



## Status for tTEM-kortlægninger, april 2019

Rapport nummer 30-4-2019, April 2019





## Indholdsfortegnelse

Indledning.....	2
tTEM-systemet.....	3
Kortlægningseksempler fra Danmark udført af AU .....	6
Kortlægningseksempler fra Danmark udført af rådgivere .....	22
Kortlægningseksempler fra udlandet.....	24
Referencer .....	30
Appendiks A – tekniske specifikationer.....	31



## Indledning

Denne rapport indeholder en kort oversigt over status for tTEM kortlægning i Danmark og i udlandet. Den er udarbejdet i regi af GeoFysikSamarbejdet for at give et overblik over bredden i anvendelsen af tTEM og samtidig give indtryk af det totale volumen af kortlægninger foretaget i Danmark og i udlandet.

Rapporten vil blive fulgt op af en del 2, hvor der vil blive foretaget sammenligninger mellem tTEM, PACES og ERT/MEP.

Rapporten her er udarbejdet af Jesper Pedersen og Anders Vest Christiansen.



## tTEM-systemet

### Udvikling

Udviklingen af det system, der er blevet til tTEM, begyndte i 2015 med nogle små forsøg med at sende i et meget lille senderloop, der var fastgjort til nogle pæle banket i jorden. Drivkraften var fra starten, at der manglede et geofysisk system, der billigt og hurtigt kunne producere 3D billeder af den overfladenære undergrund (0-70 meter). SkyTEM har ikke tilstrækkelig opløsning helt tæt på overfladen og er for dyrt på mindre områder. MEP kan give den nødvendige opløsning, men er alt for dyrt til andet end korte 2D profiler, og GCM har ikke indtrængning til mere end 5 – 8 m under terræn.

Erfaringerne med GCM havde i 2015 vist, at det var ganske effektivt at trække et system efter en ATV, og resultaterne var rigtig gode i forhold til fladedækning. Det satte en lang række tanker i gang med at lave et TEM system, der kunne trækkes. Der var mange udfordringer på specielt senderteknologien, da senderspolen af praktiske årsager kun er 2 x 4 meter, hvilket betyder, at signalet er lille. Derfor er det nødvendigt at gentage målingerne mange gange og bruge en stor strøm. Det udvikler imidlertid meget varme omkring elektronikken, og det giver også nogle andre problemer, som det tog flere år at løse. Der blev også arbejdet med en modtagerspole i det der hedder 0-position, som kendes fra SkyTEM systemet. Af forskellige grunde kunne det ikke virke, men det tog mere end to år at nå til den erkendelse. Derfor er modtagerspolen placeret ca. 8 meter efter senderen i en offset-position.

Produktion med tTEM begyndte i september 2017, og systemet har kørt næsten uafbrudt siden. Udviklingen er ikke stoppet, og der er udviklet flere generationer af sender- og modtagerplatformen samt elektronik. I 2019 er disse udviklinger langsomt konvergeret imod det nuværende system som er vist i figur 1. Det er et meget stærkt produktionssystem bygget i fiberglas og kompositmaterialer, og der er i høj grad benyttet karbonforstærkede 3D-printede dele. Der er desuden udviklet et navigationssystem, som er afgørende for effektiviteten i felten.



Figur 1. tTEM systemet i aktion.

Den nye platform er meget fleksibel, og der er lavet varianter af systemet til brug på sne (SnowTEM – se figur 2) og på vand (FloaTEM – se figur 3). FloaTEM har været meget benyttet i Mississippi-deltaet i USA og har leveret flotte resultater. SnowTEM systemet har været anvendt i Schweiz og anvendes på Grønland mens dette skrives.



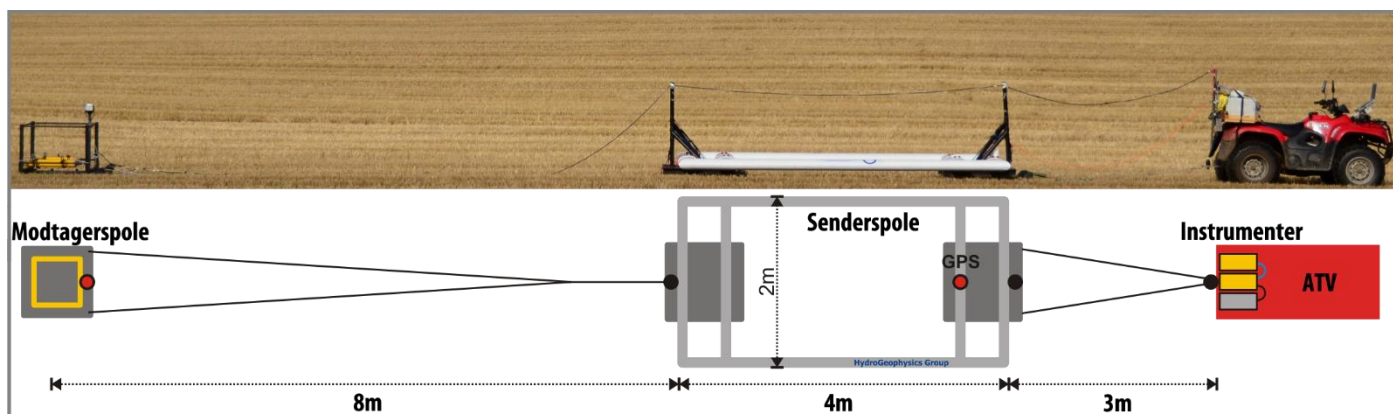
Figur 2. FloaTEM systemet. Senderrammen er monteret på to SUP-boards og modtageren trækkes efter i en lille gummi-båd. Hele systemet slæbes efter en lille motorbåd.



Figur 3. SnowTEM systemet. Mederne på slæderne er gjort bredere så de agerer som ski og hele systemet trækkes af en snescooter.

## Metoden

tTEM er en transient elektromagnetisk metode ligesom TEM og SkyTEM-metoden. Systemet er udviklet med henblik på at opnå en tre-dimensionel geologisk kortlægning af de øverste 30-70 meter af jorden. tTEM-systemet består af to slæder, der trækkes af en ATV (All-Terrain Vehicle) (Figur 1). Alle instrumenterne er monteret bagerst på ATV'en, og forrest er der fastgjort en tablet, så man i real-tid kan se, hvor og hvad man måler. Den forreste slæde bærer en 2x4 meter senderspøle, som genererer en kraftig strøm, og derved dannes et stærkt primært magnetfelt. Når strømmen slukkes abrupt i spolen, vil det primære magnetfelt aftage, hvormed der dannes elektriske hvirvelstrømme i jorden. Hvirvelstrømmene skaber et sekundært magnetfelt, der langsomt vil henfalde over tid. Henfaldsraten af det sekundære magnetfelt måles i en modtager-spøle, som er fastspændt til den anden slæde bag ATV'en. Ud fra henfaldsraten kan man beregne den specifikke elektriske modstand (resistiviteten) af lagene i jorden, da henfaldet af det sekundære magnetiske felt afhænger af modstanden, som igen afhænger af de geologiske lag i undergrunden. F.eks. er ler-aflejringer kendetegnet ved at have en lav resistivitet, og der vil derfor være et langvarigt respons fra disse jordlag, hvorimod der for sand- eller gruslag, som har en høj resistivitet, vil være et kortvarigt respons, idet magnetfeltet hurtigt dør ud. Alle de geofysiske målinger bliver georefereret ved hjælp af en GPS, som er fastmonteret på senderspølen. I appendiks A findes detaljerede tekniske specifikationer på hele tTEM-systemet, såsom placeringen af de enkelte enheder, senderbølgeform og konfiguration af lav- og høj-moment.



Figur 4. tTEM systemet i det første produktions-setup fra september 2017. Dimensionerne er uændrede i det nuværende setup.

Der kortlægges ved hastigheder på 3-5 meter per sekund, og med dette setup kan man typisk opmåle 100-240 hektar per dag ved en linjetæthed på 10-25 meter. Metoden har et meget lille følsomhedsvolumen, eller *footprint*, hvilket giver en lateral opløselighed helt ned på 3-10 meter, hvormed der kan kortlægges tredimensionale strukturer på mark-skala. Metodens lille footprint giver endvidere den fordel, at man kan komme betydeligt tættere på støjklude såsom højspændingsledninger, elektriske kabler og andre menneskeskabte installationer, som normalt forstyrrer elektromagnetiske målinger.

### Databehandling

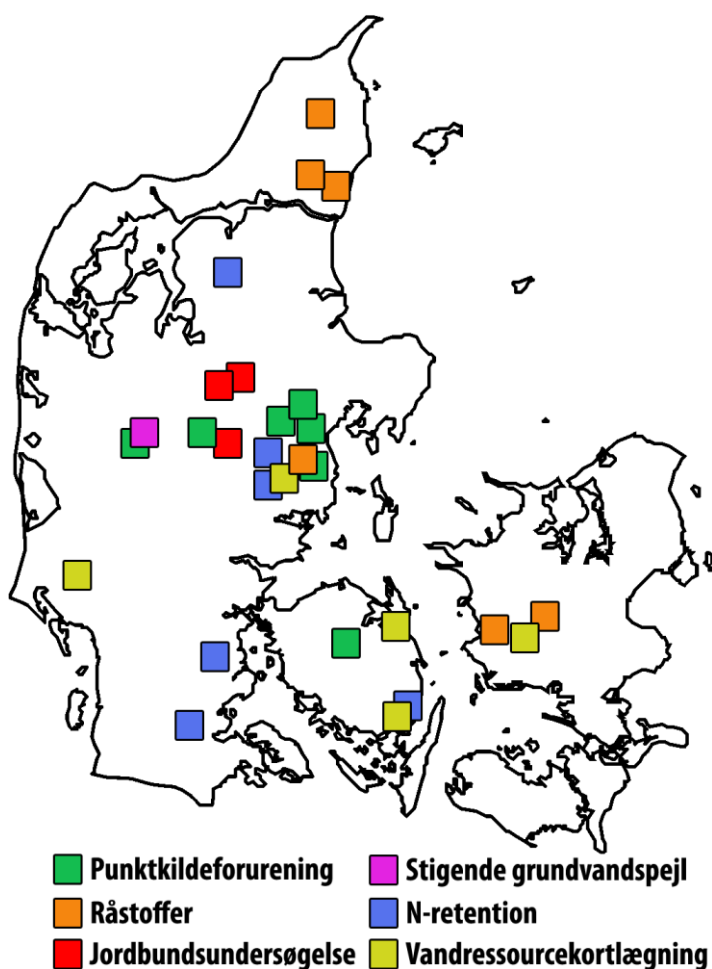
Tolkning af tTEM data foretages i Aarhus Workbench med et designet tTEM modul. I udviklingen af dette modul er der arbejdet med at optimere dataflowet og så mange processer som muligt er automatiseret. Data importeres direkte i de formater instrumentet leverer, de filtreres for vibrations- og 50 Hz støj og der beregnes usikkerheder på hvert enkelt datapunkt. Efter databehandling inverteres data til jordmodeller med velkendte teknikker såsom Laterally Constrained Inversion eller Spatial Constrained Inversion.

