

# FÖRBÄTTRINGAR INOM ELEKTRISK TOMOGRAFI AV UNDERGRUNDEN

*Ny mätstrategi, databearbetning och modellering*

Per-Ivar Olsson

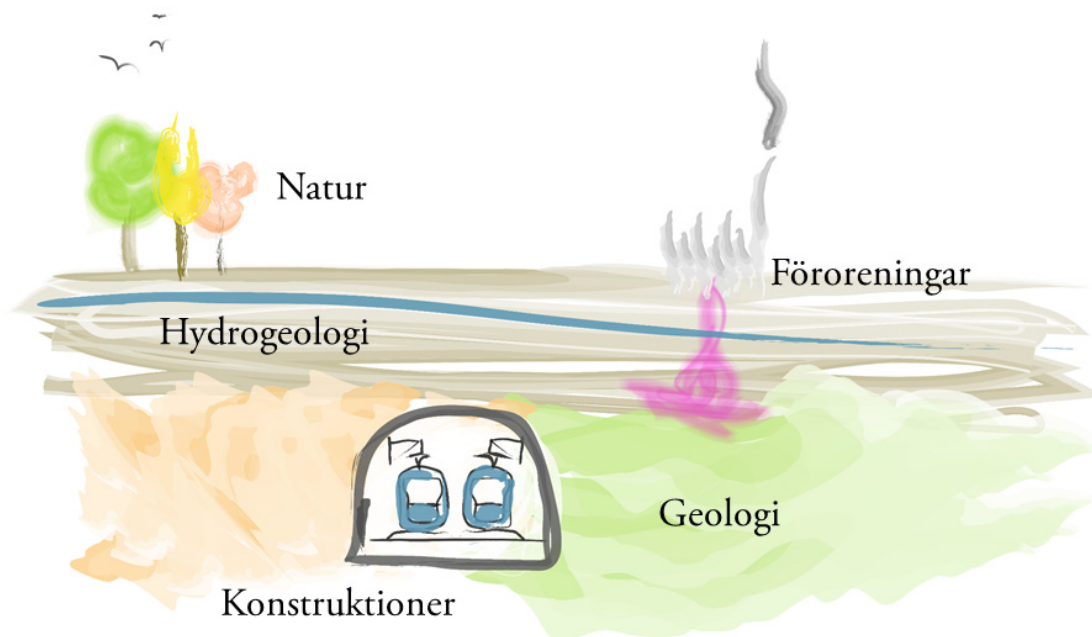
2019-04-05

# FÖRORD

Denna rapport sammanfattar resultaten från arbetet med en doktorsavhandling (Olsson, 2018), utfört vid avdelningen för Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, Sverige samt vid Hydrogeofysikgruppen, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet, Danmark. Avhandlingsarbetet är en fortsättning på material och resultat från ett licentiatavhandlingsarbete, därmed återges delvis samma material i de två publikationerna. Arbetet har finansierats av Formas (ref. 2012-1931), Befo (ref. 331) och SBUF (ref. 12719 och 13232). Projektet som arbetet utförts inom är en del av projektet TRUST-Geoinfra (<http://www.trust-geoinfra.se>). Ytterligare finansiering för samarbete med Aarhus Universitet har erhållits av Civilingenjören Hakon Hanssons stiftelse (ref.2015-0074) samt Ernhold Lundstöms stiftelse.

