

tTEM - ny kortlægningsmetode til risikovurdering af grundvands- forurening fra punktkilder

Miljøprojekt, nr. 2315

Juli 2026

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Flemming Jørgensen, Region Midtjylland

Anders Edsen, WSP Danmark

ISBN: 978-87-7564-126-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

1.	Forord	5
2.	Sammenfatning	6
3.	Summary	8
4.	Indledning	10
4.1	Baggrund	10
4.2	Formål	10
5.	Introduktion til tTEM og nuværende praksis for anvendelse	12
5.1	tTEM-systemet, kortfattet teknisk beskrivelse	12
5.2	Anvendelse af tTEM ved punktkildeforureninger	14
6.	Eksisterende erfaring med tTEM i regionerne	15
6.1	Eksisterende erfaring inden projektopstart	15
6.2	Erfaringsopsamling i regionerne	15
7.	Gennemførte testkortlægninger	17
7.1	Hanehøjvej, Skørping, Region Nordjylland	19
7.2	Voldum, Region Midtjylland	22
7.3	Stampevej, Ringkøbing, Region Midtjylland	26
7.4	Rygesmindevej, Them, Region Midtjylland	31
7.5	Skovmølleværket, Svendborg, Region Syddanmark	34
7.6	Vesterlund Losseplads, Region Syddanmark	37
7.7	Nybølle, Region Hovedstaden	42
7.8	Skovlytoften, Søllerød, Region Hovedstaden	47
7.9	Frijsenborg	51
8.	Sammenstilling af resultater	53
8.1	Fordeling af lokaliteter	54
8.2	Relevans i forhold til forureningstyper	54
8.3	Betydning af tilgængelighed og datadækning	54
8.4	Egnethed i forskellige geologiske miljøer	56
8.5	Betydning af kortlægningslayout i feltet og den efterfølgende processering	57
8.6	Anvendelsen af de indsamlede tTEM-data i sagerne	57
8.7	Samarbejde	58
8.8	Betydning for risikovurdering og afværge/monitoring	59
8.9	Cost benefit-vurdering	59
8.10	Bæredygtighed	59
9.	Forslag til fortsat udvikling	61
10.	Vejledning	62
11.	Konklusioner	63

1. Forord

Denne rapport beskriver resultaterne af et projekt "tTEM - ny kortlægningsmetode til risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder". Projektet er finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening og medfinansieret af de deltagende regioner og WSP.

Projektet er gennemført af WSP Danmark og Region Midtjylland i samarbejde med Region Nordjylland, Region Syddanmark og Region Hovedstaden. Desuden har Videncenter for Miljø og Ressourcer (VMR) og Geoscience, Aarhus Universitet deltaget i projektmøder.

Målgruppen for projektet er primært medarbejdere i regionerne, men også rådgiverbranchen kan drage nytte af projektets resultater.

Projekt- og følgegruppe bestod af følgende personer:

WSP Danmark: Anders Edsen, Henrik Olesen, Daniel Juul Okholm og Johanne Jager Jensen

Region Nordjylland: Annette Dohm.

Region Midtjylland: Jesper Simensen, Flemming Jørgensen, Ida Dyrland Damgaard, Lotte Banke og Winnie Hyldegaard, Thomas Ljungberg.

Region Syddanmark: Agnieszka T. Bentzen, Lars Frimodt Pedersen og Steffen Gram Lauridsen.

Region Hovedstaden: Vinni Rønde, Helle Overgaard, Ditte Lykkesborg Schrøder og Katja Sauer Grunnet.

Danske Regioner, Videncenter for Miljø og Ressourcer (VMR): Kurt Møller

Geoscience, Aarhus Universitet: Jesper Bjergsted Pedersen

2. Sammenfatning

Denne rapport beskriver resultaterne af projektet "*tTEM – ny kortlægningsmetode til risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder*", som er finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprogram og medfinansieret af de deltagende regioner og WSP. Projektet blev gennemført af WSP og Region Midtjylland i samarbejde med Region Nordjylland, Region Syddanmark og Region Hovedstaden.

tTEM (towed Transient ElectroMagnetics) er en relativt ny teknologi udviklet af Aarhus Universitet til geologisk kortlægning af de øverste ca. 50-70 m jordlag. tTEM-systemet, der trækkes efter et ATV-køretøj, muliggør indsamling af tætliggende data og giver et detaljeret indblik i de øverste jordlag. Dette kan afsløre rumlige geologiske forhold, der er afgørende for at kortlægge strømningsveje for forureningsfaner. I modsætning til andre typer af geofysiske metoder giver tTEM både en relativt dyb indtrængning og tilstrækkelig detaljeret fladedækning til reel 3D-kortlægning af det relevante jordvolumen.

Projektet var et kombineret teknologiuudviklings-, erfaringsopsamlings- og feltprojekt, der havde til formål at optimere anvendelsen af tTEM til risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder og udbrede kendskabet til metoden i regionerne.

Der er gennemført i alt 8 testkortlægninger fordelt på de 4 deltagende regioner. Disse testkortlægninger repræsenterede forskellige problemstillinger, geologityper og forureningstyper. På alle lokaliteter viste det sig vigtigt at kortlægge geologiske strukturer og elementer, der havde betydning for forureningsspredningen. Dette var f.eks. kortlægning af udbredelse og kontinuitet af beskyttende lerlag og identifikation af inhomogeniteter, der kunne fungere som lækagepunkter eller spredningskorridorer.

Relevansen af tTEM-kortlægning på forureningslokaliteter afhænger ofte af, om kortlægning er mulig at udføre på grund af bebyggelse og infrastruktur, da metoden er følsom over for elektriske installationer, hegn og metal. Selvom flere af de 8 testkortlægninger fandtes i bymæssig bebyggelse, viste projektet, at selv spredte data optaget i omgivelserne kunne give meningsfulde input til sagsbehandlingen og forståelsen af forureningsspredningen på større afstand.

En central konklusion var, at tTEM-kortlægning i 6 ud af de 8 cases burde have været udført tidligere i sagsforløbet end tilfældet var. Når tTEM bliver inddraget tidligt, bidrager det til at skabe en holdbar konceptuel model tidligt i sagsforløbet, hvilket gør det muligt at planlægge mere målrettede undersøgelsesstrategier. Selvom kortlægningerne blev introduceret senere i sagsforløbene, end det havde været optimalt, førte anvendelsen af tTEM til betydelige økonomiske besparelser, primært gennem reduktion af antallet af nødvendige, dyre undersøgelsesboringer.

Samlet set har tTEM-kortlægningen også ført til forbedrede og mere robuste risikovurderinger i alle 8 forureningssager, og i to tilfælde har den medvirket til at afværgetiltag eller monitoring kunne undgås. Metoden betragtes desuden som mere bæredygtig end boringer, da den er noninvasiv og mindsker risikoen for at skabe kortslutninger mellem grundvandsmagasiner og dermed sprede forureningen.

Testkortlægningerne viste også konkrete resultater på, hvordan feltarbejde bedst planlægges og udføres. Valg af layout for dataindsamling med en maksimal linjeafstand på 20 m og en kørehastighed på maks. ca. 15 km/t er f.eks. afgørende for at opnå optimal opløsning og udbytte.

Projektet har desuden fastslået vigtigheden af et tæt tværfagligt samarbejde mellem geofysiker, geolog og sagsbehandler. Dette samarbejde sikrer, at alle faglige elementer kommer i spil, og at produktet gradvist optimeres gennem feedback-loops fra sagsbehandler tilbage til geolog, og fra geolog tilbage til geofysiker. For at få det fulde udbytte kræves endvidere en iterativ tilgang i projektforsløbet.

På baggrund af projektets resultater er der udarbejdet en særskilt vejledning for brugen af tTEM i forureningssager (Edsen et al 2026). Vejledningen udgives som et selvstændigt dokument.

3. Summary

This report describes the results of the project "*tTEM – new mapping method for risk assessment of groundwater contamination from point sources*", which is funded by the Danish Environmental Protection Agency's Technology Development Programme and co-financed by the participating regions and WSP. The project was carried out by WSP and Region Midtjylland in collaboration with Region Nordjylland, Region Syddanmark, and Region Hovedstaden.

tTEM (towed TEM) is a relatively new technology developed by Aarhus University for geological mapping of the upper approximately 50 m subsurface. The tTEM system, which is towed behind an ATV, enables the collection of very detailed data. tTEM can thus provide a fairly precise insight into the near-surface geology and thereby reveal detailed geological conditions that are crucial for mapping flow paths for contaminant plumes. In contrast to other types of geophysical methods, tTEM provides both a relatively deep penetration and sufficient detailed surface coverage for real 3D mapping of the relevant subsurface volume.

The project was a combined technology development, experience collection, and field project, aimed at optimizing the use of tTEM for risk assessment of groundwater contamination from point sources and spreading knowledge about the method in the regions.

A total of 8 test mappings were carried out, distributed across the 4 participating regions. These test mappings represented different problems, geologies, and contamination types. At all locations, it proved important to map geological structures and elements that were significant for contamination spreading. This included, for example, mapping the extent and continuity of protective clay layers and identifying inhomogeneities that could act as leakage points or preferred flow pathways.

The relevance of tTEM mapping at contaminated sites often depends on whether mapping is possible due to buildings and infrastructure, as the method is sensitive to electrical installations, fences, and metal. Although several of the 8 test mappings were located in urban areas, the project showed that even scattered data collected in the surroundings could provide meaningful input to the management of the cases and the understanding of contaminant spreading at greater distances.

An important conclusion was that tTEM mapping in 6 out of the 8 cases should have been carried out earlier in the case workflow than it was. When tTEM is included early, it contributes to creating a robust conceptual model early in the workflow, making it possible to plan more targeted investigation strategies. Although the mappings were introduced later in the workflows than would have been optimal, the use of tTEM led to significant economic savings, primarily through the reduction of the number of expensive investigation drillings.

Overall, tTEM mapping has led to improved and more robust risk assessments in all 8 contamination cases. In two cases, it contributed to avoiding remediation or monitoring measures. The method is also considered more sustainable than drilling, as it is non-invasive and reduces the risk of creating short cuts between groundwater reservoirs and thereby spreading contamination.

The test mappings also showed concrete results on how fieldwork is best planned and carried out. For example, choosing a data collection layout with a maximum line spacing of 20 m and a driving speed of max. approximately 15 km/h is crucial for achieving optimal resolution and yield.

Furthermore, the project established the importance of close interdisciplinary collaboration between geophysicist, geologist, and case project managers. This collaboration ensures that all professional elements are utilized, and that the product is gradually optimized through feedback loops from the project manager back to the geologist, and from the geologist back to the geophysicist. To gain the full benefit, an iterative approach in the workflow is also required.

Based on the project's results, a separate guidance document has been prepared for the use of tTEM in contamination cases.

4. Indledning

4.1 Baggrund

TEM-metoden (Transient ElectroMagnetic) har været benyttet i den danske grundvandskortlægning siden slutningen af 90'erne. I begyndelse som en sonderingsmetode, hvor målingen blev udført til fods og med stor afstand mellem målepunkter, og senere som kontinuert opmåling langs profiler med helikopterbåret udstyr (SkyTEM). Begge datatyper har nogle begrænsninger ved kortlægning af de øvre jordlag, der ikke kan opløses i en detaljeringsgrad nødvendig ved risikovurdering i forhold til jordforurening. Metoden kunne derfor dengang ikke anvendes til kortlægning af grundvandsforhold i relation til punktkilder.

Ny teknologi har de senere år muliggjort en forbedret opløsningsevne for TEM-metoden, og dermed er der blevet åbnet op for, at der, med et mindre TEM-system på jordoverfladen, kan indsamles væsentlig mere detaljerede data. SkyTEM-systemet er i princippet nedskaleret i størrelse og kan nu trækkes gennem terrænet efter en ATV. Systemet kaldes tTEM (**t**owed **TEM**) og er udviklet af Århus Universitet. Senest er udviklingen af tTEM-systemet overgået fra Aarhus Universitet til det etablerede firma TEMCompany.

Resultater opnået med tTEM giver indblik i en varieret og kompleks geologi i den øvre del af undergrunden (øverste ca. 50 m). Mindre strukturer kommer til syne – og det er disse strukturer, der er behov for at få kortlagt, når der f.eks. skal laves risikovurderinger i forhold til grundvandsforurening fra punktkilder. Når data tilmed indsamles langs tætliggende linjer, opnås en arealmæssig datadækning, der resulterer i en 3D opløsning af undergrunden. Særligt er det blevet muligt at kortlægge glacialtektonisk dannede strukturer, små begravede dale, tynde lerlag, indsynkninger, små grundvandsmagasiner m.m. – alt sammen strukturer, hvis eksistens og form er afgørende at kortlægge, når eksempelvis strømningsveje af forureningsfaner skal afgrænses.

Anvendelsen af fladedækkende geofysiske metoder indenfor arbejdet med jordforurening har hidtil været forholdsvis begrænset. De mest udbredte metoder har været DCIP og DualEM/GCM (Ground Conductivity Meter), men begge har afgørende begrænsninger. DCIP (Direct Current Induced Polarization) er omkostningstung at udføre og normalt kortlægges kun langs 2D profiler. Der opnås dermed ikke en 3D opløsning af jorden, hvilket oftest er nødvendigt for at få kortlagt geologien i den nødvendige detalje. DualEM/GCM giver omvendt en god fladedækning, men på grund af en begrænset indtrængning, giver den kun oplysninger om de øverste få meter. Med tTEM metoden fås begge dele samtidigt - en dyb indtrængning og en tilstrækkelig fladedækning, hvilket muliggør en reel 3D kortlægning af det relevante jordvolumen.

4.2 Formål

Dette projekt er en blanding af et teknologiudviklingsprojekt (metodeoptimering), et erfaringsopsamlingsprojekt og et feltprojekt. Med sidstnævnte menes, at der i praksis er gennemført afprøvning af tTEM-teknikkens anvendelse i forbindelse med forureningsundersøgelser.

Det er på baggrund af Region Midtjyllands erfaringer med tTEM, at dette projekt er blevet iværksat. Erfaringerne viste et stort potentiale i forhold til undersøgelser af grundvandsbåren forurening fra punktkilder, men følgende udfordringer gav anledning til gennemførelsen af projektet:

1. Den anvendte praksis ved tTEM var ikke designet og målrettet præcist til formålet.

2. tTEM blev opfattet kompleks at bruge og implementere i det daglige arbejde.

I forhold til 1) var der behov for målrettede test og udvikling af arbejdsgange og procedurer for at få optimeret metodikken til formålet. I forhold til 2) krævedes specialviden og erfaring både hos rådgivere såvel som hos regioner.

Projektets formål og indhold blev på denne baggrund defineret på følgende vis:

- At optimere anvendelsen af tTEM til brug ved risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder, herunder at:
 - Gennemføre en indledende erfaringsopsamling på hidtidige sager, hvor metoden har været anvendt og inddrage erfaringer fra andre anvendelsesformål.
 - Teste anvendeligheden i forskellige geologiske miljøer og i forhold til forskellige forurenende stoffer.
 - Teste forskellige layouts for dataindsamling (datatæthed, linjeudlæg, kortlægningshastighed, håndtering af koblingslementer og støj).
 - Teste forskellige metoder og arbejdsgange til dataprocessering, inversion og geologisk tolkning af de geofysiske data.
- At udbrede metodens anvendelse i regionernes arbejde med risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder, herunder at:
 - Give medarbejdere i regionerne erfaring med metoden.
 - Dele viden opnået via de gennemførte pilottests.
 - Sætte fokus på diverse faldgruber i anvendelsen.
 - Udarbejde et dokument med anbefalinger (en vejledning) for brugen af tTEM i forureningsager, samt for hvornår brugen af tTEM giver mening.

5. Introduktion til tTEM og nuværende praksis for anvendelse

5.1 tTEM-systemet, kortfattet teknisk beskrivelse

tTEM-systemet er designet til detaljeret 3D-geofysisk og geologisk kortlægning af den overfladenære undergrund. Undersøgelsesdybden afhænger af tTEM systemets tekniske opsætning men er især meget afhængig af undergrundens elektriske modstandsforhold og kan variere mellem 50 og op til 120 meter.

Den detaljerede 3D-dækning opnås ved dataopsamling langs kørelinjer med en indbyrdes afstand på 10-25 m. Dette resulterer i en tæt lateral datadækning, der giver mulighed for at konstruere detaljerede geologiske modeller. tTEM-metoden har en høj produktivitet, og der kan indsamles data omfattende 100 til 140 ha/dag. Produktionen afhænger af de valgte parametre ved dataindsamlingen (primært kørehastighed og linjeafstand) men også i særlig grad af kortlægningsområdets tilgængelighed. Mindre markarealer adskilt af diger eller levende hegn, områder med blød bund samt områder med buskads eller skov nedsætter dagsproduktionen.

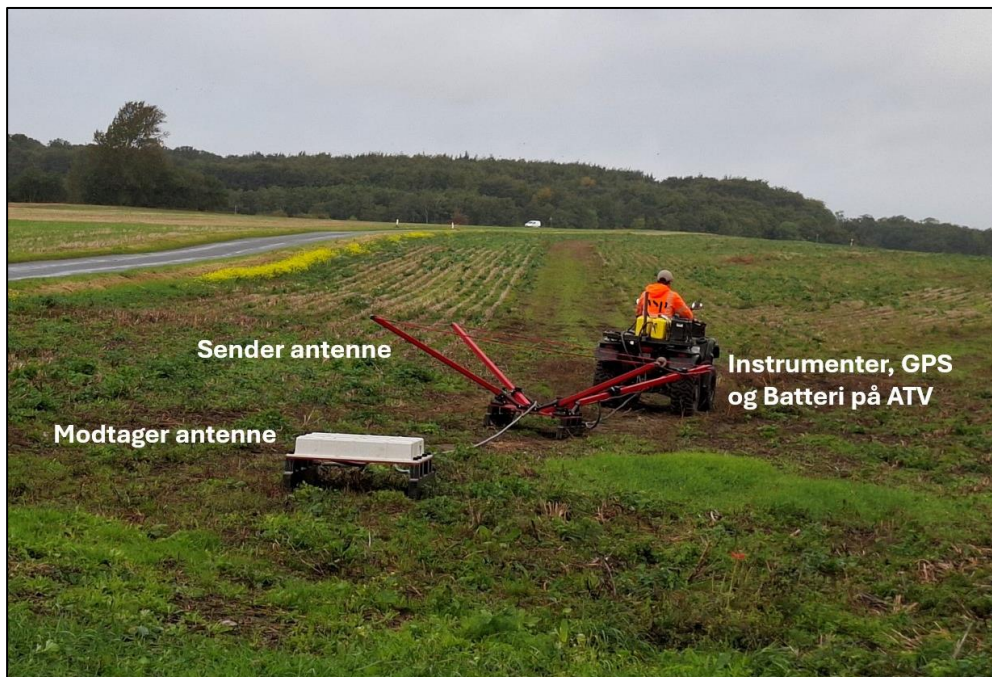
tTEM systemet er et elektromagnetisk instrument, der kortlægger variationer af den elektriske modstand i undergrunden. Variationen af elektrisk modstand med dybden indeholder geologisk og hydrogeologisk information, fordi forskellige typer af aflejringer kendetegnes ved forskellige elektriske modstande, ligesom porevæskens ion-indhold også påvirker den elektriske modstand i det pågældende lag.

Målingerne sker ved induktion af hvirvelstrømme i undergrunden, og systemet behøver således ikke direkte kontakt med jorden. Dette indebærer dels, at metoden kan måle over alle typer overflader og dels, at målingerne kan foretages med en kørehastighed på op til 15 km/t.

Systemet består overordnet af 3 hoveddele:

- Instrumenter inkl. GPS og batterier,
- En sender-spole (senderantenne)
- En modtager-spole (modtagerantenne).

Dataindsamlingen foretages kontinuert, mens systemet trækkes hen over jorden. På land trækkes systemet af en ATV (firehjuls motorcykel, 'All Terrain Vehicle'), men metoden kan også anvendes på vand, trukket af en båd, eller på sne, trukket af en snescooter.



Figur 1: Dataindsamling med tTEM metoden. (Foto: WSP Danmark)

tTEM systemet findes i forskellige konfigurationer, som primært adskiller sig ved ændringer af sender-antennens areal og antal vindinger. Herudover findes der muligheder for at ændre på selve målemetodikken, men dette bør kun ske i nært samarbejde med udstyrsleverandøren.

Under selve dataindsamlingen vil den anvendte kørehastighed og linjetæthed have signifikant påvirkning på metodens evne til at opløse undergrundens strukturer. Ved den efterfølgende processering af data foretages tilpasning af indstillinger for datafiltreringer og midling samt valg af, hvor mange af de målte data, der anvendes ved den efterfølgende tolkning. Valg af disse parametre vil også påvirke resultatet af kortlægningen, men disse valg kan ændres under kvalitetssikringen eller ved en efterfølgende re-processering af data. Valg foretaget under selve dataindsamlingen kan ikke ændres uden at indsamle data igen!

Endelig foretages der en række valg, når resultaterne skal præsenteres. Ofte præsenteres de modellerede modstandsværdier på fladekort, der enten referer til dybde eller kote. Da modstandene er tilknyttet sonderinger (punkter) langs målelinjerne, visualiseres værdierne ofte ved interpolation/konturering imellem sonderingerne.

tTEM metoden har et potentiale til at levere data af høj kvalitet og detaljeringsgrad. For at få det fulde udbytte, er det imidlertid vigtigt, at ovenfor beskrevne valg af parametre både under dataindsamling, processering og tolkning overvejes nøje. Netop tTEM metodens høje potenti-ale kombineret med risikoen for uhensigtsmæssige valg i forbindelse med metodens anvendelse har været en væsentlig motivation for dette TUP-projekt.

TEM-metoden er generelt følsom overfor elektriske installationer og kabler samt større metal-konstruktioner. Dette gælder også tTEM-systemet. Årsagen er dels, at signaler fra de elektriske installationer også registreres i modtagerantennen og dels, at der foruden hvirvelstrøm-mene i undergrunden også dannes elektriske strømme i større metallegemer. Målinger, der er påvirket af disse effekter, kan ikke korrigeres og skal fjernes fra data, og hvis det ikke sker, kan det føre til fejlagtige og misvisende tolkninger.

Derfor er tTEM ofte ikke anvendelig tæt på bynær bebyggelse, infrastruktur, el-ledninger, kabler m.m. Der kan ikke måles data tættere på sådanne installationer end ca. 30-50 m, hvilket er en begrænsning ved mange forureningssager, som ofte befinder sig i byområder.

I Region Midtjylland er det ved hjælp af GIS-analyse (i forbindelse med TOPSOIL-projektet) estimeret, at der vil kunne kortlægges med tTEM i ca. 50 % af alle videregående undersøgelser.

5.2 Anvendelse af tTEM ved punktkildeforureninger

De indsamlede data udgøres af stakkede sonderinger, som efter dataprocessering og inversion hver især beskriver jordens elektriske resistivitet i lagdelte modeller. Modellerne kan interpoleres til en rumlig resistivitetsmodel, men resistivitetsdata kan ikke umiddelbart omsættes til geologi. Hertil kræves en geologisk fortolkning af data, og for at få det fulde udbytte af en sådan, kræves erfaring med metoden og indsigt i både geofysiske og geologiske/hydrogeologiske forhold.

Ved den geologiske fortolkning af data omsættes resistivitetsdata til geologiske strukturer, lagdeling og lithologi. Dette gøres bl.a. via en forståelse af stratigrafiske forhold, dannelsesmiljøer og -processer. For at opnå optimalt udbytte bør arbejdet med data foregå i et tæt samarbejde mellem geofysiker, geolog og sagsbehandler. Netop dette er et af projektets hovedformål at belyse – se resultaterne senere i rapporten.