Metoden er publiceret i en række internationale og danske tidsskrifter. Der er per dags dato 8 artikler/konferencebidrag udgivet og yderligere 3 artikler er udarbejdet/indsendt og under videnskabelig evaluering. Artikler og konferencebidrag fremgår af referenceafsnittet.



## Kortlægningseksempler fra Danmark udført af AU

Det første tTEM-system blev anvendt til at kortlægge N-retention i innovationsfondprojektet rOpen i september, 2017. Kortlægningen foregik ved Javngyde, hvor 1000 hektar blev kortlagt med 10-25 m linjeafstand. Siden da er der på 1,5 år blevet udført yderligere 27 kortlægninger med fokus på kortlægning af punktkildeforureninger, råstoffer, stigende grundvandspejl, vandressource kortlægning, jordbundsundersøgelser og N-retention. I samme periode er der blevet udført 3 kortlægninger i Sverige, 1 på Grønland og 24 kortlægninger i 8 forskellige stater i USA. Figur 1 giver et overblik over de danske kortlægningers lokalitet og formål. I det følgende gennemgås 5 kortlægninger som eksempler, og dernæst listes et overblik over de resterende kortlægningers samarbejdspartnere, formål, størrelse og tidsforbrug.

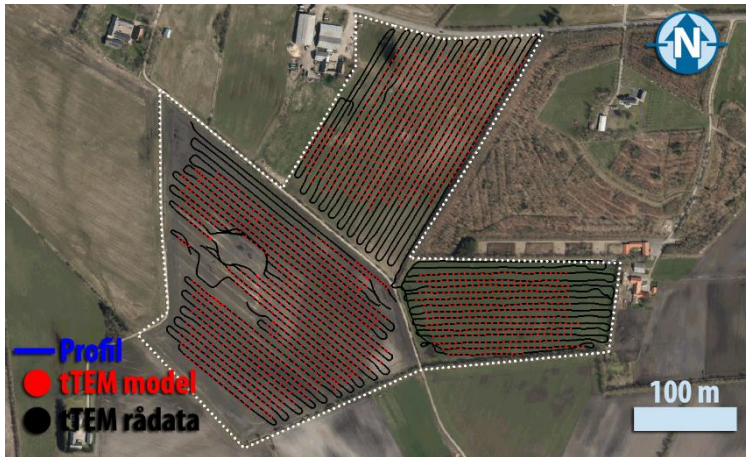


Figur 5. Overblik over danske tTEM-kortlægninger fra 2017-2019.



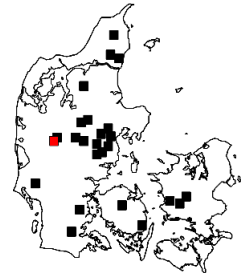
# 1. Optimeret risikovurdering af jordforureninger

EU-Interreg Topsoil projekt med Region Midtjylland



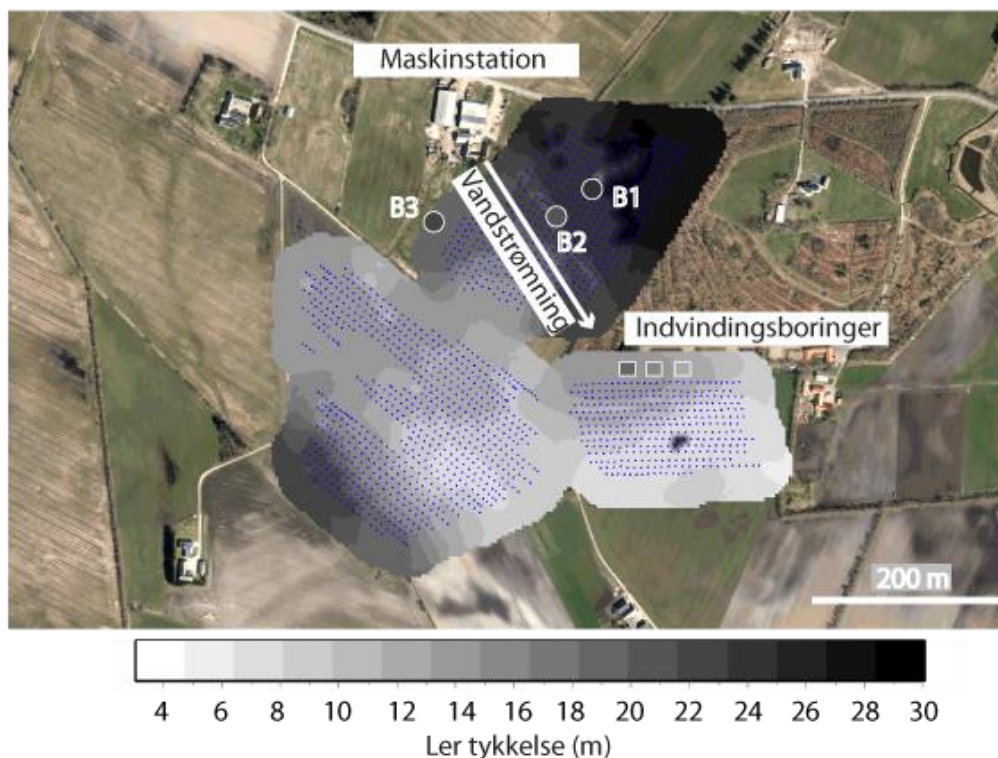
OMRÅDE	VILDBJERG
<b>GEOLOGI</b>	Moræneler, miocænt kvartssand og glimmerler.
<b>STØRRELSE/TID</b>	29 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	29
<b>LINJE-AFSTAND</b>	10 m

**Formål:**  
Kortlægning af lerdæklag omkring pesticidforurening 200m opstrøms fra vandindvinding



## Resultater

Ved en maskinstation uden for Vildbjerg er der lokaliseret en pesticidforurening i forbindelse med en maskinstation. Vandstrømningen er sydøst og dermed direkte mod Vildbjerg vandværks indvindingsboringer. Fra eksisterende boringer (B1, B2, B3) er der viden om et lag af glimmerler med en vis tykkelse, men det kan ikke konstateres, om laget er konstant og uden vinduer til det underliggende magasin. Med tTEM er der kortlagt mellem maskinstationen og vandværksboringerne. Med tTEM kan man få et detaljeret billede af den lokale geologi, og dermed vurdere mulighederne for spredning af perkolat via kortlægning af den rumlige variation af ler- og sandlag. Figuren nedenfor viser tykkelsen af lerlaget jf. tTEM-målinger og boringer. Som det fremgår, er tykkelsen af glimmerleret mere end 15 meter alle steder, og der er ingen vinduer. Dermed er der en lille risiko for spredning af forureningen mod sydøst. Denne viden ville være vanskelig og omkostningstung at opnå alene med boringer.







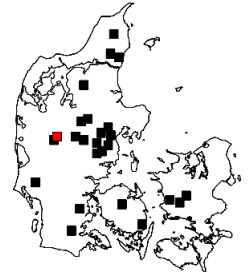
## 2. Geologisk kortlægning på land og til vands

EU-Interreg Topsoil projekt med GEUS, Region Midtjylland, Herning Kommune og Herning Vand



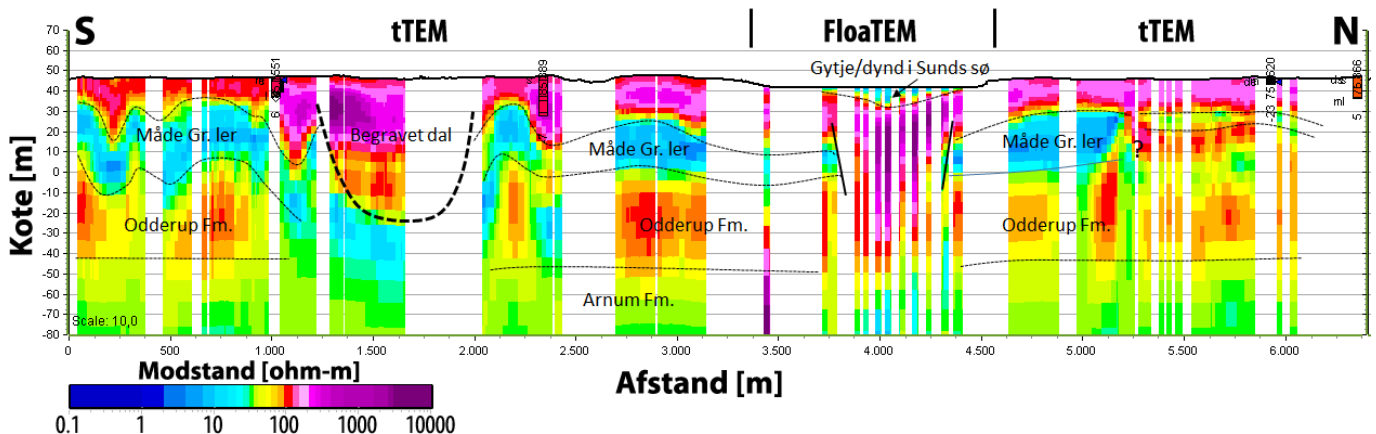
OMRÅDE	SUNDS
<b>GEOLOGI</b>	Hedeslette over Miocænt kvartssand og ler fra Måde fm.
<b>STØRRELSE/TID</b>	816 hektar/8 dage
<b>LINJE-KM</b>	326,4
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

**Formål:**  
Geologisk kortlægning på land og sø for at forstå det hydrologiske system og forstå og afværge stigende grundvandsspejl i og omkring Sunds by.



