GEOFYSISK KARTLÄGGNING AV SEDIMENTDJUP OCH STRUKTURER I BERG UNDER VATTEN I STOCKHOLM

Geophysical mapping of sediment depth and bedrock structures under water in Stockholm

Torleif Dahlin, Teknisk geologi, LTH / Lunds universitet

Roger Wisén, Teknisk geologi, LTH / Lunds universitet & Impakt Geofysik AB

Sammanfattning

Kombinerad undersökning med elektrisk resistivitetstomografi (ERT) och refraktionsseismik har utförts i ett antal vattenpassager i Stockholm med gott resultat, i såväl Mälaren som i Saltsjön. I en del fall har endast en av metoderna använts. Mätningarna genomfördes med elektroder respektive hydrofoner på sjöbotten, vilket ger bättre upplösning än att ha dem i vattenytan och är det enda alternativet vid större vattendjup. Små sprängladdningar nära bottnen användes som signalkälla för seismiken. Geologisk tolkning av de erhållna modellerna stämmer väl överens med borrning. Liksom för geofysiska mätningar på land är fördelen att man får kontinuerliga modeller som kan kopplas till jorddjup, strukturer i berget och hydrogeologiska förutsättningar. ERT kan användas där det är olämpligt att spränga eller borra p.g.a. av ledningar eller arkeologiska lämningar. Elektriska och seismiska modeller från den kombinerade undersökningen kompletterar varandra, och ihop med borrning i strategiskt valda punkter ger det en bättre totalbild av sedimentdjup och bergförhållanden.

Summary

Combined investigation with electrical resistivity tomography (ERT) and refraction seismic was performed in a number of water passages in Stockholm with good results, in both Mälaren and Saltsjön. In some cases, only one of the methods was used. The measurements were carried out with electrodes or hydrophones on the seabed, which gives better resolution than having them in the water surface and is the only alternative at greater water depth. Small explosive charges near the bottom were used as the signal source for the seismic. Geological interpretation of the obtained models is in good agreement with drilling. As for geophysical measurements on land, the advantage is that it provides continuous models that can be connected to soil depth, structures in the rock and hydrogeological conditions. ERT can be used where it is inappropriate to blast or drill due to of cables, pipes or archaeological remains. Electric and seismic models from the combined surveys complement each other, and together with drilling in strategically selected points, it gives a better overall picture of sediment depth and rock conditions.

Inledning

Det kommer byggas flera olika bergtunnlar under vattenpassager i Stockholm i en nära framtid, t.ex. Förbifart Stockholm, City Link och avloppstunnel från Bromma till Sickla. Utöver detta är det troligt att T-banan till Nacka samt Östlig förbindelse också förläggs i bergtunnel. Vattenpassagerna är de delar av en bergtunnel där det är störst risk för problem med liten bergtäckning, dålig bergkvalitet och vatteninläckage, eftersom vattenpassagerna är lokaliserade där de största svaghetszonerna i berget är belägna. Saltsjö-Mälarsnittet som ska passeras är en del av ett större förkastningssystem som sträcker sig i öst-västlig riktning från Finska viken till Kilsbergen, där den vertikala förskjutningen uppskattas vara ca 1000 meter (Wichmann 2018), vilket gör att mycket komplex geologi är att förvänta. Det innebär stora risker vid missbedömningar av djup till berg och bergets egenskaper, eftersom det finns obegränsat med vatten som kan söka sig ned genom svaghetszoner, och otillräcklig bergtäckning och lervittrat instabilt berg kan få katastrofala följder där.

