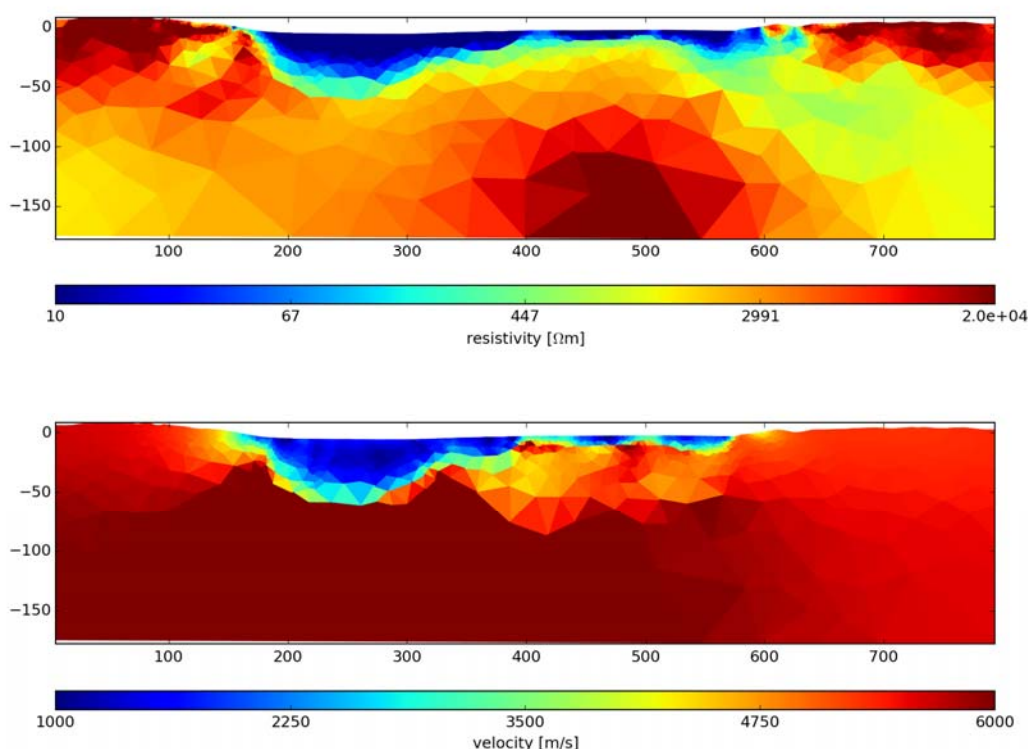


Integrerad användning och tolkning av data från geofysiska och icke-geofysiska metoder för planering och byggande i berg



Modellsektioner visande resistivitet och seismisk tryckvågshastighet under en vattenpassage vid Äspö berglaboratorium. Den blå zonen i vänstra halvan av sektionerna tolkas som en tidigare okänd sedimentfylld djup svacka i berggrundens överyta.

Lund 2016

Mathias Ronczka, Roger Wisén & Torleif Dahlin

Teknisk Geologi, LTH/Lunds Universitet

Förord

I denna rapport redovisas preliminära resultat från SBUF-projekt 12718 som ingår som steg 1 i TRUST 4.2 som är ett delprojekt det nationella samarbetet TRUST¹ (TRansparent Underground STructure).

Projektet finansieras förutom av SBUF av BeFo, som tagit beslut att finansiera både steg 1 och steg 2 av projektet. Vidare medfinansierar Teknisk geologi, LTH/Lunds Universitet och LIAG (Leibnitz Institute of Applied Geophysics) projektet. Delar av de fältförsök som genomförts har kunnat utföras tack vare finansiering från Nova FOU, Trafikverket och Skanska.



