Til Region Sjælland

Dokumenttype Datarapport

<sub>Dato</sub> August 2018

# RÅSTOFKORTLÆGNING VED SORØ KORTLÆGNING MED TTEM OG DUALEM I OMRÅDE 1 OG 2





Revision	1
Dato	23. August
Udarbejdet af	Peter Thomsen og Niels Richardt
Kontrolleret af	Joakim H. Westergaard
Godkendt af	Peter Thomsen
Beskrivelse	Råstofkortlægning i Sorø Kommune. Supplerede
	geofysisk kortlægning indenfor område 1 og 2 ved
	Stenlille. Afprøvning af tTEM- og DUALEM-metoderne
	til kortlægning af sand, sten og grus.

Ref. 1100010307

### INDHOLD

1.	Indledning	3
1.1	DUALEM-metoden	4
1.2	tTEM-metoden	4
1.3	Udførte undersøgelser	5
2.	Resultaterne fra kortlægningen	7
2.1	Delområde 1	7
2.1.1	Middelmodstand i dybdeintervaller	7
2.1.2	Modelsektion	8
2.2	Delområde 2	10
2.2.1	Middelmodstand i dybdeintervaller	10
2.2.2	Modelsektion	12
3.	Opsummering	14
4.	Referencer	15

### BILAG

Bilag 1: Middelmodstandskort beregnet på baggrund af DualEM

### **APPENDIKS**

Appendiks A: DUALEM 421-metoden Appendiks B: tTEM Mapping Stenlille

# 1. INDLEDNING

Nærværende geofysiske kortlægning er gennemført som et led i Fase 3 i råstofkortlægning ved Sorø. Kortlægningen er blevet gennemført i to områder ved Stenlille og har til formål dels at forbedre det geofysiske datagrundlag for afgrænsning af råstoffer i form af sand og grus, og dels at teste forskellige geofysiske metodes anvendelighed ved kortlægning og afgrænsning af råstofforekomster i form af sand og grus.

I 2017 er der i forbindelse med Fase 3 indsamlet og tolket 4 km MEP, der supplerer en MEPkortlægning udført i 2016. På baggrund af tolkningen af MEP-data er der udpegede to fokusområder hhv. nord for Stenlille og øst for Stenmagle, se Figur 1.



Figur 1 Placeringen af de to delområder, delområde 1 nord for Stenlille og delområde 2 øst for Stenmagle.

Delområde 1 er beliggende i råstofkortlægningområde 1, hvor Fase 2-kortlægningen er afrapporteret i /1/, mens delområde 2 er beliggende i råstofkortlægningsområde 2, hvor Fase 2-kortlægningen er afrapporteret i /2/. I begge områder er der som nævnt udført MEP-kortlægning, men i delområde 2 er der den særlige udfordring, at MEP-kortlægningen ikke kan opløse de tynde råstoflag, der ses i boringer i området.

Generelt gælder det for Sorø Kommune, at der i store områder ses dårlige modstandskontraster mellem sand-/gruslag og mere lerede aflejringer, hvilket vanskeliggør tolkning af geofysiske data. I grundvandskortlægningen af Sorø-Stenlille kortlægningsområde blev der i store områder udført både MEP og SkyTEM, og det var i en del områder vanskeligt at koble tolkningen af de geofysiske data sammen med områdets boringer, og i nogle områder var der ydermere markante afvigelser mellem de geofysiske tolkninger af MEP og SkyTEM /3/. Bortset fra de ovennævnte problemer med opløsning af tynde sand-/gruslag i delområde 2 lykkedes det imidlertid at etablere en god sammenhæng mellem MEP og boredata i råstofkortlægningens Fase 2 /1/, /2/. Der er altså tale om områder, hvor tolkning af geofysiske data er udfordrende men ikke umulig.

I nærværende opgave er der i de to delområder i efteråret 2017 indsamlet og tolket hhv. en DUALEM- og en tTEM-kortlægning, hvorfor det således er muligt at foretage en sammenstilling af resultaterne fra de tre forskellige geofysiske metoder. Herudover er der udført 5 supplerende råstofboringer i delområde 1.

### 1.1 DUALEM-metoden

DUALEM-metoden er udviklet til detaljeret kortlægning af de øverste 6-8 m under terræn. Rambøll introducerede metoden i Danmark i 2013 og har siden da udført i størrelsesorden 100 kortlægninger indenfor klima-, geoteknik- og naturprojekter. For mere detaljeret beskrivelse af DUALEM-metoden henvises til Appendiks A. På Figur 2 ses det anvendte DUALEM-system. Som det fremgår af figuren, trækkes DUALEM-instrumentet på en slæde efter en ATV. Metoden giver derfor mulighed for at optage mange kilometer profil dagligt og giver derfor i modsætning til MEP-metoden mulighed for en tilnærmet fladedækkende datadækning. DUALEM-data er indsamlet og behandlet af Rambøll.



Figur 2 Det anvendte DUALEM-setup.

### 1.2 tTEM-metoden

tTEM-metoden er en nyudviklet geofysisk metode. Metoden er udviklet på Aarhus Universitet og er optimeret til detaljeret kortlægning af de øverste 50-70 m af jordlagene, og udgør således et attraktivt alternativ til MEP og PACES-metoden. Metoden er som SkyTEM og single site TEM en elektromagnetisk metode, og bliver derfor forstyrret af elektriske ledere indenfor en afstand af 50-70 m afhængig af geologien. Det anvendte tTEM-system er vist på Figur 3. På samme måde som for DUALEM trækkes instrumenterne efter en slæde, og metoden giver på samme måde mulighed for at optage mange kilometer data dagligt.

HydroGeophysics Group fra Aarhus Universitet har stået for dataindsamlingen og databehandlingen af tTEM. HydroGeophysics Group har udarbejdet en teknisk afrapportering af selve tTEM-kortlægning, vedlagt som Appendiks B.



Figur 3 Det anvendte tTEM-setup.

### 1.3 Udførte undersøgelser

Placeringen af de udført undersøgelser indenfor delområde 1 og 2 er vist på, Figur 4 og Figur 5. Med blå prikker er placeringen af de tolkede DUALEM-data markeret og med grønne prikker er de tolkede tTEM-data markeret.



Figur 4 Placeringen af de indsamlede supplerende geofysiske undersøgelser og boringer indenfor delområde 1.



Figur 5 Placeringen af de indsamlede supplerende geofysiske undersøgelser og boringer indenfor delområde 2.

Som det fremgår af figurerne, er det indenfor begge område muligt at indsamle tolkbare DUALEM-data i stort set hele de kortlagte områder.

