

GEOMETRISKA STRUKTURER I GEOLOGISKA MATERIAL GENOM SPEKTRAL INDUCERAD POLARISATION I TIDS- OCH FREKVENSDOMÄN

Kort sammanfattning av en doktorsavhandling

Sara Johansson

2019-04-30

FÖRORD

Innehållet i denna rapport är en kort sammanfattning av doktorsavhandlingen *Geometrical controls on spectral induced polarization in time and frequency domain* av Sara Johansson (ISBN: 978-91-7753-982-7). Avhandlingen är en sammanläggningsavhandling baserad på fem vetenskapliga publikationer. Doktorandprojektet finansierades av Formas (ref. 2012-1931), SBUF (ref. 12719 och 13232) och BeFo (ref. 331) som en del av Trust 2.1 inom Geoinfra-TRUST projektet (<http://www.trust-geoinfra.se/>). Även Kungliga Fysiografiska sällskapet i Lund och Sven Tyréns Stiftelse bidrog ekonomiskt i enskilda delprojekt inom doktorandprojektet.

BAKGRUND OCH SYFTE

Geofysiska metoder används för att undersöka underjorden inför t.ex. utbyggnad av bebyggelse och infrastruktur men även för miljörelaterade tillämpningar som t.ex. lokalisering av förorenat grundvatten. Elektrisk resistivitet är en relativt väletablerad metod där variationer i markens motstånd mot att leda ström undersöks längs vertikala profilsnitt av marken. Undersökningarna utförs genom att skicka ström mellan elektroder installerade vid markytan samtidigt som man mäter potentialskillnaden i andra punkter. Efter dataprocessering och s.k. invers modellering erhålls en tolkningsbar sektion över variationer i elektrisk resistivitet. Mekanismerna som styr variationen i elektrisk resistivitet mellan olika jord- och bergarter är välkända; därför kan resistivitetssektionerna ofta tolkas och översättas till olika typer av geologiskt material eller variationer inom materialet i undersökningsområdet, t.ex. varierande vatteninnehåll.

Resistivitetsmätningar genomförs genom att skicka ut vågformer som består av likströmströmpulser separerade med perioder utan ströminjektering. Under perioden direkt efter att strömpulsen stängts av kan man observera att det tar en viss tid för potentialen att klinga av. Detta fenomen kallas inducerad polarisation (IP) och är ett mått på hur marken kan laddas upp elektriskt. Fenomenet uppstår på mikroskala i det geologiska materialet genom att t.ex. sandkorn laddas upp elektriskt; sandkornsytor drar till sig elektriska laddningar från vattnet som arrangeras om i förhållande till det elektriska fältet. Man vet av erfarenhet att IP-effekter brukar vara stora över t.ex. sulfidmineralisering i berggrund eller gamla deponier, men i allmänhet behövs mer forskning för att bättre förstå hur IP-effekter varierar i olika material.

I laboratoriebaserad IP-forskning är det vanligt att använda frekvensdomän (FD)-instrument för att karaktärisera den s.k. spektrala IP-responsen hos olika material och koppla denna till olika materialegenskaper. I FD används växelström istället för likströmpulser, och frekvensen på den sända växelströmmen varierar i ett bestämt intervall. För varje frekvens mäts fas- och amplitudskillnaden mellan den insända strömmen och den uppmätta potentialen, vilket ger två spektrum som visar hur

dessa parametrar varierar med strömfrekvensen. Genom forskning fokuserad på framförallt sandiga konsoliderade och okonsoliderade material vet man att den spektrala IP (SIP)-responsen är beroende av materialets mikrostruktur; t.ex. har storleken och formen hos korn eller porhalsar i materialet en påverkan på hur lång avklingningstiden är.

