

Naturstyrelsen Odense

SkyTEM Kortlægning Nordfyn

Rapport SkyTEM Nordfyn

Januar 2012

Udgivelsesdato : 30. januar 2012
Projekt : 30.9981.01

Udarbejdet : Peter A. Petersen/Peter Sandersen/HGG
Kontrolleret : Tom Pallesen
Godkendt : Peter A. Petersen

INDHOLDSFORTEGNELSE		SIDE
BILAGSFORTEGNELSE:		4
1	INDLEDNING	5
2	GEOLOGISKE FORHOLD	6
2.1	Strukturel opbygning af prækvartæret	6
2.2	De prækvartære aflejringer	7
2.3	Landskabet og de kvartære aflejringer	9
2.4	Lagserien ved udvalgte borer	10
2.5	Geologiske fokuspunkter i forhold til den geofysiske kortlægning	12
3	SKYTEM DATABEHANDLING	13
3.1	Dataindsamling og kontrol af de indsamlede SkyTEM-data	13
3.1.1	SkyTEM opsætning	14
3.1.2	Kalibrering og højdetests	14
3.2	Processeringsforløb	15
3.2.2	Positionering	15
3.2.3	Inklination	16
3.2.4	Flyvehøjde	16
3.2.5	SkyTEM data	17
3.3	Tolkning	21
3.3.1	1D-Tolkningsmodeller	21
3.3.2	Coil respons inversion	23
3.3.3	SCI-setup	26
3.3.4	Estimering af kortlægningsdybden - DOI	27
3.3.5	GeoScene3D	28
4	RESULTATER	30
4.1	Lokalisering, QC-kort	30
4.1.1	Lokalisering af flyvelinjer og modeller	30
4.1.2	Momentindikator	30
4.1.3	Flyvehøjde	30
4.1.4	Datatilpasning	31
4.1.5	Kortlægningsdybde (DOI)	31
4.2	Koten til god leder	31
4.3	Log-bog for processeringen	32
4.4	Middelmodstandskort	32

4.4.1	Beregning af middelmodstand	32
4.4.2	Introduktion til fladekort	33
4.4.3	Beskrivelse af middelmodstandskort (i koteintervaller)	35
4.5	Profilsektion	37
4.5.1	Profiler langs flyvelinjerne	37
4.5.2	Profiler på tværs af flyvelinjerne	38
4.6	Linje-repetition – med forskellig flyvehastighed	39
4.7	Alternativ inversionsopsætning – eksempler	42
4.8	Undersøgelser af test-site	42
4.9	Oversigt over Aarhus Workbench Workspace	46
4.10	Kvalitetssikring	46
4.10.1	Karakter og omfang af kvalitetssikringen	46
4.10.2	Geologiske vurderinger af SkyTEM-tolkninger	47
5	SAMMENFATNING	48
6	REFERENCER	50

BILAGSFORTEGNELSE:

Bilag 2.1	Logbog: Gennemgang af dybe boringer og logs
Bilag 3.1.1	Referater fra workshops
Bilag 4.1.1	Lokalisering af flyvelinjer og modeller
Bilag 4.1.2	Momentindikator
Bilag 4.1.3	Flyvehøjde
Bilag 4.1.4	Datatilpasning
Bilag 4.1.5	Kortlægningsdybden (i dybder)
Bilag 4.1.6	Kortlægningsdybden (i koter)
Bilag 4.2	Koten til god leder
Bilag 4.3	Dokumentation for kvalitetssikring af SkyTEM-processeringen
Bilag 4.4.2	Middelmodstandskort i koter og dybder
Bilag 4.5	Lokalisering af profiler og modeller
Bilag 4.5.1	Profilsektioner med 1D-modstandsmodeller (vest-øst langs flyvelinier)
Bilag 4.5.2	Profilsektioner gennem 3D-modstandsgrids (nord-syd på tværs af flyvelinjerne)
Bilag 4.7.1	Alternative tolkninger
Bilag 4.9.1	Logbog: Geologisk vurdering af indledende SkyTEM-tolkning
Bilag 4.9.2	Logbog: Gennemgang af 1. SkyTEM-tolkning (mangelagsmodeller)
Bilag 4.9.3	Logbog: Gennemgang af 2. SkyTEM-tolkning (mangelagsmodeller) - Sammenligning af SkyTEM, lithologi og logs i udvalgte boringer
Bilag 4.9.4	Logbog: Gennemgang af 2. SkyTEM-tolkning (mangelagsmodeller) - Middelmodstandskort
Bilag 4.9.5	SkyTEM Nordfyn – Overordnet projektkontrolplan

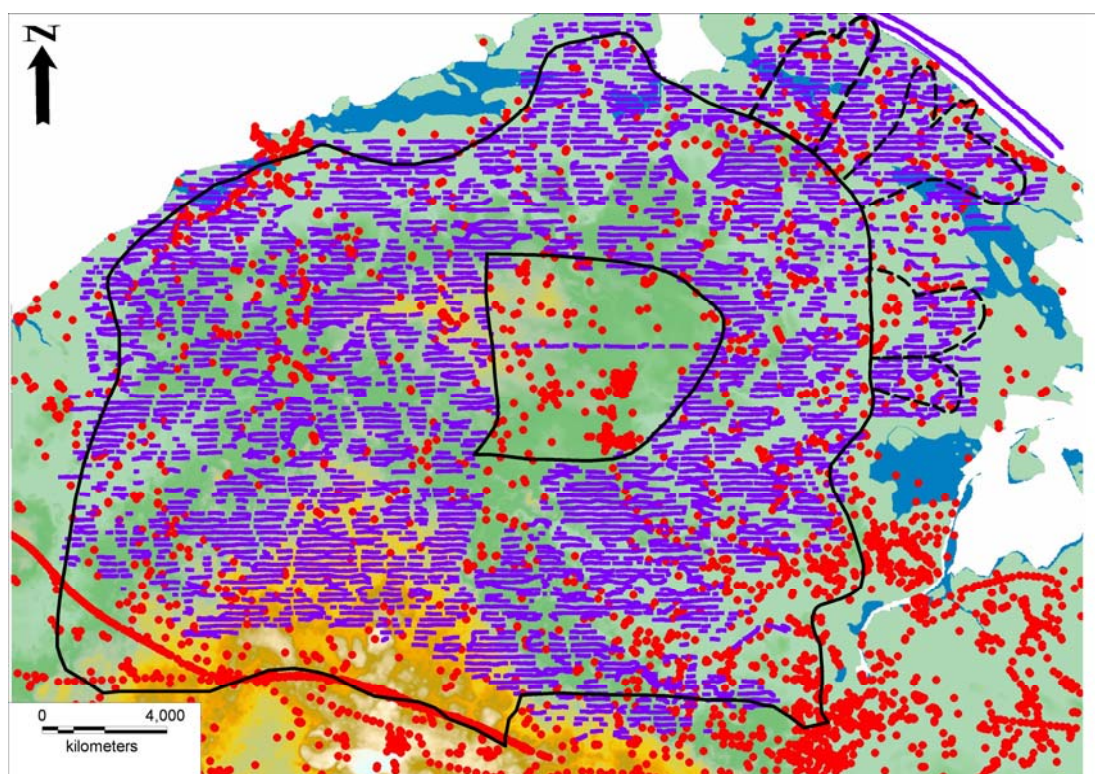
1 INDLEDNING

På Fyn har SkyTEM Aps. på foranledning af Naturstyrelsen Odense, i løbet af sommeren 2010, indsamlet SkyTEM-data i 9 kortlægningsområder. Et af disse områder er Nordfyn.

Der er fløjet 2127 km. Grundet for høj flyvehastighed, er to linjer med en samlet længde på 11 km, fløjet om. Områdeafgrænsningen fremgår af Figur 1.1.

Formålet med SkyTEM-kortlægningerne er, at indhente oplysninger om jordens elektriske modstande og dens fordeling ned til ca. 200 meters dybde. Naturstyrelsen Odense har valgt, at udføre kortlægningen med en konfiguration (superlavmoment og kun 2 vindinger på højmoment), der skulle favorisere en god datakvalitet til tidlige tider og dermed give den bedst mulige opløsning af de terrænnære jordlag.

Formålet med den udførte opgave er, at få processeret og tolket de indsamlede SkyTEM-data i henhold til gældende normer og få dem lagt ind i GERDA-databasen, så de senere kan anvendes til geologisk tolkning af indsatsområderne.



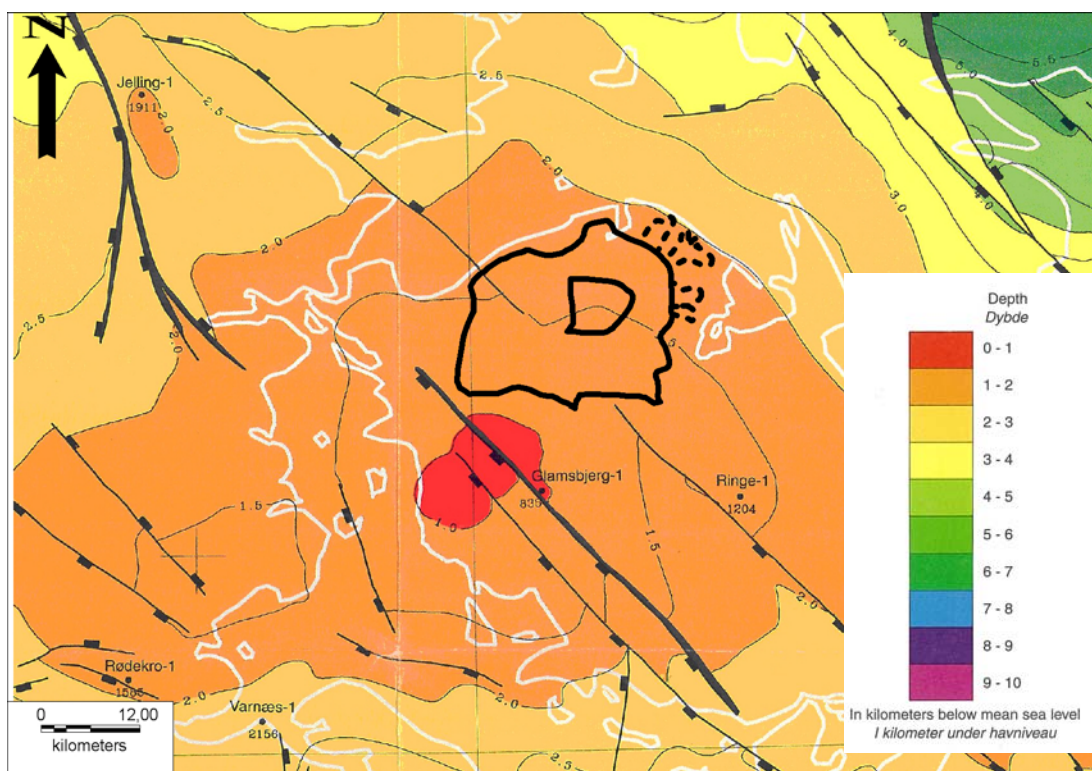
Figur 1.1: Områdeafgrænsning. Afgrænsningen af det SkyTEM-kortlagte område er vist med sort polygon, SkyTEM-sonderinger er vist som lilla pletter og Jupiter-boringer med røde pletter. Baggrunden er et farvelagt topografisk kort, hvor turkisblå/grønne farver er lavtliggende områder og orange/brune områder er højtliggende. Kortlægningsområde, samt OSD er vist med fuldt optrukken sort linje. Stiplede linjer angiver indvindingsoplande udenfor OSD.

2 GEOLOGISKE FORHOLD

I dette afsnit gives en indledende og overordnet beskrivelse af de geologiske forhold for Nordfyn, da forståelsen af de geologiske rammer har stor betydning for den geofysiske tolkning.

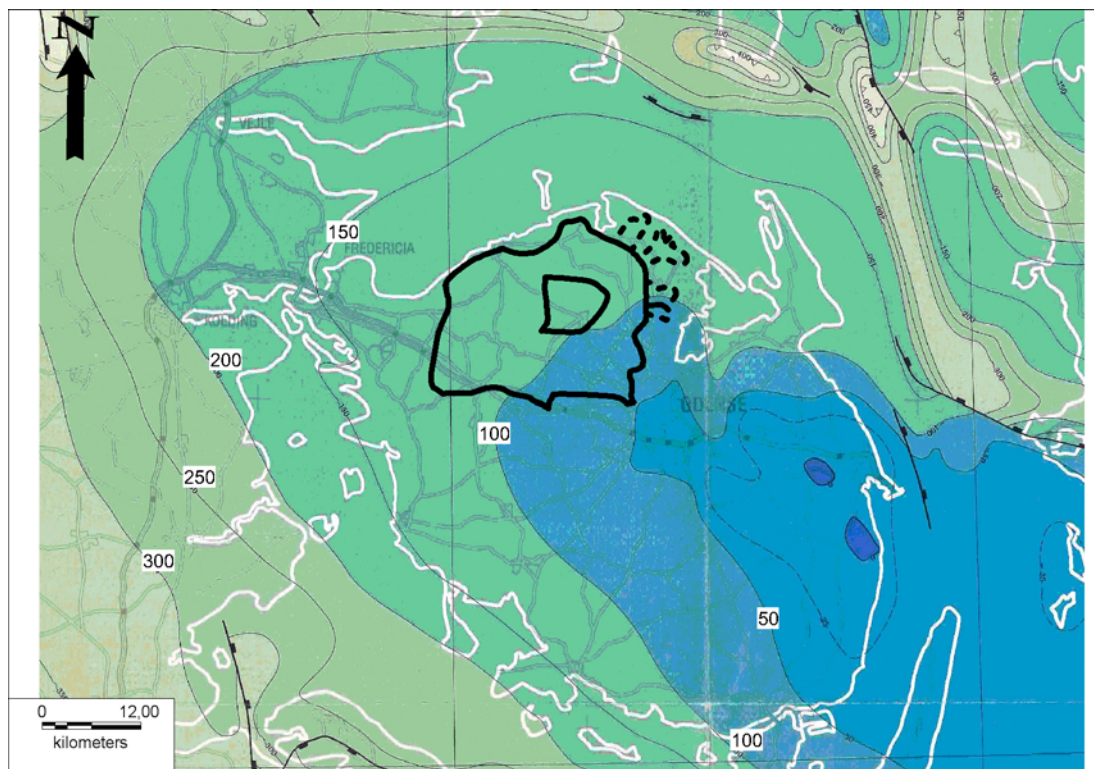
2.1 Strukturel opbygning af prækvartæret

Nordfyn er beliggende på nordflanken af det NV-SØ til VNV-ØSØ orienterede højdedrag Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Højderyggens tilstedeværelse, afspejles i overfladen af præ-Zechstein aflejringerne som et hvælvet område, med højeste punkt ved Glamsbjerg (se Figur 2.1). I overfladen er der på Midt- og Nordfyn hovedsageligt kortlagt NV-SØ til VNV-ØSØ orienterede forkastninger, svarende til højderyggen orientering.



Figur 2.1: Top af præ-Zechstein lag. Anførte tal på isokurver er dybde i km. Forkastninger (normal-) er indtegnet som sorte streger. Udsnit af kort fra /8/. Omtrentlig placering af kortlægningsområdet er markeret med et sort polygon.

På kortet over kalkoverfladen (Figur 2.2) ses højderyggen tilstedeværelse under Fyn tydeligt ved at kalken, centralt under Fyn, ligger mellem kote -25 og -100 m med en hældning mod sydvest, vest og nord-nordvest. Indenfor kortlægningsområdet hælder kalkoverfladen, mod nordvest og nord. I /1/ er det beskrevet, at Fyn udgør et hævningsområde og at kalken danner et NV-SØ orienteret højdedrag og at der i dette højdedrag, er eroderet render parallelt med og vinkelret på den overordnede orientering.



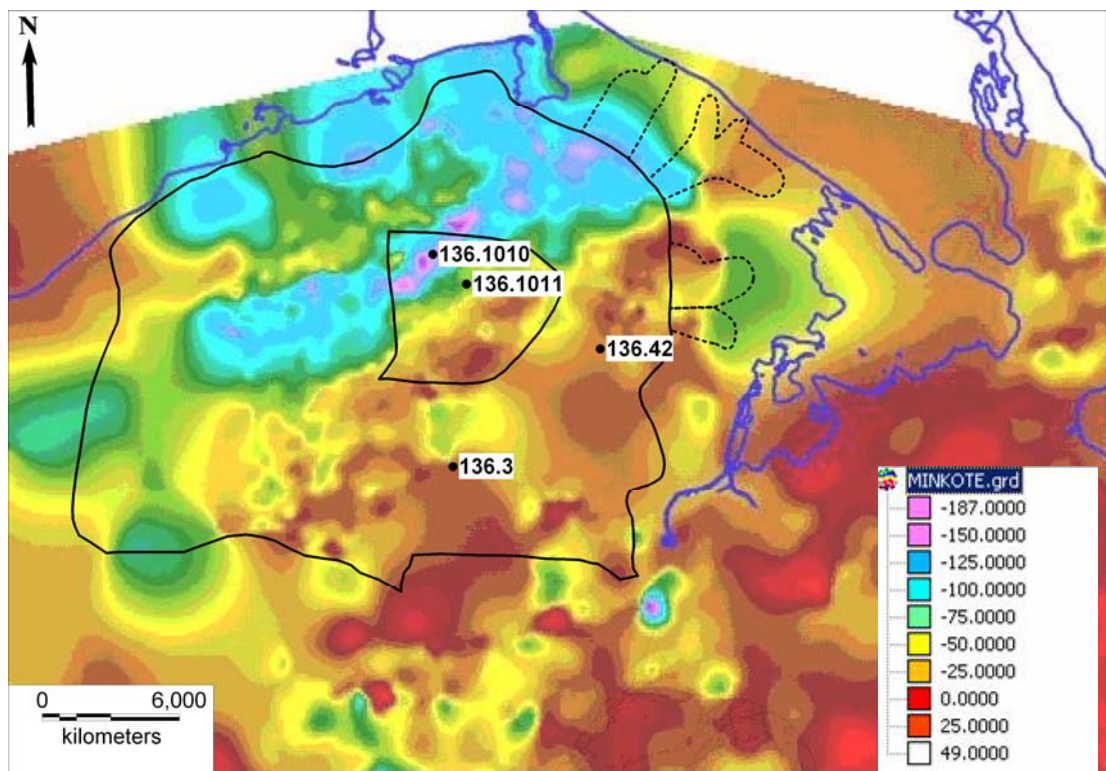
Figur 2.2: Top af kalkoverfladen. Anførte tal på isokurver er dybde i m. Forkastninger er indtegnet som sorte streger. Udsnit af kort fra /7/. Omtrentlig placering af kortlægningsområdet, er markeret med et sort polygon.

Sammenfattende kan det siges, at Ringkøbing-Fyn-højderyggen præger den strukturelle opbygning af Nordfyn. De dominerende orienteringer er VNV-ØSØ til NV-SØ parallelt med højderyggen, samt orienteringer omtrent vinkelret her på, svarende til de nordlige strøg, hvor prækvartæroverfladen ligger dybt (Figur 2.3).

2.2 De prækvartære aflejringer

Fyns Amts kort for prækvartæroverfladen viser et uroligt billede (Figur 2.3). Kortet er, i modsætning til det tidligere, landsdækkende prækvartærkort /2/, udarbejdet med anvendelse af geofysiske data. Indenfor kortlægningsområdet, er der i den nordlige halvdel tale om dybtliggende prækvartær (mellem kote -100 og -150 m), mens der i den sydlige halvdel, er tale om højtliggende prækvartær (-50 til +25 m). Grænsen mellem de to områder, er skarp og forløber VSV-ØNØ.

