

Geoelektriska metoders tillämpbarhet vid bergbyggnadstekniska förundersökningar

The applicability of geoelectrical methods in pre-investigation for construction in rock

Berit Ensted Danielsen, Engineering Geology, Lund University

Sammanfattning

Byggande i berg är förenat med risker, eftersom kunskap om geologin och markförhållandena är begränsad. Oförutsedda grundförhållanden innebär en stor risk för projektet och kan till slut leda till förseningar och extra kostnader. För att minimera riskerna, måste en optimerad förundersökning genomföras där viktig information samlas för att ligga till grund för bästa möjliga beslut i hela byggprojektet.

I detta projekt utvärderas tillämpbarheten av geoelektriska metoder som ett verktyg för undersökning av bergmassans egenskaper. Användningen av geoelektriska metoder i olika skalor har visat sig ge värdefull information i olika skeden av tunnelbygget. I de geologiska förhållandena vid Hallandsåsen indikerar metoden sprickor, vattenförande berg, vittrat berg och i viss mån förändringar i litologin. Storskalig geoelektrisk undersökning är användbar i konstruktions- och produktionsplaneringsstadiet samt i byggskedet. Geoelektriska metoder kan kombineras med andra geofysiska metoder i borrhålsloggning och tillämpas sent i konstruktions- och produktionsplaneringsstadiet. Dessutom är borrhålsgeofysik viktig för in-situ korrelation och kontroll av storskaliga geoelektriska data.

Abstract

Construction in rock is associated with risks because knowledge of the geology and ground conditions is limited. Unforeseen rock conditions involve a large risk to the project and can in the end entail delays and extra costs. To minimize the risks, an optimized pre-investigation program has to be conducted where essential information is gathered in order to make the best decisions throughout the construction project.

In this research the main focus has been on the applicability of geoelectrical methods as a tool for predicting geological and rock mass conditions. The application of the geoelectrical methods at different scales has been proved to provide useful information at different stages of rock tunnel construction. In the geological setting at the Hallandsås Horst the method can indicate fractured, water bearing rock, weathered rock and to some extent lithology changes in crystalline bedrock. Large scale geoelectrical imaging is useful in the design/production planning stage and in the construction stage. Geoelectrical methods may be combined with other geophysical methods in borehole logging and be applied late in the design/production planning stage. Additionally, borehole geophysics is important for in situ correlation/verification of the large-scale geoelectrical data.

Introduktion

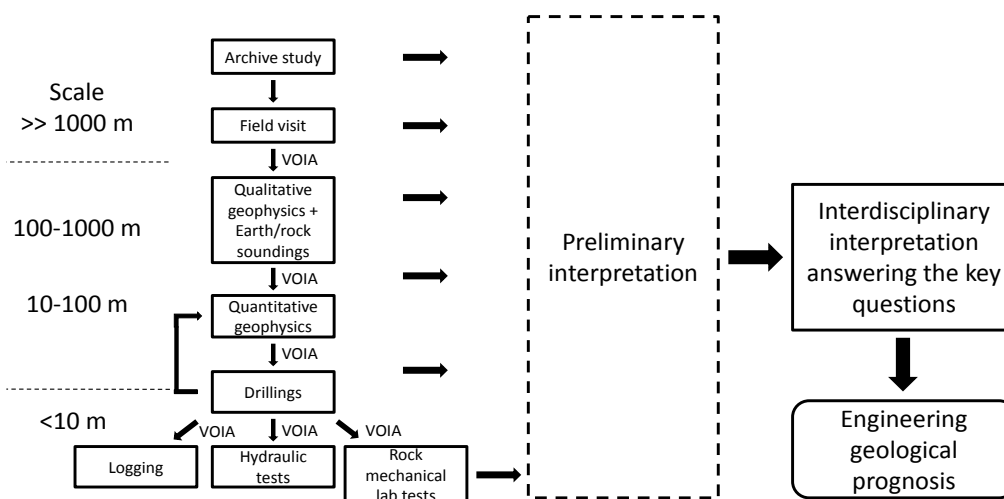
Byggande i berg är förenat med risker, eftersom kunskap om geologin och markförhållandena är begränsad. Oförutsedda grundförhållanden innebär en stor risk för projektet som kan leda till förseningar och extra kostnader. För att minimera riskerna måste en optimerad förundersökning genomföras, där viktig information samlas för att ligga till grund för bästa möjliga beslut i hela byggprojektet (Baynes et al., 2005; Ngan-Tillard et al., 2010).

Olika geofysiska metoder är viktiga i förundersökningar. Geoelektriska undersökning är en av de geofysiska metoder som har visat sig vara viktiga i en stor skala, särskilt i förstudien (t.x. Cavinato et al., 2006; Dahlin et al., 1999; Danielsen and Dahlin, 2009; Ganerød et al., 2006; Rønning, 2003; Stanfors, 1987). Metoden kan även vara relevant i liten skala för borrhålsloggning (t.x. Daniels and Keys, 1990; Ellis and Singer, 2007; Ernstson, 2006; Howard, 1990; ISRM, 1981; Paillet and Ellefsen, 2005; Rasmussen and Bai, 1987; Schepers et al., 2001; Segesman, 1980). Författarens erfarenhet från ett flertal opublicerade förundersökningsrapporter från tunnelprojekt i Sverige är emellertid att metoden inte till fullo har erkänts som en integrerad del av förundersökningar.

I detta projekt (Danielsen, 2010) utvärderas tillämpbarheten av geoelektriska metoder som ett verktyg för undersökning av bergmassans egenskaper. Geoelektriska metoder i olika skalor tillsammans med andra geofysiska metoder har visat sig ge värdefull information i olika skeden av tunnelbygget. Geoelektriska data från Hallandsåsen i södra Sverige utvärderas med avseende på dess förmåga att indikera bergmassans olika egenskaper.

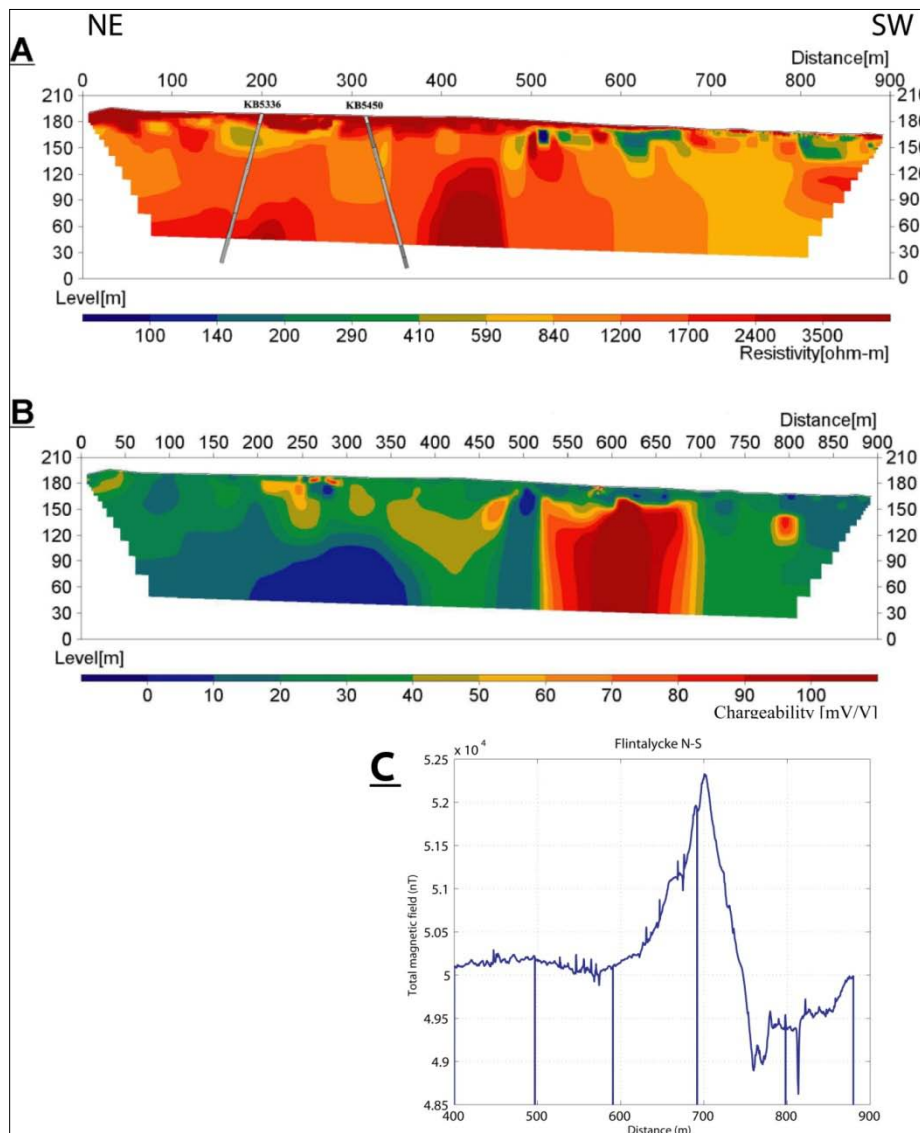
Flödet i förundersökningar

Genom att göra ingående förundersökningar kommer byggkostnaden sannolikt att minska eftersom projektets parter är bättre förberedda tack vare av större kunskap om bergmassans egenskaper. Eftersom förundersökningen innebär en kostnad, är målet att minimera den totala kostnaden för hela byggnadsarbetet inklusive förundersökningar (Einstein et al., 1978). Det primära målet med en förundersökning är att sammanställa en ingenjörsgelogisk prognos som är avgörande i förstudien, projekteringsskedet och byggskedet. Förundersökningen bör utföras top-down, vilket innebär att utredningar bör inledas i stor skala och fortsätta i högre detaljeringsgrad så det följer behovet av information i de olika projektfaserna. Flödesschemat i figur 1 visar hur förundersökningen bör göras. Gränserna mellan de olika etapperna och skalorna är diffusa och bör endast ses som riktlinjer. Informationen från de olika stegen i flödesschemat bör integreras genom hela processen.



Figur 1. Flödesschema för ett optimalt förundersökningsprogram.

Förundersökning bör ses som en dynamisk process där det är viktigt att efter varje steg göra en preliminär tolkning av all information. När alla väsentliga uppgifter har samlats görs en tvärvetenskaplig tolkning där nyckelfrågorna bör besvaras och utifrån detta bör en ingenjörsgelogisk prognos sammanställas som stöd för de viktigaste besluten. Igenom hela projektet är det viktigt att integrera allt material och inte glömma de tidigare undersökningarna. Till exempel kan den geologiska prognosen utvärderas mot de verkliga förhållandena i byggskedet, vilket ger grundläggande referenser och värdefulla erfarenheter att använda i efterföljande omtolkning och förnyad utvärdering av t.ex. geofysiska data. Därför är det viktigt att i alla skeden se över den geologiska prognosen och kontinuerligt uppdatera och ändra den när det behövs.



Figur 2. (A) Resistivetsmodell för 900 meter profilen. Två befintliga kärnboringar är markerade i profilen. I (B) visas IP-modellen, och i (C) resultatet från den magnetiska mätningen.

Den geoelektriska metoden

Den geoelektriska metoden används för att mäta den rumsliga variationen i resistiviteten under bergytan. Resistiviteten i olika geologiska material skiljer sig åt mycket och de flesta bergartsbildande mineralen är isolatorer, så resistiviteten i kristallina bergarter beror till stor

del på mängden och salthalten i vattnet i sprickor samt graden av vittring av berget (Binley and Kemna, 2005; Parasnis, 1986).

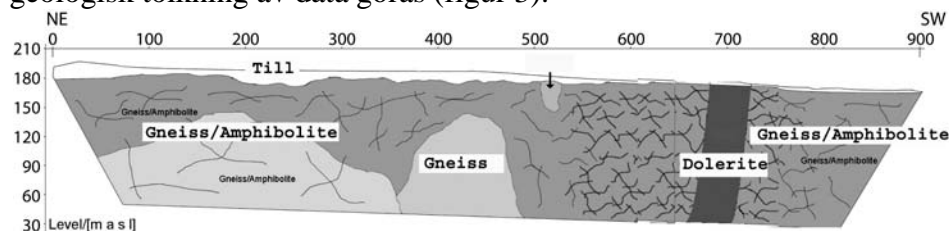
Geoelektriska mätningar som ger två modeller av marken i 2D eller 3D är en relativt snabb och kostnadseffektiv metod jämfört med andra profileringsmetoder, t.ex. refraktionsseismik. För att göra en korrekt tolkning av data, är kunskap om de geologiska förhållanden viktiga, t.ex. förväntad litologi och grundvattennivå från geologiska kartor, borrhålsdokumentation, borrhålskärnor, geofysiska mätningar etc.

Borrhålsgeofysik

För att få detaljerad information från borrhålsgeofysik finns flera olika loggningssonder. Borrhålsgeofysik är ett alternativ eller komplement till analys av borrhålskärnor och borrhålskax. Kärnboringar är ofta att föredra då det medger en kontinuerlig analys av berget över ett givet intervall, men ekonomiska och tekniska problem begränsar användningen av kärnor. En kärnboring är ungefär fem gånger så dyr som en hammarboring (svenska priser 2010, utan mobilisering/demobilisering (Bjelm, 2010)). I många mjuka och spröda bergarter, t.ex. i lervittrade bergarter kan det ofta endast vara möjligt att få upp delar av borrhålskärnan. Borrhålsgeofysik ger in-situ mätningar som är av stort värde när det finns kärnförlust (Ellis and Singer, 2007).

Geoelektriska och IP metoder använda vid förundersökningar i ett tunnelprojekt

Vid Hallandsåstunneln har resistivitets- och IP-mätningar (inducerad polarisation) utförts tillsammans med markbaserade magnetiska mätningar. Figur 2 visar exempel på resultat i form av vertikala modellsektioner baserade på numerisk tolkning av mätdata. Syftet med undersökningarna var att följa upp de geoelektriska data som uppmättes under 1998 och göra en mer detaljerad studie av det utvalda området. Genom detta kan några av de centrala nyckelfrågorna om bergart, vittring/bergtäckning och vatten besvaras och en geologisk tolkning av data göras (figur 3).



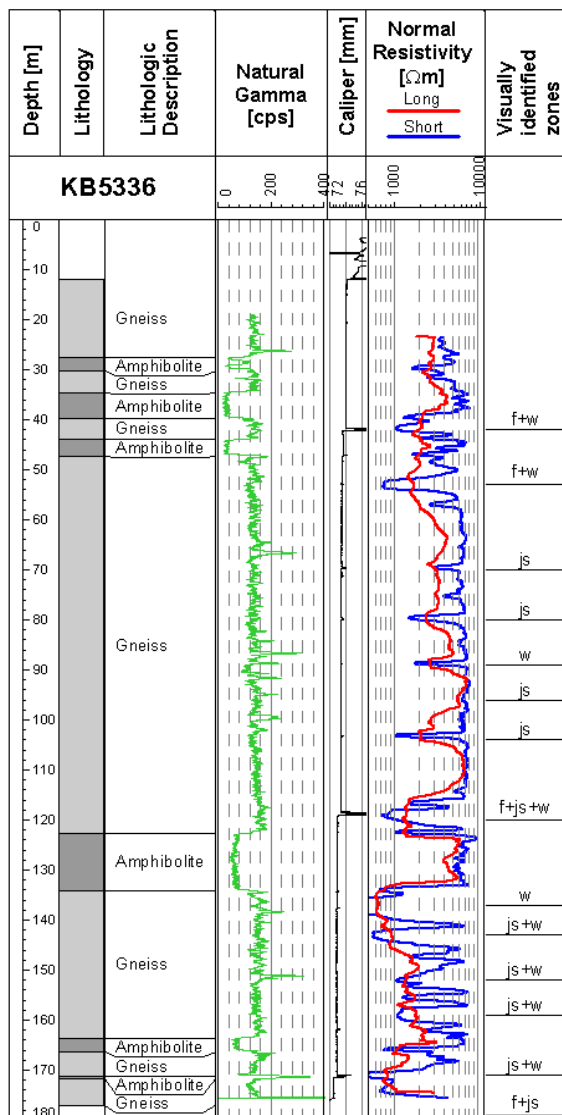
Figur 3. Detaljerad geologisk tolkning av 900 meter profilen.

Geoelektriska data, omfattande resistivitets- och IP-data, i kombination med markbaserade magnetiska mätningar och geofysiska och geologiska borrhålsinformation är användbart i projekterings- och detaljstadiet för att sammanställa en geologisk modell av berget. De kontinuerliga geofysiska mätningarna ska utföras innan borrhålsborringarna i syfte att göra ett målinriktat och optimerat borrhålsprogram, och kanske också minska antalet borrhålsborringar.

Borrhålsgeofysik ger detaljerad information vid förundersökningar för tunnlar i kristallint berg

Syftet med denna delstudie är att visa att borrhålsgeofysik kan ge detaljerad information om litologiska förändringar, sprickor och vittring i urberg. I två kärnborrhåls vid Hallandsåsen har geofysisk loggning utförts med syftet att utvärdera upplösning och nyttan av metoden. Som utvärdering jämfördes borrhålsgeofysiken med kärnorna, figur 4. Resultatet visar att borrhålsgeofysik i icke-kärnborrhåls potentiellt avslöjar mycket användbar information, särskilt när det finns ett par kärnborrhåls att korrelera med. Som ett exempel visas

borrhålsgeofysisk gjord i ett hammarborrat hål i samma område. Erfarenheterna från borrhålsgeofysiken i de kärnborrade hålen användes för tolkningen.



Figur 4. Litologisk och petrofysisk logging av KB5336. De identifierade zonerna är förkortade spricka (f), vittring (w), sprickzoner (JS).

De olika loggarna reagerar på olika fysiska egenskaper, och i detta fall har de tre typerna av geofysiska loggar följande egenskaper: Naturlig gamma; lågt antal registreringar när litologin är amfibolit eller diabas, och högt antal registreringar när litologin är gnejs. Gnejsen innehåller kaliumrika mineraler som K-fältspat och biotit, och därmed har gammaloggen ett högre antal registreringar i dessa delar. Detta är oberoende av sprickor. Det är dock inte möjligt att skilja mellan amfibolit och diabas, eftersom de är likartade mineralogiskt men med olika struktur. Caliper; ökad diameter inom ett begränsat intervall indikerar sprickigt berg och de bredare topparna är sprickzoner och/eller vittrade zoner. Normal resistivitet; låg resistivitet (800-2 000 Ωm) anger att berget har sprickor och/eller vittrade. En hög resistivitet (> 6 000 Ωm) indikerar ett homogent berg.

Borrhålsgeofysik kan bidra med information om litologi, strukturella och bergmekaniska egenskaper. En fördel med borrhålsgeofysik är att det är in-situ mätningar och att informationen registreras och sparas, så att oklarheter och tvetydigheter i ett resultat kan ses av fler än en person. Borrhålsgeofysik kan också användas för att kalibrera resultaten från

ytgeofysik och bör därför vara en integrerad del i alla skeden av förundersökningen. Det kan rekommenderas att borrhålsgeofysik görs i de billigare hammarborrade hålen som därmed kan vara ett bra alternativ till de dyra kärnborrade hålen.

Jämförelse mellan geoelektriska data och tunneldokumentation från Hallandsåstunneln, Sverige

Resultaten i föregående kapitel visar att geoelektriska metoder och borrhålsgeofysik kan ge användbar information om bergets egenskaper i en förundersökning. Det är dock viktigt att utvärdera data alleftersom projektet fortskrider, eftersom en kalibrering med t ex tunneldokumentation kan göra tolkningen av de geofysiska data mera tillförlitlig. En intressant fråga är; vad annat kan upplösas med geoelektriska metoder? Utvärderingen görs genom att jämföra de geoelektriska data med tunneldokumentation från den avslutade delen av Hallandsåstunneln. Dokumentationen är information om t.ex. bergart, vittring, vattenläckage, RQD och sprickor. (För mer information om dessa parametrar hänvisas läsaren till Danielsen och Dahlin, 2009). Jämförelsen görs endast genom visuell utvärdering av tre olika sektioner av tunneln kallade North, South och TBM.

Slutsatser

Detta projekt har främst fokuserat på tillämpbarheten av geoelektriska metoder som ett verktyg för att förutsäga geologiska förhållanden. Tillämpning av geoelektriska metoder i olika skalor har visat sig ge användbar information i olika skeden av tunnelbygge i kristallint berg. Den storskaliga geoelektriska metoden är användbar i projekterings- och byggskedet. I en mindre skala kan den geoelektriska metoden kombineras med andra geofysiska metoder i borrhålsloggning och tillämpas sent i projekteringskedet.

Innan den geoelektriska metoden används är det viktigt att fråga vad som kan förväntas när metoden tillämpas i en viss geologisk miljö. Här är ingenjörens nyckelfrågor viktiga för att identifiera sannolika problem. Att besvara sådana frågor är komplicerat, eftersom metodens upplösningsförmåga kommer att skilja sig från plats till plats. Metoden detekterar förändringar i resistiviteten; resistivitetskontrasten och storleken för de olika zonerna måste vara tillräckliga för att metoden skall kunna upplösa dem. Vid tolkningen av geoelektriska data är det viktigt att komma ihåg att upplösningen för metoden minskar med djupet. Djupnedträngningen beror på flera faktorer, t.ex. maximal elektrodseparation, elektrodkonfiguration och resistiviteten i berggrunden. Fördelen med storskalig geoelektriska undersökningar är att det ger kontinuerliga data i 2D eller 3D medan borrhningar endast ger punktinformation. När man överväger att använda den geoelektriska metoden är det avgörande att i något skede få tillgång till referensdata, t.ex. borrhålsgeofysik och borrhkärnor, för kalibrering och tolkning av data. Men referensdata behövs också för tolkningen av andra geofysiska data.

Flera faktorer är viktiga för en framgångsrik förundersökning och ett lyckat tunnelbygge. Förundersökningen bör göras top-down så att utredningarna börjar i stor skala och fortsätter med gradvis högre detaljeringsgrad på ett sätt som följer behovet av information i de olika projektfaserna. Fokus bör hela tiden vara på nyckelfrågorna som måste besvaras för att fatta de bästa besluten genom projektet. Förundersökning bör vara en dynamisk process där prognosen uppdateras när ny information finns tillgänglig. Förundersökningsrapporten bör struktureras på ett konsekvent sätt efter top-down principen. Kommunikation inom ett projekt

och därmed också integreringen av kunskap är avgörande för resultatet för projektet. Det spelar ingen roll hur många metoder som används om resultaten inte beaktas. En projekt-databas med alla geo-data hjälper integrationen av information och håller ett dynamiskt flöde i projektet.

Med en ingående och optimerad förundersökning, och väl integrerade resultat, är tillförlitligheten hos den tekniska geologiska prognosen högre och risken för att något oväntat händer minskas. Den geoelektriska metoden och borrhålsgeofysik bidrar till att minska osäkerheten och bör därför betraktas som en möjlig del av alla förundersökningar samt av byggskedet.

