

# Georadars indtrængningsdybde - stor i tørt sand/grus og lille i moræneler

Af geofysikerne Ingelise Møller, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Lars Nielsen, Geologisk Institut, Københavns Universitet

Georadarmetoden er et stærkt geofysisk værktøj til kortlægning af detaljerede geologiske strukturer. Metoden har med god grund vundet indpas og bruges nu i større og større grad i geologisk kortlægning af sand- og grusaflejringer samt kalkaflejringer i det danske område. Men georadars indtrængningsdybde er ikke væsentligt forbedret gennem de nyeste instrumentudviklinger. Det er stadig ikke muligt at kortlægge jordstrukturer gennem adskillige meter moræneler. Moræneler svækker georadarsignalet så kraftigt, at der ikke kan komme et målbart signal retur til overfladen fra fem meters dybde.

En georadars indtrængningsdybde er mindre end to til tre meter i smeltevandsler, mindre end tre til fem meter i moræneler og mindre end fem til ti meter i mættet sand. I tørt sand og grus kan indtrængningsdybden være noget større end 15 m og i bedste fald op til 30 m, hvor der er langt ned til grundvands-



Georadar på en stubmark ved Nr. Felding. (Foto: Søren Nielsen, GEUS)

spejlet. Disse estimater for indtrængningsdybder fremkommer ved en beregning af dæmpning og geometrisk spredning af georadarsignalet. Indflydelsen af disse to fænomener, som er en del af signalsvækkelsen, kan vurderes ved brug af simple relationer.

Hvorledes disse beregninger er lavet er beskrevet i artiklen. Inden vi når dertil, skal vi rundt om de fysiske rammer for en georadar.

## Georadar og radiobølger

Georadar er et elektromagnetisk instrument, der opererer i frekvensområdet 10-2.000 MHz. Det er et frekvensområde, der er så højt, at det elektromagnetiske signal – også i jord – udbredes som bølger. Frekvensområdet ligger i radiobølgeområdet.

De mest benyttede frekvenser i geologisk kortlægning på 50-200 MHz ligger i VHF-området (30-300 MHz), som bruges til FM-radiofoni og tv. Radiobølger kan transmitteres gennem luften over store afstande, som det sker med radio- og tv-signalerne.

## Radiobølger, elektrisk modstand

I luft, hvor den elektriske modstand er ekstremt stor, dæmpes radiobølger i praksis ikke – de spredes kun geometrisk. Radiobølger,

der sendes gennem elektrisk ledende materialer såsom geologiske aflejringer, vil dæmpes. Hvor hurtigt denne dæmpning sker, styres primært af materialets resistivitet (specifik elektrisk modstand). Jo lavere resistivitet, jo kraftigere dæmpning.

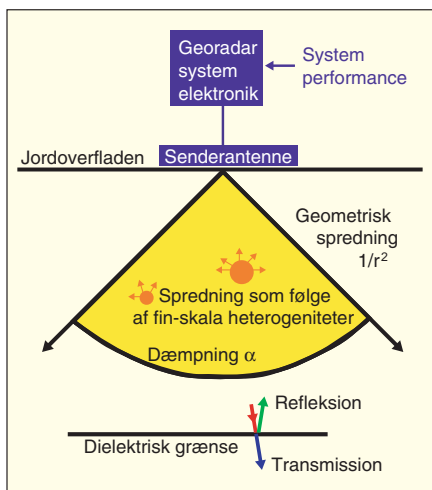
## ...og dielektricitetskonstanten

Radiobølger, der sendes gennem elektrisk ledende materialer, har en hastighed, der er reduceret i forhold til hastigheden i luft (= lysets hastighed på  $3 \cdot 10^8$  m/s = 0,3 m/ns). Hvor meget hastigheden reduceres, styres primært af dielektricitetskonstanten. I sedimenter har vandindholdet en afgørende betydning for dielektricitetskonstanten. Dets skyldes, at dielektricitetskonstanten for vand er 80 gange større end for luft, mens den for tørt sediment er fire gange større end for luft.

