



Geofysikken i Naturstyrelsens grundvandskortlægning

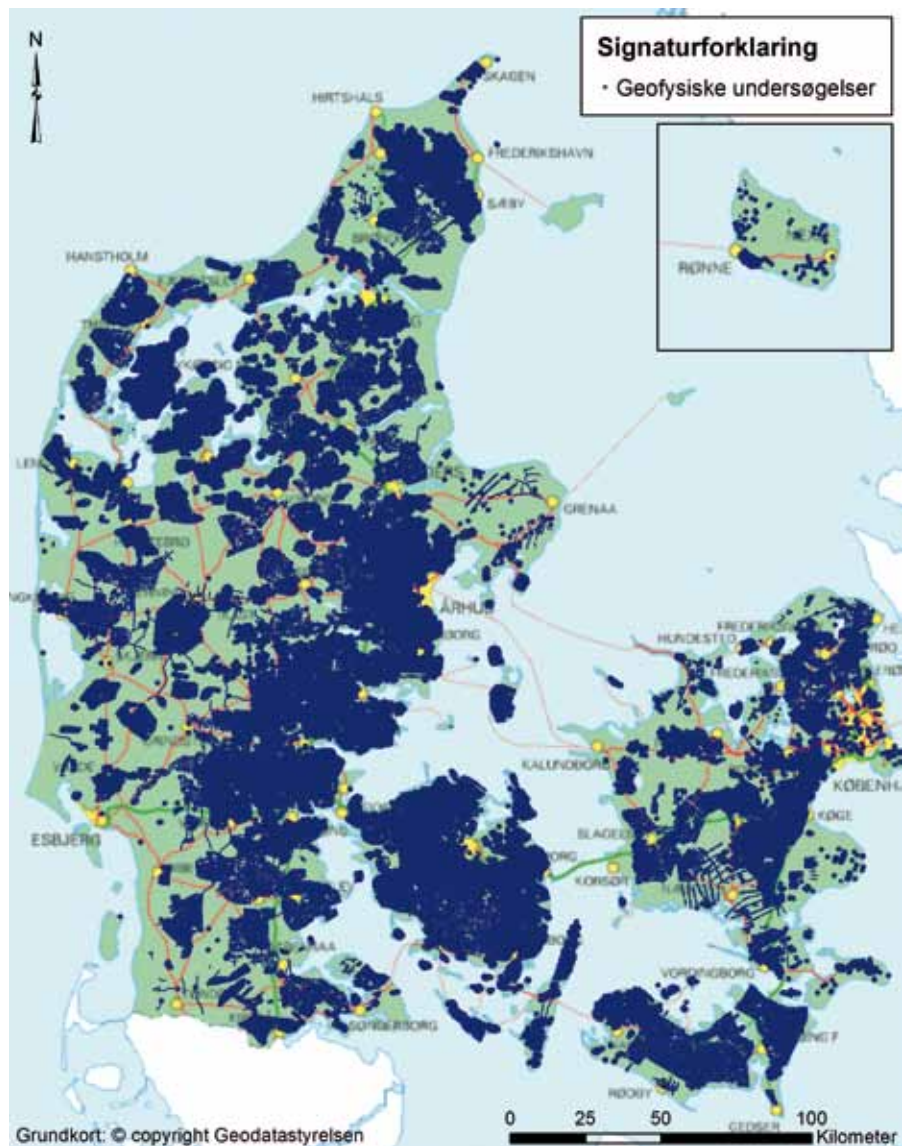
Storskala grundvandskortlægning kræver storskala metoder, både mht. dybden og den horisontale fladedækning. Den nationale grundvandskortlægning gør derfor brug af en række geofysiske metoder der, tilsammen med diverse nationale databaser, skaber grundlaget for at opstille robuste geologiske og hydrogeologiske modeller. Nogle af metoderne er udviklet i Danmark som et led i kortlægningsarbejdet.

