

ERT OCH TEM SOM VERKTYG FÖR GRUNDTVATTENUNDERSÖKNINGAR – JÄMFÖRANDE STUDIE I SKÅNE

ERT and TEM as a tool for groundwater investigations – Comparative study in Skåne, southern Sweden

av HENRIK KRISTOFFERSSON och TORLEIF DAHLIN, *Teknisk Geologi, Lunds Universitet, 221 00 Lund*
e-post: h.kristoffersson@gmail.com



Abstract

The study presented in this article addresses geophysical methods that can create 2D and 3D models that reflect the geology. The models can be used as a tool for mapping of groundwater resources. Four profiles, located in Vombsänkan in southeastern Skåne, have been investigated with Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Transient Electromagnetic Soundings (TEM). The purpose of the study was to compare the two geophysical methods and to interpret the resistivity model in a geological and hydrogeological context. Inversion models from measured data were interpreted with the available background information from the area. Generally, the resistivity through the profiles decreased with depth. Indications of aquifers exist, with coarse formations above fine-grained formations. ERT and TEM complement each other well.

Key words – Geophysics, Resistivity, ERT, TEM, Geology, Hydrogeology, Aquifer, Groundwater, Skåne, Vombsänkan

Sammanfattning

Studien presenterad i denna artikel behandlar geofysiska mätmetoder som tids- och kostnadseffektivt kan skapa tvådimensionella och tredimensionella modeller som avspeglar geologin. Modellerna kan användas som verktyg för kartläggning av grundvattentillgångar. Fyra profiler belägna i Vombsänkan i sydöstra Skåne undersöktes med galvanisk resistivitetmätning (ERT) och Transient Elektronmagnetisk Sondring (TEM). Syftet med studien var att jämföra ERT och TEM som en del i en metodstudie samt att tolka resistivitetsmodellerna geologiskt och hydrogeologiskt. Inversionsmodeller från mätdata tolkades med framtagen bakgrundsinformation över mätlökalen. Generellt genom alla profiler kan det ses en sjunkande resistivitet mot djupet. Indikationer på akviferer finns med grovkorniga vattenförande lager ovanpå mer finkorniga formationer. Slutsatsen är att ERT och TEM kompletterar varandra väl.

Inledning

Geofysiska mätmetoder kan tids- och kostnadseffektivt skapa tvådimensionella (2D) och tredimensionella (3D) modeller som avspeglar geologin och kan användas som ett verktyg för kartläggning av grundvattentillgångar. De geofysiska undersökningarna utfördes i denna studie med en geoelektrisk metod (ERT) och en elektromagnetisk metod (TEM). Resistivitets-IP-mätningar (ERT) genomförs för att bl.a. få en bild av grovsedimenten i jordlagren. De kompletteras med Transient Elektron-

magnetisk Sondring (TEM) som kan ge en uppfattning om de djupare jordlagrens karaktär samt om djup till berg och berggrundsförhållande med avseende på bergets sprickighet, vittringsgrad och konsolideringsgrad.

Studien är ett samarbete med Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och konsultföretaget WSP. Samarbetet med SGU är ett led i deras hydrogeologiska kartläggning av viktiga grundvattenmagasin i Sverige. Samarbetet med WSP är kopplat till ett uppdrag från Sjöbo kommun att undersöka en ny huvudvattentäkt som antingen ersätter eller kompletterar den befintliga vattentäkten.

De huvudsakliga målen med studien har varit att analysera styrkor och svagheter hos ERT respektive TEM samt att tolka framtagna resistivitetsmodeller geologiskt och hydrogeologiskt. Detta gjordes genom applicering av respektive metod längs fyra profiler och genom tolkningar av de geofysiska modellerna i kombination med data i området som borrhningar, brunnar och relevant bakgrundsinformation. Artikeln är en vetenskaplig sammanfattning av ett examensarbete med samma titel (Kristoffersson, 2014). Examensarbetet genomfördes på avdelningen för Teknisk Geologi vid Lunds Tekniska Högskola. Från de geologiska och hydrogeologiska tolkningarna baserade på resistivitetsmodellerna, utvärderar SGU och WSP hur bra respektive område är ur grundvattensynpunkt för sin egen räkning.

