

En vurdering af luftbårne elektromagnetiske frekvensdomænemeters anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark

Niels B. Christensen, Ingelise Møller, Thorkild M. Rasmussen
Kurt I. Sørensen og Rasmus J. Tølbøll



En vurdering af luftbårne elektromagnetiske frekvensdomænemeters anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark

Rapport finansieret af:
Fyns Amt, Frederiksborg Amt, Nordjyllands Amt,
Ribe Amt, Ringkjøbing Amt, Sønderjyllands Amt,
Storstrøms Amt, Vejle Amt, Vestsjællands Amt,
Viborg Amt og Århus Amt

Niels B. Christensen, Aarhus Universitet
Ingelise Møller, GEUS
Thorkild M. Rasmussen, GEUS
Kurt I. Sørensen, Aarhus Universitet
Rasmus J. Tølbøll, Aarhus Universitet

Indhold

Forord	8
Indledning	9
Kapitel 1 – Resume af undersøgelsens hovedresultater	14
Generelle overvejelser.....	14
Luftbårne elektromagnetiske systemer	15
Lidt historie.....	17
Karakteristika ved luftbårne systemer	18
Vertikal opløsning	18
Lateral opløsning	19
Støj og kalibreringsproblemer.....	23
Konklusion	24
Kapitel 2 – Elektromagnetiske frekvensdomænemetoder	25
Elektromagnetiske metoder.....	25
Frekvensdomæne- og tidsdomænemetoder	25
Elektromagnetisk sondering i frekvensdomænet	26
Måleteknik og virkemåde.....	27
Real- og imaginærdel, amplitude og fase.....	30
Felter for et homogent halvrum	32
Den tilsyneladende resistivitet.....	33
Datapræsentation og approksimative tolkninger.....	34
Kapitel 3 – Kobling til menneskeskabte installationer	37
Kobling for TEM metoden og HEM metoden	37
Mekanisme.....	38
Erkendelse af koblinger	40
Korrektionsmuligheder.....	41
Sikkerhedsafstande til elektrisk ledende installationer.....	42
Kapitel 4 – Beskrivelse af de valgte systemer	45
Generelt om elektromagnetiske og galvaniske systemer	45
Elektromagnetiske systemer	46
Galvaniske systemer	47
Valg af systemer	47
DIGHEM systemet.....	48
Sender	48
Modtager.....	49
Magnetisk system	49
Kalibrering.....	49

PROTEM 47 systemet.....	51
Sender	51
Modtager.....	51
Dataprocessering	51
Tidsvinduer, starttid, sluttid, centertid, bredde	52
Magnetisk system.....	55
Navigation.....	55
PACES systemet.....	56
MEP systemet.....	57
Kapitel 5 – Tolkning, analyse og følsomhed	58
Inversion af geofysiske data.....	58
En- og todimensionale modeller for jordens resistivetsforhold	59
Iterativ mindstekvadraters inversion.....	59
Analyse af usikkerheden på modelparametrene.....	60
1D mangelagsmodeller og 2D modeller - glatte modeller.....	61
Regnetid og tolkningsmuligheder for de fire metoder	61
Utilstrækkelighed og inkonsistens	63
Ækvivalenser	64
Højmodstandsækvivalens	64
Lavmodstandsækvivalens	64
Resistivetsækvivalens	64
Lagundertrykkelse	65
Credo	65
Støj	65
Omgivende støj og "geologisk støj".....	65
Støjmodeller for de fire systemer	66
MEP	66
PACES.....	67
HEM	67
TEM	70
Følsomhedsfunktioner.....	71
Følsomhedsfunktioner for de fire systemer.....	73
MEP og PACES.....	73
HEM	74
TEM	74
Kapitel 6 – Analyse af endimensionale modeller	80
Modelbeskrivelse.....	80
Udvælgelseskriterier.....	80
Beskrivelse af etlagsmodellerne (homogene halvrum).....	81
Beskrivelse af tolagsmodellerne.....	81
Beskrivelse af trelagsmodellerne	82
Modellernes geologiske relevans	82
Analyse af modellerne	83
Analyse	83

Præsentation af analyserne.....	84
Eksempler.....	85
Eksempel 1 - trelagsmodeller.....	85
DIGHEM ^{VRES}	85
MEP.....	87
PACES.....	87
PROTEM 47.....	87
Konklusion.....	87
Eksempel 2 - tolagsmodeller.....	88
DIGHEM ^{VRES}	88
MEP.....	88
PACES.....	88
PROTEM 47.....	88
Konklusion.....	89
Tolkninger af støjperterberede data.....	89
Effekten af fejl på højdebestemmelsen.....	93
Kapitel 7 – Analyse af todimensionale modeller	95
Todimensionale modeller.....	95
Beregning af todimensionale responser.....	95
Geologisk beskrivelse af modellerne.....	99
Smal Dal.....	99
Moræne.....	99
Kalk.....	99
Salt.....	100
Yoldia.....	100
1D og 2D tolkning af 2D responser.....	102
Få- og mangelagstolkninger af DIGHEM ^{VRES} og PROTEM 47 responser.....	102
Tolkning af PACES responser med lateralt sammenbundne 1D modeller.....	103
2D tolkning af MEP responser.....	103
Præsentation af tolkning og analyse.....	104
Mangelagstolkninger af Smal Dal.....	104
DIGHEM ^{VRES}	104
MEP.....	104
PACES.....	104
PROTEM 47.....	104
Fålagstolkninger af Smal Dal.....	106
DIGHEM ^{VRES}	106
MEP.....	106
PACES.....	108
PROTEM 47.....	108
Resultater for de øvrige modeller.....	108
Konklusion.....	108
Kapitel 8 – Analyse af HEM målinger fra Danmark	110
Tolkninger og analyser.....	110

Støj, filtreringer og datatilpasning.....	111
Målte højder af sender- og modtagerspøler over terræn	112
Område Stevns, Storstrøms Amt	115
Område Hyllinge, Storstrøms Amt	122
Viborg Amt.....	128
Ringkjøbing Amt	134
Sønderjyllands Amt	140
Kapitel 9 – Konklusioner	146
Intentioner med denne rapport.....	146
Fordele og ulemper ved HEM metoden	146
Vertikal opløsning.....	147
Lateral opløsning	148
Koblinger.....	149
Støjmodel og inversionspraksis.....	150
Andre datatyper	151
Kapitel 10 – Anbefalinger vedrørende luftbårne undersøgelser	152
Luftbårne geofysiske systemer og selskaber.....	152
Procedurer angående tilladelser til at foretage målinger fra luften	152
Procedurer for udvælgelse af selskab.....	153
EU-udbud ?.....	153
Udarbejdelse af udbudsmateriale.....	153
Tekniske specifikationer	153
Juridiske forhold.....	154
Specielle forhold vedrørende udførelse af målingerne	154
Vurdering af indkommende bud	154
Gerda-databasen.....	155
Andre typer af målinger	155
Litteraturhenvisninger	156
Introducerede litteratur på dansk.....	156
International lærebogslitteratur.....	156
GEUS TEM rapporten	156
Andre litteraturhenvisninger	157
Appendiks A – Katalog over 1D analyserne	159
Tolkningsstatistik	160
DIGHEM ^{VRES}	161
CVES	161
PACES.....	161
TEM	161
Appendiks B – Katalog over tolkninger af 2D modeller	195
Appendiks C – Data fra målingerne i Danmark	216

Forord

Denne rapport er udarbejdet i samarbejde mellem Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) og Geologisk Institut, Aarhus Universitet. Rapporten er udarbejdet efter aftale med og finansieret af følgende amter: Fyns Amt, Frederiksborg Amt, Nordjyllands Amt, Ribe Amt, Ringkjøbing Amt, Storstrøms Amt, Sønderjyllands Amt, Vejle Amt, Vestsjællands Amt, Viborg Amt og Århus Amt. Formålet med rapporten er primært at belyse muligheden for at anvende eksisterende helikopterbårne frekvensdomænesystemer i forbindelse med den hydrogeologiske kortlægning af Danmark. Vurderingen af helikopterbårne frekvensdomænesystemer er foretaget som en sammenlignende analyse af DIGHEM^{VRES} systemet med eksisterende landbaserede elektriske og elektromagnetiske metoder, som er kendt fra hydrogeofysiske undersøgelser i Danmark. Det drejer sig om Multi-elektrodeprofilering (MEP) med et system med mindste elektrodeafstand på 5 m, den transiente elektromagnetiske metode repræsenteret ved et PROTEM 47 system og sonderinger i central loop konfigurationen med en 40 x 40 m² strømsløjfe og endelig Kontinueret Elektrisk Sondering (PACES) med otte elektrodeafstande.

Et sekundært mål med rapporten har været at udarbejde et materiale, som vil kunne indgå som et referencemateriale for amternes anvendelse af helikopterbårne frekvensdomænesystemer i forbindelse med den hydrogeologiske kortlægning.

Muligheden for at anvende helikopterbårne frekvensdomænesystemer er fremkommet i forbindelse med amternes hydrogeologiske kortlægning. Inden udarbejdelse af rapporten har GEUS rettet henvendelse til Fugro Airborne Surveys Ltd., som markedsfører DIGHEM^{VRES} systemet og til Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), som anvender et modificeret DIGHEM system. Henvendelsen til selskaberne indeholdt en kort redegørelse for de geologiske forhold i Danmark, og problematikken omkring anvendelse af helikopterbårne frekvensdomænemålinger i hydrogeologisk sammenhæng blev skitseret.

Af forskellige årsager kom denne rapport i en foreløbig version i juni 2002. Nærværende endelige version er revideret og udbygget på en række punkter. De vigtigste er, at vi har revideret vores estimer af sikkerhedsafstandene i forbindelse med koblinger til menneskeskabte ledende installationer, vi har i Kapitel 5 og 6 tilføjet en mere tilbundsående analyse af usikkerheden på højdebestemmelsen og dens indflydelse på datausikkerheden og tolkningen, og Kapitel 8 omfatter nu også præsentationer af tolkede modelsektioner fra alle HEM undersøgelser i Danmark. Siden udarbejdelsen af den foreløbige rapport er det konstateret, at højdeinformationen for målingerne udført af Fugro Airborne Surveys er væsentligt mere usikker end først antaget. Dette har medført ændringer i strategien for tolkning af målingerne og betydet at konklusionen vedrørende tolkningerne af de målte data er revideret på væsentlige punkter.

Indledning

Med god grund er der en stigende opmærksomhed på vandet som ressource. Rent vand til alle er en nødvendig forudsætning for et sundt og fredeligt liv på jorden.

Næsten alt det vand, der anvendes i Danmark, kommer fra grundvandet. I hele den industrialiserede periode har vandforbruget i Danmark stort set været stigende, både i husholdningerne, til industribrug og til kunstvanding. I de senere år har den forøgede bevidsthed om nødvendigheden af at spare på vandet og de deraf følgende kampagner og prisstigninger ført til en stagnation og i visse dele af landet en reduktion af forbruget.

I løbet af de sidste årtier er indholdet af nitrat i grundvandet blevet forhøjet, og i de sidste år har forureningen med pesticidrester og deres nedbrydningsprodukter resulteret i lukning af mange vandforsyningsboringer. Den stadig stigende oppumpning, specielt omkring de store befolkningskoncentrationer i byerne, har ført til overudnyttelse med deraf følgende mangelsituationer og til en sænkning af grundvandspejlet omkring kildepladserne.

Det er således almindeligt erkendt, at grundvandets kvalitet er truet fra mange sider, og i det sidste tiår er der fra både staten, amter, kommuner og private vandværker taget initiativ til en mere detaljeret hydrogeologisk kortlægning af landets grundvandsressourcer. Planlægning og administration af vandforsyningen er i stigende grad baseret på anvendelse af hydrogeologiske computermodeller. Det er derfor blevet nødvendigt, på en betydeligt mere kvantitativ måde end tidligere, at kende de tilgængelige grundvandsressourcer og deres sårbarhed overfor forurening fra overfladen. Vandforsyningen i Danmark er baseret på mange decentrale vandværker, ofte med kun få brugere. Der er bred politisk enighed om, at man vil forsøge at bevare denne struktur, da den er meget robust over for forureningskatastrofer og tillige sikrer en stor grad af folkeligt engagement i grundvandskvaliteten gennem vandværksbestyrelser o.l.. En bevarelse af denne meget decentrale vandforsyningsmodel understreger behovet for et detaljeret kendskab til de hydrogeologiske forhold over store områder.

I den hydrogeologiske kortlægning har man i stadig større grad benyttet geofysiske metoder, dels til en generel geologisk kortlægning af grundvandsmagasiners forekomst og sårbarhed, dels til en detaljeret kortlægning omkring kildepladser. To jordbaserede geofysiske metoder har fundet hyppig anvendelse i denne kortlægning: geoelektriske profileringer/sonderinger og transiente elektromagnetiske sonderinger (TEM). De geoelektriske profileringer/sonderinger er foretaget med Multielektrodesystemer (MEP) og med den Kontinuerede Elektriske Sonderingsmetode (PACES) for at få kortlagt udbredelsen af overfladenære lerlag med henblik på en vurdering af underliggende grundvandsmagasiners sårbarhed over for nedsivning af uønskede stoffer fra overfladen. TEM, og også MEP, er anvendt til kortlægning af den dybere geologi og har dermed tjent til afgrænsning af eventuelle grundvandsmagasiner. De transiente sonderinger er blevet udført med traditionelle systemer, langt de fleste med PROTEM 47 systemet fra Geonics Ltd., og der er i de sidste ti år foretaget over 40 000 transiente sonderinger i Danmark. Inden for de sidste år er en nyudviklet metode, den slæbetransiente metode (PATEM = Pulled Array Transient Electromagnetic

Method), taget i anvendelse. Som navnet antyder foretages de transiente sonderinger, mens udstyret bevæges gennem landskabet.

De mange gode resultater af den hydrogeofysiske kortlægning har ført til, at geofysiske metoder nu helt naturligt indgår som en integreret del af den igangsatte kortlægning af landets vigtigste grundvandsområder. Hensigten er at få et udtømmende kendskab til landets grundvandsreserver, således at man kan udvikle en langsigtet og bæredygtig strategi for deres udnyttelse. Denne indsats, som vurderes at koste samfundet 7–800 millioner kroner over en tiårsperiode, finansieres af en ekstra vandafgift, som amterne har fået bemyndigelse til at opkræve. Den er i sin hensigt og i omfang enestående i verden.

Et kortlægningsprojekt af disse dimensioner vil naturligvis medføre, at der rettes stor opmærksomhed mod de geofysiske metoder, der skal til for at gennemføre projektet, og nærværende rapport skal ses i denne sammenhæng. En eventuel anvendelse af helikopterbårne frekvensdomænesystemer i den hydrogeofysiske kortlægning er kommet på tale på grund af disses evne til på kort tid at dække meget store områder, og de er derfor interessante, når opgaven er så stor. De kendte helikopterbårne frekvensdomænesystemer vil dog uvægerligt have en dårligere opløsning af jordens resistivitetsforhold end de jordbase-rede systemer.

Skønt det er almen viden, at luftbårne systemer har en ringere opløsning af jordens ledningsevneforhold, end hvad man kan opnå med jordbaserede systemer, er det relevant at rette opmærksomheden mod HEM systemets evne til kvantitativ løsning af de problemer, man beskæftiger sig med i den nuværende hydrogeologiske kortlægning. Forventningerne til HEM systemet er, at det kan anvendes i sårbarhedskortlægningen til bestemmelse af overfladenære lerlags forekomst og tykkelse, samt at systemet kan bidrage til kortlægningen af grundvandsmagasiner gennem informationer om de elektriske ledningsevneforhold ned til en vis dybde, specielt dybden til gode elektriske ledere. Sammenlignet med nuværende flybårne transiente metoder, har systemet en bedre opløsning af overfladenære lag, og selv om indtrængningsdybden er mindre, er den dog ikke ubetydelig.

Der er først for nylig begyndt at komme erfaringer med anvendelse af helikopterbårne frekvensdomænesystemer i en hydrogeofysisk sammenhæng i et land som Danmark med mange tætliggende menneskeskabte elektriske installationer, idet der er gennemført undersøgelser på Stevns og ved Hyllinge i Storstrøms Amt samt i Viborg, Ringkjøbing og Sønderjyllands Amter. Det er hensigtsmæssigt på nuværende tidspunkt at forsøge at vurdere helikopterbårne frekvensdomænesystemers fordele og ulemper og deres egnethed til opgaven. De danske amter - på nær nogle få - er derfor gået sammen om at få gennemført en sådan analyse. Projektet *En vurdering af luftbårne elektromagnetiske frekvensdomæ-nemetoders anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark* er blevet gennemført af medarbejdere og Ph.D studerende ved GEUS og Geologisk Institut, Aarhus Universitet, med GEUS som projektleder. Nærværende rapport er resultatet af dette arbejde.

Rapporten er udformet som en sammenlignende analyse af fire forskellige systemer:

- (1) DIGHEM^{VRES} systemet, som er et helikopterbåret frekvensdomænesystem (HEM). Systemet er et magnetisk dipol-dipol system med vertikale dipoler med en afstand på

7.86 m og fem frekvenser mellem 385 Hz og 102 kHz. Systemet fremføres med helikopter i en højde af ca. 35 m over jordoverfladen. Helikopteren befinder sig i ca. 60 m højde. Der kan gennemføres ca. 300 km profil på en god og effektiv flyvedag, men det er ikke alle dage, der kan flyves.

- (2) Et Multielektrodesystem med en enhedselektrodeafstand på 5 m. Der måles i 10 forskellige Wenner konfigurationer med elektrodeafstande mellem 5 m og 120 m. To personer kan gennemføre 1–2 km profil om dagen med systemet.
- (3) PACES systemet til kontinuert elektrisk sondering. Systemet slæbes gennem landskabet, medens der samtidigt foretages målinger i otte forskellige elektrodekonfigurationer med typiske elektrodeafstande mellem 2 m og 30 m. To personer gennemfører 10–15 km profil per dag.
- (4) PROTEM 47 systemet fra Geonics Ltd., som indtil nu er anvendt i meget stort omfang, og som formentlig stadig vil være en del af fremtidens instrumentsamling. Systemet er et håndbåret jordbaseret system, som foretager en enkelt TEM sondering ad gangen, hvorefter det flyttes til den næste lokalitet. To personer kan normalt foretage ca. 20 sonderinger om dagen.

I år 2000 udarbejdede en arbejdsgruppe fra GEUS og Geologisk Institut, Aarhus Universitet, en rapport om flybårne transiente systemer *En vurdering af flybårne transiente metoders anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2000/41* - i det følgende omtalt som *GEUS TEM rapporten* (Christensen *et al.* 2000). I denne rapport fra 2000 sammenlignedes flybårne transiente systemer med jordbaserede transiente systemer.

I nærværende rapport sammenlignes fire forskellige systemer, hvoraf to er galvaniske metoder, MEP og PACES, og to er elektromagnetiske metoder, HEM og TEM. Af de to sidste er den ene en tidsdomænemetode (TEM), medens den anden er en frekvensdomænemetode. De sammenlignede metoder er derfor af mere forskellig karakter i nærværende rapport end i den tidligere GEUS TEM rapport.

I det følgende kommer en kort omtale af rapportens disposition og de enkelte kapitlers indhold.

I Kapitel 1 omtales de generelle forhold omkring de fire systemer. Dette kapitel indeholder samtidig de væsentligste af rapportens konklusioner om systemernes egnethed til hydrogeofysisk kortlægning. Det er tilstræbt, at de fleste læsere skal kunne forstå problemstillingen og kende de vigtigste forhold på et overordnet plan efter at have læst dette kapitel.

Kapitel 2 gennemgår de fundamentale begreber til beskrivelse af helikopterbårne frekvensdomænesystemer, og der gives eksempler på data målt i Danmark.

I Kapitel 3 rettes opmærksomheden mod et meget vigtigt punkt i bedømmelsen af elektromagnetiske metoder, nemlig den forstyrrelse af målingerne, som opstår ved at måleudstyret påvirkes af ledninger og kabler i luften og i jorden. Denne koblingsforstyrrelse er generelt ubehagelig at have med at gøre for både transiente systemer og helikopterbårne frekvensdomænesystemer, og den er alvorligere for luftbårne end for jordbaserede systemer.

I Kapitel 4 gennemgås de fire valgte systemer i detaljer.

I Kapitel 5 gennemgås de fundamentale begreber knyttet til tolkning og analyse af elektriske og elektromagnetiske sonderingsdata. Specielt rettes opmærksomheden mod den støj, der altid er på data, og de forskelle, der er mellem systemerne i denne henseende. Endvidere præsenteres de enkelte systemers følsomhedsfunktioner, dvs. de funktioner som beskriver, hvordan forskellige områder i jorden påvirker måleresultatet. Disse funktioner kan give en forståelse af systemernes evne til at opløse detaljer.

I Kapitel 6 foretages en sammenlignende analyse af de fire systemer på basis af en lang række lagdelte modeller, dvs. endimensionale modeller (1D) hvor den elektriske ledningsevne kun afhænger af dybden. Dette og det følgende kapitel er centrale i bedømmelsen af de forskellige systemers fordele og ulemper.

Kapitel 7 udvider analysen fra Kapitel 6 til at gælde tolkninger af sonderingsdata opmålt over todimensionale strukturer, dvs. strukturer, hvor ledningsevnen kan ændre sig både i horisontal retning og med dybden. Der præsenteres her tolkninger med flere forskellige typer af endimensionale modeller samt todimensionale modeller.

Kapitel 8 indeholder eksempler på tolkning af helikopterbårne frekvensdomænedata fra udvalgte områder i Danmark.

I Kapitel 9 sammenfattes konklusionerne på rapportens analyser.

Kapitel 10 fremlægger praktiske anbefalinger i forbindelse med helikopterbårne frekvensdomænesystemer og anvisninger på kvalitetssikring af rekvireret arbejde.

Det skal understreges, at rapporten ikke omfatter tilbundsgående analyser af økonomien i helikopterbårne frekvensdomæneundersøgelser, ligesom den heller ikke er en indkøbsvejledning for købere af helikopterbårne frekvensdomæneundersøgelser. Der vil ikke blive givet anbefalinger af bestemte helikopterbårne frekvensdomænesystemer. Selv om vi i Kapitel 10 kommer med praktiske anbefalinger om måden, hvorpå man tilrettelægger en helikopterbåret frekvensdomæneundersøgelse, er vi ikke gået ind i at afveje fordele og ulemper ved forskellige helikopterbårne frekvensdomænesystemer mod hinanden, ligesom vi heller ikke har taget generel stilling til, om det overhovedet er hensigtsmæssigt at anvende sådanne systemer i Danmark. Det vil altid afhænge af det præcise mål med undersøgelserne.

Rapporten er temmelig omfattende, blandt andet fordi der er lavet analyser af et meget stort antal modeller for de fire meget forskellige metoder, og der er gjort en del ud af at analysere koblingsfænomener og følsomhedsfunktioner. Det har været vores hensigt at frembringe et dokument, som, ud over at sammenligne de valgte systemer, kan tjene som et generelt referenceværk til forståelse af helikopterbårne frekvensdomænesystemer og som opslagsværk for dem, som gerne vil have kvantitativ viden om muligheden for at beskrive resistivitetsforholdene i jorden for en lang række modeller med både jordbaserede metoder og helikopterbårne frekvensdomænesystemer. Hermed er rapporten også blevet en mere systematisk analyse af MEP og PACES metoden, end man før har set på dansk.

Det har ikke kunnet undgås, at der er gentagelser fra det ene kapitel til det andet, men vi har bestræbt os på, at de enkelte kapitler skulle fremstå med en afrundet karakter, således at opslag i andre kapitler skulle blive mindre nødvendige.

Omtalen af helikopterbårne frekvensdomænesystemer er, som mange andre tekniske beskrivelser, præget af en noget inkonsistent brug af engelske og danske udtryk. I en del tilfælde findes desværre ingen tradition for brug af danske udtryk.

Kapitel 1 – Resume af undersøgelsens hovedresultater

I dette kapitel omtales de generelle forhold omkring luftbårne systemer, og det indeholder samtidig de væsentligste af rapportens konklusioner om de luftbårne systemers egnethed til hydrogeofysisk kortlægning. Kapitlet beskriver de grundlæggende problemstillinger angående luftbårne systemer, specielt helikopterbårne frekvensdomænemetoder, og forklarer de vigtigste forhold på et overordnet plan.

Generelle overvejelser

Luftbårne systemer er kommet på tale i forbindelse med den igangværende landsomfattende indsats i kortlægningen af Danmarks grundvandsressourcer. Undersøgelsernes store omfang har medført, at man er blevet interesseret i at finde og anvende effektive og økonomisk realiserbare metoder, med hvilke man er i stand til at dække et stort areal på kort tid.

For to år siden udarbejdede GEUS en rapport over flybårne transiente metoder: *En vurdering af flybårne transiente metoders anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark*, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2000/41 (Christensen *et al.* 2000) - i det følgende omtalt som *GEUS TEM rapporten*. I denne rapport sammenlignedes flybårne transiente systemer med jordbaserede transiente systemer. I nærværende rapport sammenlignes helikopterbårne elektromagnetiske frekvensdomænemetoder (HEM) med tre jordbaserede geofysiske metoder, hvoraf to er galvaniske metoder, nemlig Multielektrodeprofilering (MEP) og Kontinueret Elektrisk Sondering (PACES), og én er elektromagnetisk, nemlig den transiente sonderingsmetode (TEM). Sidstnævnte er en tidsdomænemetode, medens HEM metoden er en frekvensdomænemetode. De metoder, der sammenlignes i denne rapport, er derfor af mere forskellig karakter end i den tidligere GEUS TEM rapport (Christensen *et al.* 2000).

HEM metoden er kommet på tale, da produktiviteten er høj, og da den forventes at have en bedre opløsning af de overfladenære lag end de nuværende flybårne TEM metoder. Dette er vigtigt i forbindelse med zoneringsproblematikken, hvor det er nødvendigt at kortlægge de overfladenære lerlag. Desuden forventes den at have en vis dybdeindtrængning, således at man kan få oplysninger om grundvandsmagasiners afgrænsning og struktur, med mindre der er tale om dybe grundvandsmagasiner. HEM undersøgelser er allerede gennemført flere steder i landet.

På den anden side er det ganske klart, at de luftbårne systemers evne til kvantitativt at beskrive jordens resistivitetsforhold og dermed kortlægge de geologiske formationer er ringere end det, man kan opnå med jordbaserede systemer. Dette forhold er velkendt blandt geofysikere og er ikke et nyt resultat af undersøgelserne i denne rapport.

Hvorvidt det vil være hensigtsmæssigt at anvende HEM metoden i forbindelse med hydrogeologiske undersøgelser i Danmark, må bero på en afvejning af dens fordele og ulemper. Det må i denne afvejning tages i betragtning, at de luftbårne systemer kan indgå i sammenhæng med jordbaserede geofysiske systemer, for så vidt anvendelsen af luftbårne undersøgelser ikke udelukker de jordbaserede.

Hovedvægten i denne rapport er lagt på en kvantitativ analyse af HEM metodens opløsningsevne og en sammenligning med jordbaserede systemer med henblik på at tilvejebringe et objektive vurderingsgrundlag.

Luftbårne elektromagnetiske systemer

De elektromagnetiske metoder klassificeres efter bølgeformen af strømmen i sendersløjfen. Der skelnes mellem *tidsdomænesystemer* og *frekvensdomænesystemer*.

Luftbårne tidsdomænesystemer - også kaldet transiente systemer - består i princippet af et fly udstyret med en elektrisk strømgenerator, som sender strøm gennem en *strømsløjfe*. Denne *sendersløjfe* kan f.eks. bestå af kabler udspændt omkring flyets vinger og dets bov- og halespyd. Strømstyrken i sendersløjfen varierer som funktion af tiden med en karakteristisk bølgeform, der er forskellig for forskellige systemer. Denne varierende strøm danner et magnetfelt, som betegnes *primærfeltet*. I lighed med jordbaserede systemer inducerer ændringerne i senderstrømmen en elektromotorisk kraft i omgivelserne, hvilket giver anledning til, at der går en strøm i de elektrisk ledende dele af omgivelserne: jorden, flyet, menneskeskabte gode ledere, etc. Maksimum for strømtætheden i jorden bevæger sig udad og nedad, idet styrken af strømtætheden aftager. Magnetfeltet fra den henfaldende strøm inducerer en elektromotorisk kraft i en eller flere *modtagerspoler*. Modtagerspolerne er ofte indkapslede i en dråbeformet eller torpedolignende, aerodynamisk udformet beholder, der hænger bag flyet. Det elektromagnetiske felt, som genereres af strømmene i jorden, betegnes *sekundærfeltet*, og det er dette felt, som indeholder information om jordens resistivitetsforhold.

Frekvensdomænetoder flyves oftest med sender- og modtagerspoler indkapslet i en beholder ophængt under en helikopter (se Figur 1.1). En generator udsender kontinuerligt en vekselstrøm i senderspolen under målingen og skaber dermed det *primære* magnetfelt, som inducerer en strøm i jorden. Magnetfeltet fra strømmen i jorden, *sekundærfeltet*, som indeholder informationen om jordens resistivitetsforhold, måles af modtagerspolerne. Dette er faseforskudt i forhold til primærfeltet, så en måling består af både *amplitude* og *fase* eller, ækvivalent hermed, *realdel* og *imaginærdel*. Også primærfeltet påvirker modtagerspolerne, og eftersom dette er meget større end det sekundære felt, må det udkompenseres. Denne kompensation stiller ekstremt store krav til en konstant geometri mellem sender- og modtagerspolerne og dermed til systemets mekaniske stivhed. Afvigelser fra den nominelle geometri giver anledning til datafejl. Selv om der i princippet er det samme informationsindhold i frekvens- og tidsdomænedata, medfører de måletekniske vanskeligheder med frekvensdomænesystemer, at deres indtrængningsdybde er væsentligt mindre end indtrængningsdybden for transiente systemer. Nuværende frekvensdomænesystemer måler typisk

ved fem frekvenser, så datagrundlaget er mindre end i de transiente metoder, der måler over flere tidsvinduer.

Det må forventes, at forstyrrende koblinger til ledende menneskeskabte installationer vil være alvorlige for frekvensdomænesystemer, ligesom de er det for tidsdomænesystemer.

Blandt de luftbårne systemer omtales i denne rapport kun HEM metoden, medens den transiente metode indgår blandt de jordbaserede metoder, som HEM metoden sammenlignes med.



Figur 1.1. Figuren viser det helikopterbårne DIGHEM^{VRES} system. På billederne ses helikopteren og instrumenteringen, beholderen med spolerne og systemet klar til at lette.

Lidt historie

Luftbårne elektromagnetiske metoder er blevet udviklet primært til efterforskning af malmforekomster i vidt udstrakte områder, ofte i uvejsomt terræn. Som sådan har de været anvendt i en længere årrække, og de har vist deres evne til først og fremmest at finde sulfidmineraliseringer og andre særdeles gode ledere i grundfjeldsområder, der er karakteriseret ved meget høje resistiviteter.

Pionerarbejdet med udviklingen af luftbårne elektromagnetiske systemer skete hovedsageligt i Canada, Sverige og Finland mellem 1945 og 1960. Dette udviklingsarbejde fulgte som en naturlig konsekvens af den udvikling, som havde fundet sted i disse lande med jordbaserede systemer i perioden 1925 til 1940. Det første luftbårne EM system blev afprøvet i 1946 af Lundberg Exploration, som benyttede et helikopterbåret system. Hans Lundberg, samt en række andre pionerer inden for feltet, foretrak dog at anvende fastvingefly. Den første succesfulde testflyvning med denne type blev foretaget i 1948, hvor firmaet McPhar Engineering Ltd. i et samarbejde med et mindre prospekteringselskab, Stanmac Ltd., havde videreudviklet et jordbaseret system, der oprindeligt var monteret på en slæde, som blev trukket over tilfrosne områder. De første luftbårne elektromagnetiske målinger blev foretaget med frekvensdomænesystemer, hvor mange forskellige udformninger af både modtagerspole og sendersløjfe blev afprøvet. Det første flybårne transiente elektromagnetiske system blev introduceret i 1959 under navnet INPUT. Mange af de grundlæggende elementer i de moderne systemer, såsom GEOTEM og TEMPEST, kommer fra INPUT systemet.

De første udstyr var opbygget med analog elektronik og havde mange begrænsninger med hensyn til målenøjagtighed. De led desuden under store problemer med den absolutte kalibrering, og måleresultaterne blev derfor mest vurderet kvalitativt og brugt til at pege på områder, der kunne være interessante for en nærmere jordbaseret efterforskning. Populært sagt var de "bump detectors", der blot skulle udpege steder, hvor der "foregik noget", dvs. områder med anomalt høj konduktivitet (f.eks. sulfidmineraliseringer) i forhold til områder med mere almindelige bjergarter med meget lille konduktivitet. I forbindelse med hydrogeofysiske undersøgelser er det imidlertid utilstrækkeligt med kvalitative tolkninger, idet man har brug for kvantitative bestemmelser af jordens resistivetsforhold, og det er derfor afgørende, at man kan få kvantitativ information ud af data fra luftbårne metoder.

De luftbårne systemer er som alt andet geofysisk udstyr undergået store forandringer og forbedringer takket være udviklingen i den digitale elektronik og den hastige udvikling af hurtige computere. Dette har gjort det muligt at måle både mere nøjagtigt og hurtigere (og dermed også tættere), og i moderne udstyr opsamles i dag meget store datamængder. For HEM systemernes vedkommende er den største udvikling foregået med hensyn til kalibrering af instrumentet, specielt stabiliteten af udkompenseringen af primærfeltet. Man har tillige tilstræbt at måle ved stadig højere frekvenser for at forbedre opløsningen af resistivetsforholdene tæt på overfladen. DIGHEM^{VRES} systemet, som analyseres i denne rapport har en højeste frekvens på 102 kHz, medens det tyske system fra BGR har en øvre frekvens på 192 kHz. Det er den højeste frekvens, der er vanskeligst at kalibrere.

Karakteristika ved luftbårne systemer

Der er nogle fælles træk ved luftbårne systemer, som er bestemt af nogle fundamentale forhold omkring deres konstruktion. Man kan udtrykke det kort ved at sige, at det, der giver problemerne for de luftbårne systemer, er, at de er luftbårne, dvs. at målingerne foregår med stor hastighed og langt fra jordoverfladen. I det følgende omtales den vertikale opløsning, den laterale opløsning, koblinger til menneskeskabte ledende installationer og støjforholdene for HEM metoden.

Vertikal opløsning

Det er begrænset, hvor lavt man kan flyve med et luftbårent system, specielt over områder med mange byer, tekniske installationer, o.a. For de helikopterbårne frekvensdomænemetoder befinder beholderen med spoler sig ca. 35 m over jorden, medens helikopteren flyver i ca. 65 m højde. At måleudstyret befinder sig 35 m over jorden betyder, at man skal sende en meget kraftig strøm i senderspølen for at kunne måle noget som helst. Man skal have et stort sendermoment. Dette stiller meget store krav til udkompenseringen af primærfeltet, idet blot en lille unøjagtighed vil medføre, at der overkobles et stort felt fra senderspølen til modtagerspølen. Da hver frekvens, der udsendes, skal have sit eget sender/modtager spolepar, er det tillige begrænset, hvor mange spoler, der kan pakkes ned i beholderen, der indeholder systemet, så de fleste HEM systemer anvender 5–6 frekvenser. Datagrundlaget for en efterfølgende tolkning er altså begrænset og dermed også HEM metodens evne til at opløse jordens resistivitetsfordeling. Dette forhold afspejles i det generelle resultat af undersøgelserne i Kapitel 6, nemlig at man i 80% af tilfældene kan tolke data fra trelagsmodeller med tolagsmodeller og dermed opløse tre parametre: første og andet lags resistiviteter og første lags tykkelse. I 20% af tilfældene kræves trelagsmodeller for at tolke data fra trelagsmodeller. Det har vist sig, at mangelagstolkninger i visse tilfælde er i stand til at indikere detaljer i resistivitetsvariationerne, som ikke ses på fålagstolkningerne. Disse træk ved modellen kan dermed siges at være *indikeret*, men ikke *bestemt*, og det må anbefales, at man gennemfører begge typer af tolkninger.

I nedenstående tabeller har vi samlet de vigtigste resultater angående den vertikale opløsning, idet vi specielt betragter opløsningen af overfladenære godt ledene lag (lerdækkeproblematikken i forbindelse med sårbarhedskortlægningen) og dybden til en god leder (afgrænsningen af grundvandsmagasiner). Tabellerne omhandler kun tolagsmodeller, og de fremstiller dermed de bedst opnåelige resultater. For trelagsmodeller er forholdene mere komplicerede, der er flere parametre at bestemme, og usikkerheden på bestemmelsen af parametrene er generelt større. I Appendix A er der detaljerede analyser af såvel to- som trelagsmodeller.

2-lagsmodel	HEM	MEP	PACES	TEM
30 / 70 Ωm	> 50% altid	< 50% for $t > 5\text{m}$	< 50% for $t > 2.5\text{m}$	< 50% for $t > 8\text{m}$
30 / 200 Ωm	> 50% altid	< 50% for $t > 4\text{m}$	< 50% for $t > 2.5\text{m}$	< 50% for $t > 5\text{m}$
70 / 200 Ωm	> 50% altid	< 50% for $t > 4\text{m}$	< 50% for $t > 2.5\text{m}$	< 50% for $t > 10\text{m}$

Tabel 1.1. Tabellen viser usikkerheden på bestemmelsen af tykkelsen, t , af det øverste lag i tre forskellige opstigende tolagsmodeller.

2-lagsmodel	HEM	MEP	PACES	TEM
30 / 5 Ωm	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 20\text{m}$	< 10% for $d < 100\text{m}$
70 / 5 Ωm	< 50% for $d < 100\text{m}$	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 20\text{m}$	< 10% for $d < 100\text{m}$
200 / 5 Ωm	< 50% for $d < 100\text{m}$	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 20\text{m}$	< 10% for $d < 100\text{m}$

Tabel 1.2. Tabellen viser usikkerheden på bestemmelsen af dybden, d , til den gode leder i tre forskellige nedstigende tolagsmodeller.

I Tabel 1.1 bemærker man, at usikkerheden på bestemmelsen af tykkelsen af det øverste lag altid er over 50% for HEM metodens vedkommende, uanset tykkelsen af laget, medens de jordbaserede metoder har en bedre opløsning. Tabel 1.2 viser, at HEM metoden kan opløse dybden til en god leder, hvis modellen ellers er simpel.

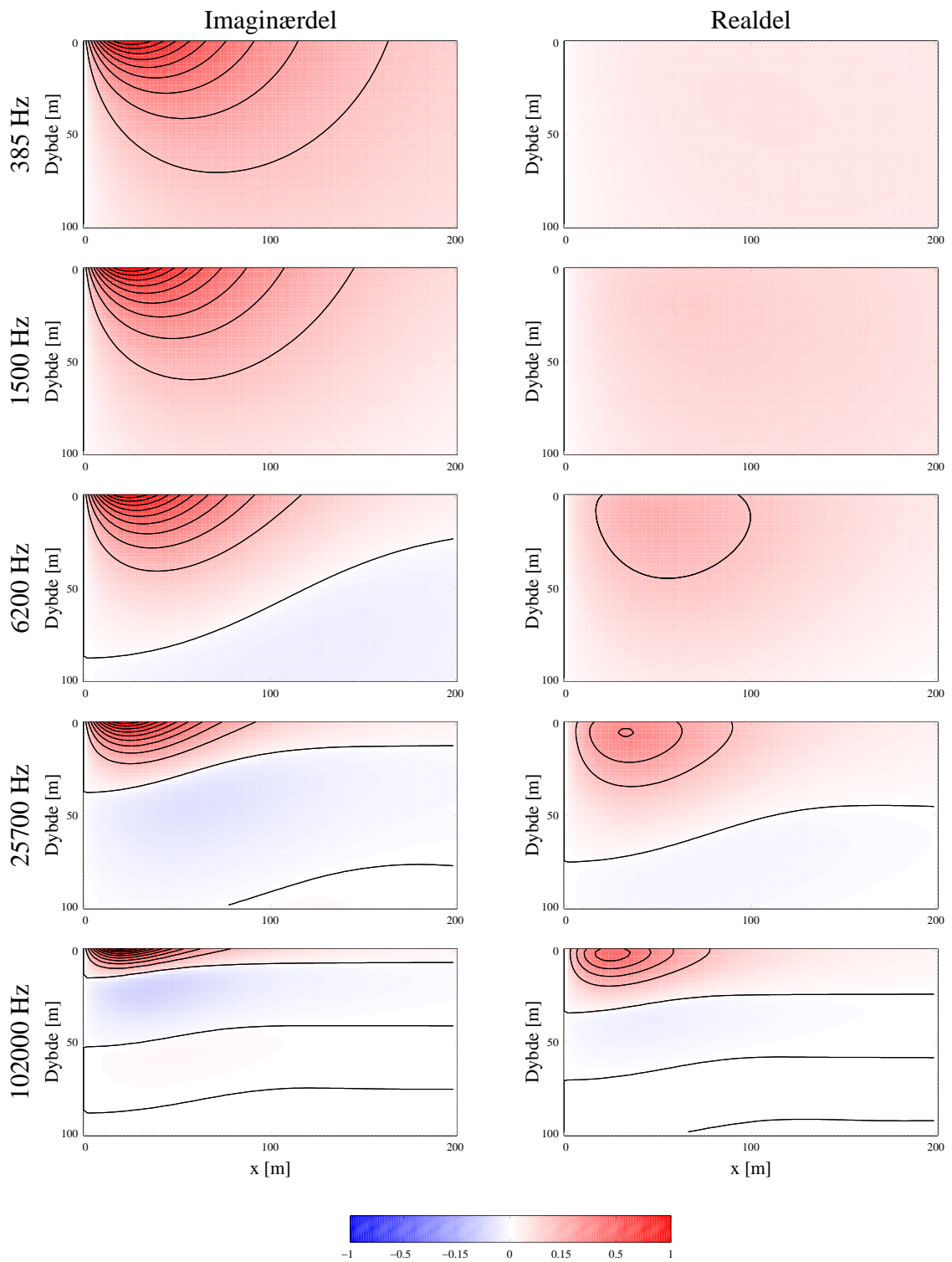
Lateral opløsning

Det forhold, at målesystemet befinder sig over jorden, betyder, at strømsystemet, som induceres i jorden, vil have en stor lateral udbredelse. Figur 1.2 viser strømtætheden i jorden for DIGHEM^{VRES} systemets fem frekvenser. Man ser, at strømsystemet har en betydelig lateral udbredelse, mere end 100 m til hver side for de lave frekvenser og noget mindre for de højere frekvenser. Den store laterale udbredelse medfører en dårlig lateral opløsning.

Der er grænser for, hvor langsomt luftbårne systemer kan flyve. Helikoptermålinger flyves som regel med en hastighed på ca. 100 km/t, og der tages en måling for hver 0.1 s, dvs. med ca. 3 m mellemrum. Samplingstætheden bidrager derfor ikke væsentligt til den i forvejen dårlige laterale opløsning. Prisen for den korte midlingslængde er en kort midlingsperiode, som medfører, at data er noget støjfyldte, hvilket betyder, at man får større usikkerhed på bestemmelsen af jordens resistivitetsforhold. Hvis data er meget støjfyldte, foretager man ofte en lateral midling i efterprocesseringen af data, hvilket yderligere forringer den laterale opløsning. Dette understreger et væsentligt forhold for alle kontinuert målende systemer, nemlig at der er et komplementært forhold mellem signal/støj forholdet for data og den laterale midlingsbredde.

Betragter man specielt HEM metodens evne til at kortlægge overfladenære lerlags forekomst og tykkelse, må man regne med, at den dårlige laterale opløsning giver en begrænsning på hvor små huller, der kan kortlægges i et morænelersdække. PROTEM 47 data, som teoretisk set har en bedre lateral opløsning, giver ikke i praksis en god lateral

opløsning, idet målingerne ofte ligger med en afstand på 100–250 m. MEP målingerne har en udmærket lateral opløsning, som bliver udnyttet fuldt ud i kraft af muligheden for 2D tolkning. PACES systemet har den bedste laterale opløsning af alle fire systemer, da man har data målt på jordoverfladen med små elektrodeafstande for hver 1.5 m. I praksis begrænses den laterale opløsning af MEP og PACES systemerne af udgifterne til en tæt kortlægning.



Figur 1.2. Figuren viser real- og imaginærdelen af strømtætheden i et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$ for en vertikal magnetisk dipolkilde i højden 35 m over jordoverfladen for fem frekvenser. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens. Afstanden mellem konturlinjerne er 10% af maksimumværdien.

Koblinger

Når man foretager en transient sondering på jordoverfladen eller i luften, induceres der strømme ikke alene i jorden, men også i menneskeskabte elektrisk ledende installationer som højspændingsledninger, kabler, hegn, osv. Disse koblingsfænomener forstyrrer målingerne, og hvis de ikke erkendes, kan de give anledning til en forkert tolkning af sonderingerne. Man har mange erfaringer med koblingseffekten for både jordbaserede og flybårne TEM målinger, hvor effekten er større for flybårne målinger end for landbaserede målinger. Størrelsen af selve koblingen er den samme for begge systemer, men responset fra jorden er svagere, når man måler i luften, og forstyrrelsen er derfor relativt alvorligere. Flybårne TEM målinger midles desuden typisk over et vist stykke langs profilet, så forstyrrelsen breder sig længere bort fra installationerne. I industrialiserede lande, som f.eks. Danmark, med tæt udbygning af den elektriske infrastruktur betyder det, at det er svært at forestille sig et større område af landet uden forstyrrende koblinger af den ene eller anden art.

I hvor høj grad koblingsfænomener vil være ødelæggende for helikopterbårne frekvensdomænemålinger, er vanskeligt at forudsige, før man har gennemført en detaljeret analyse af flere datasæt fra Danmark med henblik på at identificere koblinger, men forsigtige konklusioner kan drages på basis af en betragtning af nogle af de HEM profiler, som gruppen bag denne rapport har haft til rådighed.

Vi vil vurdere, at sikkerhedsafstanden vil være af størrelsesordenen 50–100 m for de højeste frekvenser, medens den skal være noget større for de lavere frekvenser, af størrelsesordenen 100–250 m. Disse afstande vil i mange tilfælde, på grund af den store koncentration af menneskeskabte elektrisk ledende installationer i Danmark, reducere størrelsen af de områder, man kan kortlægge. I et typisk område på landet i Østjylland eller på Øerne kan der være koblingforstyrrelser på op til 20–40% af et område for de højeste frekvensers vedkommende, medens forstyrrelser for de laveste frekvensers vedkommende kan optræde på et område, der er op til dobbelt så stort.

Det er ligeledes vores vurdering ved betragtning af HEM data, at det er vanskeligere at identificere data influeret af koblinger, end det er for TEM data. For TEM data kan man betragte både variationen af data langs profilet og den enkelte sonderingskurve for at identificere koblinger. For HEM målinger betyder de få data, at det er vanskeligt at identificere koblinger ud fra sonderingskurven. Identifikationen af koblinger kan foretages ved en betragtning af variationerne langs det målte profil, og det kan tillige være en stor hjælp at plote forskellen mellem rådata og filtrerede data indenfor det undersøgte område, idet man på et fladeplot kan erkende lineamenter, som kan korreleres med infrastrukturer som veje og højspændingsledninger.

Skønt produktiviteten af HEM undersøgelser er op til 300 km/dag - langt større end for de tre andre metoder, som vi har sammenlignet med - bør man huske på, at det tager lige så lang tid at processere HEM data som data fra jordbaserede metoder, så resultaterne kommer ikke lige med det samme. Vi vil anbefale, at data med koblinger til menneskeskabte elektriske ledere bliver identificeret og fjernet *inden* filtreringen af data, og at man husker på, at koblingerne har lange haler ud over de hurtige variationer, som man genkender dem på. De modeller, der fremgår ved tolkning af koblede data, må fjernes fra de resulterende

modelsektioner for at undgå fejlagtige og vildledende resultater. Arbejdet med at identificere og fjerne koblede data er manuelt og tidskrævende og er ikke normal praksis for de selskaber, som tilbyder HEM undersøgelser. Skal en sådan processering efterfølgende gennemføres, kan udgiften til tolkningen blive af størrelsesordenen halvt så stor som udgiften til undersøgelsen. En detailprocessering med henblik på at fjerne koblinger vil således medføre, at den effektive pris per kilometer pålidelige data vil blive væsentlig højere, end det fremgår af undersøgelsesomkostningerne.

De galvaniske metoder, MEP og PACES, er stort set ikke påvirket af koblinger, så sikkerhedsafstanden er reelt nul. Det betyder, at man kan foretage målinger næsten overalt, og datadækningen med MEP og PACES er dermed mere sikker end for TEM og HEM. For PACES systemet kan der være logistiske problemer med hensyn til at foretage kontinuerte målinger, men MEP målinger kan foretages stort set overalt, selv i bymæssig bebyggelse.

Støj og kalibreringsproblemer

Den omgivende støj, som hovedsageligt stammer fra lynudladninger i atmosfæren og menneskeskabte støjkluder som radiosendere o.l., er stort set ens for jordbaserede og for luftbårne målinger. Den tid, hvorover man midler en måling, er imidlertid kortere for en flybåren måling, og den effektive støj bliver derfor større. Det betyder, at usikkerheden bliver større på bestemmelsen af lagtykkelser og resistiviteter i tolkningen af målingerne.

Ud over den omgivende støj gør specielle forhold sig gældende for luftbårne systemer. For HEM systemer består den største vanskelighed i at fastholde en nøjagtig udkompensering af primærfeltet. For at opnå dette gennemføres med jævne mellemrum under målingerne en fornyet kalibrering, idet man flyver op til så stor højde, at indflydelsen fra jorden kan negligeres. Man genetablerer en nøjagtig udkompensering og noterer sig driften i systemet, som efterfølgende bruges til at korrigere målingerne. Korrektionen foretages under den antagelse, at driften har været lineær mellem kalibreringsmålingerne, så afvigelser fra linearitet vil medføre et yderligere bidrag til fejl på målingerne.

Målehøjden har stor indflydelse på målingerne, så en fejlagtig bestemmelse af målehøjden vil medføre at data bliver inkonsistente og vanskelige at tolke. Resultatet af tolkningen vil blive fejlagtigt, idet der introduceres områder med for høj resistivitet i overfladen, hvis højden undervurderes og vice versa. Ved overflyvning af skov og bebyggelse vil de radar- og lasersystemer, der anvendes til højdebestemmelsen, angive en for lille højde, idet signalet fra højdesystemerne vil reflekteres fra trætoppe og tage. Det er meget væsentligt, at højdedata ved en sammenligning af dataprofiler, topografiske kort og flyvevideoen bliver editeret og korrigeret, hvor de er fejlagtige. Det er ligeledes væsentligt at inddrage usikkerheden på højdebestemmelsen i inversionen af data, således at usikkerheden på højden kommer til at indgå i vurderingen af usikkerheden på modelparametrene.

De specielle forhold for luftbårne systemer diskuteres i detaljer i afsnittet *Støjmodeller for de fire systemer* i Kapitel 5 *Analyse, tolkning og følsomhed*.

Konklusion

Fordelene ved HEM systemer er, at de kan flyve overalt, også på steder, som er svært tilgængelige med jordbaserede systemer. Selv i Danmark er der områder, som er vanskelige at komme til med jordbaserede udstyr, f.eks. tæt skov og søer. Desuden er det en stor fordel, at målingerne ikke medfører markskader, og de kan derfor foretages hele året. Selv om man ikke går på jorden, kan målingerne dog forårsage gener og skader. På grund af den lave flyvehøjde kan målingerne forårsage ulykker for dyr og mennesker med deraf følgende erstatningskrav. Af denne grund er det lovpligtigt at varsle lavtgående fly og helikoptere.

Den store tæthed af målinger langs profillinien danner grundlag for at identificere de sonderinger, der er forstyrrede af koblinger til menneskeskabte ledende installationer, skønt det formodentlig kan blive vanskeligt at finde dem alle. Koblede data bør fjernes, inden de målte data midles langs profilerne, og de tilhørende modeller bør fjernes fra de endelige tolkninger.

Den største fordel er naturligvis, at man meget hurtigt kan få dækket store områder med målinger. Med en kapacitet på ca. 300 km profil per dag, kan man dække 50–75 km² med målelinier med en tæthed på 150–250 m.

HEM målinger er stærkt påvirket af målehøjden, og denne skal korrigeres inden tolkningerne, hvor den er forkert, for ikke at resultere i fejlagtige tolkninger af resistivitetsforhold nær jordoverfladen.

Ulemperne ved luftbårne systemer er, at de har en ringere lateral opløsning end kontinuerede jordbaserede systemer. I tilfælde af støjfyldte data, hvor det er nødvendigt med yderligere lateral midling, forringes denne yderligere. Konsekvensen vil blive en generel udtværing af de kortlagte strukturer og en dårligere evne til at finde detaljer, hvilket kan betyde, at f.eks. mindre huller i et morænelersdække ikke vil kunne ses på tolkninger af HEM data. Dette fremgår af analyserne i Kapitel 7, som omhandler todimensionale strukturer.

Den vertikale opløsning af jordens resistivitetsforhold er ligeledes dårligere. Informationsindholdet i data er mindre end for mange jordbaserede systemer, og tolkningen vil resultere i simple modeller med færre detaljer, typisk kun tolagsmodeller. Dette fremgår af både Kapitel 6 og 7.

Kapitel 2 – Elektromagnetiske frekvensdomænemetoder

I dette kapitel gennemgås de grundlæggende principper for elektromagnetiske frekvensdomænemetoder. Kapitlet er ment som en introduktion til de læsere, som ikke er bekendte med frekvensdomænemetoden.

Elektromagnetiske metoder

Elektromagnetiske fænomener er alle styret af Maxwells ligninger. Et af de fundamentale elektromagnetiske fænomener er, at et varierende magnetfelt vil få et varierende elektrisk felt til at opstå, som igen vil få et varierende magnetfelt til at opstå, som ... osv. i det uendelige.

De elektromagnetiske geofysiske metoder bygger alle på, at et magnetfelt - det *primære* felt - varierer i tiden og dermed, ifølge Maxwells ligninger, inducerer et elektrisk felt. Dette elektriske felt vil give anledning til, at der løber en elektrisk strøm i ledere, f.eks. i jorden. Denne strøm vil give anledning til elektriske og magnetiske felter - de *sekundære* felter. Når man f.eks. med induktionsspole måler de magnetiske felter, måler man de totale felter, dvs. summen af de primære og de sekundære felter, og der er ingen mulighed for på forhånd at skille dem ad. Det er kun den del af det totale felt, som stammer fra de sekundære felter, der indeholder information om jordens ledningsevneforhold, idet der i gode ledere vil induceres en større strøm end i dårlige ledere.

Der findes en lang række elektromagnetiske metoder til kortlægning af jordens ledningsevneforhold, og i det følgende skal basale begreber til forståelse af den elektromagnetiske frekvensdomænemetode gennemgås. Gennemgangen tager udgangspunkt i en harmonisk oscillerende vertikal magnetisk dipol, som f.eks. kan realiseres med en lille horisontalt liggende spole, hvori der løber en elektrisk strøm med en styrke, som kan beskrives ved en sinusfunktion. Dette benyttes bl.a. i DIGHEM^{VRES} systemet.

Frekvensdomæne- og tidsdomænemetoder

De fleste elektromagnetiske metoder kan henføres til at være enten en frekvensdomænemetode eller en tidsdomænemetode.

Frekvensdomænemetoder fungerer oftest ved, at en sender udsender et harmonisk signal med én bestemt frekvens ad gangen eller flere simultant, og med modtageren måles da enten *amplituden* af det totale felt og *faseforskydningen* i forhold til primærfeltet eller *realdelen* og *imaginærdelen*. Et datum består således af to tal: amplitude og fase eller real- og imaginærdel som funktion af frekvensen og/eller som funktion af afstanden mellem sender og modtager. I nogle sammenhænge bruges også en præsentation i form af *tilsyneladende resistivitet* og *fase*. En fordel ved frekvensdomænemetoderne er, at man ved målingen af én bestemt frekvens kan filtrere den omgivende elektromagnetiske støj fra meget effektivt

via synkron detektering, hvor modtageren er indstillet således, at den kun kan måle senders frekvens. Det er en ulempe, at det primære felt er til stede under måleproceduren, da dette generelt er mange gange større end det sekundære felt, som indeholder informationerne om jordens ledningsevneforhold. Man må derfor enten kunne måle med så stor nøjagtighed, at dette forhold ikke betyder noget, hvilket i praksis er umuligt, eller udkompensere primærfeltet, inden målingen foretages. Denne udkompensering stiller imidlertid meget store krav til, hvor nøjagtigt man kender måleopstillingens geometri, og disse krav er ofte meget vanskelige at opfylde. Kapitel 4 beskriver hvorledes denne udkompensering foregår for DIGHEM^{VRES} systemet, og hvilke konsekvenser det har for processing af de målte data.

Ved tidsdomænetoder måles amplituden af et signal som funktion af tiden. Tidsdomænetoderne fungerer ved, at en sender udsender en puls - typisk slukkes en strøm meget hurtigt - og målingerne foretages først, efter at primærfeltet er forsvundet, dvs. man måler udelukkende det sekundære felt. Dermed slipper man for alle de vanskeligheder, der er forbundet med frekvensdomænetoder angående det primære felt. På den anden side er det nødvendigt at måle det sekundære felt i et stort tidsinterval, inden for hvilket sekundærfeltet vil variere meget i størrelse, typisk med en faktor 10 000 – 1 000 000, altså et meget stort dynamikområde. Signalets karakter er tillige sådan, at man kun i begrænset omfang kan foretage en filtrering af signalet for at undgå den omgivende elektromagnetiske støj, og den enkelte måling er derfor ofte meget støjfyldt. Dette problem kan man imidlertid løse ved at stakke mange målinger, dvs. ved at foretage mange målinger på samme lokalitet og tage gennemsnitsværdien af dem.

I denne rapport sammenlignes fire metoder: to galvaniske metoder, nemlig multielektrodeprofilering, MEP, og kontinuert elektrisk sondering, PACES, og to elektromagnetiske metoder, nemlig den transiente elektromagnetiske metode, TEM, og den helikopterbårne elektromagnetiske metode, HEM. Grundlaget for de galvaniske metoder er velkendt og vil ikke blive gennemgået her. Læserne henvises til *Miljøgeofysiske anvendelser af geoelektriske metoder*, Forelæsningsnoter 1999, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, *Geofysiksarbejdets kursusmateriale* (<http://www.gfs.au.dk>) og M.H. Loke's kompendium *Lecture notes on 2D Resistivity Imaging* (www.abem.se). TEM metoden blev gennemgået i detaljer i GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000). I det følgende vil vi koncentrere os om HEM metoden, som vil være ny for mange læsere.

Elektromagnetisk sondering i frekvensdomænet

De grundlæggende principper for elektromagnetiske frekvensdomænetoder blev præsenteret i 1930'erne med introduktion af slingram-instrumentet, som består af en sender-spole og en modtagerspole. Navnet slingram bruges internationalt og er sammensat af de to svenske ord *slinga*, som betyder løkke eller sløjfe, og *ram*, som betyder ramme. Dette system er et jordbaseret system, men principperne for systemet adskiller sig ikke væsentligt fra de luftbårne systemer.

Metoden er som så mange andre geofysiske metoder udviklet med henblik på malmefforforskning, specielt sulfidforekomster, som er meget gode elektriske ledere. Metoden er

udviklet til også at kunne bruges til generel geologisk kortlægning, men i Danmark er metoden stort set ikke blevet anvendt.

Måleteknik og virkemåde

En frekvensdomænesondering foretages ved at sende en harmonisk varierende strøm igennem en senderspole, samtidigt med at den elektromagnetiske induktion måles i en modtagerspole i form af en elektrisk spænding i spolen. Den harmonisk varierende strøm i senderspolen frembringer et magnetisk felt i omgivelserne, som betegnes primærfeltet eller det inducerende magnetfelt. Det er det felt, man ville måle, hvis senderspolen var placeret i vakuum. For små spoler vil primærfeltet med god tilnærmelse kunne beskrives som en harmonisk oscillerende magnetisk dipol. Dette primærfelt inducerer elektriske strømme i omgivelserne, som igen inducerer sekundære elektromagnetiske felter, osv. Den elektriske spænding, som måles i modtagerspolen, vil have samme frekvens som det primære elektriske signal i senderspolen, men vil have en faseforskydning i forhold til denne. Faseforskydningen såvel som amplituden af det målte signal afhænger af omgivelsernes elektriske og magnetiske egenskaber, og det er naturligvis derfor, at metoden kan anvendes til kortlægning af jordens resistivitetsforhold.

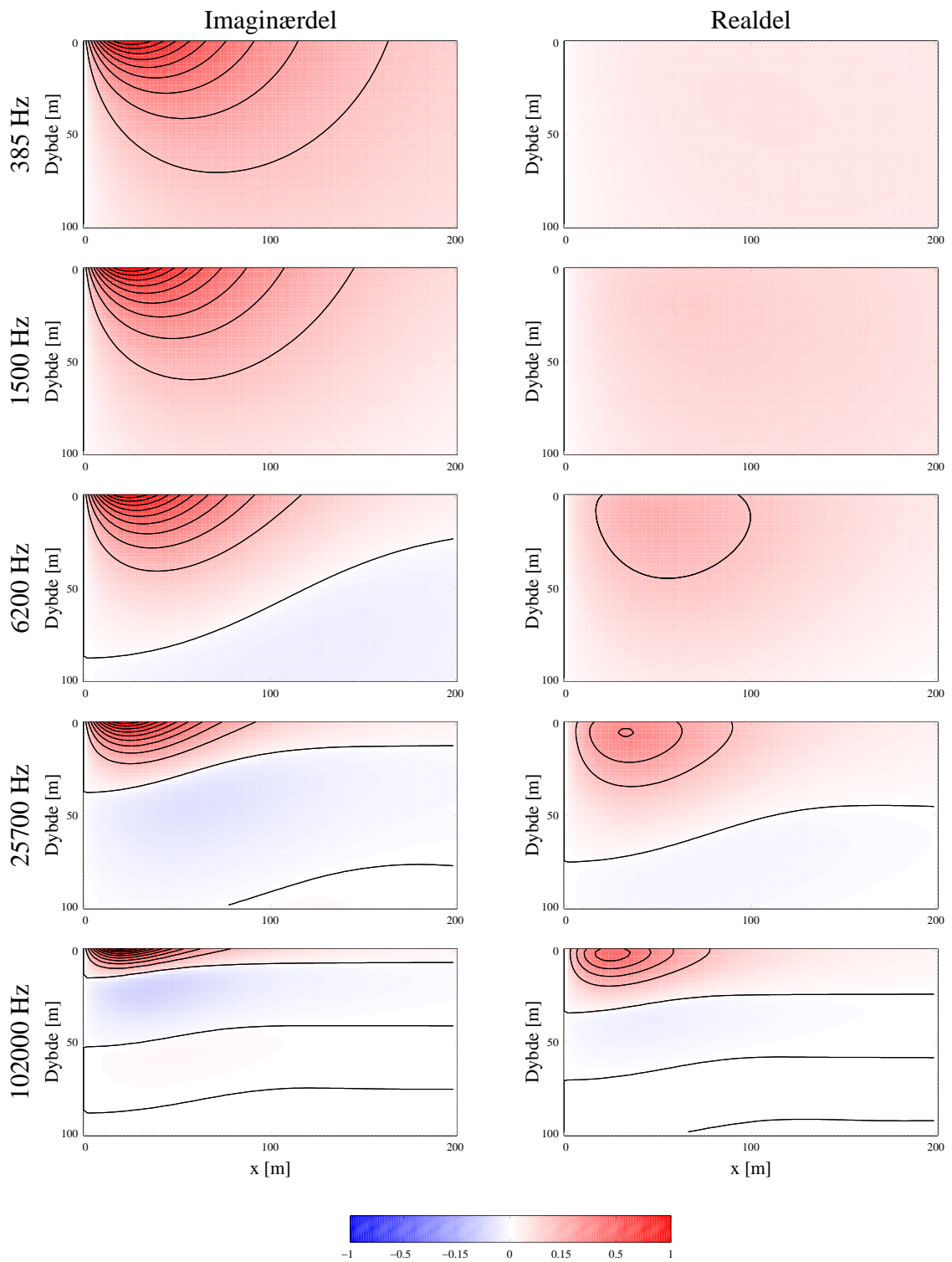
Sender- og modtagerspolernes indbyrdes orientering og afstand samt orienteringen i forhold til jordoverfladen kan varieres i et utal af kombinationer. Ved frekvensdomæne målinger på jorden måles ofte med flere forskellige afstande mellem spolerne for samme lokalitet af senderspolen, mens flybårne systemer af praktiske årsager er begrænset til én fast afstand for en given frekvens. Spoleafstanden for DIGHEM^{VRES} systemet, som blev brugt af Fugro Airborne Surveys i Danmark, var 7.86 m, og spoleafstanden anvendt af BGR var 6.6 m.

En række forskellige konfigurationer af sender- og modtagerspolernes orientering benyttes ved frekvensdomænemålinger. De helikopterbårne målinger foretaget i Danmark er alle gennemført med den horisontale coplanare konfiguration (vertikale magnetiske dipoler), som er den optimale konfiguration for de fleste geologiske forhold i Danmark. Målingerne er alle udført med fem frekvenser. Målingerne, som blev udført af Fugro Airborne Surveys, blev foretaget med frekvenserne 385 Hz, 1.5 kHz, 6.2 kHz, 25.7 kHz og 102 kHz, hvorimod målingerne foretaget af BGR blev udført med frekvenserne 384 Hz, 1.83 kHz, 8.61 kHz, 41.3 kHz og 192.6 kHz.

For en lagdelt jord vil de inducerede strømme i jorden gå i horisontale cirkulære baner, og intetsteds vil strømmen have en retning udad/indad eller opad/nedad. Størrelsen af strømtætheden i et homogent halvrum ses af Figur 2.1. Det elektromagnetiske felt i jorden kan beskrives som en bølge, der dæmpes langs med udbredelsesretningen. Da primærfeltet er på hele tiden, er strømbilledet konstant, bortset fra de ændringer som beskrives ved en harmonisk svingning. Dæmpningen afhænger af den elektriske ledningsevne i jorden. En høj ledningsevne vil betyde en kraftig dæmpning af det elektromagnetiske felt.

Når man betragter Figur 2.1, ser man netop, at strømmen i jorden dæmpes hurtigere med dybden, når frekvensen stiger. Man ser desuden, at strømmen skifter fortegn, når man be-

væger sig ned i jorden, således at der opstår zoner med skiftende strømretninger. For lave frekvenser dominerer strømmens imaginærdel over realdelen, medens de bliver af omtrent samme størrelsesorden for de højere frekvenser. Man ser også, at den laterale udbredelse af strømmen bliver noget mindre for voksende frekvens.



Figur 2.1. Figuren viser real- og imaginærdelen af strømtætheden i et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega m$ for en vertikal magnetisk dipolkilde i højden 35 m over jordoverfladen for fem frekvenser. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens. Afstanden mellem konturlinjerne er 10% af maksimumværdien.

Begrebet skindybde bruges ofte i forbindelse med elektromagnetiske målinger. Hermed forstås den dybde, hvori amplituden er dæmpet med en faktor e (grundtallet af den naturlige logaritme, $e \approx 2.72$) i forhold til amplituden på overfladen, dvs. hvor feltet er reduceret til 37%. For plane elektromagnetiske bølger, som udbreder sig vertikalt igennem et homogent medium, er indtrængningsdybden p givet ved

$$p = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad , p [\text{m}], \rho [\Omega\text{m}], f [\text{Hz}] \quad (1)$$

hvor f er frekvensen, ω er vinkelfrekvensen, μ er den magnetiske permeabilitet, σ er konduktiviteten og $\rho = 1/\sigma$ er resistiviteten. Ligning (1) gælder kun for plane bølger, hvor fasetilstanden til et givet tidspunkt er den samme overalt i et horisontalt plan.

Feltet fra en oscillerende magnetisk dipol vil ikke være plant, og den flade, hvor det er aftaget til 37% (se Figur 2.1), er ikke et horisontalt plan, men ligner nærmest den randform, som anvendes til bagning - dog med et meget lille hul i midten. For et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$ og frekvensen 385 Hz er skindybden defineret ved ligning (1) 181 m , men 37% konturen ligger i dybden 25 m i afstanden 42 m fra dipolens akse, der hvor den ligger dybest. Dette illustrerer, at begrebet skindybde ikke kritikløst kan anvendes på samme måde som for plane felter. Dog gælder det også for dipolfelter, at strømsystemets udseende skalerer i parameteren $\sqrt{\rho/f}$, ligesom det er tilfældet for plane felter.

Real- og imaginærdel, amplitude og fase

Selv om det homogene halvrum må forekomme fjernt fra virkelige geologiske formationer, er beskrivelsen af elektromagnetiske felter for denne type af modeller et vigtigt led i forståelsen af principperne i sonderingsmetoden og essentiel for indførelsen af begrebet tilsyneladende resistivitet. I det følgende vil vi derfor undersøge felterne for en harmonisk oscillerende vertikal magnetisk dipol med frekvensen f placeret i højden h over et homogent halvrum med resistiviteten ρ . I praksis vil den magnetiske dipol frembringes ved hjælp af en horisontal spole, hvori der sendes en strøm, som kan beskrives ved $I \sin(\omega t)$, idet I er strømmens maksimalværdi.

For at beskrive de målte felter korrekt er det nødvendigt at fastlægge en reference for tiden. Vi vil gøre dette ved at se på primærfeltet målt ved modtagerspølen, dvs. feltet som måles ved modtagerspølen, hvis der ikke er nogen påvirkning fra jorden. Det primære magnetiske felt H_p er givet ved

$$H_p = -\frac{N_1 A_1}{4\pi r^3} \cdot I \sin(\omega t) \quad (2)$$

hvor N_1 er antallet af vindinger i senderspølen, A_1 er arealet af spølen, og r er afstanden mellem sender- og modtagerspøle.

Fluxen igennem modtagerspølen med N_2 vindinger og areal A_2 er givet ved

$$\Phi = N_2 A_2 \cdot H_p \quad (3)$$

og den inducerede spænding i modtagerspølen er derfor

$$V_p = \frac{\omega \mu N_1 A_1 N_2 A_2}{4\pi r^3} \cdot I \cos(\omega t) \quad (4)$$

I denne fremstilling har spændingen i modtagerspølen sit maksimum til tiden $t = 0$.

Det sekundære felt, som frembringes af de inducerede strømme i jorden, vil have samme frekvens som det primære felt og vil ligeledes give anledning til, at der induceres en spænding i modtagerspølen. Denne spænding vil have sit maksimum forskudt fra det tidspunkt, hvor spændingen induceret af primærfeltet har sit maksimum – dvs. der er en faseforskydning mellem de to felter. Foruden faseforskellen vil der være en betragtelig forskel i amplituden for de inducerede spændinger. Spændingen induceret i modtagerspølen af sekundærfeltet kan skrives

$$V_s = A_s \cos(\omega t - \phi) \quad (5)$$

hvor ϕ er faseforskydningen (eller blot fasen) og A_s er amplituden. Ved anvendelse af reglerne for trigonometriske funktioner kan ligning (5) skrives som

$$\begin{aligned} V_s &= A_s \cos(\phi) \cos(\omega t) + A_s \sin(\phi) \sin(\omega t) \\ &= A_r \cos(\omega t) + A_i \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

Ligning (6) angiver, at den målte sekundære spænding kan opdeles i en del, som er i fase med spændingen induceret af det primære felt, A_r , og en del, som er drejet 90 grader i forhold til spændingen induceret af primærfeltet, A_i . På engelsk anvendes betegnelserne *in-phase* og *out-of-phase*. Synonymt med *in-phase* og *out-of-phase* bruges betegnelserne henholdsvis *real part* og *imaginary part* (eller *quadrature part*), på dansk *realdel* og *imaginærdel*. Betegnelserne *realdel* og *imaginærdel* viser, at man ofte betragter felterne som komplekse størrelser (vektorer), idet dette giver de simpleste og mest kompakte matematiske beregninger.

Under forudsætning af, at kun sender- og modtagerspølerne er tilstede sammen med jorden under udførelse af målingerne, vil den målte spænding i modtagerspølen bestå af summen af det primære signal fra senderspølen og det sekundære signal fra jorden.

Sekundærfeltet vil være betydeligt mindre end primærfeltet ved modtagerspølen, og real- og imaginærdelen og amplituden udtrykkes ofte i enheden ppm (parts per million). Denne er defineret ved forholdet mellem sekundær- og primærfelt ganget med 10^6 :

$$\text{ppm} = \frac{V_s}{|V_p|} \cdot 1.000.000 \quad (7)$$

Som sagt er det ikke muligt at få en tilstrækkelig nøjagtig bestemmelse af sekundærfeltet, hvis man måler det i det primære felts tilstedeværelse, da det bliver fuldstændigt overdøvet

af primærfeltet. HEM målinger foretages derfor i praksis ved, at der i umiddelbar nærhed af modtagerspolerne er anbragt yderligere nogle spoler, som udkompenserer påvirkningen fra primærfeltet ved modtagerspøls position. Principperne for denne måleteknik vil blive beskrevet nærmere i Kapitel 4 i afsnittet om DIGHEM^{VRES} systemet.

For en endimensional jord, hvor resistiviteten kun afhænger af dybden, kan forholdet mellem spændingerne induceret af henholdsvis sekundær- og primærfelt skrives som

$$Z = \frac{V_s}{|V_p|} = \gamma^3 \int_0^\infty R(\rho(z), f, h, k) k^2 e^{-2k} J_0(\gamma k) dk \quad (8)$$

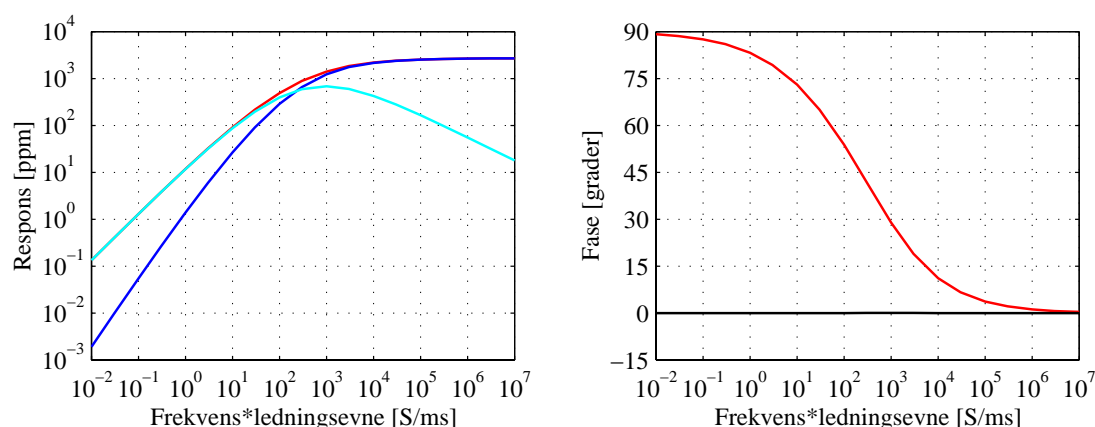
hvor spændingerne er skrevet som komplekse tal, R er en kompleks refleksionskoefficient, som afhænger af resistiviteten som funktion af dybden $\rho(z)$, frekvensen f , højden af spolerne over jordoverfladen h samt af bølgetallet k . Afstanden mellem sender og modtager, r , indgår i variabelen γ , idet $\gamma = r/h$. J_0 er Besselfunktionen af første grad og orden 0.

Felter for et homogent halvrum

For et homogent halvrum er refleksionskoefficienten R givet ved

$$R = \frac{k - \nu}{k + \nu}, \quad \text{hvor } \nu = \sqrt{k^2 + i \cdot 2 \cdot \delta^2} \text{ og } \delta = h/p. \quad (9)$$

Vi vil ikke her gå ind på, hvordan formlerne (8) og (9) er udledt, men kun i Figur 2.2 vise udseendet af funktionen Z som funktion af produktet af frekvensen og ledningsevnen for værdier svarende nogenlunde til DIGHEM^{VRES} systemet ($r = 8$ m, $h = 35$ m). Funktionen afhænger kun af produktet af frekvensen og ledningsevnen, højden h og forholdet mellem spoleafstand og højden, $\gamma = r/h$. I Figur 2.2 er vist real- og imaginærdel og amplitude for sekundærfeltet samt fasen for total- og sekundærfeltet som funktion af σf . Bemærk at totalfeltets fase er næsten nul, dvs. identisk med primærfeltets fase. Det ses af figuren at sekundærfeltet er en meget lille brøkdæl af primærfeltet.



Figur 2.2. Venstre side: real- og imaginærdel af spændingen i modtagerspølen induceret af sekundærfeltet er vist med henholdsvis en mørk og lyseblå linje. Amplituden af spændingen er vist med den røde linje. Alle spændinger er normaliseret med hensyn til amplituden af spændingen induceret af det primære magnetiske felt. Højre side: Fasen af sekundærfeltet (røde linje) og totalfeltet (sorte linje).

For den viste konfiguration ses, at både amplituden og realdelen er monotont voksende funktioner, hvorimod imaginærdelen har et maksimum. Fasen for sekundærfeltet er ligeledes en monoton funktion. Det bør understreges, at de monotone egenskaber ikke er en generel egenskab for en vilkårlig kombination af højde, spoleafstand og skinddybde, idet lokale minima og maksima vil optræde, specielt når spolesystemet er tæt på jordoverfladen.

Den tilsyneladende resistivitet

De monotone egenskaber for amplitude, realdel og fase som funktion af frekvensen, betyder, at det er muligt at beregne resistiviteten ud fra disse parametre for en given frekvens. Derimod er bestemmelsen af resistiviteten fra imaginærdelen ikke entydig.

Den tilsyneladende resistivitet kan beregnes ved at anvende kurverne i Figur 2.2, idet man ud fra enten realdelen, fasen eller amplituden på ordinaten entydigt kan bestemme den tilhørende værdi α på abscissen. Når højden h antages at være korrekt, kan man derefter bestemme den tilsyneladende resistivitet, idet

$$\alpha = \sigma f \Rightarrow \rho_a = \frac{f}{\alpha} \quad (10)$$

Hvis det målte respons stammer fra et homogent halvrum, vil disse estimater være identiske, bortset fra de forskelle som støjfyldte data vil give. Dette vil derimod ikke være tilfældet, hvis det målte respons er fremkommet fra en inhomogen jord. I dette tilfælde vil de tre metoder kunne give forskellige tilsyneladende resistiviteter.

Der vil dog ofte være usikkerheder på højdebestemmelsen, se afsnittet *Støj / HEM* i Kapitel 5. Hvis højden af spolesystemet ikke er kendt eller vurderes som usikker, er det muligt at bestemme en tilsyneladende højde ved først at bestemme værdien af α på abscissen ved hjælp af fasen og derefter anvende denne værdi sammen med funktionen for amplituden til at bestemme en tilsyneladende højde. Den tilsyneladende højde beregnes som

$$h_a = r \left(\frac{A'}{A} \right)^{1/3} \quad (11)$$

hvor A' angiver den aflæste værdi af amplituden på den teoretiske kurve og A er den målte amplitude. Det er mere hensigtsmæssigt at anvende amplituden end at anvende realdelen for bestemmelsen af den tilsyneladende højde. Dette fremgår af Figur 2.2, hvor det ses, at realdelen antager meget små værdier for store indtrængningsdybder, hvorved bestemmelsen bliver meget følsom over for støj. Når den tilsyneladende højde er kendt, indsættes denne i udtrykket for δ (9), og den tilsyneladende resistivitet kan bestemmes ved benyttelse af (1).

I den kvantitative tolkning af frekvensdomænedata er input til inversionsprogrammet de målte værdier for real- og imaginærdele. Der findes således ikke noget behov for først at transformere de oprindelige data til tilsyneladende resistiviteter, og hermed undgås problemerne med flertydighed.

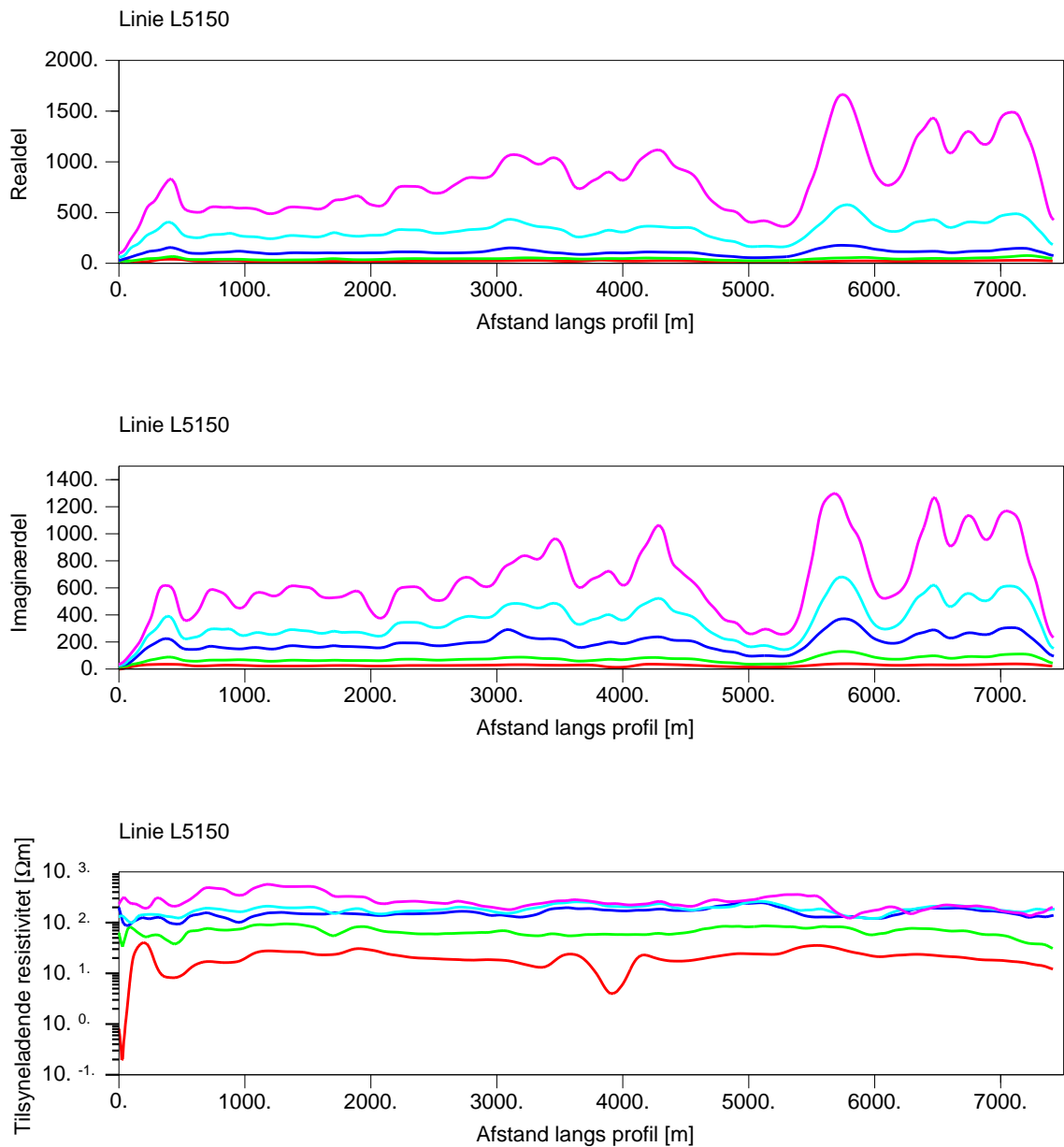
Datapræsentation og approksimative tolkninger

Transformationen af de målte elektriske spændinger til tilsyneladende resistivitet vil give en bedre intuitiv opfattelse af resistivitetsforholdene end en præsentation i form af real- og imaginærdelene af de inducerede spændinger i modtagerenspolen. Man bør dog være opmærksom på, at transformationen, foruden problemerne med flertydigheden, reducerer antallet af data med en faktor to, hvorved information vil gå tabt, hvis man udelukkende baserer den efterfølgende tolkning på den tilsyneladende resistivitet. Figur 2.3 viser et eksempel på data fra undersøgelsen for Viborg Energi, linie L5150. Figuren viser real- og imaginærdelene for de fem frekvenser langs profilet og værdierne for de beregnede tilsyneladende resistiviteter. Indtrængningsdybden er størst for den laveste frekvens, og den viste sektion indikerer derfor, at der langs profilet kan forventes lave elektriske resistiviteter under et mere resistivt lag ved overfladen.

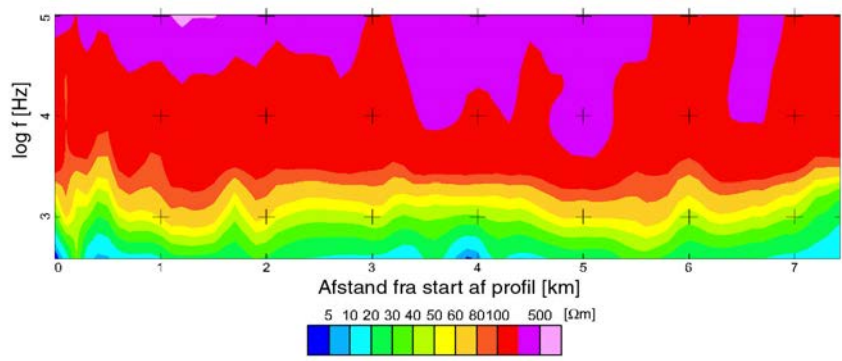
Man kan præsentere de målte data, eller rettere transformationer af data til tilsyneladende resistiviteter, i en såkaldt *pseudosektion* ved interpolation langs profilet. Som dybdeakse kan anvendes logaritmen til frekvensen. Ordet pseudosektion refererer til, at der i disse plot ikke er en angivelse af en egentlig dybde, men at frekvensen afspejler en pseudodybde, idet skinddybden er en funktion af frekvensen. Figur 2.4 viser et eksempel på en sådan pseudosektion.

Forskellige typer af approksimative algoritmer bruges for at transformere pseudosektioner til egentlige dybdesektioner. De mest almindelige er såkaldte *Sengpiel sections* og *differential sections*. En god beskrivelse af disse metoder samt referencer hertil findes i Sengpiel og Siemon (2000). Konvertering til dybde i Sengpiel sections foretages ved, at der for hver frekvens beregnes en dybde, hvorover den ene halvdel af den inducerede strøm vil forløbe. Denne dybde kaldes *centroidedybden*. Ved differential sections beregninger foretages både en transformation af frekvens til dybde og en transformation af de beregnede tilsyneladende resistiviteter til nye estimater af tilsyneladende resistiviteter, der som oftest er bedre approksimationer til de faktiske resistiviteter. Figur 2.5 viser beregnede centroidedybder samt dybder og tilhørende forbedrede tilsyneladende resistiviteter for en differential section tolkning af data.

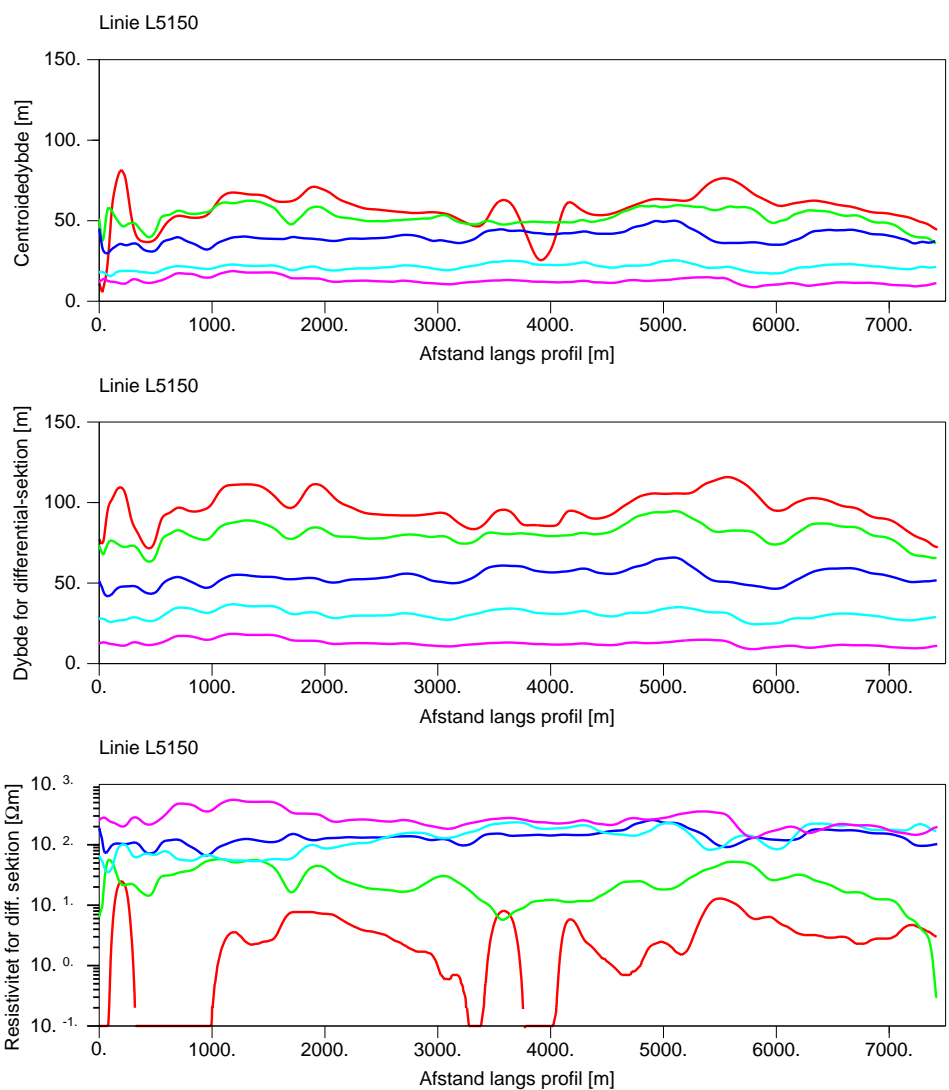
I det øjeblik, man vil tolke et meget stort antal sonderinger, hvilket er nødvendigt for HEM metoden og for flybårne transiente metoder, er det væsentligt at have hurtige, approksimative tolkningsmetoder (imaging eller Sengpiel-sektioner) til rådighed, således at man inden for rimelig tid kan få et overblik over det undersøgte område. For HEM metoden kan fuld nonlinear inversion med 1D modeller gennemføres på 0.1 sekund per datasæt, så med robuste tolkningsmetoder, som fungerer uden den store overvågning, kan en kilometer profil med HEM data tolkes på et halvt minut. Imaging eller Sengpiel-sektioner bliver derfor til stadighed af mindre betydning, jo hurtigere computerne bliver.



Figur 2.3. Figuren viser, øverst, realdele og, i midten, imaginærdele af responset langs et profil i Viborg Amt målt af Fugro Airborne Surveys for Viborg Energi med DIGHEM^{VRES} systemet. Real- og imaginærdele er normeret med primærfeltet og angives i enheden ppm. De anvendte frekvenser er 385 Hz (rød kurve), 1.5 kHz (grøn), 6.2 kHz (mørke blå), 25.7 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). De tilhørende tilsyneladende resistiviteter er vist nederst. [DIGHEM^{VRES} survey for Rambøll, Viborg området.]



Figur 2.4. . Pseudosektion for data vist i Figur 2.3. [DIGHEM^{VRES} survey for Rambøll, Viborg området]



Figur 2.5. Øverst: beregnede centroidedybder for samme profil som vist i Figur 2.3. I midten: dybder og, nederst, resistiviteter beregnet for en differential section tolkning. De anvendte frekvenser er 385 Hz (rød kurve), 1.5 kHz (grøn), 6.2 kHz (mørke blå), 25.7 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). [DIGHEM^{VRES} survey for Rambøll, Viborg området]

Kapitel 3 – Kobling til menneskeskabte installationer

I dette kapitel gennemgås det såkaldte koblingsfænomen. Når man foretager elektromagnetiske målinger på jordoverfladen eller i luften, induceres der strømme ikke alene i jorden, men også i menneskeskabte elektrisk ledende installationer som højspændingsledninger, kabler og hegn. Disse koblingsfænomener forstyrrer målingerne, og hvis de ikke erkendes, kan de give anledning til en forkert tolkning af sonderingerne.

Alvorligheden af koblingsfænomenet for frekvensdomænet metoder vurderes dels ved analogibetrægtninger til den transiente elektromagnetiske metode, for hvilken koblingsfænomenet er velbeskrevet og forstået, dels ved betragtning af målte profiler i Danmark.

Kobling for TEM metoden og HEM metoden

Indledningsvis er det vigtigt at notere, at de galvaniske metoder, MEP og PACES, stort set ikke påvirkes af koblinger til menneskeskabte gode ledere, og det er derfor ikke nødvendigt at holde sikkerhedsafstande til disse. Det betyder, at man kan foretage målinger næsten overalt, og datadækningen med MEP og PACES er dermed mere sikker end for TEM og HEM. For PACES systemet kan der være logistiske problemer med hensyn til at foretage kontinuerte målinger, men MEP målinger kan foretages stort set overalt, selv i bymæssig bebyggelse.

I GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000) blev indflydelsen fra koblingsfænomener fra menneskeskabte installationer vurderet for både jordbaserede og flybårne målinger med den transiente elektromagnetiske metode (TEM). Til grund for denne vurdering havde man et stort erfaringsmateriale fra landbaserede TEM målinger (20 – 30 000 sonderinger). Siden denne rapport's udgivelse er der gennemført detaljerede analyser af en flybåren kortlægning fra Ringkjøbing Amt med GEOTEM systemet, som viser, at vurderingerne fra GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000) angående sikkerhedsafstande holder i praksis. Rapportens konklusioner kan kort sammenfattes til følgende:

Ved jordbaserede TEM sonderinger anbefaler man en sikkerhedsafstand på 100–150 m til ledende installationer for at undgå en forvrængning af de målte data. Ved store installationer, såsom større højspændingsføringer, skal sikkerhedsafstanden være større, 150–200 m. De sidste års erfaringer med DybdeTEM (en TEM metode med større indtrængningsdybde) viser desuden, at det i områder med overvejende høje formationsmodstande, eller hvor de gode elektriske ledere ligger dybt, er nødvendigt at overholde sikkerhedsafstande på 150–250 m for at undgå forvrængning af data til sene tider i henfaldskurven.

Flybårne TEM metoder kobler lige så kraftigt til ledende installationer som jordbaserede målinger, medens styrken af signalet fra jorden er relativt lavere, og dette medfører, at sikkerhedsafstanden skal være 2–4 gange større for flybårne målinger end for jordbaserede målinger.

For et område beliggende i Østjylland eller på Øerne uden større bymæssig bebyggelse reduceres det areal, inden for hvilket der kan laves målinger uden koblingseffekt, typisk til ca. 50%, når man betragter jordbaserede TEM målinger. Det koblingsfrie areal for flybårne TEM målinger blev vurderet til at kunne være så lavt som 20%. En senere grundig analyse af den flybårne undersøgelse fra Ringkjøbing Amt viste, at der resterende 30% af målingerne efter fjernelse af de koblede data. Dette er i god overensstemmelse med GEUS TEM rapportens vurderinger (Christensen *et al.* 2000), idet tætheden af ledende installationer er noget lavere her end i Østjylland og på Øerne. Procentdelen af målinger, som var tilbage efter fjernelse af koblingerne, varierede meget fra linie til linie, mellem 5% og 45%.

Det er et fundamentalt resultat, at det ikke er muligt at reducere koblinger ved en forøgelse af sendermomentet eller en midling over længere tid, ligesom det ikke er muligt at korrigere data. Koblede data må identificeres, og de tilsvarende modeller må fjernes fra de inverterede modelsektioner for at undgå fejlagtige og vildledende tolkninger.

Der er i Danmark foretaget 5 undersøgelser med HEM metoden, men ingen af disse er analyseret kvantitativt for forekomsten af koblinger. Der er derfor ikke et erfaringsmæssigt grundlag for en vurdering af effekter fra koblingsfænomener i data målt med HEM metoden. Der er imidlertid en udstrakt ækvivalens mellem at måle i tidsdomænet og frekvensdomænet, og man kan derfor i generelle termer overføre erfaringer fra TEM metoden til målinger foretaget med HEM metoden. I det følgende vil vi gennemgå de fundamentale forhold omkring koblinger i HEM data i detaljer med udstrakt brug af henvisninger til tilsvarende erfaringer med TEM metoder.

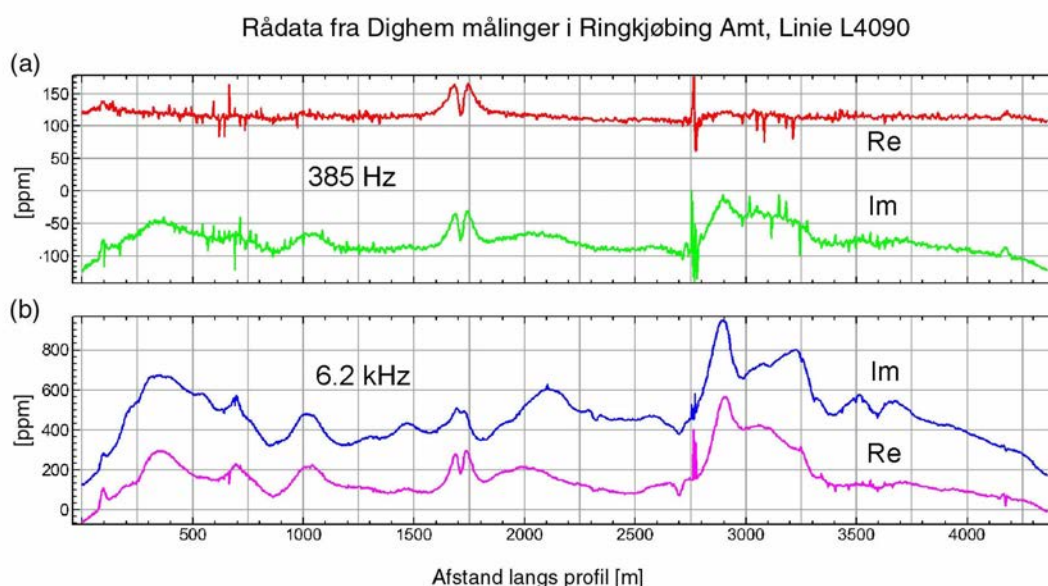
Mekanisme

Når man i forbindelse med HEM metoden udsender et oscillerende magnetfelt fra en senderspole, vil der induceres strømme i alle omkringliggende elektriske ledere og ikke bare i jordformationen. Derfor vil der i menneskeskabte elektrisk ledende installationer som højspændingskabler, jordkabler, metalhegn, jernbaneskiner, autoværn og metalvandrør induceres en strøm, såfremt denne har et lukket kredsløb at løbe i. Hvis ikke afstanden til de ledende installationer er passende stor (se senere), vil magnetfeltet fra disse strømme kunne give anledning til en forvrængning af responserne fra selve jordformationen, idet man i modtagerspolerne måler summen af effekterne af strømmene i jorden og i de ledende installationer. Det vil i mange tilfælde betyde, at man ikke kan foretage en tolkning af de målte data, eller endnu værre, at man foretager en tolkning af forvrængede data uden at være klar over deres forvrængning og dermed får en fejlagtig og misvisende opfattelse af den underliggende jordformation.

Koblingsfænomenerne til menneskeskabte installationer kan inddeles i kapacitive koblinger og galvaniske koblinger, se GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000). De kapacitive koblinger er kendetegnet ved, at installationen opfører sig som en L-C-R kreds, hvis respons er svingende med en amplitude, som falder eksponentielt med tiden. En L-C-R kreds er karakteriseret ved at have både induktans, kapacitans og resistans og kunne f.eks. være et isoleret jordkabel. Strømmen i den koblende kreds løber i den elektriske leder og kapacitivt gennem den isolerende kappe ud i jorden, som så danner returvejen for kredsen.

De galvaniske koblinger opfører sig som en L-R kredsløb, hvis respons ikke svinger, men blot falder eksponentielt med tiden. Strømmen i den koblende kredsløb løber i den elektriske leder og galvanisk ud i jorden enten gennem overfladen af lederen eller gennem jordingspunkter, som så danner returvejen for kredsløbet.

Responser fra koblinger til menneskeskabte ledere er oftest mere lokaliserede end responser fra sedimentære geologiske strukturer. Især i et sedimentært område som Danmark, hvor de laterale ændringer af geologien ofte er langbølgede, viser koblingsresponsen sig for det meste som kortbølgede variationer langs profilet, se Figur 3.1. Man kan vise, at profildata får et karakteristisk "M"-lignende udseende ved overflyvning af en lang lige leder. At koblingen får dette udseende kan forstås ved at betragte den M-formede laterale 1D følsomhedsfunktion for HEM metoden, som vises i Figur 5.5 i Kapitel 5. Koblingen i Figur 3.1 ved profilkoordinat 1700 m har en bredde på ca. 250 m til hver side for 385 Hz og ca. 200 m til hver side ved 6.2 kHz.



Figur 3.1. Figuren viser real- og imaginærdel for de to frekvenser 385 Hz og 6.2 kHz. Ved profilkoordinat 1700 m ses en tydelig kobling ved passage af en større vej. Ved profilkoordinat 2775 m passerer en højspændingsledning.

Erfaringerne fra de mange jordbaserede TEM målinger foretaget i Danmark, specielt fra det kontinuert målede PATEM system, viser, at koblingsforvrængningen hovedsagelig kan ses fra 0.02–0.05 ms og kan fortsætte resten af måleserien ud, til 10 ms. Man har også iagttaget, at forvrængningerne til sene tider har en større lateral udbredelse end forvrængningerne til tidlige tider. Endelig har man erfaret, at ved en travers over en elektrisk installation starter koblingsforvrængningen oftest som en galvanisk kobling, der ændrer sig til kapacitiv kobling centralt omkring installationen, for derefter igen at blive en galvanisk kobling.

Hvis man overfører disse erfaringer til de koblinger, der optræder i forbindelse med kontinuerede profilmålinger med HEM systemet, kommer man frem til følgende vurderinger:

Man må forvente, at responserne fra koblingerne for høje frekvenser er lateralt mindre udbredte end for lave frekvenser.

Man må forvente, at koblingerne ved høje frekvenser primært er af kapacitiv art, fra L-C-R kredse, hvor returvejen går via kapacitiv kobling fra den isolerede leder gennem isolationen ud i jordformationen.

Man må forvente, at koblingerne ved lave frekvenser primært er af galvanisk art, fra L-R kredse, hvor returvejen går via galvanisk kobling fra en elektrisk leder ud i jordformationen ved jordingspunkter.

Årsagen til disse forskelle skal søges i, at overgangsimpedansen gennem isoleringen på isolerede kabler er lille ved høje frekvenser på 50–100 kHz, og derfor bliver returvejen reduceret til en lateralt lille udstrækning. Derudover må man forvente en større dæmpning gennem jordformationen for højere end for lavere frekvenser. På grund af den mindre effektive udstrækning af koblingslegemet for høje frekvenser vil responset aftage hurtigere med afstanden, r , end $1/r^2$.

Erkendelse af koblinger

Det mere detaljerede kendskab til forvrængninger af elektromagnetiske målinger, som stammer fra koblingsfænomener til menneskeskabte installationer, og deres indflydelse på datakvaliteten stammer i høj grad fra målinger foretaget med den slæbetransiente metode, PATEM metoden. Ved denne teknik opnås kontinuerede, tætliggende sonderinger langs et profil, se GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000).

I TEM metoden har man for hvert målepunkt en målt sondering (tidsserie) med mange data, typisk 30, og her har man derfor mulighed for at afgøre graden af kobling både ud fra tidsserien for den enkelte sondering og ud fra forløbet af data langs profilet. Ved at betragte de enkelte transiente sonderinger kan man ofte erkende et koblingsmønster og derefter fjerne koblede data fra datasættet. De kapacitive koblinger giver sonderingskurven et svingende mønster, som ikke kan opstå over en lagdelt jord, og de er dermed lette at identificere. De galvaniske koblinger giver mere eller mindre udbredte "buler" på den enkelte henfaldskurve. Det viser sig, at det kan være forbundet med større vanskelighed at erkende en galvanisk kobling end en kapacitiv kobling ved betragtning af en enkelt transient sondering. Data med forvrængninger fra en galvanisk kobling kan ofte tolkes og giver i den tolkede model en god leder i en mindre dybde end ved tolkning af uforstyrrede data. Betragter man variationen af data fra transiente målinger langs med profilet, er det derimod ofte muligt for den erfarne tolker at identificere en galvanisk kobling ud fra dens betydeligt hurtigere variationsmønster langs profilet, end hvad man måtte forvente af variationer i data fra geologiske strukturer i Danmark.

I HEM metoden er der kun få data til hvert målepunkt, typisk real- og imaginærdel for fem frekvenser, hvilket i praksis medfører, at det er forbundet med stor vanskelighed alene ved visuel inspektion at se koblingsfænomener i de enkelte sonderinger. Identifikationen af koblinger kan foretages ved en betragtning af variationerne langs det målte profil, og det kan tillige være en stor hjælp at plote forskellen mellem rådata og filtrerede data indenfor det undersøgte område, idet man på et fladeplot kan erkende lineamenter, som kan korreleres med infrastrukturer som veje og højspændingsledninger. Eksempler på dette kan ses i Appendiks C. Variationen langs profilet i data fra en enkelt frekvens er ved koblingsfænomenerne for det meste større end den variation, man må forvente i jordresponset fra de danske geologiske strukturer. Derved kan man udvælge datasæt, som efter bedste skøn er uforvrængede, og lægge disse til grund for sin tolkning. Man må være opmærksom på, at de største variationer, der ses, skyldes variationer i flyvehøjden.

Som ovenfor beskrevet må man forvente, at koblingsfænomenerne er betydeligt mere lateralt udbredte for de lave frekvenser end for de høje, dog med den samme karakteristiske "M"-form. Det er ofte sværere at erkende effekter fra koblingsfænomener ved de lave frekvenser end de høje, fordi koblingerne er betydeligt mere lateralt udbredte på grund af koblingslegemets større udstrækning.

Betragter man et profil målt med HEM metoden, se Figur 3.1, ses en række "M" lignende mønstre, som er beliggende ved vejføringer og højspændingsledninger. Disse mønstre stammer fra koblingsfænomener mellem senderspølen og den ledende installation. Signalniveauet er væsentligt større end det omgivende jordresponsniveau, hvilket viser, at koblingsfænomenet har forvrænget de målte data voldsomt.

I den rutinemæssige processeringen af HEM data foretages en lateral midling af data for hver enkelt frekvens langs profilet for at undertrykke den tilfældige støj, og midlingsbredden vælges større, jo højere støjniveauet er. En uønsket effekt af dette er, at effekten af koblinger sløres, og deres udstrækning langs profilet forøges. Det bliver således nærmest umuligt at identificere koblinger på de midlede profiler, hvorved det er mere sandsynligt, at man kommer til at foretage en fejlagtig tolkning af data, og det areal, som er påvirket af koblinger, bliver større. Det er derfor vigtigt at fjerne koblede data fra de rå dataprofiler *inden* filtrering, og det er vigtigt at have adgang til de rå ufiltrerede data for at kunne identificere koblingerne.

Det er ikke praktisk muligt ved HEM metoden at tilrettelægge sine profillinier således, at de ikke skærer ledende installationer. Når man har bestemt sit undersøgelsesområde og taget beslutning om linietætheden, må man tage, hvad der kommer, idet man dog kan undgå at overflyve deciderede byområder.

Korrektionsmuligheder

Koblinger til menneskeskabte installationer kan i modsætning til tilfældig støj ikke reduceres gennem midling af de målte datasæt. Det vil sige, at det ikke hjælper at forøge den tid, hvori der midles. Årsagen hertil er, at det signal, der induceres i de menneskeskabte installationer, er kohærent med det udsendte sendersignal. Forstyrrelsen vil derfor have den

samme karakter som responset fra jorden. Tidslig midling vil fremhæve signalet fra jorden og forstyrrelsen fra menneskeskabte installationer lige meget, hvorimod den tilfældige støj vil blive reduceret.

Forstyrrelser fra koblingerne kan heller ikke reduceres ved at forøge signalstyrken fra senderspølen. En forøgelse af det udsendte magnetiske signal vil forøge jordresponset og koblingsresponset på samme vis, idet der er proportionalitet mellem sendersignalets styrke og koblingsforstyrrelsen.

Man har ofte den fejlagtige opfattelse, at man kan reducere eller fjerne indflydelsen fra koblingsforstyrrelser ved lateral midling af måleresultaterne langs profilet. Denne opfattelse skyldes sandsynligvis, at man ikke skelner mellem den tilfældige støj og det kohærente koblingsrespons. Ganske vist reduceres forstyrrelsens størrelse, men som allerede nævnt vil dette ske på bekostning af, at det bliver vanskeligere at identificere koblingerne, og deres indflydelse vil udbrede sig lateralt og dermed forvrænge betydeligt flere datasæt.

Man kunne forestille sig, at man teoretisk kunne beregne responset fra de ledende installationer og trække det fra data, men dette er ikke muligt i praksis, da situationen er alt for kompleks. For det meste vil koblinger involvere flere forskellige ledende installationer, hver med sin L-C-R karakteristisk, og det er umuligt at vurdere, præcis hvor mange installationer, der er involveret. Desuden er det ikke muligt at vurdere de enkelte kredsløbs L-C-R karakteristisk. Læg dertil, at denne karakteristisk ændrer sig i tid med installationens øjeblikkelige brug og også afhænger af jordens ledningsevnestruktur.

Man må konkludere, som man har gjort for TEM målinger, at det ikke er muligt at foretage en korrektion af data forvrænget af koblingsfænomener. Den eneste holdbare fremgangsmåde er at identificere de koblede data, at fjerne dem fra profilerne inden filtreringen og at fjerne de tilsvarende modeller fra de inverterede modelsektioner for at undgå fejlagtige og vildledende tolkninger.

Sikkerhedsafstande til elektrisk ledende installationer

Koblingen mellem en senderspøle og en elektrisk installation er bestemt af den gensidige induktion. Denne afhænger af fluxen af magnetfeltet fra det ene kredsløb gennem det andet. Da der her er tale om den direkte flux fra senderspølen gennem den elektriske installation, betragtes denne som om, der ingen jord var til stede. Jordens indflydelse på koblingsresponset vil være stærkt begrænset og kun være af betydning for gode ledere.

Betragter man en elektrisk strøm gennem en lang lige leder, højspændingskabel, jernbane, kabel ved vej etc., gælder det, at dens magnetfeltet er omvendt proportional med afstanden. Det betyder, at koblingen mellem sender og leder er omvendt proportional med afstanden, uanset om senderen befinder sig på jorden eller i luften. Koblingen mellem lederen og modtagerspølen er ligeledes omvendt proportional med afstanden, uafhængig af om modtagerspølen befinder sig på jorden eller i luften. Derfor aftager koblingsresponset for en lang lige leder med afstanden i anden potens, dvs. den er proportional med $1/r^2$, hvor r er

afstanden mellem leder og målesystem. En lige elektrisk leder kan opfattes som lang, når længden af den er mindst 6 gange afstanden til den.

For lige elektriske ledere, der har en begrænset længde, kan man vise, at koblingsresponsen aftager som $1/r^4$. En lige elektrisk leder kan opfattes som begrænset, når længden af den er mindre end 6 gange afstanden til den.

En lukket elektrisk kreds af begrænset udstrækning har et koblingsrespons, som aftager som $1/r^6$. En begrænset udstrækning betyder, at et middelmål for kredsen er mindre end 6 gange afstanden til kredsen.

Ud fra disse betragtninger kan man se, at koblingsforstyrrelserne fra de lange lige ledere såsom højspændingsføringer, kabler langs veje, jernbaner, metalautoværn og lange dyrehegn, er skyld i de mest udbredte koblingsforstyrrelser. De mere begrænsede menneskeskabte installationer såsom små indhegninger og bygningsinstallationer er ikke nær så store syndere i denne sammenhæng på grund af det hurtigere henfald af koblingsresponsen.

Koblingsresponsen afhænger overvejende af frekvensen, installationstypen og afstanden til denne og har omtrent samme størrelse, hvad enten den omgivende jord har høj eller lav resistivitet. Dette betyder, at for jordmodeller med høj resistivitet og dermed lavt respons, bliver koblingsresponsen af relativt større betydning, og sikkerhedsafstanden skal dermed være stor. For jordmodeller med lav resistivitet og dermed højt respons, bliver koblingsresponsen af relativt mindre betydning, og sikkerhedsafstanden skal dermed være mindre.

Når man kvantitativt skal vurdere den nødvendige sikkerhedsafstand til ledende installationer for HEM målinger, må man betragte de tilsvarende forhold for TEM målinger, og man må forsøge at afveje den relative betydning af frekvensen, typen af installationen og afstanden til denne. For jordbaserede TEM målinger anbefaler man som sagt generelt en sikkerhedsafstand på 100–150 m til ledende installationer, og for store installationer såsom større højspændingsføringer skal sikkerhedsafstanden være større, 150–200 m. I områder med overvejende høje formationsmodstande, eller hvor de gode elektriske ledere ligger dybt, er det nødvendig at overholde sikkerhedsafstande på 150–250 m for at undgå forvrængning af de sene tider i henfaldskurven.

For HEM metoden er der ikke jordbaserede målinger at sammenligne med. Det målte HEM respons fra jorden aftager hurtigt med målehøjden, typisk med en faktor 10–50 i forhold til en jordbaseret måling og mest for de høje frekvenser. Dette er en voldsommere højdeafhængighed, end man finder ved TEM målinger, jævnfør afsnittet om højdeafhængighed i Kapitel 2 og 5. Til gengæld vil koblingsresponsen erfaringsmæssigt aftage hurtigere med afstanden for de høje end for de lave frekvenser.

På baggrund af en betragtning af de data, vi har haft til rådighed, vil vi vurdere, at sikkerhedsafstanden vil være af størrelsesordenen 50–100 m for de højeste frekvenser, medens den skal være noget større for de lavere frekvenser, af størrelsesordenen 100–250 m. Disse afstande vil i mange tilfælde, på grund af den store koncentration af menneskeskabte elektrisk ledende installationer i Danmark, reducere størrelsen af de områder, man kan kortlægge. I et typisk område på landet i Østjylland eller på Øerne kan der være koblingfor-

styrrelser på op til 20–40% af et område for de højeste frekvensers vedkommende, mens forstyrrelser for de laveste frekvensers vedkommende kan optræde på et område, der er op til dobbelt så stort.

Det er af væsentlig betydning, at koblede data fjernes fra de målte profiler inden de filtreres, da koblingerne ellers vil blive udtværede over et større stykke. Man må i den forbindelse erindre, at koblingerne har "haler", dvs. de fylder mere end de hurtige (kortbølgede) variationer, som man identificerer dem på. Såfremt man foretager tolkningerne på de filtrerede data, må man fjerne de modeller, som fremkommer på de lokaliteter, hvor der optræder koblinger eller på anden måde indikere, at resultaterne skal tages med stort forbehold.

En præcisering af disse vurderinger må afvente en detaljeret analyse af flere datasæt fra danske undersøgelser.

Kapitel 4 – Beskrivelse af de valgte systemer

Målesystemerne, som er medtaget i denne rapport, beskrives i dette kapitel. Såvel Fugro Airborne Surveys som Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) anvender et helikopterbåret system, som i sin oprindelige udformning benævnes DIGHEM systemet. Fugro markedsfører to typer, DIGHEM^{VRES} (V for fem frekvenser) og det nyudviklede DIGHEM^{RESOLVE} med seks frekvenser, mens BGR anvender en modificeret udgave af DIGHEM^{VRES} systemet. I det følgende anvendes navnet DIGHEM-BGR for systemet fra BGR. Tre jordbaserede systemer er medtaget i rapporten: den traditionelle metode til enkeltstående transiente elektromagnetiske sonderinger repræsenteret ved PROTEM 47 systemet og to galvaniske systemer, Kontinueret Elektrisk Sonderingsmetode, PACES (Pulled Array Continuous Electrical Sounding), og Multielektrodeprofilering (MEP).

Det indledende arbejde med denne rapport inkluderede også et flybåret frekvensdomænesystem fra Finlands Geologiske Undersøgelse som en repræsentant for et flybåret system af fastvinge-typen. De indledende undersøgelser viste dog at mulighederne for kvantitative tolkninger af data fra dette system er meget begrænsede for de flyvehøjder, som må forventes for et fastvingefly i Danmark. Systemet anvender kun to frekvenser, og analyser for dette system er derfor ikke medtaget i rapporten.

Foruden beskrivelsen af de nævnte systemer, er der i dette kapitel medtaget en beskrivelse af nogle fundamentale begreber vedrørende målemetoder.

Generelt om elektromagnetiske og galvaniske systemer

Selvom formålet med både de elektromagnetiske metoder og de galvaniske (eller DC-geoelektriske) metoder er ens, nemlig en kortlægning af jordens elektriske ledningsevne, er der meget væsentlige forskelle mellem disse metoder. Kortfattet kan forskellen udtrykkes ved, at de elektromagnetiske metoder *inducerer* en strøm i jorden uden jordkontakt, medens de galvaniske metoder sender en strøm gennem jorden via den *polarisation*, som etableres via en spændingsforskel mellem elektroder med jordkontakt. Der er også forskel på, hvorledes de to metoder reagerer på jordens resistivitetsforhold: de galvaniske metoder kortlægger *forholdet mellem resistiviteter* eller, ækvivalent hermed, forholdet mellem konduktiviteter, medens de elektromagnetiske metoder kortlægger jordens *absolutte konduktivitet*. Dette betyder, at de galvaniske metoder kortlægger gode og dårlige ledere stort set lige godt, medens de elektromagnetiske metoder er meget dårlige til at skelne høje resistiviteter fra hinanden, blot de er højere end ca. 60–80 Ωm , dvs. hvor konduktiviteten er lille. Omvendt kortlægges dybden til gode ledere vældig godt, og de elektromagnetiske metoder skelner fint mellem resistiviteterne for gode ledere, selv om de ligger tæt på hinanden. Alle elektriske og elektromagnetiske fænomener styres af Maxwells ligninger, og de galvaniske metoder specielt af Ohms lov.

Elektromagnetiske systemer

De elektromagnetiske metoder klassificeres efter, hvilken variation strømmen i senderspølen gennemløber. Der skelnes mellem *tidsdomænesystemer* og *frekvensdomænesystemer*. I princippet er der det samme informationsindhold i de to forskellige datatyper, men på grund af forskellige måletekniske forhold er der i praksis væsentlige forskelle.

Betegnelsen tidsdomænesystem anvendes helt ækvivalent med transient system. Denne type målinger er kendetegnet ved, at en tidsperiode med strøm gennem sendersløjfen efterfølges af en periode, hvor der ikke udsendes strøm. Disse tidsperioder har en varighed af nogle få millisekunder. Det *primære* magnetfelt dannes af strømmen i sendersløjfen, og ændringer i primærfeltet inducerer elektriske strømme i jorden, som vil vedblive at løbe i jorden, efter at strømmen er slukket i sendersløjfen. Strømtætheden i jorden vil være størst omkring tidspunktet, når strømmen afbrydes i sendersløjfen, og vil aftage hurtigt i tiden derefter. Det er dette kortvarige pulsagtige forløb af strømstyrken, som har givet anledning til benævnelsen *transient* system og transiente målinger. Henfaldet af magnetfeltet fra strømmene i jorden, *sekundærfeltet*, måles i modtagerspølen, og de målte data præsenteres som en funktion af tiden. Dette har givet anledning til betegnelsen tidsdomænesystem. Nogle transiente systemer, f.eks. de flybårne, måler både i det tidsrum, hvor der løber en strøm i sendersløjfen, og i tiden derefter. Disse måleperioder betegnes henholdsvis *on-time* og *off-time*.

I modsætning til transiente systemer sendes der i frekvensdomænesystemer kontinuerligt strøm gennem en senderspøle. Bølgeformen i senderspølen består af en eller flere sinusbølger. Ved anvendelse af mere end én frekvens kan målingerne enten foretages én ad gangen eller samtidigt. Det registrerede signal i modtagerspølen vil være af tilsvarende karakter, dvs. sinusbølger, hvor størrelsen af *amplituden* og *faseforskydningen* (eller *real-del* og *imaginær-del*) i forhold til det udsendte signal afspejler jordens elektriske egenskaber. Disse amplituder og faseforskydninger indeholder information om jorden og præsenteres som en funktion af frekvensen. Denne måde at præsentere målingerne på har givet anledning til betegnelsen *frekvensdomænesystem*.

En grundlæggende forskel mellem et transient system og et frekvensdomænesystem er, at de transiente systemers målinger i off-time foregår på et tidspunkt, hvor der ikke sendes strøm gennem senderspølen, hvorimod frekvensdomænesystemerne altid vil have en strøm i senderspølen. Målinger for transiente systemer i off-time vil udelukkende være påvirket af sekundærfeltet, dvs. det felt som indeholder information om jorden. Ved målinger med frekvensdomænesystemer vil modtagerspølen være påvirket af summen af det sekundære og det primære felt. Eftersom primærfeltet er meget større end det sekundære felt, bliver man nødt til at udkompensere primærfeltet, for at det ikke totalt skal overdøve signalerne fra sekundærfeltet. Ved at installere yderligere spoler mellem sender- og modtagerspølen søger man at udslukke primærfeltet helt ved modtagerspølen.

Afstanden mellem sender- og modtagerspølen i elektromagnetiske systemer er en væsentlig systemparameter. Udviklingen af de luftbårne systemer kendetegnes ved to typer. Den ene type er karakteriseret ved at have lang afstand mellem sender- og modtagerspøle i forhold til dimensionen af senderspølen. Dette er f.eks. tilfældet for de luftbårne transiente

systemer GEOTEM og TEMPEST, hvor modtagerspølen befinder sig over 100 m fra flyet og dermed fra senderspølen. Den anden type er karakteriseret ved, at senderspølen og modtagerspølen befinder sig i umiddelbar nærhed af hinanden. Dette er ofte tilfældet for frekvensdomænetoderne. Fordelen ved en lang afstand mellem sender- og modtagerspølen er, at små ændringer i konfigurationens geometri under flyvningen kun påvirker måleresultaterne moderat. Eftersom magnetfeltet i nærheden af senderspølen varierer meget kraftigt, vil en lille afstand mellem sender- og modtagerspøle stille store krav til stabiliteten af sender- og modtagerspølernes indbyrdes afstand.

Galvaniske systemer

For de galvaniske metoder (DC-geoelektriske metoder) antager man, at strømmene i jorden ikke ændrer sig med tiden i det øjeblik, hvor målingen foretages (DC: *direct current*). Strømmene i jorden genereres ved, at der mellem to elektroder påtrykkes en elektrisk spænding ved hjælp af et batteri. Strømsystemet vil give anledning til forskelle i det elektriske potentiale i jorden, og målinger af disse indeholder information om jordens elektriske ledningsevne. Som regel gennemføres en måling som en middel over målinger foretaget gentagne gange med strømmen gående skiftevis i begge retninger. Dette gøres for at eliminere indflydelsen fra selvpotentialer i jorden, dvs. potentialer, der ikke skyldes den galvaniske kilde, samt off-set i målesystemerne.

Valg af systemer

I rapporten diskuteres to helikopterbårne frekvensdomænesystemer og tre jordbaserede systemer, nemlig

- DIGHEM^{VRES} systemet fra Fugro Airborne Surveys og det modificerede DIGHEM-BGR system fra BGR
- PROTEM 47 systemet fra Geonics Ltd
- PACES systemet fra Aarhus Universitet
- MEP systemet

DIGHEM^{VRES} systemet er valgt af flere årsager. Systemet er det mest anvendte system for helikopterbårne frekvensdomænetoder og har desuden været anvendt i de undersøgelser, der allerede er foretaget for nogle danske amter. Systemet har været anvendt ved forskellige typer af projekter, som omfatter såvel mineralprospektering som hydrogeofysiske undersøgelser. Ved udvælgelse af de helikopterbårne systemer har vi lagt vægt på, at de alle er kommercielt tilgængelige systemer. Man bør være opmærksom på, at et nyt DIGHEM system, DIGHEM^{RESOLVE}, med seks frekvenser nu også tilbydes kommercielt af Fugro Airborne Surveys.

PROTEM 47 er det mest anvendte og bedst kendte system til jordbaserede enkeltstående transiente sonderinger i Danmark, og vi har valgt at medtage dette system som et referencsystem. PROTEM 47 systemet kan anvendes i mange forskellige konfigurationer, men

den oftest anvendte konfiguration er central loop konfigurationen, som også er den, der analyseres i denne rapport.

PACES systemet består af to faste strømelektroder med en afstand på 30 m, som sammen med en række potentialelektroder er fastgjort på et kabel, som trækkes gennem landskabet efter et lille bæltekøretøj, medens der til stadighed måles i alle 8 elektrodekonfigurationer. Der udtages en måling for hver ca. 1.5 m.

MEP systemet består af et mindre antal kabler med ækvidistante elektrodeudtag med enhedsafstande mellem 2 og 10 m, som rulles ud på jorden. Elektroder stikkes i jorden og forbindes med kablet, som er forbundet med måleudstyret. Dette består af en feltcomputer, som styrer en relæenhed, der udvælger de fire elektroder, der skal benyttes ved målingen, og et resistivetsinstrument. I måleproceduren gennemløbes en protokol af forskellige elektrodekonfigurationer, og målingerne gemmes på computeren. De fleste systemer anvender en *roll-along* teknik, hvor man først måler de elektrodekonfigurationer, der involverer det yderste kabel, hvorefter dette kan flyttes hen til den anden ende af opstillingen, medens de andre konfigurationer måles.

I det følgende gives en systematisk gennemgang af de undersøgte systemer. Det bør bemærkes, at andre konfigurationer er mulige for systemerne. Parametrene, som angives herunder, er anvendt ved analyserne i denne rapport.

DIGHEM systemet

De angivne parametre er for DIGHEM^{VRES} med mindre andet er specificeret.

- Ejerskab: Fugro Airborne Surveys Ltd. Pty. efter opkøb af Geoterrex-Dighem Ltd. Ét system ejes af BGR.
- System: Helikopterbårent magnetisk og frekvensdomæneelektromagnetisk.
- Platform: Helikopter.
- Flyvehastighed: ca. 30 m/s.
- Nominel flyvehøjde: 60 m.

Sender

- Sendersløjfs orientering: Spolerne er placeret i en beholder ophængt ca. 30 m under flyet. Spoleaksen er vertikal for målingerne udført i Danmark og for de syntetiske data vist i denne rapport. Andre senderorienteringer er mulige. Spoleorienteringen kan ændres fra vertikal rettet akse til horisontal rettet akse langs med flyveretningen.
- Der anvendes én sendersløjfe per frekvens.
- Sendersløjfs nominelle højde over terræn: 30 m. Den faktiske middelhøjde er ofte ca. 35 m, og der er i analyserne i denne rapport overalt regnet med en højde på 35 m.
- Frekvenser : Frekvenserne kan variere noget mellem forskellige målekampagner. For målingerne i Danmark med DIGHEM^{VRES} er anvendt 385 Hz, 1.5 kHz, 6.2 Hz, 25.7 kHz og 102 kHz. For målingerne med DIGHEM-BGR er anvendt 384 Hz, 1.83 kHz, 8.61 kHz, 41.3 kHz og 192 kHz. For DIGHEM^{RESOLVE} systemet har Fugro Airborne Surveys foreslået en frekvens på 1789 Hz som frekvens no. 6 i en koaksial konfiguration.

- Dipolmoment : For DIGHEM^{VRES}
- 385 Hz: 310 Am²
- 1.5 kHz: 175 Am²
- 6.2 kHz: 70 Am²
- 25.7 kHz: 35 Am²
- 102 kHz: 18 Am²

Sendermomenterne for DIGHEM^{RESOLVE} systemet afviger ikke væsentligt fra DIGHEM^{VRES} systemet.

Modtager

- Komposanter: Vertikalretningen af feltet er registreret for målingerne i Danmark, dvs. spoleaksen er vertikal. Der anvendes én modtagerspole per frekvens. Spoleorienteringen kan ændres fra vertikal rettet akse til horisontal rettet akse langs med flyveretningen.
- Konfiguration: Sender og modtagerspolerne ligger i samme horisontale plan med en indbyrdes afstand på 7.86 m for målingerne i Danmark. For DIGHEM-BGR systemet er spoleafstanden ca. 6.6 m. Afstanden varierer her en anelse med frekvensen. Fugro Airborne Surveys har til undersøgelser i Danmark foreslået at DIGHEM^{RESOLVE} anvendes med en koaksial konfiguration for frekvens nummer 6 foruden de ordinære fem frekvenser svarende til DIGHEM^{VRES} systemet.
- Nominel højde over terræn: Samme som senderspole, dvs. 30 m.
- Sensortype: induktionsspole.

Magnetisk system

- Type: Cæsiumdamp. Digital registrering
- Følsomhed: 0.001 nT.
- Magnetometer output interval: 0.1 s (~3 m)
- Højde over terræn: 20 m under helikopteren.
Navigation
- GPS receiver: Differential GPS.
- Videokamera: Ja.

Kalibrering

De to mest fundamentale komponenter i Dighem systemet er sender- og modtagerspolerne. Foruden disse to komponenter og selve dataindsamlingsenheden består systemet af en række andre komponenter med afgørende betydning for systemets evne til at måle de meget svage sekundære elektromagnetiske felter fra jorden. Systemets kompleksitet betyder, at det er af afgørende betydning, at det er muligt at undersøge systemets respons for kendte værdier af magnetfeltet ved modtagerspolerne, de såkaldte kalibreringsmålinger. Resultatet fra kalibreringerne bruges ved den endelige bearbejdning af de målte data fra de ordinære målinger. Kalibrering af instrumentet er nødvendig, idet beregninger baseret udelukkende på elektromagnetisk teori og opmålte værdier for spolekonfigurationen ikke er tilstrækkeligt gode til at forudsige systemets karakteristisk. Ændringer i spoleafstanden ned

til 0.1 mm giver væsentlige ændringer i systemets respons. I det følgende beskrives nogle af komponenterne i målesystemet og procedurerne for kalibrering.

I Kapitel 2, Figur 2.2, fremgik det, at primærfeltet er væsentligt større end det sekundære felt, og at fasen for det totale felt stort set er den samme som for primærfeltet. I praksis vil det ikke være muligt at foretage en nøjagtig måling af sekundærfeltet under tilstedeværelse af det primære felt ved modtagerspølen. Det primære felt fjernes derfor ved modtagerspølerne ved at der i nærheden af de fem modtagerspøler placeres nogle mindre spøler (engelsk *bucking coils*), hvori det primære felt inducerer en spænding, som igen inducerer et varierende magnetfelt ved modtagerspølerne. Det inducerede felt fra disse bucking coils har en størrelse og retning som netop udkompenserer det primære felt ved positionen af modtagerspølerne. Denne procedure benævnes på engelsk *primary field bucking* og foretages ved starten af hver målekampagne.

Foruden placeringen af bucking coils i nærheden af modtagerspølerne placeres ferritstave i nærheden af hver modtagerspøle. Disse ferritstave giver kun anledning til et respons som er i fase med det primære signal i senderspølen. Dette benyttes til at foretage en elektronisk justering af registreringsenheden for hver frekvens, således at den målte fase netop er nul i forhold til det primære signal. Denne procedure benævnes som fasekalibrering. Fasekalibreringen foretages dagligt.

Ved begyndelsen og afslutningen af en målekampagne foretages der kalibrering ved hjælp af eksternt placerede spøler, hvori det primære signal inducerer en spænding. De eksterne spøler er placeret således, at spændingen i disse inducerer et signal i modtagerspølerne, hvor realdelen er præcis lig med imaginærdelen og ca. 200 ppm af primærfeltet. Der foretages derefter en justering i den elektroniske forstærkning, således at output fra forstærkerne er 200 ppm af primærfeltet. Foruden registreringen af kalibreringssignaler fra de eksterne spøler foretages der også registreringer af signaler fra interne kalibreringsspøler (Q-coils) umiddelbart før eller efter den eksterne kalibrering. Disse interne kalibreringsspøler benyttes også under selve målekampagnen, idet der foretages en kalibrering med de interne spøler i stor flyvehøjde før opmåling af en linje. Herved opnås ved sammenligning med resultaterne fra den kombinerede eksterne og interne kalibrering foretaget i begyndelsen af en målekampagne, at eventuelle ændringer i systemets karakteristik kan registreres og senere benyttes ved behandlingen af de ordinære måledata. Idet den interne kalibrering foretages ved stor målehøjde (>250 m), hvor responset fra jorden er forsvindende lille, kan en reference for fasen og forstærkningen (gain) defineres for de efterfølgende målinger. Eventuelle ændringer i fasen og forstærkningen mellem to interne kalibreringer afspejler drift i systemets responskarakteristik. Der korrigeres for disse ændringer under antagelse af linearitet med hensyn til tiden. Hvorvidt antagelsen om linearitet er en god tilnærmelse vil afhænge af flere faktorer. Målesystemets responskarakteristik er følsom over for temperaturændringer og deraf følgende termisk udvidelse af materialet. Der vil forekomme forskelle i temperatur, når systemet befinder sig i højder over 250 m ved kalibreringen og ved højder på 30 m ved de ordinære målinger. Der må ligeledes forventes svingninger i temperaturen som følge af varierende påvirkning fra solens stråler under flyvningerne. Mekaniske påvirkninger som følge af lufttryk vil også påvirke systemet.

PROTEM 47 systemet

- Producent: Geonics Ltd.
- Ejerskab: Systemet er kommercielt tilgængeligt og anvendes af en lang række private firmaer og offentlige institutioner.

Sender

- Sendersløjffens orientering: Kvadratisk udlæg på jorden med kantlængde 40 m.
- Sendersløjffens højde over terræn: På jordoverfladen.
- Sendersløjffens areal: 1600 m².
- Antal vindinger: 1.
- Kurveform: Den nominelle bølgeform er en bipolar firkantbølge. Slukketid på 0.0025 ms.
- Maksimalt sendermoment (dipolmoment): 4800 Am²
- Maksimal strømstyrke: 3 A.
- Grundfrekvens: 25 Hz, 62.5 Hz eller 237.5 Hz afhængig af segmentet. Med PROTEM 47 systemet måles i tre segmenter, der har en del overlap. Hvert segment består af 20 logaritmisk fordelte målevinduer (gates). Således er der i alt 60 målepunkter i en hel måleserie.
- Halv periodelængde: 20 ms, 8 ms eller 2.1 ms, afhængig af segmentet.
- Varighed af on-time (pulsbredde): 10 ms, 4 ms eller 1.05 ms, afhængig af segmentet.
- Varighed af off-time efter hver puls: 10 ms, 4 ms eller 1.05 ms, afhængig af segmentet.
- Måling af sendersløjffens orientering under dataindsamling: Statisk konfiguration; normalt ingen egentlig opmåling.
- Stabilisering af sendersløjffens orientering under dataindsamling: Ingen. Der benyttes en statisk konfiguration som afhænger af topografien.

Modtager

- Komposanter: Vertikalkomposanten måles.
- Konfiguration: Central loop.
- Højde over terræn: På jordoverfladen.
- Sensortype: induktionsspole.
- Antal vindinger: 8.
- Effektivt areal: 31.4 m², båndbredde 450 kHz.
- Samplingsfrekvens: Baseret på tidsvinduer (kan ikke ændres).
- Samplingsinterval: Baseret på tidsvinduer (kan ikke ændres).
- Specifikation af filtre (afskæringsfrekvens og orden): 243 kHz førsteordensfilter og 430 kHz andenordens filter.
- Digitalisering af det målte signal: AD-converter.
- Måling af modtagerens orientering under dataindsamling: Statisk opstilling. Normalt ingen egentlig opmåling. Afhænger af operatøren.
- Stabilisering af modtagerens orientering: Afhænger af operatøren.

Dataprocessering

- Kalibreringsprocedure: kalibreres på testlokalitet.
- Datasorterings- og udvælgelsesprocedure: Ingen.

- Stakningsprocedure: Rå stak.
- Filtreringer: Modtagerspølsens og forstærkernes afskæringsfrekvenser.

Tidsvinduer, starttid, sluttid, centertid, bredde

Tiderne er målt fra slutningen af turn-off rampen.

Gate nr.	Starttid (millisek.)	Sluttid (millisek.)	Centertid (millisek.)	Bredde (millisek.)
1	0.006	0.0077	0.00685	0.0017
2	0.0077	0.0102	0.00895	0.0025
3	0.0102	0.01396	0.01208	0.00376
4	0.01396	0.01748	0.01572	0.00352
5	0.01748	0.02262	0.02005	0.00514
6	0.02262	0.02972	0.02617	0.0071
7	0.02972	0.03718	0.03345	0.00746
8	0.03718	0.04702	0.0421	0.00984
9	0.04702	0.06118	0.0541	0.01416
10	0.06118	0.07522	0.0682	0.01404
11	0.07522	0.09038	0.0828	0.01516
12	0.09038	0.11882	0.1046	0.02844
13	0.11882	0.15238	0.1356	0.03356
14	0.15238	0.19222	0.1723	0.03984
15	0.19222	0.23758	0.2149	0.04536
16	0.23758	0.31242	0.275	0.07484
17	0.31242	0.38558	0.349	0.07316
18	0.38558	0.48642	0.436	0.10084
19	0.48642	0.62358	0.555	0.13716
20	0.62358	0.77842	0.701	0.15484

Very high (VH) segmentet:

Gate nr.	Starttid (millisek.)	Sluttid (millisek.)	Centertid (millisek.)	Bredde (millisek.)
1	0.0447	0.0519	0.0483	0.0072
2	0.0519	0.0619	0.0569	0.01
3	0.0619	0.0767	0.0693	0.0148
4	0.0767	0.0913	0.084	0.0146
5	0.0913	0.1107	0.101	0.0194
6	0.1107	0.1393	0.125	0.0286
7	0.1393	0.1697	0.1545	0.0304
8	0.1697	0.2083	0.189	0.0386
9	0.2083	0.2657	0.237	0.0574
10	0.2657	0.3223	0.294	0.0566
11	0.3223	0.3917	0.357	0.0694
12	0.3917	0.4903	0.441	0.0986
13	0.4903	0.6357	0.563	0.1454
14	0.6357	0.7843	0.71	0.1486
15	0.7843	0.9777	0.881	0.1934
16	0.9777	1.2663	1.122	0.2886
17	1.2663	1.5617	1.414	0.2954
18	1.5617	1.9643	1.763	0.4026
19	1.9643	2.5157	2.24	0.5514
20	2.5157	3.1343	2.825	0.6186

High (HI) segmentet:

Gate nr.	Starttid (millisek.)	Sluttid (millisek.)	Centertid (millisek.)	Bredde (millisek.)
1	0.09	0.11	0.1	0.02
2	0.11	0.132	0.121	0.022
3	0.132	0.17	0.151	0.038
4	0.17	0.206	0.188	0.036
5	0.206	0.256	0.231	0.05
6	0.256	0.326	0.291	0.07
7	0.326	0.404	0.365	0.078
8	0.404	0.5	0.452	0.096
9	0.5	0.64	0.57	0.14
10	0.64	0.784	0.712	0.144
11	0.784	0.958	0.871	0.174
12	0.958	1.202	1.08	0.244
13	1.202	1.578	1.39	0.376
14	1.578	1.922	1.75	0.344
15	1.922	2.438	2.18	0.516
16	2.438	3.122	2.78	0.684
17	3.122	3.918	3.52	0.796
18	3.918	4.862	4.39	0.944
19	4.862	6.258	5.56	1.396
20	6.258	7.822	7.04	1.564

De ovennævnte tre segmenter har betydeligt overlap. I modelleringen af 2D responser (Kapitel 7) er beregningerne foretaget således, at responset udregnes for ét sammenhængende segment. Følgende simplificerede tidsvinduer er derfor anvendt (bemærk, at tidsintervallet er det samme):

Gate nr.	Starttid (millisek.)	Sluttid (millisek.)	Centertid (millisek.)	Bredde (millisek.)
1	0.00600	0.00770	0.00685	0.00170
2	0.00770	0.01020	0.00895	0.00250
3	0.01020	0.01396	0.01208	0.00376
4	0.01394	0.01746	0.01570	0.00352
5	0.01748	0.02262	0.02005	0.00514
6	0.02262	0.02972	0.02617	0.00710
7	0.02972	0.03718	0.03345	0.00746
8	0.03718	0.04702	0.04210	0.00984
9	0.04702	0.06118	0.05410	0.01416
10	0.06118	0.07522	0.06820	0.01404
11	0.07522	0.09038	0.08280	0.01516
12	0.09038	0.11476	0.10257	0.02438
13	0.11476	0.13930	0.12703	0.02454
14	0.13930	0.16970	0.15450	0.03040
15	0.16970	0.20830	0.18900	0.03860
16	0.20830	0.26570	0.23700	0.05740
17	0.26570	0.32230	0.29400	0.05660
18	0.32230	0.39170	0.35700	0.06940
19	0.39170	0.49030	0.44100	0.09860
20	0.49030	0.63570	0.56300	0.14540
21	0.63570	0.78430	0.71000	0.14860
22	0.78430	0.97770	0.88100	0.19340
23	0.97770	1.23410	1.10590	0.25640
24	1.23410	1.57800	1.40605	0.34390
25	1.57800	1.92200	1.75000	0.34400
26	1.92200	2.43800	2.18000	0.51600
27	2.43800	3.12200	2.78000	0.68400
28	3.12200	3.91800	3.52000	0.79600
29	3.91800	4.86200	4.39000	0.94400
30	4.86200	6.25800	5.56000	1.39600
31	6.25800	7.82200	7.04000	1.56400

Magnetisk system

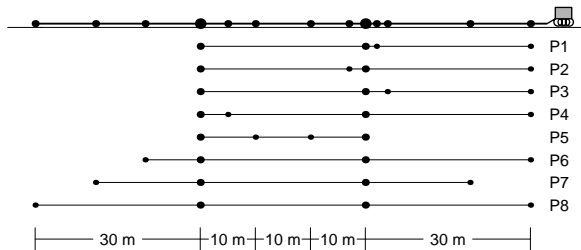
Ingen.

Navigation

- GPS receiver: Ingen.
- Videokamera: ingen.

PACES systemet

PACES systemet består af to faste strømelektroder med en afstand på 30 m, som sammen med en række potentialelektroder er fastgjort på et kabel, som trækkes gennem landskabet efter et lille bæltekøretøj, medens der til stadighed måles i alle 8 elektrodekonfigurationer. Den totale længde af slæbet er ca. 100 m. I Figur 4.1 ses de otte forskellige elektrodekonfigurationer. To af konfigurationerne er Wenner konfigurationer med lige stor afstand mellem alle elektroder, nemlig en 10 m Wenner og en 30 m Wenner konfiguration.



Figur 4.1. Figuren viser de otte elektrodekonfigurationer for PACES systemet

Over strømelektroderne udsendes en alternerende firkantspænding på 20 Hz og potentialerne på potentialelektroderne samples to gange for hver halvperiode. Der udregnes en løbende middel over 1 s, idet de målte signaler udsættes for en prediktiv filtrering. Den løbende middelværdi samples for hver 1 s svarende til ca. 1.5 m langs profilet. To personer kan gennemføre 10–15 km profil pr. feldag.

De målte data efterprocesseres, idet der foretages en lateral midling med midlingsbredder af samme størrelsesorden som en typisk længde for elektrodekonfigurationen, dog mindst over den strækning, der er mellem de endelige data. De endelige data er hidtil blevet udtaget for hver 10 m, men praksis går i retning af en afstand på 5 m.

Positionerne for potentialelektroderne for PACES systemet ses i nedenstående tabel, idet det må erindres, at strømelektroderne for alle konfigurationer er placeret i +15 m og -15 m.

Konfiguration	Potentialelektrode 1 [m]	Potentialelektrode 2 [m]
P1	+45	17
P2	+45	12
P3	+45	19
P4	+45	-10
P5	+45	- 5
P6	+45	-25
P7	+45	-34
P8	+45	-45

Navigationen ved PACES undersøgelser foregår ved GPS positionering af profilernes knæpunkter.

MEP systemet

MEP systemet består af et mindre antal kabler, ofte fire, med ækvivalente elektrodeudtag med enhedsafstande mellem 2 og 10 m, som rulles ud på jorden. Stålelektroder stikkes i jorden og forbindes med kablet, som er forbundet med måleudstyret. Dette består af en feltcomputer, som styrer en relæenhed, der udvælger de fire elektroder, der skal benyttes ved målingen, og et resistivitetsinstrument. I måleproceduren gennemløbes en protokol over forskellige elektrodekonfigurationer, og målingerne gemmes på computeren. De fleste systemer anvender en *roll-along* teknik, hvor man først måler de elektrodekonfigurationer, der involverer det yderste kabel, hvorefter dette kan flyttes hen til den anden ende af opstillingen, medens de andre konfigurationer måles.

Over strømelektroderne udsendes en alternerende firkantspænding, hvor længden af de perioder, hvor strømmen er på og slukket, kan programmeres. Målingerne gentages et vist antal gange, og der udregnes en middelværdi for at reducere den effektive støj. To personer kan gennemføre 1–2 km profil per feltdag med et system med en enhedselektrodeafstand på 5 m.

I denne rapport har vi betragtet et system, med en enhedsafstand på 5 m og i alle analyser og tolkninger er det forudsat, at der er målt i Wennerkonfigurationer med afstandene 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100 og 120 m.

For en yderligere beskrivelse af MEP metoden se M.H. Loke's kompendium *Lecture notes on 2D Resistivity Imaging* (kan downloades gratis fra www.abem.se).

Kapitel 5 – Tolkning, analyse og følsomhed

I dette kapitel gennemgås fundamentale forhold og problemstillinger omkring, hvad det vil sige at tolke elektriske og elektromagnetiske data, og hvorledes det foregår i praksis. Desuden beskrives, hvad en modelanalyse er, og hvorledes den skal forstås.

For at kunne vurdere, hvor godt man kan bestemme jordens resistivetsforhold på baggrund af et givet datasæt, er det nødvendigt at have en kvantitativ beskrivelse af støjen på data. I det følgende opstilles en model for støjen på data for de fire målemetoder, og de specielle forhold omkring helikopterbårne data gennemgås.

Forskellige dele af jorden bidrager forskelligt til målingerne, og den måde hvorpå bidragene er fordelt, siger noget fundamentalt om de forskellige systemers evne til at opløse jordens resistivetsforhold. Fordelingen beskrives ved følsomhedsfunktioner, og en række af disse vises for de fire forskellige målesystemer.

Inversion af geofysiske data

Alle fysiske love, som de udtrykkes i matematikkens sprog, er formuleret *forlæns*; dvs. hvis vi kender fordelingen af de fysiske parametre i rum og tid, så vil løsningen af ligningerne, som styrer fænomenet, dvs. beregning af modelresponsen, tillade os at forudsige resultatet af en bestemt måling.

Denne tingenes tilstand synes ideel for alvidende skabninger, hvis arbejde det er at udfolde universet. Men når vi ønsker at forøge vores viden om omverdenen, f.eks. at finde en model for variationen af ledningsevnen i undergrunden ud fra et sæt målinger af elektriske og/eller elektromagnetiske felter, har vi det modsatte af et forlæns problem: et *omvendt* eller *inverst* problem. Eftersom alle vore matematiske og numeriske teknikker er formuleret forlæns, er der i almindelighed ingen direkte løsning til det inverse problem, og den eneste fremgangsmåde er at løse det forlæns problem for en række modeller og derefter sammenligne de udregnede responser med de faktisk målte data for at se, hvilken model der bedst tilpasser de målte data. Fundamentalt set går alle dybsindighederne i geofysisk inversion ud på at gøre netop dette, idet man vælger rækkefølgen af forlæns beregninger så intelligent som muligt og derved minimerer den nødvendige regnetid.

De elektriske og elektromagnetiske responser fra jorden er ikke-lineære funktioner af jordens resistivetsforhold, og det inverse problem må løses ved en iterativ tilpasning til data, idet man for hvert skridt løser et lineariseret problem.

Alle geofysiske metoder har en begrænset opløsningsevne, dvs. man kan ikke kortlægge vilkårligt små detaljer i jorden. Med elektriske og elektromagnetiske metoder kan man ikke opløse meget små resistivetsvariationer i jorden, men man kan bestemme de overordnede strukturer. En analyse af, hvad de enkelte metoder kan opløse, præsenteres i Kapitel 6 og 7.

En- og todimensionale modeller for jordens resistivetsforhold

Jordens resistivetsstruktur er uendeligt kompliceret i forhold til det, vi kan magte med matematisk-fysiske beregninger. For at kunne foretage beregninger opstiller man derfor en *model* af jordens resistivetsstruktur. En sådan model er altid en forsimplende abstraktion, idet den er opbygget således, at den beskriver resistivetsvariationer ved hjælp af et begrænset antal *parametre*. Der er to forhold, der afgør, om en given model er god eller ej, nemlig dens *relevans* og *beregnelighed*. Modellen skal være kompleks nok til at kunne beskrive de forhold, vi er interesserede i - den skal være relevant - og den skal på den anden side være simpel nok til, at vi kan regne på den - den skal være beregnelig.

Den hyppigst anvendte model for jordens resistivetsforhold er den endimensionale (1D) jordmodel, ifølge hvilken resistiviteten kun er en funktion af dybden. Yderligere antages som oftest, at resistiviteten kan beskrives ved en række planparallelle lag, hvor resistiviteten er homogen og isotrop, dvs. den er konstant inden for hvert enkelt lag og afhænger ikke af retningen. Denne model er naturligvis en grov forenkling af den faktiske kompleksitet af jordens resistivetsvariation, men kan anvendes med rimelighed, hvor afvigelserne fra endimensionalitet kun er moderate, dvs. hvor den laterale ændring af resistivetsforholdene er moderat.

I denne rapport er anvendt to slags 1D modeller til tolkning af data: fålagsmodeller og mangelagsmodeller. Fålagsmodeller indeholder - som navnet siger - få lag, oftest 2–4, og i inversionen ændres både resistiveter og lagtykkelser for at tilpasse data. Modellen er karakteriseret ved sine *modelparametre*: resistiveterne og tykkelserne af hvert enkelt lag, og fålagsmodellen indeholder dermed $2L - 1$ modelparametre, hvor L er antallet af lag. Mangelagsmodellerne indeholder typisk 10–20 lag og defineres ofte således, at lagtykkelserne stiger med dybden. Laggrænsernes beliggenhed fastholdes under inversionen. Det er altså kun resistiveterne af lagene, der er modelparametre, og mangelagsmodellen indeholder dermed L modelparametre.

I en 2D model varierer resistiviteten både vertikalt og lateralt. Den realiseres oftest ved, at man underinddeler jorden i et netværk af celler, hver med sin resistivitet, og tolkningen består i at finde resistiveterne i hver celle. Det er klart, at en 2D model indeholder væsentlig flere modelparametre end en 1D model, af størrelsesordenen 100 gange flere.

Iterativ mindstekvadraters inversion

Når man vil løse et inversionsproblem, er der to ting, man vil opnå: man vil gerne finde den bedste model, og man vil gerne have et mål for pålideligheden af den model, man har fundet.

Den bedste model er den, hvis modelrespons bedst tilpasser data, og som eventuelt samtidig opfylder en række andre nærmere definerede kriterier. Eksempelvis er det ved tolkning med fålagsmodeller et meget anvendt kriterium at begrænse antallet af lag til et minimum, samtidig med at modelresponsen har en acceptabel tilpasning til de målte data. Som mål for, at en model tilpasser data bedst, anvendes ofte et mindste kvadraters kriterium, idet

man søger at finde den model, som minimerer summen af kvadraterne på forskellen mellem data og modelrespons, *residualet*.

Den iterative tilpasning af f.eks. en 1D fålagsmodel foregår i en række trin:

- Tolkingsprogrammet gives en startmodel, som er et kvalificeret gæt på en model, der kan tilpasse data. Programmet udregner herefter responset for denne model og udregner residualet mellem data og responset fra startmodellen.
- Man skal nu finde ud af, hvorledes man skal ændre modellen, således at modelresponset tilpasser data bedre. Hertil har man brug for at vide, hvorledes modelresponset ændrer sig, hvis man ændrer modellen, dvs. man må beregne de afledede af modelresponset mht. modelparametrene for alle data og alle modelparametre. Disse afledede etablerer en tilnærmet lineær sammenhæng mellem forskellen mellem data og modelrespons og ændringer i modelparametrene, og derefter løses et lineært problem for at finde ændringerne til modelparametrene.
- Modellen opdateres nu med de fundne ændringer, og man beregner responset fra den nye model. Dette sammenlignes med data, og man beregner det nye residual, som gerne skulle være mindre end det foregående.
- Processen gentages, indtil man har fundet den bedste model, dvs. indtil residualet ikke længere bliver afgørende mindre eller er under en fastsat værdi.

I praksis kan der være problemer med at få ovenstående proces til at konvergere mod den bedste model, men der er metoder til at afhjælpe dette, som ikke vil blive gennemgået her.

Analyse af usikkerheden på modelparametrene

Pålideligheden af den fundne model er givet ved en kvantitativ vurdering af usikkerheden på modelparametrene, og den foretages ved beregninger, der ligner dem, der er involveret i den iterative tilpasning til data. På basis af kendskabet til, hvorledes modelresponset ændrer sig, når man ændrer modelparametrene, og med en vurdering af usikkerheden på data, kan man beregne usikkerheden på modelparametrene. En sådan analyse er foretaget under en lineær tilnærmelse, og den er således kun kvantitativt pålidelig for små usikkerheder. For store usikkerheder vil analysen ikke være kvantitativt pålidelig, men vil dog stadig være et udtryk for, at en parameter er dårligt bestemt eller ubestemt. At analysen er lineær betyder, at hvis usikkerheden på data bliver dobbelt så stor, bliver også usikkerheden på parametrene dobbelt så stor.

I de følgende kapitler vil vi præsentere analyser af 1D tolkninger af en række 1D modeller og 1D tolkninger af 2D modeller. I disse analyser er usikkerheden på modelparametrene angivet som en relativ usikkerhed, Δ_{rel} . Denne relative usikkerhed er fremkommet som en absolut usikkerhed på logaritmen til parametrene, hvilket betyder, at en relativ usikkerhed, Δ_{rel} , på modelparameteren, p , kan udtrykkes ved, at p ligger i intervallet

$$\frac{P}{\exp(\Delta_{\text{rel}})} < p < P \cdot \exp(\Delta_{\text{rel}})$$

hvor "exp" angiver eksponentialfunktionen.

Usikkerheden på modelparametrene afspejler, at der generelt er flere forskellige modeller, der alle vil være gode tolkninger af data. Man siger, at de er *ækvivalente*. I visse situationer kan disse modeller endda være meget forskellige, og de har fået specielle navne som f.eks. højmodstandsækvivalens og lavmodstandsækvivalens. Mange forhold betinger, hvor godt en modelparameter bliver bestemt. Usikkerheden på modelparametrene bliver større jo større usikkerheden på data er, og usikkerheden bliver også større, jo mindre datadækningen er, dvs. jo mindre forholdet mellem antallet af data og antallet af modelparametre er. Det betyder, at usikkerheden på modelparametrene vokser, jo flere parametre man indfører i modellen, f.eks. ved at indføre flere lag i den model, man tolker sine data med. Populært kan man udtrykke det ved at sige, at informationsindholdet i data bliver fordelt på flere parametre, og derfor bliver der mindre information til hver. Det er derfor passende, hvis man anvender fålagsmodeller, og hvis man ikke har anden information, at tolke sine data med den simpleste model, dvs. den model, der har færrest lag, og som giver en acceptabel tilpasning til data.

1D mangelagsmodeller og 2D modeller - glatte modeller

For 1D mangelagsmodeller og sædvanlige 2D modeller påbegyndes iterationerne oftest med en homogen halvrummodel. Der er således ikke brug for en individuel vurdering af hvert datasæt for at finde en passende startmodel, hvilket er en stor fordel ved tolkning af store datasæt, og der er sædvanligvis ikke problemer med konvergens.

For 1D mangelagsmodeller og sædvanlige 2D modeller er der mindst lige så mange modelparametre som data, hvilket medfører, at alle modelparametre bliver ubestemte. Det afspejles i at mange - og meget forskellige - modeller kan tilpasse data, så ud over at modellen skal tilpasse data, forlanger man tillige, at resistivitetsvariationerne skal være gradvise, dvs. man indfører et glathedskrav til modellen. For 1D mangelagsmodeller forlanger man glathed i den vertikale retning, og for 2D modeller i både vertikal og horisontal retning. Herved undgås urealistiske modeller med meget stærkt varierende resistiviteter indenfor et lille område, men det medfører også, at bratte resistivitetsovergange, f.eks. ved skarpe laggrænser, fremtræder udtværede i modellen. For tiden arbejdes der med udviklingen af programmer til 2D tolkning af geoelektriske data, der har mulighed for skarpe laggrænser i modellen.

Regnetid og tolkningsmuligheder for de fire metoder

Forholdene angående regnetid for 1D modeller er meget forskellige for de fire metoder. For de geoelektriske metoders vedkommende kan man i vore dage tolke ca. 50 sonderinger i sekundet, for HEM data kan man tolke omkring 10 datasæt i sekundet, medens en tolkning af en transient sondering typisk tager et par sekunder. Der er altså omtrent en størrelsesorden i forskel på regnetid mellem de forskellige datatyper.

Det tager meget længere tid at regne på 2D modeller end på 1D modeller, og desuden kræves der langt flere data til at bestemme det større antal parametre i 2D modellerne. Enkeltstående datasæt, f.eks. en enkelt TEM sondering, kan kun retfærdiggøre en 1D tolkning. Profilorienterede data fra MEP, PACES og HEM åbner mulighed for 2D tolkninger.

For MEP data har man i en årrække haft kommerciel adgang til brugervenlige tolkningsprogrammer, der anvender 2D modeller, f.eks. RES2DINV (Loke & Barker 1996). Regnetiden for inversion af et af de profiler, som er vist i Kapitel 7, er ca. 4 timer.

PACES data tolkes for tiden dels med individuelt tolkede 1D modeller, dels med sammenbundne 1D tolkninger, såkaldte LCI (Laterally Constrained Inversion) tolkninger. I LCI tolkningen tolkes de enkelte datasæt stadig med 1D modeller, men man forlanger, at resistivtets- og dybdevariationer i 1D modellerne skal være gradvise langs profilet. Man har altså et lateralt glathedskrav. Dette medfører en større grad af lateral kontinuitet og også en bedre bestemmelse af de dårligt bestemte parametre.

For HEM data ville det i dag være inden for mulighedernes rækkevidde at lave 2D tolkninger, men denne mulighed tilbydes ikke for tiden af de udbydende selskaber. Data tolkes med 1D modeller, eller der fremstilles blot transformationer af data i form af tilsyneladende resistivitetskort. Med simple 1D modeller er tolkningen af de målte data fra en flybåren målekampagne overkommelig. Typisk er der 3–5 m mellem de indsamlede datasæt, så der kan være 2 – 300 000 sonderinger per 1 000 km flyprofil. Hvis man vil tolke alle datasæt, kan det lade sig gøre at tolke 1 000 km profil på ca. 7 timer, men der kræves robuste inversionsmetoder, der kan arbejde uden indgriben fra en operatør.

For TEM data er der stadig et stykke vej til 2D tolkninger, og der anvendes udelukkende 1D tolkninger. Der arbejdes dog på udvikling af hurtige, approksimative 2D tolkningsmetoder. Til illustration af regnetidsproblemet kan det nævnes, at beregning af responset på en moderne PC (2002) af de 2D modeller, som omtales i Kapitel 7, tager 15 min for PACES modellerne, som er beregnet for hver meter over 2 400 m, 1 time for MEP modellerne, som er beregnet for hver 2.5 m over et stykke på 2 400 m, 68 timer for TEM responset, som er beregnet for hver 100 m over 1 600 m, og ca. 34 timer for HEM responset, som er beregnet for hver 20 m over 1 600 m. Til sammenligning beregnes et respons fra en 1D trelagsmodel på brøkdeler af et sekund på en moderne PC. Regnetiderne er sammenfattet i nedenstående Tabel 5.1

Metode	Regnetid/målepunkt	Målepunkter	Regnetid for profil
HEM	25 min	81	34 t
MEP	4 s	960	1 t
PACES	0.4 s	2400	15 min
TEM	4 t	17	68 t

Tabel 5.1. Tabellen viser regnetiderne for 2D modellerne af de fire responstyper.

Utilstrækkelighed og inkonsistens

Ud over at data er fejlbehæftede, kan de også være *utilstrækkelige* og *inkonsistente*. Utilstrækkeligheden består i, at man kun har målt i et begrænset antal målepositioner og, for hver position, med et begrænset antal konfigurationer. For geoelektriske data har man et begrænset antal strøm/potentialelektrodeafstande, for HEM data har man normalt kun én spoleafstand og et begrænset antal frekvenser, og for TEM data måles i et begrænset tidsinterval og med en begrænset båndbredde. Et reelt eksisterende datasæt er derfor ikke ideelt, men tilbyder kun en begrænset information, som man må forsøge at få det bedste ud af gennem inversionen. Utilstrækkelighedsaspektet ved virkelige data betyder, at det er begrænset, hvor komplicerede modeller man kan tage i anvendelse til tolkning af data, idet informationsindholdet i data ikke rækker til at bestemme mere end nogle få parametre. Dette vil vise sig ved, at man f.eks. kan tolke data med en tolagsmodel, selv om de stammer fra en model med flere lag.

At data er inkonsistente betyder, at de ikke er i overensstemmelse med den jordmodel, man har antaget, som oftest en 1D model. Der er altså træk ved data, som ikke kan stamme fra en 1D model, uanset hvilken model man forsøger at tolke dem med. Det kan f.eks. være indflydelse fra 2D og 3D strukturer, såkaldte *2D effekter*, på lokaliteter, hvor jordens resistivitetsforhold ændrer sig for meget lateralt til at kunne tolkes med en 1D model, f.eks. betydelig topografi. Det kan også være koblinger til menneskeskabte gode ledere (se Kapitel 3), som kan forstyrre data på en sådan måde, at de ikke kan stamme fra en 1D model.

Om 1D tilnærmelsen til jordens ledningsevnestruktur er en brugbar approksimation eller ej, afhænger af skalaen for afvigelserne fra endimensionalitet. Hvis jorden inden for det volumen, der bidrager til målingen, er omtrent endimensional, er det en god approksimation, ellers ikke. For HEM og TEM metoden gælder, at dette volumen kan tilnærmes med en cylinder med centrum i opstillingens centrum, en dybde svarende til den maksimale sonderingsdybde og en radius lig med det dobbelte af sonderingsdybden. En frekvensdomæne sondering til 50 m dybde vil altså inddrage et volumen med ca. 100 m radius. Mere præcist kan man sige, at det område, indenfor hvilket jorden skal være rimeligt endimensional, er bestemt ved følsomhedsfunktionen for den pågældende måling. Følsomhedsfunktionerne for de fire metoder er vist og beskrevet i slutningen af dette kapitel.

En bestemt type af afvigelse fra endimensionalitet er de såkaldte *overfladenære inhomogeniteter*, dvs. resistivetsvariationer meget tæt på overfladen. For geoelektriske metoder er disse af stor betydning, idet den målte spændingsforskel er meget stærkt påvirket af ledningsevneforholdene tæt på potentialelektroderne og i mindre grad ved strømeelektroderne. For PACES metoden, som midler over 1–1.5 m under måleprocessen, reduceres indflydelsen fra de mindre overfladenære inhomogeniteter i forhold til MEP målinger. De overfladenære inhomogeniteter spiller en meget mindre rolle for såvel transiente målinger i central loop konfigurationen som for frekvensdomæne målinger, idet man måler magnetfeltet og ikke det elektriske felt. Magnetfeltet fremkommer som en integration over strømmen inden for det område, hvor strømmen forløber, og mindre inhomogeniteter spiller derfor ikke så stor en rolle.

I visse tilfælde vil inkonsistensen i data vise sig så tydeligt, at man ved, at en 1D tolkning ikke er retfærdiggjort eller skal tages med stort forbehold. En værre situation er det imidlertid, at man sommetider kan tilpasse data ganske udmærket med en 1D model, selv om de ikke stammer fra en 1D jord, hvilket betyder, at man ikke vil fatte mistanke til tolkningen, som imidlertid vil være mere eller mindre fejlagtig.

Ækvivalenser

Da man altid kun har et begrænset antal målinger, og da de målte data altid er behæftet med målefejl, vil der altid være en række modeller, der alle tilpasser data lige godt inden for måleusikkerheden. Disse modeller kaldes *ækvivalente*. I visse tilfælde er denne ækvivalens meget udtalt, dvs. at der i mængden af ækvivalente modeller er store forskelle i modelparametrene. De vigtigste af disse særlige ækvivalenser for 1D modeller er højmodstandsækvivalens, lavmodstandsækvivalens, resistivitetsækvivalens og lagundertrykkelse.

Højmodstandsækvivalens

For et højmodstandslag mellem lag med lavere resistivitet vil det være vanskeligt at bestemme resistivitet og tykkelse uafhængigt af hinanden, medens det ofte vil kunne lade sig gøre at bestemme lagets resistans, dvs. produktet af tykkelse og resistivitet. Som tommelfingerregel kan man sige, at når tykkelsen af laget bliver to gange den samlede tykkelse af de overliggende lag, vil man kunne bestemme lagets parametre hver for sig.

Højmodstandsækvivalens optræder for de galvaniske metoder, MEP og PACES, men ikke for de elektromagnetiske metoder, TEM og HEM.

Lavmodstandsækvivalens

For et lavmodstandslag mellem lag med højere resistivitet vil det være vanskeligt at bestemme resistivitet og tykkelse uafhængigt af hinanden, medens det ofte vil kunne lade sig gøre at bestemme lagets konduktans, dvs. forholdet mellem tykkelse og resistivitet. Som tommelfingerregel kan man sige, at når tykkelsen af laget bliver to gange den samlede tykkelse af de overliggende lag, vil man kunne bestemme lagets parametre hver for sig.

Lavmodstandsækvivalens optræder både for de galvaniske metoder, MEP og PACES, og for de elektromagnetiske metoder, TEM og HEM.

Resistivitetsækvivalens

Medens den geoelektriske metode er følsom over for de relative resistivitetsændringer i undergrunden, er de elektromagnetiske metoder følsomme over for jordens absolutte ledningsevne. Det betyder, at de elektromagnetiske metoder er gode til at finde de gode ledere og ligeledes gode til at skelne mellem forskellige gode ledere, men dårlige til at finde højmodstandslag og skelne mellem lag med høje resistiviteter. Generelt kan man sige, at de elektromagnetiske metoder ikke kan skelne mellem høje resistiviteter, bare de er over 60–80 Ωm , og resistiviteten af højmodstandslag vil være ubestemt, med mindre laget er meget tykt. Dette medfører dog ikke automatisk, at lagets tykkelse også er ubestemt.

Resistivitetsækvivalens optræder ikke for de galvaniske metoder, MEP og PACES, men kun for de elektromagnetiske metoder, TEM og HEM.

Lagundertrykkelse

Lagundertrykkelse optræder, hvor et lag ikke selvstændigt giver sig til kende i en sondering foretaget over lagserien, og hvor man derfor kan tolke sonderingen uden dette lags tilstedeværelse. Lagundertrykkelsen afhænger af lagets tykkelse og resistivitet, men generelt kan siges, at tynde lag kan være til stede i lagserien, uden at det fremgår af tolkningen.

Lagundertrykkelse optræder både for de galvaniske metoder, MEP og PACES, og for de elektromagnetiske metoder, TEM og HEM.

Credo

Ovenstående betragtninger understreger et fundamentalt forhold ved data og modelparametre. Et datum er *to* tal: nemlig en værdi af det pågældende datum (som angiver informationsindholdet) og en værdi af usikkerheden på det pågældende datum (som angiver informationens usikkerhed).

Uden kendskab til et datums usikkerhed er det ikke muligt at foretage en meningsfuld inversion.

Ligeledes er en modelparameter *to* tal: nemlig en parameterværdi (som angiver informationsindholdet) og en værdi af usikkerheden på parameteren (som angiver pålideligheden af bestemmelsen af parameteren).

Uden kendskab til en parameters usikkerhed er det ikke muligt at forholde sig meningsfuldt til en tolkning.

Støj

I de følgende kapitler vil vi sammenligne de fire systemers evne til at opløse jordens resistivitetsforhold. For at gennemføre en sådan analyse er det nødvendigt at have en kvantitativ vurdering af støjen på data, og vi skal derfor opstille en *støjmodel* for hvert af de fire systemer.

Omgivende støj og "geologisk støj"

Vi vil betragte støjen på data som opbygget af to bidrag: (1) den mere eller mindre tilfældige støj, som stammer fra omgivelserne og fra tilfældig målestøj i måleapparatet, og (2) et støjbidrag, som er proportionalt med måleværdien. Sidstnævnte støjbidrag skal tage højde for støjefekter, som kan stamme fra konfigurationsfejl i måleopstillingen, samt et bidrag, som ofte - med en problematisk betegnelse - kaldes for geologisk støj, som skal redegøre

for, at man tolker sine data med en model med lavere dimensionalitet end jordens. Data vil naturligvis afspejle jordens faktiske dimensionalitet og dermed være inkonsistente med en model med mindre dimensionalitet, men dette forhold inkluderes ofte som en slags støj i forhold til en 1D tolkning. For alle metoder vil vi antage, at støjbidraget nævnt under punkt (2) kan beskrives som en relativ støj på 5% på alle målinger. Summen af den absolutte støj og den relative støj udgør den støj, der tilskrives data i de følgende analyser

$$\Delta_{\text{rel}} = \sqrt{0.05^2 + (s/d)^2}$$

hvor Δ_{rel} er den totale relative støj, og s er den absolutte støj på dataværdien d .

Støjmodeller for de fire systemer

I det følgende skal vi for alle fire metoder opstille en støjmodel for den basale støj af mere eller mindre tilfældig karakter, som overvejende stammer fra omgivelserne. Men først lidt generelt om støjkloder:

Den omgivende elektromagnetiske støj stammer fra flere kilder. Der er en naturlig elektromagnetisk støj, som overvejende skyldes de såkaldte *sferics*, der stammer fra lynudladninger fra tordenvejr overalt på Jorden, overvejende i de tropiske områder. Man regner med, at der er omkring nogle hundrede lyn i sekundet i gennemsnit på Jorden. Denne støj er af tilfældig karakter og er kraftigere, jo tættere på den tropiske dagside vi befinder os, dvs. den er kraftigere om dagen end om natten og stærkere om sommeren end om vinteren.

Endvidere er der de menneskeskabte støjkloder, der stammer fra elektricitetsforsyningen og de dermed forbundne elektriske installationer. Dels er der selve det harmoniske 50 Hz signal og eventuelt over-harmoniske deraf ($n \times 50$ Hz, hvor n er et heltal), som vil være deterministiske, dels er der de transiente magnetfelter, som vil være af tilfældig karakter, og som opstår pga. ændringer i strømstyrken, når der tændes eller slukkes for elektriske installationer. Desuden vil de elektromagnetiske felter fra kommunikationsudstyr (radiosendere på langbølgebåndet og telefoni) være en kilde til støj.

Ovenstående støjkloder er af størst betydning for de elektromagnetiske metoder, HEM og TEM. For de galvaniske metoder, MEP og PACES, er de af mindre betydning, men for disse metoder er polarisationspotentialer og elektrokemiske potentialer på potentialelektroderne af stor betydning.

MEP

For MEP systemer stammer støjen fra fejlagtige elektrodeafstande, fra dårlig jordkontakt og fra polarisationspotentialer på elektroderne. Polarisationpotentialer stammer dels fra elektrokemiske potentialer, som opstår, når en elektrode stikkes i jorden, og dels fra de potentialer, der efterlades på elektroden, når den har været anvendt som strømelektrode. Begge potentialer aftager med tiden efter påvirkningen. Den effektive støj kan reduceres ved at gentage målingerne mange gange, men i praksis er der grænser for hvor mange, da det skal være rentabelt for det udførende firma at foretage målingerne. Vi har sat støjen til at være 5%.

PACES

Den dominerende støjkilde for PACES systemet er de elektrokemiske potentialer på potentialelektroderne. På stationære elektroder, f.eks. for MEP, reduceres de elektrokemiske potentialer med tiden, efter at elektroderne er stukket i jorden, men for PACES systemet forbliver de store, da elektroderne konstant bevæges hen over jordoverfladen.

For PACES systemet er støjen sat til 2%, idet gentagne målinger på samme sted tidligere har vist, at data kan reproducere med mindre end 2% fejl.

HEM

Den eneste måde, hvorpå man kan eliminere støjklenders indflydelse på en måling af amplitude og fase for et harmonisk signal, er ved at foretage en midling af amplituder og faser inden for et tidsinterval. Længden af det tidsinterval, som er nødvendigt for at opnå et ønsket signal/støjforhold, vil være proportional med perioden af det harmoniske signal, som skal måles. Denne metode fungerer godt, når den omgivende støj kan betragtes som tilfældig med middelværdien nul. For et stationært målesystem vil man for denne type af støj derfor i princippet kunne opnå en bestemmelse af amplituden og fasen med tilpas lille usikkerhed ved at måle tilstrækkeligt længe på samme lokalitet. Ved helikopterbårne målinger fremføres instrumentet med en hastighed på ca. 30 m/s, og tidsintervallet for hver midling er for DIGHEM^{VRES} systemet på 0.1 s, hvilket vil sige, at der midles over ca. 3 m. For den laveste frekvens i DIGHEM^{VRES} systemet på 385 Hz fås således 38 hele svingninger inden for hvert måleinterval og for 100 kHz fås 10 000 svingninger. Signal/støjforholdet vil være proportional med $1/\sqrt{N}$, hvor N er antallet af hele perioder i tidsintervallet for målingen. For almindelige geologiske forhold kan den laterale midling over 3 m ikke siges at være urimelig, idet responset fra jorden må forventes ikke at ændre sig meget over 3 m.

Ud over den tilfældige støj er der den støj, der stammer fra radiosendere. Denne type af støj vil først og fremmest påvirke de højeste frekvenser. Det er naturligvis vigtigt, at man ved udvælgelsen af frekvenser for det geofysiske målesystem vælger frekvenser, som ikke er sammenfaldende med kendte signaler fra eksempelvis VLF sendere.

Foruden støj fra radiosendere vil målingerne kunne påvirkes af transiente kilder. De transiente signaler vil kunne have et bredt frekvensspektrum og dermed kunne påvirke såvel høje som lave frekvenser. Man må dog forvente, at den største energi vil forekomme ved de højeste frekvenser.

Det store problem ved udførelse af HEM målinger er som tidligere nævnt, at man skal udkompensere primærfeltet fra senderspølen, for at det ikke skal dominere specielt realdelen af signalet målt i modtagerspølen. For at det overhovedet skal være muligt at måle noget som helst i 35 m højde, skal sendermomentet være stort, og det betyder, at selv små unøjagtigheder i kompensationen vil medføre store fejl i de målte data. Et HEM system kalibreres først på jordoverfladen inden målekampagnen begynder og kalibreres derefter under målingerne ca. hver tyvende minut, ved at helikopteren flyver op til en højde af ca. 300 m. I denne højde er man så langt væk fra jorden, at denne ikke vil påvirke målingerne, og man bør få en nulmåling. Det får man imidlertid ikke pga. drift i udstyrets kalibrering, men man noterer sig værdierne af realdel og imaginærdel ved højtflyvningsmålingerne. Efter dagens

målinger korrigerer man sine data, idet driften i systemet antages at være lineær mellem højtflyvningsmålingerne. Årsagerne til driften i systemet er bl.a. de skiftende temperaturer under målingerne, idet spoleafstanden vil ændre sig på grund af termisk udvidelse. Som støjmodel for et HEM system vil vi antage, at der er en absolut støj på real- og imaginærdel, som er lidt forskellig for de forskellige frekvenser og generelt stiger med frekvensen. Denne støj stammer fra elektronikken og fra tilfældige påvirkninger, bl.a. vibrationer af spolebeholderen. Desuden vil vi antage, at den korrektion, der finder sted på baggrund af højtflyvningsmålingerne ikke er helt korrekt, idet driften ikke er helt lineær. Vi antager et støjbidrag på 15% af den typiske drift mellem højtflyvningsmålingerne. I tabellen nedenfor ses de støjbidrag, vi har regnet med i overensstemmelse med Fugro Airborne Surveys.

Frekvens	Tilfældig støj [ppm]	15% af driften [ppm]	I alt [ppm]
385	5	3	8
1 500	5	3.75	8.75
6 200	10	6	16
25 700	20	9	29
102 000	25	13.5	38.5

Tabel 5.2. Tabellen viser støjbidragene fra den tilfældige støj og fra nonlinearitetsfejlen på datakorrektionen for de fem frekvenser for DIGHEM^{VRES} systemet.

Målehøjden har stor indflydelse på målingerne, så fejl på højdebestemmelsen vil medføre en fejl på data. Højdebestemmelsen er ikke alene usikker i kraft af tilfældige fluktuationer, men den kan være behæftet med en systematisk fejl over store dele af et måleprofil. Ved overflyvning af skov og bebyggelse vil de radar- og lasersystemer, der anvendes til højdebestemmelsen, angive en for lille højde, idet signalet fra højdesystemerne vil reflekteres fra trætoppe og tage (*canopy* effekten). En fejlagtig bestemmelse af målehøjden vil medføre at data bliver inkonsistente og vanskelige at tolke. Resultatet af tolkningen vil blive fejlagtigt, idet der introduceres områder med for høj resistivitet i overfladen, hvis højden undervurderes og vice versa. Det er derfor meget væsentligt, at højdedata ved en sammenligning af dataprofiler, topografiske kort og flyvevideoen bliver editeret og korrigeret, hvor de er fejlagtige.

I Figur 5.1 ses et plot af real- og imaginærdel for de fem frekvenser for DIGHEM^{VRES} systemet som funktion af målehøjden. Kurverne er fremstillet for et homogent halvrum med resistiviteterne 10 Ωm og 100 Ωm.

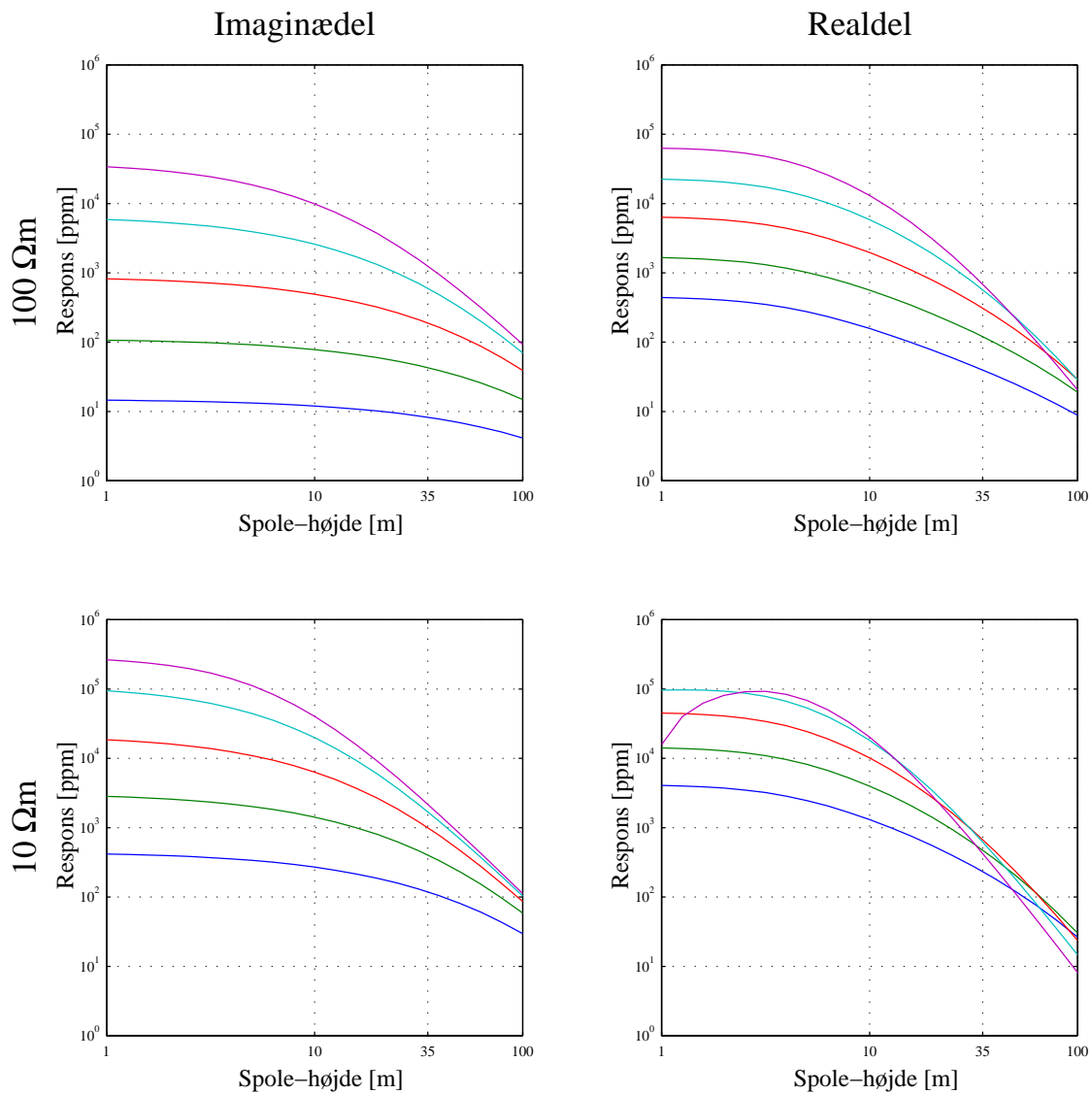
For en flyvehøjde på 35 m er ændringen af målingerne pr. meter fremstillet i Tabel 5.3.

Frekvens	100 Ω m Im	100 Ω m Re	10 Ω m Im	10 Ω m Re
385	0.1	1.3	2.8	16
1 500	0.8	5.8	18	46
6 200	5.5	18	59	54
25 700	29	42	135	61
102 000	87	65	186	31

Tabel 5.3. Tabellen viser hvor mange ppm målingerne ændrer sig når flyvehøjden ændrer sig en meter.

Flyvehøjden bestemmes ofte med både radar monteret i helikopteren og en laser monteret i spolebeholderen. Usikkerheden på radarbestemmelsen af højden er på ca. 1 m, men her til må lægges en usikkerhed på den vertikale længde af kablet, som spolebeholderen er ophængt i, idet denne varierer med flyvehastighed og vindforhold. Usikkerheden på laserhøjden er mindre, ca. 0.1 m, men spolebeholderens bevægelser giver yderligere en usikkerhed. Desuden er laserhøjden ofte væsentlig mere støjfyldt end radarhøjden. Usikkerheden på bestemmelsen af flyvehøjden er formodentlig større, hvor den må korrigeres over større afstande.

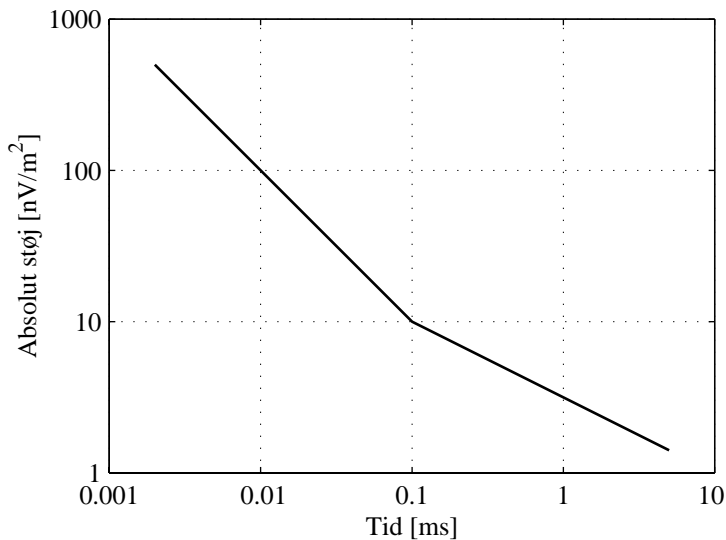
Det ses af Tabel 5.3, at den usikkerhed, der introduceres på data fra usikkerheden på højdebestemmelsen, kan være væsentligt større end måleusikkerheden på data. Man kunne forestille sig at tilføje dette bidrag til måleusikkerheden på data, men en bedre metode er omtalt i Kapitel 6 i afsnittet *Tolkninger og analyser*, hvor luftlaget inddrages som et lag i modellen når data tolkes.



Figur 5.1. Figuren viser real- og imaginærdel for de fem frekvenser som funktion af måle-højden for et homogent halvrum på henholdsvis 10 Ωm og 100 Ωm. De anvendte frekvenser er 385 Hz (mørkeblå kurve), 1.5 kHz (grøn kurve), 6.2 kHz (rød kurve), 25.7 kHz (lyseblå kurve) og 102 kHz (magenta farvede kurve).

TEM

For TEM målinger antager vi den støjmodel, som er gennemgået i detaljer i GEUS TEM rapporten, og som i korthed går ud på, at til tidlige tider falder den effektive støj som t^{-1} og til sene tider som $t^{-1/2}$. Overgangen mellem de to intervaller ligger ved 100 μs, og den absolute størrelse til denne tid er 10 nV/m². Figur 5.2 viser et plot af denne støjmodel. Den bygger på, at de tidsvinduer, inden for hvilke der midles ved en TEM måling, vokser proportionalt med tiden, og at der midles over 1 000 målinger.