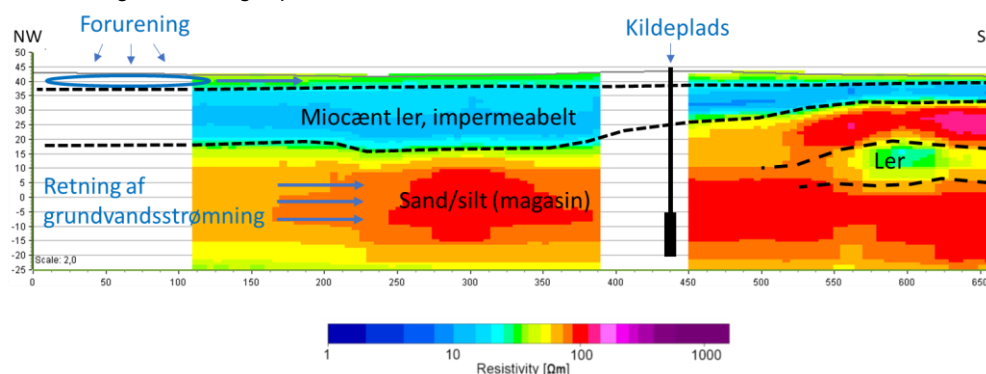
6. Eksisterende erfaring med tTEM i regionerne

6.1 Eksisterende erfaring inden projektopstart

Inden projektets opstart var tTEM-metoden i Region Midtjylland allerede blevet testet og benyttet i 11 områder i forbindelse med forureningsundersøgelser. Disse kortlægninger har omfattet forureninger fra fyld- og lossepladser, landbrug og maskinstationer og andre virksomheder. Fælles for de undersøgte lokaliteter har været, at de hovedsageligt har ligget helt eller delvist i det åbne land, og der har været tale om grundvandsbårne forureninger. De forurenende stoffer har primært været klorerede opløsningsmidler, pesticider og PFAS. I alle sager har tTEM-kortlægningerne givet et vigtigt input til sagsbehandlingen og de videre undersøgelsesaktiviteter og har resulteret i mere velfunderede og sikre risikovurderinger.

I flere tilfælde har tTEM-kortlægningerne desuden medført, at sagerne enten har kunnet afsluttes uden videre tiltag eller, at det har været nødvendigt med en mere målrettet resterende indsats.

Nedenfor ses et eksempel på en tidligere gennemført tTEM-kortlægning ved Vildbjerg i Midtjylland (**Figur 2**). tTEM-data viste et tykt lag af Miocænt ler, der var udbredt i hele undersøgelsesområdet. En pesticidforurening fra en maskinstation frygtedes at true en nedstrøms beliggende kildeplads, men tTEM-kortlægningen viste, at lerlagets konsistente tilstedeværelse i hele området beskyttede det primære grundvandsmagasin. Erkendelsen af dette lerlag havde stor betydning for risikovurderingen og bevirkede, at der kunne spares yderligere tiltag i form af undersøgelsesboringer på lokaliteten.



Figur 2: Eksempel på resultat fra en tTEM-kortlægning ved Vildbjerg. Et lerlag viste god beskyttelse af det primære magasin, og en pesticidforurening (til venstre på profilet) vurderedes på denne baggrund ikke at true vandindvindingen herfra (Jørgensen 2022).

6.2 Erfaringsopsamling i regionerne

I forbindelse med opstart af projektet blev det opgjort, hvor mange tTEM-kortlægninger, der var udført i de enkelte regioner. Metoden benyttes også i forbindelse med regionernes råstofkortlægning. Det blev desuden også opgjort, hvor mange af disse, der var udført i forbindelse med jord- og grundvandsforening fra punktkilder (se TABEL 1).

TABEL 1. Antal tTEM-kortlægninger i regionerne

Region	Antal tTEM-kortlægninger	Antal ifm. jordforurening
Region Nordjylland	7	0
Region Midtjylland	43	11
Region Syddanmark	19	4
Region Sjælland	17	4
Region Hovedstaden	2	1

Erfaringerne ved Region Midtjylland er beskrevet i det forrige afsnit. Tilbage meldingen fra de øvrige deltagende regioner var positive i forhold til anvendelse af tTEM, men også at erfaringerne byggede på meget få projekter. Kendskabet var desuden fordelt på et begrænset antal medarbejdere ved regionerne, og derfor var metoden ikke et redskab, som umiddelbart blev efterspurgt.

7. Gennemførte testkortlægninger

Der er i projektet gennemført i alt 8 testkortlægninger. Disse kortlægninger er fordelt på de 4 deltagende regioner på en måde så forskellige problemstillinger, geologityper og forurenings typer er repræsenteret (Figur 3).

Testlokaliteterne blev udvalgt blandt lokaliteter, der var under opstart, eller hvor en region allerede var i gang med at udføre ordinære forureningsundersøgelser. Således kunne den enkelte regions behov ift. myndighedsrollen tillige adresseres som en del af projektet. En enkelt af lokaliteterne har dog alene haft det formål at undersøge feltlogistiske forhold såsom kørehastighed, afstand mellem kørelinjer, køreretning m.m.

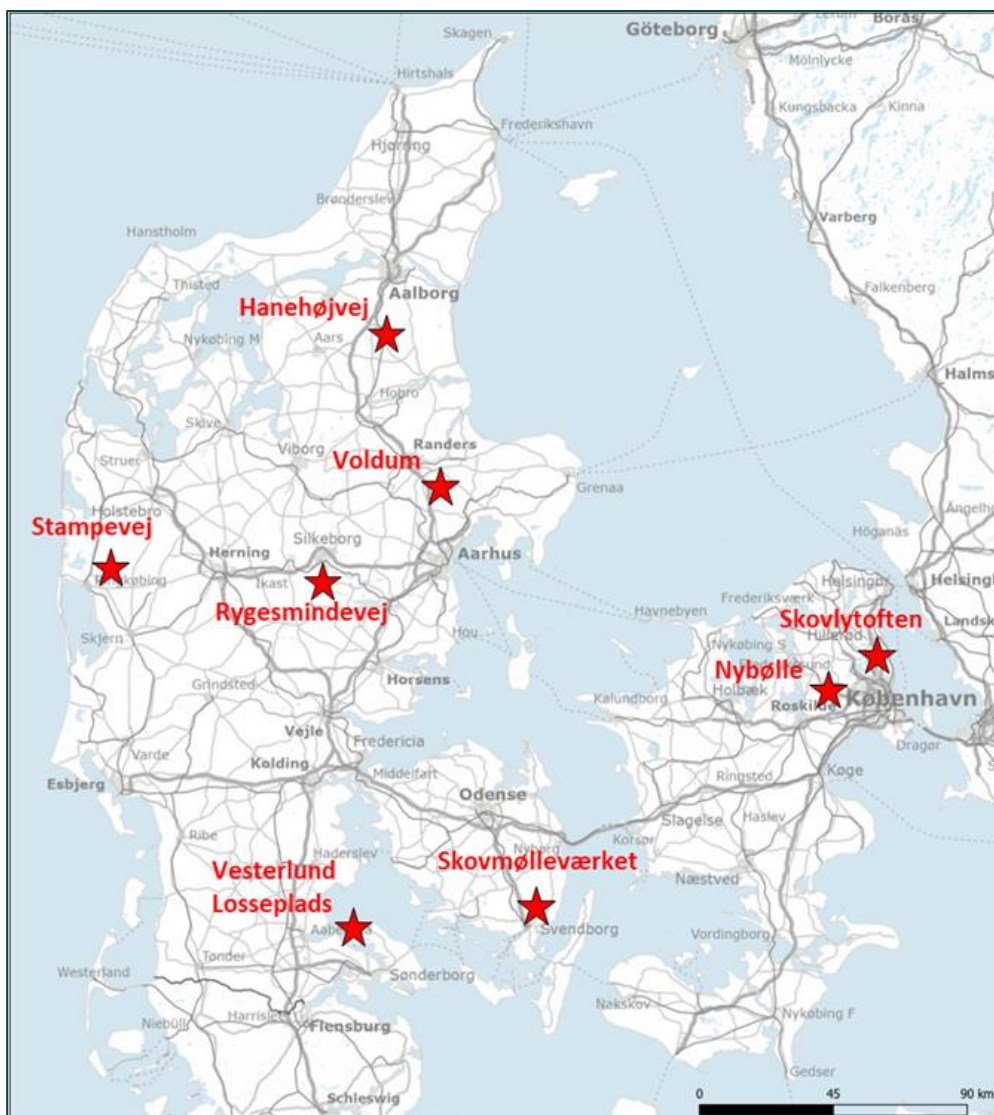
Efter indsamling er data blevet processeret, hvor støj og koblede data er blevet fjernet. Herefter er data blevet geofysisk tolket/inverteret til resistivitetsmodeller.

Resistivitetsmodellerne er efterfølgende blevet geologisk/hydrogeologisk tolket, hvormed geofysikken er blevet omsat til viden, der kan bruges i forbindelse med forureningsundersøgelserne.

På denne baggrund er potentielle spredningsveje for forureningskomponenter og grundvandsbeskyttende geologiske lag blevet karakteriseret, og i sidste ende er risikovurderinger blevet gennemført. Yderligere feltundersøgelser som f.eks. boringsplaceringer (filtersætning, dybde mm.) eller andre tiltag er efterfølgende blevet planlagt og gennemført i de konkrete sager. Flere af sagerne er således blevet gennemført i en iterativ proces med feedback loops, hvor estimater fra tolkningen af tTEM-data har dannet grundlag for nye boringsplaceringer, og hvor resultaterne fra disse nye boringer efterfølgende har kunnet forbedre og optimere tolkningen af tTEM.

Arbejdet beskrevet ovenfor spænder over flere forskellige fagdiscipliner og er derfor gennemført i et samarbejde mellem repræsentanter fra disse (geofysiker, geolog, hydrogeolog, ingeniør, sagsbehandler). Samarbejdet er primært foregået i workshops og møder med fysisk tilstedeværelse. Disse workshops har også sikret videnoverførsel mellem de forskellige fagdiscipliner.

Der er ved hver af testlokaliteterne gennemført en analyse af, hvilken betydning tTEM-kortlægningen har haft for forureningsundersøgelsen/sagen. Dette både i form af simple cost-benefit-analyser, men også i forhold til eventuelle kvalitative forbedringer af de resulterende risikovurderinger og som beslutningsgrundlag for eventuelle afværgeforanstaltninger.



Figur 3: Udvalgte lokaliteter til test kortlægning.

7.1 Hanehøjvej, Skørping, Region Nordjylland

Annette Dohm, Regional Udvikling Jord og Vand, Region Nordjylland

Baggrund og problemstilling

Denne lokalitet omfatter to tidligere lossepladser, der i perioden før 1968 blev etableret som grusgrave. Fra ca. 1968 til ca. 1972 har grusgravene været anvendt som lossepladser. Lokaliteten er beliggende mellem to indvindingsoplande til almen vandforsyning. Vandværkernes kildepladser ligger henholdsvis ca. 300 meter og ca. 1.150 meter fra lokaliteten.

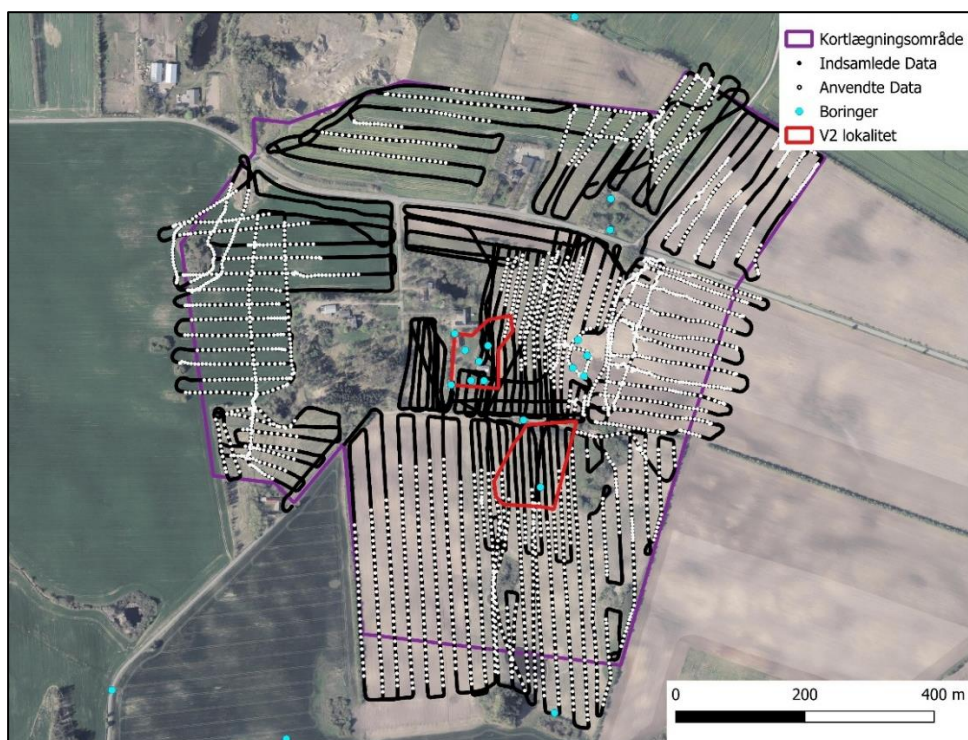
Lokaliteten er kortlagt direkte på vidensniveau 2. I forbindelse med en videregående undersøgelse opstartet i 2020, blev der bl.a. udført 13 boringer, den dybeste til 20 m.u.t. Der blev ikke fundet grundvand. Porevandsprøver vurderedes ikke at være egnede på denne lokalitet, så endnu dybere boringer blev overvejet.

Der er i øvrigt ikke mange dybe boringer i området, men vandværksboringer ca. 300 og ca. 400 meter fra lokaliteten viser henholdsvis et 15 og 20 meter tykt lerlag. En gammalogning i en af disse boringer viser dog et tyndere lerlag.

I forhold til risikovurderingen er det væsentligt at vide, om der er et beskyttende lerlag under lossepladserne eller ej.

tTEM kortlægning

Der blev udlagt et areal på 65 ha. til tTEM-kortlægning, men en del af arealet kunne ikke køres på grund af de fysiske forhold (bygninger, bevoksning, terrænhældning, transformestation mv.). Desværre var data over selve lossepladserne ikke brugbare.



Figur 4: Gennemført tTEM-kortlægning. Indsamlede data er vist med sort markering, mens anvendelige data er vist med hvide prikker.

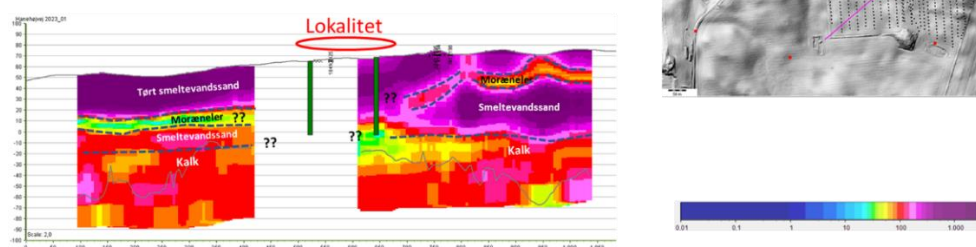
I en indledende geologiske tolkning af tTEM data, vurderedes det, at der var et lerlag, men i området for ønsket placering af dybere boringer ved lossepladserne, var det ikke vurderet til nødvendigvis at være sammenhængende (**Figur 5**). Der blev derfor udført en række

videregående analyser af tTEM-data, som viste, at der med stor sandsynlighed ikke fandtes et sammenhængende lerlag under lossepladserne.

Hanehøjvej

Geologisk tolkning

- Lerlaget forstyrret øst for lokaliteten
- Forsvinder under lokaliteten



Figur 5: Tværsnit vest-øst. Geologiske tolkninger angivet med tekst.

Sagens forløb

Sagen var allerede i gang og de første borer var udført, da tTEM-kortlægningen blev iværksat. Efter indsamlingen af tTEM blev data processeret og inverteret af geofysikerne hos WSP. I samarbejde med geolog blev de resulterende resistivetsdata oversat til geologisk forståelse. Der blev holdt et indledende møde mellem WSP, geolog og sagsbehandler for at få skabt en fælles forståelse for tolkningen, herunder betydningen af det manglende lerlag.

Der blev planlagt to dybe borer lidt udenfor afgrænsningerne af lossepladserne, en i hver retning af de to berørte kildepladser.

Der blev påvist et ca. 6 m tykt lerlag i den vestligste boring og intet lerlag i den østligste boring, hvilket stemmer godt overens med tTEM-data. Fra borerne er der udtaget vandprøver af det primære magasin. Der er kun påvist svage indhold af få pesticider under drikkevandskriterierne. Borerne bibeholdes et par år, hvorfra der udtages vandprøver årligt.

tTEM-undersøgelsernes betydning for sagen

tTEM-data har givet en god konceptuel forståelse af de geologiske forhold omkring lokaliteten og givet en bedre mulighed for den videre planlægning af de sidste borer.

Det vurderes, at hvis tTEM-kortlægningen var blevet udført på et tidligere tidspunkt, kunne sagsforløbet have været forkortet betydeligt. Det havde desuden haft den betydning, at flere af de udførte borer ikke var blevet udført. De havde været overflødige og ville ikke have tilført relevant viden.

Cost-benefit overvejelser

Som nævnt var flere af de første udførte borer ikke blevet gennemført, hvis der var blevet tTEM-kortlagt på et tidligere tidspunkt i sagsforløbet. Og ved en hurtigere gennemførelse af sagen, kunne der sandsynligvis også være sparet rådgiver- og sagsbehandler-timer. Selve sagen, havde muligvis kostet det samme, men det havde fra begyndelsen givet et bedre undersøgelsesforløb og samlet en bedre viden.

7.2 Voldum, Region Midtjylland

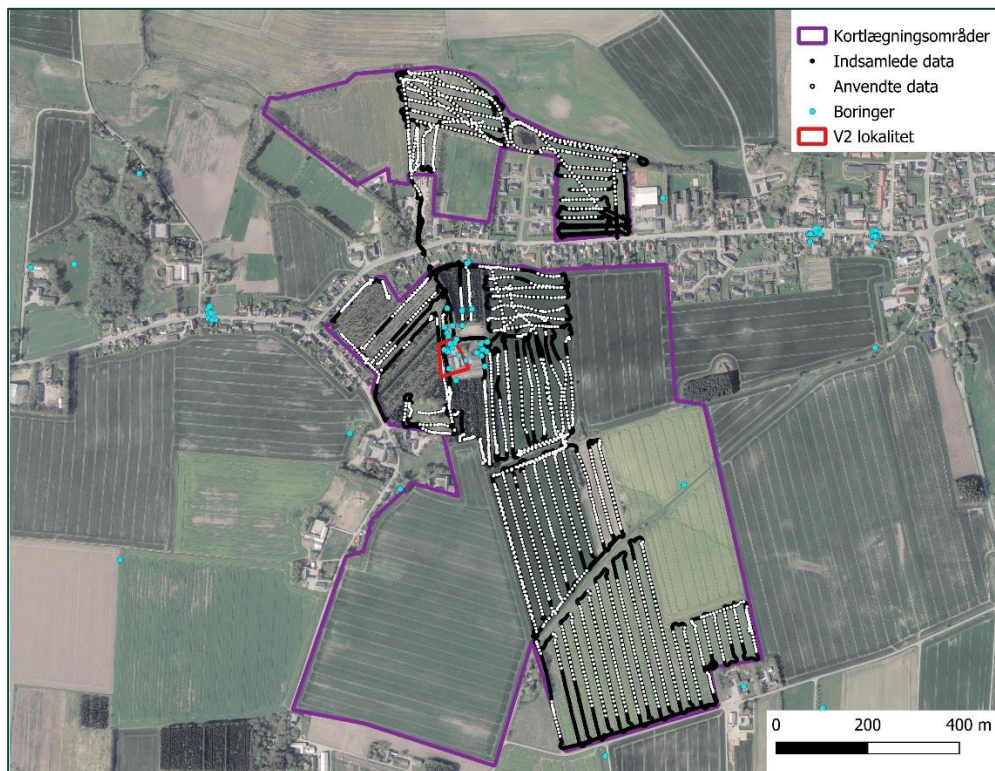
Winnie Hyldegaard, Region Midtjylland

Baggrund og problemstilling

Denne lokalitet er en tidligere maskinstation med værksted, der har været aktiv i perioden 1951 til ca. 2014. Lokaliteten er beliggende i OSD og i indvindingsopland til et vandværk med kildeplads kun ca. 180 m fra lokaliteten. Der blev i 2012 gennemført en indledende undersøgelse. Her blev der fundet pesticider i terrænnært grundvand ved en vaskeplads. Lokaliteten blev V2-kortlagt i 2017. I 2019 blev der iværksat en videregående forureningsundersøgelse med henblik på afgræsning og risikovurdering af pesticidforureningen.

I forbindelse med den videregående undersøgelse blev der udført i alt 31 filtersatte boringer, hvoraf 7 nåede en dybde til ca. 20 m.u.t. Der blev lokaliseret to punktkilder (vaskepladsen og et oplag/spild område). Der blev fundet 34 forskellige pesticider (bl.a. phenoxysyre) med koncentrationer på op til 15 µg/l (sum ca. 65 µg/l). Der blev primært fundet pesticider i terrænnært grundvand.

Boringerne på lokaliteten viste, at der mellem det terrænnære grundvand og det primære grundvandsmagasin fandtes et 12-15 m tykt palæocænt lerlag, der, hvis det forekom ubrudt og uforstyrret over store afstande, kunne yde god beskyttelse af det primære magasin.

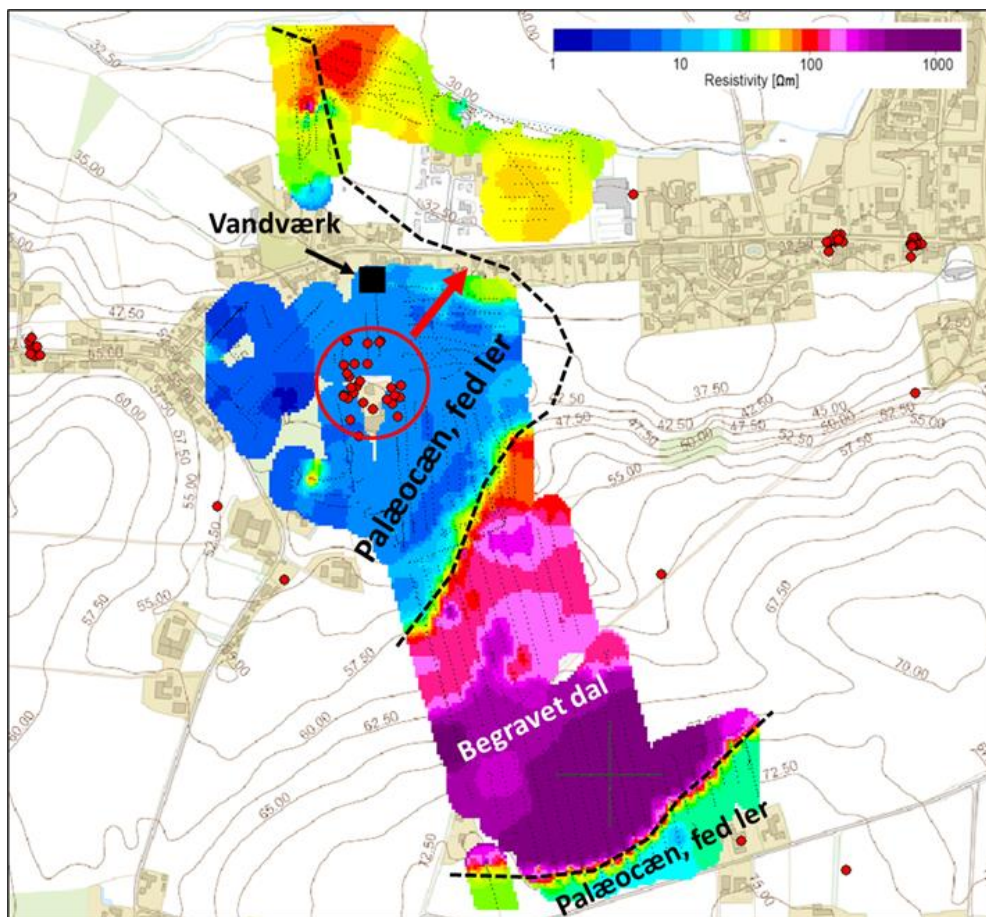


Figur 6: Gennemført tTEM-kortlægning. Planlagt areal vist med lilla polygon. Indsamlede data er vist med sort markering, mens anvendelige data er vist med hvide prikker.

