

GEOFYSISKA METODERS MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR FÖR ATT KORREKT BESKRIVA GEOTEKNISKA OCH BERGTEKNISKA FÖRHÅLLANDEN

Possibilities and limitations of geophysical methods to accurately describe parameters used in engineering geology

Erik Meland, ÅF Infrastructure AB

Eric Hegardt, ÅF Infrastructure AB

Martin Persson, ÅF Infrastructure AB

Sammanfattning

Felaktiga bergkvalitetsprognoser eller missvisande jordlagerföljder kan vid byggnation över och under mark ge allvarliga konsekvenser så som felaktiga stabilitetsberäkningar eller förseningar och ökade kostnader i projekten. I samband med förundersökningar används ofta traditionell refraktionsseismik, georadar eller resistivitmätning som metoder för att utreda de geologiska förhållandena då dessa metoder är mer kostnadseffektiva och ger mer yt- och volymtäckande information jämfört med kärnbörning eller geoteknisk sondering. Även om seismik-, radar och resistivitmätning är dokumenterat välfungerande verktyg för undersökning av de geologiska förhållandena finns brister och fallgropar, i synnerhet gällande metodernas lämplighet för att bestämma berg- eller jordparametrar mot djupet.

Denna artikels huvudsyfte är att, i ett antal tillämpningsområden, jämföra olika geofysiska metoders användbarhet vid beskrivande av relevanta parametrar och jord- och bergförhållanden. I artikeln studeras traditionell och tomografisk refraktionsseismik samt ytvågsseismik, resistivitet och georadar och deras roller i geotekniska och ingenjörsgelogiska sammanhang. I förlängningen är en målsättning att geofysiska undersökningar ska göras bättre och på så sätt få större plats i en ganska traditionell hantering av markproblem.

Abstract

Inaccurate predictions of rock quality or sediment stratigraphy may result in severe consequences such as faulty stability calculations, delays, and increasing cost in building projects on or below the ground surface. Seismic refraction, resistivity or ground penetrating radar have often been used in prestudies to investigate geological conditions as geophysical methods by far excel traditional methods in cost effectiveness. A higher degree of lateral and spatial coverage is obtained compared to the methods of drilling or sounding. Even if geophysical measurements are documented as suitable methods for describing geological conditions there are some shortcomings, especially regarding the models applicability in determining bedrock or soil parameters at depth.

The aim of this study is to compare the applicability of various geophysical methods in the production of useful geological and geotechnical predictions. In this paper traditional seismic refraction, seismic refraction tomography, ground penetrating radar and resistivity are studied in connection with geotechnical and engineering geological contexts. In the long run, the authors hope that this humble contribution will aid the understanding of preconditions that govern the overall quality of applied geophysical studies in Sweden.

1. Bakgrund

En styrka med geofysisk mätning i samband med undermarksprojekt är förmågan att, till skillnad från borrhning, snabbt täcka större ytor. Dessutom kan mätning ske i annars otillgängliga miljöer som sjö, tät skog, våtmarker och branta slänter. Ända sedan Bougers (1700-talet), Gauss (1800-talet) och Milnes (1900-talet) dagar har människan haft och försökt ha nytta av geofysiska egenskaper hos jord- och bergmaterial för att lösa problem. Längre har geofysisk mätning varit få förutnat och mätningarna har varit tidsödande. Detta har traditionellt gjort att mätningarna har gjorts med stor omsorg och med bra förberedelser. Idag, med jämförelsevis billiga instrument (100 000-tals kronor), snabba mätförlopp, stressade beställare och i hög grad automatiserad datatolkning kan den oförsiktige geofysikern snabbt producera en övertygande modell som i värsta fall är missvisande och direkt förödande.



Figur 1. Överst T.V. – Georadarutrustning i, för borrhbandvagn, otillgängligt område, överst T.H - Resistivitetsutrustning med mätkablar och elektroder, underst T.V. - Detonation av ca 30 g dynamit vid refraktionsseismisk mätning och underst T.H. -Inmätning av geofysisk mätlinje med RTK-GPS.