nova CENTER FOR UNIVERSITY STUDIES,
RESEARCH AND DEVELOPMENT



SKANSKA



SBUF BeFo

¹ <http://www.trust-geoinfra.se/>

Inledning

Det finns ett akut behov av att kunna bygga mer kostnadseffektiva undermarkskonstruktioner. Medan kostnader skall minimeras är det fortfarande viktigt att producera konstruktioner som är hållbara, säkra och effektiva att underhålla så att livscykelkostnaden blir bra. Oförutsedda geologiska förhållanden leder ofta till väsentliga förseningar, kostnadsökningar och oönskad omgivningspåverkan för undermarkskonstruktioner. Det finns därmed stora vinster i att ha en förundersökningsprocess som levererar nödvändig information vid rätt tidpunkt för att kunna fatta riktiga beslut i byggprocessen. Integrerad användning, utvärdering och tolkning av olika geofysiska och icke-geofysiska metoder kan bidra till att så bra information som möjligt finns med i beslutsprocessen.

Utvecklingen av geofysiska metoder inom ingenjörsgéologin har gjort stora framsteg sedan det sena 70-talet. Metodikerna har gått från endimensionella sonderingar till tvådimensionell profilering och 3D. Även 4D där man ser på utveckling över tiden är möjligt idag. För att nå full potential i ingenjörsgéologiska och geotekniska tillämpningar så finns det ett behov av att kunna ta fram geotekniska och bergmekaniska parametrar direkt eller indirekt med de geofysiska metoderna. För att uppnå detta krävs utveckling och anpassning av en förbättrad metodik för att kombinera mekaniska, hydrauliska och geofysiska parametrar och därmed uppnå en bättre säkerhet vid kartläggning av bergmassa och bergkvalitet. Detta kan uppnås med kombinerad tolkning och inversmodellering av geofysiska och icke-geofysiska data. Utöver detta så behövs verktyg för att visa inte bara de fysiska egenskaperna av berget utan också osäkerheten i bestämningarna.

Syftet är att utveckla och anpassa metodik för kombinerad analys av olika geologiska och geofysiska egenskaper på ett effektivt och objektivt sätt, så det ökar möjligheten för en god värdering av bergmassan och bergkvalitet. Geofysiska data kan exempelvis bestå av resistivitet, IP-effekt (inducerad polarisation, det vill säga uppladdningseffekt), seismisk tryckvågshastighet, seismisk skjuvvågshastighet, magnetism, densitet etc., och geologiska data kan komma från olika typer av geoteknisk/geologisk sondering eller borrhning, kartering i mark etc. Ett led i arbetet är att utveckla och utvärdera kombinerad inversmodellering som ett verktyg för objektiv samtolkning av geofysiska och icke-geofysiska data. Målet är att kunna ta fram bättre bergprognoser (geologiska förväntningsmodeller) med analys av osäkerheten i modellerna (riskanalys) inkluderad.

Projektet inkluderar även fältarbete i relevanta geologiska miljöer vid existerande eller planerade undermarkskonstruktioner. Data används för att testa och kalibrera de utvecklade metoderna. Fältarbete har utförts i anslutning till: ESS i Lund, Kv Färgaren i Kristianstad, Varbergstunneln, Äspö berglaboratorium, Önnestöv-Dalby, Förbifart Stockholm vid Lambarfjärden och Östlig förbindelse.

Genomförande

Ett omfattande arbete med forskning kring, och teknisk och teoretisk utveckling av, datainsamlingsmetodik, databearbetningsmetodik, tolkningsalgoritmer och programkod har utförts inom ramen för projektet. Projektet startade som ett doktorandprojekt men har övergått i att genomföras som post doc projekt. Forskning och metodutveckling har även utförts av seniora forskare på LTH och hos LIAG som är samarbetspartner i projektet.

Utvecklade mättekniska koncept och metoder har testats i full skala på ett antal fältlokaler. De algoritmer för databearbetning och inversion som tagits fram har använts för att bearbeta fältdata från dessa försök och skapa geofysiska modeller baserat på dem. Resultaten har sedan tolkats och utvärderats med hjälp av tillgängliga relevanta referensdata.