### Resultater

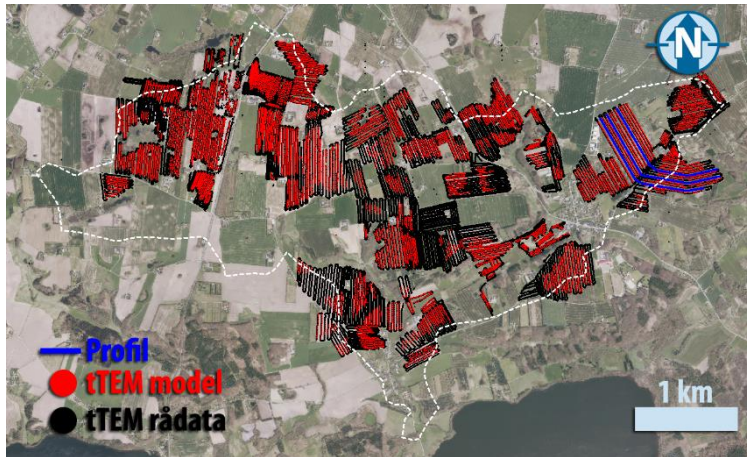
Sunds by ligger omkring Sunds sø midt på hedesletten, kendetegnet ved flad topografi og sandede aflejringer. Grundvandsspejlet i byen og i de omkringliggende dyrkede arealer ligger meget overfladenært og reagerer hurtigt på nedbørsevents, hvilket har betydet, at kældre ofte oversvømmes i byen, og markerne ligger våde. Denne udvikling forventes kun at forværres i forbindelse med renovering af byens kloaksystem og de forventede øgede nedbørsmængder i fremtiden grundet klimaforandringer. En geologisk kortlægning med tTEM og FloaTEM blev derfor initieret for bedre at forstå det hydrologiske system omkring og under Sunds by/sø. Inden projektets start var den gængse forståelse af områdets geologi, at det var en stor sandkasse ned til mere end 20 m dybde, men de geofysiske målinger har vist, at dette er langt fra sandheden. Skraber man de øverste 20 m smeltevandssand væk, dukker der glacielt deformerede lerlag fra Måde-gruppen op, vekslende med miocænt sand. Lagene er stærkt forstyrrede. Ligeledes ses en tyk gytje-aflejrung (10-20 m) under dele af Sunds sø. Ler- og gytjelagenes rumlige udstrækning har stor betydning for det hydrologiske kredsløb, og det forventes, at man med den nye viden vil kunne klimasikre landbrugsarealerne rundt om Sunds sø, og selve Sunds by.





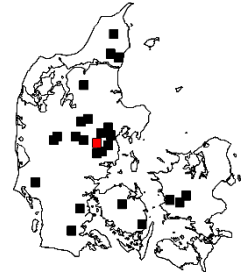
### 3. Markskala nitrat-retentionskortlægning

Innovationsfondprojektet rOPEN



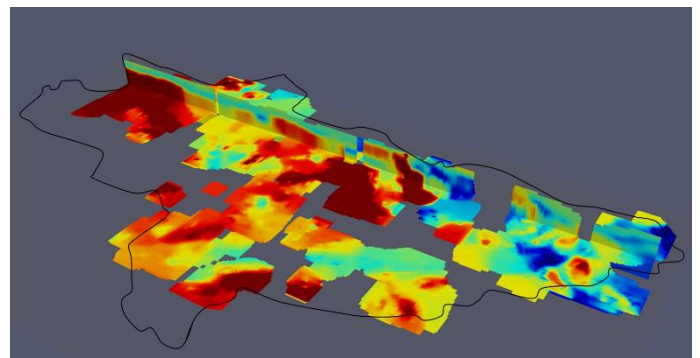
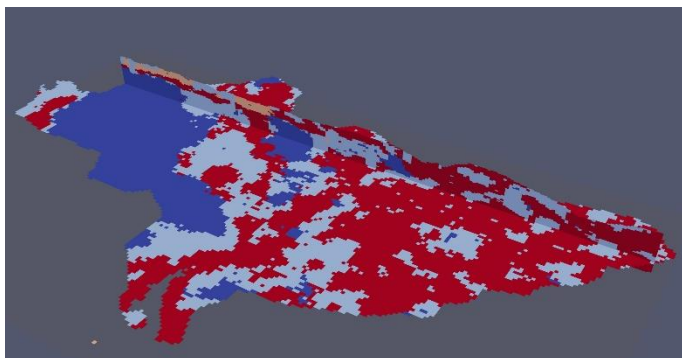
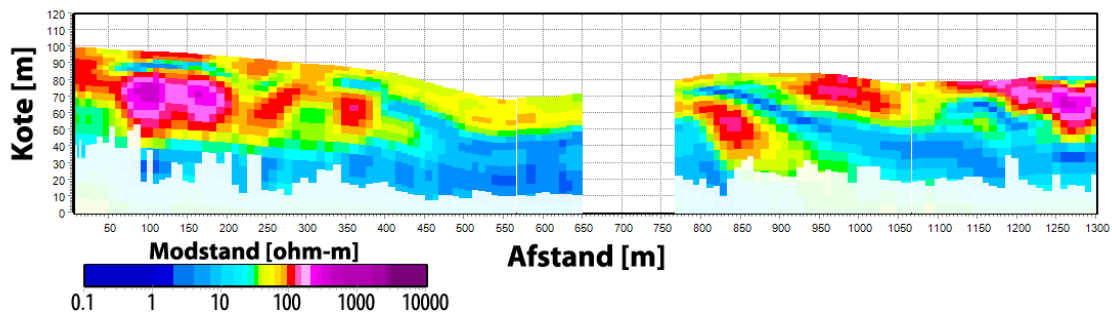
OMRÅDE	JAVNGYDE
<b>GEOLOGI</b>	Smeltevandssand og ler fra Måde-formationen
<b>STØRRELSE/TID</b>	1001 hektar/11 dage
<b>LINJE-KM</b>	400,4
<b>LINJE-AFSTAND</b>	10-25 m

**Formål:**  
Geologisk kortlægning på mark-skala for at udvikle automatiserede N-retentionskort i ID15 oplande.



#### Resultater

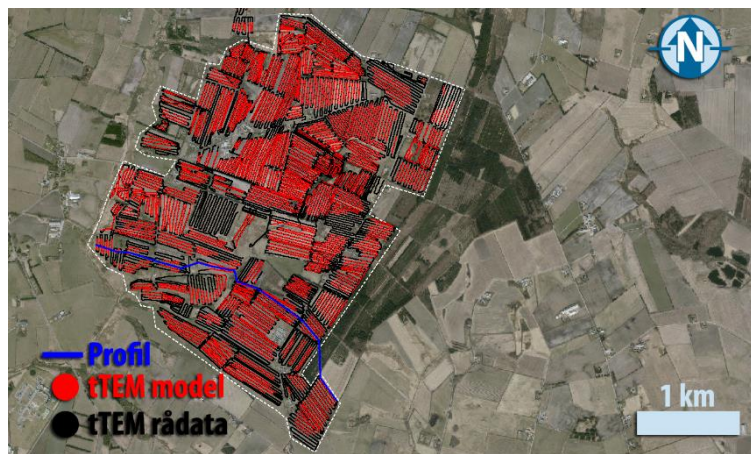
Formålet med rOPEN er at udarbejde et værktøj til vurdering af kvælstoftilbageholdelse på markskala. To ID15 oplande (Javngyde og Sillerup) er udvalgt som pilotområder og der er foretaget geofysiske, geokemiske og hydrologiske undersøgelser i oplandene. Der kortlagt med tTEM på landbrugsarealerne, og resultaterne omsættes til en hydrostratigrafisk model, der kobles med landbrugspraksis og redox-kortlægning for at producere N-retentionskort i et transparent og datadrevet mworkflow. Nedenstående figurer viser øverst den komplekse geologi, der kortlægges med tTEM langs et profil i den nordøstlige del af området. Derunder ses en enkelt realisation af den auto-generede hydrostratigrafiske model sammenholdt med det tilsvarende billede af resistiviteten. I oversættelsen fra resistivitet til hydrostratigrafi anvendes ACT-konceptet som inkluderer alt relevant information fra boringer. Et af konceptets styrker er, at alle usikkerheder håndteres således at der sammen med det endelige retentionskort også kan produceres usikkerhedskort til brug for administrationen af arealanvendelsen.





## 4. Sårbarhedskortlægning og etablering af nyt kildefelt

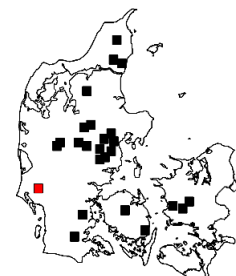
EU-Interreg Topsoil projekt med GEUS og DIN Forsyning



OMRÅDE	VARDE
<b>GEOLOGI</b>	Smeltevandssand og ler fra måde formationen
<b>STØRRELSE/TID</b>	906 hektar/10 dage
<b>LINJE-KM</b>	326,4
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

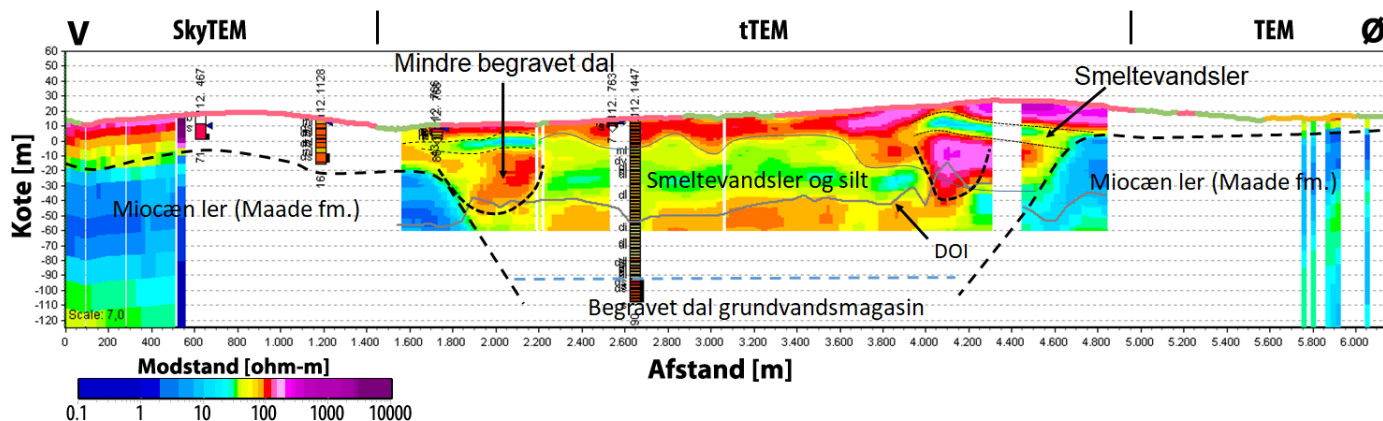
### Formål:

