



## Kombineret tolkning af GCM-data og SkyTEM-data

Report number 21-05-2019, May2019



# Kombineret tolkning af GCM-data og SkyTEM-data

Maj 2019

HydroGeophysics Group  
Department of Geoscience,  
Aarhus University, Denmark



AARHUS UNIVERSITET



## INHOLDSFORTEGNELSE

<b>Inholdsfortegnelse .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Indledning.....</b>	<b>2</b>
1.1 Projektbeskrivelsen	3
<b>2 Kortlægningsområdet .....</b>	<b>4</b>
2.1 SkyTEM	5
2.2 GCM-data	7
<b>3 Tolkingsmetodik.....</b>	<b>11</b>
3.1 LCI	11
3.2 Voxel inversionssetup	11
<b>4 Resultater .....</b>	<b>14</b>
4.1 LCI-resultater	14
4.2 Voxel-resultater	23
<b>5 Diskussion.....</b>	<b>34</b>
<b>6 Konklusion .....</b>	<b>36</b>
<b>7 References .....</b>	<b>39</b>



## 1 INDLEDNING

Kortlægningen af de meget overfladenære geologiske lag er interessant i mange sammenhænge, men særligt i forhold til kortlægning af grundvandsressourcens sårbarhed, nitrat- og pesticidfølsomme områder og påvirkningen af overfladevand.

SkyTEM-systemet er de senere år udviklet både med hensyn til at udnytte tidligere tider og samtidig måle med et større magnetisk moment. Udviklingen kan ske begge steder fordi der benyttes et såkaldt to-moment setup. Dette giver mere overfladenær information (tidligere tider) kombineret med mere dyb information (større moment). SkyTEM-kortlægninger er i vid udstrækning også blevet anvendt til sårbarhedskortlægning. En meget detaljeret opløsning af de øverste ~5 m er dog stadig en udfordring for SkyTEM-systemet.

Effektiv og detaljeret fladekortlægning af de øverste 5-8 m kan dog opnås med nyere Ground Conductivity Meter (GCM) instrumenter, da de indeholder flere målekonfigurationer end tidligere generationer af GCM-instrumenter og derved giver information om resistivitetsvariationer i dybden. Således indeholder DualEM-421s GCM-instrumentet, som blevet anvendt i testområdet, 6 forskellige konfigurationer med forskellig dybdefølsomhed, mod f.eks. et ældre EM31/EM38 GCM-instrument med blot én konfiguration. Fladedækning opnås ved at GCM-instrument trækkes over jorden med tætliggende linjer.

En kombineret tolkning i selve inversionsfasen af SkyTEM og GCM data fra samme område, synes derfor oplagt. I dette projekt er den kombinerede tolkning foretaget med en nyudviklet algoritme kaldet voxel-inversion. Algoritmen er udviklet i HyGEM-projektet, men anvendes til kombineret tolkning for første gang i dette projekt. I klassisk inversion findes én model alle de steder, hvor man har målt et datasæt. I voxel-metodikken er modellen afkoblet fra målepunkterne, sådan, at der lægges et modelnet regulært ud over måleområdet (voxler) og informationen interpoleres fra observationspunkterne ind til nodepunkterne i voxel-nettet. Denne fremgangsmåde har flere fordele blandt andet at man kan beskrive den geofysiske model i præcist det samme net/grid som f.eks. en efterfølgende grundvandsmodel eller geologisk model opstilles i. Hermed mindskes tabet ved overførsel af information imellem modellerne.



Denne rapport dokumenter primært tolkningsmetodikken og problemstillingerne ved en kombineret tolkning, og viser tolkningsresultater fra testområdet beliggende på det nordlige Djursland.

## 1.1 PROJEKTBEKRIVELSEN

Projektbeskrivelsen har følgende tre hovedpunkter:

**1) En forbedret modelbeskrivelse i de øverste dele af undergrunden**  
GCM-dataene vil særligt bidrage med information i de øverste ca. 5-8 meter, hvor SkyTEM-dataene er svagest. SkyTEM-dataene vil bidrage med den resterende information, men ved at fastlægge de øverste dele af modellen øges præcisionen også på de underliggende lag, hvorfor en kombineret tolkning af dataene er at foretrække frem for sammenstyknings af to individuelle tolkninger.

**2) Forbedret lateral beskrivelse af de overfladenære lag**  
GCM metoden har en langt højere lateral opløsning, da der indsamles et datasæt cirka for hver meter, hvor SkyTEM har et datapunkt for hver 15-20 meter. Yderligere bliver kortlægninger med SkyTEM udført med linjeafstande på mindst 100 m, mens GCM indsamles med en afstand helt ned til 2 – 5 meter.

**3) Modul i Aarhus Workbench til integreret tolkning**  
For at de ovenfor nævnte forbedringer kan blive praktisk opnåelige for deltagerne i kortlægningen udvikles et modul i Aarhus Workbench så dataintegrationen af GCM data og SkyTEM101-data kan foregå i et intuitivt og kendt databehandlingsmiljø. Med integrationen i Aarhus Workbench sikres desuden at modulet kan anvendes på flere datatyper end de her nævnte, og at de normale dokumentations- og kvalitetssikringsprocedurer kan anvendes fuldstændigt som hidtil.

Projektet er udført som et samarbejde mellem Institut for Geoscience, Aarhus Universitet og Miljøstyrelsen, med Rambøll A/S, som underleverandør på GCM-dataindsamling og processering.

Rapporten er udført af Nikolaj Foged og Anders Vest Christiansen



## 2 KORTLÆGNINGSOMRÅDET

Kortlægningsområdet for de kombinerede tolkninger udgør ca. 17 km<sup>2</sup> og er angivet i Figur 1 med tilhørende terrænmodel i Figur 2a.



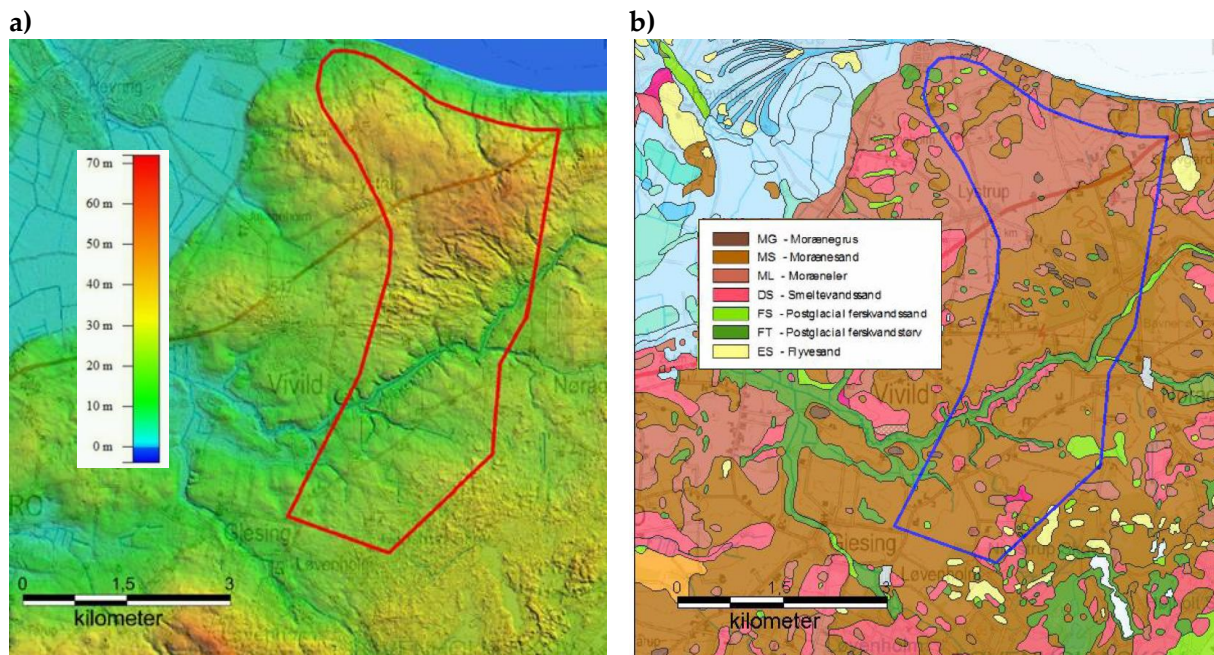
Figur 1 Lokalisering af GCM/SkyTEM kortlægningsområdet (rød polygon).  
Detaljeret luftfotokort med data positioner se figur 3 og 4.

Topografisk kan området opdeles i to områder hhv. nord og syd for Hevring Å, der løber fra nordøst mod sydvest gennem området. Terrænkoten omkring Hevring Å er omkring 10 m. I den centrale og nordlige del af området er terrænkoten 50 m o.h., mens terrænet syd for Hevring Å generelt ligger omkring kote 20 m o.h. Længst mod nord falder terrænet ud mod kysten.

Det tilhørende jordartskort er vist i Figur 2b. Som det fremgår af jordartskortet, er de sydlige tre-fjerdedele af området domineret af morænesand (MS), med enkelte mindre områder beskrevet ved moræneler (ML), morænegrus (MG), smeltevandssand (DS) og ferskvandssand (FS). I området omkring Hevring Å, ses tilstedeværelsen af blødbundsaflejringer i form af ferskvandstørv (FT).



Den nordligste del af området er overvejende beskrevet som moræneler (ML) med mindre indslag af jordarter som MS, DS, FS og FT. Jordartskortet er baseret på prøvetagning med 100-200 m mellemrum, hvorfor detaljeringsgraden ikke vurderes tilstrækkelig til tolkning af jordbundsvariationer på matrikelniveau.



Figur 2 a) Terrænoverfladen. b) Jordartskort (GEUS). Den røde og blå polygon angiver området for den kombinerede tolkning. Begge figurer fra [2].

Kortlægningsområdet for den kombinerede tolkning blev udvalgt som et delområde af den større Djurs Vest SkyTEM-kortlægning, der udviste både relativt høje og lave resistiviteter i de øverste 10 m. Således kan den kombinerede tolkning testes under forskellige resistivitetsforhold.

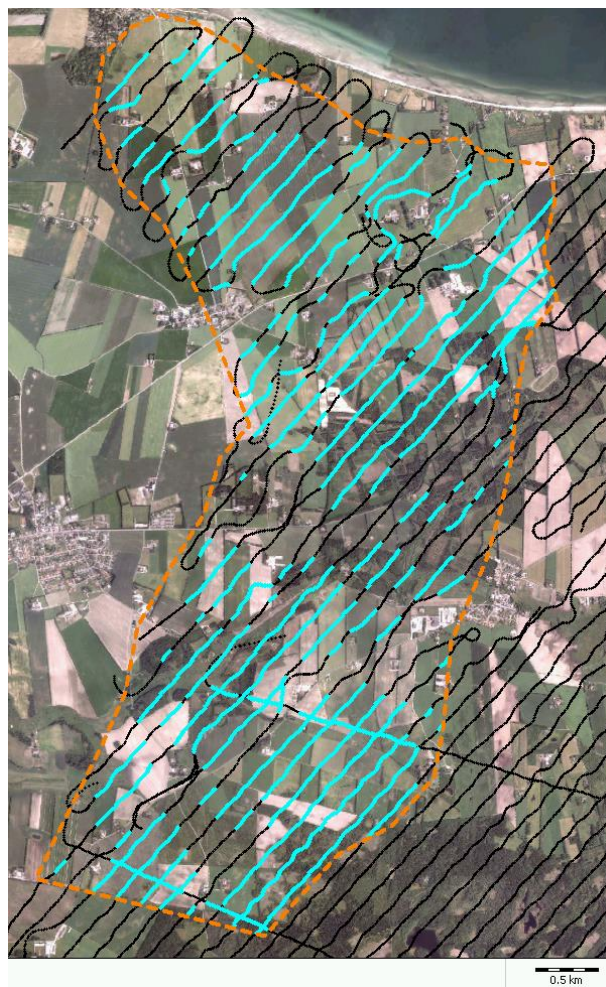
## 2.1 SKYTEM

SkyTEM datasættet er et subset af den større Djurs Vest SkyTEM-kortlægning udført september 2013. Figur 3a viser lokaliseringen af de anvendte SkyTEM-data. SkyTEM-dataene er indsamlet med SkyTEM<sup>101</sup>-systemet, hvilket på indsamlingstidspunktet var det mest overfladenært fokuserende SkyTEM-system. Linjeafstanden er ca. 170



m med en sonderingsafstand langs flyvelinjerne på ca. 13 m. I alt er der ca. 5.000 sonderinger i interesseområdet.

De her anvendte SkyTEM-data, -processering og -inversionsmodeller er alle taget fra GERDA uden yderligere bearbejdning (processering og inversion er udført af Rambøll) og anvendt i dette projekt. Yderligere information vedrørende SkyTEM-dataindsamlingen og processeringen findes i Rambølls datarapport /1/.