Bland de fältkampanjer som genomförts inom ramen för projektet ingår:

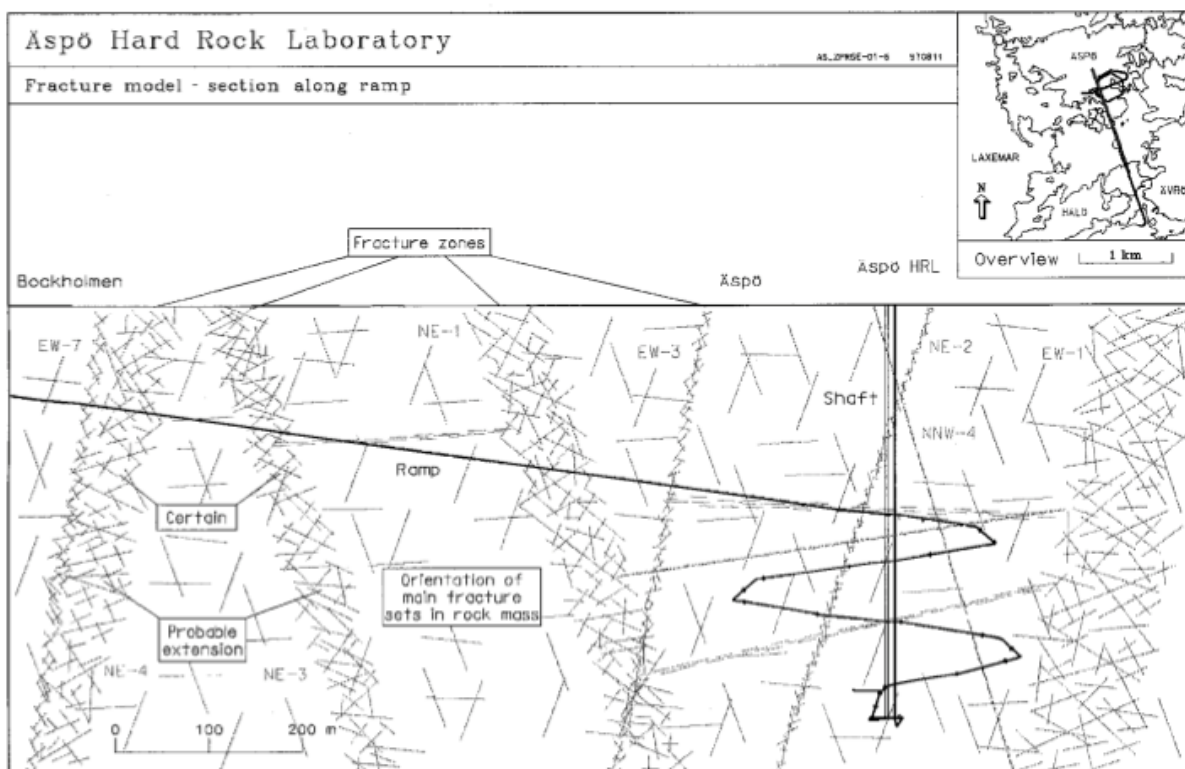
- ESS, Lund. Syfte: datainsamlingsmetodik och samtolkningsteknik

- Varbergstunneln, Varberg. Syfte: geoteknik och samtolkningsteknik
- Äspölaboratoriet, Oskarshamn. Syfte: bergkvalitet, datainsamlingsmetodik (undervattensmätningar) och samtolkningsteknik (Figur 3 - Figur 5)
- Förbifart Stockholm Lambarfjärden. Syfte: djup till berg, bergkvalitet och samtolkningsteknik
- Östlig förbindelse Stockholm. Syfte: djup till berg, bergkvalitet, datainsamlingsmetodik (undervattensmätningar) och samtolkningsteknik
- Önneshövd-Dalby. Syfte: bergkvalitet och samtolkningsteknik

Lokalerna har valts ut med tanke på relevans för projektets frågeställningar med tillgång till relevant referensdata som ett krav. Exempel på resultat presenteras nedan.