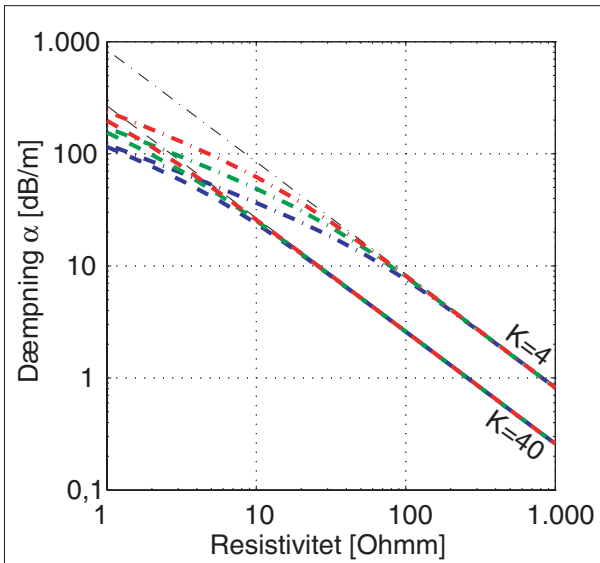
Radiobølgerne vil reflekteres ved laggrænser, hvor der sker en ændring i materialernes dielektricitetskonstant.

## Tab af energi

Georadarsignalet taber energi under sin udbredelse gennem jordlagene. Figuren til venstre viser en principskitse over de væsentligste fænomener, der reducerer georadarsignalet. De væsentligste fænomener er



Skitse over fænomener, der reducerer georadarsignalet energi på vej ned gennem jorden. (Efter Reynolds (1997))



Dæmpning per meter som funktion af resistivitet. Dæmpningen er beregnet for tre frekvenser og to værdier af dielektricitetskonstanten,  $K$ . De blå, grønne og røde kurver repræsenterer henholdsvis frekvenser på 50, 100 og 200 MHz. For høje resistiviteter bliver dæmpningen uafhængig af frekvensen. Hvor det gælder, ligger georadarsignalet i "low-loss"-området. De tynde sorte kurver angiver dæmpningen udtrykt i "low-loss"-approximationen. (Grafik: Forfatterne)

dæmpning som følge af jordens elektriske ledningsevne, geometrisk spredning, spredning af signalet som følge af finskala heterogenitet (fx diffraktion af signalet omkring store sten eller rør) samt refleksion og transmission ved laggrænser.

Dæmpningens størrelse (= attenuation på engelsk) kommer fra løsningen af de elektromagnetiske bølgeligninger (boksen til højre). Figuren ovenfor til venstre viser, at resistiviteten er den primære faktor, som styrer, hvor kraftigt dæmpningen er. Dielektricitetskonstanten har også en betydning for størrelsen af dæmpningen. Senderfrekvensen influerer på dæmpningen, når resistiviteten er lav. Når resistiviteten bliver så høj, at kurverne for de tre viste frekvenser sammen ligger oven i den tynde kurve, befinder georadarsignalet sig i den såkaldte low-loss-tilstand. Den tynde kurve repræsenterer dæmpningen udtrykt i low-loss-approximationen, hvor dæmpningen er uafhængig af frekvensen.

Den geometriske spredning er også en størrelse, der kan beregnes. Her er det gjort under antagelsen af, at signalet udbredes ens ud i alle retninger fra et punkt (sfærisk udbredelse).

Der tabes også signalenergi ved spred-

ning på grund af finskala heterogenitet (= scattering på engelsk). Det betyder, at georadarsignalet spredes i forskellige retninger, når det rammer små anomalier, der har en størrelse, som er af samme størrelsesorden som signalets bølgelængde. Denne form for signaltab kan bedst kvantificeres ved simulering af bølgefeltet gennem heterogene medier. I geologiske aflejringer vil betydningen af denne form for spredning være relativt kraftigere for høje frekvenser end for lave frekvenser, da de kortbølgede signaler er mere følsomme over for strukturer i lille skala.

Hvor meget energi, der sendes tilbage mod jordoverfladen og modtagerantennen, når georadarsignalet reflekteres ved en laggrænse, er bestemt af laggrænsens refleksionskoefficient. Størrelsen af refleksionskoefficienten, det vil sige, hvor kraftig refleksionen bliver, styres af, hvor stor kontrasten mellem de to mediers dielektricitetskonstanter er. Et grundvandspejl i en grovkornet aflejring vil føre til en kraftig refleksion med en refleksionskoefficient på ca. 0,4, da der er stor kontrast mellem dielektricitetskonstanten for tørt grus ( $K \sim 4$ ) og mættet grus ( $K \sim 25$ ). En lille ændring i porøsitet kan også føre til en svag, men målbar re-

## Dæmpning

$$\alpha = \omega \left[ \frac{\mu \epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

hvor  $\mu$  er (magnetisk) permeabilitet,  $\epsilon$  (dielektrisk) permittivitet,  $\sigma$  elektrisk ledningsevne og  $\omega$  vinkelfrekvens,  $\omega = 2\pi f$ , hvor  $f$  er frekvens.

