

# tTEM i jord- og grundvandsforurening

Geofysik finder normalt kun begrænset anvendelse i arbejdet med jord- og grundvandsforurening, men med udviklingen af tTEM er geofysikken for alvor kommet ind i varmen. Dette skyldes, at geologiske strukturer, der er styrende for grundvandets lokale strømning, nu bedre kan kortlægges. tTEM giver et vigtigt input til arbejdet, der kan spare ressourcer og opnå bedre risikovurderinger.

FLEMMING JØRGENSEN

TEM-metoden (Transient ElectroMagnetic) har været benyttet i den danske grundvandskortlægning siden begyndelsen af 90'erne. I starten som en håndudlagt punkt-sonderingsmetode, men med afsæt i dansk-udviklede tolkningsalgoritmer samt rutiner til udstyrskalibrering og dataindsamling blev metoden senere videreudviklet til kontinuert opmåling med helikopter (SkyTEM). Mange succesfulde kortlægninger med TEM og SkyTEM har ændret forståelsen af den danske undergrund ved at afsløre nye og hidtil ukendte forhold. Først og fremmest viste undergrunden sig langt mere kompleks og varieret end man tidligere havde forestillet sig. SkyTEM-metoden har dog sine begrænsninger, idet kun større geologiske strukturer kan kortlægges. Geologiske strukturer styrende for grundvandets lokale strømningsmønstre er typisk for små til at blive kortlagt, og derfor har metoden kun i mindre omfang været relevant i forbindelse med grundvandsforurening fra punktkilder.

Senest har ny teknologi muliggjort udviklingen af en ny TEM metode, kaldet tTEM (towed-TEM). tTEM-metoden har en væsentligt forbedret opløsningsevne, og resultaterne af tTEM-metoden ser ud til igen at føje væsentlig ny viden til forståelsen af den danske undergrund. Nu kommer mindre strukturer til syne – og i høj grad de strukturer, der er behov for at kende, når der f.eks. skal laves risikovurderinger i forhold til grundvandsforurening fra punktkilder. Igen observeres en kompleks og varieret undergrund, nu blot bestående af strukturer på mindre skala. Særligt er det ble-

vet muligt at kortlægge glacialtektonisk dannede strukturer, små begravede dale, tynde lerlag, indsynkninger, små grundvandsmagasiner m.m. Strukturer, hvis eksistens og form er afgørende at kende, når spredningsveje for forureningsfaner skal afgrænses.

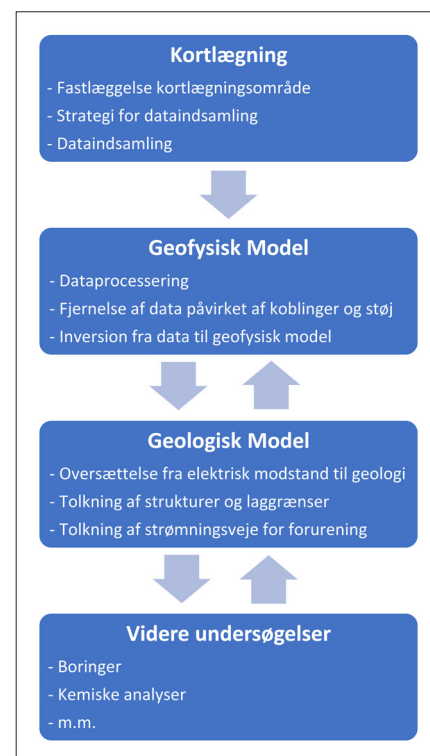
tTEM-systemet er designet til detaljeret 3D kortlægning af den overfladenære undergrund (0-80 m) på en omkostningseffektiv måde. Der kan kortlægges op til 150 ha/dag, og der opnås en detaljeret 3D-dækning ved dataopsamling langs kørelinjer med en indbyrdes afstand på 10-25 m. Dette resulterer i en tæt lateral datadækning, der muliggør konstruktion af detaljerede geologiske og hydrogeologiske modeller. Systemet består af en ATV, der trækker instrumenteringen – en senderamme adskilt fra en modtagerspole; begge dele monteret efter ATV'en. Systemet er beskrevet i /1/.