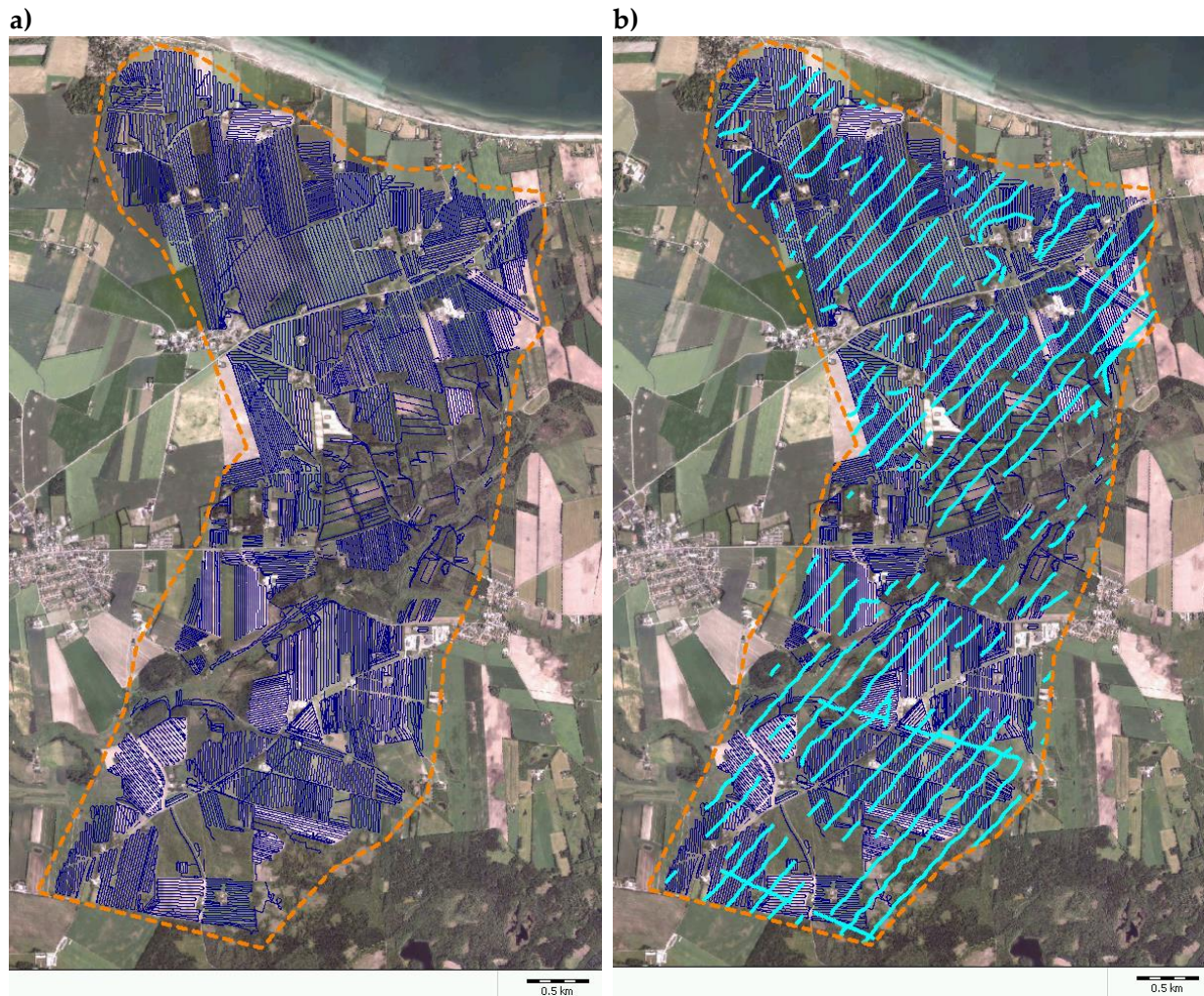
*Figur 3. SkyTEM-kortlægning Djurs Vest. Den orange polygon angiver området for de kombinerede SkyTEM/GCM-inversioner. Sorte flyvelinjer er del af SkyTEM DjursVest-kortlægningen. De lyseblå markeringer er de tilbageværende SkyTEM-data efter processering (sletning af koblinger) i interesseområdet.*





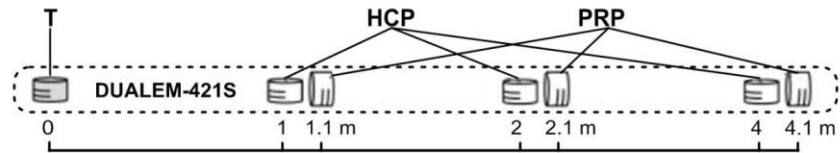
## 2.2 GCM-DATA

GCM-dataindsamlingen blev udført med et DualEM-421s instrument af Rambøll A/S i perioden 10. marts til 28. april 2015. Lokalisering af GCM-kørelinjerne er vist i Figur 4a og udgør i alt ca. 690 linje km GCM-data. Linjeafstanden på regulære marker er ca. 20 m, mens områder med skov og lignende er forsøgt dækket ved at køre på de tilgængelige skovveje, som det fremgår af Figur 4a. Sonderingsafstanden langs linjerne er 5 m, resulterende i ca. 123.000 sonderinger. Figur 4b viser det samlede dataset, der indgår i den kombinerede tolkning bestående af SkyTEM og GCM-data. Som det fremgår af Figur 4b, er der enkelte steder indsamlet GCM data præcist sammenfaldende med SkyTEM-flyvelinjer (se evt. Figur 7). Ved disse sammenfaldende linjer er der i afsnit 4.1 udført en detaljeret sammenligning af GCM, SkyTEM og de kombinerede tolkningsresultater.



Figur 4 a) Lokalisering af GCM kørelinjer (blå). b) Lokalisering af data der indgår i den kombinerede tolkning. Blå: GCM, Lyseblå: SkyTEM. Orange polygon angiver området for de kombinerede tolkninger.

DualeM-421s-instrumentet indeholder 6 målekonfigurationer fordelt på tre med horisontal coplanar modtagergeometri (HCP) og tre med vinkelret (perpendicular) modtager geometri (PRP), som vist i Figur 5.



Figur 5. DualEM-421s geometri og feltbillede. Den horisontale sender (T) er placeret i fronten (0 m). Afstandene til modtagerspolerne (HCP, PRP) er ca. 4, 2 og 1 m, deraf navnet DualEM-421s.

Yderligere information vedrørende dataindsamlingen, processeringen og standard-tolkningerne findes i Rambølls datarapport /2/.

For GCM-data er det generelt vanskeligt at fastlægge data-usikkerheden bl.a. fordi man ikke kan foretage en egentlig kalibrering af instrumentet som f.eks. for SkyTEM på det nationale teststed. Dette hænger sammen med primært to ting; for det første er et GCM-udstyr så overfladenært at det vil være påvirket af temperatur- og vandindholdsændringer i jorden, og for det andet har denne type instrumenter problemer med at de målte dataværdier "driver" henover fx en måledag eller en målekampagne. I den oprindelige dataprocessering/tolkning er der anvendte en uniform datausikkerhed på 5 % (faktor 1.05), og i højmodstandsområderne opnås relativt høje dataresidualer (/2/). Dette skyldes primært at usikkerheden på datapunkter med lavt signal (høj rho-a værdi) er større end de 5 %. For tolkninger i denne rapport er usikkerheden på GCM-data med lavt signal derfor øget ift. de oprindelige 5 %, for at opnå en bedre repræsentation af den faktiske usikkerhed/støj på data. Tabel 1 angiver de estimerede datausikkerheder der tilskrives data i dette studie. Data med lavere værdi end angivet i tabellen har bibeholdt deres oprindelige usikkerhed.



<b>Data-værdi [rho-a]</b>	<b>Usikkerhed (faktor)</b>
1.450-2.000	1,3
2.000-2.500	1,4
2.500-3.333	1,5
3.333-5.000	1,7
5.000-10.000	2,0
>10.000	3,0

*Tabel 1. Opdaterede datausikkerheder (STD) for data med lavt signalniveau (høj rho-a værdi).*



## 3 TOLKNINGSMETODIK

### 3.1 LCI

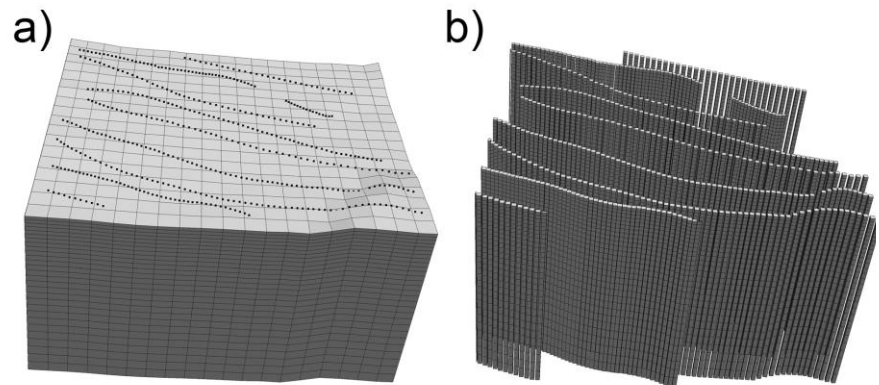
Der blev udvalgt en række SkyTEM-linjer, hvor der blev indsamlet GCM-data nøjagtig sammenfaldende med disse linjer. Formålet var at foretage en kombineret tolkning af begge datasæt langs disse linje i en klassisk LCI-opsætning (lateral constraints). Herved kan effekten ved den kombinerede tolkning illustreres og studeres i detalje på profiler, hvor man har geografisk sammenfaldende data.

Den kombinerede LCI-tolkning følger metodikken beskrevet i /3/. LCI-inversions-resultaterne af GCM-data og SkyTEM-data enkeltvis og kombineret for de seks udvalgte profiler er vist i afsnit 4.1.

### 3.2 VOXEL INVERSIONSETUP

Ved en almindelig inversion af SkyTEM-data eller GCM-data tilpasses de enkelte sonderinger med 1D resistivitetsmodeller, som lateralt er sammenbundet i en såkaldt LCI (Laterally Constrained Inversion) /4/ eller SCI (Spatially Constrained Inversion) inversionsopsætning /5/. Der opnås således en resistivitetsmodel for hver sonderingsposition (Figur 6b) ved inversion af data. Efterfølgende vil man typisk interpolere resistivitetsmodellerne ud i regulære horisontale grids, for at producere fladekort eller stakke dem for at få en 3D-repræsentation. Ved en voxel-inversion er resistivitetsmodellerne i selve inversionsfasen defineret i et regulært 3D-grid (Figur 6a). Horisontalt med en fast nodeafstand og vertikalt typisk med stigende lagtykkelser med dybden. Figur 6 viser forskellen mellem det regulære voxel-modelrum og det normale inversionssetup med én 1D model ved hver dataposition. Voxel-metodikken er yderligere beskrevet i /6/.

Ved voxel-inversion dannes i den iterative inversionsfase en midlertidig lokal 1D-resistivitetsmodel ved sonderingspositionerne til beregning af forwardrespons og datatilpasning, men selve modelopdateringen foregår i 3D-resistivitets gridet.



Figur 6. a) Voxel model-cube. De sorte prikker angiver datapositioner. b) Normalt inversionssetup med én 1D model ved hver dataposition, som anvendt ved f.eks., LCI- og SCI-inversion.

Voxel-inversionsopsætningen omfatter en række indstillinger: Modeldiskretisering, horisontale og laterale resistivitetsbånd (regularisering), søgeradius, mv. Tabel 2 dokumenterer voxel-opsætningen for de tre voxel-inversioner (GCM alene, SkyTEM alene, GCM + SkyTEM), som der vises resultater for i afsnit 4.2. Nogle udvalgte voxel-indstillinger kommenteres i det følgende.

Type	GCM	SkyTEM	SkyTEM+GCM
Horisontal diskretisering (bredde)	20 m grid	20 m grid	20 m grid
Antal lag	10	30	30
Vertikal diskretisering (tykkelse)	0.2 - 4.0 m	0.2 - 31 m	0.2 - 31 m
Dybde, sidste laggrænse	11 m	300 m	300 m
Horisontale bånd	1.3	1.3	1.3
Vertikale bånd	2.0	2.0	2.0
Startresistivitet	70 $\Omega$ m	70 $\Omega$ m	SkyTEM resultat
Søgeradius	400 m	400 m	400 m
Derivatives footprint	2x2 noder	2x2 noder	2x2 noder
Model-interpolation	Power 2	Power 2	Power 2
Uforbundne modelnoder	Vertikale bånd: off	Vertikale bånd: off	Vertikale bånd: off

Tabel 2. Voxel-setup for GCM, SkyTEM og GCM + SkyTEM inversioner.



Der er så vidt muligt valgt samme voxel-opsætning for de tre inversioner for at kunne sammenligne resultaterne på tværs. Dette betyder at der er foretaget nogle kompromisser på blandt andet den horisontale og vertikale diskretisering som beskrevet nedenfor.

### **Horisontal og vertikal diskretisering**

Den horisontale diskretisering skal ideelt set afspejle den forventede laterale opløsningsevne og sensitivitet for den pågældende metode. I praksis er det dog også en afvejning imod beregningstid og hukommelsesforbrug. Efter mange test er der her valgt en horisontal diskretisering på 20 m, hvilket er lidt under-diskretiseret (for stor node-afstand) for GCM-dataene, men en over-diskretisering (for lille node-afstand) for SkyTEM-datasættet.