I modsætning hertil ses på de to figurer, at en stor del af de indsamlede tTEM-data er forstyrret i en sådan grad, at data ikke er tolkbare. Især en højspændingsledning orienteret vest-øst forstyrrer en stor del af de indsamlede data i delområde 1, Figur 4.

MEP-profilerne indsamlet i 2016 for område 2 og i 2016 og 2017 for område 1 er markeret på de to kort med røde linjer. På figurerne ses ligeledes placeringen af boringer i området, dels boringer fra Jupiterdatabasen, og dels råstofboringer fra 2016 og 2017.

# 2. RESULTATERNE FRA KORTLÆGNINGEN

I det følgende er resultaterne af kortlægningerne i de to delområder vist. I forbindelse med nærværende projekt er der d. 31. oktober 2017 indsamlet ca. 30 km DUALEM og 30 km tTEM. Kortlægningerne er udført med tilsigtet linjeafstand på 20 m, og tTEM og DUALEM er som udgangspunkt indsamlet langs de samme linjer.

### 2.1 Delområde 1

Delområde 1 er det sydvestligste af de 2 udvalgte delområder og er placeret nord for Stenlille. Resultaterne fra DUALEM-, tTEM- og MEP-kortlægningerne er præsenteret dels som middelmodstandskort og dels som en modelsektion gennem området.

### 2.1.1 Middelmodstand i dybdeintervaller

For at kunne sammenligne resultaterne fra undersøgelserne udført med de tre forskellige metoder, er der udarbejdet kort over middelmodstanden i intervaller 0 til 3 m, 3 til 6 m og 6 til 10 m, hvor resultaterne fra alle tre metoder er sammenstillet. Fra en dybde af 10 m u.t. er kortene udarbejdet i dybdeintervaller af 5 m, hvor det kun er resultaterne fra tTEM- og MEP-kortlægningerne, der er sammenstillet.

På grund af en tværgående højspændingsledning er store dele af tTEM kortlægningen i dette område skåret fra i forbindelse med processeringen. Kortene over middelmodstanden i samtlige dybdeintervaller ned til 30 m u.t. er vedlagt som bilag 1.1 til bilag 1.7. De tre øverste dybdeintervaller ses desuden i Figur 6.

Som det fremgår af kortene, er der stor overensstemmelse mellem resultaterne fra de tre datatyper i intervallerne 0 til 3 m og 3 til 6 u m.t., bilag 1.1 og bilag 1.2. Området med meget høj modstand i den centrale/vestlige del ses både af resultaterne af DUALEM og af MEP-profilet. I dette område er tTEM-data fjernet pga. kobling til elledningen, der løber på tværs af området.

Det ses af bilag 1.1 og bilag 1.2, at tTEM og især DUALEM afdækker et noget mere komplekst modstandsmønster og dermed sandsynligvis og en mere kompleks geologi i de terrænnære lag, end det ville være muligt at tolke ud fra MEP-data.

I intervallet fra 6 til 10 m u.t., bilag 1.3, er der ikke en helt entydig overensstemmelse mellem MEP og DUALEM, mens der er bedre overensstemmelse mellem tTEM og MEP. Dog ses det, at den relative variation i den kortlagt modstand for DUALEM og MEP stadig er meget overensstemmende, hvor der blot med MEP er tolket en højere modstand end med DUALEM.

Dybdeintervallerne fra 10 til 30 m u.t., for område 1, er udelukkende vist på bilag 1.4 til 1.7. I intervallet fra 10 til 15 m u.t. der fortsat er relativ stor overensstemmelse mellem resultaterne fra tTEM og resultaterne fra MEP-kortlægningen. Dog er der langs dele af MEP-profilet kortlagt en anelse lavere modstand med MEP-metoden end med tTEM. I intervallet fra 15 til 20 m u.t.er der i den vestlige del stor overensstemmelse mellem resultaterne fra de to kortlægninger. I den østlige del er der med MEP kortlagt en anelse lavere modstand med MEP end med tTEM. I de to dybdeintervaller fra 20 til 30 m u.t. er der igen meget stor overensstemmelse mellem modstanden kortlagt med MEP og modstanden kortlagt med tTEM.

Dybdeinterval 0 til 3 m u.t.



Dybdeinterval 3 til 6 m u.t.



Dybdeinterval 6 til 10 m u.t.



Figur 6 Område 1. Middelmodstanden i dybdeintervallerne 0 til 3 m, 3 til 6 m og 6-10 m. Resultaterne fra MEP er vist med størst prikker, mens resultaterne fra tTEM er vist med mindre prikker, begge med en sort ring omkring. Resultaterne fra DUALEM er vist med de mindste prikker uden sort ring omkring.

### 2.1.2 Modelsektion

På Figur 7 er der vist en modelsektion langs MEP-profilet SLT02. Langs sektionen er resultatet fra MEP-profilet vist bagerst, med data fra TEM og DUALEM, vist som hhv. lange stave med sort

afgrænsning og som terrænnære modelstave uden nogen afgrænsning. Modelsektionerne er vist i to forskellige dybdeintervaller hhv. til kote -50 m og til kote 0 m. Herudover er samtlige boringer indenfor en maksimal afstand af 200 m vist langs sektionen.



Figur 7 Oversigtskort samt modelsektioner i to forskellige dybdeintervaller. Modelsektionerne er præsenteret fra vest mod øst til hhv. kote -50 m og til kote 0 m, og placeringen er vist med lys blå streg på oversigtskortet

Som det fremgår af Figur 7, er der stor overensstemmelse mellem resultaterne fra MEPkortlægningen og fra tTEM-kortlægningen langs de sektioner, hvor begge datatyper er tilstede. Som det fremgår af den nederste modelsektion er der ligeledes stor overensstemmelse mellem MEP og resultaterne fra DUALEM-kortlægningen. Området omkring profilkoordinat 500 til 700 m er der med begge datatyper kortlagt et terrænnært lag med en tykkelse på 2 – 4 m. I den nederste del af DUALEM data ses en relativ skarp grænsen til et lag med en lavere modstand end der tilsvarende ses ud fra tolkningen af MEP-profilet. Denne grænse kan være sammenfaldende med grænsen mellem sandede aflejringer og lerede aflejringer, der ses i en del af boringerne langs modelsektionen.

Den eneste boring, der er placeret direkte på modelsektionen, er DGU 205.1101, udført i forbindelse med nærværende projekt. Boringen er beskrevet ved senglaciale smeltevandsaflejringer, hvor de øverste 3,5 m er sandede efterfulgt af mere lerede aflejringer. I dybden 9,5 m er der beskrevet moræneler. Sammenlignes den beskrevne litologi med den kortlagte modstand ses det, at de lerede aflejringer ikke afstedkommer lav elektrisk modstand. Dette problem er fælles for alle tre geofysiske metoder.

