

DCIP TOMOGRAFI FÖR KARTLÄGGNING AV JORDDJUP OCH STRUKTURER I BERG

DCIP tomography for mapping of depth to rock and bedrock structures

Torleif Dahlin, Teknisk Geologi, LTH / Lunds Universitet

Sara Johansson, Teknisk Geologi, LTH / Lunds Universitet

Per-Ivar Olsson, Teknisk Geologi, LTH / Lunds Universitet

Matteo Rossi, Teknisk Geologi, LTH / Lunds Universitet

Mathias Ronczka, Teknisk Geologi, LTH / Lunds Universitet

Sammanfattning

Det finns planer på att bygga ett energilager i berget vid Önnestöv nära Dalby i Skåne. Berggrunden utgörs av en del av Romeleåsen och består huvudsakligen av gnejs med inslag av amfibolit och diabasgångar. Området ligger omedelbart söder om Sydstens stora bergtäkt, där det framgår att berget till stora delar är kraftigt uppsprucket med lervittrade zoner av olika storlek. I samband med byggande genom zoner med sprickor och vittring finns risk för problem med inläckage av vatten och stabilitet. Vidare kan variationer i djup till bergets överyta ge stabilitetsproblem i de övre delarna av en tänkt konstruktion.

Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) är en etablerad förundersökningsmetod inför tunnelprojekt, och har använts i stor skala för bland annat Hallandsåstunneln. Metoden ger kontinuerliga modeller av variationer i bergets elektriska egenskaper som kan kopplas till variationer i bergets mekaniska och hydrauliska egenskaper. Då elektrisk resistivitet (DC) kombineras med inducerad polarisation (IP) kallas metoden DCIP-tomografi, vilken kan ge ytterligare information om variationer i materialegenskaper i berget. Med hjälp av nya förbättrade metoder för datainsamling, förprocessering och tolkning är det möjligt att på ett tids- och kostnadseffektivt sätt samla in stora mängder IP-data av god kvalitet, vilket banar väg för bättre och mera nyanserade modeller av berget och variationer i dess egenskaper. Den nyutvecklade tekniken har testats i full skala vid Önnestöv, där tre parallella DCIP sektioner om 1 km med ett maximalt undersökningsdjup på cirka 170 m, plus en 800 m lång korsande sektion har mätts. Vidare har DCIP loggning utförts i två hammarborrhål ned till 200 m djup. I samma borrhål har det även gjorts loggning av diameter, naturlig gammastrålning, seismisk gånghastighet samt flöde under pumpning.

Den geologiska tolkningen av DCIP resultaten stämmer väl överens med vad man kan förvänta sig då man jämför modellerna med dokumentationen av jorddjup samt variation i sprickighet och vittringsgrad från bormningarna. Fördelen med DCIP resultaten är att man får kontinuerliga modeller som kan kopplas till variation i jorddjup, strukturer i berget och hydrogeologiska förutsättningar. De kombinerade undersökningarna med ytbaserade mätningar och borrhålsmätningar kompletterar varandra och ger en säkrare totalbild av variationer i bergförhållandena.

Abstract

There are plans to build an energy storage in the rock at Önnestölv near Dalby in Skåne. The bedrock is of a part of Rönneåsen and mainly comprises gneiss, with elements of amphibolite and dolerite intrusions. The area is located immediately south of the Sydsten's large rock quarry, which shows that the rock is mostly heavily fractured with clay weathered zones of different sizes. In connection with underground construction fractured zones and weathering constitutes a risk for problems with water inflow and stability. Furthermore, variations in depth to the upper surface of the rock can lead to stability problems in the upper portions of a planned construction.

