

# Fra geofysik til 3D-modeller

En detaljeret 3D-model af undergrundens strukturer er essentiel for, at man kan forudsige, hvor vandet løber i undergrunden, og dermed også hvordan fx nitratreduktionen foregår. Her beskriver vi hvordan man kombinerer geofysiske data med boringer for at danne 3D modeller af undergrunden.

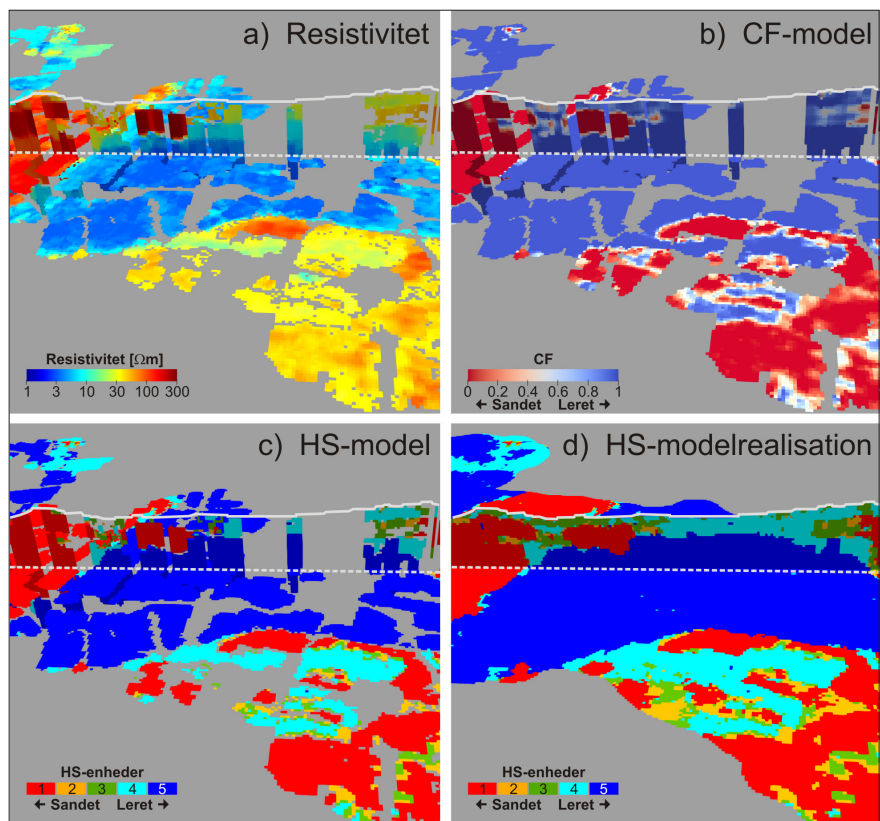
ANDERS V. CHRISTIANSEN &  
NIKOLAJ FOGED

## Oversættelse af den geofysiske kortlægning

Denne artikel beskriver, hvordan vi i MapField-projektet danner en 3D-model over strukturer i undergrunden baseret på en geofysik kortlægning med tTEM-instrumentet og boringsinformation fra området. 3D modellen med undergrundens strukturer er det hydrostratigrafiske input til en grundvandmodel for området. Vi kvantificerer modelusikkerheden ved at generere mange lige sandsynlige hydrostratigrafiske modelrealisationer.

Den geofysiske metode tTEM /1/ er særdeles velegnet til detaljeret kortlægning af de øverste ca. 80 m, og tTEM-kortlægningerne er den altdominerende kilde til information om strukturerne i undergrunden i MapField-projektet. Resultatet fra en tTEM-kortlægning er i første omgang en model, der beskriver den specifikke elektriske modstand (resistiviteten) i undergrunden. Resistiviteten er interessant, da den korrelerer til litologi (sand, ler, kalk, mv.) og derved også til, hvor godt de geologiske materialer kan lede vand (den hydrauliske ledningsevne). Således vil en lav resistivitet normalt svare til finkornede og meget lerede sedimenter, der bremser eller blokerer vandstrømning, mens en høj resistivitet svarer til grovkornede sedimenter (sand og grus), som er de vandførende lag i undergrunden. I Figur 1 er der vist et horisontalt og et vertikalt snit i resistivitetsmodellen fra tTEM-kortlægningen i projektet MapField på de to demonstrationsområder, her kaldet demosites. De to demosites er beliggende på Salling, nord for Skive og dækker et ca. 3000 hektar stort område. tTEM-kortlægningen af demosites er præsenteret i større detalje /1/.