MAI-BRITT MOSE JENSEN, ESSEN AUKEN
& ANDERS VEST CHRISTIANSEN

Geofysikkens rolle og udvikling

Drikkevandsforsyningen i Danmark er 100% baseret på indvinding af grundvand. For at sikre en stabil forsyning nu og i fremtiden, og for at begrænse forureningsrisikoen, gennemfører Naturstyrelsen frem til 2015 en landsdækkende grundvandskortlægning. Der stilles ganske store krav til detaljeringsgraden og sikkerheden i denne kortlægning, noget som bl.a. opnås gennem anvendelse af geofysiske kortlægningsmetoder. Geofysiske datasæt med stor arealmæssig tæthed og en høj opløselighed giver information om både de terrænnære og de dybereliggende geologiske forhold, og skaber således grundlaget for den geologiske model, der i sidste ende udgør grundlaget for den hydrogeologiske/hydrologiske model.

Anvendelsen af geofysiske metoder i grundvandskortlægningen er øget betydeligt siden starten af kortlægningskampagnen, og i dag kan en række forskellige metoder tages i brug, ofte i kombination med hinanden (tabel 1). I forbindelse med kortlægning af lerdæklag og grundvandsmagasiner anvendes primært geoelektriske metoder, fx MEP (Multi Elektrode Profiler) og PACES (Pulled Array Continuous Electrical Sounding); elektromagnetiske metoder, fx TEM og SkyTEM (hvh. landbaseret og luftbåren Transient Elektromagnetisk Metode), og i mindre omfang magnetisk resonans sondering (MRS). Principperne bag SkyTEM og MRS metoden forklares



Figur 1. Kortet viser, hvorfra i landet der d. 26. februar 2014 findes geofysisk data i GERDA.

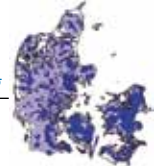


Table 1. Oversigt over de geofysiske metoder som anvendes i Naturstyrelsens grundvandskortlægning. For metoder markeret med * findes data eksempel i artiklen.

Metode	Hvad måles?	Hvad tolkes?	Jordkontakt	Max. dybde (m)	
Elektromagnetisk	1. TEM 2. SkyTEM*	Den elektriske modstand i jorden	Jordart	1. Ja 2. Nej	250-300 m
Elektrisk	1. PACES 2. MEP	Den elektriske modstand i jorden	Jordart	Ja	1. 20-30m 2. 15-25m
Borehulslogging	1. Naturlig gammalog* 2. Spektral gammalog 3. Induktionslog* 4. Resistivitetslog* 5. Fluid resistivitets- og temperaturlog* 6. Caliperlog 7. Flowlog 8. Soniclog 9. Densitetslog 10. Vertikal Seismisk Profil (VSP)	1. Samlet strålingsintensitet 2. Den radioaktive effekt fra hhv. Uran, Thorium og Kalium 3. Elektrisk ledningsevne 4. Formationens resistivitet 5. Formationsvandets resistivitet og Temperatur 6. Borehullets diameter 7. Indstrømningsfordelingen 8. Akustiske egenskaber 9. Densitet 10. Hastighed	1. Tilstedeværelsen af lersedimenter 2. Lerminerale 3. Jordart 4. Porøsitet, vandindhold, indholdet af salte 5. Koncentration og art af opløste salte samt Temperatur 6. Borehullets diameter 7. Indstrømningsfordeling 8. Jordart 9. Jordart 10. Hastighed	Nej	Borehuldybde
Seismik	1. P-bølge refleksionsseismik* 2. S-bølge refleksionsseismik 3. Refraktionsseismik	Hastighed (m/s)	Geologiske strukturer	Ja	1. km 2. km 3. 50m
MRS*		Vandmængde Permeabilitet	Vandmængde Permeabilitet	Ja	50-70 m
SSV	1. SkyTEM /MEP/PACES 2. Geologisk beskrivelse af borehuller	Hvor god er korrelationen mellem SkyTEM data og geologisk data fra borehuller	Den samlede geofysiske lertykkelse	--	Borehuldybde

nærmere senere i artiklen. MEP og PACES anvendes også til at kortlægge både tørre og vandmættede sandlag samt lerlag i dæklagene, mens TEM-metoden traditionelt anvendes til kortlægning af dybereliggende lag. De nyeste TEM udviklinger gør, at metoden også kan anvendes til at kortlægge selv meget overfladenære lag. Den seismiske metode, hvor man måler lydølgers udbredelse i undergrunden, anvendes også, fx til kortlægning af kalkmagasiner som er overlejret af sand samt til detaljerede kortlægninger af interne strukturer i de geologiske lag.