Electric resistivity tomography (ERT) is now an established pre-investigation method for tunnel projects, and it has been used on a large scale in connection with for example the Hallandsås Tunnel. The method provides continuous models of variations in the electrical properties of the rock in two (2D) and three dimensions (3D) that can be linked to variations in the rock mechanical and hydraulic properties. ERT measured by a combination of DC resistivity and induced polarization can be called DCIP tomography, which can provide additional information about the variation in the material properties of the rock. With the help of new and improved methods of data acquisition, processing and interpretation it is possible to collect large amounts of good quality IP data in a time and cost effective way, paving the way for better and more nuanced models of the rock and variations in its properties. The newly developed technology has been tested in full scale at Önnestölv. Three parallel DCIP sections about 1 km long, with a maximum survey depth of about 170 m were measured, plus a 800 m long cross-section. Furthermore, DCIP logging was carried out in two percussion drill holes down to 200 m depth in which it is furthermore made logging of diameter, natural gamma radiation, seismic velocity and flow rate during pumping.

Geological interpretation of the DCIP results agree well with what one can expect from the documentation of soil depth, and variation in degree of fracturing and weathering as documented from drilling. A major advantage is continuous models that can be linked to variation in soil depth, structures in the rock and hydrogeological conditions. The combined surveys with surface-based measurements and borehole measurements are complementary and provide a more reliable overall picture of the variations in rock conditions.

Inledning

En undersökning med DC resistivitet och tidsdomän inducerad polarisation (DCIP) genomfördes längs fyra linjer vid Önnestöv nära Dalby i södra Sverige. Syftet med undersökningen var att kartlägga variationer i bergkvalitet, som en del av platsundersökningar för en planerad underjordisk anläggning. Seismiska undersökningar gjordes längs tre av linjerna under samma vecka som DCIP undersökningen. Även magnetisk profilering har gjorts i området.

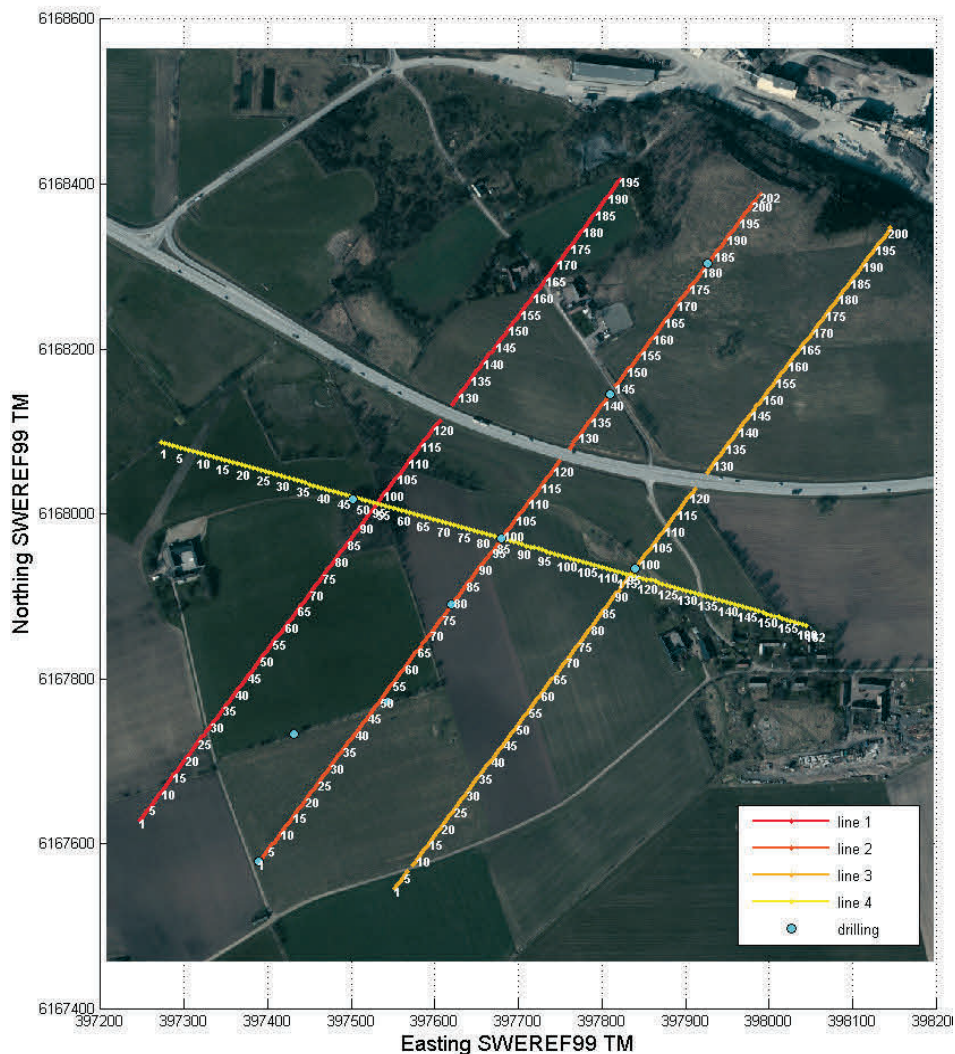
Instabilt eller vattenbärande berg är vanliga problem vid undermarksbyggande, vidare kan ytlig bergtäckning över anläggningar skapa stabilitetsproblem. Elektrisk resistivitets-tomografi (ERT) har visat sig vara ett användbart verktyg för att kartlägga variationer i bergkvalitet som kan kopplas till variationer i bergkvalitet med relevans för undermarksbyggande (t.ex. Rønning et al 2014; Danielsen och Dahlin 2009; Dahlin et al 1999; Dahlin och Sturk 1998). Denna studie syftar till att förfinas karakteriseringen genom att lägga till information från mätningar av IP effekter.

Metodbeskrivning

Undersökningen gjordes längs 4 linjer med 800-1000 m längd, varav tre parallella och en korsande linje (Figur 1). Ett dubbelt kabelutlägg med totalt 162 elektroder med 5 m separation användes vilket totalt resulterade i ett 810 m långt utlägg. Utlägg med separerade elektrodkablar användes för att säkerställa en så bra kvalitet som möjligt för IP-data genom att minska risken för kapacitiv koppling i kablarna (Dahlin och Leroux 2012). En komplicerande faktor för datainsamlingen var att en större väg med tung trafik korsade tre av linjerna. Detta hanterades genom att borra horisontella borrhål under vägen och förlängningskablar användes för att länka samman utläggen på vardera sidan av vägen (Figur 1).

Datainsamlingen gjordes med en ABEM Terrameter LS med 12 mätkanaler och elektrodkonfigurationer av multipel gradient-typ (Dahlin och Zhou 2006). Mätningarna gjordes med hjälp av en fyrkantsvågform med s.k.100% arbetscykel (Olsson et al 2015) och med 4 sekunder långa strömpulser.

DCIP data extraherades från de registrerade vågformerna som sparats med en datahastighet på 3750 Hz. Vid dataextraheringen utnyttjades den metod för datafiltrering och förädling som presenterats av Olsson et al (2016). De inverterade IP-modellerna som presenteras här motsvarar integrerade skenbara IP-effekter.



Figur 1. Placering av undersökningslinjer i förhållande till Väg 11 och stenbrottet.
 Figure 1. Layout of survey lines in relation to road and quarry.

Kontaktmotståndanden varierade från några hundra Ω till mer än 10 k Ω , med genomsnittliga motstånd mellan 2,2-3,8 k Ω . De uppmätta sektionerna innehåller mellan 3298 och 4264 datapunkter vardera, där antalet datapunkter varierar beroende på längden av linjen och antalet elektroder som exkluderades i samband med vägkorsningar. Även om harmoniska

störningar från elnätet och transienter, förmodligen från elektriska kreatursstängsel, ses i de registrerade vågformerna uppvisar integrerade resistiviteter och uppladdningseffekter data av god kvalitet. Detta medförde att endast 2-8 datapunkter redigerades bort från respektive datasektion innan inversion.

Res2dinvx64 (ver. 4.04.35) användes för inversnumerisk modelltolkning (inversion) av data med L1 norm (robust) inversion. Inversionen resulterade i modeller med bra modellpassning, med medelresidualer i intervallet 1,1 - 2,8% för resistivitet och 1,5-4,1% för laddningsbarhet (uppladdningseffekter).

Baserat på resultaten från undersökningarna med DCIP och seismik valdes ett antal representativa punkter för borrning ut, och totalt åtta hammarborrhål borrades till ett djup av 200-250 m. Geofysisk loggning utfördes därefter i några av borrhålen. Ett stort stenbrott ligger strax norr om det undersökta området (synlig i den övre kanten i figur 1), vilket ger en utmärkt översikt över de geologiska förhållanden som kan förväntas i undersökningsområdet. Ett exempel på en vertikal vittrad zon i stenbrottet visas i figur 2.

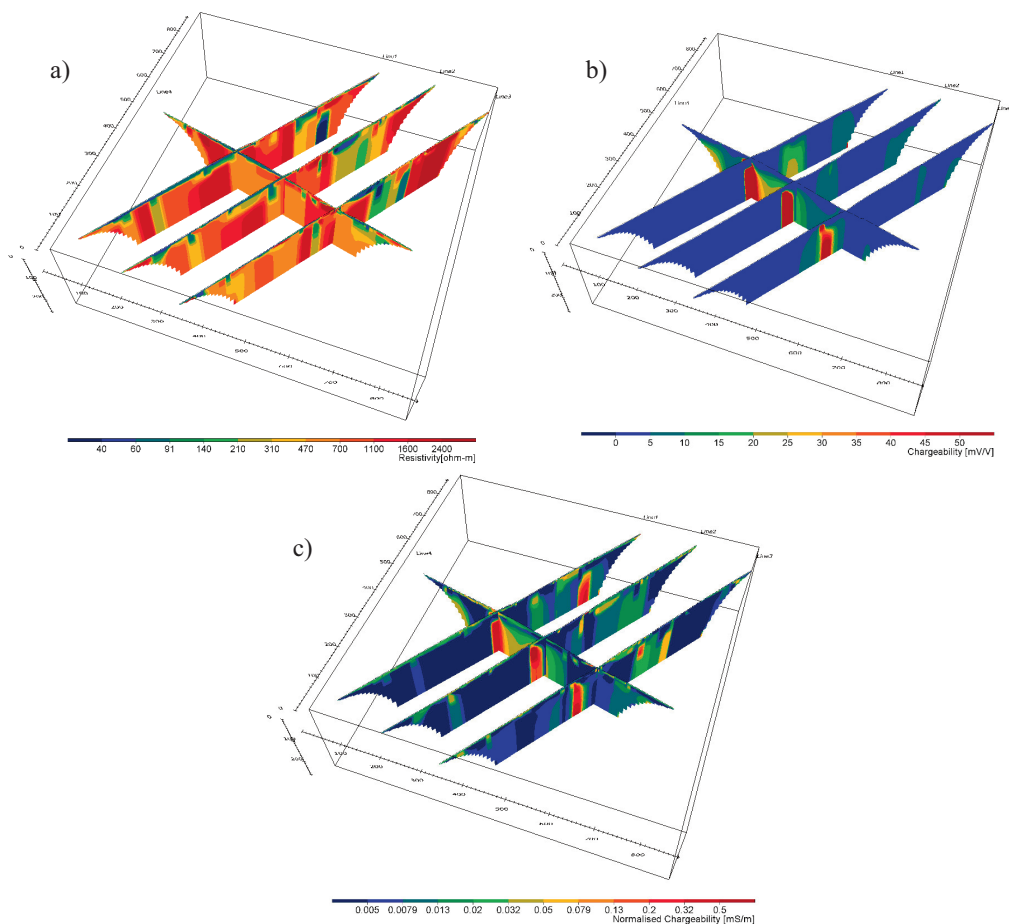


Figur 2. Exempel på en vertikal vittrad zon i stenbrottet som ligger intill undersökningsområdet. Lägg märke till den starkt uppspruckna karaktären hos bergmassan som omger den vittrade zonen, vilket är typiskt för berget som är exponerat i stenbrottet.