## tTEM-systemet og behandling af de indsamlede data

tTEM måler på jordens elektriske modstande. De indsamlede data består af stakkede sonderinger, som efter dataprocessering og inversion beskriver jordens elektriske modstand i en lagdelt geofysisk model. Modellerne interpoleres efterfølgende til en rumlig resistivitetsmodel.

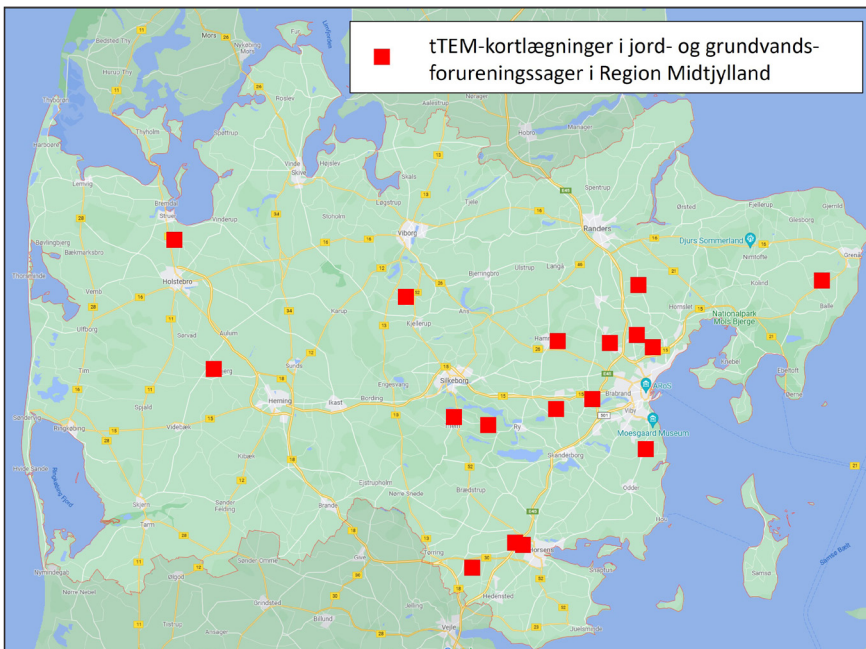
For at få fuldt udbytte af tTEM-metoden, skal resistivitetsdata omsættes til geologi gennem tolkning. Denne tolkningsproces kræver erfaring med metoden og indsigt i både geofysiske og geologiske forhold. Her er det vigtigt at kende metodens begrænsninger og også at kende de elektriske modstande af de geologiske aflejringer i et givent kortlægningsområde.

I Figur 1 ses processen for et optimalt kort-



Figur 1. Processen for tTEM-data fra indsamling til anvendelse

lægningsforløb. Først udføres selve kortlægningen i et design tilpasset sagens problemstilling. Herefter processeres og inverteres data til en geofysisk model. Næste skridt er så at omsætte den geofysiske model til en geologisk model, som danner grundlag for gennemførelsen af de videre undersøgelser. Modellerne forbedres gennem feedback loops mellem miljøogsagsbehandler, geolog og geofysiker. Dette samarbejde har erfaringsmæssigt vist sig at være meget vigtigt.



