ATOMKERNERNES FORTÆLLER GRUNDVANDET

Med en teknik kaldet overflade-NMR kan man måle direkte på grundvandet i jorden. Denys Grombacher arbejder på at forbedre metoden, så den kan blive et udbredt værktøj til hjælp for kortlægningen af de vandførende lag og til en bæredygtig forvaltning af vores grundvand.

Af Carsten R. Kjaer,
Aktuel Naturvidenskab

DET FRIE FORSKNINGSRÅD
DANISH COUNCIL FOR INDEPENDENT RESEARCH

Artiklen bringes i samarbejde med Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers.

Det Frie Forskningsråd dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Det Frie Forskningsråd består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers er professor ved Danmarks Tekniske Universitet, Lone Gram.

Denys Grombachers forskning er finansieret af eliteprogrammet Sapere Aude Forskertalent (2015) og DFF-Individuelt postdocstipendium (2015). Læs mere på detfrieforskningsraad.dk

Drikkevand kan uden at overdrive betegnes som et af verdens allervigtigste råstoffer. I Danmark får vi 98 % af vores drikkevand fra grundvand, og vi bruger derfor meget krudt på at kortlægge vore grundvandsressourcer. I praksis vil vi gerne vide, hvor grundvandet er lokaliseret, hvor meget vand, der er i et grundvandsreservoir, hvilke egenskaber reservoiret har – og ikke mindst, hvor sårbart grundvandet er.

At skaffe sig denne viden er dog ikke en triviel øvelse. Ved hjælp af boringer kan vi blive meget klogere på undergrundens beskaffenhed og dens indhold af vand i et givet punkt i landskabet. Men boringer er dyre, og de kan heller ikke bruges til hurtigt at tilvejebringe et billede af undergrundens materialer og indhold af vand i et større område. Med forskellige geofysiske teknikker kan man ved målinger fra jordoverfladen få et godt billede af undergrundens jordlag og tolke, hvilke materialer de består af – og derigennem indirekte give et bud på, om de er vandførende. Men ingen af de udbredte målemetoder i dag giver direkte information om, hvor meget vand, der faktisk er i undergrunden i et givet område.

Og dog. På Aarhus Universitet arbejder Denys James Grombacher med en metode, som har påkaldt sig en del interesse fra forskere og forvaltere af grundvand verden over. Metoden kaldes overflade-NMR, og den glimrer ved, at de målte signaler kommer direkte fra vandmolekylerne.

Førende i grundvand

Det er ikke nogen tilfældighed, at Denys netop befinder sig på institut for Geoscience ved Aarhus Universitet. Her findes nemlig en forskningsgruppe, som er verdensførende indenfor en geofysisk metode til grundvandskortlægning, hvor man tolker undergrundens beskaffenhed ud fra forskelle på jordlagenes elektriske ledningsevne. Sådanne målinger kan foretages på jordoverfladen, og Aarhusgruppens store fortjeneste er, at de har udviklet metoden, så målingerne kan laves fra en helikopter. På den måde kan man hurtigt og effektivt kortlægge undergrunden uden at forstyrre landmænd og andet godtfolk alt for meget. Den helikopterbaserede metode, kaldet SkyTEM, har været en både forskningsmæssig og kommerciel succes, som har bragt Aarhus-forskerne på verdenskortet. Via et samarbejde med en tilsvarende forskningsgruppe inden for geofysisk grundvandsundersøgelse på Stanford University i USA, kom Denys til Danmark her i 2016 på en post.doc.-bevilling fra Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers.

Anvendt kvantemekanik

Den metode, overflade-NMR, Denys arbejder med i sit forskningsprojekt, minder for en overfladisk betragtning om den, som SkyTEM bygger på. Begge går de således ud på at inducere et magnetfelt i jorden ved hjælp at et elektrisk signal og måle på det signal, man får tilbage fra undergrunden. Men grundlæggende bygger metoderne på vidt forskellige fysiske principper.

Forkortelsen NMR står for nuklearmagnetisk resonans, og hvis den lyder bekendt, skyldes det, at den dækker over nøjagtig det samme

SPIN OM

Denys Grombacher er fra Canada, men har taget det meste af sin uddannelse på Stanford University i USA. Hans tilgang er den teoretiske geofysik, så derfor foregår det meste af hans forskning ved computeren, mens feltarbejde optager måske 20 % af hans tid. Foto: Lars Kruse.