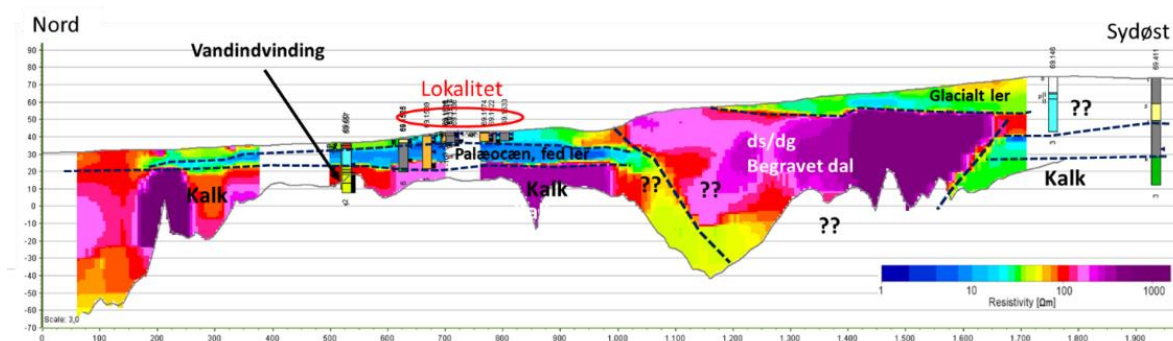
tTEM kortlægning

Der blev udlagt et areal på 90 ha. til tTEM-kortlægning, men en stor del af området blev ikke kortlagt pga. modvilje fra en landmand, der var bekymret for sine afgrøder. Området blev derfor reduceret til kun at omfatte 50 ha, og det var tvivlsomt, om det var stort nok til formålet (**Figur 6**).

Selvom tTEM-kortlægningen var begrænset, kunne den give et vigtigt overblik over det tertiære lerlags udbredelse (se **Figur 7** og **Figur 8**). Lerlaget var lateralt afgrænset af erosion fra en begravet dal mod syd, og mod nord tyndede det gradvist ud og forsvandt. Hældningen af lerlagets overflade og pejldata indikerede en strømningsretning væk fra lokaliteten mod nord-øst og altså ikke i retning af vandværkets kildeplads. Kildepladsen fandtes desuden indenfor lerlagets udbredelse og var således lokalt beskyttet af lerlaget.



Figur 7: Målte resistiviteter i kote +30 m. Geologiske tolkninger angivet med tekst. Afgrænsning af det palæocæne lers udbredelse er angivet med stiplet linje. Strømningsretning væk fra lokaliteten er vist med rød pil.



Figur 8: Profil gennem det kortlagte område fra nord til sydøst gennem vandværkets kildeplads og lokaliteten. Geologiske tolkninger er påført med tekst og stiplede linjer.

Sagens forløb

Sagen var allerede fremskreden, da tTEM-kortlægningen blev iværksat. Sagen havde kørt gennem nogle år, og der var blevet udført et stort antal boringer – også til relativt stor dybde.

Efter indsamlingen af tTEM blev data processeret og inverteret af geofysikerne hos WSP, og de resulterende resistivitetsdata blev oversat til geologisk forståelse. Der blev holdt et indledende møde mellem sagsbehandler, rådgiver og geolog for at målrette arbejdet og få skabt en fælles forståelse for problemstillinger og muligheder. Efter tolkningen af data blev der afholdt en workshop, hvor både data og tolkningerne blev præsenteret. Der enedes om en samlet konceptuel forståelse af sagen på lokaliteten, og der blev skabt klarhed over videre tiltag samt enighed om en foreløbig risikovurdering.

Det udbredte lerlag over det primære grundvandsmagasin vurderes at yde god beskyttelse, og den foreløbige risikovurdering lyder på, at der formentlig ingen risiko er for indvindingen og for OSD.

Den manglende laterale afgrænsning mod nordøst resulterede i, at der blev udført yderligere 4 boringer. Der blev desuden taget yderligere vandanalyser, som viste svingende og til tider meget høje koncentrationer. De meget høje koncentrationer i det østlige kildeområde og en stadig ukendt afgrænsning har efterladt en lille usikkerhed, da det ikke helt kan udelukkes, at forureningen på sigt kan spredes udover kanten mod nordøst til det primære magasin.

tTEM-undersøgelsernes betydning for sagen

tTEM-data har givet en god konceptuel forståelse af de geologiske og hydrogeologiske forhold på og omkring lokaliteten. tTEM har også givet en god forståelse af forureningens mulige spredningsveje. Lerlagets laterale konsistens, udstrækning og overfladeforhold var helt afgørende at få kortlagt, for at der kunne formuleres en robust, foreløbig risikovurdering.

Det vurderes, at hvis tTEM-kortlægningens var blevet udført på et tidligere tidspunkt, kunne sagsforløbet have været forkortet betydeligt. Det havde desuden haft den betydning, at de 7 dybe boringer ikke var blevet udført. De havde været overflødige og ville ikke have tilført relevant viden. Derudover vurderes det, at nogle af de øvrige boringer ville være blevet placeret i mere optimale positioner (nedstrøms mod nordøst i stedet for i retning mod vandværket mod nord).

Hvis der slet ikke var blevet kortlagt med tTEM, var der sandsynligvis blevet udført flere afgrænsende boringer, og det kan ikke udelukkes, at sagen var endt som en afværgesag.

Cost-benefit overvejelser

Som nævnt var de 7 dybe boringer ikke blevet gennemført, hvis der var blevet tTEM-kortlagt på et tidligere tidspunkt i sagsforløbet. Omkostningerne til disse boringer beløb sig til ca. 310.000 kr. Dertil kommer andre omkostninger, der kunne være blevet sparet. Til sammenligning koster en tTEM-kortlægning af det udførte omfang 60.000-75.000 kr.

Der er ikke regnet på, hvor store omkostningerne potentielt ville have været, hvis der slet ikke var blevet gennemført tTEM på lokaliteten.

7.3 Stampevej, Ringkøbing, Region Midtjylland

Lotte Banke, Region Midtjylland

Baggrund og problemstilling

Denne lokalitet er en tidligere fyldplads med aktivitet fra 1980 til 2002. Lokaliteten ligger i OSD og i indvindingsopland til Lybæk Vandværk. Nærmeste målsatte overfladevandsrecipient er en å ca. 400 m syd for lokaliteten. Desuden findes §3-beskyttede vandløb og søer i umiddelbar nærhed af lokaliteten.

Området er beliggende på Skovbjerg Bakkeø dannet under den næstsidste istid af flere gletsjere fra forskellige retninger. Geologien består af både moræne- og smeltevandsaflejringer ovenpå miocæne lag af sand og ler.

Der blev i 2020/21 gennemført en indledende undersøgelse, hvor der blev fundet overskridelser i jordprøver med oliestoffer. I vandprøver udtaget fra et sekundært magasin i 6-14 dybde blev der fundet flere stoffer over kvalitetskriteriet, herunder især toluen, phenoler, PFAS samt pesticider. I 2023 blev der iværksat en videregående forureningsundersøgelse med henblik på afgræsning og risikovurdering af de fundne stoffer.

I forbindelse med denne blev der i alt etableret 4 nye undersøgelsesboringer ved lokaliteten som supplement til de eksisterende boringer udført ved den indledende undersøgelse. I boringerne er der under fyldlaget truffet sand til boringernes bund.

Der er fundet flere forskellige pesticider med værdier over kvalitetskriteriet på 0,1 µg/l. Med undtagelse af den dybeste boring (DGU nr. 83.2607, filtersat 32-34 m.u.t.) centralt på pladsen er der fundet PFAS-forbindelser i alle boringer. Indholdet af Σ4 PFAS er alle steder over kvalitetskriteriet på 2 ng/l, og i en enkelt boring er kvalitetskriteriet for Σ22 PFAS overskredet med en faktor 1,5.

I den dybe boring er der kun fundet pesticider i koncentrationer under kvalitetskriteriet. Dette indikerer at pesticiderne enten nedbrydes, inden de når ned til filtret, eller at det faktisk kun er en begrænset vandmængde, der siver gennem fyldpladsen og når ned i den dybde, i hvilken boringen er filtersat. Hovedparten af det forurenede vand strømmer derfor muligvis af højere oppe i lagserien mod vandløbene og nærmeste sø. Der er da også gjort fund af PFOS i to vandprøver i søen.

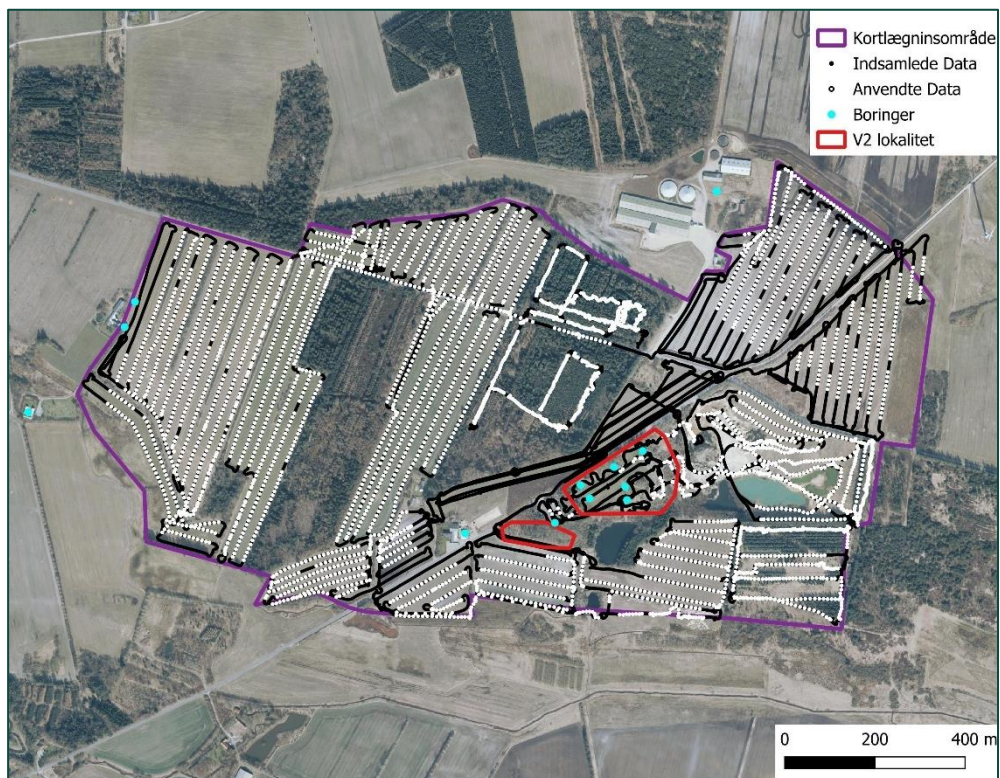
I forbindelse med den nationale grundvandskortlægning er området tidligere blevet kortlagt med SkyTEM og andre geofysiske metoder. Disse kortlægninger viser, at lokaliteten findes på et plateau af miocæn geologi og relativt tæt på flere gennemskærende begravede dale. Lyby Vandværk indvinder fra en af disse begravede dale og ifølge de resulterende geologiske og hydrologiske modeller fra grundvandskortlægningen, er der store områder med fravær af beskyttende lerlag over det primære grundvandsmagasin mellem lokaliteten og vandværket (se Figur 11). Tilstedeværelsen og konsistensen af beskyttende lerlag over magasinet i retning mod Lybæk Vandværk er forhold, der har væsentlig betydning for den endelige risikovurdering.

tTEM kortlægning

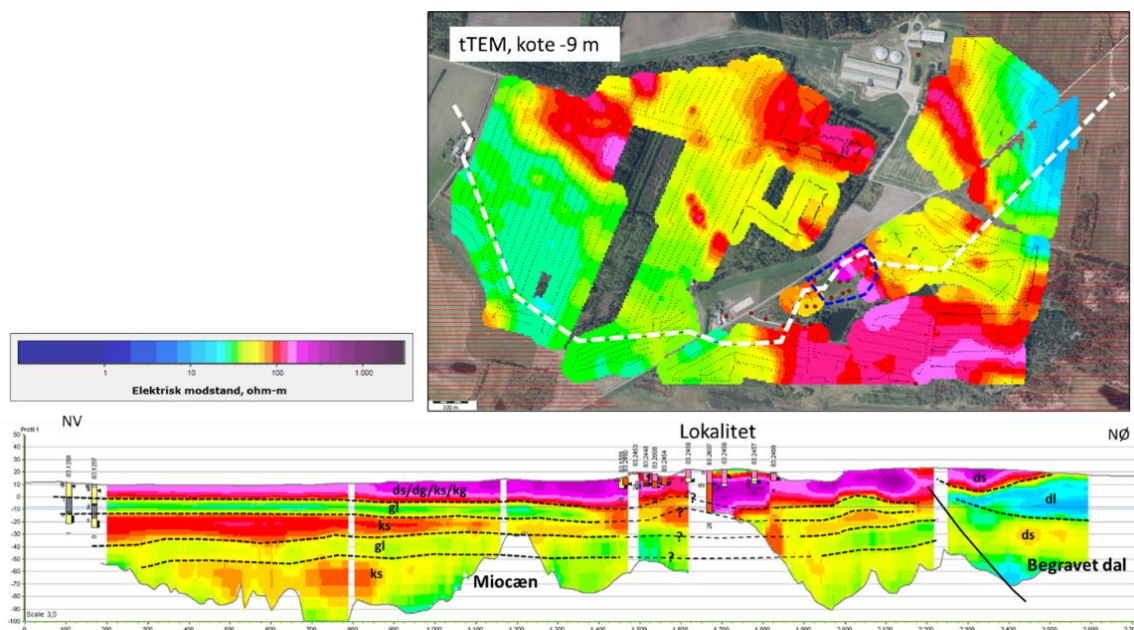
For at opnå et bedre grundlag til risikovurdering overfor grundvandsressourcen og Lyby Vandværk, blev der inden den videregående undersøgelse udført en tTEM-kortlægning i området. Kortlægningsområdet har et omfang på 140 ha. Dataindsamlingen er gennemført på en dag, og der er kørt med gennemsnitlig linjeafstand på ca. 25 m (**Figur 9**). Relativt store dele af

området var ikke tilgængeligt eller svært tilgængeligt på grund af bevoksning. Således også området umiddelbart nord og nordvest på lokaliteten.

Kortlægningen viser, at der i området forekommer to udbredte lag af miocænt glimmerler, hvoraf det øverste lerlag findes omkring 10-25 m under terræn. Dette lerlag ses tydeligt, især i det kortlagte område vest for lokaliteten, men under selve lokaliteten og sydøst herfor bliver laget diffust og forsvinder flere steder (**Figur 10**). De to lerlag adskiller det terrænnære grundvand fra det primære magasin og udgør derfor en vigtig beskyttelse af områdets grundvandsressource. Det øverste af de to lag kan ikke umiddelbart ses i data under lokaliteten, og fraværet er bekræftet af en den dybeste undersøgelsesboring til 34 m, hvor der kun er fundet smeltevandssand i boringen. Det nederste forekommer dog at være mere konsistent i sin udbredelse.



Figur 9: Gennemført tTEM-kortlægning. Sorte streger viser kørt linjer, og anvendelige data er vist med hvide prikker.



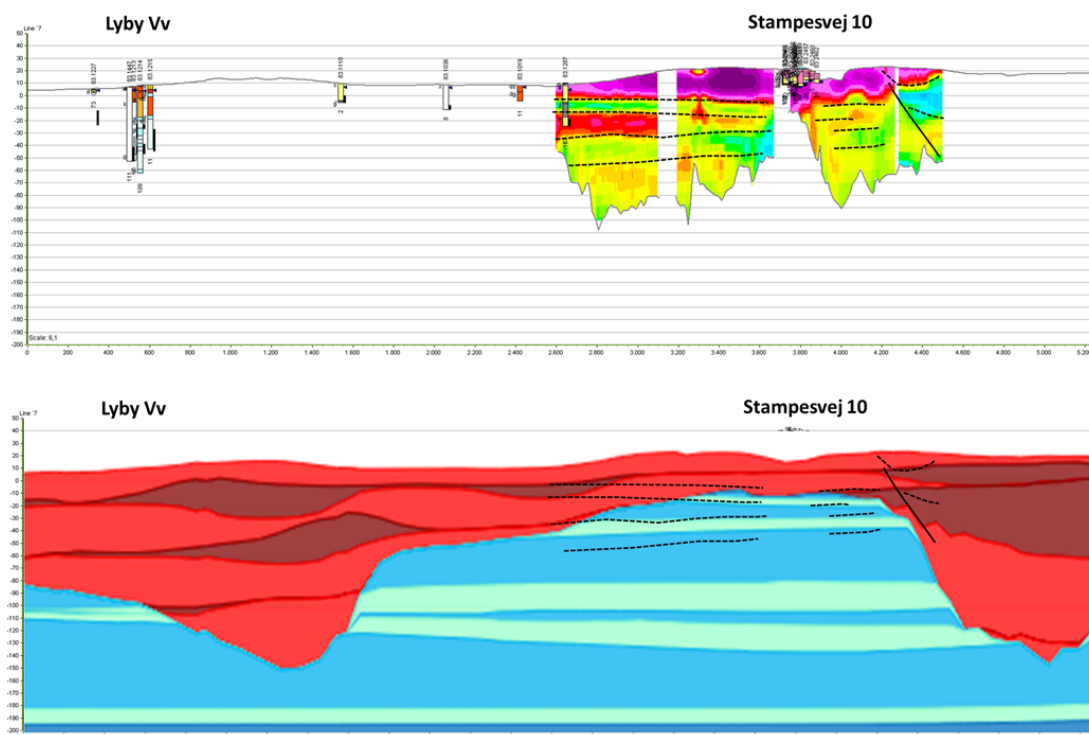
Figur 10: Målte resistiviteter med tTEM i kote -9 m og profil gennem området. Geologiske tolkninger af lag er angivet med tekst på profilet. Profilets beliggenhed er vist på kortet med hvid stiplede linje. Lokaliteten er vist med blå stiplede polygon. En tynd sort streg angiver kote -9 m på profilet. Den dybe boring (83.2607) ses ved profilkoordinat 1650 m.

Sagens forløb

Efter indsamlingen af tTEM-data blev data processeret og inverteret af geofysikere hos WSP. I samarbejde med geologer fra regionen blev de resulterende resistivitetsdata oversat til geologisk forståelse. Der blev holdt et indledende møde mellem sagsbehandler, rådgiver og geologer for at målrette arbejdet og få skabt en fælles forståelse for problemstillinger og muligheder. En samlet konceptuel forståelse af geologien på lokaliteten blev udarbejdet, og ud fra denne kunne de borer, der kunne belyse forureningsbilledet på fyldpladsen, placeres.

Som omtalt ovenfor var udbredelsen af de miocæne lerlag under lokaliteten et centralt spørgsmål. Det blev på det indledende møde derfor besluttet, at der skulle gennemføres en iteration, hvor de geofysiske data skulle undergå en analyse for, om det øverste lerlag under fyldpladsen kunne eksistere, dvs. om data kunne tillade dennes eksistens. Resultatet viste, at et lerlag på stedet, og i den givne dybde, højst kan være ca. 1 m tykt. Alternativt kunne laget være mere siltholdigt og have lavere lerindhold lokalt under fyldpladsen. Resultatet falder i tråd med den dybe boring, der viser forekomst af sand i den givne dybde.

På denne måde blev det vurderet, at lerdæklaget under pladsen sandsynligvis ikke er til stede, og at der derfor kan være hydraulisk kontakt til det underliggende sandmagasin, der herefter yderligere kan have kontakt til områdets primære magasin. Grundet de lave koncentrationer af miljøfremmende stoffer og teoretiske estimater blev det dog vurderet, at der kun lokalt er risiko for ressourcen, og det samlede billede viste, at der ikke er risiko for vandforsyningen. Der kan imidlertid være risiko for overfladevand.



Figur 11: Profil fra Lyby Vandværks kildeplads i vest gennem lokaliteten Stampesvej 10 i øst. Øverst er vist tTEM og nederst FOHM-modellen. Tolkninger på tTEM-profilet er overført til FOHM-profilet til sammenligning. Skala for elektrisk modstand/resistivitet er vist i Figur 10. Kvartære lag i FOHM-modellen er vist med brune og røde farver (rød er sand, brun er ler). Miocæne lag er vist med blålige farver (lys blå er sand, mørkere blå er ler).

tTEM-undersøgelsernes betydning for sagen

tTEM-data har givet en god konceptuel forståelse af de geologiske og hydrogeologiske forhold på og omkring lokaliteten. tTEM har også givet en god forståelse af forureningens mulige spredningsveje, dog med den udfordring, at det under fyldpladsen ikke har været muligt fuldt ud at tolke lagene og dermed give det fulde strømningsbillede her.

Da tTEM-kortlægningen blev udført allerede før den videregående undersøgelse, har det været muligt at spare nogle dybe borer. Det var kun nødvendigt at udføre en enkelt dyb boring, og den blev placeret midt på lokaliteten på stedet, hvor tTEM ikke entydigt kunne klarlægge spørgsmålet om eksistensen af det beskyttende lerlag.

Uden tTEM havde det ikke været muligt at verificere om de modeller, der var tilgængelige for området, var korrekte. Boringerne, der blev udført i forbindelse med den indledende og den videregående undersøgelse, var kun få og ikke dybe nok til at informere om de geologiske forhold. tTEM kunne derimod give et detaljeret indblik i disse, og det viste sig, at de eksisterende modeller var for grove/ukorrekte til vurdering af geologien og strømningsbilledet i området. tTEM-kortlægningen har givet en væsentlig forbedret risikovurdering og dette uden at udføre mere end en enkelt supplerende dyb boring.

Et andet vigtigt perspektiv er tidsforbruget på sagen. Med tTEM-kortlægningen vurderes sagsperioden at være blevet forkortet betydeligt. Med en god forståelse for områdets geologiske forhold fra starten af den videregående undersøgelse, har det været muligt at spare mindst én fase i undersøgelsen – måske flere.

Cost-benefit overvejelser

Det vurderes, at der i en situation uden tTEM-kortlægning før den videregående undersøgelse ville have været gennemført mindst fire dybe borer mere i og omkring lokaliteten. Fire borer til 30-35 m u.t. inkl. prøvetagning m.m. kan i omkostning estimeres til ca. 300.000 kr. Selv om borerne var blevet udført, ville forståelsen af områdets geologi stadig ikke være tilstrækkelig, og der ville muligvis have været behov for flere borer end de fire. Et alternativ til nogle af borerne for bedre belysning af lossepladsen kunne dog have været MEP-profilering. Til sammenligning har tTEM-kortlægningen alt i alt kostet ca. 67.000 kr., så der er ingen tvivl om, at den både økonomisk og kvalitetsmæssigt har været en god investering.