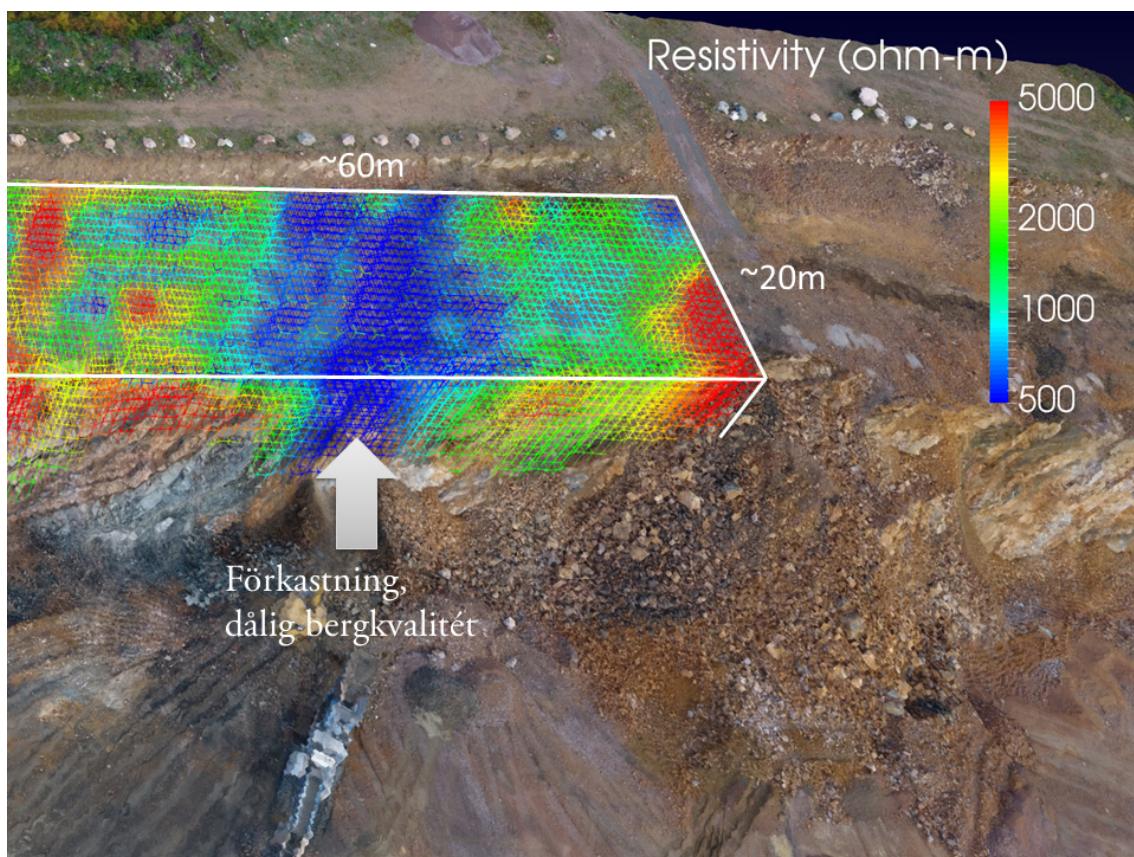
## BAKGRUND OCH SYFTE

Det finns ett ökande behovet av detaljerad information om undergrunden till följd av stadsexpansion, förtätning, utbyggnader av underjordiska konstruktioner (till exempel tunnlar) och miljörelaterade projekt (till exempel sanering av förorenade områden). En välbeprövad metod att förvärva denna typ av geo-information är geofysiska mätningar av markens elektriska resistivitet och uppladdningsförmåga. Avhandlingen sammanfattar utvalt arbete för att utveckla och öka användbarheten av metoden, med fokus på uppladdningsegenskaper, genom att reducera några av dessbegränsande flaskhalsar.



**Figur 1.** Illustration av några viktiga aspekter för undergrundsplanering som kan kartläggas med, eller vara behjälpliga av, geofysiska undersökningar.

Elektrisk resistivitetstomografi har använts framgångsrikt inom många undermarksprojekt för till exempel miljö- och ingenjörstillämpningar (Auken et al., 2014; Dahlin et al., 1999) och hydrogeologiska tillämpningar (Leroux and Dahlin, 2005). En inneboende svaghet hos resistivitetstomografimetoden är att olika material ha samma resistivitet, och det är således inte möjligt att skilja dem åt genom skillnader i resistivitet. Detta gör information om markens elektriska uppladdningsegenskaper särskilt värdefull eftersom den kan mätas samtidigt som resistiviteten med liten eller ingen extra ansträngning samtidigt som geo-material kan ha samma resistivitet men ha olika uppladdningsförmåga. Att ha två materialparametrar minskar alltså tvetydigheten när man kopplar elektriska mätresultat till geometri och material i undergrunden. Denna minskning i osäkerhet har visats tidigare i flera tillämpningar, till exempel för deponikartläggning (Dahlin et al., 2010; Leroux et al., 2007) och geologisk kartläggning (Slater and Lesmes, 2002).



