Mini-SkyTEM – et nyt kortlægningsværktøj

Grundvandsmodeller er blevet et uundværligt beslutningsværktøj i administration og vurdering af grundvandsressourcer. Det stiller stigende krav til mængden, tætheden og kvaliteten af modellernes datagrundlag, hvis der skal opnås en tilstrækkeligt høj opløsning af de geologiske strukturer. Det kan umuligt opnås kun på baggrund af boringer, hvorfor geofysiske data typisk inddrages. Men er den overfladenære opløsning med eksisterende metoder tilstrækkelig?

Jesper Pedersen, Flemming Effersø, Flemming Jørgensen, Jens Christian Refsgaard, Esben Auken, Cyril Champer & Anders Vest Christiansen

SkyTEM metoden

SkyTEM-metoden er en videreudvikling af det jordbårne TEM-udstyr (Transient Electromagnetic Method), som kan bruges til indirekte at måle de geologiske forhold i undergrunden helt ned til en dybde på 300 meter samtidig med, at der kan opnås en stor arealdækning. Metoden er i Danmark hovedsageligt blevet brugt til at kortlægge de dybere geologiske strukturer og grundvandsmagasiner, da det på grund af instrumentelle begrænsninger for TEM-systemer hidtil ikke har været muligt at få en detaljeret opløsning af de øverste 10 - 15 meter af jorden. Indenfor de seneste år er der dog sket banebrydende instrumentelle udviklinger, hvilket har ført til udviklingen af Mini-SkyTEM systemet, der giver gode muligheder for at opnå en effektiv og detaljeret kortlægning af de helt overfladenære lag.

SkyTEM systemet består af en ikke-metallisk ramme, der bæres af en helikopter (Figur 1). På rammen er der monteret en senderspole, hvori der kan opbygges strøm af stor styrke, så der dannes et kraftigt primært magnetfelt. Når strømmen slukkes abrupt i spolen, vil det primære magnetfelt aftage, hvormed der dannes elektriske hvirvelstrømme i jorden. Dette skaber et sekundært magnetfelt, der langsomt vil henfalde. Henfaldsraten af det sekundære magnetfelt måles i en lille modtager-spole, som er fastspændt til rammen. Ud fra henfaldsraten kan man beregne den elektriske modstand af lagene i jorden, da henfaldet af det sekundære magnetiske felt afhænger af modstanden, som igen afhænger af de geologiske lag i undergrunden. F.eks. er ler-aflejringer kendetegnet ved at have en lav modstand, og der vil derfor være et langvarigt respons fra disse jordlag, hvorimod der for sand- eller gruslag, som har en høj elektrisk modstand, vil være et kortvarigt respons, idet magnetfeltet hurtigt dør ud.

Mini-SkyTEM-systemet

Mini-SkyTEM-systemet blev udviklet i forbindelse med NiCA-projektet (Nitratreduktion i geologisk heterogene oplande – www.nitrat.dk), hvor formålet er at modellere nitratreduktionen i de overfladenære grundvandsmagasiner og udsivning af nitrat til vandløb.

For at kunne modellere nitratreduktion i de øverste 30 meter af jorden kræves der en yderst detaljeret rumlig beskrivelse af de geologiske strukturer, hvilket stiller nye krav til den overfladenære opløselighed af TEM. Mini-SkyTEM-systemet, som er kendetegnet ved en langt bedre overfladeopløsning og hurtigere produktionstid, omfatter udvikling af:

1) En ny senderspole-ramme bygget med en særlig aerodynamisk profil og et areal på kun 132 m^2. Dette betyder mindre luftmodstand samt et lettere system. Dermed er systemet væsentligt nemmere at anvende i en nominal flyvehøjde på 30 - 40 meter. Dette betyder, at der kan kortlægges ved flyvehastigheder på 100 - 140 km/t. Til sammenligning flyves de konventionelle SkyTEM-systemer med en rammestørrelse på 300-500 m^2 typisk ved en flyvehastighed på 50 - 80 km/t.