7.4 Rygesmindevej, Them, Region Midtjylland

Ida Dyrland Damgaard, Region Midtjylland

Baggrund og problemstilling

På Rygesmindevej i Them har der siden 1945 været produktionsvirksomhed, hvor der blandt andet er foregået affedtning med chlorerede opløsningsmidler. Brugen af chlorerede opløsningsmidler har forårsaget en større jordforurening på fabriksarealet (NIRAS 2024). Herfra spredtes forurening med terrænnært grundvand og grundvand der nedsiver mod dybere magasiner, hvorfra forureningen desuden spredtes til poreluften. Forureningen udgør således både en risiko overfor indvindingen i området og boliger i nærområdet.

Them vandværk har 4 indvindingsboringer i området. En af indvindingsboringerne, hvor der er fundet chlorerede opløsningsmidler (under grænseværdien for drikkevand), findes 100 meter nedstrøms det mest forurenede område. I den boring der findes længst væk (ca. 300 m mod nord), blev der dog i samme periode fundet overskridelser af grundvandskvalitetskriteriet. Ud fra den viden, der fandtes om områdets geologi, var det ikke muligt at forklare, hvorfor billedet så ud som det gjorde. For at opnå bedre geologisk forståelse og derved forhåbentlig at kunne forklare de fundne koncentrationer i den fjerneste boring, blev det besluttet at benytte geofysiske metoder.

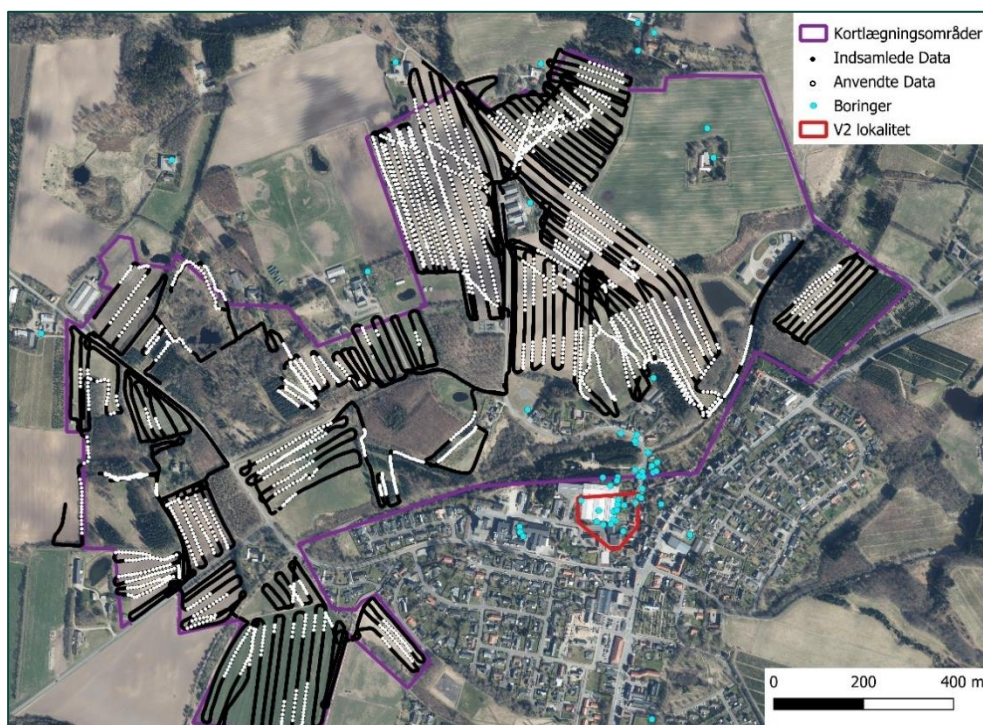
MEP blev i første omgang vurderet anvendelig, da man med den metode kan indsamle uforstyrrede geofysiske data relativt kildenært. I november 2019 blev MEP-kortlægning gennemført tæt på lokaliteten og ved den fjerneste indvindingsboring. Der blev i alt udført 1,4 km fordelt på 5 profiler. Resultaterne var af varierende kvalitet og profilinjerne var for spredt beliggende til at kunne forklare, hvorfor der fandtes højere koncentrationer i den nordlige boring end i boringerne tættere på kilden.

Der blev herefter "zoomet ud" i skala for at opnå bedre kendskab til det geologiske dannelsesmiljø for området. Her kunne man se, at området er præget af en høj kompleksitet, sandsynligvis med flere begravede dale, der skærer igennem det kuperede område. På trods af den bynære beliggenhed blev det vurderet, at der ved tTEM-kortlægning måske kunne opnås et bedre indblik i disse komplekse geologiske forhold. Vurderingen var også, at planlægningen af de videre undersøgelser på lokaliteten ville blive forbedret på baggrund af en tTEM-kortlægning.

tTEM - Dataindsamling og processering

Indsamling af tTEM-data blev gennemført i marts 2022. Det kortlagte område kan karakteriseres ved både store og små markarealer, skovområder, offentlige arealer (stier mv.) samt juletræsplantager (se *Figur 12*). Flere områder var ikke tilgængelige på grund af bebyggelse, skov, risiko for beskadigelse af afgrøder og terrænmæssige forhold.

Processeringen er foretaget i programmet Aarhus Workbench. Se yderligere beskrivelse i WSP (2022a). Ved manuel processering af data kunne det konstateres at datakvaliteten var kraftigt påvirket af et højt resistivitetsniveau i området, hvilket kom til udtryk i lave signalstyrker. For at øge signal-/støjforholdet og for at optimere indtrængningsdybden var det derfor nødvendigt at øge midlingsbredden ved import af rå-data. Dette for at få flere data med i datastakken for derved bedre at kunne undertrykke støj. Hertil var der i kortlægningsområdet et stort antal højspændingsledninger, nedgravede kabler og marker med el-hegn. På denne baggrund var det en ganske betragtelig mængde af de indsamlede data, der måtte kasseres.



Figur 12: Oversigtskort med kørt tTEM-spor og endeligt anvendte geofysiske sonderinger/modeller. Det mest forurenede område findes der, hvor borerne står tættest.

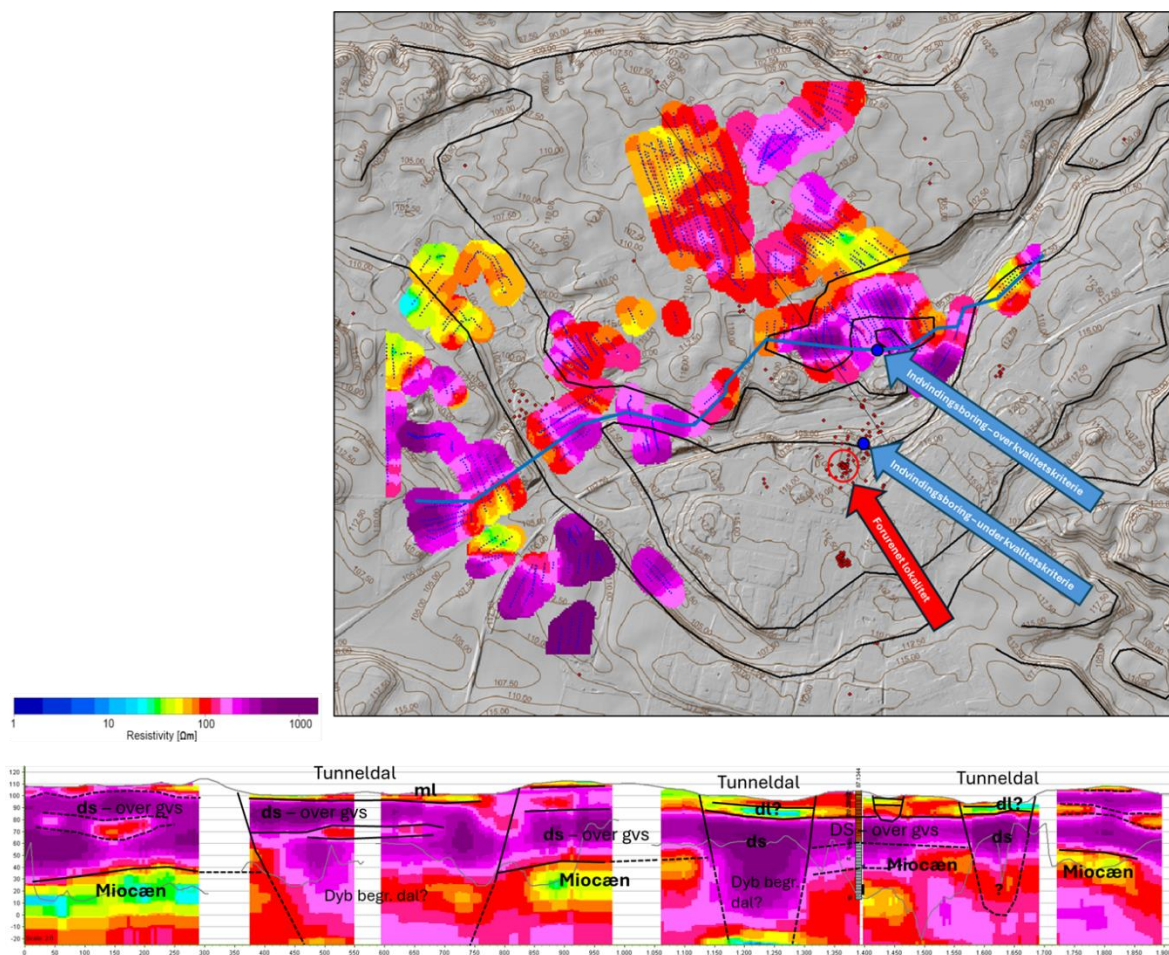
tTEM-undersøgelsernes betydning for sagen

Tolkningen af tTEM-data sammen med eksisterende borer i området bidrog til en bedre forståelse af geologien i området. Resultaterne fra tTEM kortlagde udbredelsen af de begravede dale. Dalene krydser ind gennem området og indeholder både sand og lerlag, hvilket er med til at gøre geologien kompleks (**Figur 13**). Kortlægningen har vist, at der findes begravede dale under områdets åbne tunneldale (der kan ses i landskabet). En sådan åben tunneldal skærer også ind gennem området mellem de to forurenede indvindingsboringer. Her kunne der på grund af bebyggelse ikke indsamles tTEM-data, men da tTEM afslører begravede dale under områdets øvrige tunneldale, formodes der også at eksistere en begravet dal her.

tTEM-data indikerede desuden et dybtliggende miocænt lerlag i hele området (i kote 30-70 m), hvis tilstedeværelse kan have stor betydning for forureningens spredning til dybere magasiner. Dette lerlag er gennemskåret af flere af de begravede dale, hvilket kan skabe lækage til dybere liggende lag.

Efter tTEM-undersøgelsen blev der ved logging af indvindingsboringen tættest på kildeområdet konstateret, at det var utætheder og manglende afpropning på ydersiden af filteret, der var årsag til forureningen. Boringen blev herefter overboret og reetableret. Forureningen i den nordlige boring med koncentrationer over kvalitetskriteriet vurderes dog stadig at stamme fra kilden.

Grundet den komplekse geologi er grundvandets strømningsveje og dermed også forureningsspredningen svært at karakterisere. De begravede dale kan både fungere som barrierer og som transportkorridorer. I større dybder kan forureningen spredes oven på det miocæne lerlag. Forureningens præcise spredningsveje er stadig ikke fuldt klarlagt på trods af den forbedrede geologiske viden.



Figur 13: Øverst: horisontalt oversigtskort fra kote 45 m med visning af tTEM-data, placeringen af de to forurenede indvindingsboringer i området (røde prikker) og den forurenede lokalitet. Tunneldale i landskabet er vist med sorte streger. Nederst: Vertikalt profilsnit (blå linje vist på kortet) med geologisk tolkning påført. Det ses bl.a., at der er tolket begravede dale under tunneldalene.

Ud over at bidrage med viden i forhold til forståelse af forureningsspredningen i området, har tTEM også bidraget med viden om den dybere geologi. Efter tTEM-undersøgelserne er der opmærksomhed på, at den rigtige borerig benyttes således, at det kan sikres, at borearbejde som minimum kan føres ned til det miocæne lerlag når nødvendigt. tTEM-data har på den måde således også bidraget med værdifuld viden i forhold til de efterfølgende forureningsundersøgelser og planlægning af afværge på lokaliteten.

Cost-benefit overvejelser

Selv om der forud for tTEM-undersøgelserne blev identificeret større områder, der kunne forventes at give forstyrrede data, vurderes undersøgelserne at have bidraget med væsentlig værdi til projektet. Den opnåede viden, særligt omkring det miocæne lerlag og de begravede dale, kunne ikke have været indhentet med andre metoder og slet ikke inden for tilsvarende økonomiske ramme.

På baggrund af erfaringerne fra dette projekt, kunne det have været fordelagtigt at have udført tTEM, som noget af det første i projektet. Herved havde man tidligere i projektet fået bedre mulighed for at forstå forureningens spredningsmønstre, og på den baggrund havde det været muligt, at planlægge en mere miljøøkonomisk forureningsundersøgelse.

7.5 Skovmølleværket, Svendborg, Region Syddanmark

Lars Frimodt Pedersen, Regional Udvikling, Vand og Jord, Region Syddanmark

Baggrund og problemstilling

Region Syddanmark, Svendborg Vand A/S og Svendborg Kommune indgik den 22. november 2019 en partnerskabsaftale, der havde til formål at kortlægge pesticidproblematikken på forsyningens to kildepladser til Skovmølleværket.

På Skovmølleværkets sydlige kildeplads ligger der otte indvindingsboringer som perler på en snor på tværs af strømningsretningen. Her er der i boring DGU nr. 165.151 påvist et indhold af DMS på 2,4 µg/L efter at boringen er taget ud af drift. Der er tidligere påvist op til 6,1 µg/L DMS, hvor boringen var i drift. I de nærmeste indvindingsboringer, der ligger 200 m mod vest og 300 m mod øst, er koncentrationen af DMS under kriteriet, men stigende efter DGU 165.151 er taget ud af drift.

For at opspore punktkilder, der kan være skyld i forureningen af DGU 165.151, har Region Syddanmark undersøgt to tidligere vandhuller, for at afklare, om DMS-indholdet kunne stamme fra dem. De var ikke kilden til grundvandsforureningen.

Geologi og grundvandsforhold

Indvindingsboringerne på Skovmølle Kildeplads er filtersat i intervallet fra ca. 36 til 55 m u.t. i et frit grundvandsmagasin. Filtrene er generelt relativt korte (typisk 5 m), da den vandmættede del af det frie magasin ikke har en stor mægtighed. Dæklagene over grundvandsmagasinet består af vekslende lag af smeltevandssand og moræneler. Grundvandsspejlet er typisk beliggende i kote 6 til 7 m. De fleste indvindingsboringer på kildepladsen er beliggende i en terrænkote på ca. 45 m.

Grundvandsspejlet er således beliggende omtrent 40 m u.t. Det er usædvanligt dybt. Det dybtliggende grundvandsspejl medfører, at dæklagene over grundvandsmagasinet i vid udstrækning er iltede, og derfor kun yder en meget begrænset beskyttelse af grundvandet over for forurening med nitrat.

Sporing af spredningsveje til det primære magasin

Et bedre kendskab til opbygningen af geologien i dæklaget over det primære magasin, er en forudsætning for, at der kan gives et realistisk bud på om forureningen skyldes en punktkilde eller en fladekilde. Er der vinduer gennem dæklaget eller findes der skråtstillede lag, der kan lede forureningen til det primære magasin.

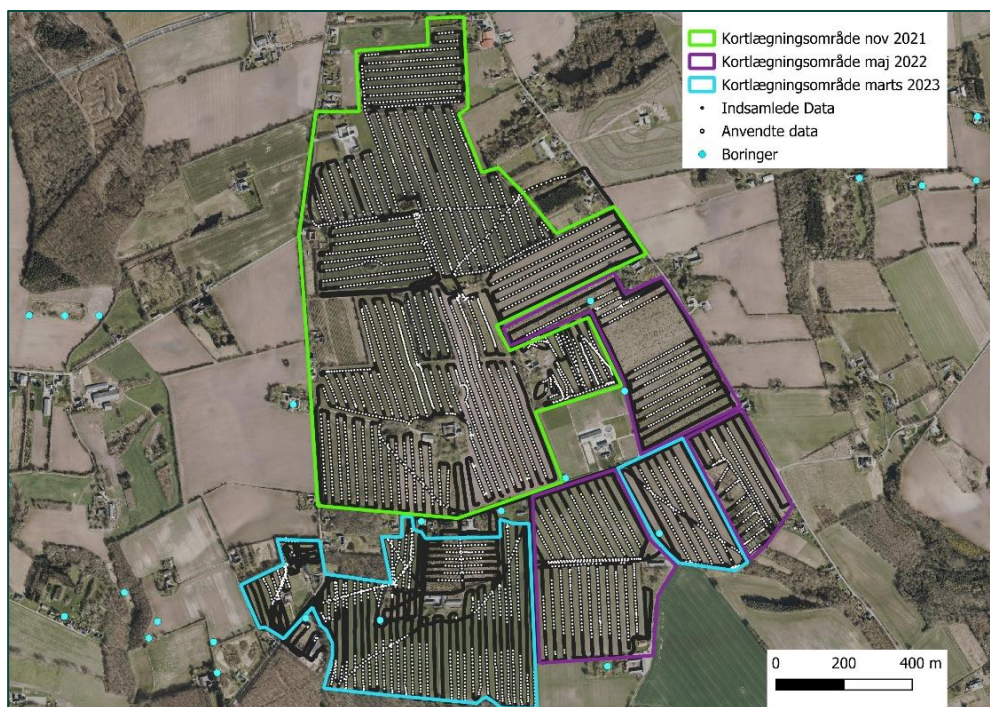
Formålet med tTEM-kortlægningen var at give et bud på, hvor regionen skal koncentrere de videre undersøgelser til opsporing af punktkilder.

tTEM-kortlægningen

tTEM-kortlægningen blev foretaget d. 18. november 2021 og en supplerende kortlægning blev udført d. 19. maj 2022. Svendborg Vand A/S har siden udvidet det kortlagte areal mod syd og vest langs med indvindingsboringerne på Skovmølle Kildeplads.

Omkostningerne til tTEM kortlægningen i oplandet til den forurenede boring ved Skovmølleværket er dækket af Region Syddanmark.

tTEM data blev processeret og inverteret af geofysikerne hos WSP (WSP 2021a, WSP 2022b).



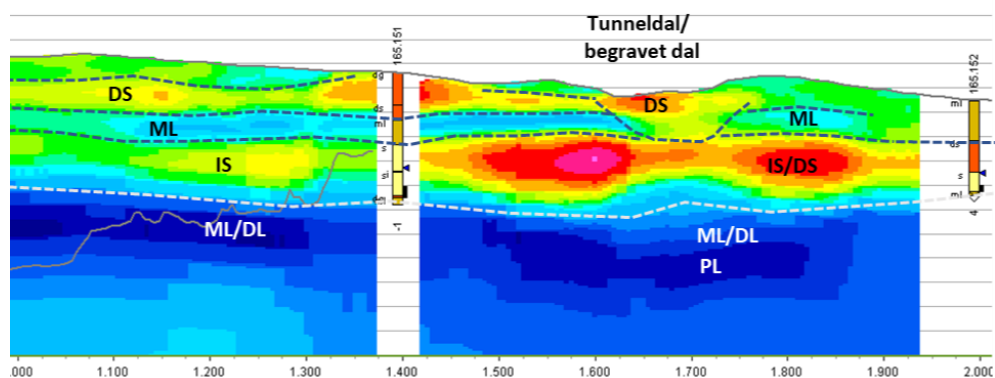
Figur 14: tTEM-kortlægningen omkring boring DGU 165.151 blev foretaget den 18. november 2021 (grøn polygon) og 19. maj 2022 (lilla polygoner). De blå polygoner viser, hvor Svendborg Vand A/S har foretaget supplerende tTEM-kortlægning i nærområdet.

Tolkning af tTEM

Tolkning af data fra tTEM kortlægningen er foretaget af geolog Flemming Jørgensen, Region Midtjylland. I tolkningen er inddraget den tTEM kortlægning, som Svendborg Vand A/S har foretaget ved kildefeltet mod nord.

Kortlægningen viser et nedre lag moræne-/smeltevandsler, der er aflejret på Paleocæn ler. Herover er der smeltevandssand/ferskvandssand, der udgør grundvandsmagasinet ved Skovmølleværket. Magasinet har et dæklag af moræneler, der er overlejret af et terrænnært magasin af smeltevandssand. Herover er der igen moræneler, hvorpå der ses aflejringer, der er tolket som tunnel-ås/-dal eller en mindre begravet dal.

Området gennemskæres af to delvis begravede dale, der også ses i terrænet. Ved den nordlige dal ses antydninger af normalforkastninger i moræneler over det primære magasin. I dalen er der aflejret smeltevandssand og -grus. Der er stedvist et tyndt lerlag over dalen.



Figur 15: Udsnit af et nord-syd profil ved boring DGU 165.151. Tunneldalen 200 m syd for boringen kortslutter det terrænnære og det primære magasin. Fra Jørgensen (2023).

Den sydlige dal skærer gennem terrænet få hundrede meter syd for boring DGU 165.151. Dalen bryder moræneleret over det nedre magasin, så der er et vindue til det øvre magasin.

Tolkningen og kortlægningen blev præsenteret af geofysiker Anders Edsen, WSP og geolog Flemming Jørgensen, Region Midtjylland på et møde i partnerskabet mellem Svendborg Vand A/S, Svendborg Kommune og Region Syddanmark.

tTEM-kortlægningens betydning for sagen

Kortlægningen har bidraget væsentlig til den geologiske forståelse af området. På baggrund af tTEM-kortlægningen, bør den konceptuelle model for området revideres, så de begravede dale inddrages. Ligeledes bør den hydrogeologiske model genbesøges, så den hydrogeologiske effekt af de begravede dale og dermed spredningsveje kan vurderes.

En opdateret hydrogeologisk model for nærområdet vil med fordel kunne benyttes i regionens videre arbejde med opsporing af punktkilder til forureningen med DMS.

Svendborg Vand A/S har i 2024 iværksat en afværgepumpning på boring DGU 165.151. Der monitoreres på boringen og nabo-indvindingsboringerne.

Resultaterne fra tTEM-kortlægningen og monitoreringen vil danne baggrund for det videre arbejde i partnerskabet mellem Svendborg Kommune, Svendborg Vand A/S og Region Syddanmark.

Cost-benefit overvejelser

Til opsporing af spredningsveje til det primære magasin, har tTEM-kortlægningen været en god investering. Omkostningerne til tTEM-kortlægningen er mindre end den indledende undersøgelse af to lokaliteter. Værdien af de data tTEM-kortlægningen bidrager med, og overstiger langt det, de to konventionelle indledende undersøgelser bidrog med.

Erfaringerne fra denne kortlægning har vist, at en indledende tTEM kortlægning og efterfølgende geologisk tolkning, er et uvurderligt værktøj til planlægning af videre undersøgelser og tiltag.

7.6 Vesterlund Losseplads, Region Syddanmark

Steffen Gram Lauridsen, Regional Udvikling, Vand og Jord, Region Syddanmark

Baggrund og problemstilling

Denne lokalitet er en tidligere losseplads, som har været i drift i perioden 1965 til ca. 1985. Lokaliteten er beliggende i OSD og i udkanten af indvindingsoplandet til Oksbøl vandværk på Als.