Detaljeret kortlægning for at lokalisere begravet dal og vurdere sårbarheden af det potentielle kildefelt



## Resultater

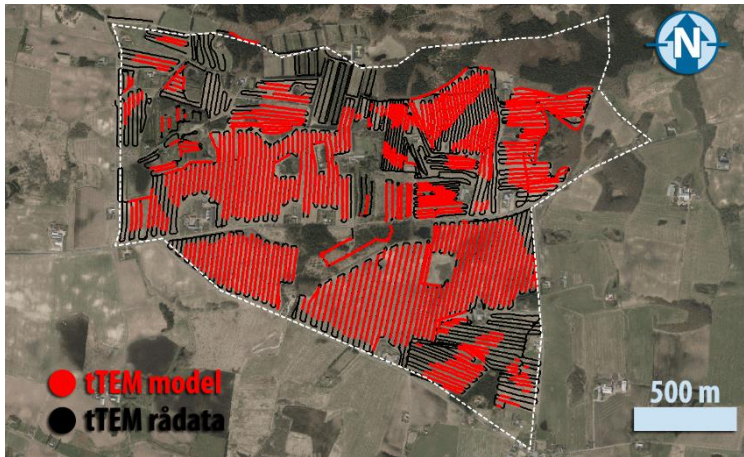
DIN Forsyning står bl.a. for vandforsyningen til indbyggerne i Varde. Der er inden for de seneste par år fundet BAM i drikkevandet i Varde by, og nyere undersøgelser har vist, at der også er problemer med stofferne DMC og DPC i vandværker uden for byen. Eksisterende borer er truet af miljøfremmede stoffer og som en konsekvens er forsyningen på jagt efter et nyt kildefelt, og i denne proces blev tTEM inddraget for at kortlægge den rumlige afgrænsning af en begravet dal nær Varde. En vurdering af grundvandsmagasinet sårbarhed var ligeledes en høj prioritet. Til dette formål er tTEM-metoden særdeles anvendelig, da systemet har en unik vertikal opløsning i de øverste 30 m. Mægtigheden af lerlag i de øverste 30 m er typisk bestemmende for, om et grundvandsmagasin er sårbart. Desto tykkere lerpakke, desto mere robust er magasinet over for f.eks. nitrat. tTEM-resultaterne viser en 2,4 km bred, begravet dal med et mere end 20 m tykt ler-dække. Tidlige vandanalyser i dalen har vist, at vandkvaliteten er god, så med baggrund i de geofysiske undersøgelser og de udførte borer, er det er forventningen, at der kan etableres et nyt kildefelt i området.





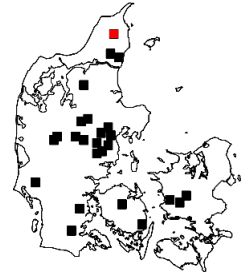
## 5. Kortlægning af potentielle råstofforekomster

Udviklingsprojekt med Orbicon og Region Nordjylland



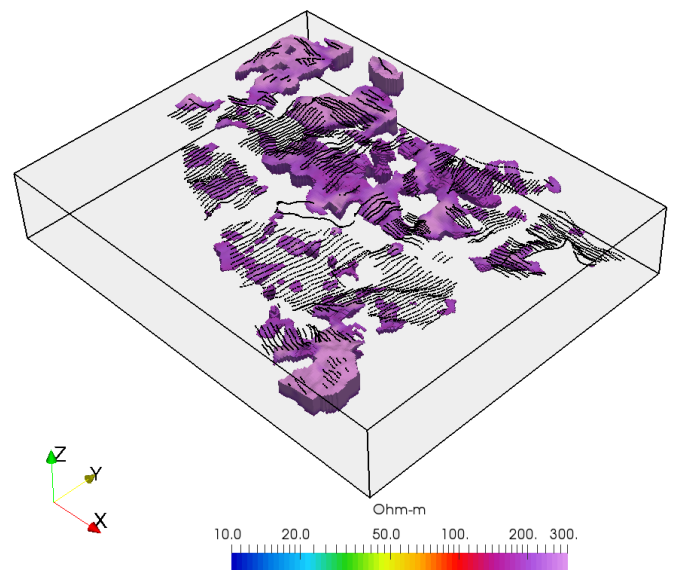
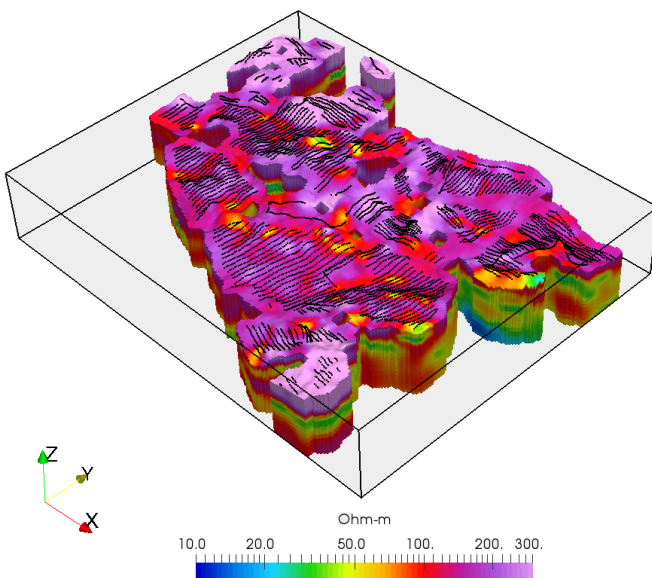
OMRÅDE	STENDALMARK
<b>GEOLOGI</b>	Smeltevands-sand og ler-aflejringer. Marine aflejringer.
<b>STØRRELSE/TID</b>	365 hektar/3 dage
<b>LINJE-KM</b>	146
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

**Formål:**  
Kortlægning af sand/grus råstoffer til at understøtte udvikling af infrastruktur



### Resultater

En stabil grus-forsyning er kritisk for at kunne udbygge og vedligeholde landets infrastruktur så som veje, jernbaner og lang række projekter inden for byggebranchen. Der er derfor behov for at lokalisere nye grusgrave med en kost-effektiv fremgangsmåde, da det ville være for omkostningstungt at finde nye graveområder vha. borerer alene. I et udviklingsprojekt med Orbicon og Region Nordjylland blev et 365 hektar stort område kortlagt med tTEM for at vurdere metodens anvendelighed til at identificere råstoffer. Kortlægningen er udført som led i regionens råstofplanlægning, som skal sikre, at der er udlagt tilstrækkelige arealer, hvor der findes råstoffer til de kommende 12 års forbrug. Det 365 hektar store område blev kortlagt på kun 3 dage, og store områder med høje modstande blev lokaliseret. Ved hjælp af tTEM-kortlægningen har Regionen nu en meget præcis rumlig afgrænsning af potentielle grusforekomster, og de kan dermed placere opfølgende undersøgelser på et solidt grundlag. Nedenstående figur viser et 3D billede af kortlægningsresultaterne. Til venstre ses hele volumet med konduktive lag og højmodstandslag, og til højre ses et iso-resistivitetskort med en afskæringsværdi på 200 ohm-m, så kun højmodstandslagene fremgår.





## Jordbundsundersøgelse ved byggemodning

Udviklingsprojekt med Agro, AU



### OMRÅDE

### VEJRUMBRO

**STØRRELSE/TID**

10 hektar/<1 dag

**LINJE-KM**

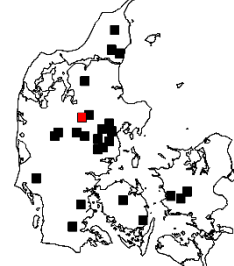
20

**LINJE-AFSTAND**

5 m

### Formål:

Kortlægning af jordbunden for at udpege eventuelle våde områder på byggemodningsarealer



## Forbedret dræning af marker ved jordbundsundersøgelse

Udviklingsprojekt med SEGES



### OMRÅDE

### SALTEN

**STØRRELSE/TID**

31 hektar/<1 dag

**LINJE-KM**

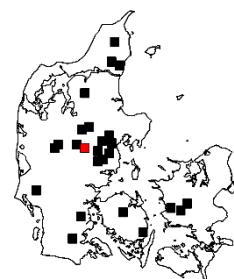
31

**LINJE-AFSTAND**

10 m

### Formål:

Kortlægning af jordbunden for at undersøge hvorfor der opstår våde områder på marker, og hvordan de kan afhjælpes





## Jordbundsundersøgelse for at forstå det hydrologiske kredsløb

Udviklingsprojekt med Agro, AU



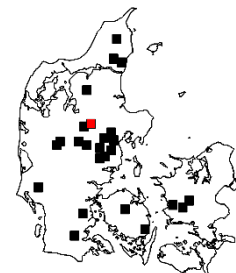
### OMRÅDE

### JUELSGÅRD

<b>STØRRELSE/TID</b>	28 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	11,2
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

Kortlægning af jordbunden for at forstå det hydrologiske kredsløb i den overfladenære geologi



## Optimeret risikovurdering af jordforureninger

EU-Interreg Topsoil-projekt med Region Midtjylland



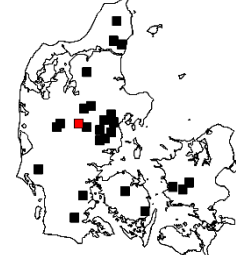
### OMRÅDE

### KJELLERUP

<b>STØRRELSE/TID</b>	67 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	67
<b>LINJE-AFSTAND</b>	10 m

### Formål:

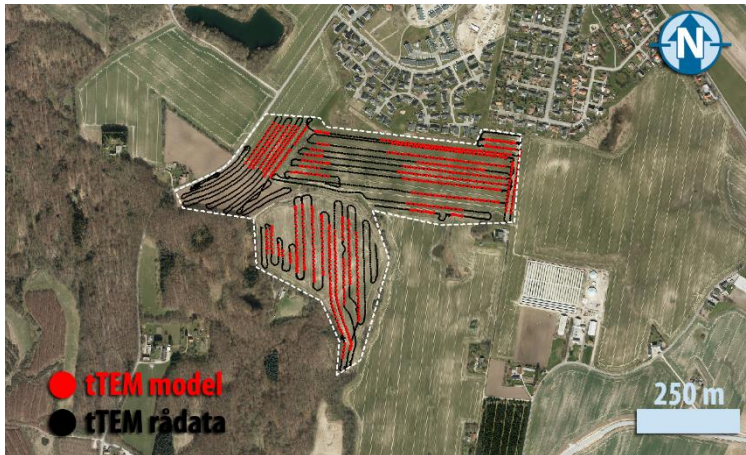
Kortlægning af geologien omkring en punktkildeforurening for at vurdere risikoen for spredning af perkolat til grundvandet





