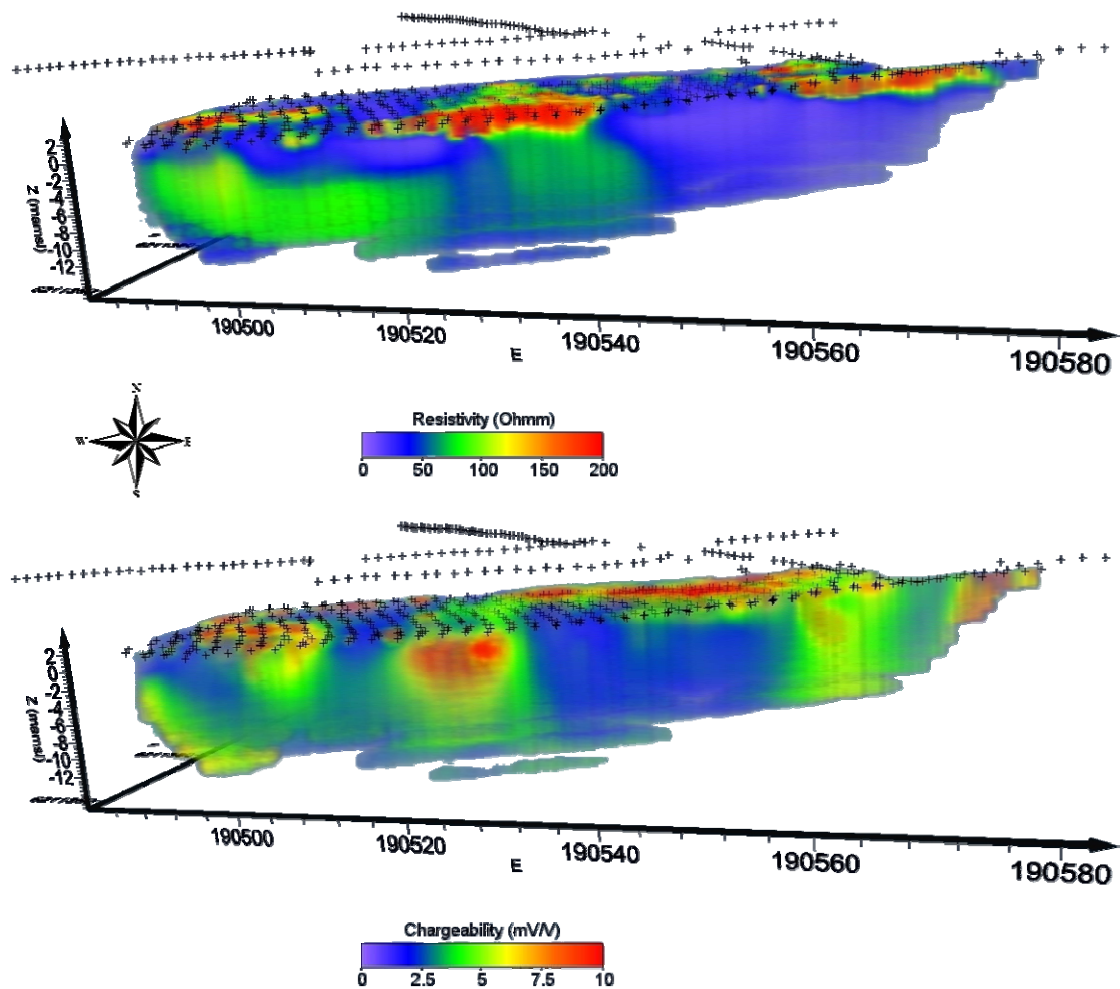




LUND
UNIVERSITY
ENGINEERING GEOLOGY

Rapport SBUF-projekt 12719 TRUST 2.1 steg 1

Geoelektrisk kartläggning av jord- och bergförhållanden i 3D i urban miljö



Lund 2016

Torleif Dahlin, Sara Johansson & Per-Ivar Olsson

Teknisk Geologi, LTH/Lunds Universitet

Förord

I denna rapport redovisas preliminära resultat från SBUF-projekt 12719 som ingår som steg 1 i TRUST 2.1 som är ett delprojekt det nationella samarbetet TRUST¹ (TRansparent Underground STructure).