Idet der er oplysninger om, at der har været deponeret slam med indhold af oliestoffer og chlorerede opløsningsmidler m.v. og spildevandsslam, blev der omkring 1990 udført en række boringer, hvor der blev fundet markante indhold af chlorerede opløsningsmidler. Disse boringer indgik efterfølgende i en monitoringsplan. Der blev i 2017 udført en revurdering af monitoringen, og det blev besluttet, at der skulle udføres en videregående undersøgelse for at få en nærmere afgrænsning af forureningen samt en bedre risikovurdering i forhold til grundvandet og overfladevandet i en nærliggende mose.

I forbindelse med den videregående undersøgelse i 2017 er der udført boringer til ca. 30 meter under terræn. Boringerne er ført til denne dybde, idet der er et stærkt vandførende sekundært magasin, der ligger over et lerlag, der varierer i tykkelsen. Der er i alt udført 16 boringer før der blev udført undersøgelser med tTEM, og efterfølgende er der udført 3 dybe (til ca. 50 meter) boringer til det primære magasin.

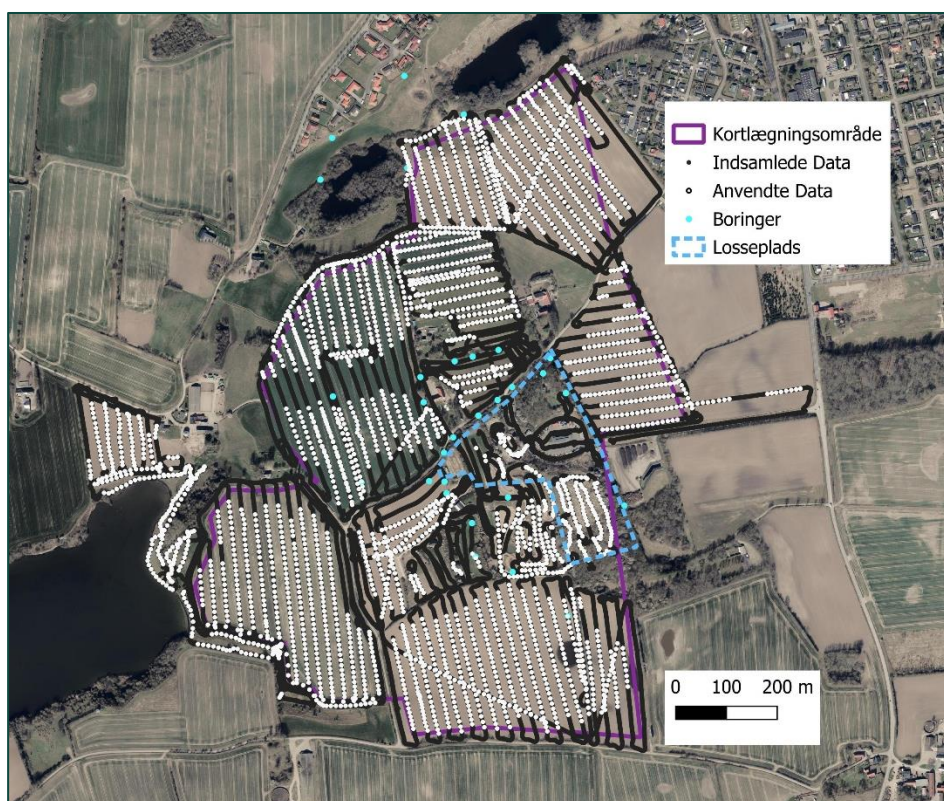
Det sekundære grundvand er undersøgt for pesticider, olie- og PFAS-stoffer samt chlorerede opløsningsmidler med nedbrydningsprodukter. Der er fundet pesticidindhold på ca. 20 gange grundvandskvalitetskriteriet, olie- og PFAS-stoffer med mindre indhold. Vinylchlorid og cis-DCE er fundet med koncentrationer op til henholdsvis 690 µg/l og 1.400 µg/l. Der er endvidere analyseret for ethen og ethan, og resultaterne antyder, at der foregår nedbrydning af klorerede opløsningsmidler til disse stoffer.

Det sekundære magasin er således kraftigt påvirket af perkolat og risikovurderingen afhænger af om og hvor, der er kontakt til det primære magasin.

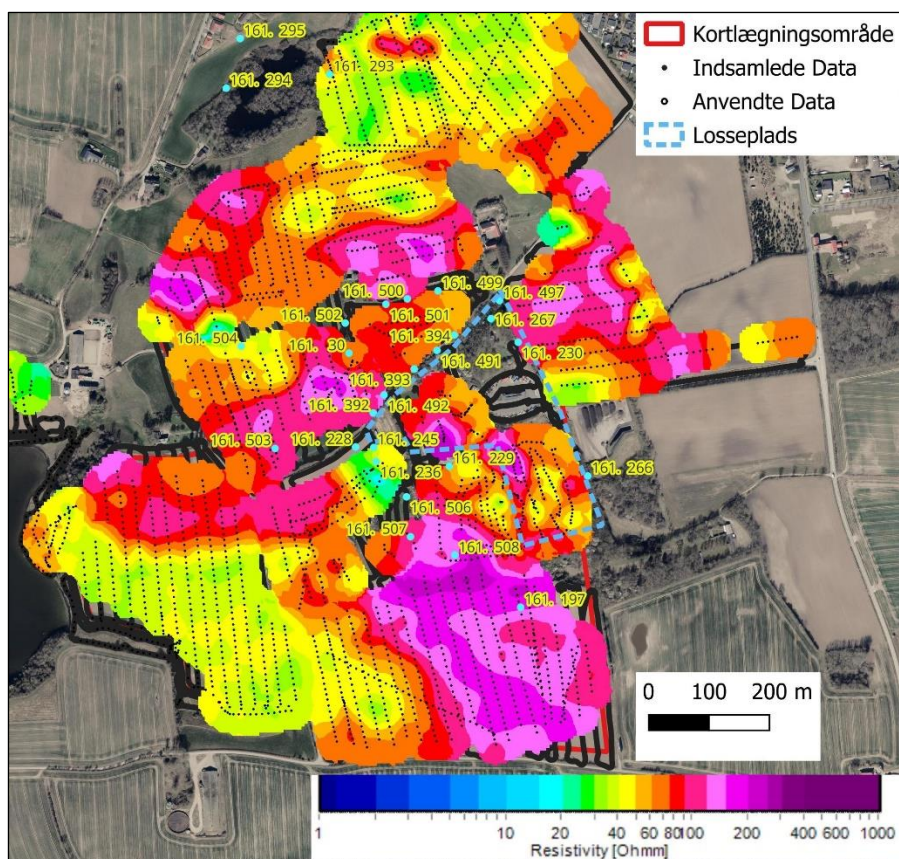
tTEM kortlægning

Der er lavet geofysisk kortlægning med tTEM på ca. 90 ha (**Figur 16**). Der blev fra starten kørt på en vestlig mark som ikke var planlagt ind i kortlægningen. Der kørt på andre marker, der var ejede af samme grundejer, så grundejer udviste forståelse og samarbejdsvilje. Som det ses af **Figur 17** og **Figur 18**, er der kørt på selve lossepladsen, men som det kunne forudsiges, var der meget støj på arealet og begrænset mulighed for at lave kortlægning.

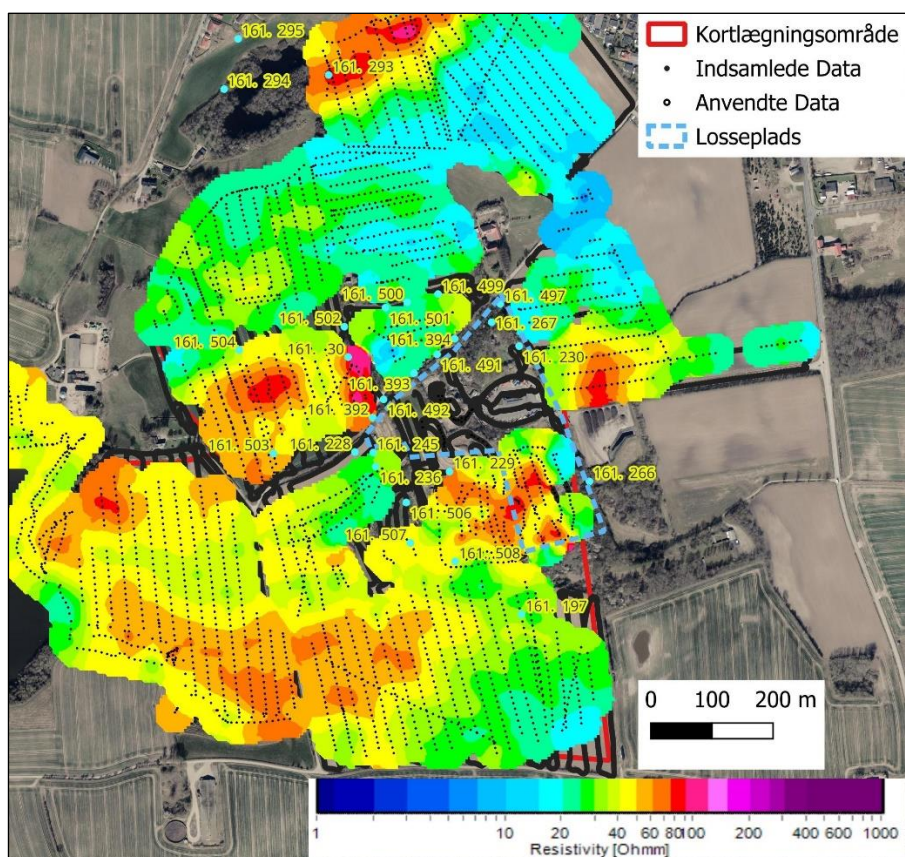
Den udførte tTEM kortlægning har bl.a. haft til formål at kortlægge udbredelsen af det beskyttende lerlag over det primære magasin. Det fremgår af profilerne og middelmodstandskortene, at der generelt ses et sammenhængende lerlag, dog med afvigelser (se **Figur 19**).



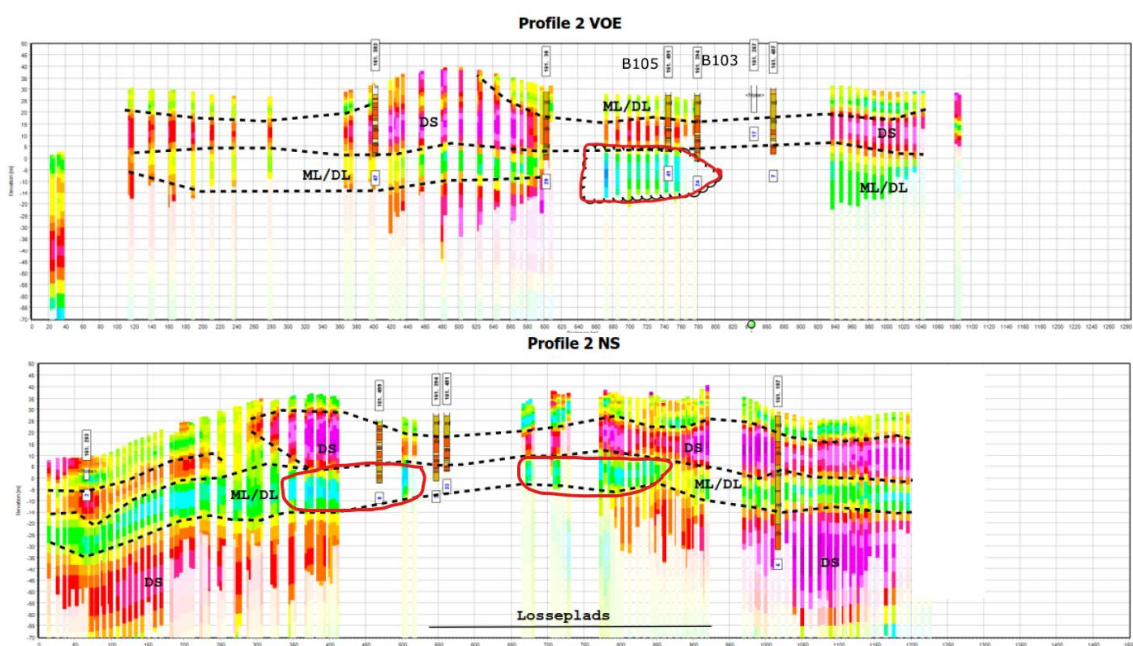
Figur 16: Kort over de kortlagte arealer. Indsamlede data er vist med sort, mens anvendte data er vist med hvid markering.



Figur 17: Middelmodstandskort for koteintervallet 10-15 m.



Figur 18: Middelmodstandskort for koteintervallet -5 til -10 meter.



Figur 19: Eksempler på profilsnit Vest-Øst og Nord-Syd gennem Vesterlund Losseplads. Mulig forureningspåvirkning af lerlag er vist med rød omkransning.

Selvom kortlægningen ikke er fuldt dækkende på lossepladsarealet, så giver den dog et vigtigt overblik over morænelerslagets udbredelse og mægtighed.

Kortlægningen sammenholdt med boringslagene viser lerlaget fra ca. 30 m.u.t. i varierende tykkelse. Kortlægningen af leret under lossepladsen er dog usikker, og det ser ud som om, det er noget tyndere her (**Figur 19**).

har også givet en god forståelse af forureningens mulige spredningsveje. Lerlagets udstrækning og overfladeforhold var helt afgørende at få kortlagt, for at der kunne formuleres en robust foreløbig risikovurdering.

Det vurderes, at hvis kortlægningens var blevet udført i starten af undersøgelsesfasen, ville vi det give et bedre grundlag for placering af boringerne, der er udført i det sekundære magasin. Disse 16 boringer er udført i omgange af 3 faser. Dermed kunne undersøgelsesforløbet have været forkortet betydeligt. Det havde også haft en betydning for placering af de afgrænsende boringer, idet antallet givetvis ville været reduceret med 2-3 boringer. Boringerne ville muligvis også være blevet placeret lidt mere optimalt i den nordvestlige retning.

Hvis der ikke var udført en tTEM-kortlægning, var der sandsynligvis blevet udført flere afgrænsende boringer, og det kan ikke udelukkes, at der forsat skulle køre en monitorering af grundvandet i en længere årrække på baggrund af en uskarp risikovurdering.

Som risikovurderingen foreligger nu, så er vurderingen den, at der er dannet et ret godt indtryk af forureningen, og hvordan den opfører sig. Der ser ud til at ske nedbrydning af de chlorerede opløsningsmidler, taget i betragtning af deponeringen er 50 år gammel. For at følge udviklingen i nedbrydningen iværksættes en monitoringsrunde om 3-5 år.

Cost-benefit-analyse

Som det fremgår af ovenstående, så ville der sandsynligvis være blevet udført færre boringer i de tre indledende faser, hvis tTEM-kortlægningen var blevet udført tidligere. Det anslås, at der vil være tale om 3 boringer. Hertil kommer, at det altid er dyrere, når der skal mobiliseres gentagne gange og feltarbejdet trækker ud. Det anslås, at der som minimum ville have været udgifter for yderligere 200.000 kr. uden tTEM-kortlægningen. Dertil skal der lægges et beløb på anslået 75.000 kr. per monitoringsrunde udgifter til rådgiver til revurdering efter en længere monitoringsperiode.

tTEM-kortlægningen på denne sag har kostet omkring 80.000 kr.

Kan der spares boringer i forbindelse med, at der inddrages tTEM-kortlægning på regionernes undersøgelser, er der ikke mindst en økonomisk gevinst, men det er også en stor gevinst for miljøaftrykket. Samtidig giver kortlægningen en mere robust risikovurdering.

7.7 Nybølle, Region Hovedstaden

Katja S. Grunnet, Center for Regional Udvikling, Region Hovedstaden

Baggrund og problemstilling

Denne lokalitet er en landbrugsejendom, hvor der har været drevet landbrug siden 1877. Der har desuden været gartneri med to drivhuse omkring 1920-1960. Lokaliteten er beliggende i OSD og i indvindingsopland til et vandværk med kildeplads ca. 1 km nord for lokaliteten. På kildepladsen er der påvist nedbrydningsprodukter af pesticider, dimethachlor ESA og OA i nærheden af grænseværdien.

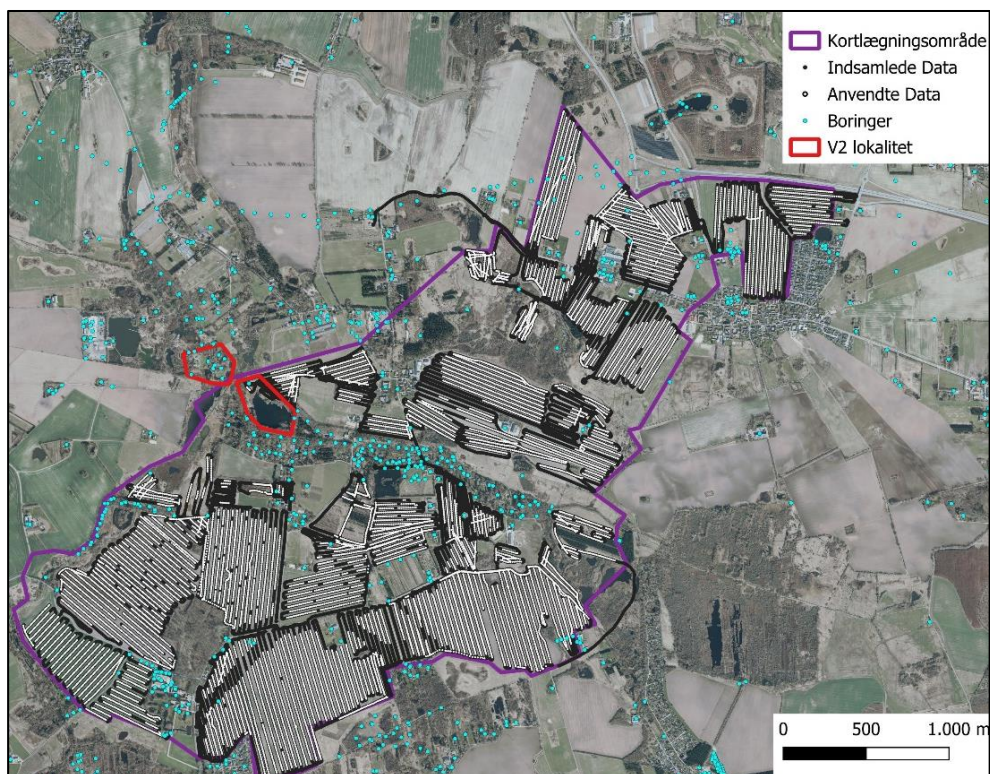
Der blev i 2020-2023 gennemført en indledende undersøgelse på lokaliteten. Her blev der fundet pesticider i et sandlag ca. 9-12 meter under terræn. Sandlaget vurderes at være i kontakt med den underliggende kalk, der udgør det primære magasin. Over sandlaget findes et lerlag, og det er uvist, hvad mægtigheden af lerlaget er i området.

Ved undersøgelsen blev der lokaliseret en mulig punktkilde til dimethachlor ESA og – OA ved en maskine/lagerbygning på den nordvestlige del af ejendommen. Der findes en vandhane, og området kan muligvis have været anvendt til påfyldning af sprøjte eller vaskeplads. Lokaliteten blev V2-kortlagt i 2023. Samme år blev der påbegyndt en videregående forureningsundersøgelse med henblik på at vurdere, om der findes en væsentlig punktkilde på lokaliteten, der kan være årsag til de påviste koncentrationer af dimethachlor ESA og – OA på kildepladsen. Eller om den regelrette brug af midlet Terridox, der indeholder dimethachlor, på de omkringliggende marker kan være årsag til påvisningen med dimethachlor ESA og – OA på kildepladsen. Undersøgelsen pågår stadig.

Terridox har været anvendt på rapsmarker, og det er blevet oplyst, at der på samtlige marker tilhørende ejendommen forventeligt har været dyrket raps i anvendelsesperioden for Terridox. I kildeområdet blev der fundet sum af pesticider på op til 34 µg/l, heraf dimethachlor ESA på 8,6 µg/l og dimethachlor OA på 7,7 µg/l samt mechlorprop på 6,5 µg/l som de højeste koncentrationer af enkeltstoffer.

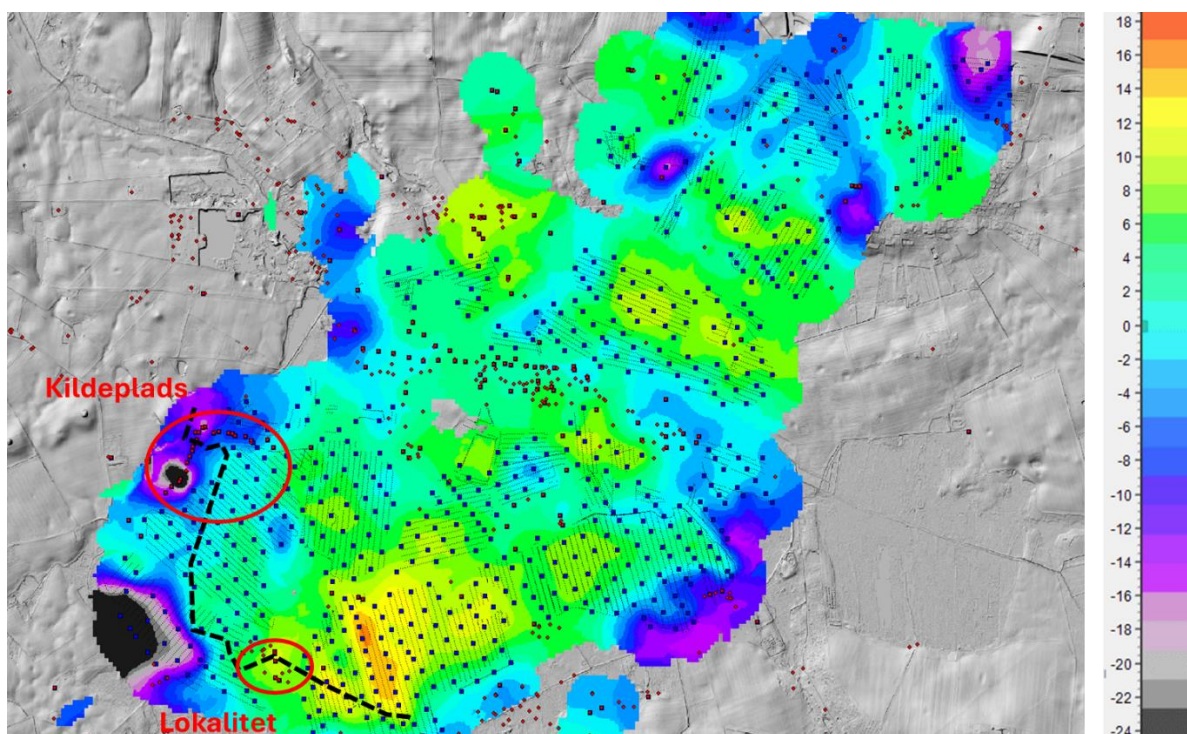
tTEM kortlægning

I 2023 blev en tTEM-kortlægningen udført af WSP som supplement til en videregående forureningsundersøgelse. Formålet med tTEM-kortlægningen var at forbedre den konceptuelle forståelse i et større område omkring lokaliteten hvad angår geologi og potentielle spredningsveje for forurening. Den opnåede viden skulle anvendes aktivt i strategien for den videregående undersøgelse samt bidrage til en vurdering af om påvirkningen af kildepladsen skyldes en punkt- eller fladekilde. Der blev udlagt et areal på 850 ha. til tTEM-kortlægning, og der er generelt opnået en god datadækning mod syd og nord (**Figur 21**). Kun mindre områder i den centrale del, er ikke dækket så godt pga. indhegnede marker, stedvise vanskelige adgangsforhold og elektriske kabler i tilknytning til infrastrukturen omkring bebyggelsen.