## Low-loss-tilstand

Hvor forholdet  $\sigma/(\omega \epsilon) \ll 1$ , er der low-loss-tilstand. Udtrykket for dæmpning reduceres til

$$\alpha_{LL} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0}} \frac{\sigma}{\sqrt{K}}$$

hvor  $\epsilon_0$  er (dielektrisk) permittivitet i vakuum, og  $K$  er dielektricitetskonstanten,  $K = \epsilon/\epsilon_0$ , også kaldet relativ permittivitet. I low-loss-tilstanden er dæmpningen uafhængig af frekvensen.

Se fx Reynolds (1997) for mere information om georadarteori.

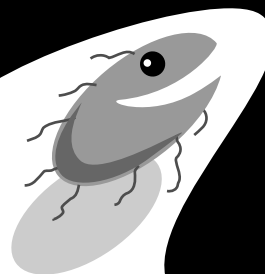
fleksion, hvor refleksionskoefficienten kun er ca. 0,04.

## Georadarsystemets formåen

*System performance* er et engelsk udtryk for systemets interne signal/støj-forhold. Det angives typisk i deciBel (dB), en enhed som ofte bruges ved angivelse af lydstyrke. System performance er et mål for forholdet mellem, hvor kraftigt et signal der kan udsendes, og hvor svagt et signal, der kan modtages og skelnes fra intern instrumentstøj. Den nyeste generation af pulseEKKO georadarsystemer fra Sensors & Software har en maksimal system performance på 186 dB.

# VI HAR JORD I HOVEDET ..!

- og plads til mere

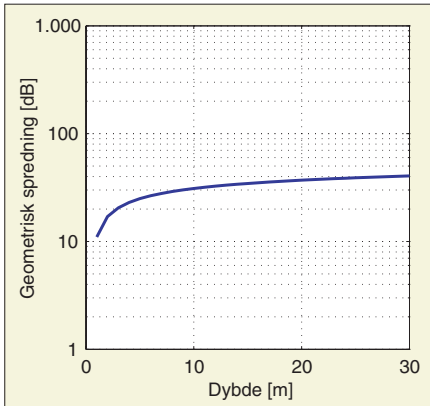


Bioteknisk Jordrens SOILREM er Danmarks landsdækkende jordrensere, når det gælder olie- og kemikalieforurening – med anlæg i Kalundborg, Esbjerg, Aalborg og på Ærø, Samsø og Bornholm.

Kontakt os på tlf. 59 50 46 68.



Bioteknisk Jordrens  
**SOILREM**  
- jordens bedste valg



Geometrisk spredning som funktion af dybden. Den geometriske spredning er beregnet under antagelsen af, at signalet udbreder sig ens ud i alle retninger fra senderen. (Grafik: Forfatterne)

### Instrumentstøj og støj fra omgivelserne

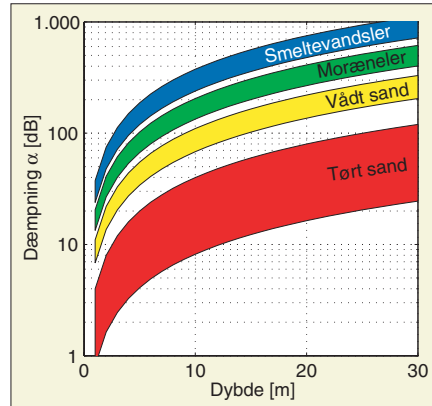
Det niveau, hvor modtagersignalet drukner i intern instrumentstøj, vil i Danmark ligge væsentlig under det niveau, hvor signalet er druknet i elektromagnetisk støj fra omgivelserne. Man kan reducere det niveau, hvor signalet drukner i tilfældig støj fra omgivelserne, ved at stakke hvert enkelt "skud" mange gange. En stakning af skuddene har ikke indflydelse på den interne instrumentstøj.