Geofysiske målinger med NMR

I forbindelse med geofysiske undersøgelser skelner man mellem tre forskellige metoder, der alle bygger på nuklearmagnetisk resonans (NMR). Udover overflade-NMR, som Denys arbejder med, findes der desuden borehuls-NMR og laboratorie-NMR.

Borehuls-NMR har været anvendt indenfor oliebranchen siden 1960'erne og er derfor at betragte som en moden teknologi. Som navnet antyder, går metoden ud på at sænke udstyr til NMR-målinger ned i et borehul, og med målingerne kan man få information om porerum og væsker (bl.a. olie) i de bjergarter, man har gennemboret. Det er heftigt udstyr, man bruger til sådanne målinger, da det skal kunne modstå de høje tryk i en dyb olieboring – en standard MR-skanner til at sænke med i en olieboring er 10 meter lang, 12,1 cm i diameter og vejer på den anden side af et halvt ton. Den er derfor alt for stor til at kunne bruges i de noget mindre boringer efter grundvand. I de senere år er der dog begyndt at dukke "slimline-udstyr" op, som kan anvendes til de formål også.

Ved laboratorie-NMR foregår målingerne ikke overraskende i laboratoriet, hvor man har udstyr, der er specialiseret til at undersøge geologiske prøver fra boringer og beskrive deres geofysiske egenskaber.

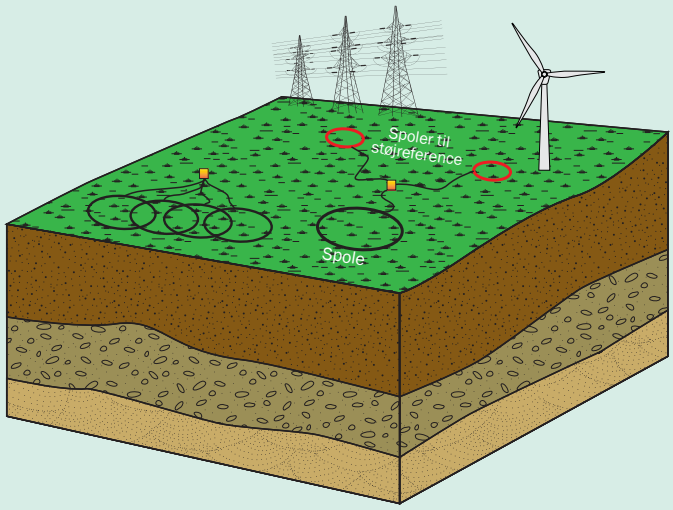
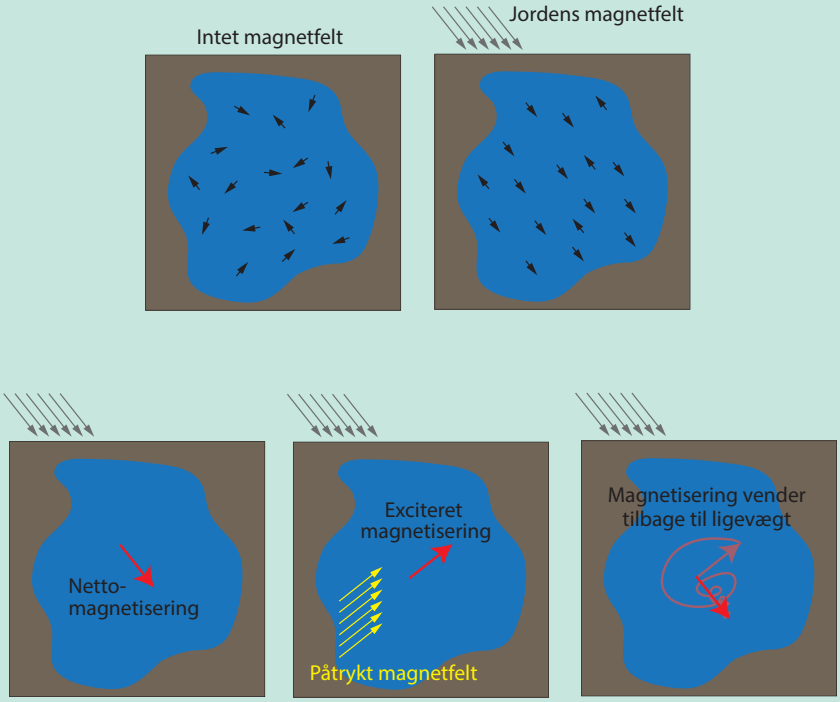


Illustration af måleopstillinger til overflade-NMR i felten. Typisk bruges kun en enkelt spole, men man kan også lave opstillinger med flere spoler. Udover spolen, der skal optage signalet fra vandet, kan man udlægge spoler tæt på støjkilder (fx elektriske hegn, vindmøller mv.) og dermed få præcise mål for støjen, som i den efterfølgende databehandling bruges til at trække støjen fra det målte signal.