Det finns därigenom ett stort behov av information om rumslig variation av djup till berg och variation i bergkvalitet. Om en tunnel förläggs i ett ogynnsamt läge kan det leda till att man måste placera den djupare än i ett mera optimalt läge, och det kan leda till behov av omfattande bergförstärkning och eventuellt frysning av berget under byggskedet. Om man missbedömt djup till berg eller bergkvalitet, eller bådadera, kan det leda till stora förseningar och extrakostnader förutom risk för människoliv. Det finns potentiellt stora besparingar som kan göras om de värsta lägena undviks. För att ha en rimlig möjlighet att uppnå detta måste man dock ha tillräckligt god information om bergnivåer och bergets egenskaper i ett så tidigt skede att tunnels läge i plan och höjd kan påverkas. En väl fungerande förundersökningsprocess, där undersökningsmetoderna väljs och kombineras på ett bra sätt, är central för att detta ska vara möjligt. Att enbart basera förundersökningen på geoteknisk sondering och borrning är oekonomiskt, och medför stor risk för att man missar information om kritiska zoner. Genom att utföra geofysik i ett tidigt skede kan man basera val av fortsatta undersökningar på resultatet och får en bättre helhetsbild. Kombinerad geofysisk undersökning med elektrisk resistivitetstomografi (ERT) och refraktionsseismik, enligt det koncept som vi presenterar nedan, kostar i storleksordningen lika mycket per undersökningslinje som en enda marin geoteknisk JB-sondering (Wisén et al. 2019).

Metodbeskrivning

Bägge typerna av geofysiska undersökningar utförs med bottenförlagd kabel, med inbyggda elektroder respektive hydrofoner. Kabeln läggs ut med båt och kraven på position på den utlagda kabeln är höga. Arbetet med kabeln har utförts med båtar i lite olika storlek, från 5.5 m upp till ca 10 m i längd. Position erhålls från en realtids-korrigerad GNSS mottagare. Vid utläggning förankras kabeln i bägge ändar i kända positioner, antingen på land eller i ankare som positioneras när de sänks ned på bottnen,

och under förloppet då kabeln sträcks ut och sänks ner på bottnen registreras båtens position. På detta sätt erhålls en tillräckligt hög precision i horisontal led. Positionering av kabeln i höjdled utförs med detta förfarande inte direkt i fält utan denna information erhålls från befintlig, eller för tillfället inmätt, höjdmodell av havsbottnen. En handfull trycksensorer med inbyggd datalogger kan fästas på mätkabeln, och användas som komplement för verifiering och eventuell kalibrering av höjdmodellen.

I de senaste utförda undersökningarna buntades elektrod- och hydrofonkabel ihop så att de kan läggas ut och samlas in samtidigt (Wisén et al. 2019), vilket sparar tid och eliminerar positioneringsfel mellan metoderna. Vidare kan positioneringen utföras akustiskt m.h.a. av hydrofonerna och små sprängladdningar i kända positioner, vilket ökar precisionen. Det kräver dock en större undersökningsbåt p.g.a. storlek och vikt på den kombinerade kabeln.

Elektrisk resistivitetstomografi (ERT)

Elektrisk resistivitetstomografi (ERT), även känt som CVES (Contiuous Vertical Electrical Sounding) (t.ex. Dahlin 1996), genomfördes med hjälp av elektrodkabel som placerades på sjö- respektive havsbotten. En ABEM Terrameter LS med 12 mätkanaler användes för mätningarna, där flerkanalsmätning medför en snabb mätningsprocess trots det stora antalet datapunkter. För att kunna få användbara uppskattningar av resistivitet i jord och berg, är det nödvändigt att integrera vattendjup och resistiviteten hos vattnet i tolkningsmodellen. Fel i vattendjup eller resistivitet leder till artefakter i modellen då inversionsprogrammet kompenserar för ett felaktigt överskott eller underskott i ledningsförmåga i vattenmodellen genom motsvarande ökning eller minskning i resistivitet i jord/bergmodellen. Bottentopografi baserad på en kombination av sonarmätning och trycksensorer ingår som en integrerad del av modellerna, liksom vattenresistivitetsfördelningen som mättes med borrhåls-loggningsutrustning eller en borrhålselektrodkabel som hängdes ner i vattnet från undersökningsbåten.

Tolkade modeller av resistivitetsfördelningen i bottensedimenten och berggrunden skapades genom invers numerisk modelltolkning (inversion) m.h.a. programvaran Res2dinvx64, vilket resulterar i modeller som visar vertikala sektioner av resistivitets-variationen. Inversion utfördes som L1-norm (robust) med elektroderna liggande i botten av vattenskiktet (Loke et al 2003). Inversionsprogramvaran har anpassats för att uppfylla kraven för data från Saltsjön genom att tillåta flera vattenskikt med olika resistivitet.(Dahlin & Loke 2018).