Figur 2. Fordeling af tTEM-kortlægninger i Region Midtjylland

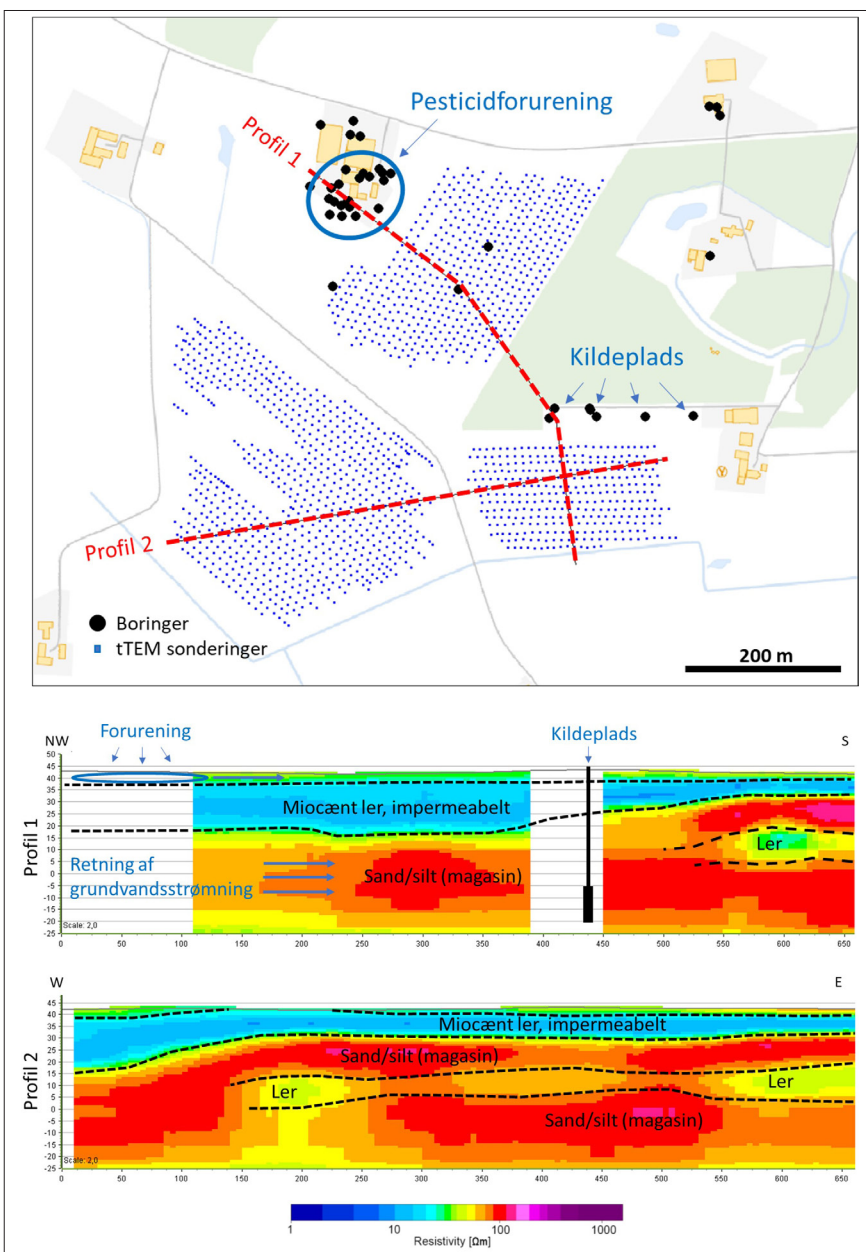
TEM-metoden er generelt følsom overfor elektrisk støj og tekniske installationer og er derfor udfordret tæt på bebyggelse, infrastruktur, elledninger, kabler m.m. Der kan ikke måles data tættere end ca. 50 m på sådanne installationer, hvilket er et problem i mange forureningssager. I Region Midtjylland er det i en GIS-analyse estimeret, at det kan være problematisk at kortlægge i ca. halvdelen af alle sager med videregående undersøgelser.