## Optimeret risikovurdering af jordforureninger

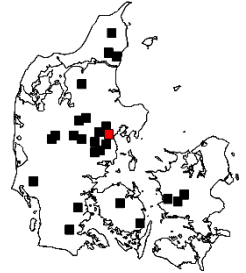
EU-Interreg Topsoil-projekt med Region Midtjylland



OMRÅDE	ELEV
STØRRELSE/TID	31 hektar/<1 dag
LINJE-KM	31
LINJE-AFSTAND	10 m

### Formål:

Kortlægning af geologien omkring en losseplads for at vurdere risikoen for spredning af perkolat til grundvandet



## Optimeret risikovurdering af jordforureninger

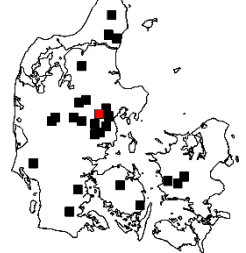
Udviklingsprojekt med Region Midtjylland



OMRÅDE	HARLEV
STØRRELSE/TID	50 hektar/<1 dag
LINJE-KM	20
LINJE-AFSTAND	25 m

### Formål:

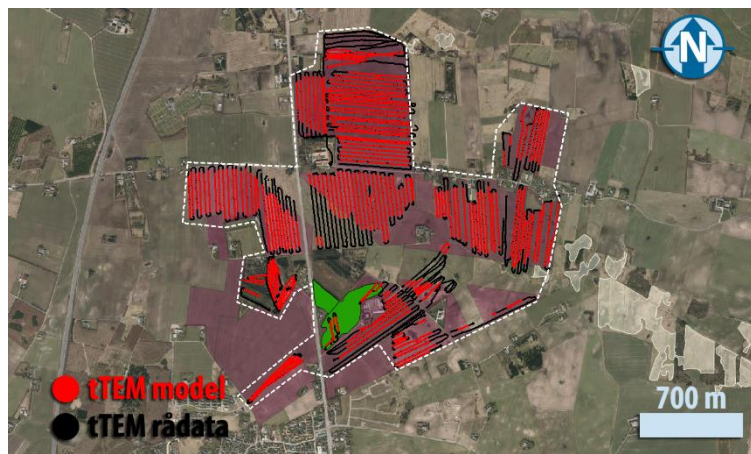
Kortlægning af geologien omkring en losseplads for at vurdere risikoen for spredning af perkolat til grundvandet





## Optimeret risikovurdering af jordforureninger

Udviklingsprojekt med Region Midtjylland



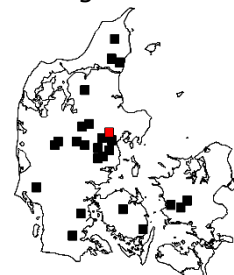
### OMRÅDE

### TRIGE

<b>STØRRELSE/TID</b>	280 hektar/4 dage
<b>LINJE-KM</b>	112
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

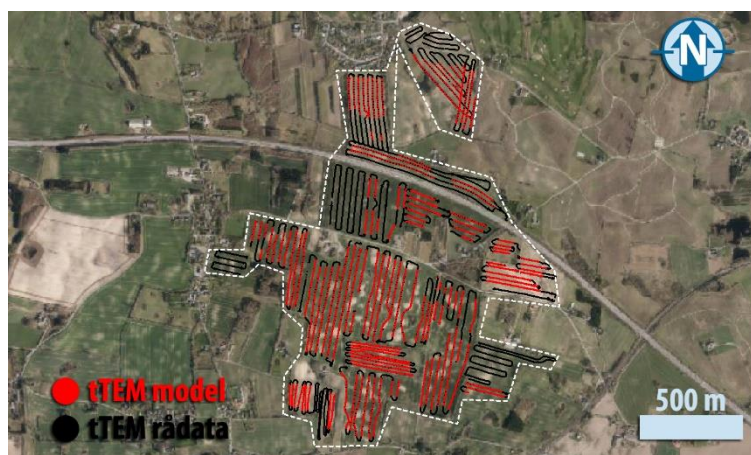
### Formål:

Kortlægning af geologien omkring en losseplads for at vurdere risikoen for spredning af perkolat til grundvandet



## Optimeret risikovurdering af jordforureninger

Udviklingsprojekt med Region Syddanmark



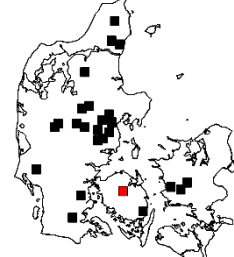
### OMRÅDE

### ODENSE V.

<b>STØRRELSE/TID</b>	174 hektar/3 dage
<b>LINJE-KM</b>	69,6
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

Kortlægning af geologien omkring en række punktkildeforureninger for at vurdere risikoen for spredning af perkolat til grundvandet







## Sårbarhedskortlægning af grundvandsressourcer

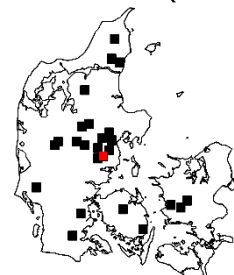
EU-Interreg Topsoil-projekt med Region Midtjylland, Horsens Kommune, og Go-gris



OMRÅDE	GEDVED
<b>STØRRELSE/TID</b>	160 hektar/2 dage
<b>LINJE-KM</b>	64
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

Kortlægning af geologien på en bedrift (Go-gris) for at forstå det hydrologiske system. Resultaterne bruges til at vurdere, hvordan udledningen af kvælstof til Horsens fjord kan reduceres



## Kortlægning på markniveau for at forstå forskelle i N-transport

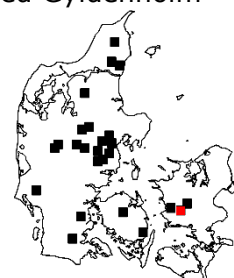
Udviklingsprojekt med Institut for Agroøkologi, AU



OMRÅDE	GYLDENHOLM
<b>STØRRELSE/TID</b>	435 hektar/3 dage
<b>LINJE-KM</b>	174
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

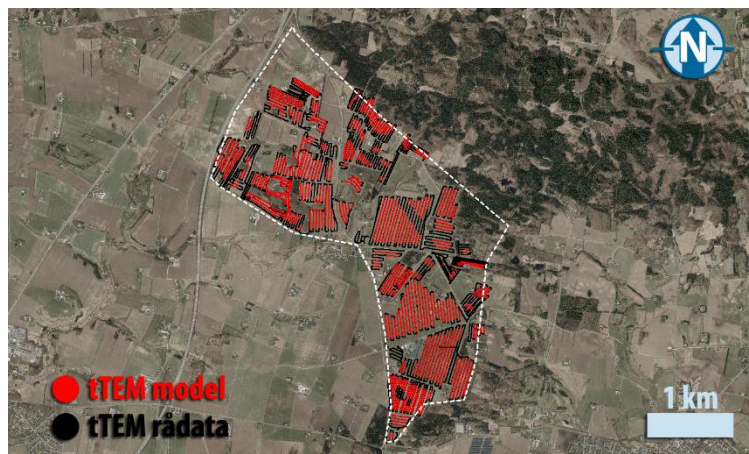
Kortlægning af geologien ved Gyldenholm gods for at opnå en bedre forståelse af forskelle i drænrespons fra tilsyneladende ens marker





## Kortlægning af råstofforekomster

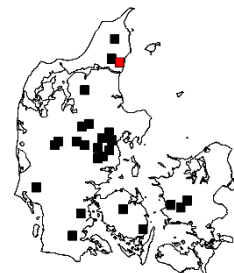
Udviklingsprojekt med Orbicon og Region Nordjylland



OMRÅDE	DRONNINGLUND
STØRRELSE/TID	470 hektar/4 dage
LINJE-KM	188
LINJE-AFSTAND	25 m

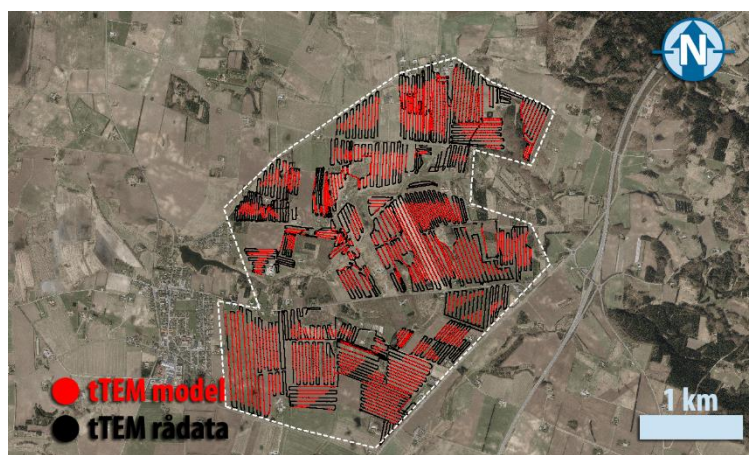
### Formål:

Kortlægning af sand/grus-råstoffer til at understøtte udvikling af infrastruktur



## Kortlægning af råstofforekomster

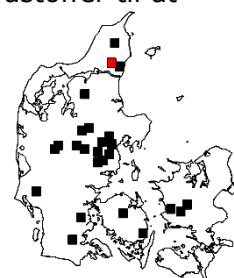
Udviklingsprojekt med Orbicon og Region Nordjylland



OMRÅDE	KLOKKERHOLM
STØRRELSE/TID	486 hektar/5 dage
LINJE-KM	194,4
LINJE-AFSTAND	25 m

### Formål:

Kortlægning af sand/grus-råstoffer til at understøtte udvikling af infrastruktur





## Kortlægning af råstofforekomster

Udviklingsprojekt med Region Midtjylland



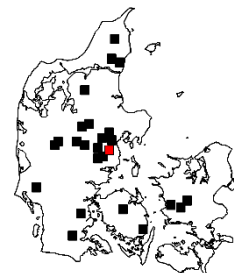
### OMRÅDE

### JEKSEN

<b>STØRRELSE/TID</b>	25 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	10
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