Refraktionsseismik

För de refraktionsseismiska undersökningarna användes en hydrofonkabel med 48 aktiva hydrofoner med 5 meters avstånd och en total längd på 235 meter. Som signalkälla används sprängladdningar och dessa placeras på kabeln med 20 meters avstånd ca 1m över bottnen. I bägge ändar av kabeln placeras så kallade fjärrskott med syfte att erhålla refraktortäckning för berget i bägge riktningar och för alla hydrofoner.

För de profiler som var längre än 235 meter så gjordes flera mätutlägg med minst en geofons överlapp. Data från dessa utlägg har sedan lagts samman och modellerats och tolkats som en profil. Två 24 kanalers Geometrics Geode seismografer användes för mätningarna som presenteras här. De flesta mätningarna utfördes nattetid på grund av att buller från båtar och industri under dagtid gav en försämrad datakvalitet.

Seismikdata tolkades som refraktionstomografi (SRT) med programvaran Rayfract Pro.

Saminversion (joint inversion)

Data från både ERT och refraktionsseismisk tomografi (SRT) har tolkats tillsammans m.h.a. så kallad saminversion (joint inversion) med forskningsprogramvaran BERT-GIMLi. Därigenom kan gemensamma strukturer från de olika modellerna stötta varandra och ge säkrare om mera precis modelltolkning (Ronzka et al. 2018).

Resultat från Saltsjön

Kombinerade undersökningar med ERT och refraktionsseismik har utförts som led i förundersökningarna för Östlig förbindelse 2015 och 2018. Undersökningarna har gjorts i sammanlagt 14 linjer, varav de flesta med båda metoderna och några få med enbart seismik. Metoderna har mestadels fungerat bra trots mättekniska utmaningar, och resultaten ger en översikt av den komplexa geologin som inte varit möjlig med andra metoder, och som utgör en bra bas för fortsatta undersökningar (Wisén et al. 2019).

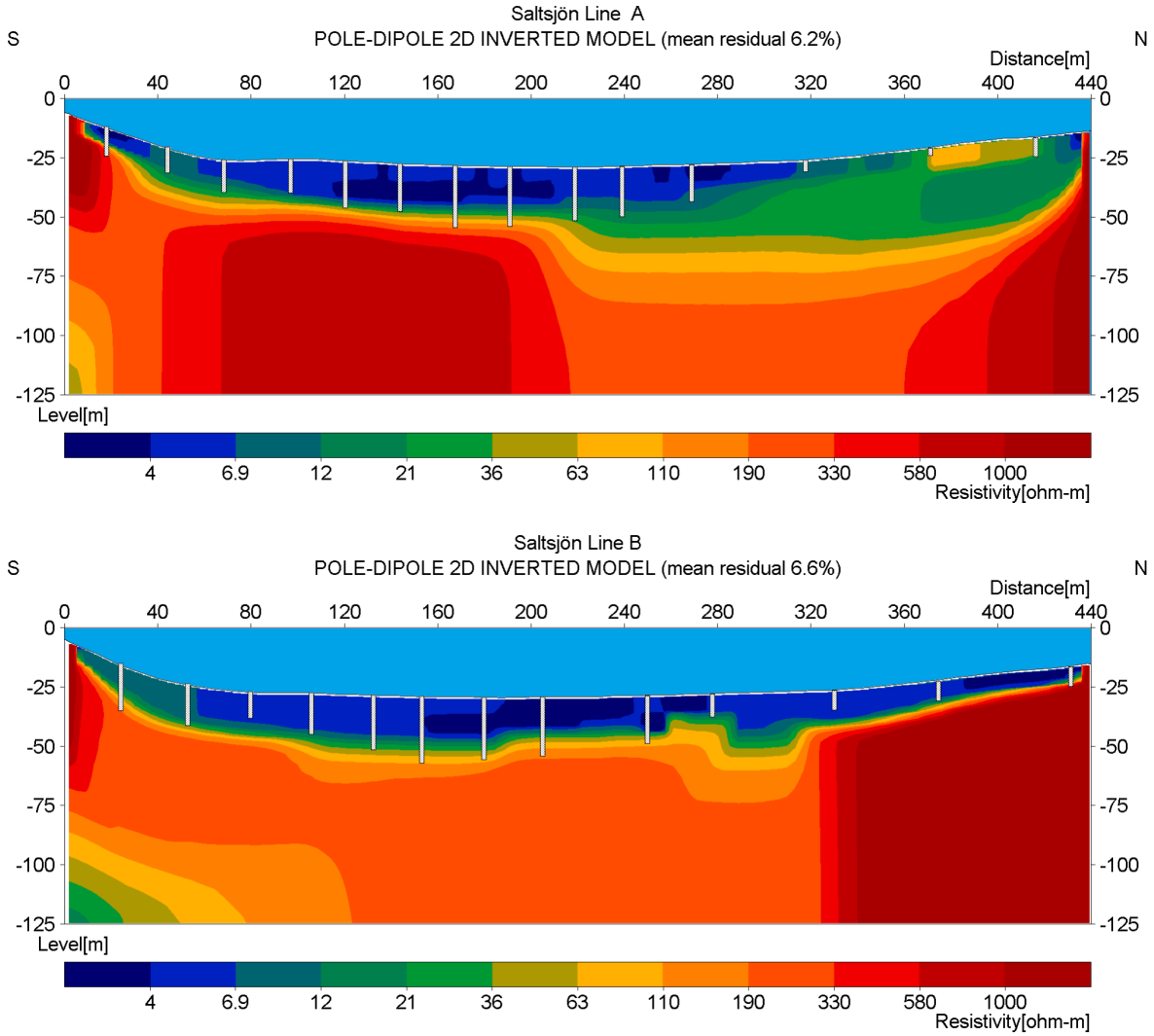
En ERT-undersökning utfördes i Saltsjön 2013 som del av förundersökningarna för T-bana Nacka. Sammanlagt mättes fem linjer, varav två längs sträckningen för City Link för att utnyttja de där utförda borrningarna för utvärdering och kalibrering. Fältundersökningen genomfördes under 3 dagar, där en linje mättes under den första dagen när tid också gick åt till att installera fjärrelektroden och andra förberedelser (Dahlin & Loke 2018).