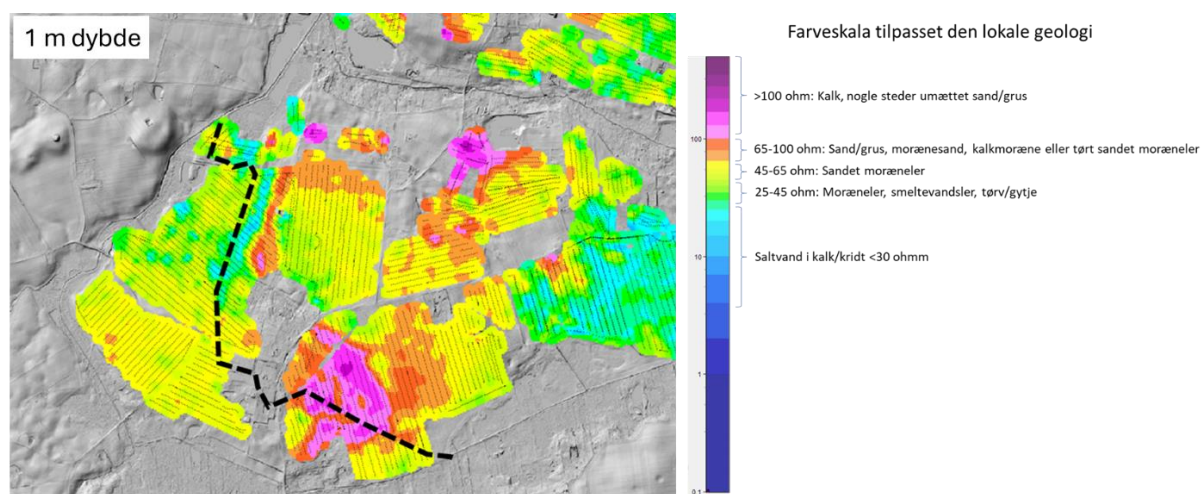


Figur 21: Gennemført tTEM-kortlægning. Planlagt areal vist med lilla polygon. Anvendelige data vist med hvide prikker.

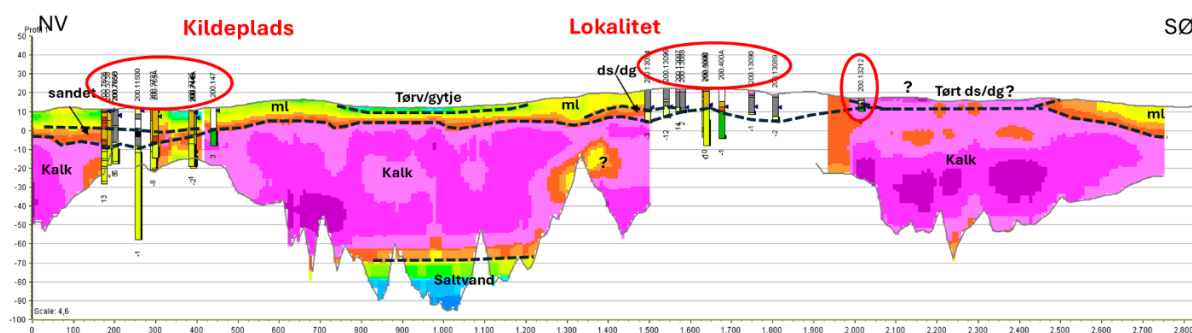
Lokaliteten og kildepladsen ligger i den sydlige del af kortlægningsområdet, hvor der var god datadækning. Resultaterne af tTEM-kortlægningen viser, at kalkoverfladen ligger meget terrænnært øst for lokaliteten, hvor der er intet eller meget begrænset dæklag over kalken (se **Figur 22**, **Figur 23** og **Figur 24**). Ligeledes kan det ses, at der i området mellem lokaliteten og kildepladsen findes områder med mindre dæklag, end der forventes at findes på selve lokaliteten. Ved kildepladsen vurderes der at være en forkastning i kalken, da tTEM-resultaterne øst for indvindingen ikke repræsenterer geologien, som den er registreret i indvindingsboringerne. I indvindingsboringerne ses kvartære aflejringer med en mægtighed på op til 50 m (ses dog ikke på stedet hvor profilet i **Figur 24** krydser kildepladsen).



Figur 22: Model af kalkoverfladen målt i koter (m DVR90) med farveskala i meter til højre. Kildepladsen ved forkastning i kalken mod vest og lokaliteten med godset i den sydlige ende. Sort stiplede linje mellem kildeplads og lokalitet viser profil, som er vist i **Figur 24**.



Figur 23: Resistiviteten i 1 meters dybde i den sydlige del af det kortlagte område med farveskala for tolket geologi til højre. Lyserøde og lilla farver viser kalk, men grønne og gule viser henholdsvis moræner/smeltevandsler/tørv/gytje og sandet moræner. Profil (**Figur 24**) gennem område vist med stiplede linje.



Figur 24: Profil gennem den sydlige del af det kortlagte område fra nordvest gennem kildepladsen mod syd, drejende mod sydøst gennem lokaliteten og videre øst for lokaliteten. Geologiske tolkninger er påført med tekst og stiplede linjer, se farveskala for resistiviteter i **Figur 23**. Rød oval figur længst til højre markerer en boring, hvor der er påvist et tyndt lerlag, hvilket ikke kan ses på tTEM.

Sagens forløb

Indsamlingen af data til tTEM-kortlægningen er udført efter den indledende forureningsundersøgelse, og før den videregående undersøgelse blev sat i gang. Der blev udført tTEM i et større område i Nybølle, og området med lokaliteten og kildepladsen udgør en mindre del af det sydlige kortlægningsområde.

Resultaterne af tTEM-kortlægningen forelå omtrent samtidigt med opstarten af den videregående undersøgelse. Ved orientering af regionen om resultaterne af tTEM-kortlægningen og tolkningen af de geofysiske målinger i hele Nybølle-området, blev regionens sagsbehandler på forureningsundersøgelsen inddraget. Ligeledes blev projektleder på tTEM-kortlægningen inviteret til opstartsmøde for forureningsundersøgelsen, så der kunne opnås en fælles forståelse for den lokale geologiske konceptuelle forståelse omkring lokaliteten og kildepladsen til gavn for planlægning af den videregående forureningsundersøgelse.

tTEM-undersøgelseernes betydning for sagen

tTEM-data har givet en god konceptuel forståelse af de geologiske forhold omkring lokaliteten. Det har desværre ikke været muligt at udføre tTEM på selve lokaliteten pga. adgangsforhold og elektriske kabler ifm. bebyggelse. Der er derfor ikke målt geofysik lokalt omkring det formodede kildeområde, som kunne bidrage til den geologiske forståelse i kildeområdet.

Derimod har tTEM-kortlægningen bidraget med en god geologisk forståelse for et større område opstrøms kildeområdet og for hele området mellem kildeområdet og den forurenings-påvirkede kildeplads. Sammen med historisk information om driften af markerne i området, har tTEM-resultaterne givet en større konceptuel forståelse for mulige sprednings- og transportveje for området, uden udførelse af mange fysiske borer.

På baggrund af tTEM-kortlægningen blev det tydeligt, at der særligt øst for lokaliteten er meget begrænset dæklag over kalken og det primære magasin. Der er viden om, at der forventeligt har været dyrket raps på samtlige marker i anvendelsesperioden for Terridox. Det er derfor sandsynligt at evt. påvirkning af det primære magasin med dimethachlor kan være sket fra fladekilder (marker omkring lokaliteten) med varierende nedslivningshastighed pga. de varierende dæklagstykkelser.

Der pågår i skrivende stund undersøgelser af bidrag fra fladekilder i området. Ved udpegning af et egnet mark-område til undersøgelserne har tTEM resultaterne bidraget til at udvælge et areal med passende dæklagstykkelse.

Cost-benefit overvejelser

Som nævnt er tTEM-kortlægningen udført umiddelbart inden planlægningen af den videregående undersøgelse. Resultaterne af den geofysiske undersøgelse har dermed været med til at skabe en indledningsvis, fælles konceptuel forståelse af geologien i området, som har været med til at danne grundlag for strategien for undersøgelsen.

Da tTEM-kortlægningen har været en del af grundlaget for udarbejdelsen af undersøgelsesstrategien, er det ikke muligt at beregne en evt. økonomisk besparelse, som kortlægningen har bidraget til.

Men ifm. undersøgelser af om markerne omkring lokaliteten kan udgøre en fladekildepåvirkning, har det ligeledes været gavnligt at anvende geofysikken til at udpege et egnet markareal til fladekildeundersøgelser.

7.8 Skovlytoften, Søllerød, Region Hovedstaden

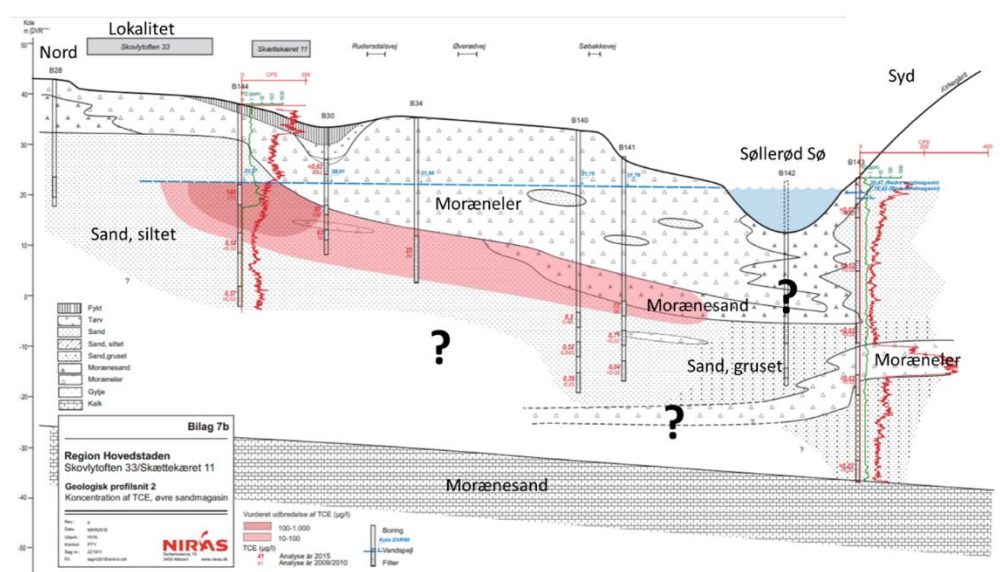
Vinni Rønde og Helle Overgaard, Center for Regional Udvikling, Region Hovedstaden

Baggrund og problemstilling

På Skovlytoften 33, Søllerød har der fra ca. 1955-68 været produktion af bl.a. køleskabe. TCE har været håndteret ifm. affedtning og lakering af metal (WSP 2021b).

Lokaliteten er beliggende i OSD samt ca. 300 m nord for den målsatte Søllerød Sø.

Undersøgelser gennemført siden 2001 har vist, at forurening med TCE og nedbrydningsprodukter har spredt sig til det sekundære grundvandsmagasin, bestående af smeltevandssand, ca. 20 m u.t. og at en forureningsfane strømmer mod Søllerød Sø (**Figur 25**) (NIRAS 2019). Massen af TCE i kildens umættede zone og i grundvandsfanen er vurderet til hhv. 2-5 og 18 kg, mens forureningsfluxen er estimeret til 200-800 g/år. Der er ikke påvist forurening syd for Søllerød Sø.



Figur 25: Konceptuel model for geologi og forureningsspredning. Modificeret fra NIRAS (2019).

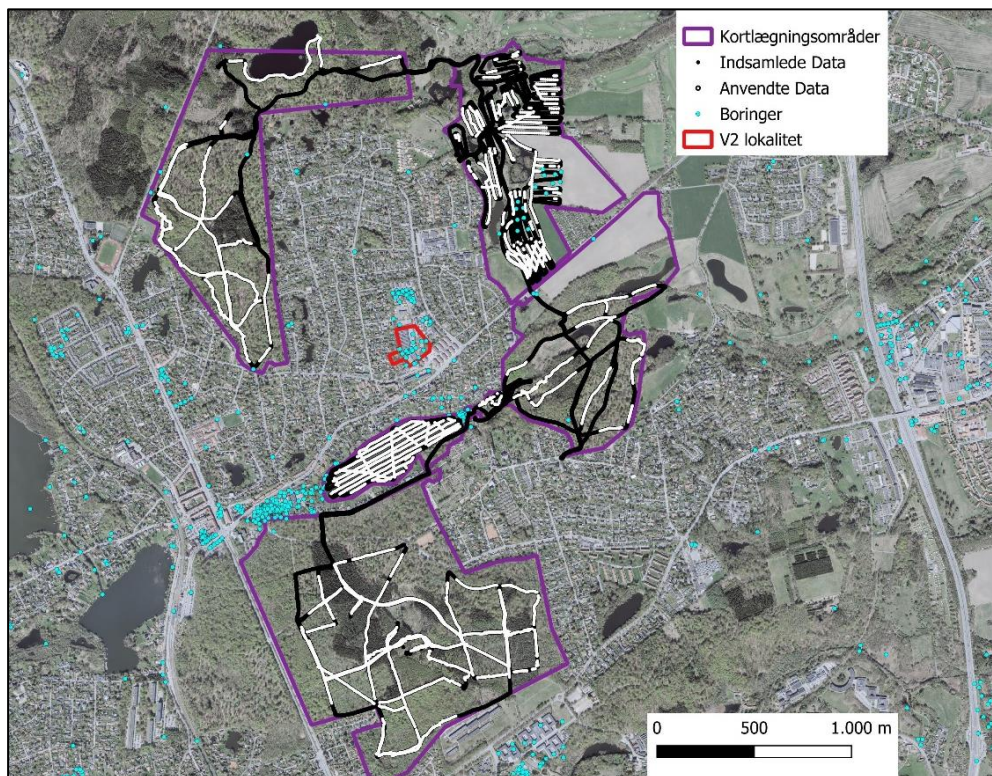
Over det sekundære magasin er der observeret moræneler, hvis tykkelse tiltager ned mod søen. Nord for søen er der ikke udført borer til det primære magasin (kalken). På den sydlige side af søen træffes ikke et tilsvarende morænelerlag over det sekundære magasin, men et relativt tyndt morænelerslag adskiller det primære og sekundære magasin. Geologien under Søllerød Sø er ikke kendt. Det er således uvist, om der er hydraulisk kontakt mellem det sekundære magasin, hvori forureningen strømmer, og hhv. søen og det primære magasin.

På baggrund af undersøgelserne er spredningsvejene for forureningen usikker og risiko for hverken grundvand eller overfladevand kan udelukkes. Omkostningerne til afværge er dog så høje, at en indsats overfor grundvandsressourcen ikke er prioriteret af regionen.

tTEM-kortlægning

I 2022 blev en tTEM-kortlægning udført af WSP som et supplement til en overfladevandsundersøgelse, der skulle afklare risikoen overfor Søllerød Sø. Formålet med tTEM-kortlægningen var mere specifikt at forbedre forståelsen af spredningsveje, herunder vurdere om forureningen strømmer, eller på sigt vil strømme, op i Søllerød Sø.

Kortlægningsområdet for tTEM var på i alt 370 hektar, herunder 280 hektar i skov og 13 hektar på Søllerød Sø (floaTEM), se **Figur 26**. Det bemærkes, at selve lokaliteten er beliggende i et industriområde, hvor tTEM ikke kan anvendes grundet elektrisk støj. Data blev indsamlet den 15-16. juni 2022.



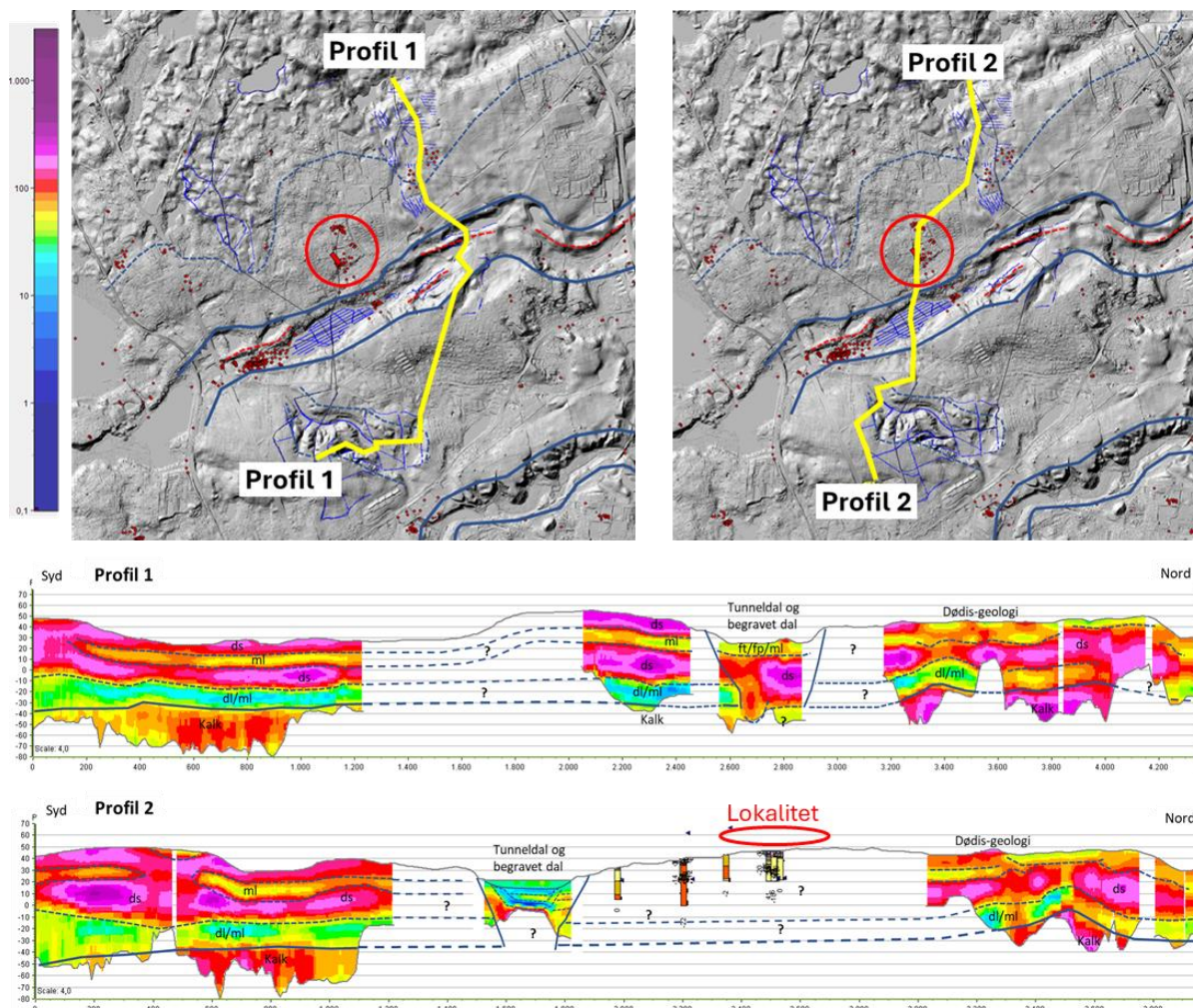
Figur 26: Kortlægningsområde for tTEM. Lilla polygoner viser de planlagte kortlægningsområder.

Processering er foretaget i programmet Aarhus Workbench og beskrevet nærmere i (WSP 2022c). Ved en manuel gennemgang og processering af data kunne det konstateres, at data-kvaliteten generelt er tilfredsstillende. Efter processeringen er der på baggrund af de målte data beregnet variationen af den specifikke elektriske modstand (resistivitet). For området generelt er der opnået en god tilpasning mellem data og den beregnede elektriske modstand, idet der dog i den centrale del af Søllerød sø ses et område med markant dårligere tilpasning.

I denne kortlægning varierer kortlægningsdybden mellem 30 og op til lokalt over 100 meter. Da data er indsamlet med relativt lille hastighed på Søllerød sø (ca. 5 km/t), er der anvendt en større midlingsbredde (målt i tid) på data fra søen end ved processering af data optaget på land. Herved kan signal-støj forholdet forbedres, hvorved indtrængningsdybden øges. Dybden til bunden af første lag i inversionen er bundet til data fra ekkolod, der blev anvendt under dataindsamlingen på søen.

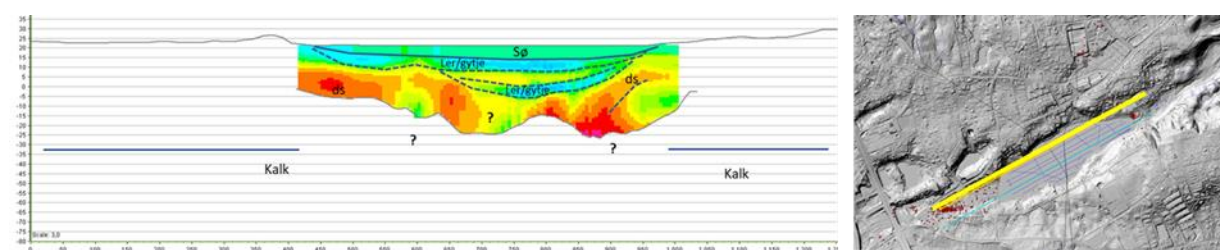
På de to tTEM-profiler nederst i **Figur 27** løbende fra syd til nord hhv. øst for søen (Profil 1) og gennem søen (profil 2) ses et tilsyneladende gennemgående morænelerlag, hvilket tyder på en vis beskyttelse af det primære magasin knyttet til kalken. tTEM-profilet under Søllerød Sø (Profil 2) går dog ikke tilstrækkelig dybt til at bekræfte lerlagets tilstedeværelse her.

Af skyggekortene øverst i **Figur 27** ses det at Søllerød Sø er beliggende langs med en syd-vest-nordøst-gående tunneldal, der fortsætter til Vedbæk. Denne tunneldal er ligeledes synlig i begge tTEM-profiler. Det østlige profil (profil 1), afslører at tunneldalen og flere begravede dale under tunneldalen gennemskærer det ellers gennemgående lerlag. Det er således sandsynligt, at samme geologi gør sig gældende under selve Søllerød Sø.



Figur 27: Geofysiske profiler (profil 1 og 2) samt geologisk tolkning.

Et geofysisk profil på langs af Søllerød Sø (Figur 28) afslører en søbund med lav resistivitet (blå farver), sandsynligvis bestående af et lag af ler/gytje. Lidt dybere ses endnu et lag med samme lave resistivitet. Resultaterne tyder på at søbunden engang lå dybere end den gør i dag.



Figur 28: Geofysisk profil på Søllerød Sø samt geologisk tolkning. Farveskala for resistivitet er vist i Figur 27.

Sagens forløb

Indledningsvist blev det sammen med TUP-projektets deltagere vurderet, at lokaliteten var egnet til tTEM-kortlægning, og at resultaterne fra en sådan ville kunne forventes at opfylde det ønskede formål. Efter udførelsen af kortlægningen og en indledende geofysisk tolkning, afholdtes der en workshop mellem TUP-projektdeltagere (geofysiker, geolog, tovholder fra regionen) samt rådgiver og sagsbehandlere på overfladevandsundersøgelsen. På workshoppen blev deltagernes viden sammenstillet og den konceptuelle forståelse blev drøftet. Efterfølgende blev den geologiske tolkning forfinet til det endelige resultat.