I Region Midtjylland er tTEM-metoden indtil videre blevet anvendt på 17 lokaliteter i forbindelse med forureningsundersøgelser (figur 2). Disse lokaliteter omfatter en blanding af affaldsdepoter, landbrug, maskinstationer og andre virksomheder. Fælles for de undersøgte lokaliteter er, at de hovedsageligt ligger helt eller delvist i det åbne land, og at der er tale om grundvandsbårne forureninger. De forurenende stoffer dækker primært over klorerede opløsningsmidler og pesticider, men også PFAS.

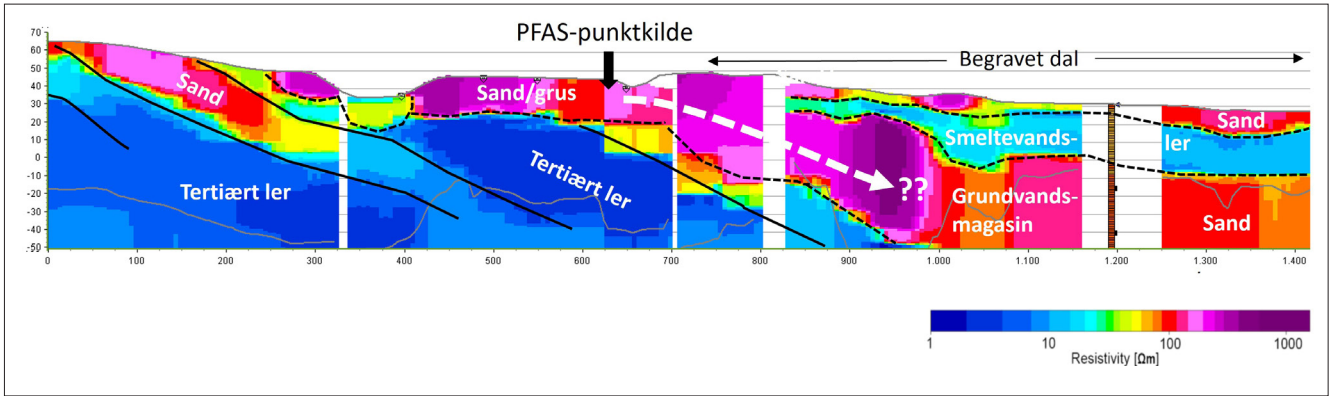
I alle sager har tTEM-kortlægningerne givet et vigtigt input til sagsbehandlingen og de videre undersøgelsesaktiviteter og resulteret i mere sikre risikovurderinger. tTEM-kortlægningerne har typisk medført, at sagerne har kunnet afsluttes med en mere målrettet resterende indsats, og i nogle tilfælde har tTEM-kortlægningerne vist, at punktkilderne ikke udgør en trussel mod grundvandsressourcerne, og sagen har kunnet afsluttes uden videre tiltag.