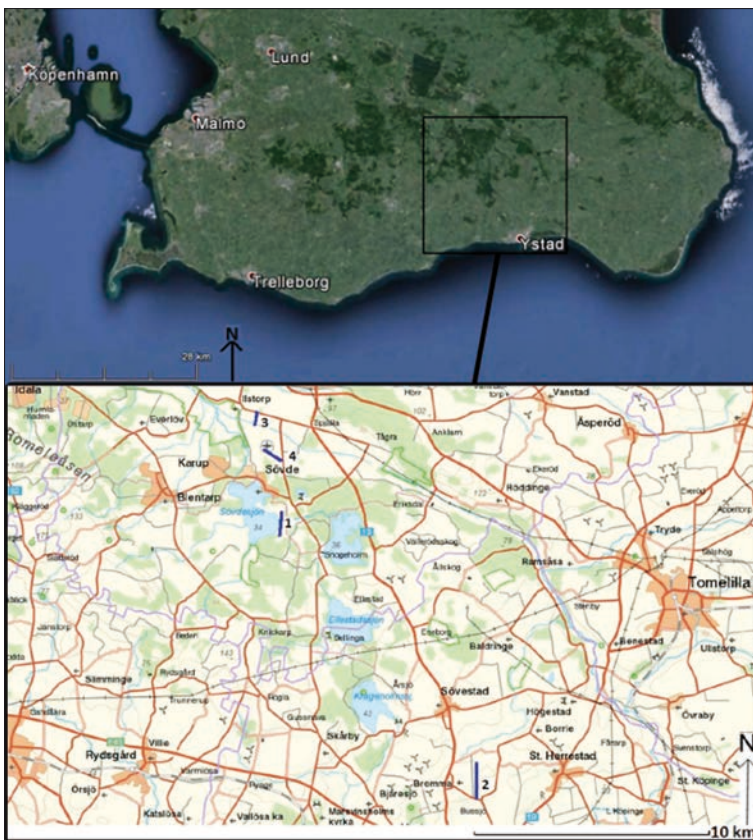
Metodik

Platsbeskrivning

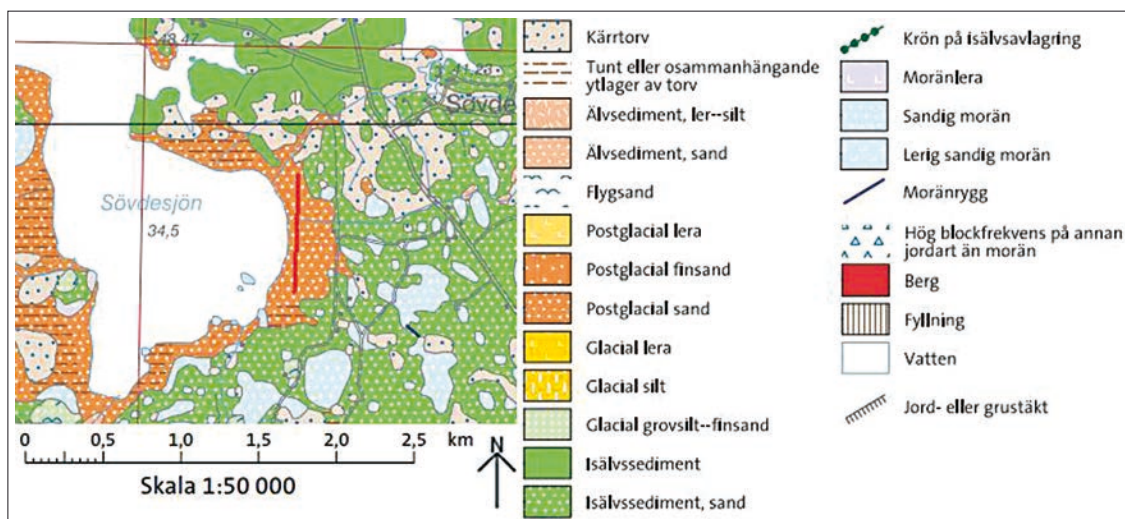
Området som är av intresse i denna studie finns i sydöstra Skåne mellan Sjöbo och Ystad, mer specifikt i de centrala och södra delarna av den så kallade Vombsän-

kan, mellan horstarna Romeleåsen och Linderödsåsen. Figur 1 åskådliggör områdets och profilernas geografiska placering och sträckning. Generellt sett är geologin i området högst intressant ur grundvattensynpunkt, bestående av issjosediment och isälvsavlagringar innehållande grovsediment med större mäktighet i de övre jordlagren. Ofta med ett underliggande lerlager som agerar likt en barriär gentemot vattnet och kan fungera som en akvifers undre begränsning.