Overfladevandsundersøgelsen, der bl.a. inkluderede tre boringer tæt ved søen og en vandprøve fra søen, blev udført parallelt med tTEM-kortlægningen og færdiggjort i 2023.

tTEM-undersøgelsernes betydning for sagen

Selvom grundvandsundersøgelsen er afsluttet, er det værd at bemærke, hvad tTEM-kortlægningen potentielt kunne have bidraget med i den henseende. tTEM-resultaterne har bl.a. vist, at der findes et lerlag over kalken, der betyder bedre beskyttelse af det primære magasin. Før tTEM-kortlægningen var lerlagets tilstedeværelse ukendt. Resultaterne viste dog også at lerlaget sandsynligvis ikke findes langs tunneldalen, idet laget her gennemskæres af tunneldalen og begravede dale herunder. Således kan tunneldalen fungere som et vindue, hvor forureningen eventuelt kan trænge ned til det primære magasin. Denne viden peger på at en opadrettet gradient fra det primære til det sekundære magasin, ville være af afgørende betydning for risikovurderingen overfor grundvandsressourcen. Det bemærkes at tunneldalen ved Holte befinder sig i en langt større og bredere dalstruktur, nemlig Sønderødalen, der generelt har dominans af sandede aflejringer i de dybeste dele (Sandersen & Jørgensen 2016). Ønskes det på et senere tidspunkt at styrke de faglige argumenter for ikke at prioritere en afværgeindsats, vil det derfor være relevant at undersøge potentialeforholdene nærmere.

Overfladevandsundersøgelsen blev afrapporteret før de endelige tTEM-resultater forelå (WSP 2023). På baggrund af undersøgelsen blev det – uden inddragelse af tTEM-kortlægningen – vurderet at forureningen ikke udgør en risiko for Søllerød Sø. Alligevel er det værd at bemærke, hvad tTEM-resultaterne kan bidrage med hvad angår risikovurdering af overfladevand. tTEM-resultaterne afslørede et dobbelt lag af ler/gytje under søen. Lagene kan betyde gunstige forhold for anaerob reduktiv dechlorering, idet opløst organisk materiale fra lagene kan agere som elektrondonorer i processen. Derudover kan lagene øge sorptionen af chlorerede stoffer i en evt. opstrømmende fane, hvilket giver mere tid til at reaktionen kan foregå. Alt i alt kan lagene altså øge nedbrydningen, hvilket kan betyde en reduceret forureningsflux til søen. Samtidig er der dog risiko for dannelse af vinylklorid.

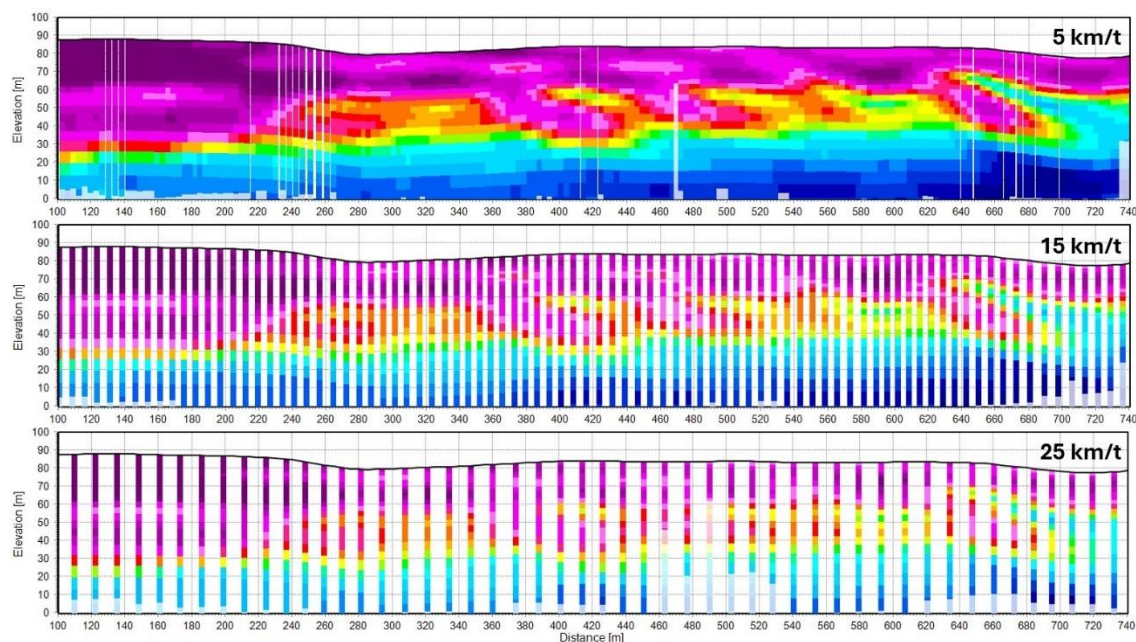
Cost-benefit overvejelser

Samlet set har tTEM-resultaterne givet information om geologien i et stort område bl.a. under Søllerød Sø og bedre konceptuel forståelse af mulige scenarier for forureningsspredning for begrænsede økonomiske midler. Havde tTEM-kortlægningen været udført tidligere kunne den have peget på en nærmere undersøgelse af potentialeforholdene i hhv. det primære og sekundære magasin, og således have bidraget til risikovurderingen af grundvandsressourcen. Hvis udført tidligere, kunne tTEM-kortlægningen desuden have bidraget til en nuanceret risikovurdering overfor Søllerød Sø.

7.9 Frijsenborg

På en lokalitet ved Frijsenborg i Midtjylland blev der udført en række test af betydningen for valg af feltlogistiske parametre for kortlægningsresultatet. Ved en tidligere tTEM-kortlægning var der konstateret markante strukturer i undergrunden på den pågældende lokalitet, som derfor vurderedes egnet til formålet.

Indenfor et ca. 20 ha stort område blev der indsamlet tTEM-data med en linjeafstand på 10 m, 20 m, 30 m og 40 m, data blev indsamlet i to retninger og med hastigheder på 5 km/t, 15 km/t og 25 km/t. Med dette datasæt er det således muligt at vurdere indflydelsen af valg af kørehastighed, afstand mellem kørelinjer og køreretning på resultatet af en tTEM-kortlægning.



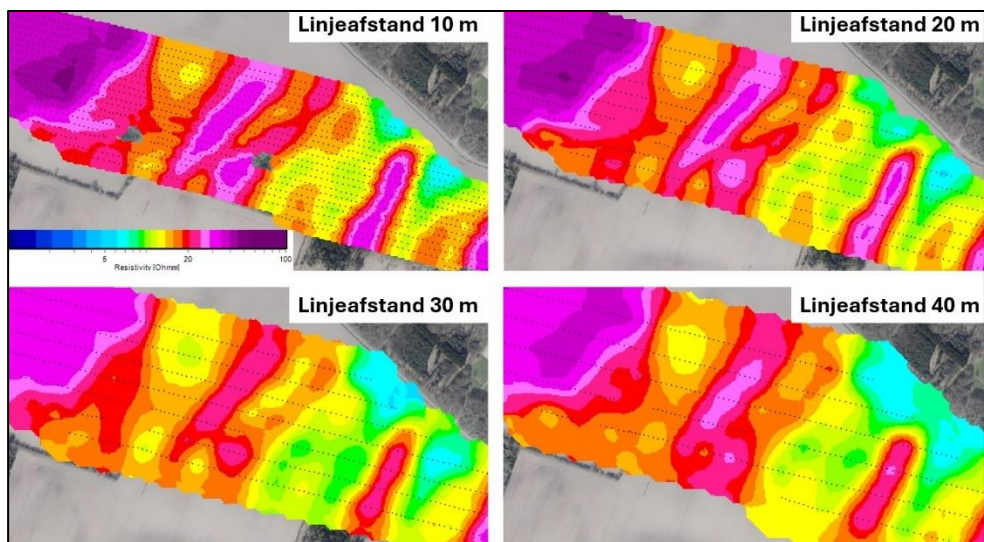
Figur 29: Profil VNV-ØSØ gennem kortlægningsområdet, der viser elektriske modstande baseret på data indsamlet ved forskellige kørehastigheder. Se Figur 30 for resistivitetsskala.

Figur 29 illustrerer forringelsen af opløsningen af undergrundens strukturer ved en forøgelse af hastigheden under dataindsamlingen. I dette eksempel tabes der ikke væsentlig information ved forøgelsen af hastigheden fra 5 km/t til 15 km/t, men ved en yderligere forøgelse til 25 km/t forringes opløsningsevne markant.

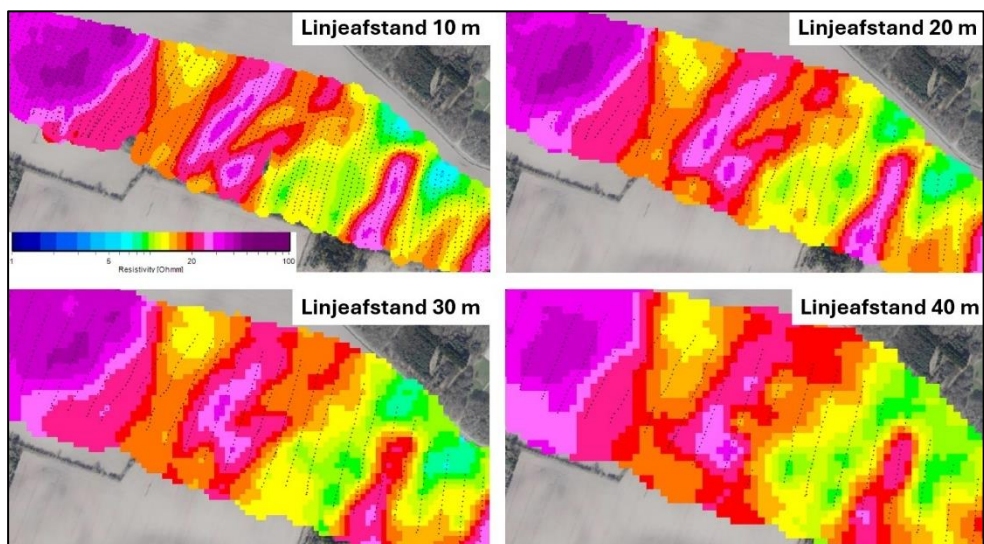
Figur 30 og Figur 31 illustrerer betydningen af valg af linjeafstand og retningen for dataindsamlingen.

Ved dataindsamling i VNV-ØSØ-lig retning opnås der på den aktuelle lokalitet næsten den samme opløsning af modstandsfordelingen ved de forskellige linjeafstande. Årsagen er primært, at der her er kørt vinkelret på strukturerne. Det modsatte er gældende ved dataindsamling i SSV-NNØ-lig retning. Her ses et tydeligt tab af opløsning ved en linjeafstand på 30 og 40 meter.

Linjeafstanden vælges aktivt under selve dataindsamlingen, mens retningen i forhold til de geologiske strukturer i undergrunden oftest først vil blive kendt når data tolkes. Da en forureningsspredning kan ske ad snævre hydrologiske passager, er det på den baggrund essentielt, at der vælges at indsamle data med maksimal linjeafstand på 20 meter.



Figur 30: Elektrisk modstandsfordeling i koteintervallet 40-45 m bestemt på baggrund af tTEM-data indsamlet ved forskellige linjeafstande og med VNV-ØSØ-lig kørselsretning. Ved udtegning af middelmotstandskortet er der anvendt en søgeradius på 1,5 x linjeafstanden og et grid med celledørrelse på 0,5 x linjeafstanden.



Figur 31: Elektrisk modstandsfordeling i koteintervallet 40-45 m bestemt på baggrund af tTEM data indsamlet ved forskellige linjeafstande og med SSV-NNØ-lig kørselsretning. Ved udtegning af middelmotstandskortet er der anvendt en søgeradius på 1,5 x linjeafstanden og et grid med celledørrelse på 0,5 x linjeafstanden.

8. Sammenstilling af resultater

I dette afsnit sammenstilles de erfaringer, der er opnået ved gennemførelsen af testkortlægningerne. I Figur 32. ses en oversigt over projektets 8 forureningslokaliteter sammenholdt med en række relevante forhold, der har betydning for tTEM-kortlægning.

	Hanehøjvej	Voldum	Stampevej	Rygesmindevej	Skovmøllevej	Vesterlund lossepl.	Nybølle	Skovlyroften
Tidligere losseplads	x		x			x		
Produktionsvirksomhed				x				x
Landbrug/gartneri/maskinstation		x					x	
Kildeopsporing					x			
Pesticider	x	x			x		x	
Klorerede opløsningsmidler				x		x		x
PFAS			x					
Bymæssig bebyggelse				x				x
Landlige omgivelser	x	x	x		x		x	
Selve lokaliteten ikke kortlagt med tTEM	x			x			x	x
Selve lokaliteten delvist kortlagt med tTEM			x			x		
Selve lokaliteten kortlagt med tTEM		x			x?			
Kortlægning af begravede dale af betydning for sag		x	x	x	x			x
Kortlægning af glacialtonik af betydning for sag	x		x			x		x
Kortlægning af forkastninger af betydning for sag	x				x		x	
Kortlægning af beskyttende lerlag af betydning for sag	x	x	x	x	x	x	x	x
Kortlægning af kalk af betydning for sag	x	x					x	x
Kortlægning af Palæogen ler af betydning for sag		x			x			
Kortlægning af Miocæn af betydning for sag			x	x				
Information fra omkringliggende områder anvendelige	x	x	x	x	x	x	x	x
Bedre afklaring af strømningsveje/gradientforhold	x	x	x	x	x	x	x	x
Forbedring af konceptuel model samt øget viden og sikkerhed	x	x	x	x	x	x	x	x
Mulig monitoring eller arværgesag undgået pga tTEM		x				x		
Bidraget til afklaring af forhold omkring overfladevand			x					x
tTEM har givet en bedre planlægning af fortsatte undersøgelser	x	(x)	x	x	x	x	x	(x)
Forbedret risikovurdering	x	x	(x)	x	(x)	x	x	(x)
Ingen økonomisk besparelse							!	
Økonomisk besparelse større end udgift			x				!	
Økonomisk besparelse noget større end udgift	(x)						!	
Økonomisk besparelse meget større end udgift		x	(x)	x	x	x	!	(X)
Forkortelse af sagsforløb	(x)	(x)	x	!	(x)	(x)	!	!
Sagen ikke afsluttet				x	x		x	
Fordel hvis tTEM var blevet udført tidligere	x	x	x	x		x		x

(x): "Ja hvis" x: "Ja" !: Ikke vurderet

Figur 32. Sammenstilling af tTEM-resultaterne fra de 8 testlokaliteter.

Desuden sammenstilles nogle af projektets resultater i oversigten. Oversigten omfatter emner omkring branche/kildetype, stoftype, tilgængelighed, geologi, geologisk og hydrogeologiske forståelse, sagsforløb, risikovurdering og økonomi.

8.1 Fordeling af lokaliteter

De 8 testlokaliteter omfatter forurening fra 3 tidligere lossepladser, 2 landbrug/gartnerier/maskinstationer og 2 produktionsvirksomheder. Desuden er en enkelt testlokalitet et kildeopsporingsprojekt. Stofferne der undersøges for på lokaliteterne, er i 4 tilfælde primært pesticider, i 3 tilfælde er det klorerede opløsningsmidler, og i et tilfælde er det primært PFAS, der undersøges for.

Kun to af de 8 lokaliteter forekommer i bymæssig bebyggelse, mens de øvrige er udvalgt i landlige omgivelser.

Flertallet af lokaliteterne findes i lerede morænelandskaber øst for den østjyske israndslinje. Ved en enkelt af disse ligger kalkoverfladen dog meget højt, kun få meter under terræn (Ny-bølle). Tre af lokaliteterne findes i mere sandede omgivelser. Disse er Stampevej i Vestjylland på kanten af en bakkeø med miocæne lag tæt under terræn, Hanehøjvej i et område præget af sand ovenpå kalk og Rygesmindevej i Midtjylland med tynde lag af moræneler ved terræn ovenpå smeltevandssand og miocæne sandlag. En enkelt lokalitet (Voldum) findes i et område med moræneler over både kalk og fed tertiær ler.

På 6 ud af de 8 lokaliteter er der kortlagt begravede dale, og i 5 af disse spiller dalene en central rolle for den geologiske forståelse af sagerne. Glacialtekniske forstyrrelser af jordlagene og forkastninger spiller også en rolle for sagerne på flere af lokaliteterne.

8.2 Relevans i forhold til forureningstyper

Som nævnt ovenfor er tTEM-kortlægning blevet testet på flere forskellige grundvandsforureningstyper. Resultaterne viser, at det ikke er af betydning for relevansen, om der er tale om forurening med pesticider eller klorerede opløsningsmidler, og om forureningen stammer fra lossepladser, produktionsvirksomheder eller landbrug m.v. I et enkelt tilfælde har der også været fokus på PFAS, men kun i begrænset omfang. I et andet eksempel, der dog ikke er en del af dette projekt, har tTEM undersøgelser vist sig have meget stor betydning for en sag med kritisk PFAS-forurening (Søballe, Region Midtjylland).

Ved kildepladsopsporingssagen (Skovmølleværket) viste tTEM-kortlægningen sig også som et stærkt værktøj, især fordi et større område skulle afdækkes i forhold til geologiske og hydrogeologiske forhold.

Nogle ionholdige forureningskomponenter kan vise sig som en selvstændig respons i tTEM-data, og under optimale forhold vil udbredelse og form af forureningsfaner af sådanne stoffer i sig selv kunne kortlægges. Dette er dog ikke med sikkerhed set på projektets testlokaliteter.

Da det i de fleste videregående grundvandsforureningssager (uanset forureningstype) er væsentligt at kende til lokalitetens rumlige geologiske forhold, både på detailniveau på selve lokaliteten og mere generelt i nærområdet, er relevansen i højere grad afhængig af, om der af logistiske og infrastruktur-mæssige årsager overhovedet kan udføres tTEM-kortlægning. Fysisk tilgængelighed og nærhed til elinstallationer er ofte afgørende.

8.3 Betydning af tilgængelighed og datadækning

Meget ofte vil detaljerede variationer i de geologiske forhold kræve en tætliggende dataindsamling med tTEM. Her er det vigtigt, at der i det udlagte netværk af tTEM-kørelinjer opnås

korrelation mellem linjerne således, at de geologiske lag og strukturer, der kan udledes af data, hænger sammen i det kortlagte område. Ved mere homogene geologiske forhold, f.eks. med sammenhængende lag over store afstande, er fuld datadækning mindre vigtig, da der her med større sikkerhed kan trækkes information ind fra de kortlagte områder til huller i kortlægningen, der ikke er blevet dækket.

Betydningen af datadækningen er således afhængig af de geologiske forhold, og derfor er datadækningen nogle steder vigtig; andre steder mindre vigtig.

Generelt er det ved kortlægningen dog at foretrække, at få så god en datadækning som muligt. Omkostningerne er lave, set i forhold til øvrige udgifter ved videregående grundvandsundersøgelser, og det vil normalt have lille betydning at søge størst mulig datadækning. Dette gælder både på lokaliteten, i nærområdet og i et større område rundt omkring.

Begrænsninger i datadækning har ved de gennemførte testlokaliteter vist sig ikke kun at handle om fysisk tilgængelighed på grund af f.eks. bebyggelse, skov og vådområder. Der er også ofte begrænsede muligheder for at få brugbare data ud af dataindsamlingen i områder med støj fra elinstallationer og kobling af de transmitterede elektromagnetiske felter til kabler, hegn osv. Sidstnævnte begrænsning kan være svær at forudsige på forhånd, men der vil naturligvis være større sandsynlighed for støj og kobling i nærheden af bebyggede arealer, hegn og øvrig infrastruktur. Der var således også områder i de 8 testkortlægninger, der uventet måtte tages ud af datasættet, men disse har generelt ikke været af en størrelsesorden, der har ødelagt muligheden for opnåelse af den ønskede viden.

Et stort antal af regionernes videregående grundvandssager findes i større byer, hvor der således ikke vil være mulighed for at gennemføre relevant tTEM-kortlægning. For at det skal give mening, skal lokaliteten befinde sig i landlige omgivelser eller i mindre eller spredt bymæssig bebyggelse. Iblandt de 8 testlokaliteter blev der udpeget to lokaliteter beliggende i spredt bymæssig bebyggelse (Skovlytoften og Rygesmindevej). Resten er tidligere lossepladser og landbrugsrelaterede lokaliteter i landlige omgivelser.

På de to lokaliteter i spredt bymæssig bebyggelse var det i begge tilfælde ikke muligt at indsamle data på selve lokaliteten, men der kunne indsamles data i spredte, mindre områder i omgivelserne omkring lokaliteterne. Selvom kortlægning på lokaliteterne var ønskværdig, viste det sig, at de spredte data kunne give meningsfulde input til sagsbehandlingen. Dette omfattede information, der enten gennem geologisk tolkning kunne korreleres til de datafattige områder, eller som kunne kortlægge forholdene omkring forureningsfanerne på større afstand. tTEM-kortlægningerne viste sig meget anvendelige i begge tilfælde, selvom lokaliteterne befandt sig i bymæssig bebyggelse.

Tre af testlokaliteterne omfattede tidligere lossepladser. Her har der generelt været dårlig fysisk adgang, og kun dele af punktkildearealerne blev dækket med data under feltarbejdet. Dette var typisk på grund af bevoksning, eller anden begrænsning i terrænet, der umuliggjorde kørsel med tTEM-instrumenterne. Dette på trods af, at der ved alle kortlægningerne er gjort en stor indsats og investeret ekstra tid i at opnå så god datadækning som muligt.

Der hvor det har været muligt at indsamle data på selve lossepladsarealerne, er der nogle steder observeret data med ringe mulighed for modeltilpasning. Dette kan skyldes kobling til f.eks. metalelementer blandt fyldet. Andre årsager kan være stærkt ionholdigt perkolat i affaldet eller såkaldte IP-effekter. De dårligt tilpassede geofysiske modeller kan dermed give en indikation af lossepladsens udbredelse, men betyder også at de geologiske lag ikke kan kortlægges. Udbredelsen af lossepladsen er dog i sig selv nogle steder en vigtig parameter, hvis den ikke kendes præcist i forvejen.

Der er blandt testlokaliteterne ikke umiddelbart registreret IP-effekter, men dette udelukker ikke, at de kan være til stede. IP-effekter kan potentielt indeholde vigtig information, men det er stadig en avanceret udfordring at udtrække den af data. Forskning vil fremadrettet måske kunne gøre dette muligt, hvilket vil være af stor interesse f.eks. i forbindelse med forurening fra tidligere lossepladser.

8.4 Egnethed i forskellige geologiske miljøer

Som nævnt fordeler testlokaliteterne sig over flere forskellige typer af geologiske miljøer. På alle lokaliteter har udbredelse og lateral kontinuitet af lerlag haft stor betydning. Det har generelt været vigtigt at kortlægge udbredelsen og tykkelsen af beskyttende lerlag over enten sekundære eller primære grundvandsmagasiner. Problemstillingen har været at kende lerlagenes evne til at tilbageholde forurening fra at gennemtrænge lerlaget. Dette betyder, at lerlagenes rumlige form har været vigtig at få kortlagt. Med dette menes tykkelsen og variationer heri og ikke mindst forekomst af huller og manglende tilstedeværelse, der vil kunne skabe lækage mellem grundvandsmagasiner og fungere som vinduer for nedsivende forurening. Forstyrrelser i lerlagenes kontinuitet forårsaget af glacial deformation eller erosion fra f.eks. små begravede dale spiller en væsentlig rolle og er observeret og kortlagt på flere lokaliteter. For at der kunne foretages kvalificerede beslutninger om videre tiltag i sagerne eller foretages endelige risikovurderinger, har sådanne forhold været meget vigtige at få overblik over på flertallet af lokaliteterne.