Projektet finansieras förutom av SBUF av Formas-Trafikverket via utlysningen Geoinfra, BeFo och Sven Tyréns Stiftelse. Vidare medfinansierar SGU, ABEM Instrument AB, Aarhus Universitet och Teknisk geologi, LTH/Lunds Universitet projektet. Delar av de fältförsök som genomförts har kunnat utföras tack vare finansiering från Nova FOU och Skanska.



¹ <http://www.trust-geoinfra.se/>

Inledning

Alltmer infrastruktur förläggs under mark av utrymmes- eller miljöskäl, i synnerhet i urban miljö. Byggande av underjordisk infrastruktur i urban miljö kräver god kunskap om parametrar som struktur, berggrund och jord, sprickor, förkastningar, närliggande underjordiska anläggningar samt grund- och ytvatten, geokemiska förhållanden, eventuell förekomst av avfall och förorenad mark, etc.. Bristen på kunskap om dessa avgörande parametrar innebär en stor risk för förseningar och kostnadsökningar vid byggande av underjordiska anläggningar, och det kan även påverka driftskedets effektivitet och kostnadsbild negativt.

Borrning och geoteknisk sondering ger detaljerad information som dock inte nödvändigtvis är representativ för hela den aktuella undermarksvolymen. Geofysiska tomografiska mätningar kan däremot ge tredimensionella (3D) modeller av variationen i fysiska egenskaper som kan kopplas till de parametrar som är av intresse vid byggande. Resistivitet och tidsdomän (spektral) inducerad polarisation ger en bild över markens distribution av specifika elektriska motstånd och uppladdningsförmåga (kapacitiva egenskaper). Metoden kallas även DCIP tomografi (DCIP = DC resistivity and time-domain Induced Polarisation).

Teknisk utveckling av mätutrustning för tidsdomän IP och nya tolkningsalgoritmer, som delvis skett i detta projekt, har medfört möjligheter till att samla in stora datamängder och tolka dem med avseende på spektrala IP parametrar. För tolkningen används invers numerisk modellering, där programvaran skapar en finita elementmodell i 2D eller 3D över de elektriska egenskapernas fördelning i marken, s.k. inversion. På detta sätt kan mer information om marken utvinnas från en och samma mätning, jämfört med vad som varit möjligt tidigare.

Mätningar av spektral DCIP ställer högre krav på mätdatas kvalitet eftersom det i inversionsprocessen krävs en mer ingående modellering för att bestämma de spektrala parametrarna. Problemet med mätdatas kvalitet är extra uttalat för mätningar i urban miljö då där finns fler och starkare störningskällor, exempelvis från elnät. Detta begränsar användbarheten av DCIP metoden. Det huvudsakliga målet med licentiatavhandlingen *Optimization of time domain induced polarization data acquisition and spectral information content*² är därför att öka användbarheten av DCIP-metoden genom att utveckla nya metoder för bearbetning av mätdata. De nya metoderna ska leda till minskat mättid och kostnad, ökat (spektralt) informationsinnehåll i data och bättre datakvalité. I slutändan leder detta till mindre tid och kostnad för bearbetning av mätdata och mer pålitligt tolkningsresultat.

Det är välkänt att spektrala IP effekter uppstår genom omfördelning av joner på porskalenivå, och att spektrala IP parametrar kan kopplas samman med ytkemiska och strukturella egenskaper på mikroskala. Dock behövs forskning om hur spektrala IP parametrar från fältskaleundersökningar med tidsdomän IP i urbana stadsmiljöer bör analyseras och tolkas. Det huvudsakliga målet med licentiatavhandlingen *From microstructure to subsurface characterization - Spectral information from field scale time domain induced polarization*³ är därför att fokusera på dessa problem. Mer specifikt behandlar avhandlingen frågeställningen om den oljelika föroreningstypen klorerade kolväten kan detekteras med DCIP, samt hur IP variationer i kalkstensberggrund kan tolkas.

² Olsson, P.-I. (2016) Optimization of time domain induced polarization data acquisition and spectral information content. Licentiate thesis, ISRN LUTVDG/(TVTG-1035)/1-94/(2016), Lund University, Lund, 94p.

³ Johansson, S. (2016) From microstructure to subsurface characterization - Spectral information from field scale time domain induced polarization. Licentiate thesis, ISRN LUTVDG/(TVTG-1036)/1-97/(2016), Lund University, Lund 97p.