Som det ses i figur 1a, er der masser af strukturer i resistivitetsmodellen, hvor de



Figur 1. 3D-view af modellerne set mod nord, med horisontalsnit i kote -20 m og vertikal sektion (mellem de hvide linje). Den vertikale sektion er ca. 5 km lang og ~40-60 m højt. a) Resistivitetsmodellen, b) CF-modellen, c) HS-modellen, d) en modelrealisation af den komplette HS-model.

røde områder indikerer sandede sedimenter og de blå farver er de lerede sedimenter.

Første skridt i dannelsen af en 3D model af strukturerne er en oversættelse af de geofysiske modeller til en model, der viser andelen af ler i hver modelcelle ved hjælp af boringsinformation /2,3/. Lerandelen angives som clay fraction (CF).

I figur 1b er resistivitetsmodellen oversat til CF-værdier, hvor den blå farve er ler (CF-værdier ~1), og hvor sand/grus har en rød farve (CF-værdier ~0). Oversættelsen er sket ved at sammenholde boringsbeskrivelserne om lersand-fordelingen med de nærliggende resistiv-

vitetsværdier. Dette gøres for alle borerne i området i en række dybdeintervaller og her ved opnås en række lokalt optimerede grænseværdier for oversættelsen af resistiviteterne til en CF-værdi. Optimeringen af denne rumligt varierende oversættelse af resistiviteterne er automatiseret i en regnekode. Inputtet til regnekoden er andelen af lerlag i dybdeintervaller i borerne samt resistivitetsmodellerne. Regnekoden finder dernæst de lokale grænseværdier, der giver den bedst mulige overensstemmelse mellem lerandelen (CF) beskrevet i borerne og lerandelen beregnet fra resistivitetsmodellerne. Den rumlige varia-

**Boks 1 - Clustering**

Clustering er en måde at opdele eller gruppere datasæt således, at datapunkterne i den samme gruppe (kaldet en cluster) er mere ens med hinanden end med datapunkterne i de andre clusters. Vi anvender en såkaldt K-means cluster-algoritme. I K-means clustering tilhører et datapunkt den cluster, hvor afstanden til cluster-centret er kortest. K-means clustering algoritmen finder cluster-centrene ud fra det kriterie, at den kvadrerede afstand fra datapunkterne til nærmeste cluster-centrum skal være mindst mulig for det samlede datasæt. Når vi taler om afstande i clustering, er der således tale om afstande i data-rummet og ikke geografiske afstande. Som i vores tilfælde kan clustering foretages på flere variabler (resistiviteter og CF-værdier). For at variablerne får lige meget vægt i cluster-beregningen, foretages bl.a. en normalisering af variablerne forud for selve clusteringen.

Ved en clustering er det brugeren, der angiver, hvor mange clusters man vil have. Figur 2a viser, hvordan et CF- og resistivitets-datasæt opdeles af K-means cluster-algoritmen i fem clusters (de fem farver i figuren). Figur 2b viser det tilhørende silhuet-indeks. Silhuet-indeks er et mål for, hvor unikt et datapunkt tilhører sit cluster i forhold til de andre cluster. Som det fremgår af Figur 2a-b, har datapunkter nær et clustercentrum et højt silhuet-indeks svarende til et meget unikt tilhørsforhold, mens datapunkter tæt ved cluster-grænserne har et lavt silhuet-indeks svarende til et mindre unikt tilhørsforhold. Silhuet-indeks kan således bruges som en usikkerhedsindikator for cluster-tilhørsforholdet for datapunkterne i cluster-domænet. Silhuet-indeks kan også bruges til at indikere, hvor mange clusters et dataset kan "bære" at opdeles i, således at, hvis en given cluster har meget lave silhuet-indeks-værdier, bør man opdele datasættet i færre clusters.

ble oversættelse af resistivitetsværdier er nødvendig, bl.a. fordi: 1) den elektriske ledningsevne af porevandet i sedimenterne kan ændre sig igennem kortlægningsområdet, og dette påvirker resistiviteten; 2) usikkerheder i resistivitetsmodellen, hvor specielt kortlægning af tynde lag dybt nede er vanskelig og disse lag vil have stor usikkerhed; 3) lag, der er beskrevet som fx Ler i borerne kan spænde over et stort resistivitetinterval alt efter mængden og typen af lerminerale i den pågældende lerede aflejring.