Med ny och pågående utveckling av både datainsamlings-, processerings- och inversionsmetoder är det nu möjligt att få fram SIP-information även från fältdata mätt i tidsdomän. Med moderna instrument för resistivitets- och tidsdomän (TD) IP kan man idag samla in betydligt mer information än tidigare; hela ström- och potential-vågformerna kan lagras vilket också innebär att data kan processeras vidare efter själva fältmätningarna. Formen på potentialavklingningsförloppet i tidsdomän beskrivs med hjälp av olika modeller och resulterar i s.k. spektrala IP (SIP) parametrar. Den vanligaste modellen är den s.k. Cole-Cole modellen. Förutom resistiviteten innehåller Cole-Cole-modellen tre SIP parametrar som beskriver olika aspekter av IP-avklingningen; magnituden på IP-effekten, avklingningstiden och en s.k. frekvensexponent.

På detta sätt kan man idag få fram fyra istället för två inverterade parametersektioner från samma mätning. Dessa fyra sektioner beskriver olika aspekter av samma material. Men för att kunna ha nytta av denna nya och tillgängliga information måste man förstå hur spektrala IP parametrar uppstår och varierar i olika material. Utan denna kunskap går man miste om den användbara information som kan finnas i de spektrala IP parametrarna, och de förlorar därmed sitt värde. Det övergripande syftet med denna doktorsavhandling är därför att undersöka vilken extra information som kan fås fram om olika underjordiska material från inverterade spektrala IP parametrar från TD IP-undersökningar i fältskala. Det finns en del svårigheter med detta syfte; ett huvudproblem är att medan man idag främst har förståelse för SIP-responser i sandiga material (som undersökts i omfattande mängd med frekvensdomän IP i laboriemiljö). I fältmätningar kan man däremot förvänta sig många olika typer av material inom samma fältlokal. Till detta kommer skillnader i skala och mätmetod mellan labbmätningar i FD och fältmätningar i TD.

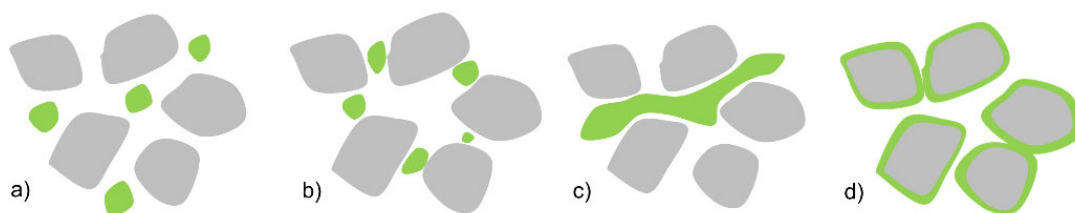
De huvudsakliga målet för denna avhandling är därför att undersöka den fysiska meningen av inverterade spektrala IP parametrar från TD IP mätningar i fältskala (med hänsyn till skillnader i mätskala och mätmetod samt geometrisk mikrostruktur i olika typer av material). Huvudsyftet kan brytas ned till två konkreta mål: att undersöka effekten av olika mikrostrukturer på SIP-responsen hos ett material, samt att minska forskningsgapet mellan FD SIP forskning i laboriemiljö och TD SIP tomografi i fältskala.

Tillämpningsmässigt är denna avhandling begränsad till att undersöka effekten av mikrogeometriska variationer i två olika typer av material. Den första tillämpningen är Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL)-förorenad sand, motiverat av ett samhälleligt behov av bättre metoder för att avgränsa förorenad mark under t.ex. f.d. kemptvättar och gamla deponier. Det andra tillämpningsområdet är kalksten, vilket motiveras

av att detta material fått väldigt begränsad uppmärksamhet i tidigare SIP-forskning samtidigt som kalksten är en relativt vanlig bergart i södra Sverige. Båda tillämpningarna tillhör öppna områden där mer forskning behövs inom forskningsfältet för SIP.