Boringerne i kortlægningsområdet når stedvist kalkaflejringer i stor dybde. Dette gælder f.eks. DGU nr. 136.1010, som er placeret omtrent midt i en bred, begravet dal. Kalken nås i 160 m.u.t., hvilket svarer til kote -115 m. Kalken indeholder fersk vand og den udgør på dette sted prækvartæroverfladen. I andre boringer haves der tertiært plastisk ler ovenover kalken, som f.eks. i boring DGU nr. 136.1011. Leret er beskrevet som "LER, ret fedt, olivengrå, stærkt kalkholdig (selandien ler, palæocæn ler, kerteminde mergel)" og i DGU nr. 136.42 som "Kertemindeler med haarde lag". I boring DGU nr. 136.3 (www.geus.dk), er leret beskrevet som "Tertiært (eocænt) ler". I sidstnævnte boring, anbores kalken sandsynligvis i kote ca. -91 m, og det konstateredes, at boringen "gav stærkt Saltvand". Den maksimale tykkelse antages, at være omkring 60 m, som i boring DGU nr. 136.42.

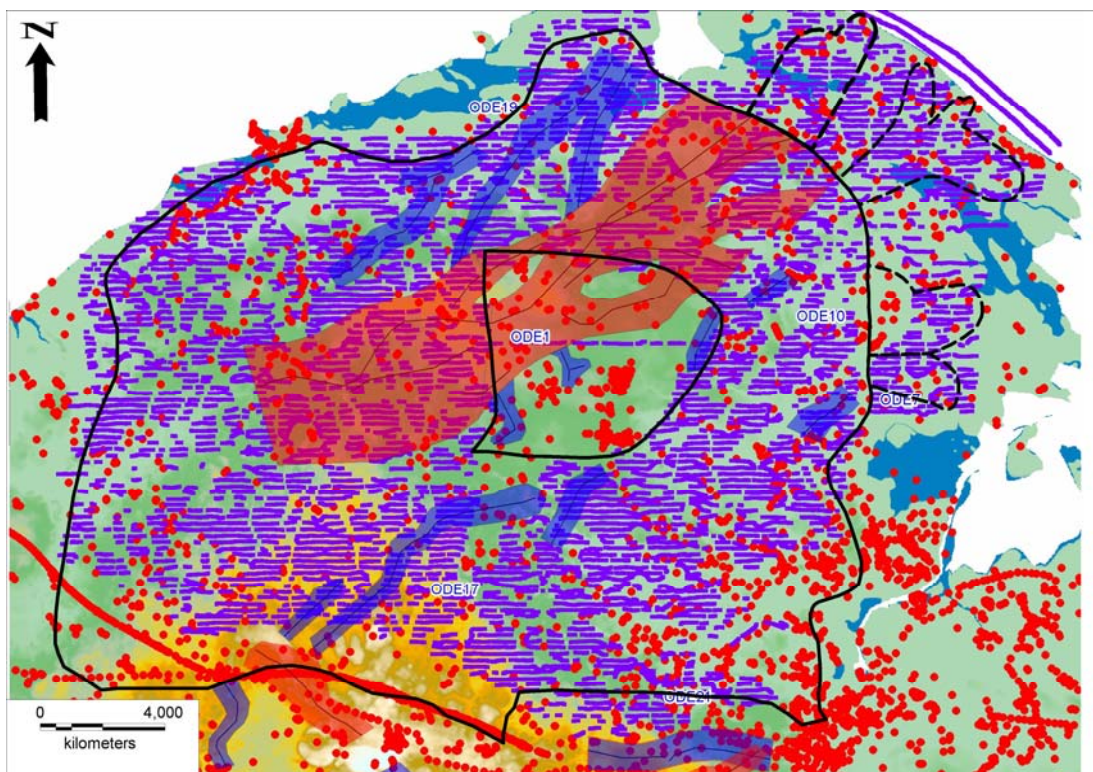


Figur 2.3: Prækvartæroverfladen; Fyns Amt 2006 /3/. Omtrentlig placering af kortlægningsområdet, er markeret med et sort polygon.

Det skal derfor forventes, at kalken kan have et højt chloridindhold i de områder, hvor der er tykke lag af tertiært ler ovenover og et lavt indhold de steder, hvor det tertiære ler er borteroderet. Lignende forhold kendes fra Midt- og Østfyn (f.eks. /9/ og /10/).

2.3 Landskabet og de kvartære aflejringer

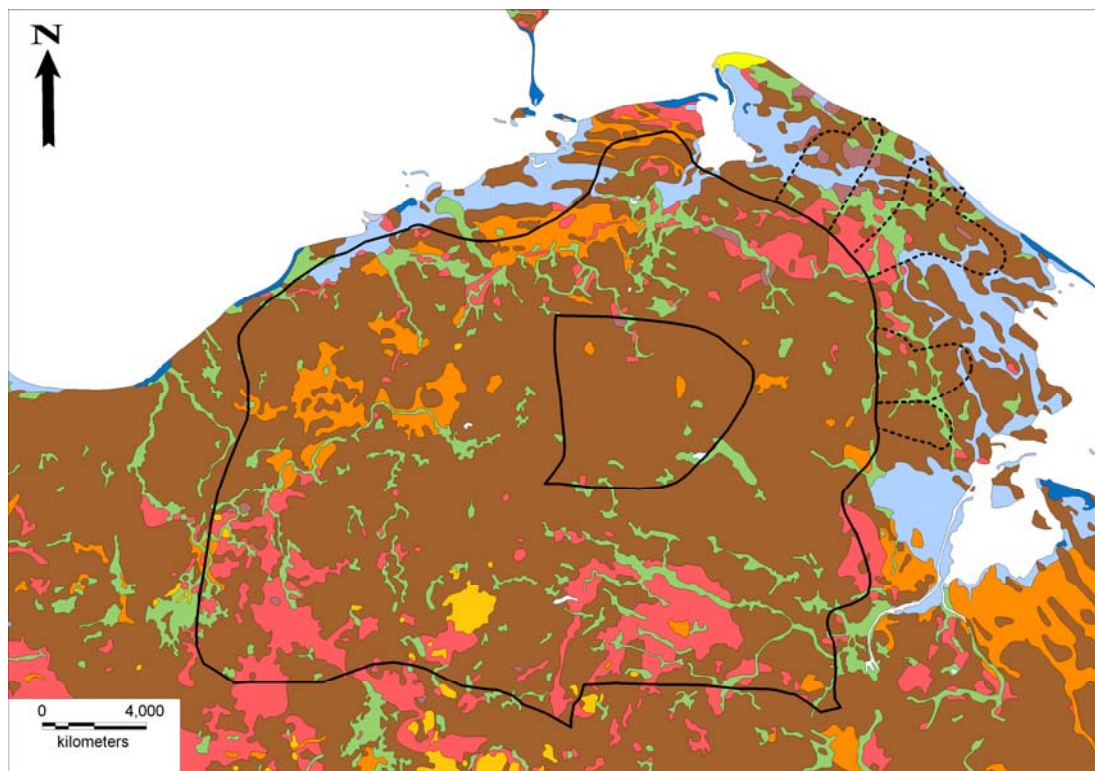
Tykkelsen af den kvartære lagserie varierer og de største tykkelser findes centralt, i de begravede dalsystemer, som tidligere er kortlagt i området /4/ (se Figur 2.4). I boring DGU nr. 136.1010 beliggende centralt, i den brede dalstruktur ("ODE 1" på Figur 2.4), er den kvartære lagserie 160 m tyk, mens den udenfor dalene – jf. områdets boringer – er omtrent 50 m tyk. Den kvartære lagserie, består ifølge områdets boringer af vekslende lag, af ler (moræneler/smeltevandsler) og smeltevandssand. Typisk er de øverste lag lerede, hvilket bekræftes af jordartskortet Figur 2.5, mens der kun sjældent ses sand, i de overfladenære lag.



Figur 2.4: SkyTEM-sonderinger, Jupiter-boringer og lokalisering af begravede dale /4/. SkyTEM-sonderinger er vist som lilla pletter, Jupiter-boringer med røde pletter, veldokumenterede dale er skraveret med gennemsigtig rød – svagt dokumenterede med gennemsigtig blå (Label angiver lokalitetsnummer i /4/). Baggrunden er farvelagt topografisk kort, hvor turkise/grønne farver er lavtliggende områder og orange/brune områder er højtliggende.

De begravede dale, som er vist på Figur 2.4, udgør markante strukturer, som arealmæssigt udgør, en stor del af kortlægningsområdet. Dalene er dannet som tunneldale, som nu er helt begravede. Dalene er overordnet orienteret NØ-SV og består centralt i området af et bredt, sammensat strøg, som stedvist har en stor dybde og dermed en tyk kvartær lagserie. Som det kunne ses i boring DGU nr. 136.1010, så er det tertiære ler, stedvist borteroderet i bunden af dalene, således at kalken her ligger direkte under de kvartære aflejringer. De indtegnede dale på Figur 2.4 udgør status inden SkyTEM-kortlægningen. De begravede dale, fremstår på prækvartærkortet (Figur 2.3) som det nordlige strøg i kortlægningsområdet, hvor de prækvartære aflejringer ligger dybt.

I kortlægningsområdet findes flere mindre, overfladenære forekomster af sen- og postglaciale ferskvandssand, samt marine postglaciale, lerede og sandede aflejringer tæt ved den nuværende kyst. Disse aflejrings tykkelse er begrænset.

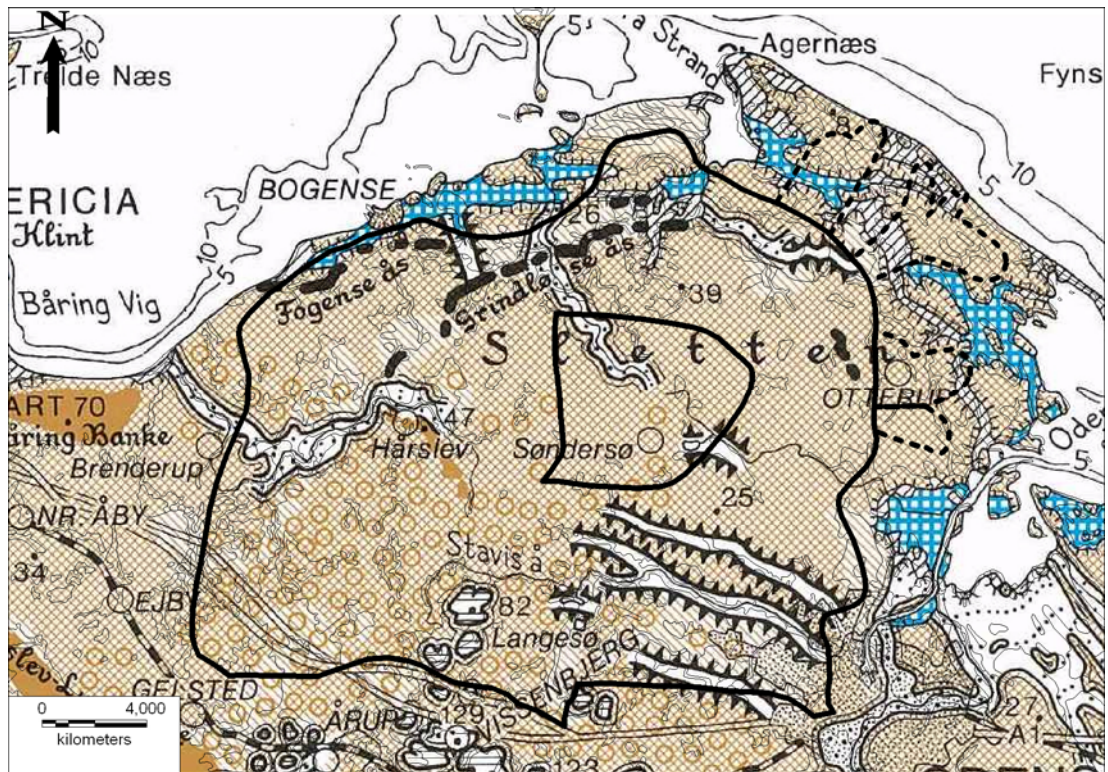


Figur 2.5: Jordartskort, GEUS. Omtrentlig placering af kortlægningsområdet er markeret med et sort polygon. Mørkbrun=ML, Lysbrun=MS, Pink=TS, Orange=TS, Grøn=FS, Gul=DL, Blå=HS/HL/HV

Landskabet i kortlægningsområdet viser et leret morænelandskab med forekomster af issøbakker, åse samt tunnel- og smeltevandsdale. I den sydlige halvdel ses dødispræg (Figur 2.6) /6/. Mod nord og øst er havet i postglacial tid, trængt ind i de laveste dele af dalene, svarende til de områder på jordartskortet, hvor der er marine aflejringer.

2.4 Lagserien ved udvalgte borer

Inden den geofysiske tolkning af SkyTEM-data blev udført, blev 15 borer i den centrale og sydvestlige del af kortlægningsområdet gennemgået (bilag 2.1). Der er tale om borer med forskellig dybde, men fælles for dem alle er, at der er udført borehulslogging eller, at boringen er udført som ellog. Dette har givet et indblik i lagseriens elektriske modstand inden udførelsen af processeringen og tolkningen af SkyTEM-data. Boringernes placering fremgår af Figur 2.7.

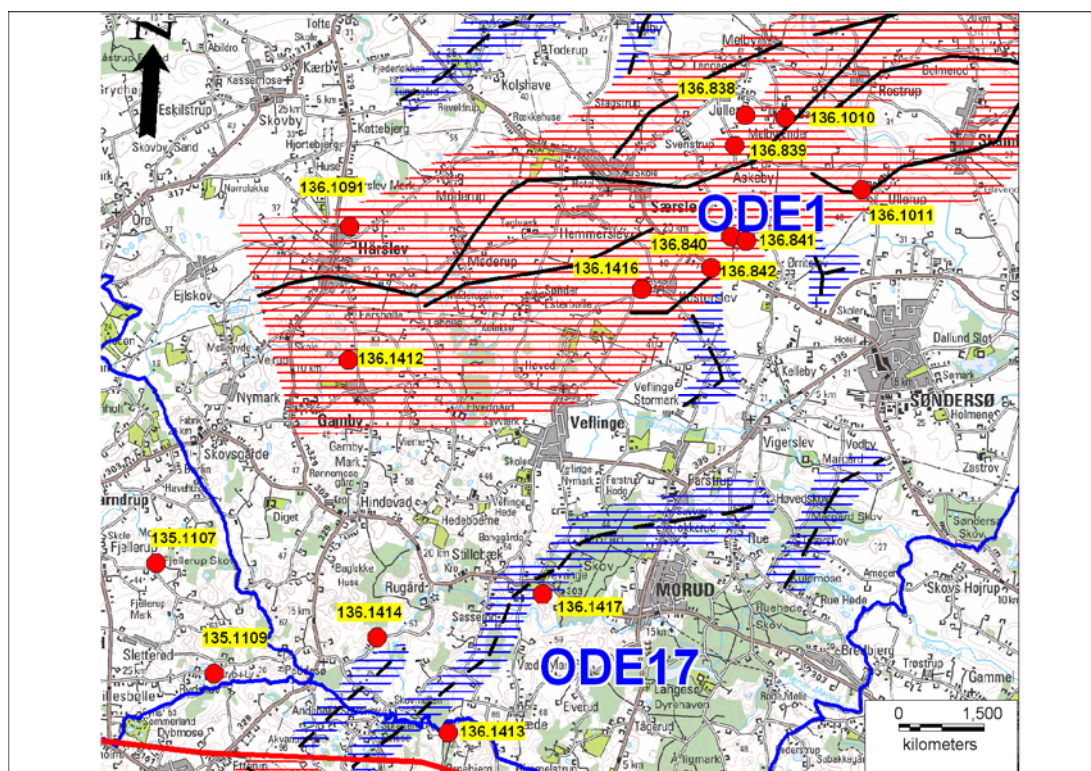


Figur 2.6: Landskabskort, fra /6/.

Omtrentlig placering af kortlægningsområdet er markeret med et sort polygon.

Generelt viser gennemgangen, at:

- Det tertiære, plastiske ler (Kertemindemergel) viser modstande under ca. 20 ohmm og vil generelt udgøre den dybe, gode leder i området.
- Moræneleret ovenover det tertiære ler, har i flere boreriger et lavere modstands niveau end forventet (10-40 ohmm mod forventet ca. 50-70 ohmm), hvilket sandsynligvis skyldes opblanding med det underliggende tertiære ler
- For moræneleret i de øverste 20-30 m, ses der i nogle af borerigerne et højere modstandsniveau end forventet (80-120 ohmm mod forventet ca. 50-70 ohmm)
- Den kvartære lagserie veksler hyppigt mellem sand og ler, og der ses relativt små forskelle i lagenes elektriske modstand. Dette vil kunne gøre en opløsning af lagserien vanskelig for TEM-metoden.
- I de dybeste dele af de begravede dale er det tertiære ler borteroderet, således at kalken er i direkte kontakt med den kvartære lagserie. Den gode leder vil her udgøres af salt grundvand et stykke nede i kalken.



Figur 2.7: Boringer med logs gennemgået i bilag 2.1.
Begravede dale /4/ er markeret med vandret skravering og sorte centerlinier.

2.5 Geologiske fokuspunkter i forhold til den geofysiske kortlægning

De konstaterede variationer i den geologiske opbygning indenfor området, kan have stor betydning for de geofysiske tolkninger. Følgende geologiske fokuspunkter vurderes indledningsvist at være vigtige for de geofysiske tolkninger:

- Prækvarteroverfladen, som består af paleocænt ler, er højest liggende mod syd/sydøst, mens den er dybest liggende mod nord/nordvest.
- Der er hyppig forekomst af begravede dale, som udgør betydelige strukturelle elementer i undergrunden.
- Det tertiære ler er stedvist helt, eller delvist borteroderet, i forbindelse med forekomsten af begravede dale
- Der er salt porevand i kalken, bortset fra de steder, hvor det paleocæne ler er gennemroderet, og fersk grundvand kan trænge ned i kalken
- Toppen af det tertiære ler vil udgøre den dybe gode leder, undtagen hvor leret er borteroderet. Her vil salt porevand i kalken udgøre den dybe gode leder
- Den kvartære lagserie er generelt mere end 50 m tyk – tykkest i de begravede dale - og består af ML, DS og indslag af DL
- Den ofte konstaterede gradvise overgang fra det dybtliggende moræneler til det tertiære ler, vil kunne gøre det vanskeligt for TEM-metoden at fastlægge laggrænsen præcist.

3 SKYTEM DATABEHANDLING

3.1 Dataindsamling og kontrol af de indsamlede SkyTEM-data

Indsamling af SkyTEM-data er foretaget af SkyTEM Survey ApS i perioden 23. juni 2010 til 3. juli 2010. Dataindsamlingen foregår med SkyTEM-udstyret ophængt under en helikopter. Figur 3.1 viser helikopter og måleudstyret i luften under indsamling af data. Der måles kontinuert, mens der flyves.