### Beregnet indtrængningsdybde

Den geometriske spredning og dæmpningen kan konkretiseres gennem nogle beregnings-eksempler. Eksemplerne er beregnet ved brug af karakteristiske værdier for dielektricitetskonstanten og resistivitet. Vi opstiller fire "jordtype-scenarier": Tørt sand og grus, mættet sand og grus, moræneler og smeltevandsler (tabellen nedenfor).

De anvendte resistiviteter er valgt ud fra resistivitetsniveauer, man erfaringsmæssigt møder i danske aflejringer. Der er ikke samme gode kendskab til de karakteristiske værdier for dielektricitetskonstanten i danske aflejringer. Her er derfor brugt værdier fra international litteratur.

Figuren øverst til venstre viser, hvorledes den geometriske spredning øges med dybden. Figuren i midten ovenfor viser, hvor meget signalet dæmpes med dybden for de



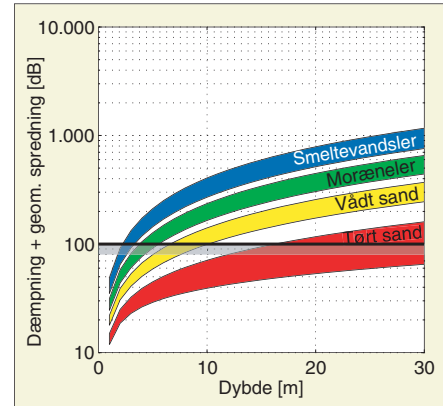
Elektrisk dæmpning som funktion af dybden for fire jordtype-scenarier. Jordtyperne tørt sand og grus er betegnet "Tørt sand" og mættet sand og grus er betegnet "Vådt sand". Beregningen er udført for en frekvens på 50 MHz. For lave resistiviteter, hvor frekvensen har betydning for den elektriske dæmpning, fører den lave frekvens til den mindste dæmpning. (Grafik: Forfatterne)

fire jordtype-scenarier. Kombinationen af kurven i figuren til venstre og kurverne i figuren midtfor, som til sammen giver et mål for den beregnelige del af signalreduktionen, er vist i figuren øverst til højre.

I denne figur, som viser summen af geometrisk spredning og dæmpning, er indtegnet en sort streg, der markerer 100 dB niveauet. Et signal, der er reduceret til 100 dB i en given dybde, kan ikke reflekteres og derefter nå op til modtageren med en målbar signalstyrke. Signalet vil efter refleksionen svækkes i samme grad af geometrisk spredning og dæmpning på vejen op til jordoverfladen og modtagerantennen.

100 dB er et meget optimistisk mål i vurderingen af indtrængningsdybden. 80-100 dB, markeret som en grå skyggezone i figuren øverst til højre, vil give et mere realistisk skøn over indtrængningsdybden, da 80 dB er et realistisk mål for det halve af en georadars system performance.

Af figuren øverst til højre fremgår, at en georadars maksimale indtrængningsdybde i en smeltevandsler er to til tre meter, i moræneler tre til fem meter og i mættet sand og



Samlet elektrisk dæmpning og geometrisk spredning for fire jordtype-scenarier (summen af kurverne i de to figurer til venstre). Kurverne viser, hvor meget signalet reduceres på vejen ned mod en reflektor. Den fede sorte streg markerer en signalreduktion på 100 dB, og den grå skyggezone angiver niveauet ned til 80 dB. 80 dB svarer til et realistisk mål for det halve af en georadars "system performance". Figuren viser kun de elementer af signalreduktionen, der kan beregnes via simple relationer. Spredning som følge af finskala heterogenitet er ikke medtaget i beregningerne. Derfor er den dybde, hvor signalet ligger i skyggezone, et optimistisk bud på en indtrængningsdybde. (Grafik: Forfatterne)

grus fem til ti meter. I tørt sand og grus kan indtrængningsdybden være noget større end 15 m – under ideelle forhold op til ca. 30 m.

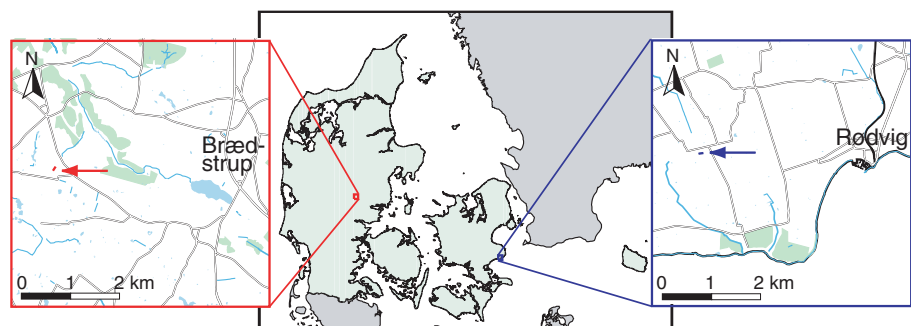
Disse beregninger er udført med en frekvens på 50 MHz. For højere frekvenser vil indtrængningsdybderne være mindre.

