. *Root Mean Square*) efter varje iteration. Programmet stannar efter att RMS nått en bestämd nivå eller när ett maximalt antal iterationer har passerats.

Vid modelleringen finns det två sätt att läsa in data; med pol-dipol-konfiguration eller vector array-konfiguration. Med pol-dipol-konfiguration behandlas data från de två (nästan) vinkelräta riktningarna separat, det vill säga två mätpunkter erhålls från varje dipol. Vid vector array-konfiguration kombineras i stället den uppmätta potentialen från de två riktningarna. Loke m.fl. 2022 och Loke 2024 beskriver fördelen med att använda vector array-konfigurationen framför pol-dipol-konfiguration.

Vi har testat att invertera data både på konventionellt sätt med pol-dipol-konfiguration och med vector array-konfiguration. För att omorganisera datasetet till vektorkonfiguration användes ett Matlabscript eftersom den funktionen inte finns i programvaran Prosys ännu. Vid modelleringen har vi även testat många olika parametrar som till exempel cellstorlek på modellgridden, typ av norm vid inversionen (L1 och L2) och olika storlek på dämpningsfaktorn.



Figur 8. IP-avklingningskurvor för några mätpunkter där IP Windows 158 visar exempel på en kurva som rensats bort.

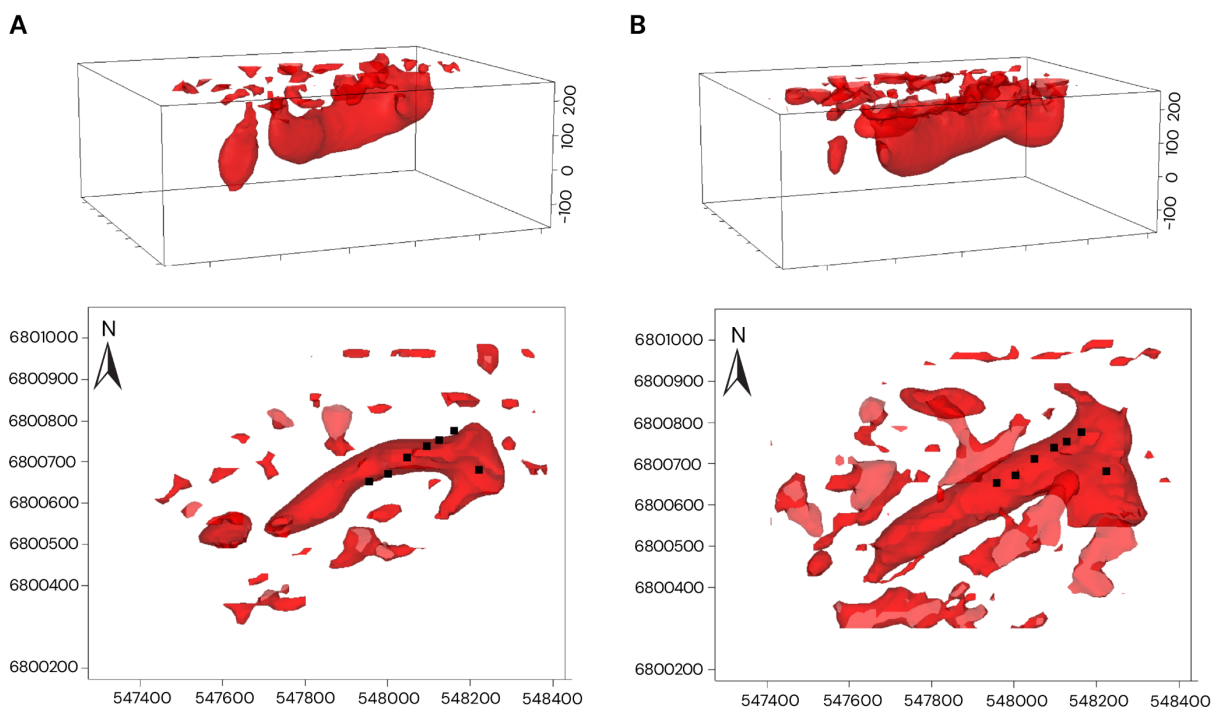
Resultat

Jämfört med 2D-modellering av resistivitet och IP-data är det generellt svårare att anpassa en 3D-modell till insamlade data. Vid inversion har vi upptäckt samma fenomen trots att datakvaliteten är bra. En ytterligare försvårande faktor är att våra data uppvisar mycket stora resistivitetsvariationer nära markytan.

För att erhålla en bättre dataanpassning har vi utfört ett stort antal inversioner där vi testat att ändra olika parametrar i programvaran Res3Dinv. Det har dock visat sig att det inte påverkar det slutliga resultatet så mycket och att standardinställningar oftast ger bäst resultat. Cellstorleken som använts i de flesta av inversionerna är ca 15×15 m i horisontalld. Cellstorleken i djupled är 15 m närmast markytan för att sedan öka logaritmiskt på djupet.

Inversion av enbart resistivitetsdata

Vid inversion av enbart resistivitetsdata erhålls resistivitetsmodeller med relativt låga RMS för både pol-dipol- och vektorkonfiguration. Våra tester visar också att vektorkonfiguration gav något lägre RMS i jämförelse med modellen från pol-dipol-konfiguration (RMS = 6 respektive RMS = 11). Figur 9 visar en jämförelse mellan 3D-resistivitetsmodellerna från inversion med vektorkonfiguration (fig. 9A) och pol-dipol konfiguration (fig. 9B). 3D-modellen visualiseras som en isoyta för celler med resistiviteter mindre än 50 ohmm. De övre bilderna visar modellen sedd från sydväst och de nedre bilderna visar modellen sedd uppifrån.



Figur 9. Resultat från 3D-modellering av enbart resistivitetsdata. 3D-modellen visualiseras som en isoyta för celler med resistiviteter mindre än 50 ohmm. De övre bilderna visar modellen sedd från sydväst och de nedre bilderna visar modellen sedd uppifrån. Svarta punkter markerar läget för sulfidförekomster.

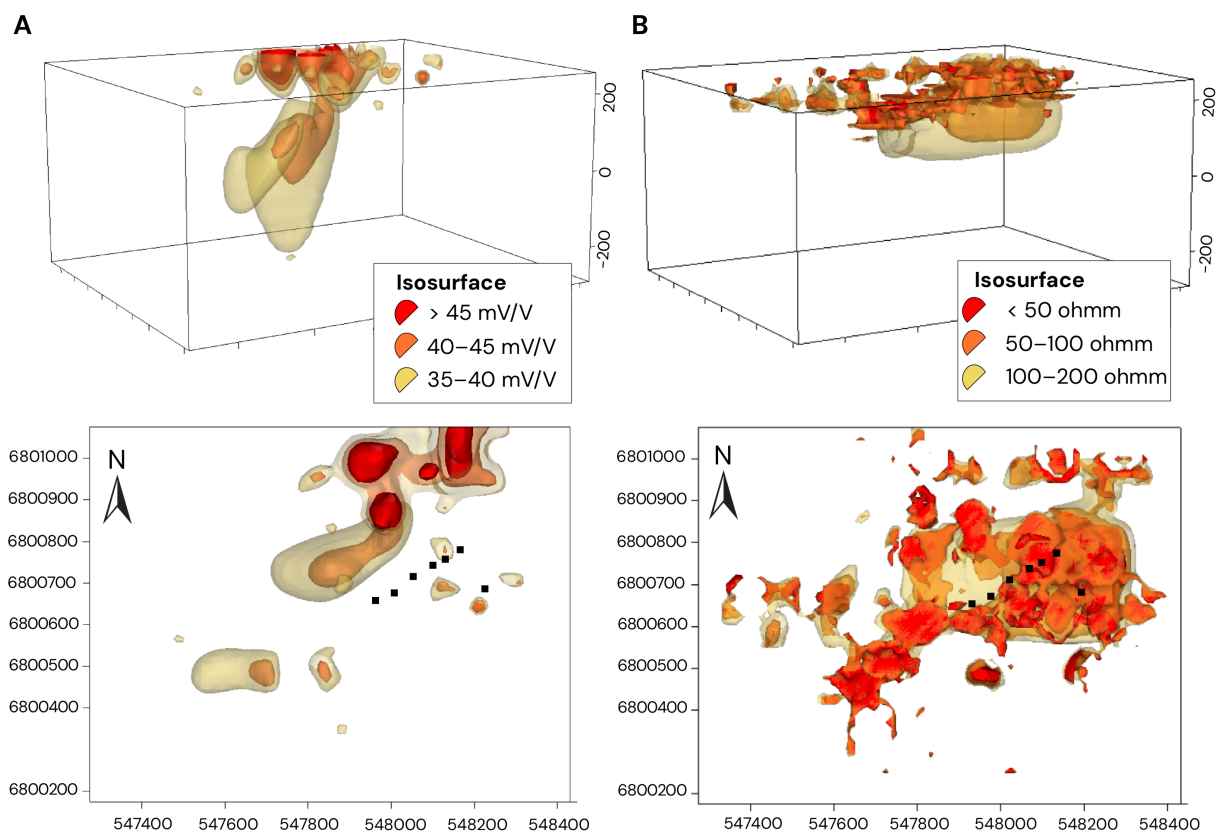
A. Inversion med vektorkonfiguration. **B.** Inversion med pol-dipol-konfiguration.