Den vertikale diskretisering er relativ fin i toppen, startende med lagtykkelse på 0,2 m, hvilket er nødvendig for at tilpasse GCM-datasættet. Den fine top-diskretisering er bibeholdt i alle tre opsætninger, selvom den ikke er nødvendig for at tilpasse SkyTEM-dataene. For GCM-opsætningen, stopper den vertikale model-diskretisering ved 11 m, da indtrængningsdybden for GCM-data normalt kun er 5-7m. Tilsvarende rækker modellerne med SkyTEM data helt ned til 300 m for at sikre at den forventede indtrængningsdybde altid er dækket.

### **Startmodel**

Startmodellen til LCI-inversionerne og voxel-inversionerne for GCM alene og SkyTEM alene er et homogent halvrum på 70  $\Omega$ m. For den kombinerede GCM og SkyTEM voxelinversion er inversionsresultatet fra voxel SkyTEM-tolkningen anvendt som startmodel for at sikre et stabilt inversionsresultat i områder med stor afstand til SkyTEM-datapunkter.



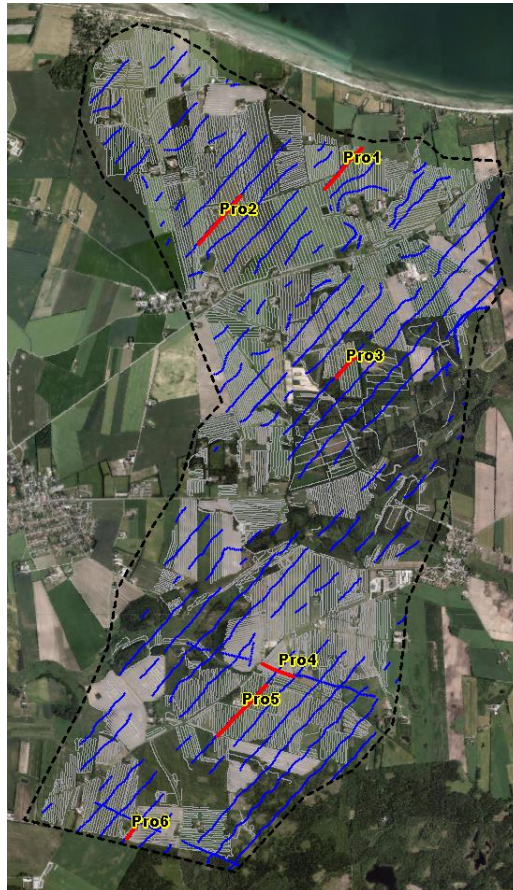
## 4 RESULTATER

I dette afsnit, sammenlignes og kommenteres inversionsresultaterne for GCM og SkyTEM hver for sig og for den kombinerede inversion af SkyTEM og GCM. Afsnit 4.1 med LCI tolkningsresultater langs sammenfaldende GCM- og SkyTEM-linjer og afsnit 4.2 med voxel-inversionsresultaterne.

### 4.1 LCI-RESULTATER

Figur 7 viser placeringen af de seks profiler, hvor der er foretaget kombineret LCI-tolkning af GCM- og SkyTEM-dataene og LCI-tolkning af datatyperne hver for sig. Profilerne med LCI-tolkningsresultaterne præsenteres i Figur 8 til Figur 13. Hver af disse figurer indeholder: Øverst; GCM-tolkningen med tilhørende panel med dataresidualer, midt; SkyTEM-tolkningen med tilhørende dataresidualer, bund; den kombinerede tolkning med tilhørende dataresidualer. Der er på resistivitssektionerne zoomet ind på de øverste ~40 m for at kunne se og evaluere GCM-dataenes indvirkning på den kombinerede tolkning. I det følgende beskrives to af profilerne udførligt.





Figur 7. LCI kombineret inversion. De røde linjer markerer de seks LCI-profiler, med sammenfaldende SkyTEM- (blå) og GCM-data (grå).

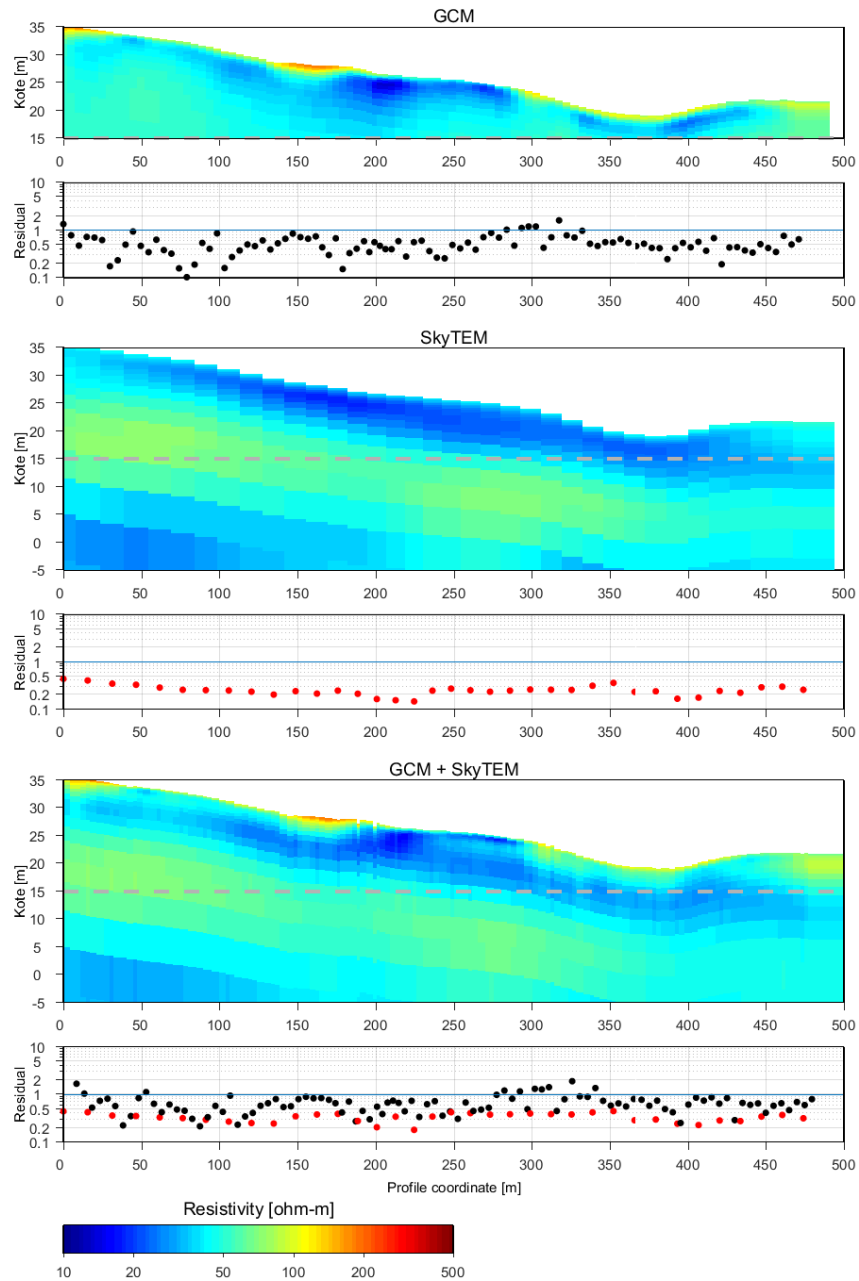
Profil Pro1 (Figur 8) viser tydeligt hvad der opnås ved at kombinere de to dataset i én tolkning. Det tynde højmodstandslag der ses øverst i GCM-tolkningen erkendes slet ikke af SkyTEM-metoden, da det kun er få meter tykt og det genererer derfor meget lidt signal. Ved den kombinerede tolkning opnås den ønskelige effekt, således at de øverste 5-8 m afspejler GCM-tolkningen og den dybere del af modelsektionen afspejler SkyTEM-tolkningen. Det bemærkes at datatilpasningen for den kombinerede tolkning er god (under 1) og sammenlignelig med datatilpasningen på de separate tolkninger. Dette fortæller os at de to datatyper uden problemer kan enes om en fælles resistivitetsmodel og der er således ikke diskrepans de to dataset imellem. Tilsvarende effekt opnås ved den kombinerede tolkning for hovedparten af de øvrige profiler. Et eksempel er profil Pro4 (Figur 11), hvor den detaljerede lagdeling i de øverste ~5 m fra GCM-tolkningen overføres til den kombinerede tolkning, mens laggrænsen til lavmodstandslaget i kote ~7 m, der ikke kortlægges af GCM-metoden er tydelig i SkyTEM-tolkningen og også fremkommer i den kombinerede tolkning.



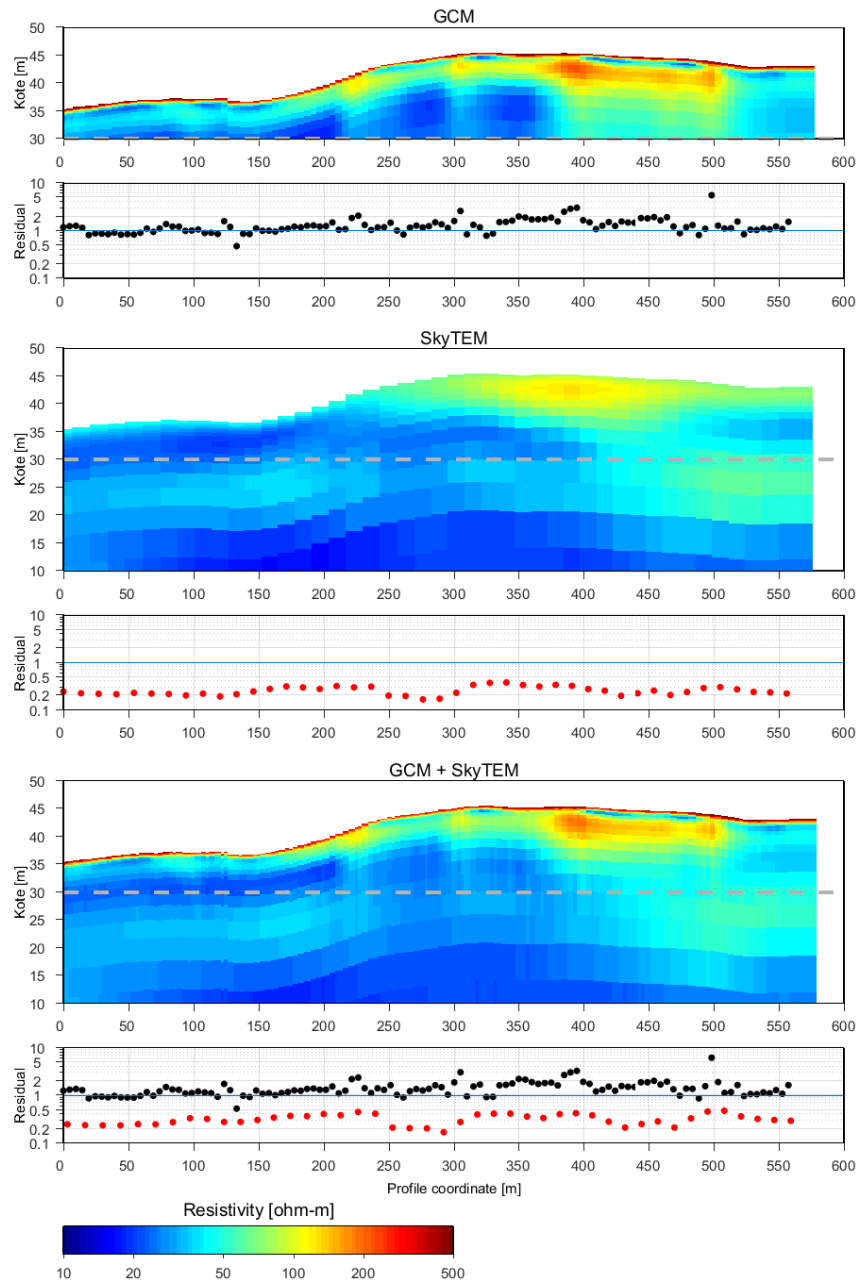
Ligeledes er datatilpasningen sammenlignelig for de to separate tolkninger og den kombinerede tolkning.

Profil Pro3 (Figur 10) er placeret i et område hvor den overfladenære resistivitet er meget høj og resultaterne skiller sig ud fra de øvrige profiler. GCM-sektionen viser hovedsageligt resistiviteter over 500  $\Omega\text{m}$  med to tynde konduktive indslag. Datatilpasningen for GCM-sektionerne er generelt meget dårlig (værdier mellem 2-10). Den dårlige tilpasning af GCM dataene skyldes de meget høje resistiviteter der stor set ikke genererer noget EM-signal og vi er således tæt på representationsgrænsen internt i GCM-instrumentet, som er 0,1 mS/m eller 10.000 ohmm. Data er så støjede at man kunne argumentere for at slette dem helt, men her er de medtaget for dog at indikere, at der er tale om et område med høj resistivitet. Alternativt kunne datausikkerhederne øges endnu mere end de anvendte værdier i Tabel 1, men dette er svært at vurdere da man ikke umiddelbart kan måle eller på anden måde beregne den faktiske usikkerhed på data. I den kombinerede tolkning (Figur 10) opnås tilsvarende dårlige datatilpasning for GCM-dataene. Den relativt høje GCM-resistivitet synes i dette tilfælde ikke at være forenelig med SkyTEM-dataene, hvilket giver en noget dårligere SkyTEM-datatilpasning i den kombinerede tolkning. Man ser også at den kombinerede model er påvirket dybt ned af GCM-data. En model med et meget højresistivt lag oven på noget mere lavresistivt er favorabel for indtrængningsdybden for EM metoder, og det kan således forventes i dette tilfælde at GCM faktisk har noget sensitivitet i +10 m dybde. I dette tilfælde skal man dog holde sig for øje dels, at data er meget støjede, og dels, at de to datasæt faktisk ikke rigtig kan enes om en fælles model - residualerne stiger for begge dataset i den kombinerede tolkning.