Berggrunden i Vombsänkan är sedimentär och består till större delen av sandsten, kalksten eller lersten från den geologiska perioden krita. Från kartmaterial över området framgår det att utbredningen av de glaciala sedimenten issjosediment i fält och isälvsavlagringar är stor, främst i norra delen av området där det finns ett sammanhängande system av isälvsavlagringar. Gränsen mellan en isälvsavlagring och ett issjosediment är flytande och är mycket svår att urskilja (Daniel, 1992). Söderut i området, i det så kallade backlandskapet, dominerar moränlera men glacial lera (s.k. platålera) i markytan är ofta förekommande. Längre norrut förekommer ofta den glaciala leran under isälvs- och issjosediment.



Figur 1. Orienteringskarta över södra Skåne med profilernas geografiska placering och sträckning. Profil 1 och 2 är utförda i samarbete med SGU. Profil 3 och 4 är utförda i samarbete med WSP. (Google Maps och modifierad topografiskarta från Lantmäteriet, 2014.)



Figur 2. Sträckning för profil 1. Färgkodningen är likt jordartskartor från SGU. Kartunderlag är jordartskartan (SGU Ae 99).

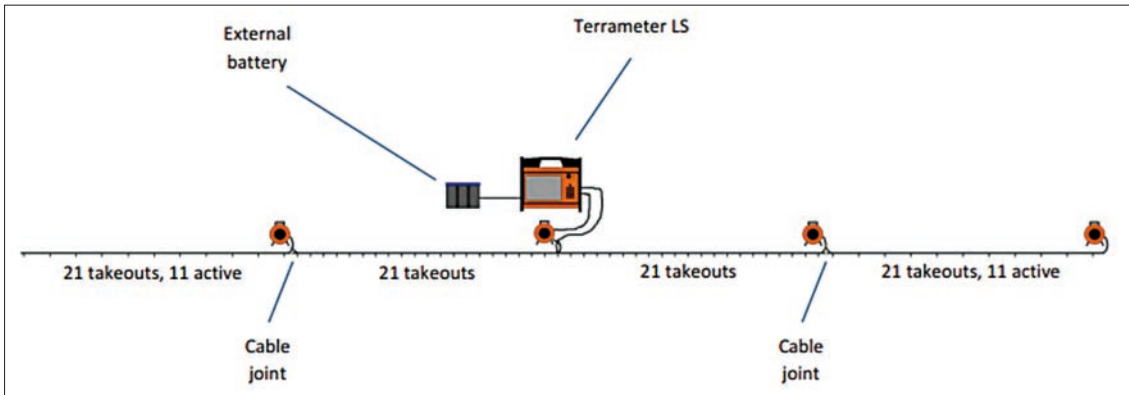
Figur 2 visar placeringen av profil 1 ovan jordartskartan. Profil 1 är placerad i gränslandet från de ovan nämnda områdena av isälvsediment och lermorän. Profilen är placerad omedelbart öster om Sövdesjön och sträcker sig med sina 800 meter från söder till norr genom en relativt plan terräng. Norrut begränsas profilen av ett mindre kärr. Söderut finns en glesare skog som definierade utgångsläget för profilen. Flera mindre bäckar som korsar profilen utgör flöden från Sövdesjön. Bäckarna som korsar profilen har i fält uppskattats vara 1 respektive 5 meter breda. Med denna närhet till sjön är det högst troligt att grundvattennivån ligger nära markytan. Uppgifter gällande jordmäktigheten har observerats i närliggande borrhål samt från jorddjupkartan, och kan uppgå till 70 meter. Från jordartskartan (Figur 2) kan det ses att Sövdesjön omges av ett ytnära område postglaciala sandiga sjösediment. En strandkant utmed östra delen av sjön kunde anas vid fältrekognosering och utbreder sig troligtvis som ett intermoränt sediment under marken. De delvis torvtäckta sedimenten i norra delen av profilen utgör gamla bottensediment från tiden då sjön var betydligt större.