Figure 2. Example of a vertical weathered zone in the quarry which is situated next to the survey area. Notice the highly fractured character of the rock mass surrounding the zone, it is typical for the rock that is exposed in the quarry.

Resultat

Resistivitetsmodellerna (figur 3a och figur 4a) visar ett övre skikt med lägre resistivitet, mestadels mindre än 10 m i mäktighet men på vissa ställen upp till 20-30 m djupt (t.ex. linje 1-400 m; line 3-550 m). Detta övre lågresistiva lager tolkas som jordlager, vilket har bekräftats av bormning (Figur 4). På vissa ställen, där de underliggande strukturerna har låg resistivitet finns det ingen tydlig gräns mellan de övre och undre lagren, t.ex. Linje 2 vid 700 m (fig 4a). I andra delar av området kan ett tunt lager med högre resistivitet urskiljas ovanpå en lågresistiv enhet.



Figur 3. Översikt av inverterade modeller från Önnestöv; a) resistivitet, b) laddningsbarhet (IP-effekt), c) normaliserad laddningsbarhet.

Figure 3. Overview of inverted models from Önnestöv; a) resistivity, b) chargeability, c) normalised chargeability.

Resistivitetssektionerna (figur 3a och figur 4a) domineras för övrigt av ett antal mer eller mindre vertikala strukturer med omväxlande hög och låg resistivitet. Resistiviteten hos dessa zoner varierar från under 40 till över 2400 Ωm , med stora zoner med resistiviteter på ett fåtal hundra Ωm . Detta tolkas som berggrund med varierande grad av sprickbildning och vittring, där berggrunden består av gnejs, amfibolit och diabasgångar samt mindre förekomst av andra bergarter. De mest resistiva zonerna förväntas bestå av berg med en relativt låg sprickfrekvens, medan lägre resistivitet tyder på en högre grad av sprickbildning och möjligtvis vittring. De lågresistiva zonerna tros vara förknippade med de mest vittrade delarna av berget vilka kan vara förenade med stabilitetsproblem vid undermarksbyggande. Kristallint berg med resistiviteter i storleksordningen hundratals Ωm kan tolkas som vattenförande, där potentiellt hög hydraulisk konduktivitet också kan ge bergtekniska problem.

IP-modellerna för de tre parallella linjerna (figur 3b och figur 4b) liknande varandra i det att alla uppvisar en skarp och distinkt anomali med hög laddningsbarhet nära centrum av sektionen (över 100 mV/V). Denna zon är också synlig i den kortare vinkelräta linjen men med ett mer utsträckt utseende vilket man kan förvänta sig eftersom zonen korsas med en annan vinkel. Dessutom finns det mer diffusa zoner med förhöjd uppladdningsbarhet i den nordöstra delen av de tre parallella linjerna. Den tydligaste zonen med förhöjd IP sammanfaller med en zon med lägre resistivitet. Zonen kan tolkas som berg med en hög grad av sprickbildning och vittring, t.ex. en uppsprucken och delvis vittrad diabasgång. Uppladdningsbarheten indikerar här en eventuell mineralisering i sprickorna. Eftersom zonen ligger under eller nära en telefonkabel (som inte längre används) kan det inte helt uteslutas att de geofysiska signalerna orsakas av denna. Djupet till ovankant av anomalierna och deras utsträckning mot djupet tyder dock på att de är geologiskt betingade. De mer diffusa zonerna med förhöjd laddningsbarhet kan vara orsakade av tektoniserat och sprickigt berg med mineralisering och vittring.

Den normaliserade laddningsbarheten (figur 3c och figur 4c) visar i princip samma mönster som uppladdningsbarheten, men vissa nyanser framträder tydligare. Till exempel syns en övergång som skulle kunna utgöra övergången mellan jord och sprickigt berg tydligare i delar av sektionerna.

De inverterade sektionerna uppvisar mycket vertikala strukturer, och dessa har sannolikt ett överdrivet vertikalt utseende. Detta hänger samman med det sätt programvaran arbetar på och standardinställningarna för parametrarna som styr inversionen, men även det faktum att modellernas upplösning avtar med djupet.

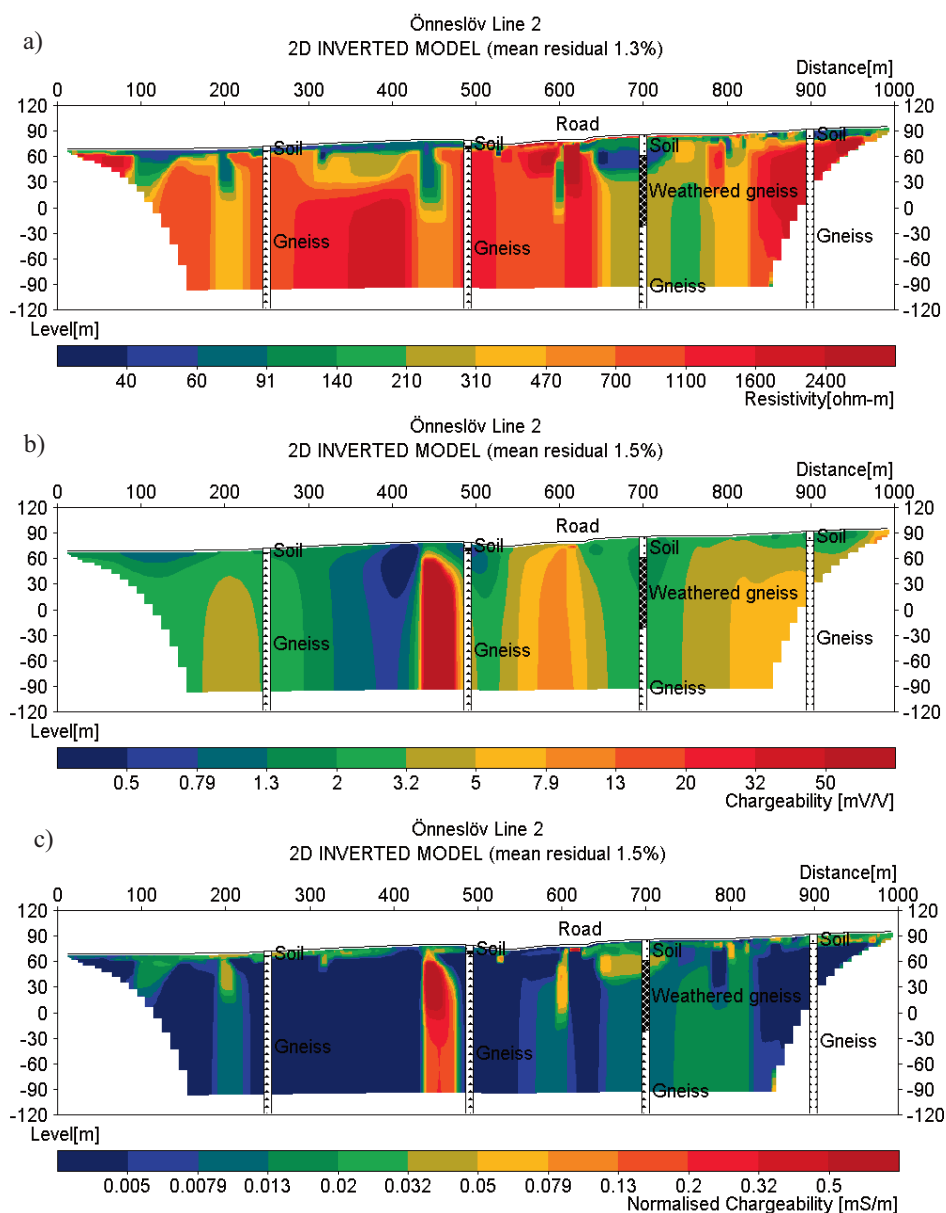


Figure 4. Inverted models from Line 2 at Önneslöv with geological logs from percussion drilling; a) resistivity, b) chargeability, c) normalised chargeability.

Slutsatser och fortsatt arbete

DCIP resultaten visar ett ytligt skikt som motsvarar ett jordlager ovan bergytan. En stor del av variationerna i de elektriska egenskaperna i berggrunden verkar återspegla variationen i bergkvalitet som kan förväntas vid Önneslöv att döma av det närliggande stenbrottet. Den information som kan erhållas från de tillgängliga hammarborrningarna är dock begränsad vilket också begränsar möjligheterna att finna samband mellan borrhåsdokumentationen och de geoelektriska modellerna. Geofysisk borrhålsloggning har utförts som komplement för att kunna koppla mer detaljerade borrhålsdata till modellsektionerna från DCIP-mätningarna. Borrhålsloggningarna möjliggör mer detaljerade analyser och mer ingående tolkningar och inkluderar flödeslogg, naturlig gammastrålning, seismisk hastighet och resistivitet-IP. Arbete pågår med att invertera data för spektrala IP-parametrar, och en fördjupad analys av DCIP modeller tillsammans med dokumentation från borrhning, provtagning och analys kommer att göras i syfte att karakterisera berget i termer av variation i egenskaper som är relevanta för undermarksbyggande.

Tack