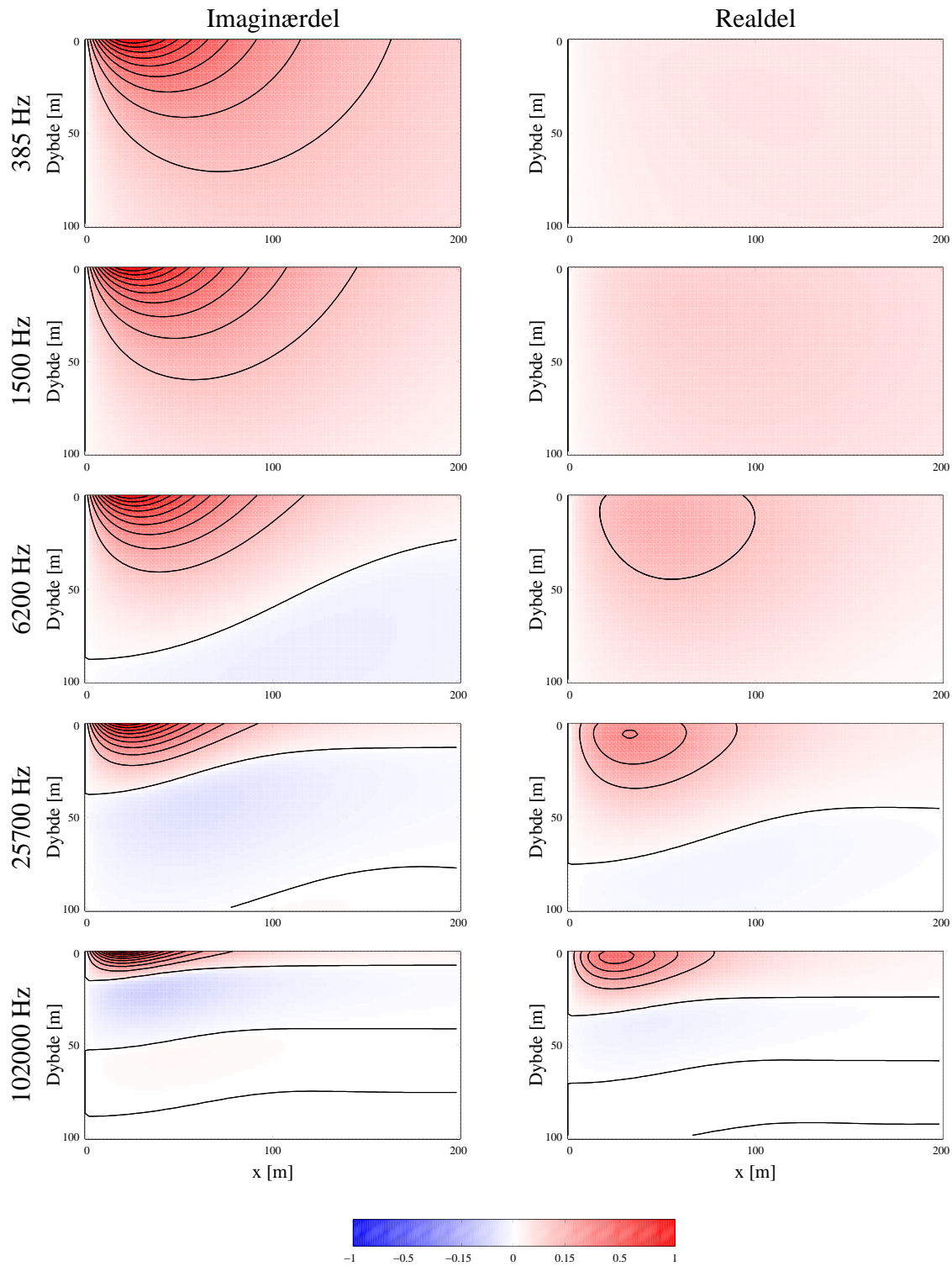


Figur 5.2. Figuren viser den absolutte støj fra omgivelserne for PROTEM 47 systemet som funktion af tiden.

Følsomhedsfunktioner

En hvilken som helst geofysisk måling er et udtryk for en midling af jordens egenskaber inden for et vist område. Ikke alle dele af jorden indgår dog med samme vægt i denne midling. Som oftest vil de områder, der enten er tættest på strøm/potentialelektroderne eller senderen/modtageren, have størst indflydelse på målingen. Den funktion, der beskriver vægtningen af jordens ledningsevne i den enkelte måling, kaldes for en *følsomhedsfunktion* (eller Fréchetkerne) for målingen. For hver målekonfiguration vil den være en funktion af stedet. Den er et udtryk for, hvorledes en måling vil ændre sig, såfremt man ændrer konduktiviteten på det pågældende sted. Hvis følsomhedsfunktionen er høj, betyder det, at konduktiviteten på det pågældende sted er godt bestemt ved målingen. Omvendt, hvis følsomhedsfunktionen er lav. Hvis følsomhedsfunktionen er koncentreret til et lille område, vil målingen have gode rumlige opløsningsegenskaber, idet den vil sige noget om konduktiviteten i et begrænset område. Og naturligvis omvendt, hvis følsomhedsfunktionen er rumligt meget udbredt.

I Kapitel 2, *Elektromagnetiske frekvensdomænemetoder*, betragtede vi strømsystemerne i jorden fra en vertikal magnetisk dipolkilde (en lille horisontal strømsløjfe) som funktion af frekvensen, og vi så, at strømsystemet for HEM systemet er lateralt temmelig udbredt med en vis tendens til at blive mere koncentreret med voksende frekvens. Denne figur gentages her som Figur 5.3.



Figur 5.3. Figuren viser real- og imaginærdelen af strømtætheden i et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$ for en vertikal magnetisk dipolkilde i højden 35 m over jordoverfladen for de fem frekvenser. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens, og afstanden mellem konturlinierne er 10% af maksimumværdien.

En ting er imidlertid strømtætheden i jorden, en anden strømtæthedens bidrag til målingen. Hvis man for det enkelte strømelement beregner dets bidrag til det målte magnetfelt, vil man have bestemt følsomhedsfunktionen. Denne fremkommer matematisk som prikproduktet af den elektriske feltvektor fra kilden og den elektriske feltvektor fra modtageren, hvis den fungerer som kilde:

$$F(\mathbf{r}_{\text{kilde}}, \mathbf{r}_{\text{modtager}}, \mathbf{r}) = \mathbf{E}_{\text{kilde}} \cdot \mathbf{E}_{\text{modtager}}$$

hvor $\mathbf{r}_{\text{kilde}}$ og $\mathbf{r}_{\text{modtager}}$ er stedvektorerne for henholdsvis kilde og modtager, og \mathbf{r} er stedvektor for et punkt under jordoverfladen.

Som det vil fremgå af de følgende figurer, kan følsomhedsfunktionen være negativ i visse områder. Det betyder, at der er områder af jorden, hvor en forøgelse af ledningsevnen vil reducere det målte signal. Et område af jorden kan altså bidrage både positivt og negativt til måleværdien.

Der vil kun blive vist følsomhedsfunktioner for det homogene halvrum. Følsomhedsfunktioner for andre og mere komplicerede modeller vil have en lighed med følsomhedsfunktionerne for et homogent halvrum, hvis konduktivitet er gennemsnitskonduktiviteten i det område, hvor strømmen forløber.

For HEM målinger afhænger følsomhedsfunktionen af frekvensen, medens den afhænger af tiden for TEM målinger. For HEM og TEM målinger afhænger følsomhedsfunktionen af halvrummets ledningsevne, medens dette ikke er tilfældet for de galvaniske metoder MEP og PACES.

Følsomhedsfunktioner for de fire systemer

Følsomhedsfunktionerne for de fire systemer illustreres i de følgende figurer 5.4, 5.5 og 5.6 ved hjælp af snit horisontalt og vertikalt gennem den tredimensionale følsomhedsfunktion. Af hensyn til præsentationen af funktionerne er de tilhørende figurtekster samlet på en separat side.

MEP og PACES

Wenner konfigurationen med lige stor afstand mellem alle elektroder er den hyppigst anvendte til MEP målinger, og to af PACES konfigurationerne er Wenner konfigurationer. I Figur 5.4 ses et plot af følsomhedsfunktionen for denne konfiguration og en af de asymmetriske elektrodekonfigurationer for PACES systemet. Det ses, at følsomhedsfunktionen har både positive og negative områder, men at de er forskelligt fordelt for de to konfigurationer. For alle geoelektriske konfigurationer bliver følsomheden uendelig høj på elektroderne, og dette er grunden til de geoelektriske metoders følsomhed overfor overfladenære inhomogeniteter.

HEM

I Figur 5.5 og 5.6 ses følsomhedsfunktionerne for real- og imaginærdel for de fem frekvenser. Man ser igen både positive og negative værdier, idet følsomheden inden for den vertikale cylinder, som har linien mellem sender- og modtagerspole som diameter, har modsat fortegn af følsomheden lige udenfor. Desuden ses det, at følsomheden strækker sig ned til større dybder for de lavere frekvenser end for de højere, hvilket afspejler, at de højere frekvenser overvejende siger noget om de overfladenære lag, medens de lavere frekvenser har større indtrængningsdybde. Den laterale udbredelse af følsomhedsfunktionen skrumper også med stigende frekvens, men ikke i samme grad som den vertikale. For de højere frekvenser ses tillige et temmelig kompliceret billede med op til flere overgange mellem positive og negative værdier for følsomhedsfunktionen. Endvidere bemærker man, at for de lave frekvenser er følsomheden for imaginærdelen væsentlig større end for realdelen, medens de bliver af samme størrelsesorden for de højere frekvenser.

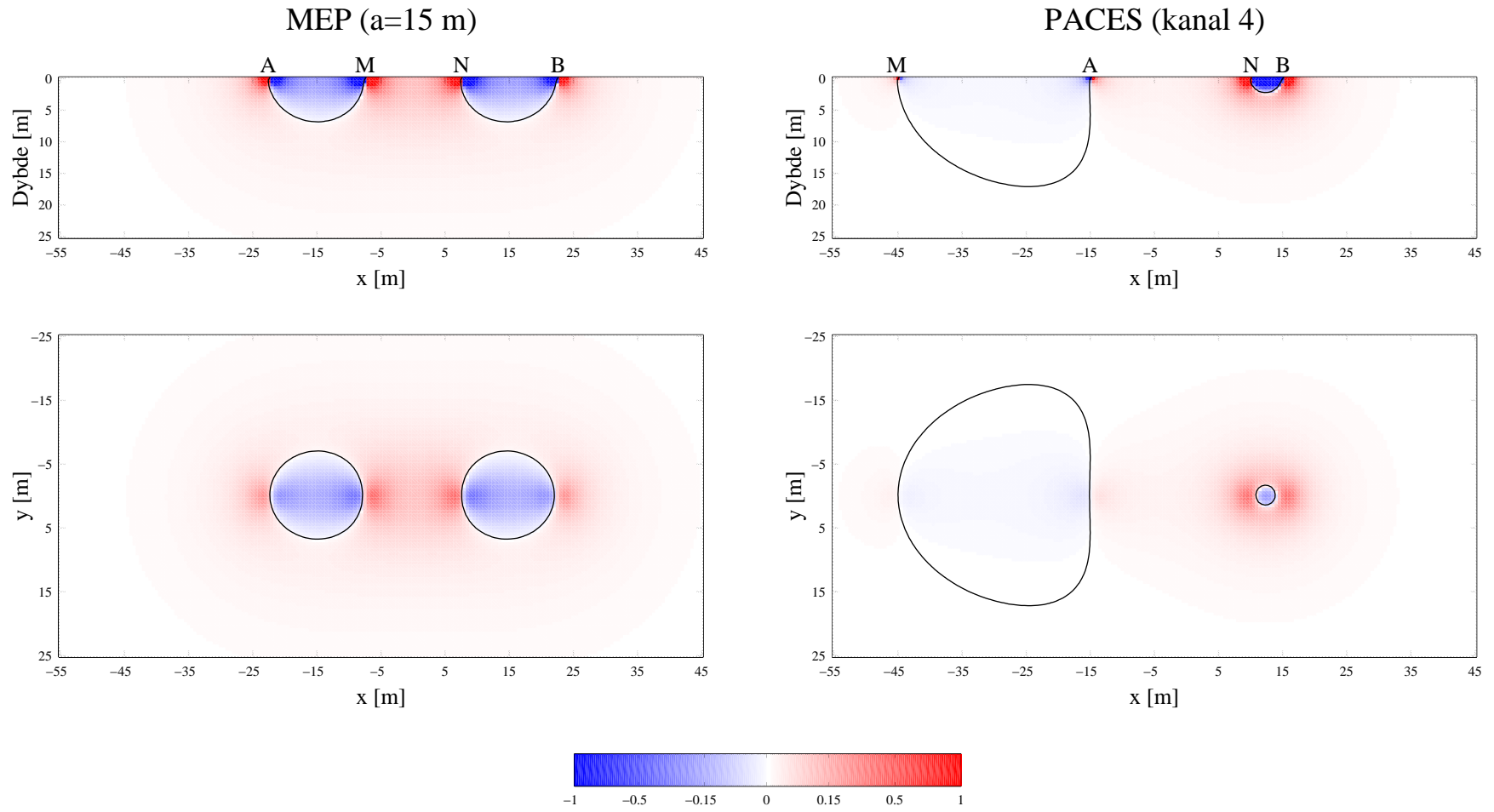
Foruden snittene gennem følsomhedsfunktionerne i tre dimensioner (3D) ses på Figur 5.5 tillige følsomhedsfunktionen som funktion af dybden for en 1D model. Denne er fremkommet ud fra 3D følsomhedsfunktionen ved integration i et horisontalt plan. Desuden ses følsomhedsfunktionen som funktion af positionen langs profilet. Den er fremkommet ved integration i et vertikalt plan vinkelret på papirets plan. Denne laterale 1D følsomhedsfunktion er vist, idet den på udmærket vis illustrerer det forstyrrende koblingssignal fra en lang lige leder (se Kapitel 3).

TEM

Vi har valgt at præsentere følsomhedsfunktionerne til tiden 0.05 ms. Følsomhedsfunktionerne til andre tider kan man slutte sig til ved at betragte de viste figurer med tanke på, at følsomhedsfunktionen breder sig udad og nedad til senere tider.

Figur 5.7 viser et vertikalt og horisontalt snit gennem følsomhedsfunktionen for PROTEM 47 systemet i central loop konfigurationen til tiden 0,05 ms i 100 m dybde i et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$. Følsomhedsfunktionen for PROTEM 47 systemet er rotationssymmetrisk omkring opstillingens centrum, og man ser på figurerne, at følsomheden forsvinder i en kegle lige under opstillingens centrum. Følsomheden breder sig udad og nedad i en vinkel på ca. 30° med overfladen med tiden. Det ses, at følsomhedsfunktionen har et fortegnsskift i en dybde på ca. 140 m under opstillingens centrum.

Den afbildede følsomhedsfunktion gælder for det transiente impulsrespons, som er det, der tilnærmelsesvis måles med PROTEM 47 systemet.

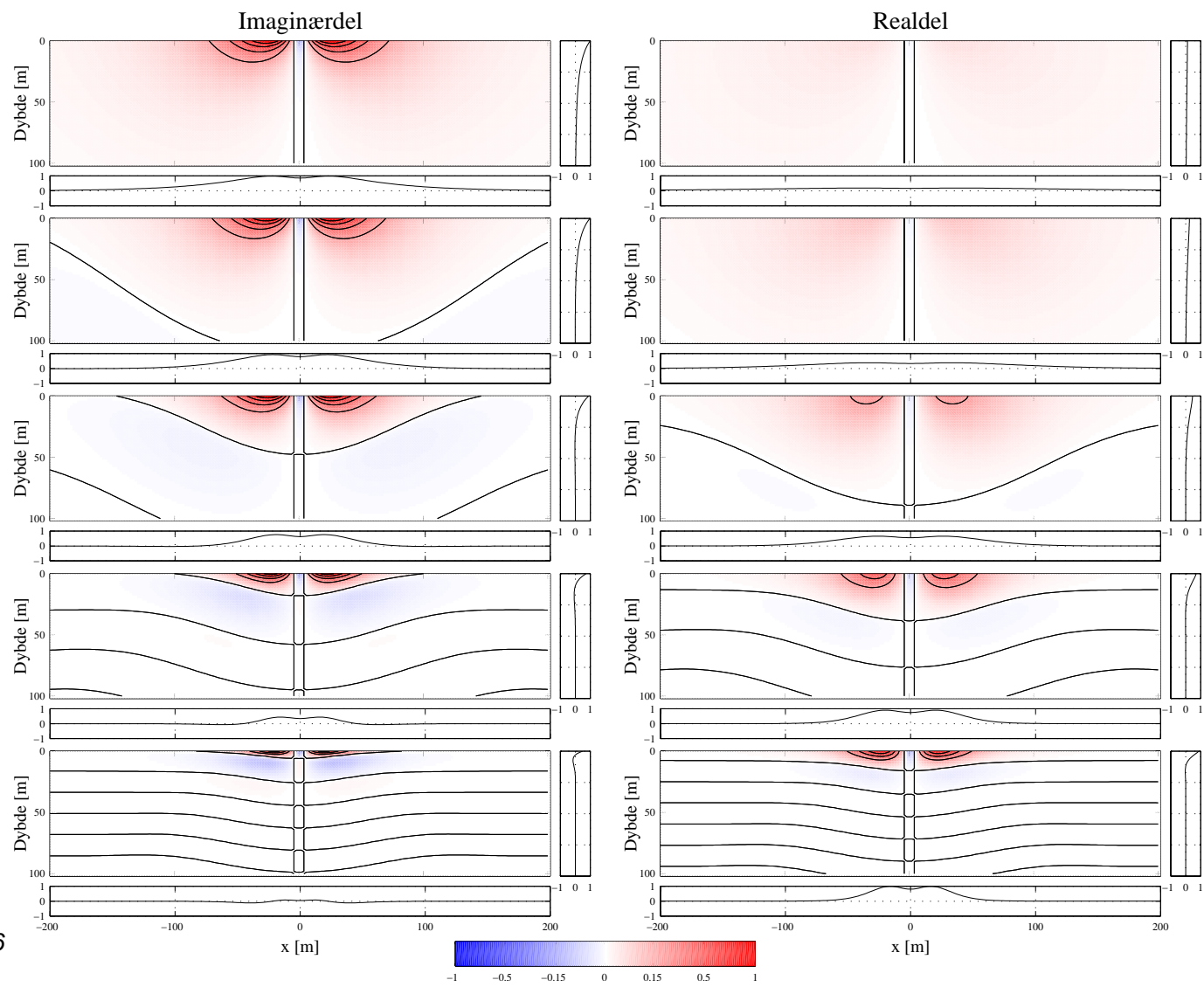


Figur 5.4. Figurtekst på side 76.

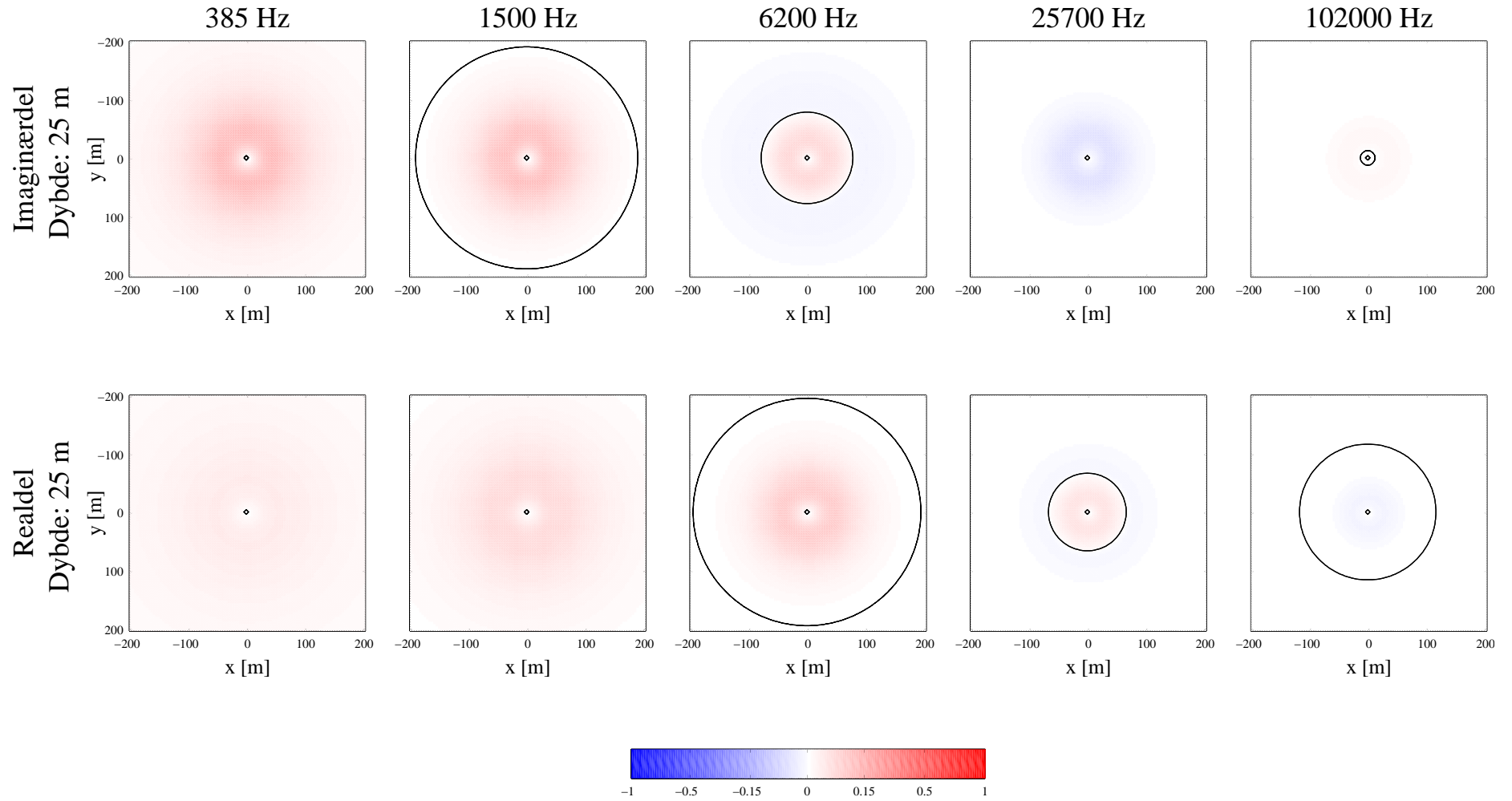
Figur 5.4 Figuren viser vertikale snit gennem følsomhedsfunktionerne for konduktiviteten for HEM systemet for et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$. Spolerne befinder sig i en højde af 35 m, og der er 8 m mellem spolerne. I venstre søjle ses følsomheden for imaginærdelen og i højre søjle for realdelen. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens, og afstanden mellem konturlinierne er 20% af maksimumværdien. Til højre for hvert plotvindue ses 1D følsomheden som funktion af dybden, og under hvert plotvindue ses 1D følsomhedsfunktionen som funktion af profillængden. Begge 1D plot er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens.

Figur 5.5. Figuren viser vertikale snit gennem følsomhedsfunktionerne for konduktiviteten for HEM systemet for et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$. Spolerne befinder sig i en højde af 35 m, og der er 8 m mellem spolerne. I venstre søjle ses følsomheden for imaginærdelen og i højre søjle for realdelen. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens, og afstanden mellem konturlinierne er 20% af maksimumværdien. Til højre for hvert plotvindue ses 1D følsomheden som funktion af dybden, og under hvert plotvindue ses 1D følsomhedsfunktionen som funktion af profillængden. Begge 1D plot er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens.

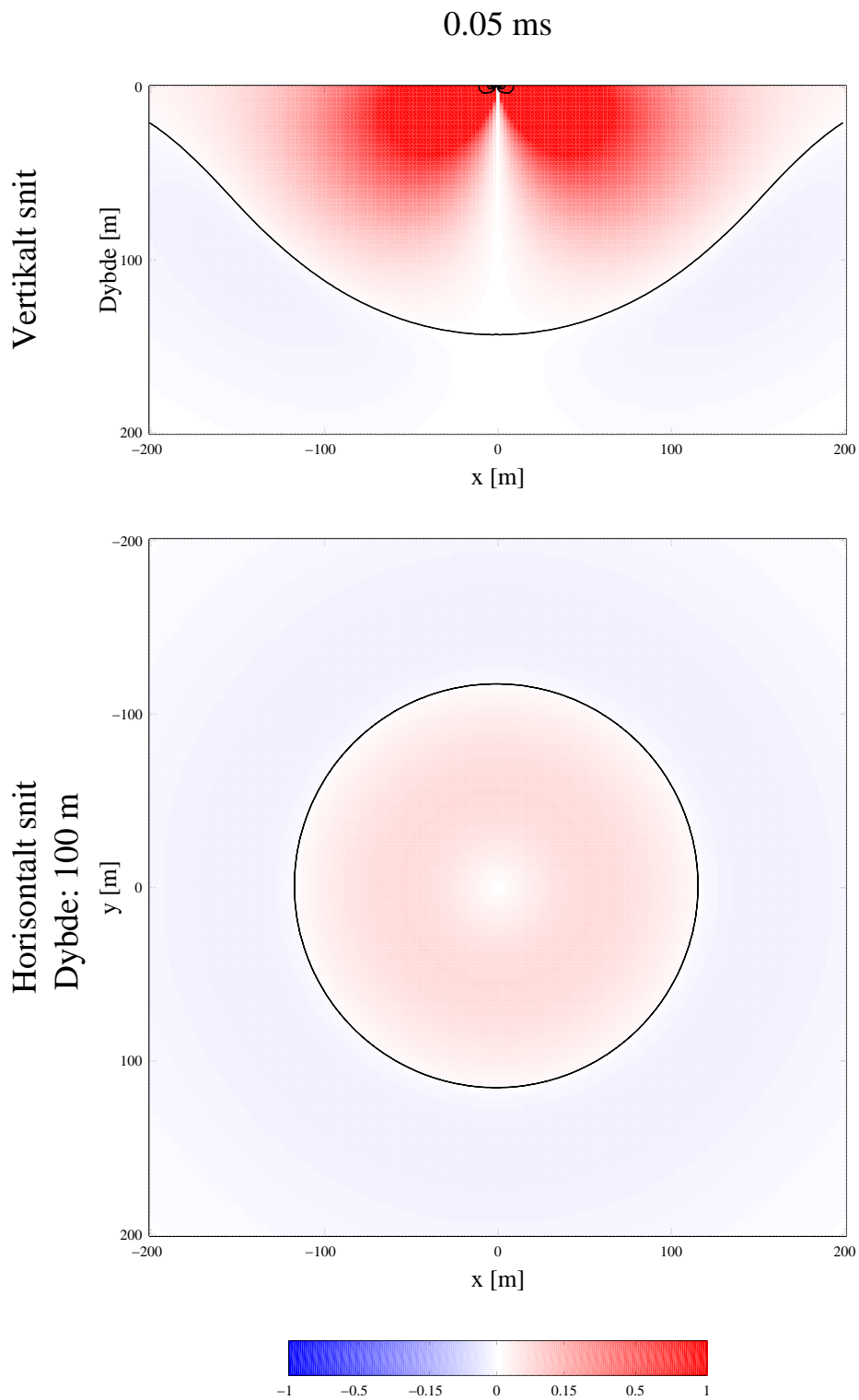
Figur 5.5. Figuren viser horisontale snit i dybden 50 m gennem følsomhedsfunktionerne for konduktiviteten for HEM systemet for et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$. Spolerne befinder sig i en højde af 35 m, og der er 8 m mellem spolerne. I øverste række ses følsomheden for imaginærdelen og i nederste række for realdelen. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden for hver enkelt frekvens, og afstanden mellem konturlinierne er 20% af maksimumværdien.



Figur 5.5. Figurtekst på side 76



Figur 5.6. Figurtekst på side 76.



Figur 5.7. Figuren viser øverst et vertikalt og nederst et horisontalt snit gennem følsomhedsfunktionen for konduktiviteten for PROTEM 47 systemet for et homogent halvrum med resistiviteten $50 \Omega\text{m}$ til tiden 0.05 ms. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden og derefter ganget med 10 for præsentationens skyld, og afstanden mellem konturlinierne er 20% af maksimumværdien.

Kapitel 6 – Analyse af endimensionale modeller

I dette kapitel præsenteres analyser af en lang række endimensionale jordmodeller for hvert af de fire betragtede målesystemer. Alle analyser er udført med udgangspunkt i de støjmodeller, der er beskrevet i Kapitel 5.

Det viser sig, at for de betragtede modeller opnås den bedste opløsning af undergrundens resistivitetsforhold med PROTEM 47 og MEP systemerne, medens DIGHEM^{VRES} systemet i mange tilfælde giver en nogenlunde opløsning af modellerne. PACES systemet har en ringere dybdeindtrængning end de andre tre systemer, men giver en bedre opløsning af tynde, overfladenære lag. Ved sammenligningen bliver det tydeligt, at de elektromagnetiske metoder, DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47, er bedst til kortlægning af gode ledere, medens de elektriske metoder, MEP og PACES, bestemmer gode og dårlige ledere omtrent lige godt.

Modelbeskrivelse

Som beskrevet i Kapitel 5 foretages tolkninger af elektriske og elektromagnetiske data oftest med udgangspunkt i en endimensional (1D) jordmodel, skønt en sådan model kan være en utilstrækkelig beskrivelse af jordens faktiske resistivitetsforhold. I dette kapitel præsenteres analyser af en lang række 1D modeller for hvert af de fire betragtede systemer (DIGHEM^{VRES}, MEP, PACES og PROTEM 47). Først gives imidlertid en beskrivelse af de modeller, der i denne rapport er udvalgt til analyse, og relevansen af disse set i en geologisk sammenhæng forklares.

Udvælgelseskriterier

De betragtede modeller er udvalgt i samarbejde med de parter, som er involveret i projektet, og beskriver tilsammen mange af de geologiske forhold, der forekommer i det danske område. Den geologiske inspiration til modellerne er hentet dels fra GEUS's arkiv over EI-log-boringer, der er anerkendt for at give detaljerede og præcise oplysninger om jordens vertikale modstandsvariation, og dels fra jordartskort over Danmark (Pedersen 1989), der også præsenterer snit igennem lagserien.

Generelt for modellerne gælder det, at de er opbygget af et, to eller tre lag. Til beskrivelse af de faktiske geologiske forhold kan det naturligvis være relevant at inddrage modeller med flere end tre lag, og nogle geofysiske systemer vil da også sommetider kunne opløse sådanne modeller. Der er imidlertid to grunde til, at der er indført denne begrænsning. For det første vil de systemer, der undersøges i denne rapport, ofte have svært ved at opløse mere end tolagsmodeller, og for det andet vil sammenligningsgrundlaget hurtigt blive uoverskueligt, såfremt der inddrages modeller med mere end tre lag.

Det har i udvælgelsen været nødvendigt at indgå flere kompromiser mellem den geologiske relevans og systematikken i den geofysiske variation i modellerne. Således er ikke alle de

valgte modeller lige geologisk relevante, men er dog alligevel medtaget for at have et bredt spektrum af modeller til vurdering og sammenligning af systemerne.

Beskrivelse af etlagsmodellerne (homogene halvrum)

I etlagsmodellerne - normalt betegnet homogene halvrum - er resistiviteten af halvrummet den eneste parameter, som kan varieres.

Til undersøgelserne i denne rapport er der valgt en suite bestående af 21 modeller. Halvrumresistiviteten varieres fra 1 Ωm til 1024 Ωm på en sådan måde, at resistiviteten i en given model er en faktor $\sqrt{2} \approx 1.414$ større end i den foregående. De forskellige etlagsmodeller samt resultatet af analyserne af disse er vist i Appendiks A, Figur A1.

Beskrivelse af tolagsmodellerne

I tolagsmodellerne er det muligt at ændre på tre parametre, nemlig resistiviteten af første lag (RHO1), resistiviteten af andet lag (RHO2) og tykkelsen af første lag (THK1).

Tolagsmodellerne i denne rapport er bygget op omkring 12 forskellige grundmodeller. I hver grundmodel fastholdes resistiviteten af første og andet lag, mens tykkelsen af første lag varieres på en sådan måde, at tykkelsen i en given model er en faktor $\sqrt[10]{10} \approx 1.26$ større end i den foregående, dvs. at der er 10 modeller pr. dekade. Lagenes resistiviteter i de forskellige grundmodeller fremgår af nedenstående tabel.

	RHO1 (Ωm)	RHO2 (Ωm)
Grundmodel 1	5	30
Grundmodel 2	5	70
Grundmodel 3	5	200
Grundmodel 4	30	5
Grundmodel 5	30	70
Grundmodel 6	30	200
Grundmodel 7	70	5
Grundmodel 8	70	30
Grundmodel 9	70	200
Grundmodel 10	200	5
Grundmodel 11	200	30
Grundmodel 12	200	70

Som det ses, er grundmodellerne opbygget som en kombination af fire forskellige resistiviteter. Baggrunden for valget af netop disse resistiviteter er forklaret i afsnittet *Modellernes geologiske relevans*.

Da der er 12 grundmodeller, og hver grundmodel giver anledning til en suite med 21 modeller, fås i alt 252 tolagsmodeller. De forskellige tolagsmodeller samt resultatet af analyserne af disse er vist i Appendiks A, Figur A2–A13.

Beskrivelse af trelagsmodellerne

I trelagsmodellerne er det muligt at ændre på fem parametre. Det drejer sig om resistiviteterne af de tre lag (RHO1, RHO2 og RHO3) og om tykkelserne af de to øverste lag (THK1 og THK2).

Trelagsmodellerne, der betragtes i denne rapport, er dannet ud fra fire forskellige grundmodeller. Disse grundmodeller er skitseret i nedenstående tabel.





	RHO1 (Ωm)	RHO2 (Ωm)	RHO3 (Ωm)	THK1 (m)	THK2 (m)
Grundmodel 1 (dobbeltopstigende)	30	70	200	10	20
Grundmodel 2 (dobbeltnedstigende)	200	70	5	10	20
Grundmodel 3 (maksimumsmodel)	70	200	5	10	20
Grundmodel 4 (minimumsmodel)	70	30	200	10	20

Ud fra tabellen ses det, at de anvendte resistiviteter er de samme, som er brugt i tolagsmodellerne. Derudover er det værd at bemærke, at tykkelsen af andet lag (RHO2) for alle grundmodeller er sat til det dobbelte af tykkelsen af det første lag (RHO1). Dette er gjort ud fra den betragtning, at opløsningsevnen for de forskellige målesystemer generelt er faldende med dybden, og at grundmodellerne som udgangspunkt skal kunne opløses.

Ud fra hver grundmodel frembringes fem modelsuiter, idet der laves en modelsuite for hver enkelt af de fem modelparametre. Hver modelsuite kommer til at indeholde 21 modeller, idet resistiviteterne varieres fra 1 Ωm til 1024 Ωm (som ved etlagsmodellerne), og lagtykkelserne varieres fra 1 m til 100 m (som ved tolagsmodellerne). De fire grundmodeller giver anledning til fem modelsuiter hver, så der er 20 modelsuiter á 21 modeller, i alt 420 forskellige trelagsmodeller. De forskellige trelagsmodeller samt resultatet af analyserne af disse er vist i Appendiks A, Figur A14–A33.

Modellernes geologiske relevans

Som beskrevet ovenfor er de forskellige grundmodeller bygget op omkring de samme fire resistiviteter. For at illustrere modellernes geologiske relevans gives i det følgende nogle eksempler på de geologiske materialer, der kan være knyttet til hvert enkelt resistivitetsniveau:

5 Ωm 	Marint ler Fedt ler, ofte af tertiær alder Smeltevandsler Kalk med salt grundvand (eller anden formation med salt grundvand)
30 Ωm 	Marint ler med vekslende sandlag Moræneler Smeltevandsler
70 Ωm 	Moræneler med sandindslag Morænesand Sand under grundvandsspejlet Kalk under grundvandsspejlet
>200 Ωm 	Tørt sand Tør kalk Kalk med fersk grundvand

Som det fremgår, er den højeste resistivitet i grundmodellerne sat til 200 Ω m, selvom mange geologiske materialer rent faktisk er karakteriseret ved at have højere resistiviteter. Baggrunden for dette er, at de to elektromagnetiske målesystemer, DIGHEM^{VRES} og PRO-TEM 47, som indgår i undersøgelsen, har en meget lille følsomhed over for høje resistiviteter, dvs. resistiviteter over ca. 60–80 Ω m, og de 200 Ω m vil for disse systemer derfor repræsentere høje resistiviteter i almindelighed. Samtidig skal man dog huske på, at resistiviteten i nogle af modelsuiten varierer fra 1 Ω m og helt op til 1024 Ω m, hvorved også modeller indeholdende lag med betragteligt højere resistiviteter inddrages i tolkningerne og analyserne. Dermed tilgodeses også de geoelektriske systemer, der alt andet lige er bedre til at opløse høje resistiviteter.

Analyse af modellerne

For alle de opstillede jordmodeller er der foretaget en analyse for hvert af de fire betragtede målesystemer. I det følgende gives først nogle indledende kommentarer til analyserne, og dernæst forklares det kort, hvordan analyserne er præsenteret i denne rapport.

Analyse

Der skal på dette sted ikke gås i detaljer med den teori, der ligger bag analysebegrebet, idet der henvises til Kapitel 5. Blot skal det nævnes, at formålet med en analyse er at opnå et mål for, hvor godt de enkelte modelparametre (i dette tilfælde lagenes tykkelser og resistiviteter) i en given model er bestemt. Ved analysen tilskrives hver modelparameter således en usikkerhed, der vil være lille, hvis parameteren er godt bestemt, og vice versa.

Som beskrevet i Kapitel 2 har sender- og modtagerspolernes højde over jordoverfladen en direkte (og tilmed stor) betydning for størrelsen af det respons, der registreres med et DIGHEM^{VRES} system. Før der foretages analyser, er det derfor nødvendigt at gøre sig klart,

hvordan højdeinformationerne skal inddrages. Principielt set er der to måder, hvorpå dette kan gøres:

- 1) Den første mulighed er at anvende den målte højde direkte uden at tilskrive den nogen usikkerhed. Fordelen ved denne metode er, at den er relativ simpel, men til gengæld tages der ikke hensyn til, at der i virkelighedens verden unægteligt vil være en usikkerhed på højdemålingen.
- 2) Den anden mulighed er at lade luftlaget mellem spolerne og jorden indgå som et ekstra lag i den betragtede model, idet tykkelsen af laget sættes lig med den målte flyvehøjde, og laget samtidig tilskrives en meget høj resistivitet. Dermed kommer flyvehøjden til at indgå som en egentlig parameter i modellen og bliver som sådan også tilskrevet en usikkerhed.

I forbindelse med de analyser, der præsenteres i dette afsnit, har vi valgt at anvende den sidstnævnte metode, da vi mener, at dette alt andet lige er den bedste måde at beskrive de faktiske forhold på. I alle tilfælde er der således indsat et ekstra lag i toppen af modellen med en resistivitet, der er bundet hårdt på $100\ 000\ \Omega\text{m}$, og en tykkelse, der er sat til 35 m med en relativ usikkerhed på 0.014. De 35 m svarer til den højde, som spolerne antages at befinde sig i, mens den relative usikkerhed på 0.014 angiver, at højden er kendt med en usikkerhed på ca. 0.5 m.

For så vidt angår analyserne af usikkerheden på modelparametrene har det konsekvenser, om man vælger den første eller den anden mulighed, idet usikkerheden på modelparametrene bliver mindre ved anvendelse af mulighed 1 end ved mulighed 2.

Før analyserne præsenteres, skal det nævnes, at alle analyser er foretaget med programmet SELMA, som er udviklet ved Geologisk Institut, Aarhus Universitet (Christensen & Auker 1992).

Præsentation af analyserne

For hver enkelt modelsuite præsenteres analyserne af de 21 undermodeller samlet på én side (se f.eks. Figur 6.1). Øverst på siden ses modelsuiten med de sande modeller, og nedenunder følger så analyserne for hver enkelt af de fire målesystemer.

For etlagsmodellerne er halvrumresistiviteten den eneste parameter, der analyseres. For tolagsmodellerne gives en analyse af tre parametre: første og andet lags resistivitet (RHO1 og RHO2), og første lags tykkelse (THK1), som er identisk med dybden til andet lag. Endelig indgår der ved trelagsmodellerne seks parametre i analysen: de tre lagresistiviteter (RHO1 , RHO2 og RHO3), de to lagtykkelser (THK1 og THK2) og dybden til tredje lag (DEP2).

Den relative usikkerhed, Δ , på den enkelte modelparameter er vist grafisk ved hjælp af en farveskala, hvis kode fremgår af nedenstående tabel. Som det ses, er farveskalaen inddelt i 5 niveauer og angiver, hvor godt den enkelte parameter er bestemt.

Interval	Farve	Bestemmelse
$\Delta < 0,1$	Rød	Velbestemt
$0,1 < \Delta < 0,2$	Orange	Godt bestemt
$0,2 < \Delta < 0,5$	Gul	Nogenlunde bestemt
$0,5 < \Delta < 1,0$	Turkis	Dårligt bestemt
$1,0 < \Delta$	Blå/mørkeblå	Ubestemt

Ved at præsentere analyserne for alle de fire systemer på samme side bliver det umiddelbart muligt at sammenligne resultaterne for de forskellige systemer. Analyserne kan imidlertid også med fordel læses på den anden led, idet det ved betragtning af f.eks. en trelagsmodel, en tolagsmodel og et homogent halvrum med sammenlignelige modstandsfordelinger kan iagttages, hvorledes analyserne udvikler sig.

Eksempler

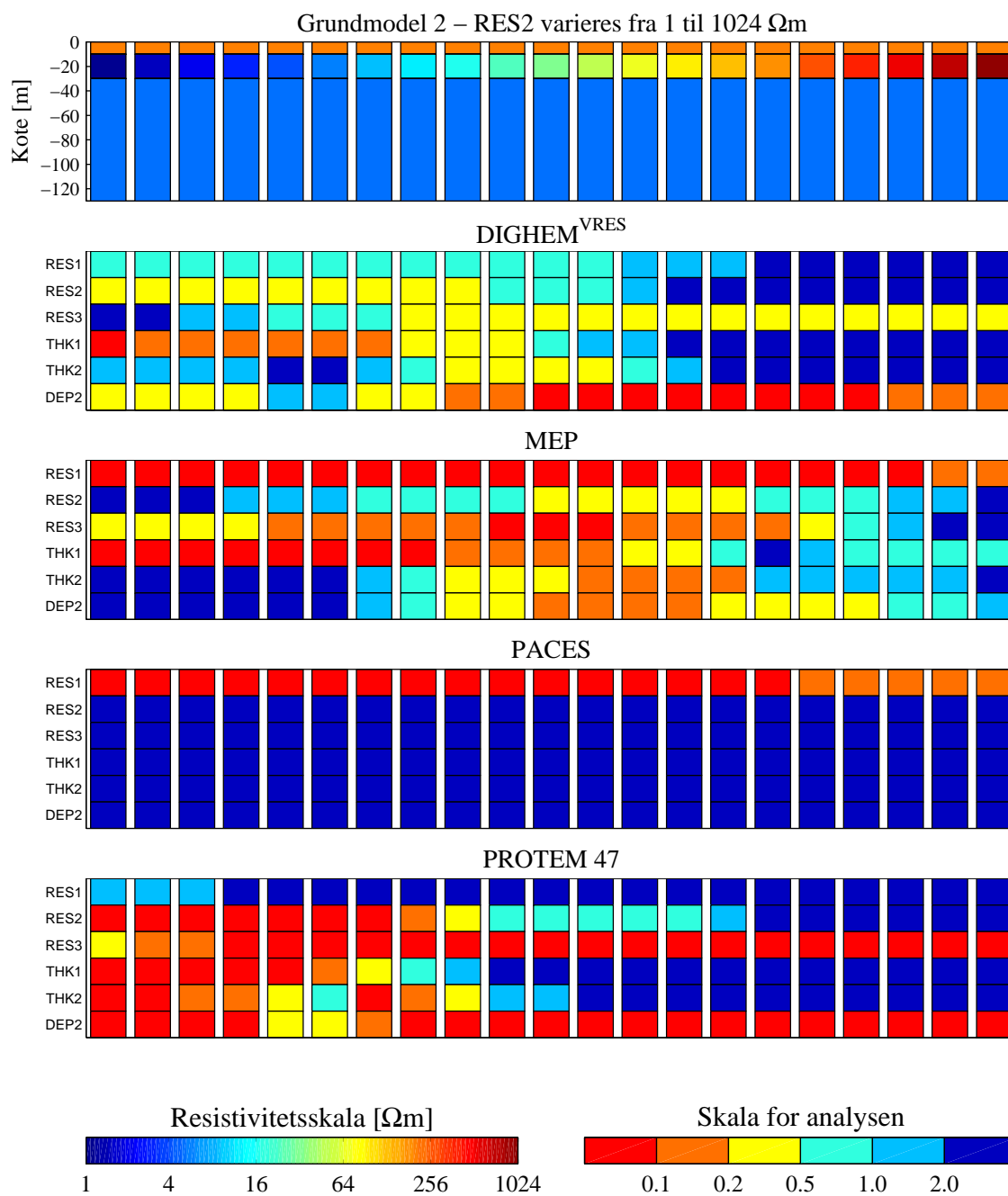
For at demonstrere, hvorledes analyserne læses, vil der i det følgende blive gennemgået to eksempler. I begge eksempler indledes med en kort beskrivelse af den betragtede modelsuite, hvorefter der gives en beskrivelse af analyserne for hvert af de betragtede målesystemer. Eksemplerne slutes af med en konklusion, hvor der på baggrund af analyserne foretages en kort sammenligning af de betragtede systemers opløsningsevner. Det skal understreges, at hvis et af systemerne i gennemgangen fremstår bedre end et andet på ét eller flere punkter, behøver dette ikke at være gældende generelt, da de forskellige systemer reagerer forskelligt på forskellige modeller.

Eksempel 1 - trelagsmodeller

Modelsuiten, der betragtes i dette eksempel, ses øverst på Figur 6.1 (samme som Figur A.20 i Appendiks A). Som det fremgår af figuren, er modelsuiten dannet ud fra den dobbelt nedstigende grundmodel (Grundmodel 2), hvor resistiviteten i andet lag varieres fra 1 Ωm til 1024 Ωm . Der er 21 modeller i suiteen, og som henvisning bruges i det følgende modellens nummer regnet fra venstre.

DIGHEM^{VRES}

For DIGHEM^{VRES} systemet ses det, at første lag generelt er dårligt opløst. Både resistiviteten og tykkelsen af første lag er således bestemt med en relativ usikkerhed på over 0.5, idet der dog opnås en noget bedre bestemmelse af tykkelsen i venstre ende af modelsuiten (model 1–10), hvor resistiviteten af andet lag er lille. Også opløsningen af andet lag er forholdsvis dårlig. Dette kommer til udtryk derved, at såvel resistiviteten som tykkelsen af dette lag de fleste steder er bestemt med en usikkerhed på over 0.5 og intetsteds er bestemt med en usikkerhed på under 0.2. Med undtagelse af modellerne i den venstre ende af modelsuiten (model 1–7) er resistiviteten af tredje lag nogenlunde bestemt, mens dybden til det tredje lag kun få steder (model 9–12) er bestemt med en usikkerhed på under 0.5.



Figur 6.1. Tolkning og analyse for de fire systemer af trelagsmodeller, hvor andet lags resistivitet varierer. Første og tredje lags resistivitet er henholdsvis 200 Ωm og 5 Ωm , og første og andet lags tykkelse er henholdsvis 10 m og 20 m.

Generelt kan det konkluderes, at der med DIGHEM^{VRES} systemet fås en dårlig opløsning af de overfladenære højresistive lag, men at dybden til den første gode leder til gengæld er godt bestemt eller velbestemt.

MEP

For MEP systemet ses det, at første lag generelt er godt opløst. Både resistiviteten og tykkelsen af første lag er således godt bestemt eller velbestemt, idet der dog opnås en dårligere bestemmelse af tykkelsen i højre ende af modelsuiten, hvor resistiviteten af andet lag er høj. For de øvrige modelparametre gælder det, at de er relativt dårligt bestemte i begge ender af modelsuiten, mens de er bedre bestemte for intermediære resistiviteter af andet lag, dvs. omkring model nr. 10–15. Specielt skal det bemærkes, at resistiviteten af tredje lag med undtagelse af model 18–21 er bestemt med en usikkerhed på under 0.5.

Generelt kan det konkluderes, at der med MEP fås en god opløsning af det øverste højresistive lag, ligesom der i de fleste tilfælde opnås god bestemmelse af resistiviteten af det tredje lag. Til gengæld fås en relativt dårlig bestemmelse af modelparametrene for andet lag og dybden til den gode leder i bunden.

PACES

Ud fra analysen ses det, at PACES systemet ikke formår at opløse de betragtede trelagsmodeller. Ganske vist er resistiviteten af første lag godt bestemt eller velbestemt for alle modeller, men alle øvrige parametre er til gengæld ubestemte.

Generelt kan det konkluderes, at PACES systemet giver en god bestemmelse af resistiviteten af det første lag, men til gengæld slet ikke formår at opløse de øvrige modelparametre.

PROTEM 47

For PROTEM 47 systemet ses det, at resistiviteten af første lag er ubestemt. Også tykkelsen af første lag er ubestemt, men dette gælder dog kun i højre ende af modelsuiten (model 9–21), hvor resistiviteten af andet lag er høj. For andet lags vedkommende gælder det, at modelparametrene er relativt godt bestemte i venstre ende af modelsuiten, men til gengæld er ubestemte i den højre ende. Resistiviteten af det tredje lag og dybden til dette er alle steder bestemt med en usikkerhed på under 0.5.

Generelt kan det konkluderes, at TEM metoden giver en meget god opløsning af det tredje lag, men til gengæld giver en dårlig opløsning af det første lag. Det andet lag er godt opløst, når resistiviteten af laget ikke er for høj.

Konklusion

Sammenfattende kan det konkluderes, at PROTEM 47 er bedst til at opløse den gode leder i bunden, men at også DIGHEM^{VRES} systemet giver en nogenlunde opløsning af dette lag. Derimod formår hverken PROTEM 47 eller DIGHEM^{VRES} at opløse det øverste lag, hvilket til gengæld er muligt med MEP systemet. Af de fire systemer giver PACES systemet den

klart dårligste opløsning, idet det kun formår at opløse resistiviteten af det øverste lag. Dette skyldes, at PACES systemet fokuserer relativt tæt ved jordoverfladen (jævnfør Kapitel 4) og dermed reelt set ikke kan trænge ned til det andet lag. Således kommer PACES systemet først til sin ret i forbindelse med en kortlægning af relativt tynde, overfladenære lag (se eksempel 2).

Eksempel 2 - tolagsmodeller

Ønskes en direkte sammenligning af de forskellige systemers evne til at bestemme dybden til og resistiviteten af et godt ledende lag, giver analyserne af tolagsmodellerne det bedste sammenligningsgrundlag. I dette eksempel tages udgangspunkt i en suite af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet er henholdsvis $70 \Omega\text{m}$ og $5 \Omega\text{m}$, og hvor første lags tykkelse varieres fra 1 m til 100 m (Grundmodel 7). Modellsuiten med de sande modeller og analyserne ses vist i Figur 6.2 (samme som Figur A.8 i Appendiks A).

DIGHEM^{VRES}

Ud fra analyserne ses det, at det første lag er dårligt opløst, når dets tykkelse er lille, men derimod godt bestemt, når dets tykkelse er stor. Resistiviteten af andet lag er godt bestemt for de første modeller (model 1–14), men bliver derefter dårligere bestemt, i takt med at tykkelsen af første lag bliver større. Generelt opløser DIGHEM^{VRES} systemet således den gode leder i bunden, så længe det første lag ikke er for tyndt eller for tykt.

MEP

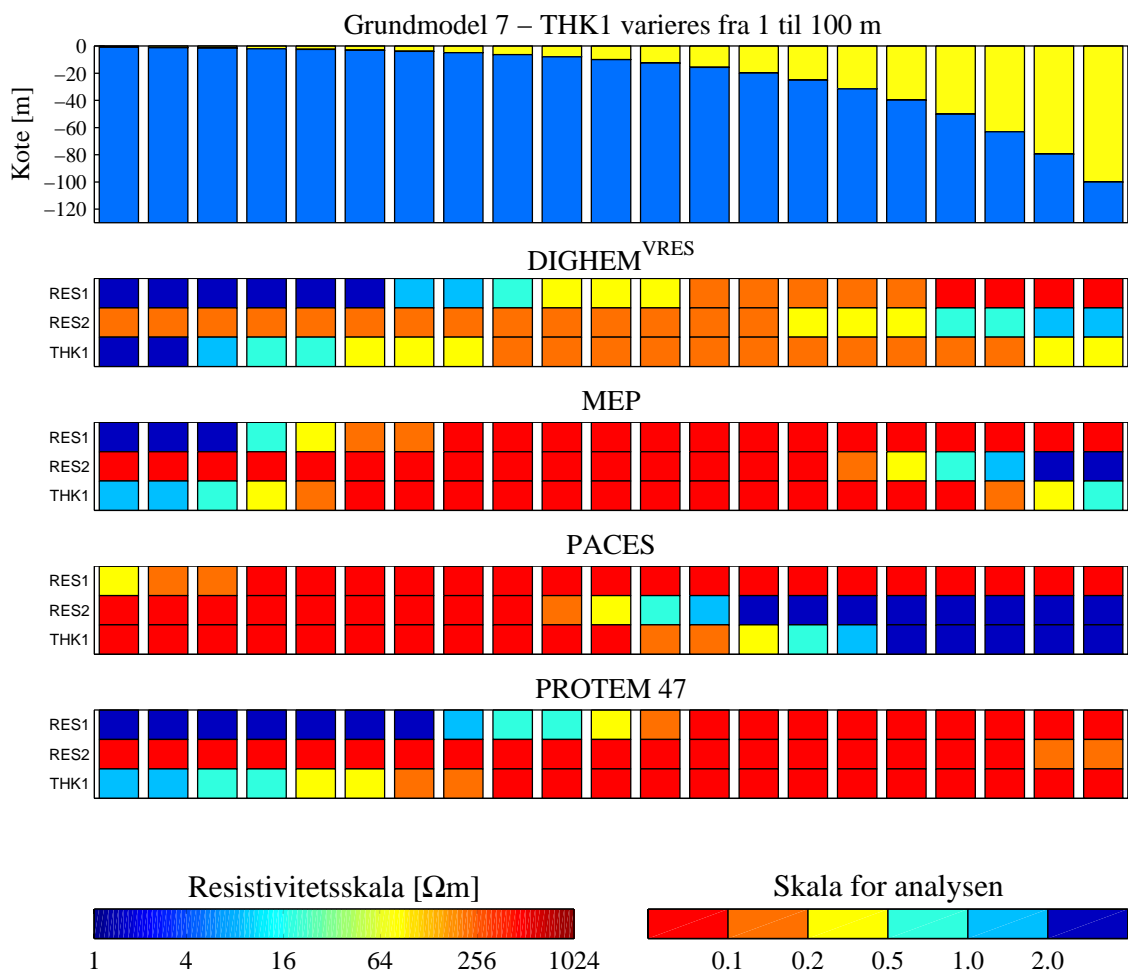
For MEP systemet bliver alle modelparametrene for de midterste modeller (model 5–17) bestemt med en usikkerhed på under 0.5, og først i enderne af modellsuiten ses der at være problemer med bestemmelsen. For små tykkelser af første lag er både resistiviteten og tykkelsen af første lag således ubestemte, mens det for store tykkelser af første lag er resistiviteten af andet lag og tykkelsen af første lag, der er relativt dårligt bestemte.

PACES

Ud fra analysen ses det, at PACES systemet for alle modeller bestemmer resistiviteten af første lag med en usikkerhed på under 0.5. Såvel resistiviteten af andet lag som tykkelsen af første lag er godt bestemt eller velbestemt i den venstre ende af model suiteen (model 1–10), men er til gengæld helt ubestemt i den højre ende (model 16–21), hvor tykkelsen af første lag er forholdsvis stor.

PROTEM 47

For PROTEM 47 systemet ses det, at resistiviteten af andet lag er godt bestemt eller velbestemt for alle modeller. Første lag er dårligt opløst, når dets tykkelse er lille, men til gengæld godt opløst, når tykkelsen er stor.



Figur 6.2. *Tolkning og analyse for de fire systemer af tolagsmodeller, hvor første lags tykkelse varierer. Første og andet lags resistivitet er henholdsvis 70 Ωm og 5 Ωm .*

Konklusion

Ud fra det betragtede eksempel kan det konkluderes, at den bedste bestemmelse af et godt ledende lag fås ved anvendelse af det jordbaserede PROTEM 47 system. En nogenlunde opløsning fås dog også med DIGHEM^{VRES} og MEP systemerne, mens PACES systemet, på grund af dets relativt dårlige indtrængningsdybde, er mindst anvendeligt til dette formål. Ønskes en bestemmelse af øverste lag, er PACES systemet til gengæld at foretrække, i hvert fald så længe tykkelsen af laget ikke er særlig stor. Nogenlunde det samme billede genfindes i Figur A.5 og A.11 i Appendiks A, der også viser nogle suiter af tolagsmodeller med et godt ledende lag i bunden, men med andre resistiviteter i det overliggende lag.

Tolkninger af støjperturberede data

Udover analyserne er der også foretaget egentlige tolkninger for to udvalgte jordmodeller. Formålet med disse tolkninger er at illustrere de betragtede systemers støjfølsomhed, da dette kan give et indblik i, hvad systemerne i praksis kan opløse.

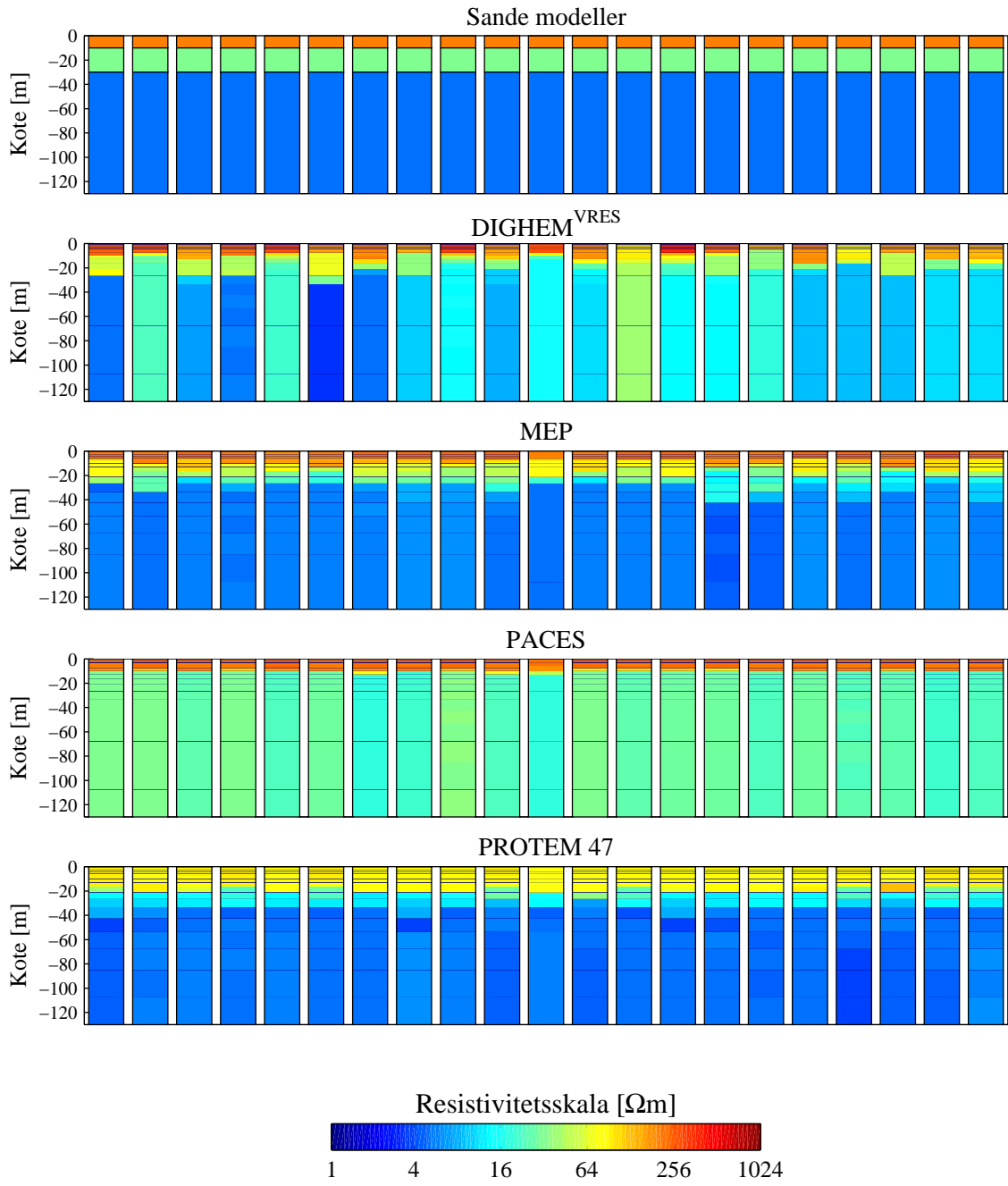
For en given jordmodel er tolkningen foretaget ved, at der for hvert af de fire betragtede systemer først er beregnet teoretiske data i form af modelrespons. Modelresponsene er herefter perturberet med støj, idet støjen er lagt på i overensstemmelse med støjmodellerne for de enkelte systemer (jf. Kapitel 5). Som følge af støjens stokastiske natur er der for hver jordmodel frembragt 21 forskellige "udfald" eller "realiseringer" af støjen, og de 21 datasæt, der på denne måde frembringes, er herefter tolket. Tolkningerne er foretaget som mangलगstolkninger – en metode der er omtalt i kapitel 5.

Den mangलगmodel, der er anvendt i de nedenstående eksempler, er en 20-lagsmodel med en tykkelse af det øverste lag på 1 m og en stigende lagtykkelse med dybden. Glathedsbegrænsningerne er konstante ned gennem modellen, men varierer for de enkelte systemer (se nedenstående tabel).

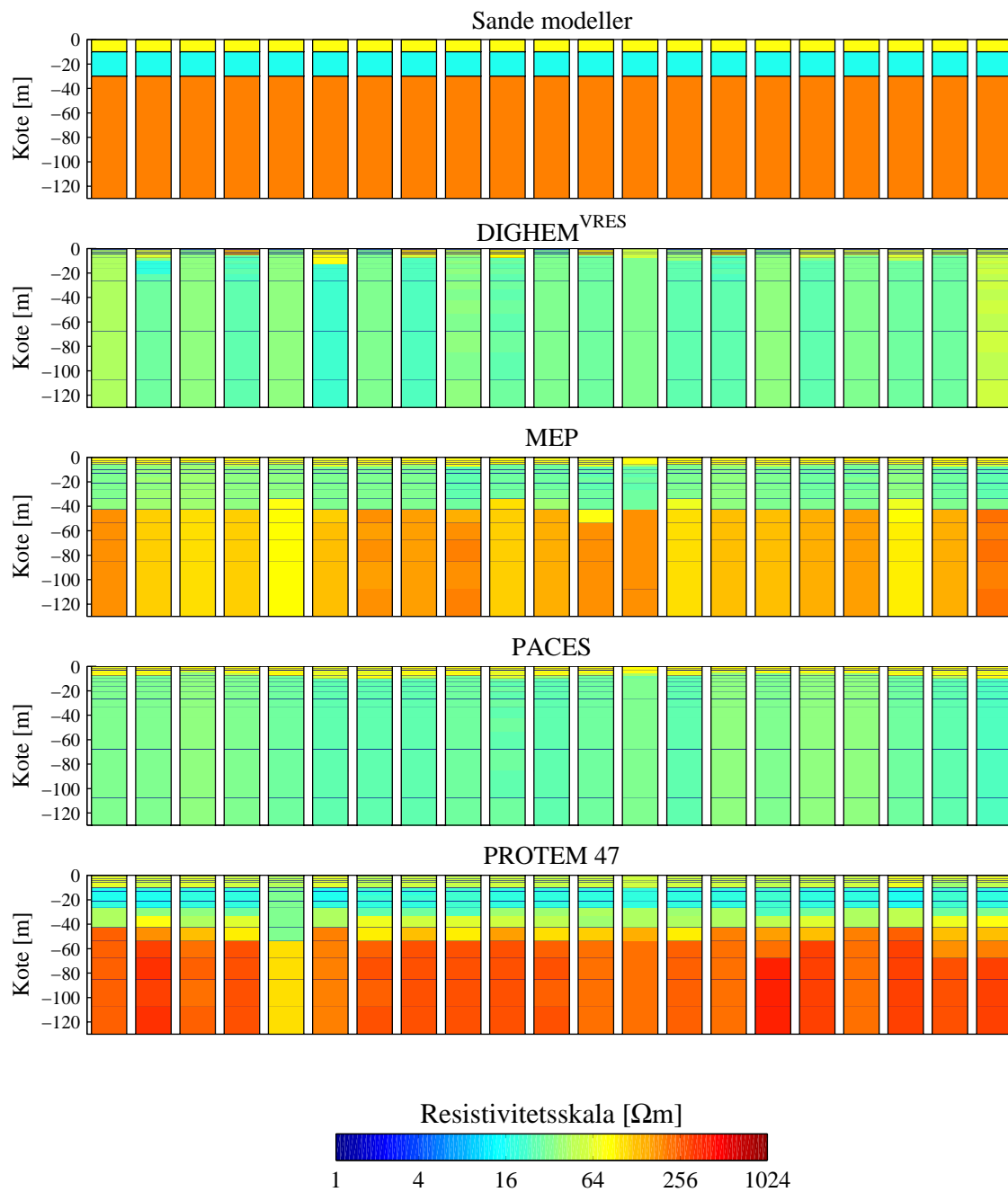
System	Glathedsbegrænsning
DIGHEM ^{VRES}	0.25
MEP	0.15
PACES	0.15
PROTEM 47	0.07

Resultatet af mangलगstolkningerne er vist i Figur 6.3 og Figur 6.4. I Figur 6.3 er udgangsmodellen, hvorfra data er genereret, en nedstigende trelagsmodel, hvor første lags tykkelse er 10 m, og andet lags tykkelse er 20 m. Resistiviteterne i første, andet og tredje lag er henholdsvis 200 Ω m, 32 Ω m og 5 Ω m. I Figur 6.4 er udgangsmodellen en trelags minimumsmodel, hvor lagtykkelserne er henholdsvis 10 m og 20 m for de to øverste lag, mens lagresistiviteterne i første, andet og tredje lag er henholdsvis 70 Ω m, 16 Ω m og 200 Ω m. Det skal understreges, at de viste suiter i Figur 6.3 og Figur 6.4 viser resultatet af mangलगstolkninger af data fra den *samme* model, men med 21 forskellige realiseringer af støjen på data.

Af Figur 6.3 fremgår det, at PROTEM 47 systemet er ganske robust over for støjpåvirkninger, idet der ved tolkningerne findes frem til nogenlunde ensartede modeller for hver af de 21 støjrealisationer. Som forventet er det tredje, lavresistive lag generelt godt opløst. Det første og andet lag er dårligt opløst og er i tolkningerne blevet "slået sammen" til et enkelt lag med en intermediær resistivitet. Også for PACES systemet findes der ved alle tolkninger frem til nogenlunde den samme jordmodel i alle 21 realisationer. Mens første lag klart genfindes i de tolkede modeller, kan det tredje lag slet ikke erkendes, hvilket stemmer godt overens med den tidligere iagttagelse, at PACES systemet ikke kan opløse dybereliggende lag. For MEP systemet ses det, at der er lidt mere variation i de tolkede modeller. Dog findes der i de fleste tilfælde frem til modeller, der minder ganske meget om de sande, og specielt bemærkelsesværdigt er det, at også det andet lag i mange tilfælde kan genfindes i modellerne. Af de fire systemer er det klart DIGHEM^{VRES} systemet, der er mindst robust over for støjpåvirkningerne. Således forekommer der en relativ stor variation mellem de enkelte modeller, men i næsten alle tilfælde findes der dog frem til et tyndt højresistivt lag i toppen og et underliggende lag med en lav resistivitet.



Figur 6.3. Analyse af effekten af støj på en dobbelt nedstigende trelagsmodel. Modellen kan genfindes i Appendiks A i Figur A.20.



Figur 6.4. Analyse af effekten af støj på en minimums trelagsmodel. Modellen kan genfindes i Appendiks A i Figur A.30.

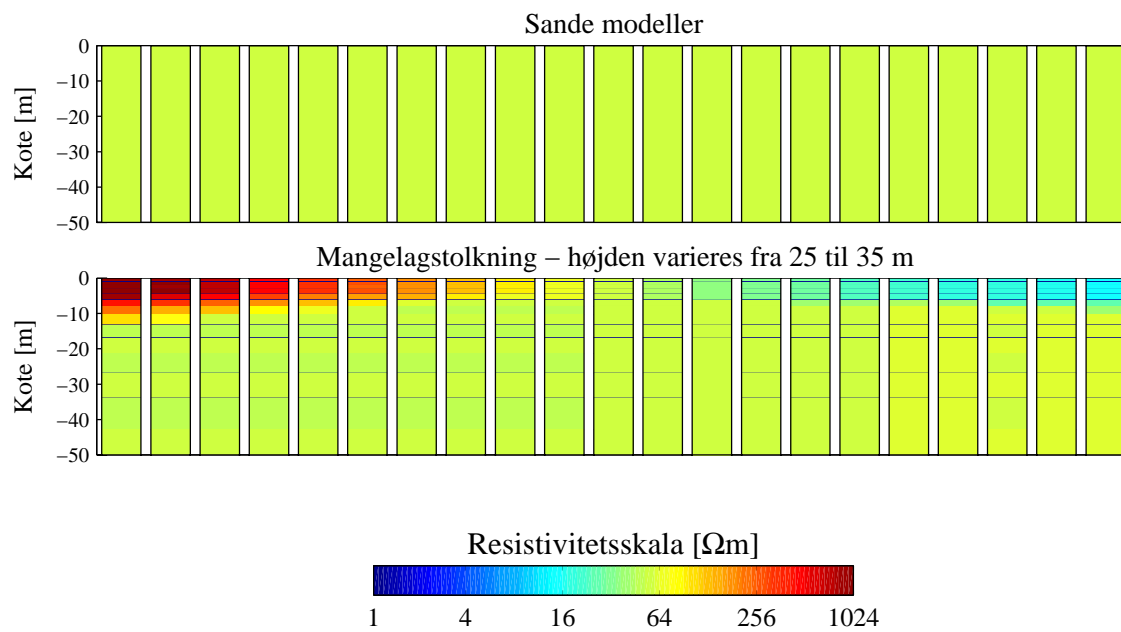
I Figur 6.4 er det nogenlunde det samme billede, der træder frem. PROTEM 47 systemet ses således igen at være forholdsvis robust over for støjpåvirkninger, når det gælder bestemmelsen af laggrænserne, men igen formår systemet ikke at opløse det øverste lag. MEP systemet er også robust over for støjpåvirkninger, og i alle tolkninger findes frem til modeller, der minder meget om de sande modeller, omend tykkelsen af det andet lag bliver overvurderet. PACES systemet formår også som før at opløse det første lag, men kan ikke trænge ned til det tredje. For DIGHEM^{VRES} systemet går det helt galt. I de fleste tilfælde findes således frem til modeller, der ligger tæt op af et homogent halvrum med en resistivitet, der svarer nogenlunde til resistiviteten af andet lag i den sande model. Enkelte steder genfindes det øverste lag.

Effekten af fejl på højdebestemmelsen

Som omtalt i Kapitel 5 i afsnittet *Støjmodeller for de fire systemer / HEM* har målehøjden stor indflydelse på målingerne, hvorfor en fejl på højdebestemmelsen vil medføre en fejl på tolkningen af data. Der skal i dette afsnit kort ses nærmere på effekten af at tolke data med en fejlagtig højde.

Udgangspunktet er et homogent halvrum med en resistivitet på 50 Ωm , for hvilket der beregnes teoretiske data, idet spolehøjden sættes til 35 m. De generede data er derefter tolket med 21 forskellige flyvehøjder mellem 25 m og 45 m, idet der er anvendt en manglagsmodel svarende til den tidligere omtalte. Resultatet af tolkningerne ses i Figur 6.5

Man ser tydeligt, at en undervurderet flyvehøjde (venstre halvdel) vil bevirke, at der introduceres områder med for høj resistivitet i overfladen, og vice versa. Specielt kan det bemærkes, at de tolkede modeller ændrer sig, blot flyvehøjden er forkert med 1 m. Figur 6.5 understreger vigtigheden i at editere og korrigere højdedata, hvor de er fejlagtige.



Figur 6.5. Figuren viser data fra et homogent halvrum på $50 \Omega m$ målt i højden 35 m og tolket under antagelse af målehøjder i intervallet fra 25 m til 45 m.

Kapitel 7 – Analyse af todimensionale modeller

I dette kapitel præsenteres resultaterne af endimensionale og todimensionale tolkninger af data fra fem todimensionale modeller for de fire forskellige metoder. Tolkningen af DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 responser foretages med endimensionale modeller, både få- og mangelagsmodeller. Tolkningen af PACES responser foretages med lateralt sammenbundne endimensionale modeller, og tolkningen af MEP responser foretages med todimensionale modeller. For alle metoder gælder det, at de endimensionale tolkninger ikke kan forventes at opløse alle detaljer i de todimensionale modeller, og der optræder eksempler på, at de laterale variationer i de todimensionale modeller forvrider de endimensionale tolkninger. Alle tolkninger er udført på syntetiske data, der ikke er perturberet med støj, og analyserne er udført på basis af støjmodellerne fra Kapitel 5.

Todimensionale modeller

Den endimensionale (1D) beskrivelse af jordens resistivetsforhold er ikke altid en tilstrækkelig god tilnærmelse til de faktiske geologiske forhold, og det er derfor vigtigt at belyse HEM metodens evne til at opløse todimensionale (2D) strukturer, når data tolkes med en 1D model, og at undersøge 2D strukturers indflydelse på 1D tolkningen.

Beregninger af responset fra 2D modeller adskiller sig fra beregninger for 1D modeller ved betydeligt længere regnetider. Typiske regnetider for 2D modellerne med profillængder på 2000 m og måleafstand 20 m er af størrelsesordenen 100 000 gange længere end regnetiden for en tilsvarende mængde responser fra en 1D jord. Hurtige beregninger for flerdimensionale modeller kan kun foretages for nogle helt specielle typer af modeller som f.eks. pladeformede gode elektriske ledere (thin sheets). Disse specielle typer af modeller har stort set ingen relevans for danske forhold.

2D modellerne er de samme som blev anvendt i GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000). Modellerne er udvalgt i samarbejde med de parter, som er involveret i projektet, og er opstillet med to dybdeskalaer: én svarende til modellerne i GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000), i det følgende betegnet med V1, og én hvor laggrænserne er placeret i den halve dybde, i det følgende betegnet med V2. De beskriver nogle typiske geologiske forhold i Danmark, inden for de rammer, 2D modelleringen tillader. Inden den nærmere beskrivelse af de valgte modeller skal der knyttes nogle bemærkninger til fremgangsmåden for 2D modelleringen.

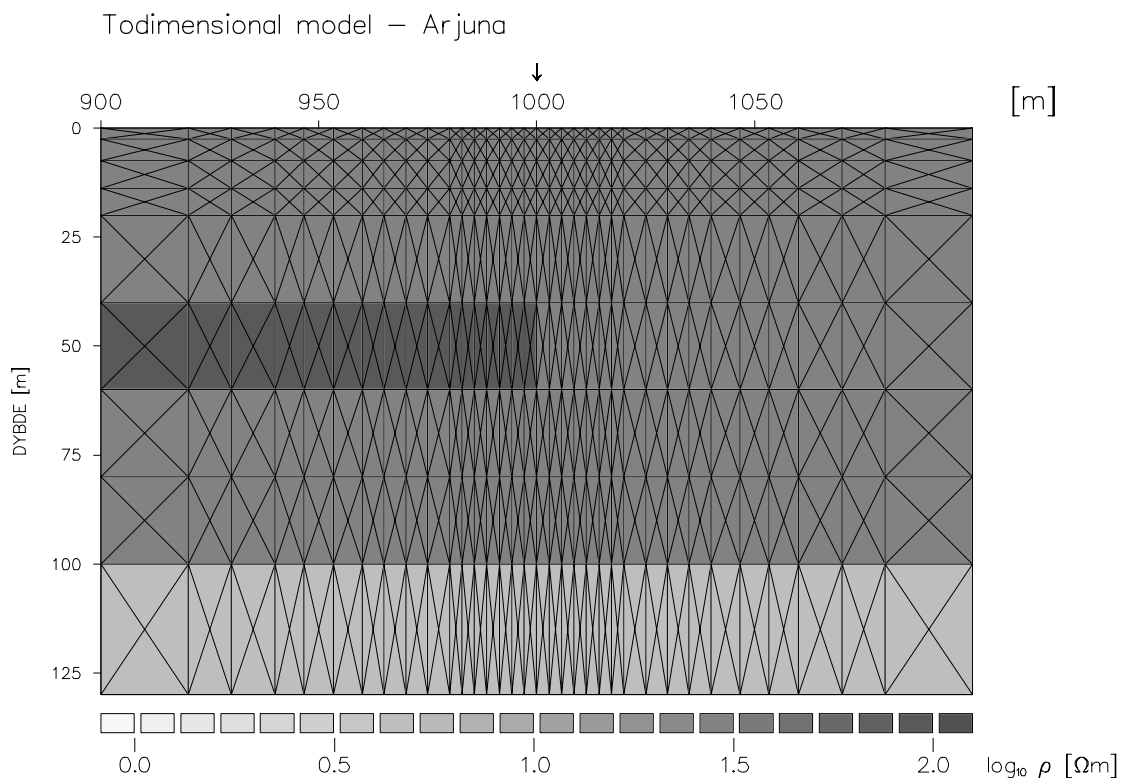
Beregning af todimensionale responser

De elektromagnetiske 2D responser, som præsenteres i denne rapport, er beregnet ved anvendelse af to computerprogrammer, ARJUNA og ARJUNA_AIR (Raiche *et al.* 1999). Programmerne er udviklet under AMIRA projektet (Australian Mineral Industries Research Association Ltd.), og er begge baseret på *finite element* metoden. De geoelektriske 2D

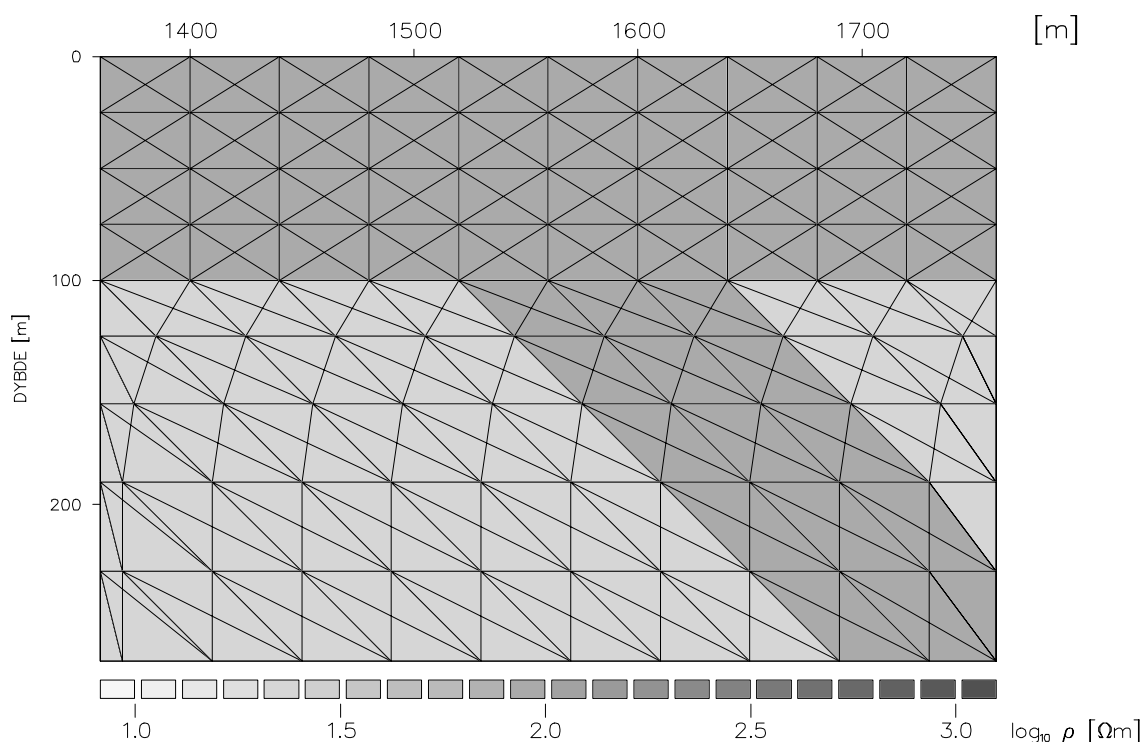
responser er beregnet ved anvendelse af computerprogrammet DCFOR2D (McGillivray 1992), som er baseret på *finite difference* metoden.

Programmet ARJUNA_AIR benytter en magnetisk dipolkilde og er anvendt til beregninger af responset for DIGHEM^{VRES} systemet. Responset for PROTEM 47 systemet, hvor antagelsen om en dipol ikke er tilstrækkelig god, er beregnet med ARJUNA programmet, som modellerer den faktiske geometri af sendersløjfen.

Figur 7.1 og 7.2 viser eksempler på opbygningen af 2D modellerne. Som det ses, er de opbygget omkring *et gitter* (engelsk: *grid*) udspændt over et vertikalt tværsnit gennem jorden og luftrummet. Gitteret definerer en række *knudepunkter* (engelsk: *nodes*) og en række *modelelementer* eller *celler* (engelsk: *cells*) udspændt mellem et antal knudepunkter. I ARJUNA programmet er gitteret og dermed cellerne rektangulære. Ledningsevnen er konstant inden for en celle, og hver celle omfatter fire trekantede beregningsceller (se Figur 7.1). ARJUNA_AIR forudsætter ikke rektangulære celler (se Figur 7.2). I ARJUNA_AIR er en celle defineret af tre nærliggende knudepunkter, hvor ledningsevnen er konstant. Ved computerberegningerne antages, at det elektriske felt varierer lineært i hver celle. Denne antagelse betyder, at cellestørrelsen skal være tilstrækkelig lille for at kunne simulere de faktiske forhold i jorden. Cellerne skal være små, hvor det elektriske felt varierer kraftigt vertikalt eller horisontalt, dvs. især i nærheden af kilden. Afstanden mellem knudepunkterne kan forøges ved større dybder.



Figur 7.1. Figuren viser diskretiseringen af 2D modellerne i programmet ARJUNA. Man ser de rektangulære celler, hvor konduktiviteten kan defineres, og de trekantede beregningsceller.



Figur 7.2. Figuren viser diskretiseringen af 2D modellerne i programmet ARJUNA_AIR. I dette program er de firkantede celler ikke nødvendigvis rektangulære, og konduktiviteten kan defineres inden for hver af de trekantede beregningsceller.

Beregningstiden for modelresponsene stiger meget kraftigt med antallet af celler i modellen. Dette medfører begrænsninger med hensyn til, hvor små cellerne kan være, og dermed til graden af detaljer i modellerne og beregningsnøjagtigheden. I ARJUNA programmet defineres modellen af rektangulære områder med konstant ledningsevne. Denne beskrivelse af ledningsevnefordelingen betyder, at det ikke er muligt at simulere de bløde variationer, som vil være til stede i jorden. ARJUNA_AIR programmet giver bedre muligheder for at simulere de faktiske forhold i jorden. Vi har dog valgt også at anvende et rektangulært gitter i ARJUNA_AIR modellerne for at opnå identiske modeller for de beregninger, som er foretaget med de fire systemer.

DCFOR2D programmet (McGillivray 1992), som benyttes til beregning af PACES og MEP responserne, anvender rektangulære beregningsceller. Den laterale udstrækning af cellerne skal være mindre end den korteste elektrodeafstand, medens cellehøjden kan stige med dybden. Beregningstiden for de geoelektriske responser er væsentligt mindre end beregningstiden for elektromagnetiske responser, selvom DCFOR2D programmet anvender et væsentligt større antal celler i modellerne.

Beskrivelsen af de fire systemers opsætning findes i Kapitel 4, hvor også de frekvenser, tidsvinduer og elektrodekonfigurationer, som er anvendt ved 2D modelleringen for henholdsvis DIGHEM^{VRES}, PROTEM 47, PACES og MEP systemerne, er angivet.

En måling med et elektromagnetisk eller geoelektrisk udstyr er et udtryk for en midling af konduktiviteterne inden for et vist område. I Kapitel 5 er følsomhedsfunktionerne vist for de fire systemer, som omtales i denne rapport. Selvom de er meget forskellige, gælder det generelt, at følsomheden breder sig udad og nedad, enten for faldende frekvens for DIGHEM^{VRES} systemet, som tiden går for TEM systemer eller for forøget elektrodeafstand for geoelektriske systemer. En sondering kortlægger derfor ikke bare variationer af konduktiviteten med dybden, men også laterale variationer. Hvis der i 2D modellerne er laterale variationer inden for det område, hvor følsomhedsfunktionen har sin hovedvægt, vil disse påvirke målingen, men i en 1D tolkning vil disse variationer blive tilskrevet variationer udelukkende med dybden. Det betyder, at laterale variationer i større eller mindre omfang vil forvrænge 1D tolkningerne. Dette kaldes for 2D *effekt*, se afsnittet *Utilstrækkelighed og inkonsistens* i Kapitel 5.

Ved bevægelige systemer som DIGHEM^{VRES} og PACES stakkes og filtreres data, efter at målingerne er foretaget. Denne efterprocessing kan ikke simuleres ved 2D modelleringen af DIGHEM^{VRES} systemet, da det ville kræve, at man beregnede responserne i et stort antal meget tætliggende punkter, hvorved regnetiden ville blive uoverskuelig stor. I 2D modelleringen er DIGHEM^{VRES} responset beregnet for hver 20 m langs profilerne. Denne afstand er rimelig, idet den nogenlunde svarer til den midlingsbredde, som anvendes ved filtrering af responserne langs profilet. Den svarer imidlertid til en måling med et stationært system over målepunktet og tager ikke højde for systemets bevægelse og den laterale midling i stakningsperioden. Denne manglende stakning kan give anledning til, at 2D effekterne vil optræde stærkere i modelleringen end i målte data, så i virkelighedens verden er problemerne lidt mindre end i analyserne i dette kapitel.

For PACES systemet simuleres efterprocessingen. PACES responset, som er beregnet for hver meter, midles for hver elektrodekonfiguration over afstande svarende til elektrodeafstanden eller afstanden mellem de udvalgte sonderinger, hvis denne er større. Derefter samles data i sonderinger med en indbyrdes afstand på 5 m.

PROTEM 47 data er modelleret med en central loop konfiguration på jordoverfladen, og målepunkterne er placeret med 100 m afstand langs 2D profilerne. Med dagens feltpraksis for enkeltstående sonderinger vil PROTEM 47 målinger oftest blive anbragt med en indbyrdes afstand, der er større end 100 m. For DIGHEM^{VRES} systemet er der 20 m mellem målepunkterne, medens de rå data fra feltmålinger ligger med en indbyrdes afstand på ca. 3 m. Profilkoodinaten refererer til centrum af senderen for DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 systemerne, medens den referer til midtpunktet af elektrodeopstillingen for MEP og PACES systemerne.

Det er af stor betydning at kende 2D modelleringsprogrammernes beregningsnøjagtighed, således at eventuelle beregningsunøjagtigheder ikke fejlagtigt opfattes som 2D effekter. For at undersøge beregningsnøjagtigheden af ARJUNA og ARJUNA_AIR er der foretaget en række beregninger af responserne for DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 systemerne for et homogent halvrum og nogle 1D to- og trelagsmodeller. Responserne er sammenlignet med de tilsvarende responser beregnet med 1D programmet SELMA. Resultaterne af disse sammenligninger viser, at responserne beregnet med ARJUNA_AIR, som er anvendt til

modellering af det luftbårne system DIGHEM^{VRES}, generelt afviger mindre end 5% fra de tilsvarende SELMA responser. For ARJUNA programmet, som anvendes ved modellering af det jordbaserede system PROTEM 47, er afvigelserne større ved de tidlige tider. Konsekvensen af disse afvigelser er, at der kan optræde tynde, overfladenære, resistive lag i de endimensionale tolkninger, eller at det øverste lag kan blive mere resistivt eller tykkere. Dette var tilfældet for de modeller, som blev præsenteret i GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000), men vi har i forbindelse med udarbejdelsen af denne rapport foretaget en korrektion af de beregnede 2D-responser. Korrektionen er foretaget således, at de differenser, som kan observeres for responser for homogene halvrum med samme resistivitet som overfladelaget i 2D-modellerne, adderes til 2D-responserne inden tolkningen.

Beregningsnøjagtigheden for DCFOR2D er undersøgt på tilsvarende vis ved en række beregninger af PACES og MEP responser. Generelt afviger MEP og PACES responser beregnet med DCFOR2D mindre end 1% fra de tilsvarende SELMA responser.

Geologisk beskrivelse af modellerne

Fem forskellige 2D modeller er anvendt til at simulere nogle typiske geologiske forhold i Danmark, se Figur 7.3 og Appendiks B. Detaljeringsgraden i modellerne er tilpasset de begrænsninger, som er nævnt i afsnittet om beregninger af 2D responser. Mindre inhomogeniteter, som vil være interessante i anden geologisk sammenhæng, er derfor udeladt. Modellerne optræder med to forskellige dybdeskalaer. Flere af modellerne har resistivitetsforhold, der gør, at de kan simulere mere end én type geologi svarende til resistivitetsbeskrivelserne i Kapitel 6, *Geologisk beskrivelse af modellerne*. De fem modeller er følgende:

Smal Dal

Simulering af forholdene omkring en begravet dalgang i tertiært ler med overlejring af kvartært materiale. Det kvartære materiale omfatter et fersk grundvandsmagasin i sandet materiale og er delvis dækket med morænemateriale med områder, hvor sandet går i dagen, de såkaldte "sandvinduer". Dalens bredde er 800 m og dybden er 55 m eller 110 m. Modellen har til hensigt at teste systemernes evne til at kortlægge variationer i toplaget og dalskrænter med forskellig hældning samt deres evne til at lokalisere den gode leder i bunden af modellen. Modellen kan også simulere saltvand/ferskvandsgrænsen i kvartært sand med et overdække af morænemateriale.

Moræne

Modellen er domineret af tykke moræneaflejringer over tertiært ler. Morænematerialet er stedvist mere sandet eller leret. Modellen har bl.a. til hensigt at teste metodernes evne til at opløse resistivitetsforskelle i et tykt overdække.

Kalk

Modellen simulerer en kalkforekomst med overlejrende morænemateriale af forskellig tykkelse. Morænematerialet indeholder flere sandede lag af forskellige dimensioner. Modellen

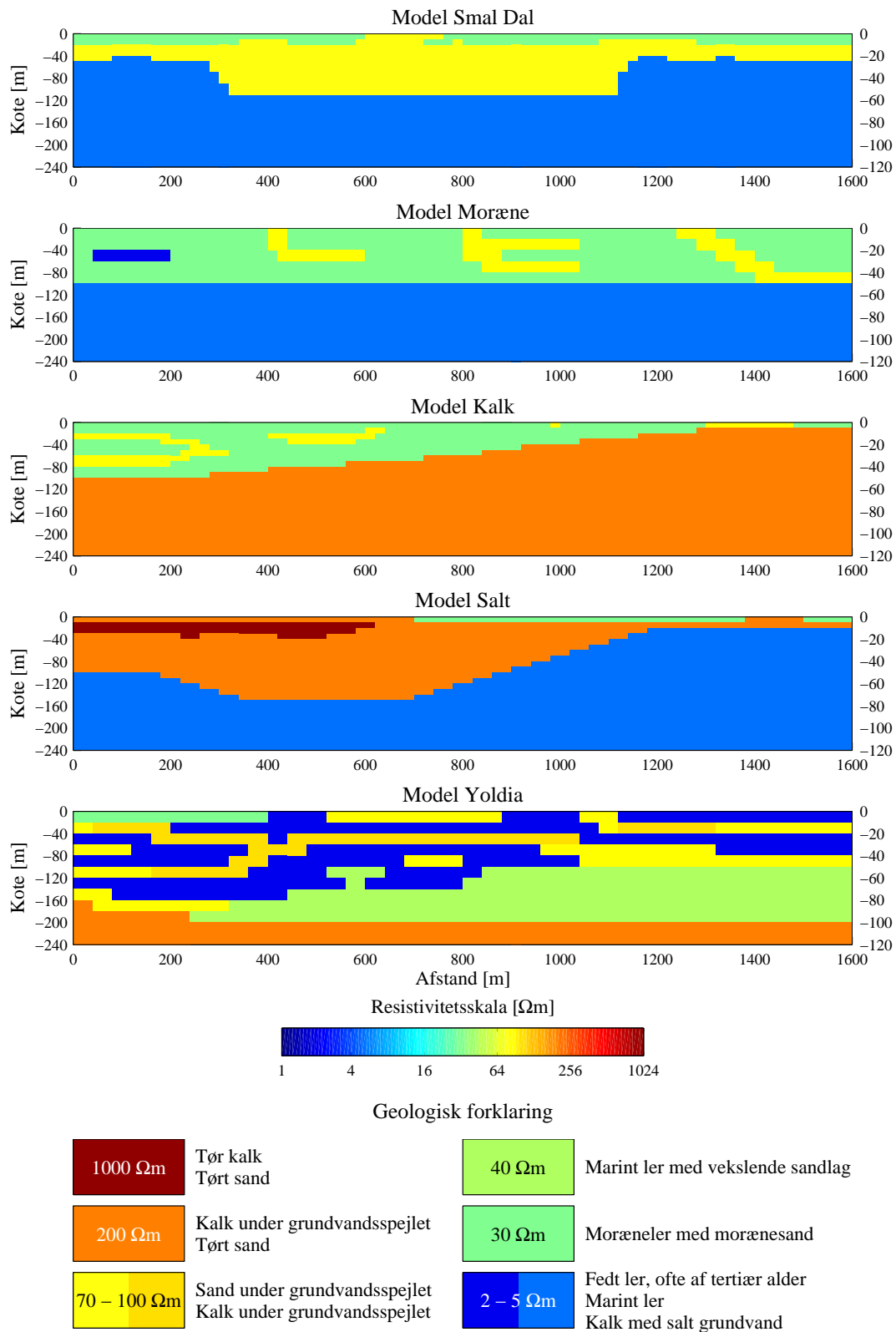
tester systemernes evne til at opløse grænsen mellem den forholdsvis godt ledende moræne og den dårligt ledende kalk i bunden samt muligheden for at skelne ændringer i toplagets resistivitet. Den dårlige leder i bunden kan også simulere sand med fersk grundvand.

Salt

Modellen simulerer en kalkforekomst med saltvand/ferskvands grænse. Kalk med salt grundvand udgør bunden af modellen. I venstre side af modellen er der i toppen umættet kalk med overlejrende tørt sand. I højre side udgøres toplaget af morænemateriale med et sandvindue. Med denne model undersøges metodernes evne til at kortlægge overgangen mellem en dårlig leder og en god leder i bunden af modellen, samt evnen til at skelne variationer i toplagene.

Yoldia

Model med aflejringer fra Yoldia havet. Modellen består af vekslende ler-, sand- og morænelag med en vandmættet fersk kalk i bunden. Den meget kantede model med skarpe grænser mellem vekslende lag af forskellige resistiviteter svarer naturligvis ikke til en faktisk forekommende geologi, men modellen tester metodernes indtrængningsevne og opløsningsevne, når der er en god leder i toppen.



Figur 7.3. Figuren viser de fem 2D modeller, som analyseres i dette kapitel, nemlig Smal Dal, Moræne, Kalk, Salt og Yoldia. Modellernes to dybdeskalaer er vist på henholdsvis den venstre og den højre vertikale akse.

1D og 2D tolkning af 2D responser

Regnetiden for at udføre inversion er ofte mere end 100 gange større end regnetiden for et modelrespons. Den meget lange regnetid for transiente elektromagnetiske 2D responser betyder derfor, at tolkning med anvendelse af inversionsteknik baseret på 2D modeller ikke er realistisk med almindelig tilgængelig computerkapacitet når TEM data skal tolkes. På trods af den meget hurtige udvikling inden for computerteknologi vil det antageligt ikke være realistisk at forvente rutinemæssig 2D inversion af TEM inden for de nærmeste fem år. Skønt vore dages computere er hurtige nok til, at det i princippet ville være muligt at foretage 2D tolkninger af HEM data, er sådanne programmer ikke tilgængelige. Vi må derfor gå ud fra, at tolkning af HEM og TEM data i de nærmeste år overvejende vil blive foretaget med udgangspunkt i 1D inversionsteknik.

En almindelig fremgangsmåde ved tolkning af tætliggende målinger langs et profil som f.eks. data målt med helikopter eller fly er at præsentere resultaterne fra 1D inversionerne af hver enkelt sondering ved siden af hinanden, hvorved der fremkommer en sammenhængende *modelsektion*. Herved fås en sektion, som i princippet beskriver en 2D ledningsevnevariation. Denne sektionens afvigelse fra den faktiske fordeling af ledningsevnen vil blive undersøgt i det følgende for de valgte 2D modeller. 1D tolkningerne af DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 responserne er foretaget dels med så få lag som muligt, dels med modeller med mange lag (10) med faste laggrænser. Nedenfor og i Appendiks B præsenteres tolkningerne af data fra 2D responsberegningerne for de fire forskellige systemer, idet støjmodellen fra Kapitel 5 anvendes. Inversion af data for de fire systemer er foretaget med anvendelse af de teknikker blandt de eksisterende programkoder, som ved tiden for udarbejdelsen af rapporten, må anses som værende de mest optimale og samtidigt praktisk realiserbare med hensyn til rimelige beregningstider. I dette kapitel vises udelukkende tolkningsresultaterne for Smal Dal V2 modellen, og præsentationen af tolkningerne og analyserne forklares nærmere. I Appendiks B findes tolkninger, analyser og kommentarer for alle 10 2D modeller for de enkelte systemer.

Der er i de følgende tolkninger ikke lagt støj på de syntetiske data inden tolkningen. For en nærmere omtale af effekten af støj henvises til Kapitel 6. Ud over 1D tolkningerne præsenteres også en analyse af usikkerheden på modelparametrene.

Få- og mangelagstolkninger af DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 responser

Mangelagstolkningerne af 2D responserne anvender en tilagsmodel. Laggrænsernes beliggenhed er fast, og lagtykkelsen er voksende med dybden. Dybden til laggrænserne er følgende: 1, 2.7, 5.59, 10.5, 18.86, 33.05, 57.19, 98.23 og 167.98 m. Det er således udelukkende lagenes resistivitet, der varierer i inversionen. For at modvirke, at man får en model, hvor lagresistiviteterne fluktuerer voldsomt, er der lagt en begrænsning på, hvor store resistivitetsforskelle, der kan forekomme mellem nabolag. Udgangsmodellen er et homogent halvrum på 30 Ω m, hvis ikke andet er angivet.

Fålagstolkninger har i modsætning til mangelagstolkninger ikke faste laggrænser, dvs. at laggrænsernes placering indgår i inversionen ligesom lagenes resistiviteter. Antallet af lag i

modellen varierer fra et til tre alt afhængig af informationsindholdet i data og komplikationsgraden af 2D modellen. Data tolkes med den model, som har det mindste antal lag, der skal til for at få en god tilpasning mellem modelresponsen og data. Kriteriet for udvælgelsen af den endelige model er, at residualen for datatilpasningen er mindre end eller lig med 1, og at modellen med færrest antal lag vælges, hvis flere modeller giver acceptable residualer. Antallet af lag i den udvalgte model kan være meget afhængig af små ændringer i datatilpasningen når residualen er lige omkring 1, og der forekommer derfor i nogle tilfælde store kontraster mellem nærliggende 1D modeller i en sektion.

Sammenlignes PROTEM 47 og DIGHEM^{VRES} resultaterne fra mangelagstolkningerne med fålagstolkningerne, kan man i flere tilfælde observere, at modellerne fra mangelagstolkningerne har bedre overensstemmelse med de sande modeller end de tilsvarende modeller fra fålagstolkningerne. Dette skyldes først og fremmest den måde, som de endelige få- og mangelagstolkninger er udvalgt på. Fålagstolkningerne er udvalgt som de simpleste modeller, der har et residual på mindre end 1, medens blødhedskravet på mangelagstolkningerne har været så mildt, at de har fået lov til at finde en model, med et mindre residual. Det milde blødhedskrav er muliggjort af, at man betragter perfekte data. Hvis man tolkede på støjfyldte data, ville det være nødvendigt at stramme blødhedskravet på mangelagstolkningerne, og derved ville nogle af de variationer i resistivitet, som observeres, forsvinde, og få- og mangelagstolkningerne ville komme til at ligne hinanden mere. Måden at gennemføre tolkningerne på ved anvendelse af både få- og mangelagsmodellerne er valgt for at illustrere forskellige syn på opløsningsegenskaberne. Mangelagstolkningerne viser, hvilke træk ved modellerne, der i bedste fald indikeres, men ikke nødvendigvis opløses, medens analyserne af fålagsmodellerne viser, hvor godt modelparametrene faktisk er opløst.

Tolkning af PACES responser med lateralt sammenbundne 1D modeller

PACES data tolkes rutinemæssigt med en metode, hvor de enkelte sonderinger sammenkøbes med laterale bånd og tolkes samtidigt med 1D modeller, den såkaldte LCI-tolkning (Auken *et al.* 2000). De enkelte 1D tolkninger er fålagstolkninger. Der anvendes det samme antal lag for alle 1D modellerne langs profilet.

2D tolkning af MEP responser

MEP profiler tolkes rutinemæssigt med 2D inversionsprogrammer, f.eks. programmet RES2DINV (Loke & Barker 1996), som anvendes her. RES2DINV er anvendt med en indstilling, hvor de afledede beregnes for hver iteration (Dahlin & Loke 1998). 2D modellerne inddeles i en lang række celler. Der lægges begrænsninger på, hvor store resistivitetsforskelle der kan forekomme mellem naboceller, for at modvirke, at celleresistiviteterne fluktuerer for voldsomt. Begrænsningerne på resistivitetsvariationerne kan formuleres på flere måder. RES2DINV finder enten den blødeste model, som tilpasser data (L_2 -normsinversion), eller foretager en såkaldt robust inversion, som tillader større spring i resistivitet mellem grupper af celler med stort set ens resistivitet og dermed giver en kantet model (L_1 -normsinversion). De bløde MEP modeller er placeret sammen med mangelagstolkningerne, medens de kantede MEP modeller er placeret sammen med fålagstolkningerne.

gerne. Der præsenteres ingen analyser for MEP modellerne, da de inversionsteknikker, RES2DINV programmet bygger på, ikke fremstiller en anvendelig analyse.

Præsentation af tolkning og analyse

Mangelagstolkninger af Smal Dal

På Figur 7.4 (samme som Figur B.2 i Appendiks B) ses resultatet af mangelagstolkningerne af Smal Dal for DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 systemerne, LCI-tolkningen for PACES systemet samt 2D tolkningen med den bløde model for MEP systemet. Øverst ses den sande model; herefter følger DIGHEM^{VRES}, MEP, PACES og nederst PROTEM 47.

DIGHEM^{VRES}

Mangelagssektionerne for DIGHEM^{VRES} systemet viser beliggenheden af dalen. Dalbunden kan erkendes som faldende resistivitet over et par lag. Over dalen fremstår morænelaget i toppen med en tykkelse på ca. 10 m, hvilket svarer til tykkelsen i den sande model, mens laget uden for dalen bliver tykkere og erstatter laget med vandmættet sand. Udtyndingerne i morænelaget viser sig som svage ændringer i resistiviteten, medens sandvinduet indikeres i tolkningen.

MEP

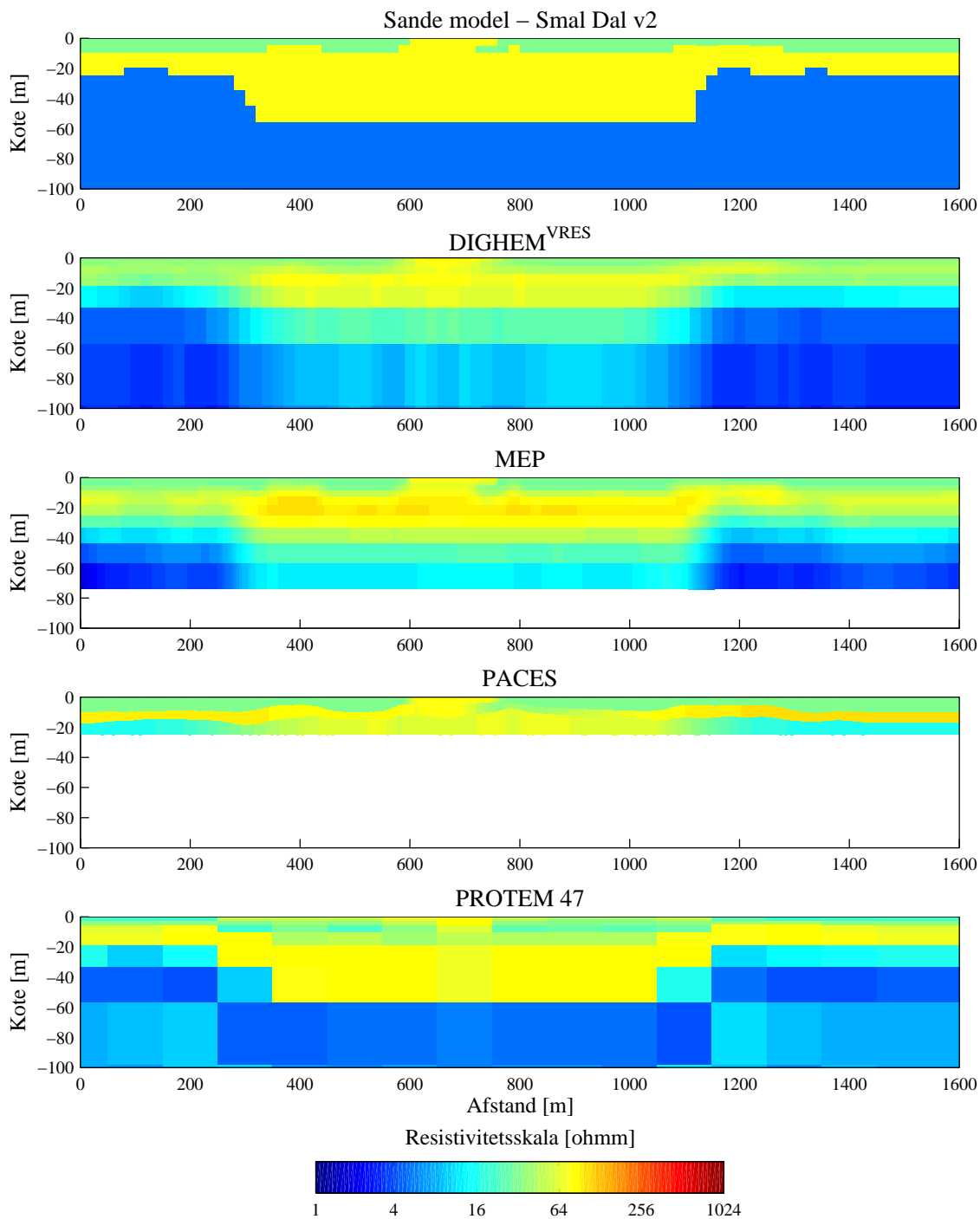
2D sektionen for MEP systemet viser klart dalens beliggenhed. Det er dog vanskeligt at definere dalbunden, da denne ligger omkring dybden for MEP systemets maksimalindtrængning. Morænelagets tykkelse stemmer overens med den sande model; dette er ligeledes tilfældet for udtyndingerne og sandvinduet i morænelaget.

PACES

LCI-sektionen for PACES systemet viser klart variationerne i morænelagets tykkelse. PACES systemets begrænsede indtrængning gør, at dalen kun erkendes ved, at lerlagene ved siden af dalen forsvinder.

PROTEM 47

Mangelagstolkningen af de beregnede PROTEM 47 responser over Smal Dal viser klart beliggenheden af dalen. Da dybden til dalbunden stort set er sammenfaldende med en laggrænse i mangelagsmodellen, fremstår dalbunden tydeligt. Morænelaget i toppen ved siden af dalen har en tykkelse på ca. 10 m i tolkningen, hvilket svarer til tykkelsen i den sande model, medens det bliver tykkere over dalen. Sandvinduer i morænen viser sig som en ændring af resistiviteten i toplaget, hvorimod udtyndingerne ikke kan erkendes.



Figur 7.4. Modellen Smal Dal tolket med mangelagsmodeller for DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 systemerne, LCI-modeller for PACES systemet og 2D modeller for MEP systemet.

Fålagstolkninger af Smal Dal

På Figur 7.5 (samme som Figur B.1 i Appendiks B) ses resultaterne af fålagstolkningerne af Smal Dal for DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 systemerne, LCI-tolkning for PACES systemet og 2D tolkning for MEP systemet udført med robust inversion. Øverst i figuren er den sande model præsenteret; herefter følger tolkningerne for DIGHEM^{VRES}, MEP, PACES og PROTEM 47. Under 1D tolkningerne vises en grafisk fremstilling af analysen af de enkelte 1D tolkninger. Da der er tolket med modeller med et til tre lag, vil antallet af parametre være forskelligt langs profilerne. Under et målepunkt er der således præsenteret dels 1D tolkning, dels analysen for netop denne tolkning.

Analysen læses på følgende måde:

- For en etlagstolkning indeholder analysen usikkerheden på én parameter, nemlig lagets resistivitet.
- For en tolagstolkning indeholder analysen usikkerheden på tre parametre (ovenfra og ned): første og andet lags resistivitet og første lags tykkelse (svarende til dybden til andet lag).
- For en trelagstolkning indeholder analysen usikkerheden på seks parametre (ovenfra og ned): første, andet og tredje lags resistivitet, første og andet lags tykkelse og dybden til tredje lag.

Den relative usikkerhed på bestemmelsen af modelparametrene er grafisk fremstillet ved en farve. Den tilhørende farveskala er inddelt i 6 niveauer, der beskriver, hvor godt den enkelte parameter er bestemt, se Kapitel 6, afsnittet om *Præsentation af tolkninger og analyser*.

DIGHEM^{VRES}

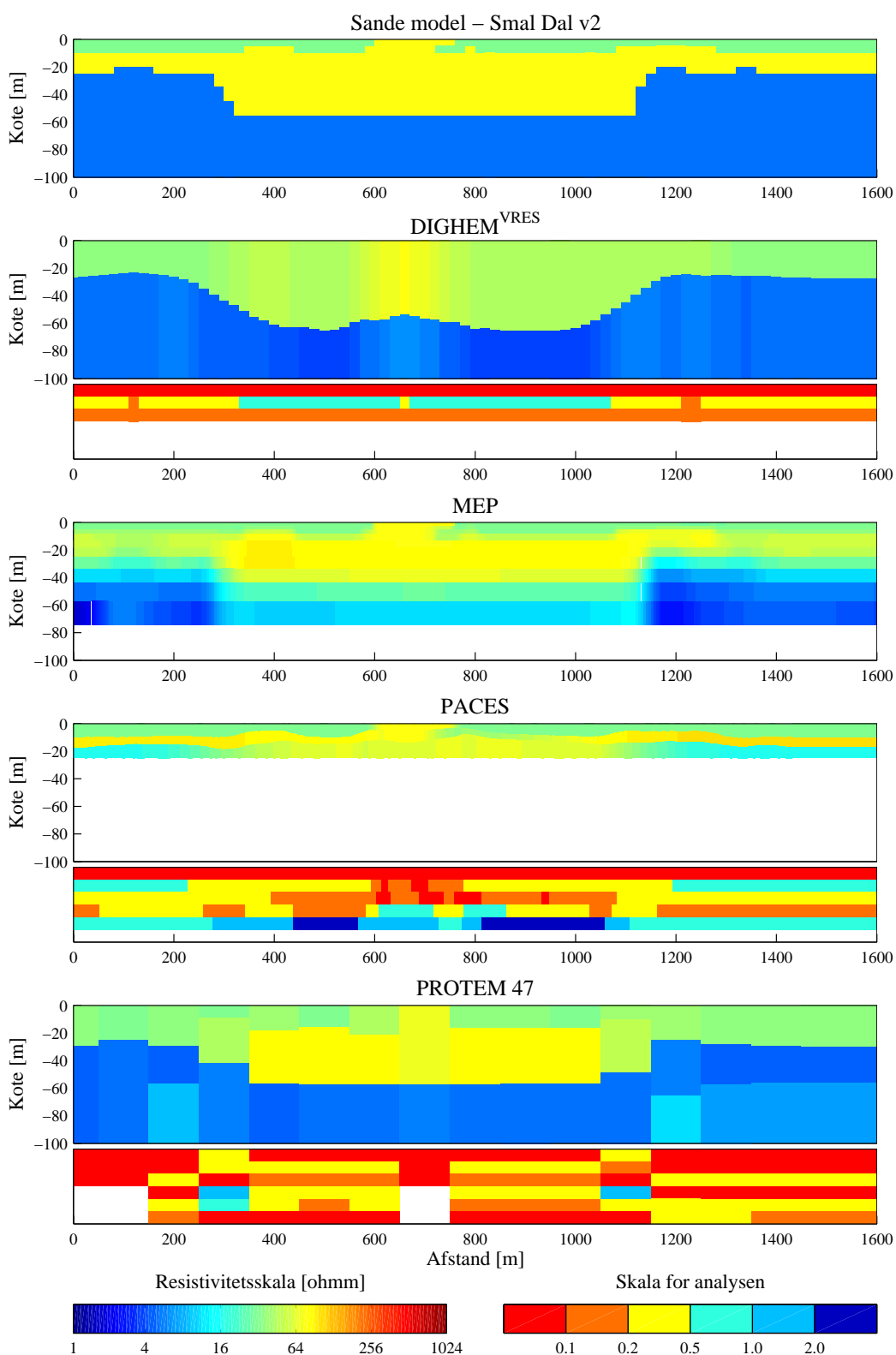
2D responserne er tolket med tolagsmodeller. Dalens placering træder tydeligt frem, men den fremstår som udfyldt med morænemateriale. Man kan erkende sandvinduet, men som et lag i hele dalens dybde.

Dybden til den gode leder (andet lag) er godt bestemt. Resistiviteten i første lag er velbestemt, mens resistiviteten i andet lag er nogenlunde bestemt uden for dalen og dårligt bestemt under dalen.

MEP

2D modelsektionen for MEP systemet beregnet med robust inversion viser klart dalens beliggenhed og morænelagets variationer i tykkelse. Dalbunden viser sig som en markant ændring i resistivitet over flere lag.

Der præsenteres ingen analyser for MEP modellen, da de inversionsteknikker, RES2DINV programmet bygger på, ikke fremstiller en anvendelig analyse.



Figur 7.5. Modellen Smal Dal tolket med fålagsmodeller for DIGHEM^{VRES} og PROTEM 47 systemerne, LCI-modeller for PACES systemet og 2D modeller opnået ved robust inversion for MEP systemet.

PACES

Det er samme LCI sektion, som er vist i Figur 7.4. Denne viser klart variationerne i morænelagets tykkelse. PACES systemets begrænsede indtrængning gør, at dalen kun erkendes ved, at lerlagene ved siden af dalen forsvinder.

De laterale bånd mellem nabomodellparametre indgår i analysen. Resistiviteten i første lag er velbestemt, mens resistiviteterne i andet og tredje lag er nogenlunde til dårligt bestemt, dog godt til velbestemt i sandvinduet. Tykkelsen af første lag er godt til dårligt bestemt, mens tykkelsen af andet lag er nogenlunde bestemt uden for dalen og dårligt bestemt til ubestemt i dalen.

PROTEM 47

2D responserne for PROTEM 47 systemet er tolket med to til tre lag. Dalens placering er tydeligt markeret i tolkningsprofilen. Det er også muligt at se sandvinduerne i morænelaget.

Generelt er dybden til den gode leder velbestemt, ligesom resistiviteten af dette lag er velbestemt til godt bestemt. Resistiviteten af det materiale, der udfylder dalen, er ubestemt, medens resistiviteten af morænen er godt bestemt. Områderne uden for dalen kan tolkes med tolagsmodeller.

Resultater for de øvrige modeller

Alle 20 modeller, som er vist i Appendiks B, er tolket på samme måde som eksemplet med Smal Dal modellen vist i dette kapitel. Det overlades til læseren at studere de forskellige metoders opløsningsevne og den måde, hvorved 2D effekter kommer til udtryk. De generelle konklusioner ses nedenfor.

Konklusion

Når man betragter resultaterne af tolkningerne af 2D modellerne, må man huske på, at der ikke er lagt støj på data inden tolkningen. Dette betyder, at de viste resultater er de bedst mulige. Havde man lagt støj til data inden tolkningen, ville profilerne fremtræde mere varierende og usammenhængende. I Kapitel 6 vises effekten af støj på data.

Sammenlignes PROTEM 47 og DIGHEM^{VRES} resultaterne fra mangelagstolkningerne med fålagstolkningerne, kan man for mange modellers vedkommende observere, at modellerne fra mangelagstolkningerne har bedre overensstemmelse med de sande modeller end de tilsvarende modeller fra fålagstolkningerne. Dette skyldes til dels, at tolkningen foretages på perfekte data, og mangelagstolkningerne viser, hvilke træk ved modellerne, der i bedste tilfælde indikeres, men ikke nødvendigvis opløses. Analyserne af fålagsmodellerne viser, hvor godt modellparametrene faktisk er opløst.

De fleste fålagsmodeller for DIGHEM^{VRES} systemet indeholder kun to lag. I et enkelt tilfælde, model Salt, har det været nødvendigt med tre lag for at opnå en acceptabelt tilpasning af data. For denne models vedkommende er der store laterale såvel som vertikale kontraster i ledningsevnen. PROTEM 47 systemet giver generelt bedre mulighed for at opløse laggrænserne, men antallet af lag er også her lille, idet alle data har kunnet tilpasses med tre lag.

De galvaniske metoder, MEP og PACES, giver væsentligt bedre muligheder end de elektromagnetiske for at kortlægge områder med resistive legemer. PACES giver dog kun information om de overfladenære strukturer.

Kapitel 8 – Analyse af HEM målinger fra Danmark

I dette kapitel præsenteres tolkninger og analyser af udvalgte dele af de frekvensdomænemålinger, som er udførte af Fugro Airborne Surveys Ltd. for henholdsvis Storstrøms Amt, Ringkjøbing Amt og Viborg Energi, samt målinger udførte af Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) for Sønderjyllands Amt. En profil fra hver af de fem målte områder præsenteres. Der er foretaget tolkning med både mangelagsmodeller og fålagsmodeller. For disse data viser det sig, at datatilpasningen kræver højst tre lag, og at to lag oftest vil være tilstrækkeligt.

Tolkninger og analyser

Datamaterialet, som er stillet til rådighed for denne rapport, er meget omfattende, og præsentationen her er på ingen måde en fuldstændig analyse og tolkning. En detaljeret analyse vil kræve et tidsforbrug som falder uden for denne rapports rammer. Generelt må man påregne, at detaljerede tolkninger og analyser vil udgøre en væsentlig del af de omkostningerne, som er forbundet med en HEM-undersøgelse, overvejende på grund af de koblings-effekter, som er omtalte i Kapitel 3, og den evaluering og sortering af data, som dermed er nødvendig. Desuden er et stort arbejde påkrævet, hvis højdeinformationen skal udnyttes fuldt ud.

Tolkningen og analysen af data er foretaget med programmet SELMA (Christensen & Auker 1992). I analysen er der lagt stor vægt på en beskrivelse af de datatilpasninger, som er opnået med 1D modellerne. Analyse og vurdering af datatilpasningen er en forudsætning for, at den efterfølgende geologiske tolkning af de modeller, som inversionsprogrammet producerer, kan foretages på et kvalificeret grundlag.

Inversionen af de filtrerede data er foretaget med den model af støj, som er omtalt i Kapitel 5, og efter de principper, som diskuteres i kapitlerne 5, 6 og 7, både med fålags- og mangelagsmodeller.

Forhåndskendskab (á priori information) om laggrænser eller resistivitetsfordelinger fra jordbaserede målinger og borer er ikke anvendt ved inversionen af data, og tolkningerne er derfor ikke helt så optimale med henblik på en geologisk tolkning, som det ville være muligt. Vi har valgt at udelade information fra andre kilder i inversionen, idet denne rapport har som hovedformål at foretage en evaluering af HEM-metoden, ikke at gennemføre detaljerede tolkninger. Anvendelse af á priori data ville gøre det kompliceret at vurdere, hvilke data, HEM-data eller á priori data, som bidrager med information om en given struktur i den færdige modelsektion.

Følgende data vil blive vist på kort for de målte områder:

- Position af flyvelinier og topografisk information
- Målte data og filtrerede/korrigerede data (Appendiks C)

Foruden ovennævnte kort vil modelsektioner blive præsenteret for udvalgte profiler, dels fra fålagstolkninger, hvor højden til sender- og modtagerspølen er anvendt som en fri parameter i inversionen, dels som manglagstolkninger med en 20-lags model. Manglagstolkningerne er foretaget med fastlåst højde i inversionen, hvor højden er bestemt fra de foregående 3-lagstolkninger med højden som fri parameter.

Inden præsentationen af 1D tolkningerne og analyserne er det hensigtsmæssigt med nogle generelle bemærkninger vedrørende støj, datatilpasning samt måling af højden af sender- og modtagerspølerne.

Støj, filtreringer og datatilpasning

En god bestemmelse af usikkerhederne på de målte data er afgørende for bedømmelsen af usikkerheder på modelparametre fra inversionen. Desværre er det ofte vanskeligt at angive usikkerheden på de målte data præcist. Beregningen af usikkerhederne på modelparametrene er stort set altid baseret på en antagelse om, at støjen er tilfældig. Denne antagelse vil ikke være korrekt, hvis der er sket fejl ved kalibreringen af måleinstrumenterne, eller hvis de målte data er påvirkede af koblinger til menneskeskabte installationer. De målte data er helt klart påvirkede af koblinger. Både Fugro Airborne Surveys og BGR har foretaget filtreringer og korrektioner af de målte data for at reducere indflydelsen af støj. De oprindelige data er blevet målt for hver 0.1 s, svarende til en afstand på ca. 3 m langs profilet, men filtreringen medfører en udglatning af data, hvorved den laterale opløsning af data forringes noget inden tolkningen.

Fugro Airborne Surveys har oplyst at de målte data er filtrerede med bl.a. *median filtrering* med typiske filterlængder på 1.1 s. Det betyder, at hvert datum i de processerede data er fremkommet ved, at de oprindelige data i et interval omkring positionen for det processerede datum sorteres efter størrelse, og at medianværdien (den værdi hvor præcis halvdelen af alle værdier er større) vælges til at repræsentere målingen. Med en filterlængde på 1.1 s svarer dette til en udvælgelse af en måleværdi inden for en afstand på ca. 15 m til hver side. Denne type filtrering er meget effektiv til at producere bløde funktioner og bruges i mange andre sammenhænge til at fjerne uønsket kortbølget støj og støj af impulsiv karakter. En ulempe ved metoden er, at det er en irreversibel type af filtrering. Det betyder, at man ikke kan regne sig tilbage til de oprindelige data ud fra de processerede data. Det er ikke umiddelbart muligt at give en præcis beskrivelse af usikkerheden på de processerede data og dermed på de modelparametre som fremkommer ved inversion af data. Foruden ovennævnte median filtrering er der anvendt to andre typer af filtreringer: trimmed median og lavpasfiltrering med Hanning filtre. Længden af filtrene tilpasses de vurderede støjpåvirkninger samt andre forhold (resistiviteter, flyvehøjde, frekvens), og det er derfor ikke muligt umiddelbart at beskrive hvordan et givet processeret datum er fremkommet. Filterlængden kan således være væsentligt større end de nævnte 1.1 s. Forekomsten af koblinger og specielle procedurer til at behandle disse omtales ikke nærmere af Fugro og BGR, men det må forventes at koblingsresponsen er indgået i vurderingen af støjen på data og i vurderingen af hvilke filtre som er hensigtsmæssige.

I Appendiks C vises oprindelige data og filtrerede data for frekvenserne 385 Hz, 6200 Hz og 102 kHz for de fire områder målt af Fugro Airborne Surveys. Foruden medianfiltreringen og lowpass filtreringen er der foretaget en korrektion for drift i måleinstrumentet for hvert profil. Ved fremstillingen af figurerne som vises i Appendiks C er der foretaget en korrektion (subtraktion af en konstant værdi for et givet profil) af de ufiltrerede data, således at middelniveauet for de filtrerede og ufiltrerede data er sammenfaldende. Værdien som er subtraheret de ufiltrerede data svarer stort set til den estimerede middeldrift for et givet profil. Kun proceserede data har været til rådighed fra målingerne i Sønderjyllands Amt, men det må formodes, at disse data har været udsat for samme eksterne støjpåvirkninger som målingerne foretaget af Fugro Airborne Surveys. En sammenligning mellem de ufiltrerede og filtrerede data er af stor værdi for at udpege områder med dårlig datakvalitet, og de ufiltrerede data er af stor værdi for identifikation af koblingspåvirkninger. Det er derfor meget vigtigt, at ufiltrerede data indgår i de data, som de geofysiske selskaber leverer, og at de er korrigeret for drift mm. i lighed med de filtrerede data. Driftkorrektionen skal specificeres for hvert profil.

Det fremgår klart af figurerne i Appendiks C, at målingerne er støjfyldte, og at der optræder koblingsfænomener. Der forekommer meget kraftige undulationer af det registrerede signal langs nogle af profilerne, som må tilskrives elektromagnetiske kilder i eller i nærheden af måleområdet. Et tydeligt eksempel på dette kan ses på Figurerne C.13–18 som viser data fra Viborg området, hvor der langs den sydlige kant af måleområdet findes en højspændingsledning, som formodentlig forstyrrer målingerne. Forstyrrelserne forårsages formentlig her af ujævn belastning af ledningsnettet, hvorved der fremkommer elektromagnetiske signaler med et bredt frekvensspektrum. Koblingsfænomener som optræder med den meget karakteristiske "M"-kurveform på profilerne kan ses på mange af figurerne. Et eksempel på dette fra Stevns området (Figurerne C.1–6) er langs med vejen mellem Klippinge og Store Heddinge.

Vi vil ikke her redegøre for de mange deltaljer som ses på figurerne i Appendiks C, men blot henvise til diskussionen i Kapitel 3 og 5. Generelt kan dog siges, at de lave frekvenser umiddelbart forekommer mere støjfyldte og påvirkede af koblinger end de høje frekvenser. Filtreringerne som er foretaget modificerer derfor mest data for de lave frekvenser. Vi har ikke haft information om driftkorrektioner for de enkelte profiler, og det har derfor ikke været muligt at beregne et præcist kvantitativt mål for effekten af filtreringerne. Afvigelserne mellem de filtrerede og ufiltrerede data er skønnet til at være under eller omkring 5% i gennemsnit for den højeste frekvens og omkring 5% for de lave frekvenser i områder uden meget kraftig støj- og koblingspåvirkning, og den er dermed af samme størrelsesorden som de usikkerheder, som blev tilskrevet afvigelser fra en-dimensionalitet ved tolkning med lagdelte modeller.

Målte højder af sender- og modtagerspøler over terræn

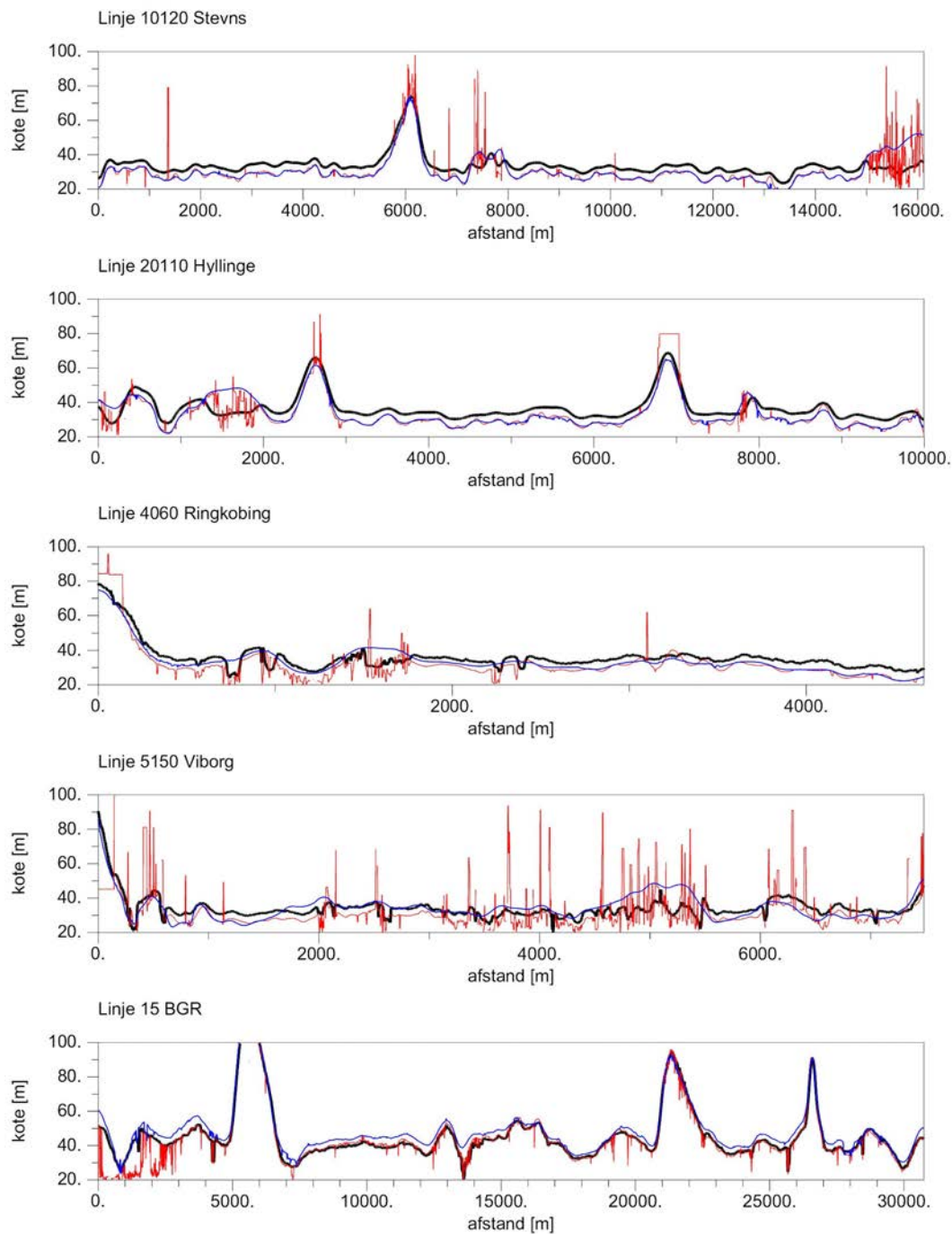
Højden af sender- og modtagerspølerne bruges i forbindelse med inversion af data. Højden har stor indflydelse på responset, og det er derfor vigtigt, at denne er godt bestemt. Det vil fremgå af figurerne over højden, som vises for de enkelte områder, at der er problemer med at bestemme denne korrekt. Dette skyldes blandt andet påvirkninger fra vegetation og bygninger (se Kapitel 5). Nogle områder kan umiddelbart erkendes som problematiske. Det

drejer sig om områder med så bratte ændringer i højdebestemmelsen, at de ikke kan tilskrives vertikale bevægelser af helikopteren eller topografi.

I inversionen af data er det muligt at betragte højden som en egentlig modelparameter, nemlig som tykkelsen af det øverste luftlag, og den bestemmes da på lignende måde som de øvrige modelparametre: resistiviteter og lagtykkelser. I dette tilfælde benytter man overhovedet ikke informationen fra højdemålingerne. Man kan imidlertid også tilføje højden bestemt ved højdemålingen som a priori information om tykkelsen af første lag med en passende usikkerhed. Dette vil resultere i en bedre bestemmelse af modelparametrene, idet man udnytter informationen fra højdemålingen. Endelig kan man betragte højden bestemt ved højdemålingerne som en fikseret konfigurationsparameter, hvorved den ikke kommer til at indgå i modellen. Denne tredje mulighed vil resultere i en forstyrret model, hvis højden er fejlagtigt bestemt, men usikkerheden på modelparametrene vil være den mindst mulige.

Figur 8.1 viser for de udvalgte fem profiler målte højder samt en estimeret højde fra inversion af data med trelags modeller, hvor højden har indgået som en helt fri parameter. Højderne er målte med henholdsvis radar (sorte kurver i figuren) og laser (røde kurver). For de fire profiler målte af Fugro ses, at højden bestemt med radar er ca. 5 m større end højden bestemt med laser for store dele af profilerne. For målingerne udførte af BGR er der bedre overensstemmelse mellem de to typer af målinger. Højden målt med laser er meget støjfyldt for nogle områder og er ikke umiddelbart anvendelig som a priori højde i inversionen. Højden målt med radar forekommer umiddelbart mere realistisk, men inversion af Fugros data med denne højdeangivelse som fast højde i inversionen resulterede i meget store systematiske afvigelser mellem de målte og de beregnede responser for den højeste frekvens på 102 kHz. For at opnå tilfredsstillende tilpasning af data med trelags modeller var det nødvendigt at have højden som helt fri parameter, eventuelt med den målte højde som a priori værdi med stor usikkerhed. For data målte af BGR var det generelt muligt at opnå tilfredsstillende tilpasning til data med anvendelse af den målte højde med radarinstrumentet. Inversion med højden som fri parameter gav en middelværdi for usikkerheden på denne parameter på 14%. Højdebestemmelsen fra inversionen er vist i Figur 8.1 med blå kurver. For målingerne udførte af Fugro fremgår det, at for de områder, hvor højden målt med laser udviser bløde variationer, er der god overensstemmelse mellem denne målte højde og højden fra inversionen. For målingerne udførte af BGR er de målte højder generelt lavere end den estimerede højde.

Korrektion af de målte højder gennem sammenligning af målte højdedata, topografiske kort, videoptagelser fra helikopteren og digitale terrænmodeller vil være det mest optimale, men dette arbejde er meget tidskrævende. En hurtig måde til bestemmelse af en højde som input til inversionen vil være at anvende medianværdien af differencerne mellem laser- og radarhøjden for et profil, og derefter addere denne værdi til de målte radarhøjder langs profilen. Dette vil fungere, hvis der er mere end 50 % af laserhøjderne som er acceptable. Det vil dog her være nødvendigt at tilskrive den korrigerede radarhøjde en usikkerhed i inversionen.



Figur 8.1. Højdedata fra de fem profiler som præsenteres i Kapitel 8. De viste kurver er højde målt med radar (fede sorte kurver), højde målt med laser (røde kurver) og højde fra inversion af data (tynde blå kurver).

Område Stevns, Storstrøms Amt

Positionen af flylinier er vist i Figur 8.2 sammen med information fra det digitale 4 cm kort fra Kort og Matrikelstyrelsen. Den gennemsnitlige højde af sender- og modtagerspolerne over terrænet er ca. 35 m for radarmålingerne. Ca. 252 000 målinger indgår i disse data.

Målingerne på Stevns dækker et område, hvor de geologiske formationer overvejende består af morænemateriale, hovedsageligt moræneler, over kalkaflejringer. Information fra boringer viser tykkelser af de kvartære aflejringer fra mindre end 5 m til omkring 30 m. Saltholdigt grundvand kendes fra de dybere dele af kalken. De kvartære lag ligger i størstedelen af området på Bryozokalk, men i den østlige del hviler de kvartære aflejringer på skrivekridtet.

I Figurene 8.3–8.6 er vist en 16 km lang modelsektion for linje L10120 (se Figur 8.2). Figurene viser tolkninger med hhv. 1, 2 og 3 lag samt resultatet fra mangellagstolkningen. Fålagstolkningerne er alle foretaget med højden som fri parameter i inversionen. Såvel det målte filtrerede respons som modelresponsen er vist. Rms værdier for hver enkel frekvens er vist sammen med rms-værdierne for alle frekvenser samlet (totale rms værdier).

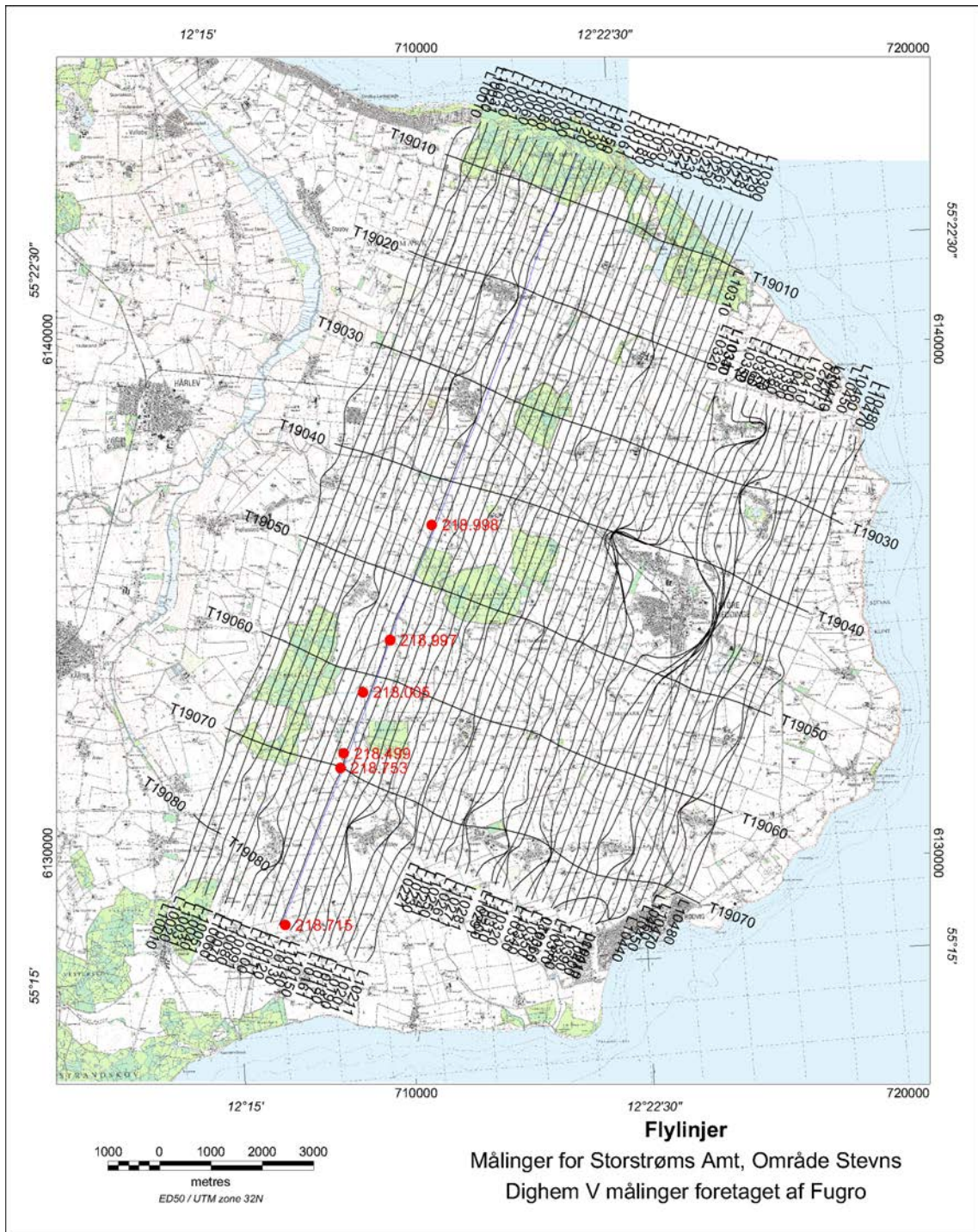
De totale rms-værdier for fålagstolkningerne er generelt større end 1 for enlagsmodellerne, men under 1 for såvel tolagsmodellerne og trelagsmodellerne. For enlagsmodellerne og delvist for tolagsmodellerne er der systematiske afvigelser mellem de målte data og modelresponsen for 102 kHz. Den systematiske afvigelse for tolagsmodellernes vedkommende er acceptable i forhold til den anvendte støjmodel.

De beregnede usikkerheder på resistiviteter (R_1 , R_2 og R_3 i figurene) og tykkelser (T_1 og T_2) er med undtagelse af øverste lags resistivitet meget store for trelagsmodellen. Bemærk at usikkerheden på dybderne (D_1 og D_2) refererer til afstanden fra senderspølen, dvs. værdierne for D_1 og T_1 er ikke identiske. For tolagsmodellen er både øverste lags resistivitet og tykkelsen af dette lag godt bestemt. Det skal dog her bemærkes at den beregnede laggrænse for tolagsmodellen ikke svarer til grænsen mellem moræneler og kalk, idet tykkelsen for øverste lag er ca. 50 m i gennemsnit for profilet.

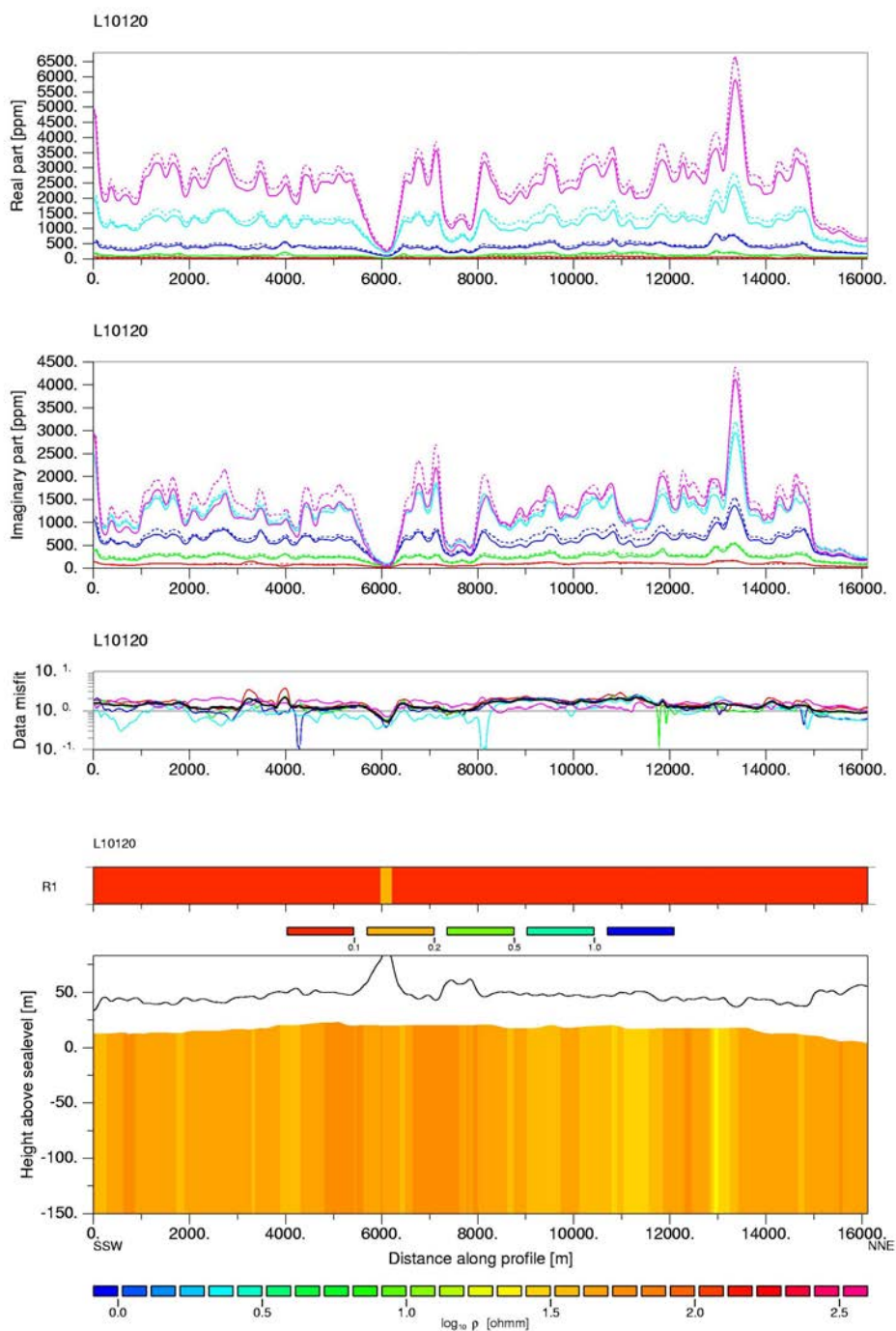
En trelagsmodel som grundmodel må anses som værende i god overensstemmelse med den forventede lagfølge i området. Resistiviteten af det øverste lag i trelagsmodellerne er ca. 50 Ω m for store dele af profilet. Typiske værdier for lagtykkelser af det øverste morænedække (ler) er fastlagt ved boringer i området til mellem 10 og 20 m (Boringer med registreringsnumre DGU 218.[5, 499, 715, 753, 997, 998]). I modelsektionerne forekommer betydelige laterale variationer i tykkelsen af øverste lag inden for afstande, som er sammenlignelige med afstande mellem flylinjerne og boringerne. Det er derfor ikke muligt ud fra en sammenligning mellem boringer og tykkelsen af øverste lag i trelagsmodellerne at konkludere, hvorvidt der er overensstemmelse. Boringen DGU 218.753 viser f.eks. 13 m ler over kalken og den tolkede lertykkelse er 9 m i målepunktet nærmest boringen. Afstanden til flylinjen er ca. 40 m. Variationen i tykkelsen af øverste lag i modelsektionen varierer mellem ca. 1 og 18 m inden for en afstand af 100 m på hver side af det nærmeste målepunkt til boringen. Området her er influeret af koblinger. Boringen DGU 218.715 ved den sydlige ende af og ca. 100 m fra profilet viser en dybde på 13 m til kalken. For denne del af

profilet er det ikke muligt umiddelbart at erkende nogle koblinger. Inversionen giver i dette område værdier på 18–20 m, dvs. en afvigelse på ca 45 % fra boringens resultat. Den beregnede usikkerhed på tykkelsen af første lag er her meget stor (>100 %).

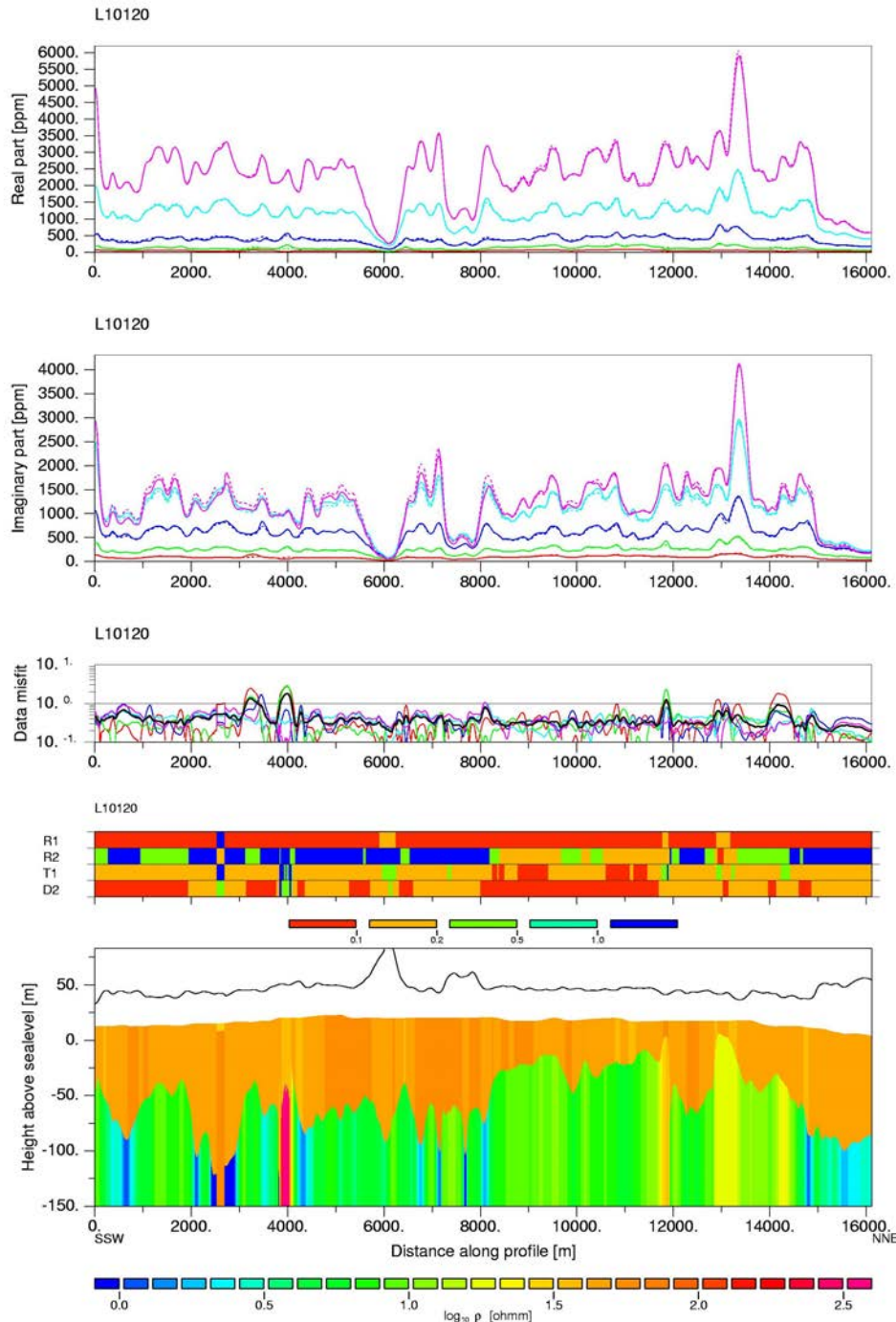
Manglelagsmodellerne i Figur 8.6 viser for dele af profilet en overgang til et mere resistivt lag som funktion af voksende dybde i de øverste 30 m af modelsektionen. Der er dog tale om meget bløde variationer, hvilket er i overensstemmelse med resultaterne fra fålagsmodellerne, hvor to lag var tilstrækkeligt for at opnå god tilpasning til data. Dele af profilet indeholdt ikke et godt ledende øvre lag.



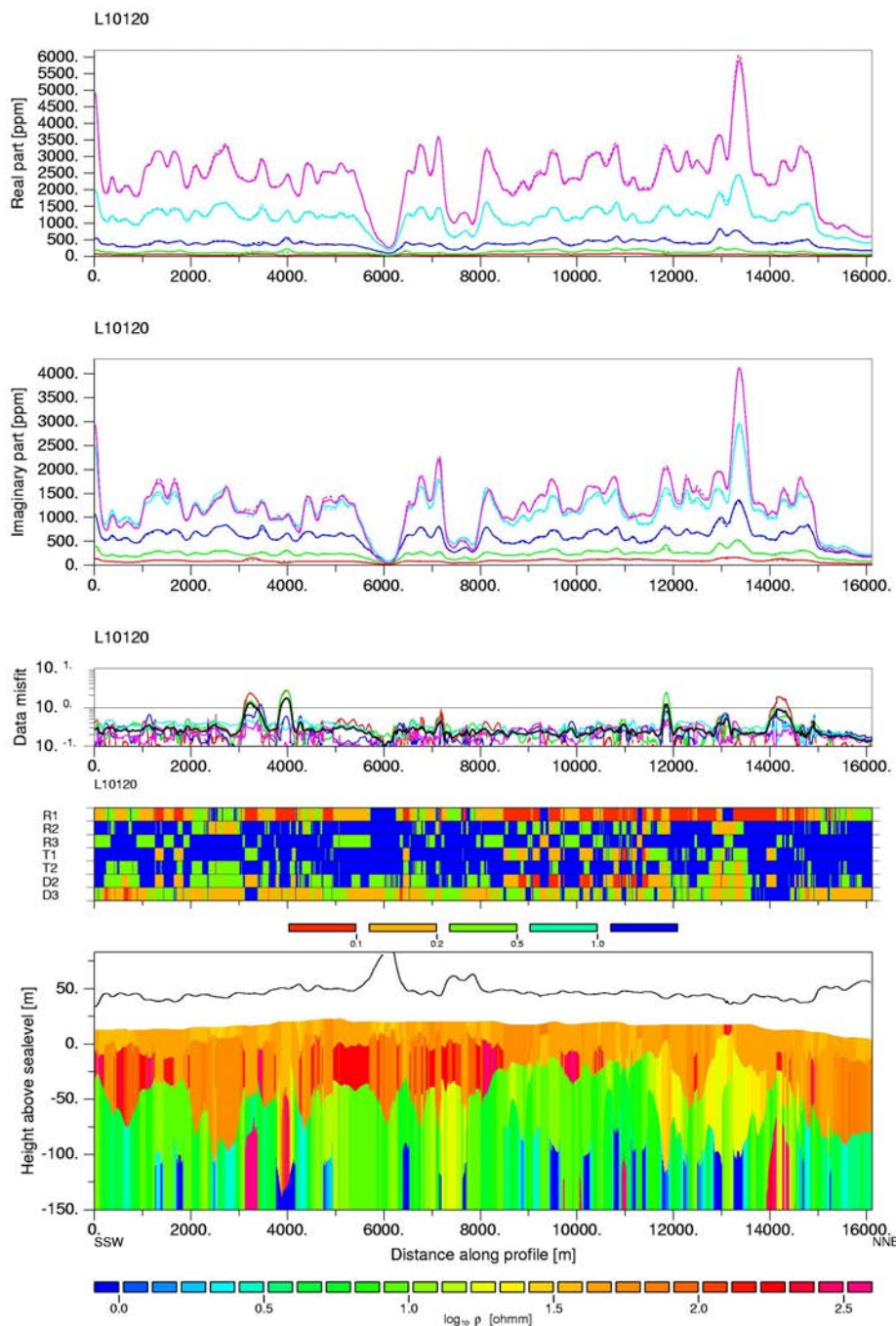
Figur 8.2. Kortet viser positionen af flylinjer for Dighem^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. De refererede borerer er angivet med røde cirkler og nummereret med rødt.



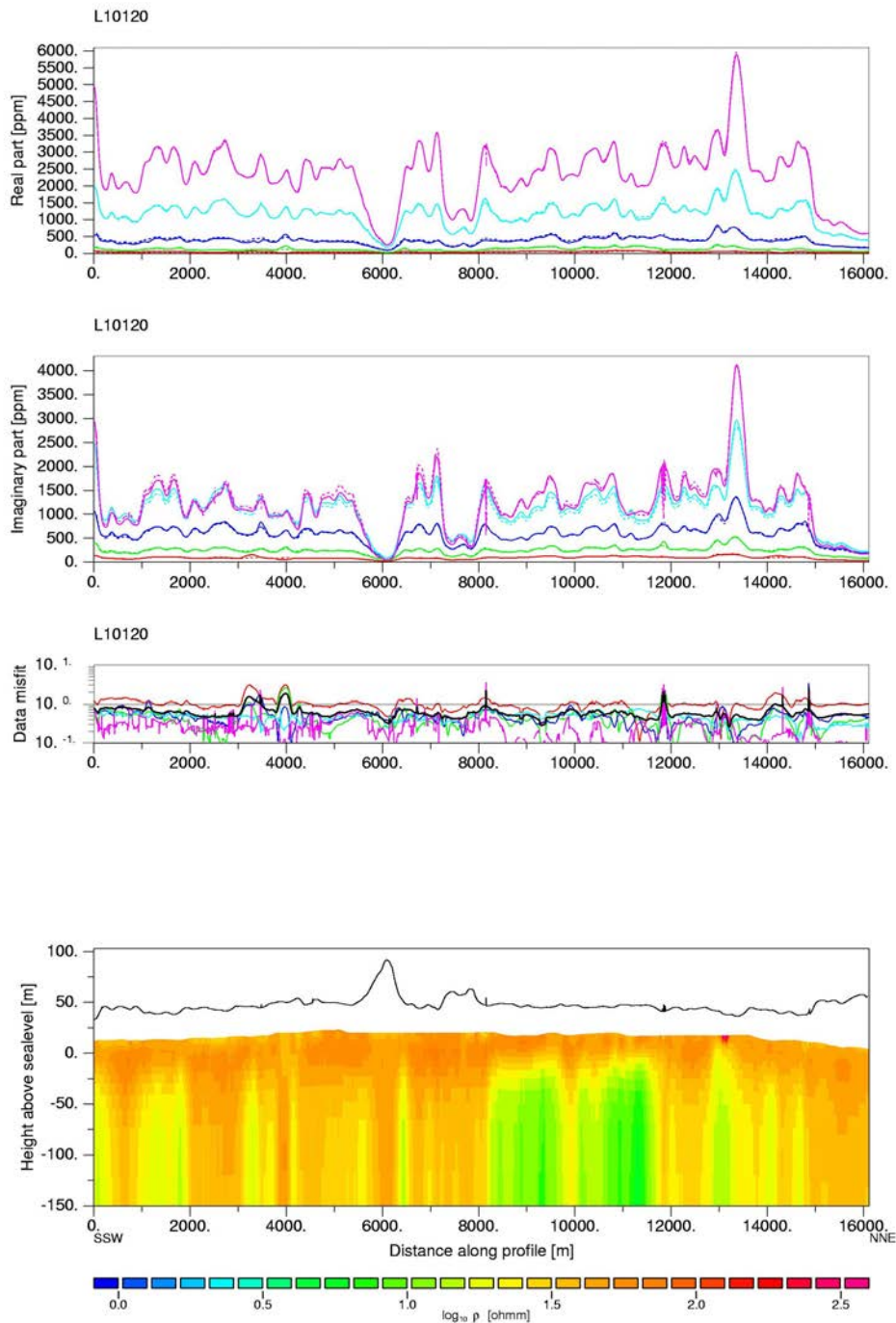
Figur 8.3. Figuren viser resultaterne af inversionen med 1-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L10120 på Stevns. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.4. Figuren viser resultaterne af inversionen med 2-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L10120 på Stevns. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.5. Figuren viser resultaterne af inversionen med 3-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L10120 på Stevns. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for data). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.

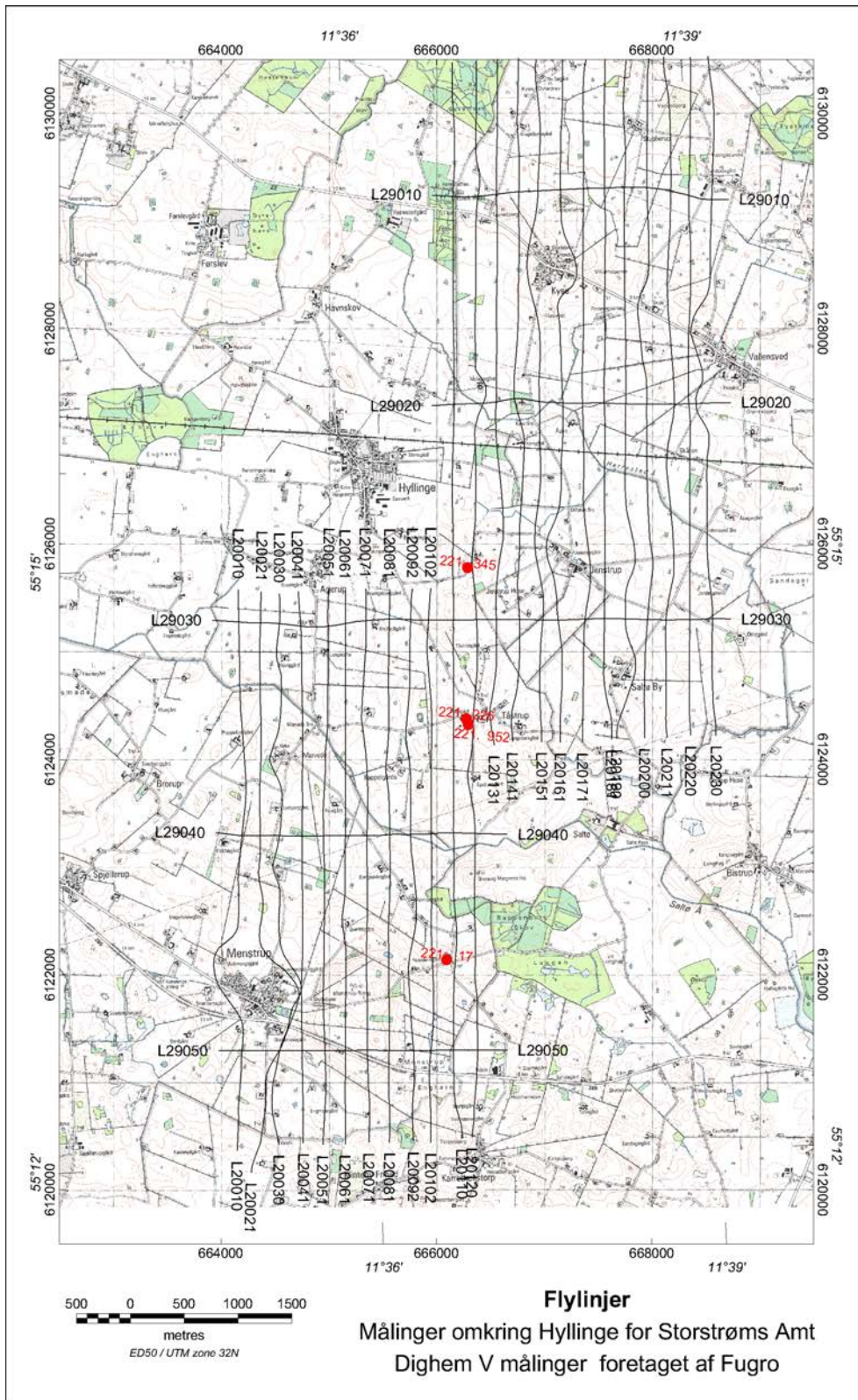


Figur 8.6. Figuren viser resultaterne af inversionen med mangelsmodeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L10120 på Stevns. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen. Den anvendte position af spolerne er angivet med den sorte linje.

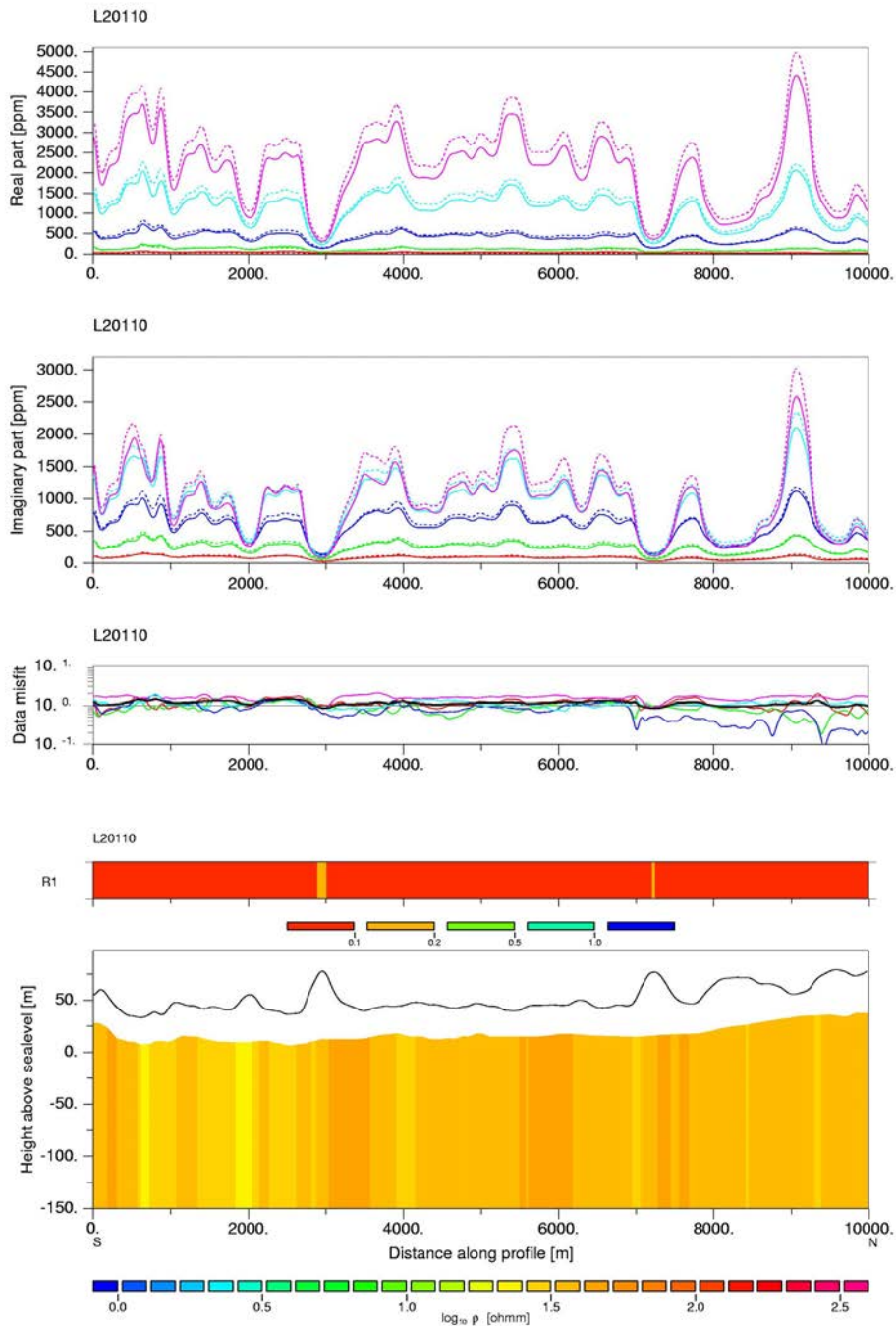
Område Hyllinge, Storstrøms Amt

Positionen af flylinier er vist i Figur 8.7 sammen med information fra det digitale 4 cm kort fra Kort og Matrikelstyrelsen. Den gennemsnitlige højde af sender- og modtagerspøler over terrænet er ca. 35 m for målingerne med radar. Totalt indgår ca. 52 000 sonderinger i disse data. Området er karakteriseret af moræneler og indslag af sand og grusaflejringer samt mosearealer.

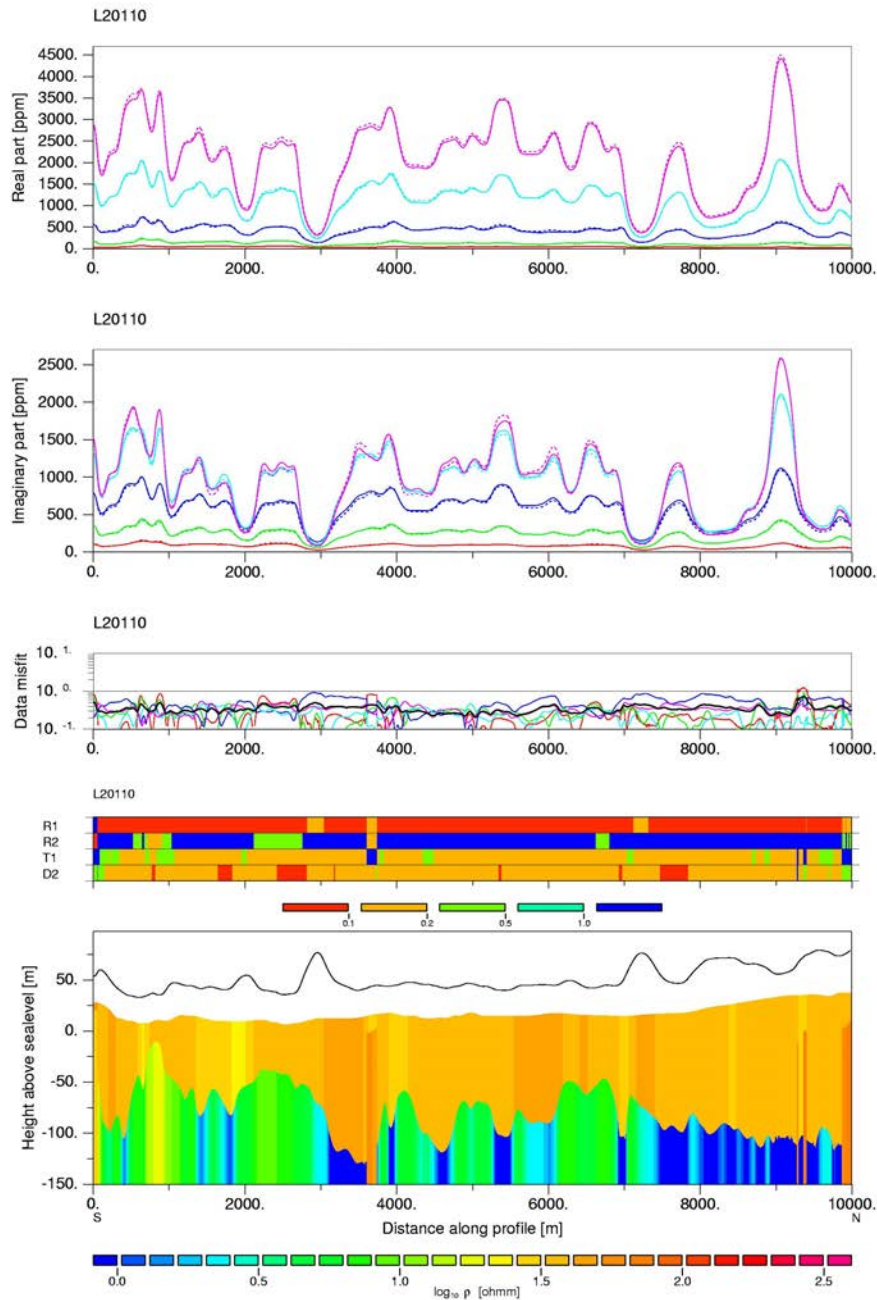
Figurerne 8.8–8.11 viser en 10 km lang modelsektion for linje L20120 (se Figur 8.7). Figurerne viser tolkninger med hhv. 1, 2 og 3 lag samt resultatet fra mangelagstolkningen. De opnåede tilpasninger til data er sammenlignelige med resultaterne fra Stevns, dvs. ét lag er ikke tilstrækkeligt, men acceptable tilpasninger kan opnås med to lag. De beregnede usikkerheder viser gode bestemmelser af øverste lags resistivitet for tolagsmodellerne, hvor dybden til andet lag er omkring 100 m i gennemsnit. For trelagsmodellerne fås dybder til andet lag på 20–40 m for dele af profilet, hvor der er en overgang til mere resistivt materiale i forhold til det øverste lag. I området omkring borerne DGU221.226 og 221.952 fås dybder på ca. 20 m til det resistive andet lag (ca 65 Ω m). Boringerne viser hhv. 33.5 m og 40 m til kalken. Resistiviteten af øverste lag er beregnet til ca. 38 Ω m. Et lag med moræneler (siltet, svagt gruset og kalkholdig ler) er beskrevet for boringen DGU221.952. For boringen DGU221.345 er der en overgang fra moræneler til smeltevandsgrus i dybden 12 m. Tre-lagsmodellen viser dog ingen kontraster i resistiviteten omkring denne boring.



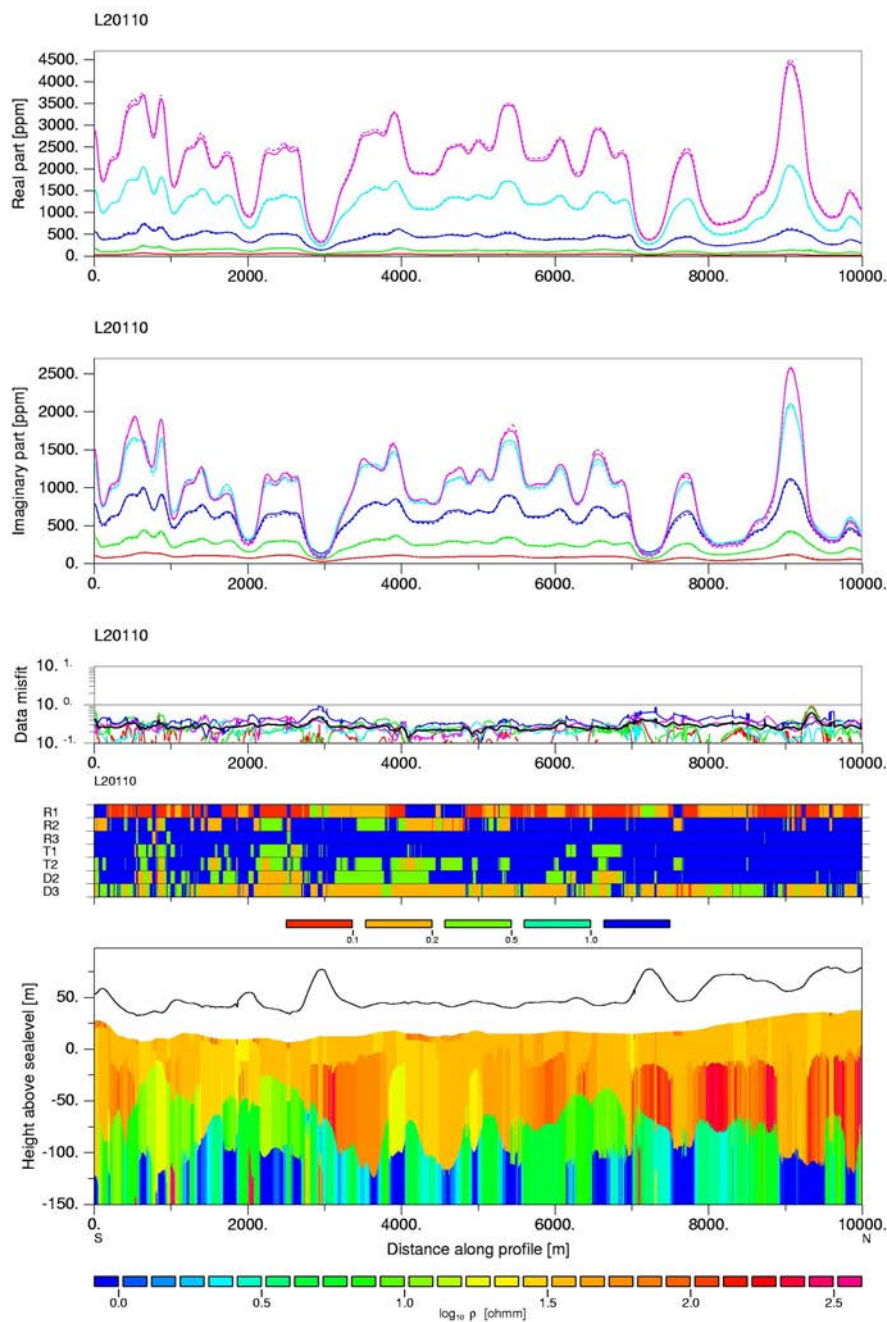
Figur 8.7. Kortet viser positionen af flylinjer for Dighem^{VRES} målinger omkring Hyllinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. De refererede borer er angivet med røde cirkler og nummerering med rødt.



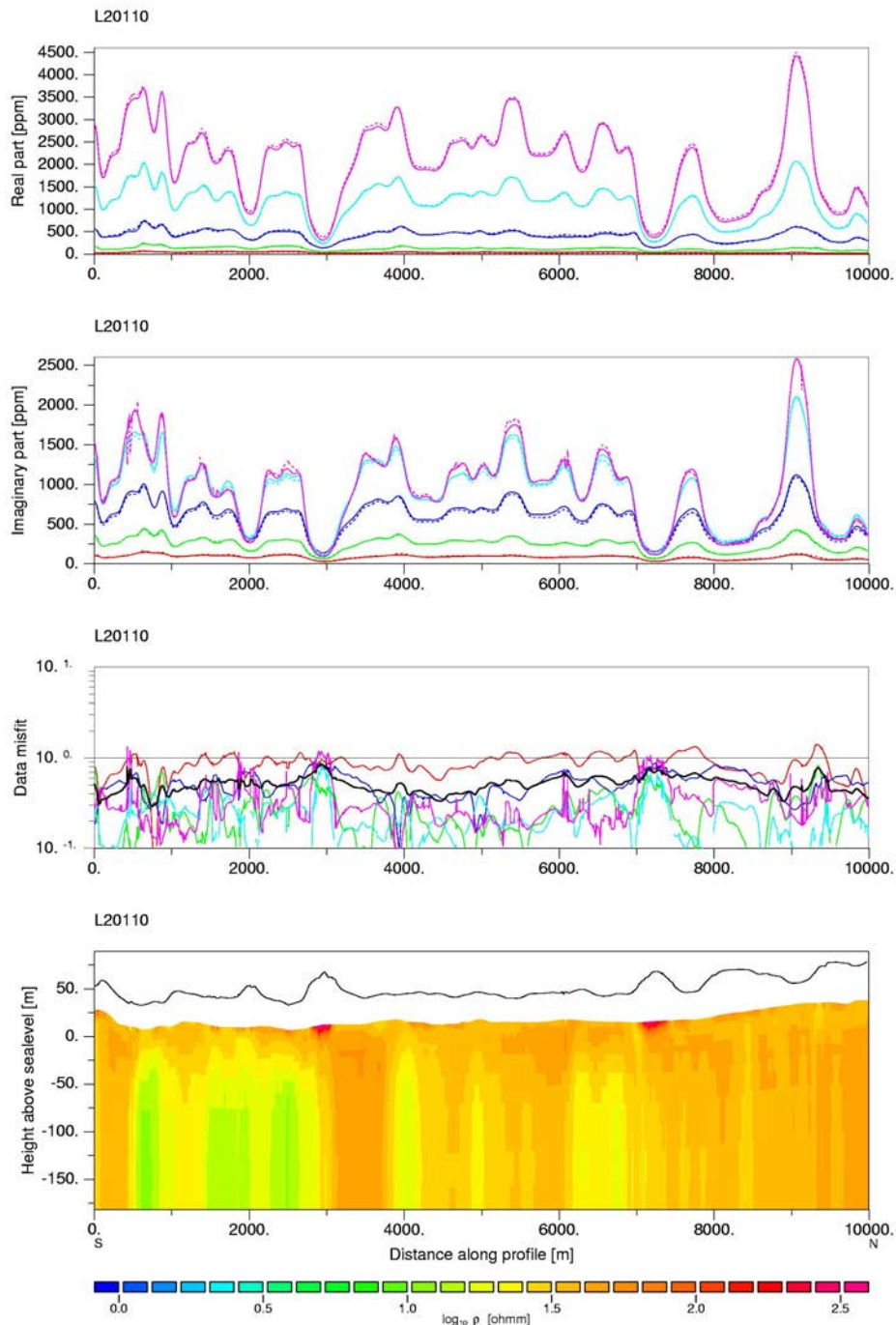
Figur 8.8. Figuren viser resultaterne af inversionen med 1-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L20110, Hyllinge. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.9. Figuren viser resultaterne af inversionen med 2-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L20110, Hyllinge. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.10. Figuren viser resultaterne af inversionen med 3-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L20110, Hyllinge. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for data). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.

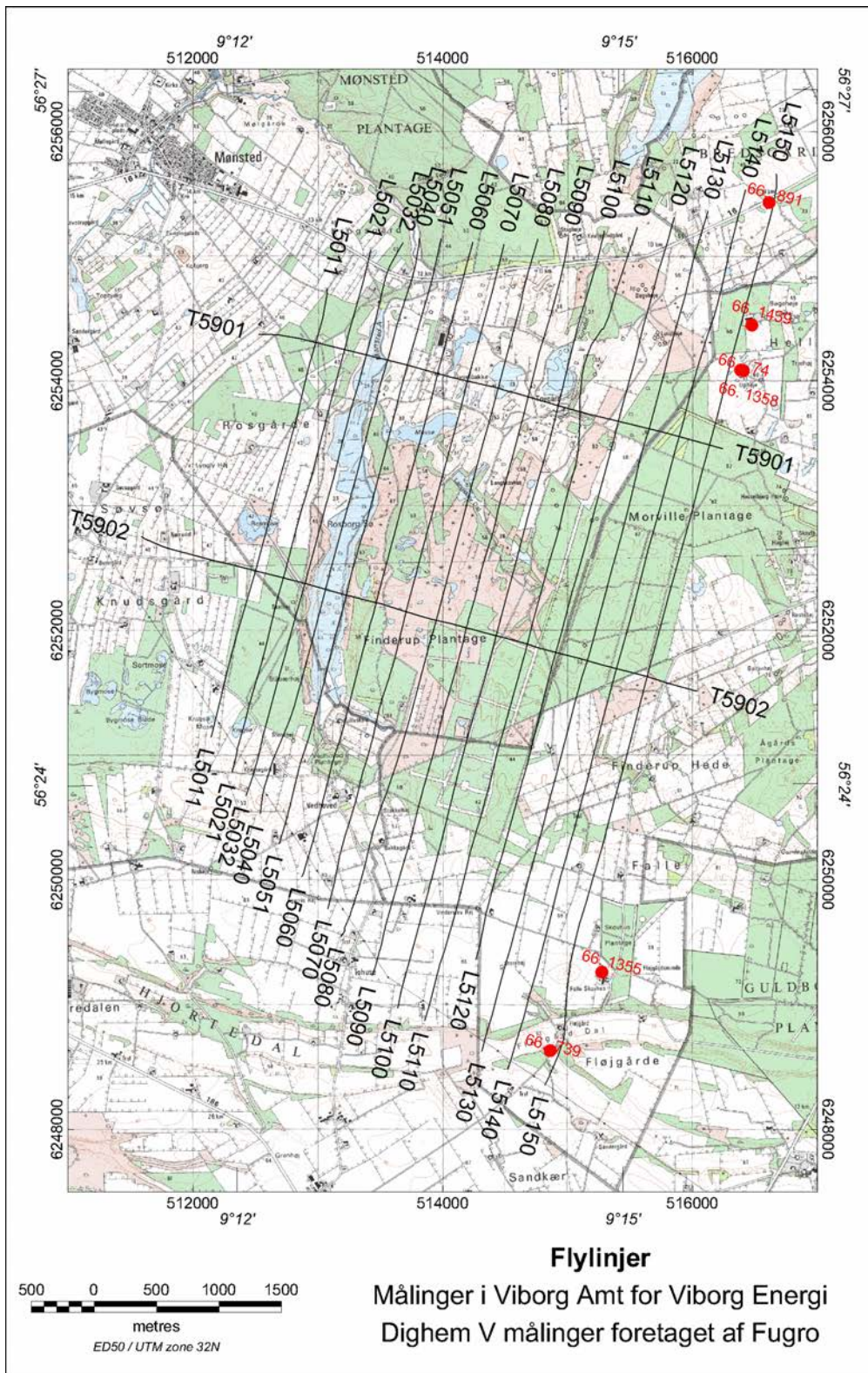


Figur 8.11. Figuren viser resultaterne af inversionen med mangelsmodeller af Dig-hem^{VRES} målinger fra linje L20110, Hyllinge. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen. Den anvendte position af spolerne er angivet med den sorte linje.

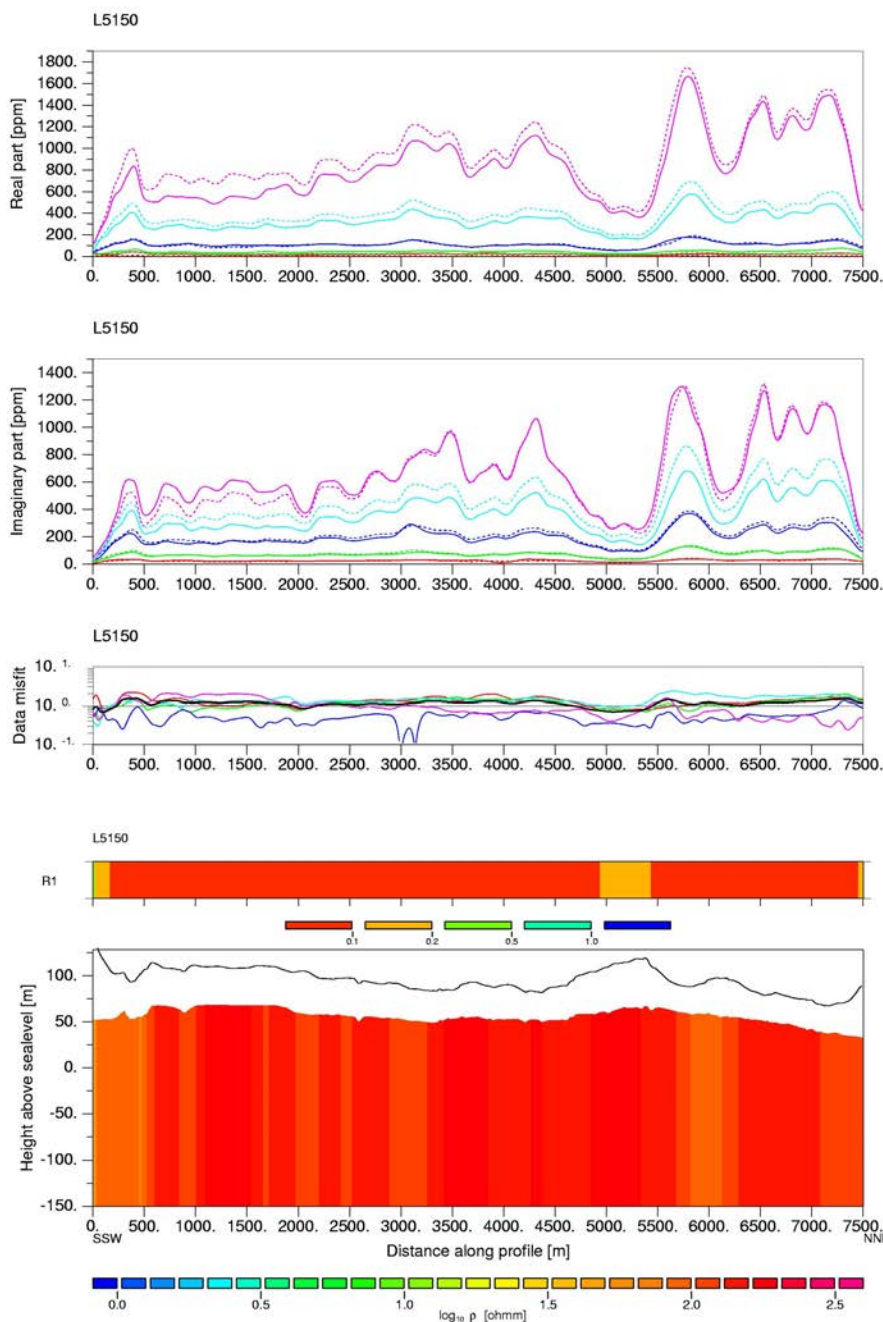
Viborg Amt

Positionen af flylinier er vist i Figur 8.12 sammen med information fra det digitale 4 cm kort fra Kort og Matrikelstyrelsen. Totalt indgår ca. 89 000 sonderinger i disse data. Området er karakteriseret af meget sandede aflejringer. Tynde leraflejringer forekommer i området. Figurerne 8.13–8.16 viser en 7.5 km lang modelsektion for linje L5150 (se Figur 8.12). Figurerne viser tolkninger med hhv. 1, 2 og 3 lag samt resultatet fra mangelagstolkningen.