### Feltdata støtter teorien

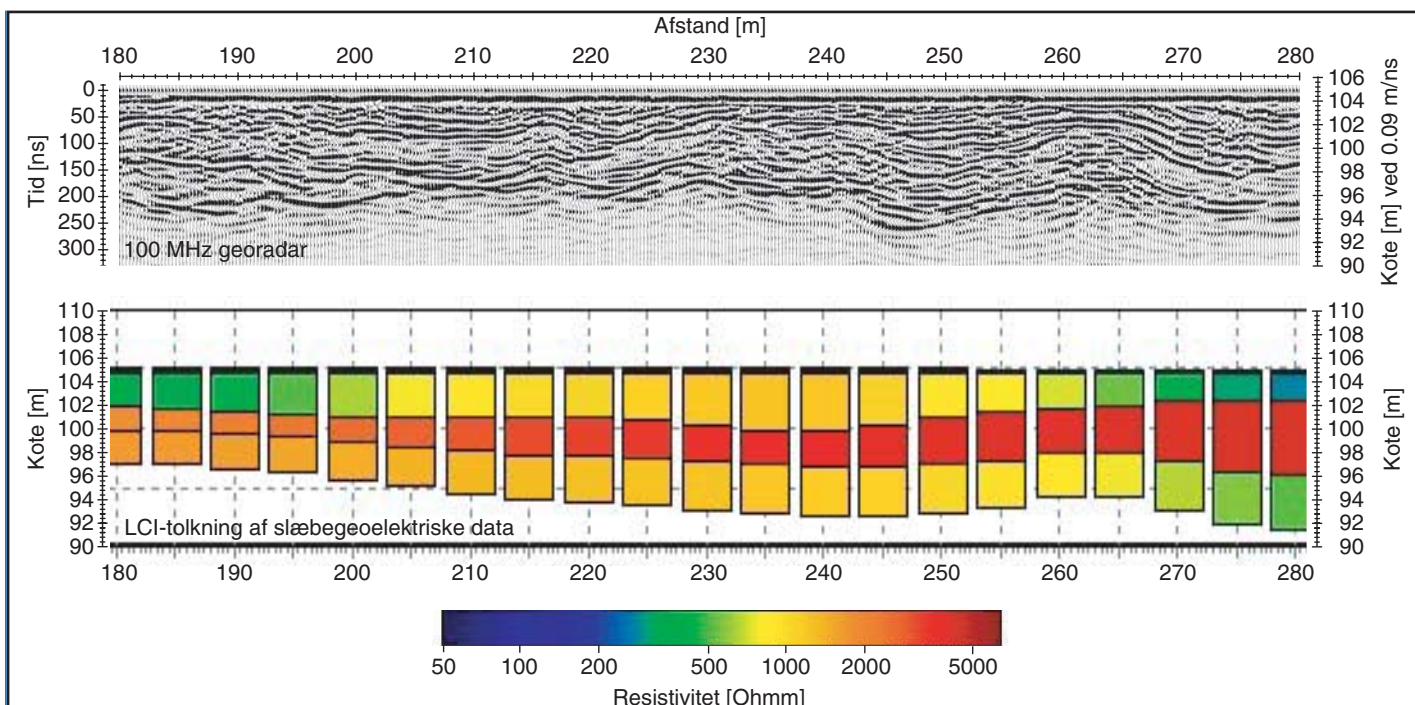
I et par enkelte undersøgelser har vi målt georadar langs linier, hvor der også er indsamlet slæbegeoelektriske data. Det giver os mulighed for at illustrere, at de teoretiske beregninger af indtrængningsdybde stemmer overens med feltdata. Ved Brædstrup i Østjylland er der på smeltevandsaflejringer målt høje resistiviteter med slæbegeoelektrik og stor indtrængningsdybde med georadar, mens der på morænelersaflejringer ved Rødvig på Stevns er målt lave resistiviteter med slæbegeoelektrik og meget ringe indtrængningsdybde med georadar. Kortene (figuren

Resistivitet ( $\rho$ ) og dielektricitetskonstant ( $K$ ) for fire jordtype-scenarier samt luft og ferskvand.

	K	$\rho$ [ohmm]
Tørt sand og grus	4	200-1.000
Mættet sand og grus	25	80-150
Moræneler	25	30-60
Smeltevandsler	25-40	10
Luft	1	8
Ferskvand	80	> ~ 40



Kortudsnit fra Brædstrup i Østjylland og Rødvig på Stevns. Placeringen af de 100 m lange profiludsnit af georadarprofilerne og de slæbegeoelektriske profiler er afsat på kortene og markeret med en pil. (Grafik: Forfatterne)



Et 100 m udsnit af georadarprofil og slæbegeoelektrisk profil vest for Brædstrup i Østjylland. Profilerne er placeret i et område, hvor tykke smeltevands-aflejringer ligger lige under terrænoverfladen. Der er målt høje resistiviteter med slæbegeoelektrik og stor indtrængningsdybde med georadar. Georadardataene er indsamlet med et 100 MHz georadarsystem. De viste data er forstærket (gain) ved brug af en rutine, der bevarer de relative amplitudestyrkeforhold, og migreret med konstant hastighed på 0,09 m/ns. En hastighed på 0,09 m/ns er også anvendt til dybdekonverteringen. Det slæbegeoelektriske profil består af sammenbundne 1D-modeller, som er resultatet af en såkaldt 1D-LCI-tolkning af de slæbegeoelektriske data. (Grafik: Forfatterne)

nederst til højre på foregående side) viser de to udvalgte profilers placering.

I et område vest for Brædstrup i Østjylland mellem Hovedopholdslinien og den Østjyske Israndslinie ligger tykke smeltevands-aflejringer lige under terrænoverfladen. Figuren ovenfor viser et 100 m udsnit af et georadarprofil og et slæbegeoelektrisk profil, som er indsamlet langs samme linie. De slæbegeoelektriske data er tolket med den såkaldte 1D-LCI-metode og resultatet, de sammenbundne 1D-modeller, er vist som brede stave. Langs profiludsnittet ligger lag-resistiviteterne hovedsageligt over 1.000 Ohmm og er intet sted mindre end 300 Ohmm.

Georadarprofilet, som er målt med et georadarsystem med 100 MHz antenner, har

en indtrængningsdybde på ca. 10 m. Refleksionerne viser et bølgende forløb, som indikerer, at aflejringerne er foldede. Et par af de markante, kraftige refleksioner i georadarprofilet kan korreleres med top og bund af det mellemste lag med meget høje resistiviteter på over 3.000 Ohmm i det geoelektriske profil.

Vest for Rødvig på Stevns udgør en otte til ti meter tyk moræneler dæklaget over Danienskalk. Et 100 m udsnit af et georadarprofil og et slæbegeoelektrisk profil, der er målt langs samme linie, er vist i figuren øverst næste side. Georadarprofilet målt med et 100 MHz georadarsystem har en meget ringe indtrængningsdybde. Der ses stort set kun en refleksion under den direkte

bølge øverst i signalet. En 2D tolkningsmodel af de slæbegeoelektriske data viser, at morænelerens resistivitet ligger mellem 30 og 40 Ohmm lige under terræn. Disse lave resistiviteter virker i praksis som en skærm for georadarsignalet. De lave resistiviteter forårsager også en ringning af signalet. Denne ringning kan observeres i georadarprofilet i to til fire meter dybde som svage planparallelle refleksioner. Det er vigtigt at erkende, at disse refleksioner skyldes ringning, så de ikke fejlagtigt tolkes som strukturer i de geologiske aflejringer.

Dataene fra Brædstrupområdet stammer fra en omfattende grundvandskortlægning af et begravet dalsystem. Vejle Amt står for undersøgelserne, som udføres i regi af det

# Vi borer over hele landet..!

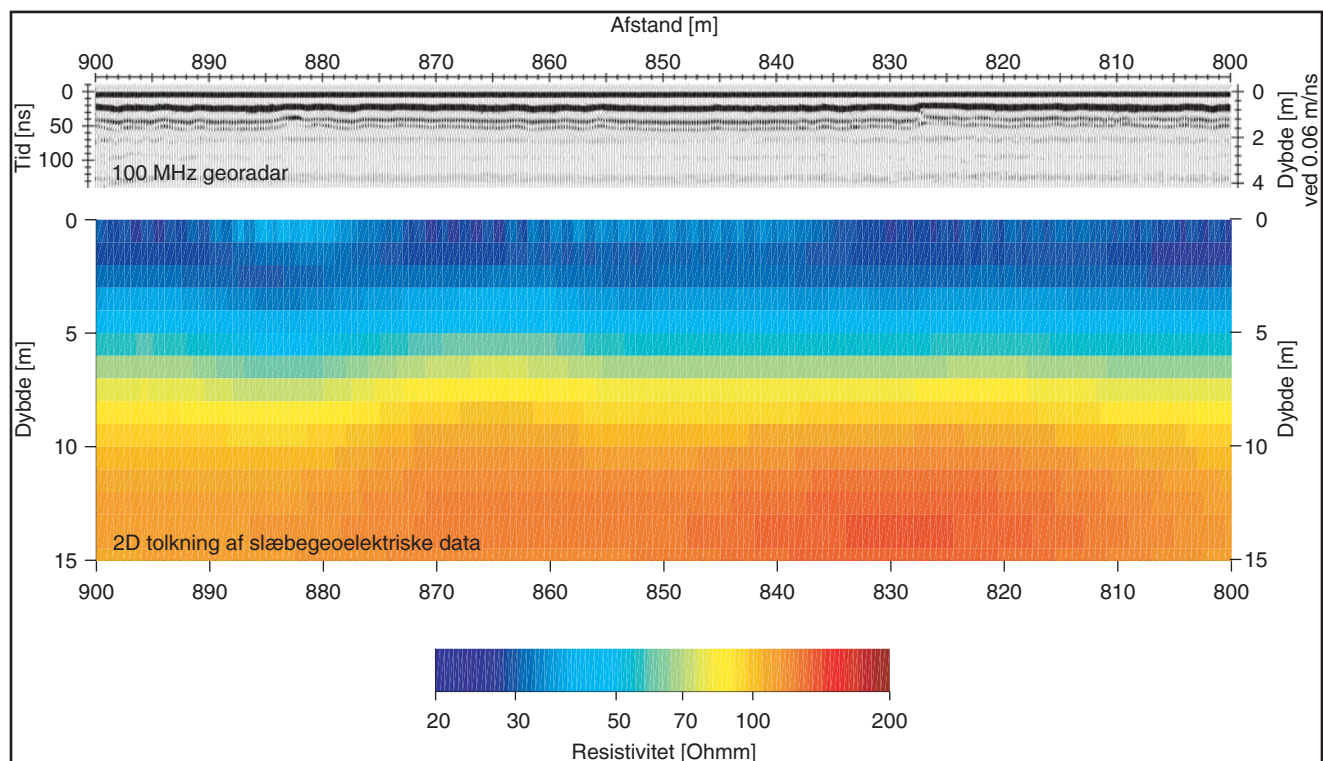
- Kerneboringer
- Hulsneglsboringer
- Højslevboring
- Tørboring
- Luftslyleboring
- Skulleboring

- ring og hør nærmere...



POUL CHRISTIANSEN A/S  
Brønborer- &  
Ingeniørfirma  
7840 Højslev  
Tlf. 97 53 52 22

- din sikkerhed for erfaring og kompetence...



Et 100 m udsnit af georadarprofil og slæbegeoelektrisk profil vest for Rødvig på Stevns. Profilerne er placeret i et område, hvor otte til ti meter moræneler overlejrer Danienkalk. Der er målt lave resistiviteter med slæbegeoelektrik og meget ringe indtrængningsdybde med georadar. Georadardataene er indsamlet med et 100 MHz georadarsystem. De viste data er forstærket (gain) ved brug af en rutine, der bevarer de relative amplitudestyrkeforhold, og migreret med konstant hastighed på 0.06 m/ns. En hastighed på 0.06 m/ns er også anvendt til dybdekonverteringen. Det slæbegeoelektriske profil viser et udsnit af en 2D-model, som er resultatet af en tolkning af de slæbegeoelektriske data udført med 2D inversionsprogrammet DCIP2D. (Grafik: Forfatterne)

EU-finansierede BurVal-projekt. BurVal-projektets deltagere er ud over Vejle Amt, Ringkøbing Amt, Sønderjyllands Amt og GEUS samt nogle nordtyske og hollandske partnere. Aarhus Universitet har indsamlet og tolket de slæbegeoelektriske data for Vejle Amt. GEUS har indsamlet og tolket georadardata langs nogle få udvalgte slæbegeoelektriske linier. Georadarlinier blev placeret, hvor de slæbegeoelektriske data viste terrænnære jordlag med meget høj resistivitet.