Grundvandskortlægningen har medført store fremskridt, ikke bare indenfor metodeudvikling, men også mht. data indsamling, processering og management. I Danmark har vi i dag nationale databaser med både geofysiske data (GERDA, se figur 1) og boringsdata (Jupiter) /1/. Disse databaser administreres af Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) og er offentligt tilgængelige uden betaling via internettet. Succesfulde kortlægningsmetoder som SkyTEM anvendes nu ikke kun i Danmark, men i hele verden, og der er skabt en succesfuld eksportvirksomhed. Kortlægningen har også udviklet softwarepakker til processering, modellering og visualisering af data. Aarhus Workbench og

GeoScene3D er gode eksempler på sådanne software pakker og de er vitale for arbejdet med data. En stor del af den udvikling der er foretaget af de geofysiske metoder er drevet i et tæt samarbejde mellem Aarhus Universitet og Naturstyrelsen i det der hedder GeoFysik-Samarbejdet /2/, hvor også GEUS deltager.

Grundvandsmagasiner som er interessante i forhold til vandindvinding findes i Danmark typisk i de øverste 200-300m af undergrunden. Hvilke geofysiske metoder som anvendes i et specifikt kortlægningsområde afhænger af de lokale geologiske forhold. I denne artikel har vi valgt at præsentere SkyTEM og seismik metoden samt borehulslogging, eftersom det er tre metoder som anvendes ganske bredt i hele Danmark. Vi vil til slut også præsentere MRS metoden som er mindre brugt, men som har stor potentiale i fremtiden.

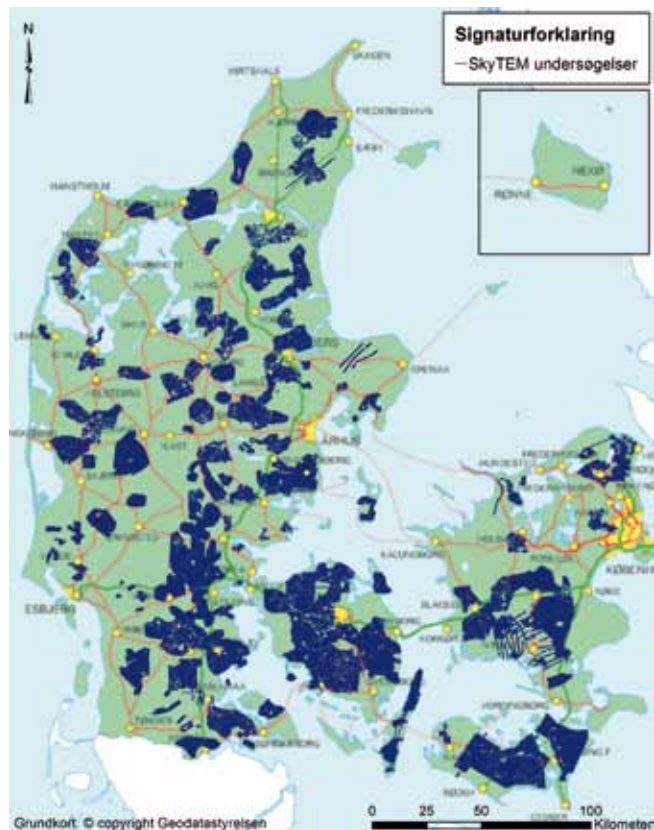
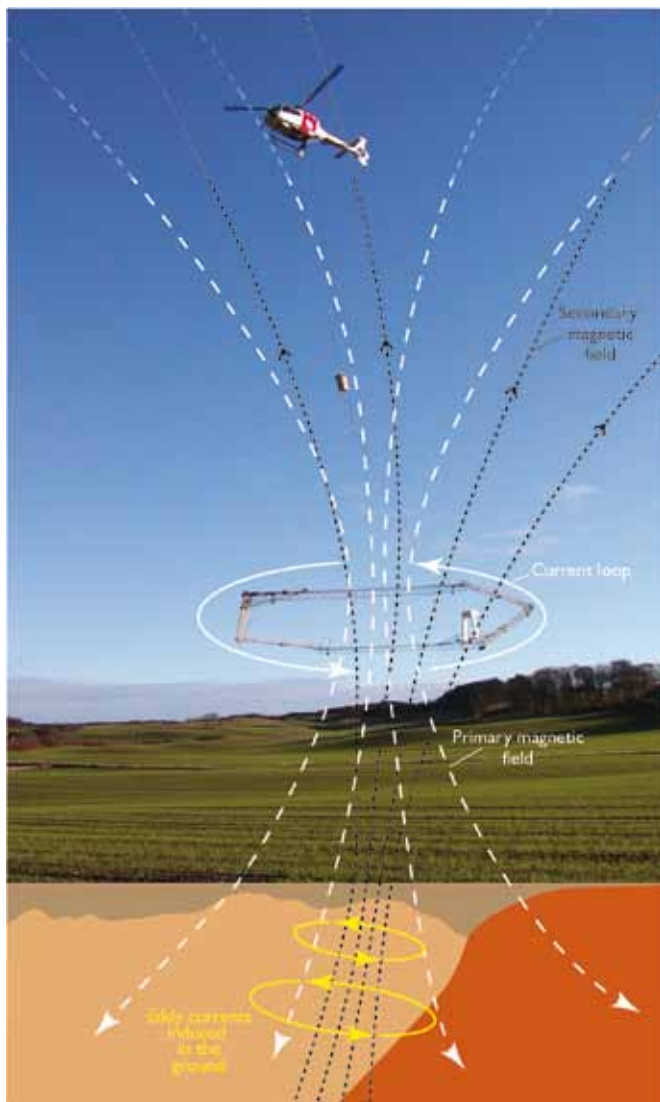
Elektriske og elektromagnetiske metoder