Tack

Projektet har finansierats av SBUF, BeFo, Trafikverket och Skanska-Vinci HB, som vi härmed vill tacka.

Referenser

- Baynes, F.J., Fookes, P.G., and Kennedy, J.F., 2005, The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 64, p. 67-94.
- Binley, A. and Kemna, A., 2005, DC resistivity and induced polarization methods, in Rubin, Y. and Hubbard, S., eds., *Hydrogeophysics*: Springer, p. 129-156.
- Bjelm, L., 2010, Personal Communication, *Engineering Geology*, Lund University, Sweden.
- Cavinato, G.P., Di Luzio, E., Moscatelli, M., Vallone, R., Averardi, M., Valente, A., and Papale, S., 2006, The new Col di Tenda tunnel between Italy and France: Integrated geological investigations and geophysical prospections for preliminary studies on the Italian side: *Engineering Geology*, v. 88, p. 90-109.
- 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*, v. 32, p. 163-172.
- Daniels, J.J. and Keys, W.S., 1990, Geophysical Well Logging For Evaluating Hazardous Waste Sites, in Ward, S.H., ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol 1, Review and Tutorial: Society of Exploration Geophysicists, p. 263-285.
- Danielsen, B.E., 2010, The applicability of geoelectrical methods in pre-investigation for construction in rock. *Engineering Geology*, Lund University.
- Danielsen, B.E. and Dahlin, T., 2009, Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsås Tunnel, Sweden: *Engineering Geology*, v. 107, p. 118-129.
- Einstein, H.H., Labreche, D.A., Markow, M.J., and Baecher, G.B., 1978, Decision analysis applied to rock tunnel exploration: *Engineering Geology*, v. 12, p. 143-161.
- Ellis, D.V. and Singer, J.M., 2007, *Well Logging for Earth Scientists*: Springer.
- Ernstson, K., 2006, Magnetic, geothermal, and radioactivity methods, in Kirsch, R., ed., *Groundwater Geophysics - A tool for hydrogeology*: Springer, p. 275-320.
- Ganerød, G.V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B., and Braathen, A., 2006, Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 65, p. 231-243.
- Howard, K.W.F., 1990, Geophysical Well Logging Methods for the Detection and Characterization of Fractures in Hard Rock, in Ward, S.H., ed., *Geotechnical and*

- Environmental Geophysics, Vol. 1, Review and Tutorial: Society of Exploration Geophysicists, p. 287-307.
- ISRM, 1981, Suggested methods for geophysical logging of boreholes: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, v. 18, p. 67-84.
- Ngan-Tillard, D., Venmans, A., and Slob, E., 2010, Total engineering geology approach applied to motorway construction and widening in the Netherlands: Engineering Geology, v. 114, p. 164-170.
- Paillet, F.L. and Ellefsen, K.J., 2005, Downhole Application of Geophysics, in Butler, D.K., ed., Near-Surface Geophysics: p. 439-471.
- Parasnis, D.S., 1986, Principles of Applied Geophysics: Chapman and Hall.
- Rasmussen, K.R. and Bai, W., 1987, Logging in deep water wells in central Jutland, Denmark: Boreas, v. 16, p. 393-404.
- Rønning, J.S., 2003, Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Sluttrapport delprosjekt A, Forundersøkelser, NGU, p. 1-64.
- Schepers, R., Rafat, G., Gelbke, C., and Lehmann, B., 2001, Application of borehole logging, core imaging and tomography to geotechnical exploration: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 38, p. 867-876.
- Segesman, F.F., 1980, Well-logging method: Geophysics, v. 45, p. 1667-1684.
- Stanfors, R., 1987, The Bolmen tunnel project. Evaluation of geophysical site investigation methods, Stockholm, SKB Swedish nuclear fuel and waste management co.