Elektrodkabeln hade 64 elektroder och ett uttagsavstånd på 7 meter, vilket ger ett totalt utlägg på 441 meter. Pol-dipolkonfiguration användes för att maximera djupned-trängningen, där en 3500 meter lång kabel användes för fjärrelektroden som placerades i vattnet öster om undersökningsområdet.

Resistiviteten (Figur 1) visar ett ytskikt med mycket låg resistivitet (<10 Ωm), vilket tolkas som jordlager, d.v.s. okonsoliderade sediment, med varierande tjocklek och sammansättning med maximala tjocklekar av upp till ca 20 meter i de centrala delarna av linjerna. Det är god överensstämmelse mellan djup till berg enligt JB-sonderingarna och mäktigheten på detta lågresistiva lager.

Under detta finns generellt högre resistiviteter, men med stora variationer som kan tolkas som uppspruckna och vittrade zoner i berggrunden, eller varierande sammansättning på berget, eller en kombination av detta. Notera dock att upplösningen

är dålig på djup under sedimentlagren, och att den komplexa geologin förväntas ger 3D-effekter. Kärnborrning utförd från Stadshuskajen (KB01 och 13VEC06K) i området visade granitioder, förkastningsbreccia samt pegmatitgångar. Kärnorna var till stora delar rödfärgade, och större och mindre krosszoner förekom i många delar av kärnorna. Stora delar av kärnorna är kraftigt omvandlade med kärnförlust till följd av leromvandlingen. Kärnborrning från Skeppsholmen (13VEC09K) visar inga förkastningsstrukturer men rödfärgade partier som tyder på vittring i den södra delen (Golder Associates 2014). Den varierande resistiviteten i berget med ställvis ordentligt låga resistiviteter för att vara berg stämmer väl överens med karaktären på borrkärnorna.



Figur 1. Resistivitetsmodeller för undersökningar längs sträckningen för City Link, med tolkade djup till berggrunden från JB-sondering markerade.