### Eksempler

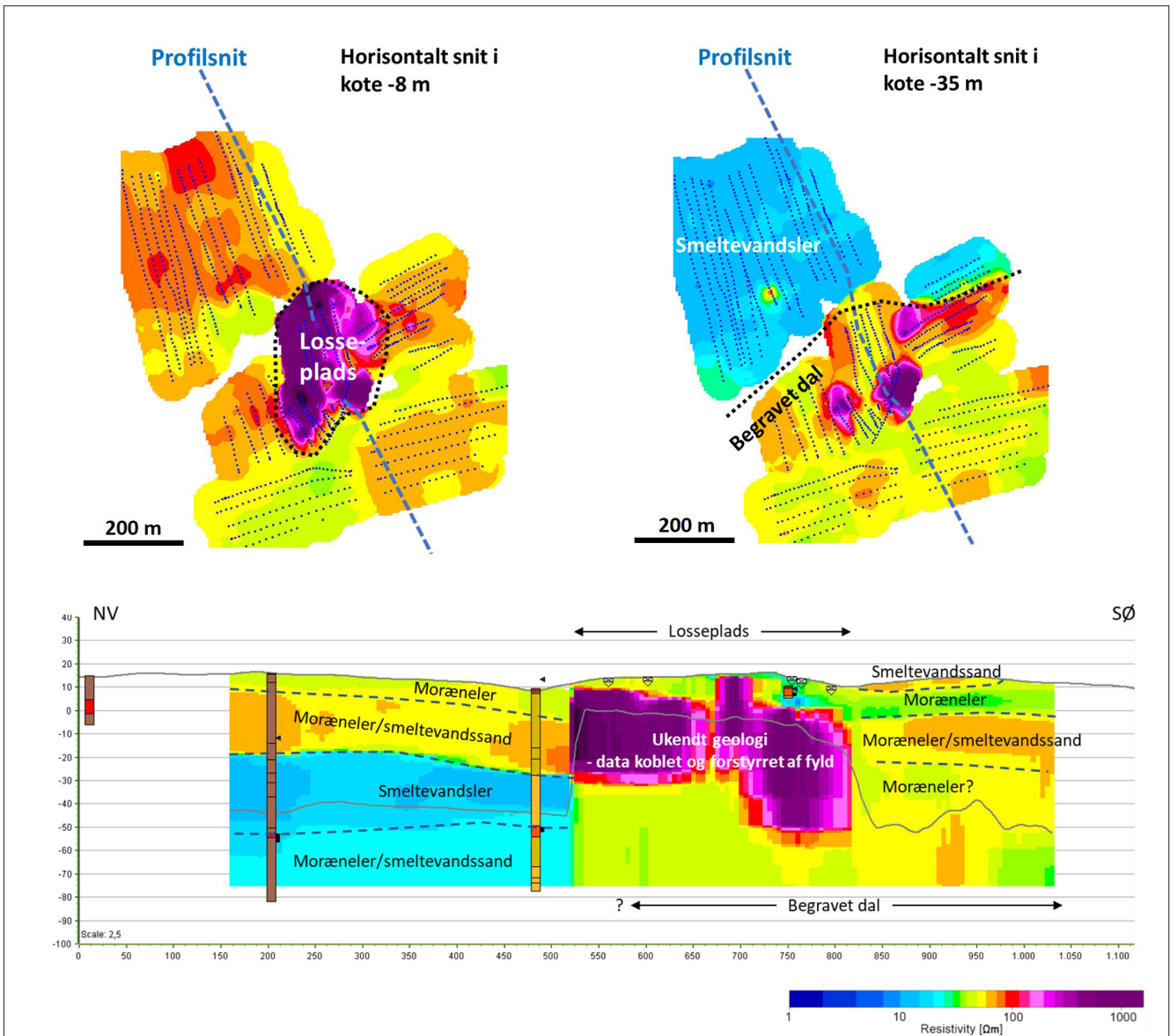
I en del af de kortlagte områder har det været muligt at kortlægge beskyttende lerlag under punktkilden. Ofte adskiller disse lerlag et primært grundvandsmagasin med terrænnært grundvand, som typisk er der, hvor forureningen er fundet. Er lerlaget tykt



Figur 3. Resultater af en tTEM-kortlægning fra Herning-området. Øverst ses et kort med en pesticid-forurening og en kildeplads for et vandværk. tTEM-data, boringer og profiler er også vist. Nederst ses to profilsnit gennem området (650 m lange og 70 m dybe). Det øverste går gennem punktkilden og kildepladsen. Her ses et terrænnært lavmodstandslag, tolket som miocænt ler (blå farver) og et dybereliggende højmodstandslag, tolket som miocænt sand/silt (rødlige farver). Det nederste profil viser ligesom det øverste, at lagserien er relativt homogen og uforstyrret i hele området.