Grundvandsmagasiner udgøres primært af sandede og grusede aflejringer samt kalklag. Styrken i de elektriske og elektromagnetiske metoder ligger i den stærke korrelation mellem den elektriske modstand og jordarten, hvilket gør, at metoderne kan anvendes til at skelne mellem lerede og mere sandede

aflejringer.

SkyTEM-metoden er en luftbåren videreudvikling af den landbaserede TEM-metode (Transient Elektromagnetisk Metode). SkyTEM blev udviklet i Danmark specifikt til hydrogeologisk kortlægning fra luften, og har i dag stor set erstattet de jordbaserede målinger til andet end meget små kortlægninger (se fig. 2B). Metoden førte til langt bedre datadækning og meget større effektivitet, og gjorde det muligt at kortlægge henover skove, søer og vandområder, hvilket er besværligt med de jordbaserede metoder. Metoden har, under optimale forhold, en meget høj lateral densitet af datapunkter, idet datatætheden er mange gange større end hvad man i praksis kan opnå på jorden. Typisk flyves der med en linjeafstand på 100-500 meter og med en måleafstand langs linjen på 15-40 meter mellem datapunkterne. Dybdeindtrængning ligger under optimale omstændigheder på op til 300 meter /3/.

SkyTEM-systemet består af en senderspole og en modtager spole monteret på en ramme, som hænger under en helikopter. Systemet sender et elektromagnetisk signal ned mod jorden, og "oversætter" det signal som kommer retur til en model over den elektriske modstand i undergrunden (figur 2A).



Figur 2. (A) Princippet bag SkyTEM metoden (GEUS). Secondary magnetic field = det sekundære magnetiske felt, Current loop = strøm sløjfe, Primary magnetic field = det primære magnetiske felt, Eddy current induced in the ground = elektrisk strøm induceret i jorden. (B) Data udtræk fra Jupiter i februar 2014: så stor en del af Danmark er dækket af SkyTEM.

Processering, inversion og visualisering af SkyTEM-data sker i programpakken Aarhus Workbench. Efter processering af data er næste skridt en tolkning af data, hvor forskellige geologiske lag og strukturer identificeres (figur 2B). Under denne del af databehandlingen er information fra nærliggende borehuller af uvurderlig betydning.