Resultat från Mälaren

ERT har utförts längs den del av Förbifart Stockholm som ska gå under Lambarfjärden. Den resulterande modellen visar ett översta mycket lågresistivt (<10 Ωm) lager vars mäktighet stämmer väl överens med djup till berg enligt tidigare utförd seismik och borrning. Den visar också låga resistiviteter (<50 Ωm) i en zon i det som tolkas som berggrunden där seismiken visar låga hastigheter och där berget enligt kärnborrning är kraftigt uppsprucket och lervittrat (Dahlin & Wisén 2017; Lindvall & Warberg 2016).

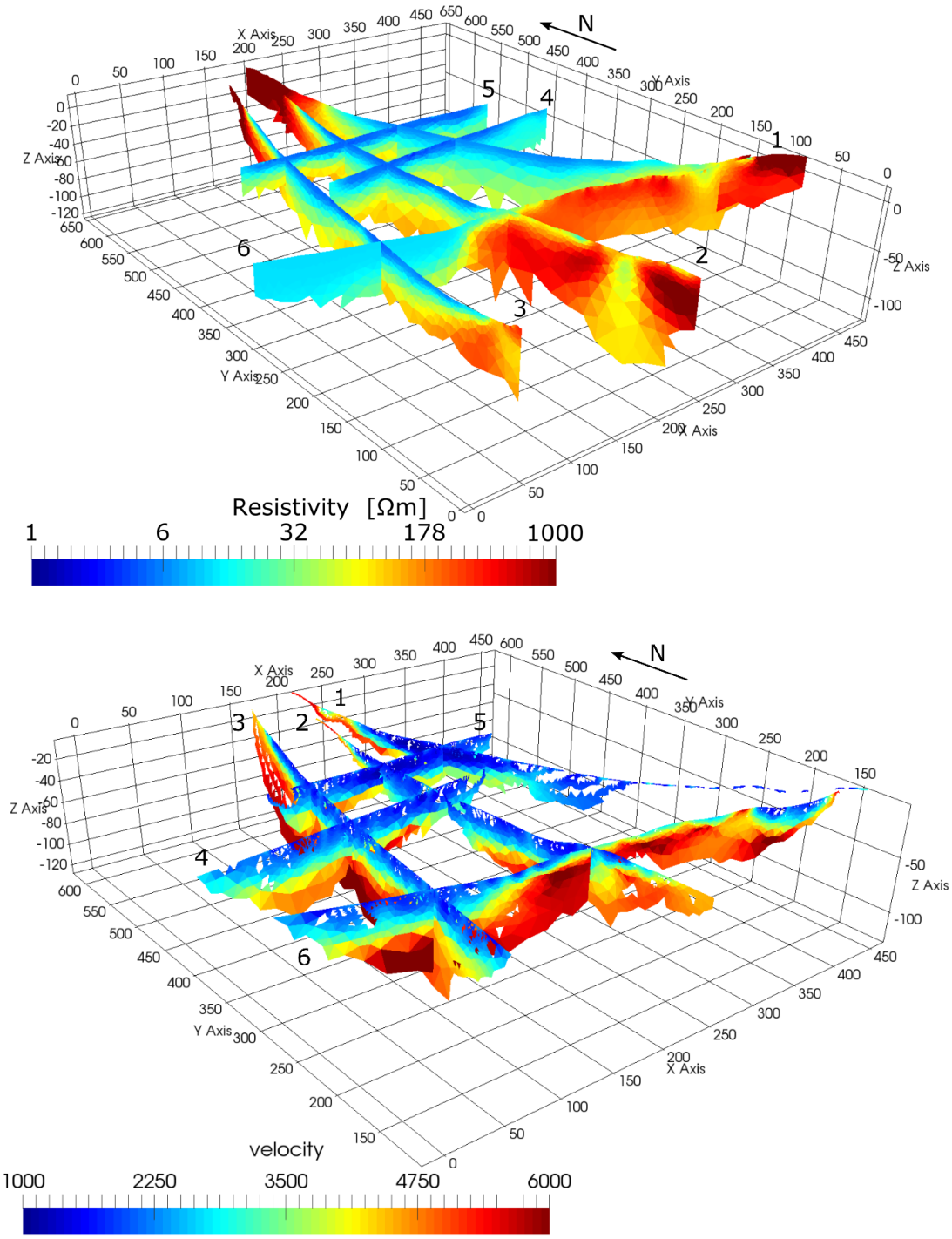
Både ERT och seismisk refraktionstomografi (SRT) har utförts i en förundersökning för ny avloppstunnel under Mälaren vid Hägersten. För ERT-mätningarna användes två separata utlägg med elektrodkabel med 64 elektroder på 5 m avstånd, med ett ca 100m långt överlapp mellan utläggen och en total längd på drygt 500 m. Mätningarna utfördes med multipel gradientkonfiguration. Seismikdata samlades in m.h.a. separata utlägg om totalt knappt 450 meters längd och ca 20 m överlapp (Lindvall & Warberg 2016).