Fältsmätningar

Resultatet från de geofysiska mätningarna är elektrisk resistivitet. Inversen av resistivitet är konduktivitet vilket kan översättas till markens förmåga att leda ström. Resistiviteten kan variera kraftigt i olika geologiska material och beror främst på vattenhalt, vattnets salthalt (jonhalt), lerinnehåll, vittringsgrad och porositet men också på mineralinnehåll och föroreningar i mark.

Principen för resistivitetmätningar är att undersöka hur väl marken leder ström. Detta görs genom att ström skickas mellan två elektroder, s.k. strömelektroder, för att sedan mäta spänningsdifferensen mellan två s.k. potentialelektroder. I denna studie har resistivitetmätningarna utförts med en Terrameter LS från ABEM Instrument AB, dels med 400 m långa utlägg (5 meters elektrodavstånd) och dels med 800 m långa utlägg (10 meters elektrodavstånd). I det senare fallet fås ett större undersökningsdjup som kan användas när datatäckning är avsett kring en djupare liggande berggrund. Mätningarna genomfördes med elektroduppställning multipel gradient som är väl lämpat för flerkanalig datainsamling vilket är tidseffektivt. Vid användningen av 400 m utlägg var varje kabel 100 m lång och hade 21 elektroduttag som visas i Figur 3. Efter att mätningarna på en station slutförts flyttas instrumentet en kabellängd och en ny kabel ansluts i änden på utlägget, och med hjälp av denna så kallade »roll-along» teknik fås längre sammanhängande linjer.

TEM-mätningarna utfördes med en så kallad »central-loop»-uppställning där Figur 4 visar en komplett uppställning av utrustningen. Uppställningen består av två mottagarspolar som är placerade i mitten av en 40 x 40 m² sändarloop. Resultatet från en sondering ger information om konduktiviteten i marken som en funktion av djupet. En TEM-sondering styrs från ett fördefinierat mätskript som finns inlagt i mätinstrumentet. Skriptet innehåller information om mjukvaran och hur mätningen skall genomföras. Innan ordinarie mätning kan ett testskript startas för att kontrollera om signalerna är positiva och om utrustningen är konsekvent och korrekt utlagd.



Figur 3. Elektroduppställning vid fullt kabelutlägg (ABEM Instruments AB, 2012).

TEM-sonderingarna utfördes med instrumentet WalkTEM. En påslagen likström stängs snabbt av i sändarspolen där ett statiskt magnetfält snabbt klingar av och inducerar enligt Faradays lag en elektromotorisk kraft ner i marken med hjälp av s.k. virvelströmmar som diffunderar ner i marken. Detta inducerar i sin tur ett sekundärt avklingande magnetfält vilket registreras i mottagarpolarna som en spänning. Den registrerade spänningen kan senare översättas till skenbar resistivitet.

Databearbetning

Uppmätt och icke behandlad resistivitet i sådana här 3D-miljöer benämns skenbar resistivitet. (Loke, 2013). Mätdata i form av skenbara resistiviteter ger endast en kvalitativ och översiktlig bild som inte kan tolkas geolo-

giskt. Den uppmätta skenbara resistiviteten måste därför tolkas med hjälp av invers numerisk modelltolkning (inverteras) med hjälp av ett datorprogram för att få en uppskattning av denna sanna resistivitetsfördelningen i marken. Resistivitetsmodellen kan sedan tolkas i geologiska och hydrogeologiska termer.

Data från resistivitetsmätningarna processeras och inverteras i programmet Res2DINV där eventuell felaktig, brusig eller negativ mätdata kontrolleras och tas bort. Ur färdig inversionsmodell väljs den iteration med lägst residual (iterationen med lägst avvikelse mellan uppmätta data och syntetiska modellsvar) för export i Lund-format »Lund format file» (*.rho) till vidare visualisering.

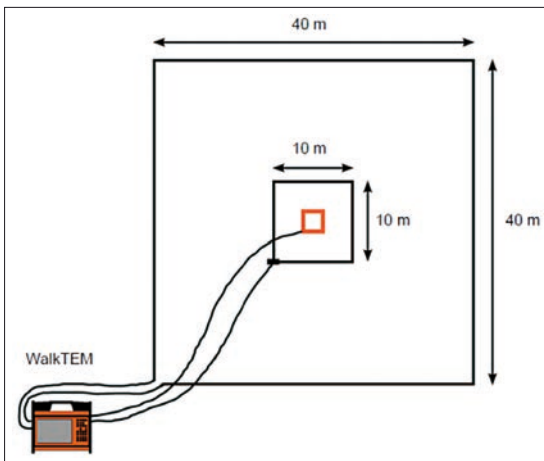
Programmet ViewTEM har ett lätthanterligt användargränssnitt som används för att processera, invertera och påvisa korrupt och felaktig transient elektromagnetisk data. De 1dimensionella modellerna från ViewTEM kan med hjälp av interpoleringar mellan sonderingar bygga upp längre 2dimensionella profiler.