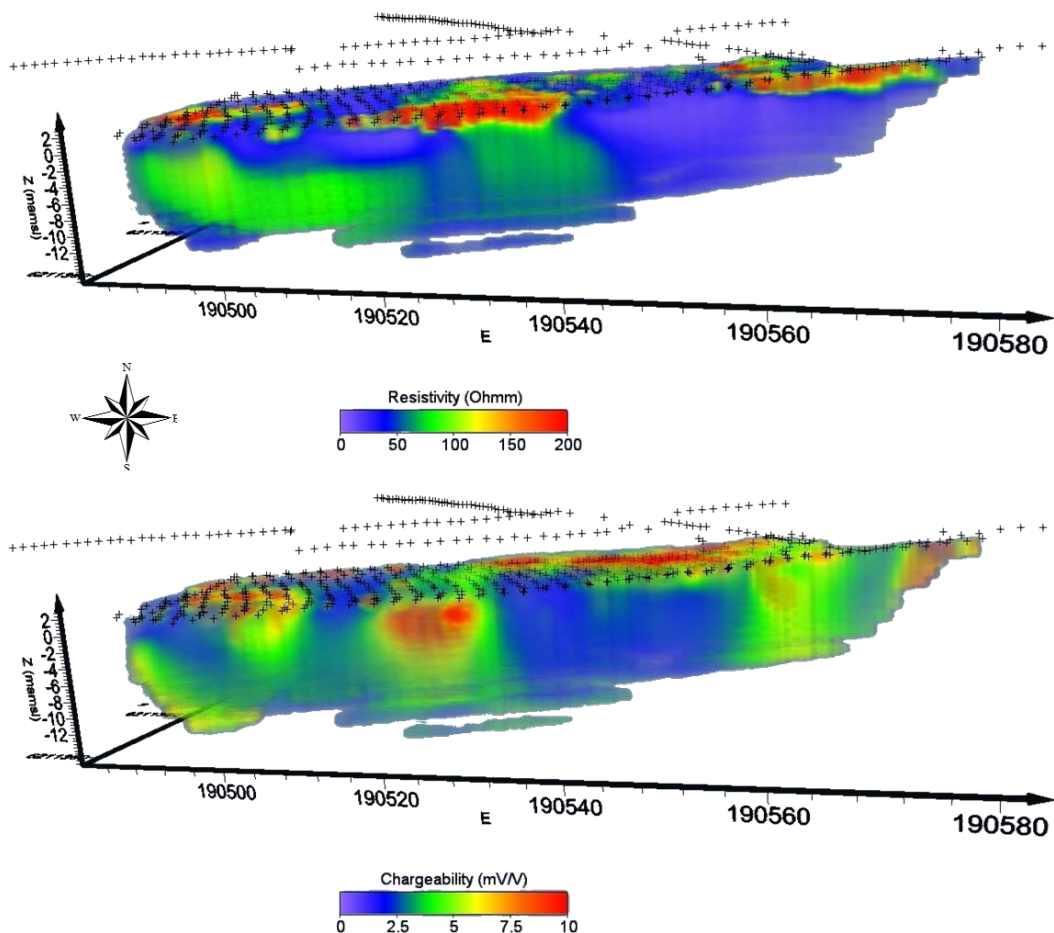
Genomförande

Ett omfattande arbete med forskning kring, och teknisk och teoretisk utveckling av, DCIP metoden har utförts inom ramen för de två licentiatavhandlingarna. Forskning och metodutveckling har även utförts som post doc-arbete samt av instrumenttillverkaren som är med som industripartner i projektet.

Utvecklade mättekniska koncept och metoder har testats i full skala på ett antal fältlokaler. De algoritmer för databearbetning och inversion som tagits fram har använts för att bearbeta fältdata från dessa försök och skapa DCIP-modeller baserat på dem. Resultaten har sedan tolkats och utvärderats med hjälp av tillgängliga relevanta referensdata.

Bland de fältkampanjer som genomförts inom ramen för projektet ingår:

- Färgaren, Kristianstad. Huvudfokus: klorerade lösningsmedel (Figur 1)
- Renen, Varberg. Huvudfokus: klorerade lösningsmedel och bergkvalitet (Figur 2 och Figur 3)
- Äspölaboratoriet, Oskarshamn. Huvudfokus: bergkvalitet (undervattensmätningar)
- ESS, Lund. Huvudfokus: mätteknik
- Önneslöv-Dalby. Huvudfokus: bergkvalitet (Figur 4 och Figur 5)
- Förbifart Stockholm Lambarfjärden. Huvudfokus: bergkvalitet (undervattensmätningar) (Figur 6)
- Förbifart Stockholm Vinsta. Huvudfokus: bergkvalitet (3D tomografi)



Figur 1. Resultat från Kv. Färgaren, Kristianstad; resistivitet (överst) och IP (nederst)⁴.