SAMMANFATTAT RESULTAT

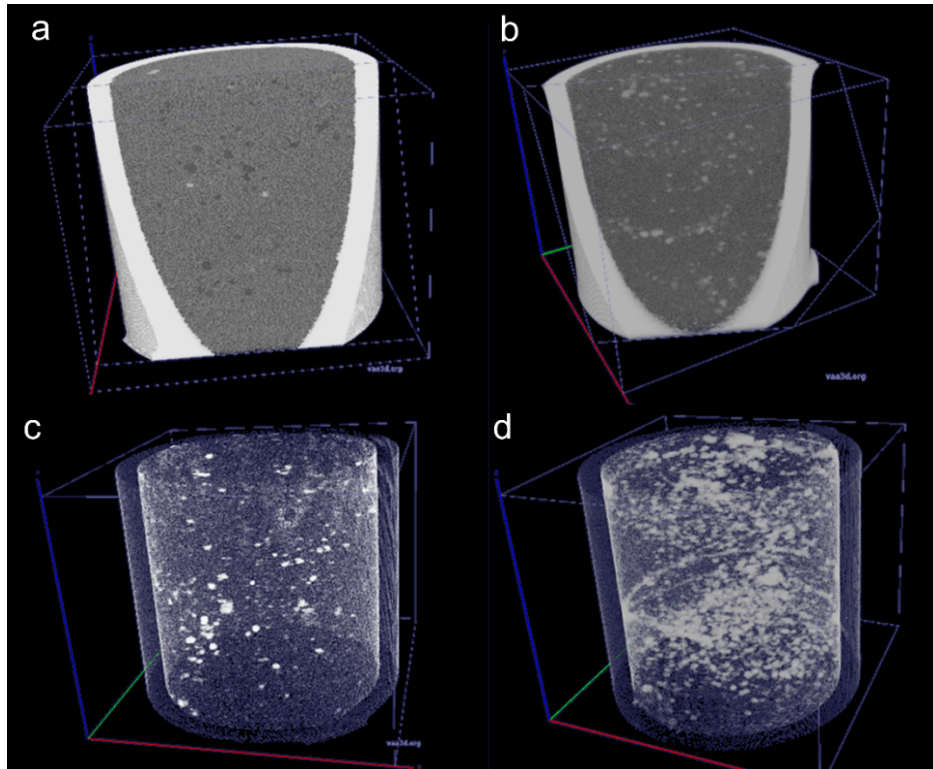
I Johansson *et al.* (2015) utfördes TD IP mätningar på tomt som tidigare huserat en kemtvätt, med stora mängder av NAPL-förorenad mark som följd. Föroreningen var perkloretylen (PCE), en icke-polär, högresistiv och tung oljelig förorening som sjunker genom grundvattnet och ofta ligger som en egen frifas i markens porsystem. Trots höga koncentrationer av PCE i föroreningens källområde påvisade de inverterade TD IP resultaten inget samband mellan föroreningskoncentration och storleken på IP-responsen (resistiviteten ökade både i och runt källområdet och var därför tvetydig att tolka). Laboratorieförsök från tidigare forskning där samband mellan NAPL-koncentration och IP spektra undersökts tyder dessutom på olika resultat i olika studier. Det finns ingen koncensus i forskningsfältet över hur frifas av NAPL påverkar materialets elektriska respons. Därför presenterades en teoretisk diskussion i Johansson *et al.* (2015), där den förväntade SIP-responsen relaterades till hur NAPL-föroreningen kan förväntas fördela sig geometriskt i markens porsystem. Figur 1 visar fyra möjliga NAPL-geometrier; droppar av NAPL i markporerna, (a) droppar av NAPL i porhalsarna, (b) sammanhängande NAPL-fas som sträcker sig över flera porer och porhalsar, (c) alternativt NAPLs som täcker sandkorn, (d). Resultaten av den teoretiska diskussionen visade att olika SIP-responser kan förväntas beroende på hur NAPL-fasen ändrar mikrogeometrin i materialet. T.ex. ger frifasgeometrierna i Figur 1a och 1b upphov till ökade IP-effekter medan geometrin i Figur 1 c snarare leder till minskade uppladdningseffekter hos materialet. Även de spektala (Cole-Cole) parametrarna (avklingningstiden och frekvensexponenten) påverkas på olika sätt. Anledningen är att även föroreningsfasen sannolikt erhåller ytladdningar som kan polariseras när ström sänds genom materialet (Johansson *et al.* 2015).



Figur 1. Beroende på hur föroreningsfrifasen av NAPL fördelar sig i porsystemet påverkas den förväntade SIP-responsen av materialet på olika sätt. Figur från Johansson (2019a), modifierad från Johansson *et al.* (2015).

Resultaten av den teoretiska diskussionen användes för att tolka fältdata från fältlokalen för den före detta kemtvätten. Två anomalier med förhöjda IP-effekter uppstod i utkanterna av källzonen, d.v.s. den zon med högst föroreningskoncentrationer. I själva källzonen uppstod ingen anomali; de geofysiska

resultaten korrelerade alltså inte med föroreningskoncentrationen. Med hjälp av resultaten som illustreras i Figur 1 tolkades de förhöjda IP-effekterna som nedbrytningszoner i utkanterna av källzonen, där frifasgeometrin konceptuellt kan förväntas vara fraktionerad som i Figur 1a eller 1b. För dessa geometrier förväntas förhöjda IP-effekter. I källzonen, där PCE-koncentrationerna är som högst, kan en frifasgeometri närmare Figur 1c förväntas, vilket kan förklara frånvaron av IP-effekter (Johansson *et al.*, 2015).



Figur 2. 3D-visualiseringar av röntgentomografiresultaten som visar PCE-fördelningen i två olika sandprover med låg PCE-koncentration (a och c) respektive hög koncentration (b och d). Figur från Johansson (2019a), modifierad från Johansson, Rossi *et al.* (2019).

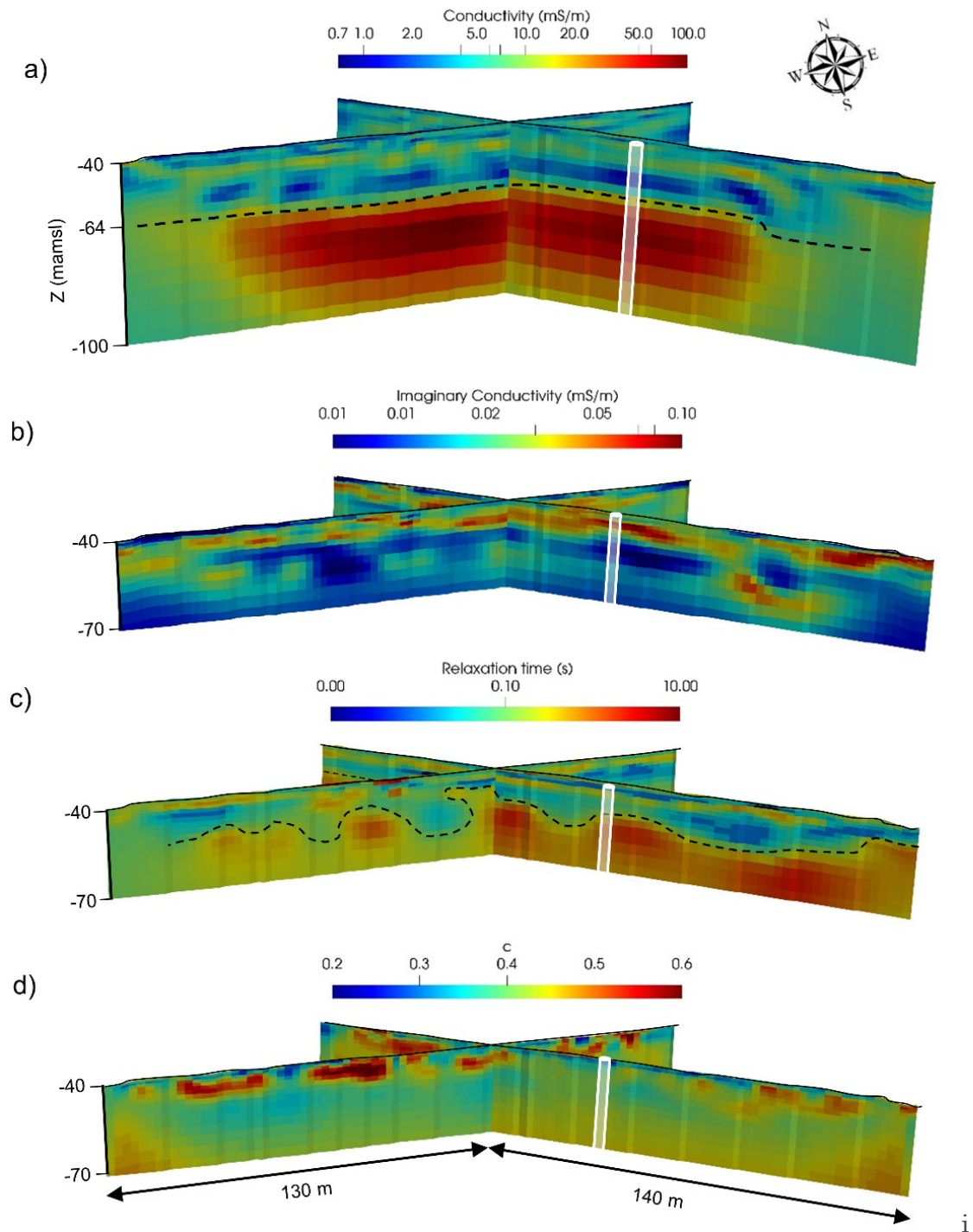
Den teoretiska diskussionen av de förväntade elektriska responserna av frifasfördelningen i Figur 1 hjälpte till att förstå och tolka fältdata i Johansson *et al.* (2015). Dock behövdes hypoteserna om SIP-responsens beroende av NAPL-geometrier testas experimentellt, vilket gjordes i Johansson, Rossi *et al.* (2019). I denna studie kombinerades SIP-mätningar på PCE-förorenade sandprover med röntgentomografi och bildanalys, vilket gav information om den verkligt uppnådda PCE-fördelningen i proverna. Totalt tre prover undersöktes; ett rent vattenmättat sandprov utan PCE samt två PCE-förorenade prover med låga respektive höga PCE-koncentrationer. I Figur 2 visas 3D-visualiseringar av röntgentomografiresultaten. Resultaten visar att frifasföroreningen är fördelad som isolerade droppar i provet med lägre PCE-koncentrationer (Figur 2a och 2c, jämför med Figur 1a), medan stora delar av frifasen hänger samman över större avstånd i provet med högre koncentrationer (Figur 2b och 2d, jämför med Figur 1c).