**Figur 2. Exempel på 3D-visualisering av markens resistivitet baserat på elektriska mätningar tillsammans med en texturerad terrängmodell. Färgad volym visar kartlagd resistivitet, ett lågresistivt område som sammanfaller med en förkastning med dålig bergkvalitet är markerad. Se även Jonsson et al., 2019a, 2019b samt Olsson et al., 2017.**

Uppladdningsfenomenet kan utöver utvärdering av dess medelamplitud utvärderas ytterligare genom att beakta dess spektrala egenskaper, det vill säga dess frekvensberoende. Frekvensberoendet kan beskrivas med hjälp av olika modeller

och beroende på modellval kan ytterligare parametrar bestämmas från mätningarna för att reducera eventuell kvarvarande tvetydighet. Användningen av spektral uppladdningsinformation är fortfarande begränsad, men det finns flera exempel på forskningsstudier där informationen visat sig vara användbar. Till exempel för akviferkaraktisering (Fiandaca et al., 2018; Slater and Glaser, 2003), kartläggning av geokemiska förändringar (Doetsch et al., 2015a), permafrostövervakning (Doetsch et al., 2015b) och deponikartläggning (Gazoty et al., 2012b, 2012a; Maurya et al., 2017). Dessutom har användningen av spektral information vid framtagande av elektriska markmodeller (så kallat inversmodellering - inversion) visat sig reducera ekvivalensproblem för resistivitetsmodeller (Madsen et al., 2018).

Bestämning av markens uppladdningsegenskaper i samband med resistivitetsundersökningar ger alltså många fördelar. Beklagligtvis saknas ofta utvärdering av dessa egenskaper i tillämpade geoelektriska undersökningar och endast resistivitetsinformationen beaktas. Detta har troligtvis flera förklaringar, till exempel kan kunskap hos utvärderare saknas och äldre mätinstrument som har en begränsad förmåga att framgångsrikt kunna mäta uppladdningsegenskaperna är fortfarande i bruk. En annan viktig faktor är relaterad till kvalitet och tillförlitlighet hos mätdata. Eftersom mätningar av uppladdningsegenskaperna har lägre signal-brus-förhållanden jämfört med resistivitetsmätningarna kan datakvaliteten vara dålig. Användningen av data skulle därmed kräva mer tid för manuell bearbetning och kräva mer resurser för att utnyttjas. Sammantaget finns det ett stort behov för en generell förbättring av datakvaliteten för geoelektriska undersökningar och speciellt för mätningar av uppladdningsegenskaper. Vidare är det önskvärt att utveckla automatiserade metoder för datakvalitetsbedömning och datafiltrering. Detta gäller speciellt för de tredimensionella undersökningar som ofta krävs i stadsmiljö och vilka till sin natur kräver behandling av större mängder data samtidigt som de elektriska störningarna ofta är större.

Resurseffektivitet i termer om tid och kostnader för geoelektriska mätningar begränsar också användbarheten av metoden, speciellt när det gäller uppladdningsegenskaper. Större fältundersökningar kan kräva tiotusentals mätningar, där förhöjd datastackning och längre strömpulser kan krävas jämfört med standardmätningar. Det finns således ett behov av att optimera mät- och efterbearbetningsförfaranden för att reducera flaskhalsar och öka användbarheten av den geoelektriska mätmetoden. Genom att förfina och effektivisera metoden kan den vara till större nytta på fler platser och användas för att få information om marken med mer begränsade resurser. Därmed har syftet för arbetet varit att öka användbarheten av metoden. Specifikt, har det satts upp mål gällande minskad fältarbetstid och -kostnad, förbättrad datakvalitet, -pålitlighet och ökat informationsinnehåll samt minskade resursbehov för efterbearbetning av mätdata.



# SAMMANFATTAT RESULTAT

Avhandlingen handlar om hur vi kan utveckla och förbättra användningen av geoelektriska undersökningar av marken. Metoden har använts och utvecklats sedan förra sekelskiftet men det finns fortfarande flaskhalsar som begränsar dess användning. Ett exempel är i städer där bland annat elinstallationer (Figur 3, mittbild) och en rörig miljö i marken förvirrar strömmen. Vi behöver då filtrera dess bild av marken för att kunna utnyttja mätresultaten. Användningen av metoden kan också begränsas av brist på resurser för att utföra undersökningarna eller för göra ordentliga tolkningar av informationen. Genom att förfina och effektivisera metoden kan den alltså vara till större nytta på fler platser och användas för att få information om marken med mer begränsade resurser.