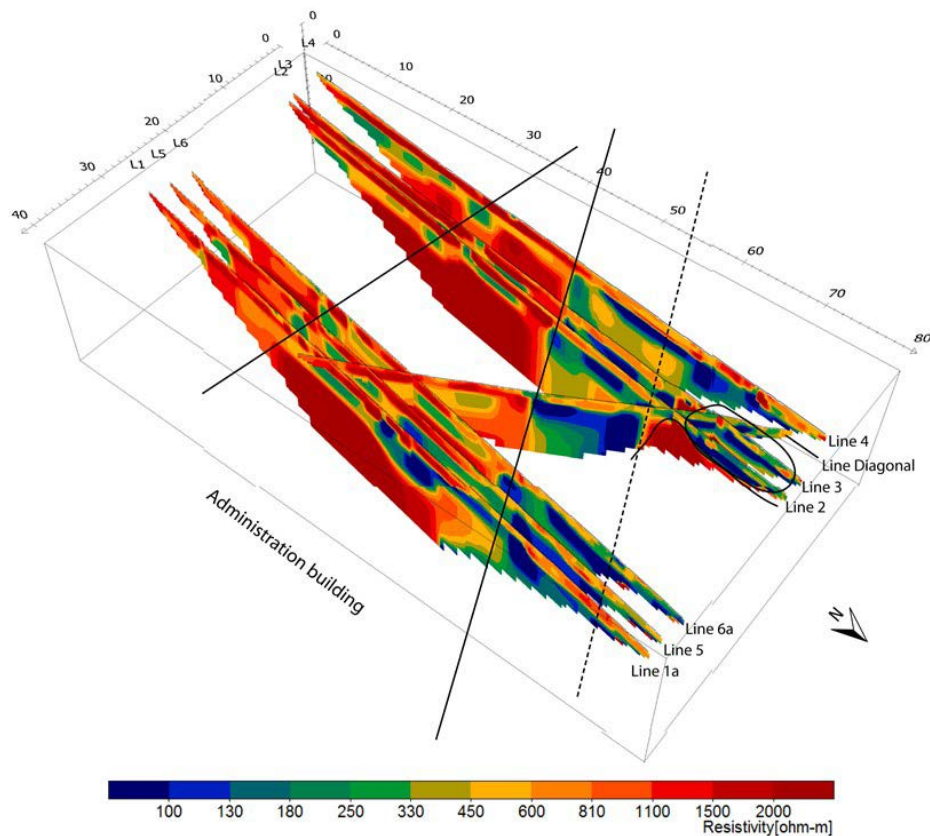
⁴ Johansson S., Olsson P.-I., Lumetzberger M., Dahlin T, Hagerberg D., Rosqvist H. & Sparrenbom C. (2014) Delineation of a free phase chlorinated hydrocarbon plume with resistivity and TDIP, in Procs. 3rd International Workshop on Induced Polarization, 6 – 9 April 2014, Oléron Island, France.

Lokalerna har valts ut med tanke på relevans för projektets frågeställningar med tillgång till relevant referensdata som ett krav. Några exempel på resultat från dessa presenteras nedan.

Resultat

Förorenad mark är ofta ett stort problem i samband med byggande i urban miljö, t.ex. vid återanvändning av gammal industrimark, kemtvättstomter, avfallsdeponier, etc.. Kv. Färgaren i Kristianstad är ett exempel på mark som skall återanvändas där det tidigare legat en kemtvätt, och där marken är kraftigt förorenad av starkt giftiga och cancerogena klorerade kolväten (PCE och TCE). Figur 1 visar exempel på resultat, där anomalierna med förhöjd resistivitet (övre bilden) tolkas som källzonen av i PCE frifas, medan zonerna med förhöjd IP (nedre bilden) tolkas som nedbrytningszoner.

Ett annat exempel på förorenad mark kommer från Kv Renen i Varberg där tidigare industri lett till förorening med klorerade kolväten. Byggandet av Varbergstunneln förväntas leda till ökad grundvattentransport genom området vilket kan mobilisera föroreningstransport, och det finns risk för att detta blir det enskilt största problemet att hantera i samband med byggandet av tunneln.