Hydrogenkerner som stangmagneter



Hydrogenkerners spin producerer et magnetisk moment, der gør dem sammenlignelige med små stangmagneter, der vil være tilfældigt orienteret i fraværet af et eksternt magnetfelt. I et magnetfelt – fx Jordens – vil de derimod være tilbøjelige til at rette sig ind efter magnetfeltets retning.

Summen af de mange små magnetiseringer producer en netto-magnetisering. Ved at påtrykke et sekundært magnetfelt med en retning vinkelret på det primære magnetfelt bringes hydrogenkernernes magnetisering ud af ligevægt (de exiteres). Når det sekundære magnetfelt fjernes igen, vender magnetiseringen tilbage til ligevægt, og forskerne måler signalet fra denne proces.

princip, som MR-skannerne på vore hospitaler bygger på. Kort fortalt udnytter man i MR-skannere, at atomkerner besidder en kvantemekanisk egenskab kaldet spin, som producerer en svag magnetisering. Denne magnetisering er tilbøjelig til at rette sig ind i forhold til retningen af et ydre magnetfelt, som i MR-skannere laves med kraftige magneter. Ved efterfølgende at anslå (excitere) atomkernerne med radiobølger med den rette frekvens, vil deres spin blive drejet væk fra den foretrukne retning langs skannerens magnetfelt. Når radiobølgen slukkes igen, vil spinnet igen rette sig ind i forhold til magnetfeltet, og i den proces udsender atomkernerne radiobølger, som kan opfanges af følsomme antenner. Disse signaler bruger man i forbindelse med MR-skanning af patienter til at danne billeder af kroppens væv. Mere konkret er det hydrogenkerner (dvs. protroner), man måler på i hospitalsscannere, og størstedelen af hydrogenkernerne i kroppen sidder i – ja, vandmolekyler.

Signal fra vandet

I MR-skannere og andre instrumenter til NMR-analyser bruger man som nævnt meget kraftige magnetfelter til at rette atomkernernes spin ind efter. Derfor skulle man umiddelbart ikke tro, at metoden kan bruges til geofysiske undersøgelser i større skala i felten, for hvordan skulle man præcist kunne lave og styre et sådant magnetfelt i "fri luft"? Men her viser det sig, at man kan bruge Jordens magnetfelt til det formål. I vandmolekylerne i undergrunden, vil hydrogenkernernes spin således være tilbøjelige til at være rettet ind efter retningen af jordens magnetfelt. Man kan så ved kortvarigt at inducere et magnetfelt i jorden excitere hydrogenkernerne, og de vil efterfølgende – præcis som i MR-skanneren – udsende et signal, når de igen retter sig ind efter jordens magnetfelt. Signalerne er dog meget svage, og derfor gik der mange år fra princippet blev foreslået tilbage i 1960'erne til russiske forsker kunne demonstrere metoden i praksis i 1980'erne. Siden er både hardware og databehandlingsteknikker blevet udviklet til et stade, så man i dag kan købe kommercielt udstyr til overflade-NMR.

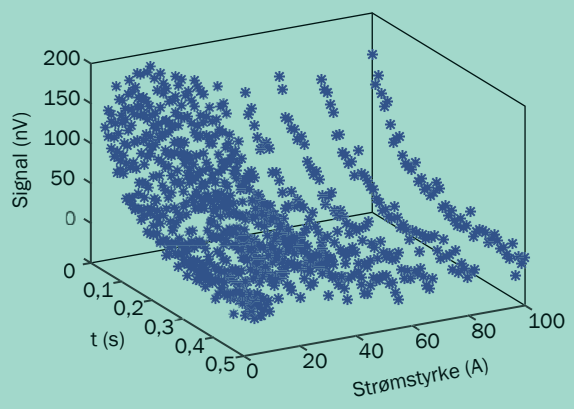
Undersøgelserne foregår ved, at man lægger en stor spole (op til 100 meters sidelængde) ud i det område, man vil undersøge. Størrelsen på spolen afgør, hvor stor en dybde, man kan måle ned til – som tommelfingerregel er det 75 % af sidelængden.