ERT-resultat för alla sex profilerna visas i Figur 3. Resultaten visar konsekventa variationer i ett lågresistivt toppskikt som motsvarar variationen i djupet av finsediment. ERT-linjerna överensstämmer i allmänhet väl vid korsningspunkterna, utom linje 6, vilken visar låg resistivitet i hela djupet av modellavsnittet längs delar av linjen. Det senare orsakas förmodligen av att linjen går ovanför och parallellt med en sprickzon i berggrunden. Bortsett från detta kännetecknas berggrunden av hög resistivitet, förutom en zon som kan noteras i Linje 1, 2 och 3. Denna vertikala zon tolkas som en svaghetszon i berggrunden.

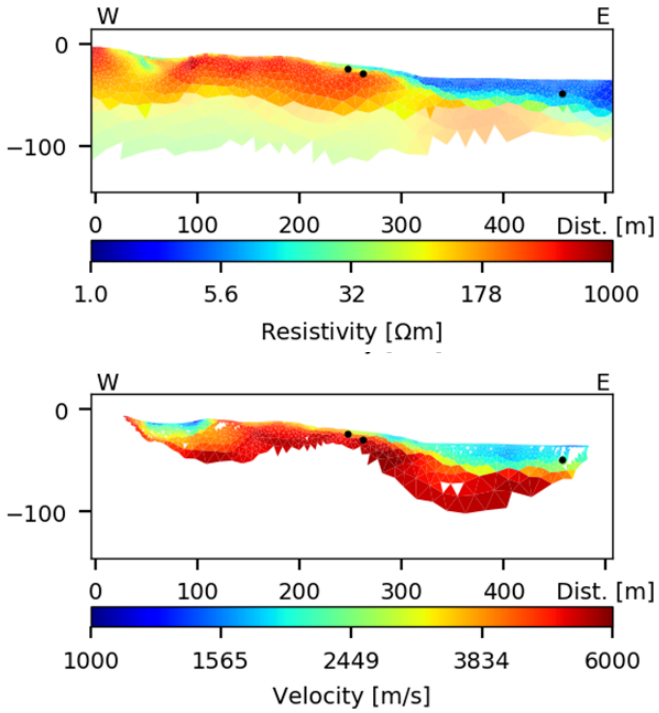
Seismikresultaten visar en bild som i stor utsträckning överensstämmer med ERT-resultaten, men med några viktiga skillnader (Figur 3). Övergången från det översta finsedimentlagret med låga hastigheter till underliggande höghastighetslager är skarpare än motsvarande övergångar i resistivitetsmodellerna. Linje 1 saknar användbar djup-penetration i södra änden p.g.a. dämpning av signalen i gasfyllda sediment i kombination med signalstörningar. Lågresistivitetszonen i berggrunden, som är tydlig i linje 1, 2, 3 och 6, framträder inte i SRT-resultaten. Den låga resistiviteten som sträcker sig till fullt djup i den västra änden av linje 6 matchas inte av låga hastigheter i SRT-modellen, vilket inte skulle förväntas på grund av den annorlunda fysiska mekanismen för seismisk vågutbredning runt en smal sprickzon. Den övre zonen med låg hastighet som syns tydligt i den östra änden av linje 6 motsvaras inte av en lågresistivitetszon, vilket tyder på att den består av grovkorniga sediment snarare än leriga.