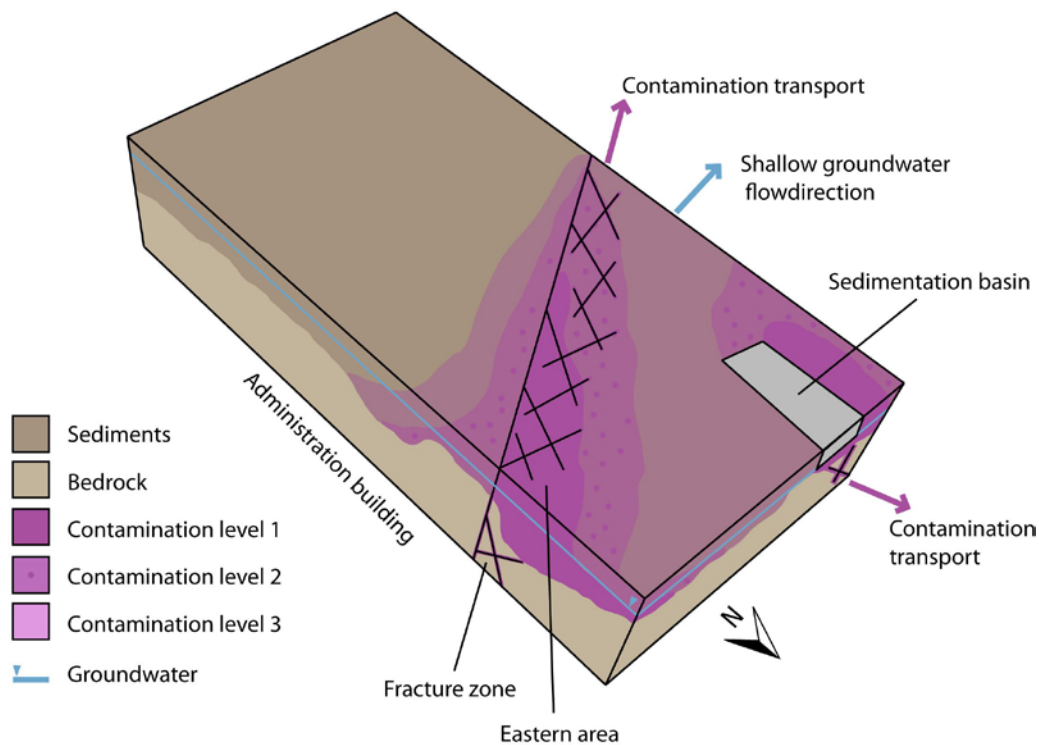


Figur 2. Resistivitetsresultat från Renen, tolkat som en sprickzon i granitberggrunden⁵.

DCIP tomografi i ett antal parallella och korsande linjer visar tydligt en sprickzon i berggrunden som framträder som en zon med lägre resistivitet (Figur 2), vilken inte har dokumenterats på ett tydligt sätt genom de borrhningar som gjorts i tidigare undersökningar i området. IP-resultaten från området ger ytterligare information som ger en fingervisning om föroreningstransport. Samtolkning av DCIP

⁵ Åkesson, S. (2015) The application of resistivity and IP - measurements as investigation tools at contaminated sites. M.Sc. Thesis, Lund University.

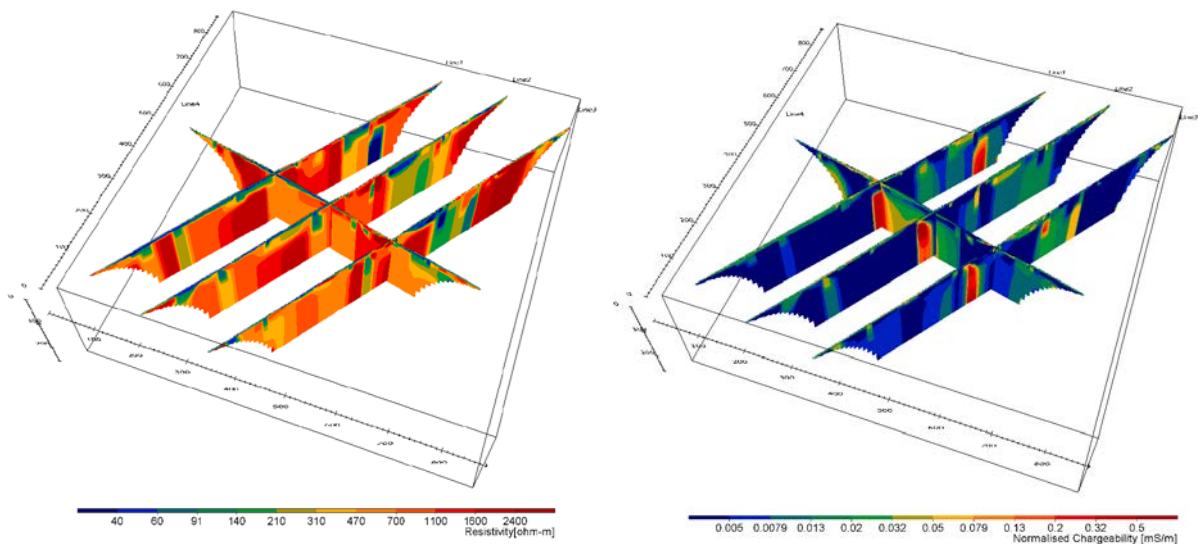
resultat och analysresultat från prover tagna i borrhål har sammanställts till den konceptuella modell som visas i Figur 3.



Figur 3. Tolkning av föroreningsspridningen på Renen, baserat på DCIP data och borrhålsanalyser⁵.

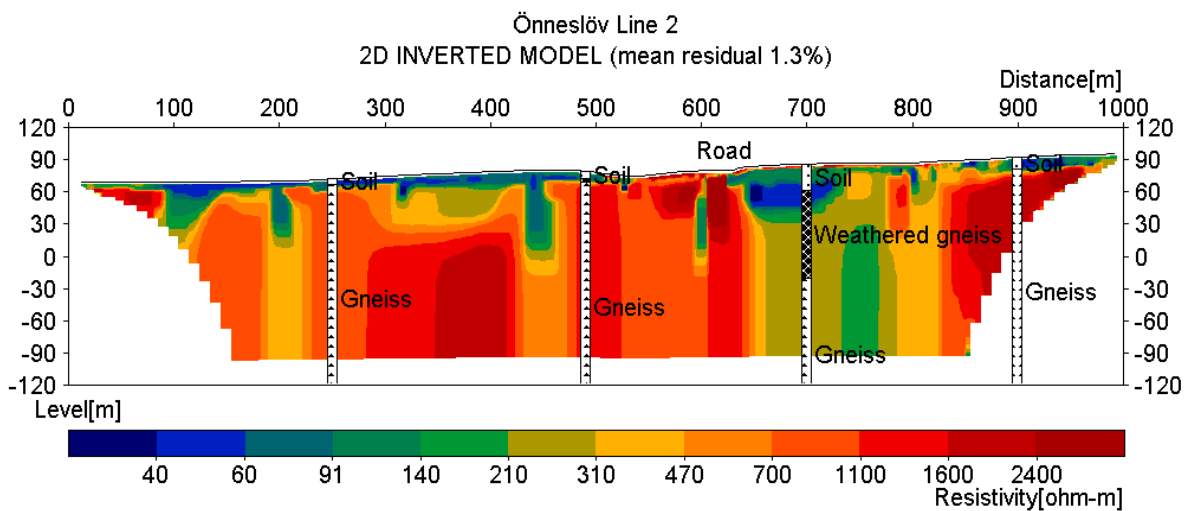
Mätförsök har utförts vid Önnestöv utanför Dalby i Skåne med syfte att utvärdera hur väl DCIP metoden kan kartlägga variationer i bergkvalitet och djup till berg. Tre parallella linjer om vardera 1000 m längd, samt en korsande 800 m lång linje, mättes. Elektrodlägget var 800 m för att uppnå en djupnedträngning på ca 175 m. Vid mätningarna testades de nyutvecklade mättekniska metoderna i full skala, och data bearbetades sedan med de signalbehandlingsrutiner som utvecklats i projektet. Tack vare detta kunde större mängder mätdata av högre kvalitet samlas in än vad som varit möjligt med sedvanlig teknik. Den modelltolkning av data som presenteras har gjorts med den kommersiellt tillgängliga programvaran som dominerar praktisk användning (Res2dinv), men arbete pågår med att även tolka data med programvara som utvecklas inom ramen för projektet.