Figur 4. Profilsnit gennem en tTEM-kortlagt PFAS-lokalitet vest for Århus. Profilet er 1400 m langt og ca. 110 m dybt. Geologien er komplekst opbygget formodentlig med en glacialtektonisk forstyrret lagserie i den venstre del af profilet og en dyb begravet dal i den højre del. Den begravede dal indeholder et stort grundvandsmagasin, som ikke umiddelbart ser ud til at være beskyttet af smeltevandsler tættest ved PFAS-lokaliteten.



Figur 5. Resultater fra en tTEM-kortlægning af en nu tildækket losseplads ved Harlev. Øverst ses to horisontale snit gennem tTEM-data. tTEM-sonderinger er vist med små blå prikker. Nederst ses en profilsnit gennem området (1100 m langt og 100 m dybt). Den grå streg viser den estimerede kortlægningsdybde – herunder er data usikre.

og hydraulisk tæt, vil det kunne beskytte det primære grundvandsmagasin, hvis det samtidigt er uforstyrret og har en stor udbredelse i nedstrøms retning. Her er det således afgørende at kende udbredelse, permeabilitet og forstyrrelsesgrad/variabilitet af lerlaget, og til kortlægning af sådanne forhold har tTEM vist sig at være et velegnet værktøj.

Figur 3 viser en sag fra Herning-området, hvor en pesticidforurening fra en maskinstation vurderedes at true den lokale vandindvinding. Forureningen blev fundet i en række korte borer på lokaliteten i terrænnært grundvand. Det generelle grundvandspotentiale for det primære grundvand i området indikerede en strømningsretning mod sydøst netop i retning af det lokale vandværks kildeplads kun 400 m væk. Resultatet af tTEM-kortlægningen viste et 5-25 m tykt lag med meget lave modstande i hele det kortlagte område. Dette lag befandt sig umiddelbart under det forurenede, terrænnære grundvand og ovenpå det regionale grundvandsmagasin (høje modstande). Den meget lave modstand af lerlaget indikerede et højt lerindhold og dermed en lav permeabilitet. Data viste også, at lerlaget var uforstyrret, og at det kunne antages at eksistere i de områder, hvor det ikke var muligt at indsamle data (langs veje og i skov). Oplysninger fra boredata viser, at lavmodstandslaget består af miocænt ler og at højmodstandslagene på større dybde består af miocænt sand og silt. Efter kortlægningen med tTEM lød risikovurderingen, at der kun var en meget lav eller ingen risiko for at pesticidforureningen ville kunne nå det primære grundvand og true vandforsyningen. Hvis ikke tTEM-kortlægningen var blevet udført, ville en tilsvarende sikker risikovurdering have krævet et stort antal dybe borer. Dette ville have været mange gange dyrere, og borer gennem lerlaget ville desuden kunne skabe lækage mellem det sekundære og det primære grundvand.

I andre tilfælde viser tTEM-kortlægningerne en noget mere varieret geologi. Her er grundvandets strømningsveje komplekse, og forureningsfaner er sværere at kortlægge og forudsige. Brudte og usammenhængende lerlag skaber lækage mellem grundvandsmagasiner, og strømningsretninger kan hurtigt skifte når grundvandet strømmer mellem magasiner, lag

og geologiske strukturer. Da tTEM kortlægger undergrunden i tre dimensioner, kan de rumlige forhold beskrives, hvilket er vigtigt når strømningsveje skal bestemmes. I Region Midtjylland ses mange af den slags lokaliteter, der er svære at håndtere på grund af usikkerhed på de geologiske og hydrogeologiske forhold. Når de geologiske strukturer er tilstrækkelig store, og modstandscontrasterne mellem aflejringerne er markante, har tTEM vist sig nyttig også under disse forhold.