Förhållandevis få praktiska jämförelser finns mellan geofysiska, geotekniska och ingenjörsgelogiska mätmetoders förmåga att avteckna geologi under svenska och nordiska förhållanden. Syftet med denna artikel är att presentera möjligheter och svagheter genom att lista ett antal vanligt förekommande geofysiska frågeställningar, samt även redogöra för saker som påverkar felmarginaler och penetrationsförmåga.

2. Vanligt förekommande frågeställningar för geofysiska metoder i Sverige

Nedan tas geofysiska rutinfrågeställningar upp. Texten behandlar de frekvent använda metoderna (refraktionsseismik, georadar och elektrisk resistivitmätning). Förutom dessa metoder behandlas ytvågsseismik i egenskap av en metod som potentiellt är användbar i flera sammanhang, inte minst i framtiden. Ibland finns anledning att använda andra metoder (t.ex. TEM, VLF, magnetometri, tyngdkraftsmätning eller slingram). Generellt bör upplägget i figur 2 följas, även om avsteg kan och bör göras i vissa fall.

Med geofysiska metoder (främst seismik och resistivitet) kan sammanhängande sektioner över tolkade jordlager tas fram. Vid goda förutsättningar och användande av terrängfordon kan upp till 1 000 meter om dagen mätas. I en del fall har metoderna använts där en geoteknisk borrhavn inte kan ta sig fram på grund av dålig stabilitet eller skog.



Figur 2. Arbetsgång i geofysiska mät- och utredningsuppdrag.

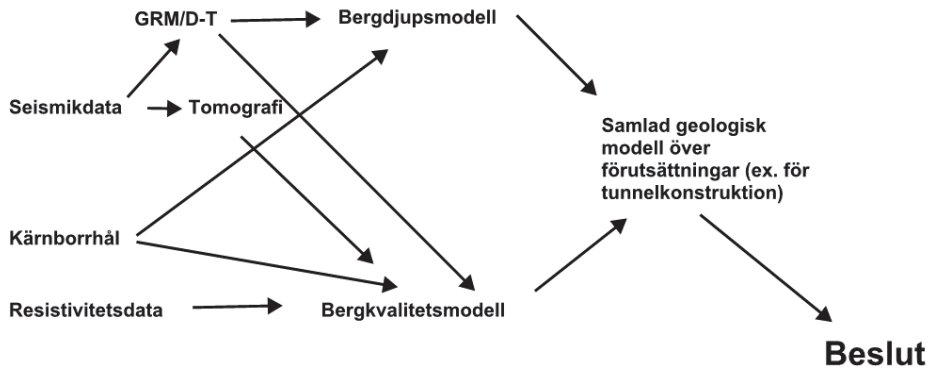
Gemensamt för de beskrivna metoderna är att arkivuppgifter, inmätningar av berg i dagen och annan stödinformation kan användas för att förbättra geologisk tolkning av geofysiska resultat (jmf. fig. 2). Samtliga geofysiska metoder vi känner till har begränsningar i återgivningen av befintlig geologi och metoder ska därför väljas omsorgsfullt för att ge relevant underlag i senare skeden av ett projekt.

2.1 Bergkvalité

Det säkraste sättet att, mycket lokalt, avgöra bergkvalité (ex. i form av Rock quality designation, RQD) är genom studier av borrhälskärnor. Eftersom dessa kärnor bara tar hänsyn till en liten del av bergvolymen är det ofta opraktiskt, tidskrävande och dyrt att få en tillräcklig mängd information ur dessa undersökningar. För att förbättra denna situation har främst refraktionsseismik (traditionell databehandling eller tomografisk modellering), men även resistivitmätning använts.

2.1.1. Refraktionsseismik

Ned till ca 20-30 m djup finns god korrelation mellan RQD, sprickfrekvens (bergkvalitéparameter) och p-vågshastighet (Sjögren m. fl., 1979 och Sjögren, 1984). Ju större djup desto sämre är korrelationen. Sammantaget kan detta förklaras med att p-vågshastigheter och Q-värde tenderar att öka mot djupet (Barton, 2006). Normalt tas ingen hänsyn till detta vid tolkningen.



Figur 3. Föreslagen multi-parametern metodik för högupplöst mätning av bergkvalité.