Der er fløjet Ø-V orienterede, rette linjer med en flyvehastighed på ca. 45 km/t. Den tilsigtede flyvehøjde over flade marker er 30 m, mens flyvehøjden over skov og træer tilpasses forholdene. Der er under kortlægningen indsamlet 2127 linje-km data med en linjeafstand på 200 m for hovedparten af kortlægningen og med en linjeafstand på 400 m for et mindre område udenfor OSD. Yderligere er der fløjet to 9 km lange testlinjer parallelt med og lige uden for kysten. De indsamlede data er afrapporteret i en rådatarapport fra SkyTEM Survey ApS /11/.

Figur 3.1: Foto af måleudstyr i luften under dataindsamling. Fra SkyTEM Survey ApS.



Data fra SkyTEM Survey ApS er kontrolleret (jf. afsnit 4.9). Efter data leveringen fra SkyTEM, blev der konstateret uregelmæssigheder med det anvendte SkyTEM udstyr. Dette resulterede i mindre korrektioner af de målte data samt et nyt kalibreringsparameter i forhold til parametrene, som er angivet i rådatarapporten fra SkyTEM Survey ApS. Endvidere blev det besluttet at tilføje coil response korrektion, så meget tidlige datapunkter kan anvendes, hvormed der opnås en detaljeret beskrivelse af modstandsforholdene i de øverste lag i kortlægningsområdet. Derudover er kalibreringskonstanterne opdateret efter den nye teststedsmodel jævnfør /21/.

Ud fra et ønske om anvendelse af fælles tolkningsprincipper i de igangværende projekter, afholdt Naturstyrelsen en række workshops, hvor de involverede rådgivere sammen med Naturstyrelsen kunne drøfte udfordring og holdninger i forbindelse med processering og tolkning af SkyTem. I forbindelse med disse workshops, aftaltes det bl.a. at anvende tidlige datapunkter (se afsnit 3.3.2). Referater fra workshops er vedlagt som bilag 3.1.1, hvoraf de konkrete retningslinjer fremgår.

De opdaterede kalibreringsparametre og korrigerede data er anvendt ved tolkningerne.

I august måned 2011 er forekomsten af meget lave formationsmodstande i lagseriens øverste 5 meter i en række SkyTEM-kortlægninger på Fyn og Sjælland vurderet af Geofysiksamarbejdet (notat af d. 26.08.2011) og af GEUS (notat af d. 28.08.2011).

Der peges i notatet fra Geofysiksamarbejdet på problemer med anvendelse af teststedet ved Århus til kortlægninger, hvor der er anvendt "tidlige tider".

Geofysiksamarbejdet har med rapportering november 2011 afsluttet en undersøgelse af teststedet /21/. Resultaterne fra undersøgelse har vist, at reference modellen har for lave modstande i de øverste 15 m af modellen, og har givet anledning til et til-læg i time-shift i den eksisterende version af workbenchen. De fornyede oplysninger har ved efterfølgende tolkninger givet bedre opløsning af modstandsforholdene, specielt i de øverste 5 meter.

Det understreges /21/, at de geofysiske modeller under de allerøverste metre ikke bliver påvirket af ændringerne. I afsnit 4.8 nedenfor gennemgås resultaterne af ændringerens betydning for nærværende projekt, og der vises eksempler på tolkning før og efter anvendelse af ny opsætning.

3.1.1 SkyTEM opsætning

Der er anvendt et to-moment SkyTEM system. Det lave moment bidrager primært med information om den overfladenære geologi. Det høje moment er defineret ved en høj senderstrøm udsendt på to vindinger. Det høje moment bidrager med information om den dybereliggende geologi. De to momenter er i nærværende rapport omtalt som henholdsvis super lavt moment (SLM) for det laveste moment og højt moment (HM) for det højeste moment. Kombinationen af de to momenter muliggør en høj lateral såvel som vertikal opløsning.

3.1.2 Kalibrering og højdetests

SkyTEM-udstyret er forud for kortlægningen kalibreret på testlokalitet ved Aarhus. Endvidere er der etableret to lokale referencelokaliteter i kortlægningsområdet. Formålet med de lokale referencelokaliteter er at sikre, at udstyret efter mobilisering stadig måler på samme måde. Endvidere er der foretaget daglige målinger på de lokale referencelokaliteter for at sikre, at udstyret måler konstant under hele kortlægningsperioden. Kalibreringsarbejdet er udført af SkyTEM Survey Aps. Dokumentation for kalibreringen af SkyTEM-udstyret findes i rådatarapporten fra SkyTEM Survey Aps /11/.

Der er i forbindelse med kortlægningen blevet foretaget en højdetest i stor højde (~1000 m) for at fastlægge systemresponset. Desuden er der foretaget bias-højdetests (300-400 m) før og efter hver produktionsflyvning for at kontrollere, at systemresponset forbliver på et lavt niveau. Dokumentation for højdetests mv. findes ligeledes i rådatarapporten fra SkyTEM Survey Aps /11/.

3.2 Processeringsforløb

Processeringen har til formål at gøre data klar til den geofysiske tolkning. Processen omfatter primært filtrering og midling af data, beskæring og kassering af koblede data, samt sammenfletning af de forskellige datatyper (GPS-data, højde-data, mv).

Processeringen foregår i SkyTEM processeringsmodulet i Aarhus Workbench. Hele processeringsforløbet gemmes i et workspace, så man ved senere lejlighed kan fastslå, hvad der konkret er foretaget under processeringen.

Processeringen kan opdeles i fire trin:

1. Indlæsning af rådata i form af skb- og sps-filer samt geometrifil (geo-fil) i en database. Skb-filerne indeholder selve TEM-dataene fra modtageren og er i binært format. Sps-filer indeholder informationer om senderstrømme, GPS positioner, den målte flyvehøjde, vinkel af modtagerspølen mm. Geometrifilen indeholder bl.a. informationer om målegeometri, lavpasfiltre, op- og nedramping af senderstrømmen og kalibreringsparametre fra teststedet. Alle data er lagret med en systemtid, som bruges til at sammenkæde de forskellige datatyper under processeringen. Beskrivelse af rådata-filformaterne findes i /12/.
2. Automatisk processering. Der foretages først en automatisk processering af de fire datatyper (GPS-, vinkel-, højde- og TEM-data) ud fra en række opstillede kriterier, der tilpasses den pågældende kortlægning.
3. Manuel processering. Gennemgang og korrektion af den automatiske processering for de forskellige datatyper.
4. Efterprocesseringen af data baseret på indledende inversionsresultater.

De følgende afsnit indeholder en kort gennemgang af processeringen af de forskellige datatyper. En mere detaljeret beskrivelse af SkyTEM-processeringsmodulet og processeringsforløbet findes i /12/.

3.2.2 Positionering

Den geografiske position måles med to uafhængige GPS-modtagere. Hver GPS-modtager registrerer positionen samt en GMT-tidsangivelse ca. 1 gang i sekundet. Usikkerheden på GPS-positionen er normalt < 10 m. GPS-dataene filtreres og midles ved stykvis tilpasning til et 2. gradspolynomium. Efter midlingen nedsamples dataene til en værdi pr. 0,5 s (beat time). De anvendte indstillinger for processeringen er vist i Figur 3.2

Figur 3.2: Indstillinger for processing af positionering.

GPS Settings	
Settings:	
Key	Value
Device GPS	All
Beat Time [s]	0.5
Filter Length [s]	9.0
Polynomial Order	2
Reposition in x-direction [m]	0

3.2.3 Inklination

Rammens hældning måles ca. 2 gange i sekundet i to retninger – Pitch og Roll. Pitch (x-vinkel) er hældningen i flyveretningen, mens roll (y-vinkel) er hældningen vinkelret på flyveretningen. Målingerne bruges til korrektion af højde og SkyTEM-data. Det antages, at senderrammen udgør et stift plan.

Under processeringen beregnes med samme skridtlængde som for positionering en løbende middel for de to vinkler. De anvendte indstillinger for processeringen er vist i Figur 3.3.

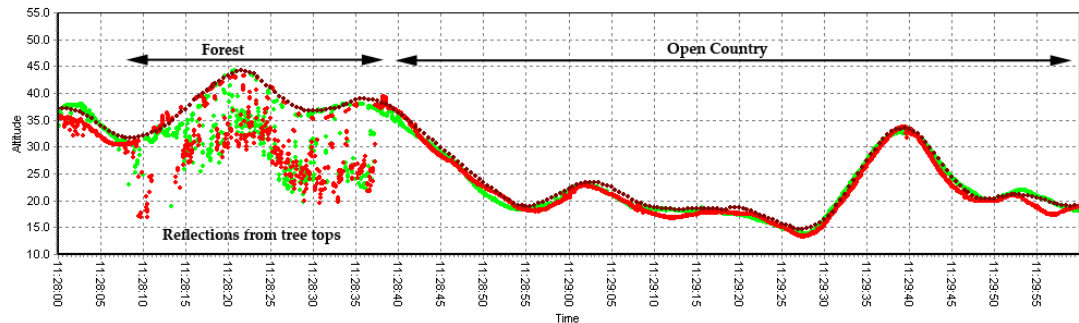
Figur 3.3: Indstillinger for processing af inklination.

Tilt Settings	
Settings:	
Key	Value
Device AN	All
Median Filter	ON
Median Filter Length [s]	3.0
Average Filter Length [s]	2.0

3.2.4 Flyvehøjde

Senderspolens højde er vigtig at fastlægge, da denne højde indføres som a priori information på flyvehøjden i selve tolkningen. Til fastlæggelse af afstanden mellem senderspole og terræn anvendes to uafhængige lasere. Laserne måler hver især ca. 30 gange i sekundet. Usikkerheden på højden er +/- 10-30 cm.

Processeringen af højdedataene har primært til formål at fjerne refleksioner, der ikke stammer fra terrænoverfladen - typisk fra trætoppe i områder med skov. I processeringen af højdedataene i områder med skov, udnytter man, at en del af refleksionerne stammer fra terrænoverfladen, samt at refleksioner fra trætoppe etc. resulterer i en tilsyneladende lavere flyvehøjde. På Figur 3.4 ses eksempler på højdemålinger fra områder med og uden skov. Under processeringen filtreres refleksioner fra træer etc. fra, og data midles. Højdedataene korrigeres også for, at laseren ikke er rettet vinkelret på terrænoverfladen.



Figur 3.4 Højdedata målt over skov (til venstre) og åbent land (midten og til højre). Røde og grønne prikker er de rå højdedata fra de to laserhøjdemålere. De brune prikker er de (auto) processerede højdedata, der anvendes ved inversion af SkyTEM dataene. De viste dataudsnit udgør 3 min, hvilket svarer til ca. 1.2 km.

De anvendte indstillinger for processeringen er vist i Figur 3.5.

Figur 3.5: Indstillinger for processering af flyvehøjde.

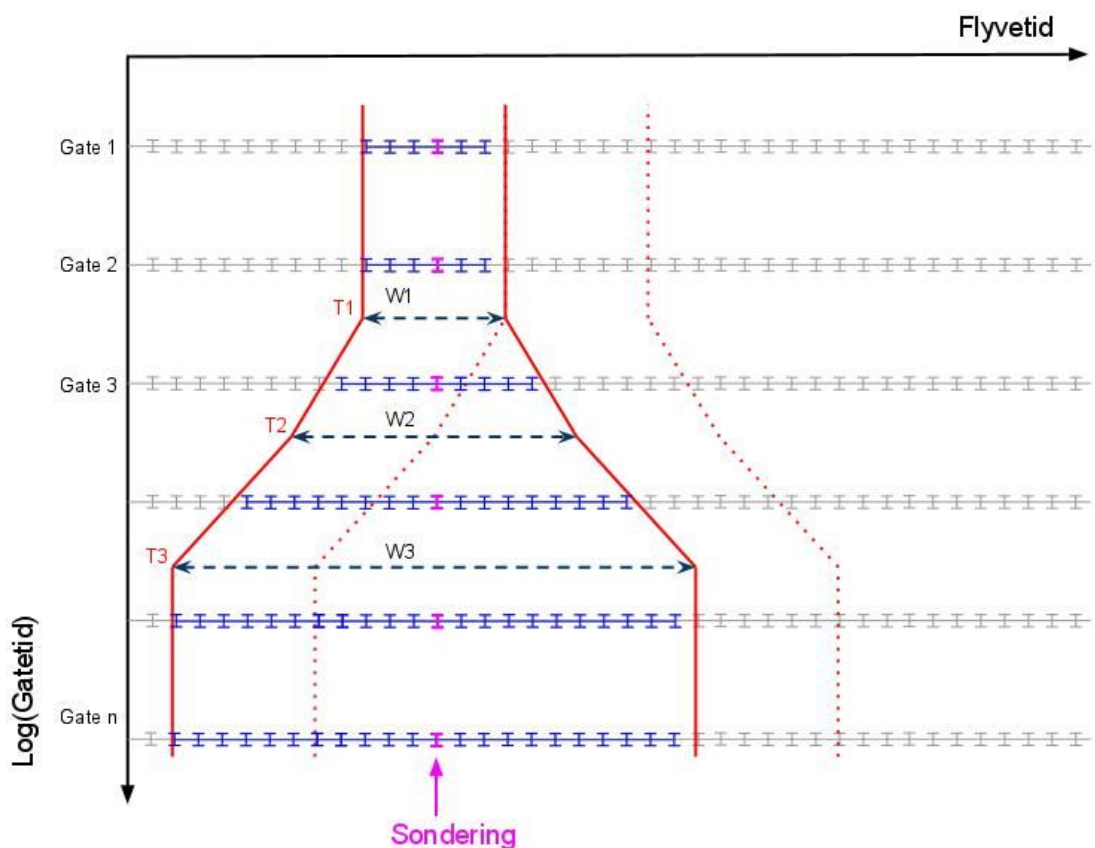
Altitude Settings	
Settings:	
Key	Value
Device ALT	All
Tilt Correction Threshold [s]	5
First Filter Poly Order	8
First Filter Number of Passes	8
First Filter Shift Length [s]	6
First Filter Length [s]	30
First Filter Lower Threshold [m]	1
First Filter Upper Threshold [m]	30
Second Filter Poly Order	8
Second Filter Length [s]	30

Efter den automatiske højdeprocessering kontrolleres resultatet, og der foretages evt. manuelle justeringer. I denne kortlægning er der relativt mange steder, hvor der er meget få eller slet ingen refleksioner fra terrænoverfladen pga. særligt tætte skovområder. Dette har bevirket, at den automatiske højdedatafiltrering ikke fungerer optimalt. Der har derfor været fokus på kvalitetssikring af den automatiske højdedataprocesering. Der er således indført relativt mange manuelle korrektioner for at opnå den mest korrekte flyvehøjde. I dette arbejde har det været nyttigt, at kunne støtte sig til plot af flyvehøjden beregnet fra GPS-flyvekoten og terrænmodellen.

3.2.5 SkyTEM data

TEM-data er indsamlet kontinuert langs profillinjen. Der måles skiftevis på super lavt og højt moment. Processeringen af TEM-data foregår i Aarhus Workbench, hvor der først laves en automatisk filtrering af data, der har til formål at fjerne koblede og støjede data. Efter denne gennemgås sonderingerne enkeltvis og editeres manuelt.

Den automatiske processing består bl.a. af en række filtre, der filtrerer data fra, hvis der findes fortegnsskift i data eller urealistiske hældninger på datakurven. Endvidere korrigeres TEM-dataene for sender- og modtagerplanets afvigelser fra vandret. Under den automatiske processing midles de rå datasæt for at reducere datastøjen. Midlingen foregår som en trapezmidling. Midlingsbredden er størst for datapunkter til de sene tider på en sonderingskurve, hvor en større midling af data er påkrævet for at undertrykke støjen. Princippet for trapezmidlingen fremgår af Figur 3.6. Midlingsbredderne W1-W3 er for SLM henholdsvis 37.5 m, 100 m og 375 m, og for HM 75 m, 250 m og 725 m. Usikkerheden, som datapunkterne tilskrives, er standardafvigelser beregnet ud fra datastakken. Derudover adderes en vis usikkerhed til datausikkerheden, som bl.a. er en følge af, at data tolkes med 1D-modeller. Dette er typisk i størrelsesordenen 3%. Sonderinger tages normalt ud med en afstand på 20-30 m.



Figur 3.6: Midling af TEM-dataene. De rå dataserier (blå punkter) inden for de røde linjer midles sammen til sonderingen markeret med lilla. Herefter flyttes midlingstrapezen, og næste sondering dannes (stiplet rød linje). Tiderne T1-3 og bredderne W1-3 definerer midlingstrapezen.

De anvendte indstillinger for processingen er vist i Figur 3.7.

Efter den automatiske processering inspiceres sonderingerne visuelt ved bruge en række forskellige plots. Her vurderes det, hvorvidt datapunkter skal tillægges en større usikkerhed, eller helt skal fjernes. Dette gøres i to omgange. Først inspiceres de rå data for at fjerne koblinger. Kortlægningsområdet gennemskæres af højspændingsledninger, veje og jernbaner. Da data i nærheden af sådanne installationer ofte er koblede til installationerne, er det nødvendigt at fjerne de koblede data. Om data er koblet, vurderes ved at se på kurveforløbet sammenholdt med flyvehøjden og afstanden til potentielle koblingskilder. Man kan under processeringen følge helikopterpositionen på et integreret GIS-kort. Desuden benyttes plot af de enkelte RhoA kurver til nærmere inspektion af sonderinger. Når koblingerne er blevet fjernet fra de rå data, foretages trapezmidlingen. Derefter inspiceres de nu midlede data for denne gang at fjerne støjede data. Overgangen fra støjfrie til støjbehæftede datapunkter sker meget hurtigt. Ved denne overgang siges det, at data "går i støj". Data, der er gået i støj, indeholder ikke brugbar information og slettes. Støjniveauets indtræden vurderes ved at se på datakurveforløbet, spredningen på datastakken og støjmålinger. En nærmere beskrivelse af støjens indvirkning på TEM-data findes i /13/.

I forbindelse med de afholdte workshops, blev en række overordnede eksempler på beskæringer drøftet mellem rådgiverne og Naturstyrelsen, for at indføre en ensartet tilgang i det omfang det er muligt. Eksempler på beskæring kan ses i bilag 3.1.1.