Arbetet finansierades av Skanska Sverige AB, Formas - Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande (ref 2012-1931.) BeFo - Stiftelsen Bergteknisk Forskning (ref. 314 och 331) och SBUF - Svenska Byggbranschens utvecklingsfond, (ref 12718 och 12719.). Projektet är en del av ramverket Geoinfra-TRUST (Transparent Underground Structure, <http://www.trust-geoinfra.se/>). Vi tackar Skanska Sverige AB och Sweco Environment AB för ett givande samarbete.

Referenser

Dahlin T. and Leroux V., 2012, Improvement in time-domain induced polarisation data quality with multi-electrode systems by separating current and potential cables: Near Surface Geophysics, 10, 545-565.

Dahlin, T. and Zhou, B., 2006, Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging: Near Surface Geophysics, 4, 113-123.

Dahlin, T. and Sturk, R., 1998, Resistivity pre-investigations for the Hallandsås railway tunnel, Sweden, in Underground Construction in Modern Infrastructure, ed. T. Franzén, S.-G. Bergdahl and A. Nordmark, ISBN 90 5410 964 5, Balkema, Rotterdam, p 135-141.

Dahlin, T., Bjelm, L. and Svensson, C., 1999, Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden, Quarterly Journal of Engineering Geology, 32(2), 163-173.

Danielsen, B.E. and Dahlin, T., 2009, Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation. Engineering Geology, 107, 118–129.

Olsson P.-I., Dahlin T., Fiandaca G. and Auken E., 2015, Measuring time domain spectral induced polarization in the on-time – decreasing the acquisition time and increasing the signal levels: Journal of Applied Geophysics, 123, 316-321.

Olsson P.-I., Fiandaca G., Juul Larsen J., Dahlin T. and Auken E., 2016, Doubling the spectrum of time-domain induced polarization by harmonic de-noising, drift correction, spike removal, tapered gating and data uncertainty estimation, Geophysical Journal International, 207(2): 774-784.

Rønning J.S., Ganerød G.V., Dalsegg E., Reiser F., 2014, Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model, Bull Eng Geol Environ, 73, 1225–1244.