Et eksempel på en kortlægning af en punktkilde i kompleks geologi ses i figur 4. Dette eksempel er fra et affaldsdepot med PFAS vest for Aarhus. tTEM-kortlægningen viser, at lokaliteten befinder sig ovenpå en glacialtektonisk forstyrret lagserie på kanten af en dyb begravet dal, som indeholder store og vigtige grundvandsreserver. Den begravede dal er i de øvre dele beskyttet af en tæt lagpakke af fed smeltevandsler, men netop op mod flanken af dalen ses lerlaget at tynde ud og forsvinde. Dermed viser data, at der formodentlig er fri hydraulisk kontakt mellem punktkilden og det dybe grundvandsmagasin. Denne viden har været meget vigtig for den fortsatte undersøgelse af lokaliteten, blandt andet fordi det har været muligt at optimere placeringen af undersøgelsesboringer, men også fordi antallet af disse er blevet reduceret betydeligt. Undersøgelsen er pågående, og omfanget af en eventuel forurening af de dybe grundvandsmagasiner kendes ikke endnu.

Et andet eksempel på en tTEM-kortlægning af en punktkilde i et område med kompleks geologi er fra Harlev vest for Århus (figur 5). Her undersøges i hvilket omfang en gammel tildækket losseplads lækker perkolat til grundvandet. Til venstre i figur 5 er vist et horisontalt snit i kote 8 m, og her ses lossepladsfyldet tydeligt med en meget høj modstand. Dette er et artefakt idet fyldet i lossepladsen forstyrrer data, men trods dette giver det en klar indikation af lossepladsens eksistens og udbredelse. Omkring lossepladsen ses moderate modstande svarende til blandede lag af smeltevandssand og moræneler. I snittet svarende til kote -35 m ses i den nordlige del med blå farver et lag af udbredt smeltevandsler. I den sydlige del har en dyb begravet dal borteroderet dette lag, og dalen er udfyldt med blandede lag af moræneler og smeltevandssand.

Den dybe del af den begravede dal indeholder et værdifuldt grundvandsmagasin i området, og det er derfor vigtig information, at lossepladsen befinder sig ovenpå flanken af dalen.

## Perspektiver

tTEM-metoden er blevet udviklet i regi af EU Interreg projektet TOPSOIL og MapField, og brugen af metoden i forbindelse med jord- og grundvandsforening er også blevet udviklet i forbindelse med disse projekter. Da metoden er særdeles avanceret at anvende, kræves specialiseret viden og erfaring, både når det gælder indsamling, processing og bearbejdning af data, men også når det drejer sig om tolkning og anvendelse af data. Der er mange begrænsninger og faldgruber, og der er risiko for, at det fulde udbytte af en kortlægning ikke opnås, hvis kortlægningerne og fortolkningerne ikke udføres af personer med specialviden. Metodens anvendelse og udbredelse er i noget omfang begrænset af mangel på ovennævnte ude hos både rådgivere og regioner, og derfor er 4 af landets regioner, Miljøstyrelsen og WSP gået sammen om et Teknologi-Udviklings-Projektprojekt (TUP), der skal udbrede kendskabet til metoden og implementere den i regionernes arbejde med jord- og grundvandsforurening.

Næste skridt i udviklingen kunne være at kortlægge med drone. Dette vil gøre det endnu mere effektivt og lettere at indsamle data på alle tidspunkter af året, og der vil kunne indsamles data i svært tilgængeligt terræn. Der arbejdes på dette i nogle projekter, og det bliver interessant at følge udviklingen også med henblik på kortlægning af fx punktkildeforureninger som de her viste.

Endelig ville det være ønskeligt at kunne kortlægge nærmere bymæssig bebyggelse og tættere på øvrig infrastruktur. Dette problem er særdeles svært at løse, men enhver forbedring vil øge antallet af forureningssager der kan kortlægges.

## Referencer

/1/ Pedersen, J.B., Christiansen, A.V., Auken, E. & Sandersen, P. 2022: Geoscanner til overfladenær kortlægning. Vand & Jord nr. 4, s. 142-144.

FLEMMING JØRGENSEN (fljoer@rm.dk) er chefkonsulent ved Regional Udvikling, Region Midtjylland, Viborg.