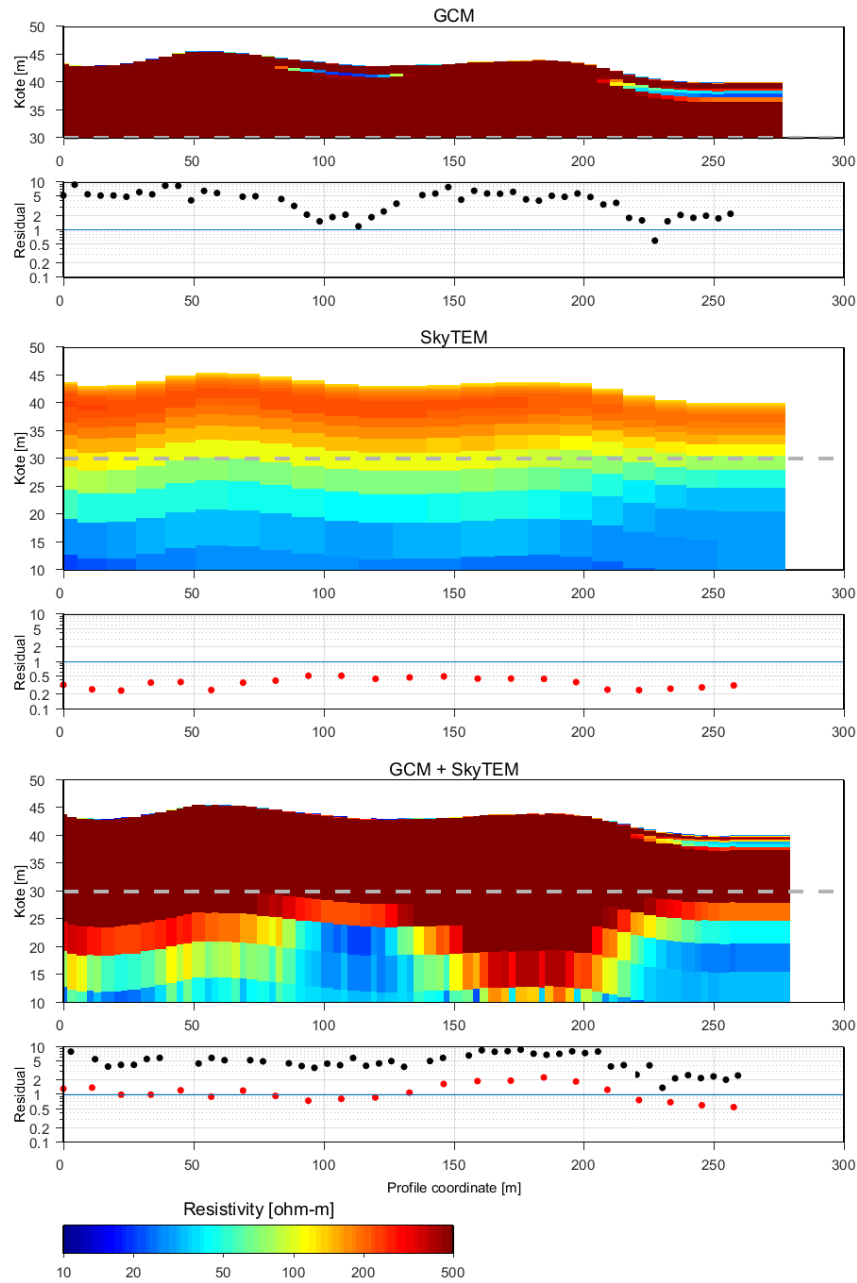
Det kombinerede tolkningsresultat er dog acceptabelt, taget inputdataenes kvalitet i betragtning.



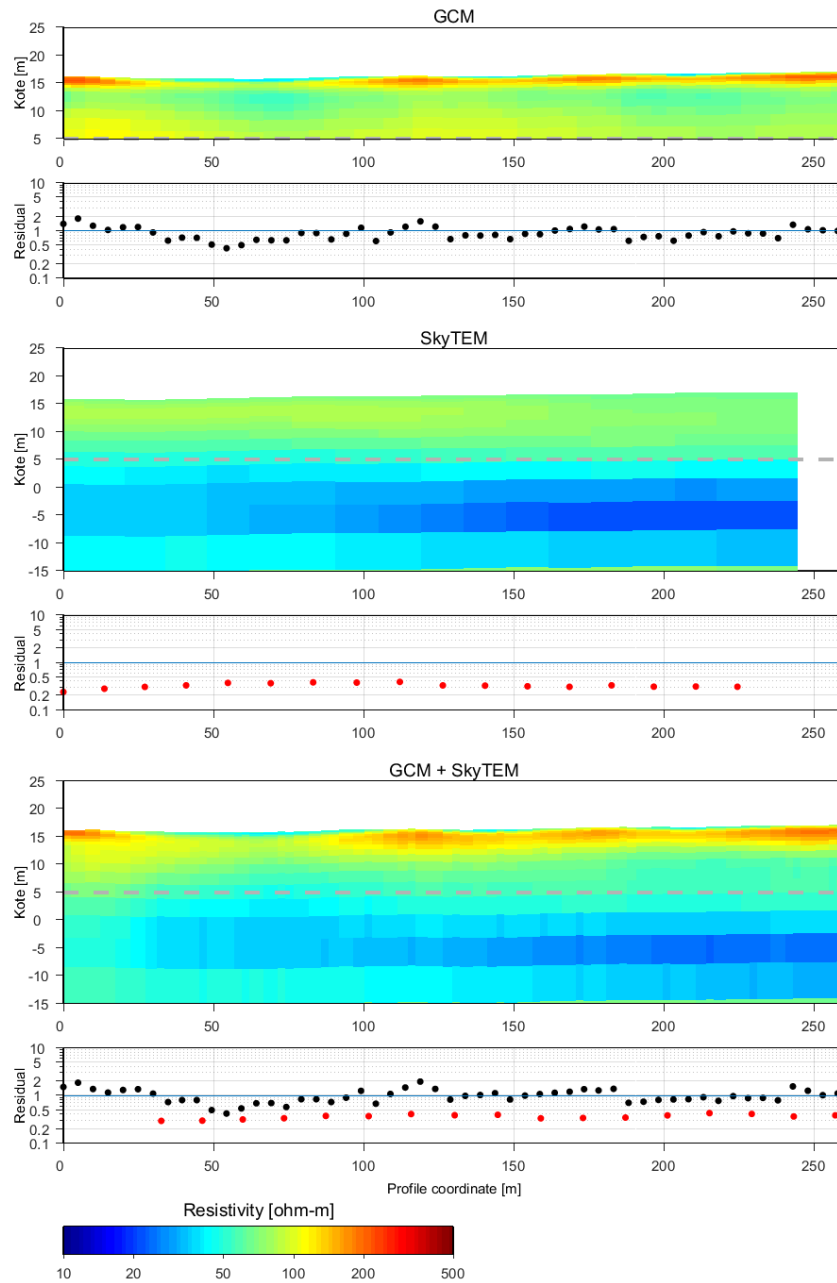
Figur 8. Pro1, LCI inversion af hhv. GCM-data, SkyTEM- data og kombineret inversions af GCM- og SkyTEM-data. Panelet under hver modelsektion viser datatilpasningen (dataresidual) for de enkelte sonderinger (røde prikker: GCM, sorte prikker: SkyTEM). Den gråstiplede linje på modelsektionerne markerer bunden af den viste GCM-sektion.



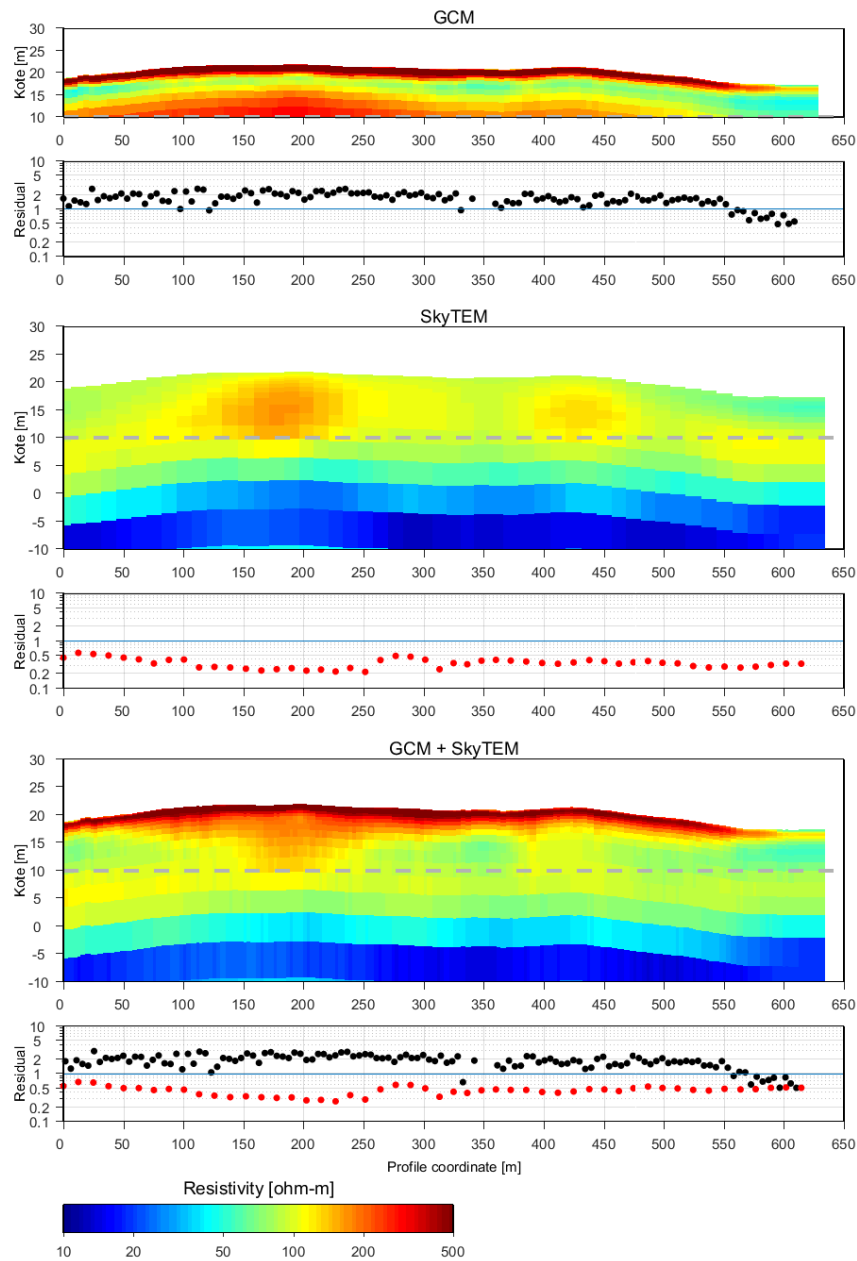
Figur 9. Pro2, LCI inversion af hhv. GCM-data, SkyTEM- data og kombineret inversions af GCM- og SkyTEM-data. Panelet under hver modelsektion viser datatilpasningen (dataresidual) for de enkelte sonderinger (røde prikker: GCM, sorte prikker: SkyTEM). Den gråstiplede linje på modelsektionerne markerer bunden af den viste GCM-sektion.