En översikt av resultaten i form av sektioner som visar variationer i resistivitet respektive normaliserad IP-effekt (uppladdningsförmåga) visas i Figur 4. I resistivitetssektionerna (Figur 4a) ser man ett övre lågresistivt lager som utgörs av jordlagret. Det underliggande berget har generellt högre resistivitet, men det framträder ett antal zoner med lägre resistivitet som syns genomgående i de parallella linjerna, vilket kan tolkas som uppspruckna zoner med mer eller mindre grad av vittring. I sektionerna med normaliserad IP-effekt (Figur 4b), som ger ett mått på markens uppladdningsförmåga, syns också ett antal genomgående strukturer i de parallella linjerna. Orsaken till dessa har ännu inte utvärderats fullt ut, men det finns troligen en koppling till diabasgångar och vittringsgrad.



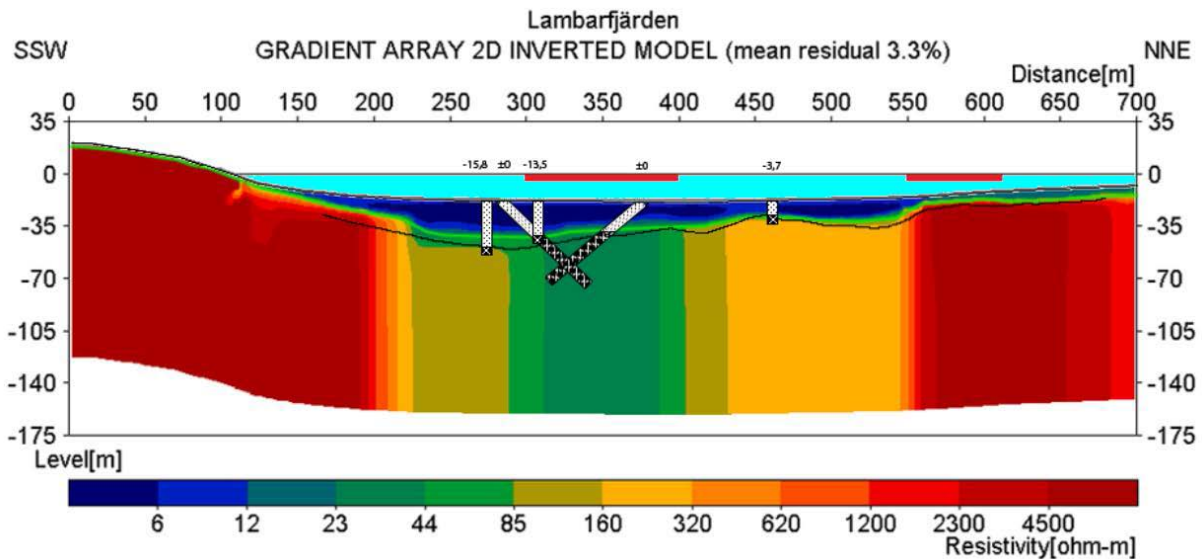
Figur 4. Översikt av resultat från Önnestöv-Dalby; a) resistivitet, b) normaliserad IP-effekt (uppladdningsförmåga).

Figur 5 visar resultaten från linje 2 med resultat från hammarborrning inlagda. Variationer i djup till berg stämmer väl överens med variation i mäktighet för det översta lagret. Det borrhål som uppvisar vittrat gnejs till stort djup är placerat i en större lågresistiv zon, medan de andra borrhålen där inget vittrat berg har noterats är placerade i mera högresistiva delar av berggrunden.



Figur 5. Resistivitetsmodell från linje 2 Önnestöv-Dalby.

Mättester har även utförts längs planerade tunnelsträckningar i ett antal vattenpassager i Stockholm för att testa DCIP metodens förmåga att kartlägga djup till berg och variationer i bergkvalitet under vatten. En av dessa sträckor är Förbifart Stockholms passage under Lambarfjärden. Mätningarna utfördes med en bottenförlagd elektrod kabel som täckte in hela mätsträckan och gick en bit upp på land på den ena sidan, i den andra var det inte möjligt p.g.a. att det ligger en marina i vägen. Även i detta fallet gjordes mätningar och databehandling med den nya teknik som utvecklats i projektet, vilket medförde snabbare datainsamling och bättre datakvalitet.