Som det fremgår af figur 1b, er CF-modellen næsten binær med CF-værdier ~1 for ler og CF-værdier ~0 for sand/grus. CF-værdier mellem 0 og 1 opstår dels, hvor man har resistivitetsværdier, der ikke entydigt kan oversættes til ler eller sand, dels når borerne har både ler og sand beskrevet for et givet re-

sistivitetslag.

Vi har nu en CF-model, som inkluderer information fra borerne, men som det fremgår af figur 1a-b, er en forsimpning af strukturerne i resistivitetsmodellen.

**Opdeling i hydrostratigrafiske enheder – Clustering**

Næste skridt i dannelse af en 3D model over strukturer er integration af de detaljerede strukturer i resistivitetsmodellen med CF-modellen til dannelse af den hydrostratigrafiske model /4/.

Den hydrostratigrafiske model danner grundlaget for beregning af vandstrømningerne i undergrunden i grundvandsmodellen. Den hydrostratigrafiske model består af enheder (HS-enheder), hvor de enkelte enheder tilskrives hydrologiske egenskaber (fx hydraul-

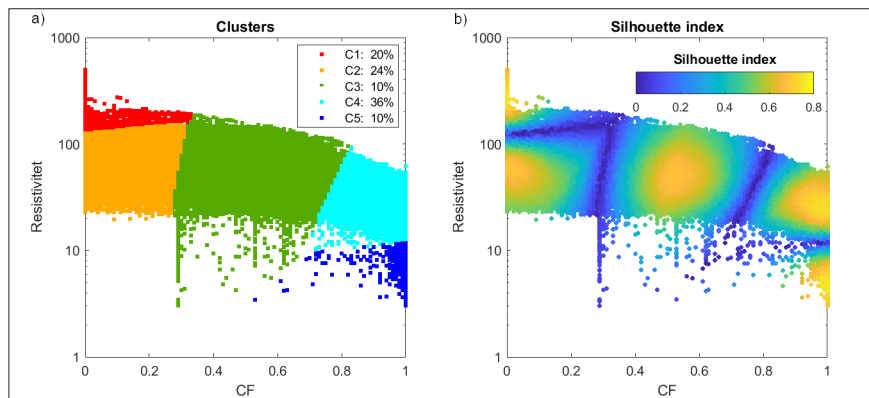
isk ledningsevne), når de indgår i en grundvandsmodel. CF-modellen kunne let transformeres til en hydrostratigrafisk model med to HS-enheder (ler og sand), men dette ville være en overforsimpling af de faktiske forhold. Tilgangen her er derfor at danne HS-enheder ud fra både CF-modellen og resistivitetsmodellen. Til gruppering af vores CF- og resistivitetsmodel til HS-enheder anvender vi en Cluster-algoritme (boks 1).

I Ffigur 2a ses gruppering af CF- og resistivitets-modellerne i 5 HS-enheder. HS-enhederne 1 og 2 (blå/lyseblå) er de mest lerede enheder med lav hydraulisk ledningsevne, mens HS-enhederne 4 og 5 er de mest sandede enheder med høj hydraulisk ledningsevne (vandførende). Antallet af HS-enheder i modellen bestemmes dels ved at vurdere, hvor mange enheder datasættet kan bære, dels med input fra den hydrologiske side om, hvor mange HS-enheder der er nødvendige for, at modellen har kompleksitet nok til at forudsige de hydrologiske data (typisk trykniveauer i borer og afstrømning i vandløb).

**Udfyldning af huller i 3D modellen**

Næste skridt i processen er dannelsen af en komplet 3D hydrostratigrafisk model, som også har estimerede HS-værdier, hvor der ikke er indsamlet data.

Som det fremgår af figur 1a-c er der "huller" i modellerne. Huller forekommer, hvor der ikke er resistivitets-modeller. Dette skyldes, at der i kortlægningsområdet fx er byområder, skov og vådområder, hvor man ikke har kunne indsamle geofysiske data, eller at man ikke har kunnet få adgang til arealerne. Også forstyrrelser i de geofysiske data fra højspændingsledninger, gasledninger, elhegn m.m. bevirker, at TEM-dataene i mindre områder må kasseres. For at kunne anvende modellen i det videre forløb, skal hullerne udfyldes, dvs. at HS-enheder skal tilskrives i hele modelvolumenet. Hvis man anvender interpolation til at lukke hullerne, vil man få udglattede strukturer, som ikke har samme kompleksitet som i områderne, hvor man har data. Vi bruger derfor multi-punkts geostatistik til denne udfyldning af hullerne /5/. Specifikt anvender vi en metode kaldet Direct Sampling til at udfyldelse af hullerne i HS-modellen. Direct Sampling genererer strukturer med samme udseende og statistik som i det træningsbillede, der er en del af inputtet til Direct Sampling. I vores tilfælde kan vi bruge HS-modellen i figur 1c som 3D-træningsbillede. I en Direct Sampling skal man også definere såkaldte hårde data (eng: hard data), som er ankerpunkter i modellen, der ikke kan ændres ved generering af en model realisationen. I vores tilfælde