Dataene fra Stevns kommer fra GEUS' og Danmarks JordbrugsForsknings afprøvning af undersøgelsesmetoder til pesticid-zonering for lerjorde i KUPA projektet. Et mindre område vest for Rødvig er benyttet til en lang række feltundersøgelser. Som led i disse undersøgelser har Aarhus Universitet indsamlet slæbegeoelektriske data for GEUS og Geologisk Institut, Københavns Universitet har indsamlet georadardata.

**Konklusion**

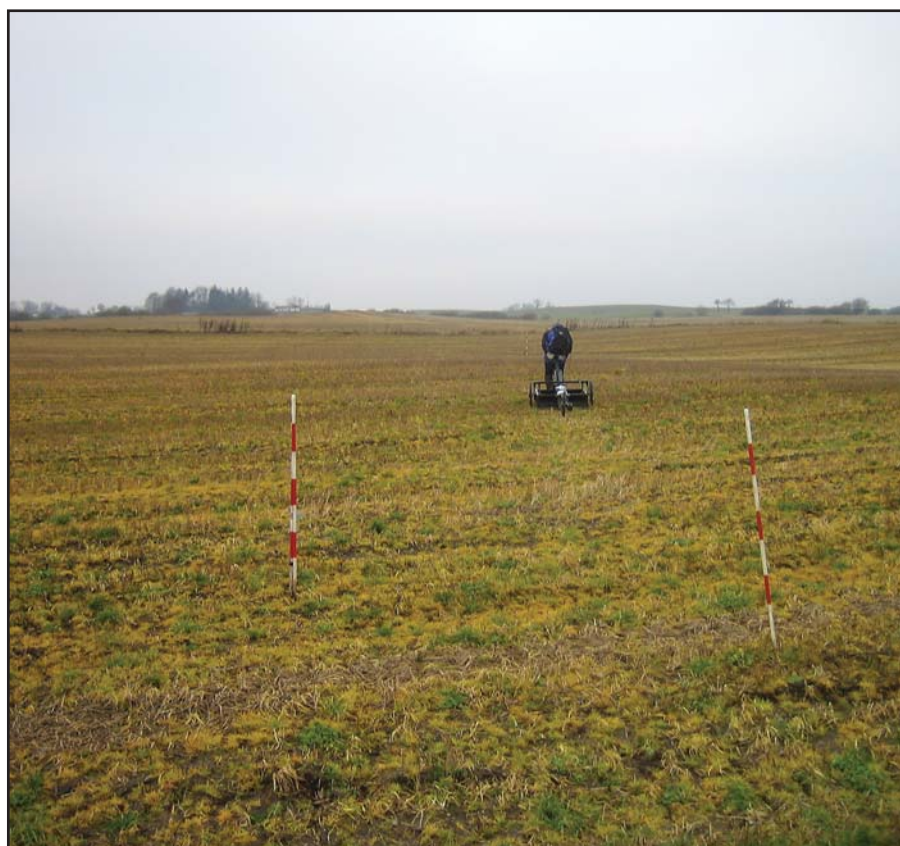
De viste beregningseksempler over signalreduktionen understøtter den erfaring, man indtil nu har fået gennem talrige georadarundersøgelser i Danmark og udlandet. Georadars geologiske anvendelsesområde befinder sig inden for kortlægningen af lerfrie og lerfattige aflejringer med fersk porevand. Indtrængningsdybden i moræneler er meget ringe og kan ikke overstige fem meter. I tørre, sand- og grusaflejringer kan man under ideelle forhold opnå indtrængningsdybder på op til ca. 30 m.

*Litteratur:*

Reynolds, J. M., 1997: *An introduction to applied and environmental geophysics*, Wiley.

*Læs mere om :*

BurVal projektet på <http://www.burval.org>  
KUPA projektets resultater på <http://www.kupa.dk>



Georadar på en stubmark ved Brædstrup-feltområdet. (Foto: Ingelise Møller)