Resultat

En av fältstudierna i TRUST 4.2 är Äspö berglaboratorium, där fältarbetet genomfördes under våren 2015. Den består av samlokaliserade resistivitets- och refraktionsseismiska mätningar längs en linje som går över både land och bräckt vatten. För att öka tillförlitligheten i resultaten kommer en kombinerad analys att genomföras med kombinerad inversmodellering och tolkning med klusteranalys. Resistivitetsmätningarna utfördes i samarbete med TRUST 2.1 och landseismiska mätningar samt RMT (Radio Magneto-Telluric) på vattnet utfördes i samarbete med TRUST 2.2.



Figur 1. Tektoniska zoner vid Äspö berglaboratorium².

Äspö berglaboratorium byggdes av Svensk Kärnbränslehantering AB för forskning kring djupförvaret av använt kärnbränsle. Syftet med undersökningen vid Äspölaboratoriet är att lokalisera sprickzoner

² Stanfors R, Rhén I, Tullborg E-L & Wikberg P (1999) Overview of geological and hydrogeological conditions of the Äspö hard rock laboratory site, Applied Geochemistry, 14, 819-834.

längs tunneldelen mellan Hålö och Äspö, där det främst de tektoniska zonerna NE-1, NE-3, NE-4 och EW-7 som är i fokus (Figur 1).

Resistivitets- och seismikprofilen är orienterad i syd-nordlig riktning, med samlokaliserade sensorer i vattendelen. Elektrodena placerades med 5 m avstånd på land och i vatten. Längden på resistivitetsprofilen är 780 m. För refraktionsseismiken användes 91 hydrofoner med 5 m avstånd och en total profillängd på 450 m. Små sprängladdningar, placerade 0,5 m ovanför havsbotten, användes för excitering av seismiska vågor. Utöver detta så kartlades topografin av havsbotten med ett multistrålekolod. Figur 2 visar undersökningsbåten, resistivitetsmätkabeln där den går ned i vattnet, samt inmätning med GNSS.

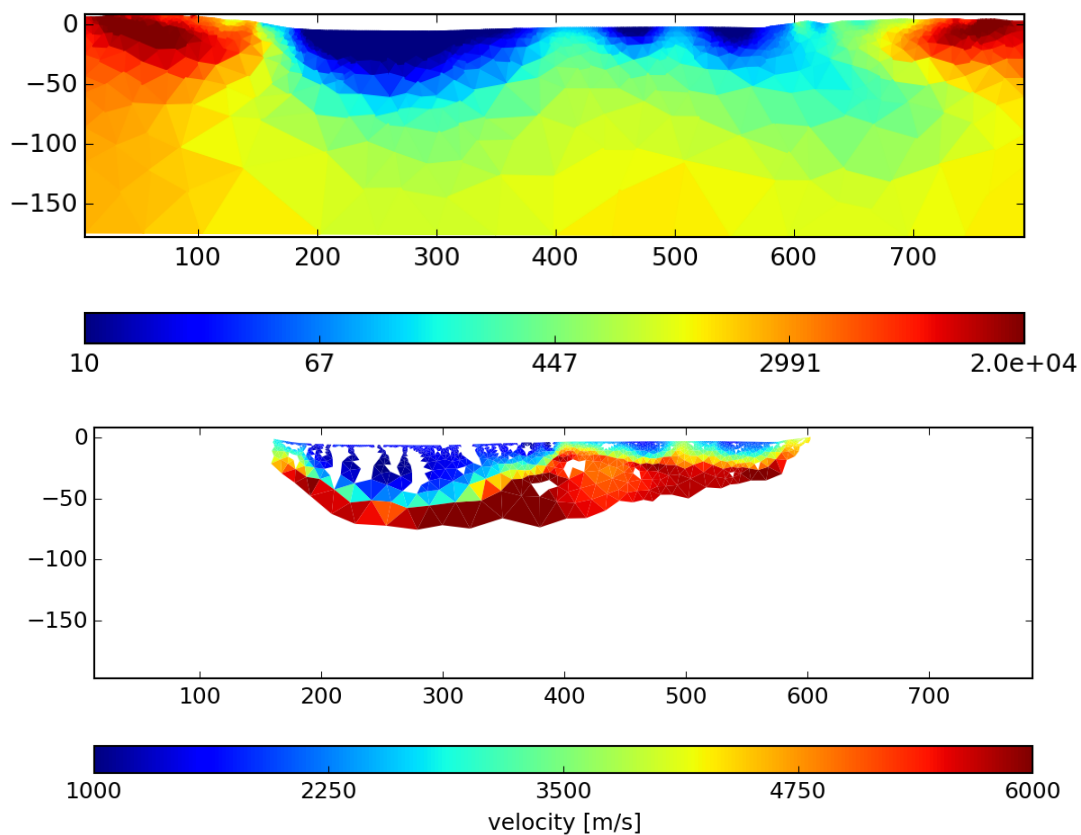


Figur 2. Foto från fältmätningarna vid Äspö berglaboratorium.

Både resistivitets- och seismikmätningarna gav vissa utmaningar på grund av svåra markförhållanden. På land gav höga kontaktmotstånd problem med lågt signal-brus förhållande för resistivitetsmätningarna och i den södra delen av seismikprofilen gav gasfyllda sediment kraftig dämpning av signalen.

Resultaten av separat inversion av data visas i Figur 3. Båda metoderna visar en ca 50 m djup zon i den vänstra halvan av sektionerna som har låg resistivitet respektive hastighet, under vilket det är högre resistivitet respektive hastighet, vilket tolkas som en tidigare okänd sedimentfylld svacka i berget. Delarna med höga resistiviteter och hastigheter tolkas som berg. Notera de gradvisa övergångarna i resistivitetssektionen under de över lågresistiva zonerna. I högra delen av resistivitetsmodellen ser den låga resistiviteten ut att fortsätta mot djupet med en stupning utåt. Seismiksektionen har mindre täckning av två skäl, dels var mätutlägget kortare och dels har refraktionsseismik inte förmåga att se

något under ett höghastighetslager om det inte förkommer ett skikt med ytterligare högre hastighet på djupet.