Kortlægning af sand/grus-råstoffer til at understøtte udvikling af infrastruktur



## Kortlægning af råstofforekomster

Udviklingsprojekt med Orbicon og Region Sjælland



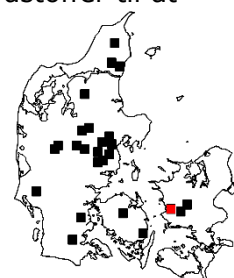
### OMRÅDE

### FORLEV

<b>STØRRELSE/TID</b>	120 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	48
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

Kortlægning af sand/grus-råstoffer til at understøtte udvikling af infrastruktur





## Kortlægning af råstofforekomster

Udviklingsprojekt med Rambøll og Region Sjælland



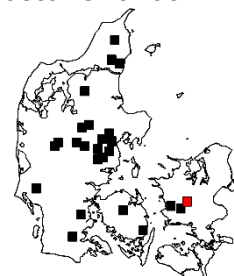
### OMRÅDE

### SORØ

<b>STØRRELSE/TID</b>	51 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	20,4
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

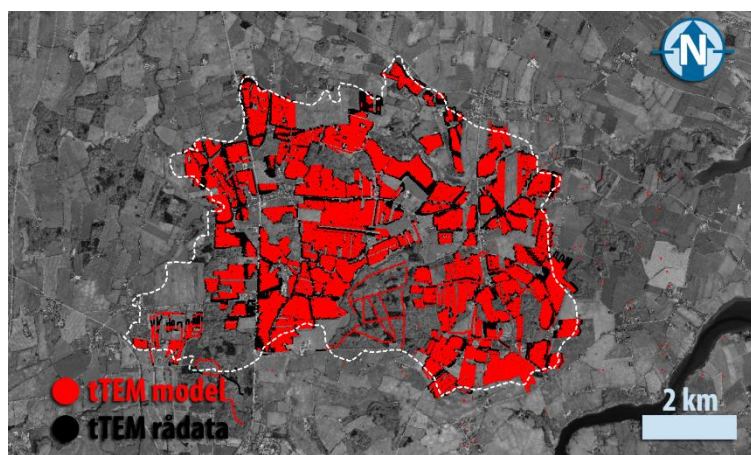
### Formål:

Kortlægning af sand/grus-råstoffer til at understøtte udvikling af infrastruktur



## Markskala nitrat-retentionskortlægning

Innovationsfondprojektet rOPEN



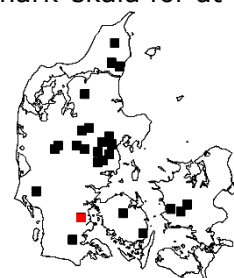
### OMRÅDE

### SILLERUP

<b>STØRRELSE/TID</b>	2144 hektar/24 dage
<b>LINJE-KM</b>	857,6
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m

### Formål:

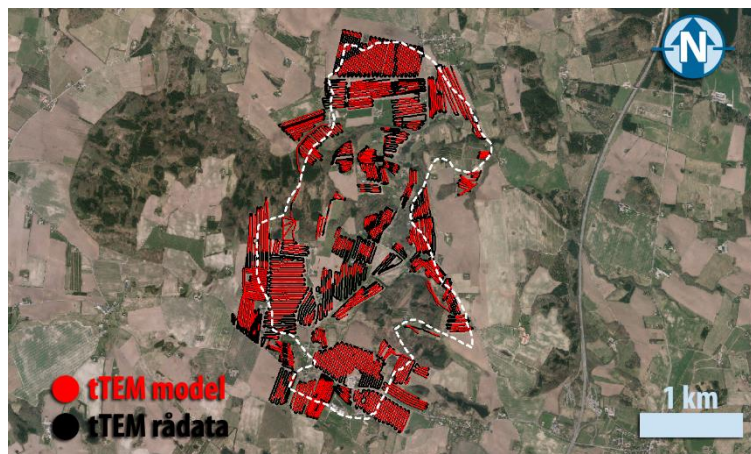
Geologisk kortlægning på mark-skala for at udvikle automatiserede N-retentionskort i ID15 oplande.





## Markskala nitrat-retentionskortlægning

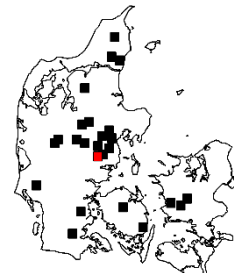
Innovationsfondprojektet MapField



OMRÅDE	EJER BAUNEHØJ
STØRRELSE/TID	545 hektar/6 dage
LINJE-KM	218
LINJE-AFSTAND	25 m

### Formål:

Geologisk kortlægning på mark-skala for at udvikle automatiserede N-retentionskort i ID15 oplande.



## Markskala nitrat-retentionskortlægning

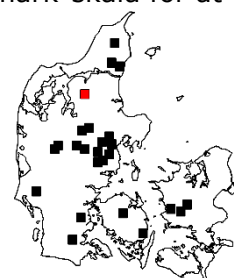
Innovationsfondprojektet MapField



OMRÅDE	AARS
STØRRELSE/TID	1140 hektar/8 dage
LINJE-KM	456
LINJE-AFSTAND	25 m

### Formål:

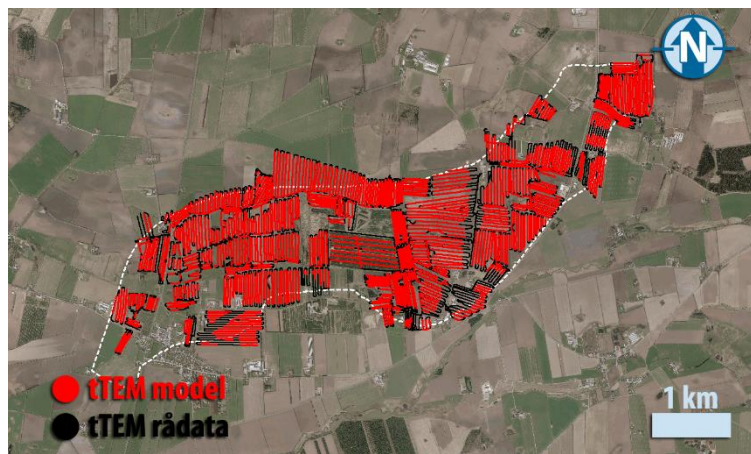
Geologisk kortlægning på mark-skala for at udvikle automatiserede N-retentionskort i ID15 oplande.





## Markskala nitrat-retentionskortlægning

Innovationsfondprojektet MapField



### OMRÅDE

### BOLBRO

**STØRRELSE/TID**

761 hektar/5 dage

**LINJE-KM**

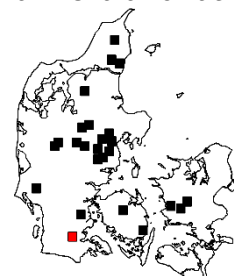
304,4

**LINJE-AFSTAND**

25 m

### Formål:

Geologisk kortlægning på mark-skala for at udvikle automatiserede N-retentionskort i ID15 oplande.

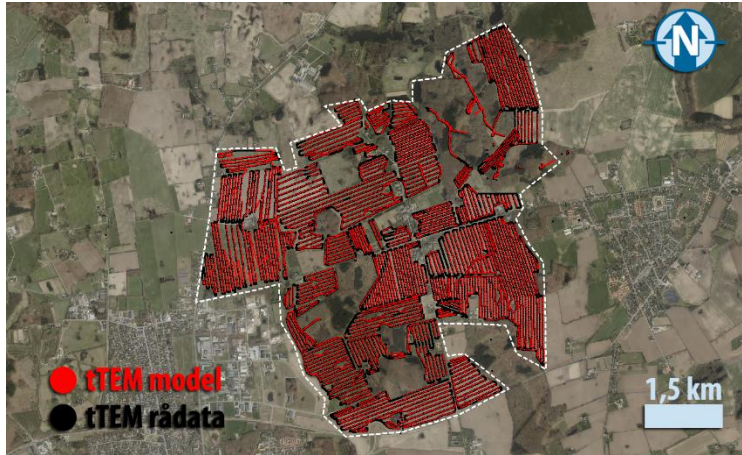




## Kortlægningseksempler fra Danmark udført af rådgivere

### Kortlægning af grundvandsressourcen

Kortlægning udført af NIRAS for Svendborg vand og affald



OMRÅDE	SVENDBORG
STØRRELSE/TID	500 hektar/4 dage
LINJE-KM	200
LINJE-AFSTAND	25 m

#### Formål:

Detaljeret kortlægning for at undersøge udbredelsen af grundvandsressourcen og overliggende lerlag.



### Optimeret risikovurdering af jordforureninger

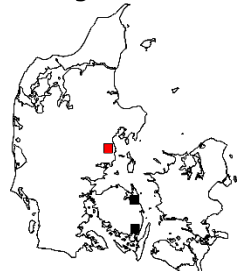
Kortlægning udført af NIRAS for Region Midtjylland



OMRÅDE	MALLING
STØRRELSE/TID	16 hektar/<1 dag
LINJE-KM	6,4
LINJE-AFSTAND	25 m

#### Formål:

Kortlægning af geologien omkring en punktkildeforurening for at vurdere risikoen for spredning af pesticider til det primære grundvandsmagasin.





## Identifikation af vandressourcer

Kortlægning udført af Orbicon for Lindøværftet



OMRÅDE	LINDØ
STØRRELSE/TID	102 hektar/<1 dag
LINJE-KM	24
LINJE-AFSTAND	25-200 m

### Formål:

Kortlægning af geologien ved Lindøværftet for at identificere nye vandressourcer til værftets drift.





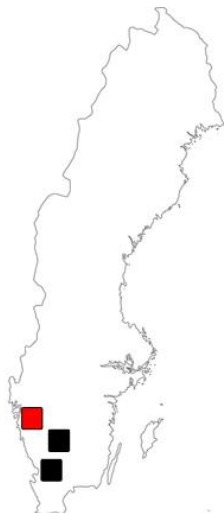


## Kortlægningseksempler fra udlandet

I det følgende vises en oversigt over tTEM/FloaTEM/SnowTEM kortlægninger udført i udlandet siden 2018. Der er kortlagt med tTEM i Sverige og USA, og kortlagt med SnowTEM i Grønland. Der er endvidere kortlagt store arealer med FloaTEM i USA.