Figur 4 visar resultat från saminversion för Linje 6, med skarpare övergång mellan lagren än för den separata inversionen. Generellt är det god överensstämmelse mellan övergång från låg till hög resistivitet och låg till hög hastighet, svarande mot gränsen mellan sediment och berg. Djup till berg från JB-sondering, markerade med punkter i Figur 4, visar att bergnivåerna avspeglas av de geofysiska modellerna. En del detaljer skiljer sig åt mellan modellerna, t.ex. visar ERT inslag med högre resistivitet i låghastighetszonen i början av linjen, vilket tolkas som grovsediment eller morän. ERT

visar vidare en låghastighetszon i berget, som inte syns i seismikmodellen, vilket tolkas som en svaghetszon.



Figur 2. Resultat från avloppstunnelundersökningen vid Hägersten; ERT-modeller (överst), och refraktionsseismiska modeller (nederst)



Figur 3. Saminversionsresultat för Linje 6 från avloppstunnelundersökningen vid Hägersten, som visar resistivitetsfördelningen (överst) och hastighetsfördelningen (nederst). Svarta prickar markerar djup till berg enligt JB-sondering.

Glappet i det seismiska resultatet för Linje 1 (se Figur 3), orsakat av höga nivåer på signalstörningar under dagtid i kombination med dämpning av signalen p.g.a. gas i bottensedimenten, täcks upp av kontinuerliga ERT-resultat. Detta är ett av flera exempel på att metoderna kompletterar varandra.

Diskussion och slutsatser

Generellt kan vattenpassager förknippas med den största risken för dålig bergkvalitet, där problem med mycket genomsläppligt samt instabilt berg kan bli aktuella. Det är också högriskområden för liten bergtäckning under vattenmättade sediment, vilket kan leda till katastrofala inflöden av vatten i tunneln om det inte tagits hänsyn till detta i planeringen. Genom att använda geofysik i ett tidigt skede, och basera placering och metodval för sondering, borrning och provtagning på det, kan man för en säkrare ingenjörsgeologisk modell genom att detaljundersökningarna placeras mera optimalt. Genom att optimera detaljundersökningarna behöver den totala kostnaden inte öka.

Resultaten visar att ERT-undersökningar kan ge viktiga bidrag till platsundersökningar i vattenpassager i stadsområden, genom att skapa kontinuerliga modeller av variationen i djup till berg som stämmer väl överens med resultaten från seismik och borrning.

Resultaten visar också på att information om variation i bergkvalitet, som kan vara av kritisk betydelse för planering av undermarkskonstruktioner, kan härledas från data.

Sjövatten med resistivitet på ca 60 Ωm medför mycket gynnsamma undersöknings-förhållanden i Mälaren även med ca 20 m vattendjup. I bräckt eller salt vatten, såsom i Saltsjön, går en stor del av den utsända strömmen i vattnet vilket gör det svårare att upplösa resistivitetsvariationen i marken. Det gör att man kan behöva mäta med pol-dipolkonfiguration, som kräver fjärrelektrod, för att uppnå tillräcklig djupnedträngning.

Refraktionsseismiken har gett bra resultat för de flesta undersökta linjerna, utom ett par fall där stora mängder gas i bottensedimenten dämpade ut mätsignalerna. Refraktions-seismik med bottenförlagd kabel och skottpunkter vid botten ger erfarenhetsmässigt tillförlitliga modeller av berggrundstopografi och berghastigheter. Bestämningen av berghastigheten blir i stort sett lika säker som vid arbete med metoden på land.

Kombinationen ERT och seismisk tomografi är ett koncept som fungerar väl i praktiken, och metoderna kompletterar varandra. Eventuella glapp i täckningen för en metod kan täckas upp av den andra. Genom att använda två metoder erhålls ett säkrare underlag för tolkning och bedömning av djup till berg, variation i bergkvalitet och förekomst av svaghetszoner i berget. Båda metoderna ger kontinuerliga modeller längs hela den undersökta sträckan, i motsats till geoteknisk sondering och borrning. De geofysiska modellerna ger ett bra underlag för placering av detaljundersökningar, så att dessa blir representativa och man minimerar risken för att missa zoner med avvikande egenskaper. Dokumentationen från borrningen kan sedan användas för kalibrering och förfining av tolkningen av de geofysiska modellerna.

Merkostnaden för att använda båda de geofysiska metoderna tillsammans är betydligt mindre än att göra två separata undersökningar, eftersom planering, förberedelser, logistik, etc. kan samutnyttjas. Det är också kvalitetshöjande eftersom positioneringsfel mellan metoderna kan reduceras eller elimineras, det senare om man buntar ihop mät-kablarna så att de lägg ut tillsammans. Ett kombinerat geofysiskt utlägg i en hel profil över Saltsjön eller Mälaren kan kostnadsmässigt jämställas med en enda marin JB-sondering. Det torde således vara mycket kostnadseffektivt att inleda undersökningarna med en geofysisk undersökning som kan ligga till grund för ett optimerat borrprogram.

Sammanfattningsvis ska geofysiska undersökningar ses som ett naturligt led i ett undersökningsprogram där man kombinerar metoder (Wisén et al. 2019). Areell täckning kan erhållas på ett ekonomiskt sätt när tidigare underlag saknas. Det är extra effektivt när man har dåligt med bakgrundsdata, och när andra undersökningar, såsom borrning, är svåra att genomföra. Det är dock viktigt att syftet med och förväntningarna på de geofysiska undersökningarna specificeras tydligt och är realistiska.

Tack

Arbetet bakom denna artikel har utförts inom ramen för Geoinfra-TRUST 2.1 och 4.2 (http://www.trust-geoinfra.se/), finansierat av Forskningsrådet Formas (ref. 2012-1931), BeFo (ref. 314 och 331) and SBUF (ref.12718 och 12719). Undersökningarna för T-bana Nacka finansierades av Stockholms Läns Landsting och utfördes i samarbete med WSP och Clinton Mätteknik. Undersökningarna i Lambarfjärden och för Östlig förbindelse 2015 gjordes i form av ett examensarbete utfört av Elisabeth Lindvall och Erik Warberg, med ekonomiskt stöd från BeFo, där Kamel Hebbache och Matteo Rossi hjälpte till i fält. Mätningarna 2018 utfördes av Rambøll Danmark A/S och Impakt Geofysik AB under ledning av Bergab och Trafikverket. Undersökningarna för Östlig förbindelse finansierades av Trafikverket. Vid Hägersten gjordes de i samarbete med Ramböll Sverige AB och Rambøll Danmark A/S och finansierades av Stockholm Vatten AB. Vi vill tacka för trevligt samarbete och för att vi får presentera resultaten.

Referenser

Dahlin T. (1996) 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, *First Break*, 14(7), 275-283.

Dahlin T. & Loke M.H. (2018) Underwater ERT surveying in water with resistivity layering with example of application to site investigation for a rock tunnel in central Stockholm, *Near Surface Geophysic*s, 16, 230-237.

Loke M.H., Acworth I. & Dahlin T. (2003) A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys, *Explor. Geophys.*, 34(3), 182-187.

Golder Associates (2014) *Geomodell Strömmen*. Rapp., Uppdragsnr 12512480520, 18p.

Lindvall E.& Warberg E. (2016) *Kombinerad förundersökning för tunnlar med resistivitet och refraktionsseismik i urban undervattensmiljö*, Examensarbete, Lunds Universitet, ISRN LUTVDG / (TVTG-5145) / 1-85 /(2016), 85s.

Ronczka M., Wisén R. & Dahlin T. (2018) Geophysical pre-investigation for a Stockholm tunnel project: Joint inversion and interpretation of geoelectric and seismic refraction data with the Python BERT/GIMLi package, *Near Surface Geophys.*, 16, 258-268.

Rossi M., Dahlin T, Olsson P.I. & Günther T. (2018) Data acquisition, processing and filtering for reliable 3D resistivity and time-domain induced polarization tomography in an urban area: field example of Vinsta, Stockholm, *Near Surface Geophys*, 16, 220-229.

Wichmann C. (2018) Att passera Saltsjö-Mälarsnittet med tunnel—En ny utmaning. in *Procs. Grundläggningsdagen 2018*, Stockholm, 15 Mars 2018, 8p.

Wisén R., Dahlin T. & Forsberg O. (2019) Geofysik som en självklar del vid förundersökningar i komplex geologi? Exempel från Saltsjön i Stockholm.in *Procs Grundläggningsdagen 2019*, Stockholm, 14 mars 2019, 16p.