De kortlagte lerlag på lokaliteterne har været forskelligartede og bestået af moræneler, glimmerler (Miocæn), smeltevandssler og fed Palæogen ler. De to sidstnævnte typer træder tydeligt igennem i data og er typisk lette for tTEM-metoden at kortlægge, mens moræneler og glimmerler nogle steder kan være mere udfordrende og diffuse i data. Når moræneler og glimmerler har lave lerindhold (og i realiteten måske er morænesilt/kalkmoræne eller glimmersilt) er de svære at opløse med tTEM-metoden, specielt hvis deres mægtighed er ringe.

Der har på de fleste af lokaliteterne også været fokus på strømningsveje væk fra punktkilderne. Her betyder de ovenfor nævnte lerlag selvfølgelig meget, men det har i sagerne også været vigtigt at kortlægge barrierer, der påvirkede strømningsvejene og dermed forureningsudbredelsen. Barrierer i form af skråtstillede geologiske lag eller begravede dale er kortlagt i nogle af lokaliteterne (Stampevej, Rygesmindevej og Skovlytoften).

Testlokaliteterne i hhv. Nordjylland, Midtjylland og Vestjylland (Hanehøjvej, Rygesmindevej og Stampevej) befinder sig i sandede miljøer i de øvre jordlag (10-60 m). I Nordjylland og Vestjylland har det været muligt at kortlægge vigtige interne lerlag i de sandede lagserier og vurdere disses evne til at beskytte primære magasiner. I Nordjylland var det i et glacialt geologisk miljø, mens det i Vestjylland var et miljø præget af Miocæn geologi. I Midtjylland (Rygesmindevej) var det en blanding af begravede dale og Miocæn geologi.

Kalkmiljøer indeholdende primære grundvandsmagasiner har været kortlagt i 4 af sagerne. I lokaliteterne Nybølle og Voldum har kalken spillet en central rolle, mens det i Hanehøjvej og Skovlytoften har spillet en mere sekundær rolle. Kalkoverfladen er kortlagt med tTEM i alle tilfælde og interne strukturer i form af forkastninger er kortlagt i Hanehøjvej og Nybølle.

På de fleste af lokaliteterne har tTEM desuden hjulpet til en tolkning af geologien på større skala. Dette har været identifikation af større og mere udbredte geologiske elementer, som f.eks. begravede dale, større primære grundvandsmagasiner, variationer i kalkoverflade, gennemgående lag m.m. Denne overordnede forståelse af geologien har været vigtig for bedre at kunne udføre lokale tolkninger af den mere lokale geologi ved selve lokaliteterne.

8.5 Betydning af kortlægningslayout i feltet og den efterfølgende processing

Valg af layout for dataindsamling skal tage udgangspunkt i situationen og den information, man ønsker fra kortlægningen. Hvis der findes data i forvejen i form af tidligere målt geofysik eller udførte boringer, og tTEM her skal anvendes til at verificere en geologisk model eller hypotese, kan kortlægningens udstrækning og datatæthed vælges i forhold til det. Hvis tTEM anvendes i begyndelsen af et kortlægningsforløb, skal der tænkes bredt, og evt. kan kortlægningen udføres i faser, så dataindsamling efterfølgende kan tilpasses det udviklede vidensbehov.

I alle tilfælde har det vist sig, at der bør anvendes en kørehastighed på ca. 15 km/t under dataindsamlingen, og at linjeafstanden i de områder, hvor der ønskes en detaljeret kortlægning, ikke bør overstige 20 meter.

Under databehandlingen skal der arbejdes omhyggeligt med bortskæring af de data, der er påvirket af koblinger til ledninger, kabler og andre metallegemer.

Da tTEM kortlægninger i forbindelse med jordforurening ofte foregår tæt ved områder med infrastruktur, og der ønskes data så tæt ved kilden som overhovedet muligt, er det her ofte nødvendigt at beholde dele af data meget tæt ved en kobling. Dette stiller særlige krav til processingen af data og også til samarbejdet mellem geofysiker og den geolog, som efterfølgende skal udføre den geologiske tolkning og model.

8.6 Anvendelsen af de indsamlede tTEM-data i sagerne

Testkortlægningerne har meget tydeligt vist, at det er vigtigt at inkludere tTEM-kortlægning tidligt i sagsforløbet. Således ville det i 6 ud af de 8 testlokaliteter have været en fordel at have udført kortlægningerne tidligere i sagsforløbet, end det blev gjort. På de fleste af disse lokaliteter vurderes det, at tTEM på et tidligere tidspunkt ville kunne have forkortet sagsforløbet tidsmæssigt, og at der kunne have været sparet på udgifter til andre undersøgelser, typisk boringer.

tTEM har givet grundlæggende informationer om områdernes geologiske forhold og har bidraget til forbedrede konceptuelle modeller – forhold der er vigtige for de indledende beslutninger og planlægning af egnede undersøgelsesstrategier.

Selvom tTEM-kortlægningerne blev udført for sent i forhold til, hvad der havde været ideelt, så bidrog de i de fleste tilfælde alligevel til ændrede sagsgange. Flere steder blev planer for f.eks. boreaktivitet ændret eller stoppet på grund af den nye viden, der blev tilført af tTEM-data.

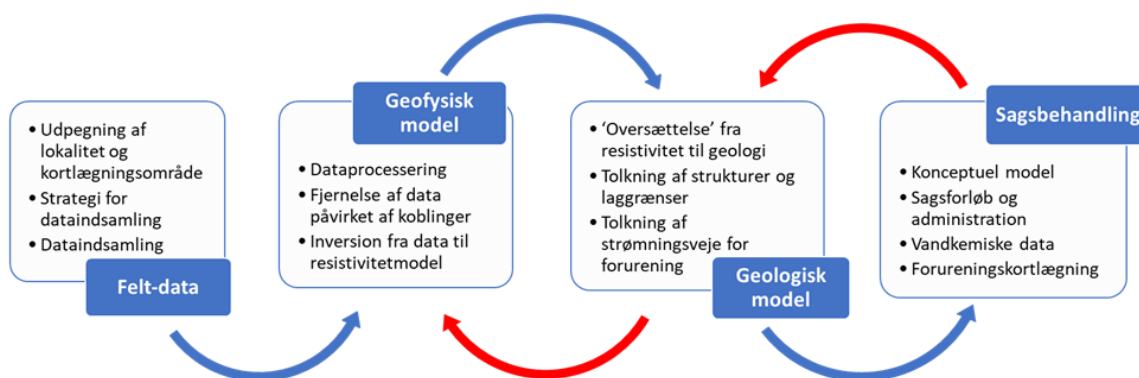
Erfaringerne fra testlokaliteterne har vist, at arbejdet med tTEM-data bør være en integreret del af sagsbehandlingen. I **Figur 33** er vist et anbefalet workflow for arbejdet med tTEM-data i jordforureningssager. Arbejdet starter med indsamling af **felt-data**, men inden dette kan ske, skal lokaliteten vurderes egnet til tTEM-kortlægning, og der skal laves en strategi for dataindsamlingen. Der vurderes faktorer som størrelse og udbredelse af kortlægningsområde, linjetæthed, kørselsretning med mere (se kap. 7.9 og afsnittet ovenfor). Heri indgår vurdering af mulig forureningsspredning, geologiske forhold og mulighed for adgang og datadækning. Generelt må det anbefales, at der ydes en stor indsats for at få indsamlet tætliggende data tæt på kildeområdet, men det er også vigtigt at kortlægge et tilstrækkeligt stort areal rundt om lokaliteten og måske også i retning af eventuelle drikkevandsboringer, så de geologiske strukturer bliver kortlagt i deres helhed og dermed kan ses og tolkes i data (typisk størrelse >100-150 ha).

Efter dataindsamlingen i feltet vil geofysikeren gennemføre en databehandling for at fremstille en **geofysisk model**. Dette omfatter først en dataprocessing, hvor fejlbehæftede og ikke-brugbare rådata frasorteres og derefter bliver data via inversionsalgoritmer konverteret til 1D-

resistivetsmodeller, der dannes for hver 5-10 m langs kørelinjen. Det er disse resistivetsmodeller, der udgør det geofysiske resultat af tTEM-kortlægningen (den geofysiske model). Et meget vigtigt forhold er, at resistivetsmodellerne ikke er unikke, og at flere modeller kan tilpasses lige godt eller tilnærmelsesvist lige godt. Dette betyder, at det ofte vil give mening at studere data og modeltilpasning nærmere, når de geofysiske modeller skal tolkes og forstås i det videre forløb. Af denne årsag er det ofte af stor værdi at arbejde i et iterativt forløb, hvor de geofysiske data og modeller med tilhørende inversionsforløb genbesøges med viden fra andre kilder.

Ovennævnte genbesøg af de geofysiske data sker, når næste trin i processen gennemføres: **Den geologiske model**. I den geologiske model sker en oversættelse af de geofysiske resistivetsmodeller til geologiske forhold, typisk i form af lag, laggrænser, lithologi, dannelsesmiljø og rumlige strukturer. Dette gøres ved at visualisere de geofysiske data via rumligt interpolerede grids, på profiler, på kort og ved at sammenholde data med anden information, der typisk vil bestå af boredata. Som et led i dette arbejde kan der opstå spørgsmål og usikkerhed om tolkningen af de geologiske forhold, som for eksempel eksistensen af vigtige lerlag, og det er her, at genbesøget af de geofysiske data giver mening (rød pil i **Figur 33**). Her kan der f.eks. testes hypoteser, hvor den geofysiske inversion "fodres" med geologisk information, og sandsynligheder for forskellige scenarier kan udledes. Dette arbejde er gjort ved lokaliteterne Hanehøjvej, Stampevej og Skovlytoften.

Det er den geologiske fortolkning, der videreleveres til **sagsbehandlingen**. Her opdateres eller udarbejdes den konceptuelle model for lokaliteten med inddragelse af yderligere data, såsom vandkemi og med anden viden. Allerede inden dette arbejde foretages, bør øvrig viden og data indgå som en del af arbejdet med den geologiske model. Dette for at arbejdet med den geologiske model kan målrettes mod problemstillingen, så overflødigt arbejde undgås (rød pil i **Figur 33**). Under inddragelsen af den geologiske tolkning i sagsbehandlingen, kan der opstå nye spørgsmål, der ønskes besvaret, og her kan det være relevant at gå tilbage til den "geologiske model" og undersøge og tolke data igen med en ny vinkel. Nogle gange kan det endda give mening at gå endnu et step tilbage og udføre supplerende geofysiske tolkninger af rådata. Disse feedback-loops udgør en væsentlig del af implementeringen af tTEM i forureningsundersøgelsen.



Figur 33: Workflow og samarbejde om tTEM. Røde pile viser, hvor samarbejde via feedback loops er vigtig.

8.7 Samarbejde

Arbejdet med geofysiske data i jordforureningssager kræver tæt samarbejde på tværs af flere forskellige fagområder. Ingen kan gennemføre hele processen på egen hånd. Der er behov for viden og ekspertise indenfor geofysik, geologi, hydrogeologi, ingeniørviden og mere generel viden og ekspertise med sagsbehandling. Det er altså en samarbejdsdisciplin med involvering

af personer fordelt på forskellige fagområder. **Felt-data** og **geofysisk model** gennemføres af geofysikere, **geologisk model** af geolog og **sagsbehandling** af sagsbehandlere med f.eks. ingeniørfaglig baggrund – alle med besiddelse af specifik viden og erfaring indenfor de anvendte metoder.

Det har i projektet vist sig nyttigt og meget vigtigt, at der afholdes workshops, hvor parterne mødes fysisk og først præsenterer delresultater for hinanden, hvorefter der udveksles viden og ideer. På disse møder defineres tolkninger og forståelse af data, der udvikles konceptuelle modeller, og der lægges planer for de næste aktiviteter i sagen. Der skal for de forskellige deltagere skabes en basisforståelse for de øvrige fagområder. Særligt er det vigtigt, at sagsbehandleren får et godt indblik i de geofysiske og geologiske aktiviteter. Men det er også vigtigt, at geofysiker og geolog kender til formålet med projektet, så arbejdet kan målrettes mod problemstillingen.

8.8 Betydning for risikovurdering og afværge/monitoring

I alle 8 forureningssager har tTEM-kortlægningen betydet, at risikovurderingerne er blevet forbedret. Eller formuleret på en anden måde: Det vurderes, at risikovurderingerne er blevet bedre og mere sikre, end hvis tTEM ikke var blevet gennemført på lokaliteten. På 3 lokaliteter var der af forskellige årsager dog ikke udarbejdet risikovurderinger ved projektets afslutning, men det blev her forudsat, at tTEM-data vil have en positiv effekt når risikovurderingerne på et tidspunkt skal udarbejdes. Årsagen til forbedrede og mere robuste risikovurderinger med tTEM er typisk, at der på baggrund af den geologiske tolkning og forståelse er opnået øget viden og større sikkerhed om strømningsveje og potentiel forureningsspredning.

På to lokaliteter har tTEM-kortlægningerne endda haft det resultat, at eventuel afværge eller monitoring har kunnet undgås.

8.9 Cost benefit-vurdering

Der er lavet cost benefit-vurderinger for alle testlokaliteter. Resultatet af disse viser, at det stort set altid giver god økonomisk mening at udføre tTEM-kortlægning. På nogle af lokaliteterne er der opnået endog særdeles store økonomiske besparelser. Oftest er det undersøgelsesboringer, der kan spares væk. Den viden tTEM bringer, gør at boringer kan placeres mere optimalt og dermed, at fejlplacerede boringer kan spares væk, og da borearbejde er dyrt at udføre sammenlignet med tTEM, skal der ikke spares ret mange boringer, før en tTEM-kortlægning er tjent hjem.

Flere af cost benefit-vurderingerne er hypotetisk gennemført med henblik på tidspunktet, hvorpå tTEM-kortlægningen blev gennemført i sagsforløbet. Vurderingen er således gennemført under forudsætning af, at tTEM-kortlægningen var blevet udført tidligere i sagsforløbet, altså på et mere optimalt tidspunkt. Dette ville i flere af sagerne kunne have medført større besparelser, end det i virkeligheden var tilfældet.

8.10 Bæredygtighed

Som ovenfor nævnt, er det ofte boringer, der kan skæres bort fra undersøgelsesprogrammet når en tTEM-kortlægning succesfuldt gennemføres. Dette betyder, at en miljømæssigt belastende aktivitet erstattes af en mindre belastende aktivitet. Der er i projektet ikke regnet på disse miljøøkonomiske effekter. tTEM er desuden en noninvasiv metode, hvor der ikke, på samme måde som ved boring, er risiko for kortslutning mellem grundvandsmagasiner og således forøget spredning af forurening. På flere af testlokaliteterne er der med tTEM indsamlet viden om forholdene på stor dybde under kilder eller forureningsfaner. Denne viden kunne ikke være indsamlet ved hjælp af boringer uden risiko for at sprede forureningen.

9. Forslag til fortsat udvikling

Med dette projekt og dets resultater som ballast er der blevet identificeret en række tiltag, der vil kunne bidrage til videreudvikling af hvordan tTEM bedst anvendes i jordforureningssammenhæng:

- Fortsat indsats med at udbrede kendskab og erfaringer med tTEM-kortlægning både internt i regionerne og hos rådgivere, der arbejder med emnet.
- Ændring af traditionelle og fastlåste arbejdsgange hos både regioner og rådgivere og forbedring af samarbejde på tværs af fagligheder, sagsbehandlere og specialister, såvel på tværs af afdelinger hos rådgivere som internt i regionerne og ikke mindst mellem regioner og rådgivere.
- Bedre implementering af metoden hos rådgivere eller/og anvendelse af konstruktioner med underleverandører, der bliver involveret i samarbejdet.
- Oprettelse af kursus specifikt målrettet mod tTEM's anvendelse i jordforureningssammenhæng.
- Implementering og anvendelse af den udarbejdede vejledning.
- Målrettet videreudvikling af tTEM metoden og evt. andre geofysiske metoder, specifikt med henblik på anvendelsen indenfor grundvandsforurening fra punktkilder.
- Målrettet videreudvikling af software, herunder geofysiske processering- og tolkningsværktøjer samt geologiske modelværktøjer specifikt med henblik på anvendelsen indenfor grundvandsforurening fra punktkilder.
- Sidstnævnte punkter drives ved at brugere af data er aktive i forhold til at formulere ønsker og krav til instrumenters og softwares evne til:
 - at indsamle kvalitetsdata på relevante lokaliteter
 - at opløse typiske kritiske geologiske strukturer
 - at undertrykke indflydelse fra støjkluder
 - at identificere kunstige artefakter i tolkede modeller.

10. Vejledning

På baggrund af projektets resultater er der blevet udarbejdet et dokument med anbefalinger (en vejledning) for brugen af tTEM i forureningssager:

Edsen, A., Okholm, D. J. & Jørgensen, F., 2026: Vejledning i anvendelsen af tTEM ved grundvandsforurenings-undersøgelser.

En af barriererne for brugen af tTEM i jordforureningssammenhæng er, at der ofte er stor usikkerhed overfor, hvordan en tTEM-kortlægning skal gennemføres – dette f.eks. i forhold til hvilke krav, der skal stilles til dataindsamling og til den efterfølgende databehandling og præsentation af datakvalitet og geofysiske resultater. Det er avanceret teknologi, der er mange faldgruber, og det er svært som kunde at gennemskue produktet. Der har derfor været et stort behov for en sådan vejledning.

Vejledningen udgives som et selvstændigt dokument.

11. Konklusioner

Nogle af projektets vigtigste konklusioner er opstillet i følgende punkter:

tTEM's evne til at kortlægge geologi og strømningsveje:

- tTEM-metoden har et stort potentiale for at levere data af høj kvalitet og detaljeringsgrad til 3D-kortlægning af den overfladenære undergrund (typisk de øverste ca. 50-70 meter), som er meget relevant ved videregående undersøgelser af punktkilder.
- tTEM muliggør kortlægning af varieret og kompleks geologi, herunder mindre strukturer, der er afgørende for risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder.
- Metoden har vist sig særligt effektiv til at kortlægge beskyttende lerlag samt at identificere brud og forstyrrelser i disse lag.
- tTEM-kortlægning er relevant uafhængigt af forureningstype (pesticider, klorerede opløsningsmidler, PFAS) eller kildetype (lossepladser, industri, landbrug).

Betydning for risikovurdering og sagsforløb:

- I alle 8 testkortlægninger har tTEM-kortlægningen medført en forbedring af risikovurderingerne, hvilket har resulteret i mere sikre og robuste risikovurderinger.
- tTEM har bidraget med grundlæggende information, der har ført til forbedrede konceptuelle modeller for lokaliteterne.
- På to lokaliteter førte tTEM-kortlægningen til, at afværgeforanstaltninger eller monitoring kunne undgås.
- Det har vist sig at være en stor fordel at inkludere tTEM-kortlægning tidligt i sagsforløbet (ideelt set før den videregående undersøgelse).
- Tidlig anvendelse af tTEM i sagsforløbet fører til en betydelig forkortelse af sagsforløbet og sparer udgifter til andre undersøgelser, primært borerer men også analyseomkostninger.

Økonomisk og praktisk implementering:

- Cost-benefit-vurderinger viser, at det stort set altid giver god økonomisk mening at udføre tTEM-kortlægning, da de økonomiske besparelser på andre undersøgelser ofte er større end udgiften til selve kortlægningen.
- tTEM er en noninvasiv metode, der reducerer miljøbelastende aktivitet og eliminerer risikoen for kortslutning mellem grundvandsmagasiner, som kan opstå ved borerer.
- Samarbejde på tværs af fagligheder er essentielt, og arbejdet bør foregå i et iterativt forløb for at sikre korrekt og optimal anvendelse af de geofysiske data i sagsbehandlingen.
- Der er udarbejdet en vejledning baseret på projektets resultater for bl.a. at imødekomme usikkerheden om, hvilke krav der skal stilles til dataindsamling og -behandling.

Begrænsninger og krav til dataindsamling:

- Den primære begrænsning for tTEM er afhængigheden af fysisk tilgængelighed i feltet samt følsomheden overfor infrastruktur og elektriske installationer, som kan give støj og koblinger.
- For at opnå tilstrækkelig opløsning, må linjeafstanden ikke overstige 20 meter i de områder, hvor der ønskes detaljeret kortlægning, og kørehastigheden under dataindsamlingen anbefales at være maks. 15 km/t.
- Selv i spredt bymæssig bebyggelse, hvor kortlægning på selve lokaliteten ikke er mulig, kan data fra omkringliggende områder stadig give værdifuldt input til sagsbehandlingen, herunder opbygning af geologisk model.

12. Referencer

Edsen, A., Okholm, D. J. & Jørgensen, F., 2026: Vejledning i anvendelsen af tTEM ved grundvandsforurenings-undersøgelser.

Jørgensen, F. 2022: tTEM i jord- og grundvandsforurening. Vand og Jord, Nr. 3, 2022, 43-46.

Jørgensen, F. 2023: Skovmølleværket. Tolkninger af tTEM. PowerPoint præsentation.

NIRAS 2019: Skovlytoften 33 og 23-27. Supplerende undersøgelser i kildeområdet samt på Søbakkevej. Rapport udarbejdet for Region Hovedstaden.

NIRAS 2024: Opsamlingsrapport for supplerende undersøgelser udført ved og omkring Rygesmindevej, Them 2021-2023. Region Midtjylland. UDKAST

Sandersen & Jørgensen 2016: Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2015. Søndersødalen (ROS2). GEUS.

WSP 2021a: tTEM kortlægning Skovmølleværket, Svendborg. Datarapport. Region Syddanmark.

WSP 2021b: Skovlytoften 33. Ekstern vurdering. Rapport udarbejdet for Region Hovedstaden.

WSP 2022a: tTEM kortlægning, Them, Datarapport. Region Midtjylland.

WSP 2022b: Supplerende tTEM kortlægning Skovmølleværket, Svendborg. Datarapport. Region Syddanmark.

WSP 2022c: tTEM kortlægning, Søllerød – Datarapport. Rapport udarbejdet.

WSP 2023: Undersøgelse af jordforurenings påvirkning af overfladevand – Søllerød Sø. Rapport udarbejdet for Region Hovedstaden.

Resume

Rapporten beskriver resultaterne af projektet tTEM – ny kortlægningsmetode til risikovurdering af grundvandsforurening fra punktkilder, som havde til formål at udvikle og afprøve anvendelsen af tTEM-teknologien til kortlægning af geologi og vurdering af forureningsspredning fra punktkilder. Projektet blev gennemført af WSP og Region Midtjylland i samarbejde med Region Nordjylland, Region Syddanmark og Region Hovedstaden.

tTEM er en geofysisk metode, der muliggør detaljeret 3D-kortlægning af de øverste 50-70 meter af undergrunden og dermed kan identificere geologiske strukturer, som har betydning for forureningsspredning. Metoden blev afprøvet på otte lokaliteter med forskellige geologiske forhold og forureningstyper. Resultaterne viste, at tTEM i alle sager forbedrede forståelsen af de geologiske forhold og gav et mere robust grundlag for risikovurderinger. I to tilfælde gjorde kortlægningen det muligt at undgå afværgetiltag eller overvågning. Projektet viste desuden, at tTEM med fordel bør anvendes tidligt i sagsforløbet, hvor metoden kan bidrage til en mere præcis konceptuel model og en mere målrettet undersøgelsesstrategi. Det kan reducere behovet for kostbare borer og dermed give betydelige økonomiske besparelser. Samtidig er metoden mere bæredygtig end traditionelle borer, da den er non-invasiv. Projektet har endvidere identificeret anbefalinger til planlægning af feltarbejde og understreget betydningen af et tæt tværfagligt samarbejde mellem geofysikere, geologer og sagsbehandlere. Resultaterne er samlet i en særskilt vejledning om anvendelse af tTEM i forureningssager.



Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk