

ANVENDELSE AF CROSS-BOREHOLE GEORADAR OG
RESISTIVITETSTOMOGRafi TIL KARAKTERISERING
- MONITERING AF DEN UMÆTTEDE ZONE

Ph.d.-studerende Majken Caroline Looms
Adjunkt Lars Nielsen
Professor, ph.d. Karsten Høgh Jensen
Professor Hans Thybo

Geologisk Institut, Københavns Universitet

ATV MØDE
UMÆTTET ZONE

SCHÆFFERGÅRDEN
22. april 2004

RESUMÉ

Vandets bevægelse i den umættede zone har stor betydning for hvorvidt forureningskilder fra overfladen udgør en fare for vores drikkevand. To nye geofysiske metoder, cross-borehole georadar og cross-borehole elektrisk resistivitetstomografi, kan bruges til at bestemme vandindholdet i et porøst materiale mellem borehuller i afstande op til 15-20m afhængigt af sedimenttype. Vigtige strømningsparametre i Richards ligning kan derfor bestemmes in situ og på stor skala.

INDLEDNING

Beskyttelsen af de danske grundvandsressourcer mod punkt- og/eller fladeforurening har i de seneste årtier skabt en øget interesse for at forstå vandbevægelse ned gennem jordens øvre umættede zone. I denne zone beskrives vandstrømningen i hydrologiske modeller traditionelt ved den ikke-lineære styrende differentilligning, Richards ligning. To hydrauliske egenskaber, som henholdsvis beskriver jordens tilbageholdelseevne og jordens ledningsevne, indgår i denne ligning. Disse egenskaber måles typisk på små sedimentprøver (ca. 100 cm³), hvorefter de opskaleres til at beskrive vandbevægelsen i større feltsystemer. Antagelsen, der ligger til grund for denne opskalering, er dog ikke blevet undersøgt til bunds, idet målingen af de hydrauliske parametre på større skala hidtil ikke har været mulig.

Den seneste udvikling indenfor georadar og elektrisk resistivitetstomografi har bevirket, at det er blevet muligt at foretage målinger af jordens vandindhold og vandets indhold af opløste salte på en større skala. Denne skala svarer i højere grad til den, der bruges i numeriske modeller for vand- og stoftransporten for feltsystemer. Sådanne målinger kan bidrage til en øget forståelse for vandstrømning og stoftransport i heterogene systemer samt muliggøre bestemmelse af repræsentative hydrauliske parametre for større skalaer.

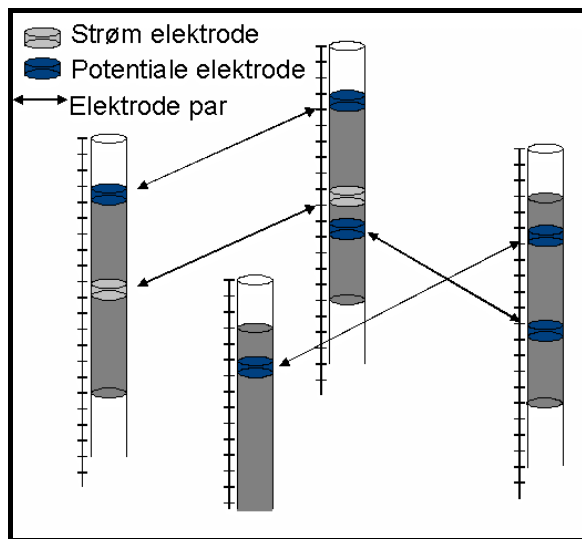
DE GEOFYSISKE METODER

Cross-borehole elektrisk resistivitetstomografi og cross-borehole georadar er en videreudvikling af allerede eksisterende metoder som benytter sig af målinger foretaget på jordoverfladen: georadar refleksionsprofilering og elektrisk profilering/sounding. Disse overflade metoder kan blandt andet bruges til at måle vandindhold af et porøst medium, men opløseligheden af det indsamlede data aftager meget med dybden. Ved at bore huller og bruge metoderne i en cross-borehole opstilling vil området mellem borehullerne have en højere og mere ensartet opløselighed i de forskellige dybdeintervaller, og vandindholdet kan derfor måles mere nøjagtigt.

Elektrisk Resistivitetstomografi

Elektriske metoder opererer ud fra et meget simpelt princip. Man sender strøm mellem to elektroder og måler det resulterende potentialfald mellem to andre elektroder. Der installeres typisk elektroder for hvert 50-75cm i hvert borehul. De enkelte elektroder fungerer skiftevis som strøm- og potentialeelektroder i forskellige målegeometrier (f.eks. Wenner, dipol-dipol og Schlumberger opstillinger). Herved bestemmes resistiviteten af det porøse medium. Den målte resistivitet afhænger primært af vandindholdet af det porøse medium, porevandets

ledningsvene og det porøse mediums lerindhold. Det der adskiller cross-borehole elektrisk resistivitetstomografi fra andre elektriske geofysiske metoder er, at elektroderne installeres permanent i minimum to borehuller. Elektroderne kan udformes på forskellig vis, dog alle med det formål at opnå god elektrisk kontakt til det porøse medium. I Binley et al. 2002 bruges et net af rustfrit stål hvorpå en ledning loddes fast. Nettene fastsættes derefter til et PVC-rør med konstant interval og røret installeres i et borehul. Borehullet efterfyldes med opgravet sediment eller en tynd blanding af sand og cement for at undgå luftlommer i borehullet og sikre god kontakt mellem elektroderne og formationen.



Figur 1: Skematisk tegning af en dipol-dipol opstilling for cross-borehole elektrisk resistivitetstomografi.

Det er vigtigt at designe en indsamlingsopstilling der opnår så god og jævn fordeling af opløsning af resistivetsfordelingen mellem borehullerne som muligt, se figur 1. Den maksimale opløselighed begrænses dog af antallet af målinger som apparaturet kan foretage indenfor en acceptabel tidsperiode.

Efter at have indsamlet data bruges den målte tilsyneladende modstand i numeriske inversionsalgoritmer til at bestemme resistiviteten af det porøse medium. Vandindholdet findes dernæst ved at bruge Archies lov (se nedenfor).

$$S = \frac{\theta}{\varphi} = \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (\text{Archies lov})$$

Hvor S = mætningsgrad
 θ = vandindhold
 φ = porøsitet
 ρ = resistivitet
 ρ_s = porevæskens resistivitet
 m = empirisk parameter

Cross-borehole elektrisk resistivitetstomografi er, efter at elektroderne er blevet installeret, en meget simpel og hurtig metode til at bestemme vandindhold i den umættede zone. Men det kan være svært at opnå elektrisk kontakt mellem elektroderne og det porøse medium ved meget grusede sedimenter pga. disse sedimenters høje resistivitet. Desuden er det svært at opnå en høj opløsning væk fra elektroderne, dvs. mellem borehullerne, og variationer i vandets ledningsevne samt i geologien kan influere vandindholdsresultaterne.

Georadar

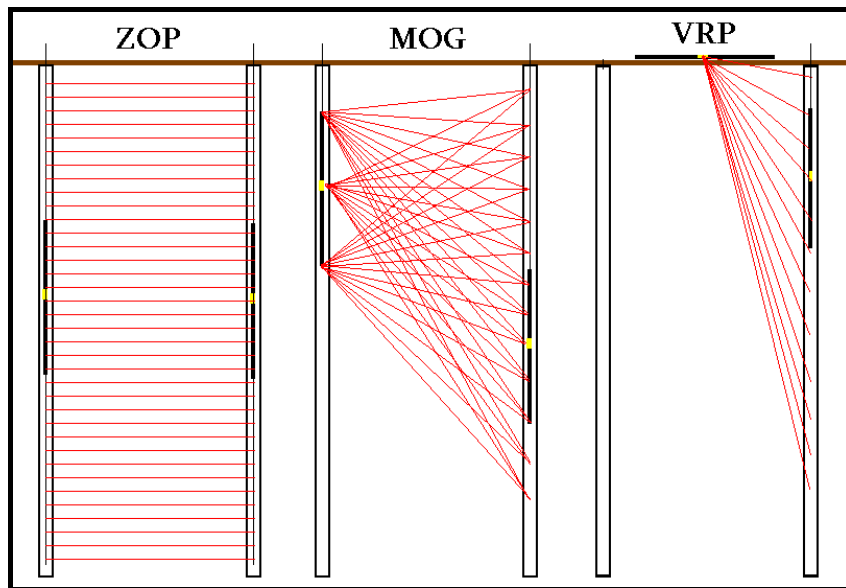
Princippet bag brugen af georadar er at man udsender en elektromagnetisk bølge fra en senderantenne (transmitter) placeret i et borehul og modtager signalet vha. en modtagerantenne (receiver) i et andet borehul, se figur 2. Bølgernes løbetid registreres for en række forskellige placeringer af sender- og modtagerantennerne. Bølgeløbetidfordelingen mellem borehullerne kan derefter bestemmes ved anvendelse af tomografisk inversion. Den elektromagnetiske bølges hastighed i luft er kendt. Derfor kan det porøse mediums dielektriske konstant beregnes og derefter omsættes til vandindhold ved brug af empiriske formler, se nedenfor.

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{v}$$

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (\text{Topps ligning})$$

Hvor ε = dielektrisk konstant
 c = elektromagnetisk bølges hastighed i luft
 v = hastigheden gennem mediet
 θ = vandindhold

Forskellige målemetoder kan bruges ved cross-borehole georadar, eksempelvis: ZOP (Zero Offset Profile), MOG (Multiple Offset Gather) og VRP (Vertical Radar Profile), se figur 2. Ved ZOP holdes antennerne i de to borehuller ved samme dybde hvorefter de sænkes trinvis ned i borehullerne. Derved opnås et 1D profil af vandindholdet mellem borehullerne. Ved MOG holdes transmitteren fast ved en bestemt dybde og receiveren flyttes med konstant interval i det andet borehul. Ved at gentage denne procedure ved forskellige dybder for transmitteren kan man ved brug af tomografisk inversion beregne hastighedsfordelingen og derved også vandindholdet som et 2D grid af celler. Ved VRP lægges transmitteren på overfladen og receiveren flyttes trinvis i det ene eller begge borehuller. For at få den bedste opløsning af vandindholdsfordelingen kan resultaterne fra alle tre metoder bruges i en samlet tomografisk inversion. I praksis testes opløseligheden vha. inversion af syntetiske data beregnet for kendte testmodeller.



Figur 2: Ved cross-borehole opsætningen hejser man antennerne ned i hvert sit borehul og det signal man modtager som førsteankomst ved receiveren er en direkte bølge (eller transmitteret bølge). Her vises forskellige målemetoder brugt ved cross-borehole georadar.

Indsamlingen af data ved brug af cross-borehole georadar kræver et lidt større arbejde end for cross-borehole elektrisk resistivitetstomografi, idet antennerne manuelt skal sænkes og hæves i borehullerne. Dataproseseringen er også lidt mere omstændelig, eftersom ankomsten af bølgen ved receiveren findes ved aflæsning af signalet. Men til gengæld indeholder hvert signal information om vandindholdet (fra førsteankomsten) samt den elektriske ledningsevne (fra amplituden) langs bølgens bane.

Metoden kan ikke bruges i medier med høj ledningsevne (ler) hvor signalet dæmpes så kraftigt at signal-støj forholdet bliver for lavt. Andre ulemper ved metoden er, at signalet refrakteres/reflekteres ved overgange mellem høje og lave hastigheder samt at områder med lave hastigheder dækkes dårligt. Ved refraction af førsteankomsten vil det ikke være den direkte bølge, som løber langs en retlinet strålebane, der når først frem til receiveren. I områder med store kontraster og deraf følgende markante refractionseffekter, bør man anvende en modelleringsalgoritme, som kan håndtere ikke-retlinede stråler.

FELTLOKALITETER

To feltlokaliteter er blevet udvalgt til at teste metoderne. Begge lokaliteter har flere fordele, udover at de opfylder de vigtigste krav om en sandet jord og en stor umættet zone.

Feltlokalitet 1: Hjelm Hede. Området er tidligere blevet undersøgt af Århus Universitet ved hydrologiske forsøg, hvor vandindholdet blev målt med TDR-prober, der stadig er installeret. Dette giver mulighed for at sammenligne data opnået ved to forskellige metoder med forskellige rumlige skalaer.

Feltlokalitet 2: Arrenæs. På denne feltlokalitet har Københavns Energi siden 1995 haft et projekt kørende omhandlende kunstig infiltration af søvand. De geofysiske metoder vil forhåbentlig give indsigt i hvorledes søvandet infiltrerer gennem bassinerne.

FREMTIDIGT ARBEJDE

Ved at kombinere resultaterne fra de to geofysiske metoder kan transporten af en tracer følges ned gennem den umættede zone. Georadar resultaterne bestemmer indholdet af vand i jorden mens data fra den elektriske resistivitetsmetode kan fastslå porevandets resistivitet og derved indholdet af tracerioner. Tracerforsøg under et naturligt samt forceret infiltrationsforløb vil derfor kunne bruges til at bestemme de effektive strømningsparametre af den pågældende jord.

Selv om cross-borehole georadar og elektrisk resistivitetstomografi har vist sig at give pålidelige kvantitative data kan tolkningen af data dog stadig forbedres. Det gælder specielt georadar inversionsalgoritmer, hvor bøjningen af strålerne og de reflekterede/refrakterede bølger kan inkorporeres i rutinen. Desuden kan en bedre data usikkerhedsanalyse udvikles. For opstillingen af den elektriske resistivitetsmetode gælder det om at minimere de problemer, der opstår pga. den lave opløsning væk fra borehullerne.

LITTERATURHENVISNING

/1/ Vadose zone flow model parametrisation using cross-borehole radar and resistivity imaging, A. Binley, G. Cassiani, R. Middleton, P. Winship, Journal of Hydrology 267, 2002