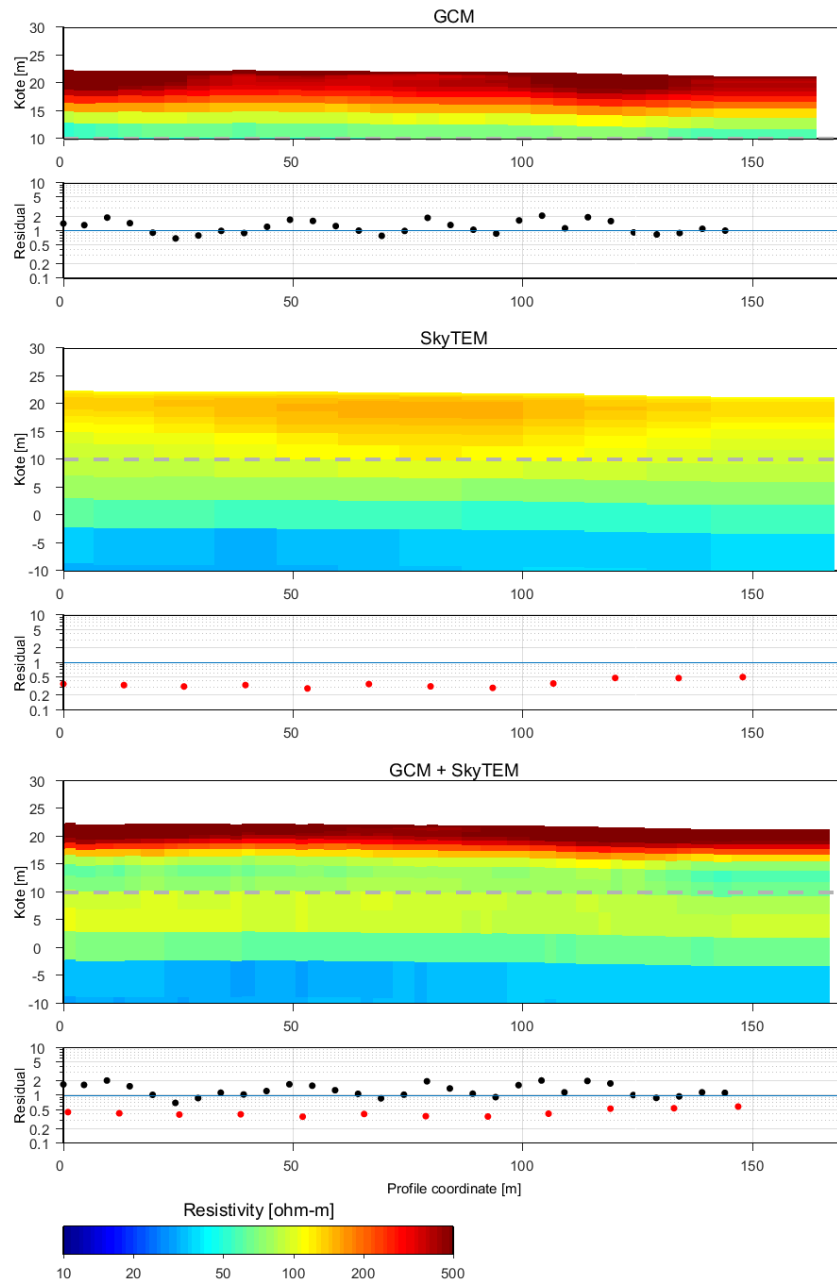
Figur 10. Pro3, LCI inversion af hhv. GCM-data, SkyTEM- data og kombineret inversions af GCM- og SkyTEM-data. Panelet under hver modelsektion viser datatilpasningen (dataresidual) for de enkelte sonderinger (røde prikker: GCM, sorte prikker: SkyTEM). Den gråstiplede linje på modelsektionerne markerer bunden af den viste GCM-sektion.



Figur 11. Pro4, LCI inversion af hhv. GCM-data, SkyTEM- data og kombineret inversions af GCM- og SkyTEM-data. Panelet under hver modelsektion viser datatilpasningen (dataresidual) for de enkelte sonderinger (røde prikker: GCM, sorte prikker: SkyTEM). Den gråstiplede linje på modelsektionerne markerer bunden af den viste GCM-sektion.



Figur 12. Pro5, LCI inversion af hhv. GCM-data, SkyTEM- data og kombineret inversions af GCM- og SkyTEM-data. Panelet under hver modelsektion viser datatilpasningen (dataresidual) for de enkelte sonderinger (røde prikker: GCM, sorte prikker: SkyTEM). Den gråstiplede linje på modelsektionerne markerer bunden af den viste GCM-sektion.



Figur 13. Pro6, LCI inversion af hhv. GCM-data, SkyTEM- data og kombineret inversions af GCM- og SkyTEM-data. Panelet under hver modelsektion viser datatilpasningen (dataresidual) for de enkelte sonderinger (røde prikker: GCM, sorte prikker: SkyTEM). Den gråstiplede linje på modelsektionerne markerer bunden af den viste GCM-sektion.





## 4.2 VOXEL-RESULTATER

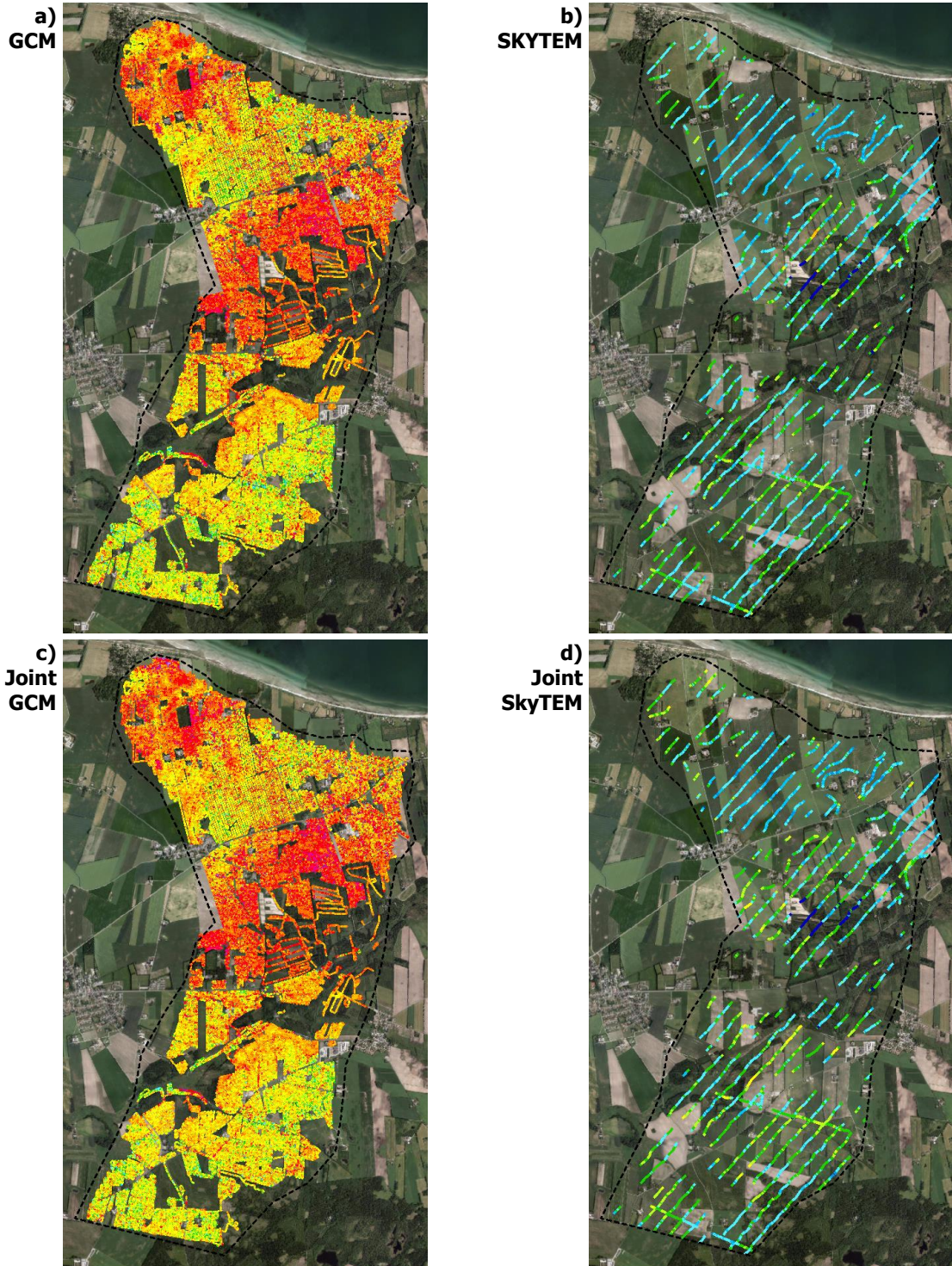
I dette afsnit sammenlignes og evalueres voxel-inversionsresultaterne. Som omtalt er der udført voxel-tolkning af SkyTEM- og GCM-dataene hver for sig og en kombineret voxel-tolkning med begge datatyper. De tekniske specifikationer for voxel-opsætningerne er beskrevet i afsnit 3.2.

### Datatilpasning

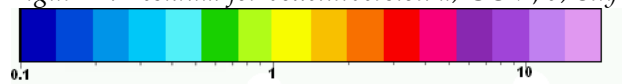
En central parameter for evaluering af den kombinerede voxel-tolkning er datatilpasningen. I Figur 14a og b er datatilpasningen plottet for hhv. GCM- og SkyTEM-voxel-tolkningen. Til sammenligning er datatilpasningen for den kombinerede voxel-tolkning (joint), plottet i Figur 14c og d. Som det frem går af Figur 14 er datatilpasningen sammenlignelig for de separate tolkninger og den kombinerede voxel-tolkning. Dette betyder at de to datatyper overordnet set kan enes om én fælles resistivitetsmodel, hvilket netop er formålet og fordelen med den kombinerede tolkning. Residualet for GCM-voxel-tolkningen er sammenligneligt med det residual der ses for standard SCI-tolkningen i /2/. Residualet må forventes at være en anelse højere i voxel-formalismen (Figur 14a) sammenlignet med SCI-resultatet fra /2/ pga. den grovere diskretisering (20 m), men til gengæld er der blevet tilskrevet en større datausikkerhed her for at kompensere for lav datakvalitet i de højresistive områder.

Som det også ses på plottene i Figur 14 er datatætheden langt større for GCM-datasættet end SkyTEM-datasættet.

Endvidere bør det bemærkes at der i begge dataset er huller enten pga. fjernede data grundet koblinger eller pga. ufremkommelighed med GCM-udstyret under kortlægningen. Hvordan bl.a. datatæthed og forskellige kortlægningsmønstre udmønter sig i voxel-resultaterne ser vi på i det følgende afsnit, hvor der vises fladekort og sektioner for voxel-tolkningerne.



Figur 14. Residual for voxelinversion a) GCM, b) SkyTEM, c) joint GCM og d) joint SkyTEM



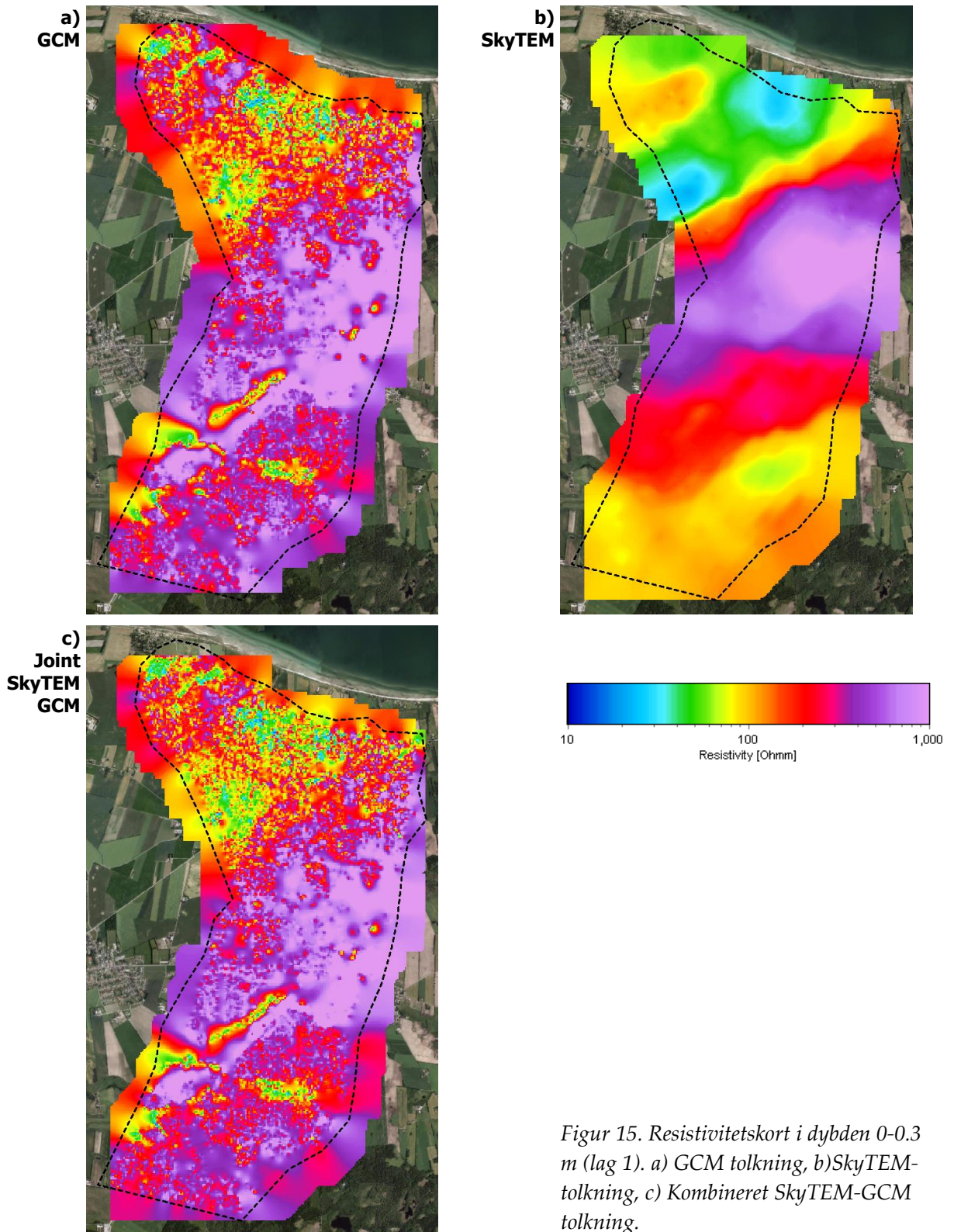


### Fladekort

I Figur 15 til Figur 17 vises fladeresistivitetskort i tre forskellige dybder for henholdsvis voxel-GCM, voxel-SkyTEM og den kombinerede voxel-tolkning. Fladekortene er blot en farvelægning af de enkelte lag i det regulære voxel-model grid. Der er således ikke foretaget en modelinterpolation for at fremstille fladekortene. Interpolationen er nødvendig fra en normal tolkning hvor data- og modelpositioner er sammenfaldende og irregulært geografisk fordelt. Der er således heller ikke midlet vertikalt hvilket ellers er almindeligt i klassiske middelresistivitetskort.