Figur 2. a) Opdelingen af et CF- og resistivitets-datasæt i 5 clusters. Hver prik er et datapar med en CF-værdi og en resistivitet (X- og Y-akserne), og farven angiver, hvilken cluster dette datapar tilhører. Legenden angiver, hvor mange procent af datapunkterne der er i hver af de 5 clusters. b) Det tilhørende silhuet-indeks.

udvælges de hårde data som de datapunkter med høj Silhuet-indeks (boks1), dvs. de mest sikre datapunkter fra HS-modellen i figur 1a. I figur 1c er vist én modelrealisation med Direct Sampling.

### Model usikkerhed

Da Direct Sampling er en statistisk proces, kan vi generere mange lige sandsynlige HS-modeller, der alle opfylder statistikken i træningsbilledet og i de udvalgte hårde data. For at kvantificere modelusikkerheden genererer vi derfor mange HS-modeller (i MapField 500) med Direct Sampling-metoden. Variationen i disse mange, lige sandsynlige modelrealisationer fortæller os om usikkerheden i vores HS-model. Et område med store variationer i de mange modelrealisationer er således mere usikkert end et område med få eller ingen variationer.

I figur 3b-c er vist 2 modelrealisationer med tilhørende hårde data i figur 3a. Eksempler på væsentlige forskelle i modelrealisationerne ses bl.a. ved de stiplede linjer ved A og B markeringerne. I figur 3b er det vandførende røde sandlag ved markering A ikke forbundet, mens dette er tilfældet i figur 3c. Området ved B-markeringen er datafattigt, hvilket resulterer i meget forskellige strukturer i de to modelrealisationer.

Den HS-model, hydrologerne arbejder videre med, er således ikke én HS-model, men flere hundrede, lige sandsynlige HS-modeller (se hvordan dette håndteres i det videre forløb i /6/.