Försök har på senare tid utförts med tomografisk modellering av refraktionsseismisk data. Metoden fungerar bra i situationer där de konventionella metoderna fallerar på grund av att de horisontella eller vertikala hastighetsgradienterna utgör en större del av hastighetsstrukturen. För att få en säkrare bedömning av bergkvalitet mot djupet bör tomografisk refraktionsseismik i kombination med resistivitmätningar användas, snarare än traditionell refraktionsseismik (Se Meland et al., 2016, A quantitative evaluation of resistivity and refraction seismic tomography as methods for preinvestigations for underground constructions – a case study). Ett annat scenario är en samlad modell där refraktionsdata tolkas i två parallella spår, där djup till berg dikteras av traditionell databearbetning och bergkvalité beskrivs med hjälp av tomografi. Ett ytterligare steg framåt är att sammodellera flera olika datakällor. Detta har, om än med andra frågeställningar än bergkvalitet, utförts med resistivitet och seismik (se Hellman et al., in review). Båda tillvägagångssätten har i inledande forskningsansträngningar visat sig klart användbara.

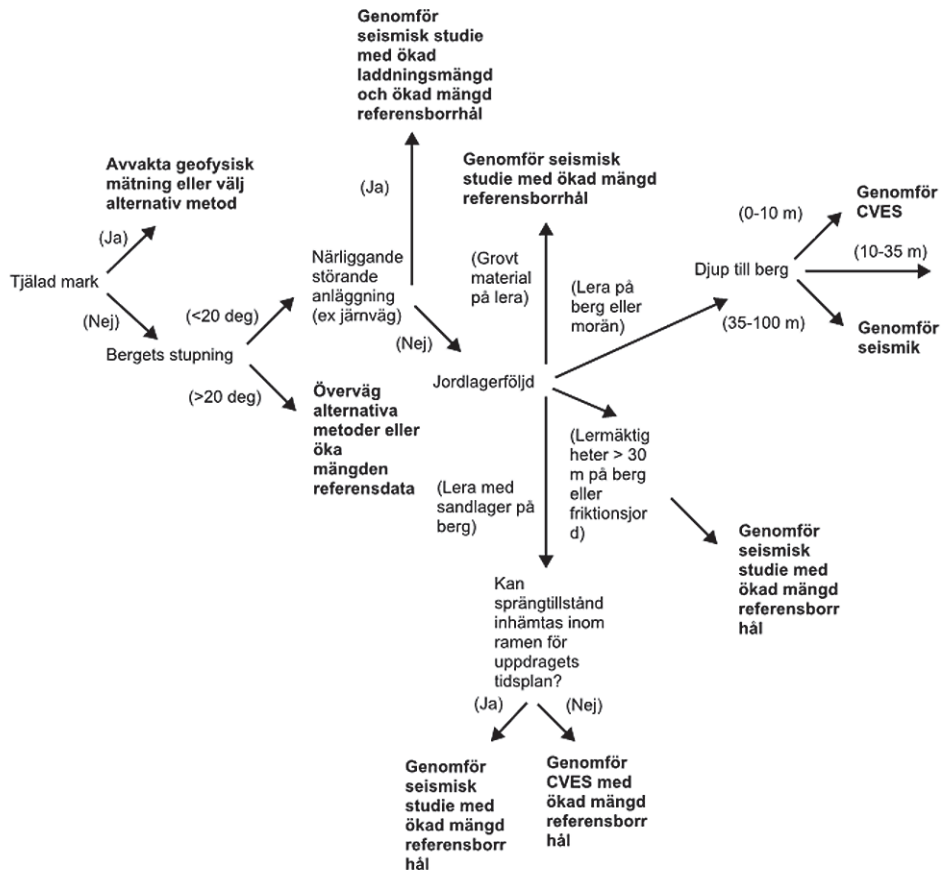
Seismisk p-vågshastighet påverkas av flera faktorer än bara sprickegenskaper. Viktiga faktorer att ta hänsyn till är till exempel anisotropi i p-vågshastigheter beroende på mätriktning i förhållande till sprickriktning och bergspänningsförhållanden. Vidare påverkas p-vågshastigheten av faktorer som E-modul och densitet. Någon hänsyn till detta har inte tagits vid användandet av det empiriska sambandet mellan Q-bas och p-vågshastighet.