### 2.2 Delområde 2

Delområde 2 er det nordøstlige af de to delområder, og er placeret øst for Stenmagle. Resultaterne fra de geofysiske kortlægninger med DuaIEM, tTEM og MEP er præsenteret som middelmodstandskort og en modelsektion gennem området.

### 2.2.1 Middelmodstand i dybdeintervaller

På Figur 8 er vist middelmodstandskort for delområde 2 for dybdeintervallerne 0 til 3 m, 3 til 6 m og 6 til 10 m. Modstande i samtlige dybdeintervaller ned til 30 m u.t. er vedlagt som bilag 1.8 til bilag 1.14. Resultaterne fra MEP er vist med størst prikker, mens resultaterne fra tTEM er vist med mindre prikker, begge med en sort ring omkring. Resultaterne fra DUALEM er vist med de mindste prikker uden sort ring omkring.

Som det fremgår af Figur 8, er der stor overensstemmelse mellem den elektriske modstand kortlagt med de tre metoder indenfor de øverste 3 m. Der ses områder, hvor modstanden er lav svarende til relative fede lerede aflejringer, mens der i andre områder er kortlagt højere modstand, svarende til mere sandede aflejringer eller sandet moræneler. Lokalt ses et par afgrænsede områder, hvor der med DUALEM-kortlægningen er kortlagt meget høje modstande, svarende til sandede eller grusede aflejringer. Disse områder med høj modstand er primært placeret, hvor der ikke er indsamlet MEP, og fremgår ikke i samme grad af tolkningen af tTEM-målingerne. Grunden til dette kan være, at det med tTEM-metoden er vanskeligt at kortlægge den mest terrænnære del af lagserien.

På kortet over middelmodstanden i intervallet 3 til 6 m u.t., Figur 8 og bilag 1.9, ses det, at modstanden generelt er lavere end i det forrige interval. Det ses, at der med tTEM metoden er kortlagt områder med lavere modstand, end der er med MEP og DUALEM metoden, og at der med tTEM-metoden overvejende er kortlagt lag med en lavere modstand.

I intervallet fra 6 til 10 m u.t., Figur 8 og bilag 1.9, er store dele af tolkningerne fra DUALEMkortlægning faldet fra pga. indtrængningsdybden. Den med DUALEM kortlagte lave modstand langs vejen i den østlige del af området, kan være en effekt af enten påvirkning fra vejen eller påvirkning fra evt. saltning af vejen. I de områder, hvor der findes både tTEM og MEP er der tilsyneladende relativt stor overensstemmelse mellem de kortlagte modstande med de to metoder.

På bilag 1.11 og bilag 1.12 er middelmodstanden i intervaller fra 10 til 20 m u.t. vist. Som det fremgår af bilagene, er der med tTEM og MEP stort set kortlagt samme modstandsniveau. Dog er der i nogle partier kortlagt højere modstand med tTEM-metoden end med MEP. På bilag 1.13 til bilag 1.14 er middelmodstanden i intervallerne 20 til 30 m u.t. vist. Som det fremgår er der i disse intervaller kortlagt højere modstand med tTEM metoden end med MEP-metoden. Fra grundvandskortlægningen kendes et sandmagasin, Sand 2, der er ca. 15 m tykt og har overgrænse ca. 15 m u.t. ved Stenmagle og kiler langsomt ud mod øst. Både MEP og især tTEM kan bidrage til afgrænsningen af dette grundvandsmagasin.

Dybdeinterval 0 til 3 m u.t.





Dybdeinterval 6 til 10 m u.t.



Figur 8 Område 2. Middelmodstanden i dybdeintervallerne 0 til 3 m, 3 til 6 m og 6-10 m. Resultaterne fra MEP er vist med størst prikker, mens resultaterne fra tTEM er vist med mindre prikker, begge med en sort ring omkring. Resultaterne fra DUALEM er vist med de mindste prikker uden sort ring omkring.

### 2.2.2 Modelsektion

På Figur 9 er der vist en modelsektion præsenteret fra vest mod øst. Øverst er vist et oversigtskort og derunder modelsektionen i to koteintervaller, hhv. fra kote -50 m til 35 m og fra kote 0 til 35 m.





Som det ses af den øverste modelsektion er der stor overensstemmelse mellem resultaterne fra MEP og tTEM, hvor der øverst er kortlagt et tyndt lag med høj modstand efterfulgt af et lag med en lavere modstand. Under dette lag ses igen højere modstand og nederst i lagserien et lag med en væsentligt lavere modstand. Laget med højere modstand, der i den vestlige del af modelsektionen har overgrænse omkring kote 15 m, tolkes at være det ovenfor omtalte

grundvandsmagasin, Sand 2. Det fremgår af modelsektionen, at MEP-metoden og tTEM-metoden er enige om magasinets overgrænse, mens tTEM viser undergrænsen lidt dybere end MEP.

Som det ses af den nederste modelsektion, er der langs store dele af modelsektionen med DUALEM kortlagt et meget tyndt med meget høj modstand. Tykkelsen af laget varierer, men laget er oftest omkring 1 meter tykt.

Der er tre boringer placeret nær modelsektionen. Alle tre er råstofboringer udført i 2016. I den vestligste boring, DGU nr. 105.1036, ses under 0,8 m tørv et 2,6 m tykt lag af smeltevandsgrus underlejret af moræneler. MEP opløser ikke disse lag. DUALEM viser tørven som et tyndt lag med lav modstand og giver desuden en antydning af laget af smeltevandssand.

I de to øvrige boringer, DGU nr. 105.1037 og DGU nr. 105.1038 ses hhv. 3,9 og 5,4 m smeltevandssand beliggende hhv. 6,2 og 4,2 m u.t. Dette sandlag bliver ikke opløst af nogen af de tre geofysiske metoder. Dog ses der ved den midterste boring, DGU nr. 105.1037, en antydning af, at DUALEM fanger lagets overgrænse, men metodens begrænsede indtrængning i laget gør tolkningen usikker.

# 3. OPSUMMERING

Der er indenfor delområde 1 og 2 udført kortlægning med de tre geofysiske metoder, MEP, DUALEM og tTEM.

- Med MEP-metoden kortlægges kontinuerte profiler, som kun i meget ringe grad er påvirket af støj fra elektriske ledere. Med MEP-metoden kortlægges variationer i jordlagenes elektriske modstand ned til ca. 70 m u.t. Metoden er relativt stabil og er en velafprøvet metode, der har været anvendt globalt gennem de seneste flere årtier. Det er med MEP metoden muligt at udføre 1,5 til 2 km profil pr. feltdag.
- DUALEM-metoden er en relativ ny geofysisk GCM (Ground Conductivity Meter) metode, optimeret til detaljeret kortlægning af de øverste 6-8 m. Metoden blev i 2013 introduceret af Rambøll i Danmark, og det anvendte system setup er unik, og vurderes ikke af findes mere optimalt i verden. Det er med metoden muligt at indsamlet 50-70 linje km pr. feltdag, og data forstyrres i en afstand af 5-10 m fra elektriske ledere.
- tTEM er udviklet på Aarhus Universitet gennem diverse støttede forskningsprojekter. Metoden er optimeret til kortlægning af de øverste 30-70 m af lagserien afhængig af geologi. Som DUALEM er metoden kontinuert, og der kan indsamlet 50-70 km pr dag, svarende til produktionen for DUALEM. tTEM-data bliver forstyrret af elektriske ledere indenfor en afstand af 50-70 m. tTEM er et unikt system på verdensplan, og bliver pt. anvendt ved kortlægninger i USA, hvor der er stor interesse for metoden.

Sammenligningen mellem resultaterne fra de tre metoder viser, at der overordnet kortlægges ensartede modstandsvariationer, når man tager de forskellige metoders opløselighed i betragtning. Helt terrænnært indenfor den øverste meter kortlægges der med DUALEM strukturer, som ikke eller kun svagt erkendes i tolkningen af de to andre datatyper. Her tænkes i sær på det tynde lag med meget høj modstand kortlagt med DUALEM i delområde 2. DUALEM har dog den begrænsning at indtrængningsdybden blot er 6-8 m.

Generelt er der stor overensstemmelse mellem de kortlagte modstande med MEP og tTEM metoderne. Dette gælder både den kortlagte lagdeling og de kortlagte modstande. Pga. forstyrrelser fra elektriske ledere er datadækningen for tTEM kortlægning til dels ringe i de to delområder. Ved fremtidig anvendelse af tTEM metoden til lignende kortlægninger, skal det nøje overvejes, om data dækningen kan forventes acceptabel. Til gengæld kan der med tTEM-metodens omtrent fladedækkende datasæt i områder, hvor der ikke er forstyrrelser opnås en god detaljeringsgrad og en pålidelig afgrænsning af råstoflegemer. Med MEP-metoden derimod vil der opnås kontinuerte profiler, men den meget mindre dagsproduktion betyder, at MEP ikke er velegnet til meget detaljerede fladedækkende kortlægninger.

En fremtidig geofysisk kortlægningsstrategi kan på baggrund af det ovenstående være at indlede med en detaljeret analyse af elektriske forstyrrelser. I områder uden forstyrrelser udføres TTEM med tilnærmet fladedækkende datasæt, og i områder med for mange forstyrrelser udføres MEP. I begge tilfælde kan det overvejes at supplere med DUALEM, hvis der ønskes bedre detaljeringsgrad i den øverste del af lagserien.

# 4. REFERENCER

- /1/ Region Sjælland. Råstofkortlægning ved Sorø, Område 1 nord for Stenlille. Rapport udarbejdet af Rambøll, februar 2017.
- /2/ Region Sjælland. Råstofkortlægning ved Sorø, Område 2 øst for Stenmagle. Rapport udarbejdet af Rambøll, februar 2017.
- /3/ Naturstyrelsen. Redegørelse for Sorø-Stenlille, Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning 2014.





























# APPENDIKS A: DUALEM421 - METODEN

DualEM421-metoden er en GCM (Ground Conductivity Meter) metode, og er en videreudvikling af de traditionelt anvendte stangslingrammetoder som eks. EM38 og EM31. DualEM421 er, som navnet antyder, et multikonfigurationsudstyr med spoleafstande på hhv. 1, 2, og 4 meter. Til forskel for andet anvendt geofysisk udstyr indeholder DualEM421, dual-orienterede spoler, dvs. spolepar med hhv. horisontale og vertikale spoler. På Figur 1 ses hvorledes de enkelte spoler i DualEM421 systemet er sat op.



Figur 1 System setup for DualEM421 systemet.

Som det fremgår af Figur 1, er senderspolen T placeret ved 0 m, de horisontale spoler HCP er placeret ved hhv. 1, 2 og 4 m, mens de vertikale spoler er placeret ved 1,1 m, 2,1 m og 4,1 m. I alt omfatter dette således målinger af i alt 6 konfigurationer af sende-modtager kombinationer, hvilket resulterer i 6 datapunkter, relateret til 6 forskellige dybder. Ved geofysisk inversion tolkes disse data efterfølgende til en resistivitetsmodel og resulterer således i en detaljeret horisontal og vertikal resistivitetsmodel ned til 5-10 m, afhængig af den elektriske modstand af de øvre jordlag.



Figur 2 Instrument setup, placeret på en slæde som trækkes bag en ATV.

Selve DualEM421-instrumentet er lagt ind i et PVC-rør, placeret på en specielt designet slæde, der trækkes efter en ATV, se foto i Figur 2. For at minimere støjen fra bevægelser, er slæden konstrueret på en sådan måde, at instrumentet glider så glat som muligt og så tæt på jorden som muligt. På den forreste del af slæden sidder en GPS, der kontinuert logger positionen sammen med de indsamlede data med stor nøjagtighed. Opsætningen med slæde og ATV betyder, at eventuelle markskader er minimale på selv våde marker.

### Processering

De indsamlede data processeres i processerings- og tolknings-softwarepakken Aarhus Workbench fra Aarhus Universitet.

På Figur 3 ses et screendump fra processeringssoftwaren.



Figur 3 Screendump fra Aarhus Workbench. Nederst er vist de rå data og øverst de processerede data.

### Geofysisk tolkning

De processerede data tolkes efterfølgende med Spatially Constrained Inversion (SCI), smooth mangelagsmodel med 14 lag. Et eksempel på en tolket sektion er vist på Figur 4.





På Figur 4 er den del af modellen, der er under den beregnede indtrængningsdybde (DOI), visualiseret med mindre mættet farvelægning.

### Tolkning af jordens elektriske modstand til litologi

Med DualEM421 udføres en deltaljeret kortlægning af jordens elektriske modstand fra terræn til ca. 10 meters dybde. Indtrængningsdybden er afhængig af jordens elektriske modstand og er for nærværende kortlægning omkring 6-8 m. Den tolkede modstand kan oversættes til geologiske lag som f.eks. sand og ler ud fra erfaringer omkring modstanden af de forskellige aflejringer. På Figur 5 ses, hvorledes forskellige aflejringer vil have forskellige elektriske modstande. Lerede aflejringer vil således resultere i en lav modstand, mens sandede aflejringer har en højere modstand. Som det fremgår af Figur 5, vil moræneler og morænesand dog kunne have en meget varierende modstand, alt efter indholdet af silt, sand og grus. Af Figur 5 ses det derudover, at det kan være vanskeligt at skelne mellem blødbundsaflejringer som tørv/gytje og glaciale/marine lerede aflejringer.