Figur 15 viser resistiviteten i det øverste voxel-lag (0 - 0.3 m). Tilsvarende billeder findes for de næst følgende lag der ikke præsenteres separat her. Som det fremgår af panel a) og b) er der, som forventet langt større detaljerigdom og lateral opløsning i GCM-tolkningen sammenlignet med SkyTEM. Det skyldes dels den langt større GCM-datatæthed og dels at de enkelte GCM-målinger har et meget mindre footprint (mindre lateral midling) end SkyTEM-målingerne. Det er dog under alle omstændigheder en ikke helt fair sammenligning, da SkyTEM-metoden har meget lav følsomhed for resistiviteten i de øverste 30 cm i det hele taget. Trods dette genfindes nogle overordnede resistivitsstrukturer fra GCM i SkyTEM-tolkningen, med indslag af lave resistiviteter i den nordlige del og en bred høj-resistiv midterste zone. Den kombinerede-tolkning (Figur 15c) afspejler for dette øverste interval, naturligt nok GCM-tolkningen. I Rambølls afrapportering af GCM-dataene (/2/, bilag 2.14) findes en sammenligning af GCM-resultaterne i 0,5-1,0 m med jordartskortet. Heri konstateres det: *"Som det fremgår, er der en særdeles god overensstemmelse mellem den kortlagte jordart og den kortlagte modstand."*

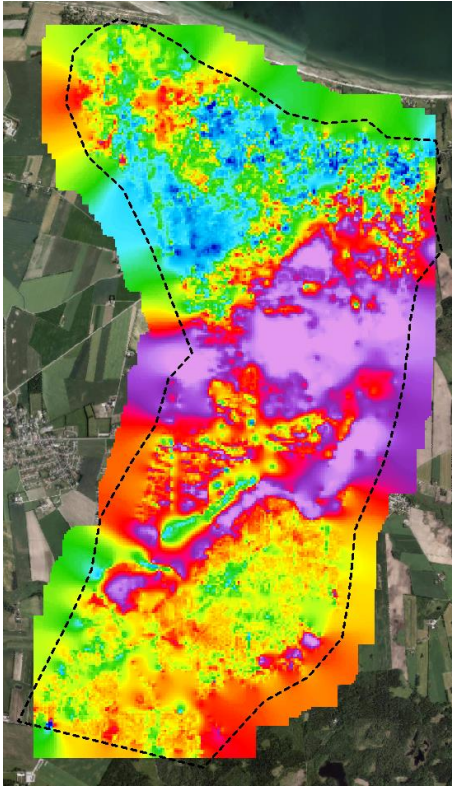
I Figur 16 ses resistiviteten i dybdeintervallet 3.7-5.5m. I de to separate tolkninger (Figur 16a og b) er der stort sammenfald mellem resistivitsstrukturerne. Her er vi i en dybde og lagtykkelse, hvor SkyTEM-metoden tydeligvis har en god opløsning af resistivitsfordelingen. Den kombinerede voxel-tolkning er naturligt nok stadig domineret af GCM-datasættes højere laterale informationstæthed.



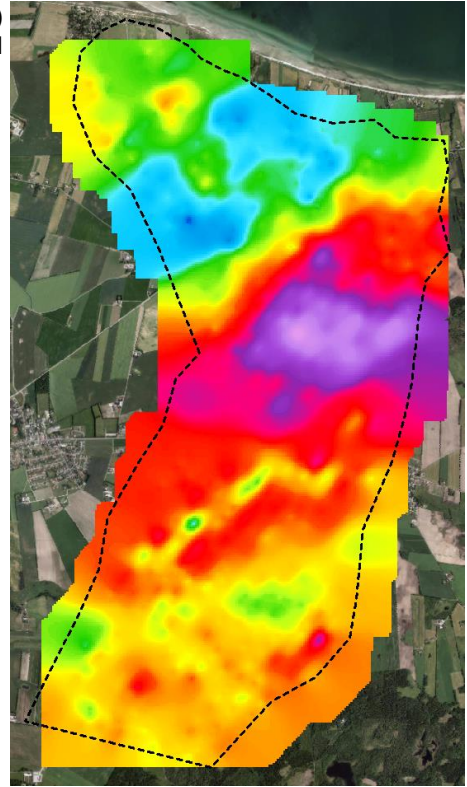
Figur 15. Resistivitetskort i dybden 0-0.3 m (lag 1). a) GCM tolkning, b) SkyTEM-tolkning, c) Kombineret SkyTEM-GCM tolkning.



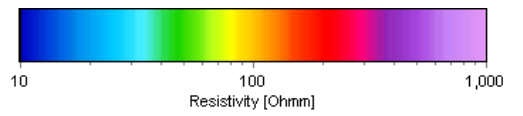
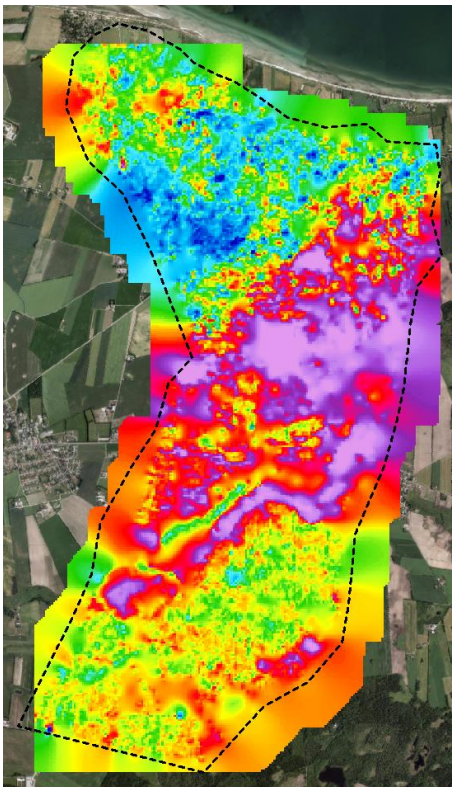
a)  
GCM



b)  
SKYTEM



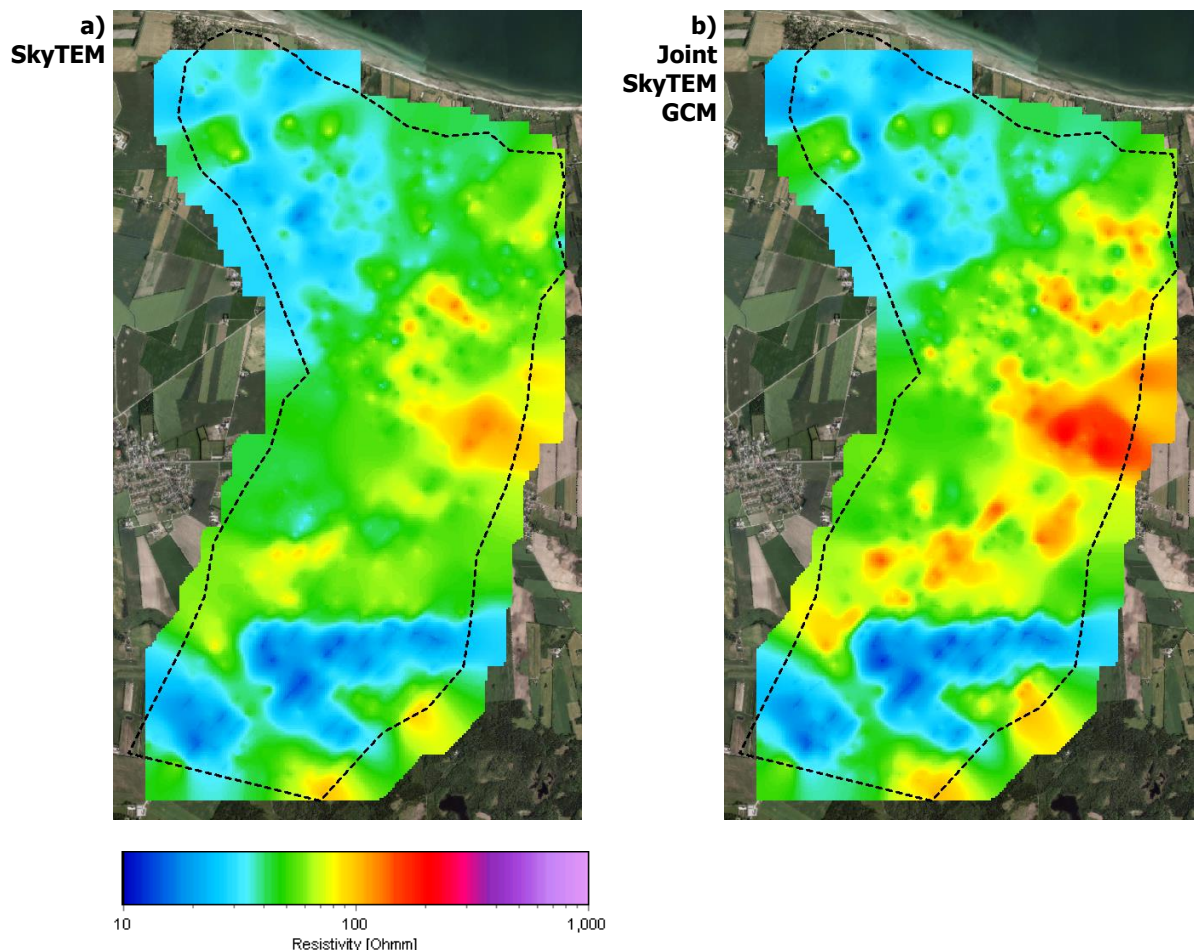
c)  
Joint  
SkyTEM  
GCM



Figur 16. Resistivitetskort i dybden 3.7-5.5 m (lag 7). a) GCM tolkning, b) SkyTEM-tolkning, c) Kombineret SkyTEM-GCM tolkning.



Figur 17 viser resistiviteten i dybden 26-33 m for SkyTEM-voxel-tolkningen og den kombinerede tolkning. I denne dybde foreligger der naturlig nok ikke en GCM-tolkning da vi er langt under indtrængningsdybden for GCM-metoden. De to tolkningsresultater er også overvejende ens. Den mere detaljerede og bedre bestemmelse af den overfladenære resistivitetsfordeling i den kombinerede tolkning, giver også en justering og en lidt bedre bestemmelse af resistivitetsværdierne i denne dybde. Således ses det i Figur 17 at specielt de højresistive områder har en højere resistivitet i den kombinerede tolkning (Figur 17b) sammenlignet med SkyTEM-tolkningen (Figur 17a). At det er højresistive områder der ændres mest skyldes primært TEM-metodens relativt lave følsomhed overfor de absolutte niveauer af højresistive lag.



Figur 17. Resistivitetskort i dybden 26-33 m (lag 13) a) SkyTEM-tolkning, b) Kombineret SkyTEM-GCM tolkning,



I begge tolkningsresultaterne i Figur 17, ses en svag antydning af en sribning, der er sammenfaldende med SkyTEM-flyvelinjerne. Dette skyldes, at når man bevæger sig væk fra datapositionerne bliver modelresistiviteten mere og mere afhængig af de laterale bånd imellem modelcellerne. I dette tilfælde anvender vi en relativt fin lateral model-diskretisering (20m) for at kunne repræsentere GCM-datasættes detaljerigdom. I de dybere dele af modellen, hvor der kun er information fra SkyTEM-dataene, er der ikke behov for den fine laterale diskretisering, og de relativt mange modelceller imellem flyvelinjerne, kan i nogle tilfælde resultere i en svag antydning af sribning i tolkningsresultatet.