På grund af instrumentelle begrænsninger har det ikke før været muligt at få en detaljeret opløsnig af de øverste 10-15 meter af jorden med SkyTEM-metoden. Dette har dog ændret sig, og det er nu muligt, med SkyTEM101 systemet, at opnå en detaljeret kortlægning fra 1-2 meter under jordoverfladen og ned til 100-130 meter. En så overfladenær geologisk kortlægning åbner op for muligheden for at anvende SkyTEM til kortlægning af forurenings sårbare områder på meget lokal skala, sekundære grundvandsmagasiner og forureningszoner /4/.

Seismik

Formålet med at anvende seismiske metoder

(tabel 1) i grundvandskortlægningen er at kortlægge et områdes geologiske strukturer. Seismiske undersøgelser dækker sjældent større flader, men er typisk placeret langs linjer, og indgår oftest i samtolkning af andre geofysiske data, fx. SkyTEM. I lang de fleste tilfælde anvendes SkyTEM kortlægningen som beslutningsgrundlag, når placeringen af nye seismiske linjer skal bestemmes.

Langt størstedelen af den seismik som indsamles i grundvandskortlægningen er baseret på P-bølge refleksionsseismik (lydbølgers udbredelse i undergrunden, tabel 1 og figur 3), og giver information om bl.a. forkastninger, tykkelsen af de geologiske lag og begravede dale. Samtolkning af den viden som opnås ved at anvende hhv. seismik og SkyTEM gør, at kombinationen af seismiske og elektromagnetiske metoder med succes kan anvendes til at kortlægge fx. begravede dale, der kan indeholde potentielle grundvandsmagasiner.

Seismik er en landbaseret metode når den anvendes i grundvandskortlægningen, og de

seismiske linjer kan placeres både på vej og på mark. Der er adskillige hensyn at tage, når en seismisk feltkampagne planlægges, således at den bedst mulige datakvalitet opnås. Findes der andet geofysik i området, placeres de seismiske linjer således, at de forskellige metoder supplerer og støtter hinanden i den geologiske tolkning. Findes der dybe og velbeskrevne borer i området, bør de seismiske linjer lægges så tæt på disse som muligt, for at sikre en god korrelation mellem de geologiske lag i borerne og de seismiske data. Tykkelsen af en eventuel umættet zone samt lerlag bør også tages i betragtning, da disse kan påvirke data og besværliggøre tolkningen ganske betragteligt.

Borehulslogging

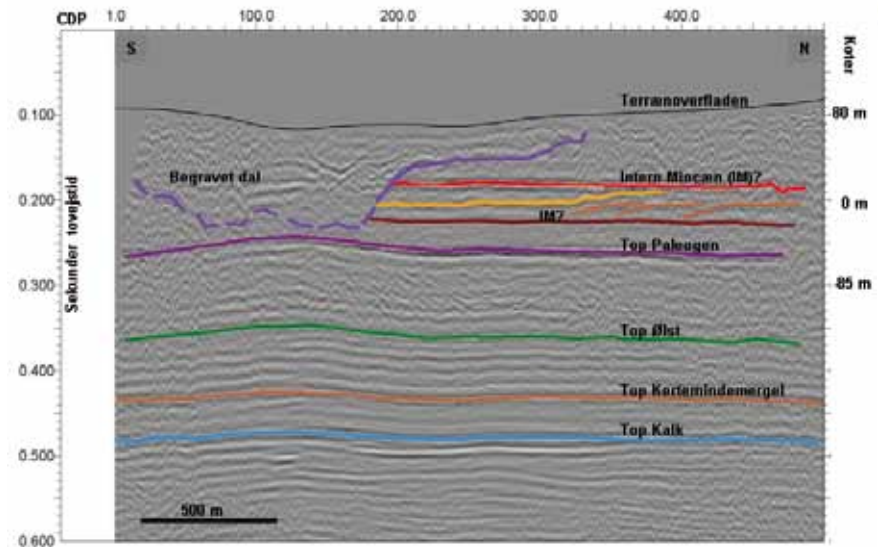
Som tidligere nævnt bør ingen geofysisk metode stå eller tolkes alene. Derfor suppleres der oftest med mindst en anden geofysisk målemetode, samt borehulslogging. Ved borehulslogging måler man forskellige geofysiske parametre i et borehul. Borehullet kan



være en allerede eksisterende boring eller en ny undersøgelsesboring, strategisk placeret i forhold til grundvandskortlægningen.