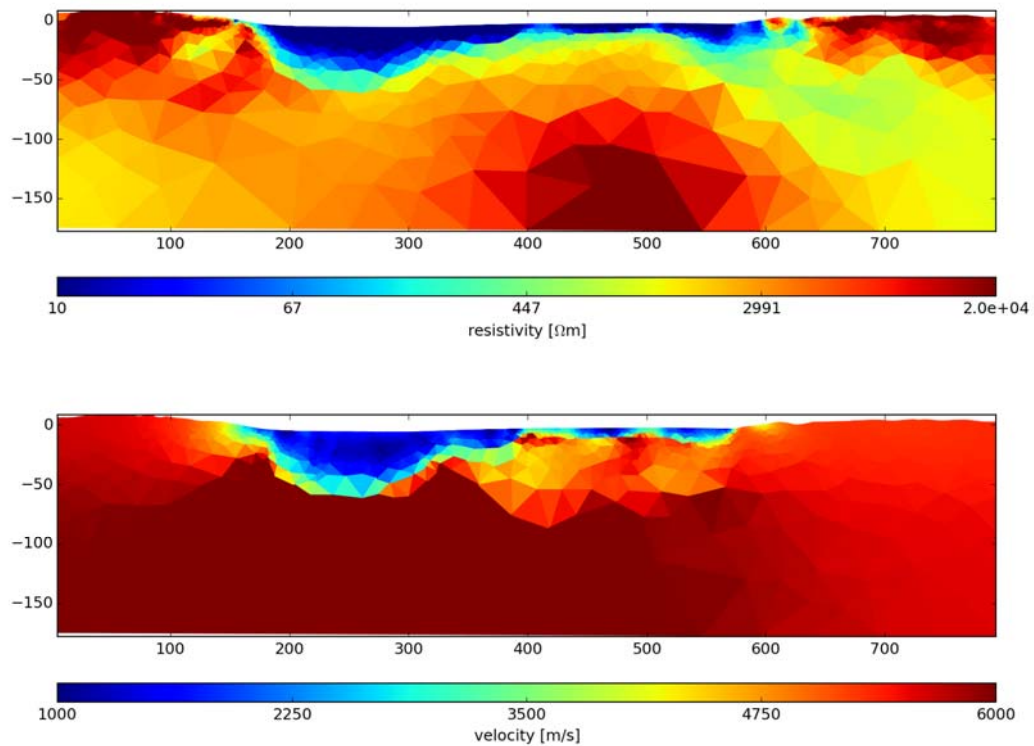


Figur 3. Resultat av separat inversmodellering av resistivitetsdata (överst) och seismiska data (botten) från Äspö berglaboratorium.

Kombinerad inversmodellering ger betydligt skarpare övergångar i resistivitet (Figur 4), vilket gör att det tolkade berget under sedimentlagren får betydligt högre resistivitet. Vidare framträder den lågresistiva zonen i den högra delen av sektionen tydligare. Hastighetssektionen får ett mera sammanhållet utseende, och får större täckning genom att egenskaperna extrapoleras med hjälp av kopplingen till resistivitet, vilket naturligtvis måste betraktas med stor försiktighet i ett fall som detta då det är så stor skillnad i datatäckning.

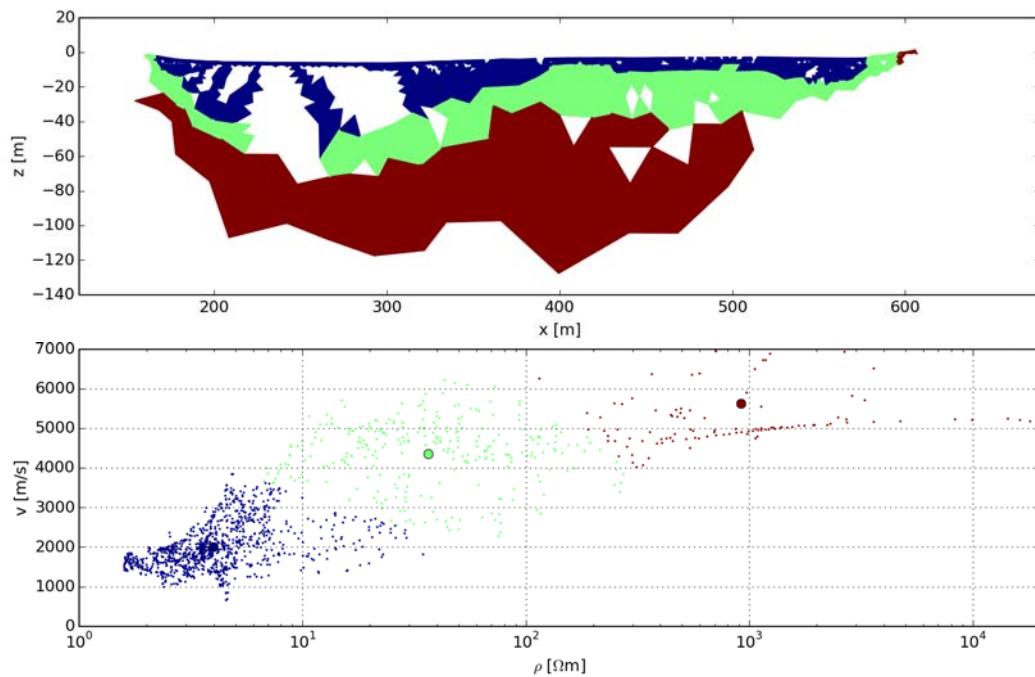
Preliminär tolkning är att den lågresistiva zonen i högra delen av resistivitssektionen (Figur 4) motsvarar NE-1 zonen, även om den förväntas att ha en brantare stupning än vad som indikeras här. Den flacka stupningen kan bero på 3D-effekter. Det kan även finnas andra 3D effekter som påverkar resultatet, vilket utreds vidare med hjälp av numerisk simulering.