Man sender derefter korte strømpulser gennem spolen for at inducere et magnetfelt, der exciterer hydrogenkernerne i undergrunden

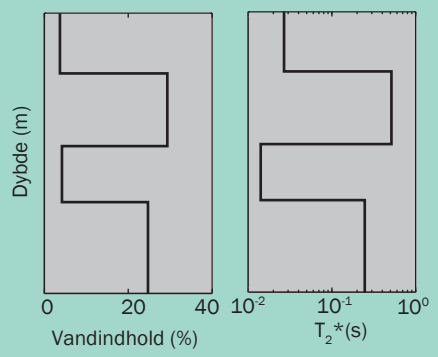
DET FRIE
FORSKNINGSRÅD
DANISH COUNCIL
FOR INDEPENDENT
RESEARCH

Workflowet i undersøgelser med overflade-NMR

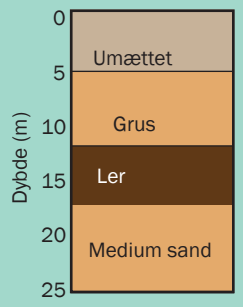
Datasæt fra overflade-NMR



Vurdering af undergrundens egenskaber



Fortolkning af undergrundens hydrogeologi



De tre illustrationer viser workflowet i undersøgelser med overflade-NMR. Målingerne på jordoverfladen giver forskerne et tredimensionalt datasæt, der kan omsættes til et dybdeprofil med kurver for vandindholdet (tv) og den såkaldte relaksions-tid, som beskriver hvor længe NMR-signalet varer. Denne parameter bærer information om porestørrelsen i materialerne og bruges til at vurdere materialernes permeabilitet. Ud fra disse kurver kan man i sidste ende lave en fortolkning af, hvilke materialer jordlagene består af.

ved deres resonansfrekvens (som er i området 1-3 kHz afhængigt af, hvor på jorden, man befinder sig). Efter sendepulsen (og en kort pause) skifter spolerne til modtager-tilstand, hvorefter de optager NMR-signalerne. Ved at gentage målingerne og variere energimængden i sendespolerne, kan man variere den dybde, man får signaler fra.

Signalerne giver forskerne et direkte mål for mængden af vand og fortæller desuden om, hvor store porerummene er i de materialer, hvor vandet befinder sig. Det sidste er en vigtig parameter i forhold til at vurdere, hvor let vandet kan strømme i materialerne (permeabiliteten), som jo afgør, om vandet er til at pumpe op.

Støjproblemet

At man kan købe kommercielt udstyr til overflade-NMR-målinger betyder dog ikke, at der ikke er plads til forbedringer – langt fra. Og det er netop baggrunden for Denys' forskningsprojekt. Den største udfordring er, at NMR-signalerne er så svage, at de overgås med mange størrelsesordner af støj fra omgivelserne.

Den primære støjkilde stammer fra vores eget elnet, og i et land som Danmark er man jo sjældent langt fra denne støjkilde. En anden væsentlig støjkilde er elektromagnetisk, atmosfærisk støj, som bl.a. kan stamme fra lynnedslag. Det skulle man umiddelbart tro ikke var det store problem, hvis man blot undlader at måle i tordenvejr. Men den elektromagnetiske støj fra lynnedslag kan udbrede sig tusinder af kilometer, så det hjælper ikke stort, at der er fint og tordenfrit vejr på målelokaliteten.

Signal/støjforholdet er sådan, at signalerne fra hydrogen i undergrunden måles i størrelsesordenen 10-100 nanovolt, mens støj fra omgivelserne typisk måles i millivolt. For at få brugbare resultater ud af målingerne, bruger man derfor avancerede signalbehandlingsteknikker til at filtrere støjen fra og isolere NMR-signalet. Uanset at man ved smart databehandling har nået gode resultater, står det forskerne krystalklart, at hvis overflade-NMR for alvor skal blive udbredt som geofysisk teknik, skal forholdet mellem støj og signal reduceres betragteligt.

Nye pulser giver stærkere signaler

De fleste forskere, der arbejder med at forbedre signal/støj-forholdet, fokuserer på at reducere støjen. Denys satser omvendt i sit projekt på at øge styrken af NMR-signalet, hvilket både handler om den måde, man sender og modtager signalerne på. I eksisterende teknologi til

DET FRIE FORSKNINGSRÅD
DANISH COUNCIL FOR INDEPENDENT RESEARCH

Mere information
Legchenko, A., and P. Valla, 2002, A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements: Journal of Applied Geophysics, Volume 50, Issue 1-2, Pages 3-19.