Resultat

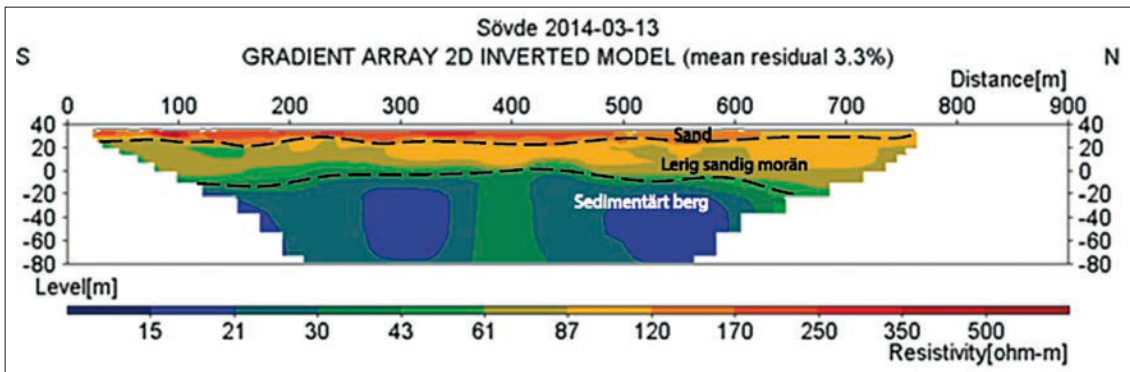
Artikeln visar endast ett exempel från de resultat som presenteras i examensarbetet. För ytterligare och utförligare resultat och diskussion hänvisas läsaren till Kristoffersson (2014).

Profil 1 – Sövde

Profilens längd är 800 m och dess sträckning kan ses på jordartskartan (Figur 2). Mätningarna utfördes från söder till norr. Ett elektrodavstånd på 10 m användes vid resistivitetsmätningarna där höga elektrodkontakts-motstånd erhöles till följd av att det ytligaste lagret var sandigt och torrt. TEM-mätningarna utfördes med ett sonderingsavstånd på 150–200 m.



Figur 4. Konfigurationen visar en färdig uppställning av utrustningen i fält med en $40 \times 40 \text{ m}^2$ sändarloop med två individuella mottagarloopar (ABEM Instruments, 2014).



Figur 5. Resistivetsprofil, ERT.

ERT

Resultat från ERT innehöll en del brusiga datapunkter, p.g.a. dålig kontakt mellan elektroderna och den torra sanden i markytan, vilka redigerades bort före inversion. En dataresidual på 3,3% erhöles på inversionsmodellen vilket kan anses bra. Resultatet från resistivetsprofilen från Sövde i Figur 5 ger indikationer på tre horisontella lager med tanke på resistivetsfördelningen.

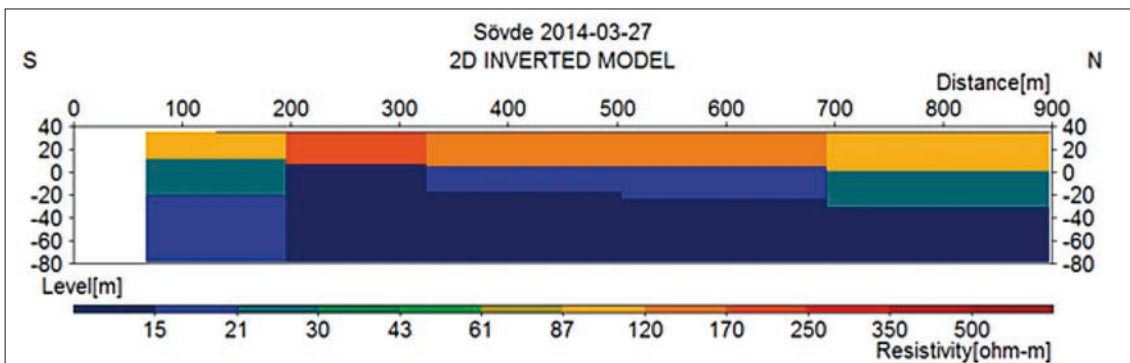
Ett osammanhängande högresistivt ytlager på 120–500 Ωm med en mäktighet på 5–15 m. Ett mellanliggande lager på 50–120 Ωm med en lagertjocklek på 15–30 m. Ett tredje lager med en resistivitet under 40 Ωm med en mäktighet på 60–80 m. Baserat på förväntningsmodell och borrhälsinformation görs följande tolkning från indikationer på resistivetsmodellen.