Figur 5 Oversættelse af modstand til litologi.

APPENDIKS B: TTEM MAPPING STENLILLE

# X

# tTEM Mapping Stenlille

Report number 07-03-2018, March 2018









# TABLE OF CONTENTS

1.	Introduction2	
2.	Data Collection	
2.1	The Survey Area4	
2.2	The tTEM System	
2.3	tTEM - Technical Specifications7	
2.4	Calibration of the tTEM System9	
3.	Processing of the tTEM Data12	
3.1	Data Processing – Workflow	
3.2	GPS-Positioning12	
3.3	Voltage Data13	
3.4	Processing - Technical Specifications14	
<b>4.</b> 4.1	Inversion of the tTEM Data	
4.2	Smooth and sharp Inversion	
4.3	Depth of Investigation	
4.4	Inversion - Technical Specifications	
<b>5.</b> 5.1	<ul> <li>Thematic Maps and Cross Sections</li></ul>	
5.2	Cross Sections	
5.3	Mean Resistivity Maps	
5.4	Deliverables	
6.	Conclusion	
7.	7. References 23	
Appendix I: Location maps, QC maps1		
Appendix II: Cross Sections		
Appendix III: Mean Resistivity Maps		


# **1. INTRODUCTION**

In October, 2017, a geophysical mapping with the ground based transient electromagnetic method tTEM was carried out in the Stenlille area, Denmark. The mapping project was conducted in a cooperation between the HydroGeophysics Group, Aarhus University, Denmark and Rambøll, Denmark. The objective of the mapping was to assess the occurrence of raw materials (sand/gravel) in the study area by means of the tTEM method.

This report primarily presents the geophysical results (resistivity maps and cross sections) and documents the data collection, processing, and inversion of the tTEM data. Chapters 2 - 4 describe the data collection, processing, and inversion. Chapter 5 explains the various types of geophysical maps and cross section placed in Appendix I: - III.

This report does not address a geological interpretation of the obtained geophysical mapping results.



tTEM survey, Stenlille			
Client	Rambøll		
Key persons	HGG, Aarhus University, Denmark Senior geophysicist &, project manager Jesper B. Pedersen, Postdoc Geophysicist. Pradip Maurya, MSc. geology Rune Kraghede & PhD stud. geophysicist Kim Engebretsen		
	Rambøll Chief consultant, Peter Thomsen		
Locality	Stenlille, Denmark		
Survey period	30 October, 2017		
Line km acquired	23,2 km		
Line spacing	25 m		



# 2. DATA COLLECTION

#### 2.1 The Survey Area

The tTEM survey was carried out October 30<sup>th</sup>, 2017, and covers a total of 23,2 line km of data (Figure 1).

The lines strike west-east and north-south with a line spacing of 25 m. The average driving speed was 10-15 km/h. In Figure 1, the tTEM measurements are shown with black lines. The aim of the mapping was assess the occurrence of raw materials in the study area



Figure 1. Survey area, with tTEM lines in black. The model spacing along the lines is  $\sim 10$  m.

#### 2.2 The tTEM System

towTEM (tTEM) is a time-domain electromagnetic system designed for hydrogeophysical and environmental investigations. The tTEM system measures continuously while towed on the ground surface. It is designed for a very high near-surface resolution with very early time gates and a fast repetition frequency. The following contains a general introduction to the tTEM system. A



more thorough description of TEM methods in general can be found in Christiansen *et al.* (2006).

#### Instrument

Figure 2 shows the tTEM system. The tTEM uses an off-set configuration, with the z-receiver coil (RX-coil) approximately 7.0 m behind the transmitter coil (TX-coil). An ATV tows the tTEM-system, and the distance between the ATV and the TX coil is 2.8 m. The TX-coil is located inside a 2 m x 4 m rectangular frame (TX-frame), which carried on two sledges. GPSs are located at the front of the TX-frame and at the RX-coil for accurate positioning of the system. The RX-coil is placed on a small sledge, suspended in the air to avoid high frequency motion induced noise. The transmitter, receiver, power supply, etc. is located at the back of the ATV.



*Figure 2. The tTEM system. Rx Coil are the receiver coil and Tx is the transmitter coil. The exact distance and device positions are listed in Table 1.* 

During data collection, the driver can monitor key data parameters and positioning in real time on a tablet in the front of the ATV.

#### **Measurement Procedure**

Measurements are carried out with two transmitter moments. The standard configuration uses low and high transmitter moments applied sequentially. A high and low moment sequence typically takes 0,5 seconds and includes several hundreds of individual transient measurements.

The driving speed can be adjusted to the survey area and target. It will normally not exceed 20 km/h.

Apart from GPS and TEM data, a number of instrument parameters are monitored and stored in order to be used for quality con-



trol when the data are processed. These parameters include transmitter temperature, current level, and voltage of the instrument.

#### Depth of Investigation (DOI)

The depth of investigation for the tTEM system depends on the transmitter moment, the geological settings, the background noise level and driving speed. Normally, a DOI of 60-70 m can be achieved in a subsurface layering with an average resistivity of 40 ohm-m. The depth will be larger at higher resistivities and less at lower resistivities. During the inversion, the DOI is estimated for each resistivity model (see section 4.3).



### 2.3 tTEM - Technical Specifications

This section lists detailed technical specifications of the tTEM system setup for the survey.

The tTEM system is configured in a standard two-moment setup (low moment, LM and high moment, HM). The system instrument setup is shown in Figure 2. The positioning of the instruments and the corners of the transmitter coil are listed in Table 1. The origin is defined as the center of the transmitter coil.

The specifications of the LM an HM moment are summarized in Table 2. The integrated waveform for both moments is shown in Figure 3. The exact waveform is listed in Table 3.

#### **Device Position**

Unit	X (m)	Y (m)	Z(m)
GP_TX (GPS)	1.40	0.00	-0.20
RxZ (Z-receiver coil)	-9.28	0.00	-0.20
Tx (center transmitter coil)	0.00	0.00	-0.09
Loop corner 1	-02.00	-01.00	0.00
Loop corner 2	02.00	-01.00	0.00
Loop corner 3	02.00	01.00	0.00
Loop corner 4	-02.00	01.00	0.00

Table 1. Equipment and transmitter coil corner positioning. The origin is defined as the center of the transmitter coil. Z is positive towards the ground.