Figur 6. Resistivitssektion från Förbifart Stockholms passage av Lambarfjärden, med tolkat djup till berg från seismik markerat som svart linje. Dokumentation från borrning inlagd där ljusare raster markerar sedimentlager och mörkare raster markerar berg. Den ljusgröna linjen är bergnivå från resistivitet tolkad utan stöd från de andra metoderna.

Resultatet visar ett lågresistivt (blått) sedimentlager som vilar på berggrund med varierande resistivitet (Figur 6). De höga resistiviteterna i bägge ändar av sektionen tolkas som berg av god kvalitet, medan lägre resistiviteter (gult-grönt) kan tolkas som uppsprucket, eventuellt vittrat, och vattenförande berg. De lägsta resistiviteterna (mörkgrönt) i berget kan bero på högre grad av uppsprickning, eventuellt med salthaltigt vatten, samt troligen ökad vittringsgrad. Djup till berg visar att underkant av den mest lågresistiva zonen (markerad med ljusgrön linje) ganska väl avspeglar variation i djup till berg enligt seismik (svart linje) och borrning (övergång från ljus till mörkt raster i borrhålsmarkeringarna). De röda linjerna i vattenytan markerar läget för tolkade svaghetszoner i berget från seismik, där den vänstra stämmer väl i läge med den mest lågresistiva zonen, medan den andra inte indikeras i resistivitssektionen. Eventuellt kan det bero på att linjerna med respektive metod inte ligger i exakt samma läge i sidled.

Sammanfattning och slutsatser

Utvecklingen av ny förbättrad teknik för datainsamling med DCIP-metoden möjliggör mera tidseffektiv mätning, med bibehållen eller förbättrad datakvalitet, vilket kan ha stor praktisk betydelse för hur kostnadseffektiv metoden är i praktisk användning. Vidare kan nyutvecklade effektivare efterbehandling av mätdata förbättra datakvalitet och öka tillförlitligheten av slutligt tolkningsresultat.

Spektrala DCIP-mätningar är fortfarande ett relativt nytt område och kunskapen om vilka typer av mätdata som man kan förvänta sig är begränsad. Detta försvårar bearbetning av mätdata och mer forskning krävs för att kunna automatisera efterbehandling av data för att minska tidsåtgång och kostnader ytterligare.

I jordar förorenade av klorerade kolväten påverkar föroreningsfasen mikrogeometrin i jordens porsystem. Resultaten från detta projekt visar att olika fördelningar av kolvätefasen sannolikt påverkar den spektrala IP- effekten (uppladdningsförmågan) i jorden på olika sätt. Som exempel på detta förekom inga IP-effekter i källzonen på en undersökt fältlokal. Dock observerades förhöjda IP-effekter i nedbrytningszonen, där kolväteföreningen sannolikt är distribuerad som isolerade droppar i porsystemet.

För att undersöka sannolika källor till de varierande IP-effekter som observerades i en kalkstensberggrund kombinerades de uppmätta spektrala IP parametrarna med undersökningar av mikrostrukturen och sammansättningen i tunnslip. Flera egenskaper som kan påverka mätningarna identifierades, t.ex. förekomst av vissa mineraler och varierande textur i kalkstenen. Dock krävs mer forskning för att förstå hur polariseringsmekanismerna fungerar i kalkstenar. Mycket av tidigare gjord forskning har fokuserat på sand- och lerstenar, men det finns en stor potential att mätningar av spektrala IP parametrar kan användas för att undersöka textur och strukturella egenskaper i alla sorts bergarter.

Mätförsök gjorda i områden med kristallint berg visar att resistiviteten ger en god bild av variation av djup till berg och variation i bergkvalitet. Resultaten tyder också på att IP-effekten ger kompletterande information som kan vara värdefull för bedömning av t.ex. vittringsgrad.

Fortsatt arbete

Den utvecklade metodiken för datainsamling och dataprocessering av DCIP-data kommer testas och verifieras ytterligare. Vidare kommer syntetiska modellstudier göras för att skapa förståelse för vilka typer av mätdata som är teoretiskt möjliga vilket kommer ligga till grund för försök med automatiserad datafiltrering.

Laboratoriemätningar i olika skalor kommer genomföras och analyseras för att skapa underlag för en bättre förståelse för IP-fenomenen.

Fortsatta analyser och tolkning av insamlade fältdata kommer genomföras, där utvärdering mot referensdata blir en viktig del. Mindre kompletteringar av fältdata kommer också göras.