Grunewald, E., Grombacher, D., and D. Walsh, 2016, Adiabatic pulses enhance surface nuclear magnetic resonance measurements and survey speed for groundwater investigations: Geophysics, Volume 81, No. 4, Pages WB85-WB96.

Foto: Lars Kruse.

DET FRIE FORSKNINGSRÅD
DANISH COUNCIL FOR INDEPENDENT RESEARCH

overflade-NMR er sendesignalet en puls af vekselstrøm med en fast amplitude og frekvens i et bestemt tidsinternavl (20-40 millisekunder). Til forskel vil Denys i sit projekt bruge en strømpuls, hvor frekvensen varieres, mens den står på (man kalder det en adiabatisk puls). Fordelen ved det er, at det påvirker hydrogenkernernes spin på en måde, der er mindre følsom overfor "ujævnheder" i det magnetfelt, man inducerer i jorden. I virkeligheden er dette et forsøg på at overføre en metodik, der har været kendt fra medicinske MR-skannere i årtier.

Resultatet skulle gerne blive, at man får stærkere signaler. En ny afhandling, som Denys er medforfatter på, viser, at amplituden af signalet kan øges med en faktor 3.

I forhold til at modtage signalet er ideen i Denys' projekt at bruge en serie af modtagere, som samtidigt

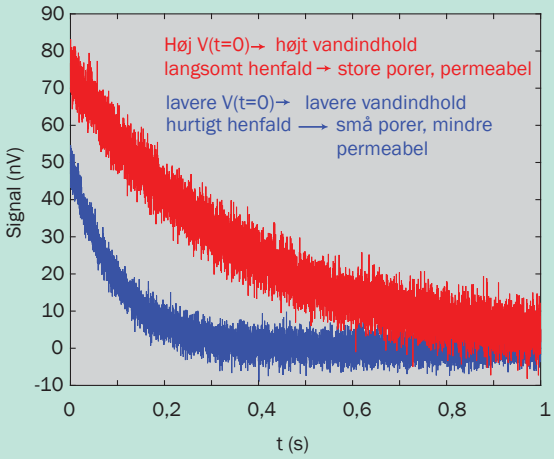
måler signalet fra mange positioner. Ideen er, at kombinationen af alle disse målinger kollektivt kan forbedre evnen til at afbillede de vandledende lags egenskaber.

En forbedret værktøjskasse

En forbedret overflade-NMR-metodik vil være et stærkt supplement til SkyTEM i værktøjskassen til grundvandsundersøgelser. Mens SkyTEM hurtigt og effektivt kan give det store overblik, giver overflade-NMR det højopløste billede med et direkte mål for vandindholdet i undergrunden – alt sammen, uden at stikke bor eller andet udstyr ned i jorden.

Kan man så forestille sig, at overflade-NMR med tiden kan blive luftbåret? Det mener Denys næppe er realistisk, men man skal selvfølgelig aldrig sige aldrig. I første omgang er det mere interessant, at gøre det muligt at få bedre resultater med metoden tæt på byer, hvor behovet for drikkevandsressourcer i sagens natur er størst, men hvor støj fra elnettet samtidig er mest generende. Går alt efter Denys plan, vil hans projekt bringe os meget tættere på det mål. ■

NMR-signaler og strømpulser



Figuren illustrer, hvordan NMR-signalet fra undergrunden tager sig ud for forskerne, og hvad forskelle på signalet afslører om vandindholdet og egenskaberne af de vandførende lag. Illustration: Denys Grombacher.

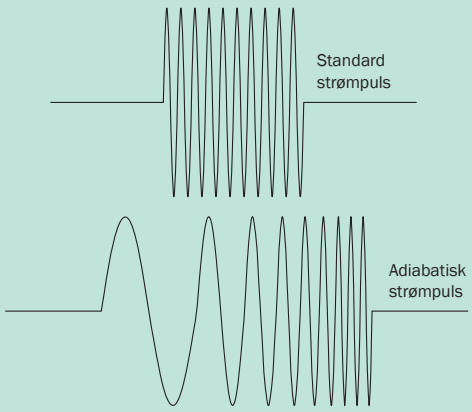


Illustration af forskellen på en strømpuls, man normalt bruger til undersøgelser med overflade-NMR, hvor frekvensen er konstant, og en "adiabatisk strømpuls" med varierende frekvens, som Denys og kolleger vil bruge. I en adiabatisk strømpuls kan amplituden også variere, men det er dog ikke muligt med det udstyr, Denys bruger.