#### Transmitter, Receiver Specifications

Parameter	LM	HM
No. of turns	1	1
Transmitter area (m <sup>2</sup> )	8 m <sup>2</sup>	8 m <sup>2</sup>
Tx Current	~ 2.8 A	~ 30 A
Tx Peak moment	~ 22.4 Am <sup>2</sup>	~ 240 Am <sup>2</sup>
Repetition frequency	1055 Hz	330 Hz
Raw Data Stack size	422	264
Raw Moment cyclus time	0.22 s	0.40 s
Tx on-time	0.2 ms	0.45 ms
Duty cycle	42 %	30%
Turn-off time	2.5 μs at 2.8 Amp	4.0 µs at 30 Amp
Number of gates	4	26
Gate time interval	4 μs –10 μs	10 μs – 900 μs
Front-gate time (nominal)	2 μs	5 μs
Front-gate delay	1.9 μs	1.9 μs

Table 2. Low moment (LM) and high moment (HM) specifications.





Figure 3. Waveform for LM (left) and HM (right).



Figure 4. Zoom in on ramp down for LM.

### Waveform, LM and HM

LM time	LM amplitude	HM time	HM amplitude
-6.7400e-04 s	-0.000	-1.9650e-03 s	-0.000
-6.7250e-04 s	-0.496	-1.9483e-03 s	-0.316
-6.7071e-04 s	-0.658	-1.9279e-03 s	-0.532
-6.6859e-04 s	-0.784	-1.9030e-03 s	-0.710
-6.6605e-04 s	-0.865	-1.8725e-03 s	-0.845
-6.6303e-04 s	-0.925	-1.8351e-03 s	-0.933
-6.5944e-04 s	-0.963	-1.7894e-03 s	-0.981
-6.5516e-04 s	-0.978	-1.7334e-03 s	-1.001
-6.5007e-04 s	-0.989	-1.6650e-03 s	-1.000
-6.4400e-04 s	-1.000	-1.5150e-03 s	-1.000



Table 3. Waveform for LM and HM. Listed as time and nominal amplitude.

#### 2.4 Calibration of the tTEM System

Prior to the survey, the tTEM equipment was calibrated at the Danish national TEM test site near Aarhus, Denmark (Foged *et al.*, 2013)). The calibration is performed to establish the absolute time shift and data level in order to facilitate precise modeling of the data. No additional leveling or drift corrections are applied subsequently.



In order to perform the calibration, all system parameters (transmitter waveform, low pass filters, etc.) must be known to allow accurate modeling of the tTEM setup.

The calibration constants are determined by comparing a recorded tTEM response on the test site with the reference response. The reference response is calculated from the test site reference model for the used tTEM configuration.

Acceptable calibration was achieved with the calibration constants stated in Table 4. The calibration was performed on October 30, 2017. Calibration plots for both moments are shown in *Figure 5* and *Figure 6*.

Moment	Time Shift	Scale Factor
LM	-0.65 µs	1.00
HM	-0.7 µs	1.03

Table 4. Calibration constants.



Figure 5. Calibration plot for low-moment. The red curve is the recorded data, and the blue curve is the forward response from the national geophysical test-site in Denmark.





*Figure 6. Calibration plot for low-moment. The red curve is the recorded data, and the blue curve is the forward response from the national geophysical test-site in Denmark.* 

### 3.1 Data Processing – Workflow

The software package Aarhus Workbench is used for processing the tTEM data.

The aim of the processing is to prepare data for the geophysical interpretation. The processing primarily includes filtering and averaging of data as well as culling and discarding of distorted or noisy data.

The data processing can be divided into four steps:

**3. PROCESSING OF THE TTEM DATA** 

- 1. Import of raw data into a fixed database structure. The raw data appear in the form of .skb-, .sps- and .geo-files. Skb-files contain the actual transient data from the receiver. Sps-files contain GPS positions, transmitter currents etc., and the geo-file contains system geometry, low-pass filters, calibration parameters, turn-on and turn-off ramps, calibration parameters, etc.
- 2. Automatic processing: First, an automatic processing of the four data types is used. These are GPS-, and TEM data. This automatic processing is based on a number of criteria adjusted to the survey concerned.
- 3. Manual processing: Inspection and correction of the results of the automatic processing for the data types in question.
- 4. Adjustment of the data processing based on preliminary inversion results.

All data is recorded with a common time stamp. This time stamp is used to link data from different data types. The time stamp is given as the GMT time.

In the following, a short description of the processing of the different data types is shown. A more thorough description of the TEM data processing can be found in Auken *et al.* (2009).

#### 3.2 GPS-Positioning

The position of the tTEM-system is recorded continuously with two independent GPS receivers. Furthermore, the GPS data are shifted to the optimum focus point of the tTEM system.

# 0

### 3.3 Voltage Data

The voltage data are gathered continuously along the driving lines (Figure 7). The processing of voltage data is carried out in a twostep system: an automatic and a manual part. In the former, a number of filters designed to cull coupled or noise influenced data are used. Furthermore, raw data are stacked to increase the signalto-noise ratio. The averaging width of late-time data is wider than that of early-time data, as seen in Table 5. The data uncertainty is calculated from the data stack, with an additional 3% uniform data uncertainty. Typically, the stacked data (soundings) are generated for every 10 m depending on mapping speed, tTEM setup and target. Each sounding location will produce a 1D resistivity model when data is inverted.



Figure 7. Data section example with coupled data. The section displays 2 minutes (~0.5 km) of data. Each of the curves shows raw low-moment or high-moment data for a given gate time. The green line represents gate 1 of the high moment, the black line gate 2 etc. The grey lines represent data that have been removed due to couplings. A coupling can clearly be identified at 08:35:12 to 08:35:37. In this case the coupling are associated with buried power cables.



The automatic processing is followed by a manual inspection and correction. A number of power lines, roads, railroads, etc. typically crosses survey areas. As data near such installations often are heavily disturbed (coupled to the installations), it is necessary to remove these data, in order to produce geophysical maps without artifact from these manmade installations. The manual inspection and removal of coupled data is therefore essential to obtain high quality models at the end. In some cases, it is not possible to identify the source of the coupling even though it is evident in the data.

Figure 7 shows an example of strongly coupled data. First the coupled data parts are removed. Then data are stacked into soundings, and finally the late-time part of the sounding curves below the background noise level is excluded.

### 3.4 Processing - Technical Specifications

Table 5 shows key processing settings in the Aarhus Workbench, used for this survey.