Ytlaget är med stor sannolikhet omättad sand med resistivitet över 200 Ωm . Grundvattenytan tros befinna sig relativt ytligt längs profilen och således finns mättad sand med något lägre resistiviteter under grundvattenytan. Detta sandlager tros befinna sig ovan den stora utbredningen av isälvsediment omväxlande med lermorän som kan ses från jordartskartan innehållandes de grövre kornfraktionerna grus och sand vilket nägorlunda

överensstämmer med resistivetsfördelningen hos det mellanliggande lagret. Det undre lagret är troligen den sedimentära berggrunden utifrån förväntat jorddjup. Det är svårt att dra någon slutsats om bergets sammansättning men det är troligt att bergmassan innehåller ler och lersten med en hög vattenhalt, med tanke på den höga konduktiviteten (=låg resistivitet) som berggrunden visar upp. Utifrån brunnborringar i området är det troligt att det sedimentära bergets sammansättning är till största delen finkornigt material såsom mägersten och lersten med överlagrande finkornigare sediment som ler och lermorän.

TEM

Med den öppna terrängen samt frånvaron av infrastruktur och källor för elektromagnetisk koppling på mätlokaler kunde TEM-sonderingarna med lätthet utföras. Alla 6 sonderingarna uppvisade goda resultat utan tecken på elektromagnetiska störningar. Inversioner som är framtagna för profilen är uteslutande 3-lagersmodeller vilka är presenterade med blockig struktur och samma resistivetsintervall som ERT för jämförbarhetens skull (Figur 6). Resistivetsprofilen visar att strukturerna inte



Figur 6. Resistivetsprofil, TEM.

har någon stor variation i djup eller resistivitet längs linjen. Sonderingarnas olika lager har god säkerhet i sin bestämning vid resistivitet, tjocklek och djup. Det är genomgående jämn resistivitet mellan 80 och 200 Ωm i det övre lagret med en mäktighet på ungefär 30 m. De två underliggande lagren har en resistivitet som inte skiljer sig så mycket från varandra, enbart några tiotals Ωm .

Sand från den postglaciala sandavlagringen runt Sövdesjön förväntas dominera markytan i området. Troligtvis är sanden mättad på vatten någon meter under marknivån, dels för närheten till sjön och dels för stor nederbörd under mätstillfället, vilket ger den relativt låga resistiviteten (runt 100 Ωm) för sand. Mellanliggande lager kan vara vattenmättad sand omväxlande med lermorän med tanke på dess låga resistivitet mellan 20 och 50 Ωm . Om gränsen mellan de två undre lagren på profilen är det sedimentära berget överensstämmer det tämligen bra med förväntat djup. Det är troligt att bergmassan innehåller lera och lersten, alternativt kan vittring eller saltinnehåll tänkas ge upphov till den låga resistiviteten.

Jämförelse mellan ERT och TEM

Resistivitetsprofilerna för ERT och TEM har presenterats med samma resistivitetsintervall och samma längd- och höjdskala för jämförbarhetens skull. TEM visas med blockig struktur och ERT med mjukt interpolerad variant. Följande likheter och skillnader mellan ERT och TEM anses finnas på mätloken:

- Resultaten visar en överensstämmelse genom att resistiviteten sjunker med djupet, även lagertjocklekarna är av någorlunda överensstämmelse.
- Ytlagret är med stor sannolikhet omättad sand vilket ses bäst på ERT där grundvattenytan befinner sig relativt ytligt längs profilen.
- Det mellanliggande lagret kan bestå av isälvssediment omväxlande med lermorän vilket överensstämmer med resistivitetsfördelningen.
- Det undre lagret som troligen är berggrunden utifrån förväntat jorddjup har en väldigt låg resistivitet vilket kan ses på båda profilerna.

Diskussion och slutsats

Under projektets gång har fältmätningarna gett erfarenhet och djupare förståelse som gjort att fältmetodiken fungerat smidigare och effektivare. Hinder som terräng

och elektromagnetiska kopplingskällor har i ett tidigare skede kunnat undvikas utefter projektets gång genom mer erfarenhet i fält. TEM-sonderingarna hade efter en väl inarbetad och utvecklad fältmetodik en genomsnittlig tid mellan två sonderingar på 45–55 minuter. Projektet har lett till en mängd intressanta resultat men även problem och felkällor har uppstått.

Genom alla profiler ses en hög resistivitet i det översta lagret vilket är gemensamt för både TEM och ERT. Generellt för profilerna ses en sjunkande resistivitet mot djupet, undantaget har varit en profil (Kristoffersson, 2014) som är placerad i backlandskapet där lermorän dominerar i markytan.

Indikationer på akviferer finns med grovkorniga vattenförande lager ovan mer finkorniga formationer som lermoräner och siltrika material. På profil 1 hade en eller flera borrhningar behövs göras för att med större säkerhet kunna uttala sig om jordlagerföljden och det sedimentära bergets sammansättning och karaktär. I andra profiler (Kristoffersson, 2014) stämmer resultat och indikationer väl överens med profilerna från ERT och TEM.

Det finns skillnader i upplösning mellan ERT och TEM i de översta 50–60 metrarna. Med ERT har resistivitetsskillnader kunnat detekteras nära markytan och ner till 60 m, beroende på elektrodkonfigurationen. Det har inte gått att uttala några lagerföljder de översta tiotalen metrarna från TEM-sonderingarna då metoden istället generaliserar dessa översta lagergränser, i gengäld har information erhållits djupare. TEM-metoden har svårigheter att avgöra skillnader i resistiviteter över 150 Ωm och passar sig därför bra på mark med större jorddjup med underliggande sedimentära bergarter likt geologin i Skånes inland och i Danmark.

TEM-metoden är en snabb förundersökningsmetod och kräver inte lika stor arbetskraft eller personal och kan därför sägas vara kostnadseffektiv. Ingen åverkan på marken görs och ingen ströminjektion i marken via elektrod, likt ERT, krävs vilket är bra där elektrodkontakt kan vara ett problem. Dock fordras en miljö utan källor för elektromagnetisk koppling, något som infrastrukturen ger. Resistivitetsmetoden ger användbara resultat med kontinuerlig dataäckning, och metoden är robust gentemot elektromagnetiska störningskällor.

TEM och ERT kompletterar varandra bra. TEM kan användas för att få en relativt snabb överblick över ett undersökningsområde. Helikopterburna TEM-mätningar (SkyTEM) kan vara ett alternativ för större områden som har testats av SGU i Skåne, på Gotland samt på Fårö. ERT erbjuder bra upplösning och metoden är lämplig i mera avgränsade områden.

Tack

Tack till personalen på avdelningen för Teknisk Geologi vid Lunds Universitet för stöd och uppmuntran under arbetets gång. Vi vill också tacka Peter Dahlqvist, Mattias Gustafsson och Mats Thörnelöf på SGU, samt Hans Jeppsson och Li Stenberg på WSP, för gott samarbete.

Referenser

ABEM Instruments AB (2012) Product leaflet Terrameter LS – Imaging system description. [pdf] <http://www.abem.se/support/downloads/brochure/terrameter-ls-4x21-system-layout.pdf> [20140415].

ABEM Instruments AB (2014) WalkTEM user's guide. [pdf] <<http://www.abem.se/support/downloads/user-manuals/abem-walktem-users-guide-33-8000-97-20140616.pdf>> [2014-07-29].

Daniel, E. (1992) Beskrivning till jordartskartan Tomelilla SV och Ystad NV. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning.

Kristofferson, H. (2014) ERT och TEM som verktyg för grundvattenundersökningar, Examensarbete TVTG 5136, Avdelningen för Teknisk Geologi, Lunds Universitet, Lund.

Loke, M.H. (2013) Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Dr. M.H.Loke. [pdf] <<http://www.geotomosoft.com/coursenotes.zip>> [2014-06-04].