Modellerna visar en central, 50 till 100 m bred, lågresistiv zon som sträcker sig ca 800 m i sydvästlig–nordostlig riktning ned till ett djup av ca 200 till 300 meter. Zonens läge sammanfaller med de ytnära sulfidförekomsterna (svarta punkter i fig. 9) och indikerar en fortsättning av mineraliseringen mot sydväst. Utöver den centrala zonen förekommer även mindre ytnära objekt med låg resistivitet. Modellen i figur 9A visar den lågresistiva zonen något mer distinkt i jämförelse med 9B och modellen i figur 9A är också mindre påverkad av ytnära lågresistiva kroppar.

Kombinerad inversion av IP- och resistivitetsdata

Vid kombinerad inversion av IP- och resistivitetsdata har det varit svårt att erhålla en modell med godtagbar anpassning till både IP- och resistivitetsdata. För IP-data erhålls efter ett fåtal iterationer ett relativt lågt RMS medan för resistivitetsmodellen stannar RMS vid ca 20 till 50. Vi har testat inversion med olika parametrar men ändå inte lyckats att få en bättre anpassning med kombinerad inversion.

Figur 10 visar resultat från en kombinerad inversion med vektorkonfiguration där RMS för IP-modellen är 2 och RMS för resistivitetsmodellen är 24, vilket är det lägsta värdet på RMS vi erhållit. IP- och resistivitetsmodellerna visualiseras som isoytor i tre intervall för laddningsbarhet (fig. 10A) och resistivitet (fig. 10B) respektive. De övre bilderna visar modellen sedd från sydväst och de nedre bilderna visar modellen sedd uppifrån.



Figur 10. Resultat från kombinerad inversion med vektorkonfiguration av IP och resistivitet. A. IP-modell visualiserad med isoytor i tre intervall. B. Resistivitetsmodell visualiserad som tre isoytor. De övre bilderna visar modellen sedd från sydväst och de nedre bilderna visar modellen sedd uppifrån. Svarta punkter markerar läget för sulfidförekomster.

Högst laddningsbarhet ($> 45 \text{ mV/V}$) erhålls i de norra, ytnära delarna av mätområdet (fig. 10A). Förhöjd laddningsbarhet ($> 35 \text{ mV/V}$) förekommer också på större djup, ända ned till 400 m, men här är IP-modellen osäker också på grund av den dåliga anpassningen för resistivitetsdata. Området med hög laddningsbarhet ligger strax norr om området med sulfidförekomster. Det sammanfaller inte exakt med de mineraliseringar som observerats i markytan men följer samma sydväst–nordostliga trend (fig. 10A).

Resistivitetsmodellen i figur 10B visar till största delen ytnära lågresistiva områden ($< 50 \text{ ohmm}$) och dessutom få likheter med modellerna i figur 9. På grund av den dåliga anpassningen till uppmätta data (RMS = 24) får resistivitetsmodellen anses som osäker.

Jämförelse med andra data/modeller

I området omkring Grängsbo har geofysiska data insamlats under olika kampanjer. Under 1980-talet gjordes detaljerade elektromagnetiska mätningar, med slingram och VLF, och magnetfältsmätningar i området (Persson & Thelander 1982, Claesson m.fl. 1986). Då utfördes även fyra kärnboringar där man borrade ned till 140 m som djupast (Claesson m.fl. 1986). Parametermätningar utfördes på borrhämnarna som visade hög IP-effekt samt låg resistivitet inom de mineraliserade zonerna (tabell 1, Claesson m.fl. 1986).

Tabell 1 visar resultat från de petrofysiska mätningar som utfördes på borrhämnar från tidigare undersökningar på 1980-talet. Totalt mätte man på åtta prov från två borrhämnar. Ingen uppgift finns om på vilket djup proverna är tagna utan endast bedömd mineraliseringsgrad. Tabell 1 visar att resistiviteten sjunker med ökande mineraliseringsgrad och lägst resistivitet uppvisar de rikt mineraliserade proverna med en resistivitet på 20–50 ohmm. De ligger i samma storleksordning som i våra 3D-modeller från resistivitets och IP mätningen. Ofyndigt berg visar inte överraskande lägst IP-effekt men ingen tydlig skillnad i IP-effekt erhålls med avseende på mineraliseringsgrad.

I området finns även moderna flyggeofysiska data (VLF, magnetfält och gammastrålning) insamlade av SGU i öst-västlig riktning och med 200 m linjeavstånd. Flygburna VLF-data har modellerats med hjälp av 3D-inversion (Kamm och Pedersen 2014) till en resistivitetsmodell.

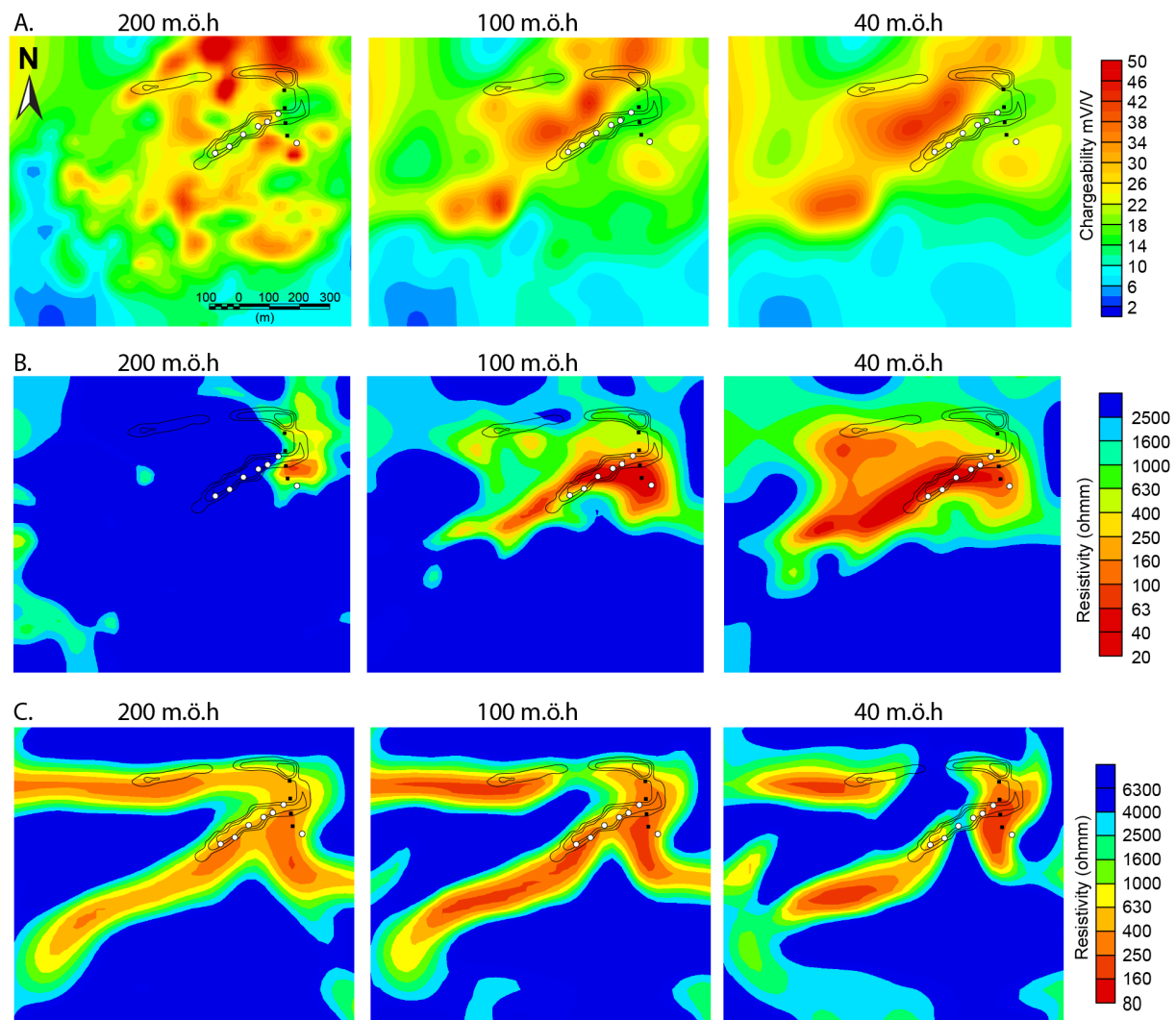
Figur 11 visar resultatet från 3D IP/resistivitetsmodellen och resistivitetsmodellen baserad på VLF data för olika djupsnitt. Resultat från den markmätta slingramundersökningen har även lagts in med svarta konturlinjerna. De visar läget för den största anomalin orsakad av de ytnära mineraliseringarna i Grängsbo. Dessa data insamlades enbart inom den norra delen av mätområdet.

Tabell 1. Parametermätningar från Bh 86002 och 86003 (Claesson m.fl. 1986).

Mineraliseringsgrad	Resistivitet	IP-effekt (%)
Ofyndigt	8 000–20 000	2–8
Svagt mineraliserat	80–470	30–80
Måttligt mineraliserat	90–110	60–75
Rikt mineraliserat	20–50	20–75

IP-modellen i figur 11A är densamma som visas i figur 10. Här ser man tydligare att områden med förhöjd laddningsbarhet hamnar strax utanför området med slingramanomalier och sulfidfyndigheter. På större djup har IP-anomalin dock samma trend (sydväst–nordostlig) som slingramsanomalin. Resistivitetsmodellen i figur 11B är densamma som visas i figur 9A, det vill säga inversion av enbart resistivitetsdata med vektorkonfiguration. Den lågresistiva zonen sammanfaller med läget för sulfidförekomsterna och den södra delen av slingramanomalin. Modellen indikerar också att mineraliseringen fortsätter längre mot sydväst än vad som identifierats i tidigare undersökningar.

Resistivitetsmodellen baserad på VLF-data (fig. 11C) visar också den en lågresistiv zon med sydvästlig riktning som överensstämmer till stora delar med resistivitetsmodellen i figur 11B. Utöver den finns ytterligare en lågresistiv zon i den norra delen av området med öst–västlig riktning. Denna zon sammanfaller med norra delen av slingramanomalin (fig. 11C). Viktigt att komma ihåg är att djupinformationen i resistivitetsmodellen från VLF-data är begränsad eftersom frekvensområdet är begränsat och enbart en frekvens (ca 25 kHz) används i modelleringen.



Figur 11. Utsnitt ur 3D-modell vid tre olika nivåer: 200, 100 och 40 m.ö.h. Markytan i området ligger på nivån 200 till 220 m.ö.h. **A.** IP-modell (laddningsbarhet) från kombinerad inversion av IP och resistivitet. **B.** Resistivitetsmodell från inversion av enbart resistivitetsdata. **C.** Resistivitetsmodell från inversion av flygburna VLF-data. Svarta konturlinjerna markerar anomalin från markmätta slingramdata. Vita punkter markerar läget för sulfidförekomster och svarta punkter visar läget för borrhningar i området.

Slutsatser och rekommendationer

Huvudsyftet med undersökningen i Grängsbo var att testa och utvärdera IP-metoden och ett specifikt mätinstrument för kartläggning av sulfidmineraliseringar på djupet. Till fältmätningarna hyrdes ett mätsystem från Iris instruments i Frankrike. Området valdes då det antogs ha goda förutsättningar för metodiken och att det finns tidigare geofysiska mätningar, samt borrhningar med parametermätningar. Området besöktes också för rekognosering innan mätning. Mätpunkterna planerades i förväg med hjälp av ett program för att säkra djupkänning ner till ca 300 m.

Själva fältundersökningen var mycket lyckad och gick i stort sett enligt plan. Vi kunde genomföra en fullskalig resistivitets- och IP-mätning i 3D och erhålla information ned till flera hundra meters djup. Mottagarna (V-FullWaver) som användes för mätning av spänning är lätta att hantera. De är flexibla och kan även användas inom andra tillämpningar än IP-mätning. Sex personer deltog i fältarbetet under hela fältperioden vilket bedömdes vara ett tillräckligt antal. Beroende på markförhållanden i undersökningsområdet bör man minst vara fyra till fem personer både ur ett säkerhetsperspektiv och för att klara arbetet inom en rimlig tid.

Kvaliteten på insamlade mätdata bedömdes vara tillräckligt god för ändamålet. Databearbetningen krävde inledningsvis mycket arbete för att koordinatsätta och samla ihop alla data i en fil. Själva rensningen av data gick smidigt i de programvaror som tillhandahölls av Iris instruments. Ett bättre verktyg/programvara för visualisering av uppmätta data skulle dock kunna underlätta bedömning av datakvaliteten och framför allt för att få en preliminär bedömning av resistivitet och laddningsbarhet inom mätområdet.