Den stora lågresistiva zonen som också är en låghastighetszon i vänster halva av diagrammen (Figur 4) tolkas som nämnts vara en djup sedimentfylld dal som inte är dokumenterad tidigare. Det skulle kunna tolkas som en erosionsdal eller en gravsänkestruktur mellan de dokumenterade förkastningarna NE-3 och NE-4 eller EW-7 (Figur 1). På grund av de mycket stora kontrasterna i fysikaliska egenskaper på platsen i kombination med signalbrus och signaldämpning är utvärdering av data komplicerad, och saminversion är ett värdefullt verktyg för tolkning av data.



Figur 4. Resultat av gemensam inversmodellering av resistivitetsdata (överst) och seismiska data (botten) från Äspö berglaboratorium

För efterbehandling av resultaten från inversmodelleringen utfördes en klusteranalys och resultaten från denna visas i Figur 5. Det blå klustret omfattar endast låga resistiviteter och seismiska hastigheter vilket tolkas som sedimentära avlagringar. Det röda klustret omfattar höga resistiviteter och hastigheter och tolkas som berggrund. Det gröna klustret är en mellanliggande zon i vilken gränsytan mellan de sediment och berggrunden kan vara belägen.



Figur 5. Resultat av klusteranalys av modellerna från Äspö med tre kluster.

Sammanfattning och slutsatser

För att testa den integrerade användningen och modelleringen av olika metoder har fältundersökningar genomförts. Separat och gemensam inversion har testats i ett försök att prova fram bästa metoden för att få tillförlitliga resultat. För att underlätta tolkningen av geofysiska parameter, som elektrisk resistivitet och seismiska hastigheter, har klusteranalys utförts på inversionsresultaten. Resultat från fältundersökningar vid Äspö berglaboratorium presenteras som exempel.

Resultatet från Äspö visar att den förväntade skarpa gränssnittet mellan de sedimentära avlagringarna och berggrunden inte avbildas som en skarp övergång vid analys av enbart resistivitetsdata. Även det seismiska inversionsresultatet visar en relativt stor övergångszon mellan låga och höga hastigheter. Med kombinerad inversmodellering av de båda dataseten erhålls förbättrat resultat med skarpare gränssnitt mellan sediment och den förväntade berggrunden. Klusteranalysen identifierar tre kluster, var och en med liknande bergegenskaper. Två kluster beskriver sedimentära avlagringar och berggrund. Det tredje klostret visar en relativt tunn övergångszon inom vilken gränssnittet mellan sediment och berggrunden kan antas finnas.

Resultaten är lovande och kommer att användas för ytterligare utvärdering av mot tillgängliga referensdata, och för vidareutveckling och förfining av tolkningsmetoder där information från borrhål etc. integreras.

Fortsatt arbete

De utvecklade tolkningsalgoritmerna kommer att testas på fler fältdataset, där det finns fältdata från ESS i Lund, Kv Färgaren i Kristianstad, Varbergstunneln, Äspölaboratoriet, Önneslöv-Dalby, Förbifart Stockholm och Östlig förbindelse. Förutom resistivitets- och seismikdata kommer även IP-data (Inducerad Polarisation) att inkluderas i den kombinerade inversionen. Vidare skall information från borrhning etc. integreras i tolkningsprocessen.

Även fältmätningar i borrhål planeras. Detta kan göras antingen som geofysisk borrhålsloggning för att få detaljerad information till korrelation. Det kan också göras som tomografi mellan hålen och markytan.

Ytterligare en viktig del av arbetet är utvecklingen av metodik för uppskattning av bergmekaniska parametrar från en kombination av geofysiska och andra geodata. Avsikten är att ta fram en modell för detta och testa den på data från faktiska undermarksprojekt. Det återstår dock mycket arbete för att sammanställa, analysera och kvalitetssäkra de nödvändiga referensdata för detta.