SLM:

Data Settings	
Settings:	
Key	Value
Noise Channel	OFF
Use 2nd order slope filters	ON
Sounding Bin Spacing [s]	2
Current Time Distance [s]	0.5
Cap Sign Filter	ON
Cap Sign from time [s]	1.0e-5
Cap Sign noise level (ms)[v/m2]	1e-8
Cap Sign noise slope	-0.5
Cap Sign back step	30
Cap Slope Filter	ON
Cap Slope from time [s]	1.75e-5
Cap Slope noise level (ms)[v/m2]	5e-7
Cap Slope noise slope	-0.5
Cap Slope min slope	-0.6
Cap Slope max slope	0.6
Cap Slope back step	2
Ave Sign Filter	ON
Ave Sign from time [s]	1.0e-5
Ave Sign back step	1
Ave Slope Filter	ON
Ave Slope from time [s]	1.75e-5
Ave Slope min slope	-0.5
Ave Slope max slope	0.5
Ave Slope back step	0
Trapez Filter	ON
Trapez Sounding Distance [s]	2.5
Trapez Gate Time 1 [s]	1e-5
Trapez Gate Time 2 [s]	1e-4
Trapez Gate Time 3 [s]	1e-3
Trapez Width 1 [s]	3
Trapez Width 2 [s]	8
Trapez Width 3 [s]	30
Trapez Spike Factor	20
Trapez Min. No. Gates [%]	25
Trapez Min. No. Gates per sound.	3
Trapez Sync. location of sound.	ON
Trapez Require left/right sound.	OFF
Minimum allowed Tx altitude [m].	5.0
Maximum allowed Tx altitude [m].	999.0

HM:

Data Settings	
Settings:	
Key	Value
Noise Channel	OFF
Use 2nd order slope filters	ON
Sounding Bin Spacing [s]	3
Current Time Distance [s]	0.5
Cap Sign Filter	ON
Cap Sign from time [s]	1e-4
Cap Sign noise level (ms)[v/m2]	2e-7
Cap Sign noise slope	-0.5
Cap Sign back step	4
Cap Slope Filter	ON
Cap Slope from time [s]	1e-4
Cap Slope noise level (ms)[v/m2]	2e-7
Cap Slope noise slope	-0.5
Cap Slope min slope	-0.5
Cap Slope max slope	0.5
Cap Slope back step	4
Ave Sign Filter	ON
Ave Sign from time [s]	1e-4
Ave Sign back step	1
Ave Slope Filter	ON
Ave Slope from time [s]	1e-4
Ave Slope min slope	-0.5
Ave Slope max slope	0.5
Ave Slope back step	0
Trapez Filter	ON
Trapez Sounding Distance [s]	2.5
Trapez Gate Time 1 [s]	1e-4
Trapez Gate Time 2 [s]	1e-3
Trapez Gate Time 3 [s]	1e-2
Trapez Width 1 [s]	6
Trapez Width 2 [s]	20
Trapez Width 3 [s]	58
Trapez Spike Factor	25
Trapez Min. No. Gates [%]	25
Trapez Min. No. Gates per sound.	5
Trapez Sync. location of sound.	ON
Trapez Require left/right sound.	ON
Minimum allowed Tx altitude [m].	5.0
Maximum allowed Tx altitude [m].	999.0

Figur 3.7: Indstillinger for processing af SkyTEM data.

3.3 Tolkning

SkyTEM data tolkes med éndimensionale modeller, der består af planparallelle, horisontale og homogene lag. Hvert lag er karakteriseret ved en specifik elektrisk modstand og en tykkelse. Det nederste lag i modellen antages at fortsætte til uendelig dybde. Ud over lag til beskrivelse af modstandsforholdene i jorden, indeholder tolkningsmodellen også flyvehøjden. Flyvehøjden bindes med en standardafvigelse på typisk +/- 2 m.

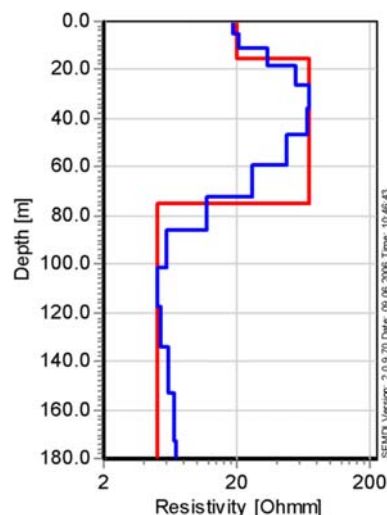
Under tolkningen sammenbindes 1D-modellerne med laterale bånd, der afspejler den geologiske variation. Dette kan gøres med en Laterally Constrained Inversion (LCI), hvor 1D-modellerne bindes sammen langs flyvelinjerne. Eller det kan gøres med en Spatially Constrained Inversion (SCI), hvor 1D-modellerne bindes sammen både på langs og på tværs af flyvelinjerne. LCI-tolkning er anvendt til de indledende tolkninger, mens alle de afrapporterede tolkninger er SCI-tolkninger.

Tolkningen foretages i tolkningsmodulet i Aarhus Workbench. Den bagvedliggende inversionskode er em1dinv /14/. Ved tolkningen modelleres det fulde systemrespons, dvs. at den endelige turn-off tid for strømmene og de anvendte filtre i instrumentet er inddraget. En generel beskrivelse af modellering af filtre kan findes i /15/.

3.3.1 1D-Tolkningsmodeller

Tolkning af SkyTEM data foretages som nævnt med 1D-modeller. For at opnå en vel-estimeret 1D-model, er der fastsat et minimum på 7 brugbare datapunkter, der skal være tilstede i den enkelte sondering, før den kan inddrages i tolkningen. 1D-tolkningsmodellen kan enten være en fålagsmodel eller en mangelagsmodel. På Figur 3.8 er der vist en fålags- og en mangelagsstolkning af den samme sondering.

Figur 3.8: Eksempel på en fålagsmodel (rød) og en mangelagsmodel (blå).



En fålagsmodel består typisk af 3-5 lag med variabel modstand og tykkelse. Fålagsmodeller bliver traditionelt anvendt til tolkning af geofysiske data i forbindelse med hydrogeofysiske kortlægninger, da de afspejler vore forventninger til de geologiske forhold - som ofte vil være en lagpakke bestående af relativt homogene lag med skarpe overgange mellem lagene. Den geofysiske model kommer således med direkte indikationer på den geologiske lagdeling. Sammen med modelresultatet beregnes en modelparameteranalyse, der giver estimater på, hvor godt modelparametrene (modstande, tykkelser og dybder) er bestemt. Denne information er værdifuld i den videre geologiske tolkning.

Bestemmelsen af, hvor mange lag der skal indgå i modellen, er en delvist subjektiv proces og er relativt tidskrævende, da den kræver en manuel gennemgang og udvælgelse fra flere tolkningsresultater med et varierende antal lag. Ofte vælger man dog at anvende samme antal lag for hele kortlægningsområdet.

Disse forhold er ligeledes drøftet i forbindelse med de afholdte workshops. Nærmere beskrivelse fremgår af bilag 3.1.1.

En mangelagsmodel består typisk af 15-20 lag med faste tykkelser. I tolkningsprocessen er det således kun modstanden af lagene, der skal fastlægges. Som ved fålagsmodellen anvendes der laterale bånd mellem modstandene. Filosofien er, at man prøver at være så objektiv som mulig i den geofysiske tolkning. En mangelagsmodel kaldes også "minimum structure model" eller "smooth model", da tolkningsresultatet vil være en model med rolige, vertikale modstandsvariationer - en blød model. En fordel ved en mangelagstolkning er dens evne til at afspejle selv komplekse geologiske strukturer i undersøgelsesområdet. Desuden skal man ikke igennem en subjektiv og tidskrævende udvælgelse/evaluering af flere modelresultater.

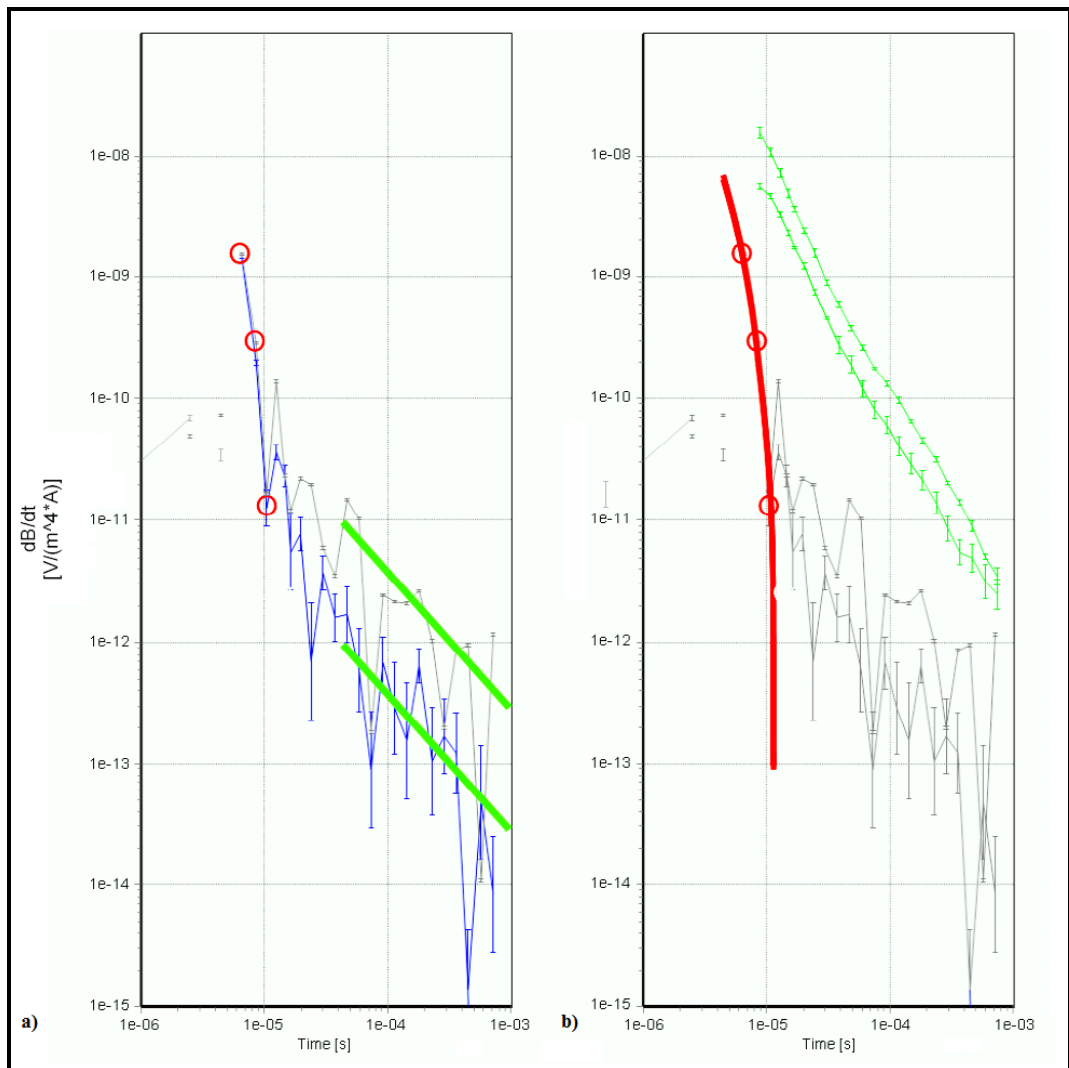
En ulempe ved mangelagsmodeller er, at der ikke kan opnås et brugbart estimat af usikkerhederne på modelparametrene (modstande). Dette skyldes, at modellen indeholder relativt mange modelparametre i forhold til antallet af datapunkter, hvilket betyder, at de vertikale og horisontale bånd bliver styrende for modelparameteranalysen.

Mangelagstolkning af TEM-data er endvidere beskrevet i rapporten /16/ udarbejdet af GeoFysikSamarbejdet.

3.3.2 Coil respons inversion

Informationen om den overfladenære geologi er indeholdt i den tidlige del af sonderingskurven. For at kunne opnå den bedst mulige opløsning af den overfladenære geologi, gælder det om at kunne opnå brugbare data så tidligt som muligt. Problemet med at opnå meget tidlige gates (tider) er, at signalet fra disse tider også indeholder et signal fra instrumentet selv. Dette forstyrrende signal kaldes for coil-responset (CR). Normalt kasseres gates, hvor CR-signalet udgør mere end cirka 5 procent af det målte signal, og derfor kan der først anvendes gates fra cirka 11-12 μ s, efter at strømmen i senderspølen er slukket. Med CR-inversionskonceptet kompenseres der under inversionsforløbet dynamisk for CR-signalet, således at de CR-påvirkede gates i tidsintervallet 7-11 μ s også kan inddrages i tolkningen. Dette forudsætter imidlertid, at SkyTEM-kortlægningen, ligesom nærværende kortlægning, er fløjet med en optimeret SkyTEM-opsætning. Der skal være tilstrækkeligt mange gates til, at formen af CR-signalet kan fastlægges.

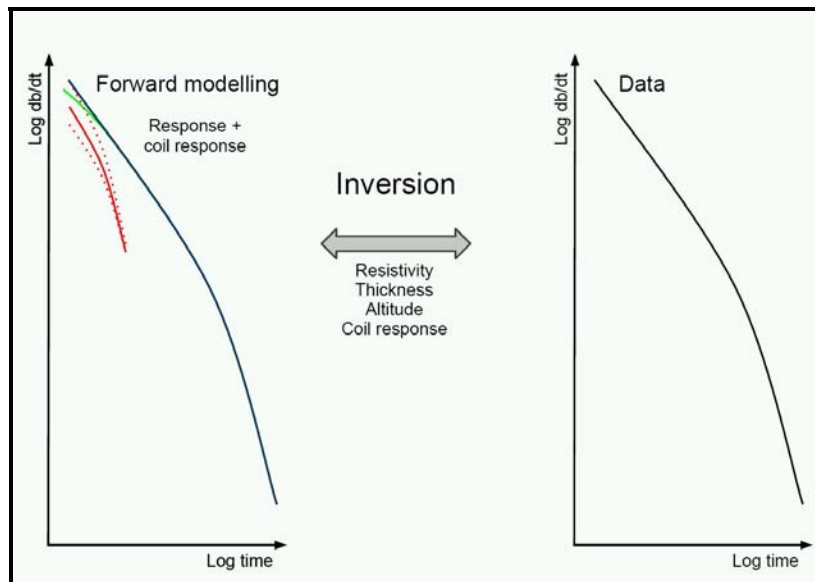
Størrelsen af CR-signalet fastlægges ved at foretage målinger i stor højde (> 800 m). Her udgør signalet fra jorden kun en forsvindende del af det målte signal, der i stedet domineres af tilfældig baggrundsstøj og CR-signalet. Hvis data midles, vil den tilfældige baggrundsstøj blive formindsket, og CR-signalet kan således kvantificeres. Dette er illustreret i Figur 3.9.



Figur 3.9: Stakkede SLM data fra stor højde. a) Stakken over 6 s og 768 s er vist som henholdsvis en grå og en blå linje. De grønne linjer viser, hvordan baggrundsstøjen er aftaget med omkring en faktor 10. De røde cirkler viser gates, der stort set er uændrede, da CR-signalet dominerer over baggrundsstøjen. b) Den røde linje viser CR-signalet. De grønne linjer viser niveauet af et typisk målt signal ved henholdsvis 30 m (øverst) og 40 m (nederst). Den første gate af det målte signal ved 40 m indeholder omkring 8% CR-signal og bliver tydeligt trukket ned af CR-signalet, der i dette tilfælde er negativt.

I plot a (til venstre) er data fra stor højde midlet i henholdsvis 6 s (grå linje) og 768 s (blå linje). De to grønne linjer viser, hvordan baggrundsstøjen effektivt er aftaget med omkring en faktor 10 (cirka kvadratroden af 6/768) som følge af midlingen. De røde cirkler viser gates, der ikke er aftaget ved midlingen, da de er domineret af CR-signalet. CR-signalet kan antages at være eksponentielt henfaldende, som vist med den røde streg gennem de røde cirkler i plot b (til højre) i Figur 3.9. I figuren er der endvidere plottet to (grønne) kurver, der viser det typiske niveau af de målte signaler i henholdsvis 30 m (øverst) og 40 m (nederst) højde.

CR-signalet er ikke konstant for en hel kortlægning. Der kan være mindre variationer i niveauet under flyvningen, og niveauet kan også forskydes, hvis modtagerpolens position ændres nogle få millimeter ved en hård landing. Formen af CR-signalet kan til gengæld antages at være konstant. På den baggrund kan man ikke uden videre trække CR-signalet fra det målte signal og så anvende de tidligere gates. I stedet indføres der med CR-inversionskonceptet en CR-funktion, som under inversionsforløbet dynamisk kompenserer for CR-signalet. Dette er illustreret i Figur 3.10. Inversionen med CR-korrektion forløber helt analogt til den normale inversion. Det samlede forward respons, bestående af det normale forward respons plus et bidrag fra CR-funktionen, sammenlignes med det målte signal. Der foretages så en mindre justering af de sædvanlige inversionsparametre og niveauet for CR-funktionen, inden der igen sammenlignes. Dette fortsætter, indtil det samlede forward respons er tilstrækkeligt tæt på det målte signal til, at inversionen anses for gennemført.



Figur 3.10: Inversion med CR-korrektion. Niveauet for CR-funktionen forskydes under inversionen som en ekstra parameter.

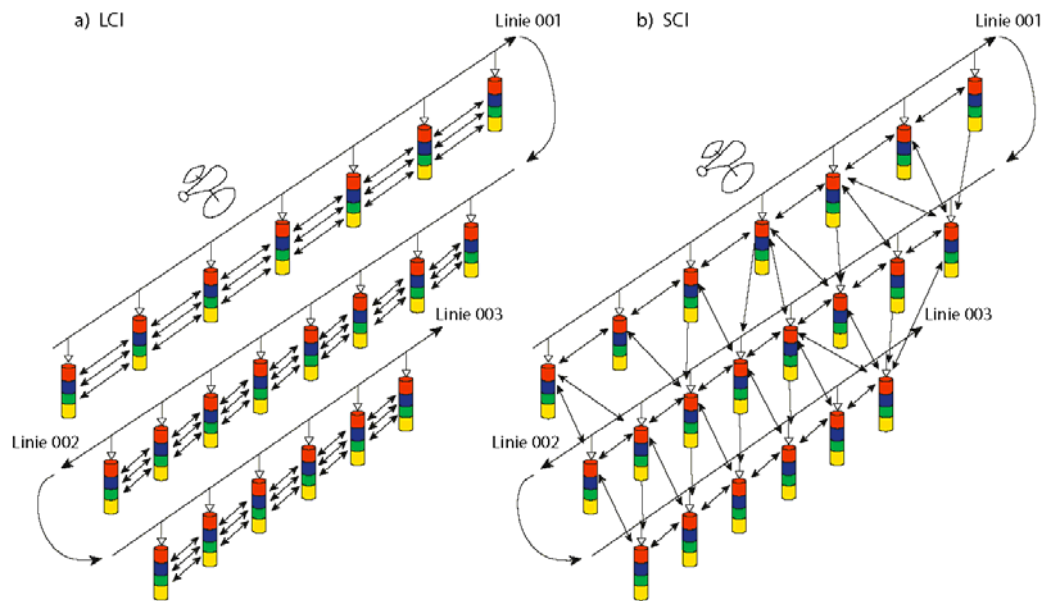
CR-funktionen er indført på baggrund af følgende antagelser:

1. CR-funktionens form er fast og identisk med CR-signalets form aflæst ved stor højde. Niveauet for CR-funktionen er variabel.
2. Der kan forekomme større variationer i niveauet for CR-funktionen fra flyvelinje til flyvelinje.
3. Der kan kun forekomme mindre variationer i niveauet for CR-funktionen fra sondering til sondering.

I Aarhus Workbench tilføjes antagelserne ved, at niveauet for CR-funktionen for hver enkelt model underlægges dels et løst a priori bånd til en startmodel med niveauet aflæst i stor højde, dels et stramt bånd til niveauet langs flyvelinjen. Hvis inversionen har brug for det, kan den således forskyde niveauet for CR-funktionen langs en hel flyvelinje, forudsat at niveauet fra sondering til sondering ikke ændres ret meget.