Der har siden 1926 været indberetningspligt i Danmark på boringer der er udført i forbindelse med vand- og råstofindvinding. Indberetningen inkluderer oplysninger om borested, boreddybde, geologisk lagfølge etc. I dag samles al denne information i GEUS' nationale boringsdatabase Jupiter, hvor der pt. er registreret mere end 240.000 boringer. Dette giver på landsplan en boringstæthed på 5-6 boringer pr. km², dog inklusiv dårligt beskrevne boringer og korte geotekniske boringer /3/. Dette lyder umiddelbart af meget, men kvaliteten af boringerne svinger meget, og boringstætheden aftager kraftigt med dybden hvilket gør, at dybereliggende grundvandsmagasiner oftest ikke "nås" af boringerne.

Naturstyrelsen anvender en række forskellige loggingmetoder i grundvandskortlægningen (tabel 1). På figur 4 ses et eksempel på geofysisk logging af en undersøgelsesboring lavet specifikt til grundvandskortlægningen. Selve loggingen foretages så hurtigt som muligt efter at boringen er færdig, og foregår ved



Figur 3. Et udsnit af et seismisk profil, hvor der bl.a. ses en begravet dal i profillets øvre venstre hjørne.

at man sænker og hæver måleinstrumenterne og måler i hele boringens dybde. Målehastighed og tætheden af målepunkterne afhænger af metode. For eksemplet i figur 4 er resistivitet og induktion (den elektriske modstand i de geologiske lag) samt fluid resistivitet (den

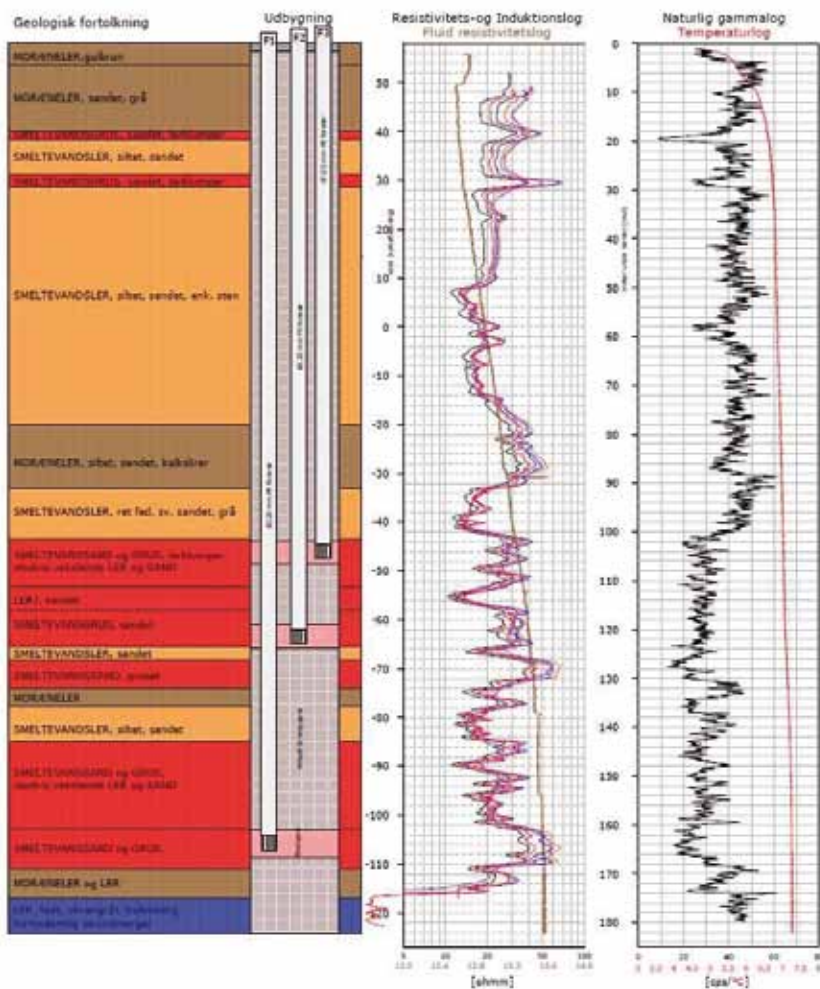
elektriske modstand i den væske som findes i de geologiske lag) og temperatur målt for hver 2,5 cm og den naturlige gamma, som registrerer den naturlige radioaktive stråling fra visse atomer i de geologiske lag, måles for hver 1 cm.

Som noget helt unikt findes der i Aarhus Workbench det såkaldte SSV-modul (Statistical estimation of Structural Vulnerability). Ved at sammenholde de geofysiske data fra SkyTEM målingerne med den geologiske information som findes for hver boring i Jupiter, kan SSV-modulet beregne den samlede mægtighed af fx ler mellem boringerne. Dette er i allerhøjeste grad med til at øge sikkerheden i datatolkningen.

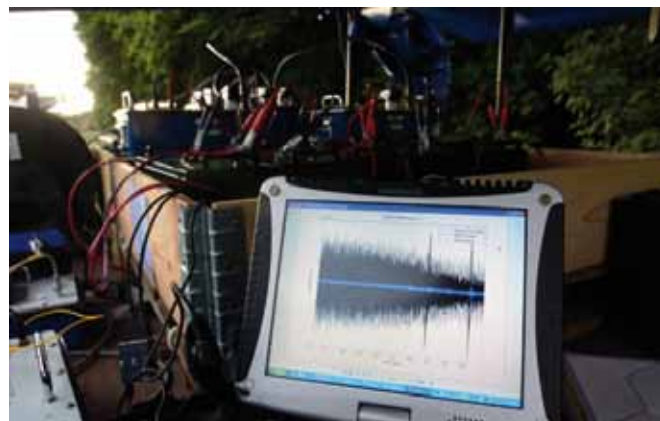
MRS

SkyTEM, seismik og borehulslogging er alle kvalitative metoder, dvs. man måler på parametre, som kun giver indirekte information om vandet. Den eneste geofysiske metode der direkte måler vandindholdet ned gennem jordlagene er MRS (Magnetisk Resonans Sondering). MRS kan endda bruges til at skelne mellem saltvand og ferskvand. Ved at supplere de mere indirekte målemetoder som SkyTEM og seismik med MRS, opnås der en direkte viden om grundvandsmagasinernes hydrologiske parametre, fx. vandindhold og permeabilitet. Metoden er i det store hele sammenlignelig med hospitalernes MR-scannere, men udføres i felten fra en kassevogn (figur 5).

MRS er en relativ ny teknologi, der blev introduceret i grundvandskortlægningen i 2003 i forbindelse med en testkortlægning i Nordjylland udført af GeoFysikSamarbejdet. Metoden fungerer ved at udsende et vekselstrøms-



Figur 4. Geofysisk og geologisk log for boring DGU 107.1567, hvor der er sat tre vandfiltre /6/.



Figur 5. MRS udstyr.

signal, hvilket aktiverer brintatomerne i undergrunden, således at atomernes spin orienterer sig vinkelret på det udsendte magnetfelt. Når strømsignalet slukkes, vil atomerne rotere tilbage til deres oprindelige position omkring jordens magnetfelt. Dette tilbage-spin skaber et magnetisk signal, der kan måles på jordoverfladen. Amplituden af dette signal er direkte proportionalt med det frie vandindhold i jorden og den tid det tager at rotere tilbage til den oprindelige position kan relateres til porøsiteten.

Som sender/modtager anvendes et kabel, der lægges ud på jordoverfladen i en firkant. Denne firkant har typisk med en sidestørrelse på 50 - 100 m og indtrængningsdybden er op til 70 - 80 m. Det absolutte største problem med metoden er, at den er ekstrem følsom overfor menneskabt støj fra 50 Hz strømnettet. Hvordan denne støj undertrykkes er et meget aktivt forskningsområde, men der er stadigvæk nødvendigt at måle over lang tid, dvs. 2 - 10 timer.

Bestemmelse af vandindholdet i jorden afhænger af jordens elektriske modstand. Derfor suppleres MRS rutinemæssigt med en TEM-måling. Endvidere anvendes prøve-pumpnings data fra nærliggende borer til at beregne den hydrauliske ledningsevne (vandets strømningsevne i grundvandsmagasinet). Den mere pålidelige transmissivitet, som er produktet af den hydrauliske ledningsevne og mægtigheden af grundvandsmagasinet, kan også beregnes.

Geofysik i felten

Geofysik er ikke kun for nørder, det er også for hr og fru Danmark! En geofysisk kortlægning går ofte ind på privatejet mark, og vi oplever generelt en meget stor interesse og forståelse fra private borgere, når en kortlægning går i gang. Det er vi meget taknemmelige for – uden denne støtte ville det være en meget stor udfordring, i visse tilfælde umuligt, at gennemføre en geofysisk kortlægning. Rent grundvand til alle, også i fremtiden, er tydeligvis en vision langt de fleste danskerne støtter op om – også i praksis!

Næste skridt

For at få yderligere information om undergrunden og sikkerhed i tolkningen af data, bør SkyTEM målingerne som minimum suppleres med geologisk viden fra borehuller. Al anden øvrig geologisk viden bør også inddrages, ligesom en stor dosis sund fornuft mht. metodernes sammenlignelighed, styrker og svagheder altid er et godt redskab!

Formålet med den geofysiske del af grundvandskortlægningen er at opnå så meget detaljeret viden om de geologiske forhold, samt grundvandsmagasinerne udbredelse og (ler-)dæklagenes sammensætning, som muligt. Begge dele er nødvendig viden, for at kunne opstille en troværdig geologisk model. I Naturstyrelsens grundvandskortlægning afsluttes alle geofysiske kortlægninger med, at data uploades til hhv. GERDA, og Jupiter databaserne. Nu kan selve den geologiske modellering i GeoScene3D starte.

Referencer

- /1/ <http://www.geus.dk/DK/data-maps/>
- /2/ www.gfs.au.dk
- /3/ HydroGeophysics Group, Aarhus University: Geofysik og Grundvandskortlægning. Kan downloades fra: <http://gfs.au.dk/publikationer/kursusnoter/>
- /4/ Pedersen, J., Effersø, F., Jørgensen, F., Refsgaard, J.C., Auken, E., Champer, C., Christiansen, A. V. 2011: Mini-SkyTEM – et effektivt værktøj til overfladenær geologisk kortlægning.
- /5/ Seismisk tolkning I Lindved indsatsområde. Miljøcenter Århus, 2008. <http://www.naturstyrelsen.dk/NR/rdonlyres/37653F73-D61D-43FC-A945-2886933E73D6/0/Lindvedseismisktolkning.pdf>
- /6/ <http://data.geus.dk/JupiterWWW/borerapport.jsp?dgunr=107.1567>

MAM-BRITT MOSE JENSEN er Ph.D. i geofysik og ansat ved Naturstyrelsen som specialkonsulent. Hun arbejder dels med grundvandskortlægning, dels som funktionsleder med ansvar for bl.a. grundvandskortlægningens faglige ekspertgrupper. E-mail: mamje@nst.dk

ESBEN AUKEN er professor ved Århus Universitet og er den daglige leder af GeoFysikSamarbejdet (www.gfs.au.dk). Han arbejder med kortlægning af grundvandsressourcer, udvikler data og processeringsalgoritmer og underviser i brugen af elektriske og elektromagnetiske metoder til geologisk og hydrogeologisk kortlægning. E-mail: esben.auken@geo.au.dk

ANDERS VEST CHRISTIANSEN er lektor ved Aarhus Universitet og arbejder med kortlægning af grundvandsressourcer, særligt omkring dataintegration og anvendelsen af geofysiske data sammen med geologiske og hydrogeologiske data. E-mail: anders.vest@geo.au.dk