Resultaten av SIP-mätningarna visade att konduktiviteten ökade i båda de förorenade proverna medan IP-effekterna minskade jämfört med det rena

sandprovet. Resultaten av experimenten i Johansson, Rossi *et al.* (2019) tyder på att hypotesen om den elektriska responsen för frifasfördelningen i Figur 1c kunde bekräftas, d.v.s. minskade IP-effekter p.g.a. kortslutning längs den sammanhängande frifasen. Dock kunde inga tydliga slutsatser kunde dras från provet med lägre koncentrationer (Figur 2a och 2c) eftersom den elektriska förändringen i detta prov sannolikt beror på många olika faktorer. Mer liknande experiment krävs för att försöka återskapa och testa övriga frifasgeometrier i Figur 1, t.ex. geometrin i Figur 1a. Förutom en bättre förståelse för SIP-responser i NAPL-förorenade prover gav resultaten i Johansson, Rossi *et al.* (2019) även viktiga insikter om osäkerheter med provpreparering av förorenade prover. Bildanalysresultaten visade att förutsättningarna i proverna skiljde sig från vad som förväntades. Eftersom liknande provprepareringsmetoder använts i de flesta tidigare laboriестudier av SIP-responsen hos NAPL-förorenade prover skulle frånvaron av kunskap om vilken frifasdistribution som faktiskt erhålls i proverna kunna förklara varför tidigare forskningsresultat pekade i många olika riktningar.

I Johansson *et al.* (2017) undersöktes fältskaleresultat från TD IP-mätningar på en kalkstensberggrund i Kristianstadbassängen i syfte att hitta eventuella sprickzoner eller andra tecken på varierande bergkvalitet i undersökningsområdet. Det är i tidigare forskning väldigt ovanligt med studier av varierande SIP-responser i kalksten och förståelsen för detta materials elektriska beteende är därför allmänt dålig. TD IP- resultaten inverterades för SIP (Cole-Cole)-parametrar och påvisade relativt kraftiga variationer i de SIP-parametrarna. Som stöd för tolkningen av data i Johansson *et al.* (2017) studerades kalkstensprover från samma formation i mikroskop och med svepelektronmikroskopi (SEM) och kemisk mappning (EDS-analys). De mikroskopiska resultaten visade att storleken och formen på kalkstenskornen varierade på olika nivåer i berggunden, beroende på den dominerande faunan då kalkstenen avsattes. Dessutom varierade den kemiska sammansättningen, t.ex. förekomsten av pyrit- och glaukonit-mineraler, på olika nivåer. Dessa skillnader i mikrostruktur och kemisk sammansättning kan förklara varför SIP-responsen varierar kraftigt inom samma kalkstensformation (Johansson *et al.*, 2017).

I en uppföljande studie (Johansson, Lindskog *et al.*, 2019) gjordes en direkt jämförelse mellan TD IP mätningar i fältskala, inverterade för spektrala IP parametrar, med undersökningar av en kärna som borrades längs med en av mätlinjerna. Delar av kärnan vakuumpförpackades i fält för att därefter undersökas med FD SIP-mätningar i laboriet, följt av detaljerad karaktärisering av variationerna i kalkstenens fysiska egenskaper (porositet, densitet etc.), kalkstenstextur och dominerande fauna (genom tunnslip) och kemiska sammansättning (XRF-mätningar). Undersökningslokalen var Limhamns kalkbrott Malmö, på den andra pallen (ca -40 m.ö.h.) belägen ca 20 meter över den kända geologiska gränsen mellan Krita och Paleogen (K-Pg-gränsen, avsatt vid tiden för dinosauriernas utdöende). De inverterade fältresultaten visas i Figur 3 där K-Pg gränsen (streckad linje) syns som en tydlig skillnad i konduktivitet i Figur 3a (konduktiviteten eller den elektriska ledningsförmågan, är inversen av



Figur 3. Inverterade resultat från Limhamns kalbrott. a) konduktivitet, b-d) spektrala IP parametrar (Cole-Cole parametrar motsvarande storleken på IP-effekten (b), avklingningstiden (c) och frekvensexponenten (d)). Figur från Johansson (2019a), modifierad från Johansson, Lindskog *et al.* (2019).

resistiviteten). I Krita-kalkstenen är konduktiviteten betydligt högre vilket framförallt beror på att kalkstenen är generellt mycket mer finkorning än den ovanliggande Paleogena kalkstenen. Figur 3b - d visar de spektrala IP sektionerna. På denna fältlokal gav särskilt avklingningstiden upphov till intressanta resultat; den streckade linjen i Figur 3c visar en tydlig övergång från kortare till längre avklingningstider. Denna övergång tolkas som de bryozorika biohermstrukturer

som förekommer i den Paleogena kalkstenen i Limhamns kalkbrott och stämmer gemetriskt väl överens med den streckade linjen i Figur 3c. De långa avklingningstiderna beror troligen på den avlånga formen på bryozofragmenten i biohermerna (Johansson, Lindskog *et al.*, 2019).

Ett av huvudsyftena i Johansson, Lindskog *et al.* (2019) var även att jämföra de inverterade fältskaleresultaten mätta i TD med IP spektra från laboratorieundersökningar i FD av kärnor (med samma *in-situ* grundvattenförhållanden). Resultaten visade att det gick att hitta samma mönster i SIP-variationerna med båda metoderna på jämförbara nivåer under markytan, trots skillnaderna i mätmetod, mätskala och mätmiljö. Detta är ett viktigt resultat eftersom det tyder på att det är rimligt att använda sig av kunskap om SIP-variationer och materialparametrar som uppnåtts i laboratorieforskning för tolkning av fältskalemätningar inverterade för spektrala IP parametrar. Detta trots att laboratoriesambanden uppnåtts i en specifik och artificiell miljö och är opåverkade av faktorer så som t.ex. inversion av data.