2) Nye instrumenter, hvor slukkeforløbet i sender-spolen er optimeret. Dette betyder, at slukketiden for strømmen i senderspolen nu er nede på kun 4 mikrosekunder, hvormed der kan opnås information fra endnu tidligere tider og dermed fra den overfladenære geologi. Med den nyudviklede optimering af slukkeforløbet er den første brugbare måletidsgate kun 5 mikrosekunder eller 1 mikrosekund, efter strømmen er slukket. Dette er der ingen andre helikopterbårne transient elektromagnetiske systemer, der præsterer. I praksis betyder det, at der kan opnås en detaljeret beskrivelse af de øverste jordlag fra 1 - 2 m under overfladen til en dybde af 80 - 130 m.

3) En ny teknik til korrektion af det såkaldte sender-spole respons for de tidligste data. Det er denne korrektion, der muliggør, at data kan anvendes kun 1 mikrosekund efter, at strømmen er slukket. Denne korrektion appliceres som en del af selve datatolkningen. Yderligere er der udviklet en ny processeringsalgoritme, der sørger for, at den meget detaljerede information i data ikke utilsigtet tabes.

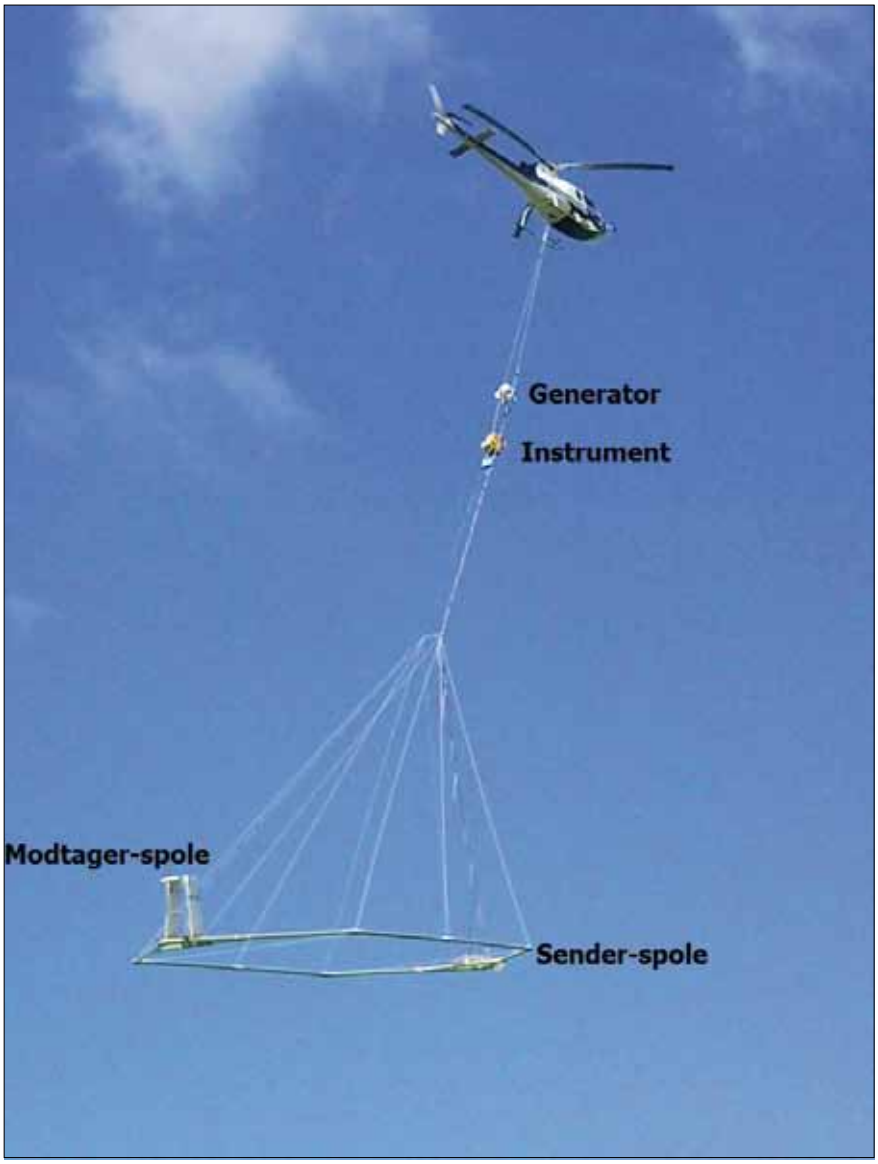
Norsminde-kortlægningen

Det nye system blev afprøvet i Norsminde-området som en del af NiCA-projektet. Den geofysiske kortlægning er udgangspunktet

for overfladenære detaljerede geologiske og hydrologiske modeller til modellering af transport og nedbrydning af nitrat i jorden.

Kortlægningsområdet udgør det cirka 101 km^2 store opland til Norsminde Fjord tæt på Odder (Figur 2). Geologien i Norsmindeoplandet er kompleks og kan inddeles i enheder bestående af glaciale aflejringer, paleogene aflejringer, begravede tunneldale og glacialtektonisk komplekser.

Mini-SkyTEM-kortlægningen blev udført af SkyTEM Surveys ApS og HydroGeofysik-Gruppen, Aarhus Universitet i juni 2010 og var inddelt i tre faser. I første fase blev der kortlagt med en linjeafstand på 100 meter mellem flyvelinjerne. Flyvelinjerne fra fase 1, 2 og 3 er vist som henholdsvis sorte, røde og grønne linjer i Figur 2. I alt er der kortlagt 1203 kilometer på 13 timer og 26 minutter i fase 1. Dette kunne have været gjort hurtigere, men flyvehastigheden var reduceret til maksimalt 100 km/t, da det var første gang, systemet blev brugt. I fase 2 er der fløjet mellem flyvelinjerne fra fase 1 for at opnå en højere datatæthed i den vestlige del af kortlægningsområdet. I alt blev der fløjet 465 kilometer data på 5 timer og 6 minutter i fase 2. I fase 3 er der fløjet 178 km på 2 timer, hvor flyvelinjerne krydser linjerne fra fase 1 og 2 for at se, om det kunne forbedre opløseligheden af geologien i dette område. Sammenlagt blev det 101 km^2 store opland kortlagt på kun 4 dage, og der blev i alt indsamlet 1846 kilometer data bestående af mere end 100.000 enkeltsonderinger.



Figur 1. *Mini-SkyTEM-systemet.*

Resultater

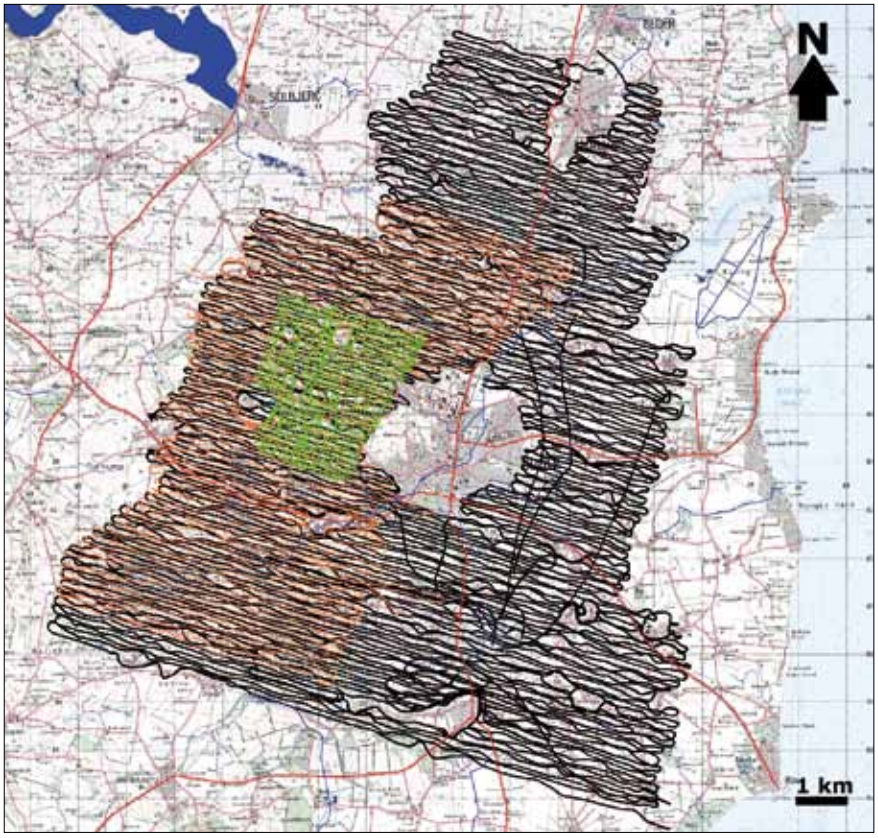
Efter dataindsamling processeres rådata for at fjerne de støjede og koblede data, der stammer fra menneskabte installationer som højspændingsledninger, kabler, veje eller jernbaner. Den gennemsnitlige flyvehastighed for kortlægningen var cirka 28 meter pr. sekund, og typisk anvendes der en repetitionsfrekvens, så der udlæses en fuld måling hvert halve sekund. Den laterale afstand imellem rådatasættene er således cirka 14 meter. Rådata bliver dog i processeringen stakket for at forbedre signal-støj-forholdet, og i realiteten er opløsningen derfor 25 - 50 meter horisontalt og mindre end et par meter vertikalt. Efter processering tolkes data med en tolkningsalgoritme, som giver en kvasi-3D model af jordens modstand ned til en dybde på 130 meter under terræn. Efterfølgende præsenteres de geofysiske modeller typisk som middelmodstandskort i forskellige dybdeintervaller (Figur 3) eller på profiler. I Figur 3 ses et middelmodstandskort for dybden 15-20 meter. Generelt er der en god sammenhæng mellem modstand og forekomsten af ler eller sand. Lerede sedimenter har typisk modstande mindre end 50 ohm-m, mens sand og grus har modstande højere end 60 ohm-m. Det palaeogene ler i oplandet er kendetegnet ved en meget lav modstand på under 10 ohm-m.

Som det fremgår af middelmodstandskortet, er detaljegraden meget høj, og der ses store lokale modstandsvariationer, hvilket reflekterer fordelingen af sand og ler. Information om den rumlige fordeling af disse spredte lokale forekomster af ler og sand er vital med henblik på at modellere nitratreduktionen i de overfladenære grundvandsmagasiner.

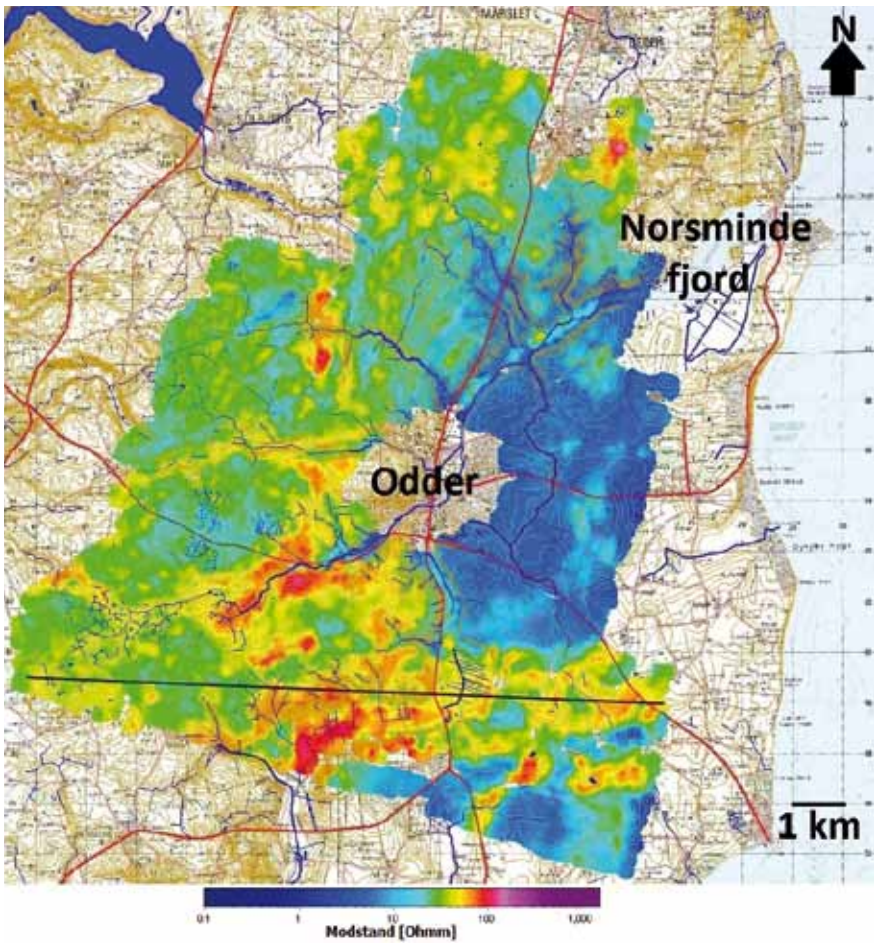
Sammenstilling med boringer

For at validere den overfladenære opløsning af Mini-SkyTEM-systemet, er de geofysiske resultater sammenstillet med både nye og eksisterende boredata i Norsminde-området. Til valideringen er alle boringer som ligger indenfor 15 m af en flyvelinje benyttet. I alt findes der 54 boringer inden for denne afstand, men kun på 46 af disse fandtes boredata. Alle tilgængelige oplysninger på disse boringer er gennemgået grundigt, og på den baggrund er der foretaget en detaljeret sammenligning med de nærmeste geofysiske modeller.

Fremgangsmåden for sammenligningen har været at plotte de geofysiske modeller på et profil sammen med boringens lithologiske information og så foretage en vurdering af overensstemmelsen. Ved sammenstillingen er kvaliteten af boringsdata nøje kvalitetsvurderet. Dette er sket ved bl.a. at gennemgå boreprøvebeskrivelser, brøndborerrapporter og lokaliseringsskemaer. Kvaliteten af boredata er ofte lav på grund af diverse faktorer så som manglende eller dårlig prøveudtagning, boremetode, ringe prøvebeskrivelse og ikke mindst fejlagtig koordinatsætning. Dernæst er



Figur 2. *Flyvelinjer fra kortlægningen i Norsmindeoplandet.*



Figur 3. *Middelmodstandskort i dybden 15-20 meter. Højdekonturerne er også vist, og der ses mange steder en direkte sammenhæng med geologien.*

overensstemmelsen mellem boringen og de geofysiske sonderingsmodeller vurderet.

Overensstemmelsen mellem boringen og de geofysiske modeller er derefter blevet delt ind i 4 kategorier; "meget god overensstemmelse", "god overensstemmelse", "ringe overensstemmelse" og "uoverensstemmelse". Ved "meget god overensstemmelse" viser de geofysiske modeller lave modstande (dvs. < 50-60 ohmm), når boredata viser lerede sedimenter (typisk moræneler, smeltevandsler og glimmerler), og hvis der f.eks. forekommer palaeogent ler, er modstandene meget lave (< 10 ohmm). Når der forekommer sand eller grus i boringerne, skal der ses høje modstande i modellerne (dvs. > 50-60 ohmm). Herudover er der overensstemmelse mht. nøjagtig placering af laggrænser og dermed tykkelserne af de enkelte lag. Ved "god overensstemmelse" er der typisk små unøjagtigheder i sammenhængen mellem placeringen af laggrænser (et eksempel kunne være en unøjagtighed på 3 m på en laggrænse i 15 meters dybde, eller at et enkelt tyndt lag på 2-3 m ikke er opløst i de øverste 10 m). Ved "ringe overensstemmelse" er der stadig nogen grad af sammenhæng og stadig brugbar information at uddrage fra MiniSkyTEM-data, mens der ved "uoverenstemmelse" ikke kan spores en sammenhæng.

Af de i alt 46 lokaliteter, hvor der er sammenlignet, fordelte overensstemmelsen sig således:

- Ved 43,5 % af sammenligningerne er der meget god overensstemmelse
- Ved 32,6 % af sammenligningerne er der god overensstemmelse
- Ved 17,4 % af sammenligningerne er der ringe overensstemmelse.
- Ved 6,5 % af sammenligningerne er der uoverensstemmelse.

Der er dermed en meget god eller god overensstemmelse for hele 76 % af boringerne, hvilket er et lovende resultat. I praksis betyder det, at kun 11 af de i alt 46 boringer havde ringe eller uoverensstemmelse. Efterfølgende er årsagerne til den manglende overensstemmelse i disse tilfælde blevet vurderet. De fundne årsager fordeler sig på (1) dårlig kvalitet af boringerne, (2) fejl i lokalisering af boringer, (3) koblinger til elinstallationer og datastøj, (4) forhøjet saltindhold i porevandet, samt (5) 3D-effekter og begrænsninger i opløsningen af systemet. Undersøgelsen viser, at omkring 1/3 af tilfældene med ringe eller ingen overensstemmelse relaterer sig til fejlbehæftede eller dårlige boredata (1+2), mens 2/3 af tilfældene skyldes faktorer, der kan relateres til kortlægningsmetoden

(3+4+5). Heraf er langt den dominerende årsag (5) 3D-effekter og begrænsninger i opløsningen af systemet.

De fleste tilfælde med ringe eller ingen overensstemmelse findes i det nordlige område, som er kraftigt glacialtektonisk deformeret. Her er det ikke overraskende, at systemet ikke kan opløse geologien og reproducere boredata, da heterogeniteten er langt under den forventede horisontale opløsning, der kan opnås med metoden.

Perspektiver

Sammenstillingen af Mini-SkyTEM resultaterne fra Norsmindeoplandet med 46 boringer viser en meget god eller god overensstemmelse for 76% af boringerne. Kun for 6.5% af boringerne (3 boringer) var der uoverensstemmelse. Dette bevidner en god overfladenær opløsning opnået med det nye system.

Resultaterne fra Norsminde-kortlægningen åbner for, at de geofysiske resultater kan bruges som input til detaljerede overfladenære geologiske modeller, der bl.a. kan anvendes til at kortlægge sårbare områder på lokal skala. Tidligere har udviklingen af SkyTEM-systemet primært været rettet mod at opnå en større kortlægningsdybde for at kunne kortlægge de primære grundvandsmagasiner, men med det nyudviklede Mini-SkyTEM kan de geofysiske resultater også bruges i den mere overfladenære geologi. Her tænkes især på geologiske og hydrologiske undersøgelser såsom kortlægning af sekundære grundvandsmagasiner, saltvandsindtrængning, vådområder, forureningssager eller en detaljeret sårbarhedskortlægning i form af lertykkelseskort.

Den geofysiske kortlægning, der opnås med Mini-SkyTEM, vil dog også være relevant for andre sektorer og vil kunne bruges i geotekniske undersøgelser ved for eksempel større anlægsprojekter, etableringen af nye veje samt jordbundsundersøgelser. Resultaterne vil også kunne understøtte den regionale kortlægning af råstoffer i Danmark. Også i forbindelse med klimatilpasning vil Mini-SkyTEM kunne anvendes. Grundet klimaforandringerne kan vi forvente længere og mere intense perioder med nedbør, og vi får derfor brug for en god og hurtig beskrivelse af de øverste jordlag og grundvandsmagasiner, så vi kan forudse, hvor der bliver behov for dræning eller sikring af infrastrukturanlæg som veje og banestrækninger.

Der peges endvidere på, at landbrugsarealer eller andre åbne arealer kan komme til at spille en vigtig rolle i tilbageholdelse af vand. Mini-SkyTEM vil her kunne bidrage til den rigtige udpegning og på sigt danne basis for en mere præcis planlægning af gødskning af markerne, så vi både kan tilgodese ønsket om øgede afgrøder og et bedre miljø.

Jesper Pedersen er videnskabelig assistent ved den hydrogeofysiske forskningsgruppe ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.

Flemming Effersø er CEO for SkyTEM survey ApS.

Flemming Jørgensen er seniorforsker i grundvandskortlægnings afdelingen ved GEUS.

Jens Christian Refsgaard er professor i Hydrologisk Afdeling, GEUS og leder af NiCA projektet.

Esben Auken er professor og leder af den hydrogeofysiske forskningsgruppe ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.

Cyril Schamper er post. doc ved den hydrogeofysiske forskningsgruppe ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.

Anders Vest Christiansen er lektor og leder af den hydrogeofysiske forskningsgruppe ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.

Skjern Å foto…

Genoprettet natur ved Skjern Å. Foto: Niels Dahlin Lisborg & Ulrik Lorenzen.