### Resistivitssektioner

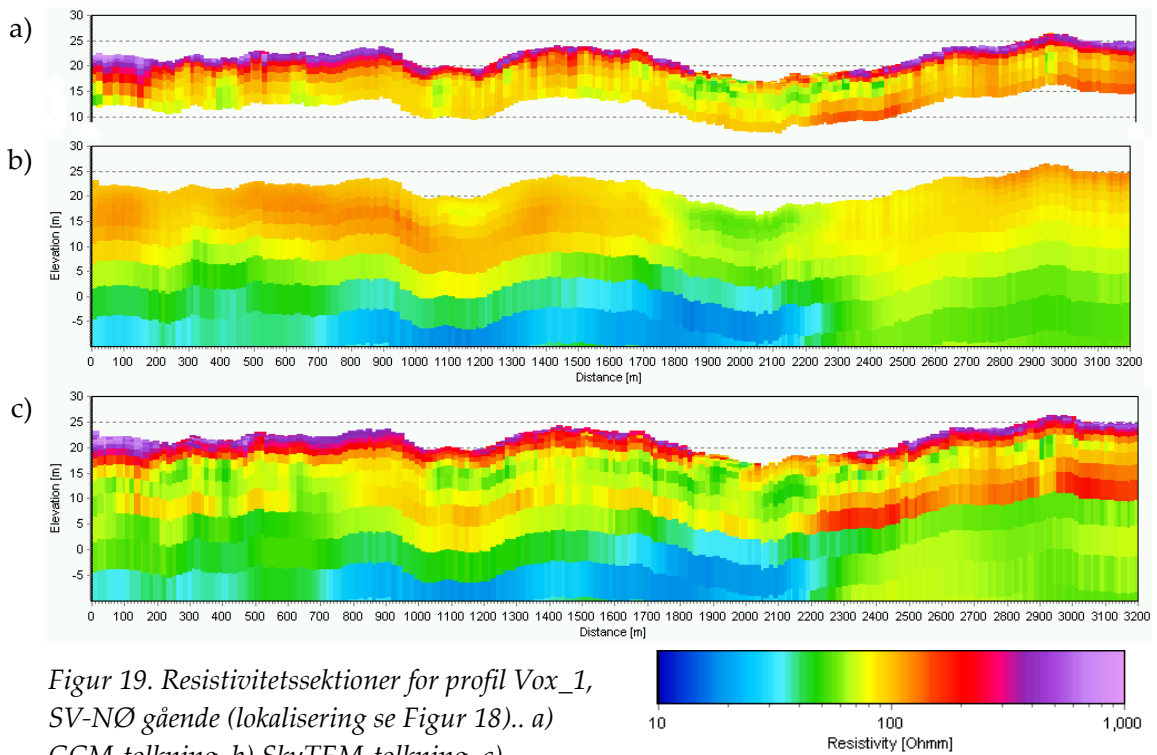
En af fordelene ved en voxel-tolkning er at man har en fuld 3D resistivitskub og man kan således placere profilsnit uafhængigt af målelokaliteterne. I denne rapport er der inkluderet tre profilsnit (resistivitssektioner) for at evaluere det kombinerede tolkningsresultat. Lokaliseringen af de tre profiler er vist i Figur 18. Som for fladekortene er de separate tolkninger af GCM- og SkyTEM-data medtaget for sammenligning.



Figur 18. Profilplaceringer. De røde linjer markerer de tre voxel-profiler. Blå, SkyTEM-data, grå GCM-data.



Som det fremgår af sektionerne i Figur 19 (profil Vox\_1) afspejler de øverste ca. 10 m i den kombinerede tolkning (Figur 19c) GCM-tolkningen (Figur 19a) og den dybere del af sektionen SkyTEM-tolkningen (Figur 19b). Dette er helt i overensstemmelse med erfaringerne fra fladekortene og LCI-tolkninger vist tidligere. Det bemærkes at der for profilkoordinat 600-900 m hverken er SkyTEM- eller GCM-data tilstede. Som det fremgår af tolkningsresultaterne håndteres dette relative store datahul på fornuftig vis i voxel-tolkningerne, idet der ikke observeres diskontinuiteter eller lignende spring i modellerne.



Figur 19. Resistivitetssektioner for profil Vox\_1, SV-NØ gående (lokalisering se Figur 18).. a) GCM-tolkning, b) SkyTEM-tolkning, c) Kombineret tolkning.

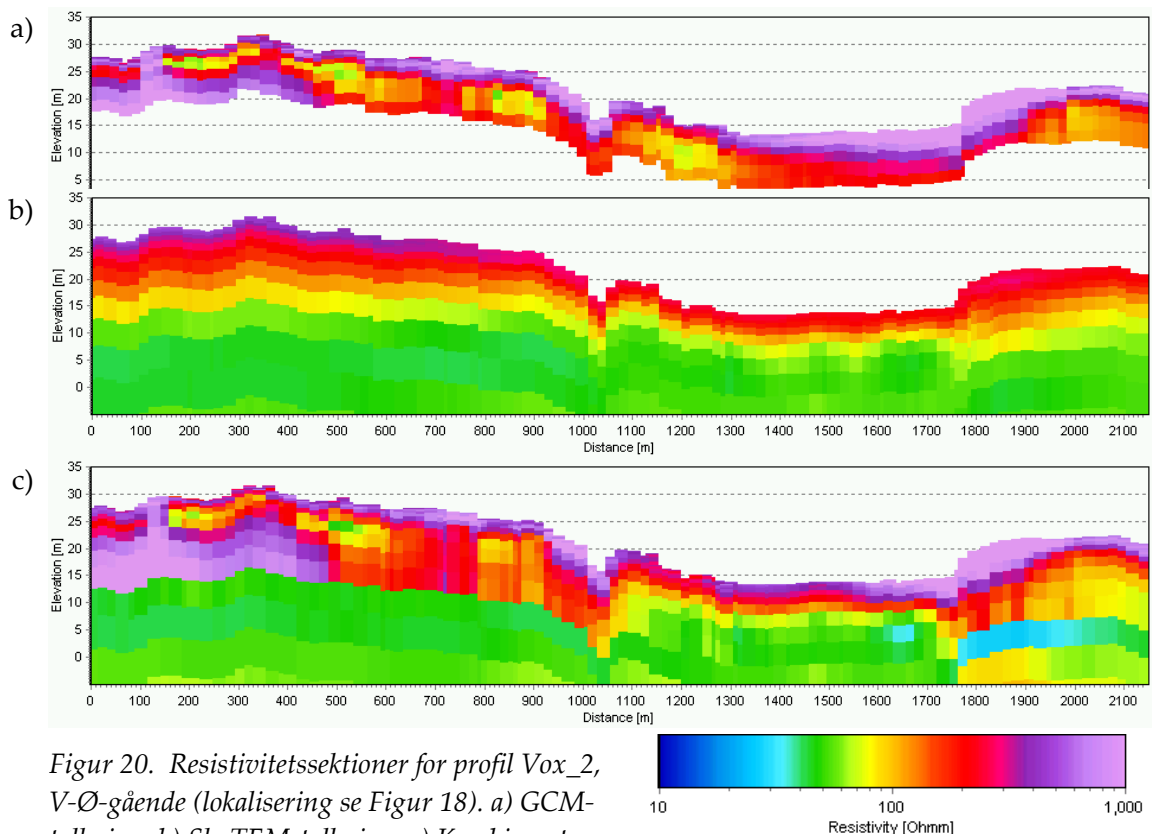
I Figur 20 vises profil Vox\_2 der bevist er placeret i et udfordrende område for voxel-tolkninger med kun GCM-data i den vestlige ende af profilet (0-1000 m) og primært SkyTEM-data i den østlige del (1000-1700 m) og så den sidste ende (1700-2150 m) med begge datatyper.

- I området med kun GCM-data (0-1000 m) bliver overgangen i den dybereliggende del af den kombinerede tolkning (kote ~12m, plot c) relativt brat. Dette skyldes, at GCM-model-





diskretiseringen stopper i ca. 11 m dybde for den kombinerede-tolkning. I den dybere del af modellen er det udelukkende SkyTEM-dataene der bestemmer, og i dette tilfælde trækkes informationen ind via de laterale modelbånd fra en relativt stor afstand (omkring 300 m), da der er stor afstand til de nærmeste SkyTEM-datapunkter. Bestemmelsen af resistiviteten i områder hvor der er langt til nærmeste SkyTEM-datapunkt er naturligt meget dårlig, og der er derfor ikke tale om at modellen ikke tilpasser data, men derimod at vi har meget lidt information. En afblænding i dybden med et "Depth of Investigation" estimat (DOI), der også tager afstanden til datapunkterne i betragtning ville her være et nyttigt redskab, og er noget der vil blive inkluderet i fremtidigt arbejde.



Figur 20. Resistivitetssektioner for profil Vox\_2, V-Ø-gående (lokalisering se Figur 18). a) GCM-tolkning, b) SkyTEM-tolkning, c) Kombineret tolkning.

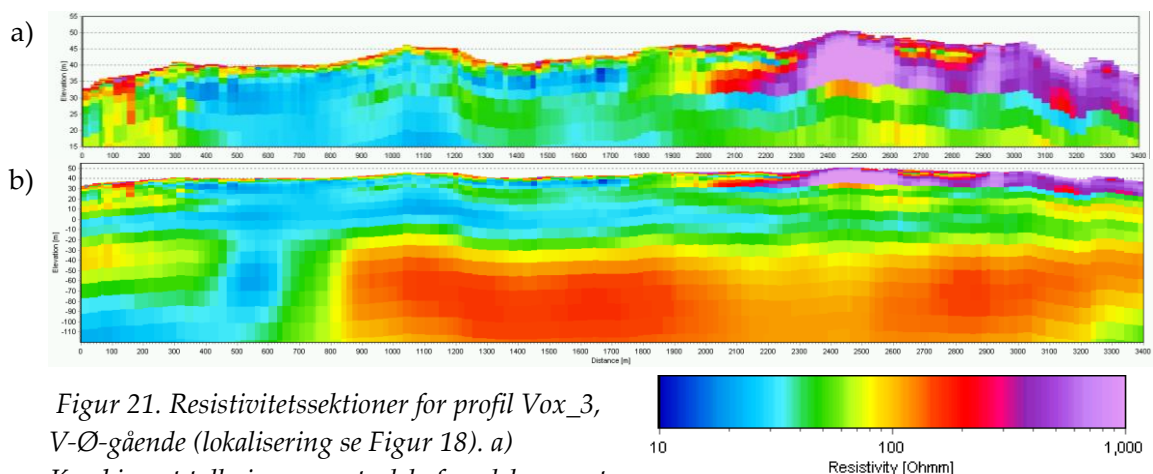
- I den omvendte situation med kun SkyTEM-data (koordinat 1000-1700 m), er manglen af GCM-data mindre forstyrrende. Man observerer at detalje-graden i den øverste del af profilet falder og ligner den fra SkyTEM-tolkningen med den ændring,



at de laterale bånd har trukket det højresistive lag igennem fra siderne.

- I den sidste del af profilet (koordinat 1700-2100 m) ses et lav-resistivt lag i den kombinerede tolkning der ikke optræder i de individuelle tolkninger. Dette er en effekt af det højresistive lag som GCM-dataene bidrager information om, hvilket påvirker SkyTEM modellen til at justerer det underliggende lav-resistive lag ind. Den overfladenære information fra GCM-dataene har altså bidraget direkte til en ændring af SkyTEM-modellen dybere nede end GCM-dataene giver information. Da vi i kombinerede tolkning har indført yderligere et datasæt (mere information), og den resulterende kombinerede model tilpasser begge datasæt er det altså denne model vi må anse som den bedste af de valgte muligheder.

I Figur 21 ses profil Vox\_3, der viser et snit igennem hele den nordlige del af kortlægningsområdet. Her er det medtaget for at illustrere voxel-resultaterne over et meget langt profil. Endvidere illustrerer profilet at GCM-dataene reelt set kun bidrager med information til en meget lille del af det totale kortlagte volumen. Dette er klart ved at sammenligne Figur 21a og b, hvor der i panel b) vises den fulde dybde for SkyTEM-modellen.