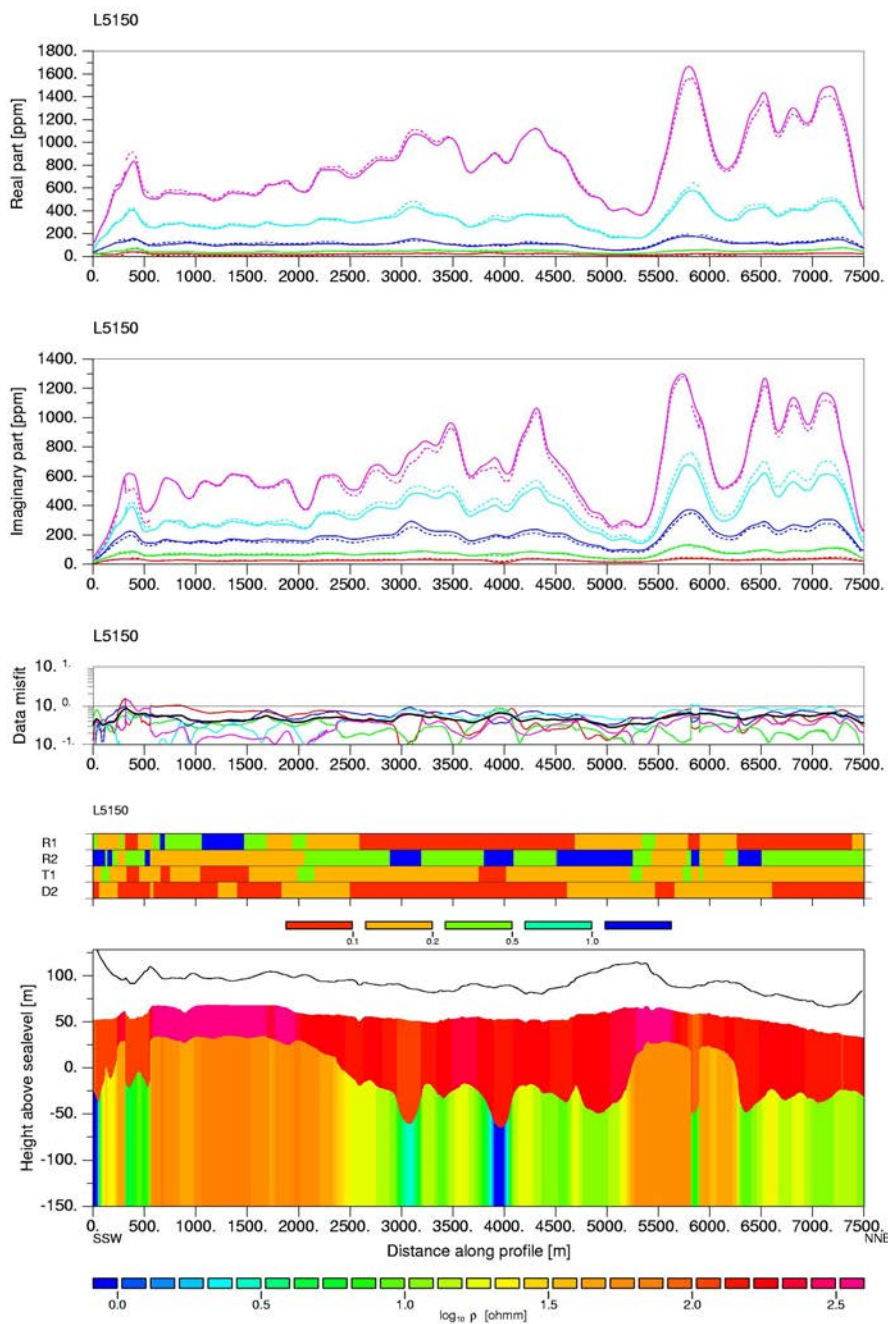
Resultatet fra Viborg-området adskiller sig fra profilerne fra Stevns og Hyllinge ved at have noget mindre usikkerheder på modelparametrene for trelagsmodellerne. Usikkerheden på tredje lags modstand er dog meget stor, hvilket også afspejles i forskellene mellem trelagssektion og mangelagssektionen for de dybere dele af modellerne. En sammenligning med beskrivelserne fra boringer i området (DGU 66.[74, 739, 1355, 1358, 1439, 1456]) indikerer at dybden til andet lag i trelagsmodellerne svarer til grundvandsspejlet omkring 25–30 m. Afvigelserne mellem de rapporterede dybder til grundvandsspejlet og de beregnede dybder er 5–10 m, hvilket må karakteriseres som værende acceptabelt.



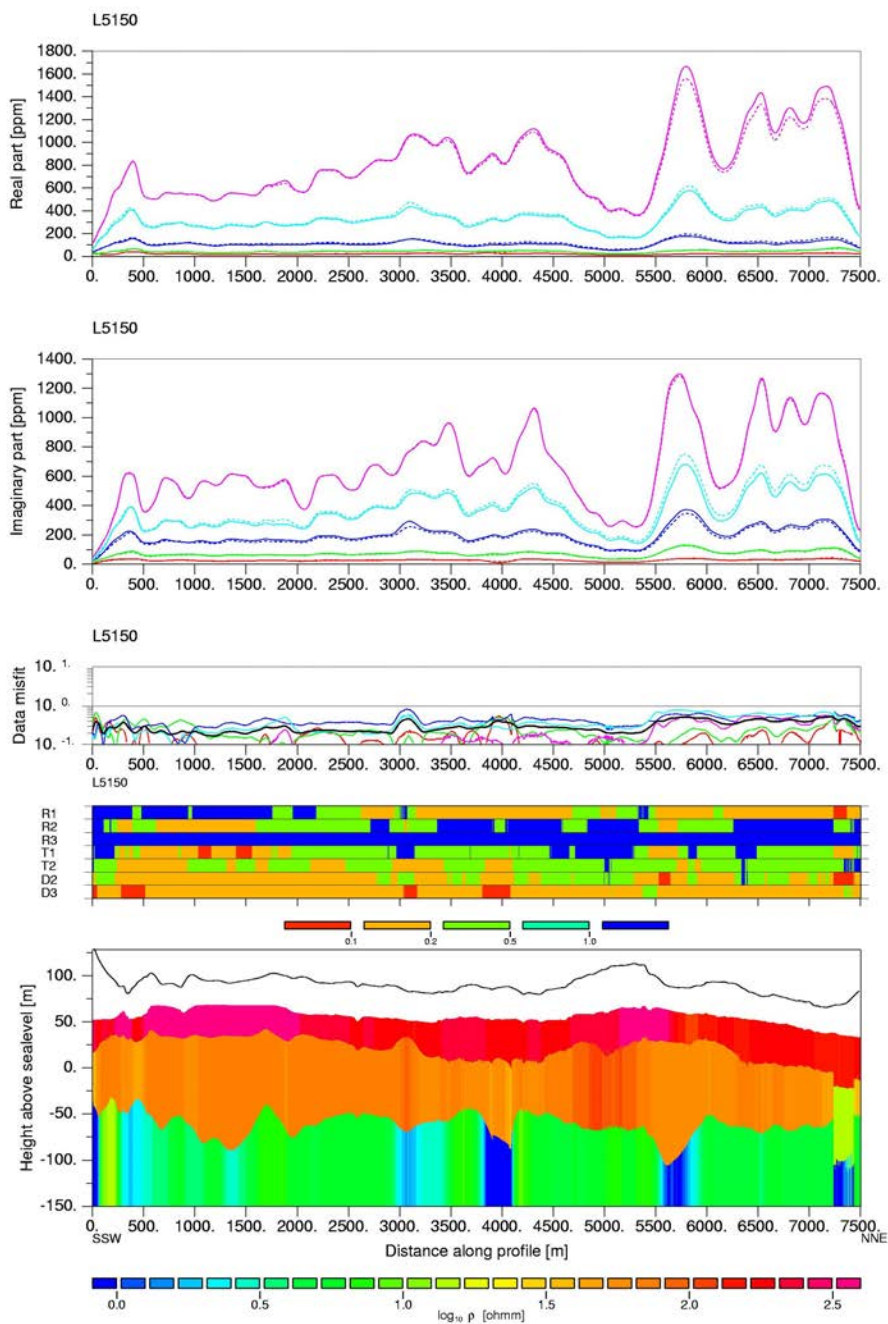
Figur 8.12. Kortet viser positionen af flylinjer for Dighem^{VRES} målinger i Viborg Amt foretaget af Fugro for Viborg Energi. De refererede boreninger er angivet med røde cirkler og nummerering med rødt.



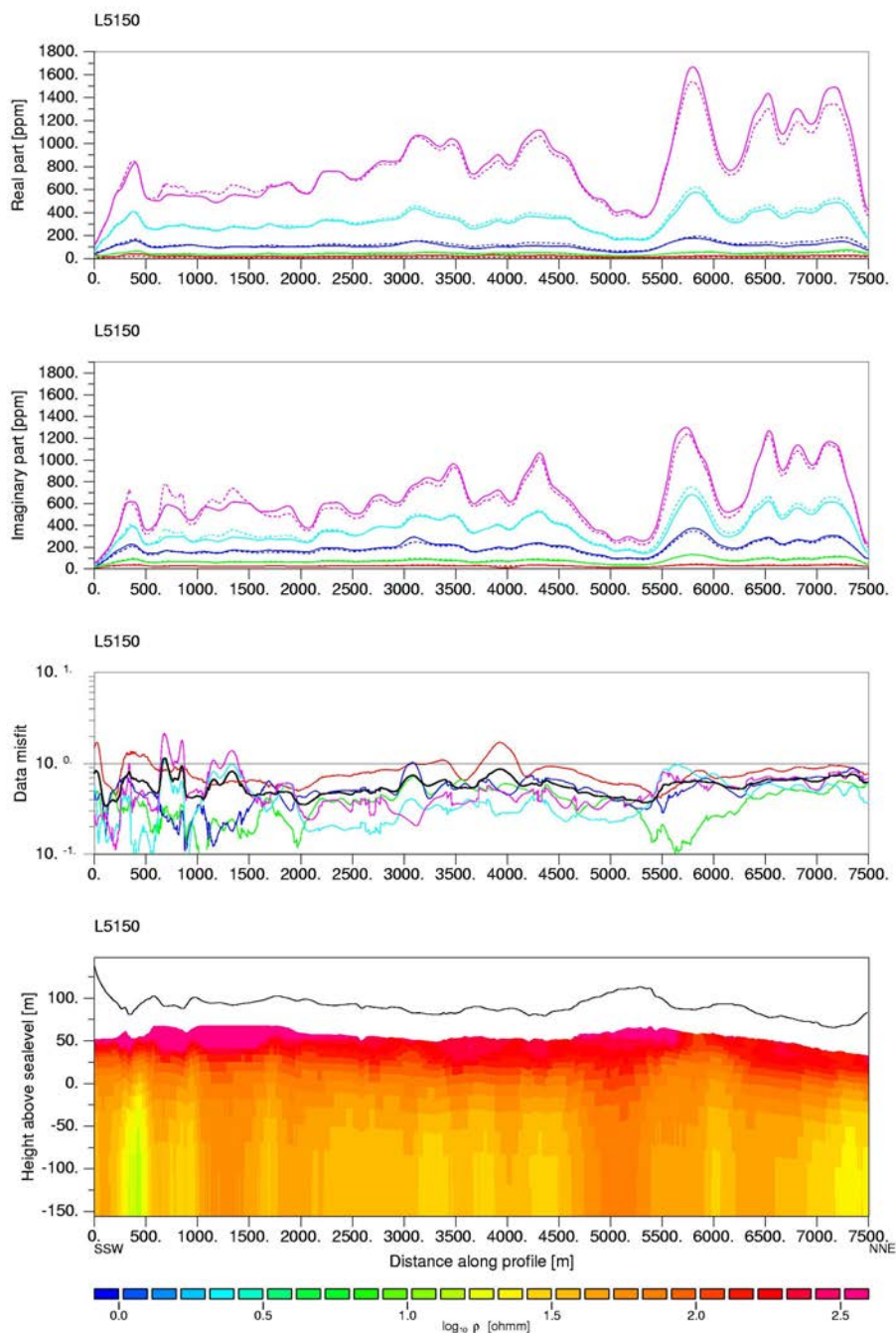
Figur 8.13. Figuren viser resultaterne af inversionen med 1-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L5150, Viborg. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.14. Figuren viser resultaterne af inversionen med 2-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L5150, Viborg. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.15. Figuren viser resultaterne af inversionen med 3-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L5150, Viborg. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for data). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.

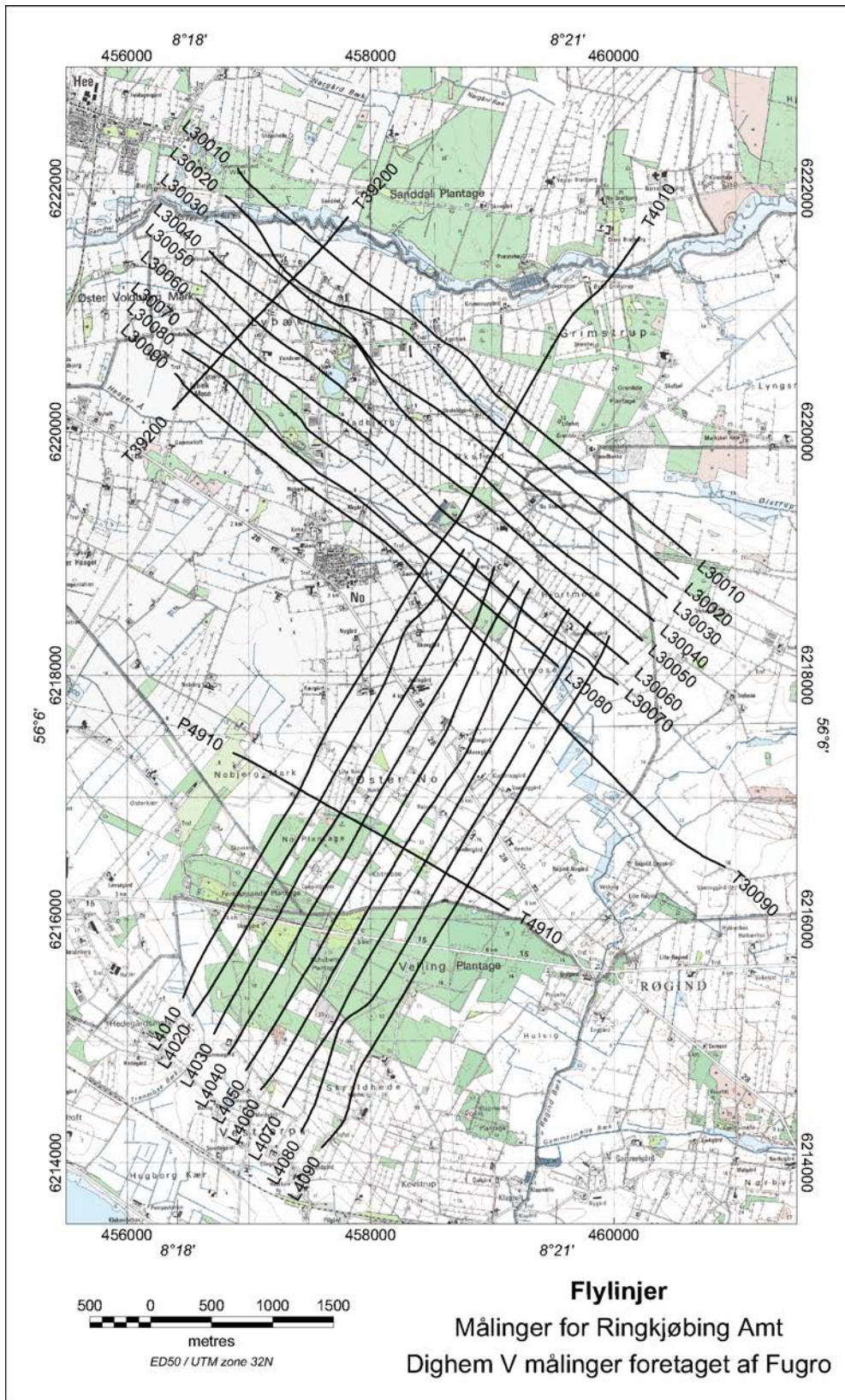


Figur 8.16. Figuren viser resultaterne af inversionen med mangelagsmodeller af Dig-hem^{VRES} målinger fra linje L5150, Viborg. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen. Den anvendte position af spolerne er angivet med den sorte linje.

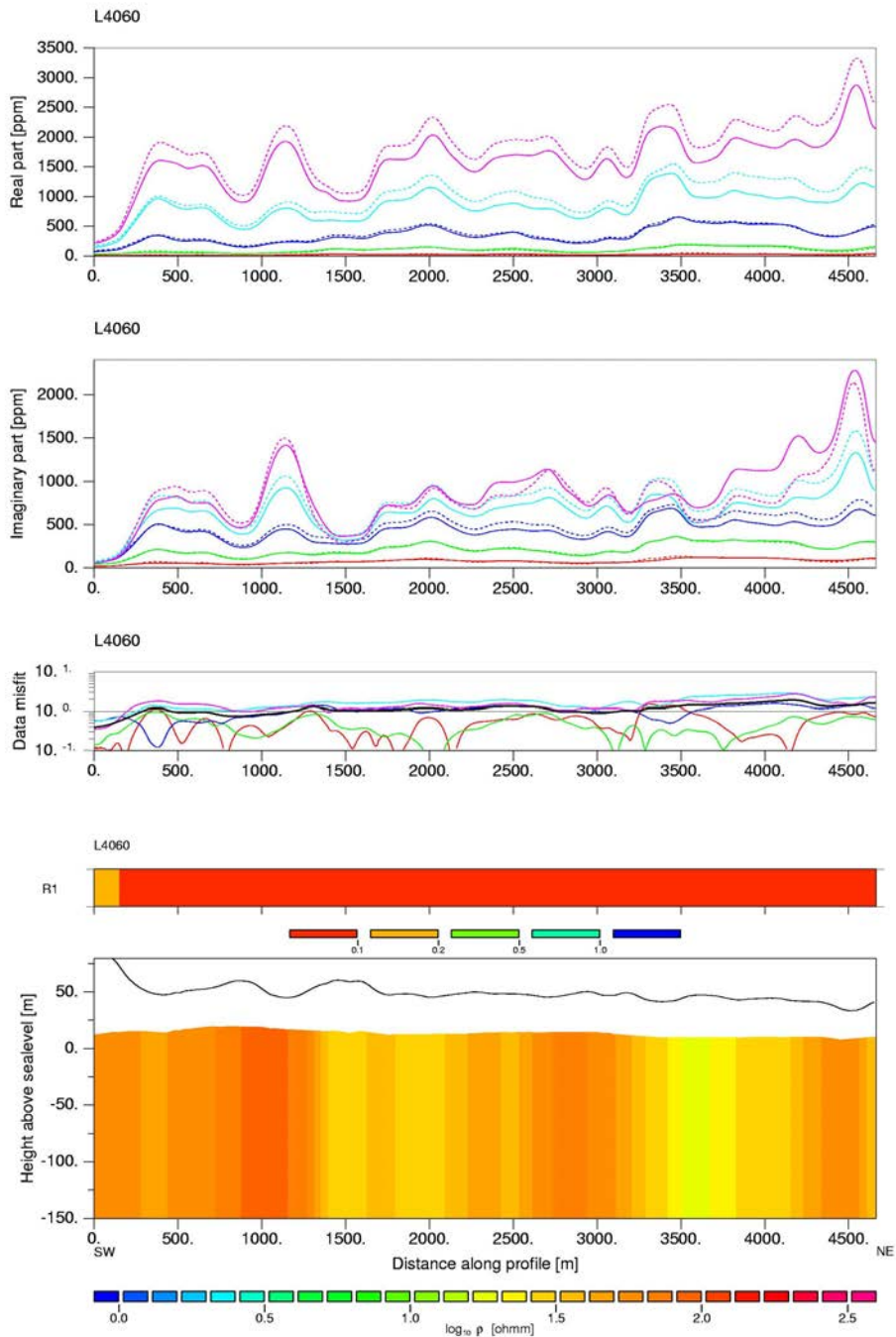
Ringkjøbing Amt

Positionen af flylinierne er vist i Figur 8.17 sammen med information fra det digitale 4 cm kort fra Kort og Matrikelstyrelsen. Totalt indgår ca. 87 000 sonderinger i disse data. Området er karakteriseret af sandede aflejringer med forekomst af leraflejringer.

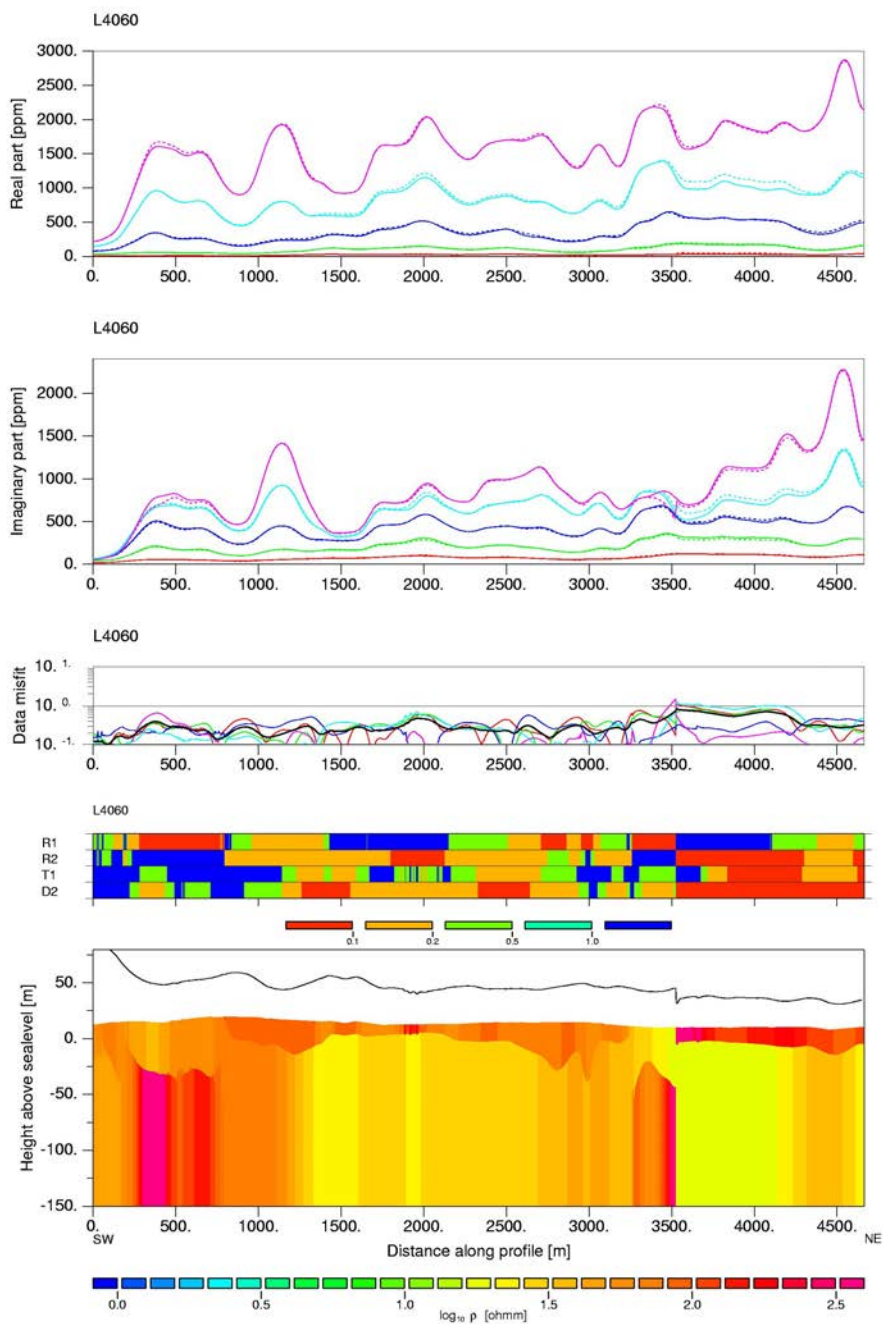
Figureerne 8.18–8.21 viser en 4.5 km lang modelsektion for linje L4060 (se Figur 8.17). Figureerne viser tolkninger med hhv. 1, 2 og 3 lag samt resultatet fra mangellagstolkningen. To- og trelagsmodellerne giver begge acceptable tilpasninger til de filtrerede data, hvormod modellerne med ét lag har store systematiske afvigelser mellem de målte og beregnede responser. Usikkerhederne på modelparametrene er noget varierende langs profilet. For trelagsmodellerne er usikkerhederne meget store med undtagelse af resistiviteten af det øverste lag for den nordlige del af profilet. Tykkelsen af det øverste lag er ligeledes godt bestemt omkring profilkoordinaterne 3500–4300 m, hvor der optræder et velledende lag i en dybde omkring 20 m. Boringerne langs profilet er for nogles vedkommende relativt korte eller ikke beskrevet udførligt og giver ikke mulighed for sammenligning med modelsektionerne.



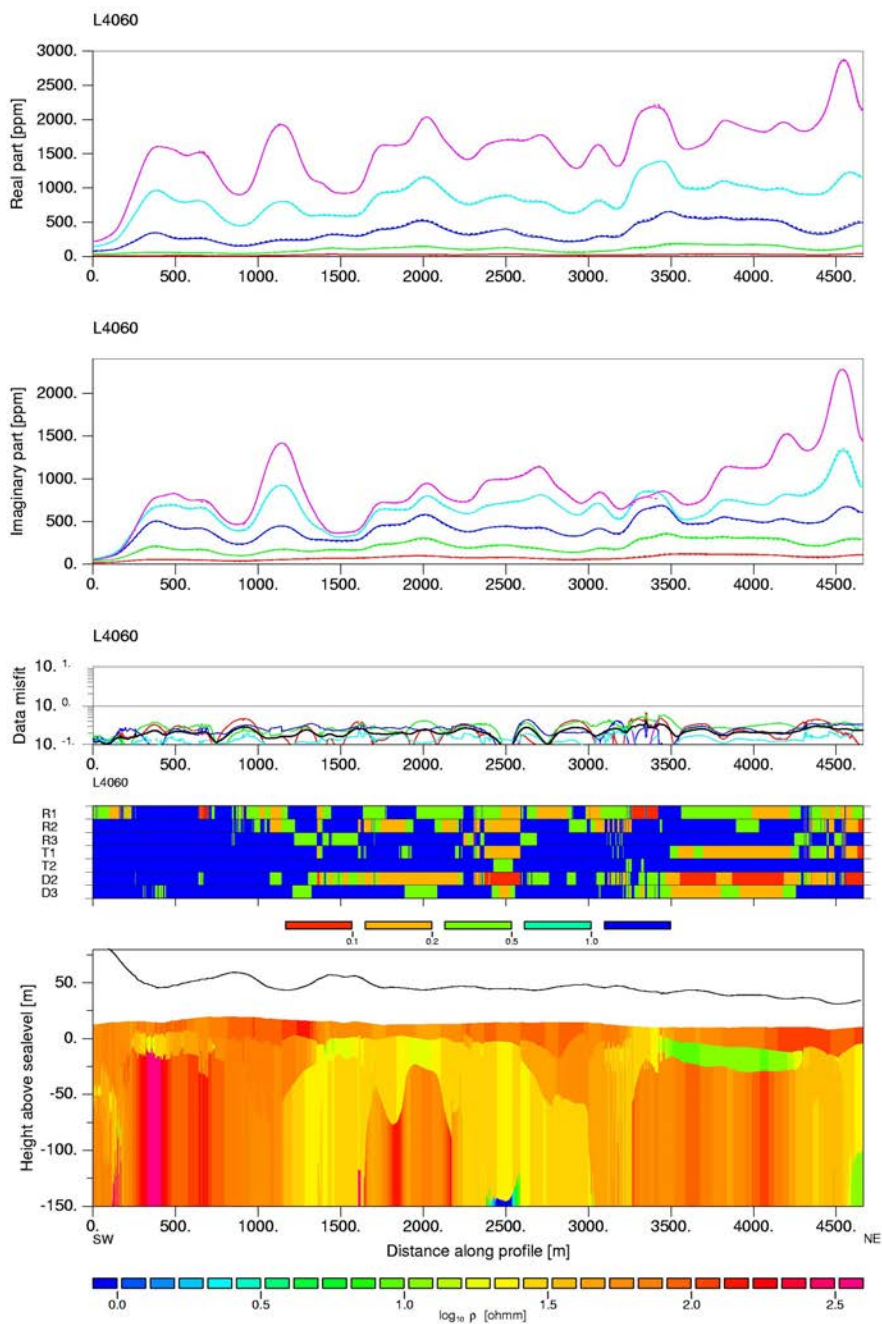
Figur 8.17 Kortet viser positionen af flylinjer for Dighem^{VRES} målinger ved Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amt.



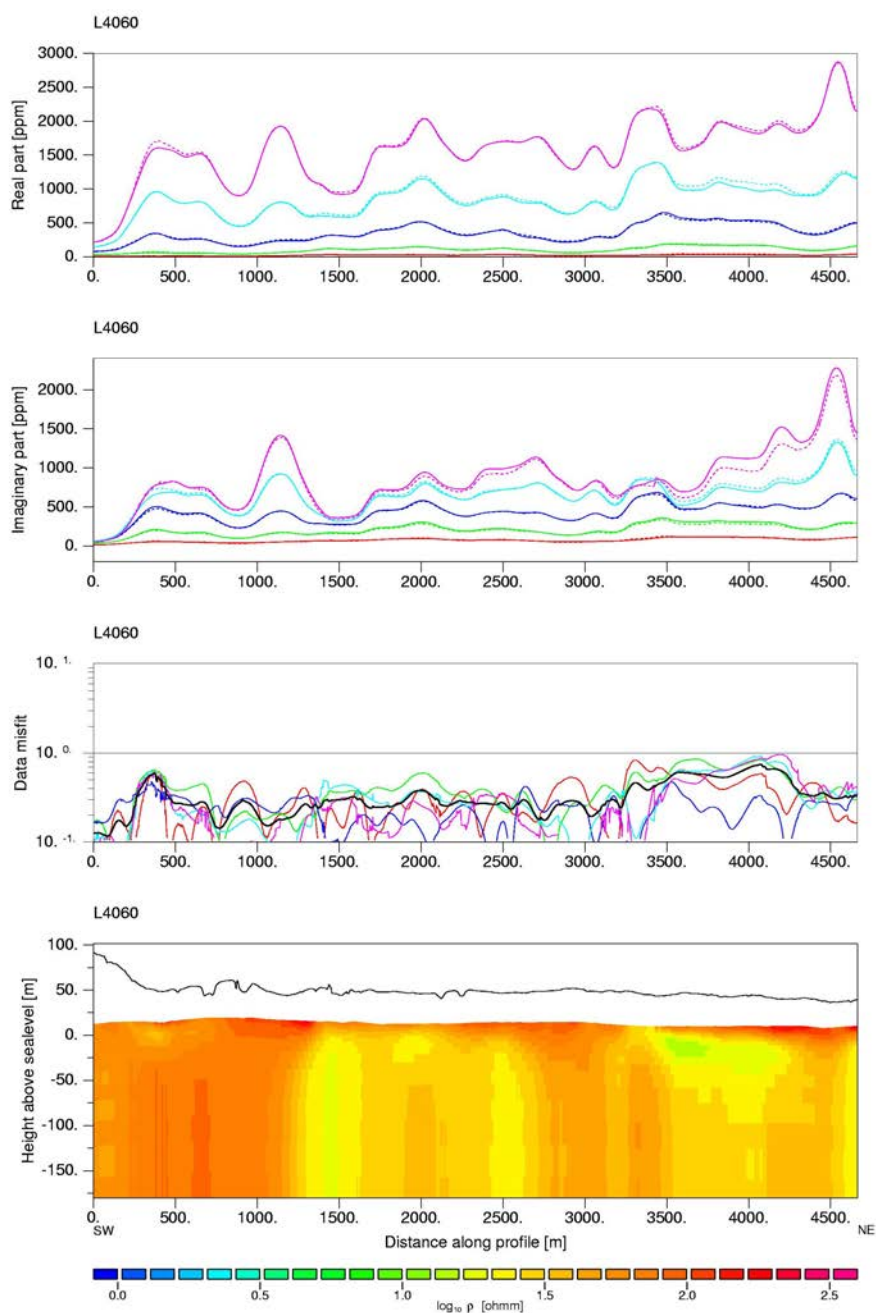
Figur 8.18 Figuren viser resultaterne af inversionen med 1-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L4060, Ringkøbing. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.19. Figuren viser resultaterne af inversionen med 2-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L4060, Ringkøbing. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.20. Figuren viser resultaterne af inversionen med 3-lags modeller af Dighem^{VRES} målinger fra linje L4060, Ringkøbing. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for data). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



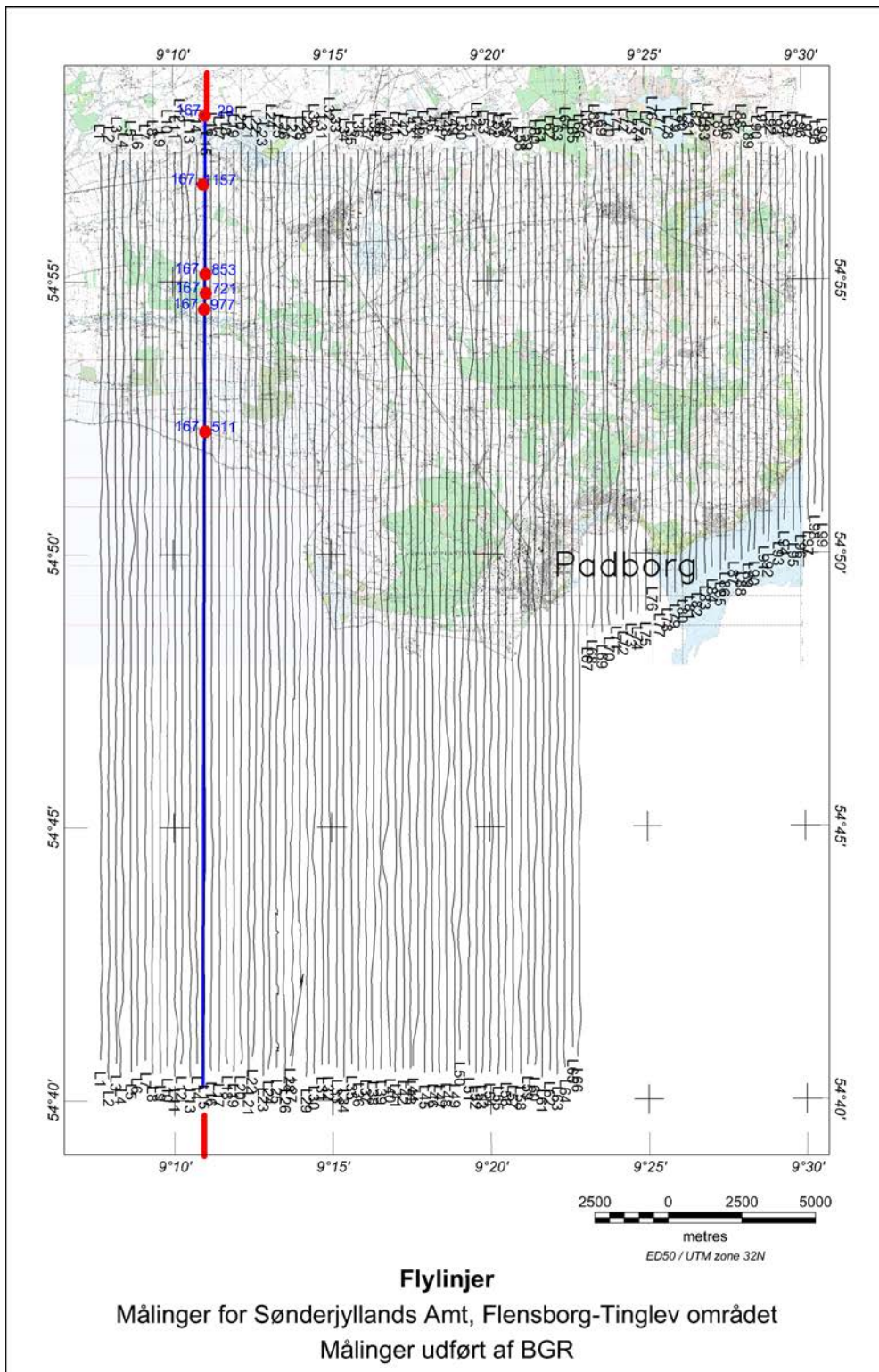
Figur 8.21. Figuren viser resultaterne af inversionen med mangelagsmodeller af Dig-hem^{VRES} målinger fra linje L4060, Ringkøbing. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 385 Hz (rød), 1500 Hz (grøn), 6200 Hz (mørkeblå), 25 kHz (lyseblå) og 102 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen. Den anvendte position af spolerne er angivet med den sorte linje.

Sønderjyllands Amt

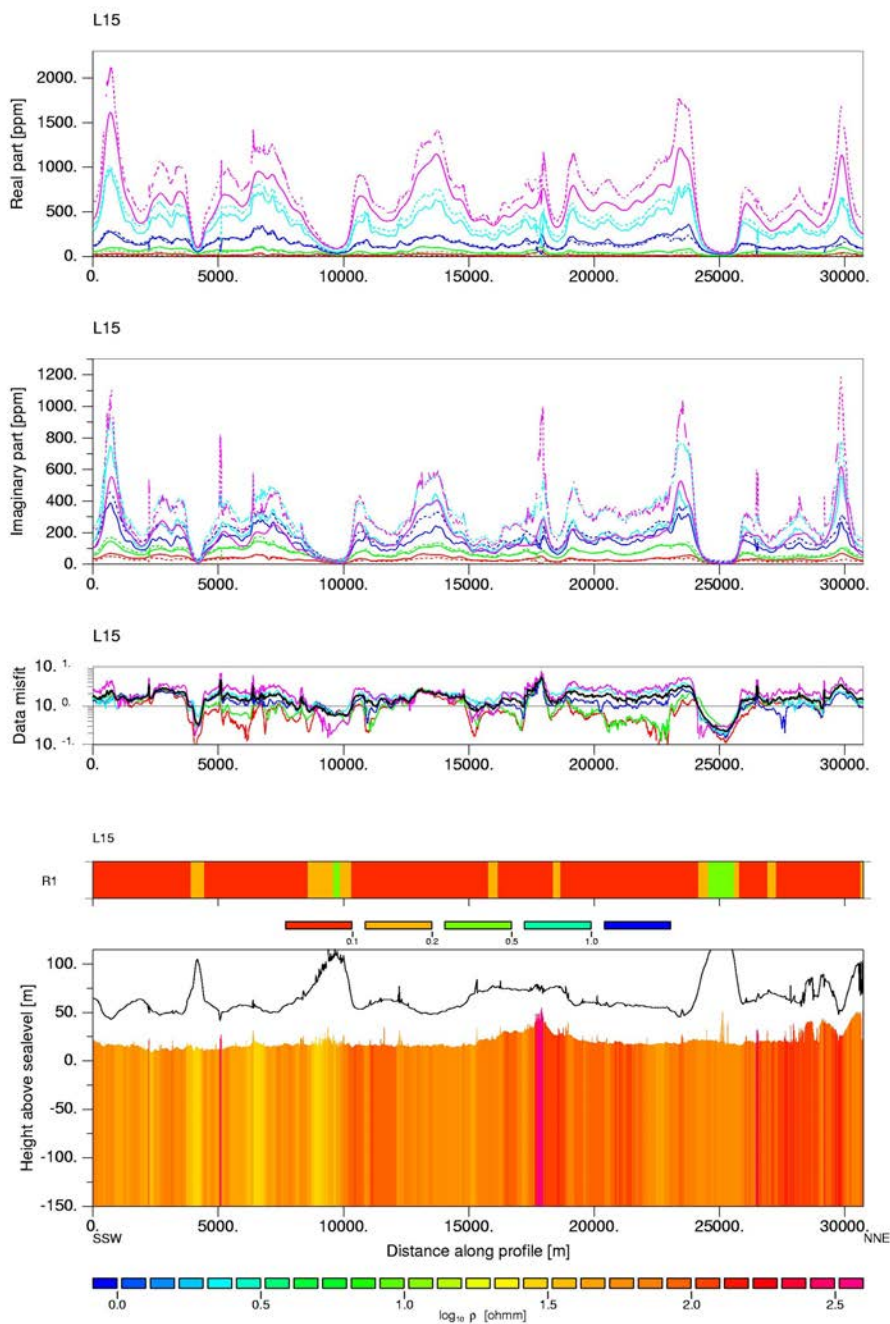
Positionen af flylinjer er vist på i Figur 8.22 sammen med information fra det digitale 4 cm kort fra Kort og Matrikelstyrelsen. Den gennemsnitlige højde af sender- og modtagerspoler over terrænet er ca. 43 m. Det totale antal målinger er ca. 318 000, hvoraf ca. 1/3 er på det danske område.

Figurerne 8.23–8.26 viser en 30 km lang modelsektion for linje L15 (se Figur 8.22). Figurerne viser tolkninger med hhv. 1, 2 og 3 lag samt resultatet fra mangelagstolkningen. Tilpasningen af de filtrerede data adskiller sig ikke væsentligt fra det som var muligt at opnå for data målte af Fugro, dvs. ét lag er utilstrækkeligt for dele af profilerne, og alle data kan tilpasses med to-lagsmodeller. Det ses også her at usikkerheden på modelparametrene vokser betydeligt mellem tolagstolkningen og trelagstolkningen. Kun øverste lags modstand er godt bestemt. Mangelagssektionen viser god overensstemmelse med resistiviteterne i trelagsmodellerne for den øvre del af sektionen, men der optræder store forskelle for de dybere dele.

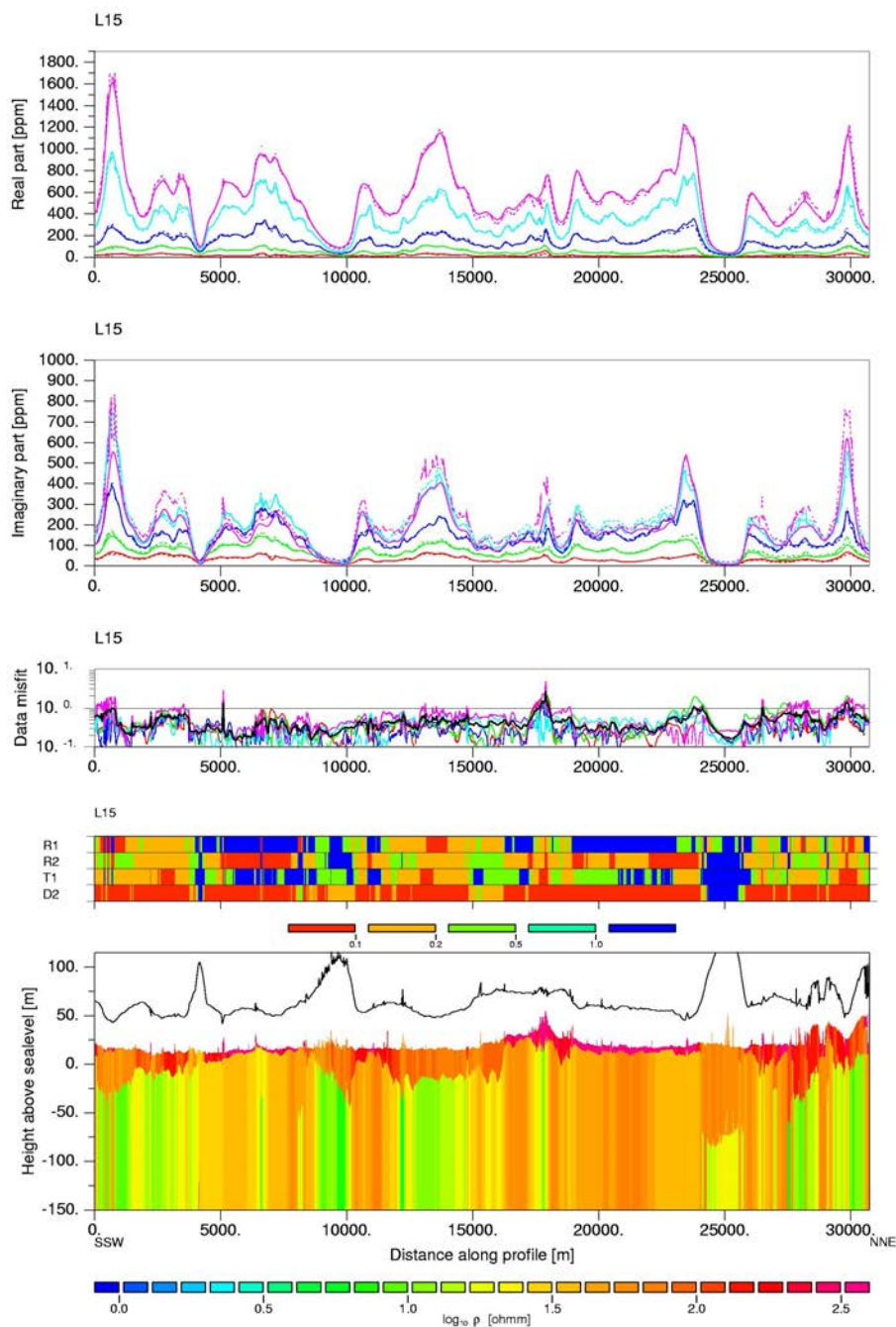
Boringerne langs profilet viser overvejende sandede aflejringer med tynde lerlag. Lerlag (mergel) findes i intervallerne 6–9 m i boringen DGU167.977 og 1.8–10.9 m i boringen DGU167.721. Begge boringer er afsluttet i den dybde af 16 m. De beregnede modelsektioner kan ikke umiddelbart korreleres med de fundne laggrænser, som varierer mellem 10 og 22 m mellem de to boringer. Beskrivelserne til de øvrige boringer er ikke fyldestgørende til at vurdere om der er overensstemmelse mellem boringer og beregnede modelsektioner.



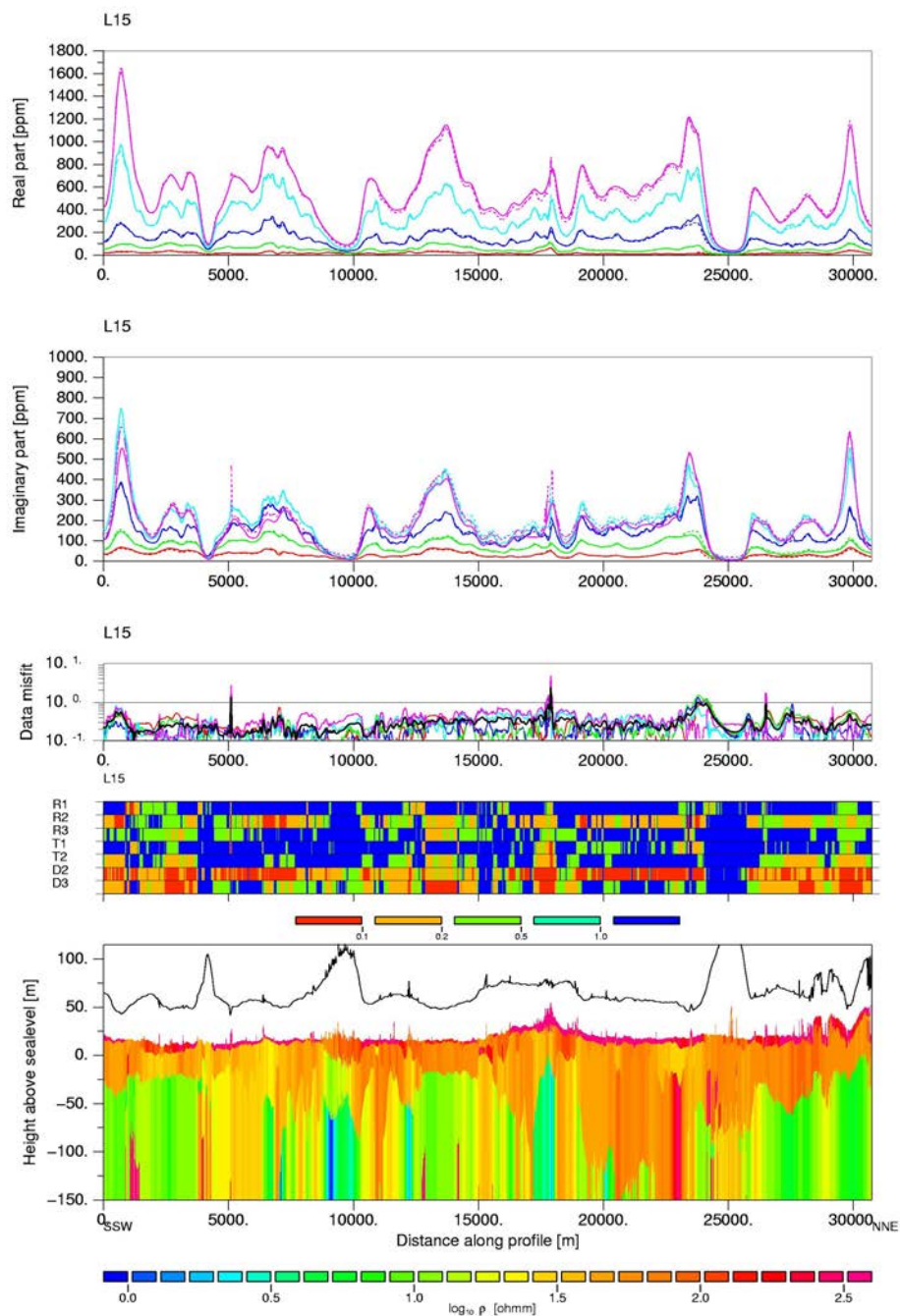
Figur 8.22. Kortet viser positionen af flylinjer for målinger i Sønderjylland (samt Nordtyskland) foretaget af BGR for Sønderjyllands Amt. De refererede borer er angivet med røde cirkler og nummerering med blå.



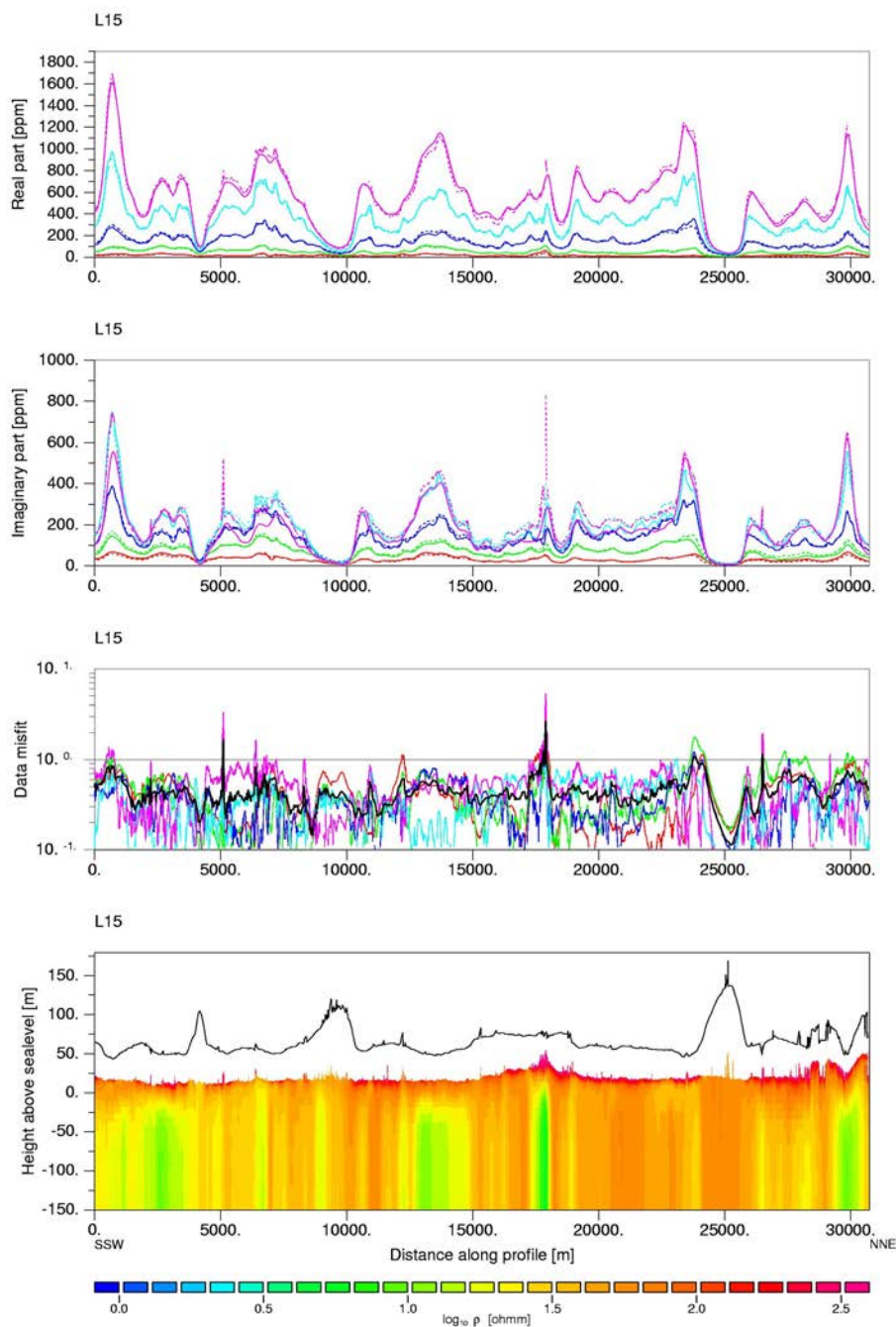
Figur 8.23. Figuren viser resultaterne af inversionen med 1-lags modeller af BGR's målinger fra linje L15, Sønderjylland. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 384 Hz (rød), 1.83 kHz (grøn), 8.61 kHz (mørkeblå), 41.3 kHz (lyseblå) og 192 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.24. Figuren viser resultaterne af inversionen med 2-lags modeller af BGR's målinger fra linje L15, Sønderjylland. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 384 Hz (rød), 1.83 kHz (grøn), 8.61 kHz (mørkeblå), 41.3 kHz (lyseblå) og 192 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.25. Figuren viser resultaterne af inversionen med 3-lags modeller af BGR's målinger fra linje L15, Sønderjylland. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 384 Hz (rød), 1.83 kHz (grøn), 8.61 kHz (mørkeblå), 41.3 kHz (lyseblå) og 192 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for data). Nederste sektion viser modellen med angivelse af relative usikker på parametrene. Den beregnede position af spolerne er angivet med den sorte linje.



Figur 8.26. Figuren viser resultaterne af inversionen med mangelagsmodeller af Dighem målinger fra linje L15, Sønderjylland. Den øverste sektion viser målte (fuldt optrukne kurver) og beregnede responser (stiplede kurver) for realdelen. Følgende farvekode er anvendt: 384 Hz (rød), 1.83 kHz (grøn), 8.61 kHz (mørkeblå), 41.3 kHz (lyseblå) og 192 kHz (magenta). Næste sektion viser tilsvarende data for imaginærdelen efterfulgt af en sektion, som viser datatilpasningen udtrykt ved rms-værdierne for alle frekvenser (sorte linje) og for hver enkelt frekvens (samme farvekode som for responserne). Nederste sektion viser modellen. Den anvendte position af spolerne er angivet med den sorte linje.

Kapitel 9 – Konklusioner

Intentioner med denne rapport

Helikopterbårne frekvensdomænesystemer er kommet på tale i forbindelse med den landsomfattende indsats i kortlægningen af Danmarks grundvandsressourcer, da de sammenlignet med traditionelle elektriske og elektromagnetiske metoder anvendt på jordoverfladen har en meget høj produktivitet. Som eksempel har vi analyseret DIGHEM^{VRES} systemet, et HEM system med fem frekvenser.

Skønt det er almen viden, at luftbårne systemer har en ringere opløsning af jordens ledningsevneforhold, end hvad man kan opnå med jordbaserede systemer, er det relevant at rette opmærksomheden mod HEM systemets evne til kvantitativ løsning af de problemer, man beskæftiger sig med i den nuværende hydrogeologiske kortlægning. Forventningerne til HEM systemet er, at det kan anvendes i sårbarhedskortlægningen til bestemmelse af overfladenære lerlags forekomst og tykkelse, samt at systemet kan bidrage til kortlægningen af grundvandsmagasiner gennem informationer om ledningsevneforholdene til en vis dybde, specielt dybden til gode ledere. Sammenlignet med de flybårne transiente metoder, som præsenteres i GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000) har systemet en bedre opløsning af overfladenære lag, og selv om indtrængningsdybden er mindre, er den dog ikke ubetydelig.

Ingen enkelt elektrisk eller elektromagnetisk metode opfylder alle de krav, man kan have til en kortlægning. De har alle deres stærke og svage sider, og hvilken metode, der skal vælges i en given situation, afhænger af undersøgelsens mål og finansieringsgrundlag. Hensigten med denne rapport har været at foretage en kvantitativ analyse af HEM metodens opløsningsevne og at sammenligne den med jordbaserede systemer for at tilvejebringe et objektivi grundlag for at vurdere, hvilken information man får ud af en HEM undersøgelse.

Fordele og ulemper ved HEM metoden

Fordele ved HEM systemer er, at de kan måle overalt, også på steder, som er svært tilgængelige med jordbaserede systemer, og at de ikke medfører markskader. Adviseringen bliver enklere, men der skal stadig foretages en varsling, idet der er specielle forhold omkring flyvning i lav højde med helikopter.

Analysen af de fire systemer, som er præsenteret i de foregående kapitler, lægger hovedvægten på deres evne til at give kvantitativ information om de geologiske strukturer, udtrykt ved usikkerheden på de beregnede modelparametre. Den kvantitative information fra tolkning af geofysiske målinger er vigtig for den generelle geologiske kortlægning, men skal også indarbejdes i de hydrogeologiske grundvandsmodeller, som etableres i forbindelse med den omfattende hydrogeologiske kortlægning af Danmark. Dette sker bl.a. som kvantitative oplysninger om grundvandsmagasiners geometriske udstrækning.

Trods begrænsninger i HEM systemets kvantitative opløsningsformåen kan det være hensigtsmæssigt at anvende HEM metoden, idet kvalitativ information og information af relativ art kan være ønskelig. Geofysiske data indgår oftest som en del af et større geovidenskabeligt datamateriale, f.eks. geologiske, geokemiske og andre geofysiske data, og integration med andre datatyper, kvantitativt og/eller kvalitativt, giver mulighed for at udtrække ny information.

Skønt produktiviteten af HEM undersøgelser er op til 300 km/dag - langt større end for de tre andre metoder, som vi har sammenlignet med - bør man huske på, at det tager lige så lang tid at processere HEM data som data fra jordbaserede metoder, så resultaterne kommer ikke lige med det samme. Vi vil anbefale, at data med koblinger til menneskeskabte elektriske ledere bliver identificeret og fjernet inden filtreringen af profilerne. Desuden må de områder, hvor der er koblede data, fjernes fra de endelige modelsektioner, eller det må på anden måde indikeres, at tolkningerne skal tages med stort forbehold. Undlader man at gøre dette, vil man få fejlagtige og vildledende resultater. Dette arbejde er manuelt og tidskrævende og er os bekendt ikke praksis for de selskaber, som tilbyder HEM undersøgelser. Skal en sådan processering efterfølgende gennemføres, kan udgiften til tolkningen blive af størrelsesordenen halvt så stor som udgiften til undersøgelsen. Disse forhold betyder, at den effektive pris per kilometer pålidelige data vil blive højere end det fremgår af undersøgelsesomkostningerne.

De kvantitative undersøgelser har koncentreret sig om den vertikale opløsning, den laterale opløsning og koblinger til menneskeskabte ledende installationer.

Vertikal opløsning

Datagrundlaget for HEM metoden består i real- og imaginærdel for 5–6 frekvenser. Real- og imaginærdel er imidlertid stærkt afhængige af hinanden, så de 10 målte data repræsenterer kun ca. 5–8 uafhængige data. Dette datagrundlag er ofte utilstrækkeligt til at opløse jorden ledningsevneforhold, og det viser sig da også ud fra analyserne i Kapitel 6 og 7. Man kan oftest kun skelne to lag med DIGHEM^{VRES} systemet, såfremt man tolker med fålagsmodeller, og parametrene i fålagsmodellerne må betragtes som gennemsnitsværdier af de faktisk forekommende variationer. Det har vist sig, at mangelagstolkninger i visse tilfælde er i stand til at indikere detaljer i resistivitetsvariationerne, som ikke ses på fålagstolkningerne. Disse træk ved modellen kan dermed siges at være indikeret, men ikke bestemt, og det må anbefales, at man gennemfører begge typer af tolkninger.

I nedenstående tabel har vi samlet de vigtigste resultater angående den vertikale opløsning, idet vi specielt betragter opløsningen af overfladenære godt ledene lag (lerdækkeproblematikken i forbindelse med sårbarhedskortlægningen) og dybden til en god leder (afgrænsningen af grundvandsmagasiner). Tabellerne omhandler kun tolagsmodeller, og de fremstiller dermed de bedst opnåelige resultater. For trelagsmodeller er forholdene mere komplicerede, der er flere parametre at bestemme, og usikkerheden på bestemmelsen af parametrene er generelt større. I Appendiks A er der detaljerede analyser af såvel to- som trelagsmodeller.

2-lagsmodel	HEM	MEP	PACES	TEM
30 / 70 Ωm	> 50% altid	< 50% for $t > 5\text{m}$	< 50% for $t > 2.5\text{m}$	< 50% for $t > 8\text{m}$
30 / 200 Ωm	> 50% altid	< 50% for $t > 4\text{m}$	< 50% for $t > 2.5\text{m}$	< 50% for $t > 5\text{m}$
70 / 200 Ωm	> 50% altid	< 50% for $t > 4\text{m}$	< 50% for $t > 2.5\text{m}$	< 50% for $t > 10\text{m}$

Tabel 9.1. Tabellen viser usikkerheden på bestemmelsen af tykkelsen, t , af det øverste lag i tre forskellige opstigende tolagsmodeller.

2-lagsmodel	HEM	MEP	PACES	TEM
30 / 5 Ωm	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 20\text{m}$	< 10% for $d < 100\text{m}$
70 / 5 Ωm	< 50% for $d < 100\text{m}$	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 20\text{m}$	< 10% for $d < 100\text{m}$
200 / 5 Ωm	< 50% for $d < 100\text{m}$	< 50% for $d < 80\text{m}$	< 50% for $d < 20\text{m}$	< 10% for $d < 100\text{m}$

Tabel 9.2. Tabellen viser usikkerheden på bestemmelsen af dybden, d , til den gode leder i tre forskellige nedstigende tolagsmodeller.

I Tabel 9.1 bemærker man, at usikkerheden på bestemmelsen af tykkelsen af det øverste lag altid er over 50% for HEM metodens vedkommende, uanset tykkelsen af laget, medens de jordbaserede metoder har en bedre opløsning. Tabel 9.2 viser, at HEM metoden kan opløse dybden til en god leder, hvis modellen ellers er simpel.

De datatransformationer og tilnærmede tolkninger, der som standard tilbydes af de firmaer, der gennemfører HEM undersøgelser, er utilstrækkelige til en kvantitativ tolkning af data. I vore dage er der ikke noget som helst i vejen for at gennemføre fuldt nonlineære 1D tolkninger af selv store datasæt, og det er da også i stigende grad praksis at gennemføre en sådan tolkningsprocedure.

Lateral opløsning

Den tætte opmåling af HEM data langs et profil er altid en fordel, idet det øger muligheden for at estimere pålideligheden af data, men det forhold, at man har en måling for hver 3 m, betyder ikke, at man har en lateral opløsning på 3 m. Også udstrækningen af følsomhedsfunktionen bestemmer den laterale opløsning. DIGHEM^{VRES} systemet befinder sig ca. 35 m over jorden, og det betyder, at strømsystemet, som induceres i jorden, vil have en væsentlig lateral udbredelse, specielt for de lavere frekvenser. Følsomhedsfunktionen inddrager konduktiviteten i en radius på mindst 100 m for de lavere frekvenser, og ca. 50–70 m for den højeste frekvens, så en måling med DIGHEM^{VRES} systemet er et vægtet gennemsnit af konduktiviteten inden for dette område. Dette medfører alvorlige begrænsninger af den laterale opløsning. Hertil kommer, at jo mere omgivende støj der er, jo større strækning bliver man nødt til at midle sine målinger over langs profilet, hvilket reducerer den laterale opløsning. Dette forhold er af betydning i et land som Danmark, hvor støjniveauet er temmeligt højt. Det fremgår af analyserne i Kapitel 7, som tager udgangspunkt i todimensionale

modeller, at tolkningen af luftbårne data vil resultere i et lateralt mere udtværet billede af undergrunden end nogle af de jordbaserede metoder, vi har sammenlignet med.

Betragter man specielt HEM metodens evne til at kortlægge overfladenære lerlags forekomst og tykkelse, må man regne med, at der kan være vanskeligheder. Analyserne fra Kapitel 7 indikerer, at et hul i morænelersdækket måske kun fremstår som en højere resistivitet indenfor et større område, såfremt man betragter fålagstolkningerne. På mangelagstolkningerne synes indikationerne på hullernes position at være klarere, men man må her betænke, at tolkningerne er lavet på perfekte data, og at den tilfældige variabilitet af tolkningerne vil være større for virkelighedens støjpertuberede data.

PROTEM 47 data, som teoretisk set har en bedre lateral opløsning, giver ikke i praksis en god lateral opløsning, idet målingerne ofte ligger med en afstand på 100–250 m. MEP målingerne har en udmærket lateral opløsning, som bliver udnyttet fuldt ud i kraft af muligheden for 2D tolkning. PACES systemet har den bedste laterale opløsning af alle fire systemer, da man har data målt på jordoverfladen med små elektrodeafstande for hver 1.5 m. I praksis begrænses den laterale opløsning af MEP og PACES systemerne af udgifterne til en tæt kortlægning.

Koblinger

De elektromagnetiske metoder, HEM og TEM, både jordbaserede og luftbårne, vekselvirker med ledende menneskeskabte installationer. Disse koblingsfænomener forstyrrer målingerne, og hvis de ikke erkendes, kan de give anledning til en fejlagtig og vildledende tolkning af sonderingerne. I industrialiserede lande som f.eks. Danmark med tæt udbygning af den elektriske infrastruktur betyder det, at det er svært at forestille sig et større område af landet, hvor der ikke vil være forstyrrende koblinger af den ene eller anden art.

For transiente systemer er der et udmærket erfaringsgrundlag, som siger, at koblingsfænomener optræder inden for en afstand af 150 m for jordbaserede målinger, dog stigende til mindst 250 m ved kortlægning af dybtliggende gode ledere. For flybårne transiente sonderinger er problemet værre, og der optræder koblinger i en afstand på 300–600 m. En optimistisk vurdering siger, at man i landlige områder af Østjylland og Øerne får forstyrrelser på 50 % af arealet ved jordbaserede målinger med PROTEM 47 systemet. For flybårne transiente målinger kan op til 80 % af arealet være forstyrret (se Kapitel 3), og det kortlagte areal vil falde i mindre, usammenhængende områder, se GEUS TEM rapporten (Christensen *et al.* 2000).

Vi vil vurdere, at sikkerhedsafstanden for HEM målinger vil være af størrelsesordenen 50–100 m for de højeste frekvenser, medens den skal være noget større for de lavere frekvenser, af størrelsesordenen 100–250 m. Disse afstande vil i mange tilfælde, på grund af den store koncentration af menneskeskabte elektrisk ledende installationer i Danmark, reducere størrelsen af de områder, man kan kortlægge. I et typisk område på landet i Østjylland eller på Øerne kan der være koblingforstyrrelser på op til 20–40% af et område for de højeste frekvensers vedkommende, medens forstyrrelser for de laveste frekvensers vedkommende kan optræde på et område, der er op til dobbelt så stort.

Det er ligeledes vores vurdering ved betragtning af HEM data, at det er vanskeligere at identificere data influeret af koblinger, end det er for TEM data. For TEM data kan man betragte både variationen af data langs profilet og den enkelte sonderingskurve for at identificere koblinger. For HEM målinger betyder de få data, at det er vanskeligt at identificere koblinger ud fra sonderingskurven. Identifikationen af koblinger kan foretages ved en betragtning af variationerne langs det målte profil, og det kan tillige være en stor hjælp at plote forskellen mellem rådata og filtrerede data indenfor det undersøgte område, idet man på et fladeplot kan erkende lineamenter, som kan korreleres med infrastrukturer som veje og højspændingsledninger.

Vi vil anbefale, at data med koblinger til menneskeskabte elektriske ledere bliver identificeret og fjernet *inden* filtreringen af data, og at man husker på, at koblingerne har lange haler ud over de hurtige variationer, som man genkender dem på. De modeller, der fremgår ved tolkning af koblede data, må fjernes fra de resulterende modelsektioner for at undgå fejlagtige og vildledende resultater.

De galvaniske metoder, MEP og PACES, er stort set ikke påvirket af koblinger, så sikkerhedsafstanden er reelt nul. Det betyder, at man kan foretage målinger næsten overalt, og datadækningen med MEP og PACES er dermed mere sikker end for TEM og HEM. For PACES systemet kan der være logistiske problemer med hensyn til at foretage kontinuerte målinger, men MEP målinger kan foretages stort set overalt, selv i bymæssig bebyggelse.

Støjmodel og inversionspraksis

Vi har formuleret en støjmodel for DIGHEM^{VRES} systemet i samarbejde med Fugro og anvendt den i de analyser, som er præsenteret i Kapitel 6. Vi skal her minde om, at alle tolkninger og analyser i Kapitel 6 er gennemført under inddragelse af luftlaget mellem spolerne og jorden som et lag i modellen. Det er vores opfattelse, at denne måde at invertere og analysere data på er den mest korrekte, idet den tager højde for, at flyvehøjden kun kendes med en vis usikkerhed, og at dette influerer på bestemmelsen af modelparametrene for jordlagene.

Målehøjden har stor indflydelse på målingerne, så en fejlagtig bestemmelse af målehøjden vil medføre at data bliver inkonsistente og vanskelige at tolke. Resultatet af tolkningen vil blive fejlagtigt, idet der introduceres områder med for høj resistivitet i overfladen, hvis højden undervurderes og vice versa. Ved overflyvning af skov og bebyggelse vil de radar- og lasersystemer, der anvendes til højdebestemmelsen, angive en for lille højde, idet signalet fra højdesystemerne vil reflekteres fra trætoppe og tage. Det er meget væsentligt, at højdedata ved en sammenligning af dataprofiler, topografiske kort og flyvevideoen bliver editret og korrigeret, hvor de er fejlagtige. Det er ligeledes væsentligt at inddrage usikkerheden på højdebestemmelsen i inversionen af data, således at usikkerheden på højden kommer til at indgå i vurderingen af usikkerheden på modelparametrene.

Andre datatyper

Ved udførelse af HEM målinger er det almindeligt, at man samtidig udfører målinger af jordens statiske magnetfelt og i visse tilfælde også den naturlige radioaktive stråling. De magnetiske målinger vil være af betydning for den generelle geologiske kortlægning af Danmark. De radiometriske målinger muliggør etableringen af et referenceniveau for baggrundsstråling, som kan være af meget stor betydning i forbindelse med eventuelle fremtidige radioaktive forureningskatastrofer.

Det kan anbefales, at disse datatyper indsamles rutinemæssigt i forbindelse med elektromagnetiske målinger. Set fra et samfundsmæssigt synspunkt kunne det være hensigtsmæssigt, at det blev pålagt rekvirenterne at indsamle magnetiske og radiometriske data i forbindelse med luftbårne elektromagnetiske undersøgelser.

Kapitel 10 – anbefalinger vedrørende luftbårne undersøgelser

I dette kapitel redegøres for nogle aspekter vedrørende de praktiske forhold ved tilrettelæggelse og kvalitetssikring af luftbårne målinger. De fleste af overvejelserne gælder såvel for helikopterbårne frekvensdomænemålinger som flybårne transiente målinger. En stor del af de anbefalinger, som findes i det følgende, er baseret på de erfaringer som GEUS har opnået i forbindelse med luftbårne målinger i Grønland, som omfatter ca. 75 000 liniekilometer elektromagnetiske målinger samt over 500 000 liniekilometer med detaljerede magnetiske målinger.

Det bør understreges, at vi i dette afsnit ikke tager stilling til det hensigtsmæssige i at foretage helikopterbårne frekvensdomænemålinger i forbindelse med den hydrogeofysiske kortlægning i Danmark, men udelukkende peger på de praktiske problemer og deres løsninger.

Luftbårne geofysiske systemer og selskaber

Målinger med elektromagnetiske metoder fra luften er væsentligt mere komplicerede end målinger på jorden. Dette forhold afspejles i, at der er færre geofysiske selskaber og statslige organisationer, som tilbyder geofysiske undersøgelser fra luften, end selskaber, som kan foretage jordbaserede målinger. Selskaberne har i de fleste tilfælde udviklet egne instrumenter, som sammen med selve flyet eller helikopteren, indgår som et integreret målesystem.

Det lille antal af selskaber afspejles af antallet af bud afgivet på nogle af de elektromagnetiske undersøgelser som GEUS har haft i åbent EU-udbud. Der er kommet bud fra to eller tre selskaber. Dette forhold understreger vigtigheden af information til selskaberne i forbindelse med udbuddet, således at konkurrencemomentet ved udvælgelse af selskab fastholdes. Efter nogle år med sammenlægninger af selskaber er der det seneste år atter kommet nye selskaber på markedet, som tilbyder elektromagnetiske målinger fra luften. Der er f.eks. nye transiente elektromagnetiske systemer som benyttes fra helikopter.

Procedurer angående tilladelser til at foretage målinger fra luften

Den indledede fase med planlægning af luftbårne geofysiske undersøgelser omfatter en række henvendelser til luftfartsmyndigheder mm., hvorved spørgsmål omkring tilladte minimumshøjder for fly og helikopter og andre restriktioner klarlægges i detaljer. Forhåndstilladelser vedrørende disse forhold er nødvendige med henblik på udarbejdelse af tekniske specifikationer i udbudsmaterialet.

Det bør understreges, at selskabet, som tilbyder de geofysiske målinger, selv skal indhente de fornødne tilladelser.

Procedurer for udvælgelse af selskab

Foruden de tekniske specifikationer indgår en række andre faktorer i forbindelse med tilrettelæggelse og gennemførelse af luftbårne geofysiske undersøgelser. Disse faktorer vil blive kommenteret i de følgende afsnit med udgangspunkt i en EU-udbudsrunde.

EU-udbud ?

Udvælgelse af selskab følger de almindelige regler for, hvornår et offentligt arbejde skal udbydes i åbent EU-udbud. Dette afhænger bl.a. af de forventede omkostninger for projektets udførelse. Vi vil ikke her gå nærmere ind på disse regler, men henviser i stedet til de officielle udgivelser vedrørende disse forhold.

Udarbejdelse af udbudsmateriale

GEUS har i forbindelse med sit arbejde i Grønland udarbejdet et omfattende materiale angående EU-udbud af luftbårne projekter. Dette materiale omfatter dels en række generelle betingelser som bl.a. omfatter juridiske forhold og dels nogle specielle betingelser af mere teknisk karakter. GEUS har fra selskaberne udelukkende modtaget positive tilbagemeldinger vedrørende dette materiale. I det følgende findes en kort beskrivelse af indeholdet i dette materiale samt nogle kommentarer til dette.

Tekniske specifikationer

De tekniske specifikationer vil som regel indeholde følgende punkter:

- Angivelse af flyvehøjde over terræn samt afstande mellem flyvelinier. Tolerancer for disse angives.
- Dokumentation af udstyr til positionsbestemmelse af fly og måleudstyr.
- Specifikation af instrumentering
- Kalibreringsprocedurer for instrumentering.
- Processering af data.
- Tolkning af data.
- Type af produkter (kort, digitale data, rapporter mm.).
- Specifikationer vedrørende fly eller helikopter.

I forbindelse med ovennævnte punkter kan det i nogle tilfælde være hensigtsmæssigt at fastlægge toleranceniveauer i selve udbudsmaterialet, og ved andre punkter bede selskaberne selv præcisere hvilke toleranceniveauer, som de garanterer at overholde. Man bør ligeledes overveje, hvorvidt det er fordelagtigt med meget velafgrænsede specifikationer, f.eks. kun HEM eller kun TEM, eller om man vil holde muligheden for begge systemer åbne og dermed forøge konkurrencemomentet i udbudsrunder.

Med hensyn til specifikation af digitale data er det af afgørende betydning, at rådata leveres og at parametre for filtre og korrektion af drift medfølger de processerede data. Grunden til

at rådata bør indgå i de digitale produkter er en bedre mulighed for vurdering af støjklender end den, som kan fås ved analyse af de processerede data.

Juridiske forhold

Herunder indgår en lang række punkter: Disse omfatter bl.a.

- Forpligtelser i forbindelse med leverancer af data
- Ansvar i forbindelse med udførelse af målinger
- Forhold vedrørende forsikringer
- Forhold vedrørende skatter og afgifter
- Forpligtelser for den udbydende part
- Forhold vedrørende tredjepart
- Rettigheder vedrørende patenter
- Rettigheder og begrænsninger vedrørende data
- Forhold vedrørende publicering og eventuelt salg af data
- Forhold vedrørende konkurs af selskab
- Forhold vedrørende misligholdelse af kontrakt og løsning af konflikter
- Force majeure
- Forhold vedrørende love og forordninger

Specielle forhold vedrørende udførelse af målingerne

Herunder kan f.eks. indgå

- Procedurer for advisering af målingerne
- Repræsentation af udbydende part under målingerne
- Samarbejde under målingernes udførelse
- Information og rapporter fra selskabet under projektets forløb

Vurdering af indkommende bud

I vurderingen af de indkomne bud indgår en række faktorer. Prisen for målingerne udførelse er naturligvis en væsentlig faktor, men det bør pointeres, at en lang række andre faktorer bør medtages. Heri indgår bl.a.:

- Tekniske specifikationer
- Backup faciliteter vedrørende instrumentering
- Backup faciliteter vedrørende fly og personale
- Tidligere erfaringer
- Referencer
- Selskabets økonomiske forhold
- Type af produkter (tolkningsarbejde m.m.)
- Tidsplan

De ovennævnte punkter, inklusiv pris, er ikke listet i en prioritet rækkefølge. Vurdering er meget ofte en balancegang, som det kan være vanskeligt at opstille generelle regler for. I EU termer bør anvendes den vurderingsform, som benævner 'økonomisk mest fordelagtige' og tillader at ikke økonomiske parameter inddrages i vurderingen.

Gerda-databasen

Det er naturligvis af stor betydning, at luftbårne elektromagnetiske målinger indberettes til den geofysiske database GERDA på lige fod med alle jordbaserede data. Som nævnt under tekniske specifikationer er det også meget væsentligt, at de data, som indrapporteres, også inkluderer rådata og systemspecifikationer.

Andre typer af målinger

Ved udførelse af luftbårne elektromagnetiske målinger er det almindeligt, at man samtidigt udfører målinger af jordens statiske magnetfelt og i visse tilfælde også den naturlige radioaktive stråling.

Tætte målinger af magnetfeltet vil kunne give yderligere information om de geologiske forhold. Denne information vil være anvendelig i både den hydrogeofysiske som i den almene kortlægning af Danmark. Påvirkning fra kulturelt skabte magnetfelter må dog forventes.

Radiometriske målinger vil kunne udgøre referencemålinger i tilfælde af senere problemer med radioaktiv forurening. I Sverige findes en del positive erfaringer med anvendelse af radioaktive data ved jordartskortlægningen. Det er dog ikke givet at lignende resultater vil kunne opnås i Danmark.

Det kan anbefales, at disse datatyper indsamles i forbindelse med luftbårne elektromagnetiske målinger.

Litteraturhenvisninger

Introducerede litteratur på dansk

På dansk findes ingen kompendier om HEM metoden, men der findes introducerede litteratur om de geoelektriske metoder, MEP og PACES, og om den transiente metode, som anvendes i universitetsundervisningen og ved diverse kurser, bl.a. Geofysiksarbejdets kurser. Disse er egnede som generel introduktion til metoderne og til hydrogeofysisk kortlægning.

Christensen, N.B.: Den transiente elektromagnetiske sonderingsmetode. Forelæsningsnoter 1994, (revision 1995, revideret 1999). Geologisk Institut, Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet, Finlandsgade 8, DK-8200 Aarhus N, Danmark. Kan fås ved henvendelse til forfatteren, nbc@geo.au.dk.

Christensen, N.B.: Miljøgeofysiske anvendelser af geoelektriske metoder. Forelæsningsnoter 1999. Geologisk Institut, Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet, Finlandsgade 8, DK-8200 Aarhus N, Danmark. Kan fås ved henvendelse til forfatteren, nbc@geo.au.dk.

Geofysiksarbejdets kursusmateriale kan findes og downloades gratis på <http://www.gfs.au.dk>.

Loke M.H.: Lecture notes on 2D Resistivity Imaging. Kompendium. Kan downloades gratis på ABEMs hjemmeside www.abem.se.

International lærebogslitteratur

Nedenstående lærebogsartikler har gode referencelister, der kan tjene som udgangspunkt for søgning i den internationale litteratur.

Spies, B.R. & Frischknecht, F.C., 1991: Electromagnetic Sounding. In: Nabighian, M.N. (ed.): Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists (SEG), Vol. 2, part A, p 285–426.

Nabighian, M.N. & Macnae, J.C., 1991: Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods. In: Nabighian, M.N. (ed.): Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists (SEG), Vol. 2, part A, p 427–520.

Palacky G.J. & West G.F., 1991: Airborne electromagnetic methods. In: Nabighian, M.N. (ed.): Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists (SEG), Vol. 2, part B, p 811–880.

GEUS TEM rapporten

Christensen N.B., Christiansen A.V., Poulsen, L.H., Rasmussen T.M og Sørensen K.I., 2000. En vurdering af flybårne transiente metoders anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport **2000/41**.

Efter ovennævnte rapporters udgivelse er der kommet yderligere både dansk og international litteratur af rapportens forfattere om den flybårne TEM metode:

- Christensen N.B., Sørensen, K.I., Christiansen, A.V., Rasmussen T.M. & Poulsen L.H. 2000: The use of airborne electromagnetic systems for hydrogeological investigations. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Washington DC, 73–82.
- Christensen N.B., Sørensen, K.I., Christiansen, A.V., Rasmussen T.M. & Poulsen L.H. 2000: An analysis of airborne transient electromagnetic data for hydrogeological investigations. Proceedings of the EEGS-ES meeting, Bochum, Germany.
- Christiansen A.V. & Christensen N.B. 2000: The sensitivity functions of TEM methods. Proceedings of the 6th Meeting, Environmental and Engineering Geophysics, Bochum, Germany, 2000, EM09, 4pp.
- Christiansen A.V., Poulsen L.H. & Christensen N.B., 2001: Luftbåren TEM i Danmark. Teoretiske overvejelser og praktiske erfaringer. ATV konferencen om jord og grundvand, Vingsted 2001. Poster.
- Christiansen A.V. & Christensen N.B., 2001: En sammenligning af flybåren og jordbaseret TEM. ATV konferencen om jord og grundvand, Vingsted 2001. Abstract.
- Christiansen A.V. & Christensen N.B., 2002: Quantitative interpretation and analysis of airborne and ground-based transient electromagnetic measurements in Denmark. Geophysics. Accepted for publication.
- Christiansen A.V. & Christensen N.B., 2002: Application and analysis of airborne transient electromagnetic methods in Denmark. The role of on-time data. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Denver Colorado.
- Poulsen L.H., Rasmussen T.M. & Christensen N.B. 1999: Interpretation of airborne measurements over Inglefield Land, North-West Greenland. Proceedings of the 61st meeting and technical exhibition of the EAGE, Helsinki 1999, P030, 4pp.
- Poulsen L.H., Rasmussen T.M. & Christensen N.B. 1999: Interpretation strategies for airborne measurements. The Inglefield Land survey. Proceedings of the Workshop W6 on Advances in Exploration Geoelectromagnetism, EAGE, Helsinki 1999, 4pp.

Andre litteraturhenvisninger

- Auken, E., Thomsen, P. & Sørensen, K., 2000: Lateral constrained inversion (LCI) of profile oriented data – the resistivity case. I: Proceedings, 6th meeting, Environmental and Engineering Geophysics, European Section, Bochum, Germany, EL06.
- Christensen, N.B., & Auken, E., 1992: Simultaneous electromagnetic layered model analysis, in Jacobsen, B.H., Ed., Proceedings of the Interdisciplinary Inversion Workshop 1, Aarhus 1992. *GeoSkifter*, **41**, 49–56. Aarhus: Geologisk Institut.
- Dahlin, T. & Loke, M.H., 1998: Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, **38**, 237–249.
- Loke, M.H. & Barker, R.D., 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**, 131–152.
- McGillivray, P.R., 1992: Forward modeling and inversion of DC resistivity and MMR data. PhD thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Pedersen, S A. S 1989: Jordartskort over Danmark, skala 1:200 000. Danmarks Geologiske Undersøgelse.

- Raiche A., Sugeng F. & Xing Z. 1999: Accurate EM modeling for appropriate levels of geological and system complexity. Extended abstracts of the EAGE 61st conference and technical exhibition, Helsinki, Finland 7–11 June 1999, 2.09–2.12.
- Sengpiel, K.-P. and Siemon, B., 2000, Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration: *Geophysics, Soc. of Expl. Geophys.*, **65**, 1983–1992.

Appendiks A – Katalog over 1D analyserne

Appendiks A indeholder alle 33 suite af modelanalyser, som er foretaget af endimensionale modeller. Det har været hensigtsmæssigt kun at medtage nogle få i Kapitel 6 for at illustrere metoden og for at forklare, hvorledes man læser analyseplottene. Der henvises til Kapitel 6 for nærmere forklaring.

Analyserne er gennemført som en analyse af hvor godt modelparametrene er bestemt i de sande modeller for alle fire metoder og desuden ved at vise manglagstolkninger af perfekte data for alle fire metoder. Manglagstolkningerne viser, hvad der i bedste fald kan *indikeres* af data, ikke nødvendigvis *opløses*. Analyserne af fålagsmodellerne viser den *faktiske usikkerhed* på modelparametrene, hvis man tolker med en model med samme antal lag som i den sande model.

Nedenfor ses en oversigt over indholdet af de enkelte figurer.

- Figur A.1 : Etlagsmodel. Resistiviteten af første lag varierer.
- Figur A.2 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5 Ωm og 30 Ωm .
- Figur A.3 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5 Ωm og 70 Ωm .
- Figur A.4 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5 Ωm og 200 Ωm .
- Figur A.5 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 5 Ωm .
- Figur A.6 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 70 Ωm .
- Figur A.7 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 200 Ωm .
- Figur A.8 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 5 Ωm .
- Figur A.9 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 30 Ωm .
- Figur A.10 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 200 Ωm .

- Figur A.11 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer. Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 5 Ωm .
- Figur A.12 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer. Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 30 Ωm .
- Figur A.13 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varierer. Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 70 Ωm .
- Figur A.14 : Dobbelt opstigende model. Resistiviteten af første lag varierer.
- Figur A.15 : Dobbelt opstigende model. Resistiviteten af andet lag varierer.
- Figur A.16 : Dobbelt opstigende model. Resistiviteten af tredje lag varierer.
- Figur A.17 : Dobbelt opstigende model. Tykkelsen af første lag varierer.
- Figur A.18 : Dobbelt opstigende model. Tykkelsen af andet lag varierer.
- Figur A.19 : Dobbelt nedstigende model. Resistiviteten af første lag varierer.
- Figur A.20 : Dobbelt nedstigende model. Resistiviteten af andet lag varierer.
- Figur A.21 : Dobbelt nedstigende model. Resistiviteten af tredje lag varierer.
- Figur A.22 : Dobbelt nedstigende model. Tykkelsen af første lag varierer.
- Figur A.23 : Dobbelt nedstigende model. Tykkelsen af andet lag varierer.
- Figur A.24 : Maksimumsmodel. Resistiviteten af første lag varierer.
- Figur A.25 : Maksimumsmodel. Resistiviteten af andet lag varierer.
- Figur A.26 : Maksimumsmodel. Resistiviteten af tredje lag varierer.
- Figur A.27 : Maksimumsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
- Figur A.28 : Maksimumsmodel. Tykkelsen af andet lag varierer.
- Figur A.29 : Minimumsmodel. Resistiviteten af første lag varierer.
- Figur A.30 : Minimumsmodel. Resistiviteten af andet lag varierer.
- Figur A.31 : Minimumsmodel. Resistiviteten af tredje lag varierer.
- Figur A.32 : Minimumsmodel. Tykkelsen af første lag varierer.
- Figur A.33 : Minimumsmodel. Tykkelsen af andet lag varierer.

Tolkningsstatistik

Vi har gennemført tolkninger med fålagsmodeller af alle modelsuiterne i dette appendiks, og nedenfor ses en statistik over fordelingen af én-, to- og trelagstolkninger for de forskellige metoder og modeller:

Tolagsmodeller	etlagstolkninger	Tolagstolkninger
DIGHEM ^{VRES}	74 svarende til 29 %	178 svarende til 71 %
MEP	5 svarende til 2 %	247 svarende til 98 %
PACES	40 svarende til 16 %	212 svarende til 84 %
PROTEM 47	25 svarende til 10 %	227 svarende til 90 %

Trelagsmodeller	etlagstolkninger	tolagstolkninger	trelagstolkninger
DIGHEM ^{VRES}	18 svarende til 4 %	328 svarende til 78 %	74 svarende til 18 %
MEP	1 svarende til 0 %	171 svarende til 41 %	248 svarende til 59 %
PACES	23 svarende til 6 %	366 svarende til 87 %	31 svarende til 7 %
PROTEM 47	2 svarende til 1 %	296 svarende til 70 %	122 svarende til 29 %

DIGHEM^{VRES}

De fleste trelagsmodeller (over 80%) kan tolkes med et- eller tolagsmodeller. Under 20% af modellerne kan tolkes med trelagsmodeller.

CVES

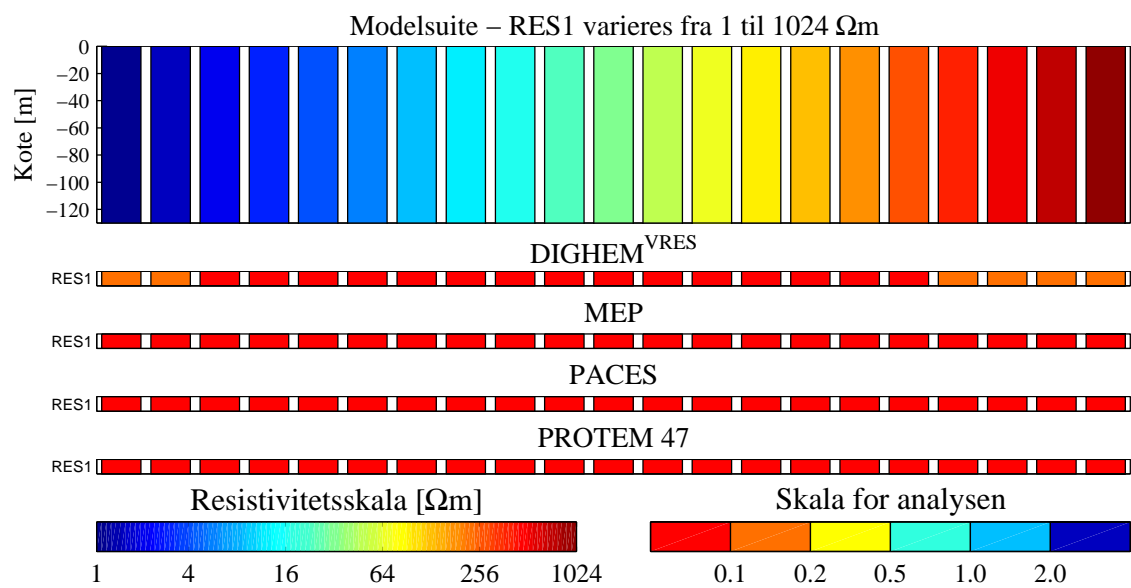
Ca. 40% af trelagsmodellerne kan tolkes med to-lagsmodeller, mens ca. 60% kan tolkes med trelagsmodeller. Kun i ét enkelt tilfælde kan der tolkes med en etlagsmodel.

PACES

Langt de fleste trelagsmodeller (over 90%) kan tolkes med et- eller tolagsmodeller. Under 10% af modellerne kan tolkes med trelagsmodeller.

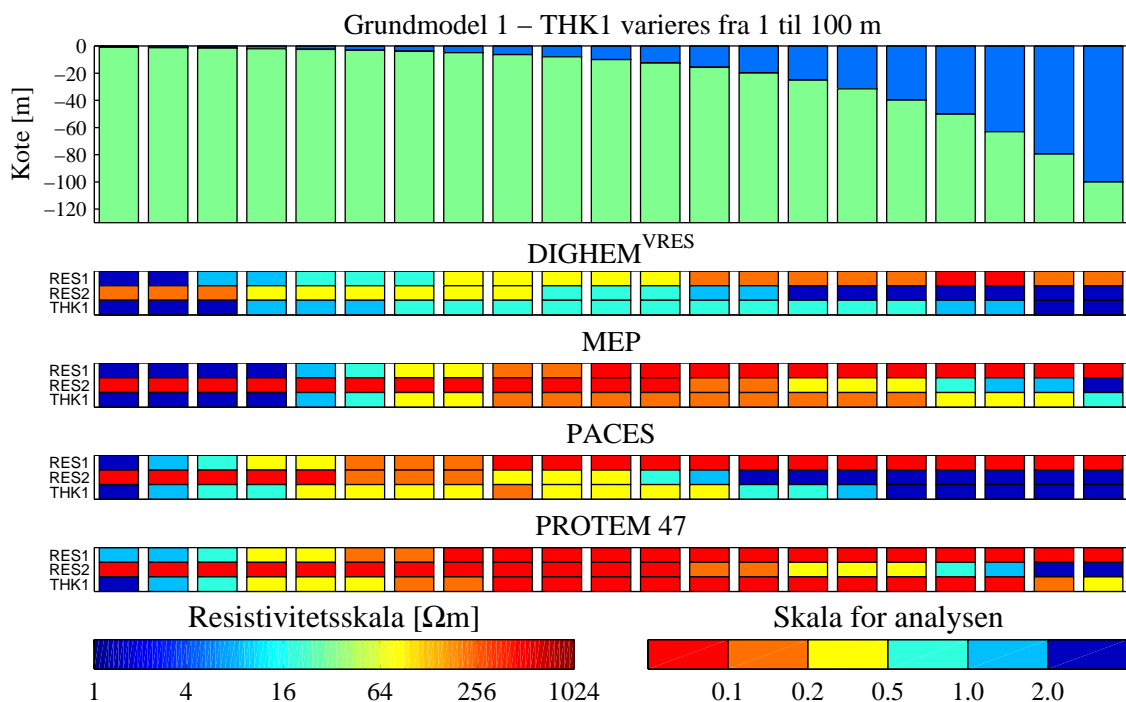
TEM

Ca. 70% af trelagsmodellerne kan tolkes med tolagsmodeller, mens ca. 30% kan tolkes med trelagsmodeller. Kun i to tilfælde kan der tolkes med en etlagsmodel.



Figur A.1. Analyse af etlagsmodeller. Resistiviteten varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm .

Det ses at for alle systemmer er første lags resistiviteter godt bestemte til velbestemte.



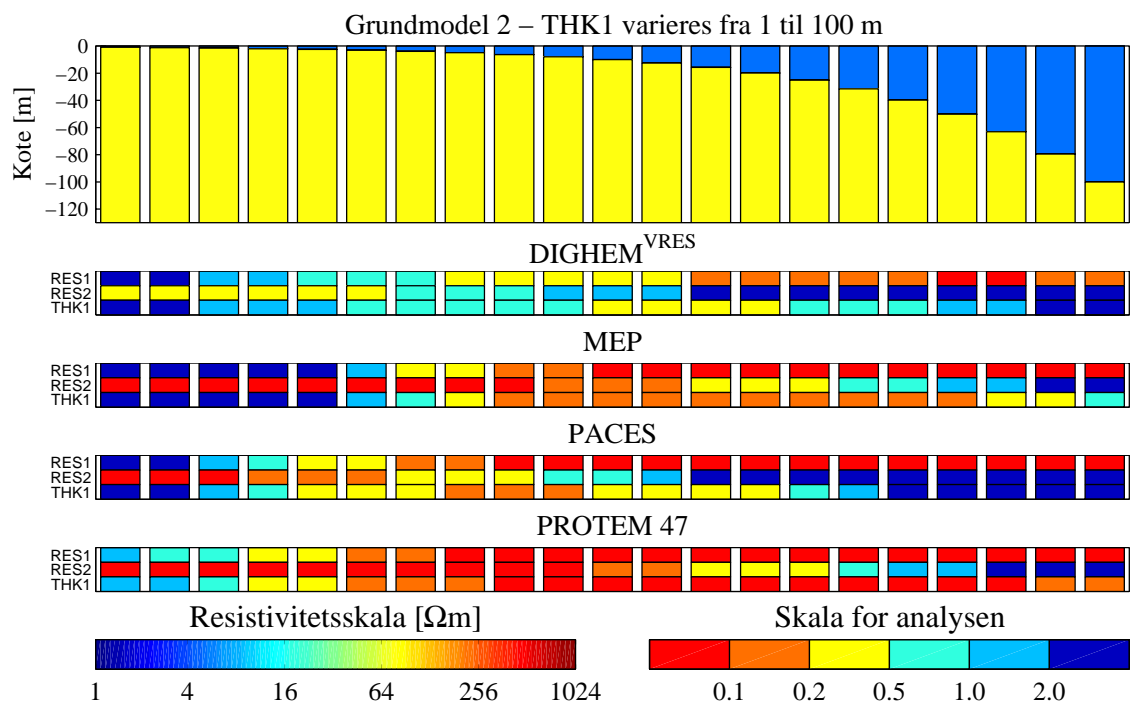
Figur A.2. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $5 \Omega\text{m}$ og $30 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 4 m) til godt bestemt (større end 12 m). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 2 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 8 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt til velbestemt (større end 5 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 30–40 m). Tykkelsen af første lag er generelt godt bestemt (større end 4–5 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er generelt godt bestemt til velbestemt (større end 2 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 6–10 m). Første lags tykkelse er generelt nogenlunde bestemt (intervallet 2–20 m). I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder. Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er godt til velbestemt (mindre end 25–35 m). Tykkelsen af første lag er generelt godt til velbestemt (større end 2–3 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



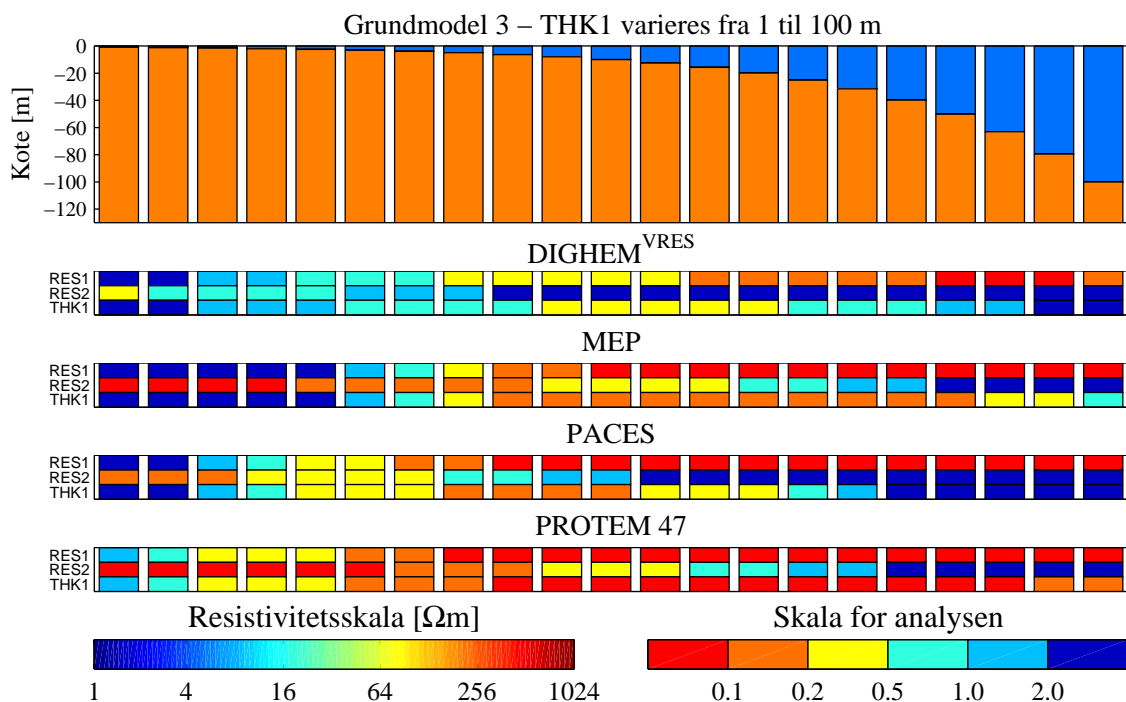
Figur A.3. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 5 Ωm og 70 Ωm . Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 4 m) til godt bestemt (større end 12 m). Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt (mindre end 4 m). Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt omkring en tykkelse på 10 m. Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt til velbestemt (større end 4–5 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 15–25 m). Tykkelsen af første lag er generelt godt bestemt (større end 5 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 4–6 m). Første lags tykkelse er nogenlunde bestemt til godt bestemt (intervallet 2–20 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er generelt godt til velbestemt (mindre end 15–25 m). Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt (større end 2–3 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



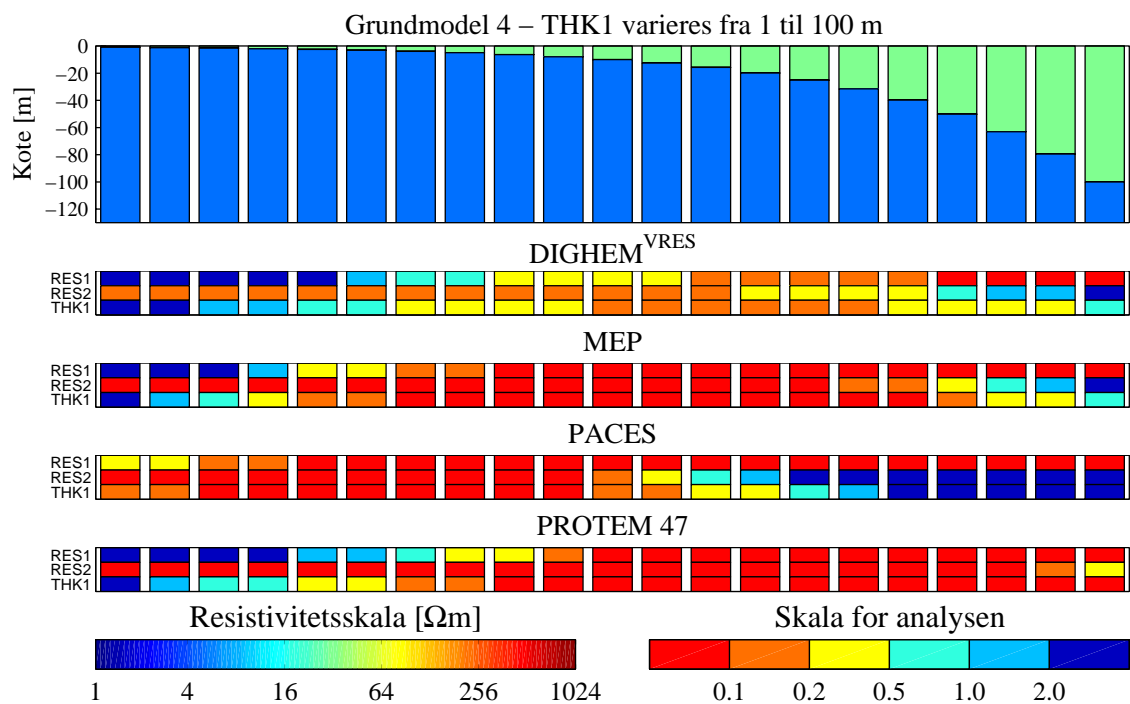
Figur A.4. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $5 \Omega\text{m}$ og $200 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 5 m) til godt bestemt (større end 12 m). Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt omkring en tykkelse på 10–12 m.. Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 5 m). Resistiviteten af andet lag er generelt godt bestemt (mindre end 8 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 20 m). Tykkelsen af første lag er generelt godt bestemt (større end 5 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er generelt godt bestemt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 2 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 5 m). Første lags tykkelse er nogenlunde bestemt til godt bestemt (intervallet 2–20 m). I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er generelt godt til velbestemt (mindre end 8–12 m). Tykkelsen af første lag er generelt godt til velbestemt (større end 2–3 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



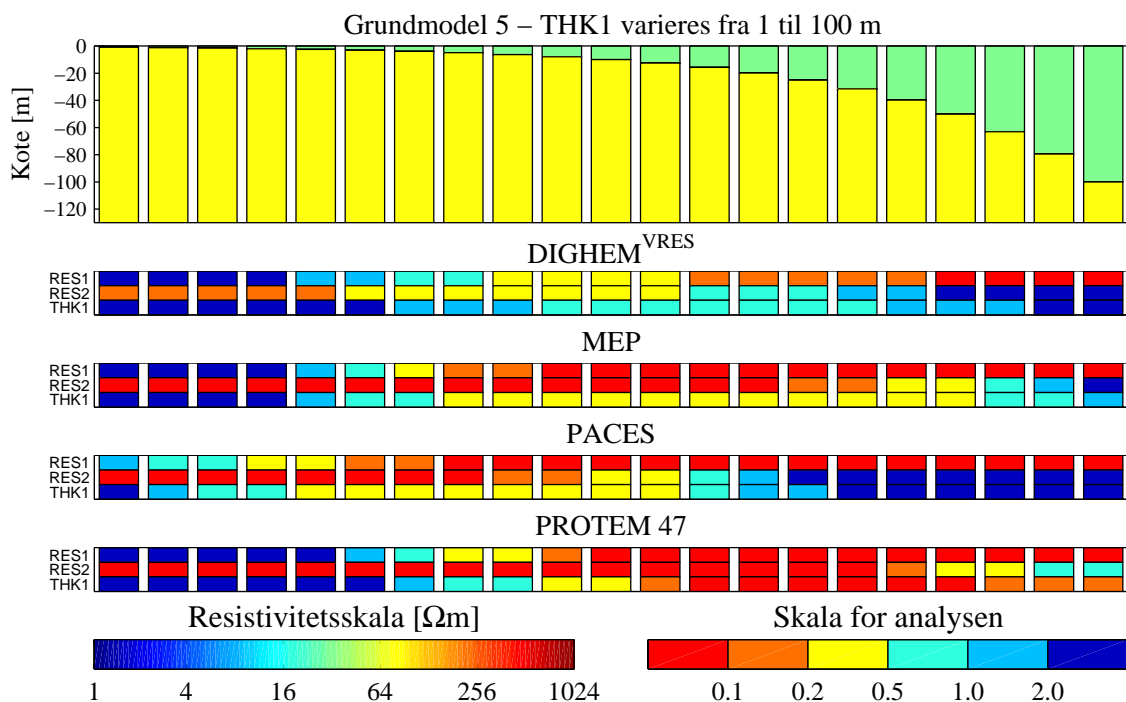
Figur A.5. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $30 \Omega\text{m}$ og $5 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 6 m) til godt bestemt (større end 12 m). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 20 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 40 m). Tykkelsen af første lag er generelt nogenlunde (intervallet 4–60 m) til godt bestemt (intervallet 10–30 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 50 m). Tykkelsen af første lag er velbestemt til godt bestemt (intervallet 2–60 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt til velbestemt (på nær de første to trin). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 12 m). Første lags tykkelse er velbestemt til godt bestemt (mindre end 15–20 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt til velbestemt (større end 5–6 m). Resistiviteten af andet lag er generelt godt til velbestemt. Tykkelsen af første lag er generelt godt til velbestemt (3–4 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



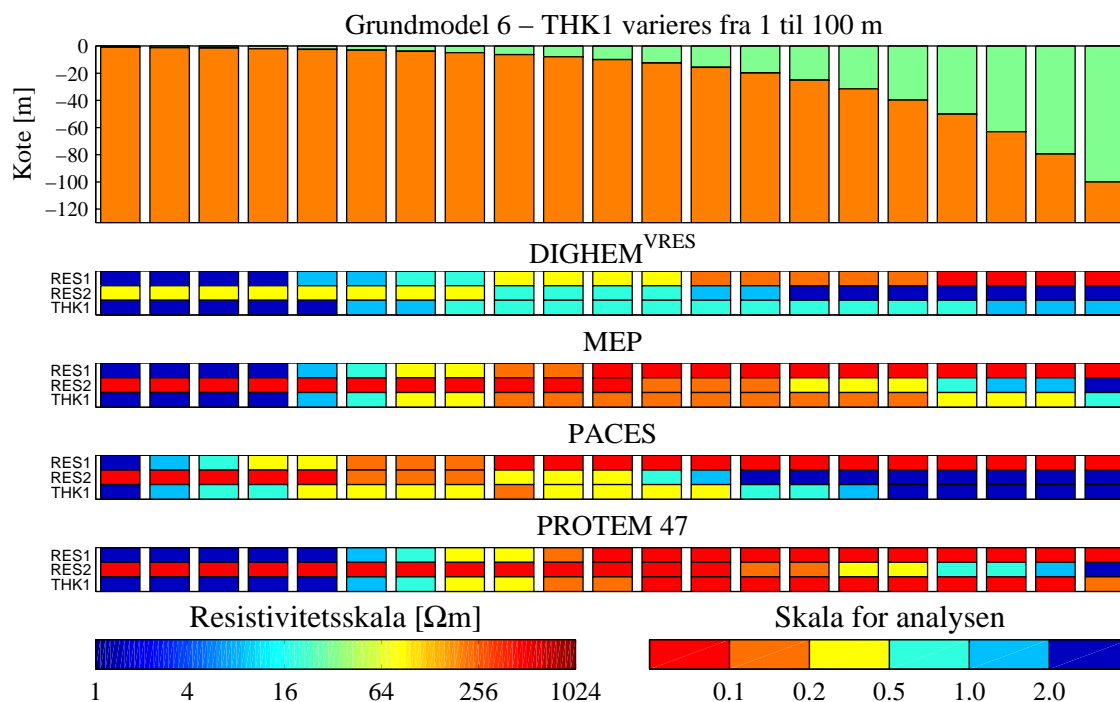
Figur A.6. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $30 \Omega\text{m}$ og $70 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 6–10 m) til godt bestemt (større end 12 m). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 3 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 15 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 4 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 40–50 m). Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt (intervallet 5–50 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 8–10 m). Første lags tykkelse er nogenlunde bestemt (intervallet 3–12 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 5–6 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 50–60 m). Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt (større end 8–10 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



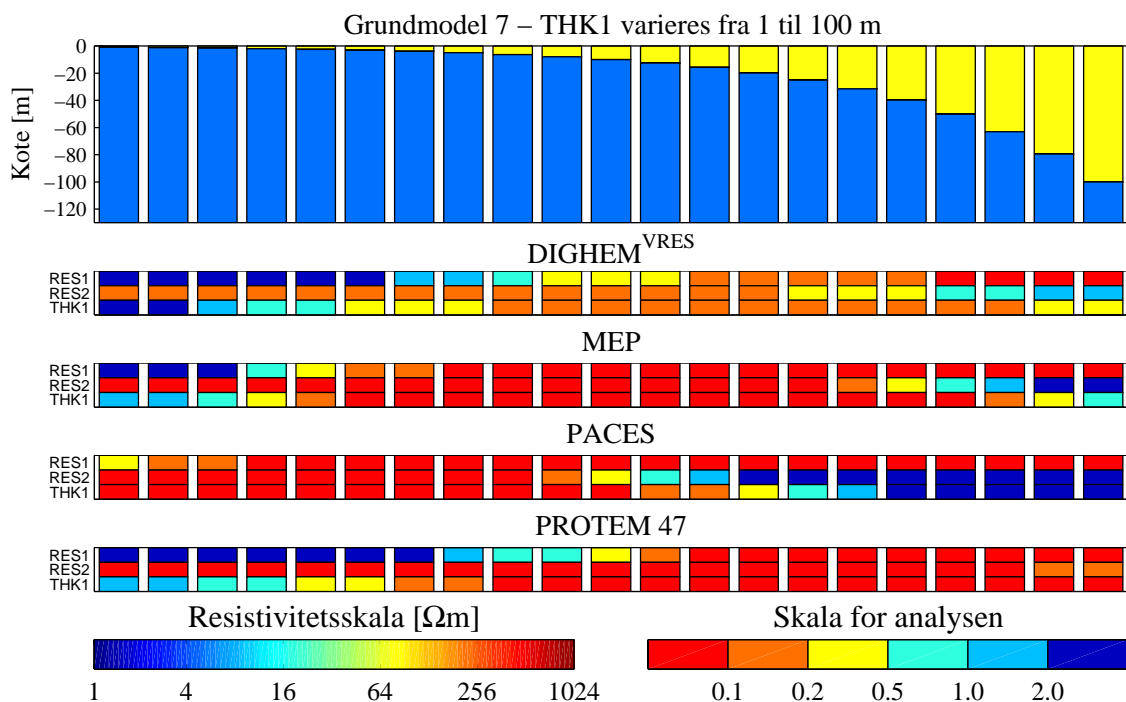
Figur A.7. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 200 Ωm . Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 6 m) til godt bestemt (større end 12 m). Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt (mindre end 6 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt til velbestemt (større end 4–5 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 25–40 m). Tykkelsen af første lag er godt bestemt (intervallet 6–40 m) til nogenlunde bestemt (intervallet 4–80 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 6–8 m). Første lags tykkelse er nogenlunde bestemt (intervallet 3–15 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en mindre indtrængningsdybde på 20–25 end de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 5–6 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 30–40 m). Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt (større end 5–6 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



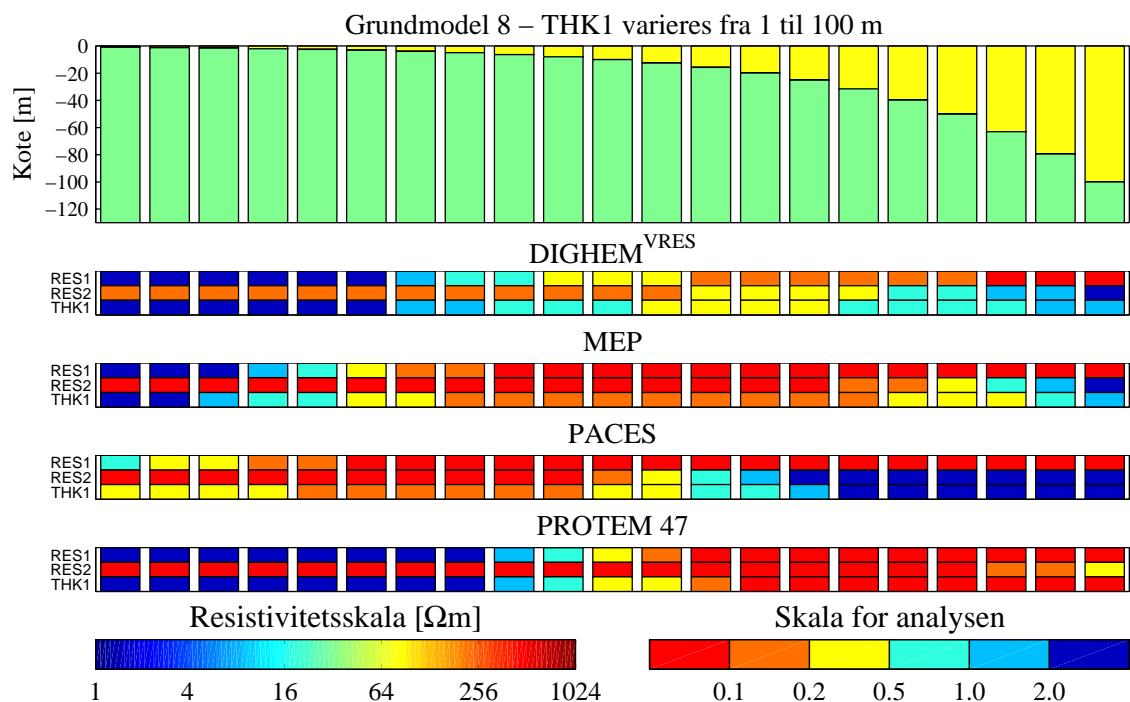
Figur A.8. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $70 \Omega\text{m}$ og $5 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 8 m) til godt bestemt (større end 12 m), når dette er tykt. Resistiviteten af andet lag er generelt godt bestemt (mindre end 25–35 m). Tykkelsen af første lag er generelt godt bestemt (større end 3–5 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større 2–3 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 40 m). Tykkelsen af første lag er generelt velbestemt til godt bestemt (større end 2–3 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 10 m). Første lags tykkelse er velbestemt til godt bestemt (mindre end 20 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 10 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt (større end 2–3 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



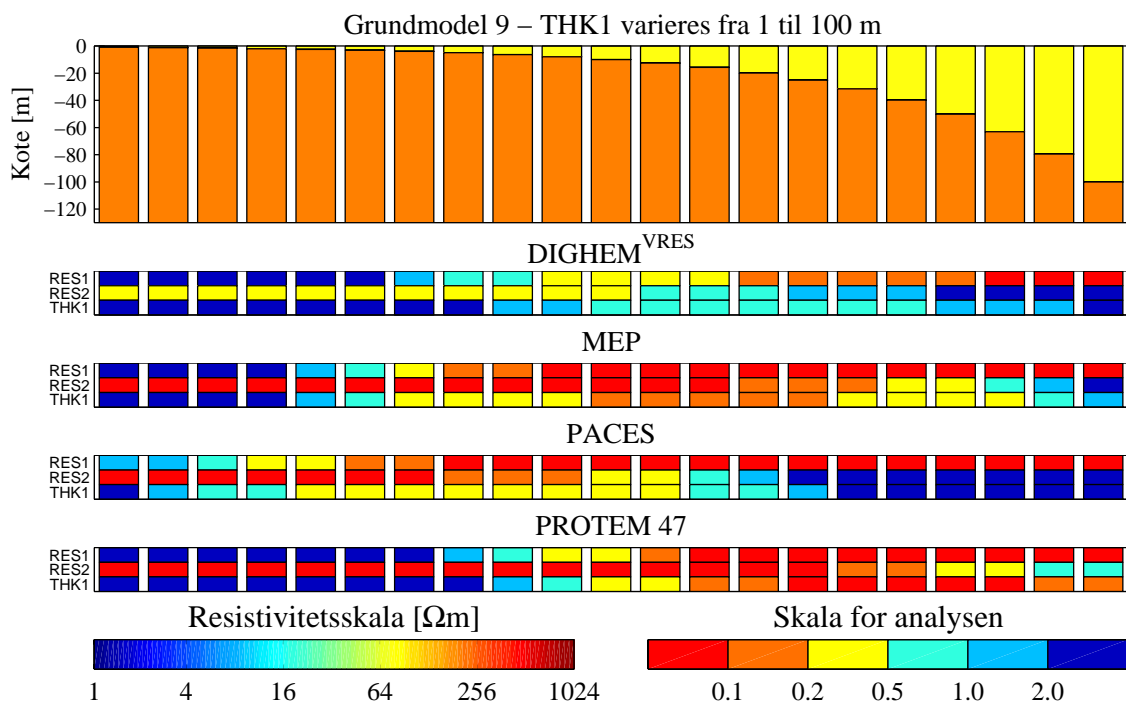
Figur A.9. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 30 Ωm . Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 8 m) til godt bestemt (større end 12 m). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 12 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 30 m). Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt (intervallet 10–25 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 3 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 40–50 m). Tykkelsen af første lag er generelt velbestemt til godt bestemt (intervallet 4–30 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er velbestemt til godt bestemt for alle model trin. Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 12 m). Første lags tykkelse er nogenlunde bestemt (mindre end 2 m) til godt bestemt (intervallet 3–10 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 10 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt (større end 10–12 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



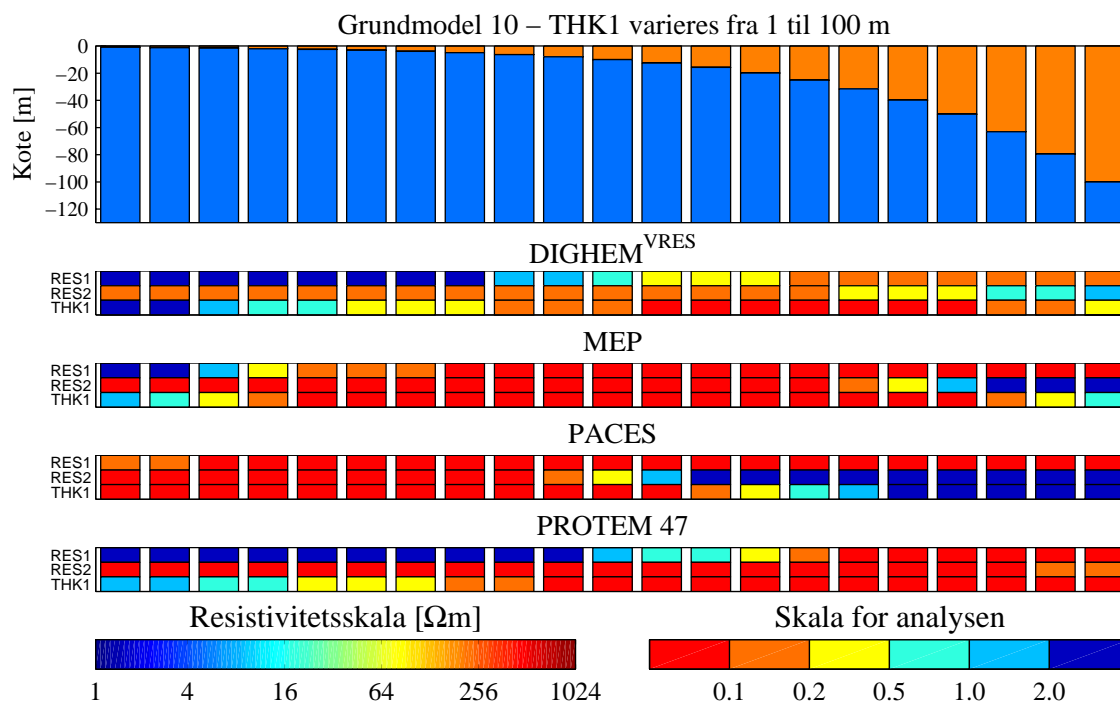
Figur A.10. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $70 \Omega\text{m}$ og $200 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 8 m) til godt bestemt (større end 20 m). Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt (mindre end 12 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 4 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 40–50 m). Tykkelsen af første lag er godt bestemt (intervallet 10–30 m) til nogenlunde bestemt (intervallet 5–60 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt (større end 2 – 3 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 10–12 m). Første lags tykkelse er nogenlunde bestemt (intervallet 3–12 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 8–10 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 50–60 m). Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt (større end 10–12 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



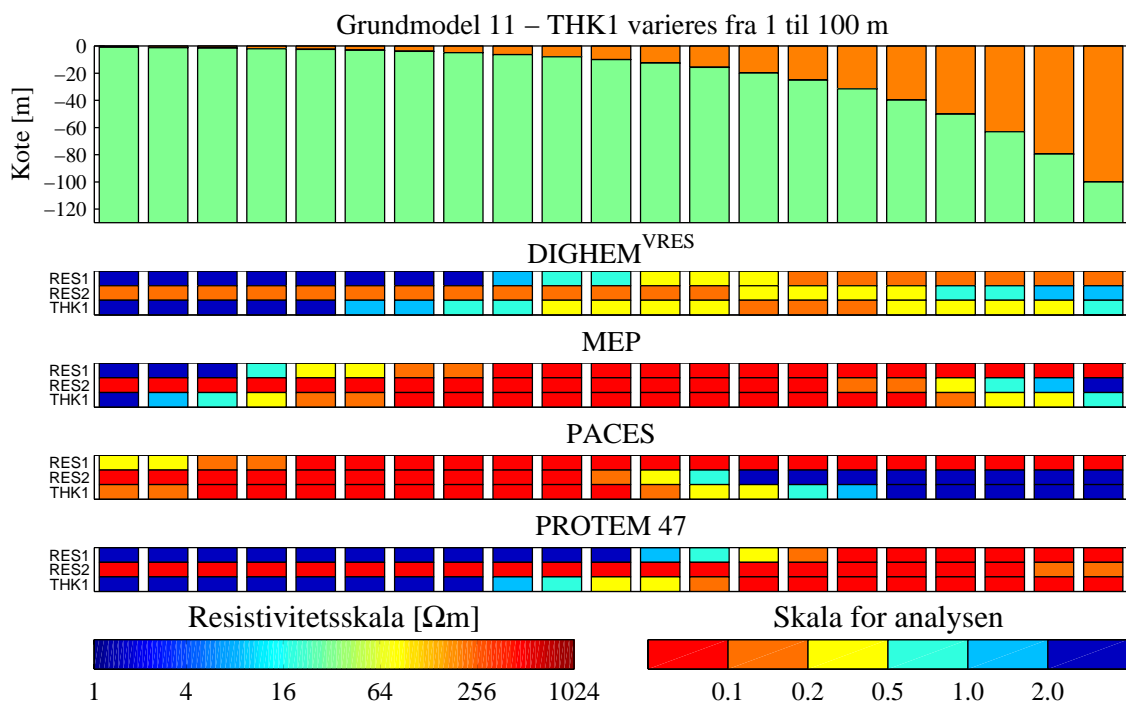
Figur A.11. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 5 Ωm . Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt (større end 15–20 m). Resistiviteten af andet lag er generelt godt bestemt (mindre end 30–40 m). Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt (større end 3 m) til godt bestemt (større end 6 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 2 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 40 m). Tykkelsen af første lag er generelt velbestemt til godt bestemt, hvis ikke laget er meget tyndt (mindre end 2 m) eller meget tykt (større end 60 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 10 m). Første lags tykkelse er velbestemt til godt bestemt (mindre end 20 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 20 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt i alle modeltrin. Tykkelsen af første lag er generelt godt til velbestemt (større end 3–4 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



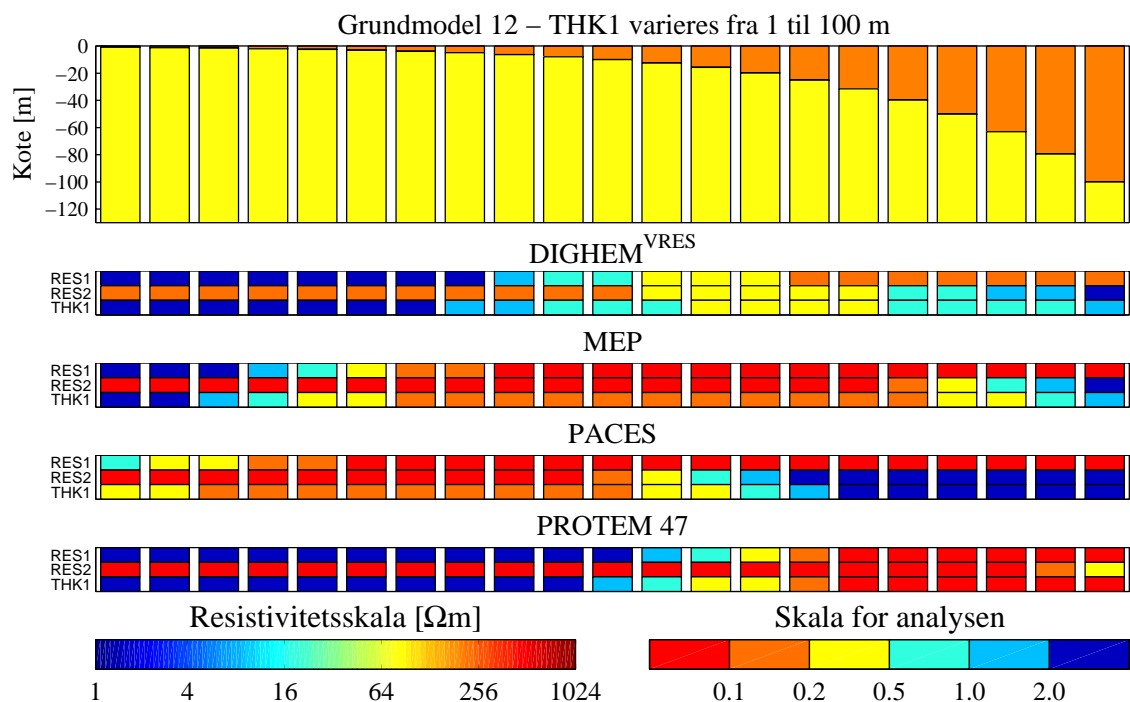
Figur A.12. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis $200 \Omega\text{m}$ og $30 \Omega\text{m}$. Første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 12–20 m) til godt bestemt (større end 20 m). Resistiviteten af andet lag er generelt godt bestemt (mindre end 20 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 40 m). Tykkelsen af første lag er generelt nogenlunde bestemt (intervallet 8–60 m) til godt bestemt (20–30 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er godt bestemt til velbestemt (større end 3–4 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 50 m). Tykkelsen af første lag er velbestemt til godt bestemt (intervallet 2–60 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin (på nær de første). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 12 m). Første lags tykkelse er velbestemt til godt bestemt (mindre end 15–20 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 20 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er generelt godt til velbestemt (større end 10–12 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



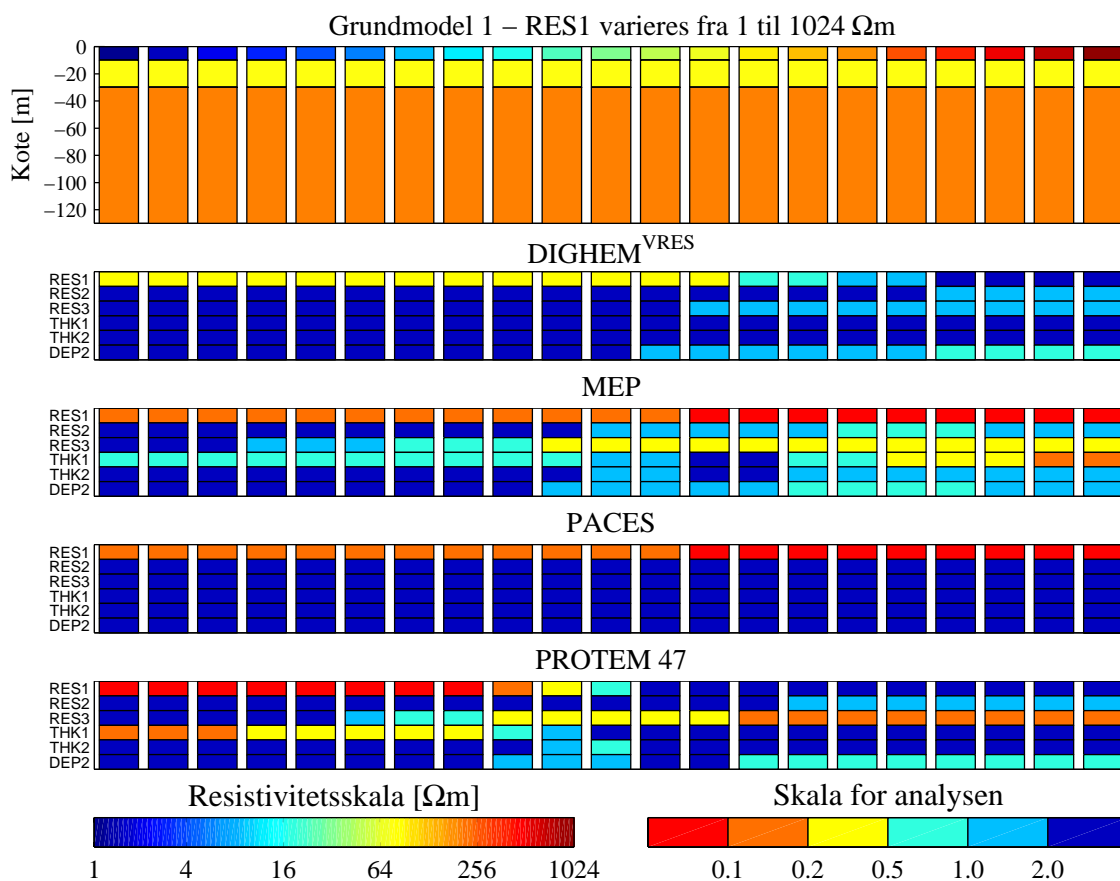
Figur A.13. Analyse af tolagsmodeller, hvor første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 70 Ωm . Første lags tykkelse varierer i 21 trin mellem 1 m og 100 m.

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt (større end 12 m) til godt bestemt (større end 20 m). Resistiviteten af andet lag er godt bestemt (mindre end 12 m) til nogenlunde bestemt (mindre end 30 m). Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt omkring en tykkelse på 15–30 m. Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt (større end 3–4 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 50 m). Tykkelsen af første lag er velbestemt til godt bestemt (større end 2–3 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt (større end 1.5 m). Resistiviteten af andet lag er velbestemt til godt bestemt (mindre end 12 m). Første lags tykkelse er generelt velbestemt til godt bestemt (mindre end 12–15 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt (større end 20 m). Resistiviteten af andet lag er generelt velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er generelt godt til velbestemt (større end 15–20 m). Ellers er resistiviteter og tykkelser generelt dårligt bestemte til ubestemte.



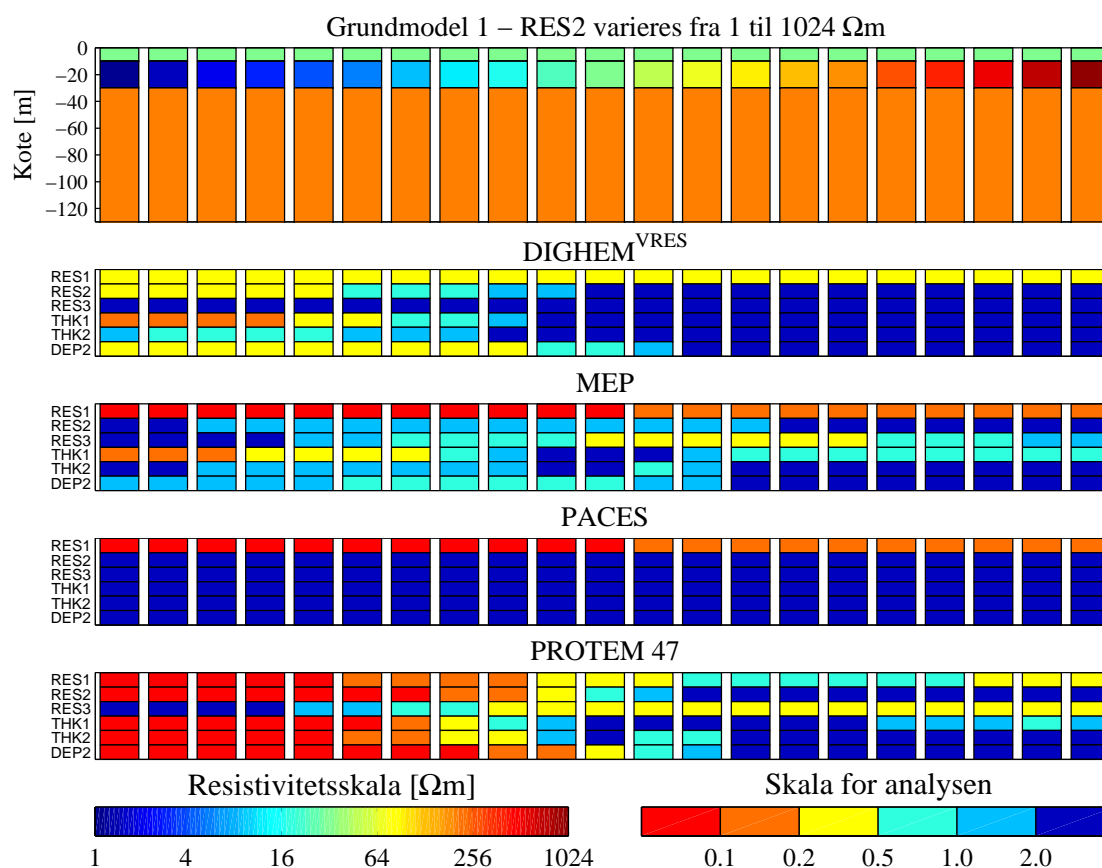
Figur A.14. Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor første lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, når denne er under 100 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte og ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle modeltrin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, når resistiviteten af første lag er over 100 Ωm . Tykkelsen af første lag er nogenlunde til godt bestemt, når resistiviteten af første lag er større end 200 Ωm . Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder dårligt bestemte til ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af første lag er mindre end 50–60 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde til godt bestemt, når resistiviteten af første lag er større end 50 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til nogenlunde bestemt, når første lags resistivitet er mindre end 50 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.



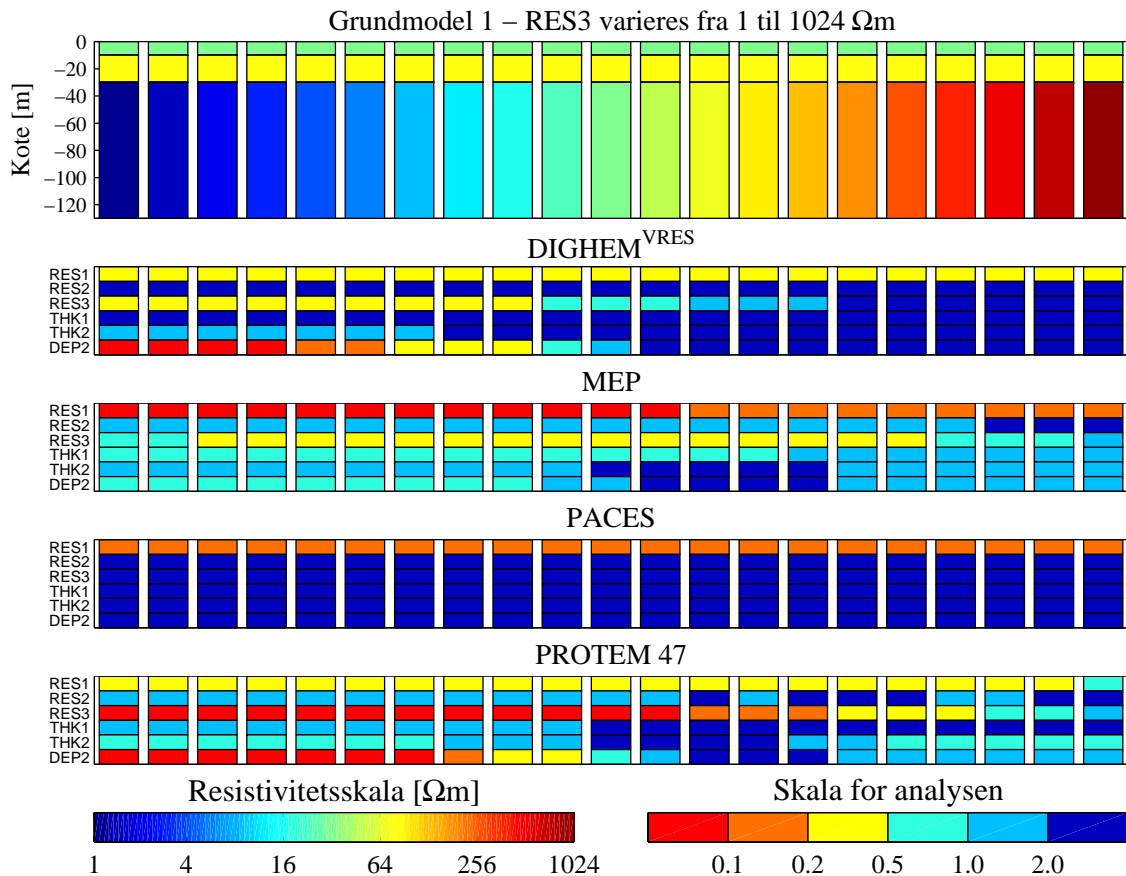
Figur A.15. Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor andet lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt i alle modeltrin. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 30 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 40 Ωm . Dybden til tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er 50–60 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle modeltrin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er 50–200 Ωm . Tykkelsen af første lag er nogenlunde til godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 100 Ωm . Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle modeltrin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første og andet lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 40–50 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er højere end 40–50 Ωm . Tykkelsen af første og andet lag og dybden til tredje lag er velbestemt til godt bestemt, hvis første lags resistivitet er mindre end 40–50 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.



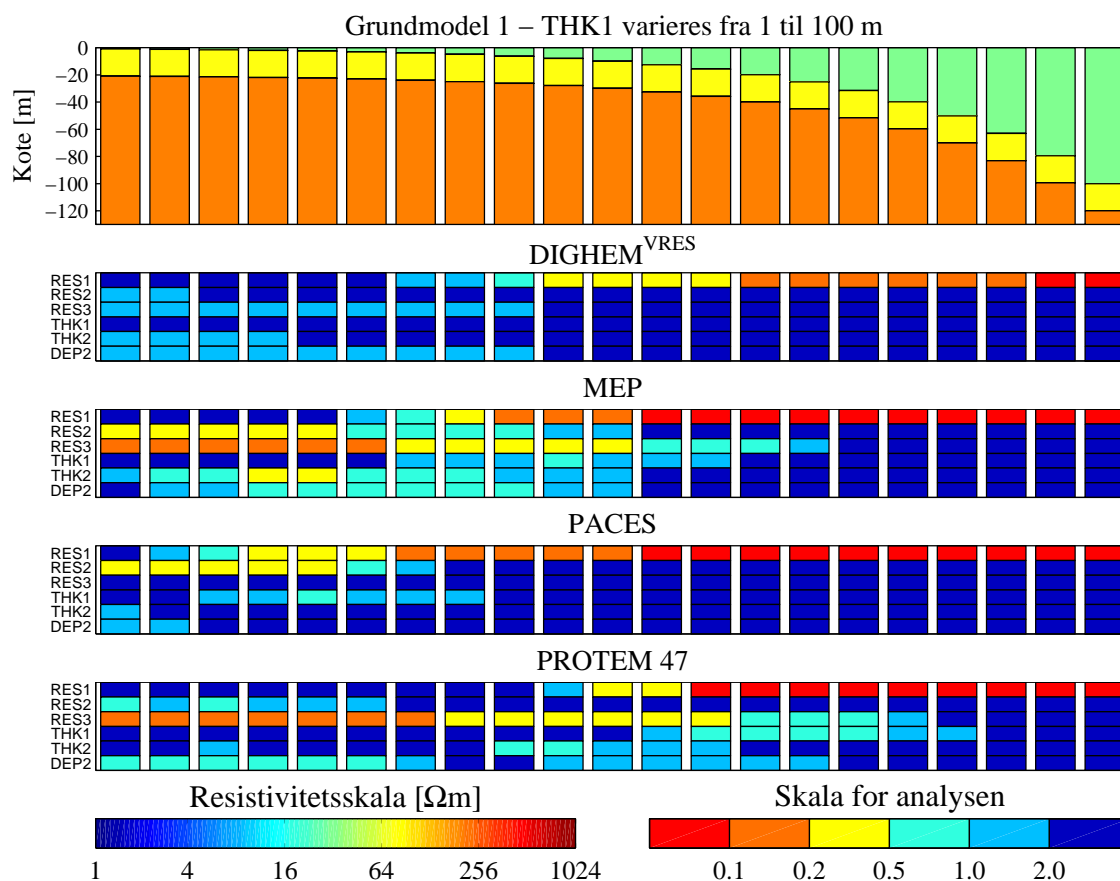
Figur A.16. Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor tredje lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 70 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt i alle modeltrin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er mindre end 40–50 Ωm . Dybden til tredje lag er velbestemt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er mindre end 50–60 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle modeltrin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er 20–500 Ωm . Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle modeltrin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt for alle resistiviteter af tredje lag. Resistiviteten af tredje lag er velbestemt til god bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er mindre end 200 Ωm . Dybden til tredje lag er velbestemt, hvis tredje lags resistivitet er mindre end 200 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemt.



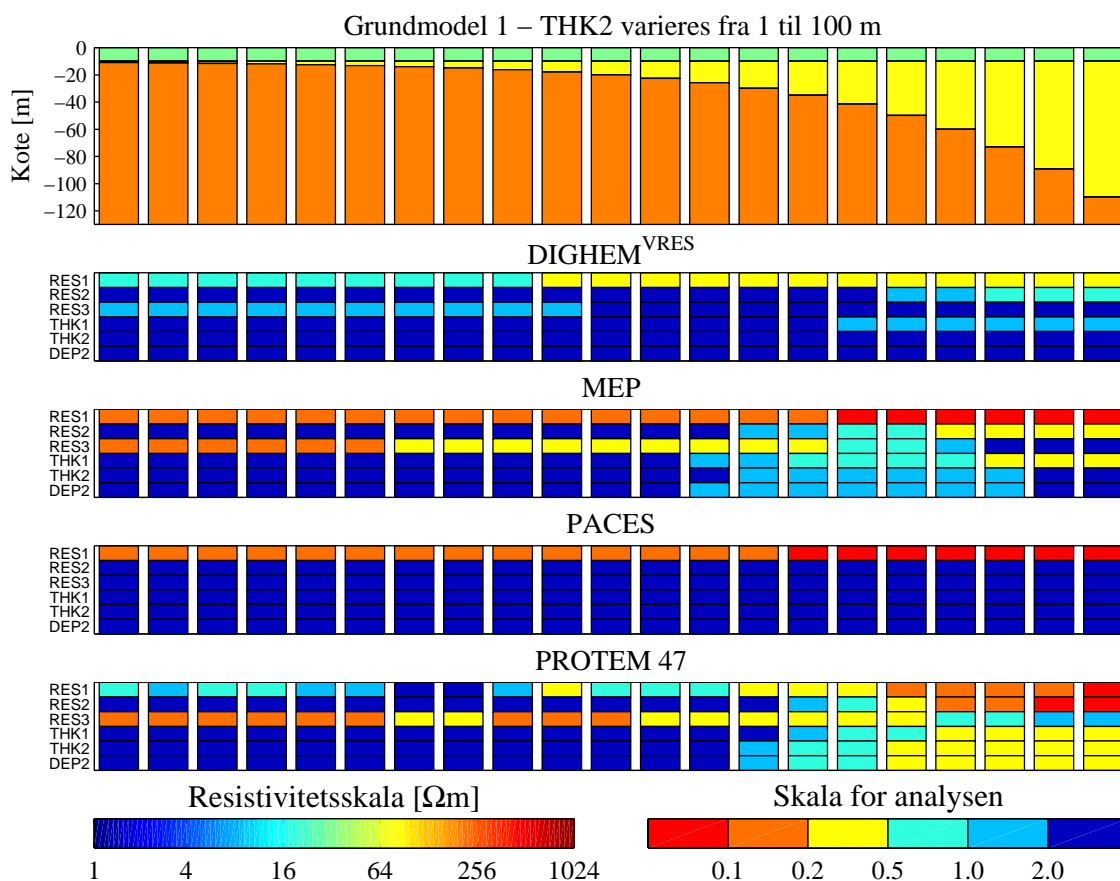
Figur A.17. Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Andet lags tykkelse fastholdes på 20 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 30 Ωm , 70 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt, hvis tykkelsen af første lag er større end 12–14 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt, hvis tykkelsen af første lag er større end 5–6 m. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, når tykkelsen af første lag er mindre end 2–3 m. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, når tykkelsen af første lag er mindre end 10–12 m. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt, hvis tykkelsen af første lag er større end 2–3 m. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 2–3 m. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt, hvis tykkelsen af første lag er større end 12–14 m. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 12–14 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.



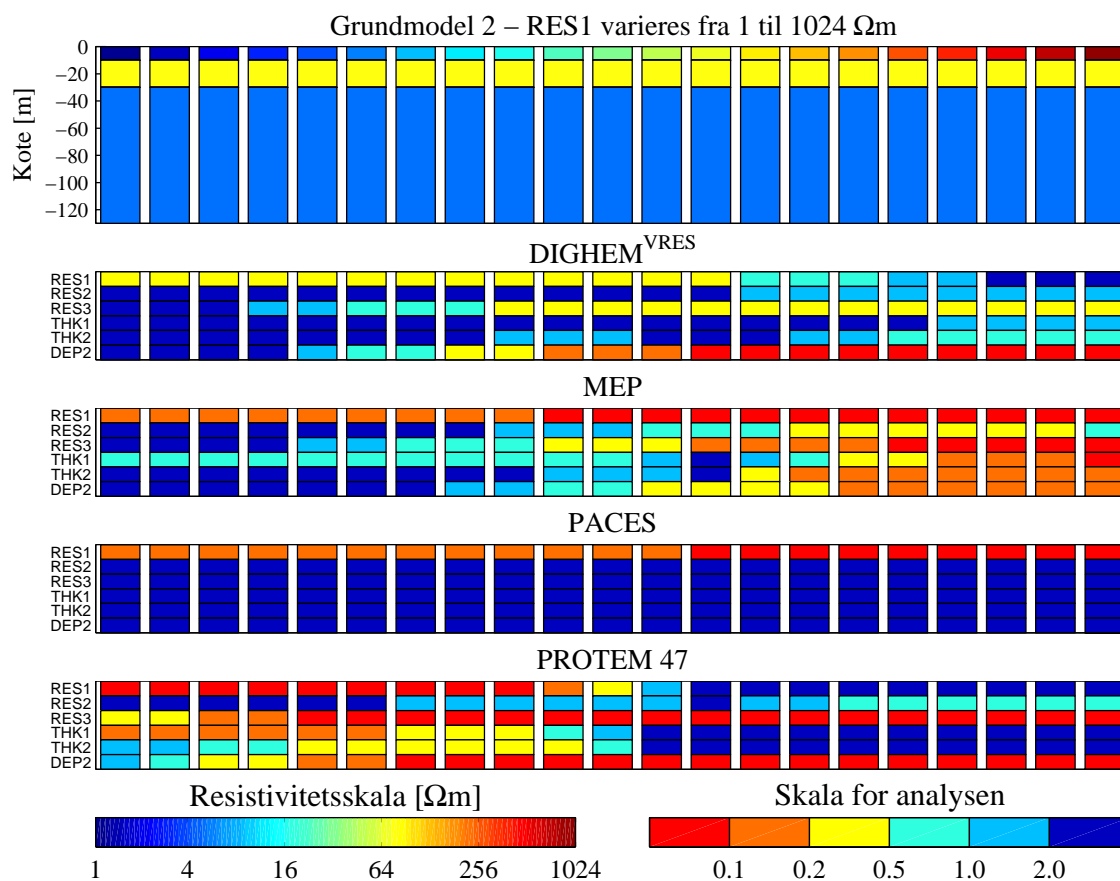
Figur A.18. Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor andet lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Første lags tykkelse fastholdes på 10 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 30 Ωm , 70 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 8 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er mindre end 20 m. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første og andet lag er godt bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 15–20 m. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 15–20 m. Tykkelsen af første og andet lag samt dybden til tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 15–20 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



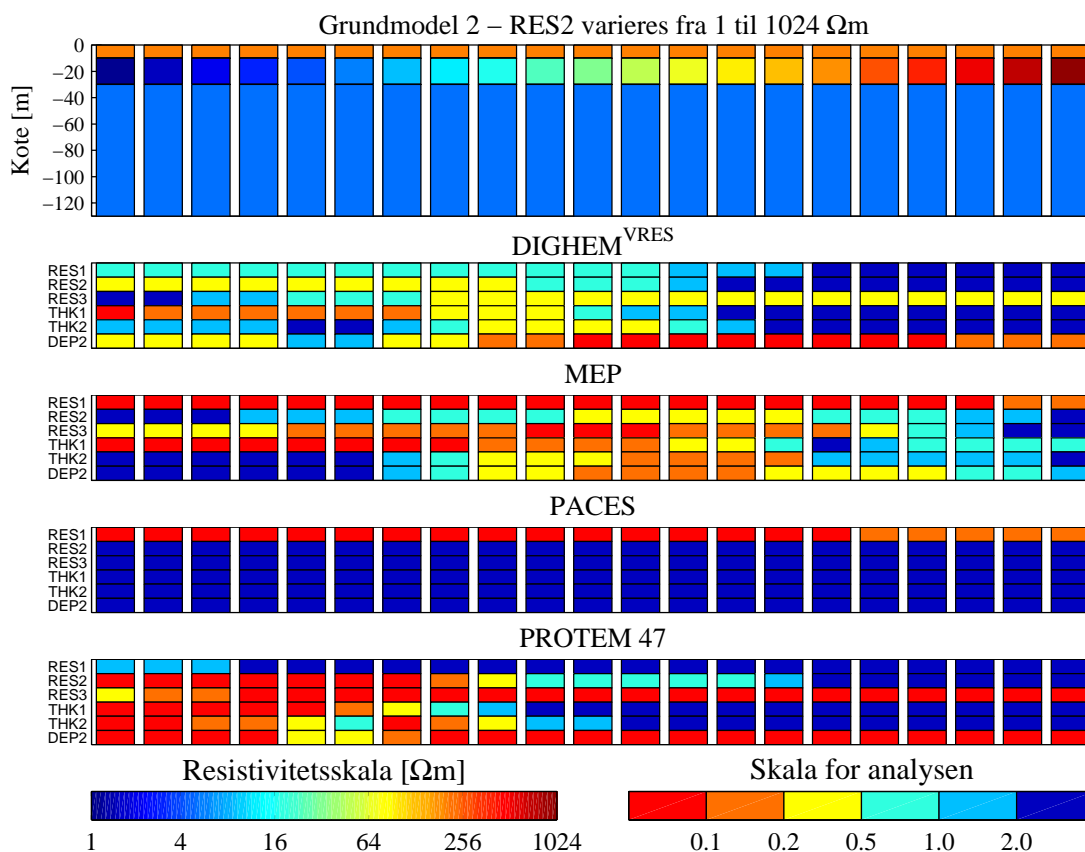
Figur A.19. Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor første lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 60–70 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 10–20 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 100 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er godt bestemt til velbestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 30–40 Ωm . Tykkelsen af første og andet lag samt dybden til tredje lag er generelt godt bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 60–80 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af første lag er mindre end 30–40 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til velbestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre 8–10 Ωm . Tykkelsen af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er mellem 4 til 20 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt godt til velbestemt i alle modeltrin. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



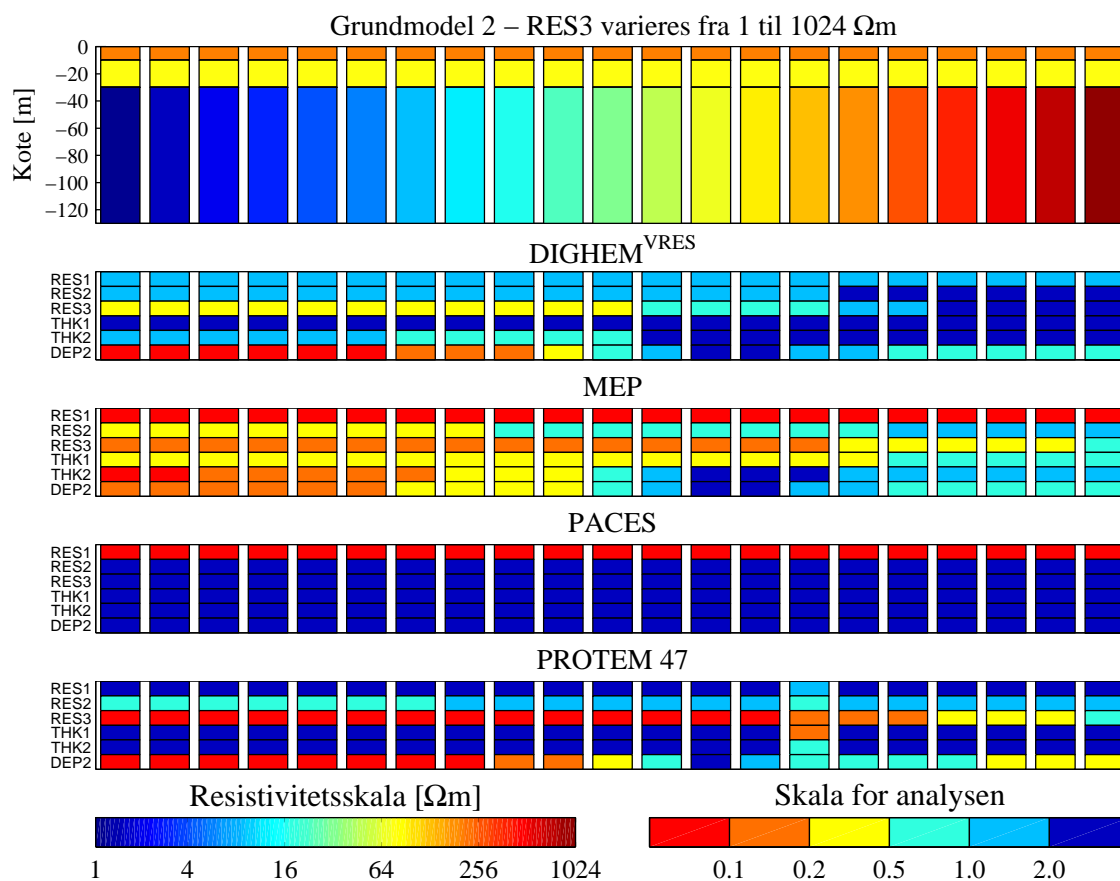
Figur A.20. Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor andet lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 15–20 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er større end 10–20 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre 20–30 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt nogenlunde bestemt for resistiviteter af andet lag mindre end 10–15 Ωm og derefter godt til velbestemt i resten af model trinnene. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde til godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 200–300 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt hvis resistiviteten af første lag er mindre end 80–100 Ωm . Tykkelsen af andet lag og dybden til tredje lag er nogenlunde til godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag ligger imellem 10–20 Ωm og 100–200 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af andet lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 15–20 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er godt til velbestemt i alle model trin. Tykkelsen af første og andet lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre 8–10 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt godt til velbestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



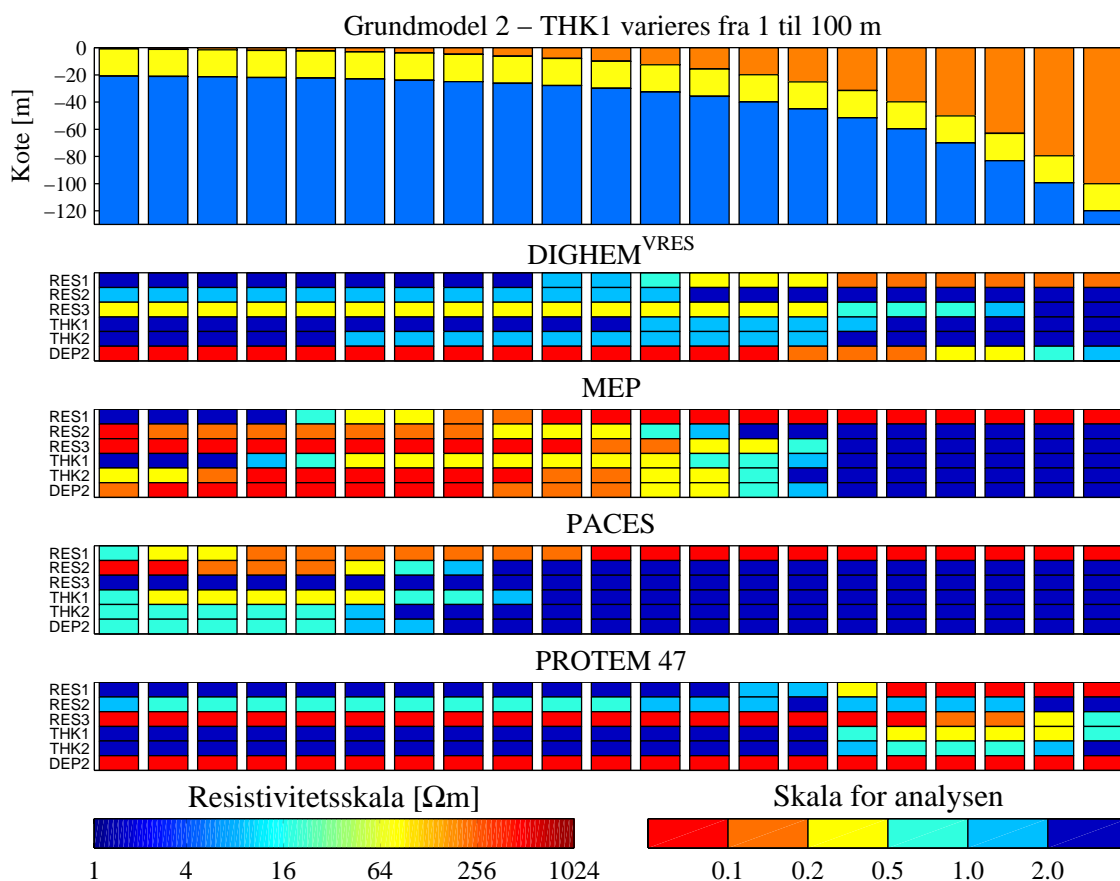
Figur A.21. Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor tredje lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 70 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er større end 30–40 Ωm . Dybden til tredje lag er velbestemt til godt bestemt for resistiviteter af laget mindre end 20–30 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er mindre end 8–10 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til nogenlunde bestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af første lag er mindre end 80–100 Ωm . Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er mindre end 100–200 Ωm . Tykkelsen af andet lag og dybden til tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tredje lags resistivitet er mindre end 8–10 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af tredje lag generelt er godt nogenlunde bestemt i alle model trin. Dybden til tredje lag er generelt godt til velbestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 10–15 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



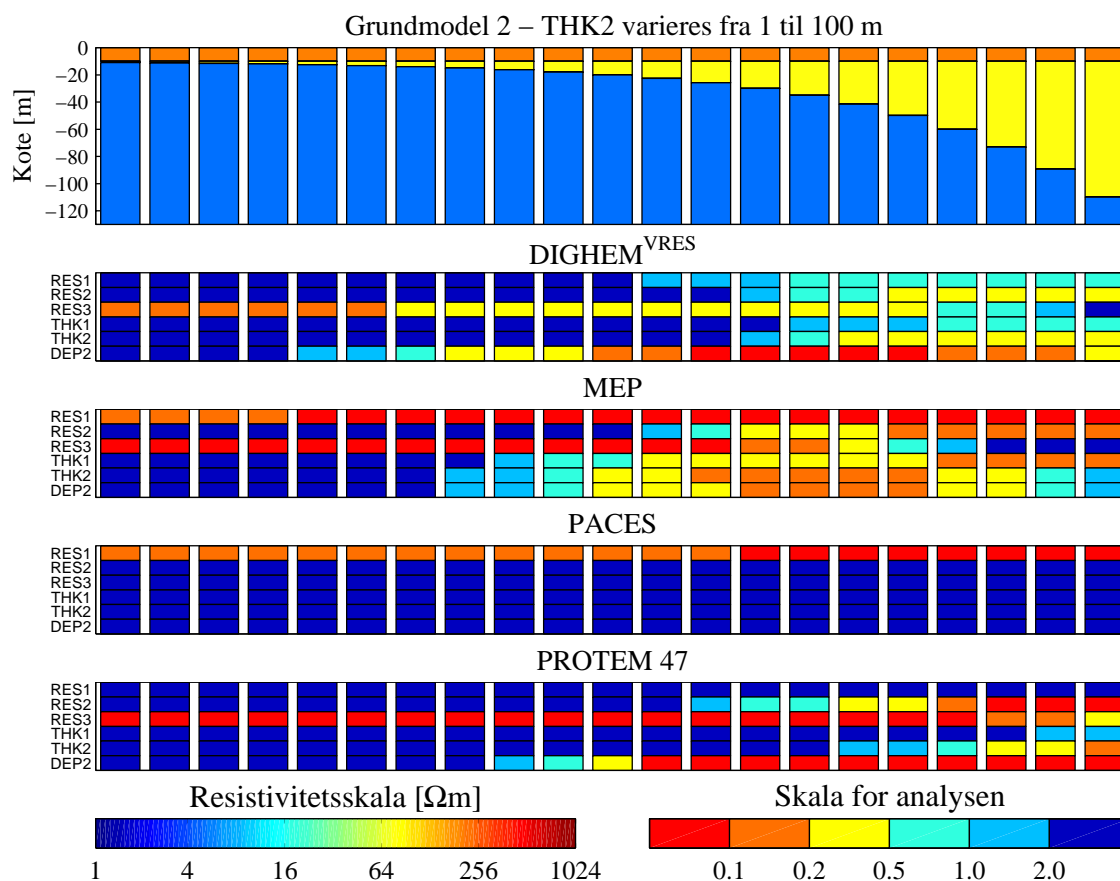
Figur A.22. Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Andet lags tykkelse fastholdes på 20 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm , 70 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde til godt bestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 12–14 m. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 20–30 m. Dybden til tredje lag er velbestemt til godt bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 30–40 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 2–3 m. Resistiviteten af andet og tredje lag er generelt godt til velbestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 10–12 m. Tykkelsen af første lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af laget ligger imellem 2–3 m og 10–12 m. Tykkelsen af andet lag og dybden til tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 10–12 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er godt bestemt for tykkelser af første lag under 2–3 m. Tykkelsen af første lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis laget er tyndere end 2–3 m. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 20–30 m. Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til velbestemt i alle model trin. Dybden til tredje lag er velbestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



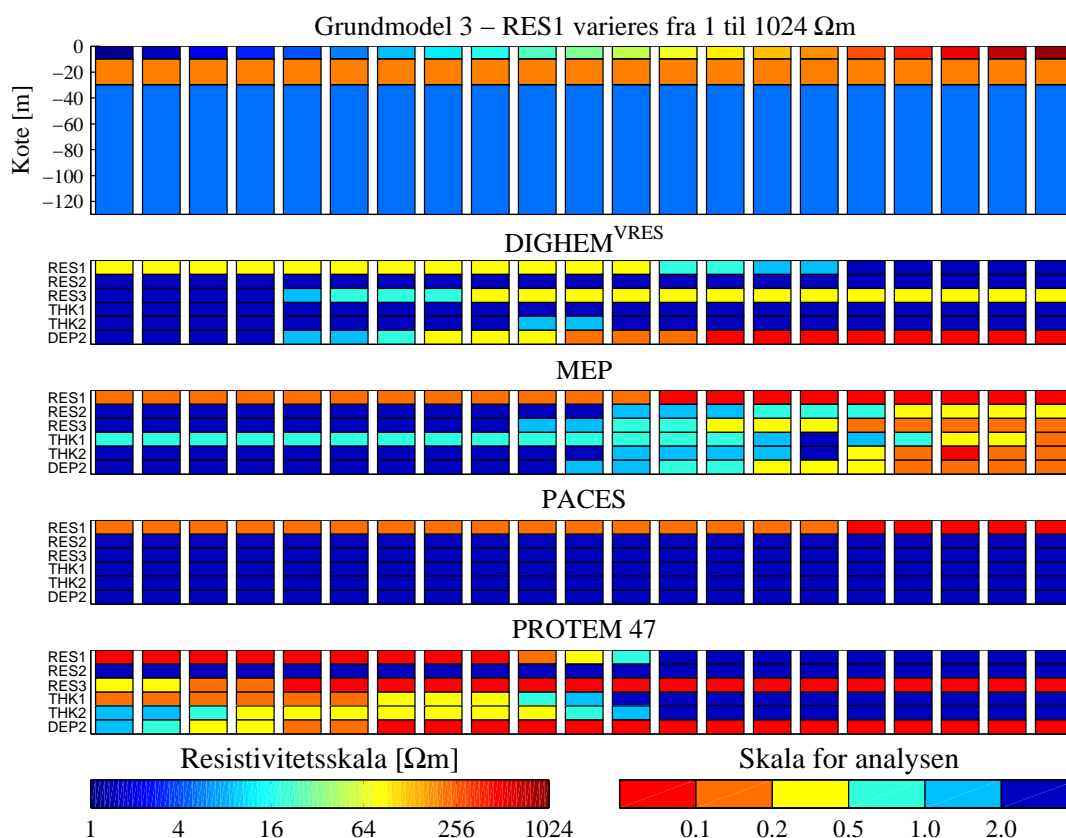
Figur A.23. Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor andet lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Første lags tykkelse fastholdes på 10 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm , 70 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 20–30 m. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 40–50 m. Tykkelsen af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis laget er tykkere end 30–40 meter. Dybden til tredje lag er generelt velbestemt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 3–4 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 20–30 m. Tykkelsen af første og andet lag samt dybden til tredje lag generelt er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 12–15 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag generelt er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af andet lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 20–30 m. Resistiviteten af tredje lag er godt til velbestemt i alle model trin. Dybden til tredje lag er velbestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 10 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



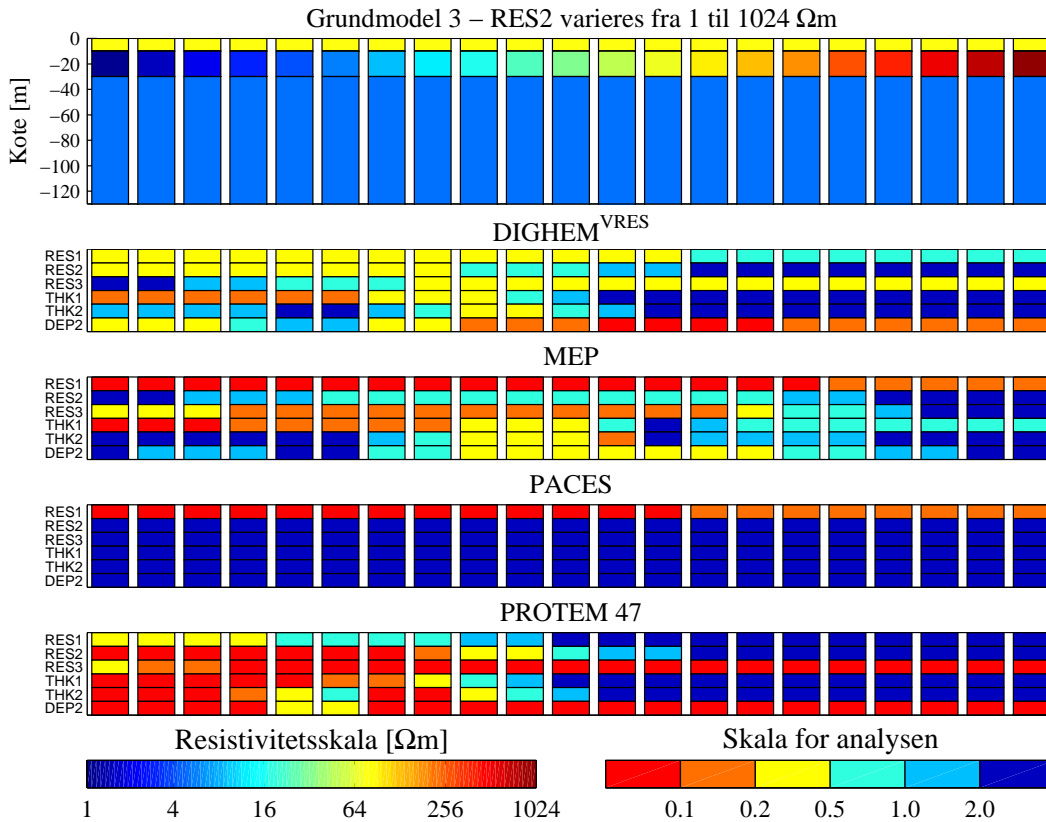
Figur A.24. Analyse af maksimumsmodellen, hvor første lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 200 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 40–50 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 15–20 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt velbestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 20–30 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 200–300 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 100 Ωm . Tykkelsen af første og andet lag samt dybden til tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 100–200 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 30–40 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt velbestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 10–15 Ωm . Tykkelsen af andet lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er mindre end 15–20 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt godt til velbestemt hvis resistiviteten af første lag er større end 2–4 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



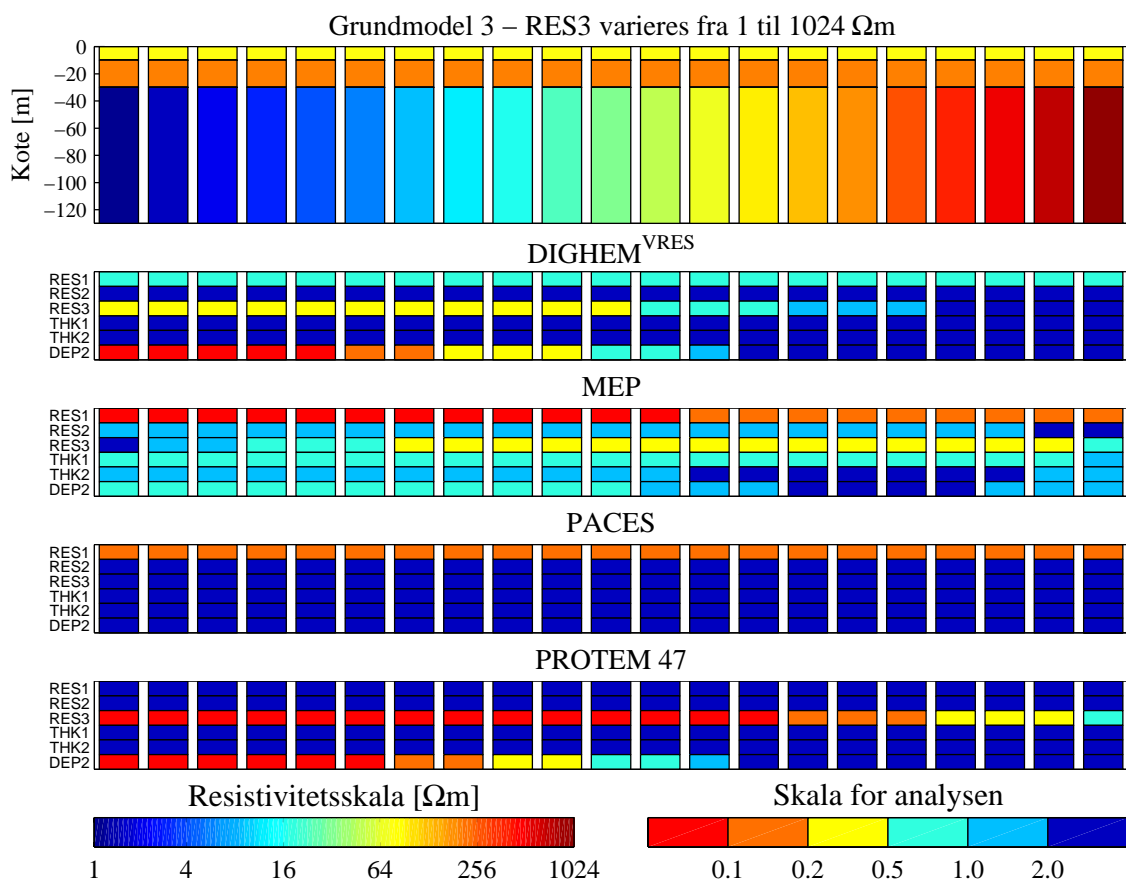
Figur A.25. Analyse af maksimumsmodellen, hvor andet lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 60–70 Ωm . Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis denne er større end 10–15 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 10–12 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 20–30 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er større end 15–20 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 200–300 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 100 Ωm . Tykkelsen af første lag er velbestemt til godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 10–15 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af andet lag er velbestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 15–20 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt velbestemt i alle model trin. Tykkelsen af første lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 10–15 Ωm . Tykkelsen af første og andet lag er generelt godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 15–20 Ωm . Dybden til tredje lag er generelt godt til velbestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



Figur A.26. Analyse af maksimumsmodellen, hvor tredje lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 200 Ωm .

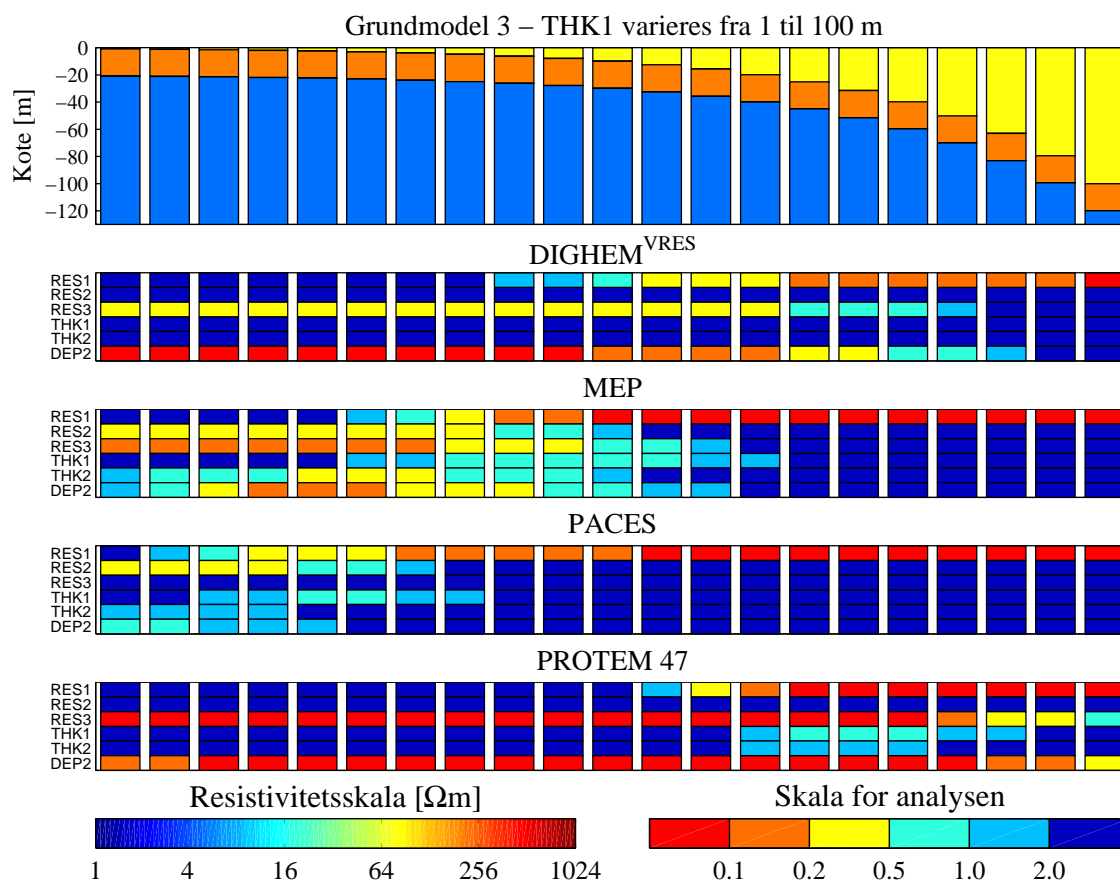
For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 30–35 Ωm . Dybden til tredje lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 10–15 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er større end 8–10 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af tredje lag generelt er velbestemt i alle model trin.

Dybden til tredje lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 10–15 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



Figur A.27. Analyse af maksimumsmodellen, hvor første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Andet lags tykkelse fastholdes på 20 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm , 200 Ωm og 5 Ωm .

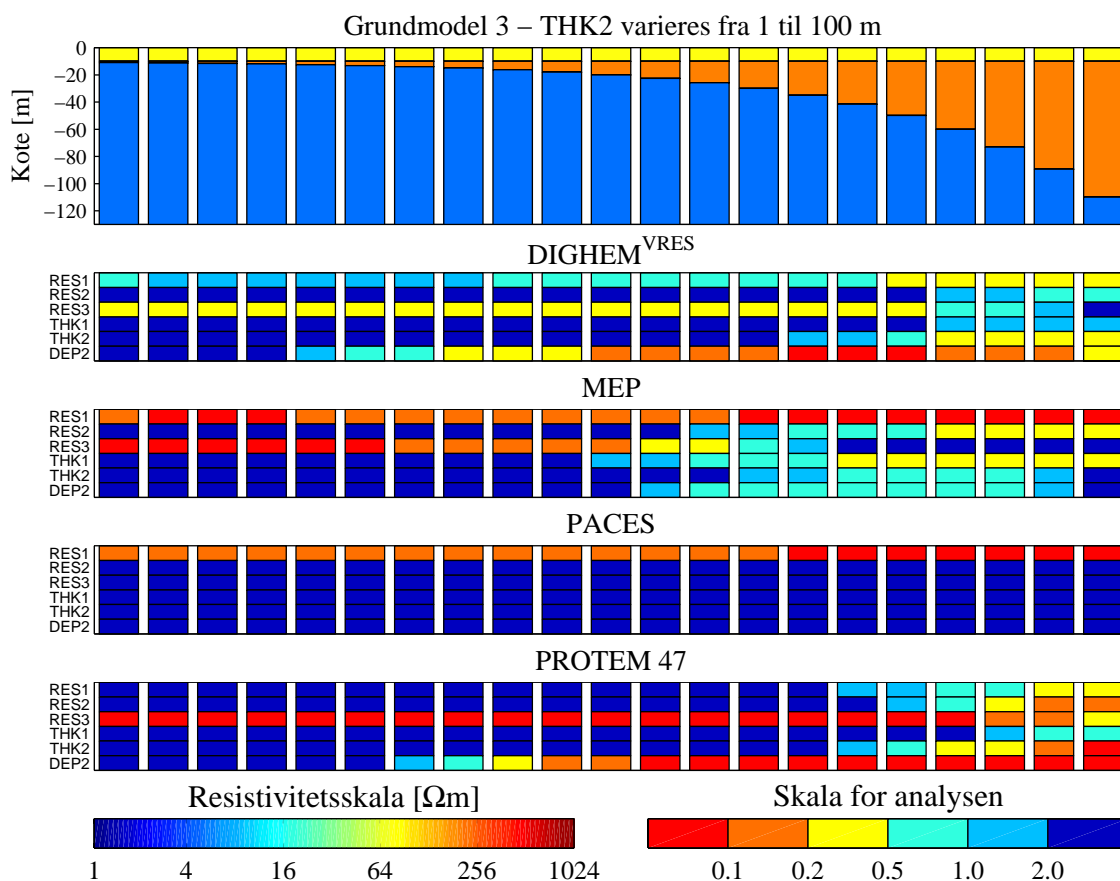
For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er godt bestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 15–20 m. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 15–20 m. Dybden til tredje lag er godt bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 15–20 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 3–4 m. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 3–4 m. Resistiviteten af tredje lag er generelt godt bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 4–5 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 2–3 m. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 12–15 m. Resistiviteten af tredje lag generelt er velbestemt i alle model trin.

Dybden til tredje lag er generelt velbestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



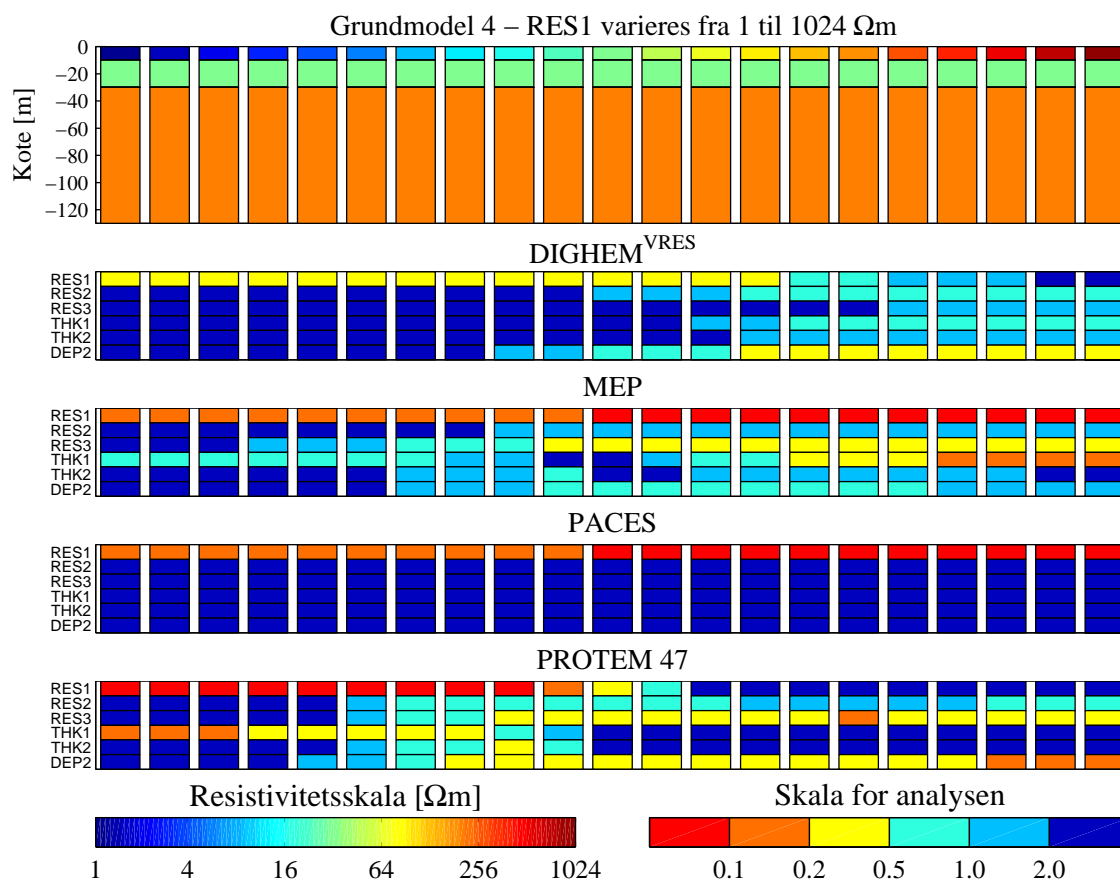
Figur A.28. Analyse af maksimumsmodellen, hvor andet lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Første lags tykkelse fastholdes på 10 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm , 200 Ωm og 5 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 30–40 m. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 30–40 m. Dybden til tredje lag er generelt godt bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 8–10 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er mindre end 3–4 m. Resistiviteten af tredje lag er generelt godt bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er mindre end 10–12 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af tredje lag er velbestemt i alle model trin. Dybden til tredje lag er velbestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 8–10 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



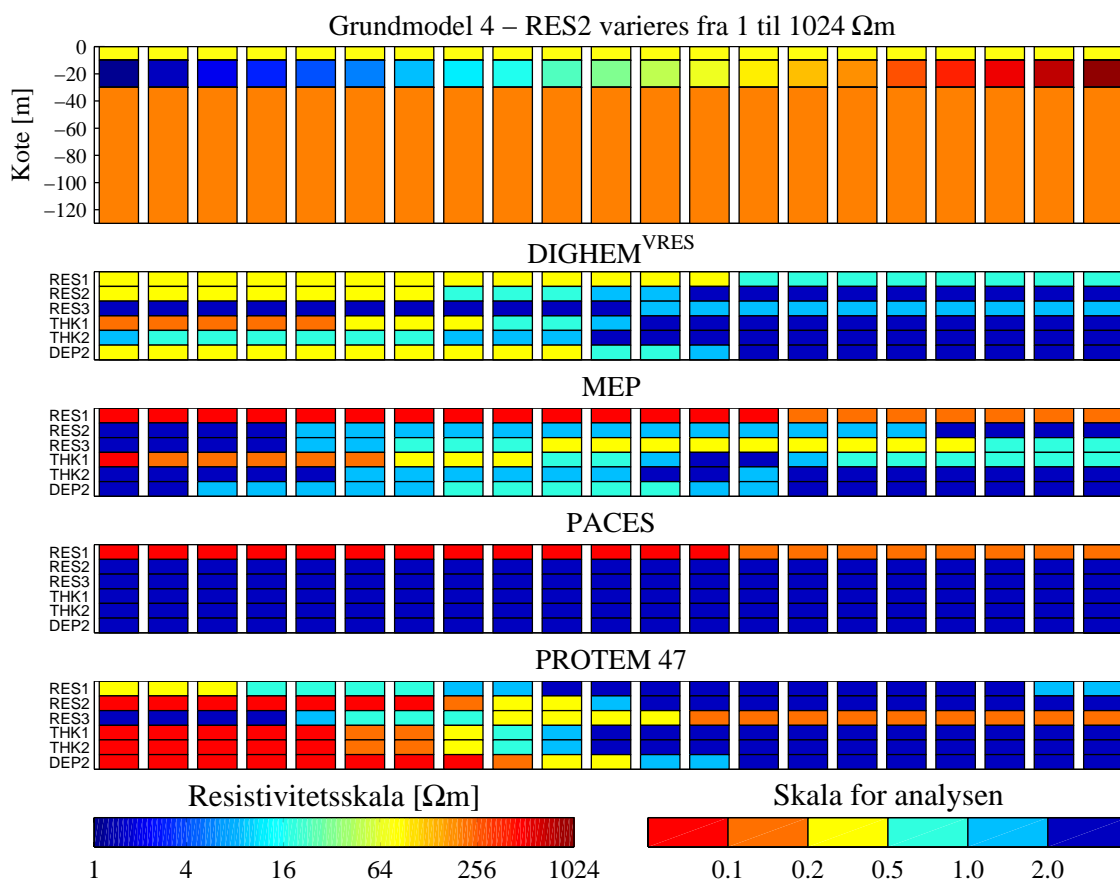
Figur A.29. Analyse af minimumsmodellen, hvor første lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 30 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 80–100 Ωm . Dybden til tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 70–80 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 20–25 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 150–200 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt, hvis denne er mindre end 30–35 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 10–12 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 10–15 Ωm . Dybden til tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af første lag er større end 8–10 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



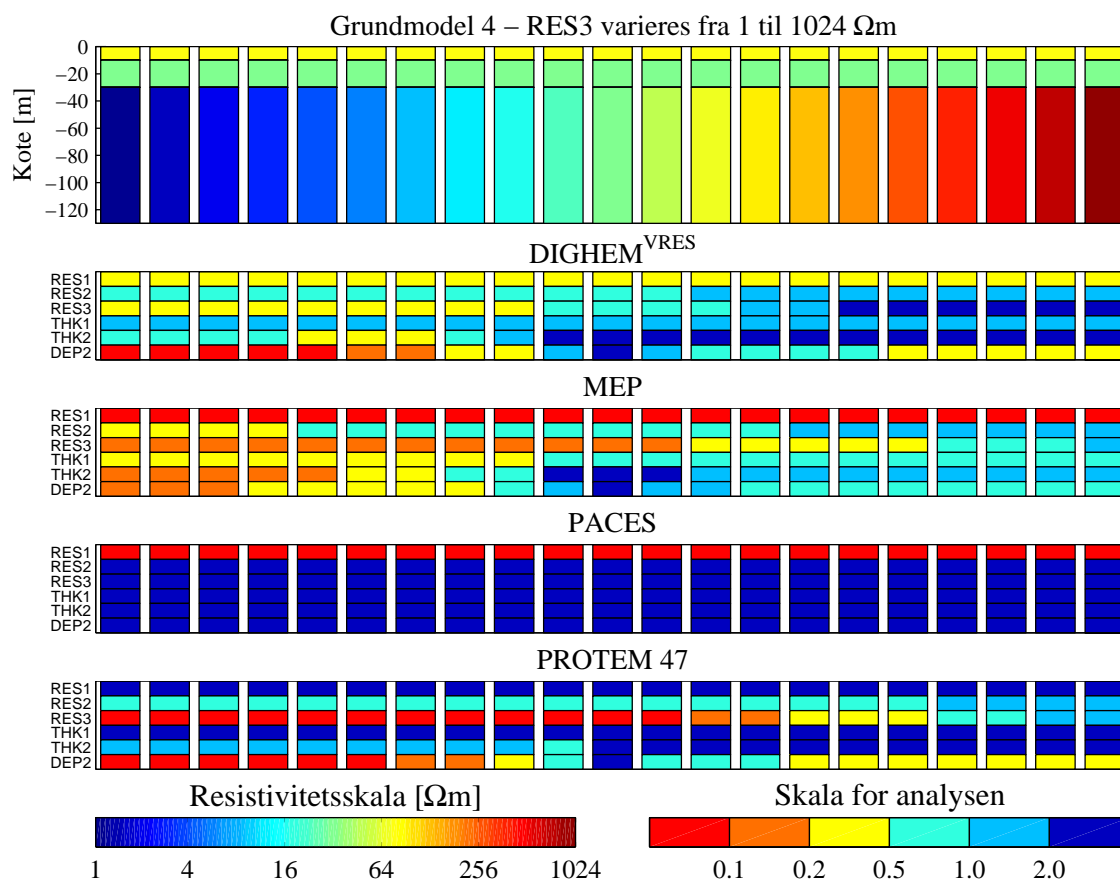
Figur A.30. Analyse af minimumsmodellen, hvor andet lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 60–80 Ωm . Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 8–10 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 8–10 m. Dybden til tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 20–25 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er større end 15–20 Ωm . Tykkelsen af første lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 10–15 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af andet lag er velbestemt, hvis lagets resistivitet er mindre end 20–25 Ωm . Resistiviteten af tredje lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af andet lag er større end 40–50 Ωm . Tykkelsen af første og andet lag samt dybden til tredje lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af andet lag er mindre end 10–20 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



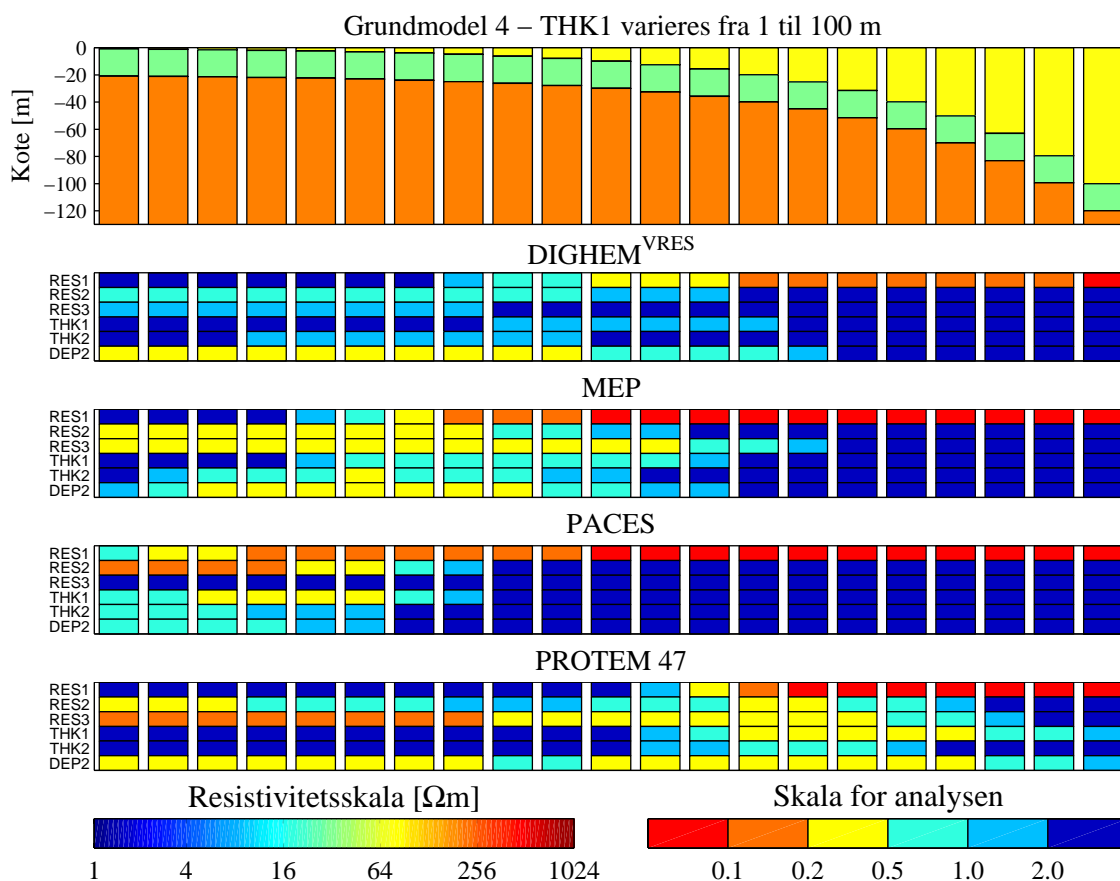
Figur A.31. Analyse af minimumsmodellen, hvor tredje lags resistivitet varieres i 21 trin mellem 1 Ωm og 1024 Ωm . Første og andet lags tykkelse fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m, og første og andet lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm og 30 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 20–25 Ωm . Dybden til tredje lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 20–25 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt i alle model trin. Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 50–60 Ωm . Tykkelsen af første og andet lag og dybden til tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis resistiviteten af tredje lag er mindre end 8–10 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af tredje lag er godt bestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 150–200 Ωm . Dybden til tredje lag er godt til velbestemt, hvis resistiviteten af laget er mindre end 20–25 Ωm . Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



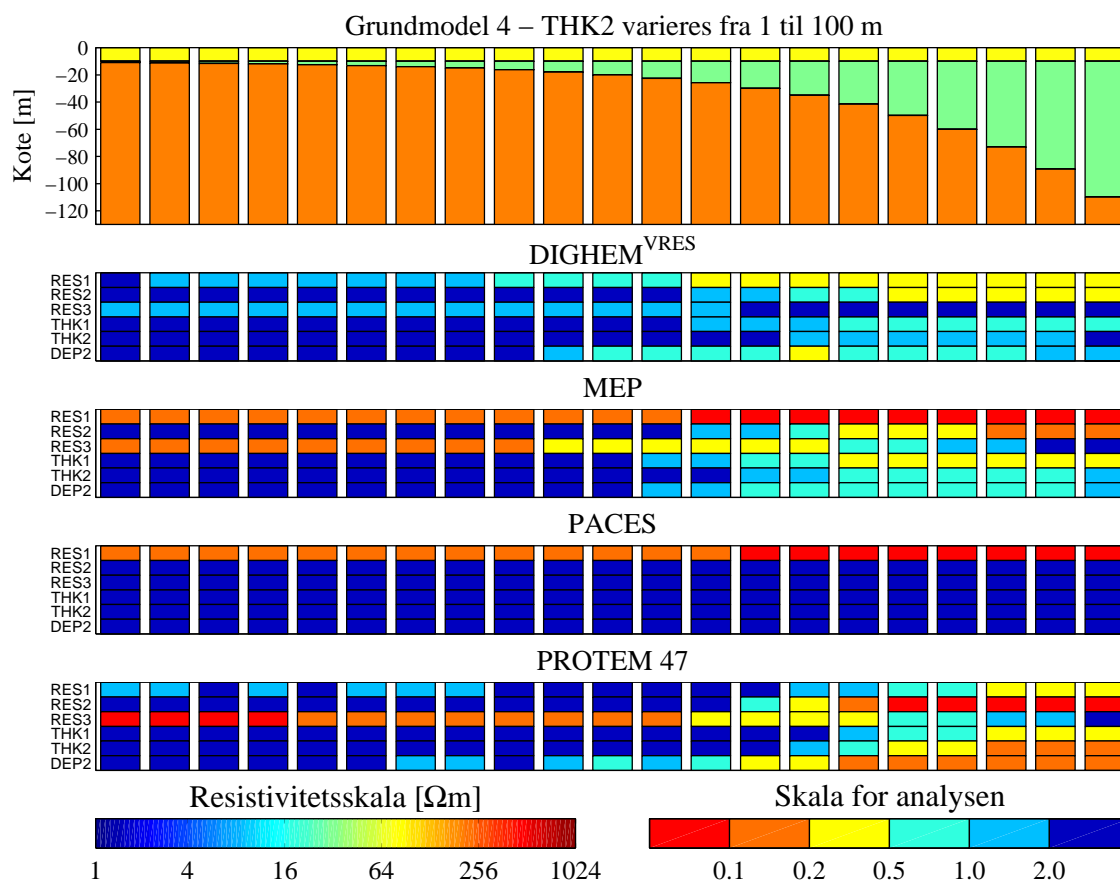
Figur A.32. Analyse af minimumsmodellen, hvor første lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Andet lags tykkelse fastholdes på 20 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm , 30 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen er større end 15–20 m. Dybden til tredje lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 8–10 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 6–8 m. Resistiviteten af andet og tredje lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 6–8 m. Dybden til tredje lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 6–8 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Resistiviteten af andet lag er godt bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 2–3 m. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af første lag velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 15–20 m. Resistiviteten af tredje lag er godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 20–30 m. Dybden til tredje lag er generelt nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af første lag er mindre end 60–80 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.



Figur A.33. Analyse af minimumsmodellen, hvor andet lags tykkelse varieres i 21 trin mellem 1 m og 100 m. Første lags tykkelse fastholdes på 10 m, og første, andet og tredje lags resistivitet fastholdes på henholdsvis 70 Ωm , 30 Ωm og 200 Ωm .

For DIGHEM^{VRES} systemet ses, at resistiviteten af første lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 15–20 m. Resistiviteten af andet lag er nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 30–40 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For MEP metoden ses, at resistiviteten af første lag er godt til velbestemt. Resistiviteten af tredje lag er generelt godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er mindre end 15–20 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

For PACES metoden ses, at resistiviteten af første lag er velbestemt til godt bestemt i alle model trin. Ellers er resistiviteterne, tykkelserne og dybder ubestemte. I denne sammenhæng skal man huske, at PACES metoden har en indtrængningsdybde på 20–25 m som er mindre end for de andre metoder.

For PROTEM 47 metoden ses, at resistiviteten af andet lag velbestemt, hvis tykkelsen af laget er større end 20–25 m. Resistiviteten af tredje lag er velbestemt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er mindre end 15–20 m. Tykkelsen af andet lag og dybden til tredje lag er generelt godt til nogenlunde bestemt, hvis tykkelsen af andet lag er større end 40–60 m. Ellers er resistiviteter, tykkelser og dybder generelt dårligt bestemte til ubestemte.

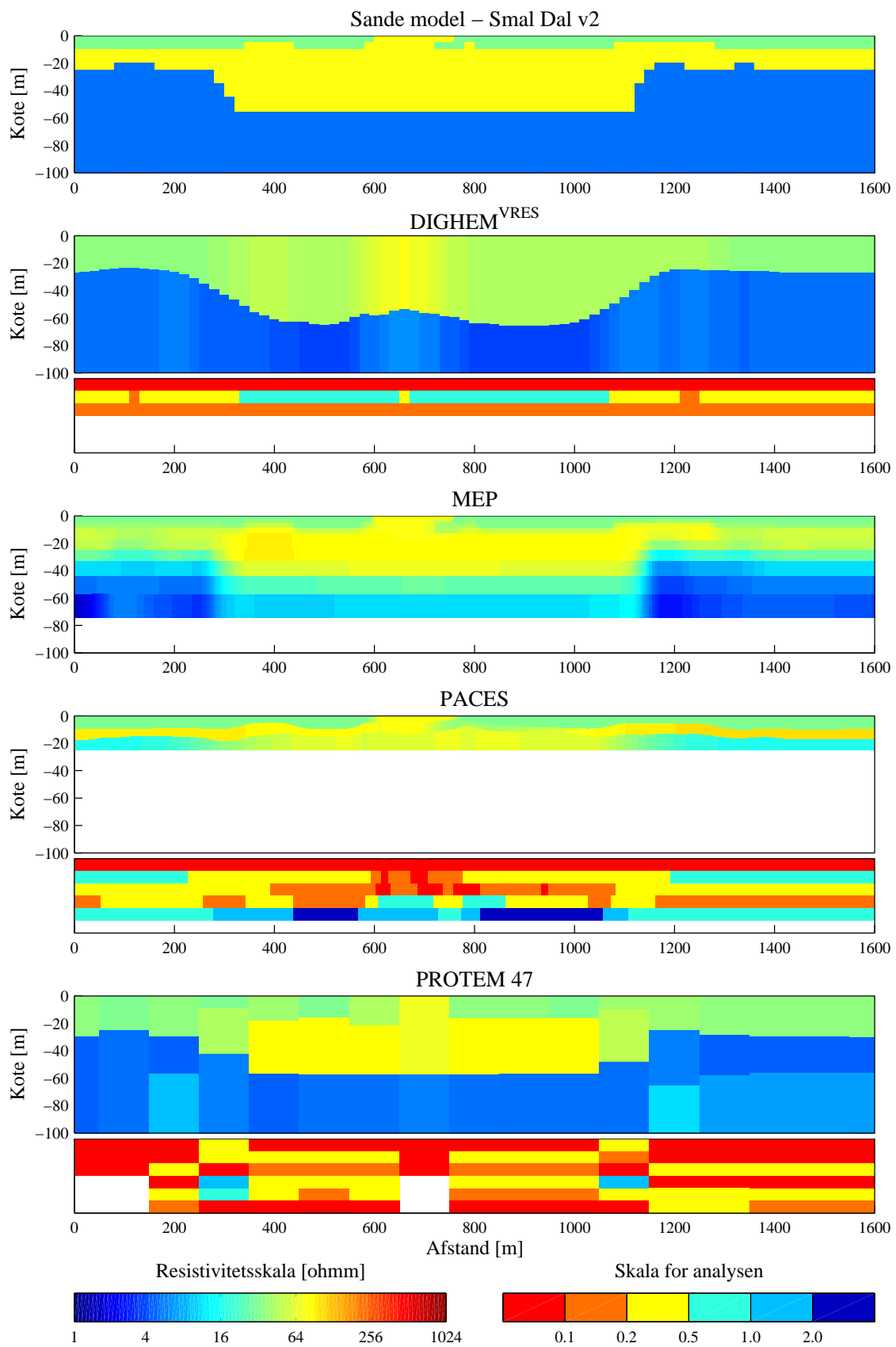
Appendiks B – Katalog over tolkninger af 2D modeller

Appendiks B indeholder tolkninger af de to gange fem 2D modeller med 1D modeller for DIGHEM og TEM systemet og 2D tolkninger af MEP systemet samt tolkninger af V2 modellerne med LCI modeller for PACES systemet. For hver model vises to figurer, dels en med fålagstolkninger, dels en med mangelagstolkninger, dog vises samme LCI modelsektion for PACES systemet på begge figurer. Der præsenteres i alt 20 figurer.

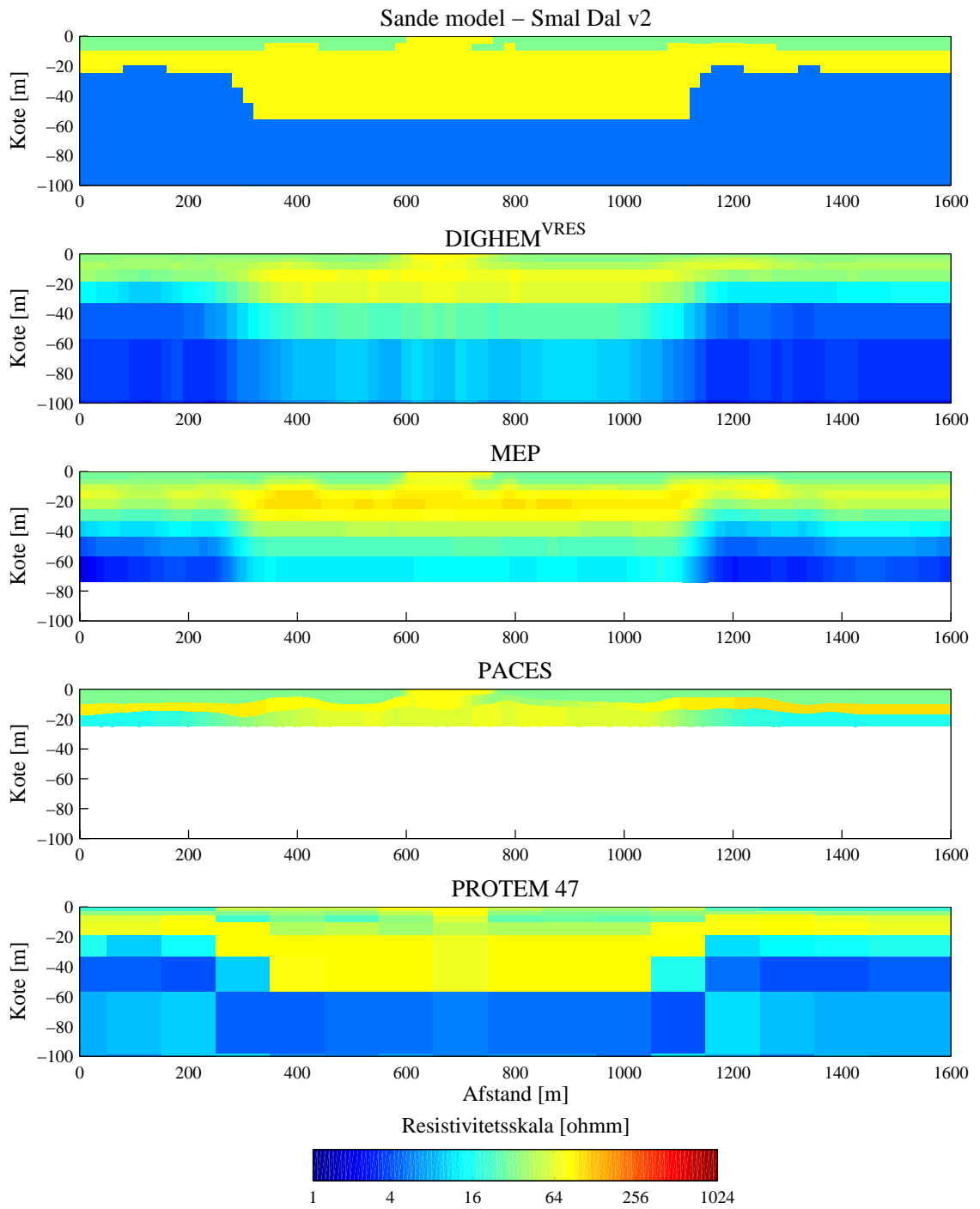
Det har været hensigtsmæssigt kun at medtage nogle få figurer i Kapitel 7 for at illustrere tolkningsmetoderne og for at forklare, hvorledes man læser plottene. Der henvises til Kapitel 7 for nærmere forklaring.

Nedenfor ses en tabel over indholdet af de enkelte figurer.

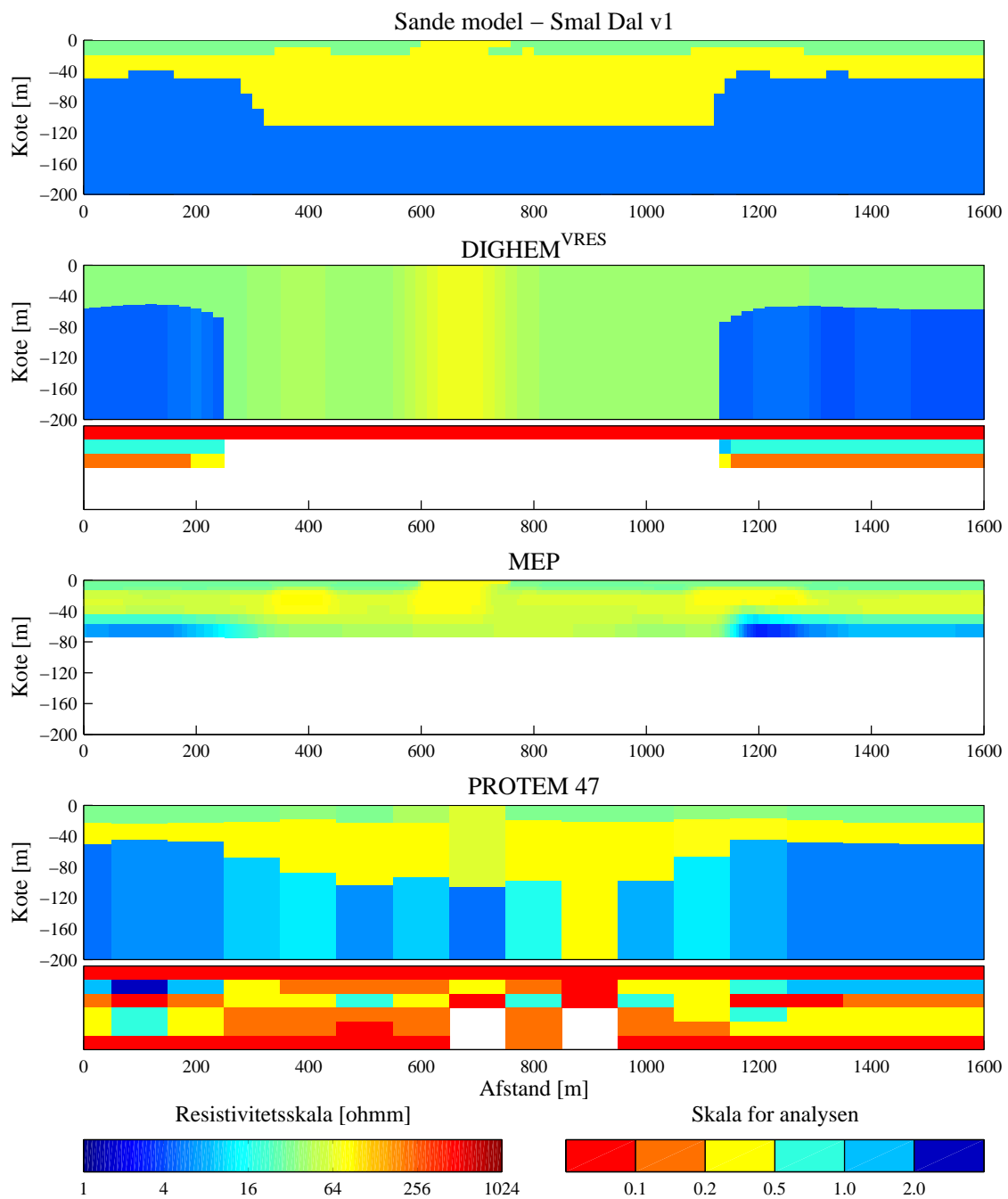
Figur B.1	Model Smal Dal – v2	Fålagstolkninger
Figur B.2	Model Smal Dal – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.3	Model Smal Dal – v1	Fålagstolkninger
Figur B.4	Model Smal Dal – v1	Mangelagstolkninger
Figur B.5	Model Moræne – v2	Fålagstolkninger
Figur B.6	Model Moræne – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.7	Model Moræne – v1	Fålagstolkninger
Figur B.8	Model Moræne – v1	Mangelagstolkninger
Figur B.9	Model Kalk – v2	Fålagstolkninger
Figur B.10	Model Kalk – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.11	Model Kalk – v1	Fålagstolkninger
Figur B.12	Model Kalk – v1	Mangelagstolkninger
Figur B.13	Model Salt – v2	Fålagstolkninger
Figur B.14	Model Salt – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.15	Model Salt – v1	Fålagstolkninger
Figur B.16	Model Salt – v1	Mangelagstolkninger
Figur B.17	Model Yoldia – v2	Fålagstolkninger
Figur B.18	Model Yoldia – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.19	Model Yoldia – v1	Fålagstolkninger
Figur B.20	Model Yoldia – v1	Mangelagstolkninger



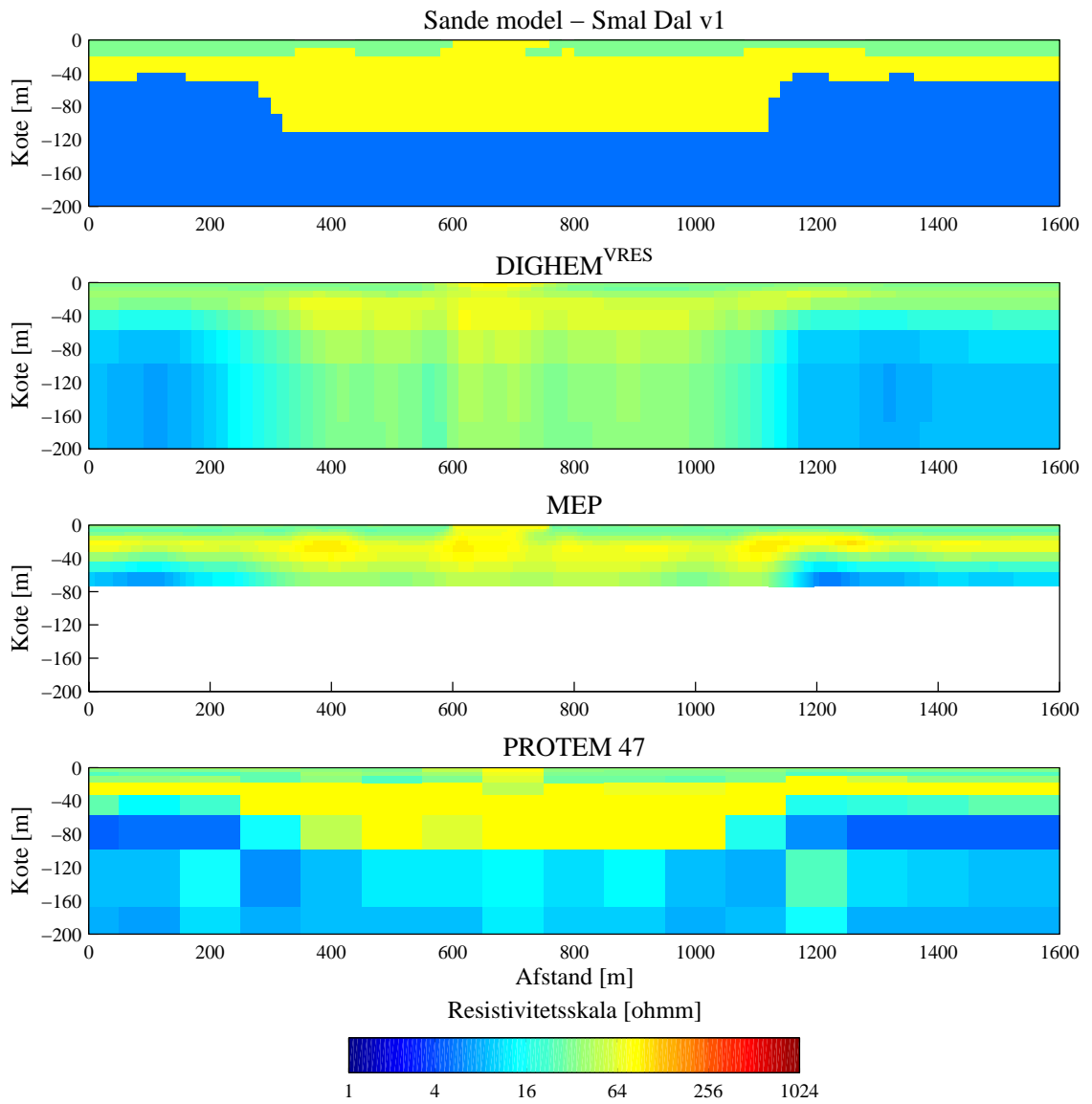
Figur B.1. Model Smal Dal – v2. Fålagstolkninger



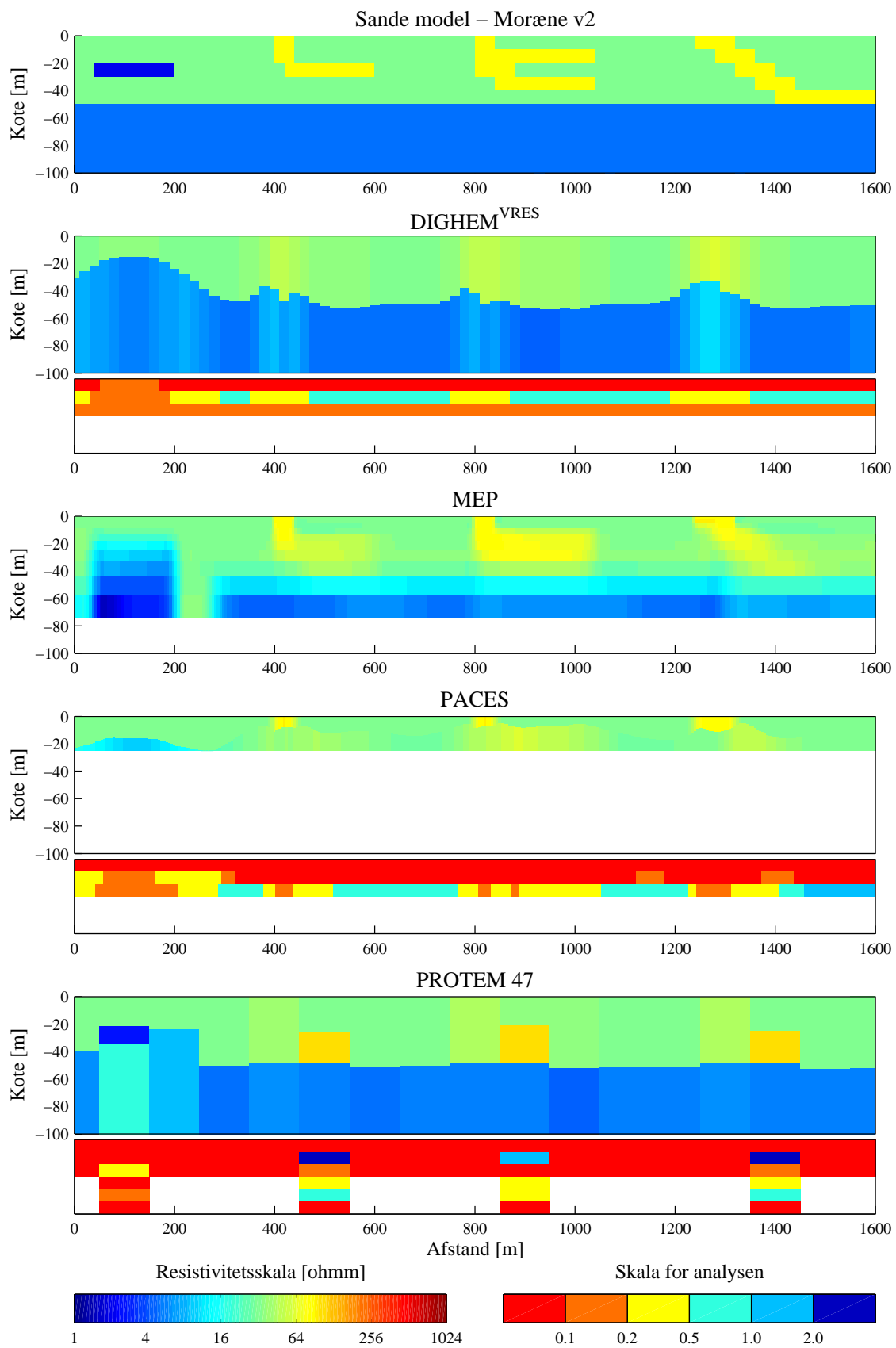
Figur B.2. Model Smal Dal – v2. Mangelaystolkninger



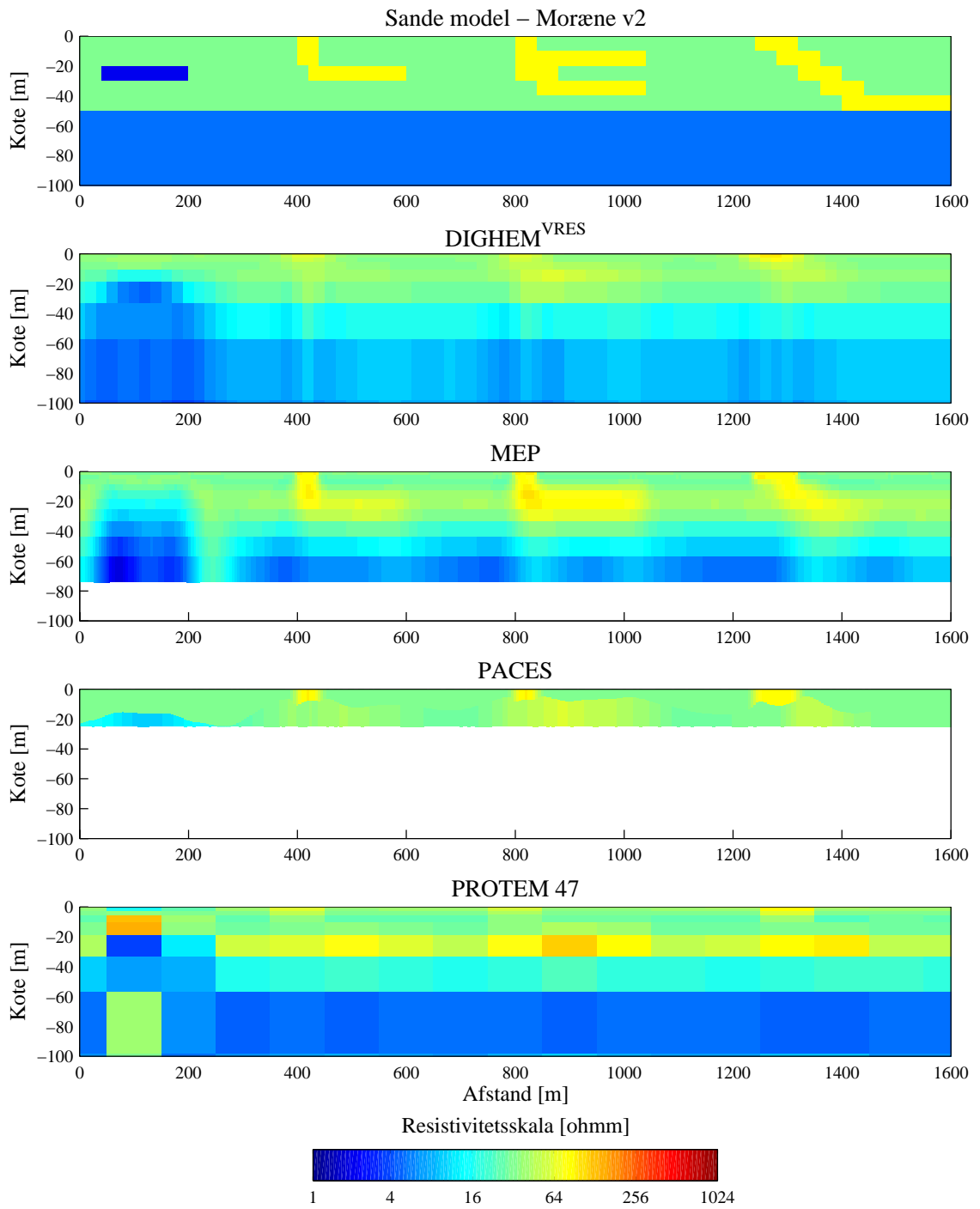
Figur B.3. Model Smal Dal – v1. Fålagstolkninger



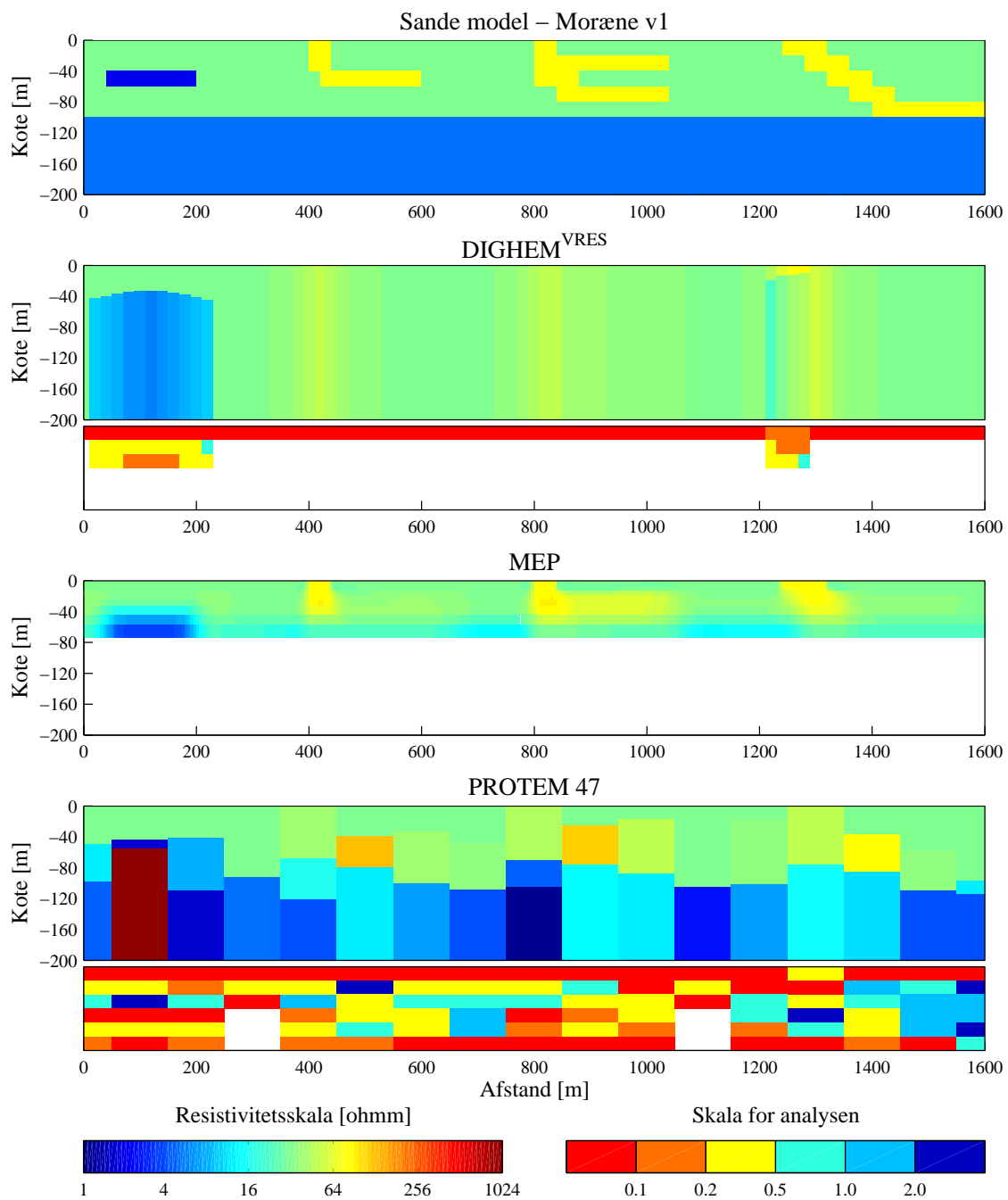
Figur B.4. Model Smal Dal – v1. Mangelaystolkninger.



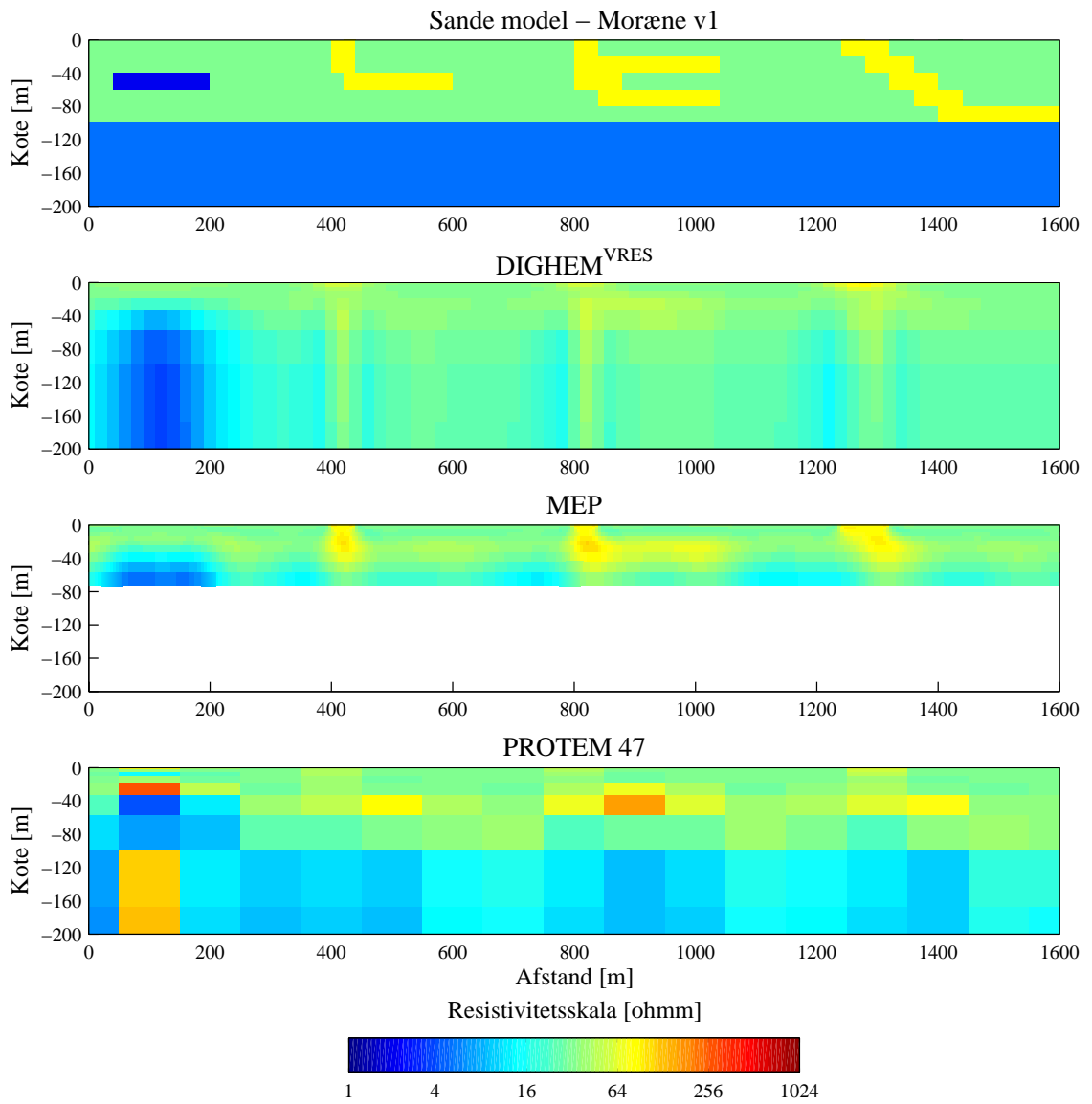
Figur B.5. Model Moræne – v2. Fålagstolkninger



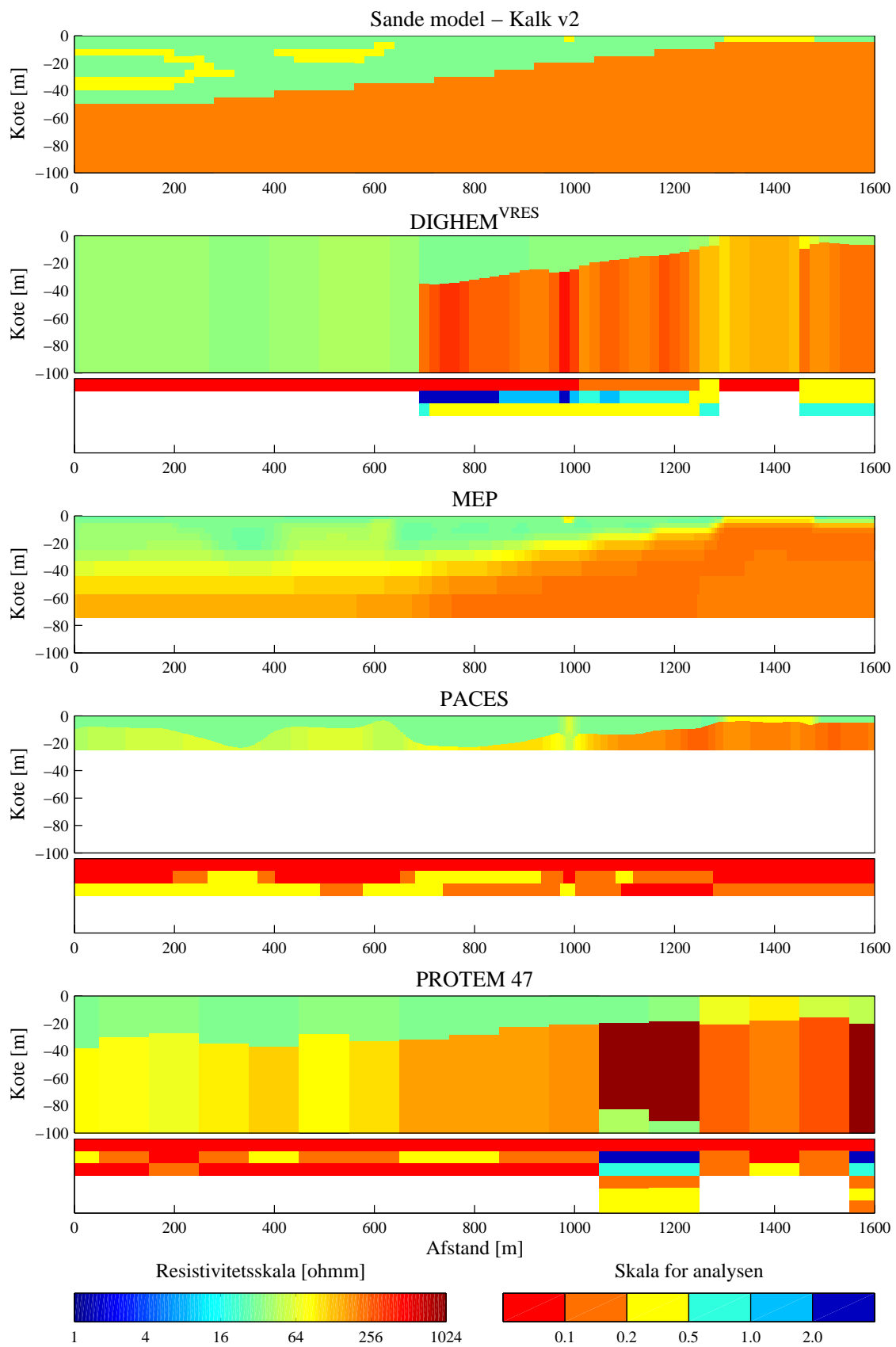
Figur B.6. Model Moræne – v2. Mangelagstolkninger.



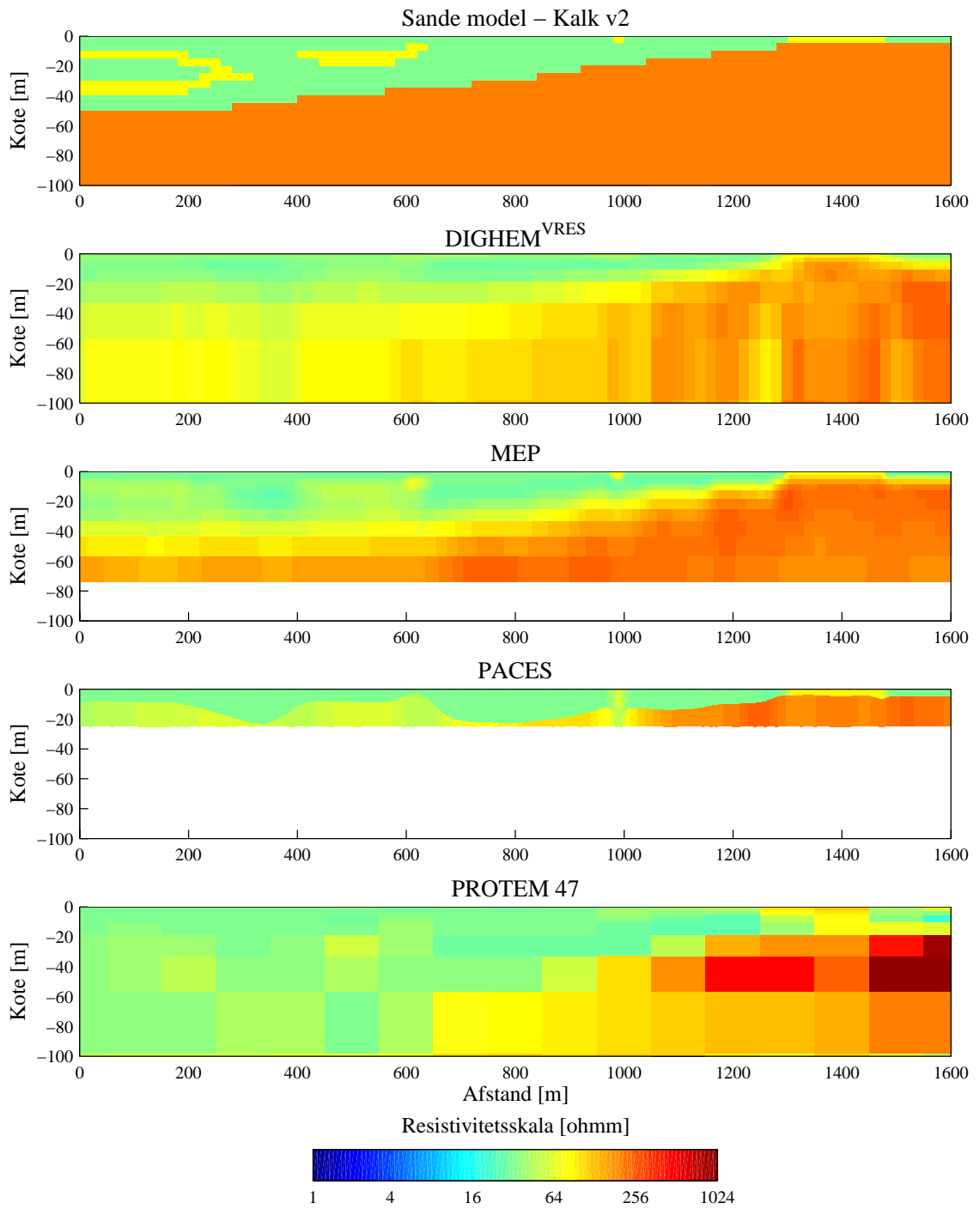
Figur B.7. Model Moræne – v1. Fålagstolkninger.



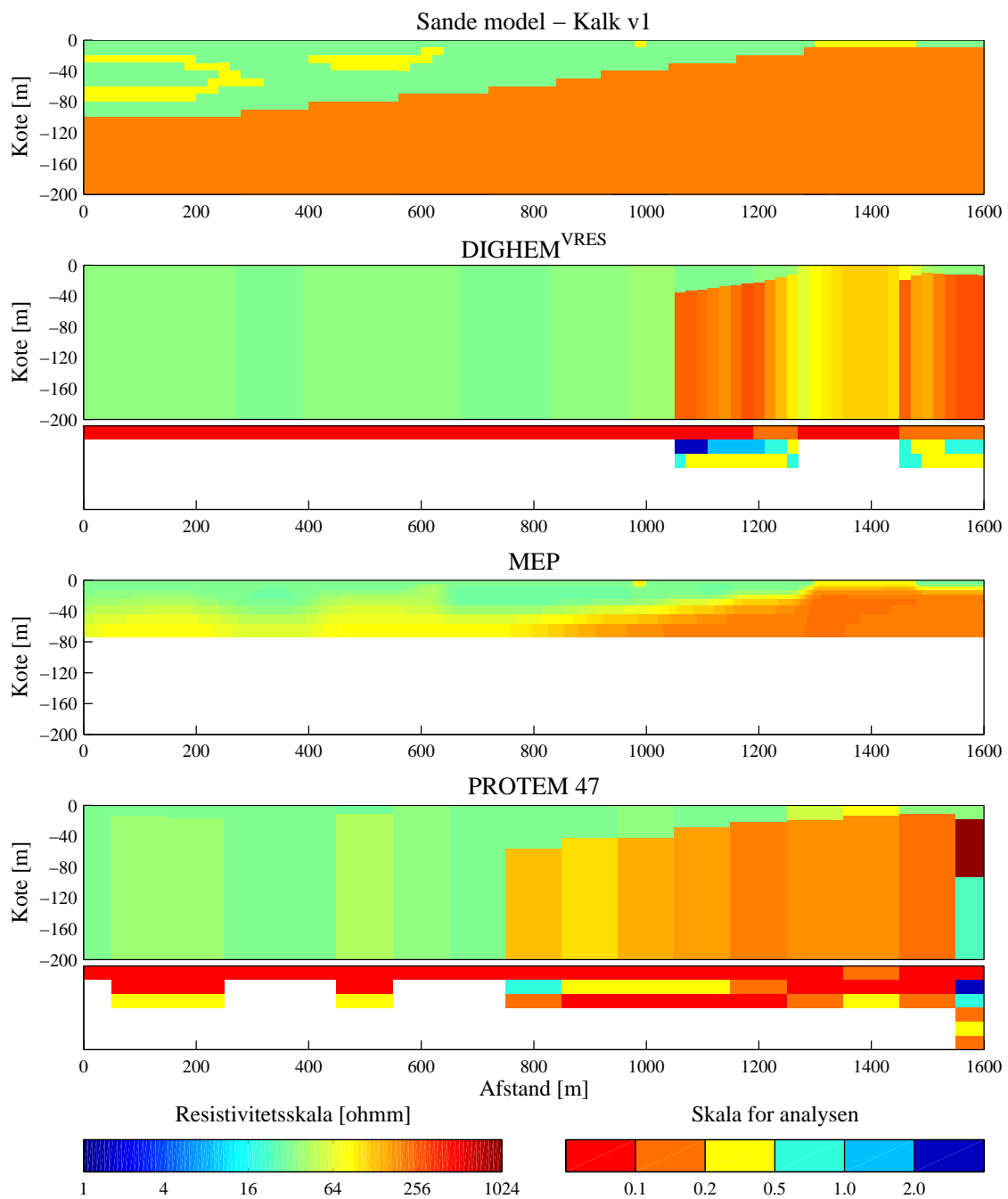
Figur B.8. Model Moræne – v1. Mangelaystolkninger.



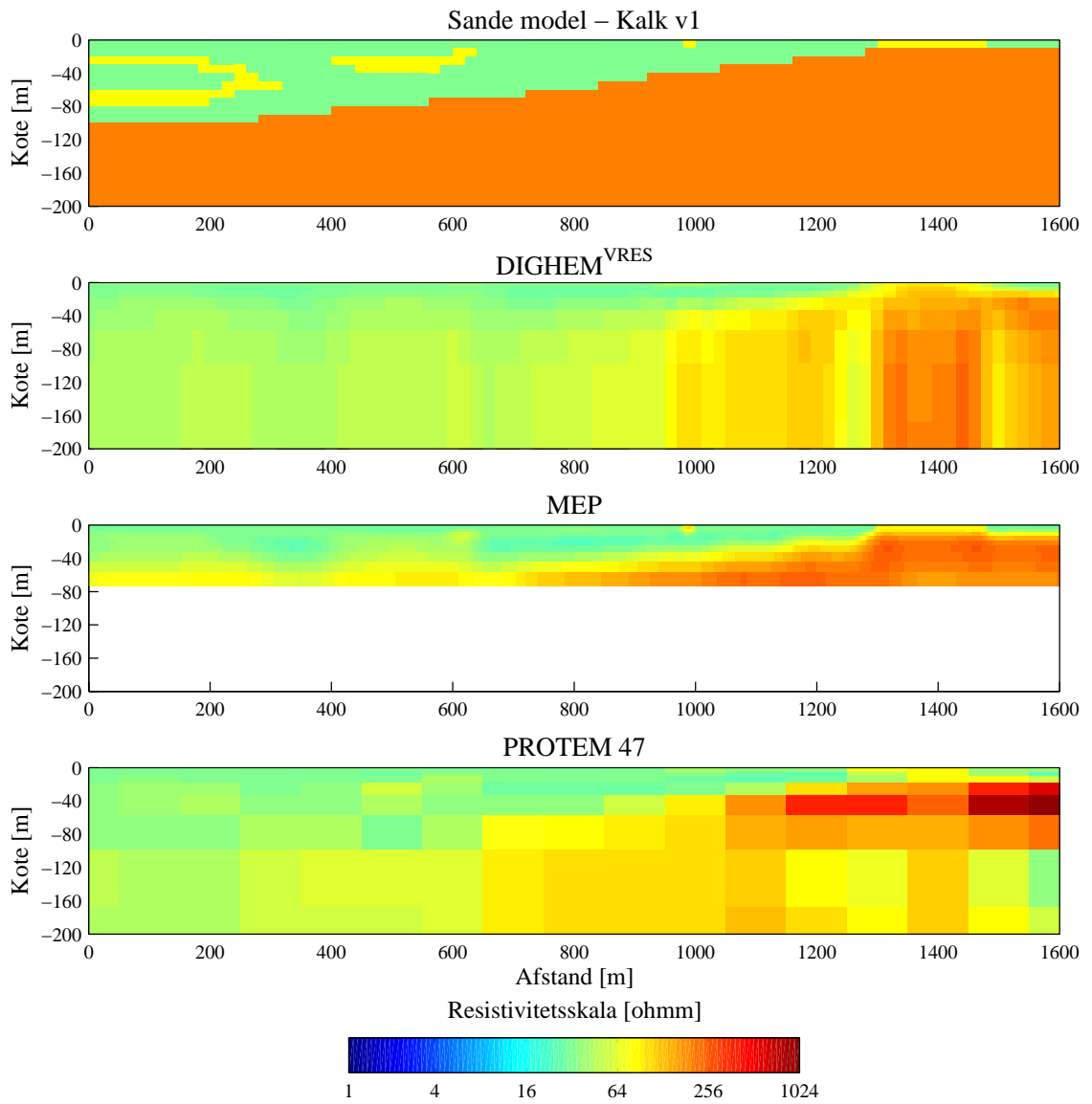
Figur B.9. Model Kalk – v2. Fålagstolkninger.



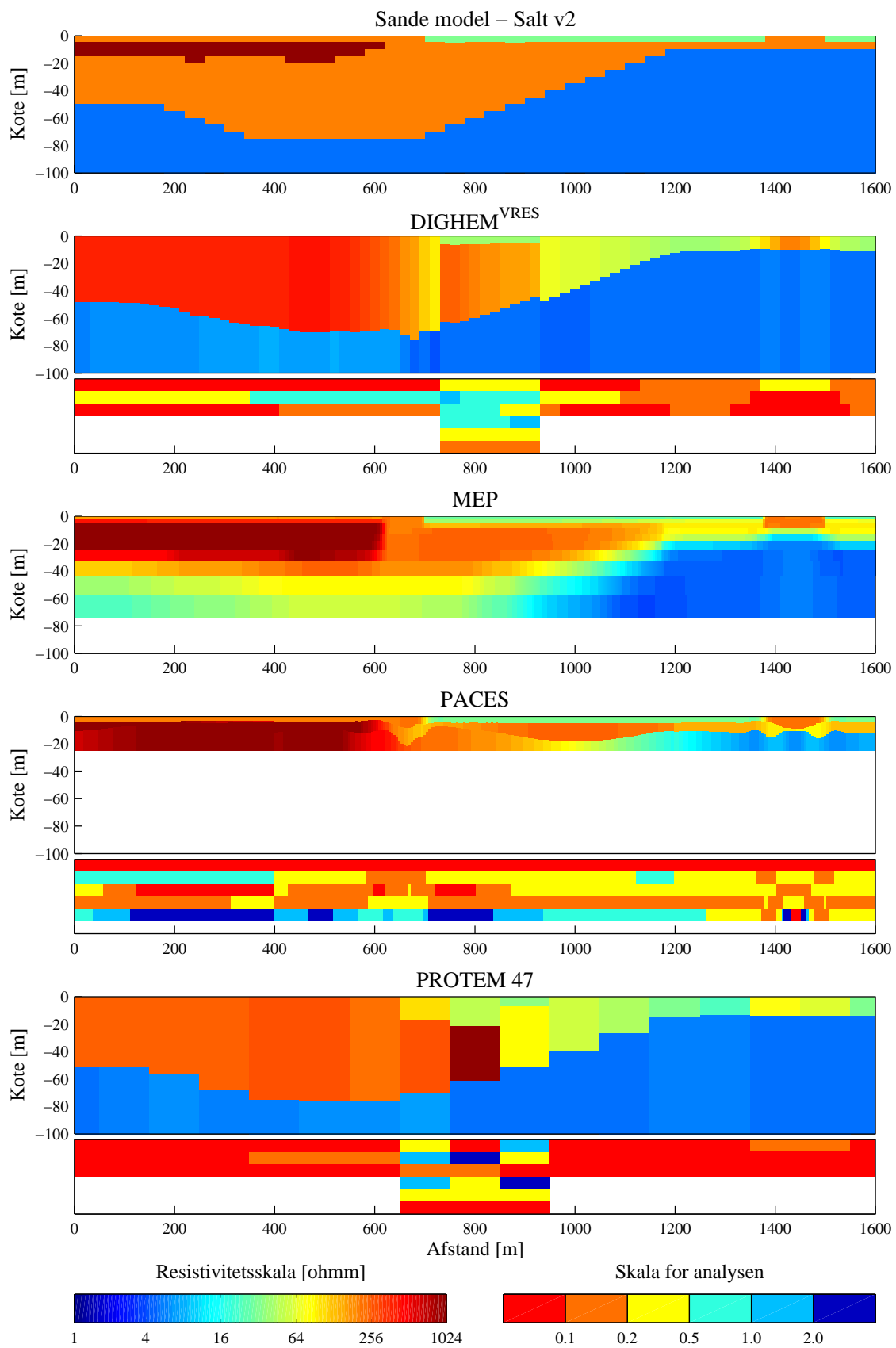
Figur B.10. Model Kalk – v2. Mangelagstolkninger.



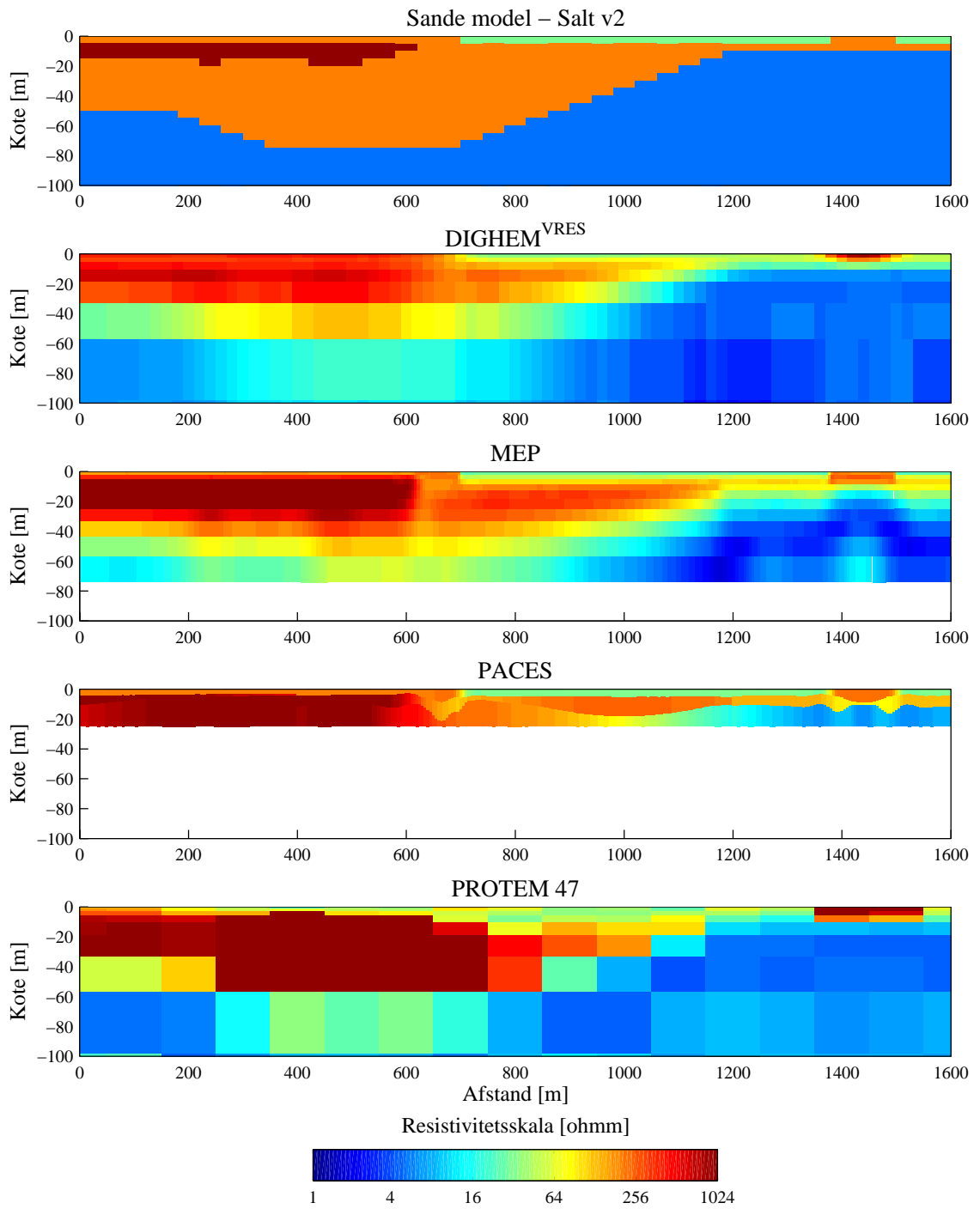
Figur B.11. Model Kalk – v1. Fålagstolkninger.



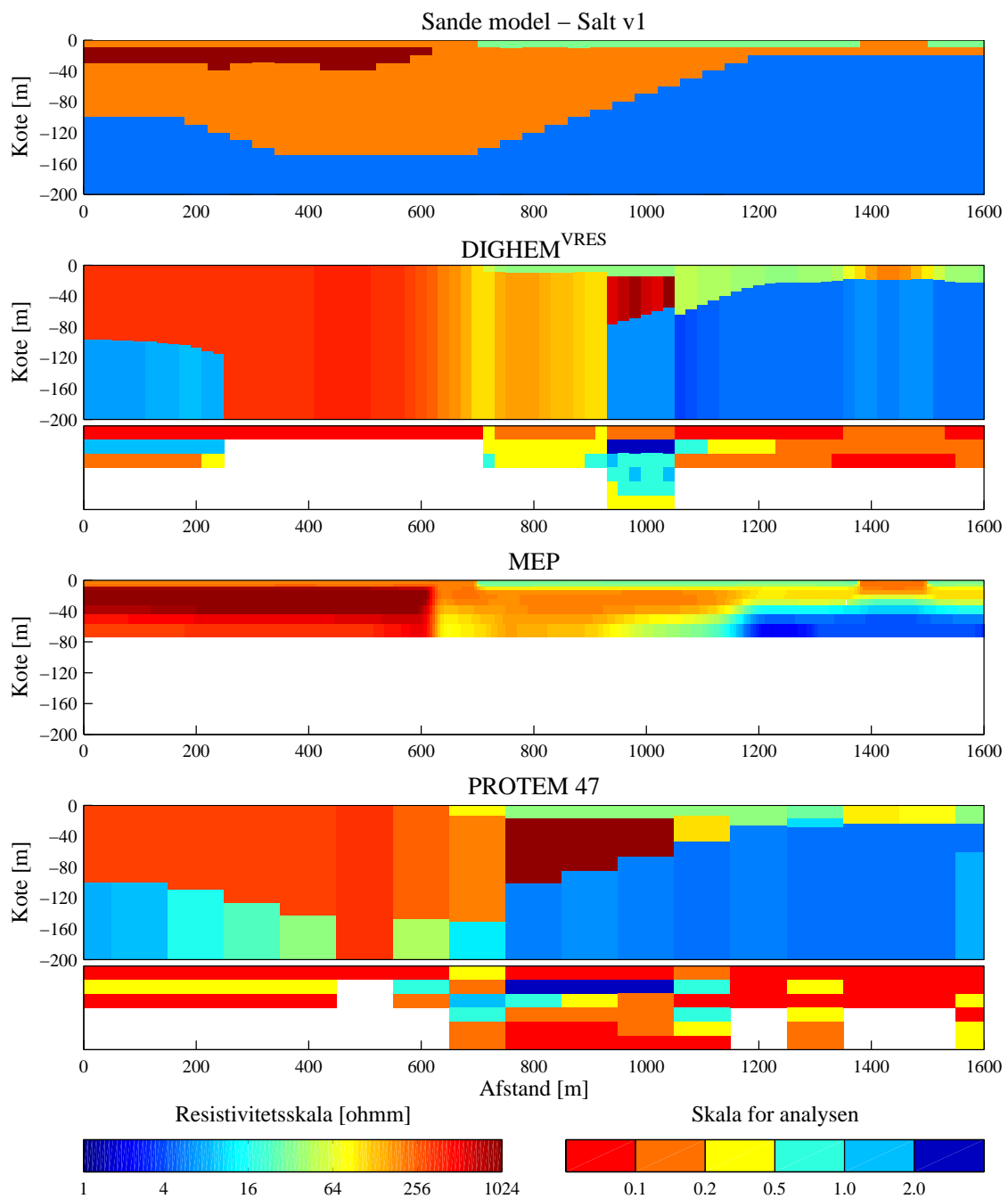
Figur B.12. Model Kalk – v1. Mangelagstolkninger.



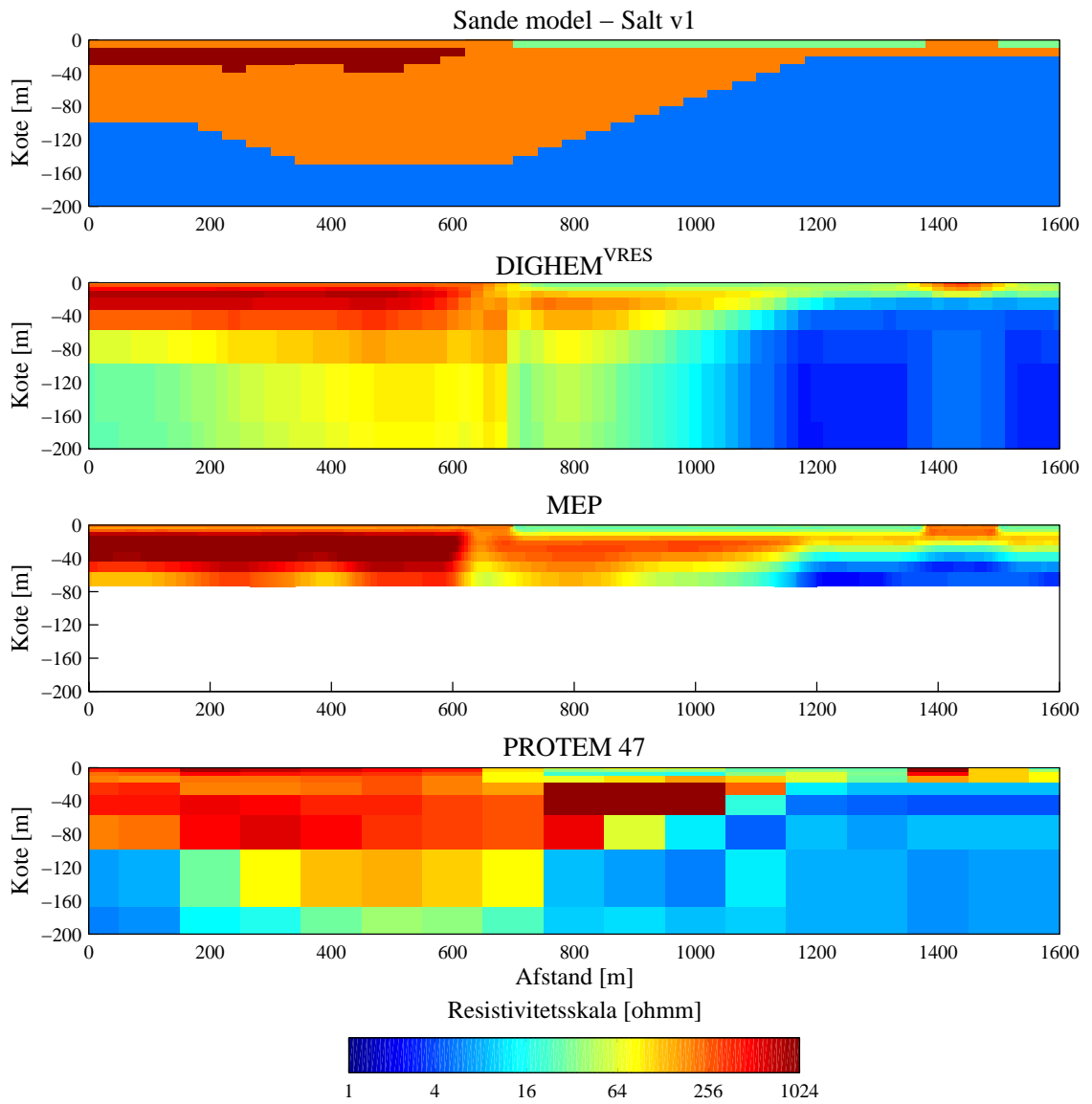
Figur B.13. Model Salt – v2. Fålagsmodeller.



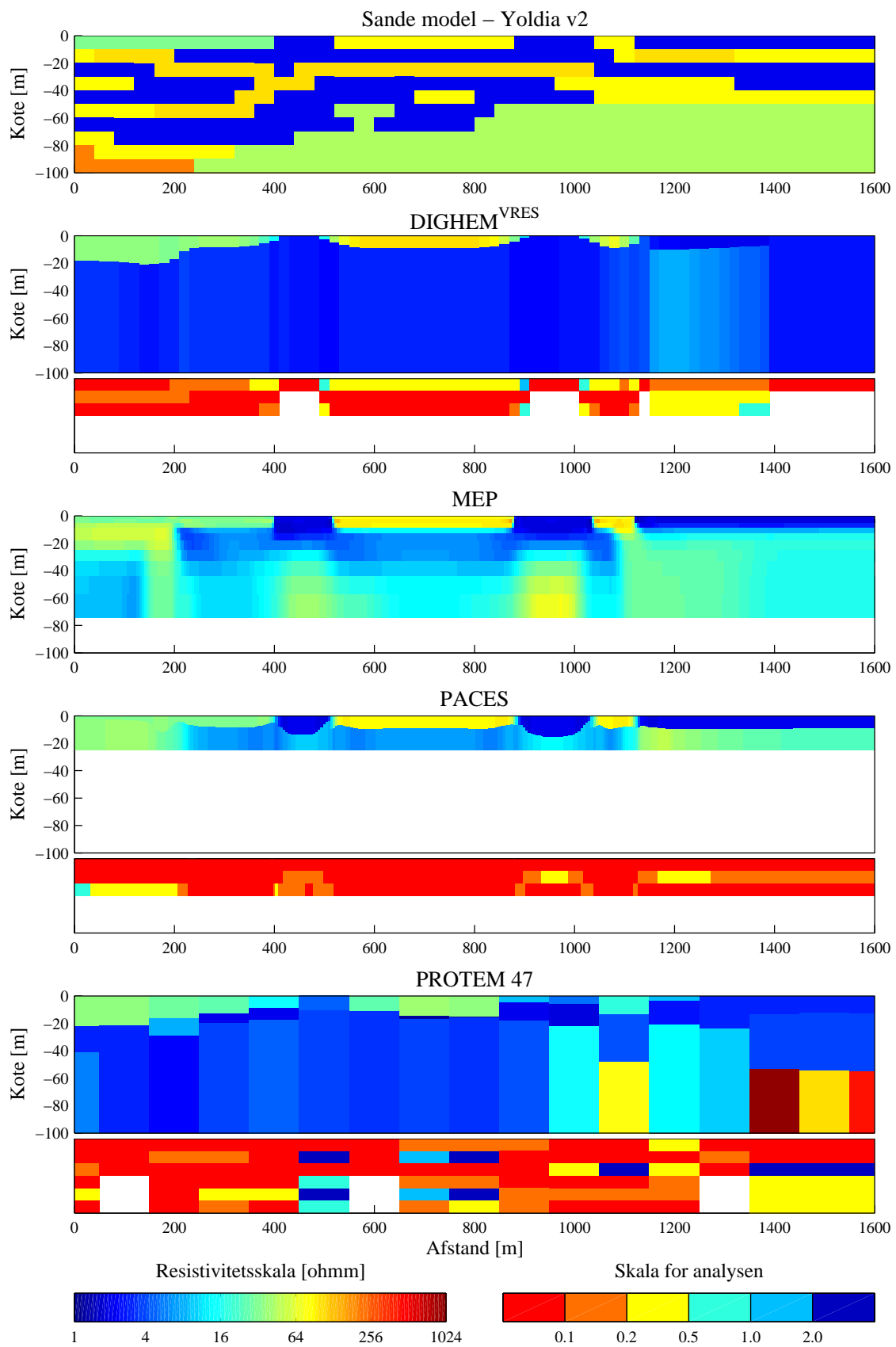
Figur B.14. Model Salt – v2. Mangelagsmodeller.



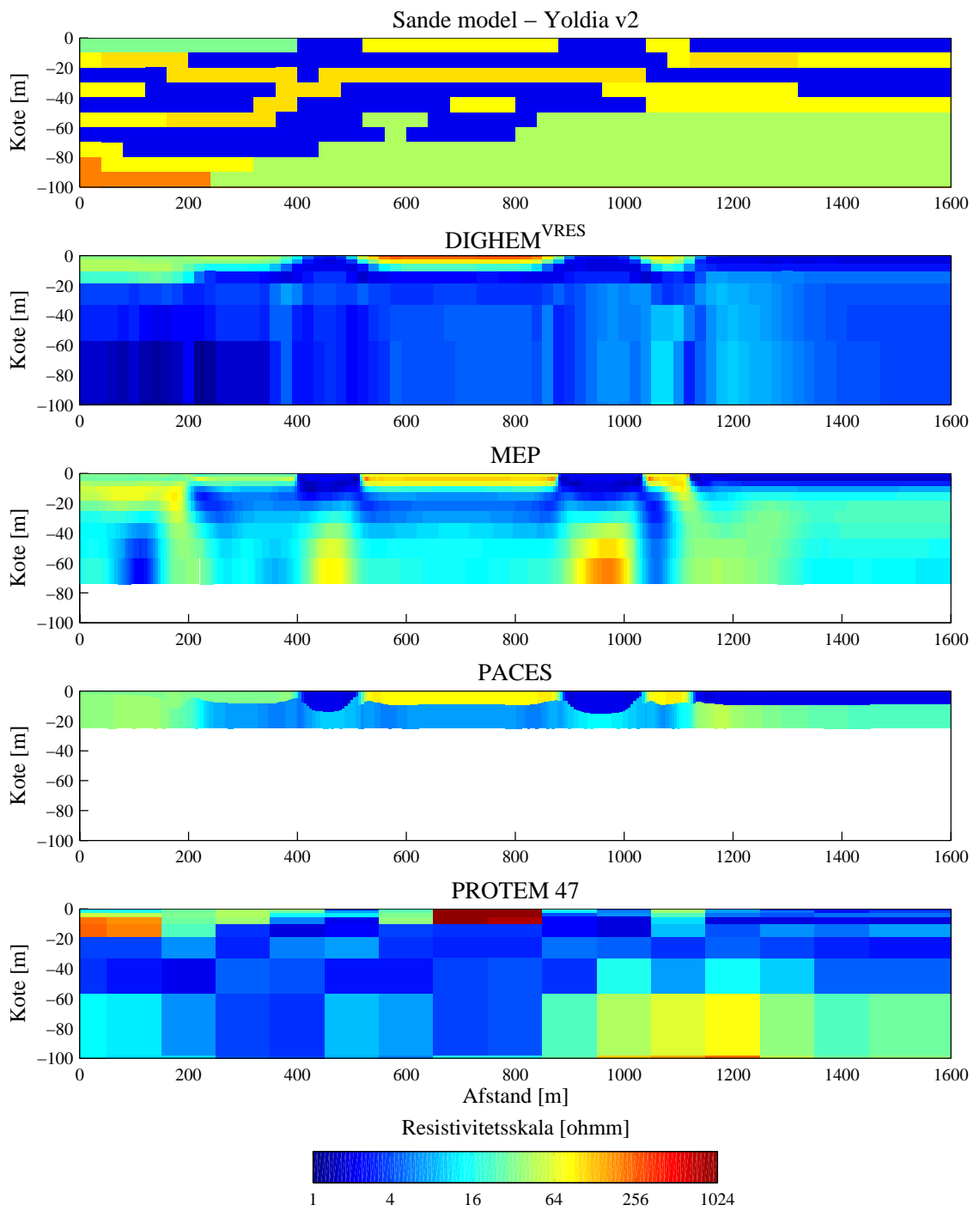
Figur B.15. Model Salt - v1. Fålagsmodeller.



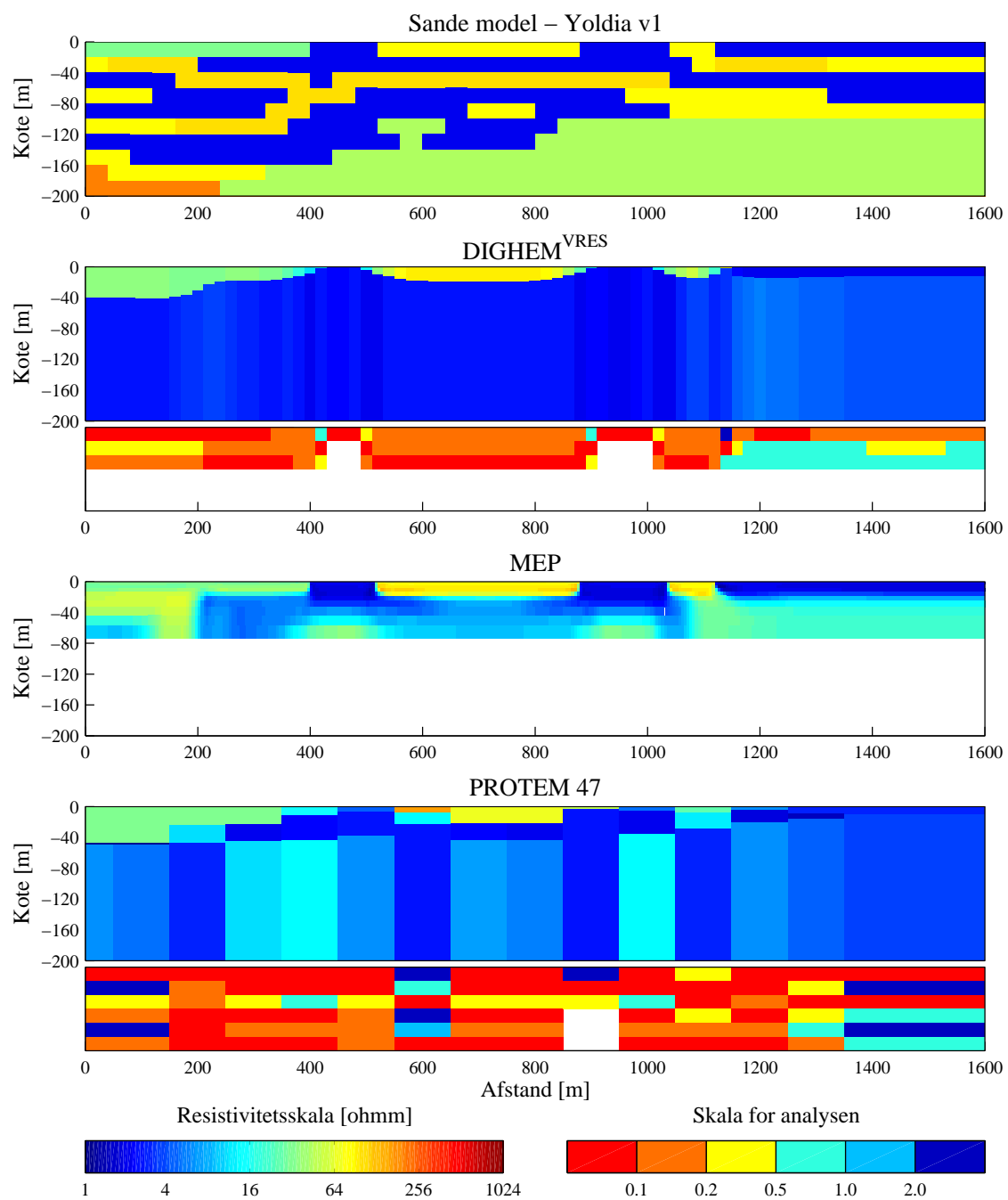
Figur B.16. Model Salt – v1. Mangelagsmodeller.



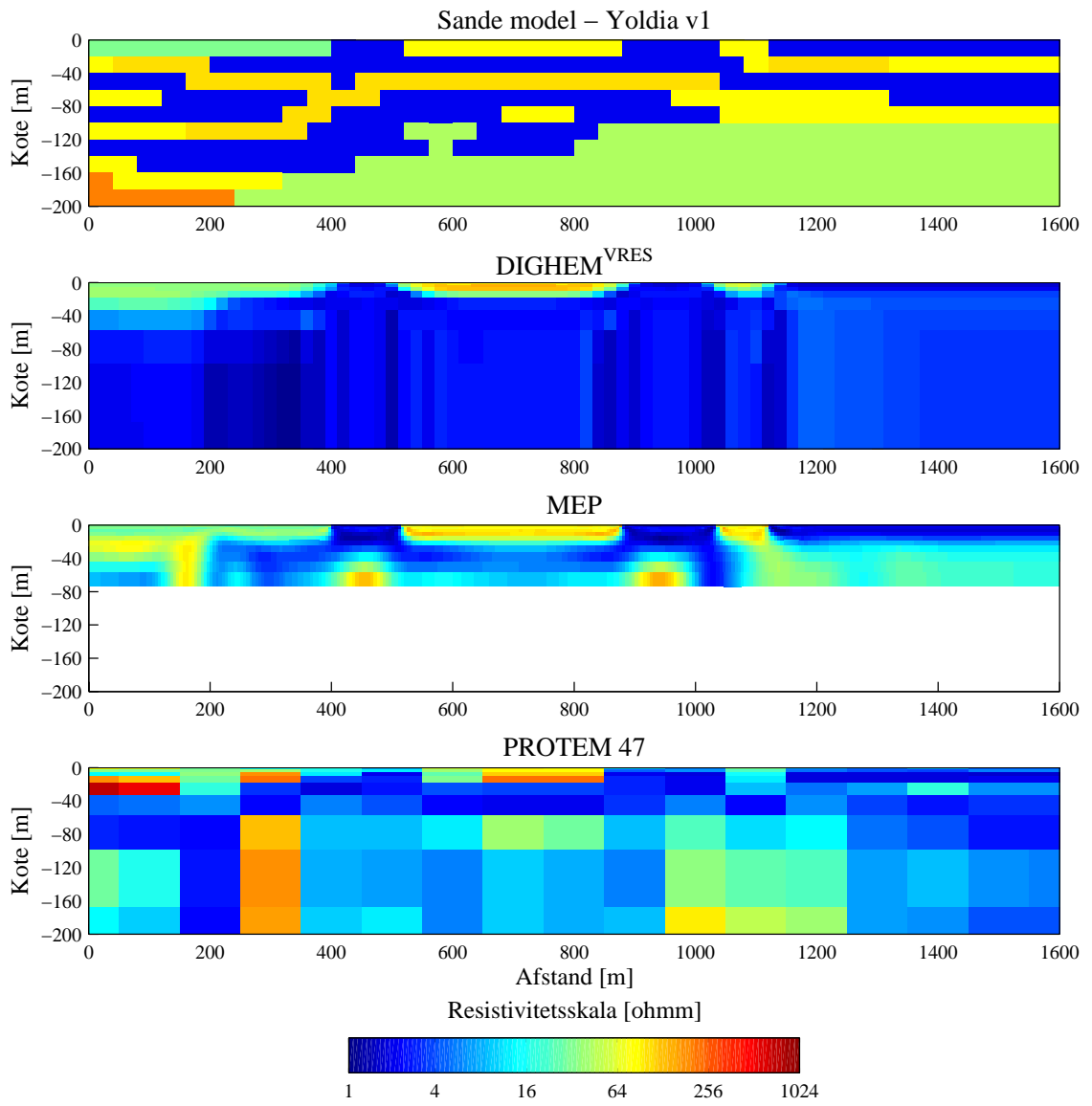
Figur B.17. Model Yoldia – v2. Fålagsmodeller.



Figur B.18. Model Yoldia – v2. Mangelagstolkninger.



Figur B.19. Model Yoldia - v1. Fålagsmodeller.



Figur B.20. Model Yoldia – v1. Mangelagsmodeller.