3.3.3 SCI-setup

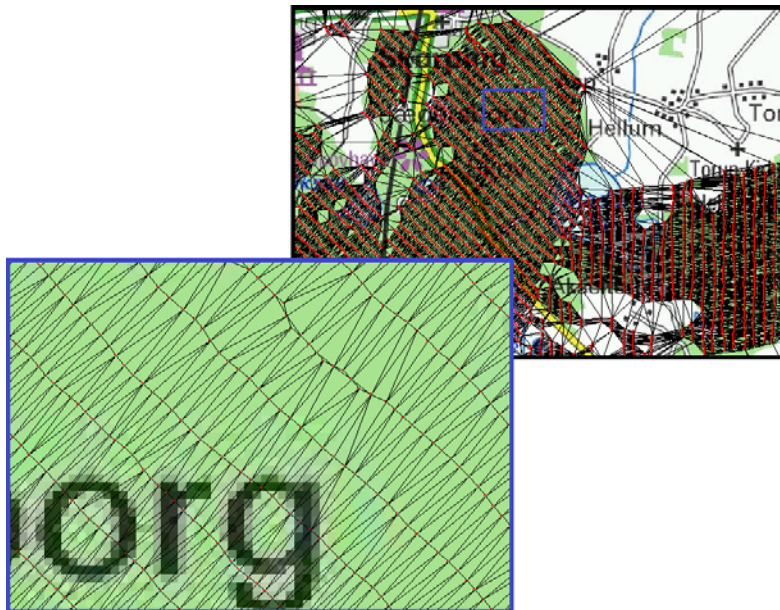
SkyTEM-inversionen inkl. CR-inversion er udført med en Spatially Constrained Inversion opsætning (SCI). SCI-tolkningsmetoden er en naturlig videreudvikling af LCI-tolkningsmetoden. I denne pseudo-3D-tolkning bindes hver enkelt 1D-model, såvel på langs med flyvelinjen som på tværs af flyvelinjerne, således at der udveksles geologisk information i de to retninger, ud over dybden der indgår ved modelvariation. På Figur 3.11 ses en principskitse for sammenbindingerne af modeller ved de to metoder.



Figur 3.11: Opsætning af de laterale bånd. a) LCI-opsætning. Modellerne bindes sammen langs flyvelinjerne. b) SCI-opsætning. Modellerne bindes sammen både på langs og på tværs af flyvelinjerne.

De laterale bånd opsættes ved SCI-tolkninger via et trekantsystem, hvor der altid bindes til de "nærmeste nabomodeller". Trekantopsplitningen sker ved at lave en Delaunay triangulering ud fra modelpositionerne. På Figur 3.12 ses et udsnit af SCI-båndene fra en SkyTEM kortlægning. Som det fremgår af figuren, bindes én model normalt til de to nærmeste modeller på flyvelinjen og til to-tre modeller på hver af nabolinjerne. Båndenes styrke afhænger af afstanden mellem modellerne. Ud over bånd mellem modelparametrene (modstande, dybder) er der også laterale bånd på flyvehøjden og niveauet for CR funktionen, dog kun mellem modeller på samme flyvelinje.

SCI-inversionskonceptet er beskrevet i detalje i /17/ og /19/. De anvendte indstillinger for SCI mangelags- og fålagstolkningen er vist i Figur 3.13 og Figur 3.14.



Figur 3.12: Eksempel på opsætning af SCI-båndene. De røde prikker er modelpositionerne. De sorte linjer viser båndene. Linjeafstanden i eksemplet er 160 m, og zoomområdet udgør cirka 1,2 x 0,85 km.

3.3.4 Estimering af kortlægningsdybden - DOI

Der er foretaget en estimering af kortlægningsdybden - Depth of Investigation (DOI) /18/. Estimeringen bygger på en beregning af sensitiviteten i de enkelte lag for den konkrete model/opsætning. I beregningen inddrages således: Modstandsmodellen, datausikkerheder og målekonfigurationen.

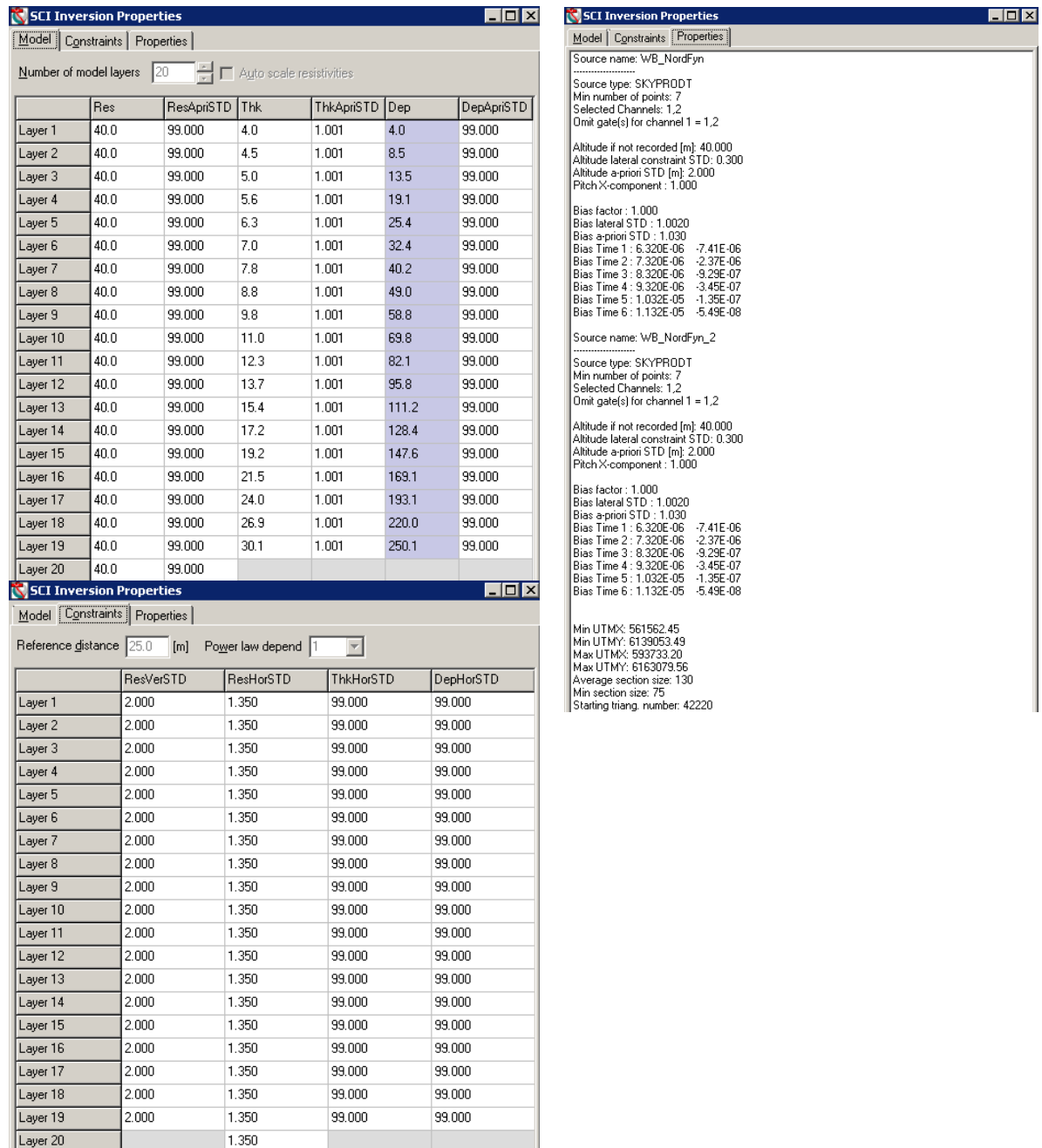
Sensitiviteten er langsomt aftagende med dybden for en TEM-sondering, så det er ikke muligt at angive en skarp grænse, hvor alt over grænsen er godt bestemt og alt under er ubestemt. I stedet benyttes to værdier til at beskrive kortlægningsdybden; DOI øvre og DOI nedre. Som en retningslinje er lagene over DOI øvre velfunderet i data. Lag/modstande mellem DOI øvre og DOI nedre er mindre stærke i data. Under DOI nedre er lagene meget svage i data, og man bør være varsom med at tolke på denne del af modellen. Det er dog vigtigt at notere sig, at beregningen foretages på den enkelte model, hvilket betyder, at den information der kommer fra de laterale bånd i SCI-opsætningen og a priori information ikke er inddraget i DOI-beregningen. Der er derfor tilfælde, hvor information under DOI nedre er relevant at medtage i den videre geologiske tolkning. Hvis højmoment data f.eks. er kasseret i et mindre område, vil DOI'en for disse modeller gå opad, men lagene i modelsektionen vil være realistisk kontinuerte pga. information fra tilstødende modeller overført via de laterale bånd.

På figurer og kort, er det kun nedre DOI, som er vist, men begge fremgår af den digitale aflevering.

3.3.5 GeoScene3D

I forbindelse med opgavens løsning har NST Odense opstillet et GeoScene3D projekt for at samle baggrundsdata (boringer, ældre surveys m.v.). GS3D projektet har primært været anvendt i tolkningsarbejdet til visualisering af de første inversionresultater (screendumps m.v.). I tilknytning hertil, er Workbenchens mange muligheder også bragt i anvendelse.

Herudover er de endelige resultater (modeller) indarbejdet i GS3D, herunder visualisering af logbogen, der er udarbejdet i forbindelse med processeringen og tolkningen.



Figur 3.13: Indstillinger for SCI mangelagstolkningen.

The image shows two overlapping windows of the 'SCI Inversion Properties' dialog box. The top window displays the 'Model' tab with a table of model layers and the 'Properties' tab with various inversion parameters. The bottom window shows the 'Properties' tab with a table of reference standards and a list of bias factors.

Model Properties (Top Window):

Number of model layers: 5 Auto scale resistivities

	Res	ResApriSTD	Thk	ThkApriSTD	Dep	DepApriSTD
Layer 1	50.0	99.000	15.0	99.000	15.0	99.000
Layer 2	50.0	99.000	25.0	99.000	40.0	99.000
Layer 3	50.0	99.000	40.0	99.000	80.0	99.000
Layer 4	50.0	99.000	50.0	99.000	130.0	99.000
Layer 5	40.0	99.000				

Reference Standards (Bottom Window):

Reference distance: 25 [m] Power law depend: 1

	ResVerSTD	ResHorSTD	ThkHorSTD	DepHorSTD
Layer 1	99.000	1.350	99.000	1.800
Layer 2	99.000	1.350	99.000	1.300
Layer 3	99.000	1.350	99.000	1.150
Layer 4	99.000	1.350	99.000	1.100
Layer 5		1.350		

Inversion Properties (Bottom Window):

Source name: WB_NordFyn
 Source type: SKYPRODT
 Min number of points: 7
 Selected Channels: 1,2
 Omit gate(s) for channel 1 = 1,2
 Altitude if not recorded [m]: 40.000
 Altitude lateral constraint STD: 0.300
 Altitude a-priori STD [m]: 2.000
 Pitch X-component: 1.000

Bias factor: 1.000
 Bias lateral STD: 1.0020
 Bias a-priori STD: 1.030
 Bias Time 1: 6.320E-06 -7.41E-06
 Bias Time 2: 7.320E-06 -2.37E-06
 Bias Time 3: 8.320E-06 -9.29E-07
 Bias Time 4: 9.320E-06 -3.45E-07
 Bias Time 5: 1.032E-05 -1.35E-07
 Bias Time 6: 1.132E-05 -5.49E-08

Source name: WB_NordFyn_2
 Source type: SKYPRODT
 Min number of points: 7
 Selected Channels: 1,2
 Omit gate(s) for channel 1 = 1,2
 Altitude if not recorded [m]: 40.000
 Altitude lateral constraint STD: 0.300
 Altitude a-priori STD [m]: 2.000
 Pitch X-component: 1.000

Bias factor: 1.000
 Bias lateral STD: 1.0020
 Bias a-priori STD: 1.030
 Bias Time 1: 6.320E-06 -7.41E-06
 Bias Time 2: 7.320E-06 -2.37E-06
 Bias Time 3: 8.320E-06 -9.29E-07
 Bias Time 4: 9.320E-06 -3.45E-07
 Bias Time 5: 1.032E-05 -1.35E-07
 Bias Time 6: 1.132E-05 -5.49E-08

Min UTMX: 561562.45
 Min UTM Y: 6139053.49
 Max UTMX: 593733.20
 Max UTM Y: 6163079.56
 Average section size: 250
 Min section size: 170
 Starting triang. number: 29226

Figur 3.14: Indstillinger for SCI fålagstolkningen.

4 RESULTATER

Resultaterne fra kortlægningen præsenteres ved en række temakort og profilsektioner mv. (bilag 4.1.1 – 4.5.2). I det afrapporterende Aarhus Workbench Workspace (se oversigt i afsnit 4.9), findes yderligere temakort, som ikke vises direkte i rapporten. SCI noderne med den endelige mangelags- og fålagstolkning indberettes til den nationale GERDA-database. Alle de indrapporterede tolkninger er lavet som SCI-tolkninger med coil correction. Linje-repetitionstesten (afsnit 4.6) er udført som LCI-tolkninger, og disse resultater indrapporteres ikke til GERDA.

4.1 Lokalisering, QC-kort

Nedenstående temakort er inkluderet i bilag 4.1

4.1.1 Lokalisering af flyvelinjer og modeller

Dette kort viser flyvelinjerne overlagt med modelpositioner. Når der ikke er vist en model, er data kasseret det pågældende sted. Det vil typisk være på grund af koblinger og ved linjevendinger. Som det fremgår af kortet, er det primært langs større veje og højspændingsledninger, at data er kasseret. Endvidere ses der koblinger fra hegn ved marker og skove.

4.1.2 Momentindikator

Dette kort viser, hvilke momenter der er til stede for hver enkelt model. Begge momenter er generelt til stede for hele kortlægningen. I nogle tilfælde er der koblinger, som kun har påvirket det ene moment. I disse tilfælde er det andet moment bevaret, hvilket ses som en rød eller blå prik på kortet. Sydøst for Bogense er der et markant eksempel, hvor det høje moment er kasseret over 6 flyvelinjer.

Koblinger er ofte bredere til de sene tider. Derfor kan det ofte være muligt at bevare en eller flere modeller mere af de super lave moment nær koblinger. Modsat ses der også nogle steder, hvor der kun er det høje moment tilbage. Dette sker typisk i nærheden af skove, hvor flyvehøjden øges væsentligt, hvilket reducerer signalniveauet og i nogle tilfælde bevirker, at det lave moment må kasseres. Endelig bevirker momentsamlingen at, den sidste model før et hul i data ofte kun indeholder et moment.

4.1.3 Flyvehøjde

Dette kort viser den målte flyvehøjde fra laserne. På kortet ses tydeligt, hvordan flyvehøjden som forventet er højere over og nær skovområderne, højspændingsledninger mv. For den kystnære af de to flyvelinjer over vand er der kun meget få brugbare højdemålinger. Den viste flyvehøjde på kortet angiver i dette tilfælde blot startsflyvehøjden i inversionsforløbet.

4.1.4 Datatilpasning

Dette kort viser datatilpasningen (data residual/data fit) for de enkelte modeller af mangelagsmodel inversionen. Det tilsvarende kort for fålagsmodellen kan findes i Aarhus Workbench Workspacet. Datatilpasningen er normaliseret med data standardafvigelsen således, at en datatilpasning mindre end en svarer til, at modellen i snit er tilpasset de målte data indenfor standardafvigelsen. Generelt er datatilpasningen lav og under en.

4.1.5 Kortlægningsdybde (DOI)

Dette kort viser DOI nedre for de enkelte modeller af mangelagsmodel inversionen. DOI nedre varierer en del over kortlægningsområdet hovedsageligt på grund af geologien. Der er en tydelig struktur fra Brenderup i vest retning østnordøst gennem kortlægningsområdet med en DOI nedre på omkring 240–280 m. I den sydøstligste del af kortlægningsområdet omkring Næsbyhoved-Broby, når DOI nedre ned til omkring 120–160 m. Generelt ligger DOI nedre for det meste af kortlægningen omkring 180–220 m. Det bemærkes også, at DOI nedre som forventet er meget begrænset over vandet, hvor den ligger mellem 60–100 m dybde. Endelig bemærkes det, at kortlægningsdybden ofte er tydeligt lavere for modellerne umiddelbart i nærheden af de steder, hvor der er kasseret data. Det vil typisk være fordi, at den del af sonderingen er kasseret.

Kortet er også lavet i en variant, hvor kortlægningsdybden vises i koter. Denne variant er lettere at relatere til middelmodstandskortene, som overvejende er i koteintervaller. Bemærk den store korrelation mellem DOI nedre kortet og kortet med koten til den gode leder.

4.2 Koten til god leder

Der er lavet en udsøgning af koten til god leder på baggrund af fålagstolkningen med en afskæringsmodstand på 15 ohmm. Temakortet er inkluderet i bilag 4.2. Resultatet af udsøgningen er griddet med Kriging metoden /20/ for at opnå et fladedækkende kort. Der er benyttet en cellestørrelse på 50 m og en søgeradius på 350 m. Griddet er efterfølgende interpoleret ned til en cellestørrelse på 25 m.

Koten for den gode leder viser generelt toppen af det palæogene ler, men stedvist viser det dybtliggende saltvand i kalken de steder, hvor det palæogene ler er bortoderet. Det VSV-ØNØ-lige strøg med en dybtliggende god leder er der, hvor den brede begravede dal er placeret, og dér, hvor den gode leder udgøres af salt porevand i kalken. Det betyder, at den gode leder nogle steder springer dramatisk i kote. Når den gode leder skifter fra top palæogen og til top salt porevand, så er der tale om store kotemæssige ændringer. Som det kan ses af kortet, så sker dette specielt i og omkring det brede dalstrøg, hvor det kan være skiftevis den ene eller den anden overflade, der udsøges.

Stedvist kan smeltevandsler i den kvartære lagserie trække den gode leder opad og lokalt vise en meget højtliggende god leder.

4.3 Log-bog for processeringen

I forbindelse med såvel processering som tolkning, er der udfyldt en log-bog for at dokumentere antagelser og tiltag, som et led i den generelle kvalitetssikring af arbejdet. Ydermere er der på baggrund af log-bogen udarbejdet et GIS tema, som viser de målinger/områder, hvor data og tolkninger er vurderet som værende usikre, f.eks. som følge af koblinger. GIS temaet afrapporteres separat som en del af GS3d projektet. Kommentarer til tolkning/processering fremgår af de bagvedliggende tabeller til GIS temaet.

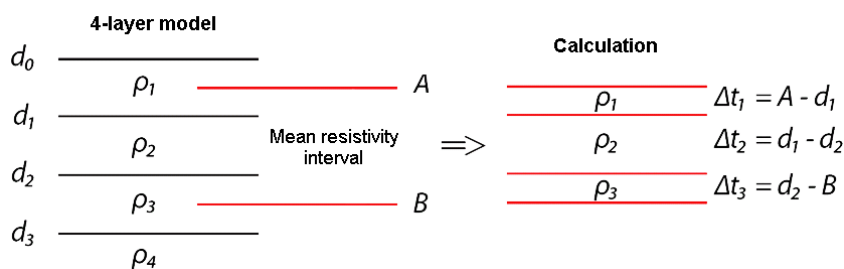
4.4 Middelmotstandskort

Inversionsresultatet består af et stort antal 1D-modeller beskrevet ved lagtykkelser og resistiviteter. For at opnå en visualisering af modstandsforholdene i kortlægningsområdet foretages en beregning af middelmotstanden i koteintervaller. Efterfølgende griddes de beregnede middelmotstande ud i fladen.

4.4.1 Beregning af middelmotstand

Figur 4.1 viser, hvordan en model opstykes til beregning af middelmotstanden i koteintervallet [A;B]. d_0 er jordoverfladen, d_1 , d_2 og d_3 er dybderne til laggrænserne i modellen, ρ_{1-4} er lagmodstande. Deltykkelserne Δt_{1-3} fremkommer ved opdeling af modellen, som vist på skitsen. I dette tilfælde beregnes middelmotstanden (ρ_{vertikal}) i intervallet AB på følgende måde:

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



Figur 4.1: Skitse af hvorledes lagmodstandene indgår i beregningen af middelmotstand i koteintervallet [A;B].

Generelt beregnes middelmotstanden i et koteinterval efter følgende formel,

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

hvor "i" løber fra 1 til antallet af deltykkelser (n), der opstår ved deling af modellen i koteintervallet. Middelmodstanden (ρ_{vertikal}), der beregnes ved ovenstående formel, betegnes som den vertikale middelmodstand - svarende til den samlede modstand man får, hvis strømmen løber vertikalt gennem intervallet. Ved kortlægninger med TEM-metoden, løber der kun strømme i horisontale planer i jorden. Derfor beregnes middelmodstanden svarende til, at strømmen har løbet horisontalt i intervallet. Denne modstand betegnes som horisontal middelmodstand ($\rho_{\text{horisontal}}$) og er den reciprokke af middelledningsevnen (σ_{middel}).

Den horisontale middelmodstand beregnes på følgende vis:

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

Der er normalt ikke store forskelle på middelmodstandskort beregnet på de to måder. Den horisontale middelmodstand vægter dog de lave modstande mere end den vertikale middelmodstand, præcis som TEM-metoden gør det. For DC metoder beregnes normalt den vertikale middelmodstand.

4.4.2 Introduktion til fladekort

Til denne kortlægning er middelmodstandskortene beregnet på baggrund af inversionsresultatet med mangelagsmodellen. De tilsvarende kort for fålagsmodellen findes i Workspacet.

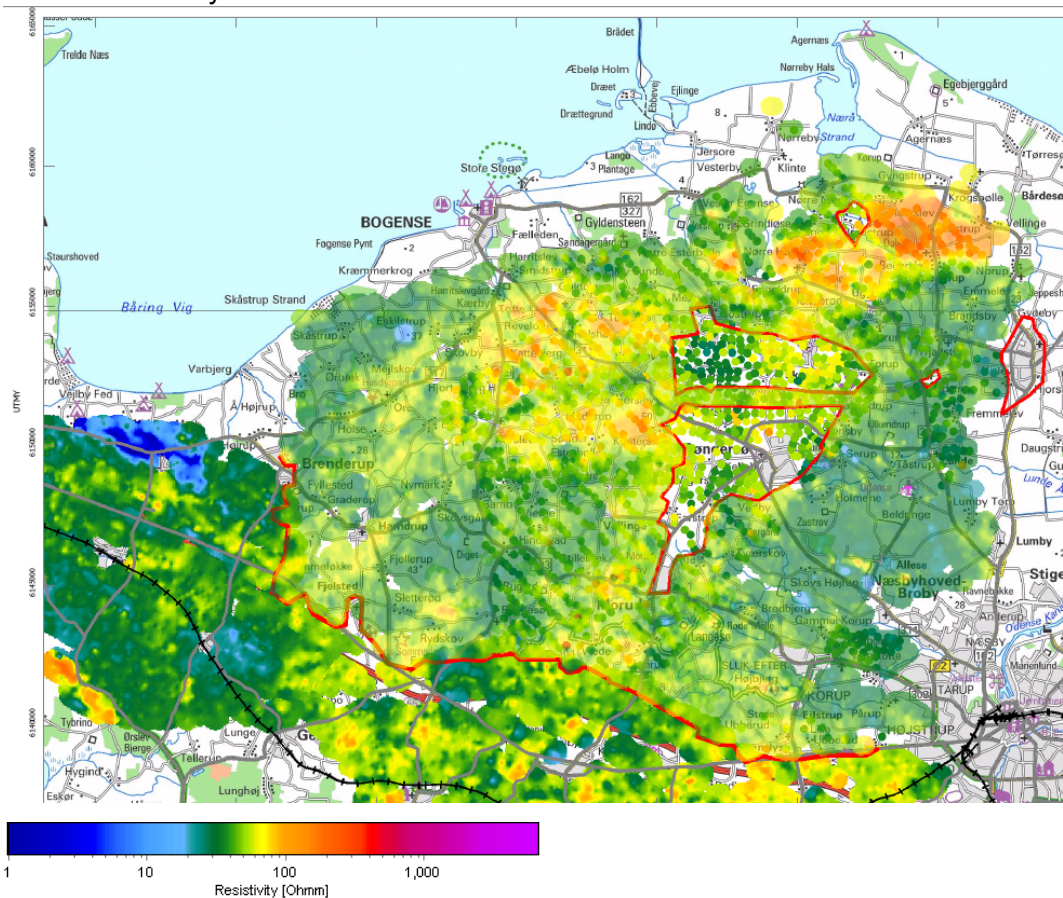
Der er lavet temakort med middelmodstanden i:

- 10 m koteintervaller fra kote 80 m og ned til kote -200 m.
- 5 m dybdeintervaller fra 0-10 m
- 10 m dybdeintervaller fra 10 m og til 30 m dybde.

Middelmodstanden er beregnet som den horisontale middelmodstand, og modellerne er afblændet under DOI nedre værdien før gridningen. De beregnede middelmodstande er griddet med Kriging metoden /20/ for at opnå fladedækkende kort. Der er i gridningen benyttet en cellestørrelse på 50 m og en søgeradius på 350 m. Griddene er efterfølgende interpoleret ned til en cellestørrelse på 25 m.

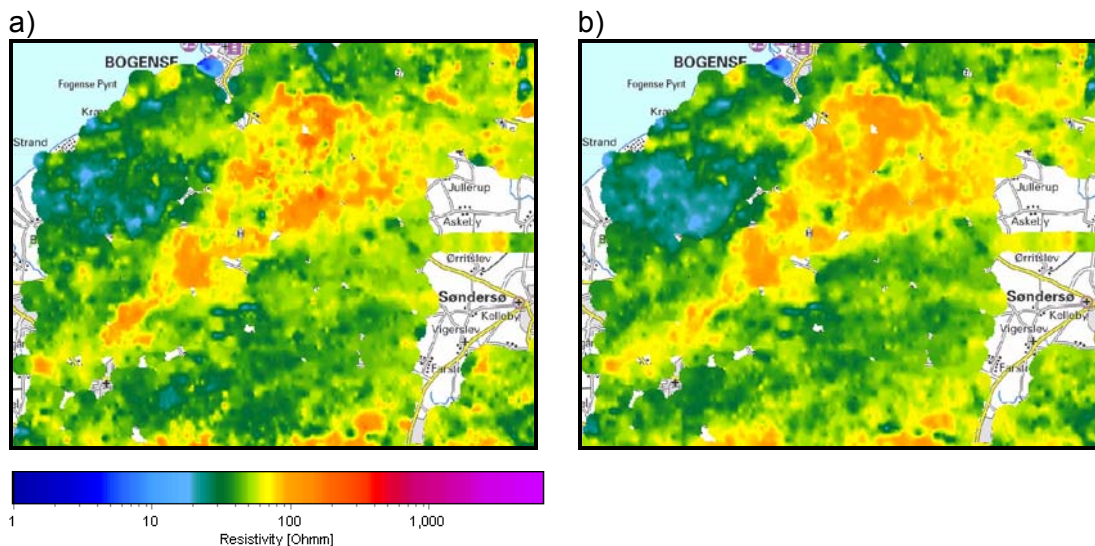
Middelmodstandskortene i bilag 4.4.2 indeholder udover det nye inversionsresultat også to ældre tilstødende SkyTEM kortlægninger (Nr. Åby og Odense Vest), som grids og de ældre, jordbaserede TEM sonderinger som punkttemaer. Hvor der er overlap, er de nye kortlægninger lagt øverst. Endelig er grænsen for den nye og de gamle SkyTEM kortlægninger markeret med en rød streg (se Figur 4.2).

De jordbaserede TEM sonderinger er blevet gennemgået med hensyn til datatilpasning, og der er på denne baggrund ikke fundet uregelmæssigheder. Antallet af lag i tolkningsmodellen for de jordbaserede TEM sonderinger er ikke evalueret. Der er ikke foretaget en afblænding af de jordbaserede TEM sonderinger. Inversionsresultater for de to ældre SkyTEM kortlægninger består af allerede eksisterende griddede temaer fra en mangelagstolkning leveret af Naturstyrelsen Odense. Middelmodstandskortene fra Nr. Åby kortlægningen ser ikke ud til at være afblændet i dybden, men er kun tilgængelig ned til kote -150 m. For Odense Vest kortlægningen synes griddene at være afblændet i dybden efter et ikke kendt kriterium.



Figur 4.2: Fladekort med middelmodstand

Som nævnt er middelmodstandskortene for denne kortlægning beregnet på baggrund af inversionsresultatet af mangelagsmodellen. De tilsvarende kort for fålagsmodellen findes i Aarhus Workbench Workspacet. Et eksempel på forskellen på de to sæt kort er vist i Figur 4.3. Der ses det samme overordnede modstandsbillede, men værdierne er generelt mere "ekstreme" på kortet baseret på fålagsmodellen. Det stemmer overens med forventning, belyst med Figur 3.8 i afsnit 3.3.1 om 1D-Tolkningsmodeller. Mangelagsmodellen resulterer i en blød vertikal model ifht. fålagsmodellen, der har skarpe laggrænser, hvilket også afspejles i middelmodstandskortene i fladen.



Figur 4.3: Sammenligning af middelmodstandskort baseret på inversion af fålags- og manglagmodel i kote 0 til -10 m. Udsnittet er 18 x 14 km a) Fålagstolkning. b) Manglagstolkning.

4.4.3 Beskrivelse af middelmodstandskort (i koteintervaller)

I det følgende gennemgås middelmodstandsbilledet i de forskellige intervaller af den kortlagte lagserie. Middelmodstandskortene findes i bilag 4.4.2. Gennemgangen sker med fokus på variationerne i middelmodstanden, set i forhold til den geologiske ramme, som beskrevet i kapitel 2.

Intervallet dybere end kote -150 m:

I de dybeste niveauer ses ikke regelmæssige mønstre, der med sikkerhed kan relateres til geologiske strukturer. Den elektriske modstand er lav; typisk mindre end 10-15 ohmm og flere steder under 4 ohmm. Variationerne i den elektriske modstand skyldes sandsynligvis en kombination af variationer i geologien (selandien ler og kalk) og tilstedeværelse af salt porevand. Stedvise områder med højere modstande forløber i et VSV-ØNØ strøg gennem kortlægningsområdet, og vurderes at afspejle forekomster af fersk porevand i kalken. Dette strøg svarer til beliggenheden af et bredt, sammensat, begravet dalsystem, som findes højere oppe i lagserien. Helt mod syd ses ligeledes pletvise høje modstande, som også ligger under begravede dalstrøg. De ældre TEM-kortlægningers data indenfor Nordfyn-området, har et plettet modstandsbillede og stort set ingen modstandsvariationer dybere end kote -150 m. Det vurderes, at intervallet ligger under kortlægningsdybden for TEM-40 metoden. Den ældre SkyTEM-kortlægning syd for det aktuelle kortlægningsområde viser et plettet udseende, og en VNV-ØSØ orientering parallelt med flyvelinierne. Dette skyldes sandsynligvis, at data er tolket med LCI og ikke SCI, som Nordfyn-data er. Dog vurderes højmodstandsområderne at afspejle områder med fersk porevand i kalken.

Intervallet kote -150 til -120 m:

I dette interval haves stadig lave modstande i størstedelen af kortlægningsområdet, svarende til palæogent ler og kalk med salt porevand, men højmodstandsstrøget ned gennem området bliver tydeligere og mere sammenhængende. De sydlige højmodstandsområder bliver også tydeligere, men danner dog ikke sammenhængende strøg. I kortlægningerne syd for ses stadig en vis stribning langs med flyvelinierne.

Intervallet kote -120 til -30 m:

I intervallets nederste del bliver det VSV-ØNØ orienterede strøg af høje modstande sammenhængende og stadigt bredere. Dette bånd er i overensstemmelse med det brede, begravede dalstrøg, som tidligere er kortlagt centralt i området (se Figur 2.4). De høje modstande i den brede dalstruktur repræsenterer enten dalfyld med fersk porevand eller fersk porevand i kalken lige under dalstrukturene. Dalstrøget klinger ud mod VSV udenfor Nordfyn-kortlægningsområdet, mens det i den ØNØ-lige ende splittes op i minimum tre smalle, retlinede dalstrøg.

Fra kote -100 m og opefter træder der endnu et sammensat dalstrøg frem nord for det brede, centrale strøg. Dette strøg er Ø-V orienteret i den østlige del og drejer mod SV ved Bogense og synes at konvergere med den brede dal ved kortlægningsområdets vestlige kant.

Højmodstandsområderne ved kortlægningsområdets sydlige grænse forsvinder ca. ved kote -80 m og overlejres af lag med lave elektriske modstande. Lige syd for kortlægningsområdet – i den ældre SkyTEM-kortlægning – ses mere eller mindre sammenhængende højmodstandsstrøg i hele intervallet.

Opefter i intervallet bliver de to overordnede dalstrøg bredere og bredere for til sidst at smelte sammen til et samlet højmodstandsområde. De to brede dalstrøg synes flere steder at være opbygget af tætliggende smallere dalstrøg. Smalle, retlinede dale ses også at gå på tværs af de to brede dalstrøg.

Generelt udgør de lave modstande palæogent ler og kalk med salt porevand, mens de høje modstande udgøres af dalfyld af kvartære aflejringer eller – i de dybeste dele af intervallet – kalk med fersk porevand. Som det f.eks. er gennemgået i bilag 2.1 og 4.9.3, består dalfyldet af vekslende lerede og sandede kvartære aflejringer.

Intervallet kote -30 til +80 m:

I dette interval ses de to brede dalstrøg ikke længere tydeligt. I stedet ses et varieret billede af vekslende høje og lave modstande i hele området – og enkelte steder smalle højmodstandsstrøg, der kan tolkes som begravede dale. Mod nordøst ses der i intervallet kote 0 til -20 m større områder med høje modstande – skarpt afgrænset til omkringliggende lag med lavere modstande (omkring og nord for Otterup). Fra kote -10 og op til +20 m ses større sammenhængende højmodstandslag nord for Sønder sø. Denne lagserie udgøres overvejende af kvartært ler og sand indenfor hele det kortlagte område.

I intervallet -20 til -10 m ses der mod vest og nord lave modstande, som jf. boredata repræsenterer smeltevandsler, mens der i samme interval mod øst/sydøst er tale om mindre områder med palæogent ler.

Mod nordøst ses lave modstande i NV-SØ og Ø-V mønstre helt øverst i lagserien. Der er tale om tynde lag af postglaciale havaflejringer og postglaciale ferskvandsaflejringer i topografiske lavninger. Der er god overensstemmelse mellem SkyTEM og topografi/jordartskort. Der ses tynde "afstikkere" ind i højlandet mod sydvest.

Sammenfatning

- Overordnet ses de strukturer og den opbygning af lagserien, som var forventet inden tolkningsarbejdet – f.eks. begravede dale, top palæogent ler, kalk i dybden, salt/fersk porevand i kalken samt en god kontrast til den kvartære lagserie.
- Der ses generelt et "pletet" billede i middelmodstandskortene, som umiddelbart vurderes at skyldes en kombination af lithologiske variationer, dataafstand og den anvendte farveskala.
- De begravede dale fremstår som højmodstandsstrukturer, hvilket umiddelbart peger på sanddominerede lagserier. Men logs fra borer i dalene viser, at dalfyldets karakter er meget varierende (bilag 2.1).
- Der ses vekslende områder med lave og høje modstande i de øverste metre af lagserien. Sammenlignes med jordartskortet, er der mange steder en fin sammenhæng mellem områder med lav modstand og områder med f.eks. marine sedimenter, postglaciale sedimenter eller smeltevandsler. Disse lave modstande afspejler derfor ofte reel geologi, hvilket også er tilfældet i de øverste meter i områder med moræneler.

4.5 Profilsektion

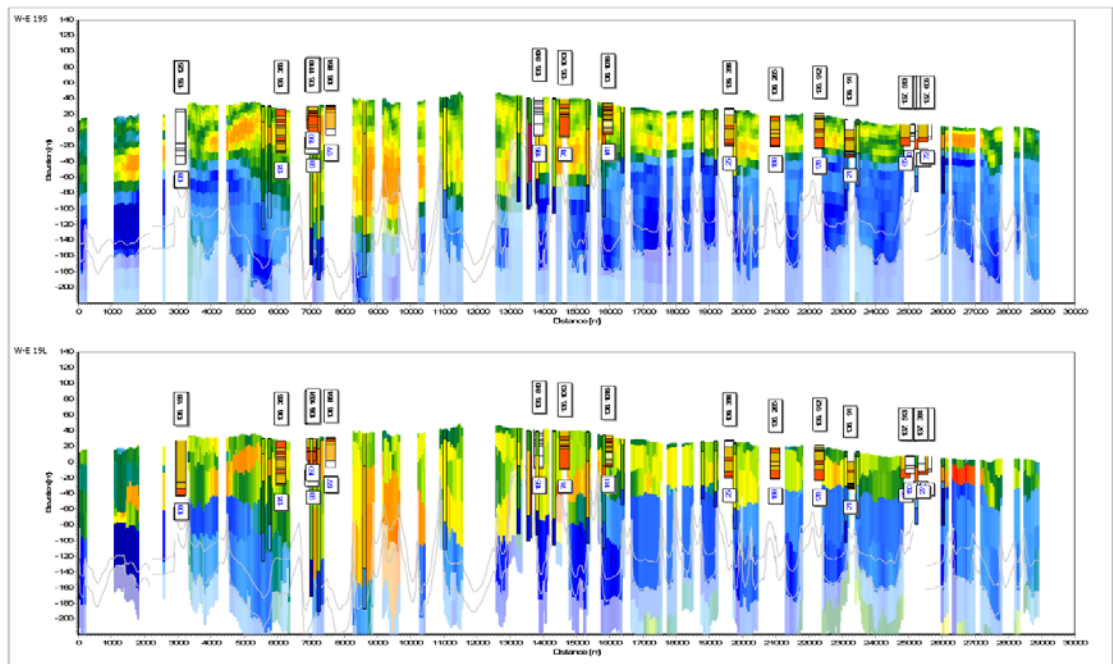
Der er udlagt et stort antal profilsektioner i kortlægningsområdet. Profilsektionerne på langs og på tværs af flyvelinjerne er konstrueret på hver deres måde. Lokaliseringen af profilerne er vist i bilag 4.5.1 og 4.5.2.

4.5.1 Profiler langs flyvelinjerne

Der er udlagt profilsektioner fra vest til øst ca. langs hver tredje flyvelinje. Disse sektioner indeholder:

- 1D-modelstave for henholdsvis mangelags- og fålagsmodel inversionsresultatet (på hver deres sektion). Farverne under DOI nedre er gjort lysere.
- Grå linjer der viser DOI øvre og DOI nedre griddet fra modeller indenfor 350 m.
- Desuden vises 1D-modelstave med sorte kanter for Jordbaserede TEM indenfor 200 m fra profilet.
- Endelig vises borer med DGU nr. i toppen og afstanden til profilet i bunden, hvis boringen er indenfor 200 m fra profilet.

Et eksempel på profilsektionerne er vist i Figur 4.4. Profilsektionerne findes i bilag 4.5.1.



Figur 4.4: Eksempel på profilsektioner langs flyvelinjerne med 1D-modelstave, DOI nedre og øvre grænse og boringer med DGU-nummer og projektionsafstand.

Den væsentlige forskel mellem mange- og få-lagsmodellerne er, at få-lagsmodellerne giver en god opløsning, hvor modstandskontrakterne er skarpe mellem lagene, f.eks. sand/fed ler, og geologien er enkel (3-5 lag).

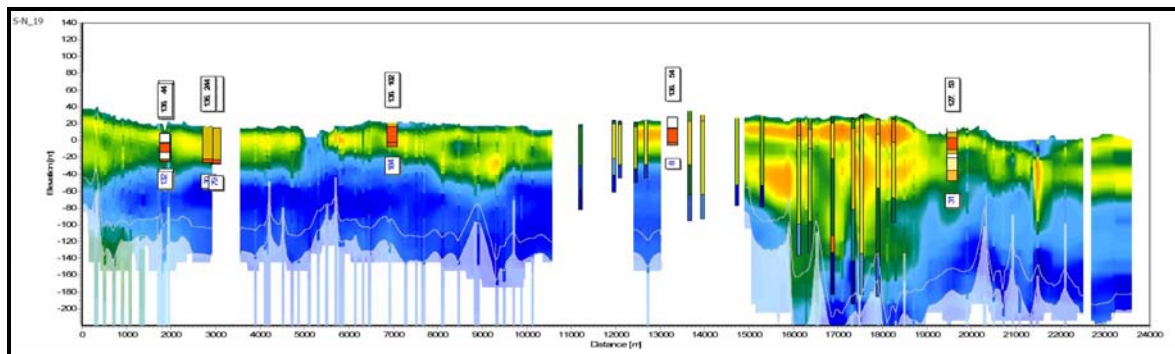
Mange-lagsmodellerne er karakteriseret ved, at lagtykkelserne er fastlåst i forbindelse med tolkningen. Mange-lagsmodellerne er gode til opløsning af komplekse strukturer, f.eks. i områder, hvor der ikke er skarpe laggrænser eller bløde modstandsovergange.

4.5.2 Profiler på tværs af flyvelinjerne

Der er desuden udlagt profilsektioner fra syd til nord på tværs af flyvelinjerne for hver km. Disse sektioner indeholder:

- 3D-modstandstandsgrid interpoleret fra de 2D-middelmodstandsgrids, der er lavet fra mangelagsmodel inversionsresultatet. Farverne under DOI nedre er gjort lysere.
- De grå linjer viser DOI øvre og DOI nedre griddet fra modeller indenfor 350 m.
- Desuden vises 1D-modelstave med sorte kanter for jordbaserede TEM indenfor 200 m fra profilet.
- Endelig vises boringer med DGU nr. i toppen og afstanden til profilet i bunden, hvis boringen er indenfor 200 m fra profilet.

Et eksempel på profilsektionerne er vist i Figur 4.5. Profilsektionerne findes i bilag 4.5.2.



Figur 4.5: Eksempel på profilsektion på tværs af flyvelinjerne. Se tekst for forklaring.

4.6 Linje-repetition – med forskellig flyvehastighed

Grundet for høj flyvehastighed er to linjer (505407 og 600102) genfløjet med normal hastighed (linjer 505403 og 600103).

Naturstyrelsen Odense ønskede at få de to linjer, der er fløjet med for høj hastighed, processeret og tolket med henblik på at belyse, hvordan hastigheden influerer på tolkningsresultatet og datakvaliteten. Det er i dette tilfælde gjort ved at foretage en processering med samme indstillinger, som for den normale processering af de to linjer med øget hastighed. Efterfølgende er linjerne fra begge dataset inverteret med en LCI-tolkning, for at have et ens sammenligningsgrundlag. De anvendte LCI indstillinger er sammenlignelige med de tidligere brugte SCI indstillinger for en mangelagsmodel inverteret med coil correction (afsnit 3.3.3).

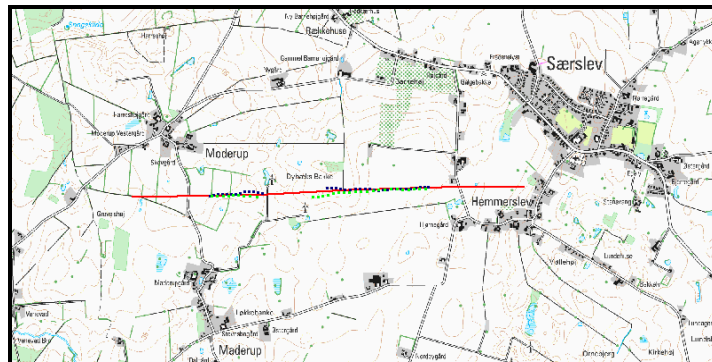
Data og inversionsresultater for de to linjer fløjet med for høj hastighed indberettes ikke til GERDA, men kan findes i en selvstændig database i Workspacet.

Placeringen af det første eksempel er vist i Figur 4.6a. Gennemsnitshastigheden for linje 505407 er ca. 15,5 m/s, mens hastigheden på linje 505403 er ca. 13 m/s (normal flyvehastighed). Den øgede hastighed bevirker en øget flyvehøjde, fra et gennemsnit på ca. 33 m for den normale flyvning, til ca. 49 m for flyvningen med øget hastighed.

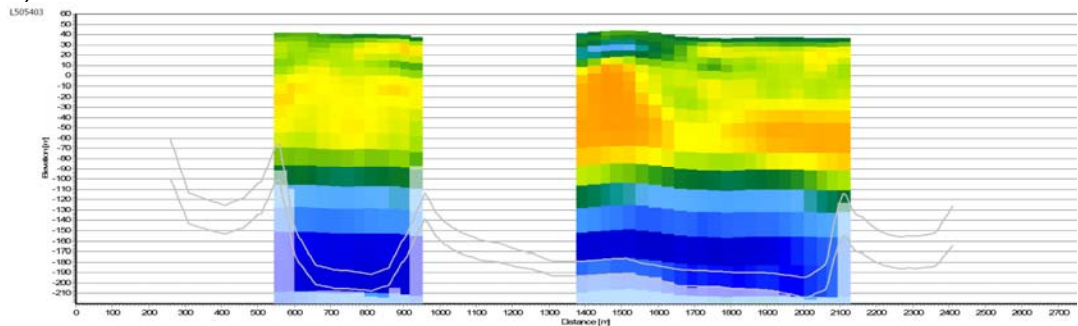
Inversionsresultaterne fra de to repetitioner er vist i Figur 4.6b-c. Lokaliseringen af sektionerne fremgår af Figur 4.6a. Der er koblinger langs store dele af profilet, og data er således kasseret ved de to veje og nær de to vindmøller.

Overordnet set er der god overensstemmelse mellem de to resultater. Den øgede flyvehastighed bevirker en øget flyvehøjde og derved et dårligere signal/støj-forhold for den hurtige flyvning. Herved mistes primært dybde information. Det er også i den dybere del af sektionen, at linjen med den normale flyvehastighed giver det mest troværdige resultat og en dybereliggende DOI øvre grænse. Endvidere er sonderingsafstanden/modelafstanden øget fra 33 m til 39 m pga. den øgede flyvehastighed.

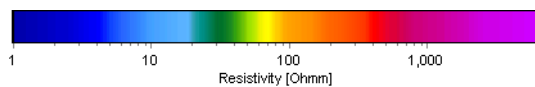
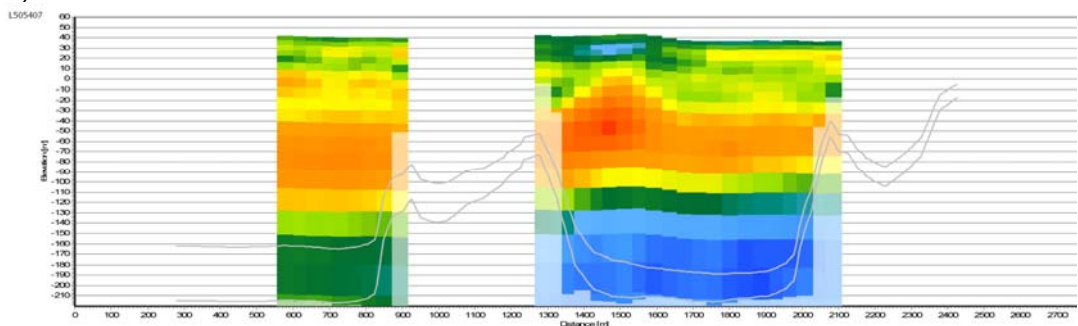
a)



b)

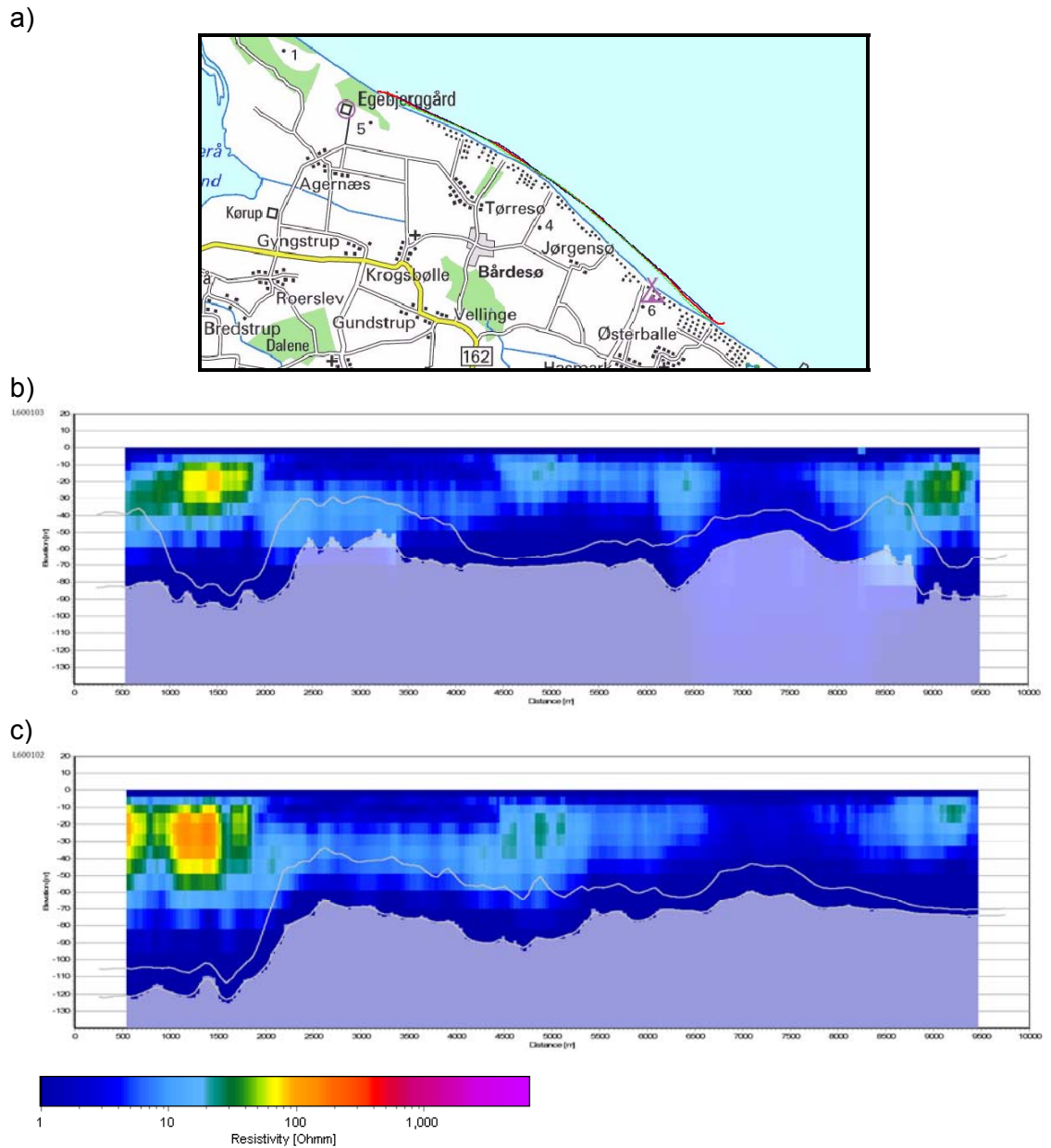


c)



Figur 4.6: Sammenligning af profil med forskellig flyvehastighed. a) Rød: profil lokaliserings. Mørk blå: model positioner for linjen med øget flyvehastighed, Grøn: model positioner for linjen med normal flyvehastighed. b) Modstandssektion ved normal flyvehastighed. c) Modstandssektion ved øget flyvehastighed. For begge sektioner angiver de to grå linjer DOI øvre og DOI nedre grænsen.

Lokalisering af det andet eksempel er vist i Figur 4.7a. Gennemsnitshastigheden for linje 600102 er ca. 16 m/s, mens hastigheden for linje 600103 er ca. 12 m/s (normal flyvehastighed). Linjerne er over vandet (se Figur 4.7), hvilket har givet en rimelig ens flyvehøjde på ca. 27 m for de to repetitioner. Da der er meget få laserrefleksioner fra havoverfladen (højdemålinger) for linjen fløjet med normal hastighed, er flyvehøjden for dette eksempel baseret på den inverterede flyvehøjde, som også er en god estimering af flyvehøjden.



Figur 4.7: Sammenligning af profil med forskellig flyvehastighed. a) Rød: profil lokalisering. Mørk blå: model positioner for linjen med øget flyvehastighed, Grøn: model positioner for linjen med normal flyvehastighed. b) Modstandssektion ved normal flyvehastighed. c) Modstandssektion ved øget flyvehastighed. For begge sektioner angiver de to grå linjer DOI øvre og DOI nedre grænsen.

Figur 4.7b-c viser inversionsresultaterne af de to repetitioner. Da der opnås fulde sonderingskurver for begge repetitioner som følge af det høje signalniveau over saltvandet, påvirker den øgede flyvehastighed ikke datakvaliteten væsentligt i dette tilfælde. Lokaliteten for sammenligning er generelt meget dårlig, da der er relative kraftige 3D-effekter ved kystlinjen. Således kan små variationer i målepositionerne have relativt stor indflydelse på inversionsresultatet.

En øget hastighed vil generelt resultere i en øget flyvehøjde, da piloten har en kortere reaktionstid til evt. forhindringer. En øget flyvehøjde bevirker et dårligere signal/støjforhold specielt til de sene tider på sonderingskurven. Med de anvendte proceseringsindstillinger bevirker en øget flyvehastighed også en øget sonderingsafstand. Effekten i inversionsresultaterne af en øget flyvehastighed for kortlægningen som helhed kan ikke udledes af de to eksempler.

4.7 Alternativ inversionsopsætning – eksempler

Forud for de udførte undersøgelser af teststedet, og de deraf affødte nye korrektionsfaktorer, er der i forbindelse med dette projekt gennemført en række alternative opsætninger og tolkninger, for at undersøge følsomheden af tolkningsresultaterne og for at undersøge, om der kunne afspejle sig en forklaring på den uforventede lavmodstandsfordeling i topplagene i området (fra de indledende tolkninger), hvor denne ikke kunne forklares geologisk.

Da arbejdet med alternativ inversionsopsætning har historisk karakter, er strategi og resultater beskrevet i bilag 4.7.1.

4.8 Undersøgelser af test-site

SkyTEM-kortlægningen på Nordfyn blev udført i 2010. De indledende geofysiske tolkninger af SkyTEM-dataene viste relative lave modstande i de øvre 0-10 m, som ikke umiddelbart stemte overens med det forventede modstandsniveau i den overfladenære geologi. Yderligere var der i nogle områder mindre god korrelation med eksisterende PACES resultater.

Grundet problemstillingen med for lave modstande i den øverste lagserie, blev GeoFysikSamarbejdet (GFS) på et tidligt tidspunkt i forløbet inddraget i projektet for at gennemgå data, processering og tolkninger for evt. u hensigtsmæssigheder og fejl. En grundig gennemgang af de leverede data fra SkyTEM ApS, samt de anvendte processerings- og tolkningsindstillinger viste ikke nogle uregelmæssigheder i databehandlingen eller inverisonsopsætningen. Der blev dog observeret en systematisk afvigelse mellem den målte og inverterede flyvehøjde, hvilket kan indikere uregelmæssigheder i data. SkyTEM ApS blev forelagt problemstillingen, og de konstaterede efterfølgende at der var anvendt et forkert sæt interne instrumentkalibreringsfaktorer for det anvendte instrument i Nordfyn kortlægningen. SkyTEM ApS rettede denne fejl og opdaterede geometrifilen til datasættet. Endvidere blev det besluttet at inddrage tidlige gates (fra ca. 8 μ s.) i inversionen ved brug af coil-respons inversionskonceptet.

Inversionsresultaterne med den opdaterede geometrifil resulterede kun mindre ændring af modstanden i toplaget og samme fordeling af høj og lav modstandsstruktur i overfladen. Til gengæld blev overensstemmelsen mellem den målte og den inverterede flyvehøjde normal og tilfredsstillende.

Problemstillingen med de lave modstande i de øverste 10 meter var dog stadig aktuell, og derfor gennemgik GFS i foråret og sommeren 2011 grundigt SkyTEM kortlægninger med samme problemstilling som Nordfyn kortlægningen. I sidste ende udmøntede det sig i en redefinering af de øverste 13 meter nationale TEM teststedsmodel. Redefineringen af teststedsmodellen bevirker, at SkyTEM dataene skal skubbes - 1.1 μ s jf. ref. /21/. De afrapporterede resultater er alle foretaget med kalibrering til den nye teststedsmodel.

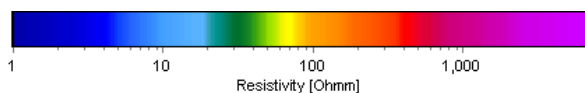
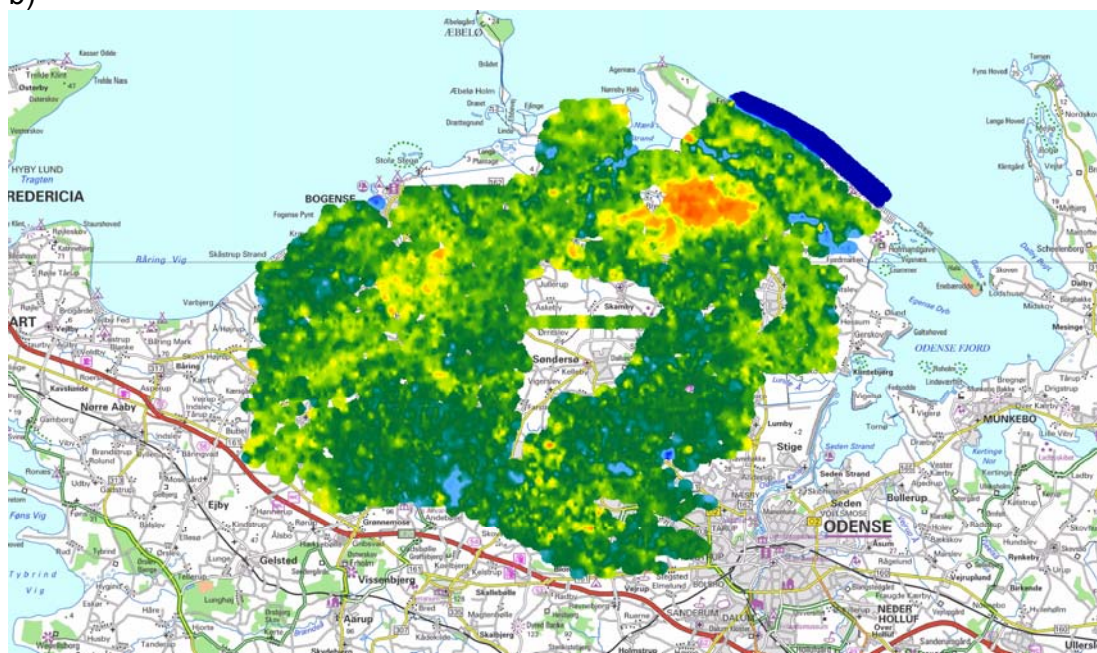
I det følgende vises enkelte eksempler på resultater før og efter kalibrering til ny teststedmodel (tidsforskubning på $-1.1 \mu\text{s}$). Figur 4.8 viser middelmodstandskort fra mangelagstolkningen i et dybdeinterval på 0-5 m fra før (plot a) og efter (plot b) kalibrering til ny teststedmodel (begge tolkninger med CR-inversion). Det ses tydeligt, at den nye tolkning (plot b) har en generel højere modstand i de øverste meter, hvilket stemmer overens med det forventede modstandsniveau i den overfladenære geologi i området og med den mindre PACES kortlægning i området. Samtidigt er det værd at bemærke, at kalibreringen til den nye teststedmodel ikke påvirker resultaterne af den dybereliggende geologi. De to middelmodstandskort for dybdeintervallet 50-60m (Figur 2.7) er stort set identisk for de to tolkninger.

I rapporten "Refinement of the TEM reference model at Lyngby, 2011" /21/ findes mere omfattende eksempler på, hvordan modstanden i toplagene ændrer sig som følge af kalibrering til ny teststedmodel. Typisk må man ved indførelse af tidsskiftet på $-1.1 \mu\text{s}$ forvente, at modstanden i de øverste 0-5m stiger, hvis modstanden er mindre end 10 ohmm. I det underliggende interval fra ca. 5 til ca. 15 m får man typisk få en reduktion i modstanden. For den dybere liggende del af modellen er ændringerne minimale.

a)

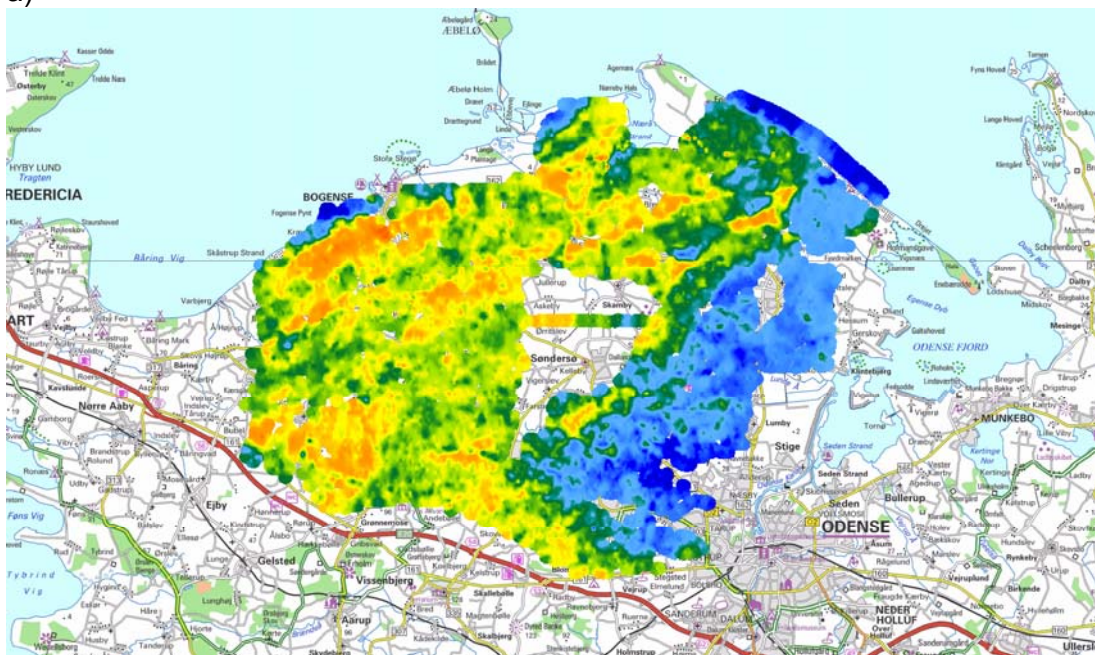


b)

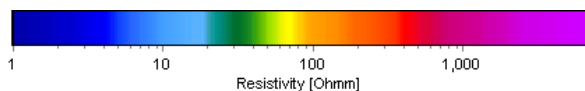
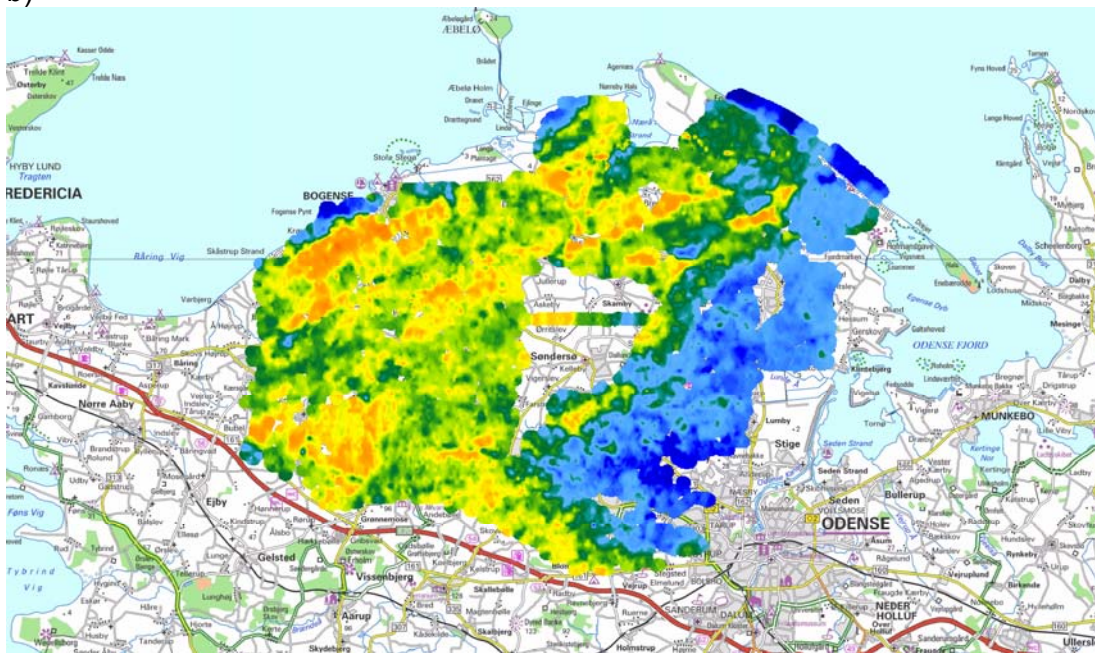


Figur 4.8: Middelmotstandskort i 0-5 m dybdeinterval på baggrund af mangelagsmodellen. a) Tolkning med CR-respons og gammel teststedskalibrering b) Tolkning med CR-respons og ny teststedskalibrering.

a)



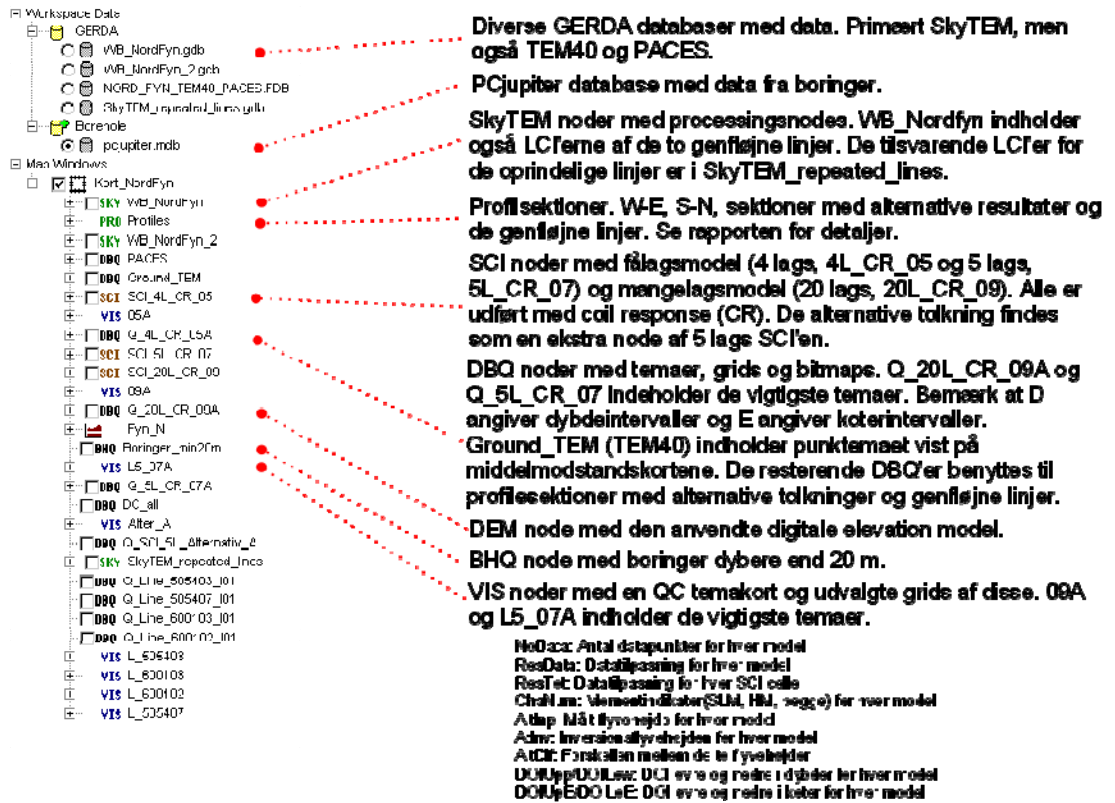
b)



Figur 4.9: Middelmotstandskort i 50-60 m dybdeinterval på baggrund af mangelagsmodellen. a) Tolkning med CR-respons og gammel teststedskalibrering. b) Tolkning med CR-respons og ny teststedskalibrering.

4.9 Oversigt over Aarhus Workbench Workspace

I det afrapporterede Aarhus Workbench Workspace findes alle inversioner, temakort og profilsektioner samt yderligere temakort, som ikke vises direkte i rapporten. En oversigt over Workspacet er vist i Figur 4.10.



Figur 4.10: Oversigt over Aarhus Workbench Workspacet

4.10 Kvalitetssikring

Gennem projektforsløbet har der fra start til slut været gennemført kvalitetssikring, såvel af rådata som af processering og tolkning i henhold til de foreskrevne retningslinjer fra Geofysiksamarbejdet. I tilgift hertil er retningslinjerne som aftalt på workshops'ene blevet fulgt.

4.10.1 Karakter og omfang af kvalitetssikringen

En del af kvalitetssikringen har udgangspunkt i det samarbejde, som NST Odense har formidlet mellem de rådgivende firmaer, der har forestået tolkning og processering. Man har her ved møder og test-processering aftalt rammerne for, hvorledes processeringen og tolkningen overordnet skulle varetages under hensyntagen til de områdetypiske forhold, der findes i de forskellige områder, som er processeret og tolket i samme periode. Dette har for alle parter været en givtig proces, der på grund af sin dynamiske karakter vanskeligt lader sig dokumentere i egentlige skemaer.

I forbindelse med processering og tolkning i nærværende projekt, er der udfyldt logbøger, som er vedlagt nærværende rapport som bilag 4.3, og som dele af den digitale afrapportering (GS3D).

Helt overordnet er projektkontrolplanen for projektet vedlagt som bilag 4.9.5. I den er de overordnede projektkontrolpunkter dokumenteret og kommenteret.

4.10.2 Geologiske vurderinger af SkyTEM-tolkninger

Undervejs i de geofysiske tolkninger af SkyTEM-data er der foretaget en geologisk vurdering af resultaterne med det formål at kunne pege på eventuelle problemstillinger eller fejl. Resultaterne af disse gennemgange er noteret i en række logbøger, som er vedlagt denne rapport:

- A) **Bilag 4.9.1:** Logbog - Geologisk vurdering af indledende SkyTEM-tolkning
- B) **Bilag 4.9.2:** Logbog - Gennemgang af 1. SkyTEM tolkning (mangelagsmodeller)
- C) **Bilag 4.9.3:** Logbog - Gennemgang af 2. SkyTEM tolkning (mangelagsmodeller) – Sammenligning af SkyTEM, lithologi og logs i udvalgte borer
- D) **Bilag 4.9.4:** Logbog - Gennemgang af 2. SkyTEM tolkning (mangelagsmodeller) - Middelmodstandskort

Disse logbøger har udgjort input til statusmøder undervejs og input til det videre tolkningsarbejde.

5 SAMMENFATNING

Der er udført processering og tolkning af ca. 2.100 km SkyTEM fra et område på den nordlige del af Fyn.

I forbindelse med processering og tolkning, har der være afholdt en række workshops mellem Naturstyrelsen Odense og de rådgivere, som har udført arbejdet. Formålet har været at få så ensartet tilgang til tolkningen og processeringen som muligt. Det har været en givtig proces, som givetvis vil kunne bidrage positivt til fremtidige projekter.

Den indledende processering og tolkning af data dannede grundlag for en revision af teststed modellen med nye geometrifiler til følge. Forud for dette, er der i nærværende projekt gennemført en række alternative tolkninger, for at undersøge problemstillingen med lavmodstandslag over større områder end forventet.

Den gældende tolkning er gennemført med coil response(CR) inversion og de nye geometri filer.

Generelt er data af god kvalitet, og arbejdet har givet et godt og entydigt resultat ud fra de indsamlede data, efter gennemførelse af CR inversion og nye geometri filer.

Resultaterne af tolkningen viser en fin overensstemmelse mellem de forventede geologiske forhold og de strukturer, som kan udledes af middelmodstandskortene. Følgende overordnede punkter kan fremhæves fra tolkningen:

- Overordnet ses de strukturer og den opbygning af lagserien, som var forventet inden tolkningsarbejdet – f.eks. begravede dale, top palæogent ler, kalk i dybden, salt/fersk porevand i kalken samt en god kontrast til den kvartære lagserie.
- Der ses generelt et "pletet" billede i middelmodstandskortene, som umiddelbart vurderes at skyldes en kombination af lithologiske variationer, dataafstand og den anvendte farveskala.
- De begravede dale fremstår som højmodstandsstrukturer, hvilket umiddelbart peger på sanddominerede lagserier. Men den omfattende gennemgang af logs fra borer i dalene viser, at dalfyldets karakter er meget varierende (bilag 2.1). Dette forhold bør få vægt i den efterfølgende opstilling af geologisk model for området.
- Der ses vekslende områder med lave og høje modstande i de øverste metre af lagserien. Sammenlignes med jordartskortet, er der mange steder en fin sammenhæng mellem områder med lav modstand og områder med f.eks. marine sedimenter, postglaciale sedimenter eller smeltevandsler. Disse lave modstande afspejler derfor ofte reel geologi, hvilket også er tilfældet i de øverste meter i områder med moræneler.

I forbindelse med nærværende projekt, er der endvidere gennemført en tolkning af to linjer, som er fløjet med forskellig hastighed. Forsøget viser, at en øget hastighed generelt resulterer i en øget flyvehøjde, da piloten har en kortere reaktionstid til evt. forhindringer. En øget flyvehøjde bevirker et dårligere signal/støj-forhold specielt til de sene tider på sonderingskurven. Med de anvendte processeringsindstillinger bevirker en øget flyvehastighed også en øget sonderingsafstand. Effekten i inversionsresultaterne af en øget flyvehastighed for kortlægningen som helhed kan ikke udledes af de to eksempler.

6 REFERENCER

- /1/ **Andrup, G. O. (1960)**/ Odense-egnens vandforsyning i relation til de geohydrologiske forhold i Fyn. Andelsbogtrykkeriet i Odense.
- /2/ **Binzer, K. & Stockmarr J. (1994)**/ Prækvartæroverfladens højdeforhold. DGU kortserie nr. 44. 1994.
- /3/ **Fyns amt (2006)**/ Opdatering af prækvartærfladens dybdemæssige beliggenhed på Fyn, August 2006.
- /4/ **Jørgensen, F. & Sandersen, P. 2009**: Kortlægning af begravede dale i Danmark. Opdatering 2007-2009. GEUS Særudgivelse. ISBN 978-87-7871-259-2
- /5/ **Smed, P. (1977)**: Det fynske landskab. Geografforlaget.
- /6/ **Smed, P. (1979)**/ Landskabskort over Danmark, Sønderjylland og Fyn. Geografforlaget.
- /7/ **Ter-Borch (1991)**/ Kalkoverfladens struktur. DGU Kortserie nr. 7.
- /8/ **Vejbæk, O. V. og Britze, P. (1994)**/ Top pre-Zechstein, geological map of Denmark 1:750.000, DGU Kortserie, 45, 9 pp.
- /9/ **Wartertech (2004)**/ Geologisk model og konceptuel geologisk model for Nyborg indsatsområde. Delrapport 2. Udført for Fyns Amt.
- /10/ **Grontmij (2011)**/ Geologisk modellering i Odense Syd indsatsområde. Juli 2011. Udarbejdet for Naturstyrelsen Odense.
- /11/ **SkyTEM Survey Aps. 2010**/ SkyTEM kortlægning af: Nordfyn. Afrapportering af rådata.
- /12/ **GeoFysikSamarbejdet 2007**/ Guide to processing and inversion of SkyTEM data, www.gfs.au.dk
- /13/ **Munkholm, M. S. og Auken, E. 1996**/ Electromagnetic noise contamination on transient electromagnetic soundings in culturally disturbed environments. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, Vol. 1 Issue 2, 119-127.
- /14/ **em1dinv manual**, www.gfs.au.dk
- /15/ **Effersø, F., Auken, E. og Sørensen, K. 1999**/ Inversion of Band-limited TEM responses. Geophysical Prospecting, 47, 551-564.
- /16/ **GeofysikSamarbejdet 2007**/ Mangelagstolkning af TEM data - test og sammenligninger, www.gfs.au.dk
- /17/ **GFS 2008**/ Spatially Constrained Inversion of SkyTEM data, Concept and Examples, www.gfs.au.dk
- /18/ **Christiansen, A. V. og Auken, E. 2010**/ A Global Measure for Depth of Investigation, Proceedings of the EAGE-NS, Zurich.
- /19/ **Viezzoli, A., Christiansen, A. V., Auken, E., og Sørensen, K.I. 2008**/ Quasi-3D-modeling of airborne TEM data by Spatially Constrained Inversion: Geophysics, 73, F105-F113.
- /20/ **Pebesma, E. J. og Wesseling, C. G. 1998**/ Gstat: A Program for geo-statistical Modelling, Prediction and Simulation: Computers & Geo-sciences, 24, 17-31.
- /21/ **Geofysiksamarbejdet 2011**/ Refinement of the National TEM referencemodel at Lyngby.