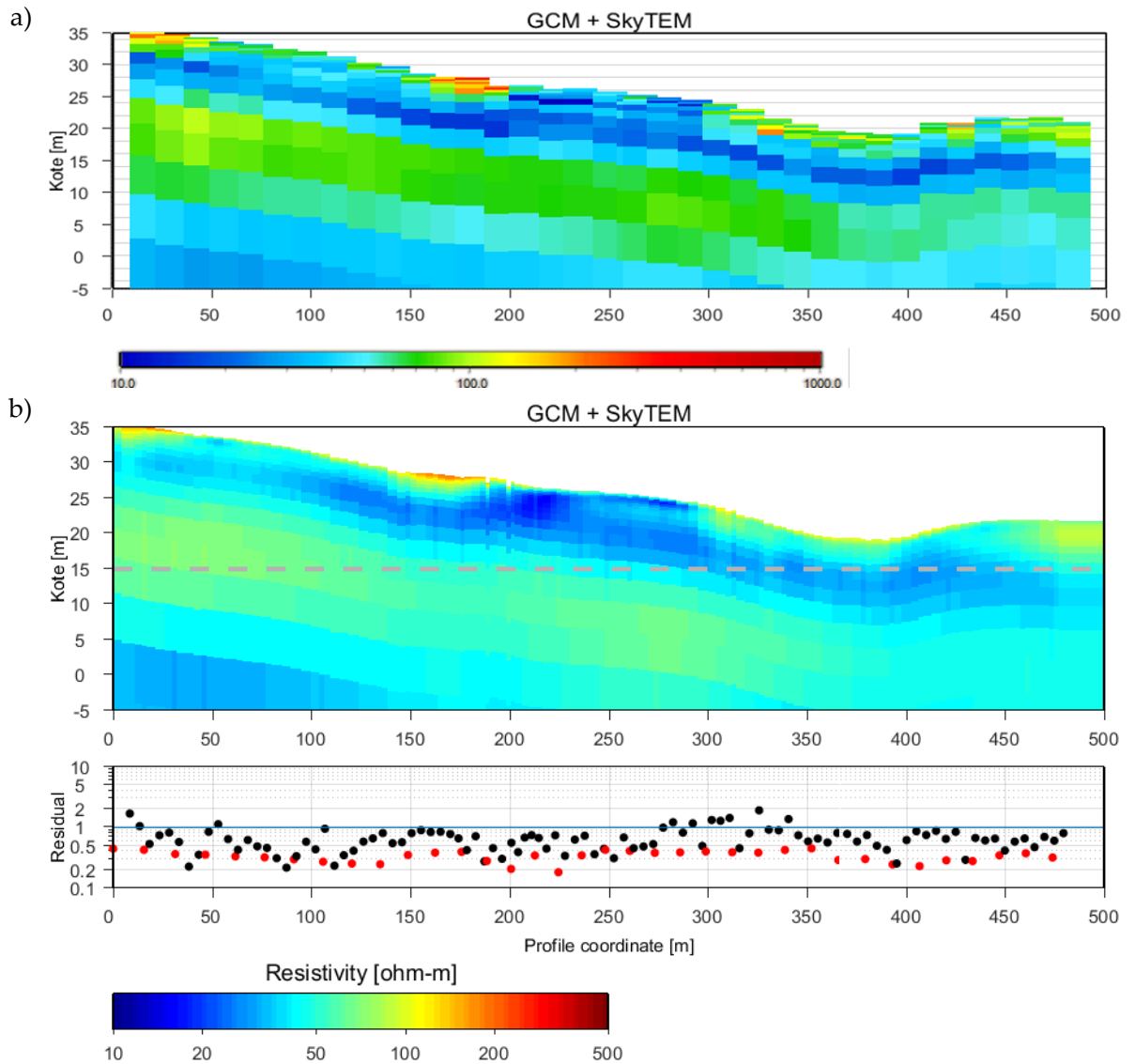


Figur 21. Resistivtetssektioner for profil Vox\_3, V-Ø-gående (lokalisering se Figur 18). a)

Kombineret tolkning, øverste del af modelrummet.

b) Kombineret tolkning, hele modelrummet. Bemærk at den vertikale skala ikke er ens på de to sektioner.

Afslutningsvis foretages en enkelt sammenligning langs en af LCI-linjerne hvor GCM-data er indsamlet præcist oven i SkyTEM-linjen. Dette er linjen Pro1 der er vist med LCI-resultat i Figur 8. LCI-



Figur 22. Sammenligning af voxel-resultat og LCI-resultat langs Pro1 (Figur 7 og Figur 8). a) kombineret voxel-inversion, b) Kombineret LCI-tolkning.

resultaterne er visualiseret i Matlab, og voxel-resultaterne er fra Aarhus Workbench, men for at foretage en rimelig sammenligning er farveskalaen fra Workbench forsøgt tilpasset farveskalaen fra Matlab. Som det ses er resultaterne overordnet meget ens, men den forskellige diskretisering ses tydeligt.



## 5 DISKUSSION

GCM-data indsamles med en sonderingsafstand på 5-10 meter og ca. 20 m mellem datalinjer. Til sammenligning indsamles SkyTEM-data med en sonderingsafstand på 20-50 m og en linje-afstand på 100-250 meter. Disse tal afspejler langt hen ad vejen footprintet eller følsomheden for de to datatyper idet GCM-data har et langt mindre footprint både lateralt og vertikalt end SkyTEM-data. Denne forskel gør det vanskeligt at opsætte ét fælles modelnet til tolkning af dataene. Kompromiset i vores tilfælde, også hukommelsesforbrug og regnetid taget i betragtning, var et modelnet med en 20 m lateral diskretisering. Denne 20 m laterale diskretisering er reelt for fin for SkyTEM dataene og resulterer i svag "stribning" langs flyvelinjerne, da der bliver forholdsvis mange modelceller mellem flyvelinjerne. Omvendt er det lidt for groft for GCM-dataene, hvilket påvirker dataresidualerne for GCM-dataene i negativ retning.

Forskellen i datamængderne fra de to datatyper er også en udfordring idet de fleste data (GCM) vil dominere den fundne model. I højresistivitetssområder hvor GCM-data er særligt påvirkede af støj ses dette tydeligt da modellen fra en joint inversion lægger mest vægt på GCM-dataene og mindre vægt på SkyTEM-dataene, der således vil opleve den største forværring i datatilpasningen da modellen lokalt er i modstrid med informationen i SkyTEM data. Problemet forstærkes hvis ikke støjen på data er beskrevet korrekt, hvilket peger i retning af en forbedret støjbeskrivelse for GCM-dataene i disse tilfælde. Dette er også forbundet til det faktum at GCM-data generelt set er vanskelige at kalibrere på en robust måde modsat SkyTEM der kalibreres på det nationale teststed. Med det anvendte GCM instrument (og andre lignende instrumenter) accepteres instrumentets måleværdier hvis de ellers ser fornuftige ud, da en egentlig kalibrering ikke er mulig som beskrevet i afsnit 2.2.

I de viste voxel-tolkninger er der ikke beregnet en *Depth of Investigation* (DOI), da dette ikke er muligt i voxelkoden. Således dækker en voxelmodel hele området til fuld dybde. Man skal derfor være opmærksom på datagrundlaget for modellen, da man ikke umiddelbart kan se i hvilken grad resultatet er drevet af data eller af båndene i modelrummet. Dette er specielt vigtigt at have fokus på i sub-områder, hvor kun den ene eller ingen af datatyperne er til stede.

I flere af sektionerne kan man erkende at resistivitetsstrukturerne i nogen grad følger topografien. Dette er en direkte følge af at



modelrummet er opsat på med faste lag startende fra den topografiske overflade. I de klassiske LCI og SCI-tolkninger er dette *topografi-problem* løst ved at lade de laterale bånd være *horisontale* i stedet for laterale fra lag til lag. Herved fremskønner man horisontale strukturer frem for strukturer der følger topografien. En lignende implementering kunne for så vidt foretages i voxel-metodikken, men størrelsen af modelrummet gør det vanskeligt af rent hukommelsesmæssige årsager. Det er dog vigtigt her at understrege, at dette ikke vil påvirke konklusionerne vedrørende den kombinerede tolkning af GCM-data og SkyTEM-data som den foreligger her. En anden løsning på topografiproblemet er at lave et modelnet der helt eller delvist afkobles fra topografien sådan at cellerne i modellen kan være horisontale uden at topografien er det. Også dette er dog en større ændring i koden.



## 6 KONKLUSION

Der er i projektet succesfuldt udført kombineret tolkning af GCM-data og SkyTEM-data.

I rapporten er vist eksempler på kombineret tolkning af GCM-data og SkyTEM-data både med en traditionel LCI-metode og med den nye voxel-metode. LCI-metoden kan kun anvendes hvor data er sammenfaldende langs f.eks. en flyvelinje, hvilket ikke er praktisk muligt for større kortlægningsområder. LCI-tolkningerne er primært medtaget for på enkel vis at illustrere hvad der sker ved kombineret tolkning af to datatyper. Voxelformulering kan anvendes på større kortlægningsområder og håndterer bl.a. udfordringen med at to forskellige datatyper ikke har geografiske sammenfaldende målepositioner.

I voxelopsætningen skal man have fokus på de forskellige målemetoders opløsningsevne og indtrængningsdybde, samt datatæthed. Voxelkoden beregner ikke en DOI-værdi (Depth of investigation), hvilket man skal have for øje når man anvender inversionsresultaterne. I det følgende gives en kort opsummering og konklusion på de tre hovedpunkter angivet i introduktionen.

### **1) En forbedret modelbeskrivelse i de øverste dele af undergrunden.**

I rapporten er der vist flere eksempler på kombineret tolkning af GCM- og SkyTEM-dataene, både via LCI-tolkninger og voxel-tolkninger. Overordnet set opnås tilsvarende datatilpasning ved den kombinerede voxel-tolkning som ved voxel-tolkningerne af data typerne separat. Den kombinerede tolkning indeholder den samlede information fra de to datatyper og er således generelt en bedre, mere sikker model af undergrunden pga. den større informationsmængde.

I den kombinerede tolkning bidrager GCM-dataene primært med information i de øverste ca. 5-8 m, hvor SkyTEM-dataene er svagest og SkyTEM-dataene bidrager med den resterende information. Dog understreges det at ved en bedre fastlæggelse af de øverste dele af modellen, øges også bestemmelsen på de underliggende lag. Således ses også modelændringer i den dybere del af modellen i den kombinerede tolkning ift. SkyTEM-tolkningen. På grund den øgede informationsmængde er den kombinerede model altså en forbedring ift. modellen bestående udelukkende af information fra SkyTEM data.



Særligt bemærkes det dog at områder med meget høje resistiviteter udgør en udfordring for en kombineret tolkning idet GCM-dataene i høj grad er meget usikre her.

## **2) Forbedret lateral beskrivelse af de overfladenære lag**

GCM data indsamles generelt med lille linjeafstand (ca. 10-20 m) og kort afstand mellem sonderinger (5 m i denne undersøgelse). SkyTEM flyves generelt med større linjeafstand (100-200 m) og længere afstand mellem sonderinger langs linjen. I voxel-opsætningen skal der findes et kompromis mht. den laterale model-diskretisering, hvilket i denne undersøgelse er på 20 m imellem nodepunkter i modelnettet. I denne overvejelse indgår også computerkraft og hukommelsesforbrug. De 20 meters nodeafstand er en anelse for groft til GCM-dataene, men lidt for fint til SkyTEM-dataene.

For modellerne i den kombinerede voxelinversion konstateres det at den laterale opløsning i de øverste lag styres af GCM-dataene der har et langt mindre footprint end SkyTEM-data, og at SkyTEM-data fint kan tilpasse sig den fint-diskretiserede model-information der genereres fra GCM-dataene. I lag der ligger dybere end hvor GCM-data bidrager med information er det overvejende SkyTEM-data der skinner igennem, dog ses det at tilpasningen af de øverste lag i modellerne (via GCM-data) i nogen grad påvirker modellerne dybere nede.

## **3) Modul i Aarhus Workbench til integreret tolkning**

Modulet til voxel-tolkning i Aarhus Workbench udvikles som en del af et generelt modul til at indbygge vilkårlige inversionsalgoritmer i Aarhus Workbench. Via en række generelle funktionaliteter vil det blive muligt for brugeren at styre hvilke inversionsindstillinger der skal kunne styres fra brugerfladen. Efter aftale med Miljøstyrelsen vil modulet ikke inkludere muligheden for joint voxel tolkning da det er vurderingen at et sådant modul vil have et meget begrænset antal brugere. Man vil kunne foretage voxel-tolkning på SkyTEM og tTEM data. Arbejdet med Aarhus Workbench-implementeringen forventes afsluttet medio 2019.

Alt i alt kan vi konkludere at voxel-metodikken er et stærkt værktøj til denne type kombineret tolkning, og der opnås forbedrede modeller der er i overensstemmelse med begge datasæt. Komplexiteten i opsætningen og styringen af modelrummet er dog forholdsvis høj. Dette betyder at der vil være et betydeligt ressourceforbrug ved anvendelsen af voxel-metodikken, og dette ressourceforbrug skal



holdes op imod gevinsten ved voxel-resultatet. En mere generel anvendelse af metodikken vil således afhænge helt af et brugerfladeværktøj og udviklingen af hjælpeværktøjer så der kan opnås gode konsistente resultater. På grund det relativt høje kompleksitetsniveau vil det formentlig primært være i applikationer hvor der kan ses klare fordele ved voxel-formalismen at det vil tages i anvendelse. Dette kunne fx være en kortlægning hvor resultaterne fra geofysikken skal anvendes direkte i en voxel-baseret grundvandsmodel.





## 7 REFERENCES

- /1/ Westergaard, J., 2014. SkyTEM – Djurs Vest. Databehandling og Rapportering. Rambøll.rapport nr. 1100006236
- /2/ Thomsen, P., 2016. Norddjurs DualEM kortlægning. Rambøll, rapport nr. 1100016852
- /3/ Christiansen, A. V., E. Auken, N. Foged, and K. I. Sørensen, 2007. Mutually and laterally constrained inversion of CVES and TEM data - A case study, *Near Surface Geophysics*, 5, 115-124
- /4/ Auken, E., A. V. Christiansen, B. H. Jacobsen, N. Foged, and K. I. Sørensen, 2005. Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data, *Geophysical Prospecting*, 53, 497-506.
- /5/ Viezzoli, A., A. V. Christiansen, E. Auken, and K. I. Sørensen, 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by Spatially Constrained Inversion, *Geophysics*, 73, 3, F105-F113.
- /6/ Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, A.V., Kirkegaard, C., 2013. Voxel inversion of airborne EM data. *Near Surface Geoscience 2013*. Bochum : European Association of Geoscientists & Engineers Publications B.V. (EAGE), 2013. s. 415-419.