### Sverige - Infiltration af vand i Gråbo deltaet

Udviklingsprojekt med Sveriges geologiske undersøgelser (SGU)



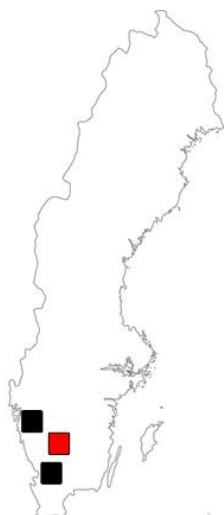
OMRÅDE	GRÅBO
STØRRELSE/TID	52 hektar/<1 dag
LINJE-KM	16
LINJE-AFSTAND	10-100 m
METODE	tTEM

#### Formål:

I nogle områder af det sydlige Sverige er rent drikkevand en mangelvare. Som en konsekvens har SGU påbegyndt en 3D geologisk kortlægning af særlige interesseområder for at vurdere, om der kan infiltreres vand i grus/sand forekomster og dermed etableres en bæredygtig vandforsyning. I indeværende projekt blev en tidligere grusgrav kortlagt for at undersøge dimensionerne af det potentielle grundvandsmagasin og dybden til det underliggende ler/grundfjeld.

### Sverige - Geologisk kortlægning

Udviklingsprojekt med Sveriges geologiske undersøgelser (SGU)



OMRÅDE	GISLAVED
STØRRELSE/TID	2000 hektar/<1 dag
LINJE-KM	13,6
LINJE-AFSTAND	Rekognoscerings linjer
METODE	tTEM

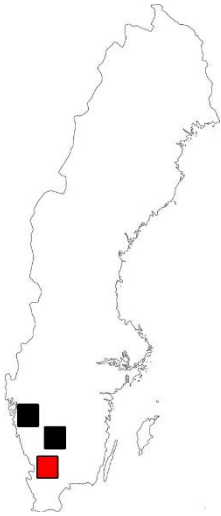
#### Formål:

Sydvest for byen Gislaved løber Nissan åen, som er en meandrende å. Åens forløb har formet landskabet i området, som er kendetegnet ved en kompleks geologi, kendetegnet ved finsorterede sand/grus-forekomster og sporadiske ler-forekomster. I nogle dele af området træffes grundfjeld ved terræn. Der blev udført en række rekognosceringslinjer i det 600 hektar store fluviale sedimentområde for at opnå en ide om den geologiske kompleksitet. En viden, som ville være svær at opnå med borer alene, da geologien varierer så meget.



## Sverige - 3D Geologisk kortlægning

Udviklingsprojekt med Sveriges geologiske undersøgelser (SGU)



OMRÅDE	YLLEVALD
STØRRELSE/TID	64 hektar/<1 dag
LINJE-KM	25,6
LINJE-AFSTAND	25 m
METODE	tTEM

### Formål:

Kortlægningsområdet i Yllevald er kendetegnet ved store topografiske og geologiske forskelle. I nogle områder træffes der grundfjeld ved terræn, hvorimod der i andre områder er ler eller sand. Området er for nylig kortlagt med SkyTEM, men i de øverste 30 m var opløsningen ikke god nok til at kortlægge de komplekse geologiske strukturer. Ved hjælp af tTEM blev området kortlagt med en 3D opløsning (25x10m grid), og der kunne identificeres adskillige tynde ler- og sandlag i de øverste 30 m, og grundfjeldet kunne kortlægges præcist.

## Grønland - Lokalisering af tabte motordele

Udviklingsprojekt med den danske og franske havarikommission



OMRÅDE	INDLANDSISEN
STØRRELSE/TID	20000 hektar/1 måned
LINJE-KM	4000
LINJE-AFSTAND	5 m
METODE	SnowTEM

### Formål:

I 2017 var der et motorhavari fra et Airbus rutfly. Motordelene landede i det sydvestlige Grønland, men man har ikke kunne finde alle dele og dermed opklare præcist, hvad der forårsagede havariet. Havarikommissionen har udpeget et 10x20 km stort nedslagsområde, hvor dele af området skal kortlægges med to SnowTEM-systemer i det håb, at man kan lokalisere de tabte motordele. Indlandsisen er kendetegnet ved høj elektrisk modstand, så eventuelle motordele vil fremstå som koblinger i SnowTEM-udstyret.



## USA - Hydrogeologisk kortlægning på floderne og stormsikring i Mississippi deltaet

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



OMRÅDE	MISSISSIPPI DELTAET
STAT	Mississippi
STØRRELSE/TID	352 km/7 dage
LINJE-KM	352
LINJE-AFSTAND	Ikke relevant
METODE	FloaTEM

### Formål:

Mississippideltaet er kendetegnet ved rigt dyreliv, frugtbar jord og landbrug. Langs flodens banker ses store marker og relateret bebyggelse. Beboere og industri i området er afhængige af vandet i floden og under jorden, og derfor er USGS i gang med at opsætte en hydrologisk model for hele området, så de kan sikre rent vand til landbruget og dyrelivet samt sikre infrastruktur som diger i forbindelse med stormflod. USGS har anvendt FloaTEM på adskillige lokaliteter i deltaet til at kortlægge undergrunden under floderne for at kunne forstå indstrømning og udstrømning i det komplekse hydrogeologiske miljø. Endvidere bruger de flodvandets resistivitet til at sige noget om vandkvalitet.

## USA - Hydrogeologisk kortlægning og infiltration af vand i Mississippi deltaet

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



OMRÅDE	MISSISSIPPI DELTAET
STAT	Mississippi
STØRRELSE/TID	260 hektar/3 dage
LINJE-KM	130
LINJE-AFSTAND	20
METODE	tTEM

### Formål:

USGS har anvendt tTEM på adskillige lokaliteter i deltaet for at kortlægge undergrunden og lave infiltration af vand for at understøtte landbruget i området. I et andet område blev diger kortlagt for at sikre, at de er intakte og kan holde til stormflodshændelser.



## USA - Hydrogeologisk kortlægning på floder i Connecticut

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



### OMRÅDE

### FARMINGTON & RAINBOW FLODERNE

<b>STAT</b>	Connecticut
<b>STØRRELSE/TID</b>	32 km/2 dage
<b>LINJE-KM</b>	32
<b>LINJE-AFSTAND</b>	Ikke relevant
<b>METODE</b>	FloaTEM

### Formål:

USGS har anvendt FloaTEM på 2 lokaliteter i Connecticut for at kortlægge det hydrogeologiske system på Rainbow og Farmington-floderne.

## USA - Hydrogeologisk kortlægning på floder, bugter og søer i Massachusetts

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



### OMRÅDE

### EEL FLODEN, WAQUIET BUGTEN & ASHUMOT SØEN

<b>STAT</b>	Massachusetts
<b>STØRRELSE/TID</b>	28 km/2 dage
<b>LINJE-KM</b>	28
<b>LINJE-AFSTAND</b>	Ikke relevant
<b>METODE</b>	FloaTEM

### Formål:

USGS har anvendt FloaTEM på 3 lokaliteter i Massachusetts for at kortlægge det hydrogeologiske system på floden Eel, Waquiet-bugten og søen Ashumot.

## USA - Hydrogeologisk kortlægning på floder i Pennsylvania

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



### OMRÅDE

### DELAWARE FLODEN

<b>STAT</b>	Pennsylvania
<b>STØRRELSE/TID</b>	82 km/2 dage
<b>LINJE-KM</b>	82
<b>LINJE-AFSTAND</b>	Ikke relevant
<b>METODE</b>	FloaTEM

### Formål:

USGS har anvendt FloaTEM i Pennsylvania for at kortlægge det hydrogeologiske system på Delaware floden.



## USA - Saltvands-indtrængning og geologisk kortlægning i Cape Cod

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



OMRÅDE	CAPE COD
STAT	Massachusetts
STØRRELSE/TID	28 km/4 dage
LINJE-KM	28
LINJE-AFSTAND	Rekognoscerings linjer
METODE	tTEM

### Formål:

USGS har anvendt tTEM på 4 lokaliteter i Cape Cod, Massachusetts for at kortlægge saltvandsindtrængning i det kystnære område og kortlægge de geologiske enheder i de øverste 30 m af jorden.

## USA - Kortlægning af frakturer i grundfjeld

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



OMRÅDE	HADDAM
STAT	Connecticut
STØRRELSE/TID	10 hektar/<1 dag
LINJE-KM	10
LINJE-AFSTAND	10
METODE	tTEM

### Formål:

USGS har anvendt tTEM på 1 lokalitet i Haddam, Connecticut for at kortlægge frakturer i grundfjeldet.

## USA - Kortlægning af geologiske strukturer

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



OMRÅDE	JAMESTOWN
STAT	North Dakota
STØRRELSE/TID	160 hektar/<1 dag
LINJE-KM	21
LINJE-AFSTAND	Rekognosceringslinjer
METODE	tTEM

### Formål:

USGS har anvendt tTEM på 1 lokalitet i Jamestown, North Dakota for at kortlægge sand- og lerlag.



## USA - Kortlægning af geologiske strukturer

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



### OMRÅDE

### RAPID CITY

<b>STAT</b>	South Dakota
<b>STØRRELSE/TID</b>	19 hektar/2 dage
<b>LINJE-KM</b>	10
<b>LINJE-AFSTAND</b>	19
<b>METODE</b>	tTEM

### Formål:

USGS har anvendt tTEM på 3 lokaliteter i Rapid city, South Dakota for at kortlægge fordelingen af sand- og lerlag.

## USA - Kortlægning af saltholdigt grundvand omkring kulmine

Udviklingsprojekt med US Geological Survey (USGS)



### OMRÅDE

### TULLY

<b>STAT</b>	New York
<b>STØRRELSE/TID</b>	3 km/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	3
<b>LINJE-AFSTAND</b>	Rekognosceringslinjer
<b>METODE</b>	tTEM

### Formål:

USGS har anvendt tTEM på 1 lokalitet i Tully, New York for at kortlægge fordelingen af saltholdigt grundvand omkring en kulmine.

## USA - Infiltration of vand i central valley

Udviklingsprojekt med Stanford University



### OMRÅDE

### TULARE

<b>STAT</b>	Californien
<b>STØRRELSE/TID</b>	30 hektar/<1 dag
<b>LINJE-KM</b>	10
<b>LINJE-AFSTAND</b>	25 m
<b>METODE</b>	tTEM

### Formål:

Stanford University har anvendt tTEM til at kortlægge grundvandsressourcen i Central Valley, Californien. Specifikt ledte de efter fordelingen af sand-, grus- og lerlag på markniveau for at finde det optimale sted at infiltrere vand og efterfølgende oppumpe det.