2.1.2. Elektrisk resistivitmätning

Ett antal studier har jämfört bergkvalitet hos kristallin berggrund mot resistivitet (ex. Rønning et al., 2013) under nordiska förhållanden. En publicerad rapport från Hallandsåsen (Danielsen och Dahlin, 2009; Danielsen, 2010) visar att gnejs av god bergkvalitet har en resistivitet mellan 4000-10 000 Ωm medan en zon med dålig kvalitet kan ha värden mellan 250-600 Ωm . Resistivitmätning utförd av Meland et al., 2016, inför bygget av tunnel på RV40 detekterade inga zoner som kunde tolkas som berg med nedsatt bergkvalitet. Resultatet från de sistnämnda resistivitmätningarna korrelerar väl mot det verkliga utfallet från kärnborrhål.

2.2. Bergläge

Liksom vid bergkvalitétudier finns vid jorddjupsundersökningar ofta ett behov av geofysisk information när projektens frågeställning och de geologiska förhållandena medför opraktiskt omfångsrika geotekniska borplaner. Detta gäller inte minst vid VA-projektering längs långa sträckor i områden med relativt tunna jordlager på en snabbt undulerande bergyta (t.ex. delar av Hisingen).



Figur 4. Arbetsgång vid mätning med resistivitet och seismik för jordlagerföljd och/eller djup till berg.

2.2.1. Elektrisk resistivitmätning

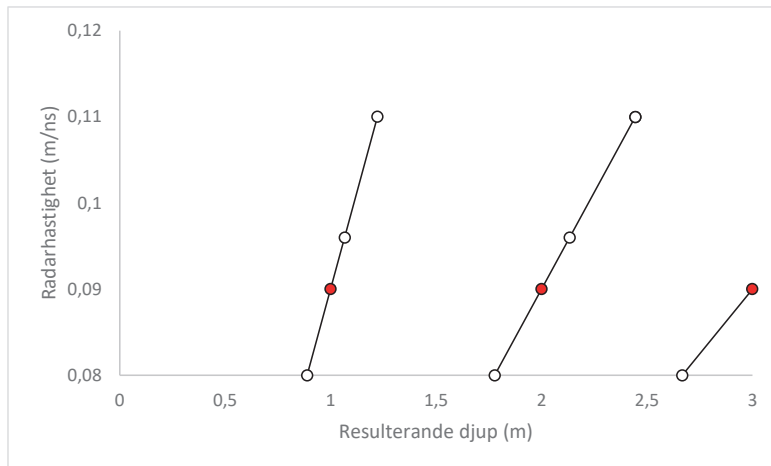
Under rätt förutsättningar (moderata lerdjup, tjälfritt, ökande resistivitet nedåt) kan resistivitmätning ge en god bild över djup till berg. För att lokalt bestämma bergets kontra jordens resistivitet krävs kalibreringsborrning eller annan stödinformation som bekräftar tolkningarna.

2.2.2. Traditionell och tomografisk refraktionsseismik

Traditionell refraktionsseismik är ofta ööverträffad när det gäller att beskriva djup till berg på geofysisk väg medan tomografisk modellering ger felaktiga, men konsekventa djupbestämningar.

2.2.3. Georadar

Om metodmässiga svagheter beaktas finns möjlighet att med radar mycket väl beskriva bergläge. Detta gäller särskilt om överliggande jordarter består av torv eller sandiga-grusiga jordarter, föredragsvis till ringa djup (< ca 10 m).



Figur 5. Exempel på hur variationer i markens radarhastighet kan resultera i olika djup ner till berg eller andra geologiska gränser. Röda punkter indikerar i ett fall rapporterade djup-hastighetskombinationer (baserade på antagen hastighet 0,096 m/ns).

Metodens användbarhet i leriga jordlagerföljder är högst begränsad. Som i figur 5 visar har den ansatta hastigheten/hastigheterna för berg- och jordmaterial stor betydelse när det gäller att representera djup. Sambandet mellan hastighet och djup är linjärt och som ett exempel kan nämnas att en överskattning av radarvägens hastighet med 30 % ger en överskattning av djup med samma belopp.

2.3 Jordlagerföljd

Återigen används geofysisk information dels i beskrivning av jordlagerföljder mellan borrhål och sonderingar och dels för att addera detaljer genom att lägga till information som är otillgänglig med traditionella geotekniska fältmetoder (med reservation för djupa provgropar).

Ett gemensamt problem för de två första metoderna nedan är svårigheter att beskriva sandskikt (tjocklek <5 m) som kan ha stor betydelse för stabilitetsfrågor.

2.3.1. Traditionell och tomografisk refraktionsseismik

Seismisk tomografi beskriver lättare jordlagerföljder än traditionell refraktionsseismik som har problem med lagerföljder där grövre material överlagrar finkornigare (jmf. beskrivningen under rubrik bergläge).

2.3.2. Resistivitetsmätning

Resistivitetsmätning har länge använts för att beskriva jordlagerföljd. Metodens användbarhet och upplösning har ökat med nya mätprotokoll under de senaste 10-15 åren (jmf. Dahlin och Zhou, 2006). Förutom rena jordlagerföljdbeskrivningar kan metoden användas för specialiserade uppgifter som att studera variationer i geotekniska parametrar (se ex. Long et al., 2010; Persson och Stevens, 2012), beskriva blockighet i naturlig jord och fyllnadsmaterial samt vid dimensionering av katodskydd (ex. för VA-ledningar eller cisterner för lagring av kolväten).

Metodmässiga problem finns där jordlagrens resistivitet är minskar med djupet. Exempel på en sådan problematisk lagerföljd är sprängstensfyllning på lera. Dessutom kan flera olika jord- och bergarter uppvisa överlappande resistivitet, vilket kan resultera i missvisande resultat vid oförsiktig tolkning.

2.3.3. Georadar

Vid rätt geologiska förutsättningar kan radar komplettera andra geofysiska eller geotekniska undersökningresultat när det till exempel gäller att kvantifiera blockighet i naturlig jord eller i fyllnadsmaterial. Även tjockleken på fyllnadsmaterial kan ofta bestämmas.

Se radarbeskrivningen under bergläge (kap. 2.2.3) för metodvisa nackdelar.

2.4 Geodynamiska problem

2.4.1. Ytvågsseismik

Ytvågsseismik har empiriskt visat sig kunna beskriva variationer av bland annat skjuvmodul. Denna parameter är viktig vid projektering av höghastighetsjärnväg där man vill undvika problem med att den av tåg orsakade tryckvågen samverkar och förstärks i och med lerans egensvängning.

Metoden är relativt snabbtolkad. Möjligheter att använda så kallade *land streamers* gör att även mätningförloppet kan effektiveras, jämfört med refraktionsseismiska mätningar.

Metodens användbarhet hämmas av det begränsade djupseendet, vanligen <15m.

2.4.2. Seismisk CPT

För att bestämma seismisk hastighet med bättre djupmässig upplösning än hos ytvågsseismik kan seismisk CPT (eng. Cone penetration test) utföras. En annan fördel med denna metod jämfört med ytvågsseismik är att man kan gå så djupt man önskar (med reservation för jordlagrens egenskaper).

2.5 Lokalisering av nedgrävda/dolda objekt

Om jordlagren och egenskaper hos eftersökt objekt tillåter är georadar och resistivitet bra metoder för att lokalisera objekt.

2.5.1. Georadar

Radarundersökning medför god precision när det gäller att lokalisera metalliska objekt. Även omgrävd jord eller stenblock kan lokaliseras i geotekniska eller arkeologiska sammanhang.

Metodens nackdelar framgår av beskrivningen under rubrik bergläge (kap. 2.2.3).

2.5.2. Resistivitetsmätning

Elektriskt mycket goda eller mycket dåliga ledare kan under rätt förutsättningar framträda mycket tydligt. Eftersom metoden mäter en volym snarare än en ren 2D-sektion tas även objekt utanför mätlinjen upp i resultatet, vilket kan vara både en för- och nackdel. Metoden har, åtminstone om standardmässig mätning och inversion görs, svårigheter med att hitta och ge små objekt rätt proportioner.

3. Allmänt om geofysiska metoders noggrannheter och fel

Vid redovisning av modellerade och tolkade resultat finns några möjliga, systematiska fel som kan uppstå:

För det första, jordlagren kan, särskilt i brist på sonderingar eller borrhningar, tolkas fel. Detta gäller inte minst vid resistivitetsmätning där flera material har överlappande resistiviteter eller vid radar där olika jordarter kan se väldigt lika ut. Exempel finns även från radar där grundvattenytan ibland har tolkats som en bergnivå.

För det andra, djupbestämningar kan vara felaktiga. Detta fel uppstår vid radartolkning om en felaktig radarhastighet antas i modellen. Detta exemplifieras i figur 5. Här visades att rapporterade

djup ändras om hastigheten i geologin ändras. I resistivitetstolkning kan diffusa övergångszoner finnas vid jord- eller berglagergränser. Dessa kan orsakas av att det finns ett okänt moräntäcke mellan berg- och lerförekomster. Detta fenomen gör gränsdragning svår.

För det tredje, beroende på ett mätuppdragets syfte kan positioneringsfel bli allvarliga. Även om RTK-GPS:er med bra geoteknisk mätklass används mäts ofta en mätlinjes änd- och mittpunkter in vilket lämnar utrymme för fel däremellan. Detta gäller särskilt i tät skog där GPS-signalen är dålig och fri siktlinje saknas. I tillägg till nämnda mätsvårigheter kommer det faktum att geofysikern mäter djup vilket senare räknas om till en +höjd. Här används ibland höjdlinjer från kommuners grundkartor eller liknande som indata till beräkningen. Dessa höjddata kan vara behäftade med allehanda problem vilka tas vidare in i de geofysiska resultaten.

Sammantaget kan man, om ovanstående tre problem kombineras, mycket lätt få en modell som har lite med verkligheten att göra. För att utesluta, eller åtminstone minimera, ovan beskrivna svårigheter med beskrivning av jordlager och deras inbördes läge bör tolkning ske av en geologiskt erfaren geofysiker med tillgång till borrh- eller sonderingsdata. I en del fall kan situationen förbättras genom att geofysikerna har lättare sonderingsutrustning med sig ut i fält (ex. Cobra med trycksonderingsstänger, spadborr eller liknande). Positioneringen (i plan och med djup) optimeras genom ökat användande av RTK-GPSer, noggranna digitala höjdmodeller (LiDAR), avvägningsinstrument och totalstationer. Dessutom bör GPS:er om möjligt direktanslutas till mätinstrumenten för att ytterligare förbättra situationen.

Till ovanstående generella geofysiska svårigheter har ett antal metods specifika beskrivningar tagits fram (se tabell 2).

Tabell 1. Normala egenskaper vid geofysisk mätning. Siffrorna är uppskattningar där korrekt positionering antas (geoteknisk mätningssklass B).

Metod	Penetrationsdjup (m)	Felmarginal - djupbestämningar	Styrande för penetrationsdjup och upplösning
Traditionell refraktionsseismik	0-100	Noggrann mätning med flera referensborrhål: <5% av djupet Mätning utan referensborrhål <15% av djupet	Tjäle, geologi och mätgeometri (längre mätlinje ger större djuppenetration på bekostnad av detalj). En jordlagerföljd som inte ökar i hastighet nedåt bör inte mätas med målsättning att ta fram jordlagerföljd och kan även ge fel i djupbestämning.
Seismisk tomografi	0-100	Noggrann mätning med flera referensborrhål: <10% av djupet Mätning utan referensborrhål: <20% av djupet	Mätgeometri och geologi.
Ytvågsseismik	0-15	Inga siffror anges – forskning behövs	Geologi och mätgeometri

Resistivitets- mätningar	Normalt 0-50. I motiverade fall kan mycket långa mätkablar användas vilket avsevärt kan öka penetrationsdjupet.	Inga siffror anges – forskning behövs	Antalet datapunkter avtar med djup. Längre avstånd mellan mätelektroder ger ökat penetrationsdjup på bekostnad av upplösning. Högresistiva, dåligt ledande material i ytan kan göra att mätningen ger irrelevanta resultat med djupet. Stora lermäktigheter kan resultera i irrelevanta resultat mot djupet.
Georadar	0-20 i vanligt förekommande geologi i Sverige. I speciella fall upp mot 80 m.	Decimeternoggrannhet vid noggrann mätning med flera referensborrhål. Meternoggrannhet utan referensborrhål	Starkt beroende av geologin. Metoden kan ej penetrera mer än några decimeter i lera. Dessutom omöjliggör salt grundvatten mätning. Geofysikerns skicklighet.

4. Slutsatser och rekommendationer

Nu utförd sammanställning visar att:

1. Ett integrerat arbetssätt där det bland geofysiker, geologer och geotekniker tydligt diskuteras kring frågor gällande metoders tillämplighet och möjliga svagheter är sannolikt ger säkrast möjliga resultat med flest antal framtagna materialparametrar. I detta sammanhang är det viktigt att ha en geologisk hypotes att utgå ifrån.
2. Vid utsättning och inmätning av mätlinjer bör man som geofysiker eller mättekniker noggrant förstå uppdraget och anpassa inmätning efter problemställning.
3. Redovisning av resultat kräver extra eftertanke. Geofysiska resultat är inte triviala och pedagogisk kraft bör ägnas åt att presentera de ofta komplexa resultaten på ett sätt som matchar beställarens tidigare erfarenhet och kunskap. Detta kan innebära visualisering i 3D modeller eller presentation i 2D ritningar som efterliknar geotekniska sektionsritningar. Sannolikt ökar denna behandling både användbarhet och kostnad.
4. De geofysiska undersökningarnas komplexitet och beställares skiftande bakgrund utgör tillsammans en barriär vid informationsöverföringen mellan dessa.
5. För att säkerställa slutsatserna och för att öka andelen empiriska samband och därigenom bättre kunna kvantifiera kopplingar mellan geofysiska mätvärden med berg- eller jordparametrar krävs ytterligare testlokaler och studier som berör skiftande problemställningar under varierade geologiska förhållanden.

Slutord

För att upprepa, den bäst lämpade metoden för uppgiften under rådande geologiska förhållanden ska väljas. Vid mätning ska största praktiskt möjliga vikt läggas vid positionering och pedagogisk presentation av resultat.

Geofysiska resultat där hänsyn har tagits till geotekniska borrh- och sonderingsdata ger de bästa möjliga förutsättningarna för tillförlitliga och maximalt användbara geotekniska eller bergtekniska slutsatser.

Referenser

- Barton, N., 2006. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis group, London, UK
- Dahlin, T. och Zhou, B., 2006. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging, Near Surface Geophysics, 4, 113-123.
- Danielsen, B.E. och Dahlin, T. 2009. Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsas Tunnel, Sweden. Engineering Geology, 107(3-4), 118-129.
- Danielsen, B.E., 2010. The applicability of geoelectrical methods in pre-investigation for construction in rock. Ph. D. Thesis Lund University
- Hellman K, Ronczka M, Günther T, Wennermark M, Dahlin T, Rücker C (in review) Structurally coupled inversion of ERT and refraction seismic data combined with cluster-based model integration, Journal of Applied Geophysics.
- Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J-S., Solberg, I-L., Rønning, J.S., Limacher, R., O'Connor, P., Sauvin, G., Rømøen, M., Lecomte, I. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. Canadian Geotechnical Journal , 49 (10): 1158-1168
- Persson, M.A. och Stevens R.L. 2012. Quick-clay formation and groundwater leaching trends in southwestern Sweden. Conference proceedings of the 11th International & 2nd North American Symposium on Landslides
- Meland, E., Hegardt, E., Höög, K., 2016. A quantitative evaluation of resistivity and refraction seismic tomography as methods for preinvestigations for underground constructions – a case study. BEFO report 145.
- Rønning, J. S., Ganerød, G. V., Dalsegg, E., Reiser, F., 2013. Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(4), 1225-1244.
- Sheehan, R. J., William. E. D., Wayne. A.M., 2005. An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analyses. Journal of environmental and engineering geophysics Vol 10 (1), 21-34.
- Sjögren, B., Öfthus, A., Sandberg, J., 1979. Seismic classification of rock mass quality. Geophys. Prospect., 27, 409-442.