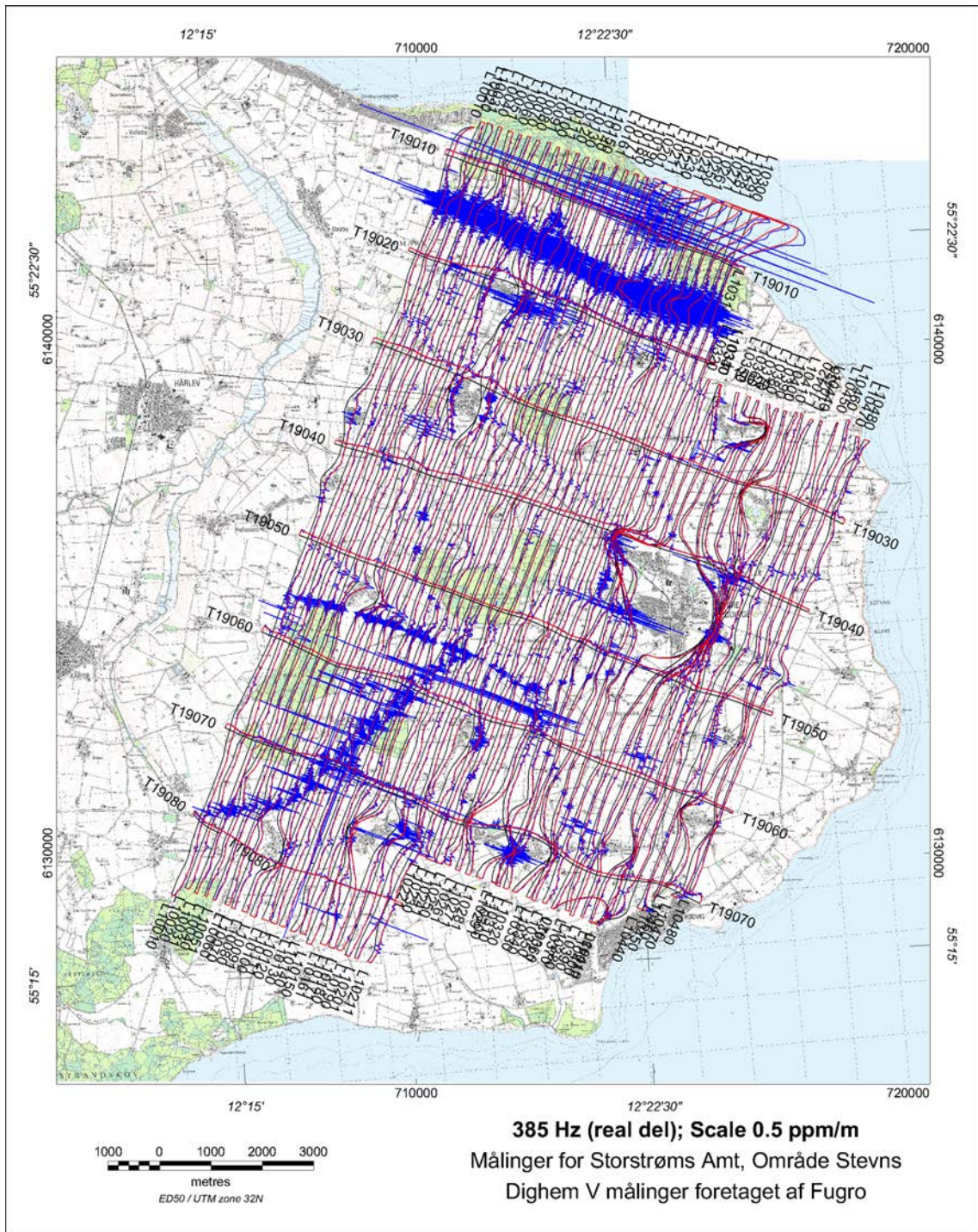
Appendiks C – Data fra målingerne i Danmark

I Appendiks C vises oprindelige data og filtrerede data for frekvenserne 385 Hz, 6200 Hz og 102 kHz for de fire områder målt af Fugro Airborne Surveys med Dighem^{VRES} systemet. Ved fremstillingen af figurerne som vises i Appendiks C, er der foretaget en korrektion af de ufiltrerede data ved en subtraktion af en konstant værdi for et givet profil, således at middelniveauet for de filtrerede og ufiltrerede data er sammenfaldende.

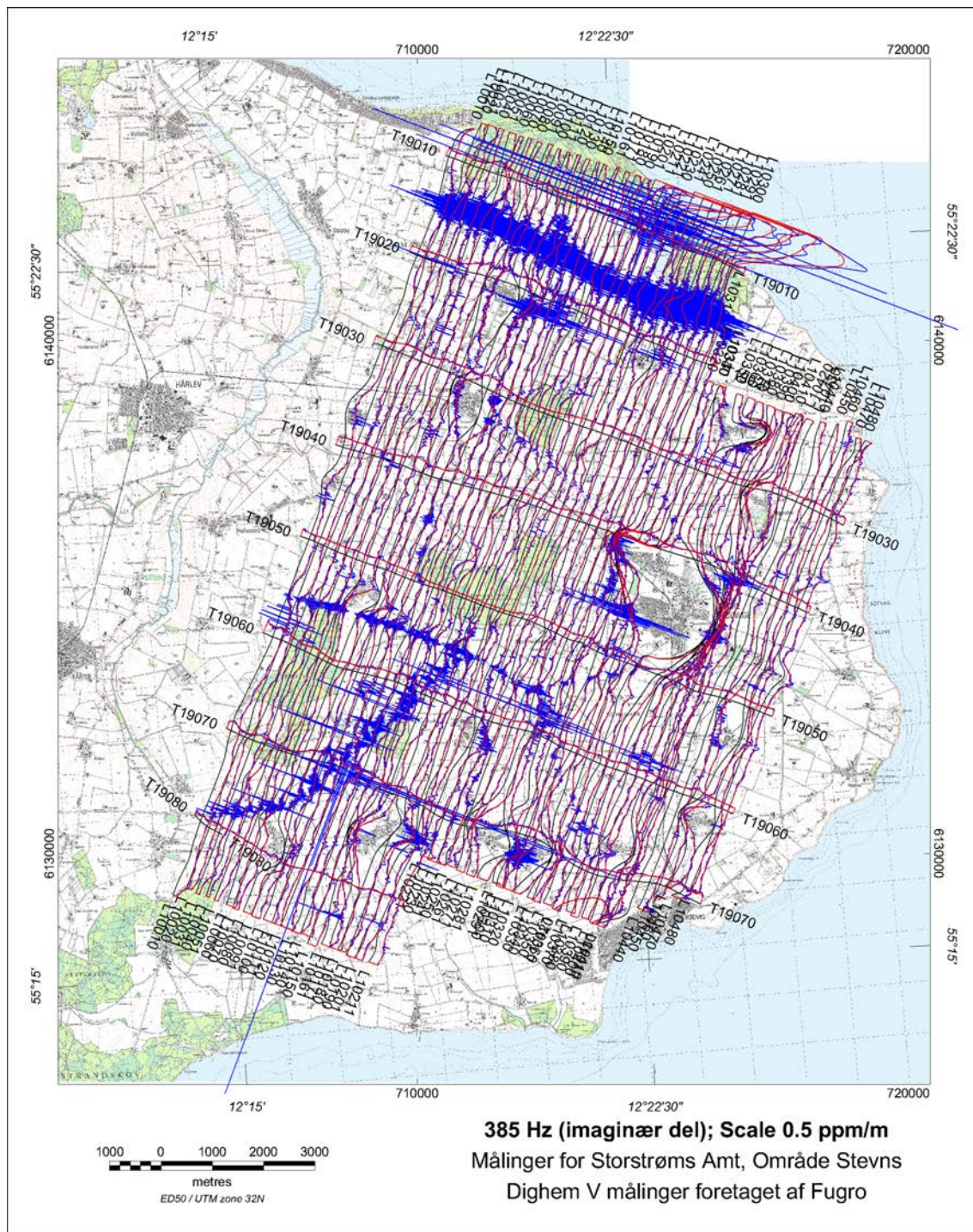
Ufiltrerede data fra målingerne i Sønderjyllands Amt har ikke været til rådighed for denne rapport.

Nedenfor ses en oversigt over de enkelte figurer

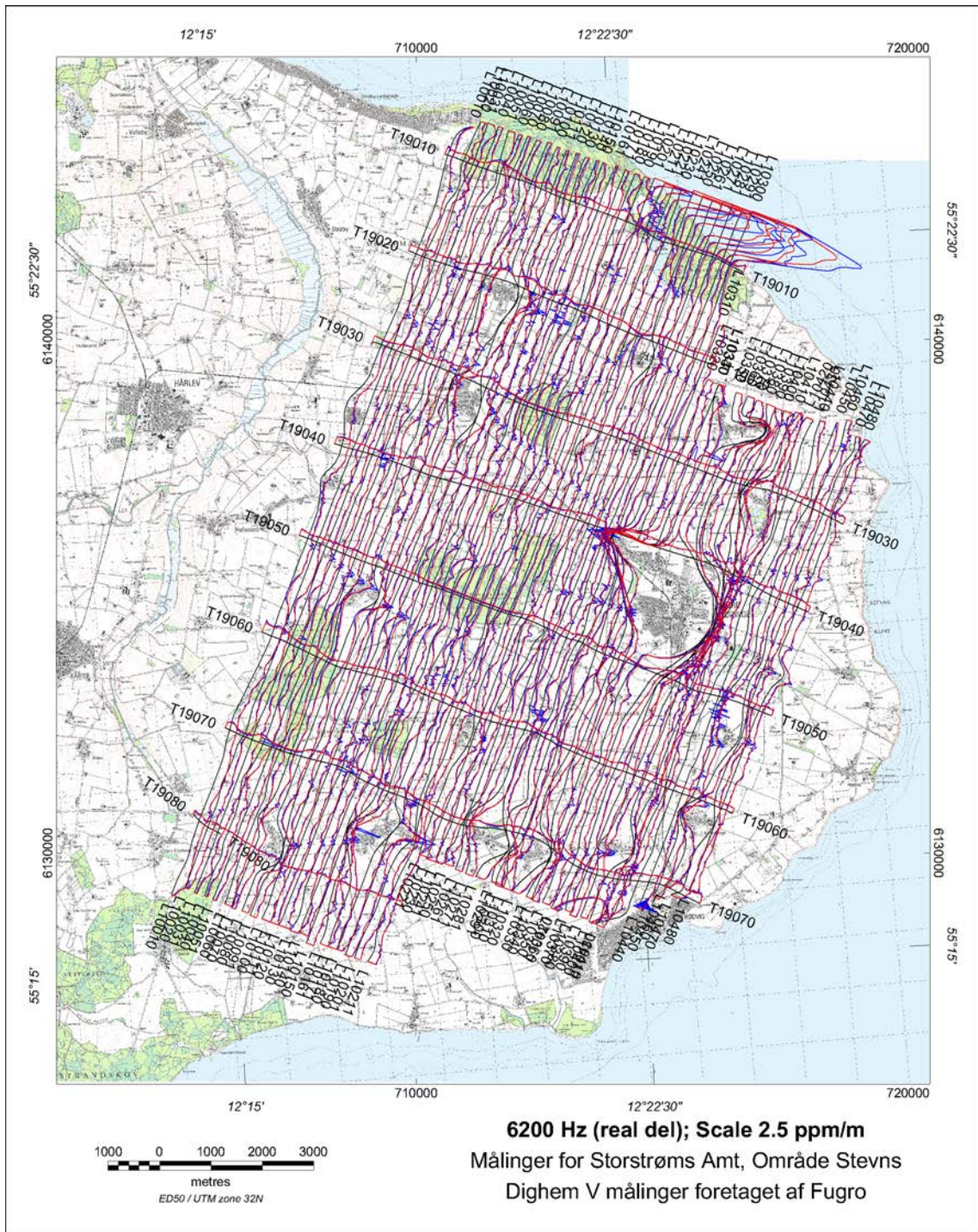
- Figur C1: Område Stevns, Storstrøms Amt, 385 Hz real del.
- Figur C2: Område Stevns, Storstrøms Amt, 385 Hz imaginær del.
- Figur C3: Område Stevns, Storstrøms Amt, 6200 Hz real del.
- Figur C4: Område Stevns, Storstrøms Amt, 6200 Hz imaginær del.
- Figur C5: Område Stevns, Storstrøms Amt, 102 kHz real del.
- Figur C6: Område Stevns, Storstrøms Amt, 102 kHz imaginær del.
- Figur C7: Område Hyllinge, Storstrøms Amt, 385 Hz real del.
- Figur C8: Område Hyllinge, Storstrøms Amt, 385 Hz imaginær del.
- Figur C9: Område Hyllinge, Storstrøms Amt, 6200 Hz real del.
- Figur C10: Område Hyllinge, Storstrøms Amt, 6200 Hz imaginær del.
- Figur C11: Område Hyllinge, Storstrøms Amt, 102 kHz real del.
- Figur C12: Område Hyllinge, Storstrøms Amt, 102 kHz imaginær del.
- Figur C13: Viborg Amt, 385 Hz real del.
- Figur C14: Viborg Amt, 385 Hz imaginær del.
- Figur C15: Viborg Amt, 6200 Hz real del.
- Figur C16: Viborg Amt, 6200 Hz imaginær del.
- Figur C17: Viborg Amt, 102 kHz real del.
- Figur C18: Viborg Amt, 102 kHz imaginær del.
- Figur C19: Ringkjøbing Amt, 385 Hz real del.
- Figur C20: Ringkjøbing Amt, 385 Hz imaginær del.
- Figur C21: Ringkjøbing Amt, 6200 Hz real del.
- Figur C22: Ringkjøbing Amt, 6200 Hz imaginær del.
- Figur C23: Ringkjøbing Amt, 102 kHz real del.
- Figur C24: Ringkjøbing Amt, 102 kHz imaginær del.



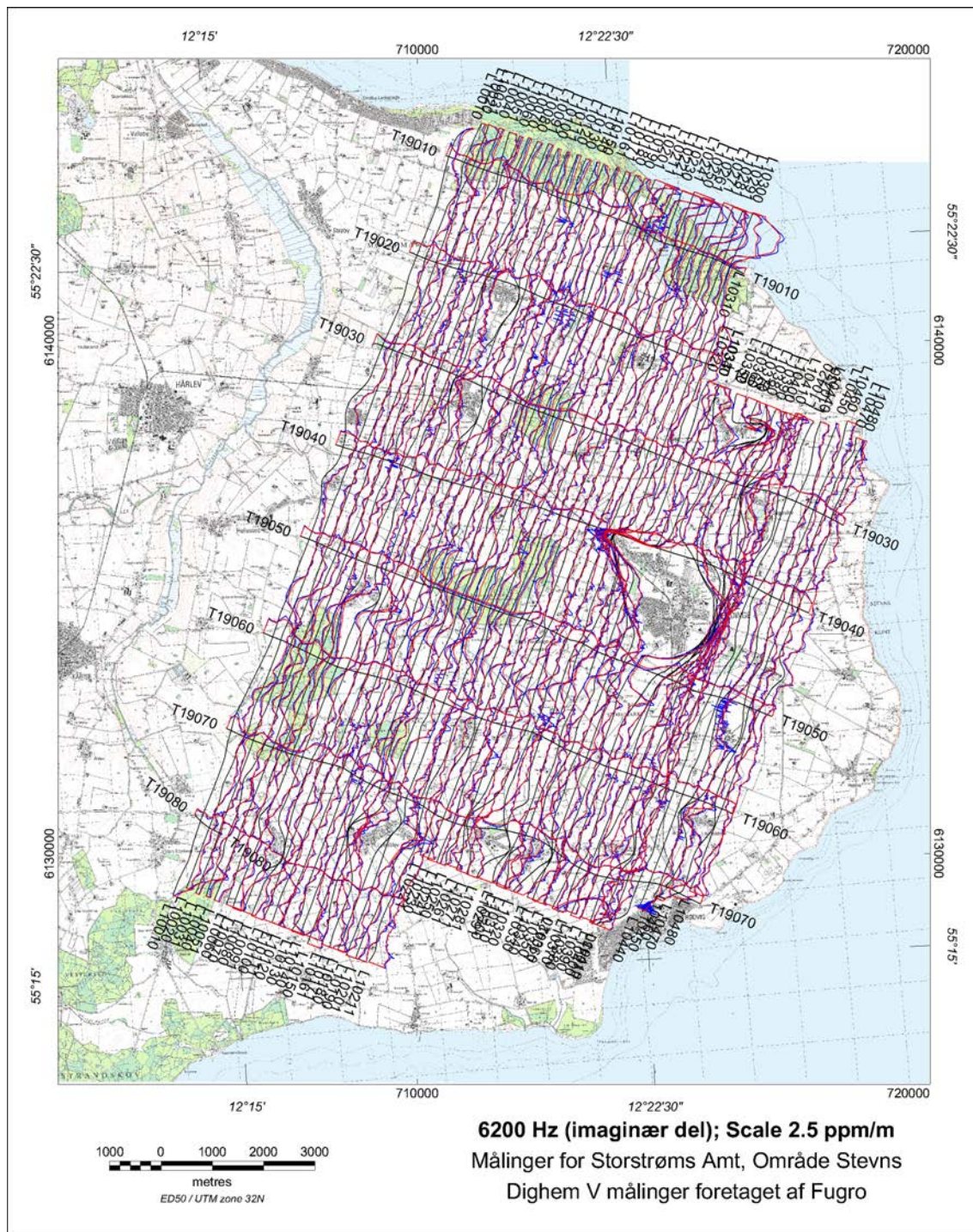
Figur C.1. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



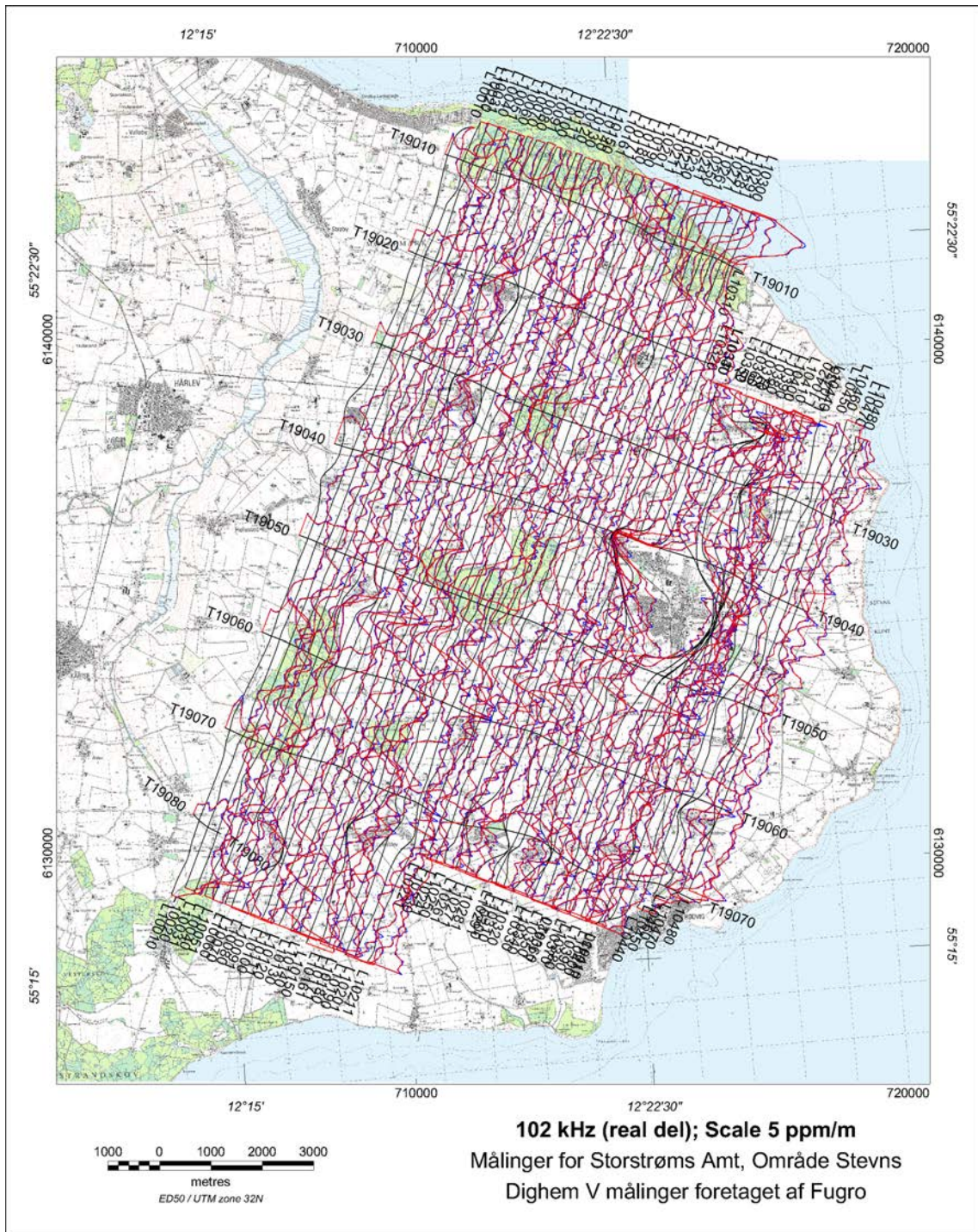
Figur C.2. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



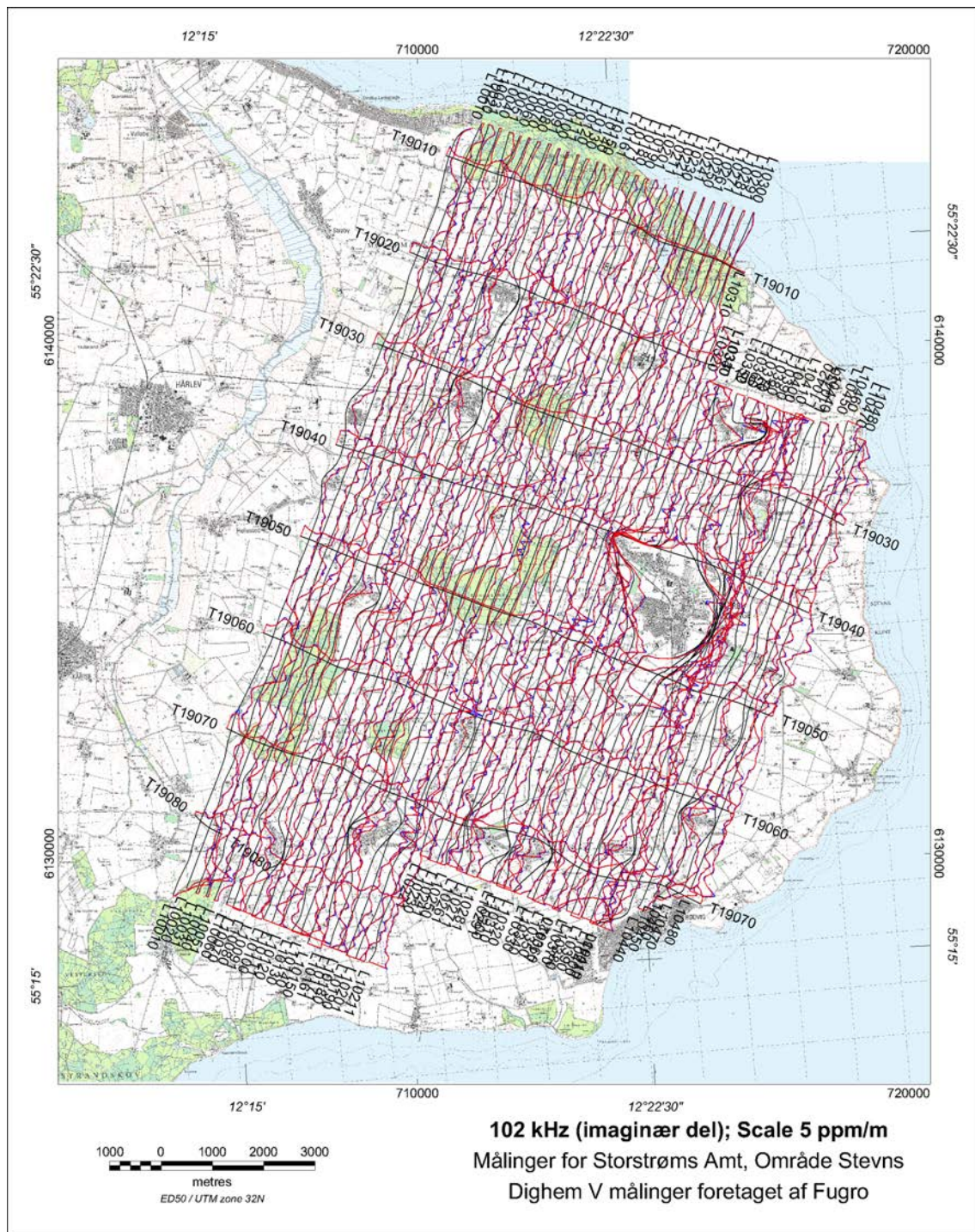
Figur C.3. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



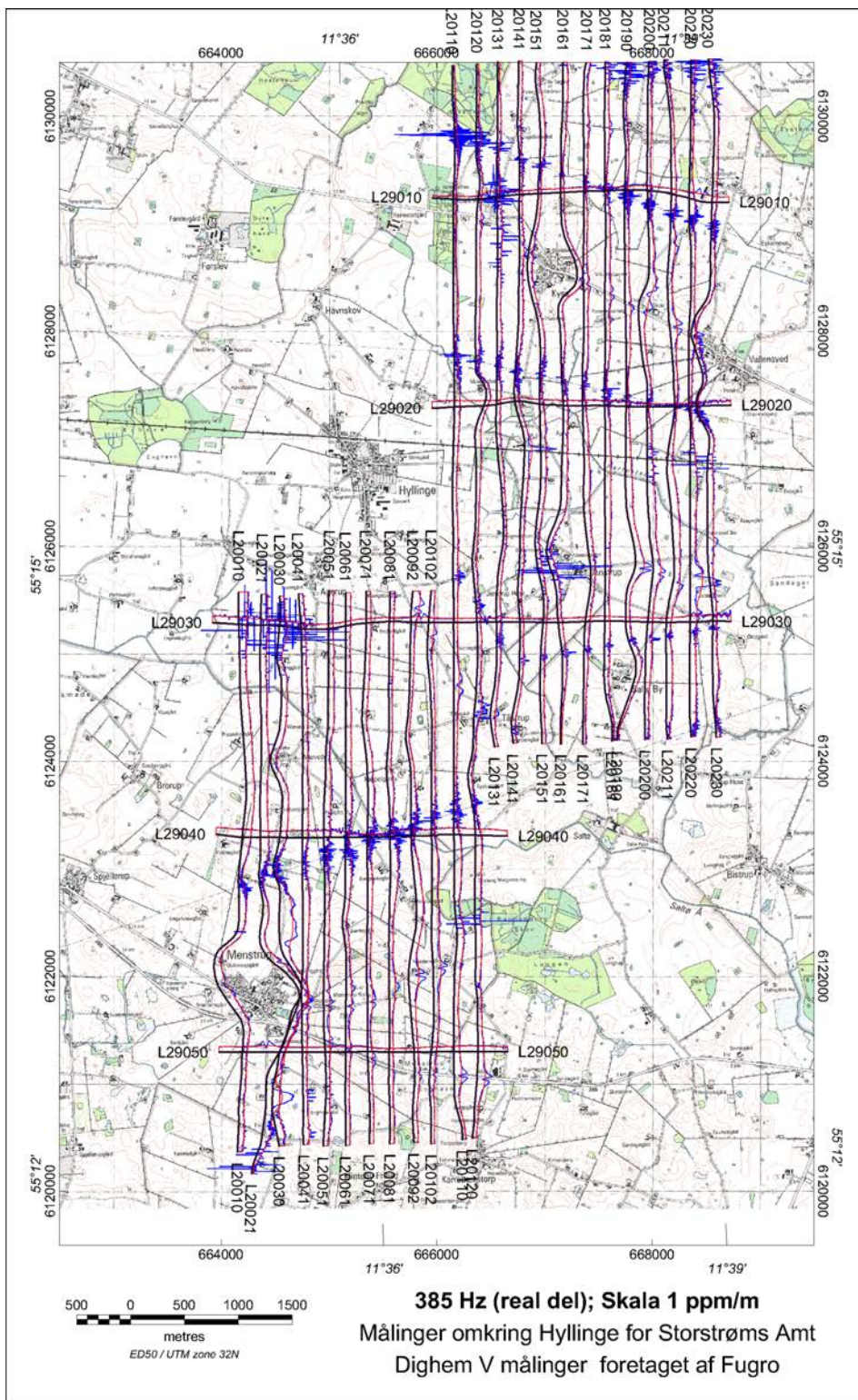
Figur C.4. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



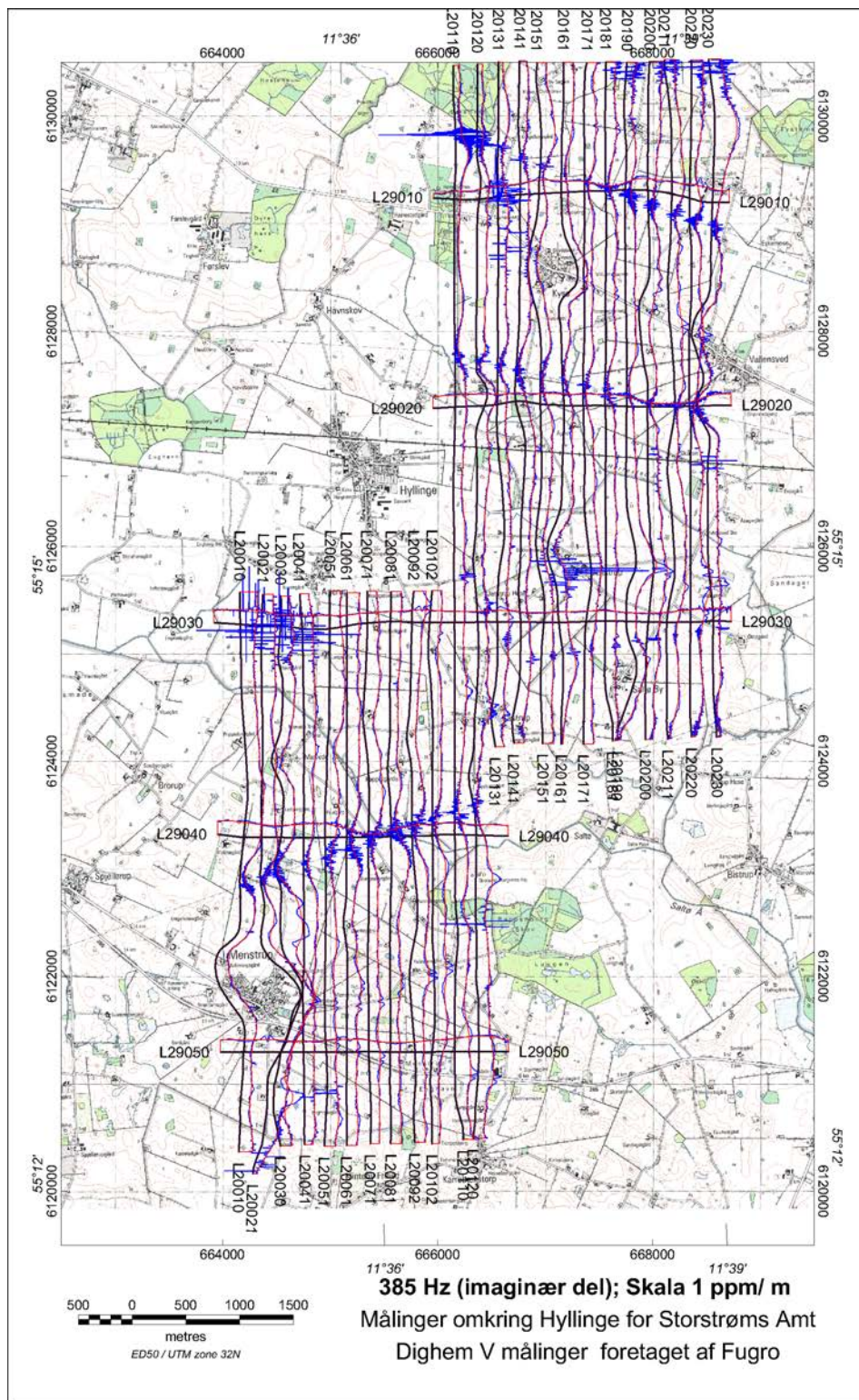
Figur C.5. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz real del fra Dighed^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



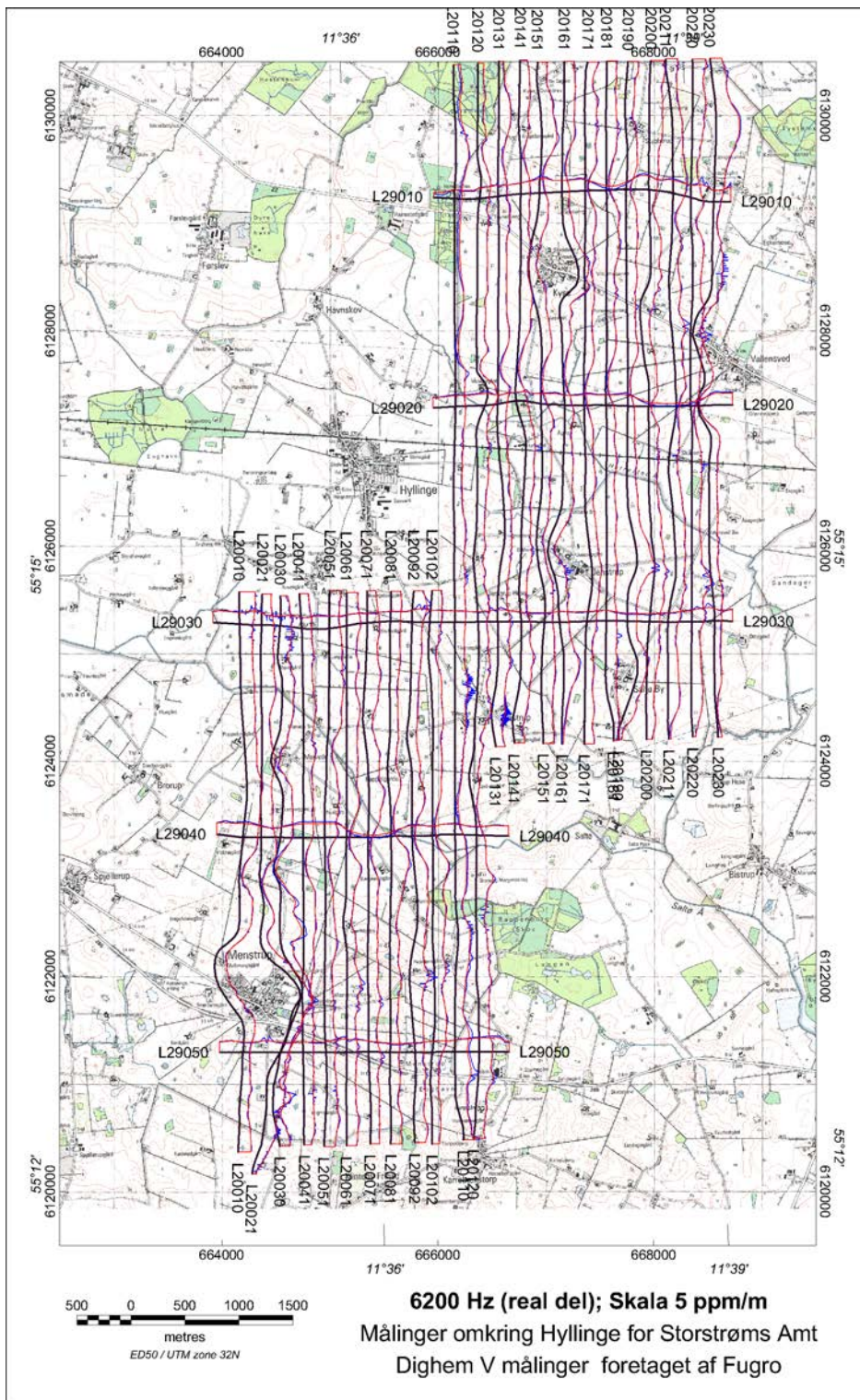
Figur C.6. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



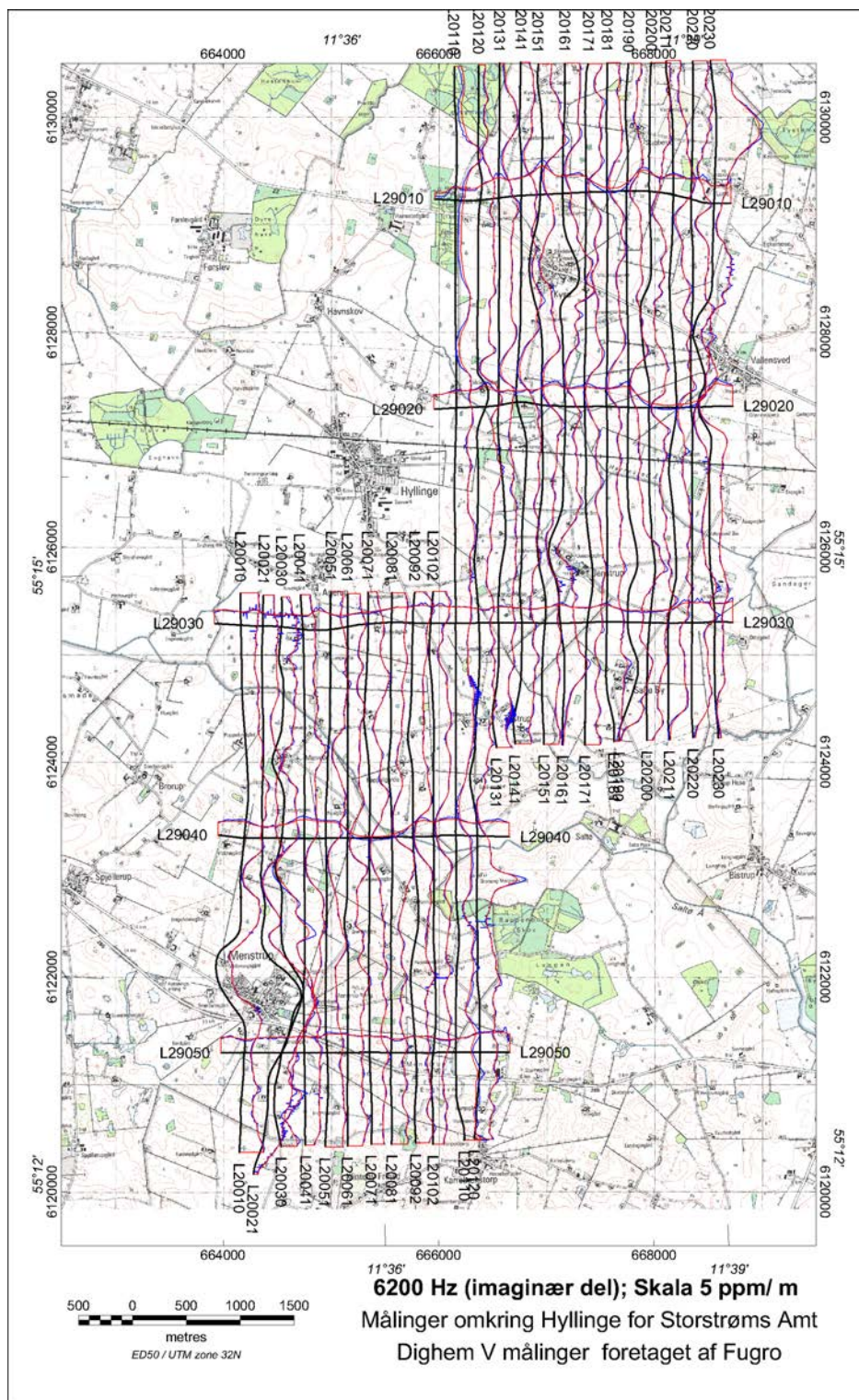
Figur C.7. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz real del fra Digham^{VRES} målinger omkring Hyllinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



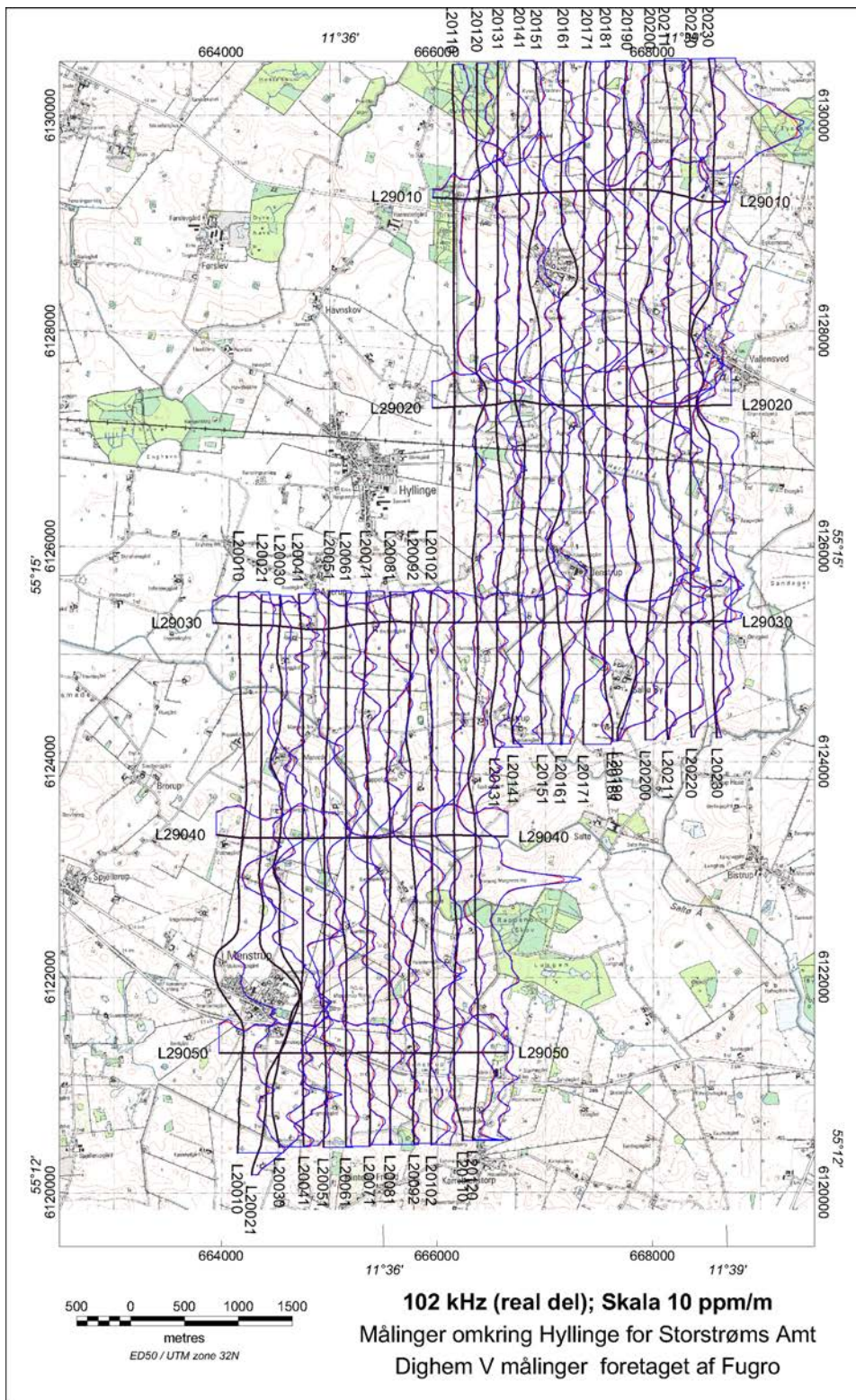
Figur C.8. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Hyllinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



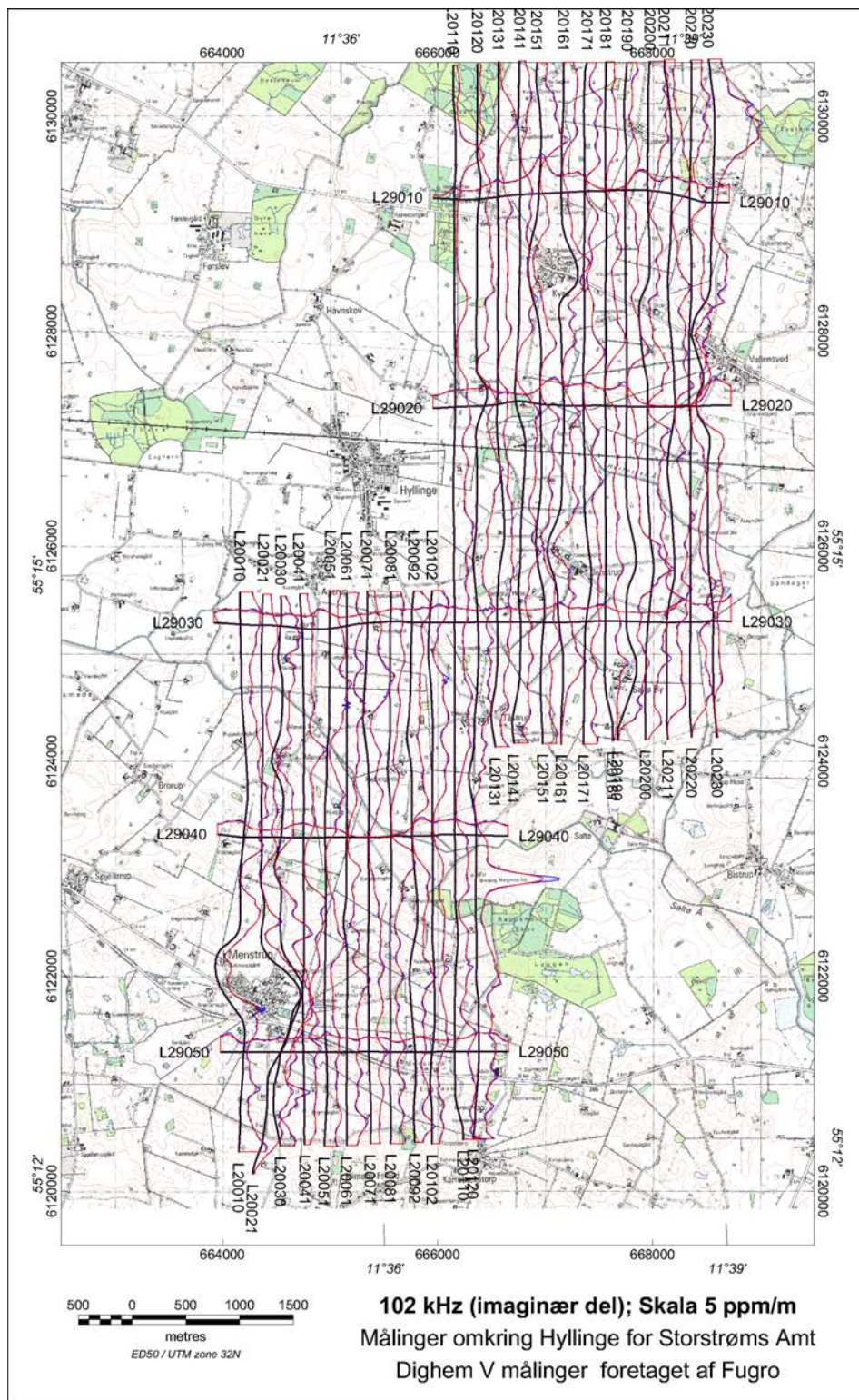
Figur C.9. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Hyllinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



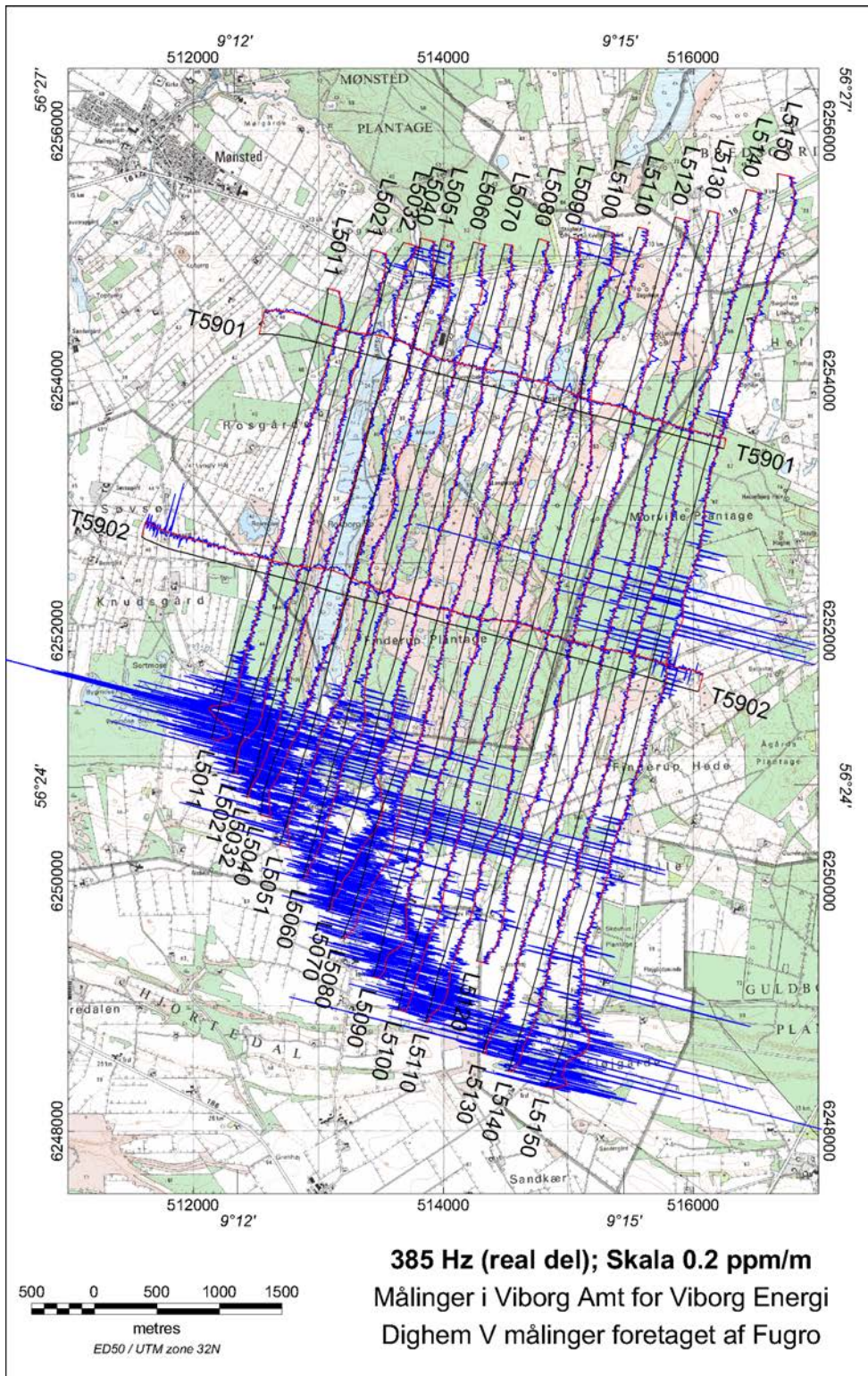
Figur C.10. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Hillinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



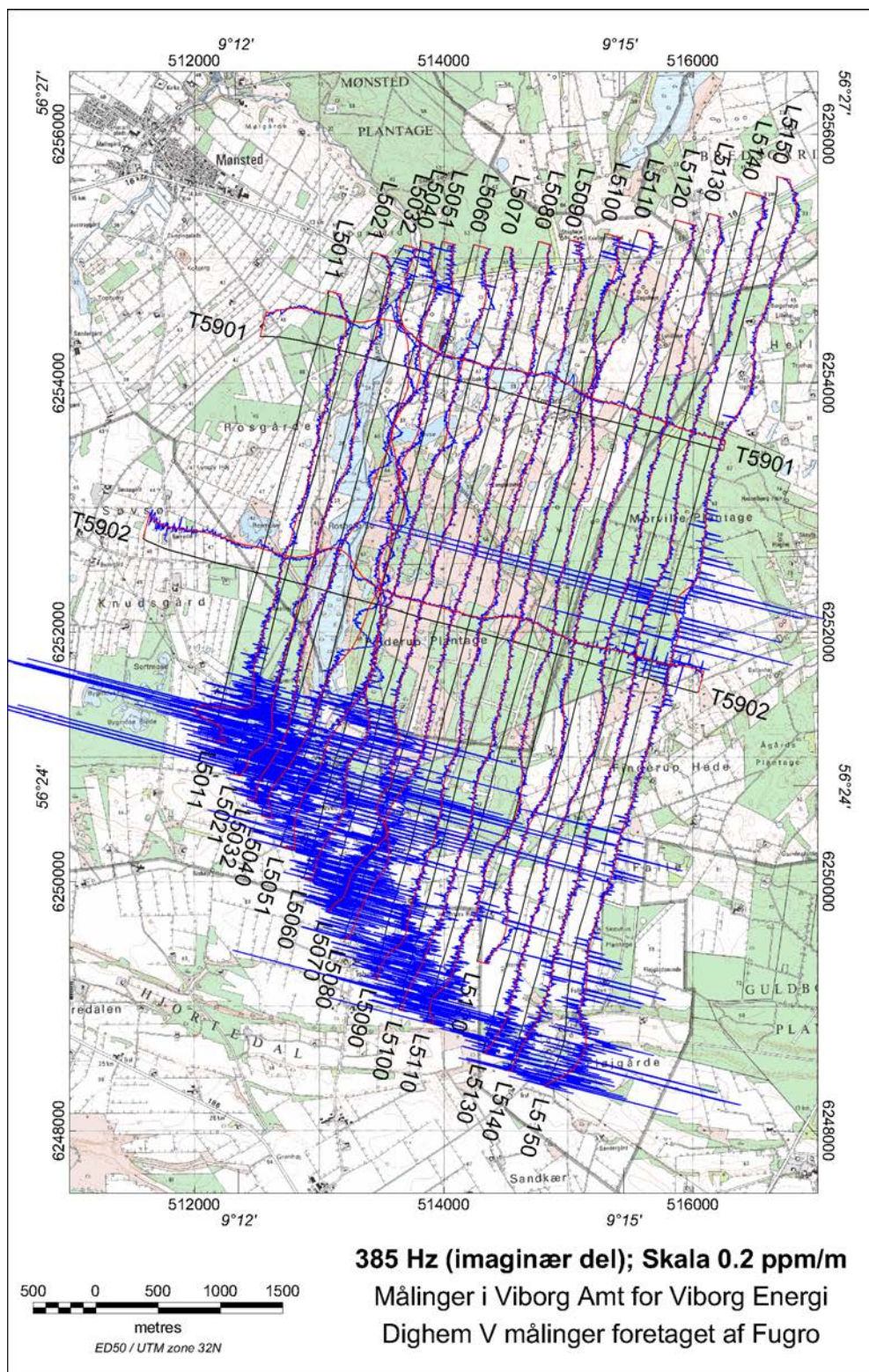
Figur C.11. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Hyllinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



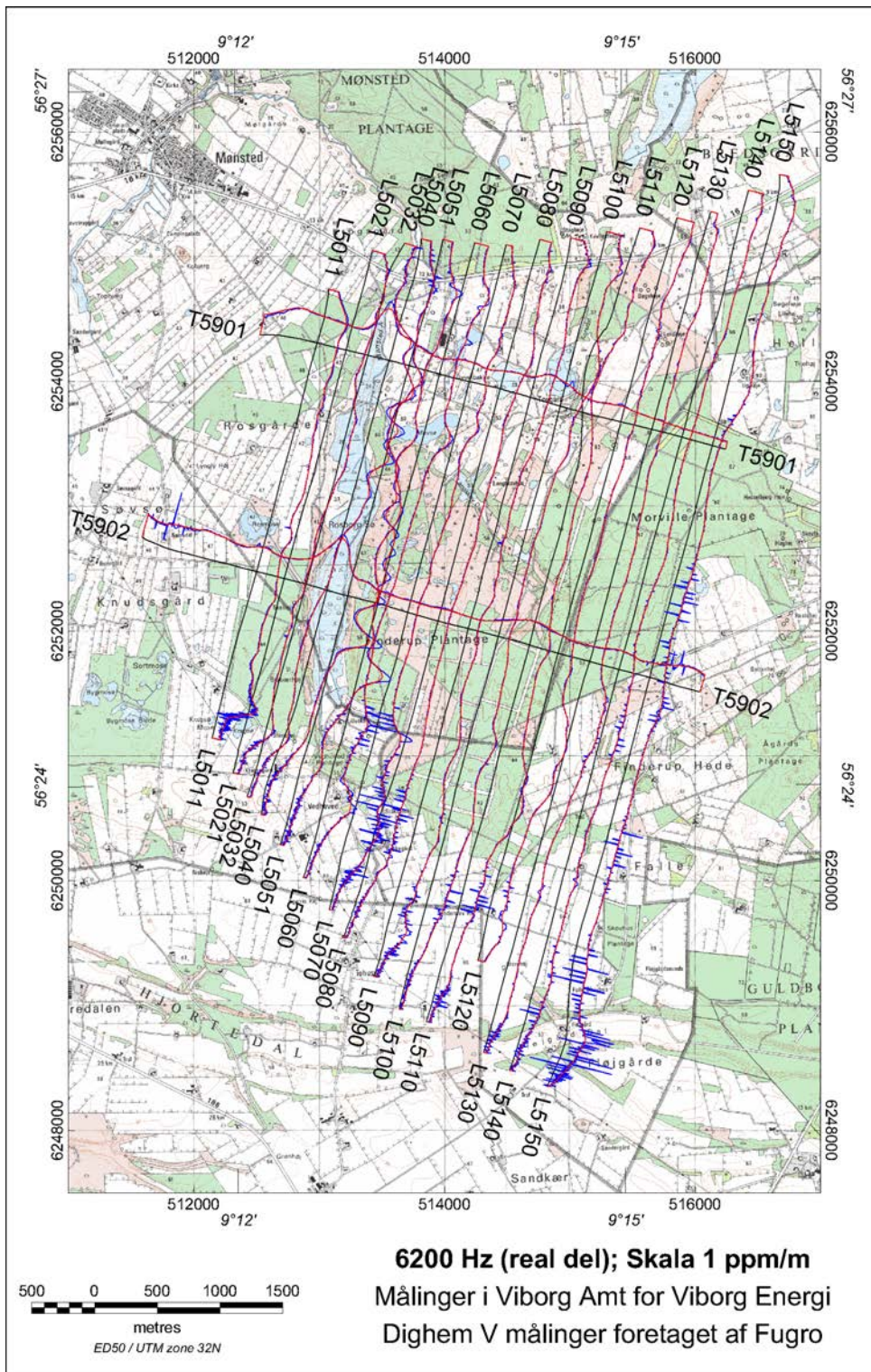
Figur C.12. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Hyllinge foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



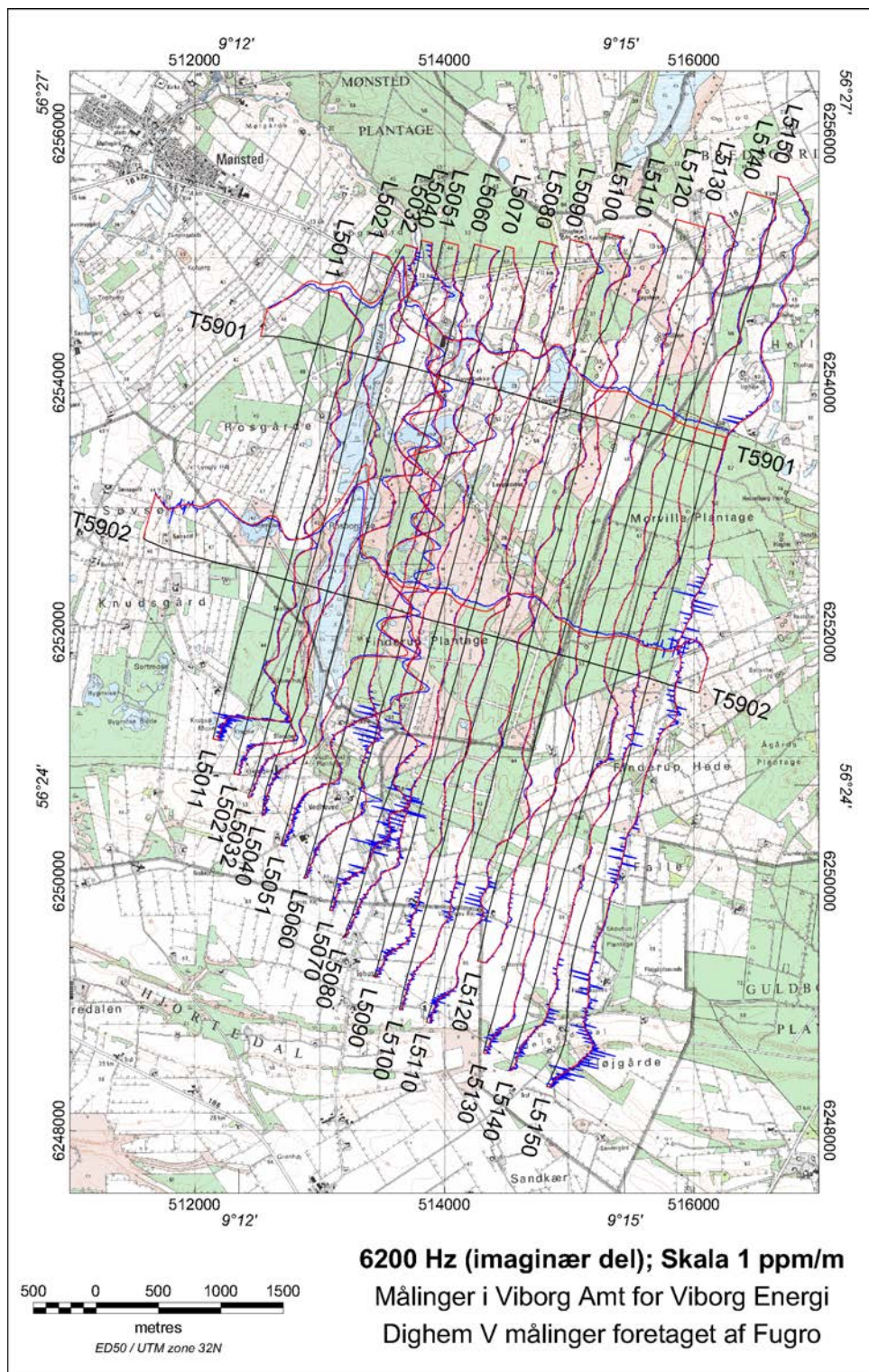
Figur C.13. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Viborg foretaget af Fugro for Viborg Energi. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



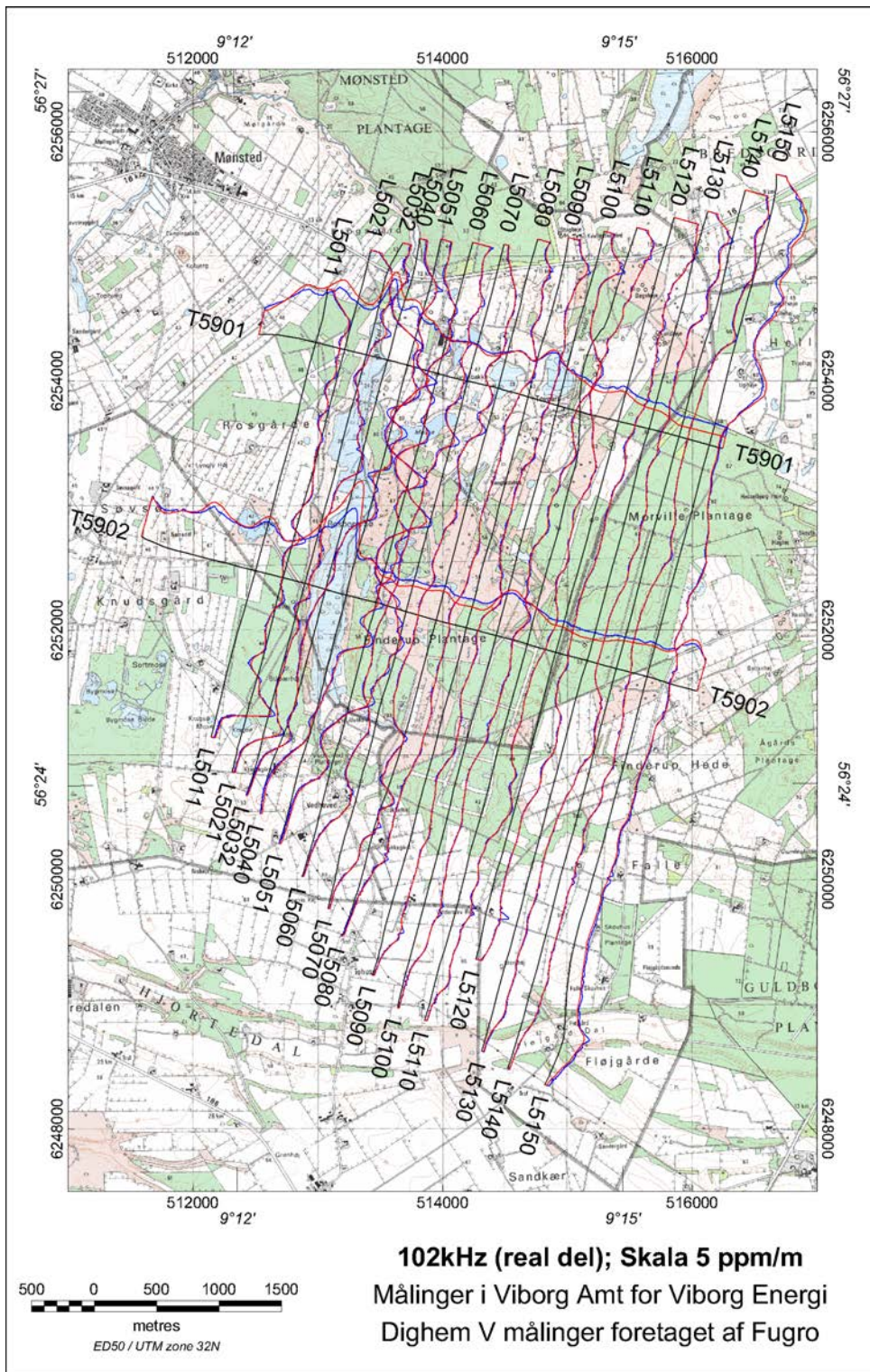
Figur C.14. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Viborg foretaget af Fugro for Viborg Energi. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



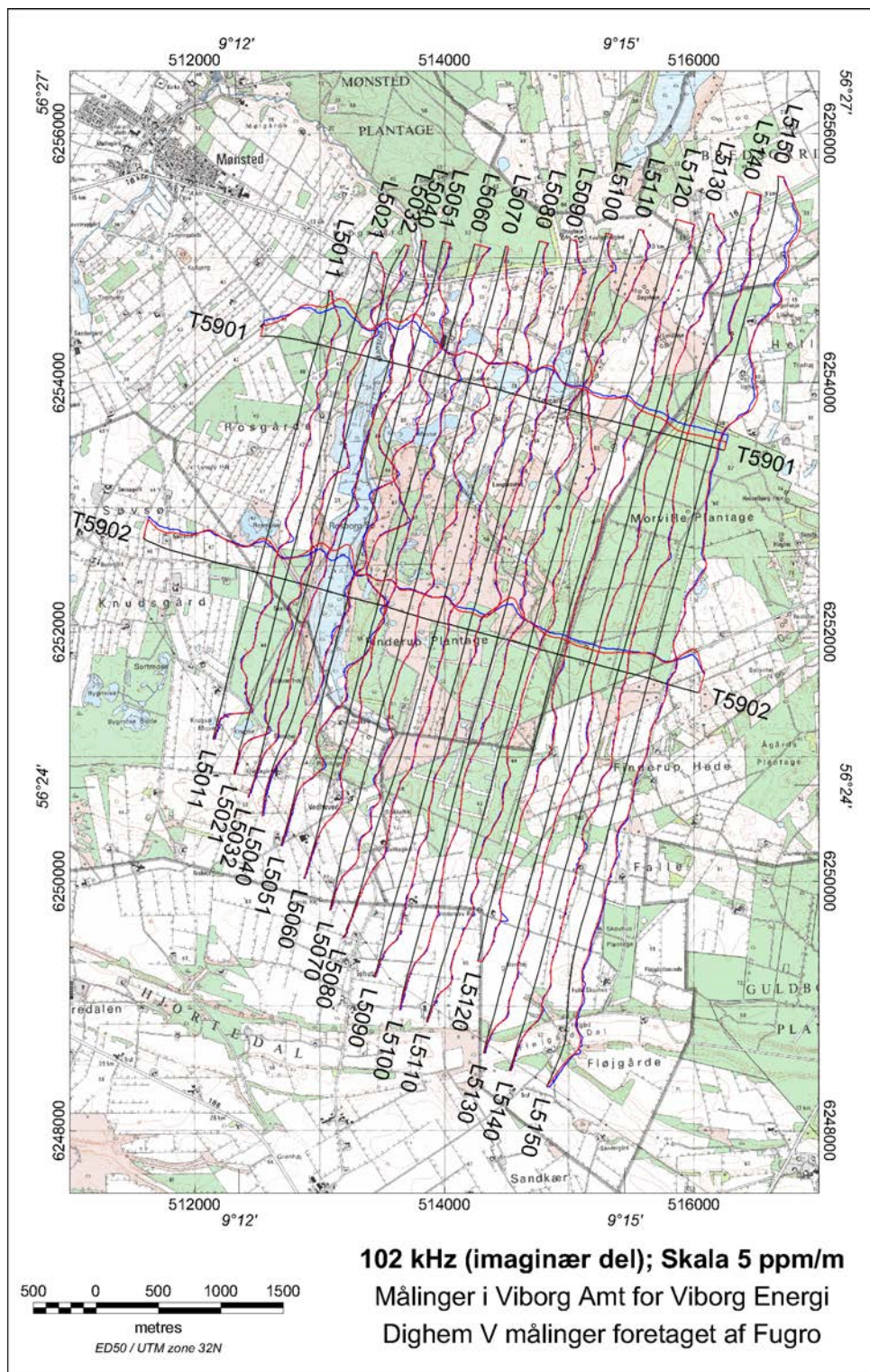
Figur C.15. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Viborg foretaget af Fugro for Viborg Energi. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



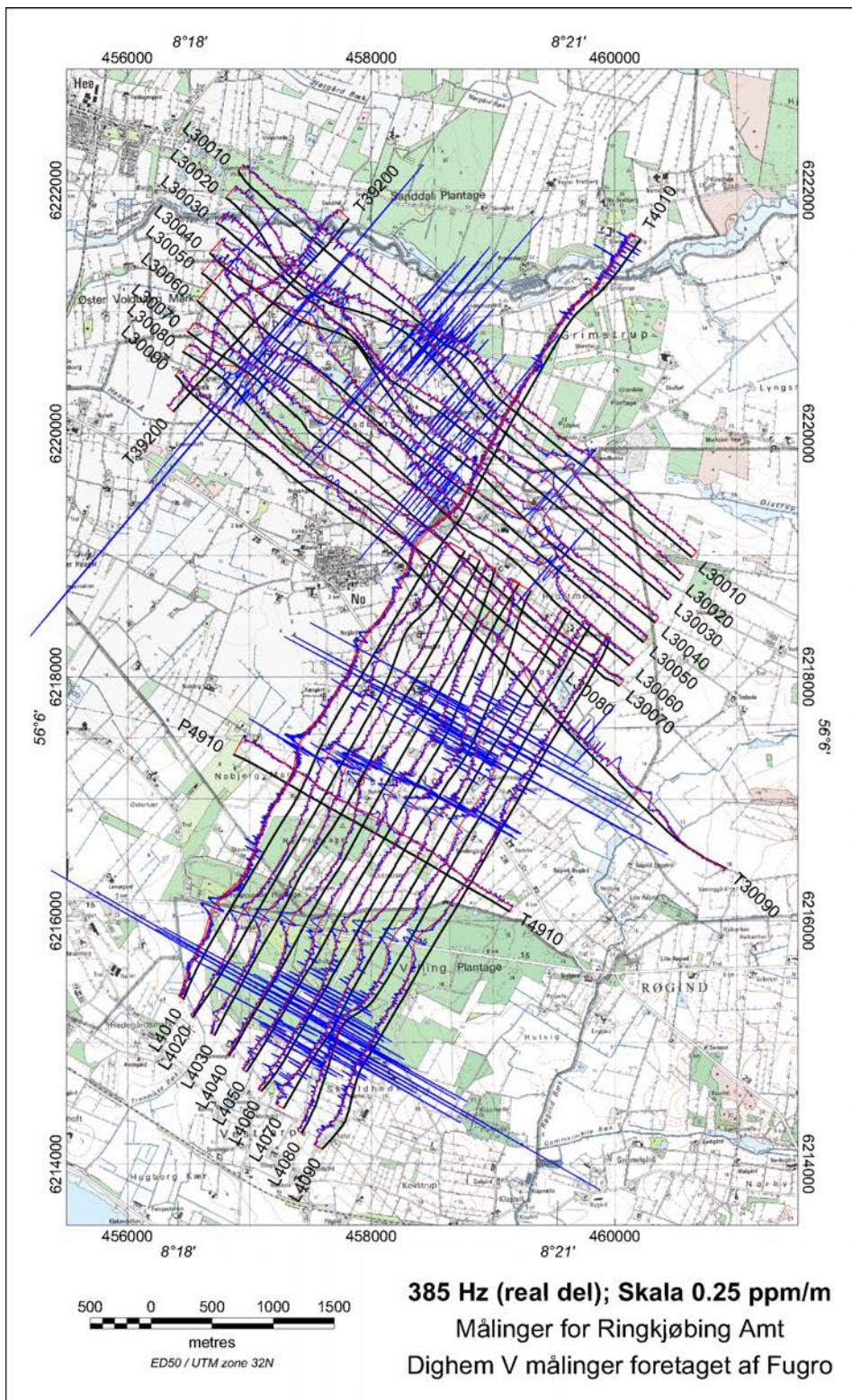
Figur C.16. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Viborg foretaget af Fugro for Viborg Energi. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



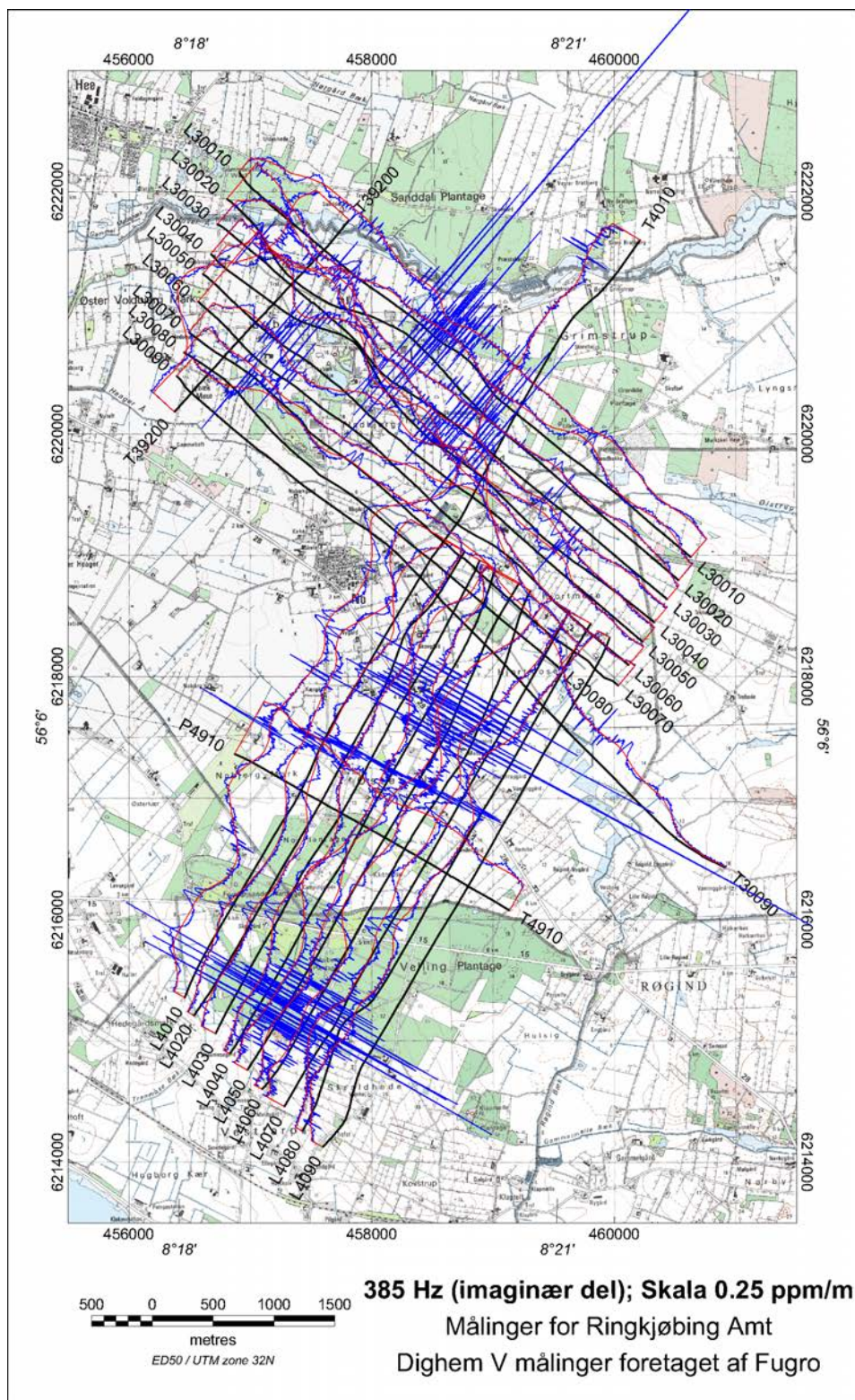
Figur C.17. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Viborg foretaget af Fugro for Viborg Energi. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



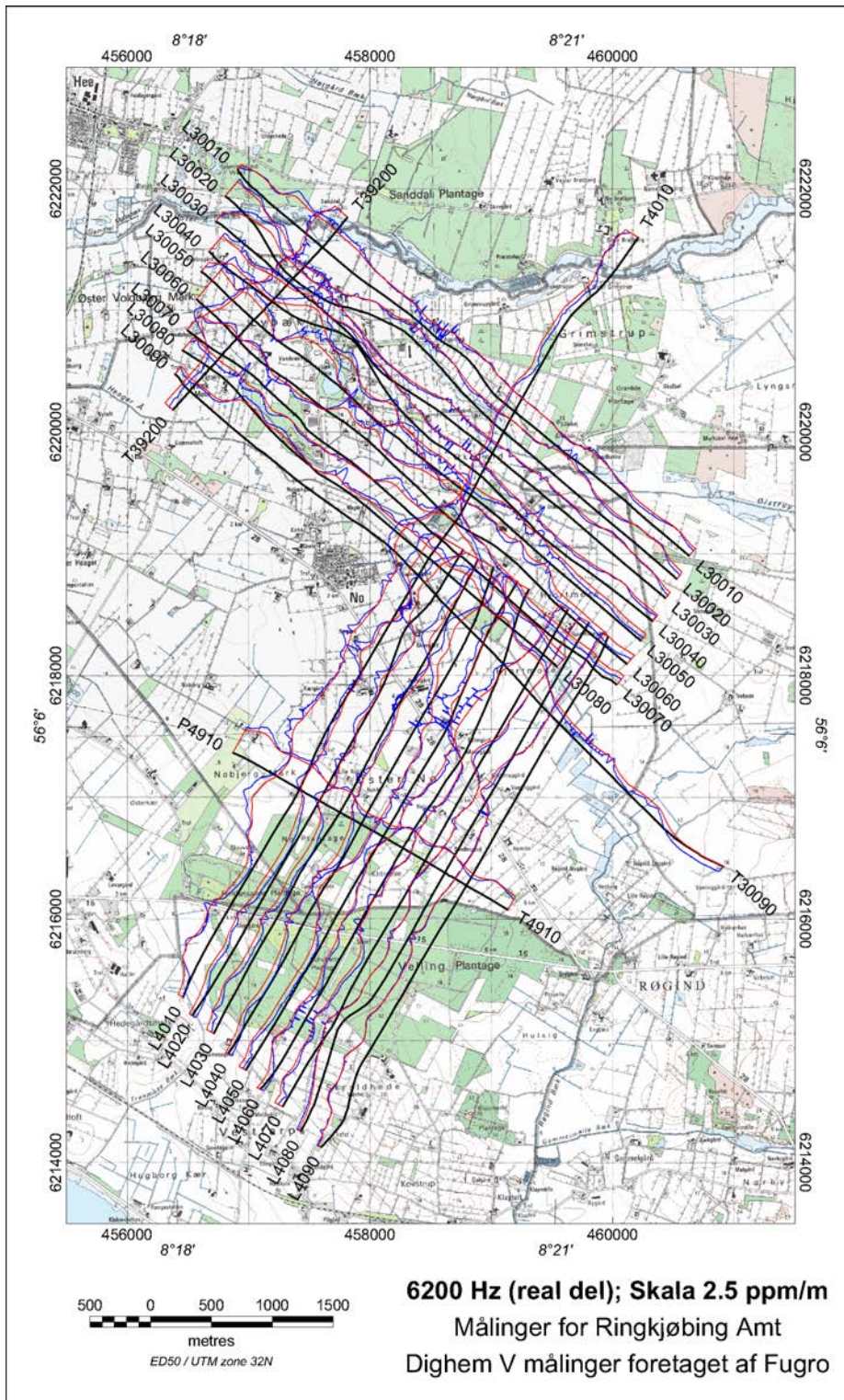
Figur C.18. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Viborg foretaget af Fugro for Viborg Energi. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



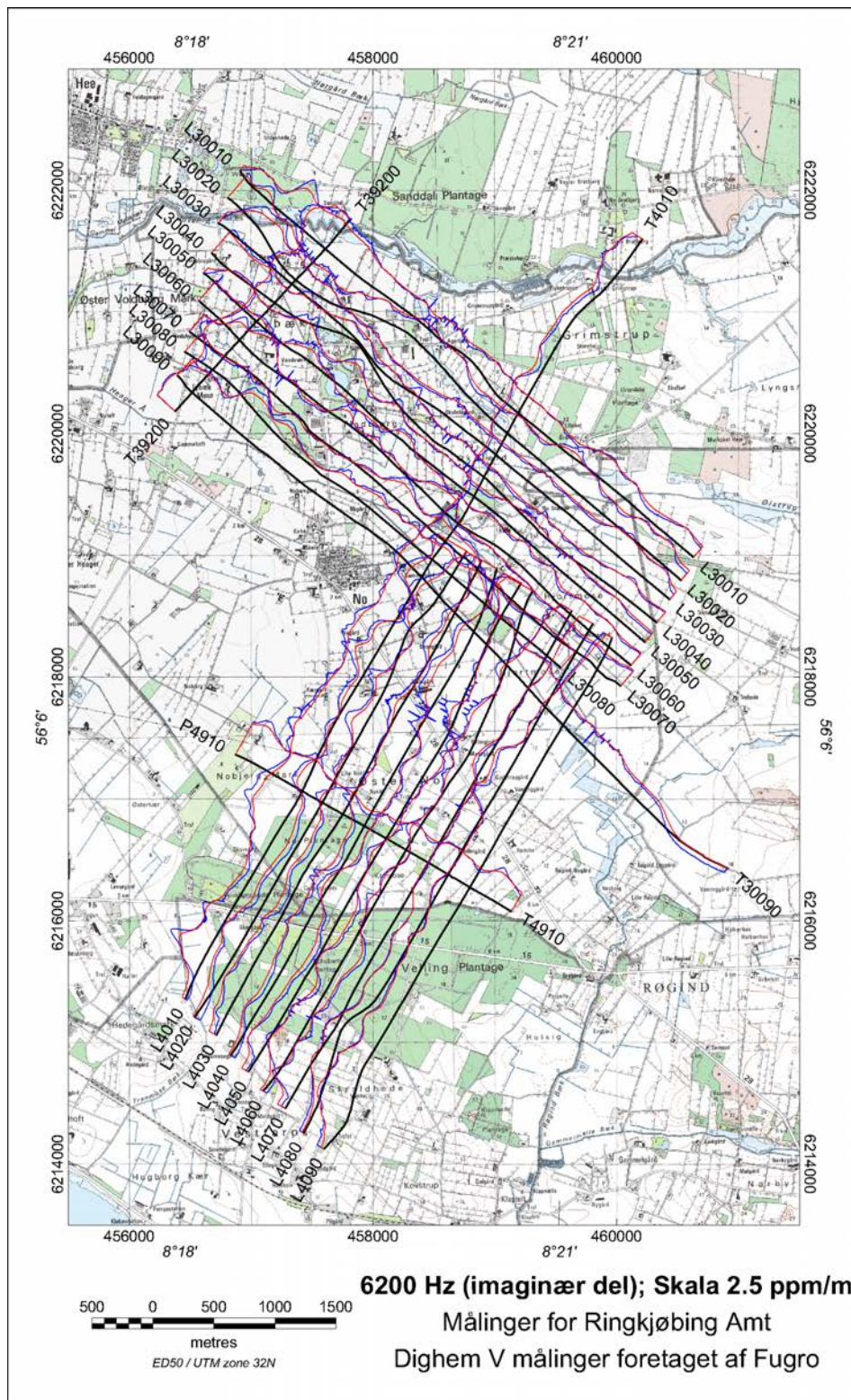
Figur C.19. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amtt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



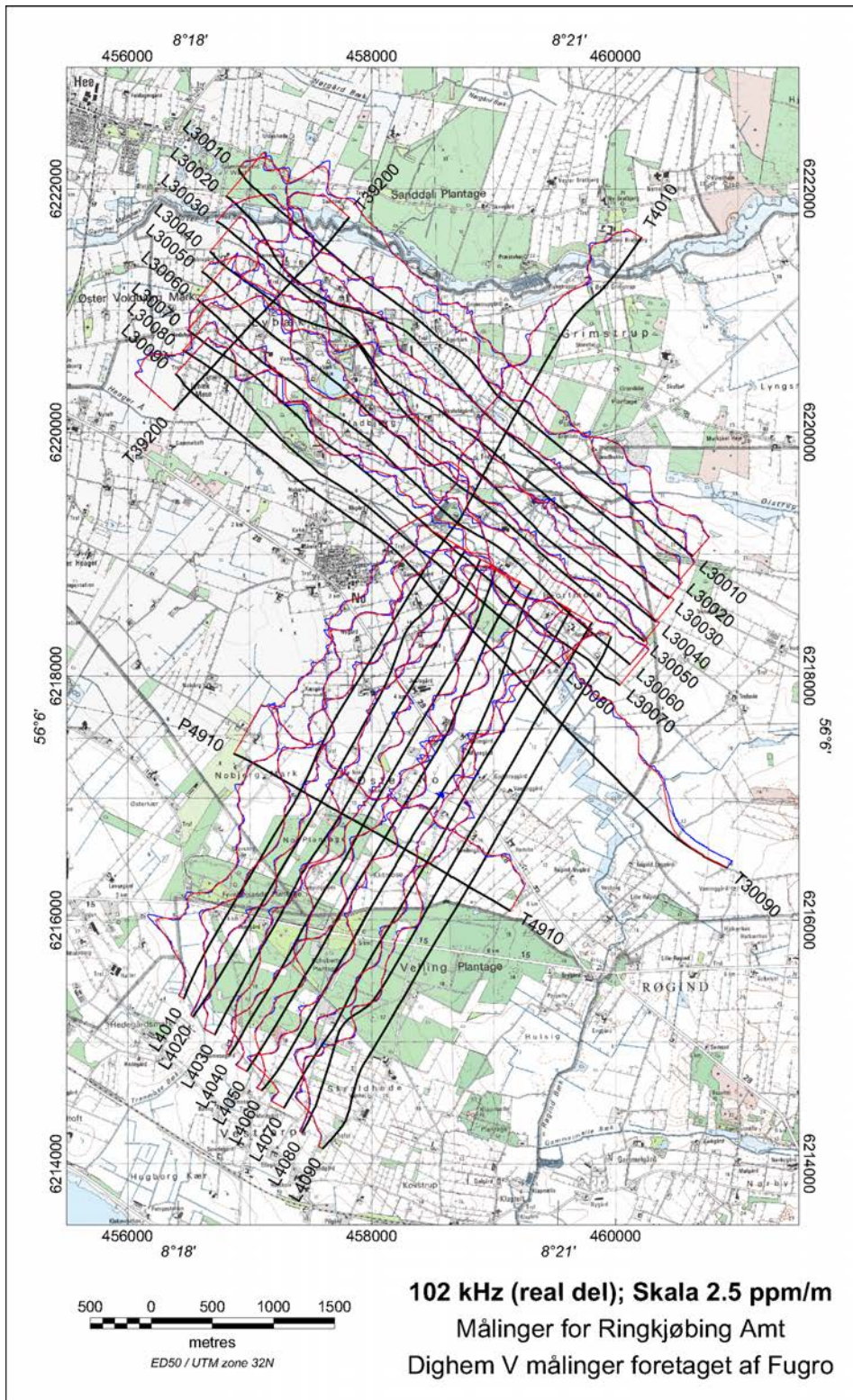
Figur C.20. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 385 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



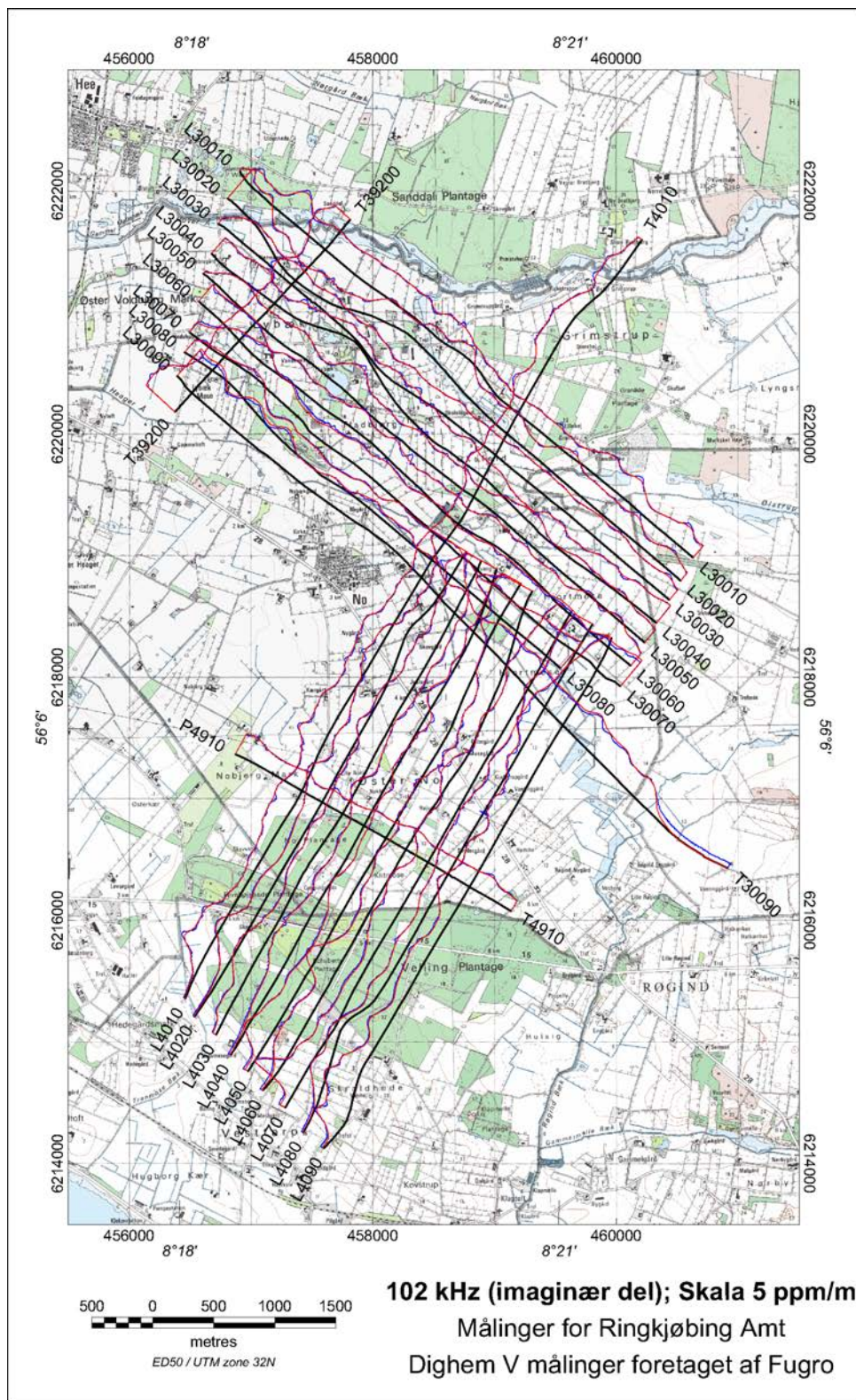
Figur C.21. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



Figur C.22. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 6200 Hz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



Figur C.23. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz real del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.



Figur C.24. Kortet viser ufiltrerede (blå kurver) og filtrerede driftkorrigerede data (røde kurver) for 102 kHz imaginær del fra Dighem^{VRES} målinger omkring Ringkjøbing foretaget af Fugro for Ringkjøbing Amt. Data er plottet således at kurvens afstand fra profil linjen (sorte linjer) er proportional med dataværdien. Skalaen i ppm/m refererer til det viste afstandsmål på kortet. En konstant værdi er subtraheret de ufiltrerede data, således at gennemsnitsværdien er den samme som for de filtrerede og driftkorrigerede data.