Item		Value
Noise	Data uncertainty	From data stack
Processing	Uniform data STD	3%
Averaging filter	Sounding distance	2.5 s (~10 m)
	LM, width	2.5 s
	HM, width	2.5 s, 5 s
	At gate times	1e-5 s, 1e-4 s

Table 5. Processing settings.

# 0

# 4. INVERSION OF THE TTEM DATA

Inversion of the dataset and evaluation of the inversion results are carried out using the Aarhus Workbench software package. The underlying inversion code (AarhusInv) is developed by the HydroGeophysics Group, Aarhus University, Denmark (Kirkegaard *et al.*, 2015) and Auken *et al.* (2015)

The inversion is a 1D full non-linear damped least-squares solution in which the transfer function of the instrumentation is modeled. The transfer function includes turn-on and turn-off ramps, front gate, low-pass filters, and transmitter and receiver positions.

#### 4.1 Spatially Constrained Inversion

The spatially constrained inversion (SCI) (Viezzoli *et al.*, 2008) scheme is used when inverting the tTEM data. The SCI scheme uses constraints between the 1D-models, both along and across the mapping lines, as shown in Figure 8. The constraints are scaled according to the distance between soundings.



*Figure 8. Schematic presentation of the SCI setup. Constraints connect not only soundings located along the mapping lines, but also those across them.* 

The connection pattern of the constraints is designed using a Delaunay triangulation, which connects *natural* neighbor models. For line oriented data the Delaunay triangulation results in a model being connected to the two neighbor models at the mapping line and typically 2-3 models at the adjacent mapping lines, (see Figure 9). The SCI constraints are the preliminary condition for breaking down the line orientation in the dataset.



Figure 9. Example setup of SCI-constraints. The red points are the model positions. The black lines show the constraints created with the Delaunay triangles. The line distance in this example is 20 m, sounding distance is 10 m and the area is approximately  $1 \times 1 \text{ km}$ .

Constraining the parameters enhances the resolution of resistivities and layer interfaces, which are not well resolved in an independent inversion of the soundings.

SCI-setup parameters for this survey are listed in section 4.4.



#### 4.2 Smooth and sharp Inversion

Both a smooth and a sharp model inversion have been carried out. Both inversion types use the SCI-setup, but the regularization scheme is different.

The smooth regularization scheme penalizes the resistivity changes, resulting in smooth resistivity transitions both vertical and horizontal, as seen in Figure 9. The sharp regularization scheme (Vignoli *et al.*, 2015) penalizes the number of resistivity changes of a certain size, resulting in model sections with few, but relative shape resistivity transitions, as seen in see Figure 9. Normally the tTEM data are fitted equally well with the model types.

Assuming a geological layered environment, picking geological layer boundaries will be less subjective in a sharp model result compared to a smooth model.



*Figure 10. Profile showing of a smooth and sharp inversion of the same tTEM data set. Note the significant better defined layer boundaries in the as a result of the sharp inversion.* 

#### 4.3 Depth of Investigation

For each resistivity model a depth of investigation (DOI) is estimated, as described in Christiansen and Auken (2012). The DOI calculation takes into account the tTEM system transfer function, the number of data points, the data uncertainty, and the resistivity model.

EM fields are diffusive, and there is no discrete depth where the information on the resistivity structure stops. Therefore, we pro-



vide a conservative and a standard DOI estimate. As a guideline, the resistivity structures above the DOI conservative value are well contained in the tTEM data, and resistivity structures below the DOI standard value are weaker contained in the data and should normally be disregarded.

The DOI conservative and DOI standard estimates are included as a point themes map in Appendix I: The cross sections in Appendix II: are blanked in depth at the DOI standard values. Furthermore, the resistivity models are blanked below the DOI- standard value when compiling the mean resistivity maps.

#### 4.4 Inversion - Technical Specifications

The inversion settings for the smooth and sharp inversions in Aarhus Workbench are listed in Table 6.

Item		Value
Model setup	Number of layers	30
	Starting resistivities [Ωm]	40 ohmm
	Thickness of first layer [m]	1.0
	Depth to last layer [m]	150.0
	Thickness distribution of layers	Log increasing with
		depth
Smooth model:	Horizontal constraints on resistivities [factor]	1.3
Constraints/	Reference distance [m]	10
Prior constraints	Constraints distance scaling	(1/distance) <sup>1</sup>
	Vertical constraints on resistivities [factor]	3.0
	Prior, thickness	Fixed
	Prior, resistivities	None
	Minimum number of gates per moment	3
Sharp model:	Horizontal constraints on resistivities [factor]	1.03
Constraints/	Reference distance [m]	10
Prior constraints	Constraints distance scaling	(1/distance) <sup>1</sup>
	Vertical constraints on resistivities [factor]	1.08
	Prior, thickness	Fixed
	Prior, resistivities	None
	Minimum number of gates per moment	3
	Sharp vertical constraints	200
	Sharp horizontal constraints	300

Table 6. Inversion settings, smooth and sharp SCI setup

# 5. THEMATIC MAPS AND CROSS SECTIONS

To visualize the resistivity structures in the mapping area, a number of geophysical maps and cross sections have been created. Furthermore, a location map and a number of maps made for quality control (QC-maps) are found in the appendices.

#### 5.1 Location Map, QC-maps

A location map and quality control maps (QC) described below are located in Appendix I:

#### **Model Location and Lines**

This map shows the actual survey lines. Black dots mark where data are disregarded due to line turns or coupling. Blue dots mark where data is kept and inverted to a resistivity model.

A decent amount of data is disregarded due to coupling, and the coupled data are primarily associated with electrical cables, build-ings, and roads.

#### Number of Time Gates in Use

This maps shows the number of time gates (high and low moment) in use for each resistivity model. Few time gates correlate to areas with a low signal level (very resistive areas).

#### **Data Residual**

The data residual expresses how well the obtained resistivity models fit the recorded data. The data residual values are normalized with the data standard deviation, so a data residual below one corresponds to a fit within one standard deviation.

The data residual map in Appendix I: is for the smooth inversion. The data residual for the sharp inversion is similar. Some areas have relatively high data residual values (>2). This is primarily due to data with a high noise level, which again is associated with a low signal over resistive ground. In general, the data residuals are low, which is expected for this type of environment and geological setting.

#### Depth of Investigation (DOI)

This map shows the DOI estimates for the smooth model inversion result (see section 4.3 for a description of the DOI-calculation). DOI maps in elevation and depths are included in the appendix.



#### 5.2 Cross Sections

Cross sections of selected mapping lines are located in Appendix II: Each section holds the smooth inversion model bars, which are blanked at the DOI- standard value. Cross section of all mapping lines are available in the delivered Workspace.