En annan faktor som skiljer konventionella fältskaleundersökningar i TD från laboriemätningar är att de senare oftast utförs i FD. Även om TD- och FD-metoder är teoretisk ekvivalenta via Fouriertransformen kan faktorer så som sampling, mätbrus etc. påverka metoderna olika. En del tidigare studier har hävdade att det är praktiskt omöjligt att få fram spektral information från IP-mätningar i TD, ett påstående som prövas och bemöts i Johansson (2019b). Resultaten i Johansson (2019b) motsäger denna typ av generaliserande slutsatser och visar hur utfallet av SIP-responsen överförd till FD, mätt med TD IP vågformer, beror på olika parametrar relaterade till datainsamlingen, t.ex. samplingsfrekvensen och pulstiden.

SLUTSATSER

En huvudsaklig slutsats från detta arbete är att inversion av TD IP data för spektrala IP parametrar kan ge värdefull och användbar information om materialstrukturer i marken, information som skulle gått förlorad annars. Resultaten från de olika studierna av NAPL-förorenad jord och kalksten visar att man måste ha en konceptuell förståelse för materialets mikrostruktur för att kunna tolka spektrala IP parametrar, även i fältskala. En sådan förståelse kan signifikant underlätta tolkningen och göra mätsektionerna förståeliga och därmed värdefulla. Avhandlingens första konkreta mål, d.v.s. att undersöka effekten av olika mikrogeometriska strukturer på SIP-responsen i ett material, har uppnåtts genom dessa studier. Vidare har resultaten från denna avhandling gett stöd åt möjligheten att kunna extrapolera generella samband mellan materialparametrar och IP spektra mätta med FD-system i labb till inverterade spektrala parametrar (t.ex. Cole-Cole parametrar), mätta med TD-system i fält. Genom detta har det andra av de två konkreta målen med avhandlingen, d.v.s. att minska forskningsgapet mellan FD laboratorieforskning och TD fältundersökningar av SIP-responser, minskats, inte minst genom demonstrationen som visar att den spektrala upplösningen på TD IP

data är beroende av olika mätparametrar. Möjligheterna för att samla in data av hög kvalitet och med stor spektral bredd har redan ökat och fortsätter att öka med moderna instrument och datainsamlingmetoder.

YTTRELLIGARE INFORMATION

Kontaktpersoner

Sara Johansson, Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet.
E-post: sara.johansson@tg.lth.se

Torleif Dahlin, Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet.
E-post: torleif.dahlin@tg.lth.se

Litteratur

Johansson, S. 2019. Geometrical controls on spectral induced polarization in time and frequency domain, Engineering Geology, Lund University, ISBN: 978-91-7753-982-7.

Olsson, P.-I., 2018. Advances in time-domain induced polarisation tomography: Data acquisition, processing and modelling, Engineering Geology, Lund University, ISBN: 978-91-7753-850-9.

REFERENSER

Johansson, S., Fiandaca, G. and Dahlin, T. (2015). Influence of non-aqueous phase liquid configuration on induced polarization parameters: Conceptual models applied to a time-domain field case study, *Journal of Applied Geophysics*, **123**.

Johansson, S., Sparrenbom, C., Fiandaca, G., Lindskog, A., Olsson, P.-I., Dahlin, T. and Rosqvist, H. (2017). Investigations of a Cretaceous limestone with spectral induced polarization and scanning electron microscopy, *Geophysical Journal International*, **208**(2).

Johansson, S. (2019a). *Geometrical controls on spectral induced polarization in time and frequency domain*, Engineering Geology, Lund University, ISBN: 978-91-7753-982-7.

Johansson, S. (2019b). *Spectral analysis of time domain induced polarization waveforms*. Manuscript appended to doctoral thesis.

Johansson, S., Lindskog, A., Fiandaca, G. and Dahlin, T. (2019). Spectral induced polarization of limestone: time domain field data, frequency domain laboratory data and physicochemical rock properties, *Geophysical Journal International* (in review).

Johansson, S., Rossi, M., Hall, S. A., Sparrenbom, C., Hagerberg, D., Tudisco, E., Rosqvist, H. and Dahlin, T. (2019). Combining spectral induced polarization with x-ray tomography to investigate the importance of DNAPL geometry in sand sample, *Geophysics*, **84**(3), pp. 1–93.