## Referencer

Der er publiceret en række videnskabelige artikler og konferencebidrag om tTEM metoden.

- /1/ Auken, E., N. Foged, J. Larsen, K. Lassen, P. Maurya, S. Dath, and T. Eiskjær, 2018, tTEM – A towed transient electromagnetic system for detailed 3D imaging of the top 70 m of the subsurface, *Geophysics*, E13-E22., <https://doi.org/10.1190/geo2018-0355.1>
- /2/ Behroozmand, AA, Auken, E., Knight, R., 2018, Assessment of managed aquifer recharge sites using a new geophysical imaging method, *Vadose Zone J.*, <https://doi.org/10.2136/vzj2018.10.0184>
- /3/ Auken, E, Pedersen, JB & Maurya, PK, 2018, A new towed geophysical transient electromagnetic system for near-surface mapping, *Preview*, vol. 194, pp. 33-35. <https://doi.org/10.1071/PVv2018n194p33>
- /4/ Auken, E, Christiansen, AV, Pedersen, JB, Foged, N & Eiskjær, T, 2019, Creating 3D images of the subsurface from high resolution towed transient electromagnetic data' Paper presented at 88th Society of Exploration Geophysicists International Exposition and Annual Meeting, SEG 2018, Anaheim, United States, 14/10/2018 - 19/10/2018, pp. 4924-4927. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2998489.1>
- /5/ Vilhelmsen, TN, Auken, E, Christiansen, AV, Barfod, A, Foged, N, Pedersen, JB & Maurya, PK, 2018, 'Quantification of subsurface structural uncertainty in groundwater models using 3D geophysical data', CMWR, Saint Malo, France, 03/06/2018 - 07/06/2018.
- /6/ Maurya, PK, Auken, E, Christiansen, AV, Foged, N & Eiskjær, TT, 2019, A new towed ground-based TEM-system for 3D mapping of the top 50 meters of the subsurface. in 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE, 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Porto, Portugal, 09/09/2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802504>
- /7/ Kallesøe, AJ, Pedersen, JB, Sandersen, P, Høyer, AS, Jørgensen, F, Christiansen, AV, Auken, E & Hansen, BG, 2018, Ny geofysisk metode inviterer til detaljeret geologisk kortlægning, Vand og jord II, 2018.



## Appendiks A – tekniske specifikationer

### tTEM-udstyret

tTEM-systemet er et tidsdomæne elektromagnetisk system, som er udviklet med henblik på hydrogeofysiske og miljømæssige undersøgelser. tTEM-systemet måler kontinuert, imens udstyret trækkes på terræn. Systemet er designet til overfladenær kortlægning med unik detaljerighed i de øverste 30 m af jorden grundet tidlige gates og en hurtig repetitionsfrekvens. I det følgende gennemgås de tekniske specifikationer på instrumentet.

### Instrument

tTEM-systemet er opsat i en offset konfiguration med modtagerspølen cirka 8 meter bag ved senderspølen. Modtagerspølen er placeret horisontalt, og måler dermed z-komponenten af det magnetiske felt. En ATV anvendes til at trække systemet, og distancen mellem ATV og senderspøle er cirka 3 meter. Senderspølen er 2x4 meter stor og fastmonteret på arme, som er boltet fast i de 2 senderspøleslæder. Dermed kan senderspølen nemt udskiftes i felten, hvis der er et behov. GPS til positionering er fastmonteret på fronten af senderrammen for præcis positionering af de elektromagnetiske målinger. Modtagerspølen er fastmonteret på en lille slæde og er suspenderet for at undgå støj introduceret pga. vibrationer. Effekten af vibrationsstøj må dog vurderes som minimal grundet den meget høje repetitionsfrekvens. Sende- og modtagerelektronikken, batteri etc. er lokaliseret bag på ATV'en. Under dataindsamling kan føreren monitorere vigtige dataparametre så som sendt strøm, sendertemperatur og GPS forbindelse og se de målte kurver og indmålte datapunkter i realtid på en tablet monteret i fronten af ATV'en.

### Måleprocedure

De transiente elektromagnetiske målinger udføres med to momenter – en lav- og højt-moment efter hinanden. En lav- og høj-momentsekvens tager typisk et halvt sekund at måle og består af adskillige hundrede individuelle målinger.

Kortlægningshastigheden tilpasses kortlægningsområdet og formålet med kortlægningen, men ligger typisk på 3-5 meter per sekund, hvilket svarer til 10-20 kilometer i timen. Udover GPS og de transiente elektromagnetiske målinger, måles og monitoreres en række væsentlige instrumentparametre for at kvalitetssikre data. Det drejer sig bl.a. om strømniveauer, spænding og sendertemperatur.

### Kortlægningsdybde

Kortlægningsdybden for tTEM-systemet afhænger af sendermoment, geologien i kortlægningsområdet, baggrundsstøjen, vibrationsstøjen og antallet af måle-repetitioner. Typisk opnår man en kortlægningsdybde på omkring 70 meter i områder, hvor jordlagene har en gennemsnitsmodstand på 40 ohm-m. Kortlægningsdybden vil være større i områder med højere modstande og lavere i områder med jordlag med meget lave modstande (0.1-10 ohm-m). I tolkningen af de indsamlede data, estimeres kortlægningsdybden for hver modstandsmodel.

### Konfiguration

I dette afsnit listes de tekniske detaljer for et typisk tTEM systemsetup. tTEM-systemet er konfigureret i en standard to-moment opsætning. Instrumentopsætningen fremgår af figur 4. Positioneringen af de enkelte instrumenter og hjørnerne af senderspølen fremgår af tabel 1. Begyndelsespunktet er defineret som centrum af senderspølen.

Specifikationerne for lav-moment (LM) og højt-moment fremgår af tabel 2. Senderbølgeformen for begge momenter fremgår af figur 6 med detaljer for slukketiden for LM i figur 7.



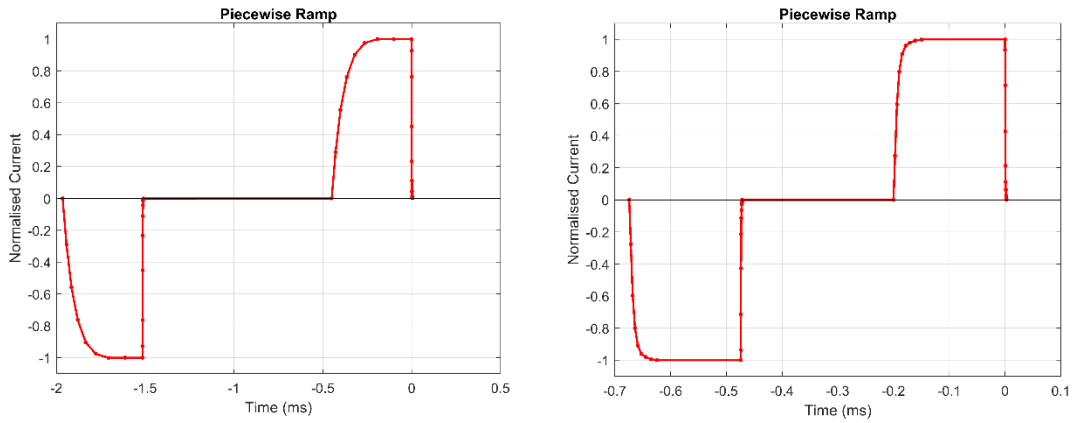


Instrument	X (m)	Y (m)	Z(m)
GPS_Senderspole	1.40	0.00	-0.40
RxZ (Z-modtagerspole)	-10.17	0.00	-0.43
Tx-Coil, centrum	0.00	0.00	-0.30
Tx-Coil hjørne 1	-02.00	-01.00	-0.30
Tx-Coil hjørne 2	02.00	-01.00	-0.30
Tx-Coil hjørne 3	02.00	01.00	-0.30
Tx-Coil hjørne 4	-02.00	01.00	-0.30

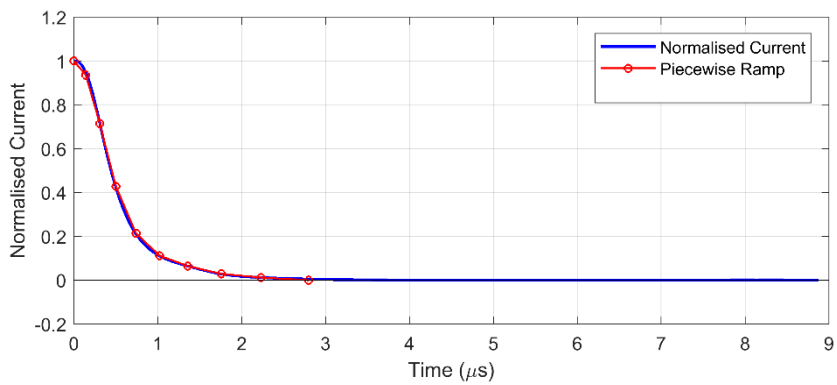
Tabel 1. Instrumentpositioner. Modtager- og senderspoleposition. Begyndelsepunktet er centrum af senderspølen. Z er positiv nedad.

Parameter	LM	HM
Vindinger	1	1
Senderareal (m <sup>2</sup> )	8 m <sup>2</sup>	8 m <sup>2</sup>
Senderstrøm	~ 2.8 A	~ 30 A
Sendermoment	~ 22.4 Am <sup>2</sup>	~ 240 Am <sup>2</sup>
Repetitionsfrekvens	1055 Hz	330 Hz
Stakstørrelse, rådata	422	264
Moment cyklustid	0.22 s	0.40 s
Sender on-tid	0.2 ms	0.45 ms
Duty cycle	42 %	30 %
Slukketid, sender	2.5 µs	4.0 µs
Antal gates	4	23
Gate tidsinterval	4 µs - 10 µs	10 µs - 900 µs
Front-gate tid	4 µs	7 µs

Tabel 2. Specifikationer for lav-moment (LM) og høj-moment (HM).



Figur 6. Bølgeform for lav-moment (venstre) og høj-moment (højre). Den røde linje indikerer den stykvist lineære modellering af bølgeformen.



Figur 7. Slukketid for lavt moment. Den røde linje indikerer stykvist lineære modellering af bølgeformen.