#### 5.3 Mean Resistivity Maps

To make depth or horizontal slices, the mean resistivity in the depth or elevation intervals is calculated for each resistivity model and then interpolated to regular grids.

Figure 11 shows how the resistivities of the layers in a model influence the calculation of the mean resistivity in a depth interval [A, B].  $d_0$  is the surface,  $d_1$ ,  $d_2$  and  $d_3$  are the depths to the layer boundaries in the model.  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  and  $\rho_4$  are the resistivities of the layers.

The model is subdivided into sub-thicknesses  $\Delta t_{1-3}$ . The mean resistivity ( $\rho_{\text{vertical}}$ ) is calculated as:

$$\rho_{vertical} = \frac{\rho_1 \cdot \Delta t_1 + \rho_2 \cdot \Delta t_2 + \rho_3 \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 \cdot \Delta t_3}$$



*Figure 11.* The figure illustrates how the resistivities of the layers influence the mean resistivities in a depth interval [A:B]

In the general term the mean resistivities in a depth interval is calculated as:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \rho_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}$$



where *i* runs through the interval from 1 to the number of subthicknesses. The mean resistivity calculated by the above formula ( $\rho_{\text{vertical}}$ ) is called a vertical mean resistivity - equal to the total resistance if a current flows vertically through the interval.

By mapping with a TEM method, the current flows only horizontally in the ground. It is therefore more correct to perform the mean resistivity calculation in conductivity, called the horizontal mean resistivity ( $\rho_{\text{horizontal}}$ ). The horizontal mean resistivity is equal to the reciprocal of the mean conductivity ( $\sigma_{\text{mean}}$ ) and is calculated as:

$$\rho_{horizontal} = \frac{1}{\sigma_{mean}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n} \left( \frac{1}{\rho_i} \right) \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i} \right]^{-1}$$

For this survey, horizontal mean resistivity themes have been generated from the smooth model inversion result in 5 m depth intervals from 0 to 30 m, and in 10 m intervals from 30 to 70 m. The resistivity models have been blanked below the DOI standard depth.

The interpolation of the mean resistivity values to regular grids is performed by kriging interpolation (Pebesma and Wesseling, 1998), with a node spacing of 5 m and a search radius of 50 m. Addition linear pixel smoothing was subsequently applied. The mean resistivity maps are located in Appendix III:

#### 5.4 Deliverables

#### Digital

- This report incl. theme maps and profiles as PDF-files.
- Aarhus Workbench workspace holding raw data, processed data, inversion results, theme maps, and profiles. The workspace holds both the smooth and the sharp inversion results.

The workspace can be delivered upon request.

Note: All digital maps and data are geo-referenced to coordinate system WGS84, UTM zone 32N.



# 6. CONCLUSION

The tTEM survey was carried out successfully and a careful data processing has been performed. Subsequently the data was inverted to produce both a smooth and a sharp resistivity model which describes the resistivity structures of the soil down to more than 50 m depth. The tTEM survey reveals a detailed three-dimensional resistivity picture of the subsurface, due to the close line spacing and lateral resolution along the driving lines. The final resolution is a 25x10 measurement grid. The survey area took 1 days to map, resulting in 23,2 km of data and 1406 models.

The next step in the project is to compare the tTEM results with ERT and boreholes performed in the area. A note will jointly be drafted by HGG and Rambøll documenting the results.



### 7. REFERENCES

- Auken, E., Christiansen, A.V., Fiandaca, G., Schamper, C., Behroozmand, A.A., Binley, A., Nielsen, E., Effersø, F., Christensen, N.B., Sørensen, K.I., Foged, N. & Vignoli, G., 2015. An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data, *Exploration Geophysics*, 2015, 223-235.
- Auken, E., Christiansen, A.V., Westergaard, J.A., Kirkegaard, C., Foged, N. & Viezzoli, A., 2009. An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system, *Exploration Geophysics*, 40, 184-192.
- Christiansen, A.V. & Auken, E., 2012. A global measure for depth of investigation, *Geophysics*, 77, WB171-WB177.
- Christiansen, A.V., Auken, E. & Sørensen, K.I., 2006. 6 The transient electromagnetic method. *in Groundwater Geophysics*. A tool for hydrogeology, pp. 179-224, ed. Kirsch, R. Springer.
- Foged, N., Auken, E., Christiansen, A.V. & Sørensen, K.I., 2013. Test site calibration and validation of airborne and ground based TEM systems, *Geophysics*, 78, E95-E106.
- Kirkegaard, C., Andersen, K., Boesen, T., Christiansen, V., Auken, E.
  & Fiandaca, G., 2015. Utilizing massively parallel coprocessors in the AarhusInv 1D forward and inverse AEM modelling code, ASEG Extended Abstracts, 2015, 1-3.
- Pebesma, E.J. & Wesseling, C.G., 1998. Gstat: A Program for geostatistical Modelling, Prediction and Simultation, *Computers & Geosciences*, 24, 17-31.
- Viezzoli, A., Christiansen, A.V., Auken, E. & Sørensen, K.I., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by Spatially Constrained Inversion, *Geophysics*, 73, F105-F113.
- Vignoli, G., Fiandaca, G., Christiansen, A.V., Kirkegaard, C. & Auken, E., 2015. Sharp spatially constrained inversion with applications to transient electromagnetic data, *Geophysical Prospecting*, 63, 243-255.



# APPENDIX I: LOCATION MAPS, QC MAPS

This appendix includes maps of:

- Model location and mapping lines
- Data residual
- Number of data points
- Depth of investigation, in depth





tTEM Stenlille 2017

Location, Stenlille Black: tTEM lines, Red: tTEM Model

UTM 32N WGS84



















# **APPENDIX II: CROSS SECTIONS**

Selected cross sections for the smooth inversion are included. Each section holds the model bars blanked at the DOI- standard value. Sections for all the mapping lines are available in the delivered Workspace.





# APPENDIX III: MEAN RESISTIVITY MAPS

This appendix includes mean resistivity maps generated from the smooth model inversion result in 5 m depth intervals from 0 to 30 m, and in 10 m intervals from 30 to 70 m. The resistivity models have been blanked at the DOI standard value prior to the interpolation to regular mean resistivity grids.

The interpolation of the mean resistivity values is performed by kriging interpolation, with a node spacing of 5 m, a search radius of 50 m, and with additional pixel smoothing.



100

60

Resistivity (ohm-m)

UTM 32N WGS84



60 Resistivity (ohm-m)

100



Resistivity (ohm-m)





UTM 32N WGS84 1 km

60 Resistivity (ohm-m)

100




60

100

1 km



1 km



1 km