För att kunna ta fram en 3D-modell från uppmätta data använde vi ett kommersiellt program, Res3Dinv (Seequent). Vid inversion av enbart resistivitet erhöll vi en modell med rimlig dataanpassning och god överensstämmelse med andra geofysiska data (slingram och VLF). Resistivitetsmodellen visar att den lågresistiva strukturen, mest troligt orsakad av sulfidmineraliseringen, fortsätter längre mot sydväst än vad som tidigare var känt.

Det visade sig svårare att erhålla en inversionsmodell med godtagbar anpassning till mätdata när vi modellerade både resistivitet och IP tillsammans. Anpassningen till IP-data är acceptabel medan anpassningen till resistivitetsdata blir mycket dålig. IP-modellen visar högst laddningsbarhet närmast markytan. Dessa områden sammanfaller inte med läget för sulfidmineraliseringar. Områden med hög laddningsbarhet förekommer även på större djup men är mycket osäkra. De sammanfaller inte med den lågresistiva zonen men följer den sydvästliga riktning som observerats i andra modeller.

I jämförelse med modellering i 2D (längs uppmätta profilinjer) är det givetvis svårare att erhålla bra dataanpassning vid 3D-modellering. Detta kan delvis förklara den dåliga anpassningen till data vid inversion av både resistivitets- och IP-data. En rekommendation för framtiden är att testa andra programvaror för 3D-modellering (som till exempel Pygimli, se www.pygimli.org) något som inte legat inom ramen i nuvarande projekt.

Vi rekommenderar även att utföra petrofysiska mätningar på bergarterna inom mätområdet samt att utföra en numerisk modellering av olika tänkbara geofysiska modeller. Detta för att få en uppskattning av den förväntade responsstyrkan innan själva fältmätningen. Detta skulle underlätta både vid planering av fältinsatser och tolkning av resultatet.

Tack

Inför planeringen av fältarbetet tog vi kontakt med Chris Nind, geofysiker på Abitibi Geophysics Inc. Han har stor erfarenhet av liknande mätningar, från bland annat Kanada. Han höll ett föredrag (digitalt) och delade med sig av sina erfarenheter på ett av våra samverkans forum på geofysikenheten på SGU under hösten 2023.

Vidare hade vi kontakt med Fabrice Vermeersch från Iris instruments. Han stöttade oss i samband med planeringen av fältinsatsen och han var även med under själva fältarbetet de tre första dagarna som instruktör.

Referenser

- Claesson, L-Å., Ehrenborg, J., Johansson, R., Luppichini, E-L. & Nilsson, B., 1986: Sulfidfyndigheter sediment/grönsten. 1986 års insatser. Prospekteringsrapport PRAP 86538. Sveriges geologiska undersökning, 95 s.
- Kamm, J. och Pedersen. L.B., 2014: Inversion of airborne tensor VLF data using integral equations. *Geophysical Journal International*, 198 (2), 775–794.
- Kim, B., Védrine, S., Bretaudeau, F., Deparis, J., Kamm, J., Autio, U., Patzer, C. and Darnet, M., 2025, September. Toward 3d deep mineral imaging: CSEM, ERT, and IP strategies for depths beyond 1 km. In *NSG 2025: 6th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining* (Vol. 2025, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Loke, M.H., 2024: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (Tillgänglig för nedladdning på <http://www.geotomosoft.com/>).
- Loke, M.H., Wilkinson, P.B., Gance, J., Malet, P-B., Truffert, C. & Leite, O., 2022: Measurement and inversion strategies for 3-D resistivity surveys with vector arrays. *Geophysical Prospecting*, 70, 578–592.
- Nind, C., Phaneuf, C. & Coles, P., 2023: DasVision 3D IP Distributed Array System: Two Case Studies. In *NSG2023 29th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Persson, G. & Thelander, T., 1982: Grängsbo, Uppföljande undersökningar inom kartbladet 15 G Bollnas SV. Prospekteringsrapport PRAP 82602. Sveriges geologiska undersökning, 23 s.
- Revil, A., Vaudelet, P., Su, Z., & Chen, R., 2022: Induced Polarization as a Tool to Assess Mineral Deposits: A Review. *Minerals*, 12(5), 571. doi: 10.3390/min12050571