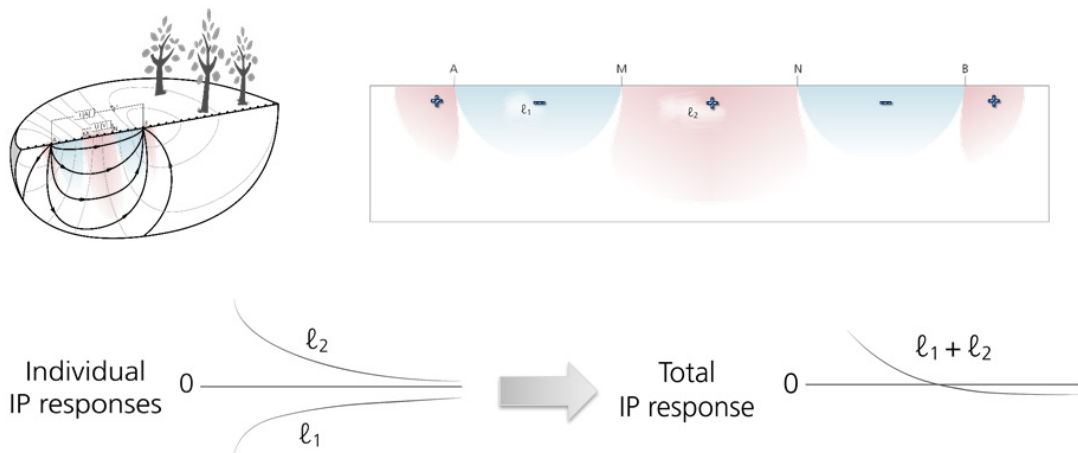


$$u_{measured} = u_{response} + u_{drift} + u_{harmonic\ noise} + u_{spikes} + u_{other}$$

**Figur 3.** Exempel på hur den uppmätta signalen kan betraktas som en summering av flera olika källor där den eftersökta komponenten  $u_{response}$  ingår.

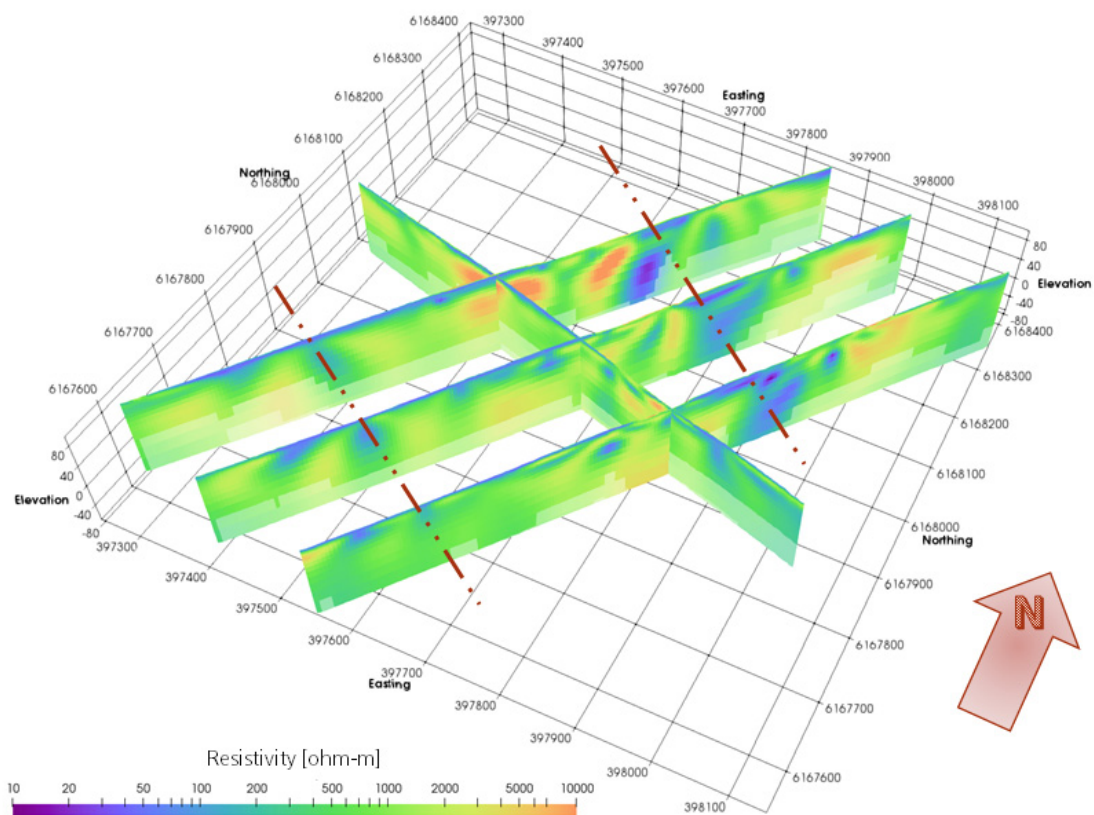
I avhandlingen beskrivs hur man kan filtrera signaler från elektriska markundersökningar och hantera störningar från olika elinstallationer, ungefär som att sätta på metoden ett par brusreducerande hörlurar. Filtringen gör att man kan få ut mer information om marken och ett mer pålitligt mätresultat. En annan förbättring som har utvecklats är att förändra formen på strömmen som skickas ner i marken. Formändringen gör att tiden som krävs för en undersökning nästan halveras samtidigt som man får dubbelt så stark signal, som att lyssna igenom en podcast på halva tiden med bättre ljudkvalitet.

Ett annat sätt att förbättra undersökningarna är att öka vår förståelse för vad elen berättar om marken. Avhandlingen beskriver hur mätresultat som tidigare betraktats som felaktiga kan uppkomma och att dessa faktiskt är fysiskt möjliga (Figur 4). Genom att inte förkasta dessa resultat kan vi få ut mer information från mätningarna och säkrare modeller av marken samtidigt som översättningen av mätresultat kan bli enklare. Dessutom beskrivs hur vi kan kompensera för effekter av hur länge strömmen sänds ner i marken. Om effekterna inte hanteras får man olika elektriska bilder av samma mark beroende på om man skickar ström någon sekund längre eller kortare.



**Figur 4. Figuren sammanfattar hur mätdata som tidigare ansågs felaktiga kan erhållas genom summering av uppladdningsbidrag från olika delar av marken.**

Avhandlingens förbättringar och effektiviseringar visas bland annat med resultat från en större undersökning som kartlägger geologi i termer av motstånd och uppladdning ned till 200 meter under markytan (Figur 5). Sådan information är viktig och kan underlätta att ta bättre beslut, till exempel i samband med infrastrukturprojekt, för en mer hållbar framtid. Förhoppningsvis kan avhandlingen öka användandet av elektriska markundersökningar så att vi kan ta mer informerade beslut i framtiden.



**Figur 5. Exempel på resultat från storskaliga geoelektriska undersökningar som kartlagt geologiska strukturer (markerad med brun linje) kopplade till Tornqvistzonen. De tre parallella sektionerna är 1 km långa, den korsande 800 m.**

# SLUTSATSER

Arbetet som presenteras i avhandlingen visar på att många flaskhalsar för geoelektriska undersökningar kan avlägsnas. Specifikt kan fältresurseffektiviteten ökas med optimering av strömvågform, vilket minskar mättiden och samtidigt ökar signal-brus-förhållandet med upp till en faktor av två. Samtidigt minskar de resurser som krävs för efterbearbetning då datakvalitet och -tillförlitlighet förbättras genom nya och förbättrade signalbehandlingsalgoritmer.

Trots omfattande förbättringar krävs det fortfarande betydande arbete vid utvärdering av *spektrala* uppladdningsegenskaper. Därför finns utrymme för ytterligare utveckling i samband med datainsamling, förbättring av kvalitet och efterbearbetning av data. Det nu utförda arbetet lägger dock till små men betydande bidrag till metodens utveckling och ökad vetenskaplig förståelse. Dessutom har flera av forskningsresultaten redan gjorts tillgängliga för samhället i stort genom implementering i kommersiella mätinstrument och programvaror. Sådan spridning kan det bidra till och öka användningen av metoden för förvärv av detaljerad information om undergrunden. Denna information kan förhoppningsvis leda till ett mer hållbart samhälle genom att möjliggöra informerade undermarksbeslut, effektivare resursanvändning och minskade ekonomiska, sociala och miljömässiga risker.

# YTTRELLIGARE INFORMATION

## *Kontaktpersoner*

Per-Ivar Olsson, Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet.

Telefon: 046 - 222 89 83

E-post: per-ivar.olsson@tg.lth.se

Torleif Dahlin, Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet.

Telefon:046 - 222 96 58

E-post: torleif.dahlin@tg.lth.se

## *Litteratur*

Johansson, S. 2019. Geometrical controls on spectral induced polarization in time and frequency domain, Engineering Geology, Faculty of Engineering, 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, Faculty of Engineering, Lund university, ISBN: 978-91-7753-850-9.

# REFERENSER

- Auken, E., Doetsch, J., Fiandaca, G., Christiansen, A.V., Gazoty, A., Cahill, A.G., Jakobsen, R., 2014. Imaging subsurface migration of dissolved CO<sub>2</sub> in a shallow aquifer using 3-D time-lapse electrical resistivity tomography. *J. Appl. Geophys.* 101, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.11.011>
- Dahlin, T., Bjelm, L., Svensson, C., 1999. Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 32, 163–173.
- Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V., 2010. Resistivity-IP mapping for landfill applications. *First Break* 28.
- Doetsch, J., Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, A.V., Cahill, A.G., 2015a. Field-scale time-domain spectral induced polarization monitoring of geochemical changes induced by injected CO<sub>2</sub> in a shallow aquifer. *Geophysics* 16, 10294. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0315.1>
- Doetsch, J., Ingeman-Nielsen, T., Christiansen, A. V., Fiandaca, G., Auken, E., Elberling, B., Adamson, K., Lane, T., Elberling, B., 2015b. Direct current (DC) resistivity and induced polarization (IP) monitoring of active layer dynamics at high temporal resolution. *Cold Reg. Sci. Technol.* 119, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.07.002>
- Fiandaca, G., Maurya, P.K., Balbarini, N., Hördt, A., Christiansen, A. V., Foged, N., Bjerg, P.L., Auken, E., 2018. Permeability Estimation Directly From Logging-While-Drilling Induced Polarization Data. *Water Resour. Res.* 54, 2851–2870. <https://doi.org/10.1002/2017WR022411>
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., Christiansen, A. V., Pedersen, J.K., 2012a. Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1793–1804. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1793-2012>
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., Christiansen, A. V., 2012b. Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: The Eskelund case study. *Near Surf. Geophys.* 10, 575–586. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012046>
- Jonsson, P., Johansson, L., Johansson, S., Olsson, P.-I., Dahlin, T., 2019a. Tredimensionell bergundersökning med geoelektriska och geologiska metoder, BeFo Rapporter. Stiftelsen bergteknisk forskning.
- Jonsson, P., Johansson, L., Johansson, S., Olsson, P.-I., Dahlin, T., 2019b. Geofysiker, drönare och geologer ger tillsammans en bättre bild av berget. *Bygg Tek.* 4.
- Leroux, V., Dahlin, T., 2005. Time-lapse resistivity investigations for imaging saltwater transport in glaciofluvial deposits. *Environ. Geol.* 49, 347–358. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0070-7>
- Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., 2007. Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Härlov, Southern



- Madsen, L.M., Fiandaca, G., Christiansen, A.V., Auken, E., 2018. Resolution of well-known resistivity equivalences by inclusion of time-domain induced polarization data. *Geophysics* 83, E47–E54. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0009.1>
- Maurya, P.K., Rønde, V.K., Fiandaca, G., Balbarini, N., Auken, E., Bjerg, P.L., Christiansen, A.V., 2017. Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography - with correlation to ionic strength measured in screens. *J. Appl. Geophys.* 138, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2017.01.019>
- 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.
- Olsson, P.-I., Jonsson, P., Johansson, S., Johansson, L., 2017. BeFo 382 - Detailed Comparison Study of 3D-characterized Rock Mass and Geophysical Models, in: *Near Surface Geoscience 2017 - 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Malmö, Sweden. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201702005>
- Slater, L.D., Glaser, D.R., 2003. Controls on induced polarization in sandy unconsolidated sediments and application to aquifer characterization. *Geophysics* 68, 1547. <https://doi.org/10.1190/1.1620628>
- Slater, L.D., Lesmes, D., 2002. IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics* 67, 77–88. <https://doi.org/10.1190/1.1451353>