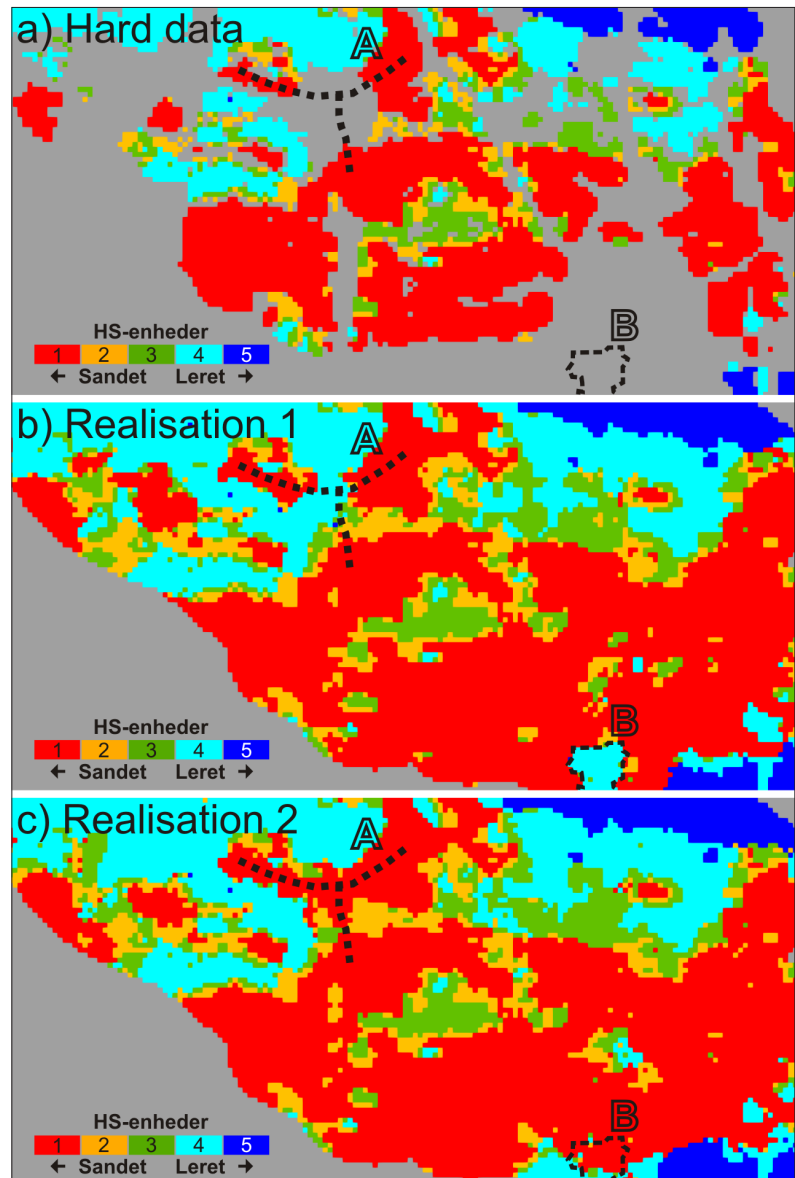
### Konklusion

Det beskrevne modelleringskoncept forudsætter en geofysisk kortlægning med høj detaljeringsgrad både vertikalt og horisontalt, da strukturerne i HS-modelrealisationerne i høj grad styres af strukturerne kortlagt af geofysikken. Boringer spiller dog også en vigtig rolle, da de understøtter oversættelsen af den geofysiske kortlægning. I dansk sammenhæng vil man ofte opleve, at boringstætheden i et modelområde umiddelbart er ganske god, men når man ser på boringstætheder i dybden, fx dybere end 30 m, er boringsinformationen ofte væsentligt begrænset. Dette resulterer i en mindre sikker oversættelse af geofysikken i dybden. Den aftagende boringsinformation med dybden er dog ikke anderledes end ved en traditionel manuel fortolkning af de geofysiske resultater i samspil med boringerne. HS-modelleringskonceptet er automatiseret, baserer sig så vidt muligt på objektive kriterier og er derved reproducerbar. Antallet af HS-enheder i modellen er dog til dels subjektiv beslutning, og træffes bedst i

samråd med hydrologen, der kan inddrage de hydrologiske data i denne beslutning. De mange lige sandsynlige modelrealisationer muliggør, at modelusikkerheden kan kvantificeres.

### Referencer

- /1/ Pedersen J. B., Christiansen A. V., Auken E., Sandersen P. 2022, Geoscanner til overfladenær kortlægning, Vand & Jord, nr. 4, s. 142-144
- /2/ Christiansen, A. V., N. Foged, and E. Auken, 2014, A concept for calculating accumulated clay thickness from borehole lithological logs and resistivity models for nitrate vulnerability assessment, Journal of Applied Geophysics, 108, 69-77.
- /3/ Foged, N., P. A. Marker, A. V. Christiansen, P. Bauer-Gottwein, F. Jørgensen, A.-S. Høyer, and E. Auken, 2014, Large scale 3D-modeling by integration of resistivity models and borehole data through inversion, Hydrology and Earth System Sciences, 18,4349-4362.



Figur 3. a) Hårde data, b-c) 2 HS-modelrealisationer. Horisontalt snit i kote -20 m. (~50-60m dybde), udsnit af modelområde på ca. 4 x 2 km.

- /4/ Marker, P. A., N. Foged, X. He, A. V. Christiansen, A. Refsgaard, E. Auken, and P. Bauer-Gottwein, 2015, Performance evaluation of groundwater model hydrostratigraphy from airborne electromagnetic data and lithological borehole logs, HESS, 19,3875-3890.
- /5/ Vilhelmsen, T. N., E. Auken, A. V. Christiansen, A. S. Barfod, P. A. Marker, and P. Bauer-Gottwein, 2019, Combining Clustering Methods With MPS to Estimate Structural Uncertainty for Hydrological Models, Frontiers in Earth Science.
- /6/ Frederiksen R. R., Christiansen A. V., Blicher-Mathiesen G., Hansen B., 2022, Et grundvandsretentionskort på lokal skala, Vand & Jord, nr. 4, s. 156-159.

ANDERS V. CHRISTIANSEN (anders.vest@geo.au.dk) er professor og NIKOLAJ FOGED (nikolaj.foged@geo.au.dk) er geofysiker PhD ved HydroGeofysik Gruppen, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet