

# En vurdering af luftbårne elektromagnetiske frekvensdomænemeters anvendelse til

Foreløbig version

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, Ringkøbing Amt, Sønderjyllands Amt,  
Storstrøms Amt, Vejle Amt, Vestsjællands Amt,  
Viborg Amt og Århus Amt

Foreløbig version

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

# Indhold

<b>Forord</b>	<b>6</b>
<b>Indledning</b>	<b>7</b>
<b>Kapitel 1 – Resume af undersøgelsens hovedresultater</b>	<b>12</b>
Generelle overvejelser.....	12
Luftbårne elektromagnetiske systemer .....	13
Lidt historie.....	14
Karakteristika ved luftbårne transiente systemer .....	15
Vertikal opløsning .....	16
Lateral opløsning .....	18
Koblinger.....	18
Støj og kalibreringsproblemer.....	19
Konklusion .....	20
<b>Kapitel 2 – Elektromagnetiske frekvensdomænemetoder</b>	<b>21</b>
Elektromagnetiske metoder.....	21
Frekvensdomæne- og tidsdomænemetoder .....	21
Elektromagnetisk sondering i frekvensdomænet .....	22
Måleteknik og virkemåde.....	23
Real- og imaginærdel, amplitude og fase.....	25
Felter for et homogent halvrum .....	27
Den tilsyneladende resistivitet.....	29
Datapræsentation og approksimative tolkninger.....	31
<b>Kapitel 3 – Kobling til menneskeskabte installationer</b>	<b>33</b>
Kobling for TEM metoden og HEM metoden .....	33
Mekanisme.....	34
Erkendelse af koblinger .....	36
Korrektionsmuligheder.....	37
Sikkerhedsafstande til elektrisk ledende installationer.....	38
<b>Kapitel 4 – Beskrivelse af de valgte systemer</b>	<b>40</b>
Generelt om elektromagnetiske og galvaniske systemer .....	40
Elektromagnetiske systemer .....	41
Galvaniske systemer .....	42
Valg af systemer .....	42
DIGHEM systemet .....	43
PROTEM47 systemet.....	45
PACES systemet .....	51
MEP systemet.....	52

<b>Kapitel 5 – Tolkning, analyse og følsomhed</b>	<b>53</b>
Inversion af geofysiske data.....	53
Én- og todimensionale modeller for jordens resistivetsforhold .....	54
Iterativ mindstekvadraters inversion.....	54
Analyse af usikkerheden på modelparametrene.....	55
1D mangelagsmodeller og 2D modeller - glatte modeller.....	56
Regnetid og tolkningsmuligheder for de fire metoder .....	56
Utilstrækkelighed og inkonsistens .....	57
Ækvivalenser .....	59
Credo .....	60
Støj .....	60
Omgivende støj og "geologisk støj".....	60
Støjmodeller for de fire systemer .....	61
Følsomhedsfunktioner .....	64
Følsomhedsfunktioner for de fire systemer.....	66
<b>Kapitel 6 – Analyse af endimensionale modeller</b>	<b>72</b>
Modelbeskrivelse.....	72
Udvælgelseskriterier .....	72
Beskrivelse af etlagsmodellerne (homogene halvrum) .....	73
Beskrivelse af tolagsmodellerne.....	73
Beskrivelse af trelagsmodellerne .....	74
Modellernes geologiske relevans .....	74
Tolkning og analyse af modellerne .....	75
Tolkninger og analyser .....	75
Præsentation af tolkninger og analyser.....	77
Eksempler.....	77
Eksempel 1 - trelagsmodeller.....	78
Eksempel 2 - tolagsmodeller .....	81
Effekten af støj på data .....	83
<b>Kapitel 7 – Analyse af todimensionale modeller</b>	<b>87</b>
Todimensionale modeller .....	87
Beregning af todimensionale responser.....	88
Geologisk beskrivelse af modellerne .....	91
1D OG 2D tolkning af 2D responser .....	94
Mangelagstolkninger af DIGHEM <sup>VRES</sup> og PROTEM 47 responser .....	94
Fålagstolkninger af DIGHEM <sup>VRES</sup> og PROTEM 47 responser .....	94
Tolkning af PACES responser med lateralt sammenbundne 1D modeller.....	95
2D tolkning af MEP responser.....	95
Præsentation af tolkning og analyse .....	95
Mangelagstolkninger af Smal Dal.....	95
Resultater for de øvrige modeller.....	100
Konklusion .....	100
<b>Kapitel 8 – Analyse af HEM målinger fra Danmark</b>	<b>101</b>

Tolkninger og analyser .....	101
Støj og datatilpasning .....	102
Målte højder af sender- og modtagerspøler over terræn .....	103
Område Stevns, Storstrøms Amt .....	103
<b>Kapitel 9 – Konklusioner</b>	<b>113</b>
Intentioner med denne rapport .....	113
Fordele og ulemper ved HEM metoden .....	113
Vertikal opløsning .....	114
Lateral opløsning .....	115
Koblinger .....	116
Støjmodel og inversionspraksis .....	117
Andre datatyper .....	117
<b>Kapitel 10 – Anbefalinger vedrørende luftbårne undersøgelser</b>	<b>118</b>
Luftbårne geofysiske systemer og selskaber .....	118
Procedurer angående tilladelser til at foretage målinger fra luften .....	118
Procedurer for udvælgelse af selskab .....	119
EU-udbud ? .....	119
Udarbejdelse af udbudsmateriale .....	119
Vurdering af indkommende bud .....	120
Gerda-databasen .....	120
Andre typer af målinger .....	121
<b>Litteraturhenvisninger</b>	<b>122</b>
<b>Appendiks A – Katalog over 1D analyserne</b>	<b>125</b>
<b>Appendiks B – Katalog over tolkninger af 2D modeller</b>	<b>161</b>

## 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<sup>VRES</sup> systemet med eksisterende landbaserede elektriske og elektromagnetiske metoder, som er kendt fra hydrogeofysiske undersøgelser i Danmark. Det drejer sig om Multielektrodeprofilering (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 m<sup>2</sup> 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<sup>VRES</sup> systemet og til Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Henvendelsen til selskabet indeholdt en kort redegørelse for de geologiske forhold i Danmark, og problematikken omkring anvendelse af helikopterbårne frekvensdomænemålinger i hydrogeologisk sammenhæng blev skitseret.

### **Bemærk venligst at dette er en foreløbig udgave af rapporten!**

På grund af GEUS' flytning fra Thoravej til Øster Voldgade, sen levering af de geofysiske data primo juni og et uheldigt sammenbrud af en computer har det desværre ikke været muligt at få alle illustrationer klar til denne udgave, før projektlederen skulle til Grønland for at deltage i feltarbejde planlagt for længe siden. I rapportens tekst er det angivet hvor der i denne version mangler noget.

En endelig version med alt inkluderet vil blive fremstillet så hurtigt som muligt efter afslutningen af årets feltarbejde i Grønland. Den endelige version vil få et nyt rapport nummer etc. og vil uden yderligere omkostninger blive leveret til samtlige deltagende amter. Den foreløbige version vil derefter udgå.

Vi har valgt denne løsning for at give amterne adgang til rapportens nuværende indhold så hurtigt som muligt.

Leif Thorning, statsgeolog  
Afdeling for Malmgeologi, GEUS

# Indledning

Med god grund er der en stigende opmærksomhed på vandet som menneskelig 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 rprisstigninger 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 grundvandsspejlet 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. Transiente elektromagnetiske sonderinger, 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 resistivetsforhold end de jordbase-rede systemer.

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 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<sup>VRES</sup> 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 til 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 mand 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 mand 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 formodentlig 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 udarbejde en arbejdsgruppe fra GEUS og Geologisk Institut, Aarhus Universitet, en rapport om flybårne transiente systemer *En vurdering af flybårne transiente systemers anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark*, GEUS 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 forskellige 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 flybårne 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. Endvi-

dere præsenteres de enkelte systemers følsomhedsfunktioner, d.v.s. 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, d.v.s. 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. Rapporten fremlægger de sammenlignende analyser mellem jordbaserede og flybårne systemer. 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 transiente 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 systemers anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark*, GEUS 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 andre jordbaserede geofysiske metoder, hvoraf to er galvaniske metoder: Multielektrodeprofilering (MEP) og Kontinuert 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 forskellige 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 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 objektivt 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.

Frekvensdomænemetoder flyves oftest med sender- og modtagerspoler indkapslet i en beholder ophængt under en helikopter. Senderspolerne udsender kontinuerligt en vekselstrøm 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 i 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 compensation 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 lige alvorlige for frekvens- og 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.

## Lidt historie

Luftbårne elektromagnetiske metoder er blevet udviklet primært til efterforskning af malmforekomster i vidt udstrakte områder, ofte i ubejst 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 hovedsagelig 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, og 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 luftbårne 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 resistivitetsforhold, 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 resistivtetsforholdene tæt på overfladen. DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet, som analyseres i denne rapport har en højeste frekvens på 100 kHz, medens det tyske system fra BGR har en øvre frekvens på 200 kHz. Det er stadig den højeste frekvens, der er vanskeligst at kalibrere.



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

## **Karakteristika ved luftbårne transiente 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

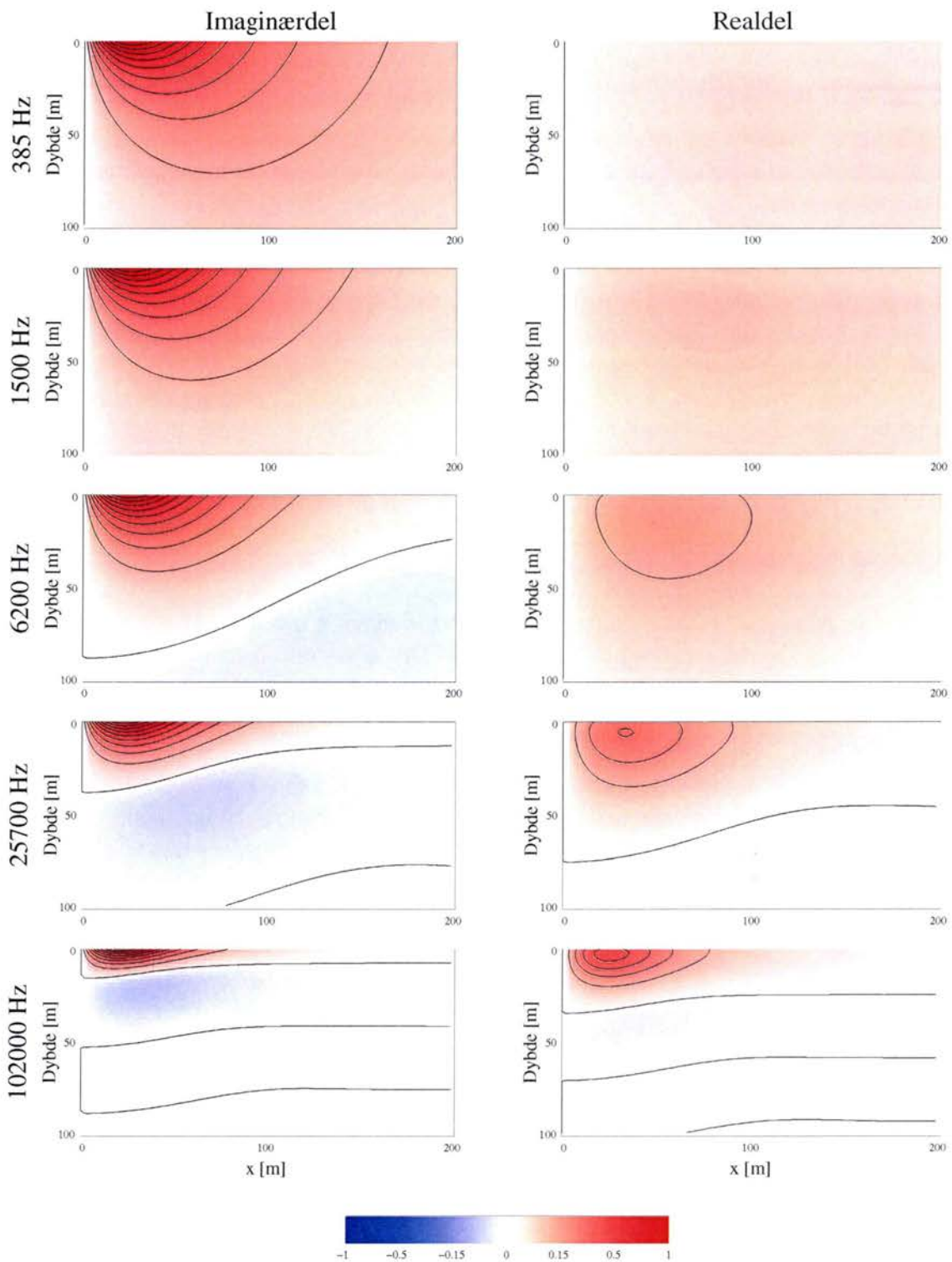
Det er begrænset, hvor lavt man kan flyve med et flybårent system, specielt over områder med mange byer, tekniske installationer, o.a. For de helikopterbårne frekvensdomænemetoder befinder beholderen med spoler sig ca. 35 m over jorden, medens helikopteren flyver i ca. 60 m højde. At måleudstyret befinder sig 35 m over jorden betyder, at man skal sende en meget kraftig strøm i senderenspolen 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 senderspolen. 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 sine målinger 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. Det har vist sig, at mangelags-tolkninger i visse tilfælde er i stand til at indikere detaljer i resistivitsvariationerne, 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.

HEM metoden har en vis opløsning af de overfladenære lag, idet den kan kortlægge tykkelsen af et toplag med lavere resistivitet end den underliggende lagserie ned til ca. 4 m, men MEP metoden kortlægger lag ned den halve tykkelse med en mindste elektrodeafstand på 5 m, og PACES metoden bestemmer endnu tyndere lag. TEM metoden er den dårligste til at bestemme tynde overfladenære lag.

Indtrængningsdybden for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet afhænger af resistivitetsfordelingen i jorden, men man kan som oftest regne med en indtrængning på ca. 50 m. I optimale tilfælde med ikke for megen ledningsevne i de overfladenære lag kan man bestemme en god leder i 100 m dybde.

De jordbaserede metoder har som hovedregel en bedre opløsning af jordens ledningsevneforhold. PACES systemet har en god opløsning i de øverste 20 m af jorden, men rækker ikke dybere. MEP systemet har en indtrængningsdybde, der er sammenlignelig med HEM metoden, men giver som regel en bedre vertikal opløsning af undergrundens resistivitsforhold. PROTEM 47 systemet har den største indtrængningsdybde af de fire systemer og giver ofte en god opløsning af de gode ledere, og man kan forvente af få opløst trelagsmodeller.





**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 maximumsværdien.

## 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<sup>VRES</sup> systemets fem frekvenser. Man ser, at strømsystemet har en betydeligt lateralt udbredelse, mere end 100 m til hver side for de lave frekvenser og noget mindre for de højere frekvenser.

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.

## 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. Effekten er større for luftbårne 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. Forstyrrelsen er derfor relativt alvorligere. Luftbårne målinger midles desuden typisk over et længere stykke end jordbaserede målinger, 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 dette forhold vil være ødelæggende for helikopterbårne målinger, er vanskeligt at forudsige, før man har gennemført en detaljeret analyse af et datasæt fra Danmark med henblik på at identificere koblinger.

Gennem analogibetragtninger med transiente systemer og en betragtning af de datasæt, vi har haft til rådighed, har vi vurderet, at der for HEM målinger vil optræde koblinger inden for en afstand på 250–300 m, og at dette vil betyde, at man må forvente koblinger på op til 60% af et undersøgelsesområde i landlige områder af Østjylland og Øerne. 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, og man er henvist alene til betragtning af profilet. Disse vanskeligheder forværres yderligere af den udbredte praksis med at midle HEM data langs måleprofilet.

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 tolkningen for at undgå fejlagtige og vildledende resultater. Dette arbejde 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 detaljprocessering med henblik på at fjerne koblinger vil medføre, at den effektive pris per kilometer pålidelige data vil blive ca. tre gange højere end det fremgår af undersøgelsesomkostningerne.

## **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 flybårne 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 varieret lineært mellem kalibreringsmålingerne, så afvigelser fra linearitet vil medføre et yderligere bidrag til fejl på målingerne.

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 kan blive vanskeligt at finde alle koblinger. Profilerne vil blive forstyrret over et område, der bliver større, jo mere de målte data midles langs profilerne. Desuden vil koblingseffekten være værre for luftbårne data end for jordbaserede systemer.

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 km<sup>2</sup> med målelinier med en tæthed på 150–250 m.

Ulemperne ved luftbårne systemer er, at de har en ringere lateral opløsning end kontinuerlige 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 vertikal, harmonisk oscillerende 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<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup> systemet, og hvilke konsekvenser det har for processering af de målte data.

Ved tidsdomænemetoder måles amplituden af et signal som funktion af tiden. Tidsdomænemetoderne 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 frekvensdomænemetoder 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 temmelig velkendt og vil ikke blive gennemgået her. Læserne henvises til *Miljøgeofysiske anvendelser af geoelektriske metoder*, Forelæsningsnoter 1999, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, *Geofysiksamarbejdets kursusmateriale* (<http://www.gfs.au.dk>) og M.H. Loke's kompendium *Lecture notes on 2D Resistivity Imaging* ([www.abem.se](http://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 frekvensdomænemetoder blev præsenteret i 1930'erne med introduktion af slingram-instrumentet, som består af en senderpole 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

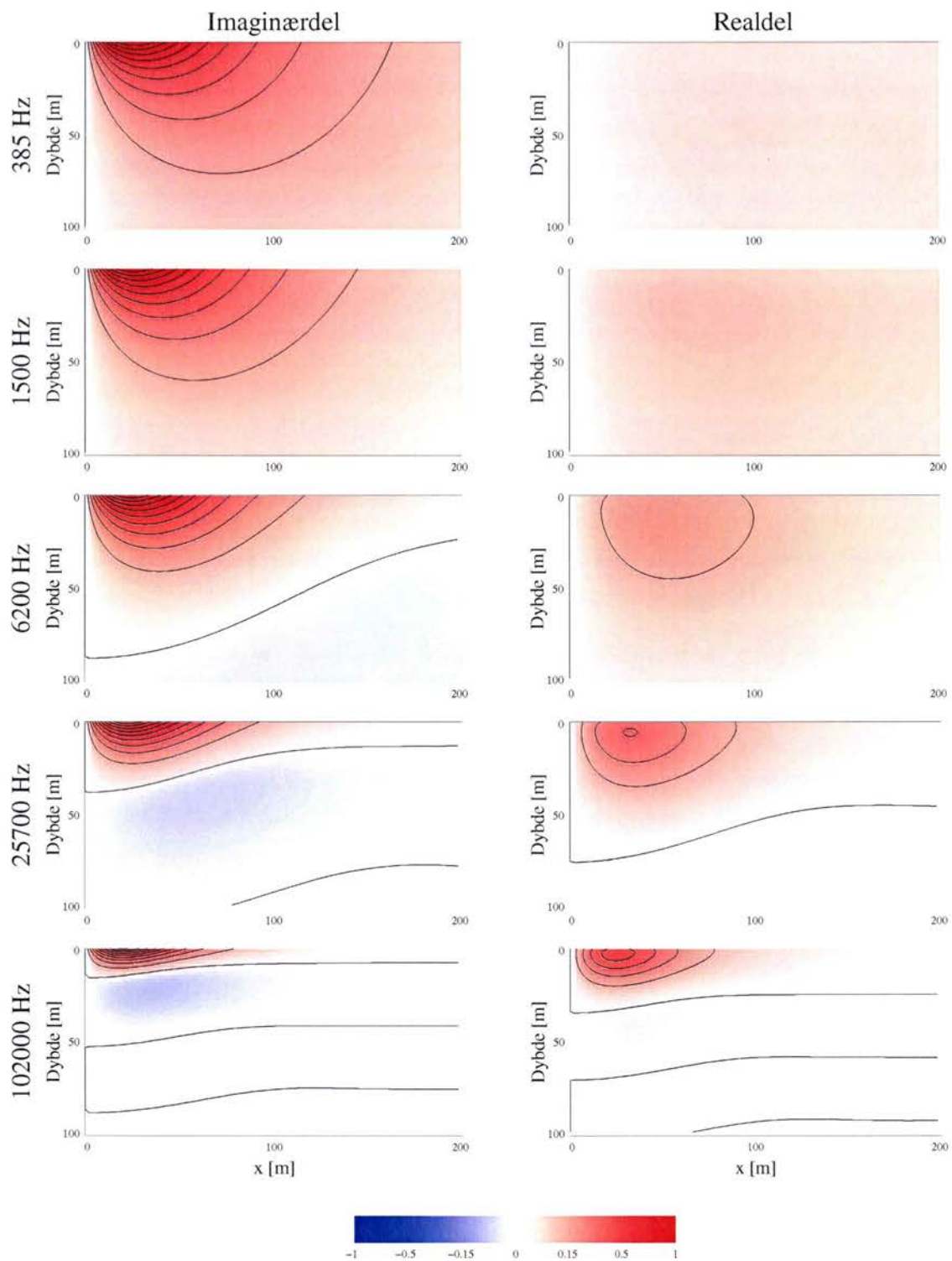
En frekvensdomænesondering foretages ved at sende en harmonisk varierende strøm igennem en senderspole, samtidigt med at den elektromagnetiske induktion måles i en modtagerspole i form af en elektrisk spænding i spolen. Den harmonisk varierende strøm i senderspolen frembringer et magnetisk felt i omgivelserne, 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<sup>VRES</sup> systemet, som blev brugt af Fugro Airborne Surveys i Danmark, var ca. 8 meter, og spoleafstanden anvendt af BGR var ca. 7 meter.

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.

De helikopterbårne målinger, som er foretaget i Danmark, 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.



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



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 bevæger sig bort fra senderspølen, 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.

Begrebet skinddybde 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,  $\omega$  er vinkelfrekvensen,  $\mu$  er den magnetiske permeabilitet,  $\sigma$  er konduktiviteten og  $\rho = 1/\sigma$  er resistiviteten. Ligning (1) gælder kun for plane bølger, hvor fasen 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  $385 \text{ Hz}$  er skinddybden  $181 \text{ m}$ , men 37% konturen ligger i dybden  $25 \text{ m}$  i afstanden  $42 \text{ m}$  fra dipolens akse, der hvor den ligger dybest. Dette illustrerer, at begrebet skinddybde ikke kritiskløst 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  $\rho$ . I praksis vil den magnetiske dipol frembringes ved hjælp af en horisontal spole, hvori der sendes en strøm, som kan beskrives ved  $I \sin(\omega t)$ .

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 og  $A_1$  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 som Spændingen induceret i modtagerspølen af sekundærfeltet kan skrives som

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

hvor  $\phi$  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  $10^6$ :

$$\text{ppm} = \frac{V_s}{|V_p|} \cdot 1000000 \quad (7)$$

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 modtagerspølerne er anbragt yderligere nogle spøler, som udkompenserer påvirkningen fra primærfeltet ved modtagerspøles position. Principperne for denne måleteknik vil blive beskrevet nærmere i Kapitel 4 i afsnittet om DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet.

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

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

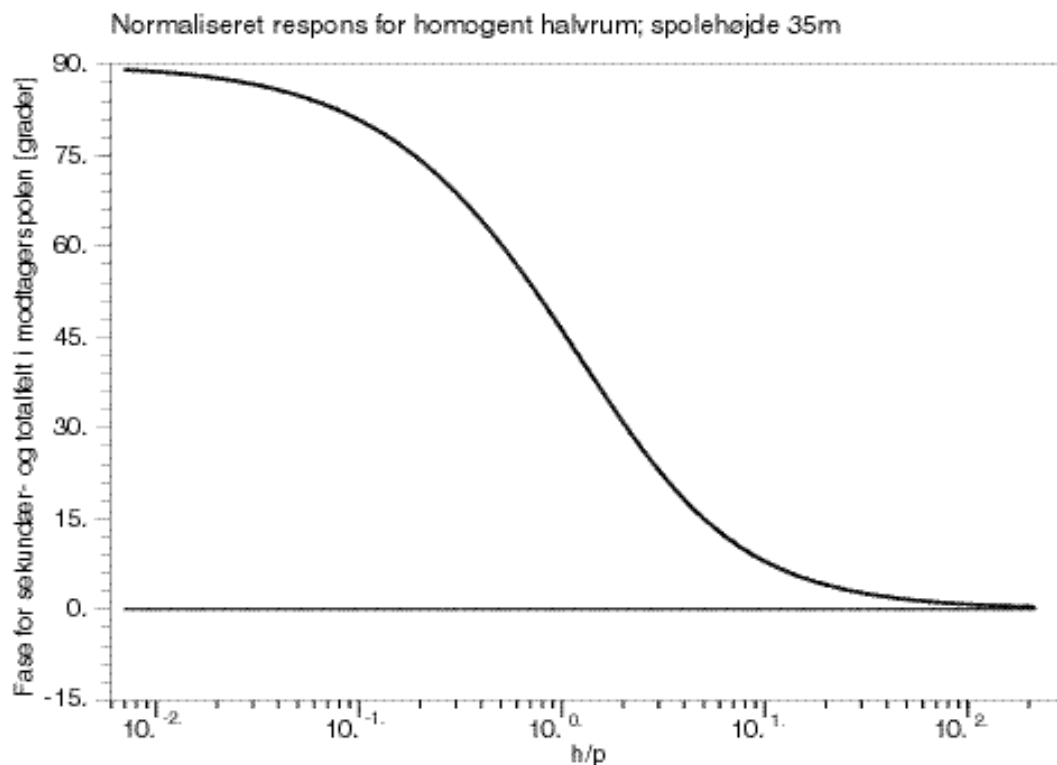
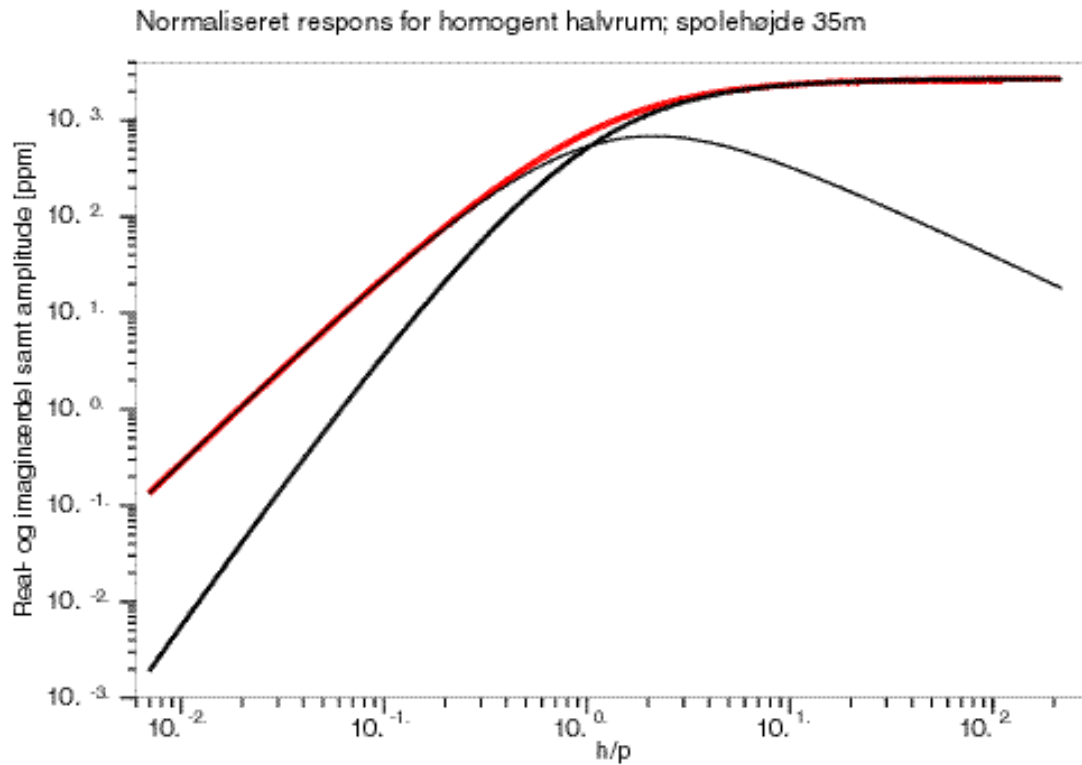
hvor spændingerne er skrevet som komplekse tal,  $R$  er en kompleks refleksionskoefficient, som afhænger af resistiviteten som funktion af dybden  $\rho(z)$ , frekvensen  $f$ , højden af spølerne over jordoverfladen  $h$  samt af bølgetallet  $k$ . Afstanden mellem sender og modtager,  $r$ , indgår i variabelen  $\gamma$ , 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

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

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  $\delta$  for værdier svarende nogenlunde til DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet ( $r = 8$  m,  $h = 35$  m). Funktionen afhænger kun af forholdet mellem højden og skindybden,  $h/p$ , og forholdet mellem spøleafstand og højden,  $\gamma = r/h$ . I Figur 2.2 er vist real- og imaginærdel og amplitude for sekundærfeltet samt fasen for total- og sekundærfeltet. Bemærk at totalfeltets fase er næsten nul, dvs. identisk med primærfeltets fase. Dette viser, at sekundærfeltet er en meget lille brøkdel af primærfeltet.



**Figur 2.2.** Øverst: real- og imaginærdel af spændingen i modtagerspolen induceret af sekundærfeltet er vist med henholdsvis en fed sort streg og tynd sort streg. 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. Nederst: Fasen af sekundærfeltet (fed streg) og totalfeltet (tynd streg).

For den viste konfiguration ses, at både amplituden og realdelen er monotont voksende funktioner, hvorimod imaginærdelen har et maksimum i nærheden af det punkt, hvor skindybden er lig med højden. 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 skindybde, 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  $\delta$ , og dermed - for en given flyvehøjde - 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.

Moderne flybårne systemer anvender radar- eller lasermåling til bestemmelse af højden af spolerne over jordoverfladen. 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  $\delta$  på abscissen. Når højden  $h$  kendes, kan man derefter bestemme den tilsyneladende resistivitet, idet

$$\delta' = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}} \Rightarrow \rho_a = \frac{\mu\omega h^2}{2\delta'^2} \quad (10)$$

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.

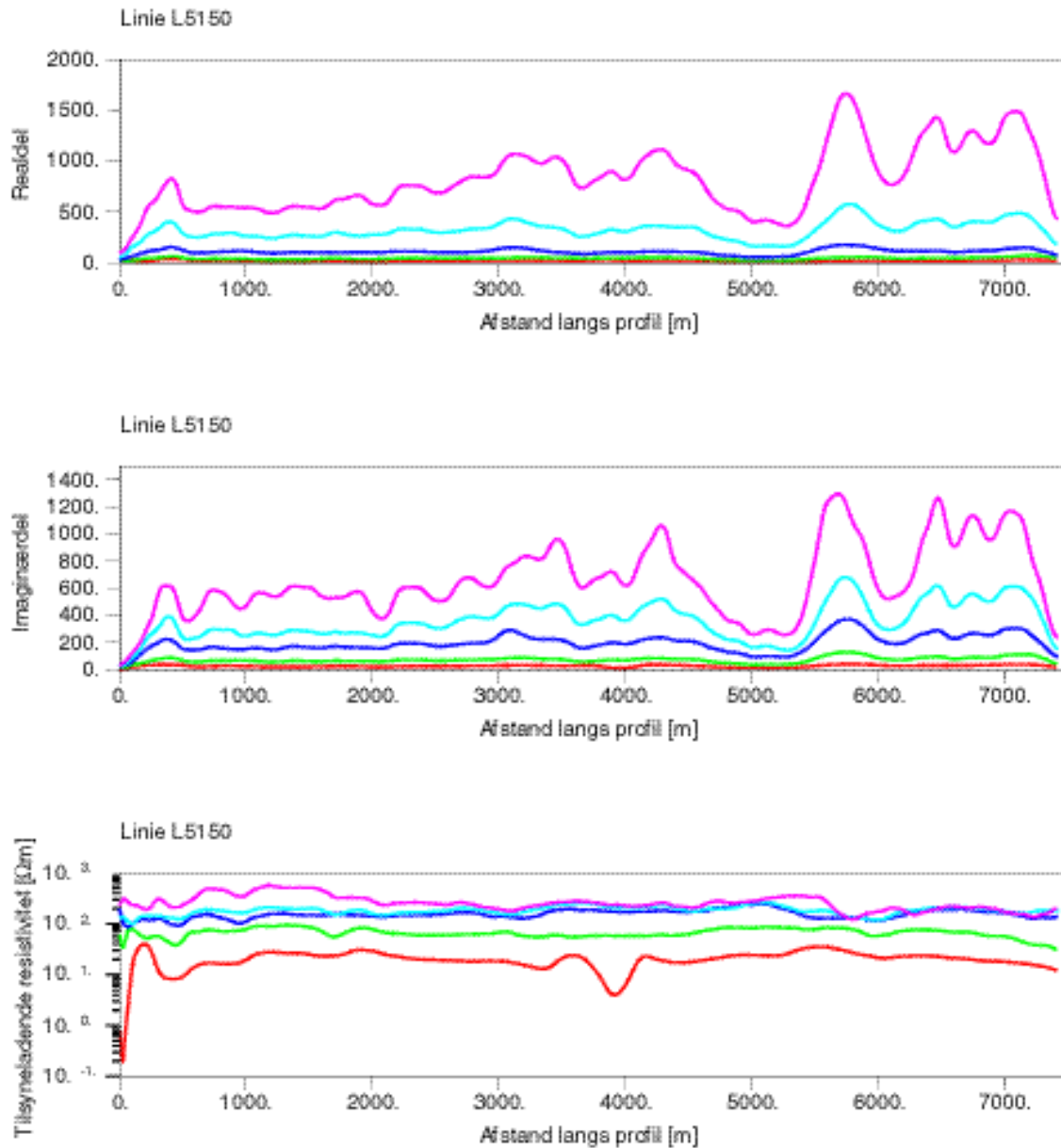
Der vil dog ofte være usikkerheder på højdebestemmelsen, idet vegetation og bygninger påvirker målingerne. Hvis højden af spolesystemet ikke er kendt eller vurderes som usikker, er det muligt at bestemme en tilsyneladende højde ved først at bestemme værdien af  $\delta = h/p$  ved hjælp af fasen og derefter 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 formel (10), og den tilsyneladende resistivitet kan bestemmes.

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.



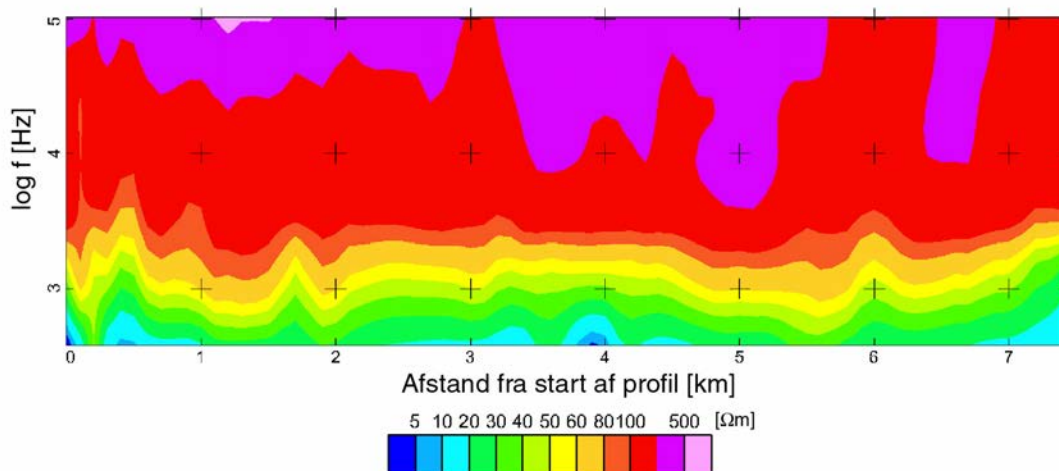
**Figur 2.3.** Figuren viser, øverst, realdele og, i midten, imaginærdele af responset langs et profil i Viborg Amt målt af Fugro Airborne Surveys for Viborg Energi med DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet. Real- og imaginærdele er normeret med primærfeltet og angives i enheden ppm. De anvendte frekvenser 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<sup>VRES</sup> survey for Rambøll, Viborg area, Denmark.]

## Datapræsentation og approksimative tolkninger

Transformationen af de målte elektriske spændinger til tilsyneladende resistivitet vil give en bedre intuitiv opfattelse af resistivetsforholdene end en præsentation i form af real- og imaginærdelene af de inducerede spændinger i modtagerspølen. 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, linje 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.

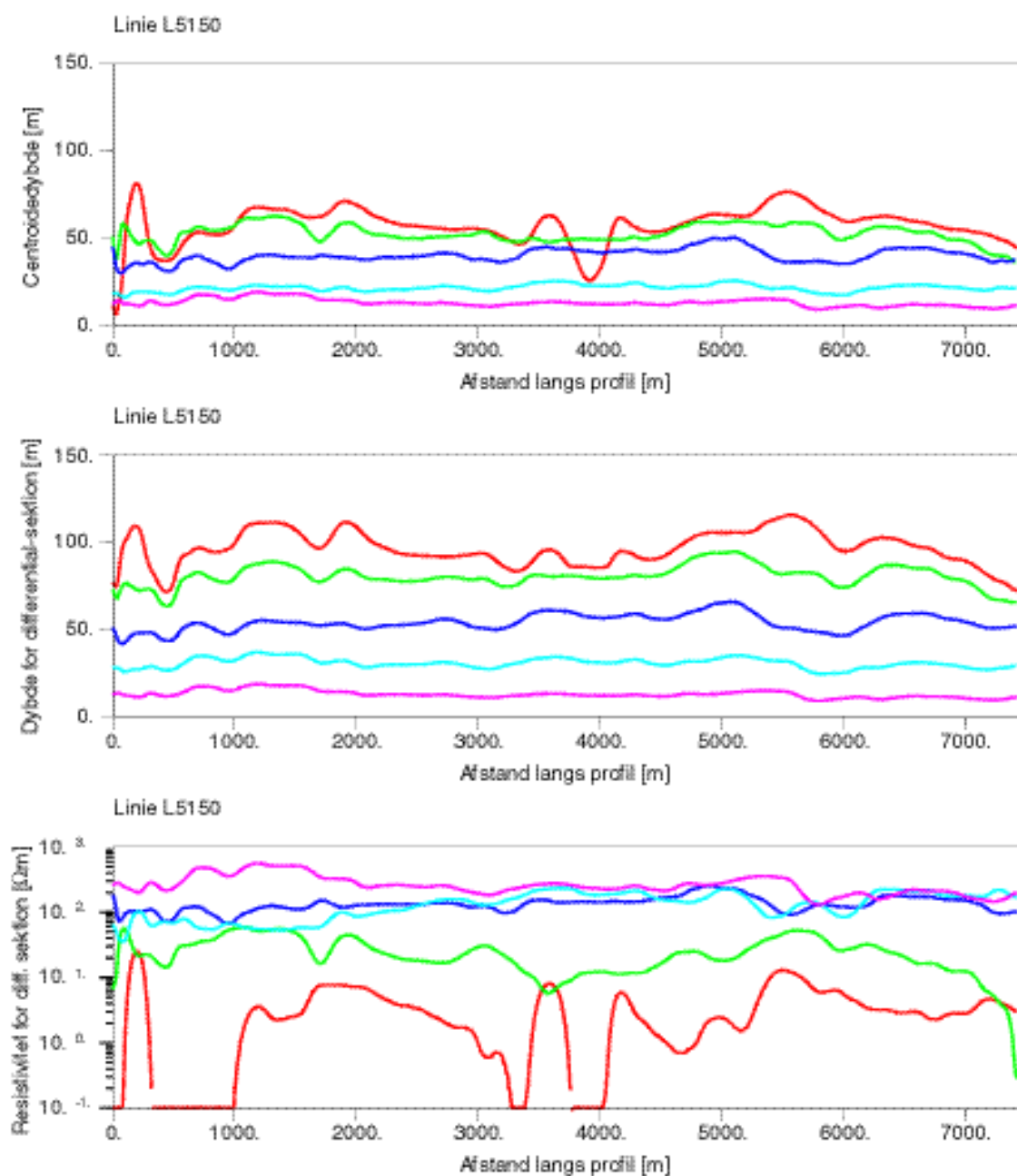
Man kan præsentere de målte data, eller rettere transformationer af data til tilsyneladende resistiviteter, i en såkaldt *pseudosektion* ved interpolation langs profilet. Som dybdeakse kan anvendes logaritmen til frekvensen. Ordet pseudosektion refererer til, at der i disse plot ikke er en angivelse 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 (2001).

Konvertering til dybde i Sengpiel sektioner 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.



**Figur 2.4.** Pseudosektion for data vist i Figur 2.3. [DIGHEM<sup>VRES</sup> survey for Rambøll, Viborg area, Denmark.]

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 2.5.** Øverst: beregnede centroiddybder for samme profil som vist i Figur 2.3. I midten: dybder og, nederst, resistiviteter beregnet for en differential section tolkning. [DIGHEM<sup>RES</sup> survey for Rambøll, Viborg area, Denmark.]



## 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

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 rapportens 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 ligeledes 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 fjernes inden en tolkning af data for at undgå fejlagtige og vildledende tolkninger.

Der er i Danmark foretaget 4–5 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.

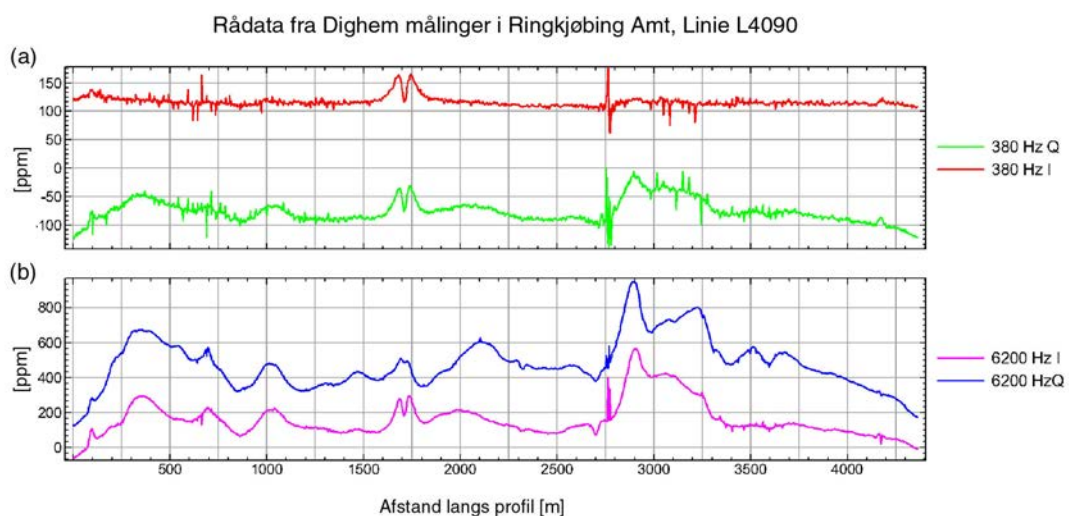
Koblingsfænomenerne til menneskeskabte installationer kan inddeles i kapacitive koblinger og galvaniske koblinger, se GEUS TEM rapporten (Christensen et al. 2000). De kapacitive koblinger er kendetegnet ved, at installationen opfører sig som en L-C-R kreds, hvis respons er svingende med en amplitude, 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 kreds, hvis respons ikke svinger, men blot falder eksponentielt med tiden. Strømmen i den koblende kreds løber i den elektriske leder og galvanisk ud i jorden enten gennem overfladen af lederen eller gennem jordingspunkter, som så danner returvejen for kredsen.

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 koblingsresponserne sig

ofte 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 5.4 i Kapitel 5. Koblingen i Figur 3.1 ved profilkoordinat 1700 m fylder ca. 300 m i bredden for 385 Hz og ca. 250 m i bredden ved 6.2 kHz.

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.



**Figur 3.1.** Figuren viser real- og imaginærdel for 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 højspændingsføring.

Hvis man overfører disse erfaringer til de koblinger, der optræder i forbindelse med kontinuerlige 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 lille effektive udstrækning af koblingslegemet og den eventuelle dæmpning vil responset aftage hurtigt med afstanden,  $r$ , til det, dvs. hurtigere 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 kontinuerte, 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 ved visuel inspektion at se koblingsfænomener i de enkelte sonderinger, og der er stort set kun mulighed for at bedømme koblinger ved en betragtning af variationerne langs det målte profil. 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.

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.

Det er standard i processeringen af HEM data at foretage 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 vanskeligere 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 ikke praktisk muligt ved HEM metoden at tilrettelægge sine profillinier således, at de ikke skærer ledende installationer. Man kan blot gøre sit bedste for at minimere antallet af overskæringer.

## **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 jordresponsen og koblingsresponsen 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 karakteristikk, 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 karak-

teristik. Læg dertil, at denne karakteristik 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 datasæt, der er forvrængede, og at fjerne dem før en videre processing og tolkning foretages.

## **Sikkerhedsafstande til elektrisk ledende installationer**

Koblingen mellem en senderspole 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 koblingsresponsen 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 modtageren er ligeledes omvendt proportional med afstanden, uafhængig af om modtageren befinder sig på jorden eller i luften. Derfor aftager koblingsresponsen 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 nødvendigt 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, men der er ingen tvivl om, at sikkerhedsafstandene skal være større end for jordbaserede TEM målingers vedkommende. 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. Størrelsen af koblingerne vil imidlertid være den samme på jorden og i luften, og de vil derfor være relativt alvorligere i luften. Til gengæld vil koblingsresponsen erfaringsmæssigt aftage hurtigere med afstanden for de høje end for de lave frekvenser.

Vi vil vurdere, at sikkerhedsafstanden vil være en smule større for de høje frekvenser end for jordbaserede TEM sonderinger, dvs. af størrelsesordenen 200 – 250 m, medens den skal være noget større for de lavere frekvenser, af størrelsesordenen 250 – 300 m. Disse afstande vil i mange tilfælde, på grund af den store koncentration af menneskeskabte elektrisk ledende installationer i Danmark, reducere størrelsen betydeligt af de områder, man kan kortlægge, formodentlig ned til 40% af undersøgelsesarealet, såfremt der er tale om et typisk område på landet i Østjylland eller på Øerne.

En præcisering af disse vurderinger må afvente en detaljeret analyse af et datasæt fra en dansk undersøgelse.

## 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 helikopterbårent system, som i sin oprindelige udformning benævnes DIGHEM systemet. Fugro markedsfører to typer, DIGHEM<sup>VRES</sup> (V for fem frekvenser) og det nyudviklede DIGHEM<sup>RESOLVE</sup> med seks frekvenser, mens BGR anvender en modificeret udgave af DIGHEM<sup>VRES</sup> 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, Kontinuert Elektrisk Sonderingsmetode, PACES (Pulled Array Continuous Electrical Sounding), og Multielektrodeprofilering (MEP).

Det indledende arbejde med denne rapport inkluderede også et flybårent frekvensdomænesystem fra Finlands Geologiske Undersøgelse som en repræsentant for et flybårent 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 typer metoder reagerer på jordens resistivetsforhold: de galvaniske metoder kortlægger *forholdet mellem resistiviteter* eller, ækvivalent hermed, forholdet mellem konduktiviteter, medens de elektromagnetiske metoder kortlægger jordens *absolute 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  $\Omega\text{m}$ , 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 pulssagtige forløb af strømstyrken, som har givet anledning til benævnelsen *transient* system og transiente målinger. Henfaldet af magnetfeltet fra stømmene 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 forgår 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 signaler fra sekundærfeltet. Ved at installere yderligere spoler mellem sender- og modtagerspølen søger man at udsukke 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 frekvensdomænemetoderne. 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 modtagerspølenes 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 elektriske 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 jorden elektriske ledningsevne. Som regel gennemføres en måling som en middel over målingern fortaget 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<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup> systemet er valgt af flere årsager. Systemet er det mest anvendte system for helikopterbårne frekvensdomænemetoder 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<sup>RESOLVE</sup>, 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 elektrokonfigurationer. Der udtages en måling for hver ca. 1.5 m.

MEP systemet består af et mindre antal kabler med ækvivalente elektrodeudtag med enhedsafstande mellem to og ti meter, 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 resistivitetsinstrument. I måleproceduren gennemløbes en protokol af forskellige elektrokonfigurationer, og målingerne gemmes på computeren. De fleste systemer anvender en *roll-along* teknik, hvor man først måler de elektrokonfigurationer, 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<sup>VRES</sup> med mindre andet er specificeret.

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

### **Sender**

- Sendersløjens orientering: Spolerne er placeret i en beholder ophængt ca 30 meter 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.
- Sendersløjens højde over terræn: Nominelt 30 m.
- Frekvenser : Frekvenserne kan variere noget mellem forskellige målekampagner. For målingerne i Danmark med DIGHEM<sup>VRES</sup> 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, 183 kHz, 8.61 kHz, 41.3 kHz og 192 kHz. For DIGHEM<sup>RESOLVE</sup> systemet har Fugro Airborne Surveys foreslået en frekvens på 1789 Hz som frekvens no. 6 i en koaksial konfiguration.
- Dipol moment : For DIGHEM<sup>VRES</sup>

385 Hz: 310 Am<sup>2</sup>  
1.5 kHz: 175 Am<sup>2</sup>  
6.2 kHz: 70 Am<sup>2</sup>  
25.7 kHz: 35 Am<sup>2</sup>  
102 kHz: 18 Am<sup>2</sup>

Sendermomenterne for DIGHEM<sup>RESOLVE</sup> systemet afviger ikke væsentligt fra DIGHEM<sup>VRES</sup> 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 forelået at DIGHEM<sup>RESOLVE</sup> anvendes med en koaksial konfiguration for frekvens nummer 6 foruden de ordinære fem frekvenser svarende til DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet.
- Højde over terræn: Samme som senderspole, dvs. nominelt 30 m.
- Sensortype: induktionsspole.

### Magnetisk system

- Type: Cesiumdamp. Digital registrering
  - Følsomhed: 0.001 nT.
  - Magnetometer output interval: 0.1 s (~3 m)
  - Højde over terræn: 30 m under helikopteren.
- Navigation
- GPS receiver: Differentiel 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 procedureerne for kalibrering.

I Kapitel 2, Figur 2.2, fremgik det, at primærfeltet er væsentligt større end det sekundære felt, og at fassen 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 foretages 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 afslutning 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 fassen og forstærkningen (gain) defineres for de efterfølgende målinger. Eventuelle ændringer i fassen 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.

## **PROTEM47 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 m<sup>2</sup>.
- Antal vindinger: 1.
- Kurveform: Den nominelle bølgeform er en bipolar firkantbølge. Slukketid på 0.0025 ms.
- Maksimalt sendermoment (dipolmoment): 4800 Am<sup>2</sup>
- 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: Vertikalkomponenten måles.
- Konfiguration: Central loop.
- Højde over terræn: På jordoverfladen.
- Sensortype: induktionsspole.
- Antal vindinger: 8.
- Effektivt areal: 31.4 m<sup>2</sup>, båndbredde 450 kHz.
- Samplingsfrekvens: Baseret på tidsvinduer (kan ikke defineres).
- Samplingsinterval: Baseret på tidsvinduer (kan ikke defineres).
- 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.
- Filtre: Modtagerspølsens og forstærkerens 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

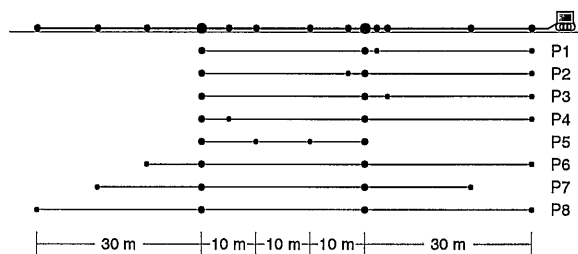
Ingen.

### 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 middelværdi 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 per feltdag.

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	Pot1	Pot2
P1	+45	17
P2	+45	12
P3	+45	19
P4	+45	-10
P5	+5	-5
P6	+45	-25
P7	+34	-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 ækvidistante elektrodeudtag med enhedsafstande mellem to og ti meter, 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 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.

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](http://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 resistivitetsforhold 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 resistivitetsforhold. 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 resistivitetsforhold, 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 resistivitetsvariationer i jorden, men man kan bestemme de overordnede strukturer. En analyse af, hvad de enkelte metoder kan opløse, præsenteres i Kapitel 6 og 7.

## Én- og todimensionale modeller for jordens resistivitetsforhold

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 resistiviteter og lagtykkelser for at tilpasse data. Modellen er karakteriseret ved sine *modelparametre*: resistiviteterne 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 resistiviteterne 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 resistiviteterne 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 forgår i en række trin:

- Tolkningsprogrammet 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 modelresponsen tilpasser data bedre. Hertil har man brug for at vide, hvorledes modelresponsen ændrer sig, hvis man ændrer modellen, dvs. man må beregne de afledede af modelresponsen 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 modelresponsen 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,  $\Delta_{rel}$ . Denne relative usikkerhed er fremkommet som en absolut usikkerhed på logaritmen til parametrene, hvilket betyder, at en relativ usikkerhed,  $\Delta_{rel}$ , 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 indefor 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 og 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 brøkdele af et sekund på en moderne PC. Regnetiderne er sammenfattet i nedenstående tabel:

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

## 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, såkaldt *2D effekt*, 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 50m dybde vil altså inddrage et volumen med ca. 100 m radius. Mere præcist kan man sige, at det område, inderfor 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. resistivitetsvariationer 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 strømlektroderne. 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 er højmodstandsækvivalens, lavmodstandsækvivalens, resistivitetsækvivalens og lagundertrykkelse.

### **Højmodstandsækvivalens**

For et højmodstandslag mellem lag med lavere resistivitet vil det være vanskeligt at bestemme resistivitet og tykkelse uafhængig 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 uafhængig 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 60–80Ωm, 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 jordens resistivitetsstruktur ikke er endimensional. Data vil naturligvis afspejle jordens faktiske dimensionalitet, og afvigelser fra endimensionalitet må opfattes 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  $\Delta_{\text{rel}}$  er den totale relative støj, og  $s$  er den absolutte støj på datummet  $d$ .

## 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  $n$  angiver 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 har tidligere vist, at data kan reproducere med mindre end 2% fejl.

## HEM

Den eneste måde, hvorpå man kan eliminere støjklunders 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 helikopterborne målinger fremføres instrumentet med en hastighed på ca. 30 m/s, og tidsintervallet for hver midling er for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet på 0.1 s, hvilket vil sige, at der midles over ca. 3 m. For den laveste frekvens i DIGHEM<sup>VRES</sup> 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 meter ikke siges at være urimelig, idet responset fra jorden må forventes ikke at ændre sig meget over 3 meter.

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 man antager, at driften i systemet har været lineær mellem højtflyvningsmålingerne. Årsagerne til driften i systemet er bl.a. de skiftende tempe-

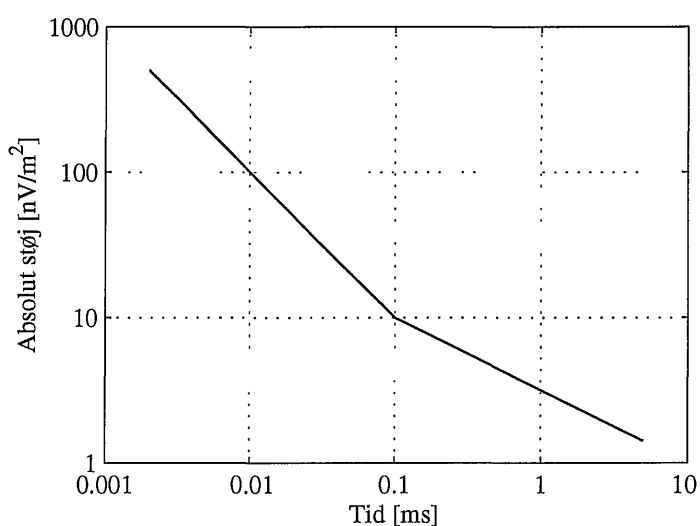
raturer under målingerne, idet spoleafstanden vil ændre sig på grund af termisk udvidelse. Som støjmodel for et HEM system vil vi antage, at der er en absolut støj på real- og imagi- nærdel, som er lidt forskellig for de forskellige frekvenser og generelt stiger med frekven- sen. Denne støj stammer fra elektronikken og fra tilfældige påvirkninger, bl.a. vibrationer af spoлеbeholderen. Desuden vil vi antage, at den korrektion, der finder sted på baggrund af højtflyvningsmålingerne ikke er helt korrekt, idet variationerne ikke er helt lineære. Vi anta- ger et støjbidrag på 15% af den typiske drift mellem højtflyvningsmålingerne. I tabellen ne- denfor ses de støjbidrag, vi har regnet med i overensstemmelse med Fugro Airborne Sur- veys.

Frekvens	Tilfældig støj	15% af driften	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 5.1.** Tabellen viser støjbidragene fra den tilfældige støj og fra nonlinearitetsfejlen på datakorrektionen for de fem frekvenser for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet.

## 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  $\mu$ s, og den abso- lutte størrelse til denne tid er 10nV/m<sup>2</sup>. Nedenfor ses et plot af denne støjmodel. Den byg- ger på, at de tidsvinduer, inden for hvilke der midles ved en TEM måling, vokser proportio- nalt med tiden, og at der midles over 1 000 målinger.



**Figur 5.1.** 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 5.2.

Én 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:

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

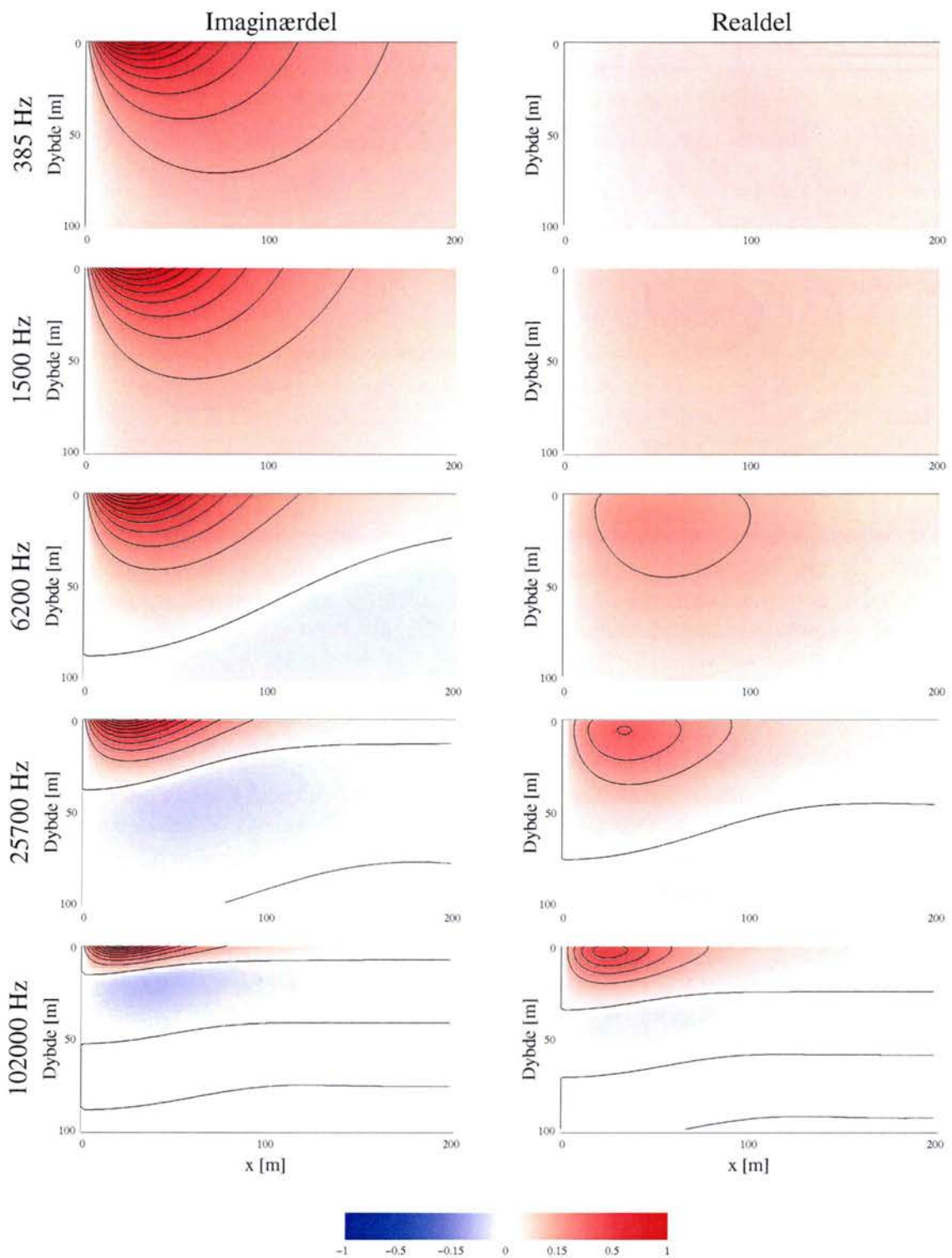
hvor  $\mathbf{r}_{\text{kilde}}$  og  $\mathbf{r}_{\text{modtager}}$  er stedvektorerne for henholdsvis kilde og modtager, og  $\mathbf{r}$  er stedvektor for et punkt under jordoverfladen.

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 det homogene 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.





**Figur 5.2.** Figuren viser real- og imaginærdelen af strømtætheden i et homogent halvrum med resistiviteten 50 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.

## Følsomhedsfunktioner for de fire systemer

Følsomhedsfunktionerne for de fire systemer illustreres i de følgende figurer ved hjælp af snit horisontalt og vertikalt gennem den tredimensionale følsomhedsfunktion.

### **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 5.3 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 5.4 og 5.5 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 fra positiv til negativ følsomhed. 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 5.4 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 koblingsignal fra en lang lige leder (se Kapitel 3).

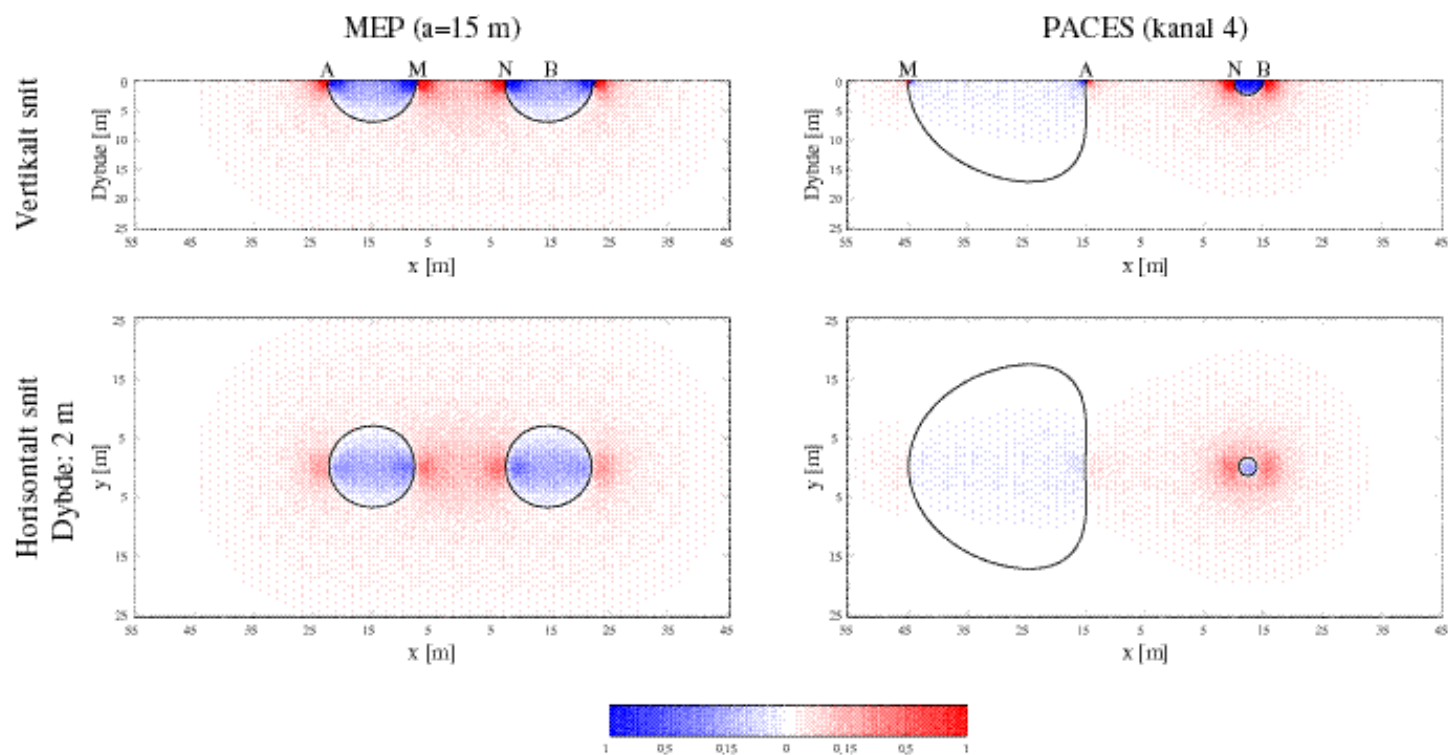
### **TEM**

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.

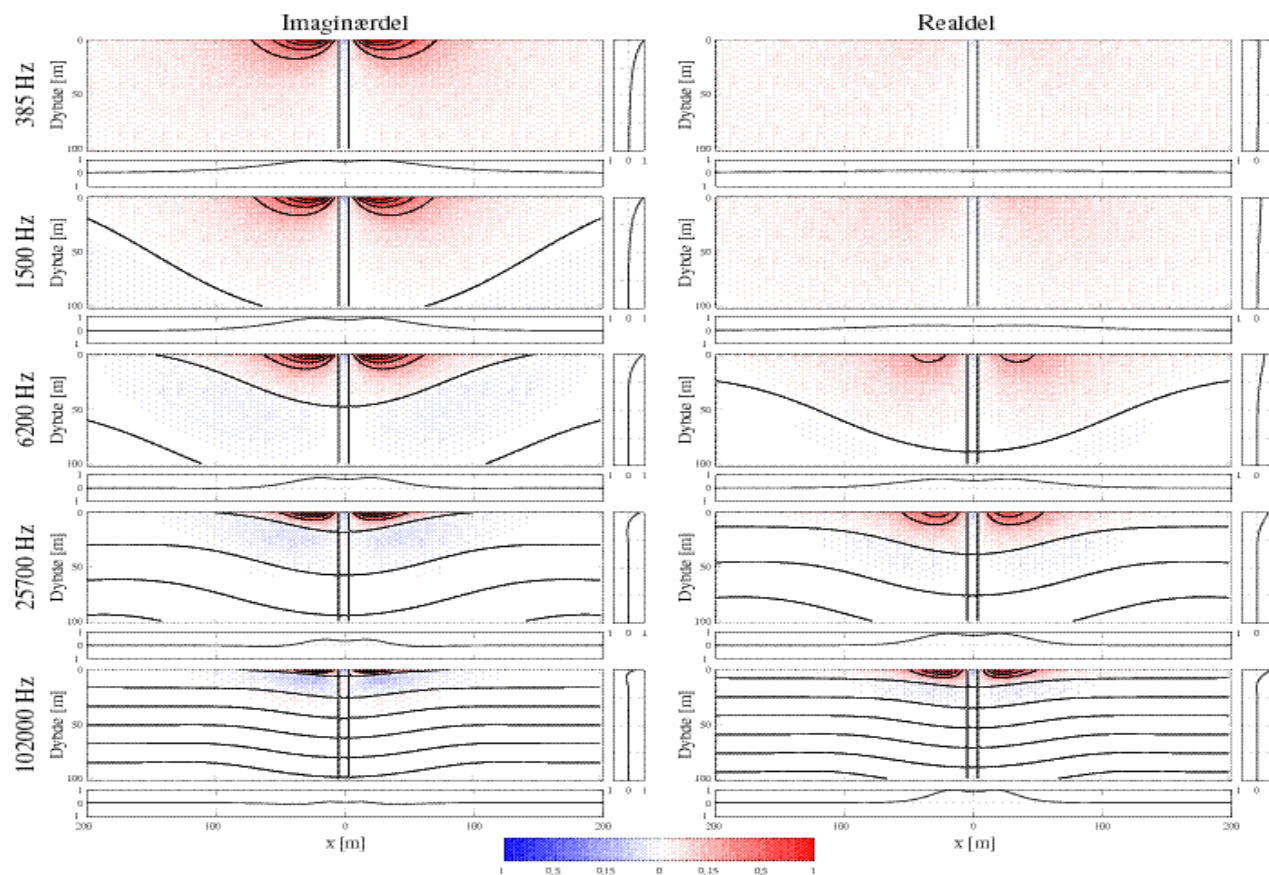
Figur 5.6 viser et vertikalt og horisontalt snit gennem følsomhedsfunktionen for PROTEM 47 systemet i central loop konfigurationen til tiden 0,05 ms i 100 m dybde i et homogent halvrum med resistiviteten 50  $\Omega$ m. Følsomhedsfunktionen for PROTEM 47 systemet er

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.  $30^\circ$  med overfladen med tiden. Det ses, at følsomheden har et fortegnsskift i en dybde på ca. 140 m under opstillingens centrum.

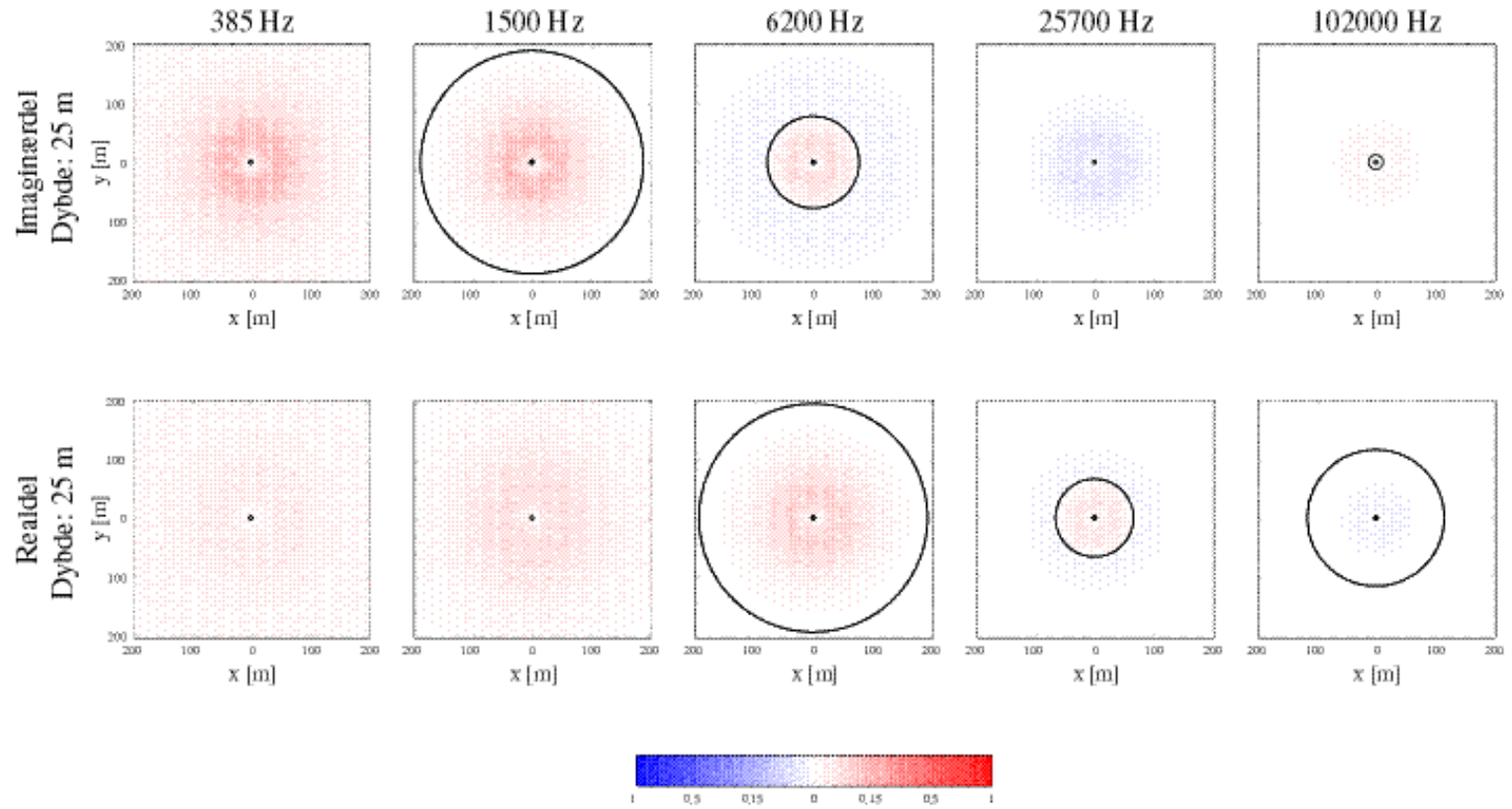
Den afbildede følsomhedsfunktion gælder for den virkelige kurveform, som anvendes i PROTEM 47 systemet, og er fremkommet som en foldning mellem følsomheden for impulsresponset og den faktisk anvendte kurveform.



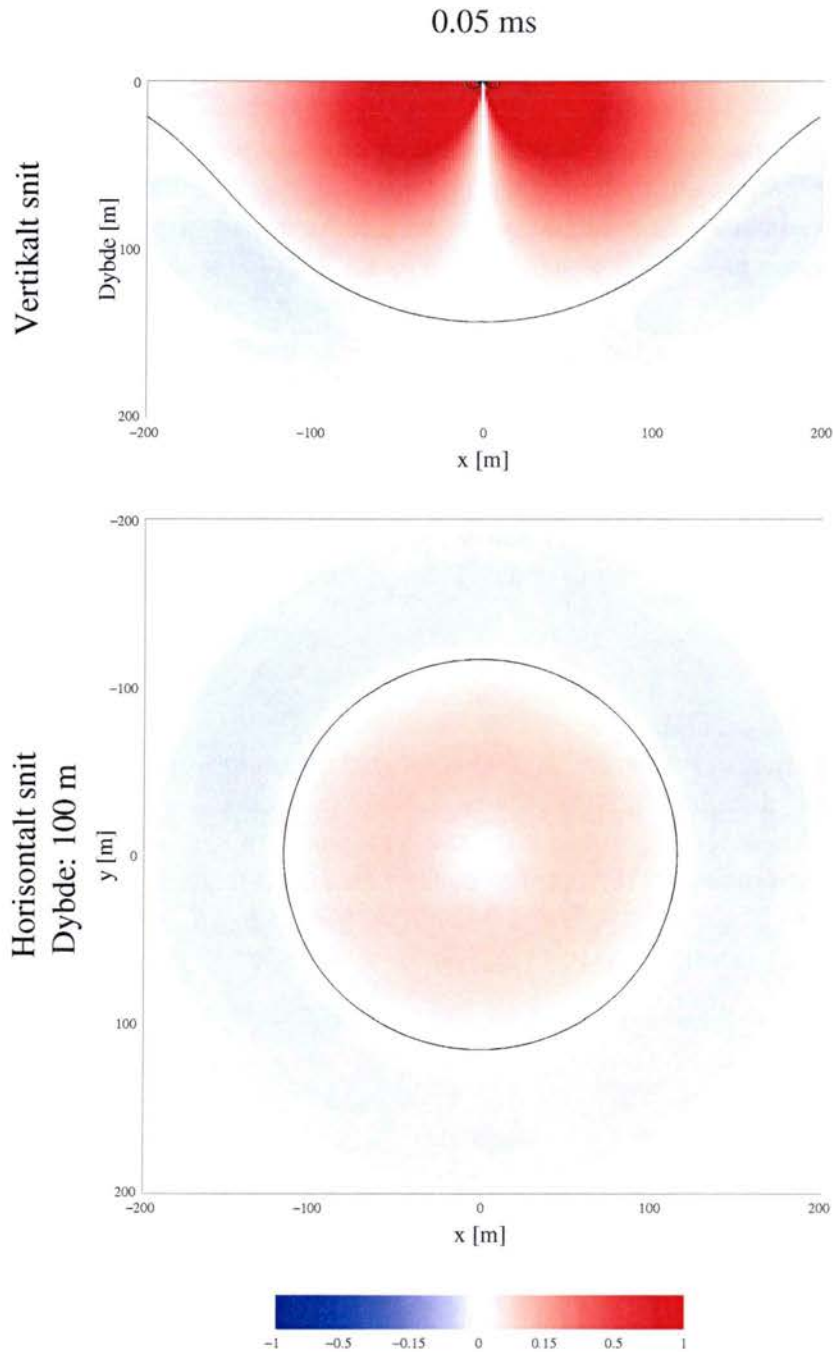
**Figur 5.3.** Figuren viser vertikale (øverst) og horisontale (nederst) snit gennem følsomhedsfunktionerne for resistiviteten for en 20 m Wenner konfiguration (venstre søjle) og en af de asymmetriske konfigurationer fra PACES systemet (højre søjle). For Wenner konfigurationen er følsomheden positiv mellem de centrale potentialelektroder, men negativ mellem strøm- og potentialelektroderne. Uden for elektroderne er følsomheden igen positiv. For den asymmetriske PACES konfiguration er strøm- og potentialelektroder flettet ind i hinanden, og følsomhedsfunktionen er mere kompliceret.



**Figur 5.4.** Figuren viser vertikale snit gennem følsomhedsfunktionerne for konduktiviteten for HEM systemet for et homogent halvrum med resistiviteten 50 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 profil længden. 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 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 5.6.** 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 m til tiden 0.05 ms. Plottene er normeret med maksimumværdien af amplituden og derefter ganget med 10 for præsentationens skyld, og afstanden mellem konturlinjerne er 20% af maksimumværdien.

## Kapitel 6 – Analyse af endimensionale modeller

I dette kapitel præsenteres resultaterne af tolkninger af data fra en lang række endimensionale jordmodeller for de fire betragtede systemer samt analyser af, hvor godt modelparametrene er bestemt. Alle tolkninger er udført på syntetiske data, der ikke er perturberet med støj, og analyserne er udført på basis af støjmodellerne fra Kapitel 5.

Det viser sig, at for de betragtede modeller opnås den bedste opløsning af undergrundens resistivetsforhold med PROTEM 47 systemet, medens DIGHEM<sup>VRES</sup> og MEP systemerne i mange tilfælde giver en udmærket opløsning af modellerne. PACES systemet har en ringere dybdeindtrængning end de andre tre systemer, men giver en bedre opløsning af overfladenære, tynde lag. Ved sammenligningen bliver det tydeligt, at de elektromagnetiske metoder, DIGHEM<sup>VRES</sup> 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 resistivetsforhold. I dette kapitel sammenlignes resultaterne af 1D tolkninger og analyser af en lang række 1D modeller for hvert af de fire betragtede systemer (DIGHEM<sup>VRES</sup>, MEP, PACES og PROTEM 47). Først gives imidlertid en beskrivelse af de udvalgte modeller og deres relevans set i en geologisk sammenhæng.

### 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 Eilog-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. Dette understreges af, at der for både DIGHEM<sup>VRES</sup>, PACES og PROTEM 47 systemet findes frem til tolagsmodeller i over 70% af de tilfælde, hvor der tolkes på data fra trelagsmodeller (se tabel over tolkningsresultaterne i Appendiks A). 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  $\Omega\text{m}$  til 1024  $\Omega\text{m}$  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 tolkningerne og analyserne af disse er vist i Appendiks A, Figur 1.

### **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 ( $\Omega\text{m}$ )	RHO2 ( $\Omega\text{m}$ )
Grundmodel 1	5	200
Grundmodel 2	30	200
Grundmodel 3	70	200
Grundmodel 4	5	70
Grundmodel 5	30	70
Grundmodel 6	200	70
Grundmodel 7	5	30
Grundmodel 8	70	30
Grundmodel 9	200	30
Grundmodel 10	30	5
Grundmodel 11	70	5
Grundmodel 12	200	5

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 tolkningerne og analyserne af disse er vist i Appendiks A, Figur 2–13.

## 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 ( $\Omega\text{m}$ )	RHO2 ( $\Omega\text{m}$ )	RHO3 ( $\Omega\text{m}$ )	THK1 (m)	THK2 (m)
Model 1 (Dobbelt opstigende)	30	70	200	10	20
Model 2 (Dobbelt nedstigende)	200	70	5	10	20
Model 3 (Maksimumsmodel)	70	200	5	10	20
Model 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 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  $\Omega\text{m}$  til 1024  $\Omega\text{m}$  (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 tolkningerne og analyserne af disse er vist i Appendiks A, Figur 14–33.

## 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 resistivetsniveau:

<b>5 <math>\Omega\text{m}</math></b> 	Marint ler Fedt ler, ofte af tertiær alder Smeltevandsler Kalk med salt grundvand (eller anden formation med salt grundvand)
<b>30 <math>\Omega\text{m}</math></b> 	Marint ler med vekslende sandlag Moræneler Smeltevandsler
<b>70 <math>\Omega\text{m}</math></b> 	Moræneler med sandindslag Morænesand Sand under grundvandsspejlet Kalk under grundvandsspejlet
<b>&gt;200 <math>\Omega\text{m}</math></b> 	Tørt sand Tør kalk Kalk med fersk grundvand

Som det fremgår, er den højeste resistivitet i grundmodellerne sat til 200  $\Omega\text{m}$ , selvom mange geologiske materialer rent faktisk er karakteriseret ved at have højere resistiviteter. Baggrunden for dette er, at de to elektromagnetiske målesystemer, DIGHEM<sup>VRES</sup> og PROTEM 47, som indgår i undersøgelsen, har en meget lille følsomhed over for høje resistiviteter, dvs. resistiviteter over ca. 60–80  $\Omega\text{m}$ , og de 200  $\Omega\text{m}$  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  $\Omega\text{m}$  og helt op til 1024  $\Omega\text{m}$ , hvorved også modeller indeholdende lag med betragteligt højere resistiviteter inddrages i tolkningerne og analyserne. Dermed tilgodeses også de geoelektriske systemer, der alt andet lige kan opløse høje resistiviteter bedre.

## Tolkning og analyse af modellerne

For alle de opstillede jordmodeller er der foretaget både en tolkning og en analyse. I det følgende gives først en beskrivelse af, hvad der rent faktisk forstås ved disse to begreber, og dernæst forklares det kort, hvordan resultaterne af tolkningerne og analyserne er præsenteret i denne rapport.

### Tolkninger og analyser

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 et modelrespons, hvorefter disse data er tolket med det færrest mulige antal lag. Med det sidstnævnte menes, at der er fundet frem til den slutmodel, der har det mindste antal lag, og hvor der samtidig er en acceptabel tilpasning mellem modelrespons og data. Alle tolkninger er fremkommet efter en iterativ tilpasning til data, hvor der som startmodel er anvendt et relativt svagt perturberet halvrum.

Der er ikke lagt støj på de teoretiske data inden tolkningen, men til gengæld er data tilskrevet en usikkerhed, hvis størrelse er fastlagt ud fra de forskellige støjmodeller, der er beskrevet i Kapitel 5. Det skal bemærkes, at den endelige tolkning kan være ret afhængig af den model, som iterationen startes med. En given tolkning er således ikke nødvendigvis identisk med det bedste resultat, der kan opnås for den givne model, men derimod én af måske mange modeller, der tilpasser data. Den bedste tilpasning opnås naturligvis altid med den sande model.

Ud over tolkningen er der også foretaget en analyse af usikkerheden på modelparametrene for de sande modeller, dvs. at analysen er foretaget under den forudsætning, at data er tolket med den sande model. Både tolkninger og analyser er foretaget med programmet SELMA, som er udviklet ved Geologisk Institut, Aarhus Universitet (Christensen og Auken 1992).

Som beskrevet i Kapitel 2 er det ved tolkninger og analyser af HEM data nødvendigt at inddrage sender- og modtagerspølerens højde over jordoverfladen, idet denne størrelse har direkte betydning for det målte respons. Der er principielt to måder, hvorpå dette kan gøres:

- 1) Den første mulighed er at indsætte højderne som værdier, der ikke kan rykkes ved i inversionen. Denne metode er relativ simpel, men har dog samtidig den svaghed, at der ikke tages hensyn til en eventuel usikkerhed på de målte højder.
- 2) Den anden mulighed er at lade luftlaget mellem spolerne og jorden indgå som et ekstra lag i den anvendte 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 inversionen og bliver som sådan også tilskrevet en usikkerhed.

For så vidt angår tolkningerne, vil der ikke være nogen nævneværdig forskel på de resultater, der opnås med hver af de to metoder, såfremt der er tale om teoretiske data, hvor man kender flyvehøjden med sikkerhed. I forbindelse med de tolkninger og 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 modelresponsene er beregnet for, mens den relative usikkerhed på 0.014 angiver, at højden er kendt med en usikkerhed på 0.5 m. Da der i tolkningerne stort set ikke ændres på tykkelsen af luftlaget, er luftlaget ikke vist i de modelsektioner, der præsenteres nedenfor.

For så vidt angår analyserne af usikkerheden på modelparametrene har det konsekvenser, om man vælger den første eller den anden mulighed. Hvis højden fastholdes på en fast værdi (mulighed 1), bliver usikkerheden på modelparametrene mindre end hvis højden inddrages i modellen med en realistisk usikkerhed (mulighed 2).

Ved at foretage både en tolkning og en analyse opnås principielt set to forskellige illustrationer af de forskellige systemers opløsningsegenskaber, dog med en vis indbyrdes af-

hængighed. Det kan således forventes, at der for de modeller, der kan tolkes med færre lag end det faktiske antal lag i den sande model, alt andet lige vil forekomme relativt mange ubestemte modelparametre i analysen.

## Præsentation af tolkninger og analyser

For hver enkelt modelsuite præsenteres tolkningerne og analyserne af de 21 modeller samlet på én side (se Figur 6.1). Øverst på siden ses de sande modeller, og herunder følger så tolkningen og analysen 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 for 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,  $\Delta$ , på den enkelte modelparameter er vist grafisk ved hjælp af en farveskala defineret i nedenstående tabel. Farveskalaen er inddelt i 6 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
$1,0 < \Delta < 2,0$	Blå	Meget dårligt bestemt/ubestemt
$2,0 < \Delta$	Mørkeblå	Ubestemt

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

## Eksempler

For at demonstrere, hvorledes tolkningerne og analyserne læses, vil der i det følgende blive gennemgået to eksempler. I begge eksempler indledes med en kort beskrivelse af den modelsuite, der tages udgangspunkt i, og dernæst beskrives tolkningerne og analyserne for hvert af de betragtede målesystemer. Eksemplerne sluttet af med en konklusion, hvor der 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 et eller flere punkter, behøver dette ikke at være gældende generelt, da de forskellige systemer reagerer forskelligt på forskellige modeller.

## Eksempel 1 - trelagsmodeller

Modellsuiten ses på Figur 6.2 (samme som Figur A.20 i Appendiks A) og er dannet ud fra den dobbelt nedstigende grundmodel, hvor resistiviteten i andet lag varieres fra 1  $\Omega\text{m}$  til 1024  $\Omega\text{m}$ . Der er 21 modeller i suiten, og som henvisning bruges i det følgende modellens nummer regnet fra venstre.

### DIGHEM<sup>VRES</sup>

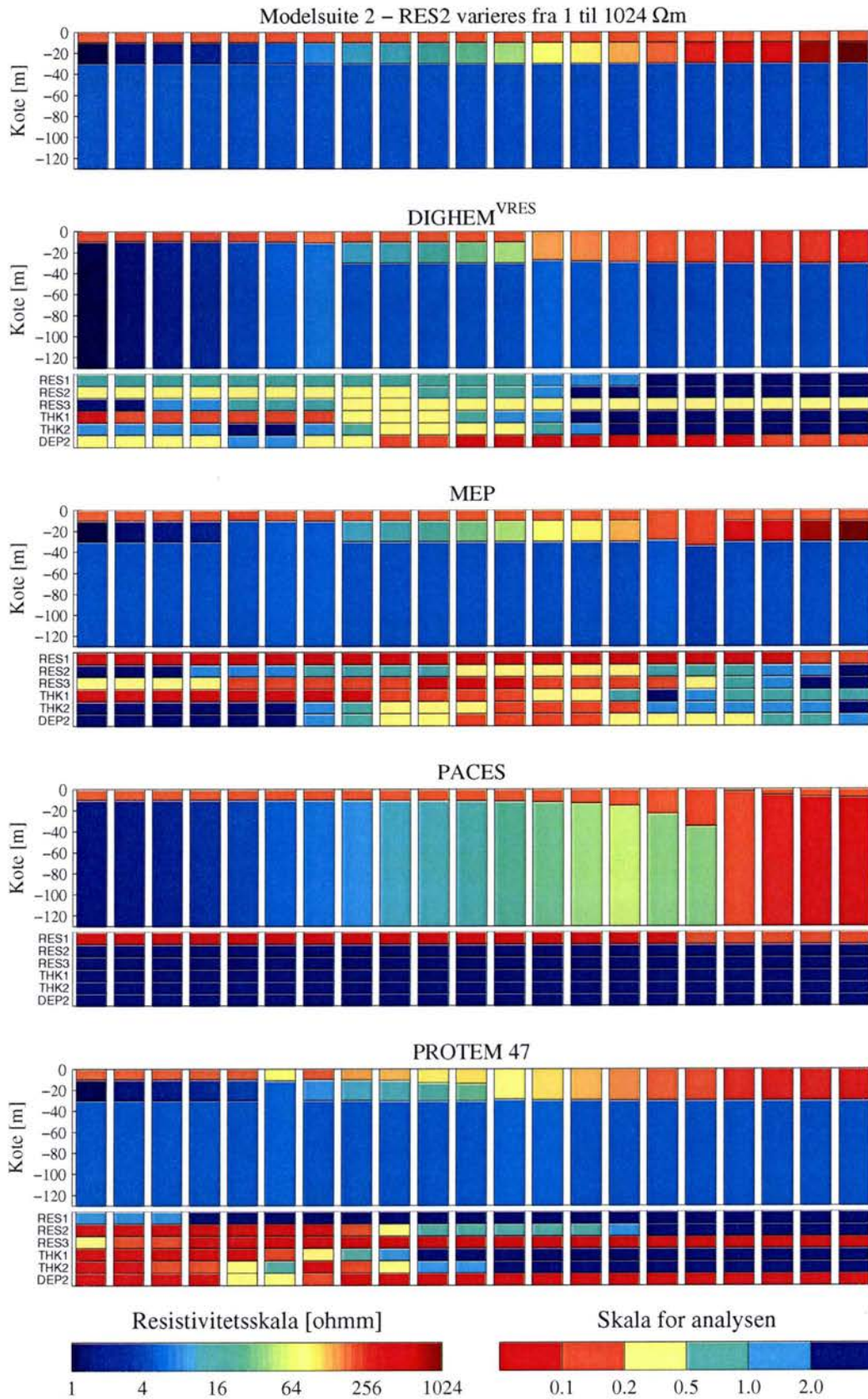
DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet har problemer med at opløse modellerne i begge ender af modelsuiten, hvor resistivitetsforskellen mellem andet og tredje lag (venstre ende af modelsuiten) og første og andet lag (højre ende af modelsuiten) er relativ lille. Den lille resistivitetsforskel resulterer i, at det ikke er muligt at skelne mellem de respektive lag, og i tolkningen bliver lagene derfor slået sammen til ét lag med en intermediær resistivitet. Kun for de midterste modeller (model nr. 8–12) er resistivitetsforskellen tilstrækkelig stor til, at der ved tolkningen findes frem til trelagsmodeller.

Ud fra analysen ses det, at bestemmelsen af første lags modelparametre bliver stadig dårligere, i takt med at andet lags resistivitet stiger. For de første modeller (model nr. 1–7) er første lag således nogenlunde opløst, mens laget slet ikke er opløst for de sidste modeller (13–21). Også bestemmelsen af andet lags resistivitet ses som forventet at blive dårligere, jo højere lagets resistivitet er, mens det modsatte til gengæld er tilfældet for bestemmelsen af tredje lags resistivitet og dybden til tredje lag. For alle modeller gælder det, at dybden til den første gode leder er godt bestemt eller velbestemt.

### MEP

For MEP systemet findes der ved tolkningerne i de fleste tilfælde frem til trelagsmodeller, der stort set er identiske med de sande modeller. For enkelte modeller kan tolkningen imidlertid foretages tilfredsstillende med tolagsmodeller. Det drejer sig om model nr. 5–7 og 16–17, hvor resistivitetsforskellen mellem henholdsvis andet og tredje lag og første og andet lag er så lille, at de to lag slås sammen til ét lag, og dermed giver anledning til tolagsmodeller.

Ud fra analysen ses det, at første lag generelt er godt opløst. Både resistiviteten og tykkelsen af første lag er således bestemt med en relativ usikkerhed på under 0,2, idet der dog opnås en noget 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. Overordnet set stemmer analyserne ganske godt overens med tolkningerne, idet det dog kan forekomme lidt bemærkelsesværdigt, at de dårlige bestemmelser af modelparametrene for de første og de sidste modeller i suiten ikke kommer mere direkte til udtryk i tolkningerne.



**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  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m, og første og andet lags tykkelse er henholdsvis 10 m og 20 m.

## **PACES**

For PACES systemet kan alle tolkninger foretages tilfredsstillende med tolagsmodeller. Mens det første lag i de sande modeller genfindes direkte i tolkningerne, bliver andet og tredje lag slået sammen til tolkningens andet lag, der får en resistivitet nogenlunde midt imellem de to lag. En undtagelse er model nr. 15–17, hvor resistiviteten i første og andet lag ligger så tæt på hinanden, at det her er disse to lag, som bliver slået sammen til tolkningens første lag.

PACES systemets manglende evne til at opløse de opstillede trelagsmodeller afspejles tydeligt i analysen. Således ses det, at resistiviteten af første lag ganske vist er godt bestemt eller velbestemt for alle modeller, men at alle øvrige parametre til gengæld er ubestemte.

## **PROTEM 47**

For PROTEM 47 systemet findes der ved tolkningerne frem til enten to- eller trelagsmodeller. For de første modeller (model nr. 1–11), hvor andet lags resistiviteter er relativt små, foretages tolkningerne således med trelagsmodeller, der minder meget om de sande modeller, idet der dog forekommer en vis variation i første lags resistivitet. En undtagelse er model nr. 6, hvor der som følge af den meget lille resistivitetsforskel mellem andet og tredje lag findes frem til en tolagsmodel. For de øvrige modeller (model nr. 12–21) kan tolkningerne foretages tilfredsstillende med tolagsmodeller. Forklaringen på dette er, at resistiviteten i andet lag nu er så høj, at det ikke længere er muligt at skelne imellem de to øverste lag, hvorved disse slås sammen til ét lag med en intermediær resistivitet. Det er værd at bemærke, at der for alle modeller findes frem til en dybde til tredje lag, der svarer nogenlunde overens med den sande dybde.

De træk, der kommer til udtryk ved tolkningerne, afspejles tydeligt i analyserne. For model 1–11 ses det således, at modelparametrene er overvejende godt bestemte eller velbestemte, mens der for model 12–21 forekommer mange ubestemte modelparametre. Overordnet ses det, at første lags resistivitet er ubestemt, mens tredje lags resistivitet og dybden til tredje lag med enkelte undtagelser er velbestemte.

## **Konklusion**

Sammenfattende kan det konkluderes, at DIGHEM<sup>VRES</sup>, MEP og PROTEM 47 systemerne generelt opløser de betragtede trelagsmodeller nogenlunde tilfredsstillende. Specielt MEP systemet har dog problemer i venstre ende af modelsuiten, hvor resistiviteten af andet lag er lav, mens DIGHEM<sup>VRES</sup> og PROTEM 47 systemerne tilsvarende har problemer i den højre ende af modelsuiten, hvor resistiviteten af andet lag er høj. Ved sammenligning ses det, at PROTEM 47 systemet som forventet giver en bedre opløsning end DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet, og at begge systemer giver en forholdsvis god bestemmelse af dybden til den første gode leder. Ligeledes ses det, at MEP systemet generelt giver en lidt bedre opløsning end DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet, idet det modsatte dog er tilfældet, når det drejer sig om parametrene for den gode leder. 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



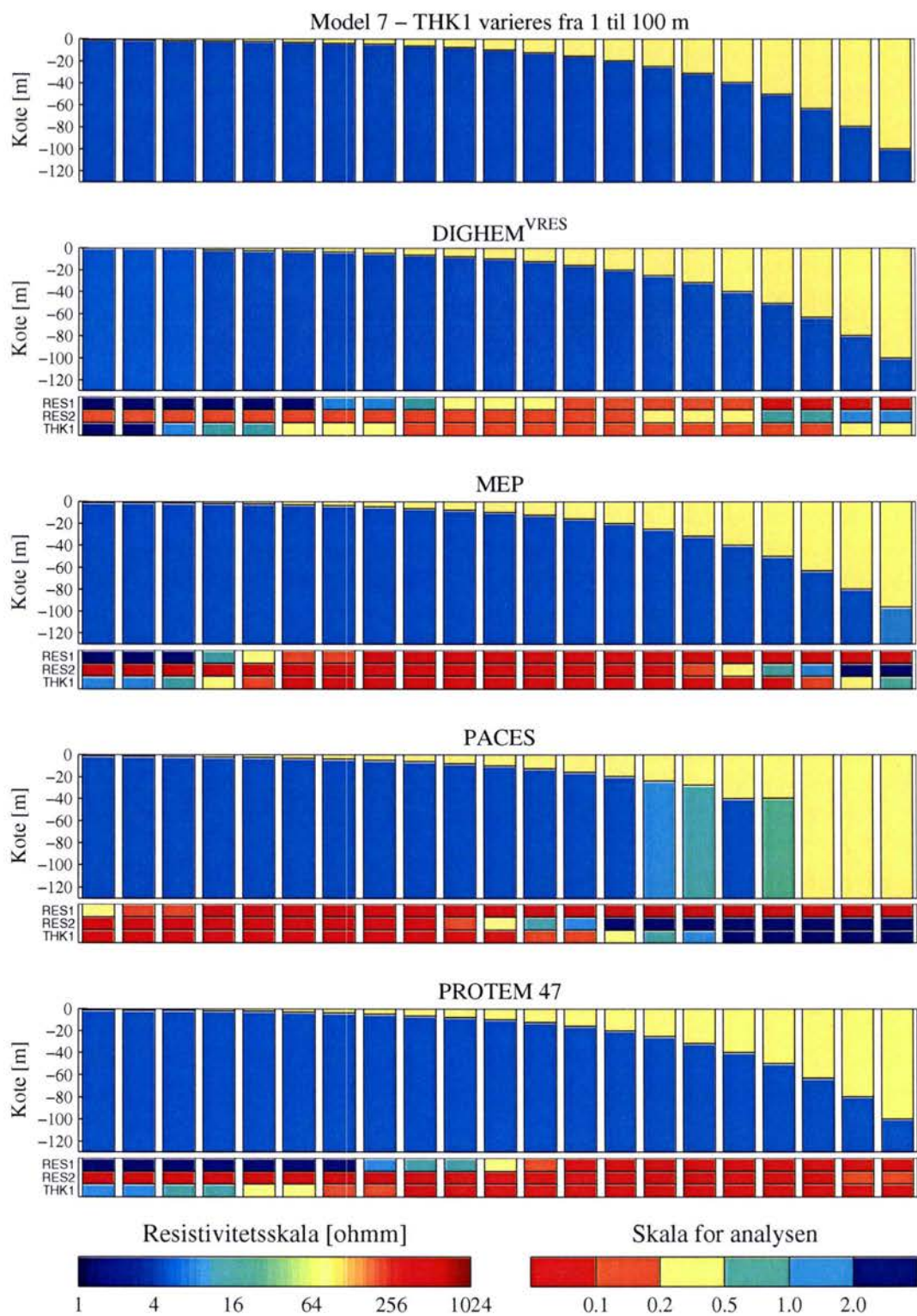
først til sin ret i forbindelse med en kortlægning af relativt tynde, overfladenære lag (se eksempel 2).

## **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, vist i Figur 6.2 (samme som Figur A.8 i Appendiks A), 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.

### **Resultater**

For DIGHEM<sup>VRES</sup> og PROTEM 47 systemerne - og til dels også for MEP systemet - ses der at være problemer i den venstre ende af modelsuiten, hvor tykkelsen af første lag er relativ lille. Problemerne kommer først og fremmest til udtryk ved en meget dårlig bestemmelse af modelparametrene for det første lag, men for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemets tilfælde ses det desuden ved, at laget ikke kan erkendes i de tolkede modeller. For PACES systemet forekommer disse problemer ikke, men til gengæld formår PACES systemet slet ikke at opløse andet lag i højre ende af modelsuiten, hvor tykkelser af første lag er stor. Allerede ved lagtykkelser på ca. 25 m er både resistiviteten af og dybden til den gode leder således bestemt med en usikkerhed på over 0.5 og ligeledes findes i tolkningerne frem til modeller, der ligger noget langt fra de sande modeller. Også DIGHEM<sup>VRES</sup> og MEP systemerne ses at have problemer ved store tykkelser af første lag, om end de ikke er lige så udtalte som for PACES systemet. Med hensyn til bestemmelsen af dybden til det andet lag, er DIGHEM<sup>VRES</sup> og MEP systemerne nogenlunde lige gode, om end MEP systemet er lidt bedre set over alle modeller i suiteen. Generelt opnås den bedste opløsning af det ledende lag med PROTEM 47 systemet, idet lagets modelparametre her er bestemt med en usikkerhed på under 0.2, når tykkelsen af første lag blot er over 10 m.



**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

For den betragtede modelsuite 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<sup>VRES</sup> og MEP systemerne, mens til gengæld PACES systemet ikke er særlig 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 særlig stor. Nogenlunde det samme billede genfindes i Figur A.5 og A.11 i Appendix A, der også viser nogle suiter af tolagsmodeller med et godt ledende lag i bunden, men med andre resistiviteter i det overliggende lag.

## Effekten af støj på data

I forbindelse med de tolkninger, der er præsenteret i denne rapport, er data tilskrevet støj, men denne støj er ikke lagt til de teoretiske data før tolkningen. Baggrunden for dette er, at en støjperturbering af data kan resultere i en tolkning, der afviger så meget fra den oprindelige model, at det bliver vanskeligt at gennemskue systematikken i de betragtede systemers evne til at opløse forskellige modeller.

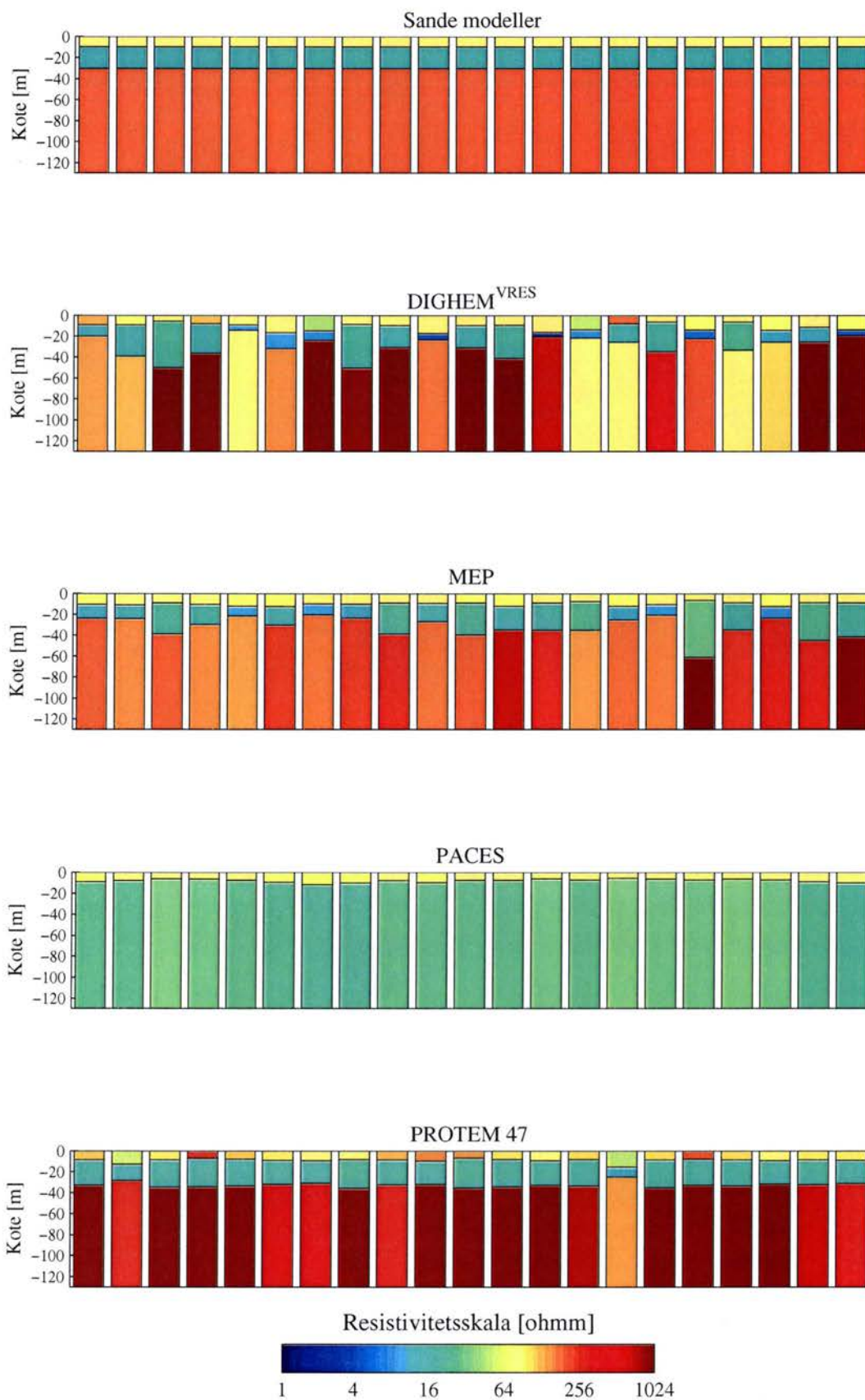
Det er imidlertid interessant at undersøge effekten af at lægge støj på data før tolkningen, da det siger noget om metodernes støjfølsomhed, og i de to følgende eksempler illustreres denne problemstilling. I hvert eksempel er der taget udgangspunkt i en given jordmodel, idet støjen er lagt på de teoretiske data i overensstemmelse med støjmodellerne. 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 efter de gængse principper.

Resultatet af tolkningerne 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  $\Omega$ m, 32  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ 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  $\Omega$ m, 16  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Det skal præciseres, at de viste suiter af tolkninger i Figur 6.3 og Figur 6.4 ikke gengiver forskellige modeller, som det var tilfældet i de ovenfor omtalte tolkninger og analyser, men derimod tolkninger af data fra den samme model, men med 21 forskellige realiseringer af støjen på data.

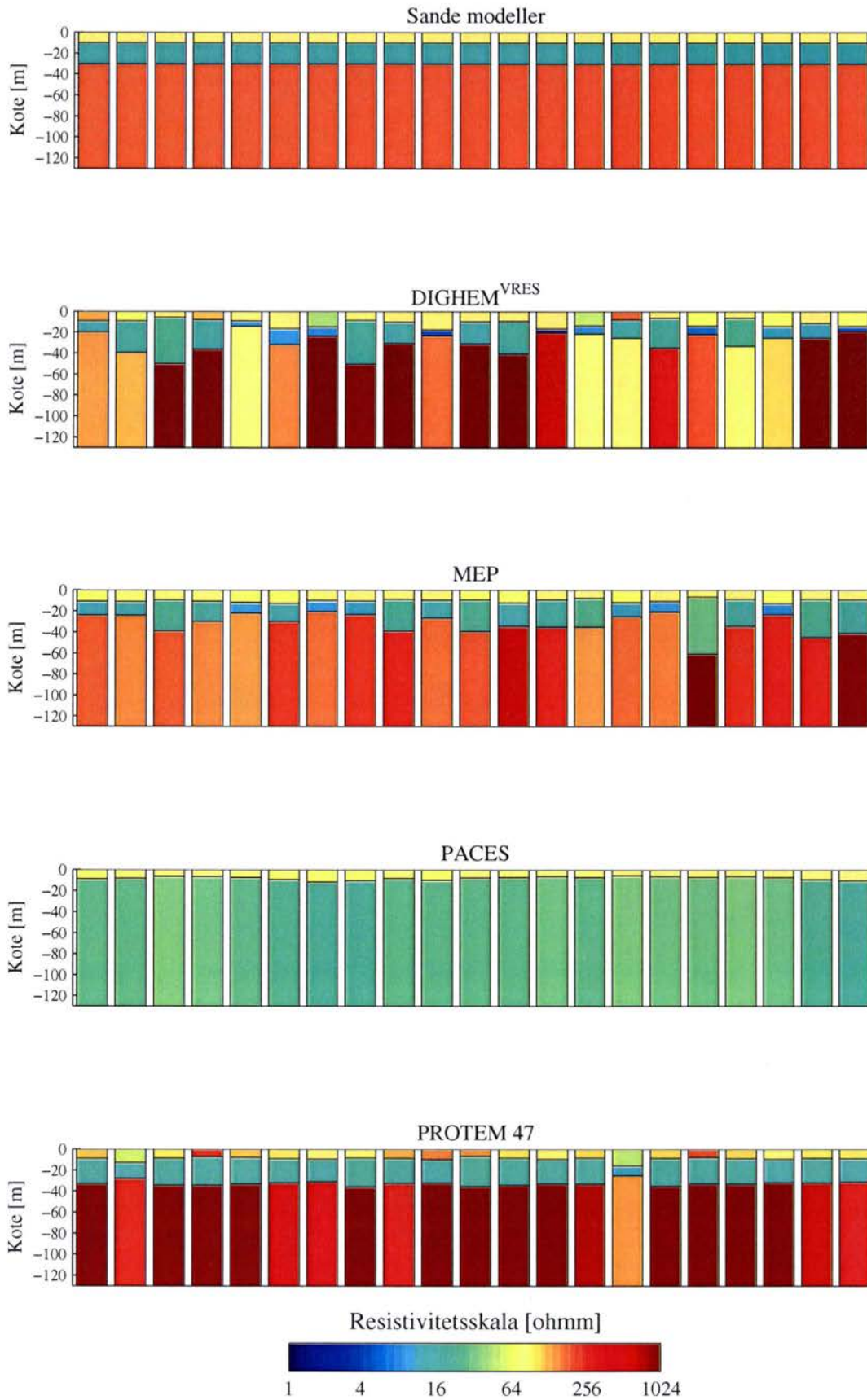
Af Figur 6.3 fremgår det, at PROTEM 47 systemet er relativt robust over for støjpåvirkninger, idet der ved tolkningerne findes frem til nogenlunde ensartede modeller for hver af de 21 støjrealisationer. Dog forekommer der en vis variation i resistiviteten af det første lag, hvilket afspejler en dårlig bestemmelse af denne modelparameter. For PACES systemet findes der som forventet frem til tolagsmodeller ved alle tolkningerne. Disse modeller er nogenlunde identiske med hensyn til første lags resistivitet og tykkelse, men der forekommer en vis variation i andet lags resistivitet. Dette stemmer meget godt overens med den tidligere iagttagelse, at PACES systemet ikke kan opløse dybereliggende lag. For MEP systemet, og specielt DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet, ses det, at de modeller, der fremkommer ved tolkningerne, afhænger forholdsvis meget af den pålagte støj. Således forekommer der en del variation i de enkelte modelparametre, idet der dog ved alle støjrealisationer findes frem til nedstigende trelagsmodeller, der minder om de sande modeller. For MEP systemet fin-

des der ved alle støjrealisationer frem til nogenlunde de samme resistiviteter og tykkelser af første lag, hvilket indikerer en god bestemmelse af disse modelparametre.

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, medens det er mere påvirkeligt, hvad angår bestemmelsen af resistiviteterne. For DIGHEM<sup>VRES</sup> og MEP systemerne forekommer en vis variation over de forskellige støjrealisationer. MEP systemet fremstår mest robust over for bestemmelsen af lagresistiviteterne, men bestemmelsen af laggrænserne udviser større variabilitet. Overordnet set er variationerne større end i Figur 6.3, og specielt andet lags tykkelse samt tredje lags resistivitet ses at variere meget.



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



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

## 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<sup>VRES</sup> 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.

Resultaterne af tolkningerne viser, at mangelagsmodellerne ofte vil være i bedre overensstemmelse med de sande modeller end fålagsmodellerne. Fålagstolkningerne for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet kan praktisk taget altid foretages med tolagsmodeller, medens der som oftest skal anvendes trelagsmodeller for at tolke PROTEM 47 data, og PROTEM 47 systemet giver en bedre opløsning af laggrænserne. 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.

### Todimensionale modeller

Den endimensionale (1D) beskrivelse af jordens resistivitetsforhold 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.

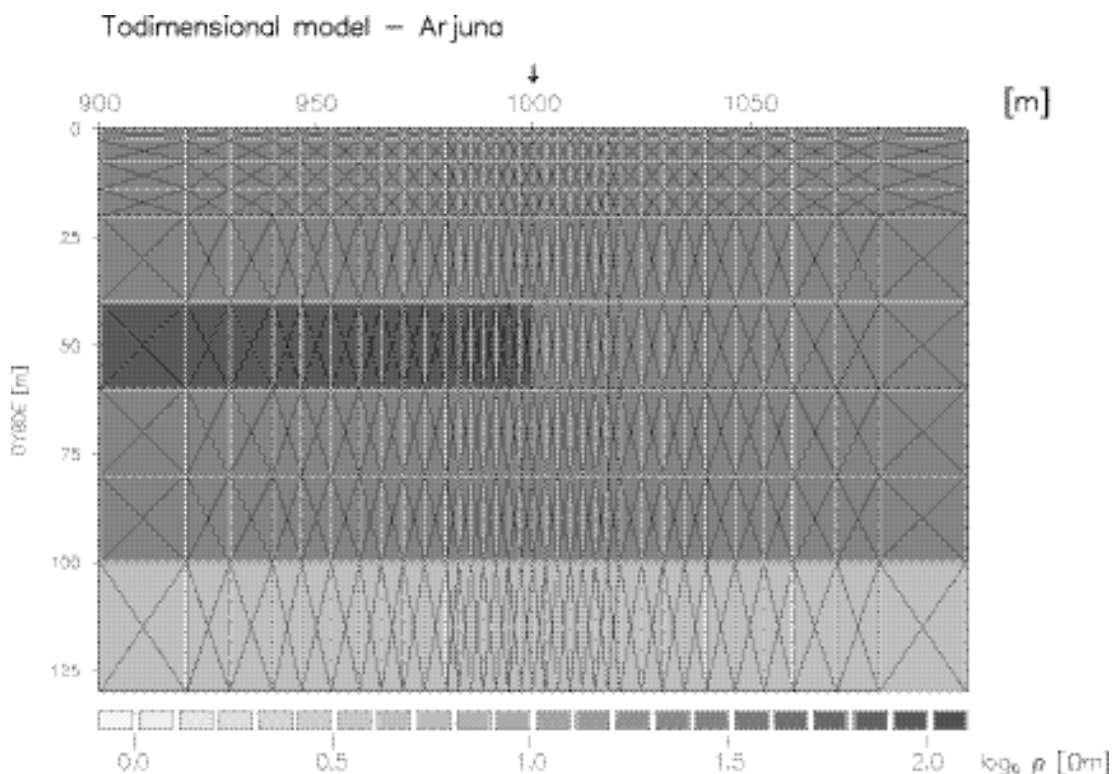
Programmet ARJUNA\_AIR benytter en magnetisk dipolkilde og er anvendt til beregninger af responset for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet. Responset for PROTEM 47 systemet, hvor antagelsen om en dipol ikke er tilstrækkelig god, er beregnet med ARJUNA programmet, som modellerer den faktiske geometri af sendersløjfen.

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 elementer eller *celler* 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 til 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.

Beregningstiden for modelresponserne 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.





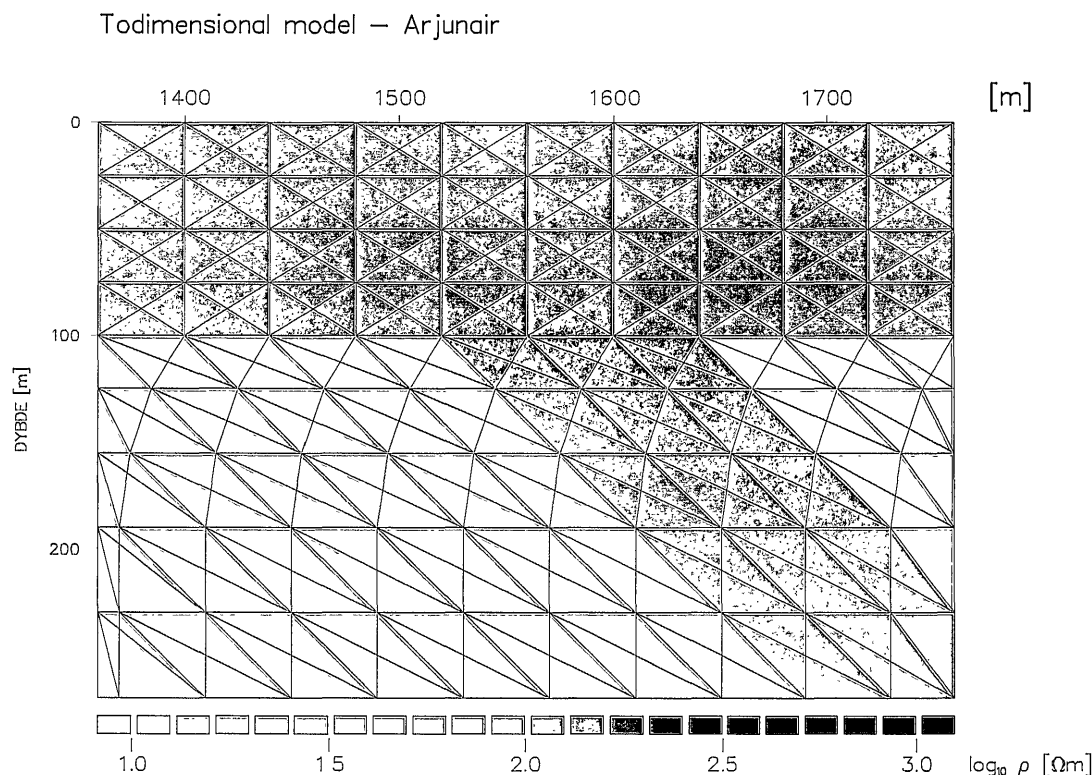
**Figur 7.1.** Figuren viser diskretiseringen af 2D modellerne i programmet ARJUNA. Man ser de rektangulære celler, hvor konduktiviteten kan defineres, og de trekantede beregningsceller.

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<sup>VRES</sup>, 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<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup> og PACES stakkes og filtreres data, efter at målingerne er foretaget. Denne efterprocessing kan ikke simuleres ved 2D modelleringen af DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet, da det ville kræve, at man beregnede responserne i et stort antal meget tætliggende punkter, hvorved regnetiden ville blive uoverskuelig stor. I 2D modelle-

ringen er DIGHEM<sup>VRES</sup> responset beregnes 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.



**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.

For PACES systemet simuleres efterprocesseringen. 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<sup>VRES</sup> systemet er der 20 m mellem målepunkterne, medens de rå data fra feltmålinger ligger med en indbyrdes afstand på ca. 3 m. Profilkoordinaten refererer til centrum af senderen for DIGHEM<sup>VRES</sup> og PROTEM 47 systemerne, medens den refererer 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<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup>, 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 overlejringer 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. hensigt at teste metodernes evne til at opløse resistivitetsforskelle i et tykt overdække.

### **Kalk**

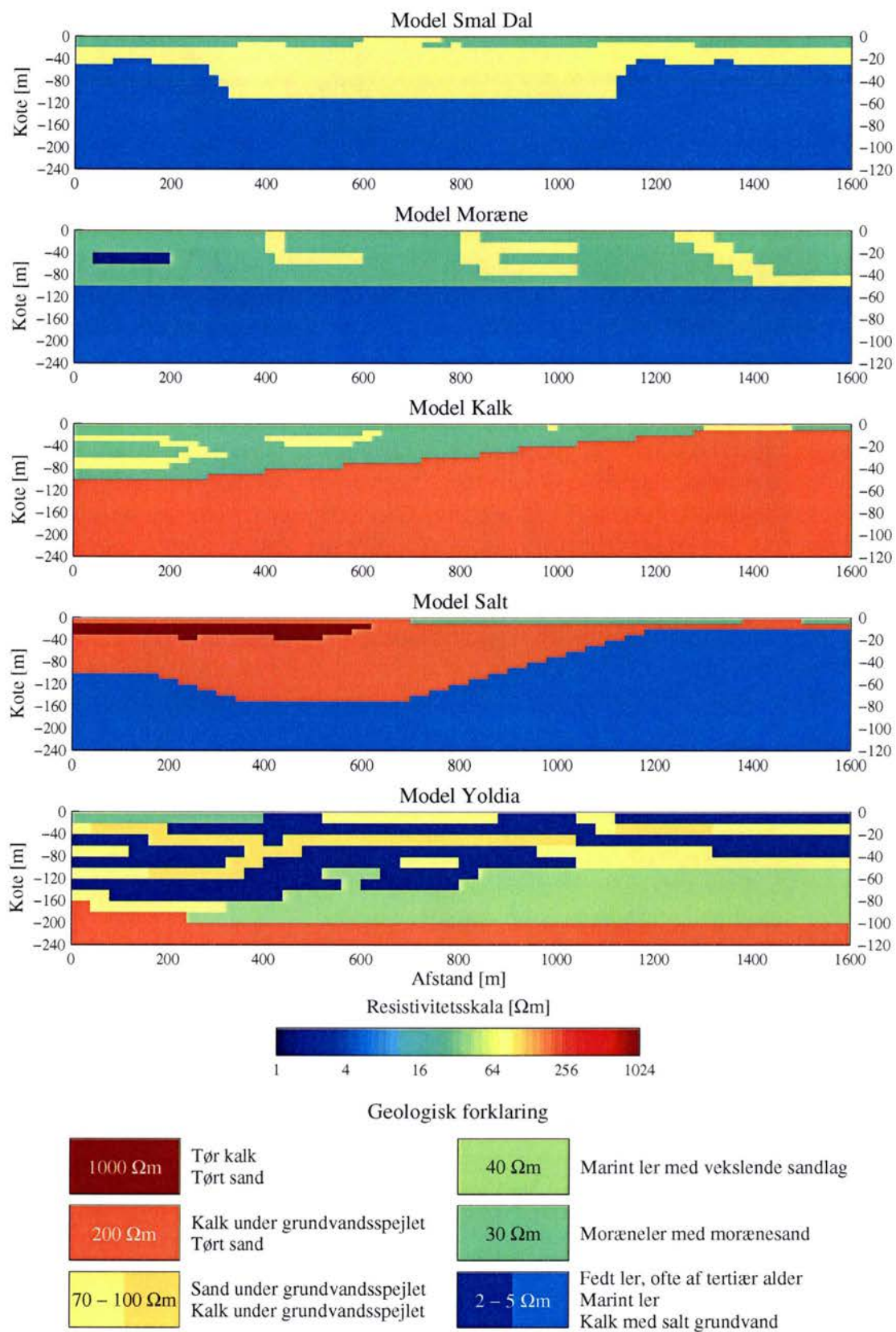
Modellen simulerer en kalkforekomst med overlejrende morænemateriale af forskellig tykkelse. Morænematerialet indeholder flere sandede lag af forskellige dimensioner. Modellen tester systemernes evne til at opløse grænsen mellem den forholdsvis godt ledende moræne og den dårligt ledende kalk i bunden 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. Modellen undersøger 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 fersk kalk i bunden. Den nødvendigvis 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 sektion afvigelse fra den faktiske fordeling af ledningsevnen vil blive undersøgt i det følgende for de valgte 2D modeller. 1D tolkningerne af DIGHEM<sup>VRES</sup> 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. 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.

### Mangelagstolkninger af DIGHEM<sup>VRES</sup> 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 lagernes 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  $\Omega$ m, hvis ikke andet er angivet.

### Fålagstolkninger af DIGHEM<sup>VRES</sup> og PROTEM 47 responser

Fålagstolkninger har i modsætning til mangelagstolkninger ikke faste laggrænser, dvs. at laggrænsernes placering indgår i inversionen ligesom lagernes resistiviteter. Antallet af lag i modellen varierer fra et til tre alt afhængig af informationsindholdet i data og komplikations-

graden 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. Resultatet kan være meget afhængigt af valget af startmodel, og der forekommer derfor i nogle tilfælde store kontraster mellem nærliggende 1D - modeller i en sektion.

## **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 og Barker 1996), som anvendes her. RES2DINV er anvendt med en indstilling, hvor de afledede beregnes for hver iteration (Dahlin og 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. 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 2 i Appendix B) ses resultatet af mangelagstolkningerne af Smal Dal for DIGHEM<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup>, MEP, PACES og nederst PROTEM 47.

### **DIGHEM<sup>VRES</sup>**

Mangelagssektionerne for DIGHEM<sup>VRES</sup> 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.

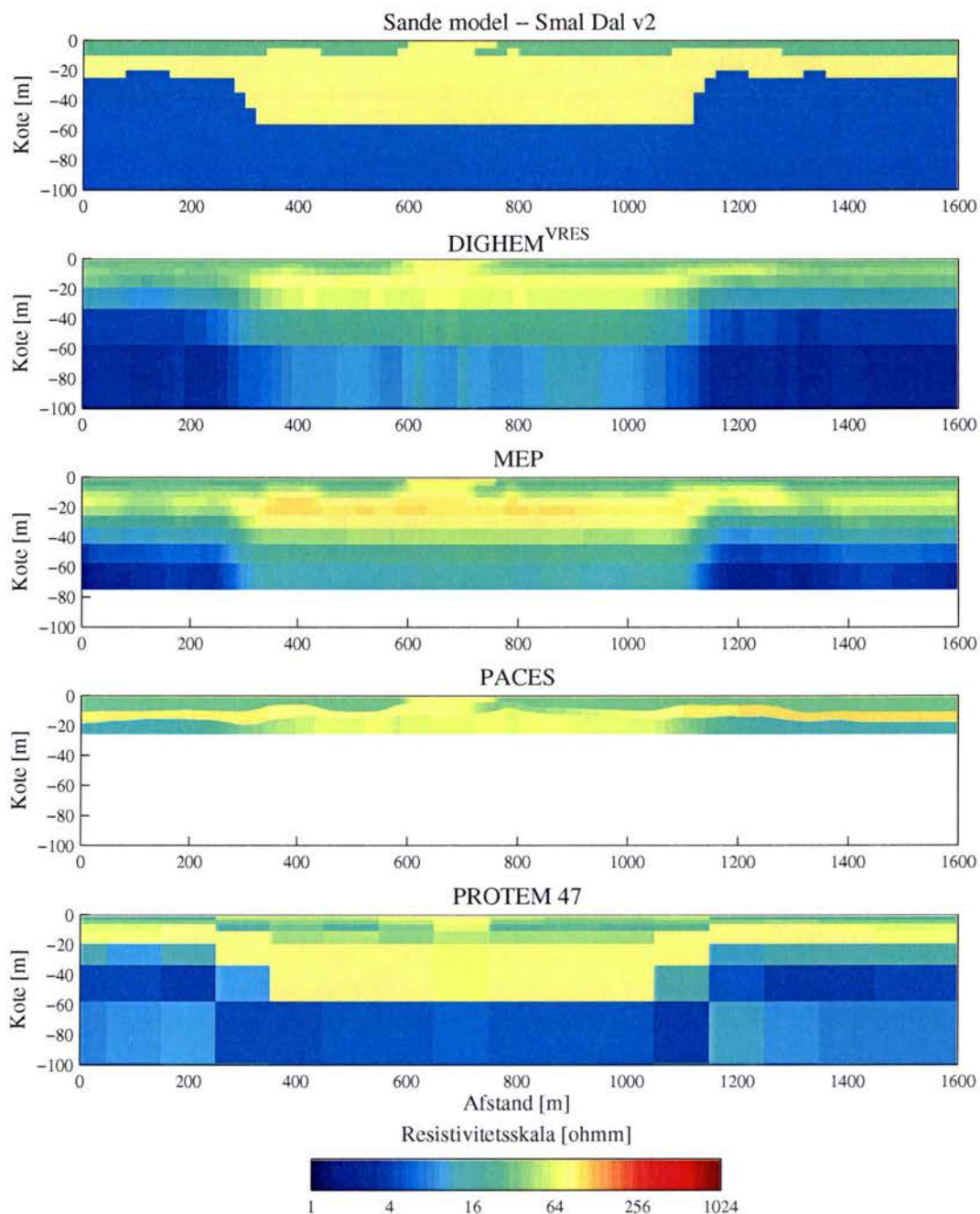
### **PACES**

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<sup>VRES</sup> 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 1 i Appendiks B) ses resultaterne af fålagstolkningerne af Smal Dal for DIGHEM<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup>, 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 væ-

re forskelligt langs profilerne. Under et målepunkt er der således præsenteret dels 1D tolkningen, 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<sup>VRES</sup>**

2D responserne er tolket med tolagsmodeller. Dalens placering træder tydeligt frem, men den fremstår som udfyldt med morænemateriale. Man kan dog erkende sandvinduet. 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**

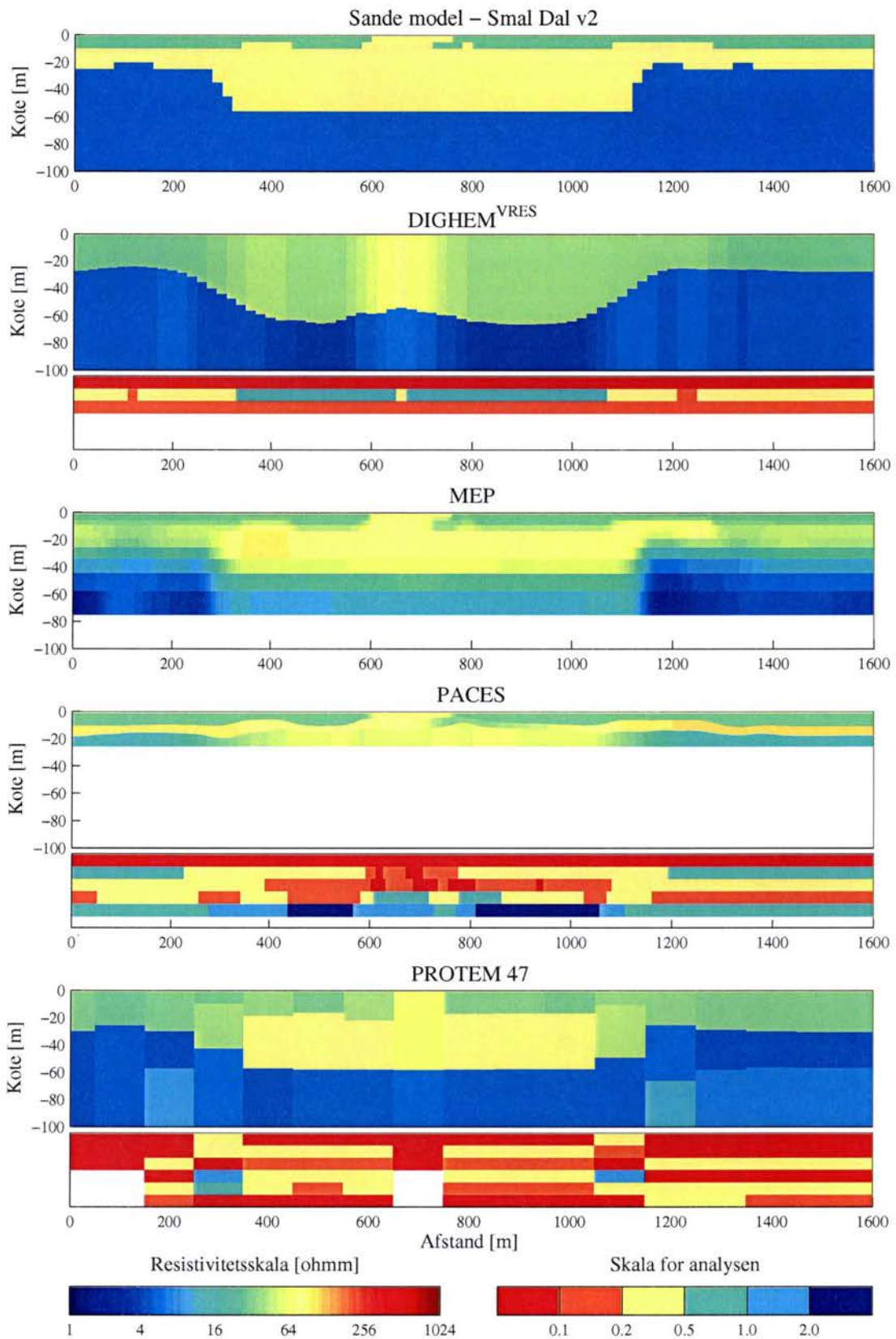
2D modelsektionen for MEP systemet beregnet med robust inversion viser en god lateral opløsning af dalen og af morænelagets variationer i tykkelse. Dalbunden viser sig som en markant ændring i resistivitet over flere lag.

#### **PACES**

Det er samme LCI sektion, som er vist i Figur 7.4. 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 tolkningsprofilet, og den højre dalskrænt forekommer mere stejl end den venstre. Det er også muligt at se sandvinduerne i morænen. 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.



**Figur 7.5.** Modellen Smal Dal tolket med fålagsmodeller for DIGHEM<sup>VRES</sup> og PROTEM 47 systemerne, LCI-modeller for PACES systemet og 2D modeller opnået ved robust inversion for MEP systemet.

## 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. I Kapitel 6 vises effekten af støj på data.

Sammenlignes PROTEM 47 og DIGHEM<sup>VRES</sup> 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. I disse tilfælde er residualet for datatilpasningen for mangelagsmodellen som regel væsentligt lavere end residualet for fålagstolkningen. Det betyder, at kravet om blødhed af modellen for mangelagstolkningen vil kunne strammes yderligere, uden at tilpasningen til data bliver dårligere end for fålagsmodellerne. Derved ville nogle af de variationer i resistivitet, som observeres, forsvinde. Valget af fålagsmodel var baseret på at residualet netop skulle være mindre end eller lig med 1.

De fleste fålagsmodeller for DIGHEM<sup>VRES</sup> 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 udført af Fugro Airborne Surveys Ltd. for henholdsvis Storstrøms Amt, Ringkjøbing Amt og Viborg Energi, samt målinger udført af Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) for Sønderjyllands Amt. Der er foretaget tolkning med både mangelagsmodeller og fålagsmodeller. I denne rapportversion medtages kun området ved Stevns i Storstrøms Amt. For disse data viser det sig, at datatilpasningen kræver højst tre lag. Der er imidlertid inkonsistenser mellem data for de forskellige frekvenser, og der er systematiske afvigelser i tilpasningen til data fra den højeste frekvens.

### 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 antageligt kræve en tidsramme, som, omsat til omkostninger, vil være ca. det halve af omkostningerne forbundet med selve undersøgelsen. En væsentlig anledning til dette er indflydelsen af koblingseffekter, som er omtalt i kapitel 3, og den evaluering og sortering af data, som dermed er nødvendig.

Tolkningen af data og analysen er foretaget med programmet SELMA (Christensen og 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 data er foretaget med de modeller for støjen, som er omtalt i Kapitel 5, og efter de principper, som er omtalt i kapitel 5, 6 og 7, både med fålags- og mangelagsmodeller. De præsenterede fålagsmodeller er de modeller med færrest mulige lag, som giver en acceptabel datatilpasning. Antallet af lag er dog begrænset til 3, idet analyserne i Kapitel 6 og 7 viser, at der ikke er information i data til bestemmelse af flere uafhængige parametre. Forhåndskendskab (á priori information) om laggrænser eller resistivitetsfordelinger fra jordbaserede målinger og borer er ikke anvendt ved inversionen af data.

Følgende parametre vil blive vist på kort for de målte områder.

- Position af flyvelinier og topografisk information
- Målte højder af sender- og modtagerspøler over terræn
- Målte data og filtrerede/korrigerede data (medtages ikke i denne rapportversion)
- Datatilpasning (rms-værdier) for fålagsmodellerne
- Datatilpasning (rms-værdier) for mangelagsmodellerne (medtages ikke i denne rapportversion)
- Resistivitet af lagene i fålagsmodellerne (1.-3. lag)
- Tykkelser af lagene i fålagsmodellerne
- Resistiviteter i mangelagsmodellerne (medtages ikke i denne rapportversion)

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

## Støj og datatilpasning

En god bestemmelse af usikkerhederne på de målte data er afgørende for bedømmelsen af usikkerheder på modelparametre fra inversionen af data. 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 påvirket 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 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 inden tolkningen.

Fugro Airborne Surveys har oplyst at de målte data er filtreret 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 median værdien (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. Dette betyder, at det ikke umiddelbart er muligt at give en præcis beskrivelse af usikkerheden på de processerede data og dermed også 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 dem omtales ikke af Fugro og BGR, og det må derfor forventes, dels at koblingsresponsen er indgået i vurderingen af støjen på data, dels at koblingspåvirkningen gennem filtrering er udtværet over et større område. Begge disse forhold er uønskede (se Kapitel 3).

I Appendix C (som ikke medtages i denne rapportversion) vises oprindelige data og processerede data for frekvenserne 385 Hz, 6200 Hz og 102 kHz for de fire områder målt af Fugro Airborne Surveys. Foruden medianfiltreringen er der foretaget en korrektion for drift i instrumentet under målingen af hvert profil. Det fremgår klart af figurerne i Appendix C at målingerne er meget støjfyldte, men vi vil ikke her redegøre for de mange deltaljer, blot henvise til diskussionen i Kapitel 3 og 5.

Kun processerede data har været til rådighed fra målingerne i Sønderjyllands Amt, men det må forventes, at disse data har været udsat for samme eksterne støjpåvirkninger som målingerne foretaget af Fugro Airborne Surveys.

### **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 den korrekt. Dette skyldes påvirkning fra vegetation og bygninger mm. 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. I inversionen af data er det muligt at inddrage højden som en egentlig fri parameter, som bestemmes på lignende måde som de øvrige parametre, resistiviteter og lagtykkelser. Den målte højde indgår da som a priori information om den sande højde. Dette vil medføre at usikkerheden på resistiviteter og lagtykkelser vil forøges i forhold til de usikkerheder, som fremkommer, hvis man tolker data med fikseret målehøjde under antagelse af, at højdebestemmelsen er korrekt og uden usikkerhed. Korrektur af de målte højder gennem inddragelse af digitale terrænmodeller og brug af videooptagelser fra helikopteren af det overfløjne terræn vil være det mest optimale, men dette arbejde er meget tidskrævende. Tolkningerne, som præsenteres i det følgende, er baseret på den målte højde under antagelse af, at den er korrekt. Områder med fejlagtig højdeangivelse vil i de fleste tilfælde have en lavere højde end den sande, og dette vil afspejles i, at de fremkomne modeller vil indeholde et meget resistivt lag øverst i modellen. Omvendt, hvis den angivne højde er for stor. Så vil man se et konduktivt lag øverst i modellen.

### **Område Stevns, Storstrøms Amt**

Positionen af flylinier er vist på i Figur 8.1 sammen med information fra det digitale 4 cm kort fra Kort og Matrikelstyrelsen. Figur 8.2 viser de målte værdier af sender- og modtagerspøler over terrænet. Den gennemsnitlige højde er ca. 35 meter.

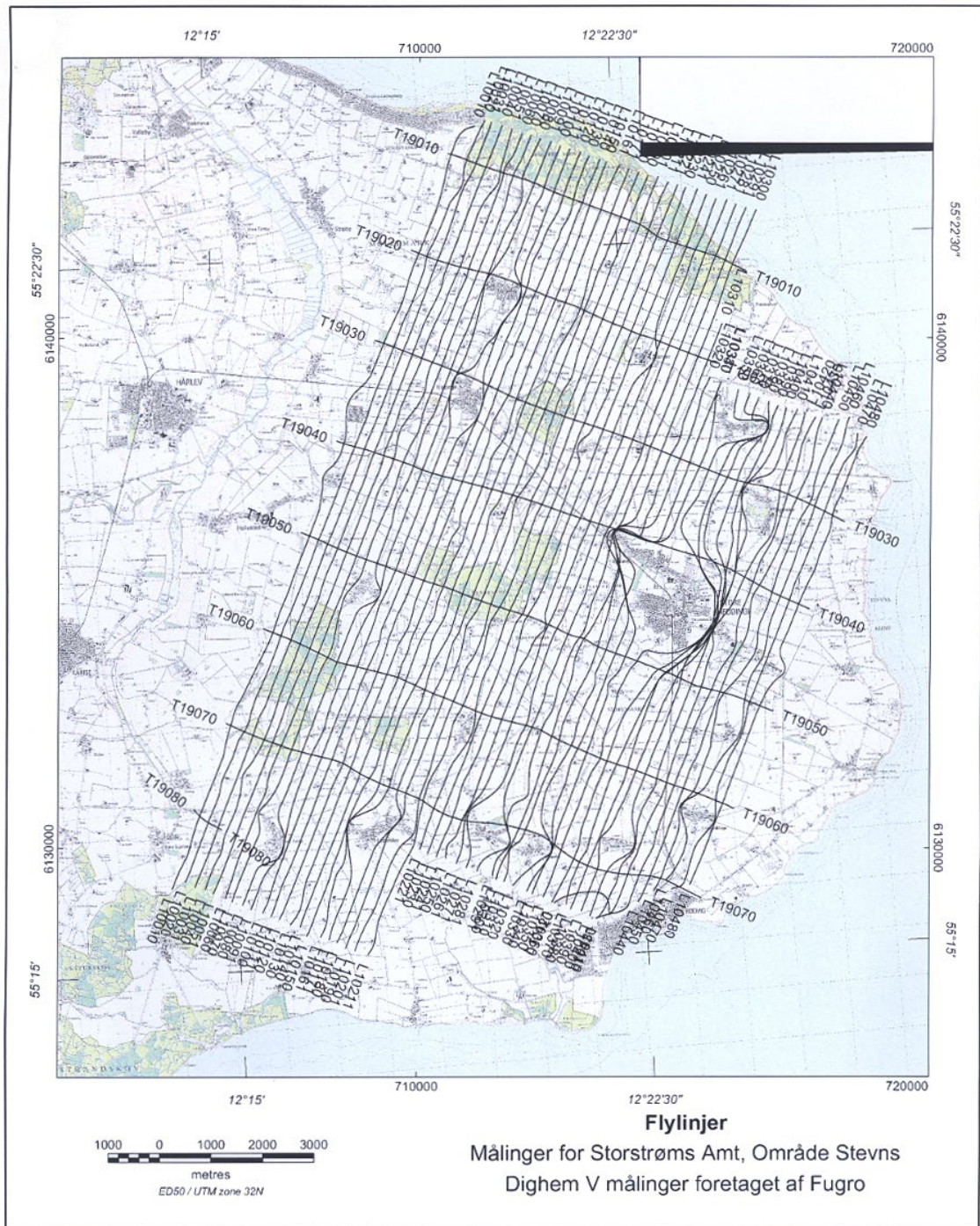
Målingerne på Stevns dækker et område, hvor de geologiske formationer overvejende består af morænemateriale, hovedsageligt moræneler, over kalkaflejringer. Information fra borer viser tykkelser af de kvartære aflejringer fra mindre end 5 m til omkring 30 m. Saltholdigt grundvand kendes fra de dybere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

Datatilpasningen, eller rettere afvigelsen mellem data og modelrespons, udtrykkes ved rms-værdien (residualet), som er vist i Figur 8.3 for tolkningen med fålagsmodeller. Middelværdien er 0.76 og den tilhørende standard afvigelse er 0.34. Ca. 252 000 målinger indgår i disse data. Under antagelse af, at den anvendte støjmodel er en rimelig god beskrivelse af de faktiske usikkerheder, må de nævnte værdier for datatilpasningen betegnes som til-

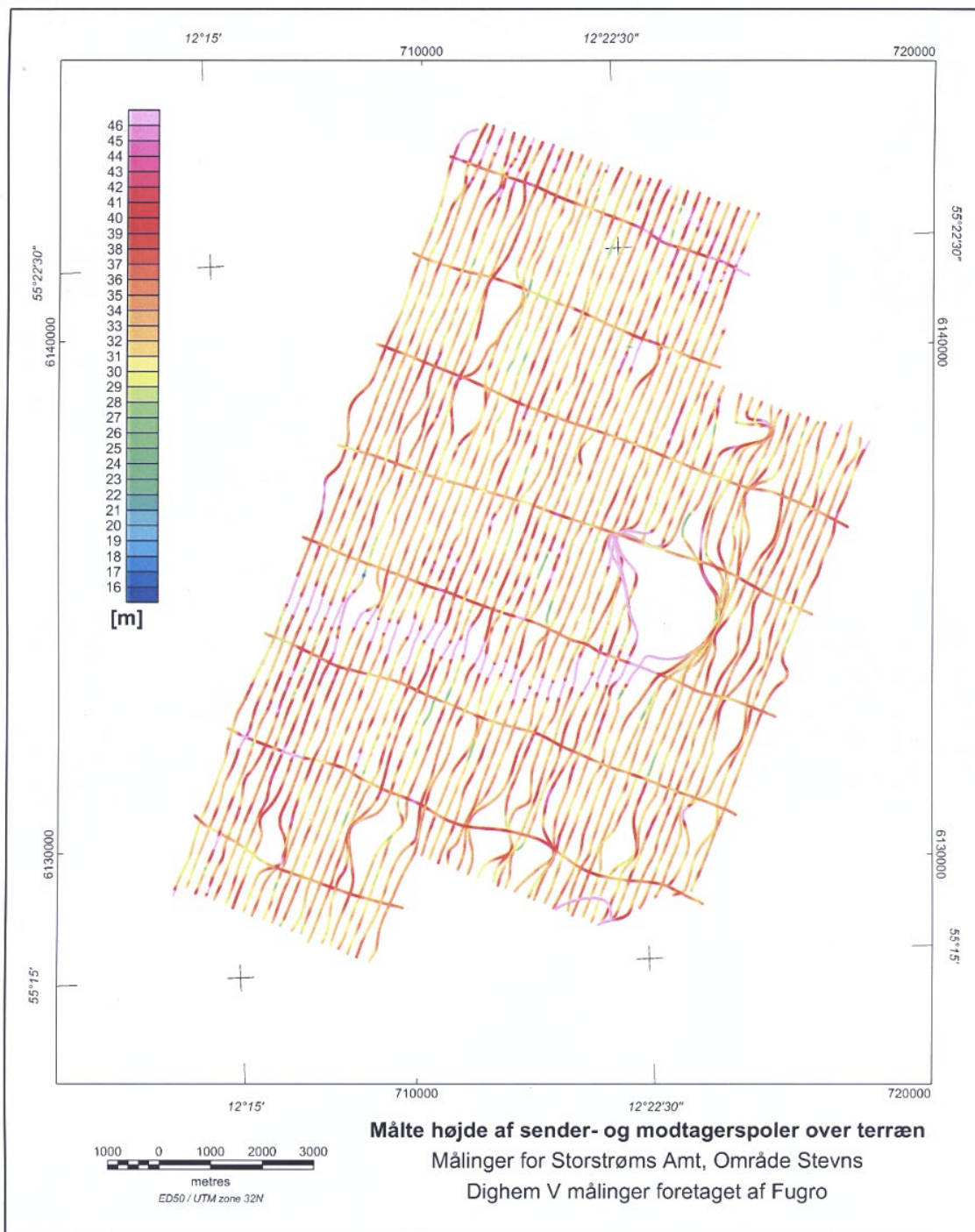
fredsstillende. Der er imidlertid et problem, som ikke fremgår af de nævnte gennemsnitsværdier. Problemet består i, at bidraget til residualen er væsentligt højere for 102 kHz data end for de øvrige frekvenser, samt at afvigelsen mellem de målte data og modelresponsen for 102 kHz udviser systematiske afvigelser. Det største problem er den systematiske afvigelse, idet størrelsen på residualen kunne ændres ved at revidere støjmodellen. Årsagen til den systematiske afvigelse eller inkonsistens mellem data og modelrespons skyldes antagelig, at nivelleringen af de målte data har været utilstrækkelig for den højeste frekvens på 102 kHz, eller at instrumentet ikke har været korrekt kalibreret. Den højeste frekvens bidrager mest til informationen om de overfladenære lag, som ønskes kortlagt i forbindelse med zoneringen, og man har derved mistet opløsning i de øverste lag. De værdier af resistivitet og lagtykkelse, som inversionsprogrammet giver, specielt nær overfladen, må forventes at være forstyrrede. Resistiviteterne ligger dog inden for det interval, som man må forvente for de geologiske aflejringer i området. Tilsvarende må de modeller, som opnås ved fremstilling af Sengpiel-sektioner og differential sections, forventes at være fejlbehæftede.

Fålagsmodellerne for hele området vises ved hjælp af kort over hver af de tre lagresistiviteter og to lagtykkelser (Figurerne 8.4-8.8). Områder på kortet, hvor data er tolket med et-lagsmodeller optræder som blanke i figurerne over lagtykkelserne og resistiviteterne af andet og tredje lag. Tilsvarende gælder for tolagsmodellerne for lagtykkelsen af andet lag og resistiviteten af tredje lag.

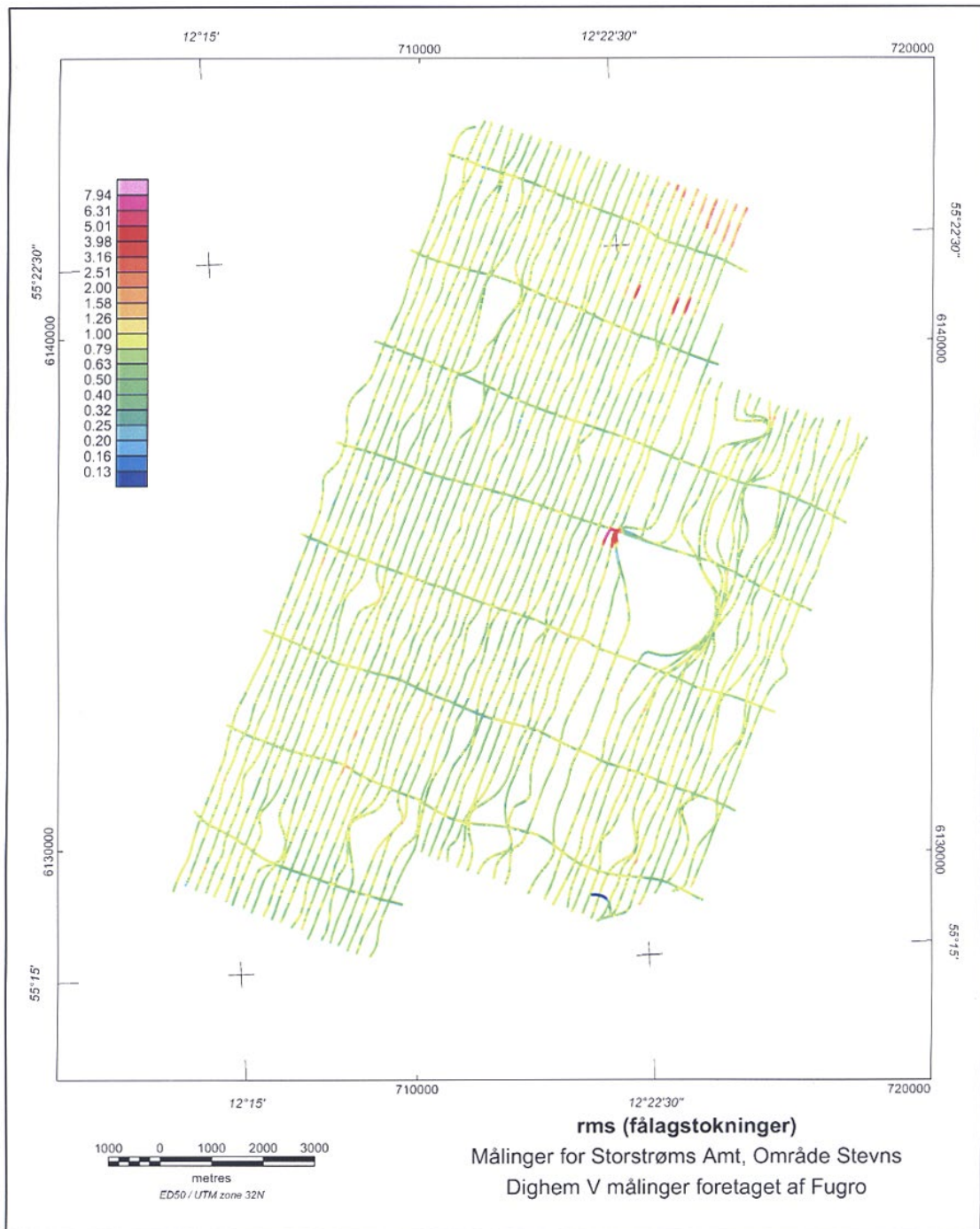




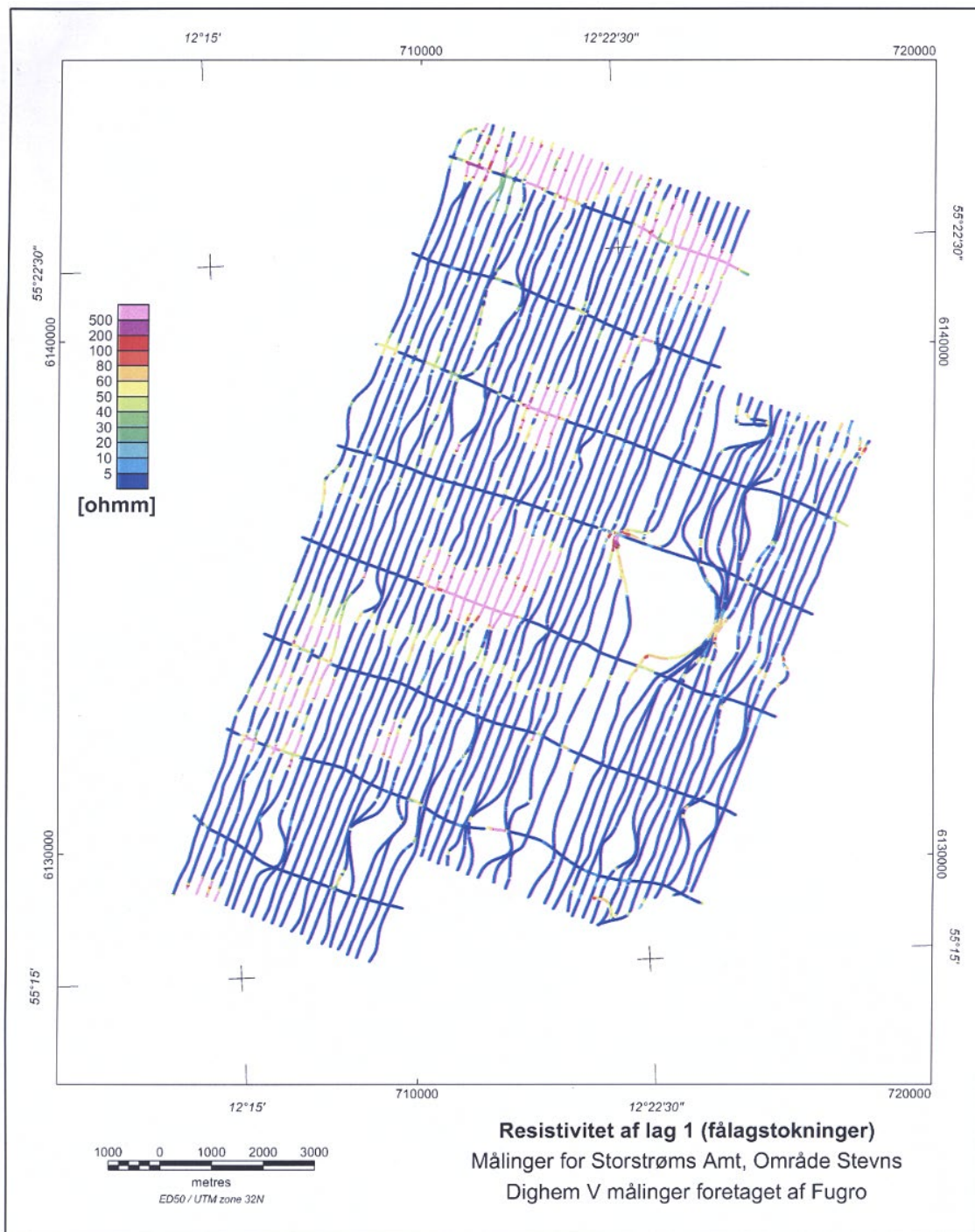
**Figur 8.1.** Kortet viser positionen af flylinjer, Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt.



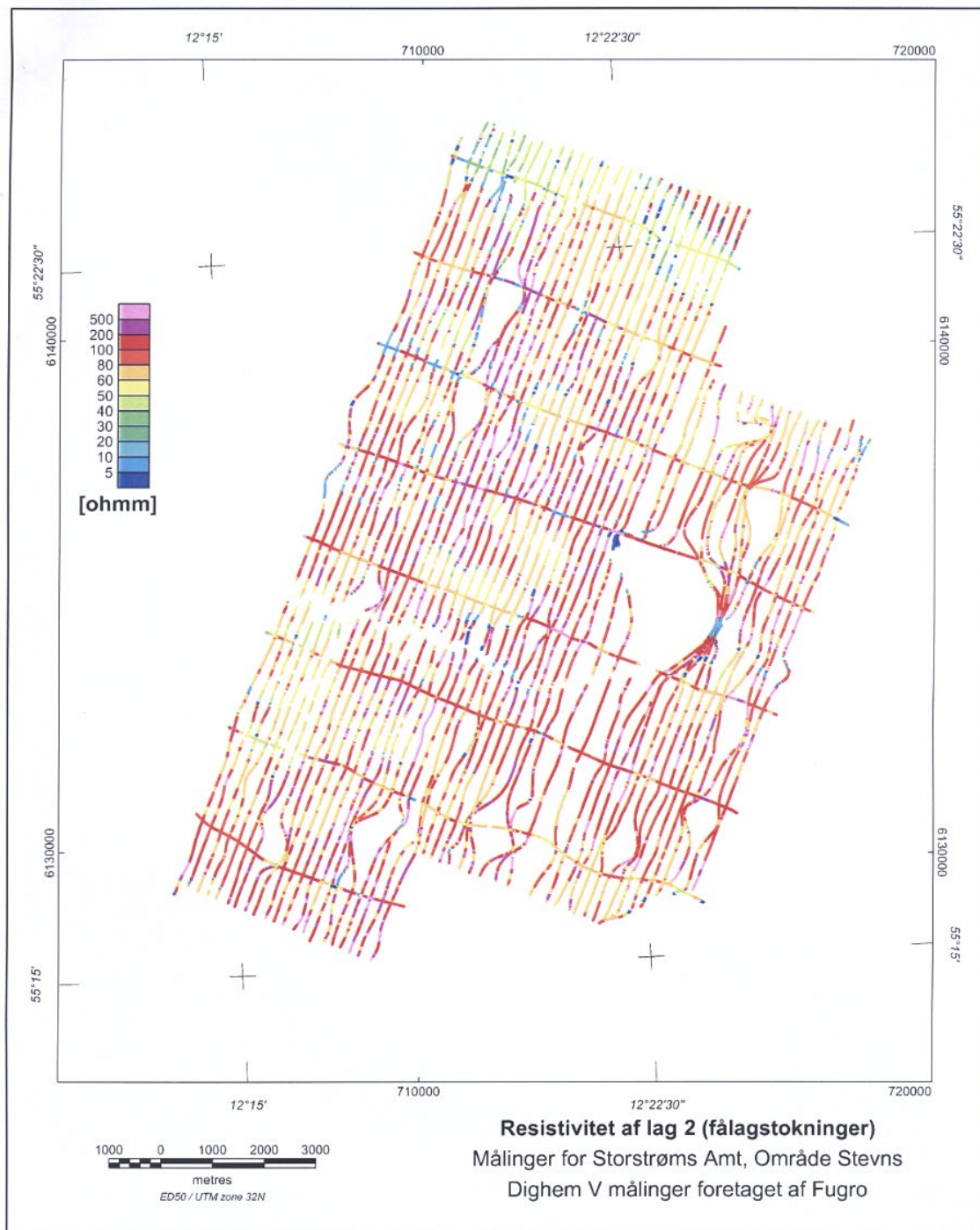
**Figur 8.2.** Kortet viser de målte højder af sender- og modtagerspøler over terræn, Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt.



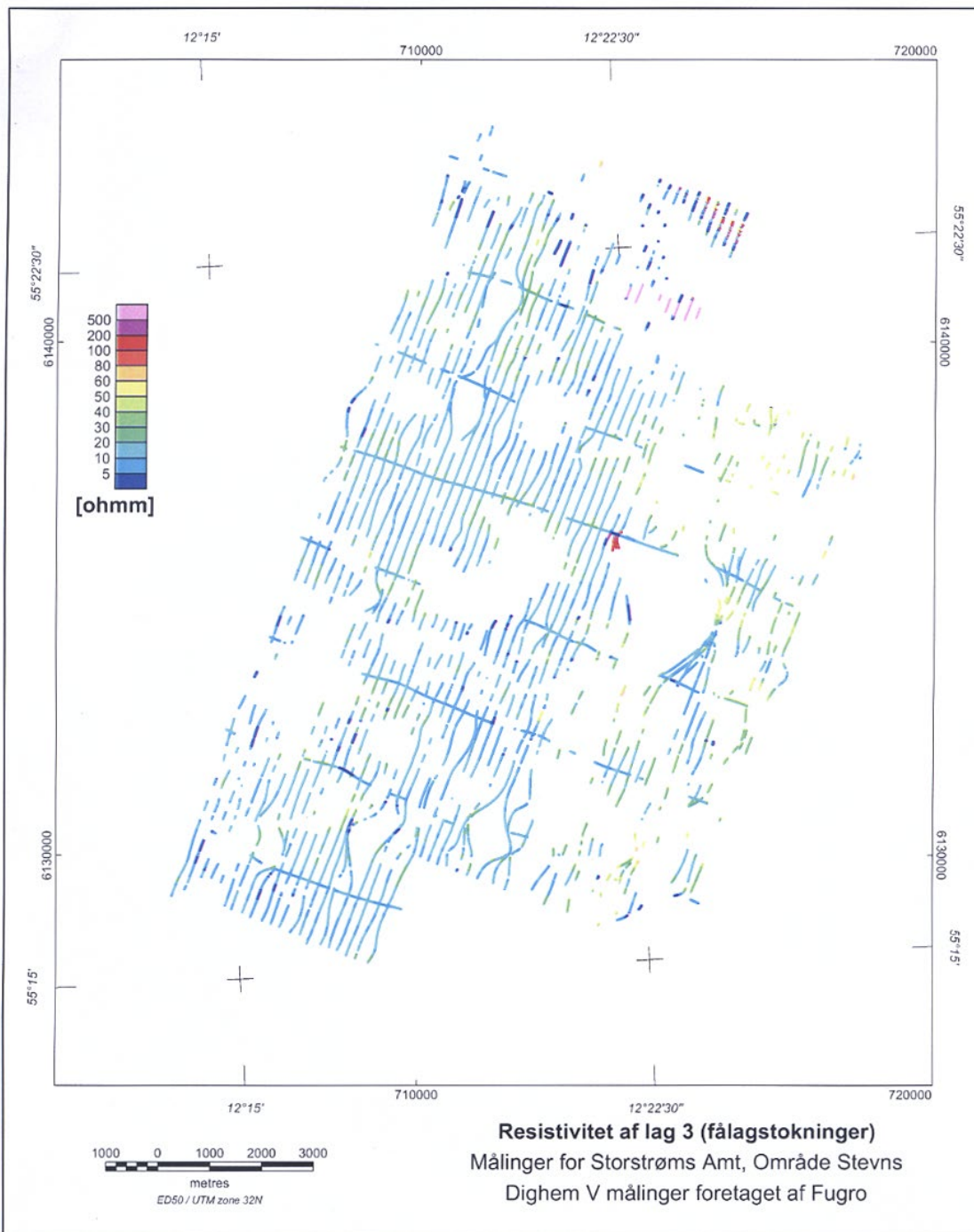
**Figur 8.3.** Kortet viser rms-værdien for 1D fålagstokninger af Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt.



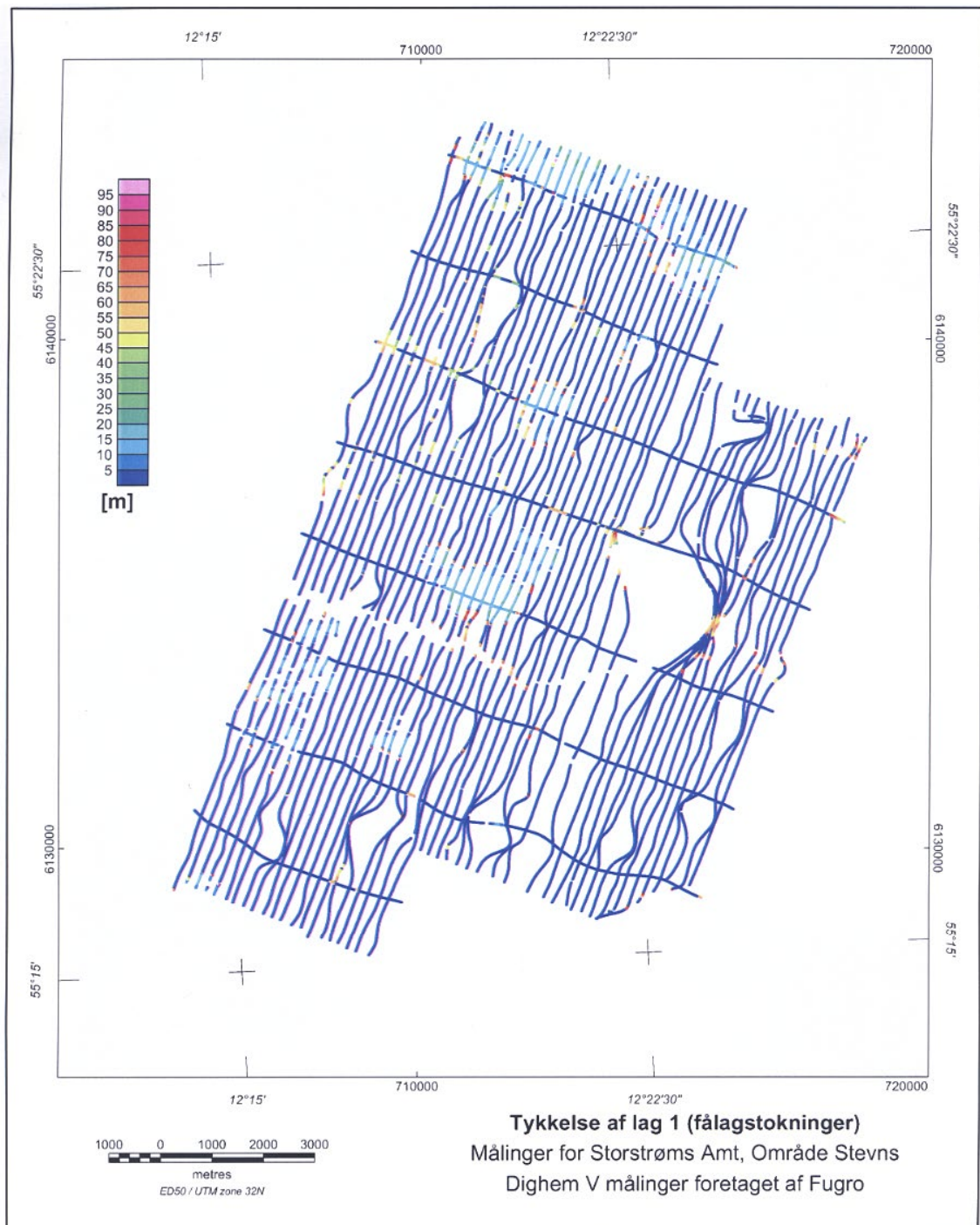
**Figur 8.4.** Kortet viser resistiviteten af første lag i 1D fålagstokningerne af Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt.



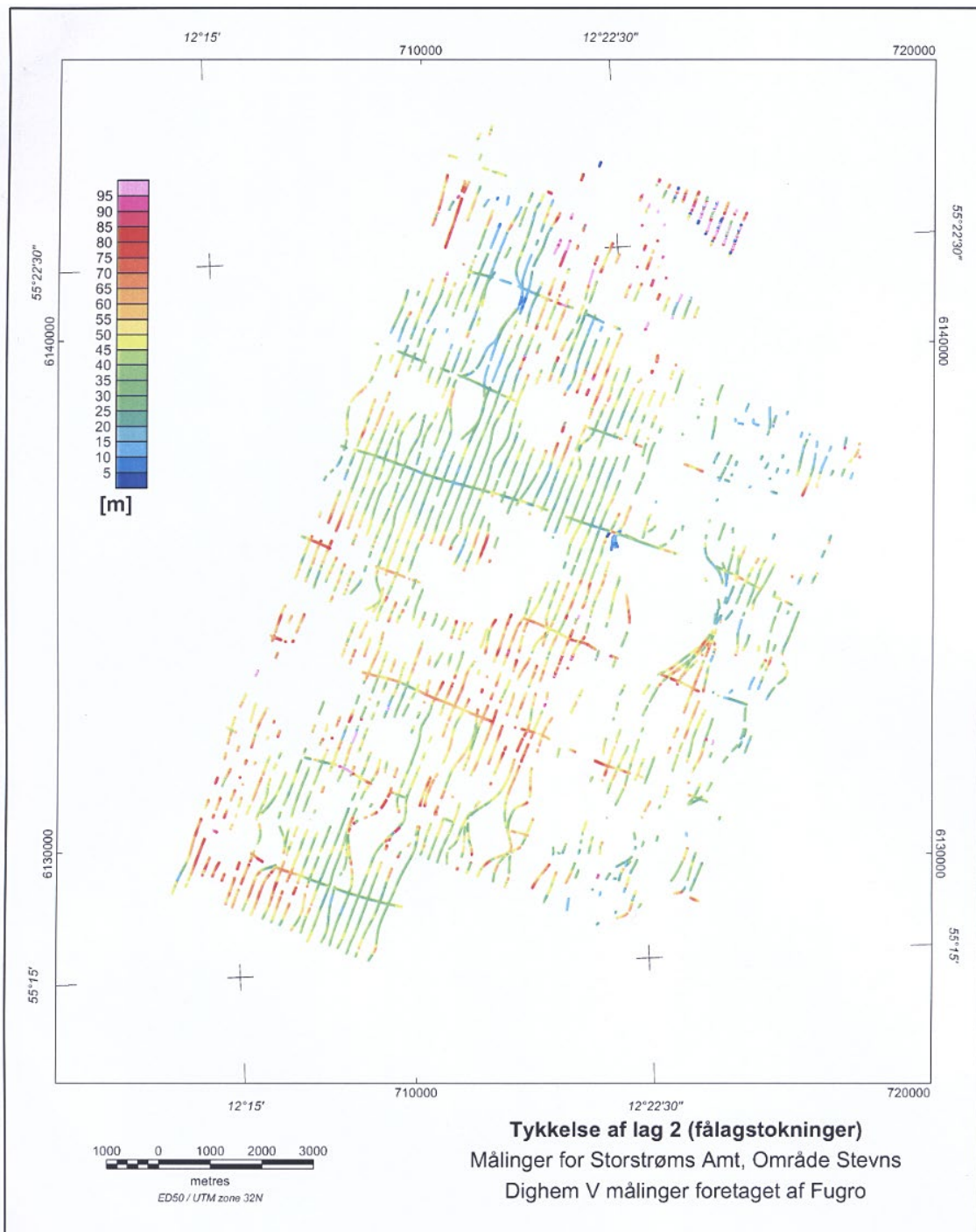
**Figur 8.5.** Kortet viser resistiviteten af andet lag i 1D fålagstolkningerne af Digham<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Områder, hvor 1D modellerne består af etlagsmodeller, vises som blanke.



**Figur 8.6.** Kortet viser resistiviteten af tredje lag i 1D fålagstokningerne af Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Områder, hvor 1D modellerne består af et- eller tolagsmodeller, vises som blanke.



**Figur 8.7.** Kortet viser tykkelsen af første lag i 1D fålagstokningerne af Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Områder, hvor 1D modellerne består af etlagsmodeller, vises som blanke.



**Figur 8.8.** Kortet viser tykkelsen af andet lag i 1D fålagstolkningerne af Dighem<sup>VRES</sup> målinger på Stevns foretaget af Fugro for Storstrøms Amt. Områder, hvor 1D modellerne består af et- eller tolagsmodeller, vises som blanke.



# 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<sup>VRES</sup> systemet, et HEM system med fem frekvenser.

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 flybårne transiente metoder, se 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 objektivt grundlag for at vurdere, hvilken information man får ud af en HEM undersøgelse.

## Fordele og ulemper ved HEM metoden

Fordelene 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 tolkninger 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.

Resultaterne af analyserne i denne rapport er blandede. Med hensyn til kortlægningen af overfladenære lag, kan HEM metoden opløse tykkelsen af et toplag med lavere resistivitet end den underliggende lagserie ned til ca. 4 m. Man kan regne med en indtrængningsdyb-

de på ca. 50 m, i optimale tilfælde ned til 100 m, hvis man har en god leder i bunden af lagserien og ikke for megen ledningsevne over den. Gennemføres en tolkning med fålagsmodeller, kan man tolke de fleste datasæt med tolagsmodeller. Kun i ca. 20% af tilfældene er det nødvendigt at bringe trelagsmodeller i anvendelse for at tolke data, så for det meste indeholder data information til at opløse tre parametre. Anvendes mangelagsmodeller vil man i nogle tilfælde få indikationer af resistivitetesvariationer, som ikke viser sig i fålagsmodellerne.

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 tolkningen for at undgå 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 processing efterfølgende gennemføres, kan udgiften til tolkningen blive af størrelsesordenen halvt så stor som udgiften til undersøgelsen. Når de koblede data fjernes, må man forvente, at man kun får pålidelige resultater i en begrænset del af undersøgelsesområdet, typisk ca. halvdel, og at denne del vil være spredt over mindre, usammenhængende områder. Disse forhold betyder, at den effektive pris per kilometer pålidelige data vil blive ca. tre gange 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<sup>RES</sup> 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 resistivitetesvariationerne, som ikke ses på fålags-tolkningerne. Disse træk ved modellen kan dermed siges at være indikeret, men ikke bestemt, og det må anbefales, at man gennemfører begge typer af tolkninger.

HEM metoden har en vis opløsning af de overfladenære lag, idet den kan kortlægge tykkelsen af et toplag med lavere resistivitet end den underliggende lagserie ned til ca. 4 m, men MEP metoden kortlægger lag ned den halve tykkelse med en mindste elektrodeafstand på 5 m, og PACES metoden bestemmer endnu tyndere lag. TEM metoden er den dårligste til at bestemme tynde overfladenære lag.

Indtrængningsdybden for DIGHEM<sup>VRES</sup> systemet afhænger af resistivitetsfordelingen i jorden, men man kan som oftest regne med en indtrængning på ca. 50 m. I optimale tilfælde med ikke for megen ledningsevne i de overfladenære lag kan man bestemme en god leder i 100 m dybde.

De jordbaserede metoder har som hovedregel en bedre opløsning af jordens ledningsevneforhold. PACES systemet har en god opløsning i de øverste 20 m af jorden, men rækker ikke dybere. MEP systemet har en indtrængningsdybde, der er sammenlignelig med HEM metoden, men giver som regel en bedre vertikal opløsning af undergrundens resistivitetforhold. PROTEM 47 systemet har den største indtrængningsdybde af de fire systemer og giver ofte en god opløsning af de gode ledere, og man kan forvente af få opløst trelagsmodeller.

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 nonlinear 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<sup>VRES</sup> 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<sup>VRES</sup> 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 flybårne 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 resi-

stivitet indenfor et større område, såfremt man betragter fålagstolkningerne. På mangelags-tolkningerne 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 støjertuberede 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.

## Koblinger

De elektromagnetiske metoder, HEM og TEM, både jordbaserede og flybårne, 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.

Gennem analogibetragninger med transiente systemer og en betragtning af de datasæt, vi har haft til rådighed, har vi vurderet, at der for HEM målinger vil optræde koblinger inden for en afstand på 250–300 m, og at dette vil betyde, at man må forvente koblinger på op til 60% af et undersøgelsesområde i landlige områder af Østjylland og Øerne. 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, og man er henvist alene til betragtning af profilet. Disse vanskeligheder forværres yderligere af den udbredte praksis med at midle HEM data langs måleprofilet.

Det er vigtigt at koblede responser bliver identificeret og fjernet fra datasættet inden tolkningen, så man undgår fejlagtige og vildledende tolkninger.

## **Støjmodel og inversionspraksis**

Vi har formuleret en støjmodel for DIGHEM<sup>VRES</sup> 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.

## **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, da marginaludgifterne er små.

## **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.

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 un-



der 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 rutinemæssigt indsamles i forbindelse med luftbårne elektromagnetiske målinger, da marginaludgifterne er forholdsvis små.

# Litteraturhenvisninger

## Introducerende litteratur på dansk

På dansk findes ingen kompendier om HEM metoden, men der findes introducerende 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](http://www.abem.se).

## International lærebogslitteratur

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

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

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

Palacky G.J. and West G.F., 1991: Airborne electromagnetic methods, In: 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 systemers anvendelse til hydrogeofysisk kortlægning i Danmark. GEUS 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. and 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. and 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. and 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. and Christensen N.B., 2001, Luftbåren TEM i Danmark. Teoretiske overvejelser og praktiske erfaringer. Poster fra ATV konferencen om jord og grundvand, 2001.
- Christiansen A.V. and Christensen N.B., 2001, En sammenligning af flybåren og jordbase- ret TEM. Abstract fra ATV konferencen om jord og grundvand, 2001.
- Christiansen A.V. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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., and Auken, E., 1992, Simultaneous electromagnetic layered model analysis, in Jacobsen, B.H., Ed., Proceedings of the Interdisciplinary Inversion Workshop 1, Aarhus 1992:GeoSkrifter , 49-56. 41
- Dahlin, T. and 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. and 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. and 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 suiter 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.

Nedenfor ses en tabel over indholdet af de enkelte figurer.

- Figur A.1 : Etlagsmodel. Resistiviteten af første lag varieres.
- Figur A.2 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5  $\Omega\text{m}$  og 30  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.3 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5  $\Omega\text{m}$  og 70  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.4 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5  $\Omega\text{m}$  og 200  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.5 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega\text{m}$  og 5  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.6 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega\text{m}$  og 70  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.7 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega\text{m}$  og 200  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.8 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega\text{m}$  og 5  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.9 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega\text{m}$  og 30  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.10 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega\text{m}$  og 200  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.11 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega\text{m}$  og 5  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.12 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega\text{m}$  og 30  $\Omega\text{m}$ .
- Figur A.13 : Tolagsmodel. Tykkelsen af første lag varieres.  
Resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega\text{m}$  og 70  $\Omega\text{m}$ .

- 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

Nedenfor ses en statistik over fordelingen af én-, to- og trelagstolkninger for de forskellige metoder og modeller:

### Tolagsmodeller

	1-lags	2-lags
DIGHEM <sup>VRES</sup>	74 29,4%	178 70,6%
MEP	5 2,0%	247 98,0%
PACES	40 15,9%	212 84,1%
PROTEM 47	25 9,9%	227 90,1%

### Trelagsmodeller

	1-lags	2-lags	3-lags
DIGHEM <sup>VRES</sup>	18 4,3%	328 78,1%	74 17,6%
MEP	1 0,2%	171 40,7%	248 59,0%
PACES	23 5,5%	366 87,1%	31 7,4%
PROTEM 47	2 0,5%	296 70,5%	122 29,0%

### DIGHEM<sup>VRES</sup>

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

### CVES

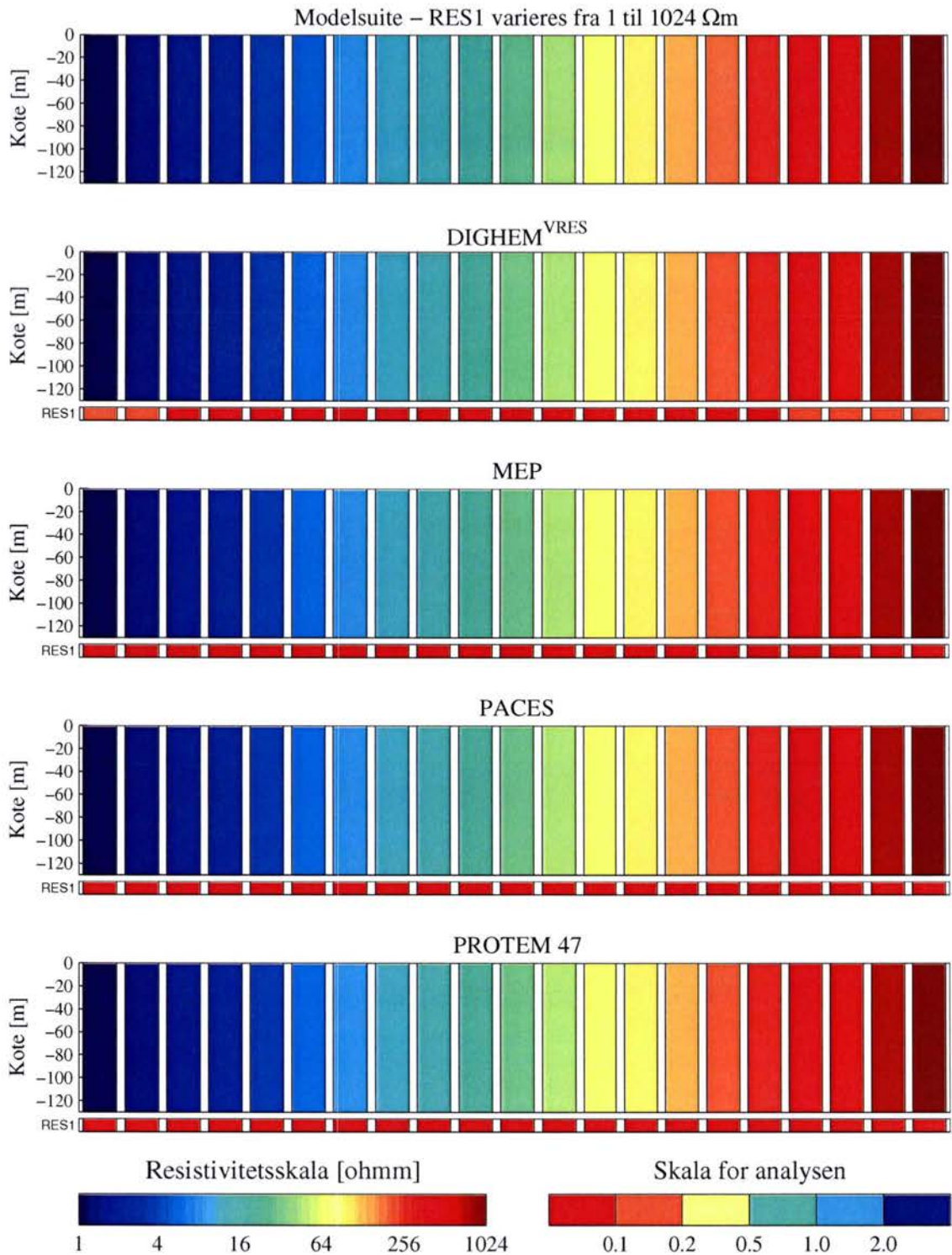
Ca. 40% af trelagsmodellerne kan tolkes med to-lagsmodeller, mens ca. 60% kan tolkes med trelagsmodeller. Kun i ét enkelt tilfælde kan der tolkes med en et-lagsmodel.

### PACES

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

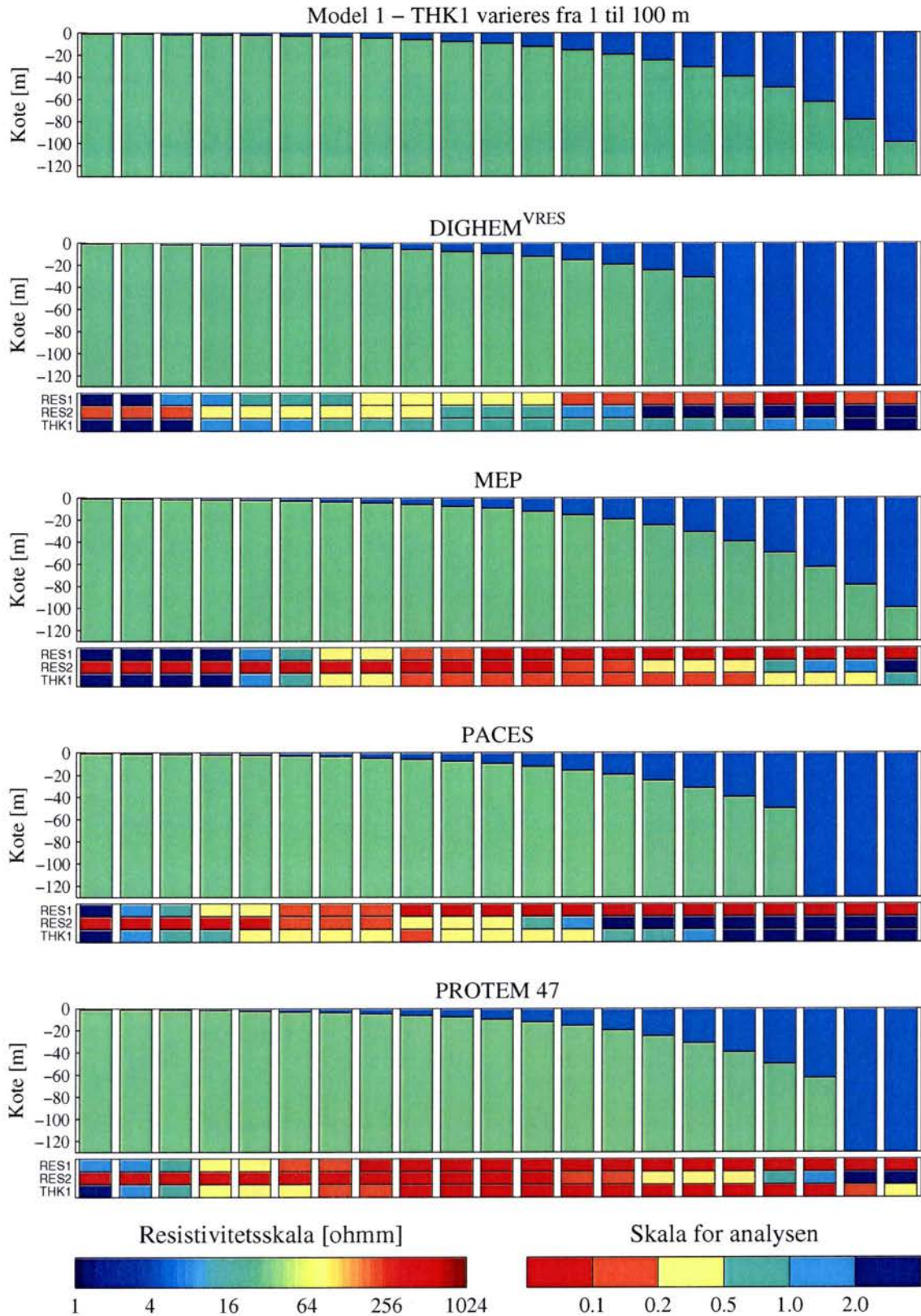
### TEM

Ca. 70% af trelagsmodellerne kan tolkes med to-lagsmodeller, mens ca. 30% kan tolkes med trelagsmodeller. Kun i to tilfælde kan der tolkes med en et-lagsmodel.

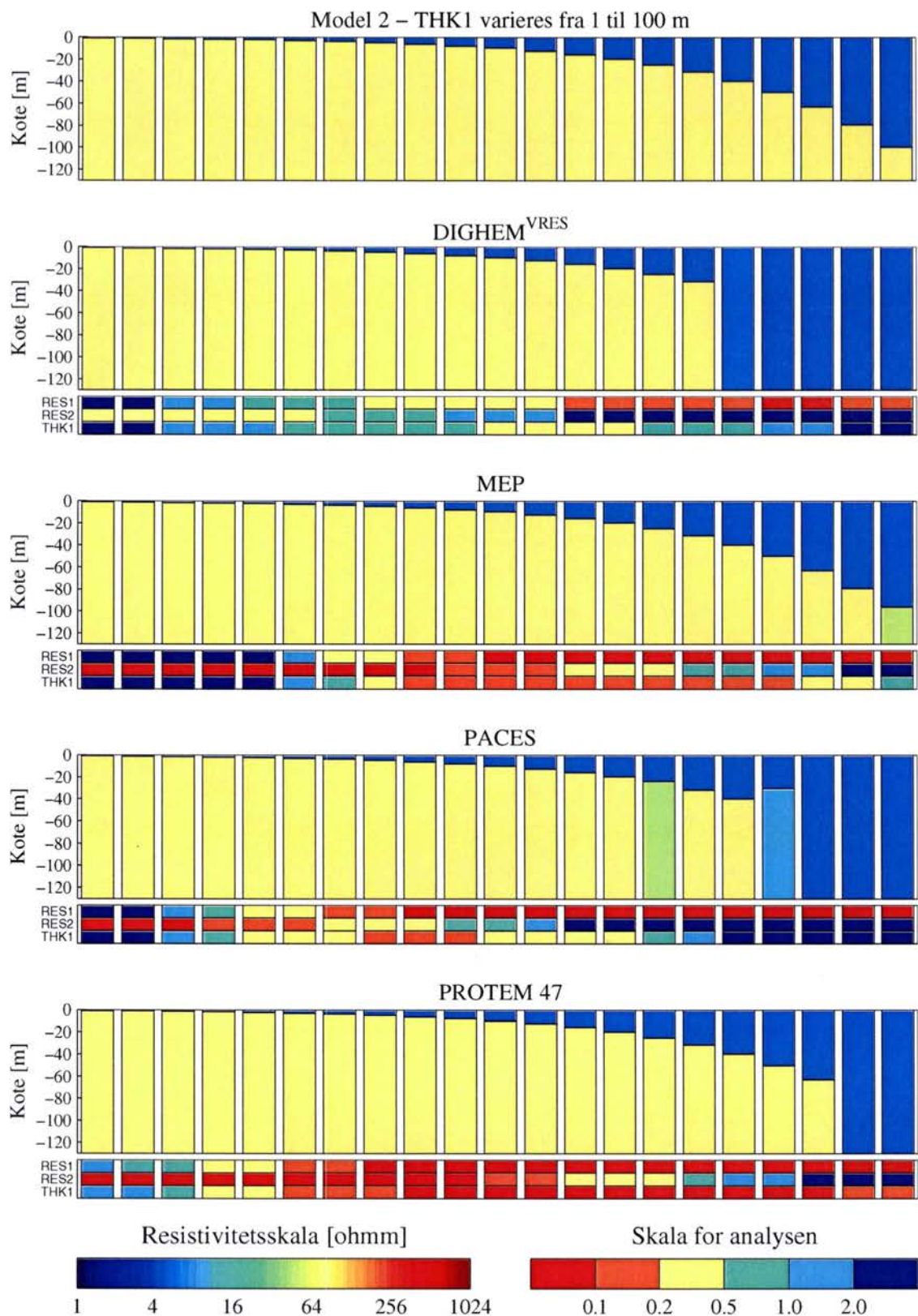


**Figur A.1.** Analyse af etlagsmodeller. Resistiviteten af laget varieres mellem 1  $\Omega\text{m}$  og 1024  $\Omega\text{m}$  i 21 trin.

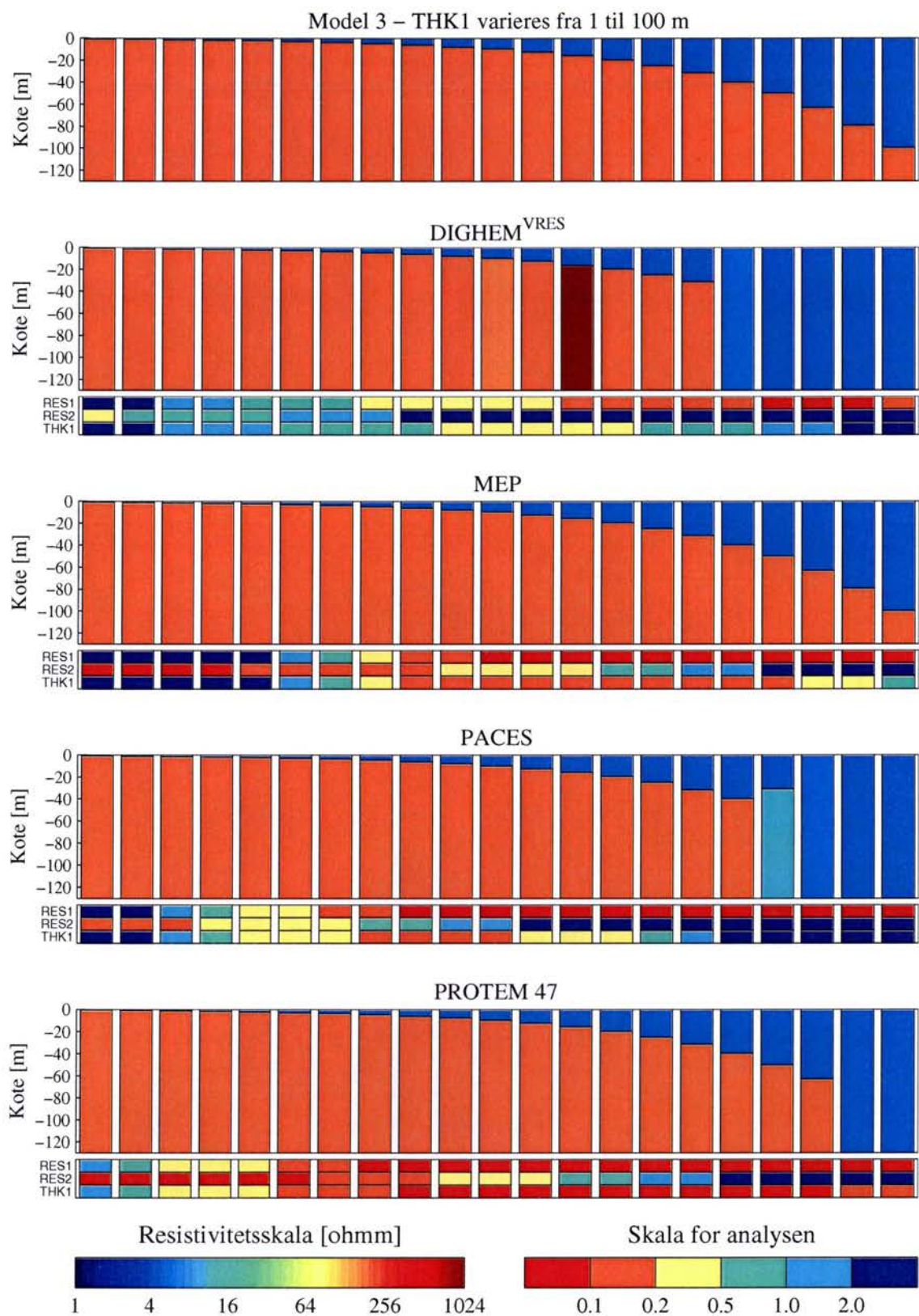




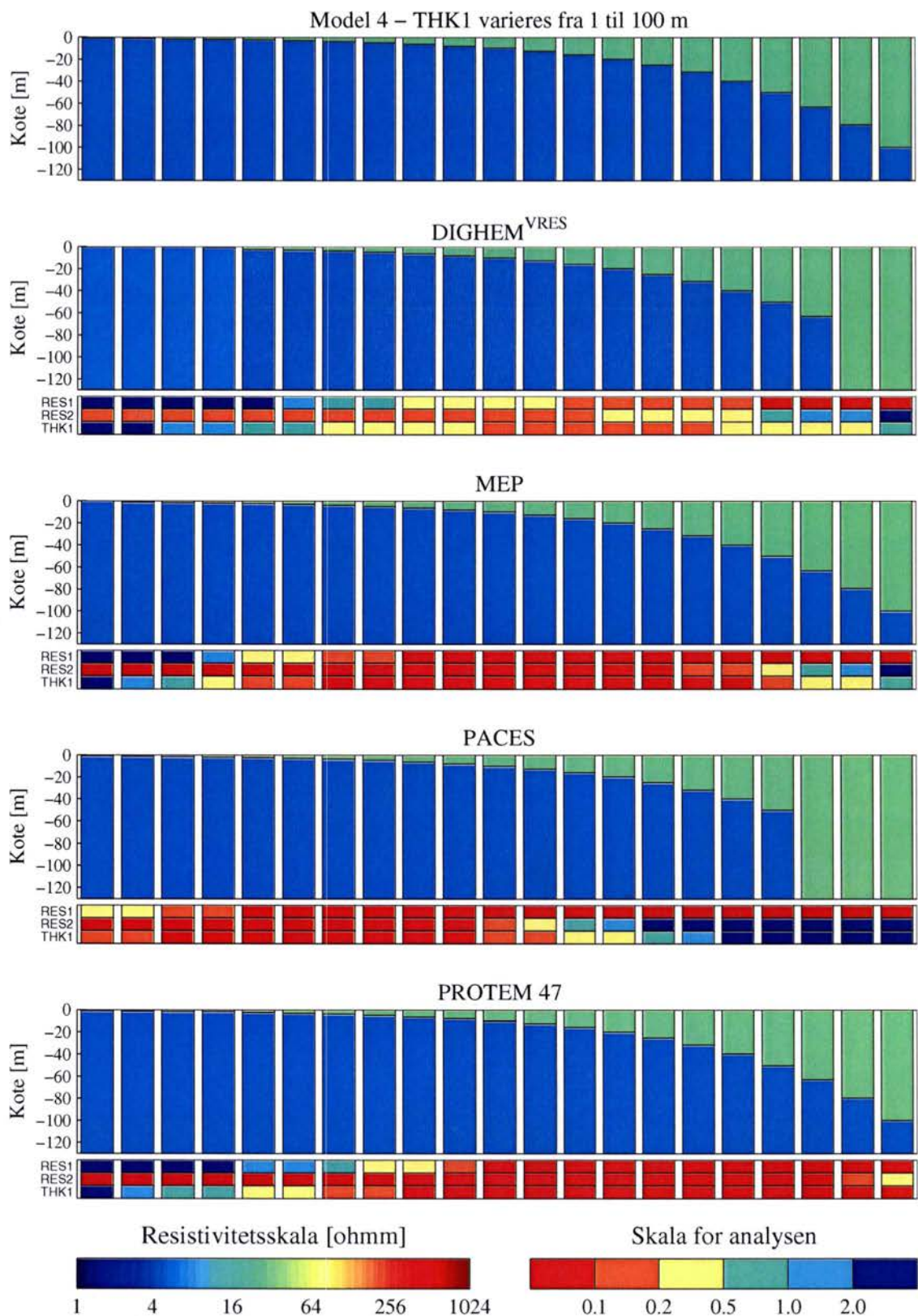
**Figur A.2.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis  $5 \Omega\text{m}$  og  $30 \Omega\text{m}$ . Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



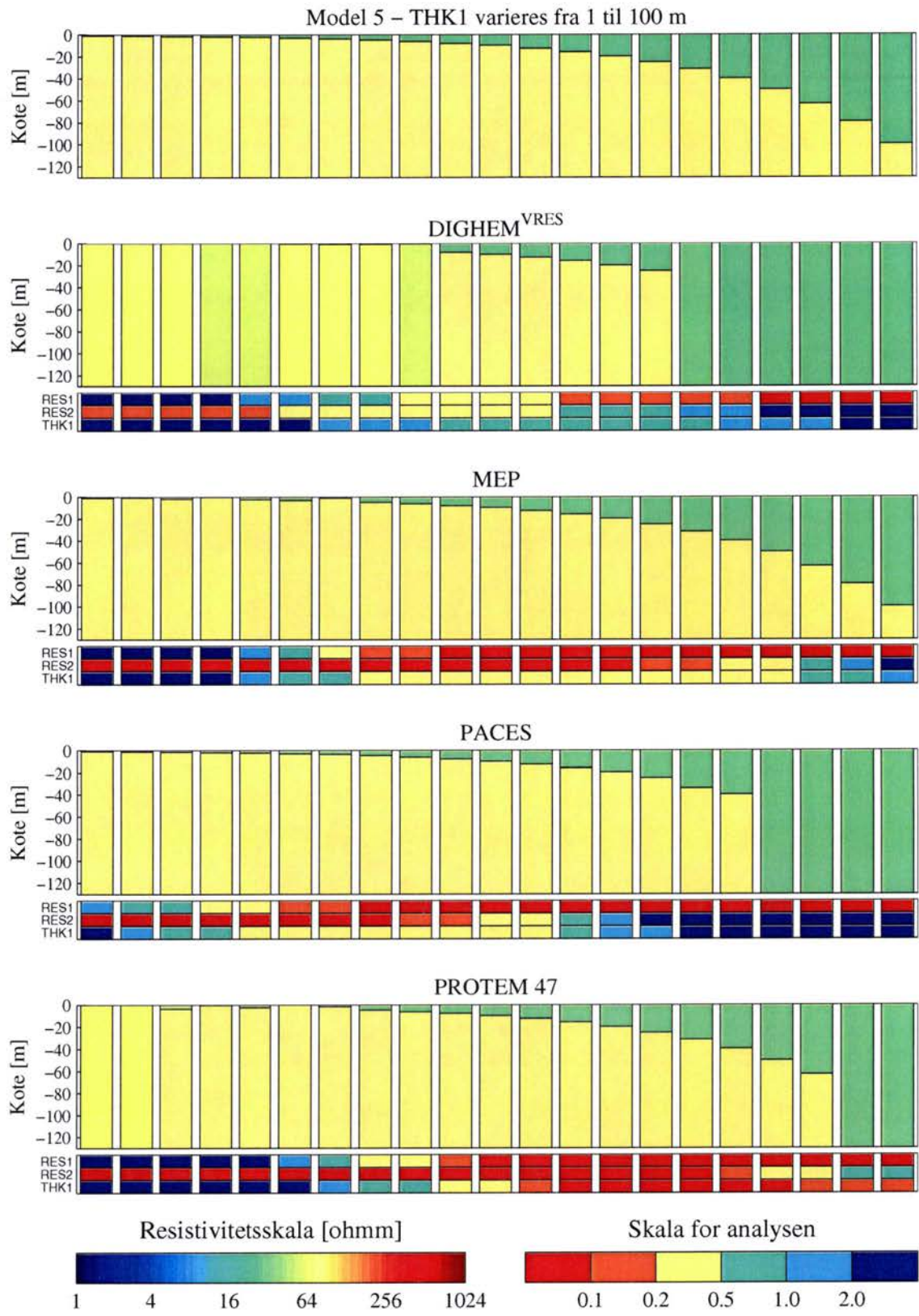
**Figur A.3.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5  $\Omega\text{m}$  og 70  $\Omega\text{m}$ . Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



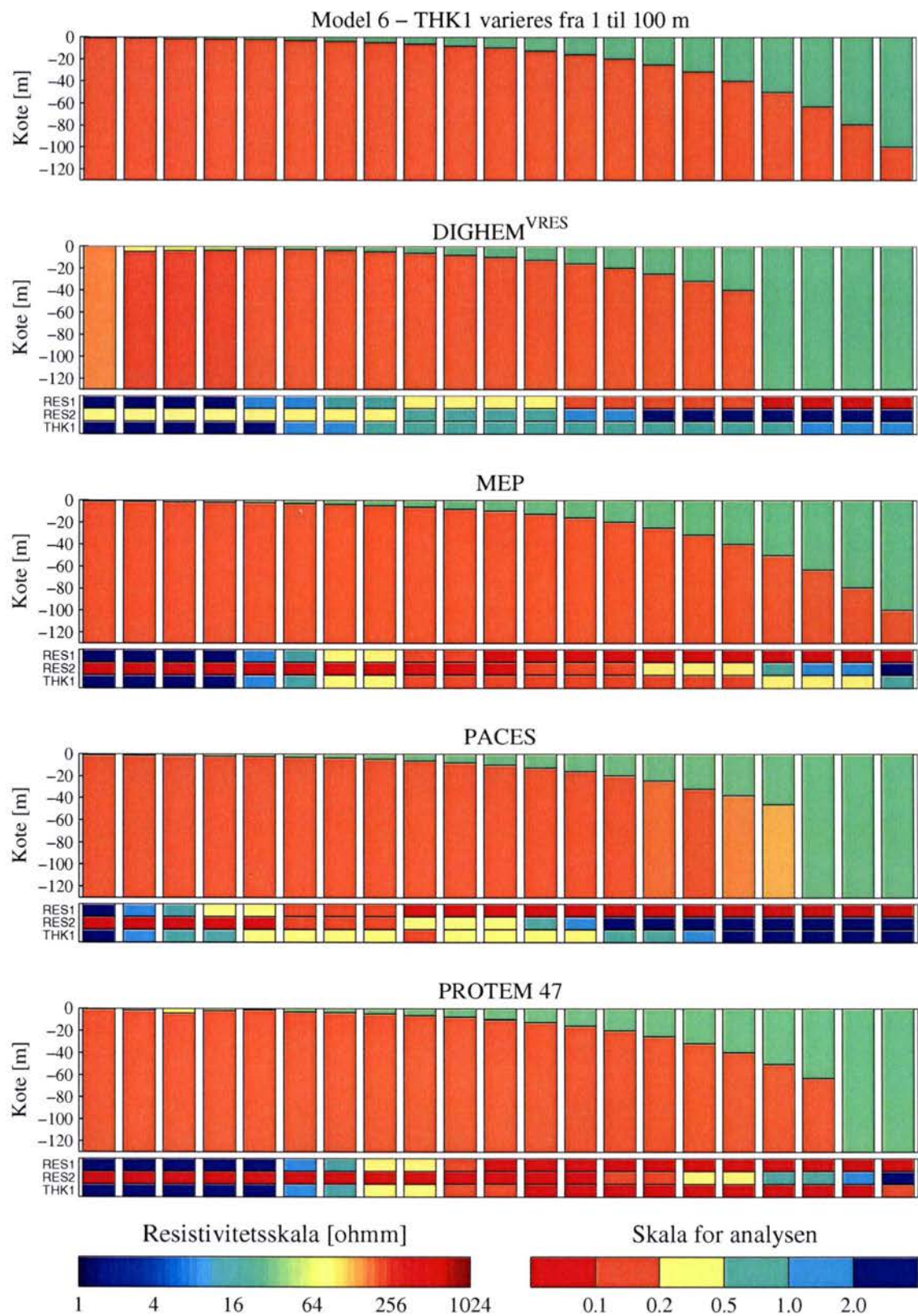
**Figur A.4.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 5  $\Omega\text{m}$  og 200  $\Omega\text{m}$ . Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



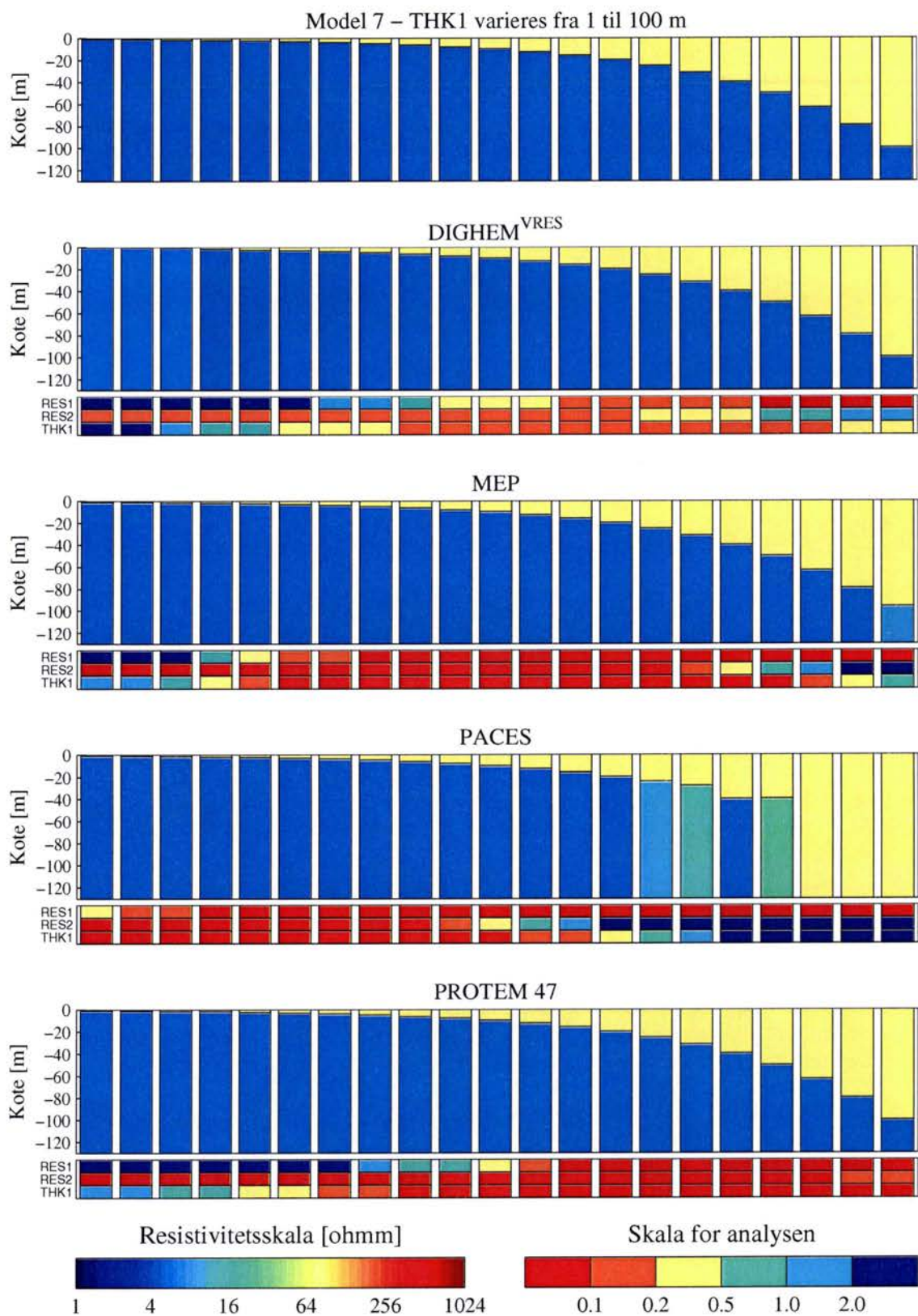
**Figur A.5.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



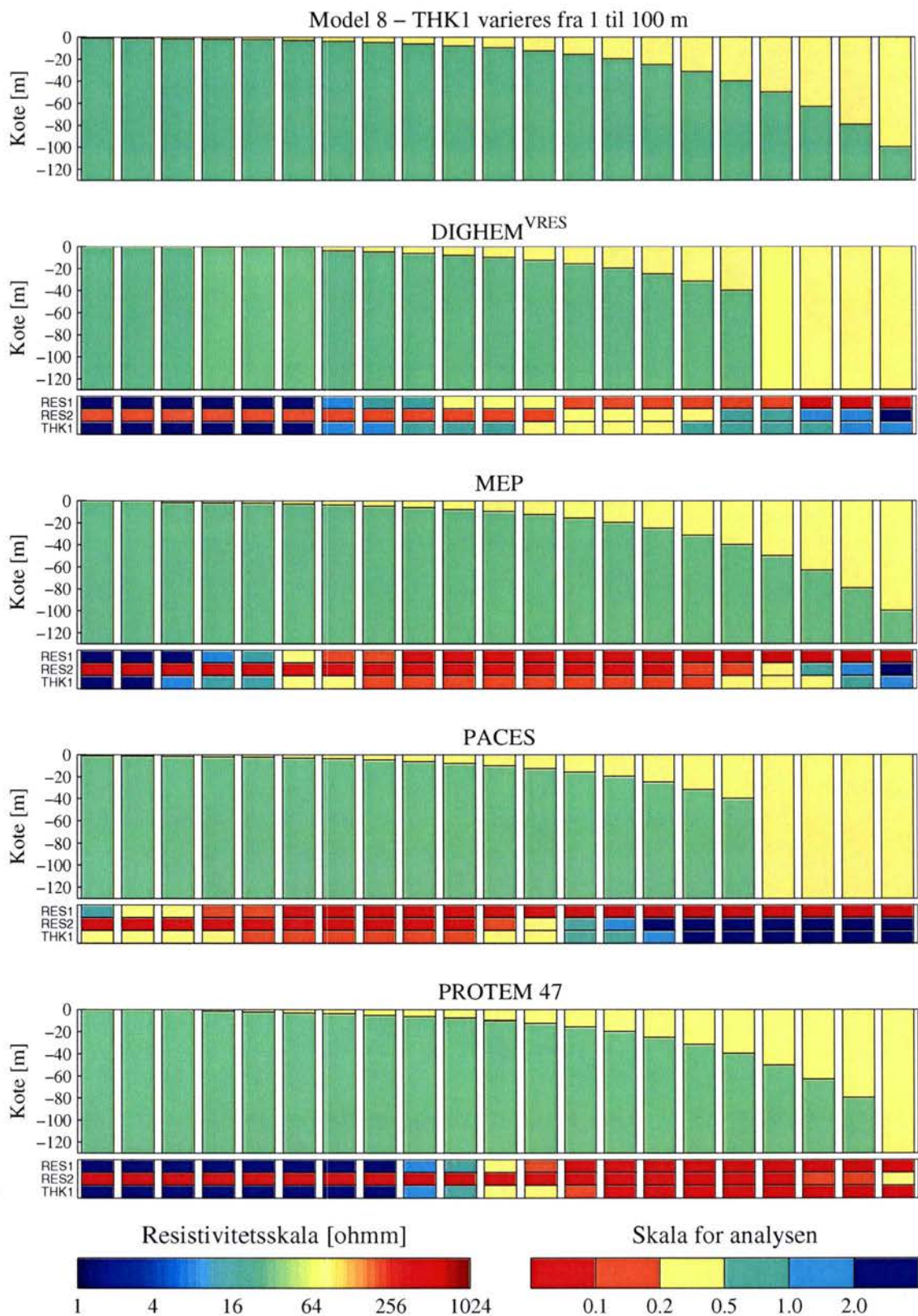
**Figur A.6.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega m$  og 70  $\Omega m$ . Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



**Figur A.7.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega\text{m}$  og 200  $\Omega\text{m}$ . Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.

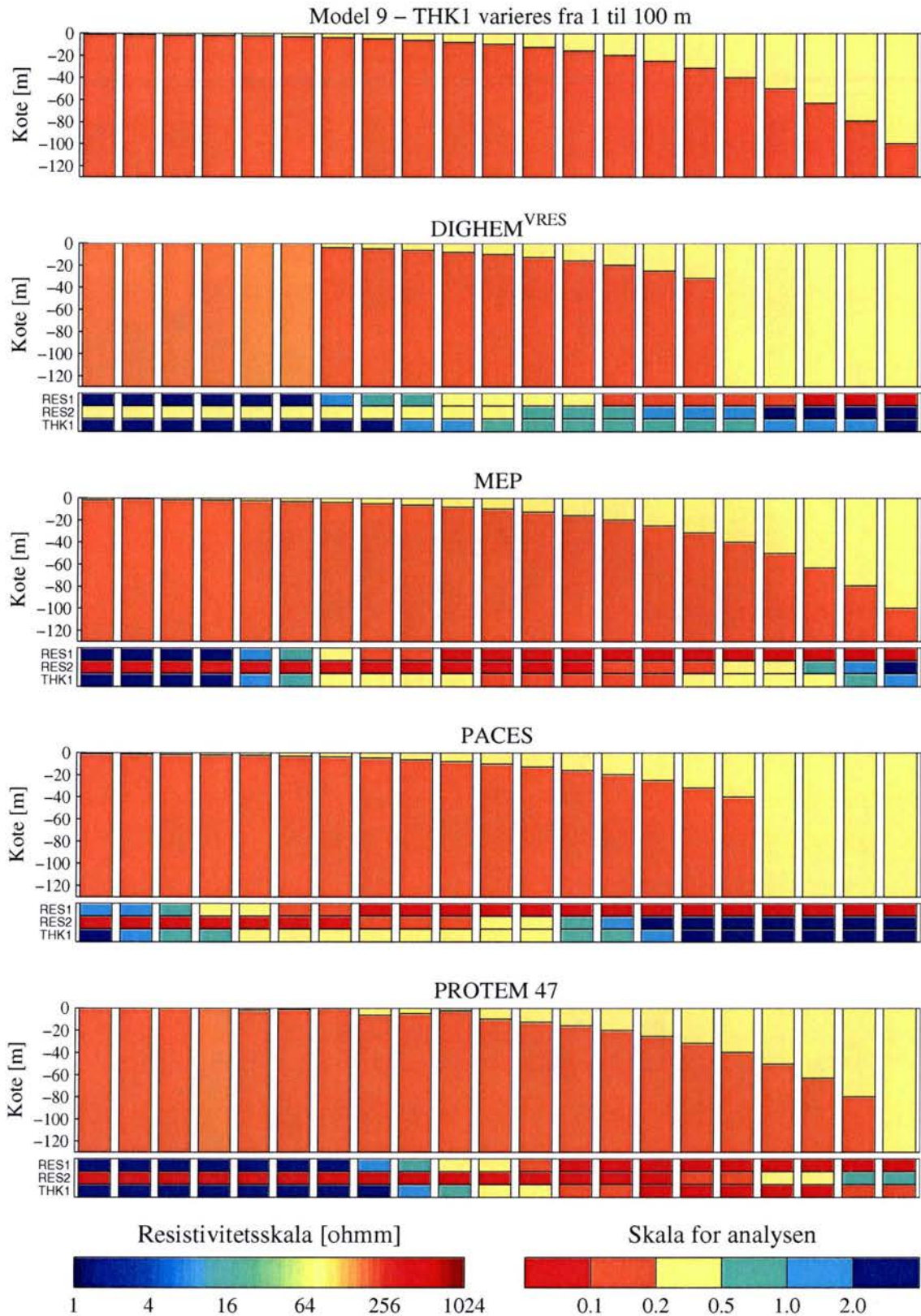


**Figur A.8.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.

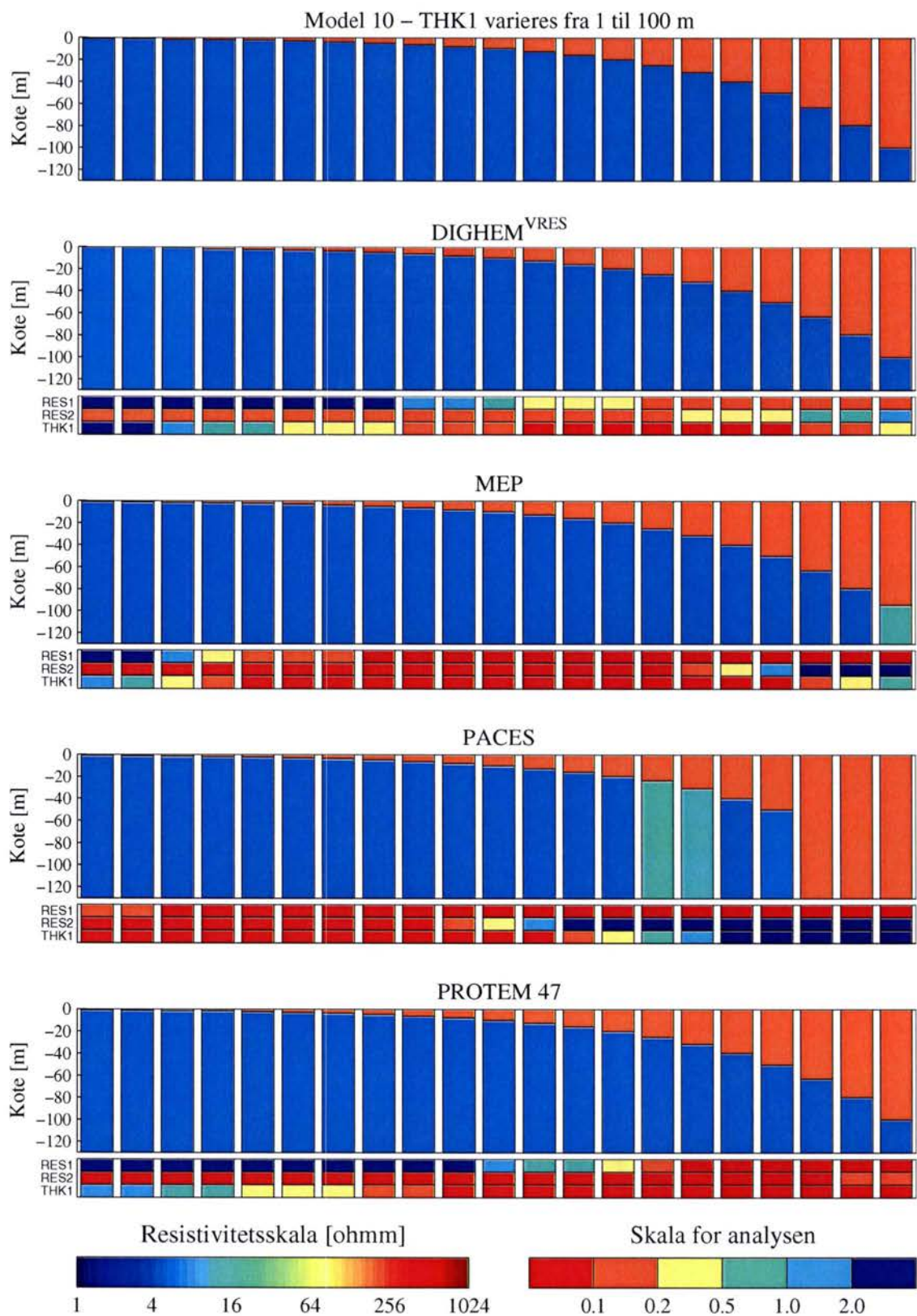


**Figur A.9.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 30  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.

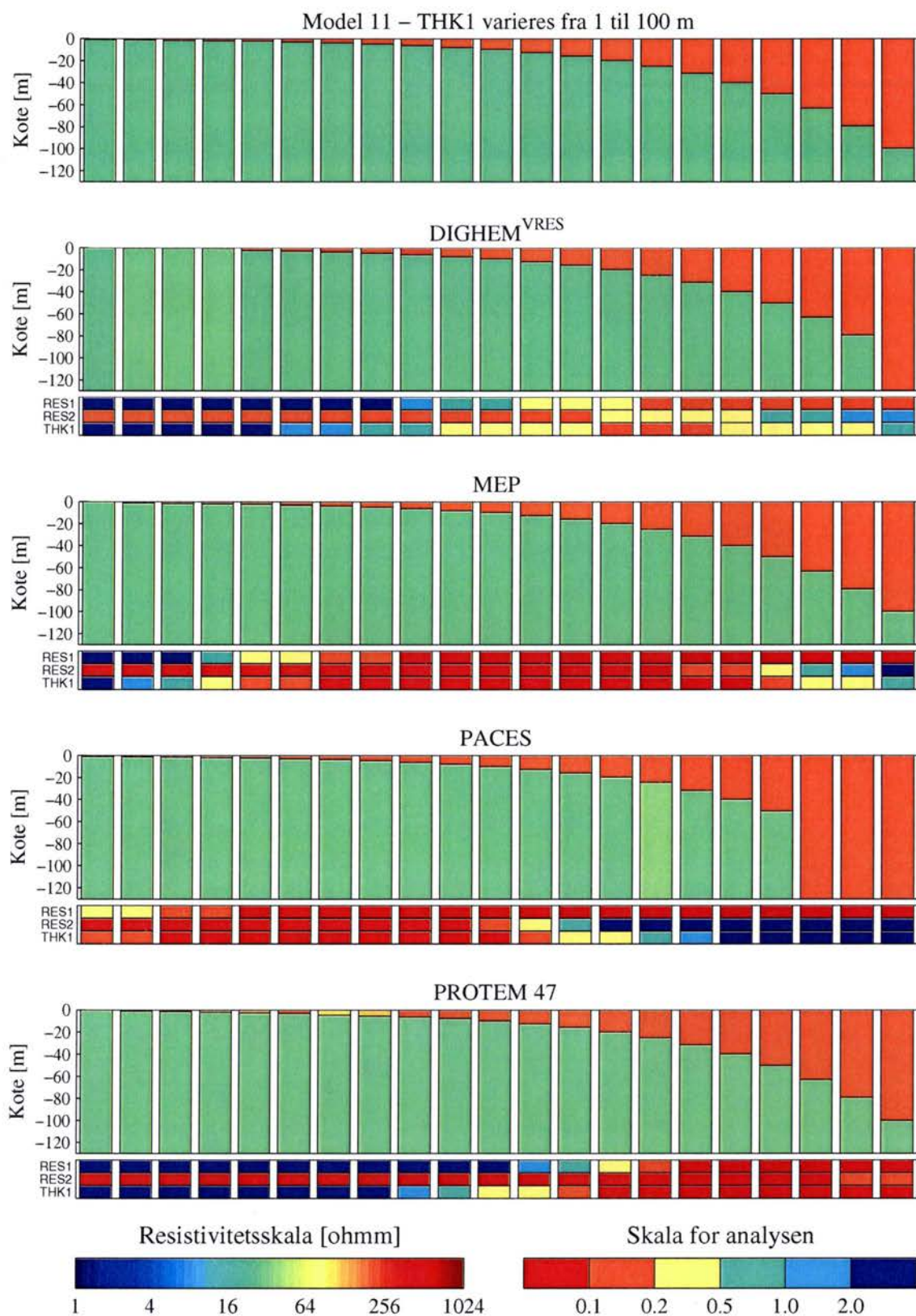




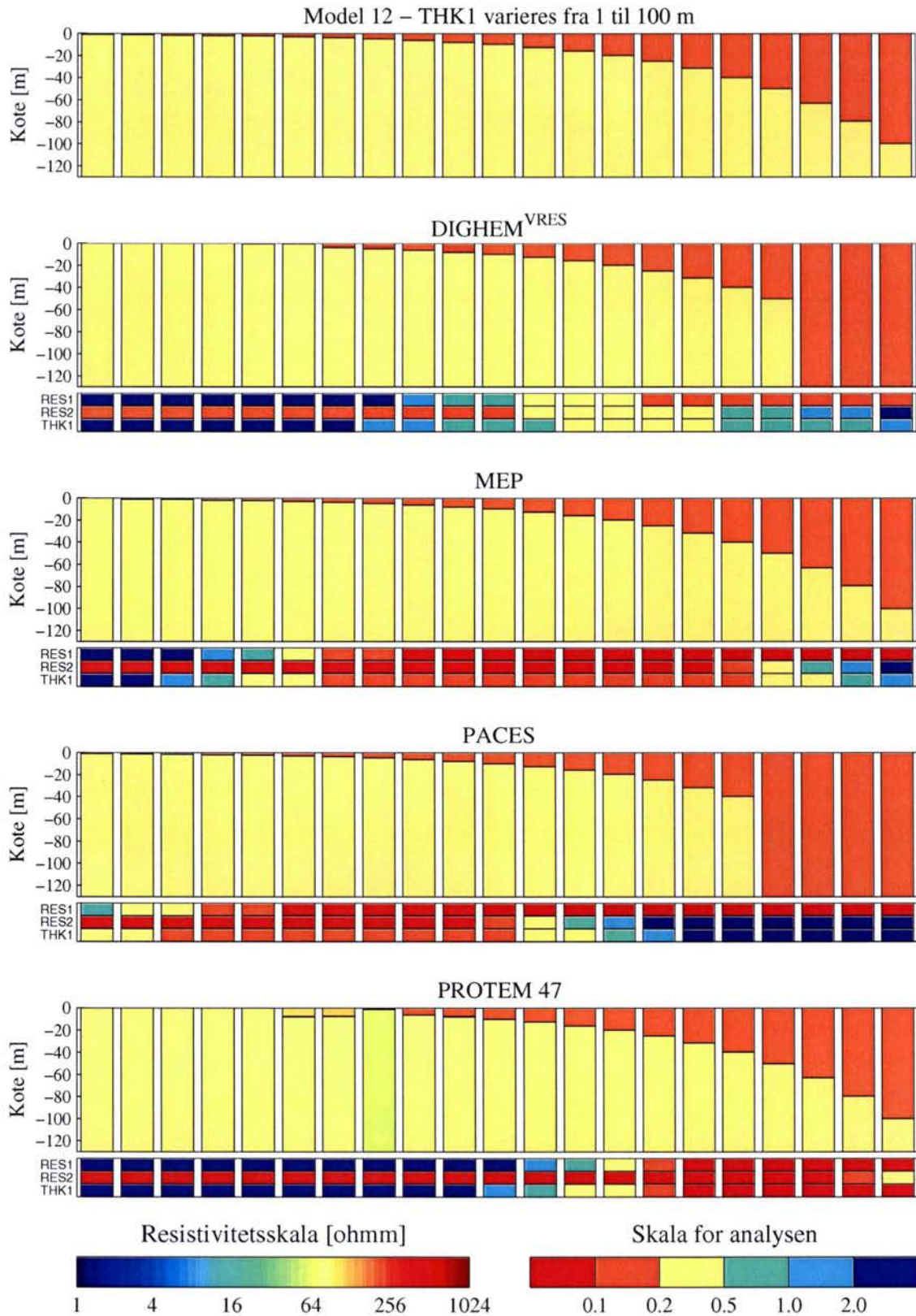
**Figur A.10.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



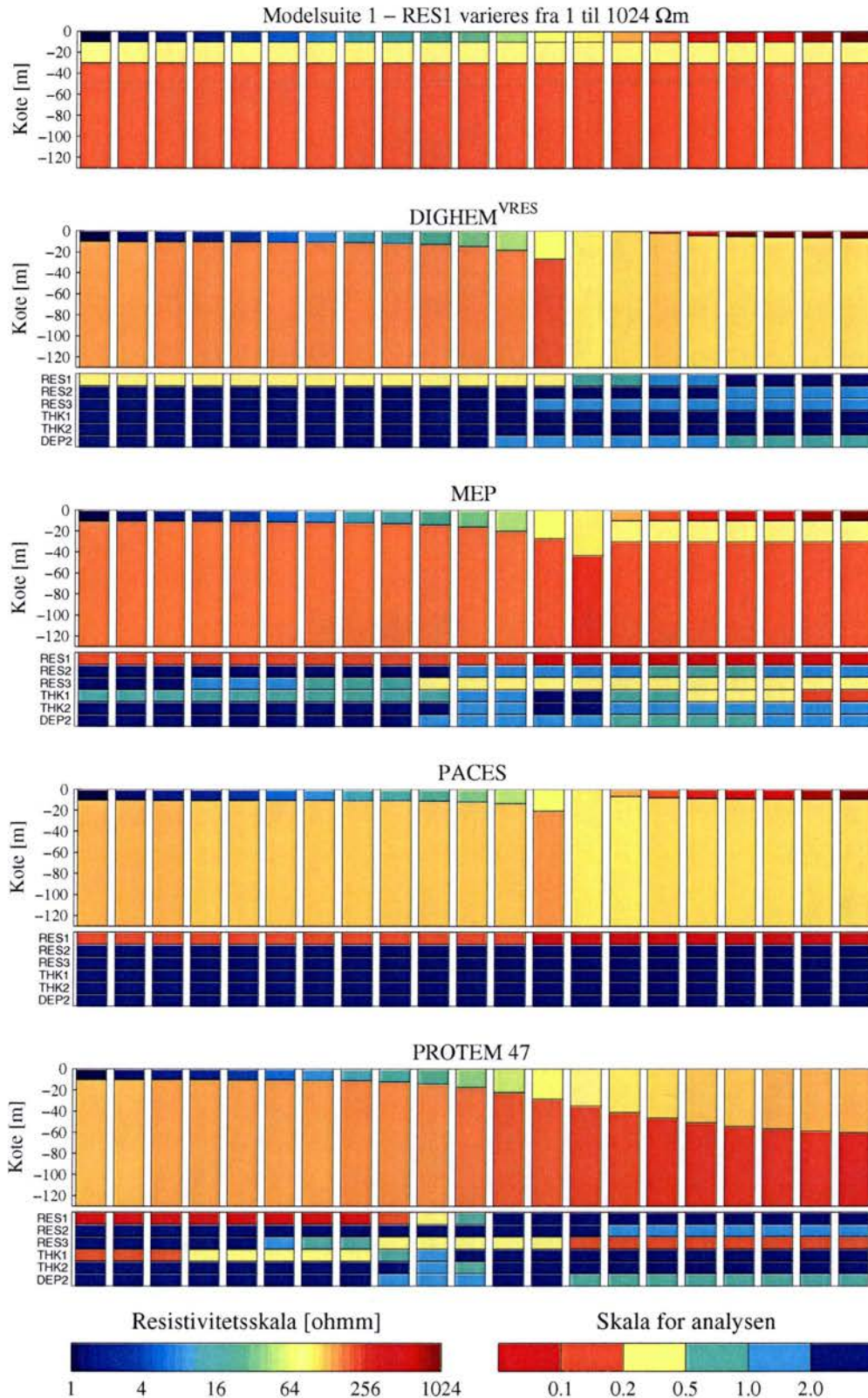
**Figur A.11.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega\text{m}$  og 5  $\Omega\text{m}$ . Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



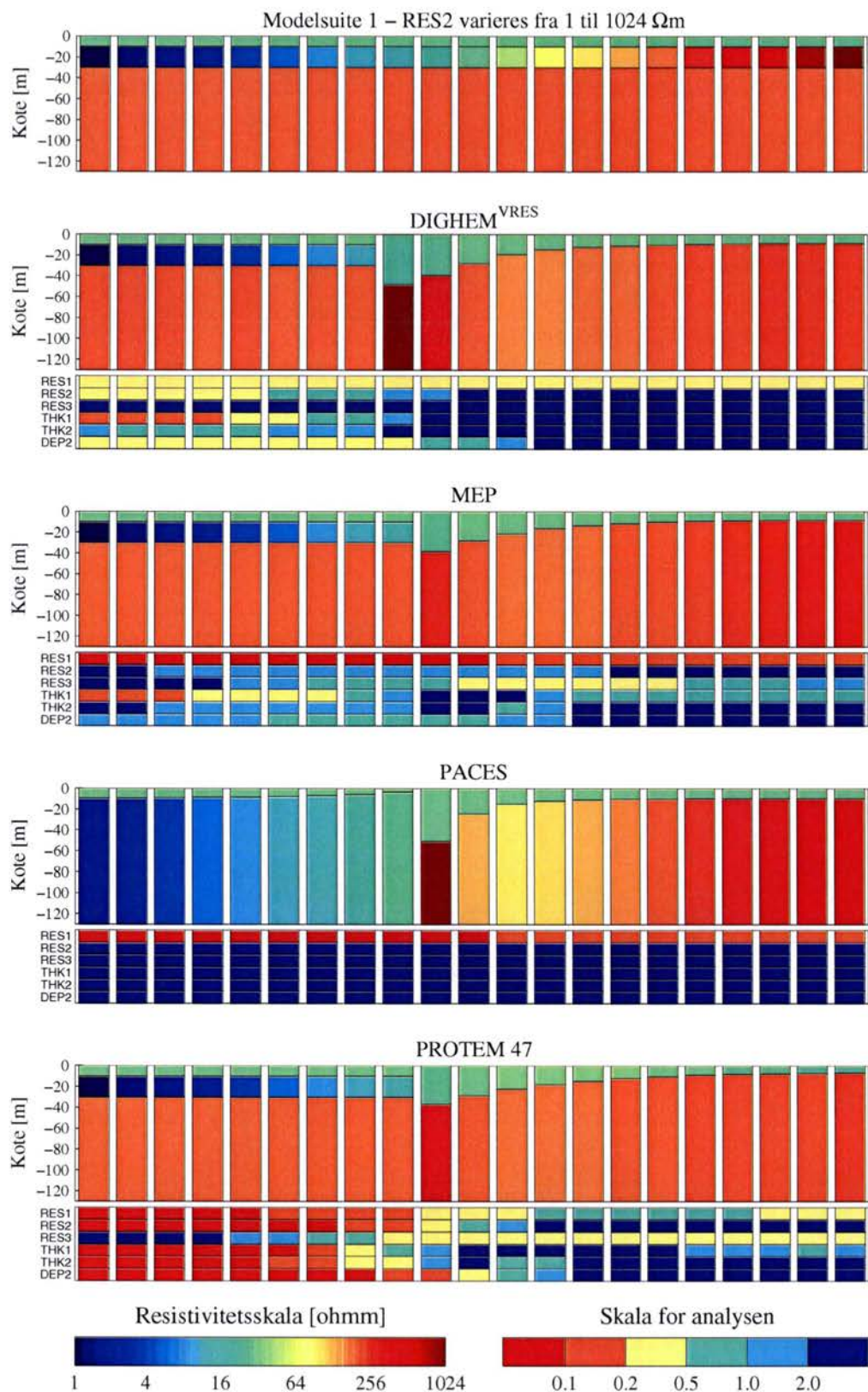
**Figur A.12.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega$ m og 30  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



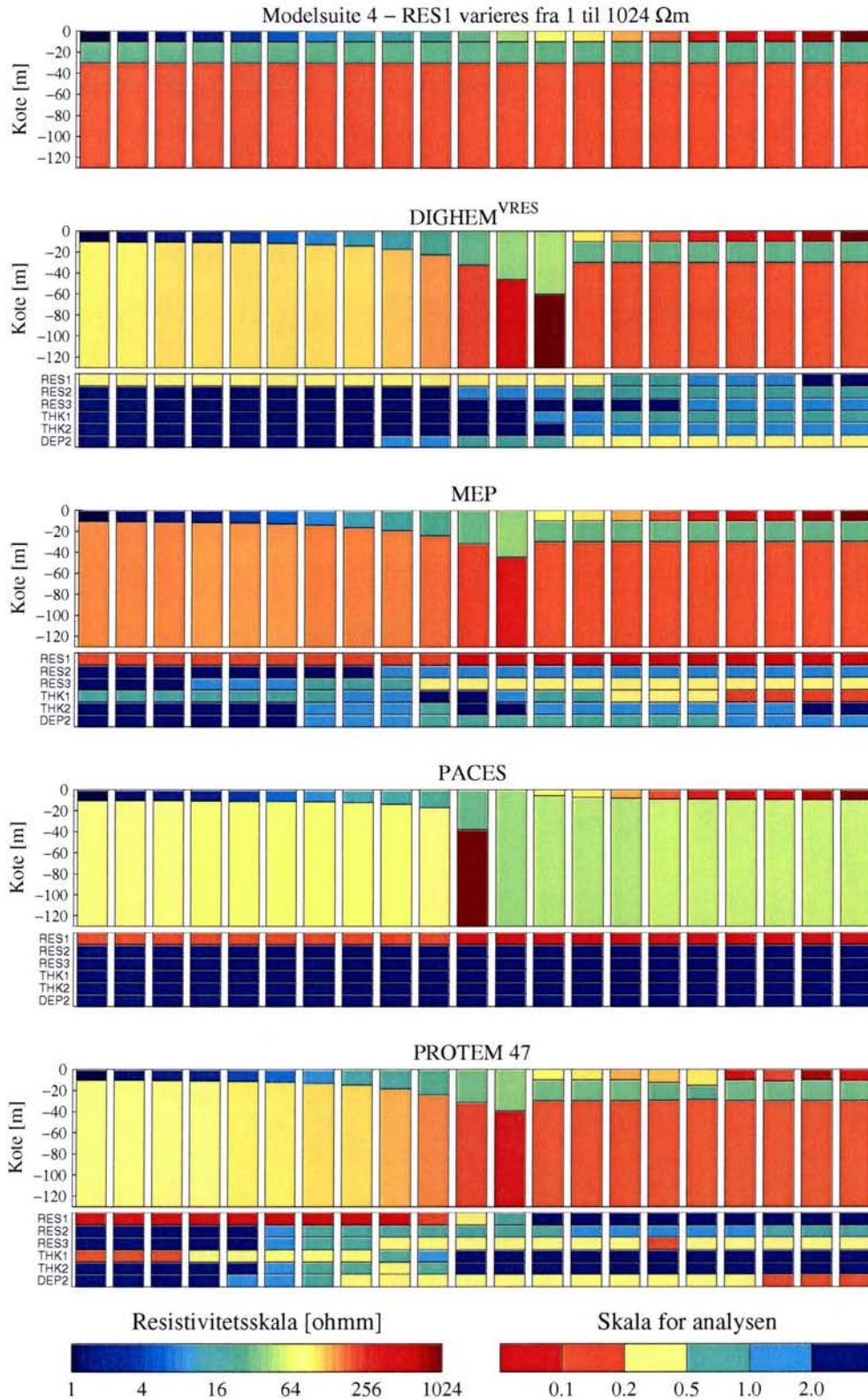
**Figur A.13.** Analyse af tolagsmodeller, hvor resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega$ m og 70  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



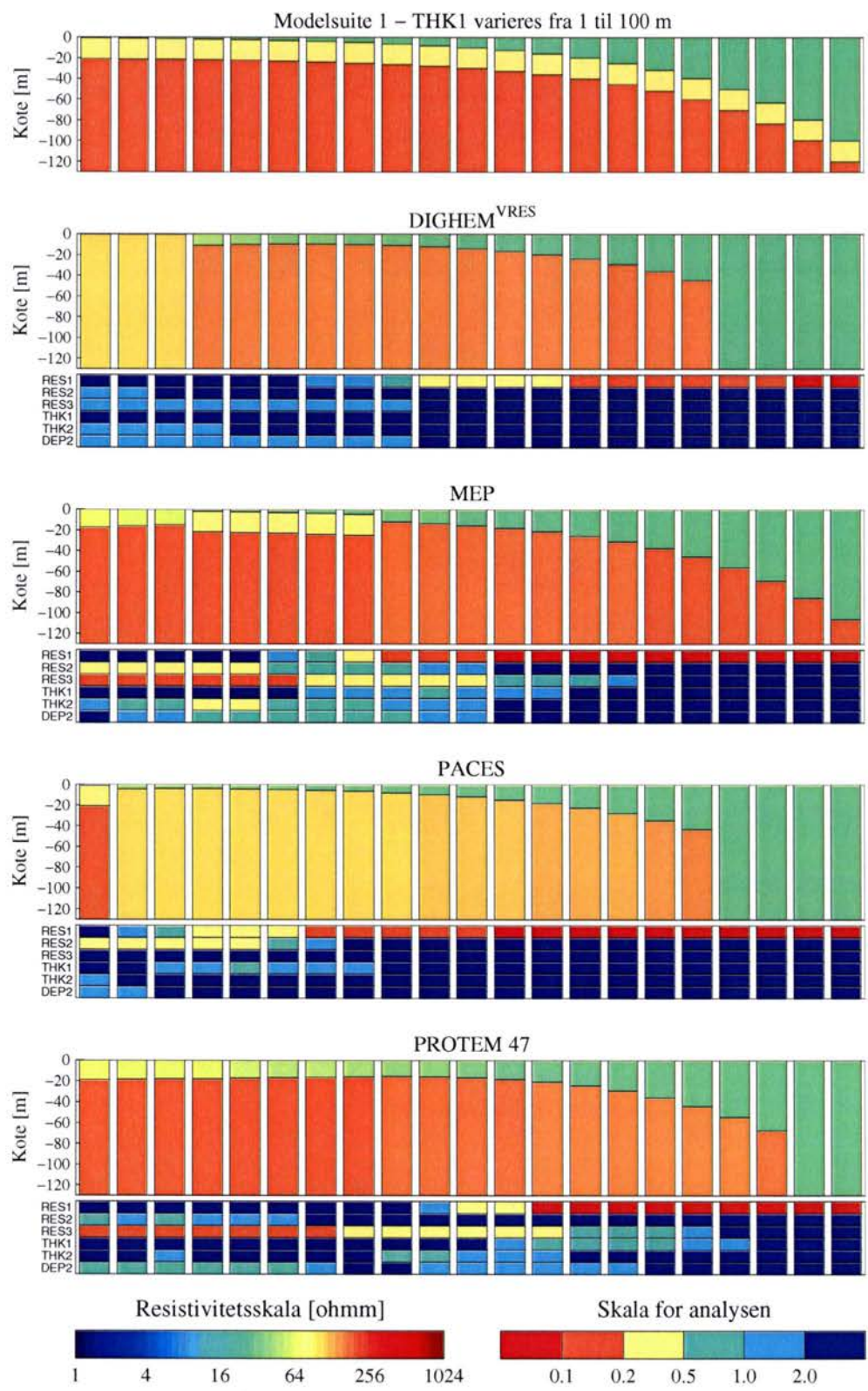
**Figur A.14.** Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor resistiviteten i første lag varierer. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Resistiviteten af første lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.



**Figur A.15.** Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor resistiviteten i andet lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og tredje lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Resistiviteten af andet lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.

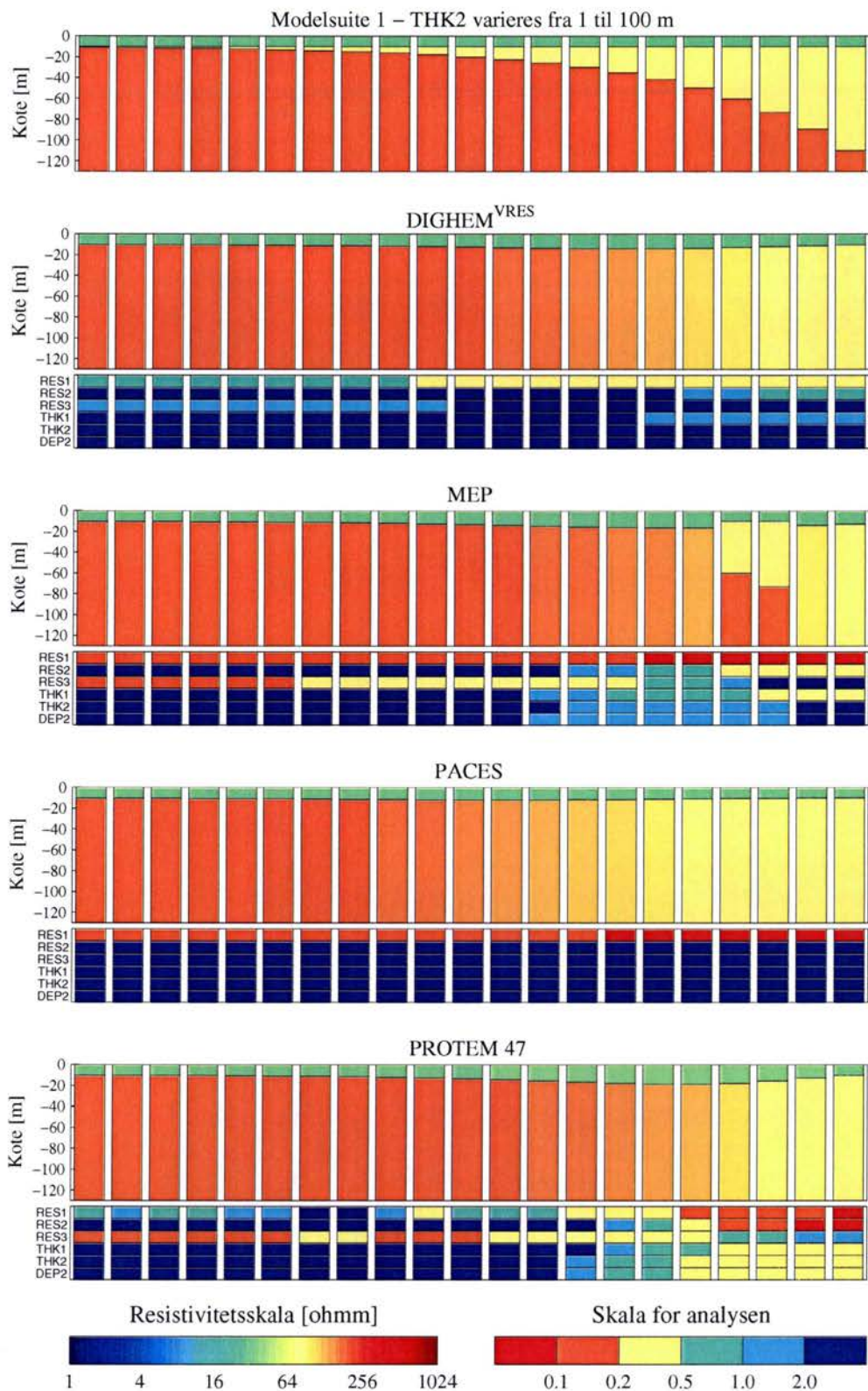


**Figur A.16.** Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor resistiviteten i tredje lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega$ m og 70  $\Omega$ m. Resistiviteten af tredje lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.

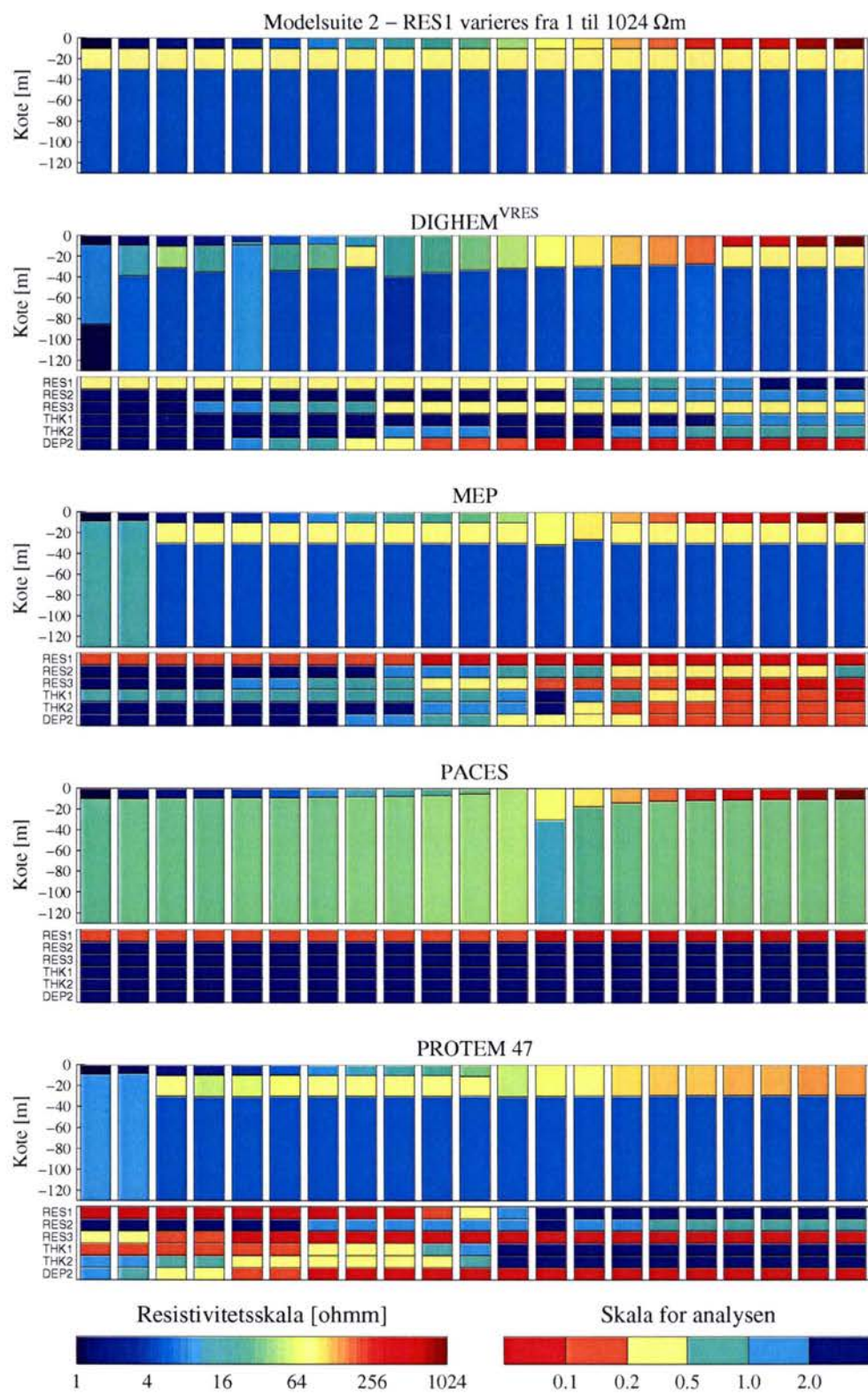


**Figur A.17.** Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor tykkelsen af første lag varieres. Tykkelsen af andet lag fastholdes på 20 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 30 Ωm, 70 Ωm og 200 Ωm. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.

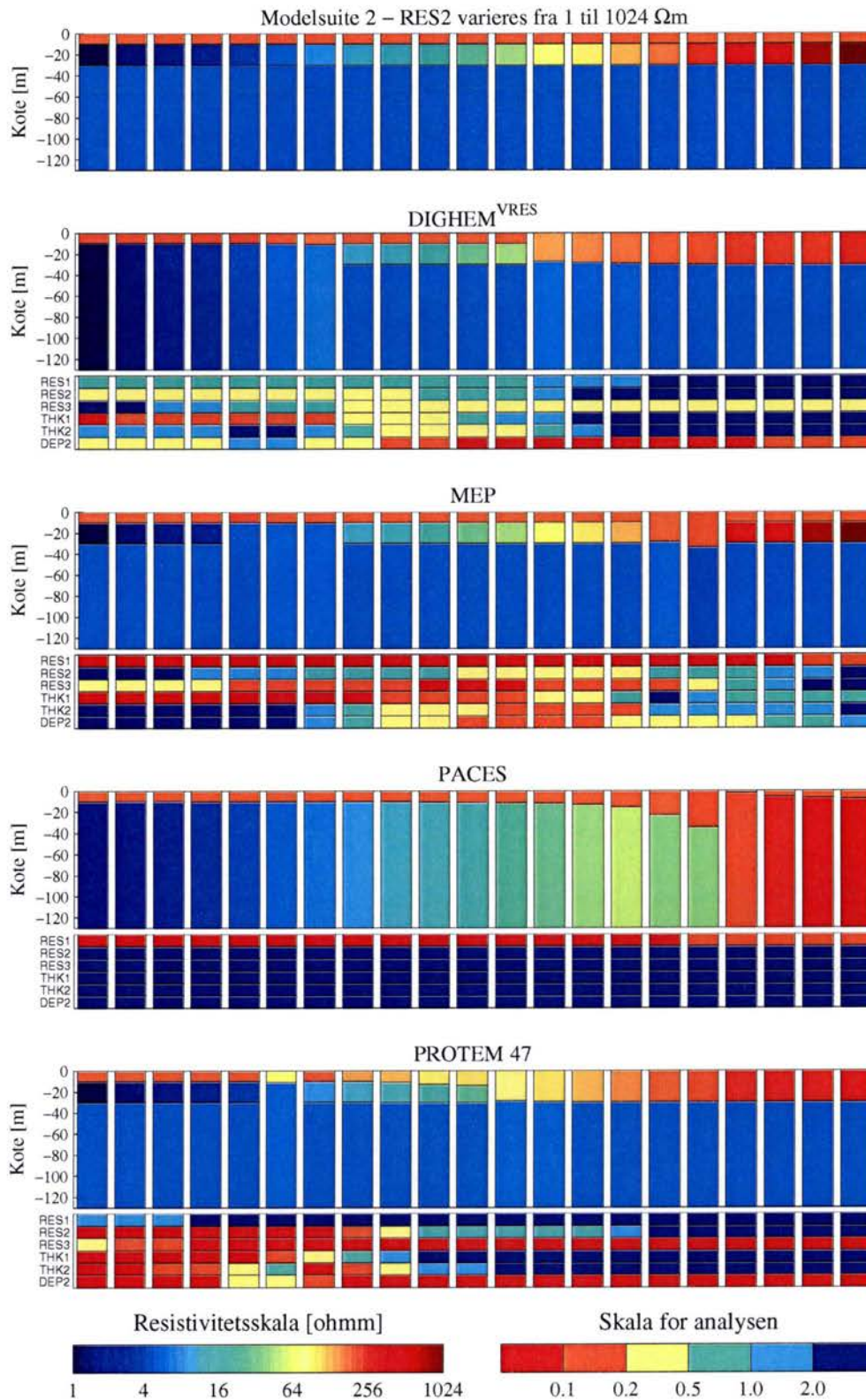




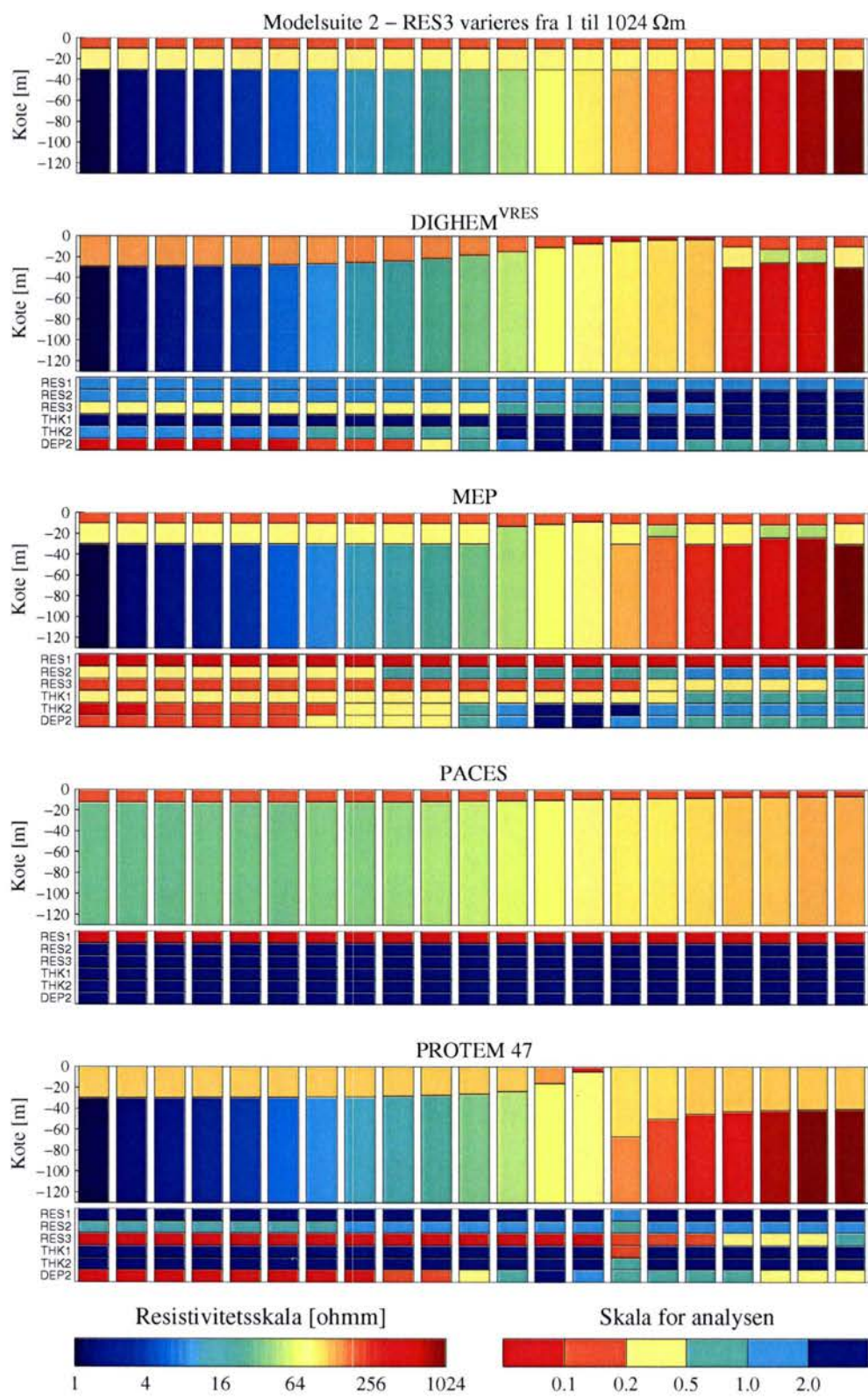
**Figur A.18.** Analyse af den dobbelt opstigende model, hvor tykkelsen af andet lag varieres. Tykkelsen af første lag fastholdes på 10 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega$ m, 70  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Tykkelsen af andet lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



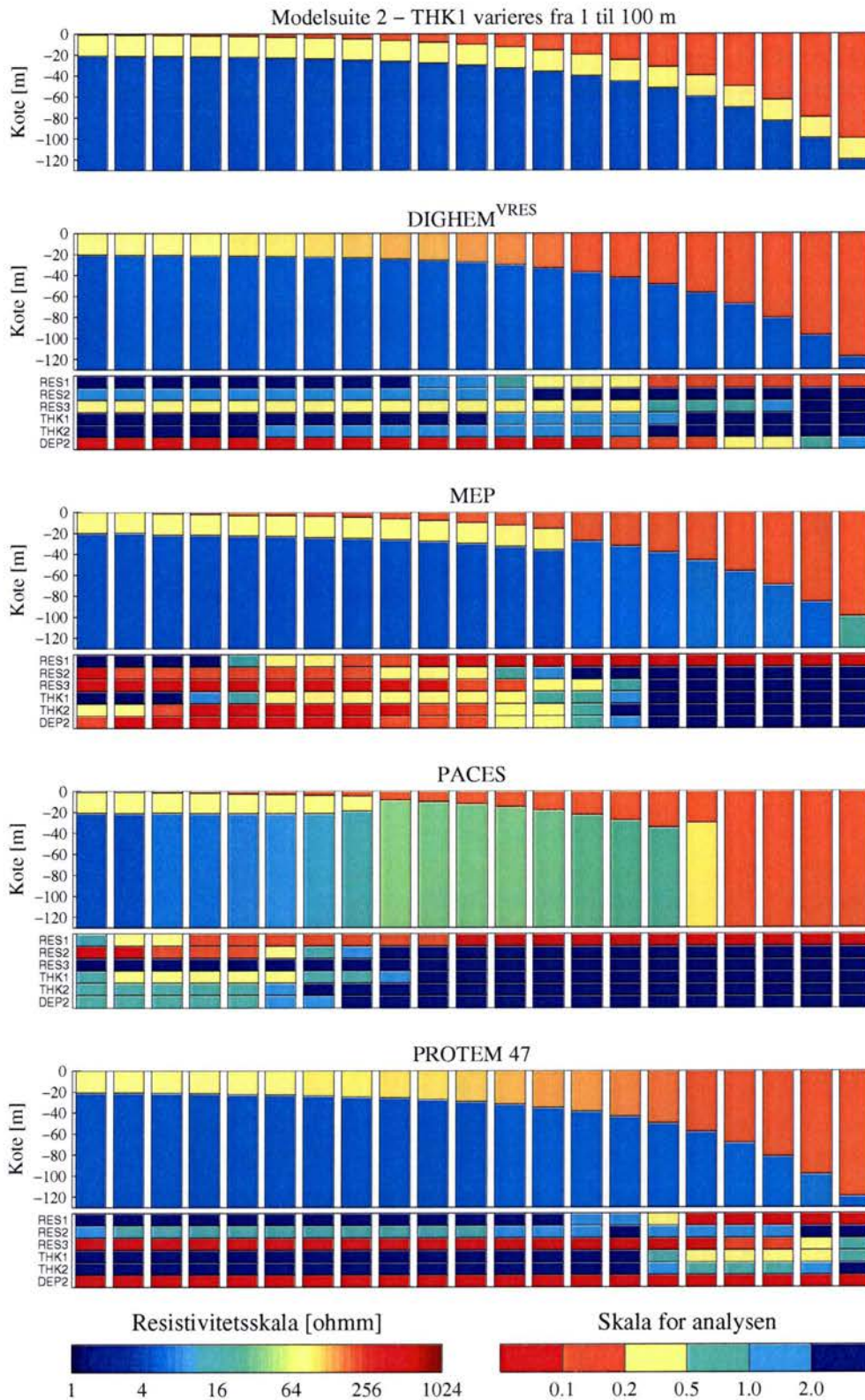
**Figur A.19.** Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor resistiviteten i første lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Resistiviteten af første lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.



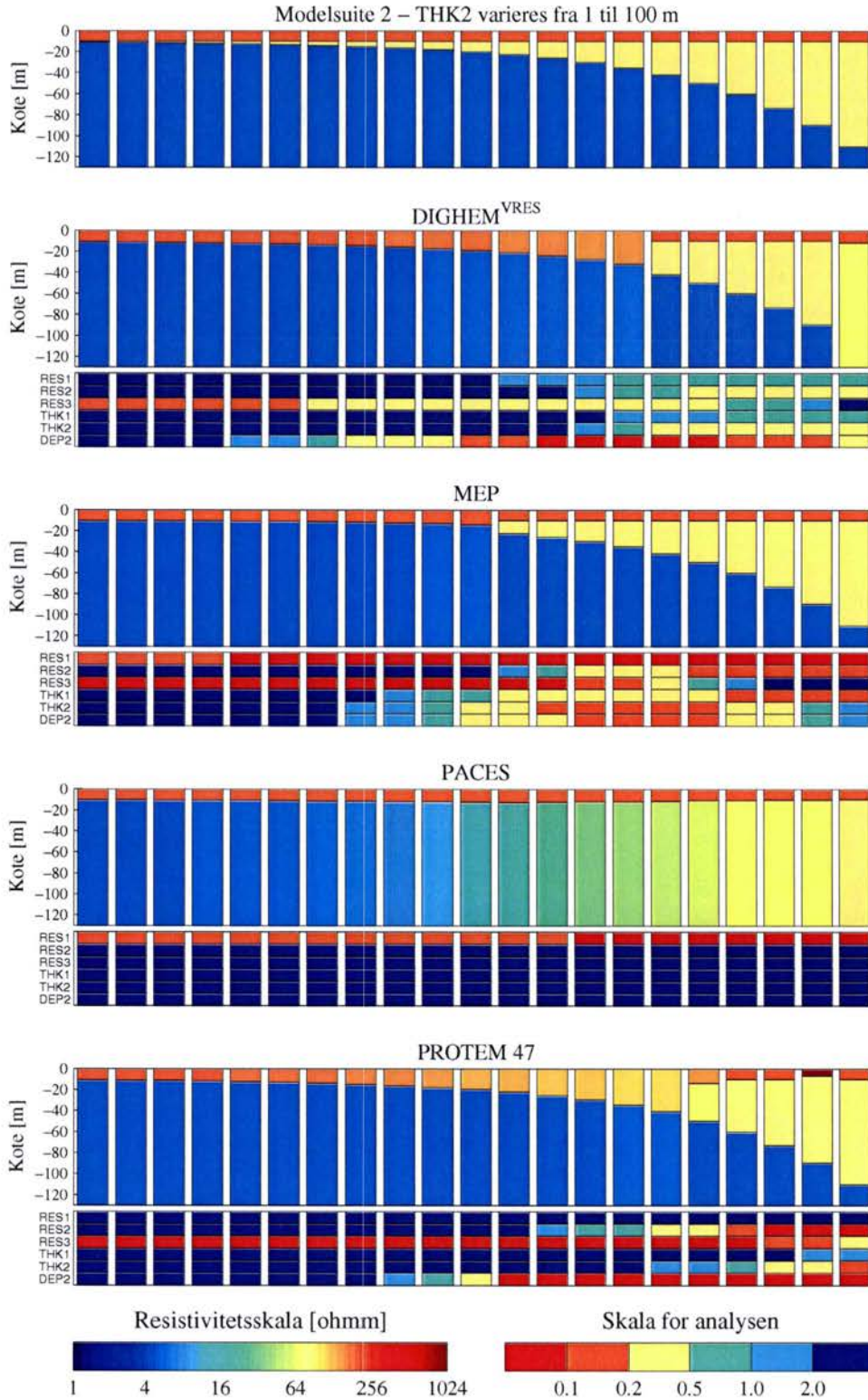
**Figur A.20.** Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor resistiviteten i andet lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og tredje lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega\text{m}$  og 5  $\Omega\text{m}$ . Resistiviteten af andet lag varieres mellem 1  $\Omega\text{m}$  og 1024  $\Omega\text{m}$  i 21 trin.



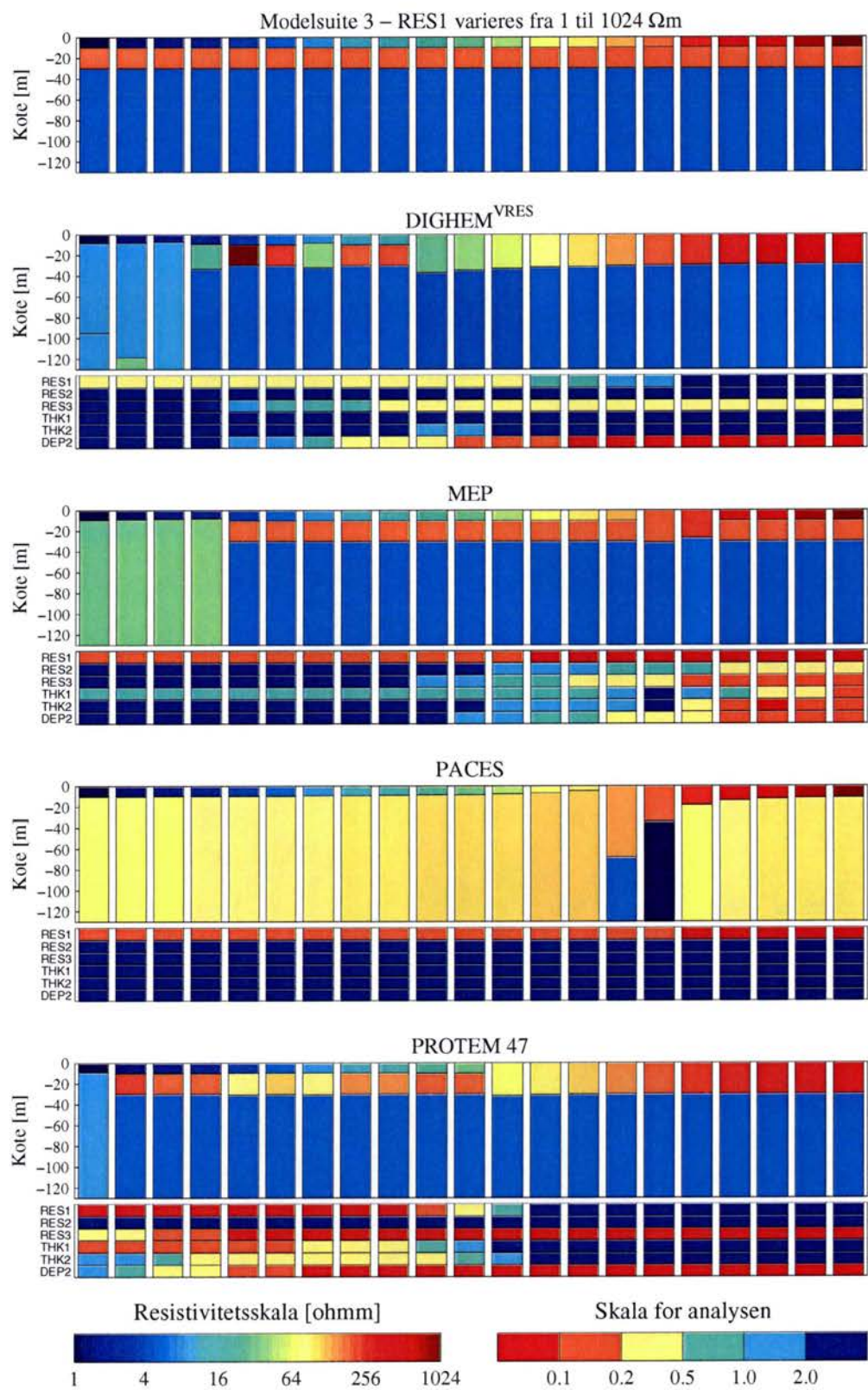
**Figur A.21.** Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor resistiviteten i tredje lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega$ m og 70  $\Omega$ m. Resistiviteten af tredje lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.



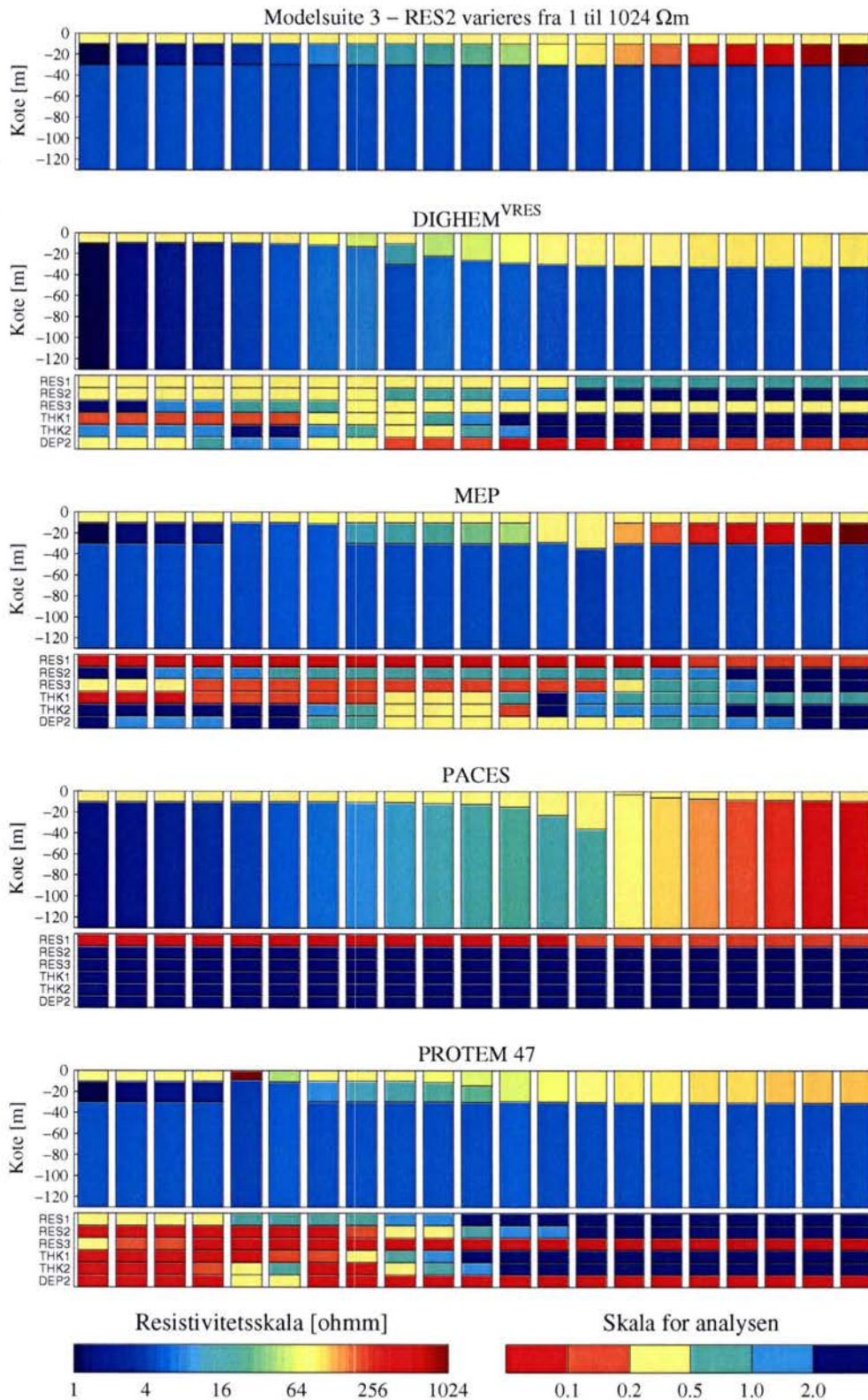
**Figur A.22.** Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor tykkelsen af første lag varieres. Tykkelsen af andet lag fastholdes på 20 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega$ m, 70  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



**Figur A.23.** Analyse af den dobbelt nedstigende model, hvor tykkelsen af andet lag varieres. Tykkelsen af første lag fastholdes på 10 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega$ m, 70  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.

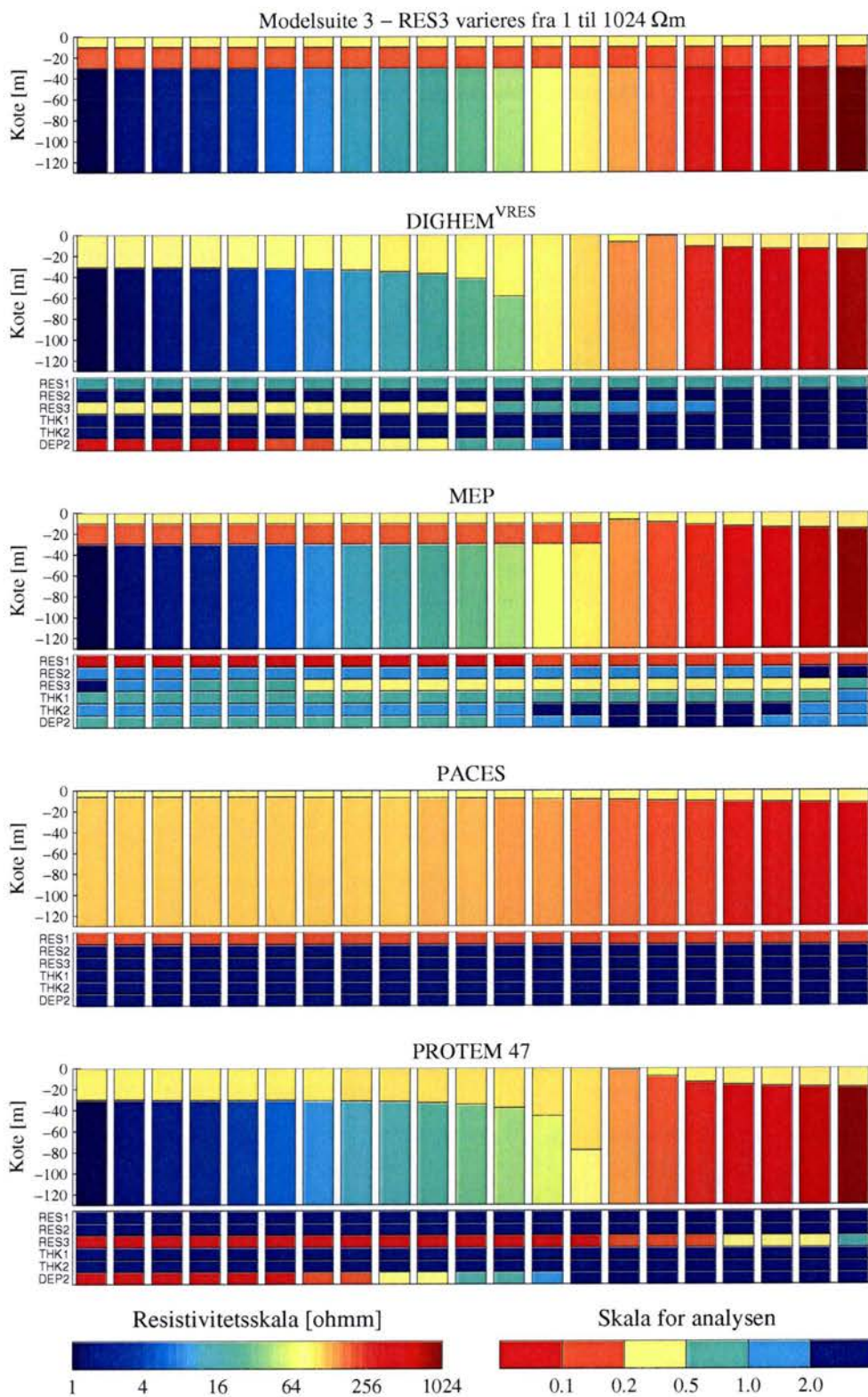


**Figur A.24.** Analyse af maksimumsmodellen, hvor resistiviteten i første lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 200  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Resistiviteten af første lag varieres mellem 1 m og 1024 m i 21 trin.

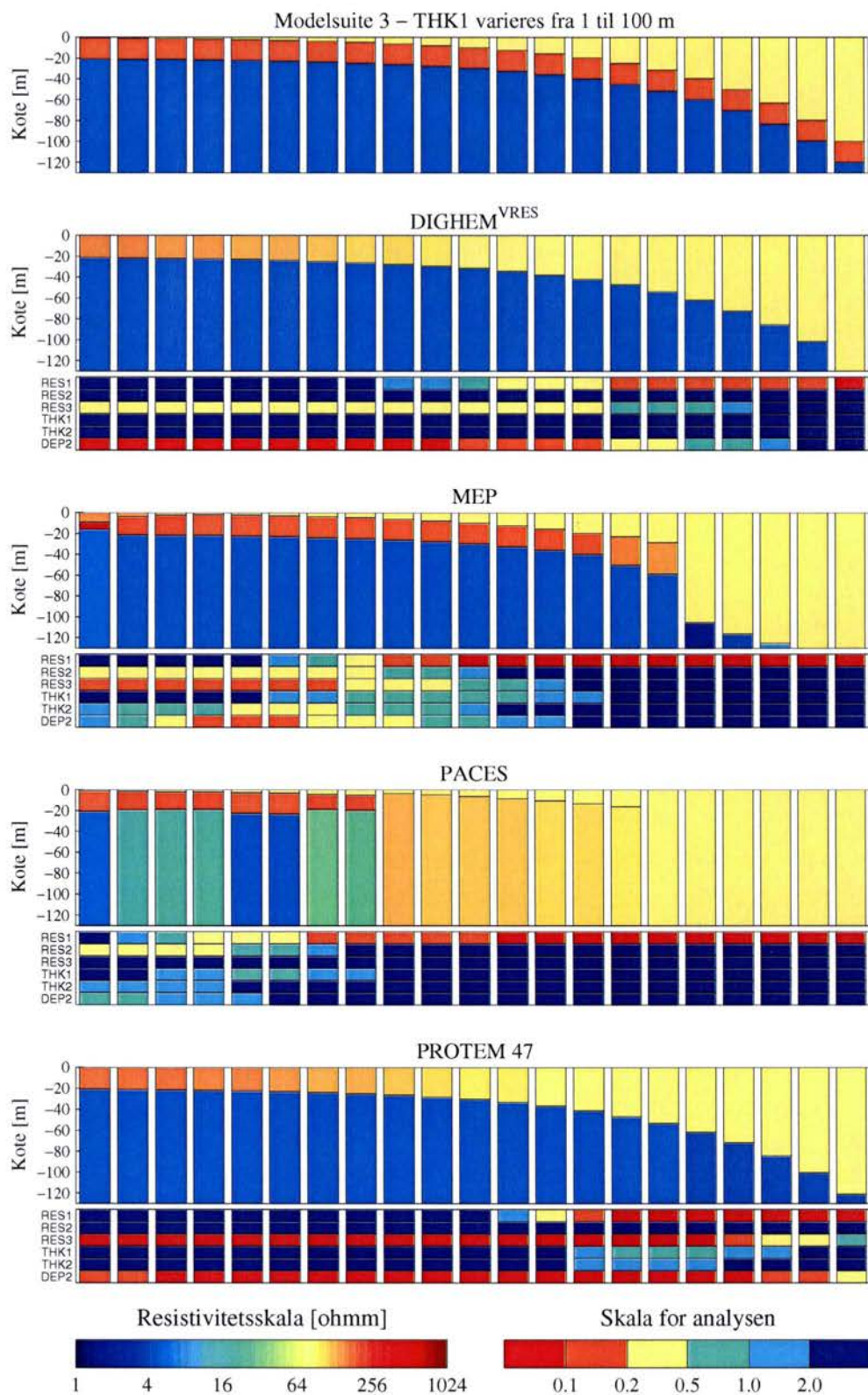


**Figur A.25.** Analyse af maksimumsmodellen, hvor resistiviteten i andet lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Resistiviteten af andet lag varieres mellem 1 m og 1024 m i 21 trin.

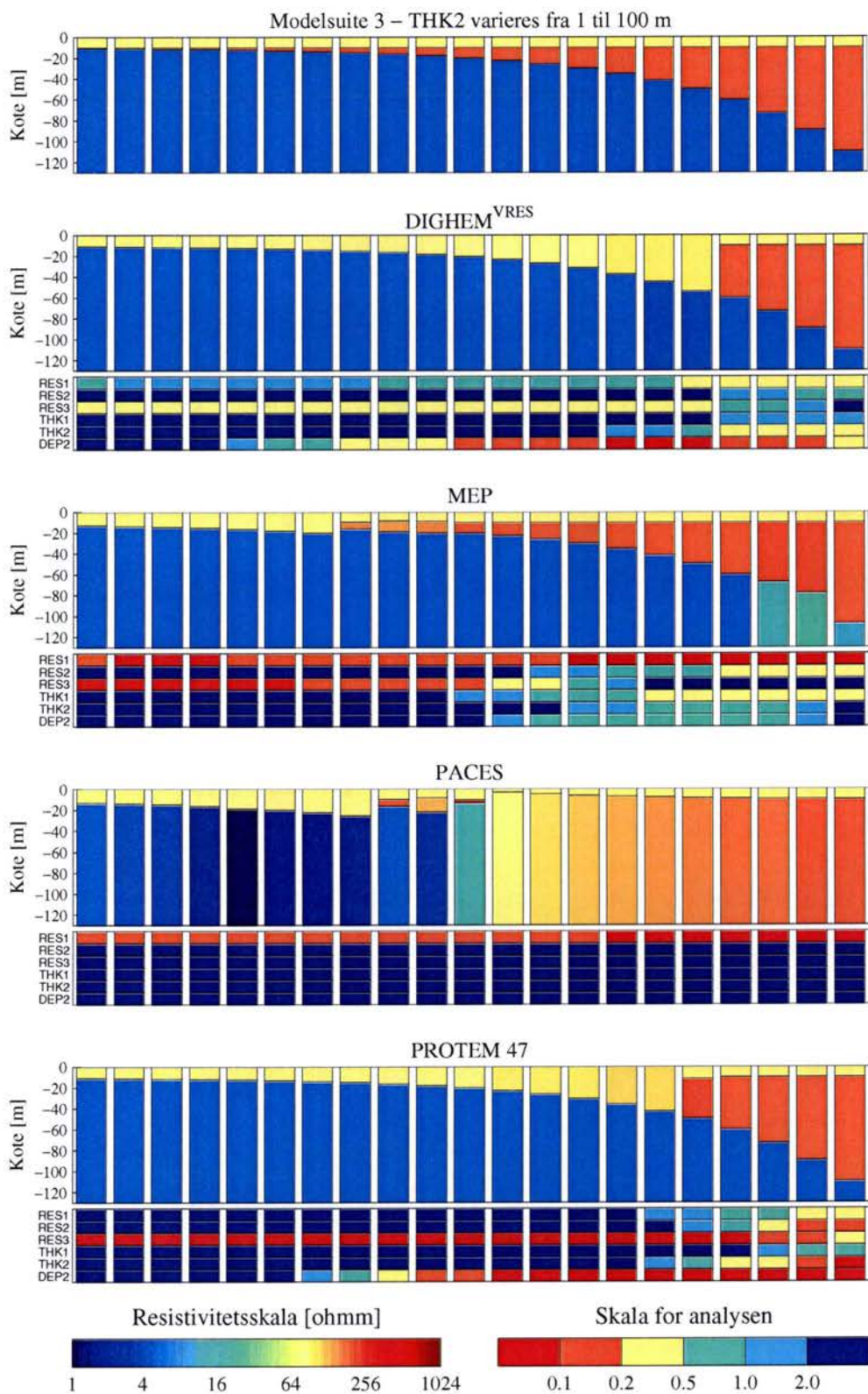




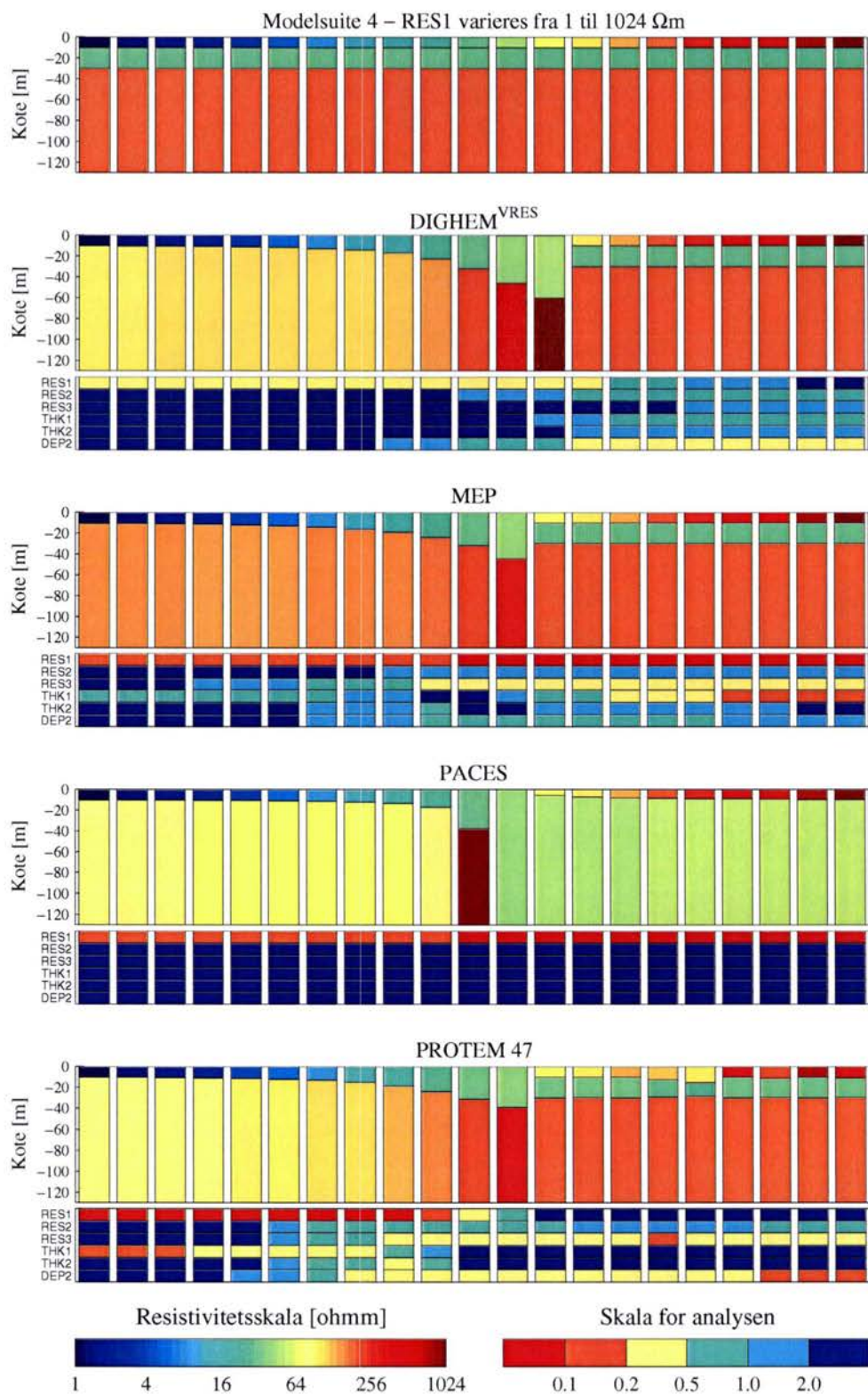
**Figur A.26.** Analyse af maksimumsmodellen, hvor resistiviteten i tredje lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Resistiviteten af tredje lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.



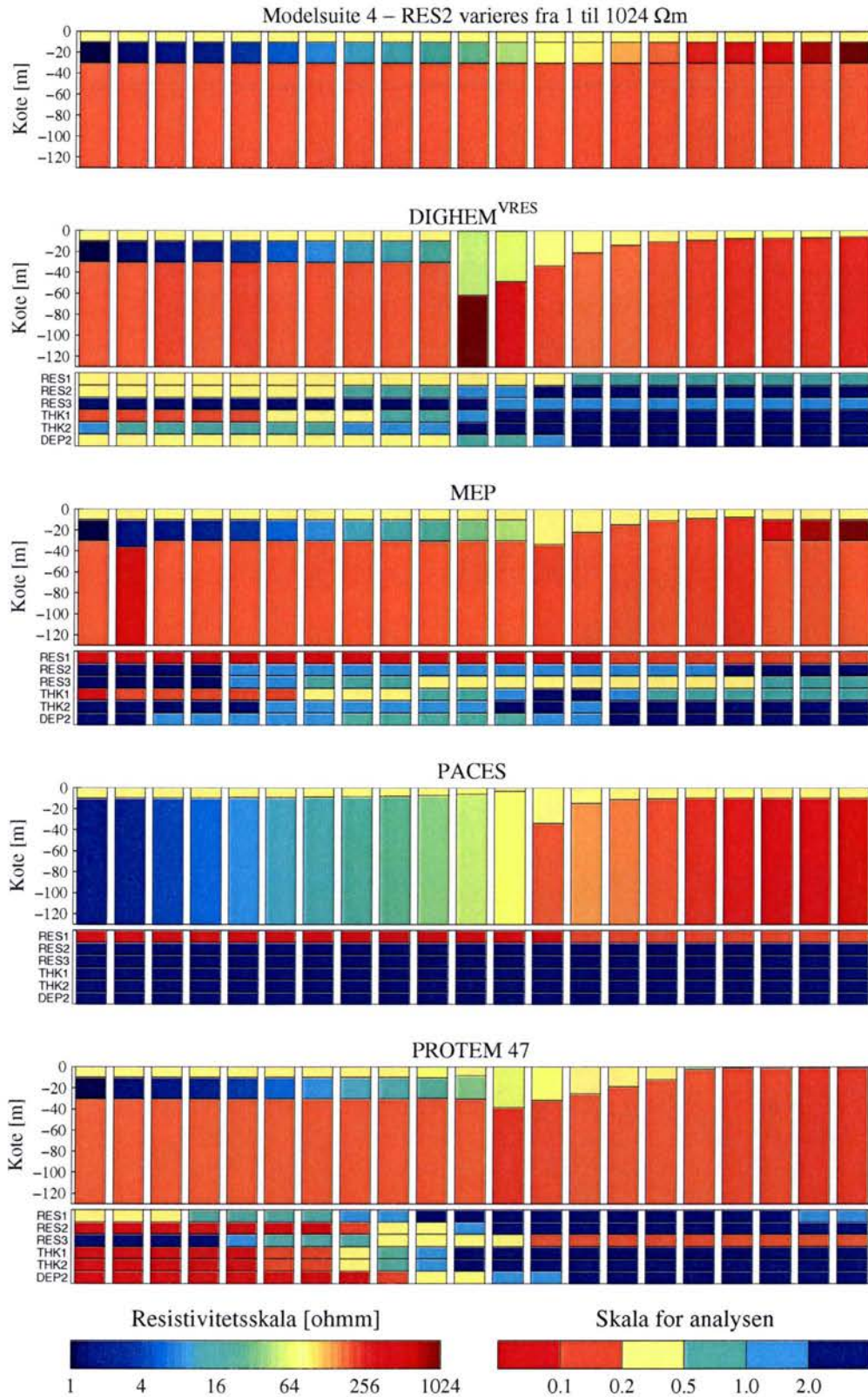
**Figur A.27.** Analyse af maksimumsmodellen, hvor tykkelsen af første lag varieres. Tykkelsen af andet lag fastholdes på 20 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m, 200  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



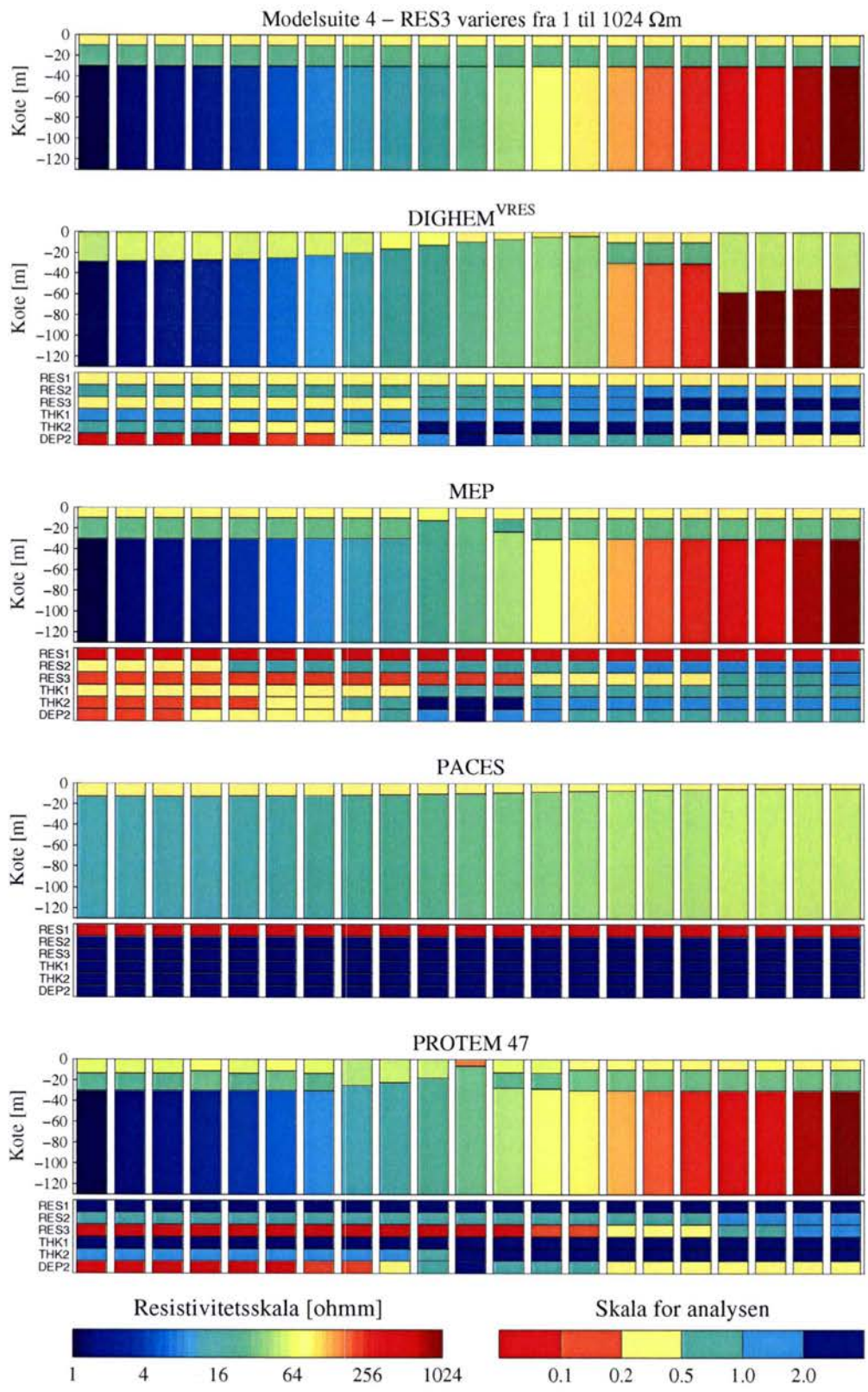
**Figur A.28.** Analyse af maksimumsmodellen, hvor tykkelsen af andet lag varieres. Tykkelsen af første lag fastholdes på 10 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m, 200  $\Omega$ m og 5  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



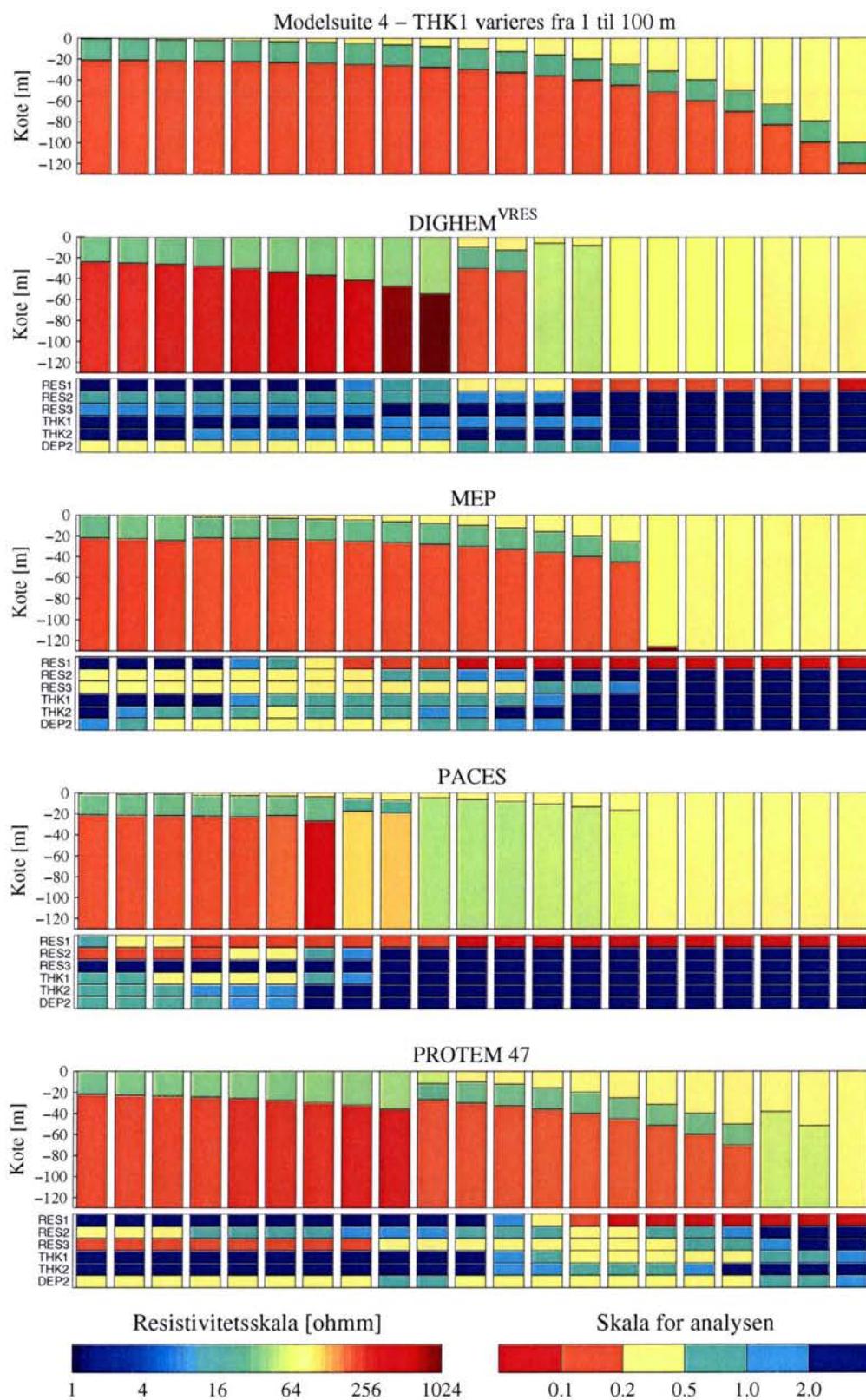
**Figur A.29.** Analyse af minimumsmodellen, hvor resistiviteten i første lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 30  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Resistiviteten af første lag varieres mellem 1  $\Omega$ m og 1024  $\Omega$ m i 21 trin.



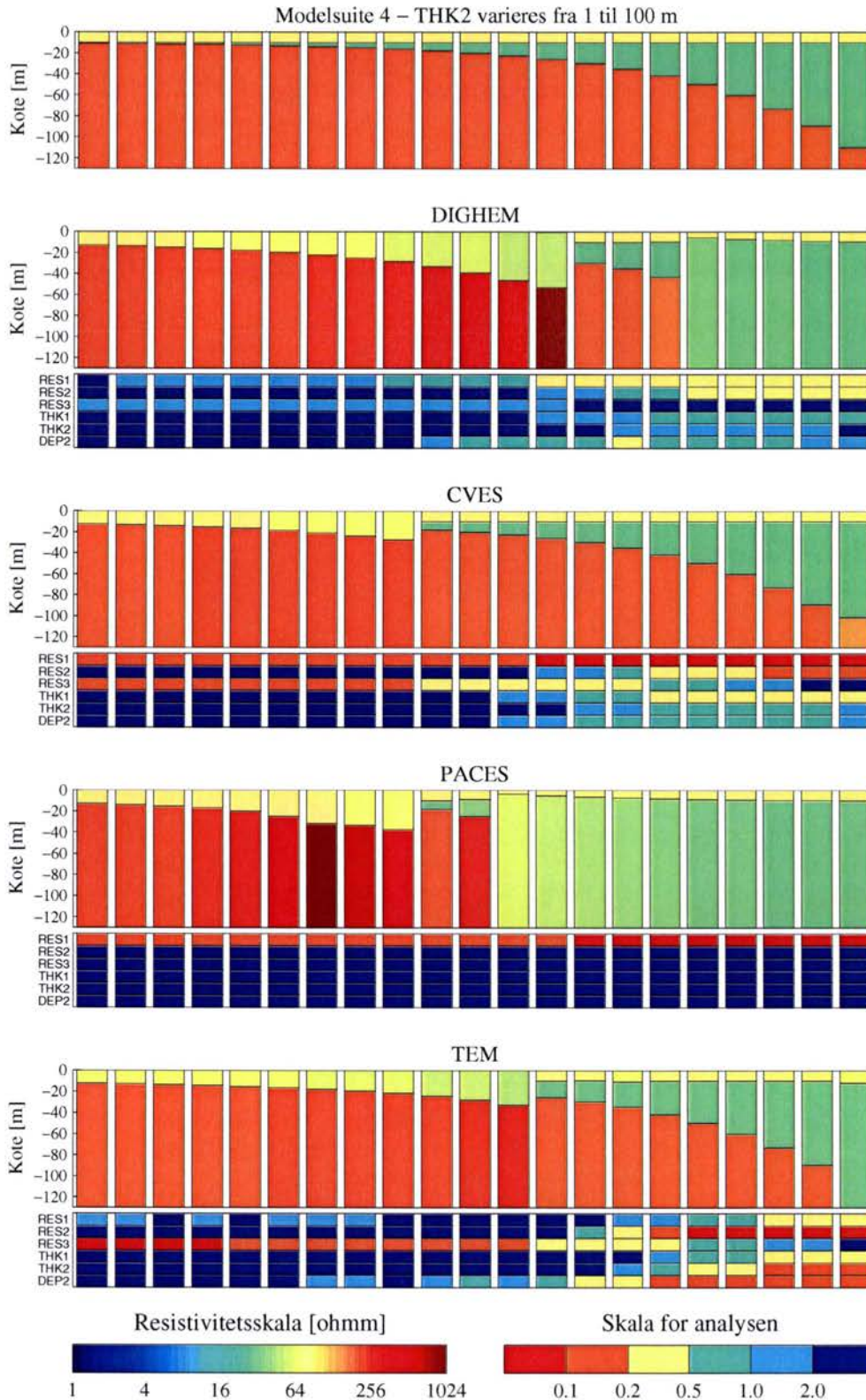
**Figur A.30.** Analyse af minimumsmodellen, hvor resistiviteten i andet lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega\text{m}$  og 200  $\Omega\text{m}$ . Resistiviteten af andet lag varieres mellem 1  $\Omega\text{m}$  og 1024  $\Omega\text{m}$  i 21 trin.



**Figur A.31.** Analyse af minimumsmodellen, hvor resistiviteten i tredje lag varieres. Tykkelsen af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 10 m og 20 m og resistiviteten af første og andet lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega\text{m}$  og 30  $\Omega\text{m}$ . Resistiviteten af tredje lag varieres mellem 1  $\Omega\text{m}$  og 1024  $\Omega\text{m}$  i 21 trin.



**Figur A.32.** Analyse af minimumsmodellen, hvor tykkelsen af første lag varieres. Tykkelsen af andet lag fastholdes på 20 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m, 30  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Tykkelsen af første lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



**Figur A.33.** Analyse af minimumsmodellen, hvor tykkelsen af andet lag varieres. Tykkelsen af første lag fastholdes på 10 m og resistiviteten af første, andet og tredje lag fastholdes på henholdsvis 70  $\Omega$ m, 30  $\Omega$ m og 200  $\Omega$ m. Tykkelsen af andet lag varieres mellem 1 m og 100 m i 21 trin.



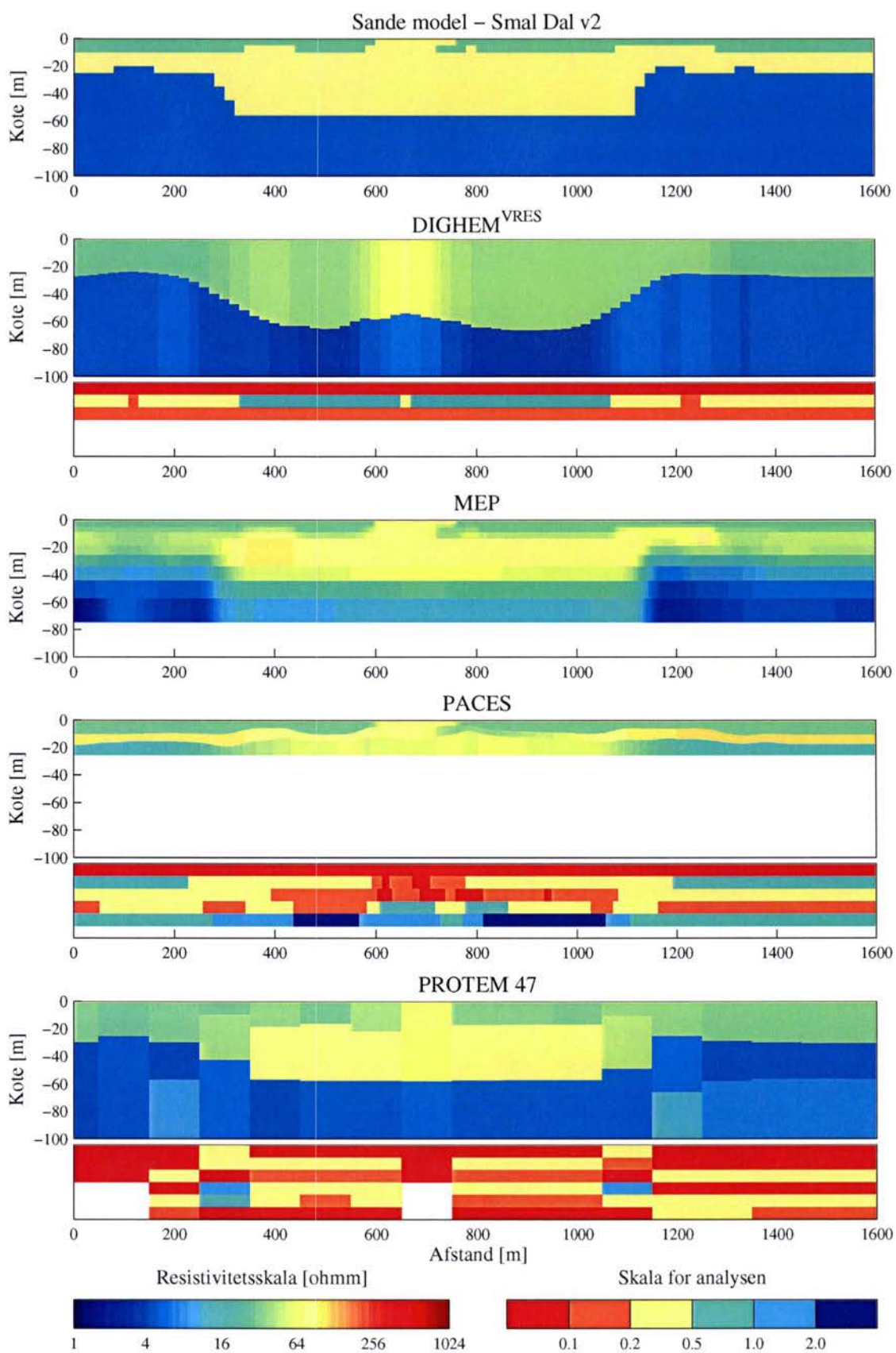
## Appendiks B – Katalog over tolkninger af 2D modeller

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.

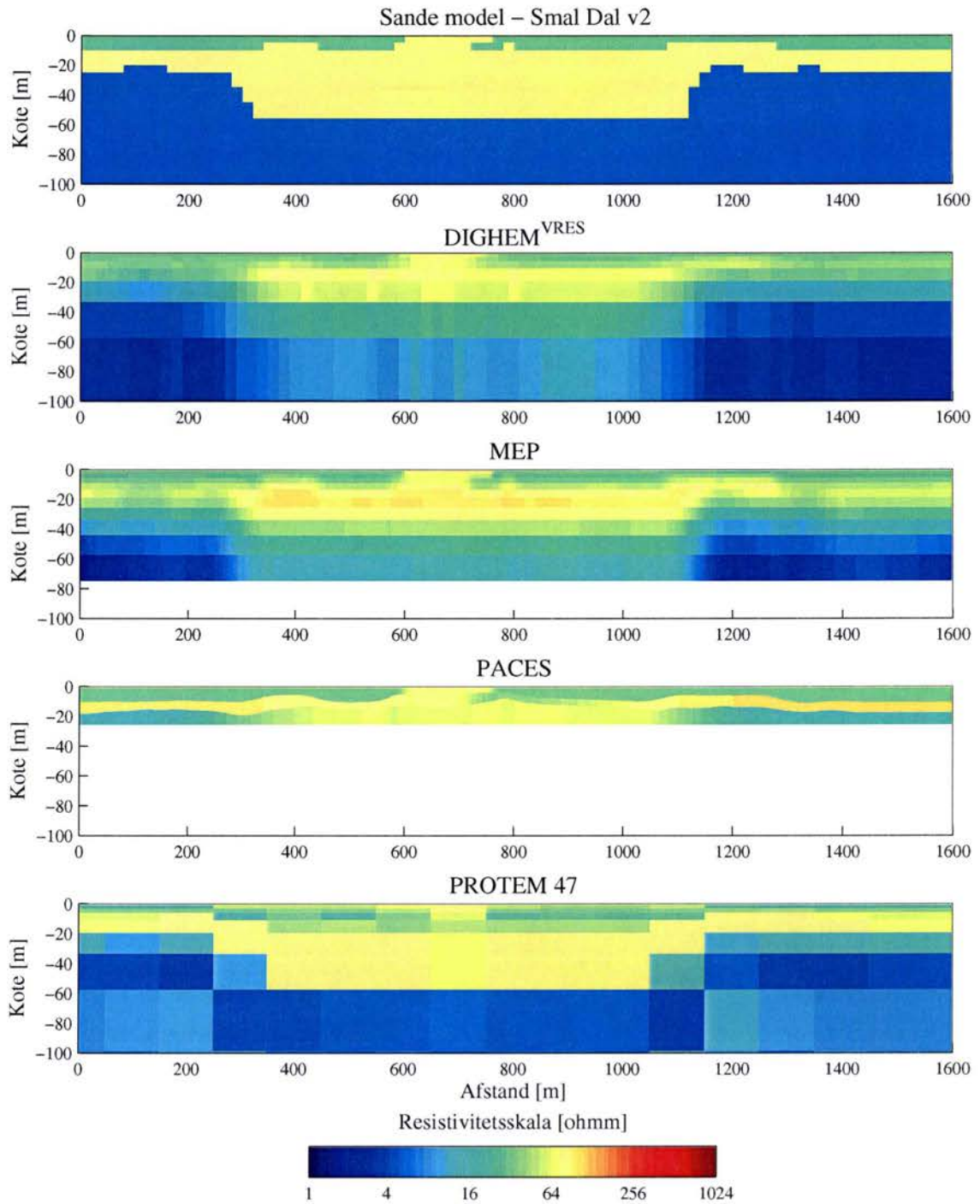
Det har været hensigtsmæssigt kun at medtage nogle få figurer i Kapitel 7 for at illustrere tolkningsmetoderne og for at forklare, hvorledes man læser plottene. Der henvises til Kapitel 7 for nærmere forklaring.

Nedenfor ses en tabel over indholdet af de enkelte figurer.

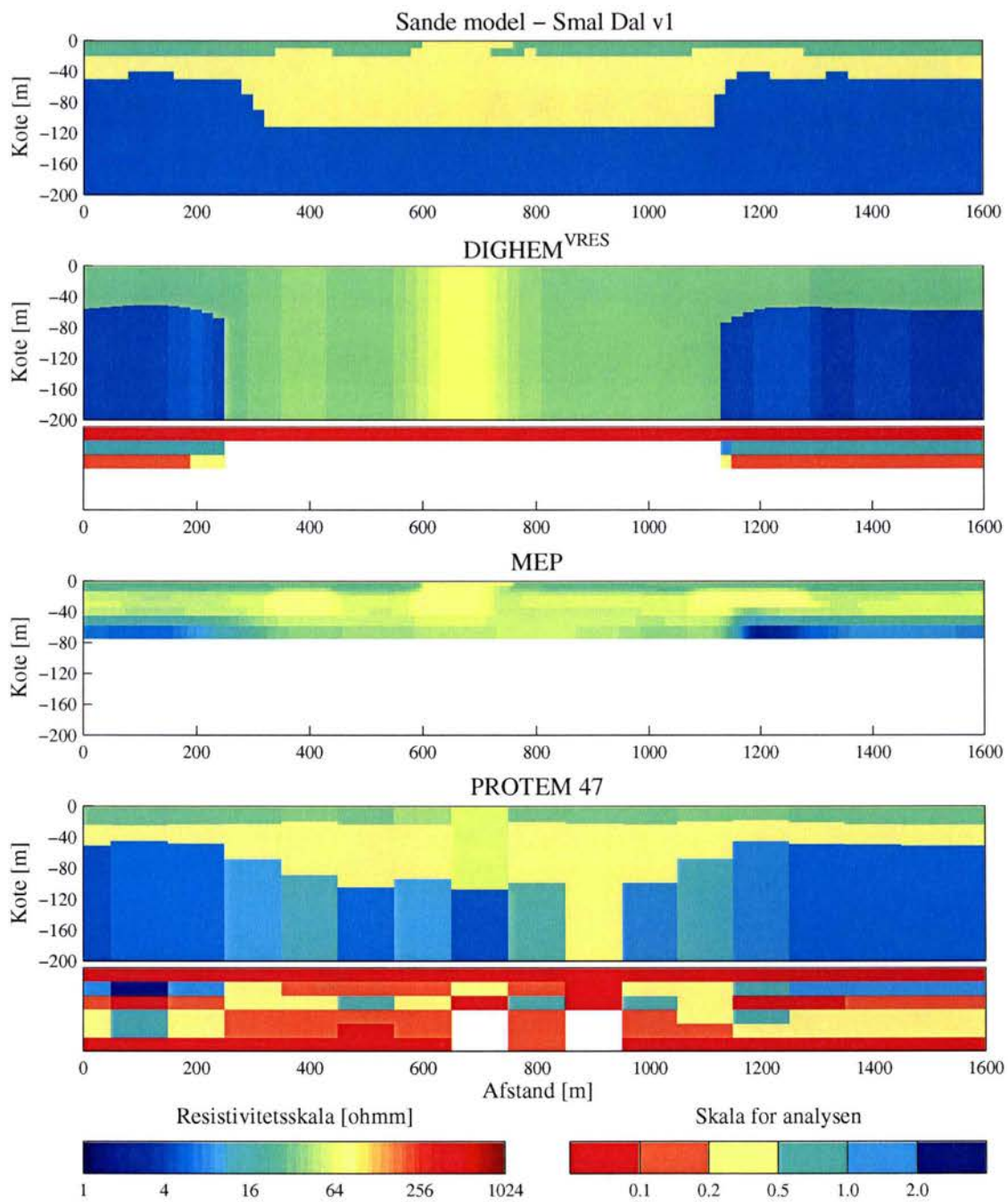
Figur B.1	Model Smal Dal – v2	Fålagstolkninger
Figur B.2	Model Smal Dal – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.3	Model Smal Dal – v1	Fålagstolkninger
Figur B.4	Model Smal Dal – v1	Mangelagstolkninger
Figur B.5	Model Moræne – v2	Fålagstolkninger
Figur B.6	Model Moræne – v2	Mangelagstolkninger
Figur B.7	Model 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



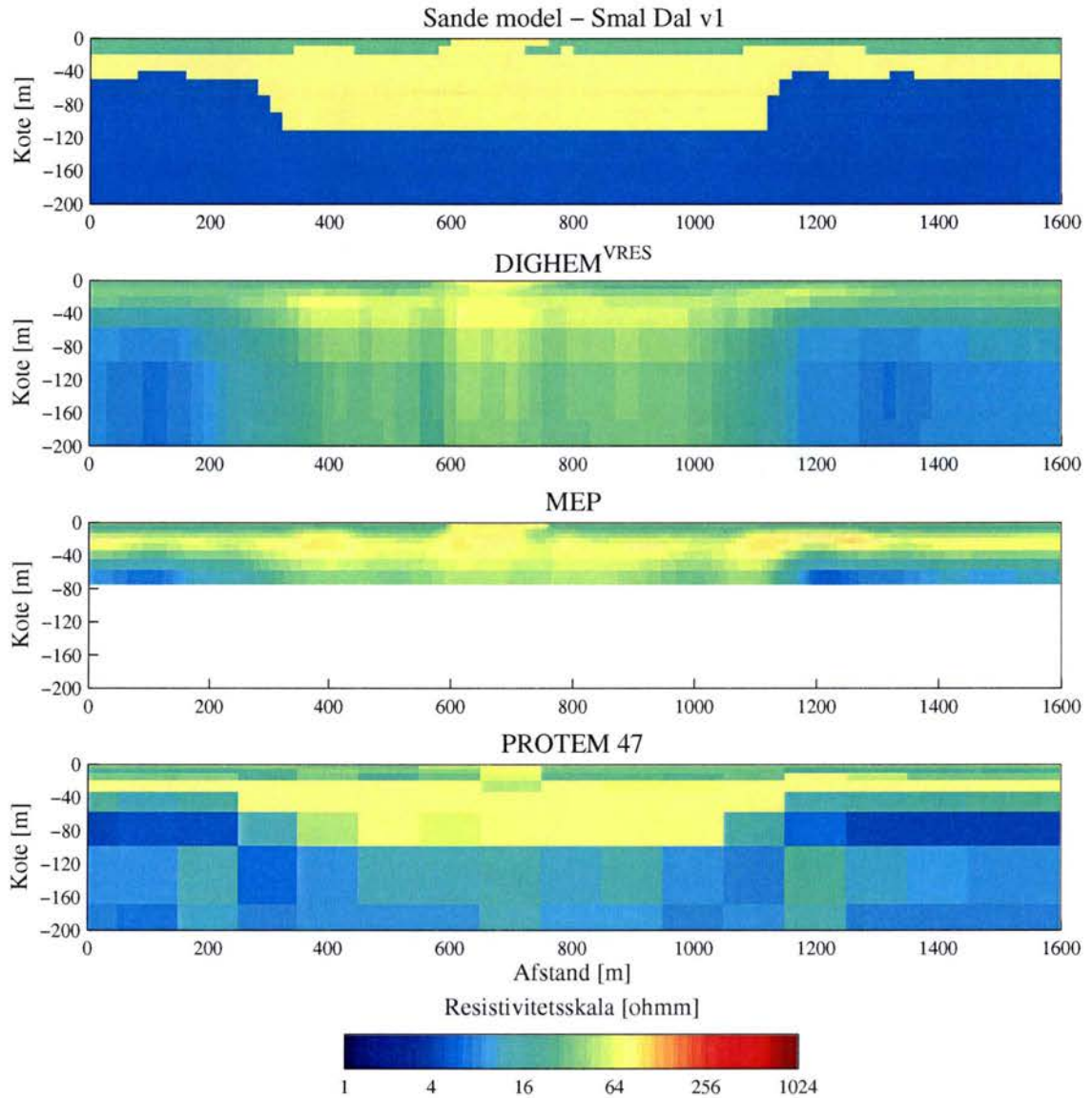
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Smal Dal – v2. Fålagstolkninger



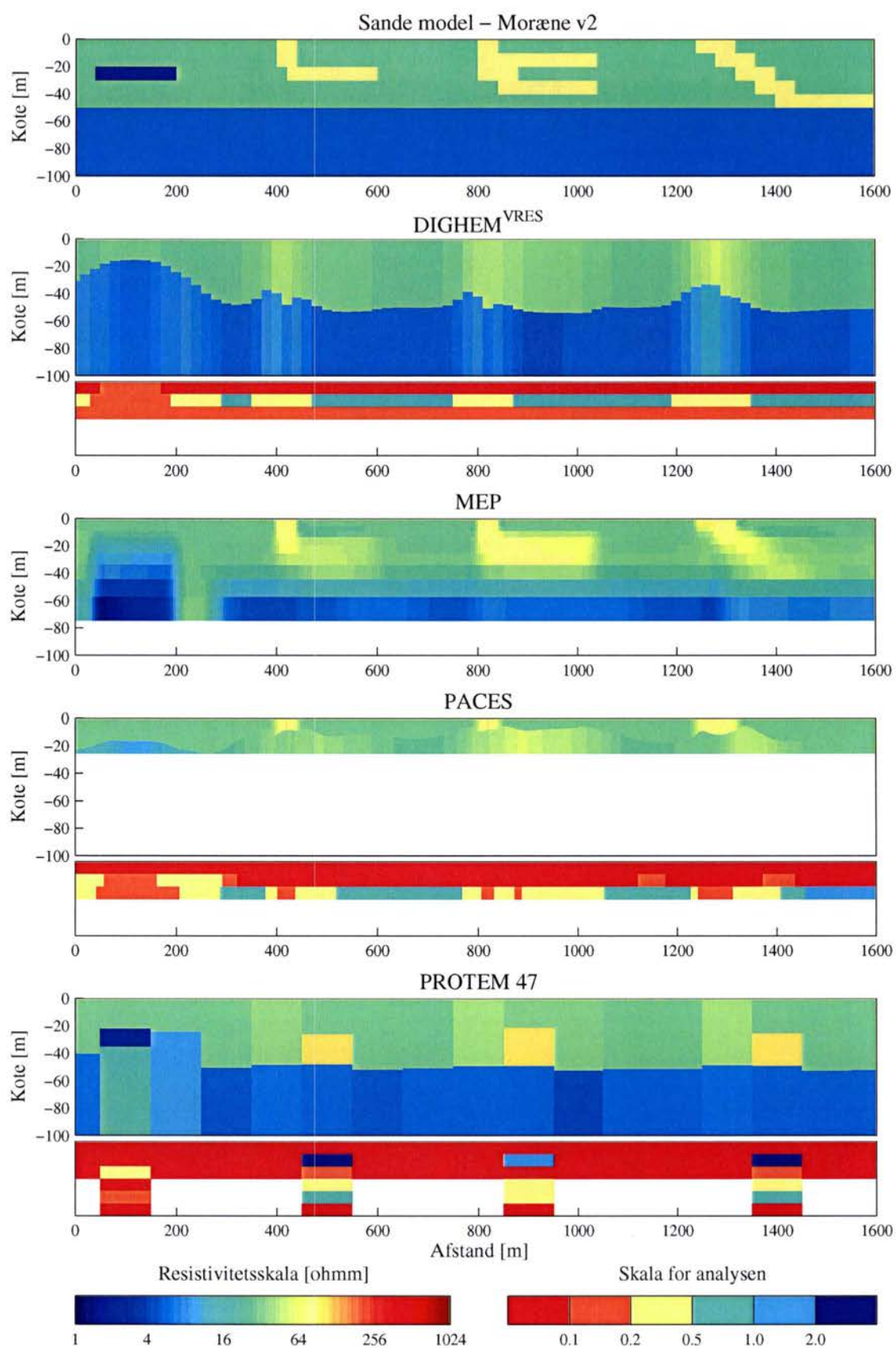
**Figur B.** Fejl! Ukendt argument for parameter.. *Model Smal Dal - v2. Mangelaystolkninger*



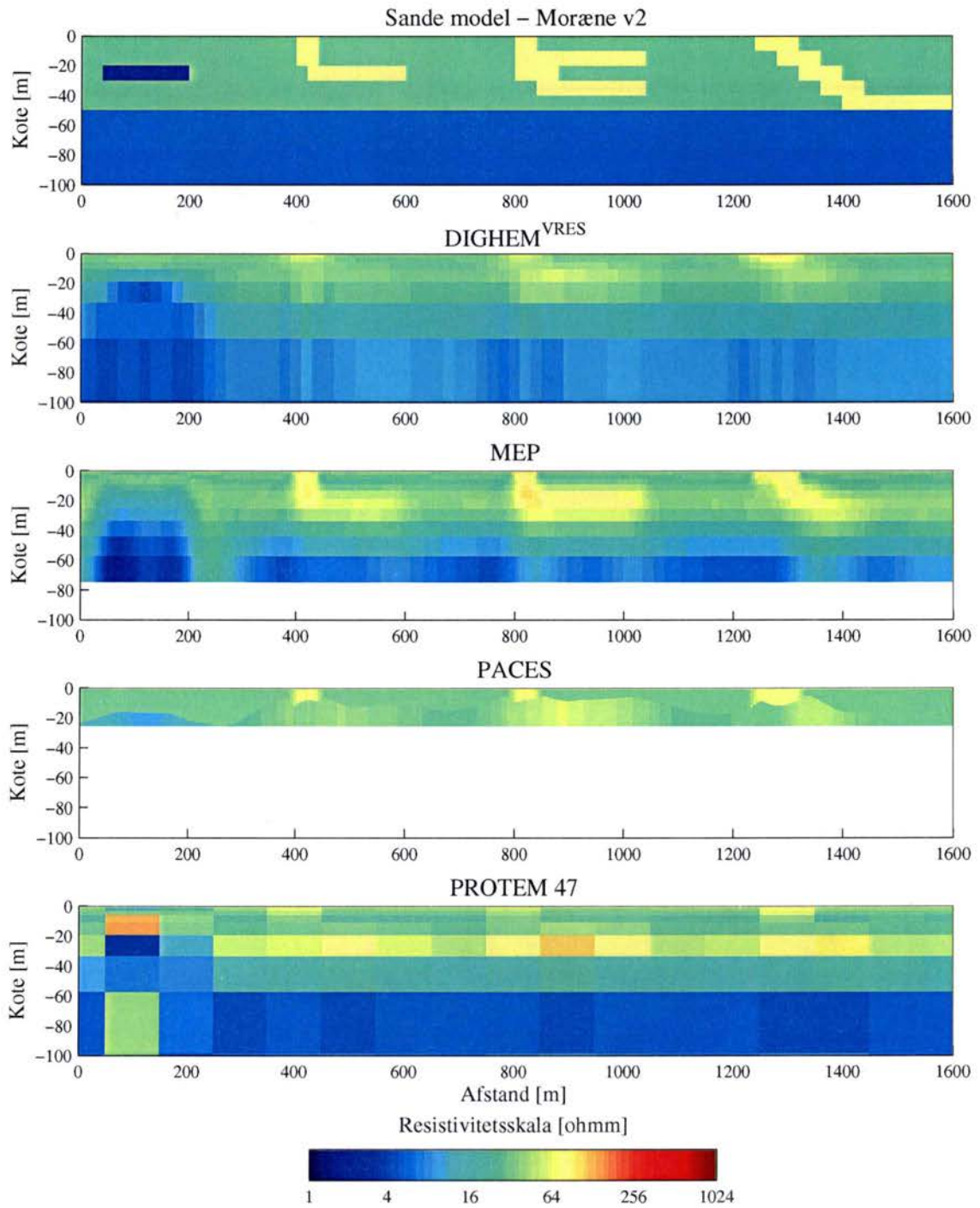
Figur B. Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Smal Dal - v1. Fålagstolkninger



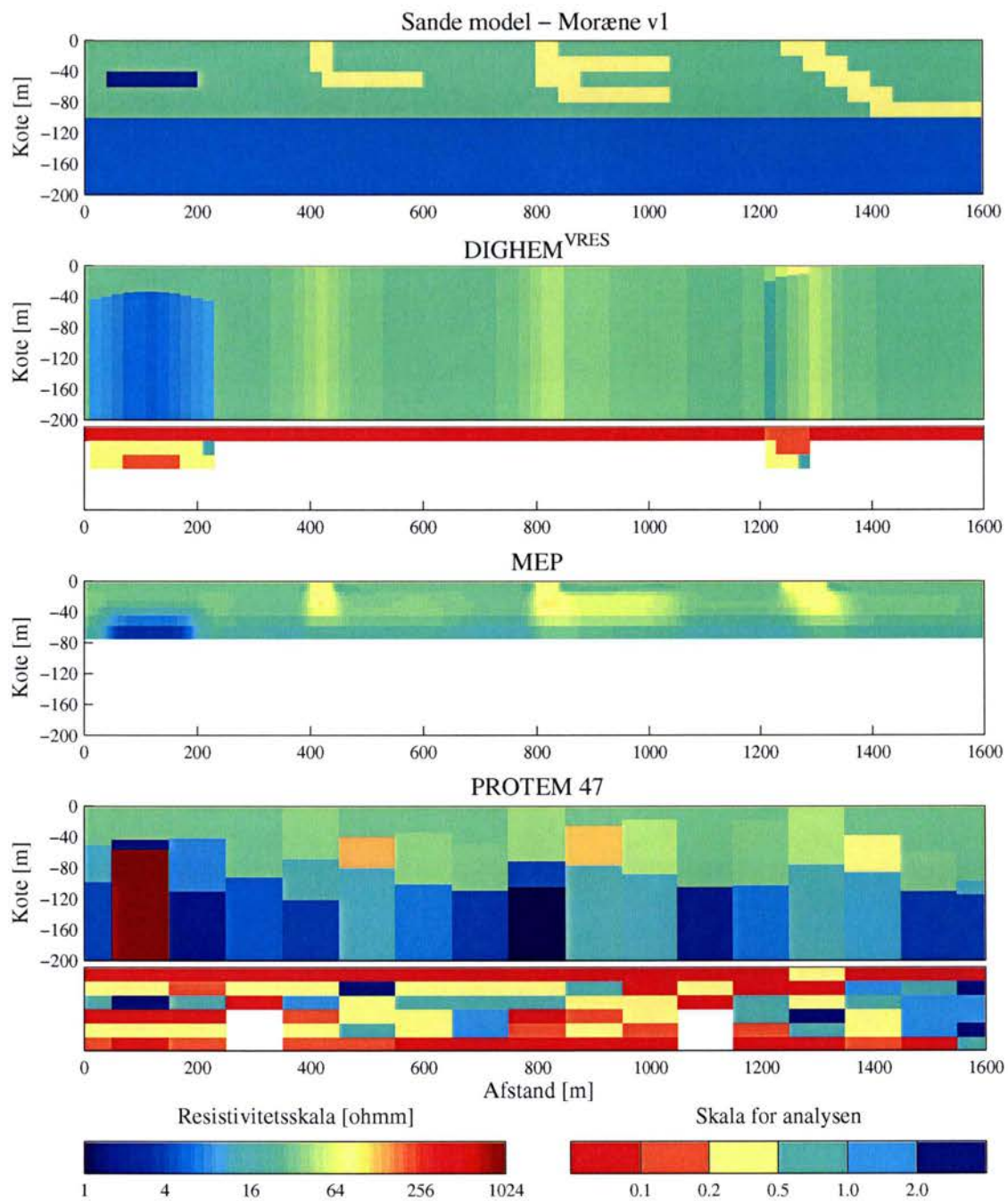
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. *Model Smal Dal - v1. Mangelagstolkninger.*



Figur B. Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Moræne – v2. Fålagstolkninger

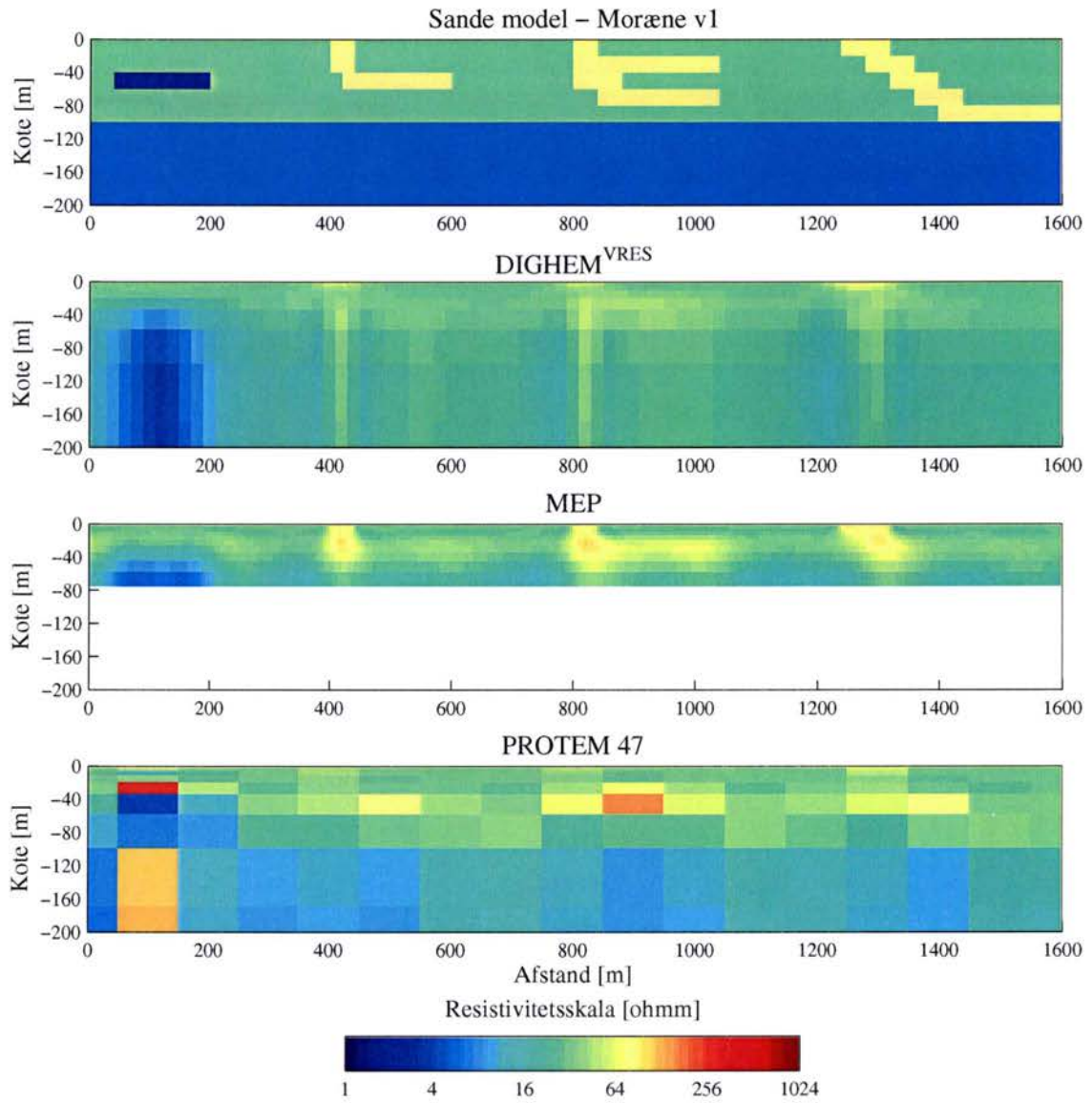


Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Moræne – v2. Mangelaystolkninger.

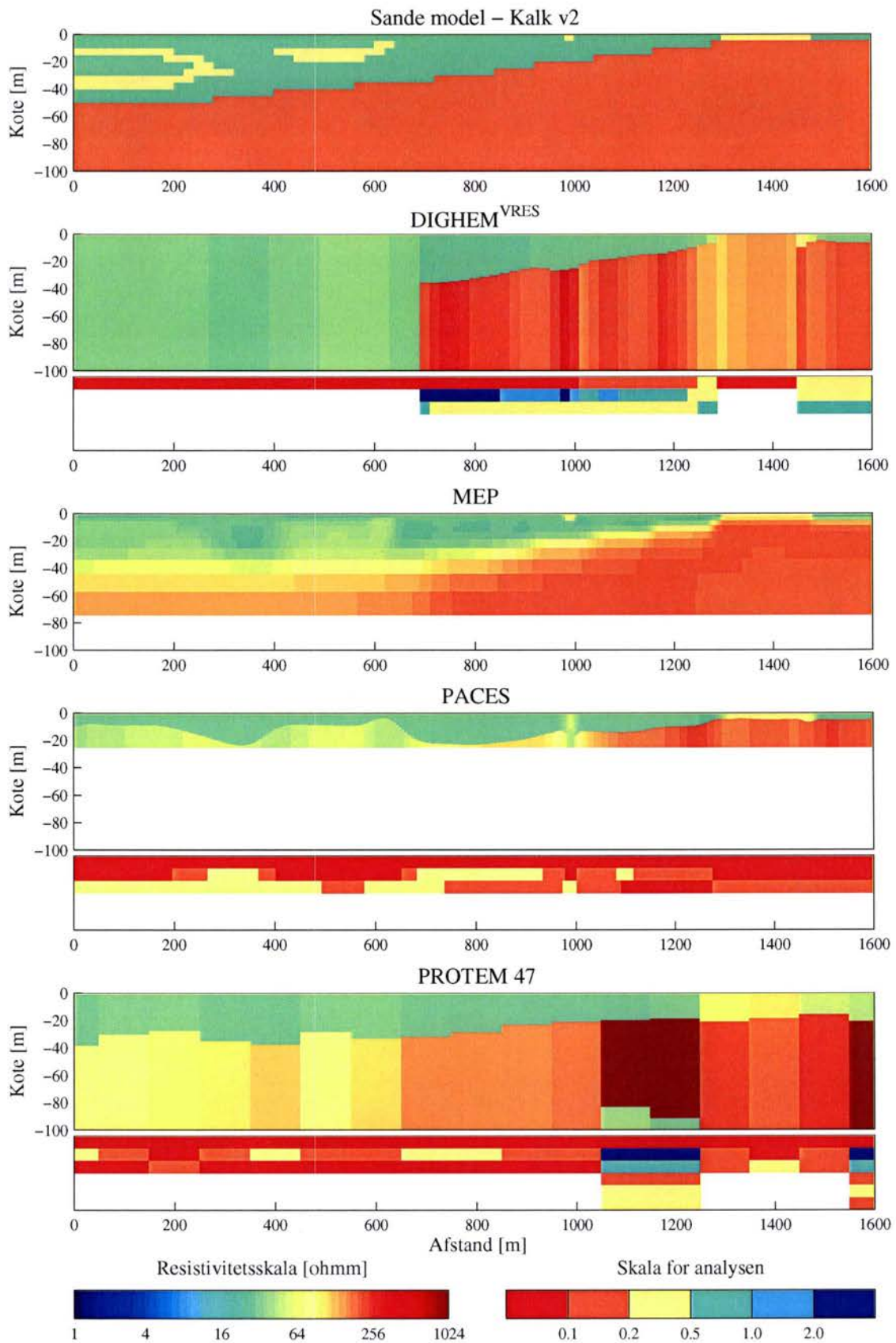


Figur B. Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Moræne - v1. Fålagstolkninger.

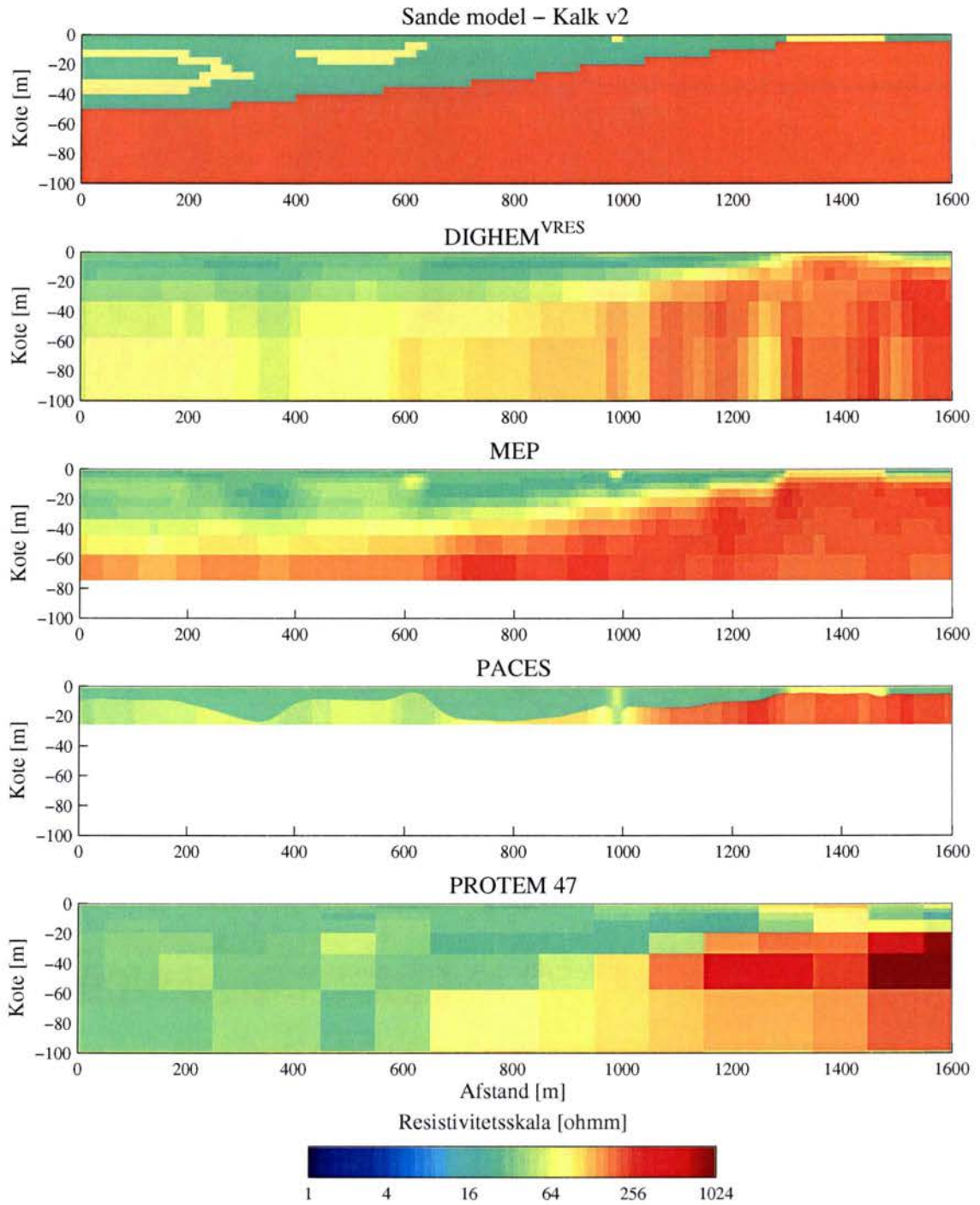




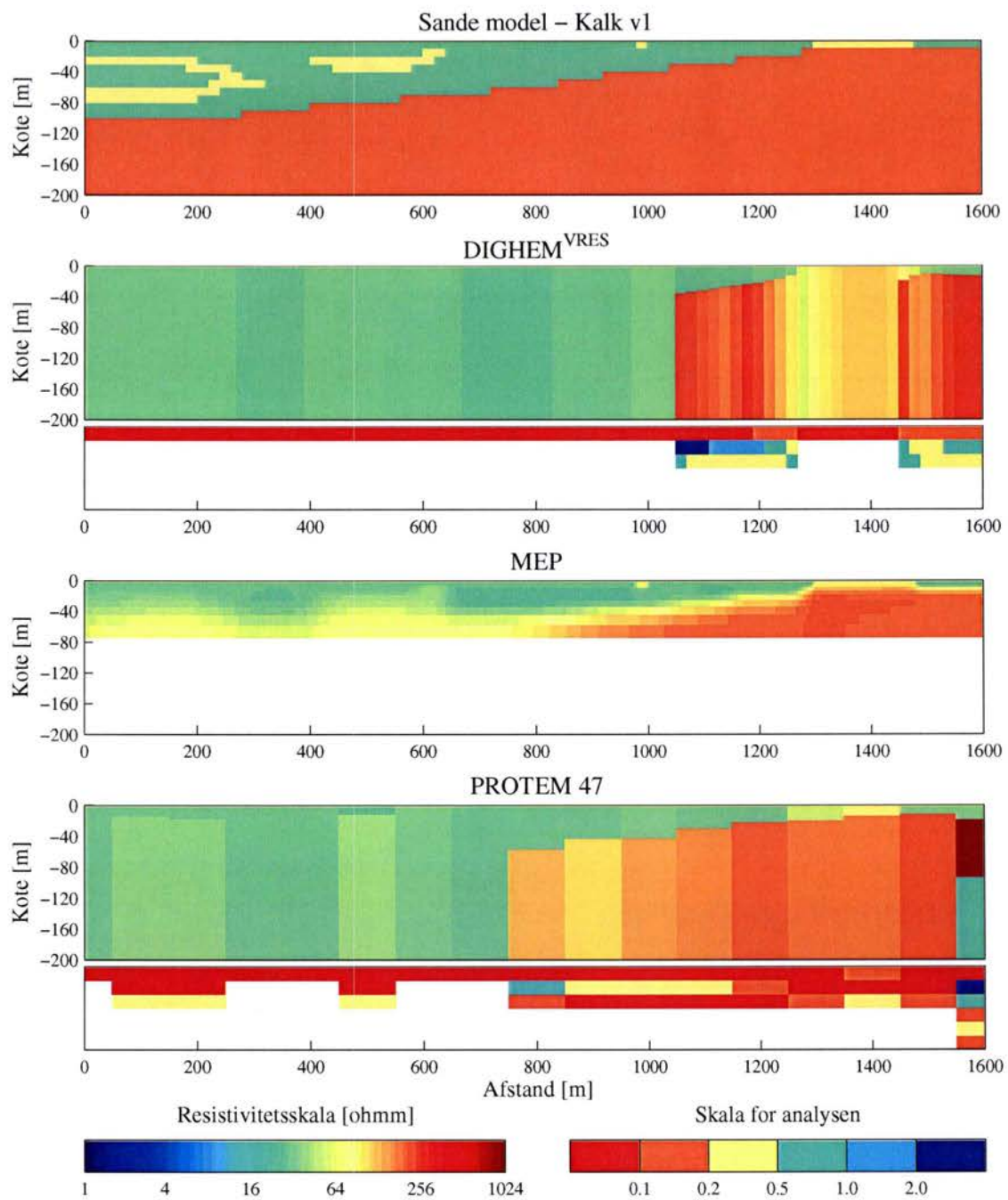
**Figur B.** Fejl! Ukendt argument for parameter.. *Model Moræne – v1. Manglagstolkninger.*



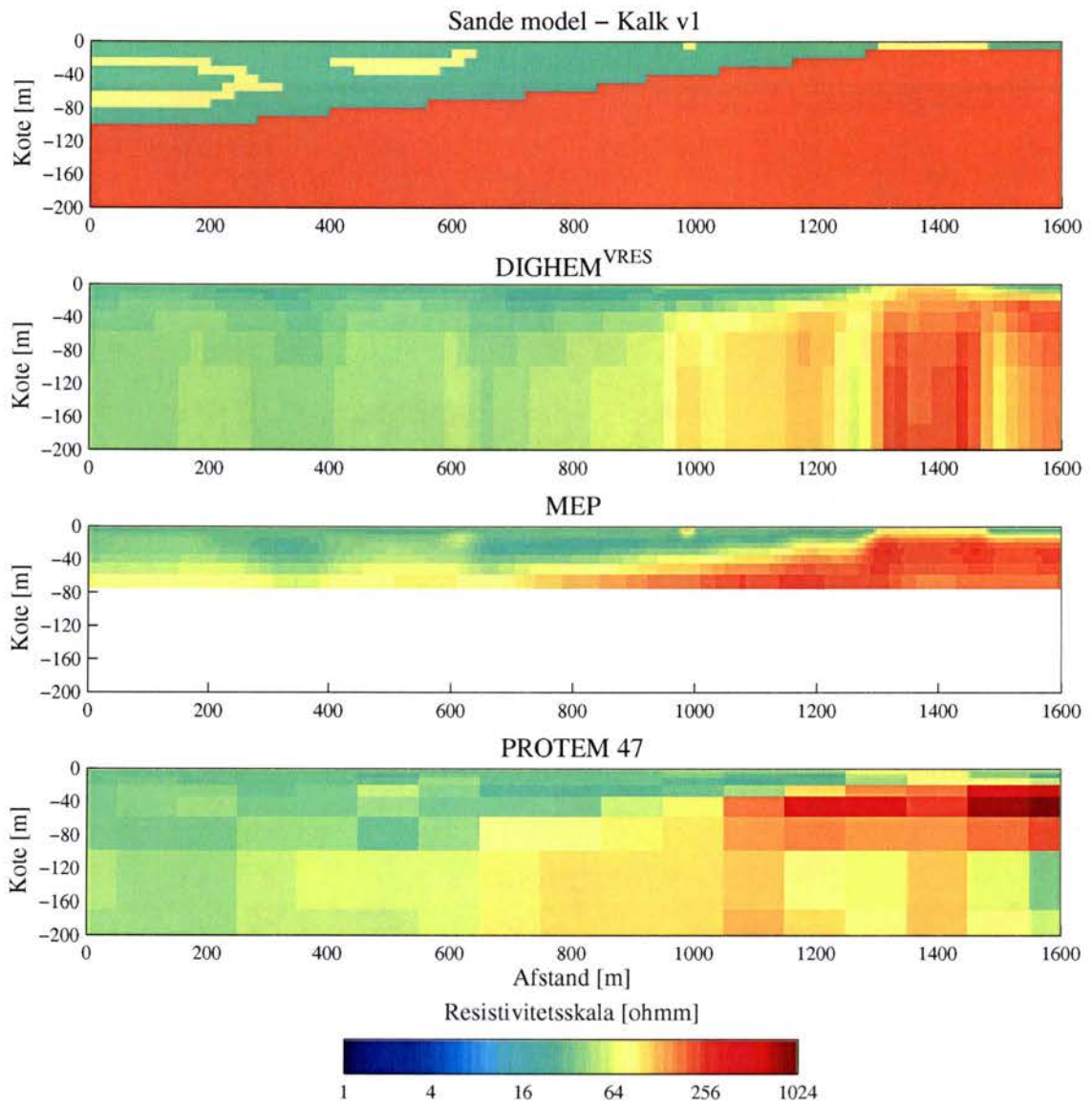
Figur B. Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Kalk - v2. Fålagstolkninger.



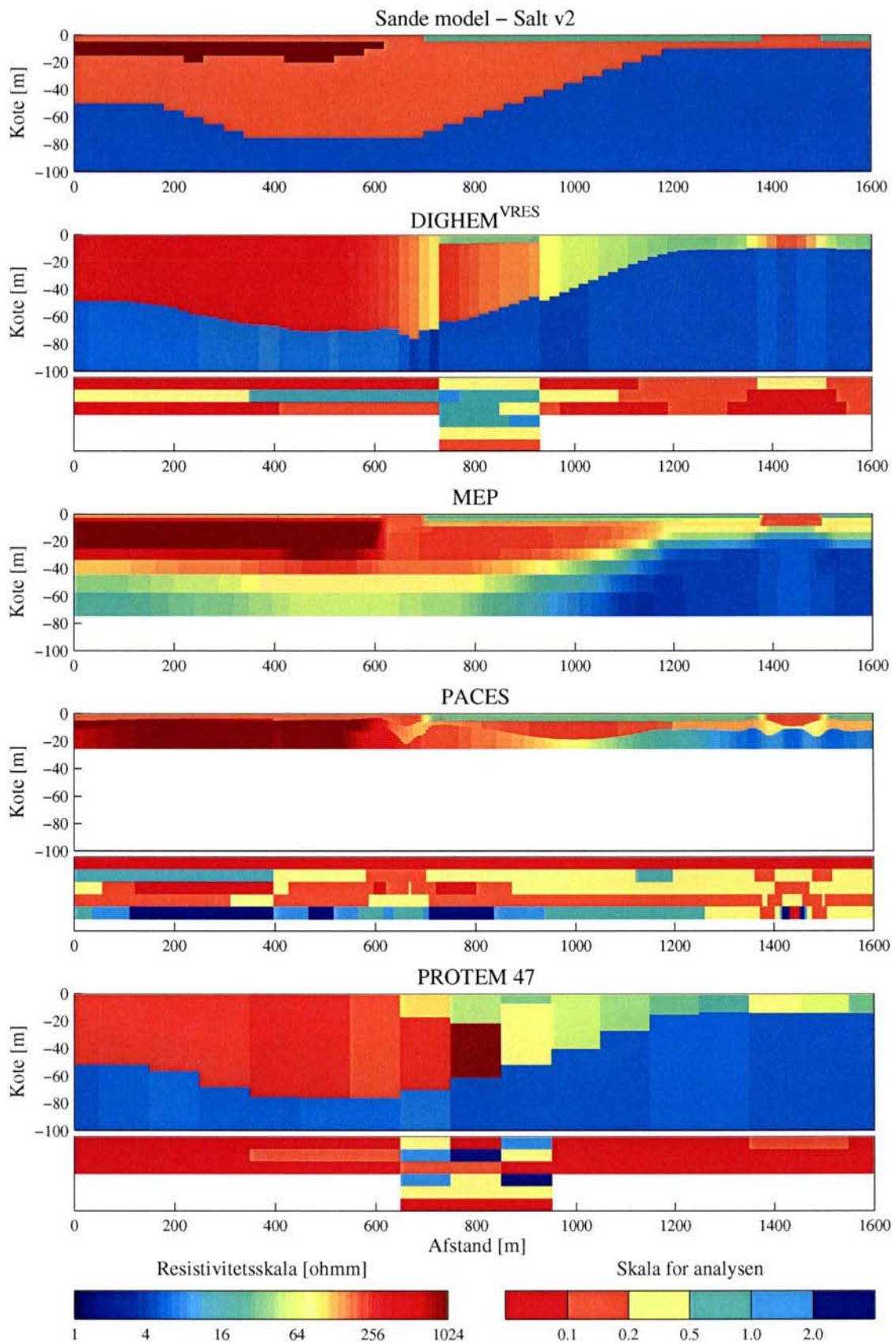
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Kalk - v2. Mangelagstolkninger.



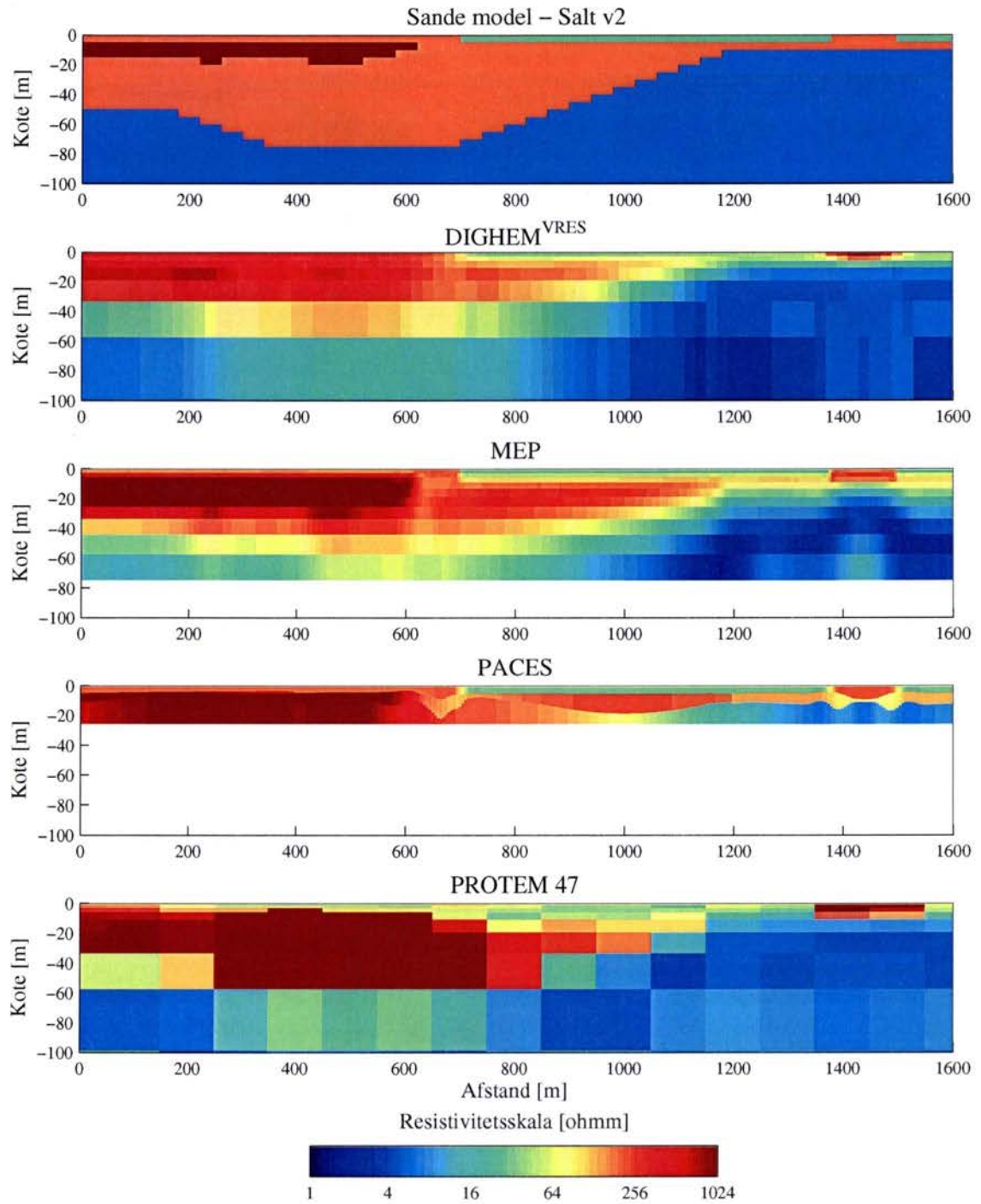
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Kalk - v1. Fålagstolkninger.



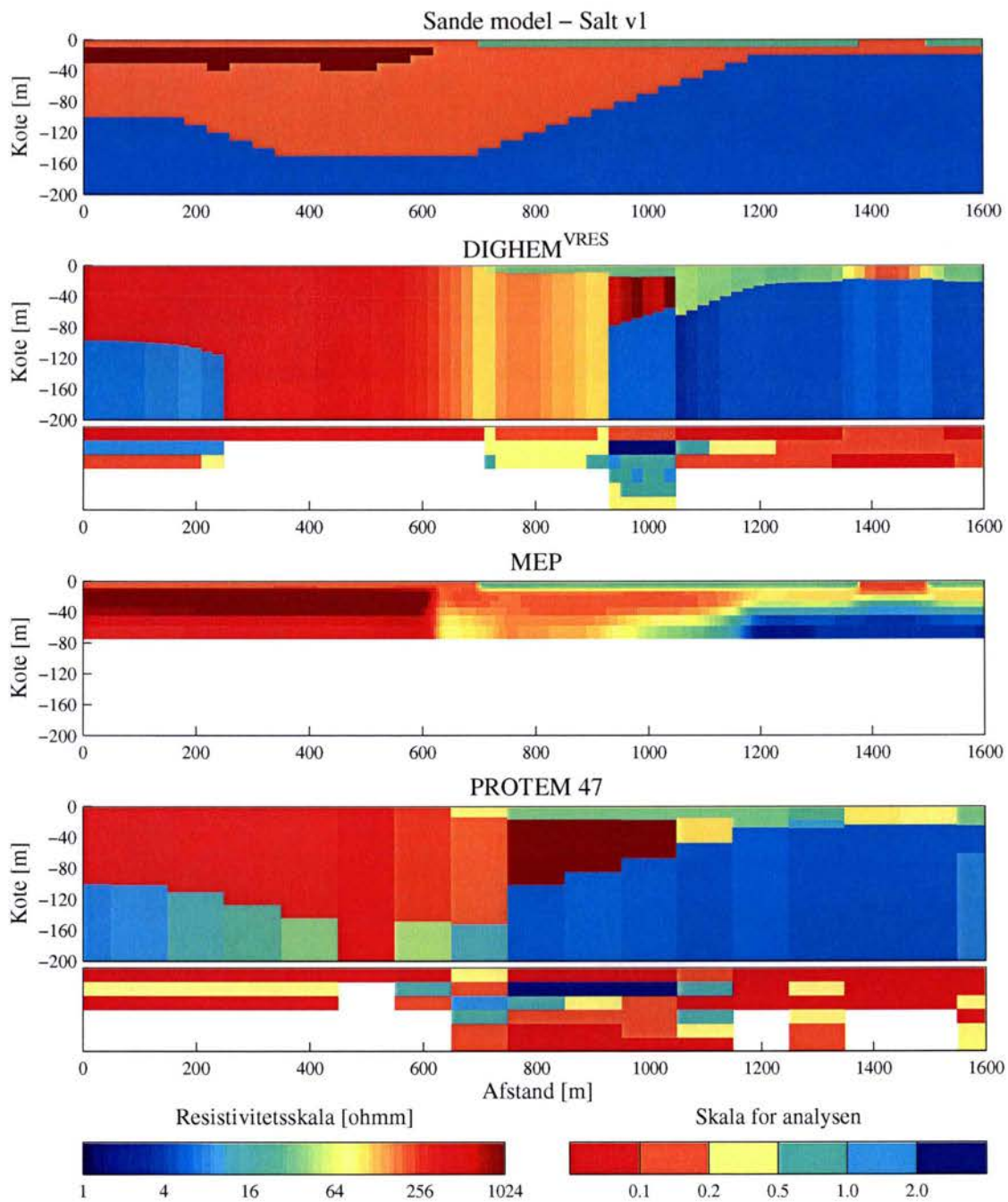
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Kalk - v1. Mangelagstolkninger.



Figur B. Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Salt - v2. Fålagsmodeller.

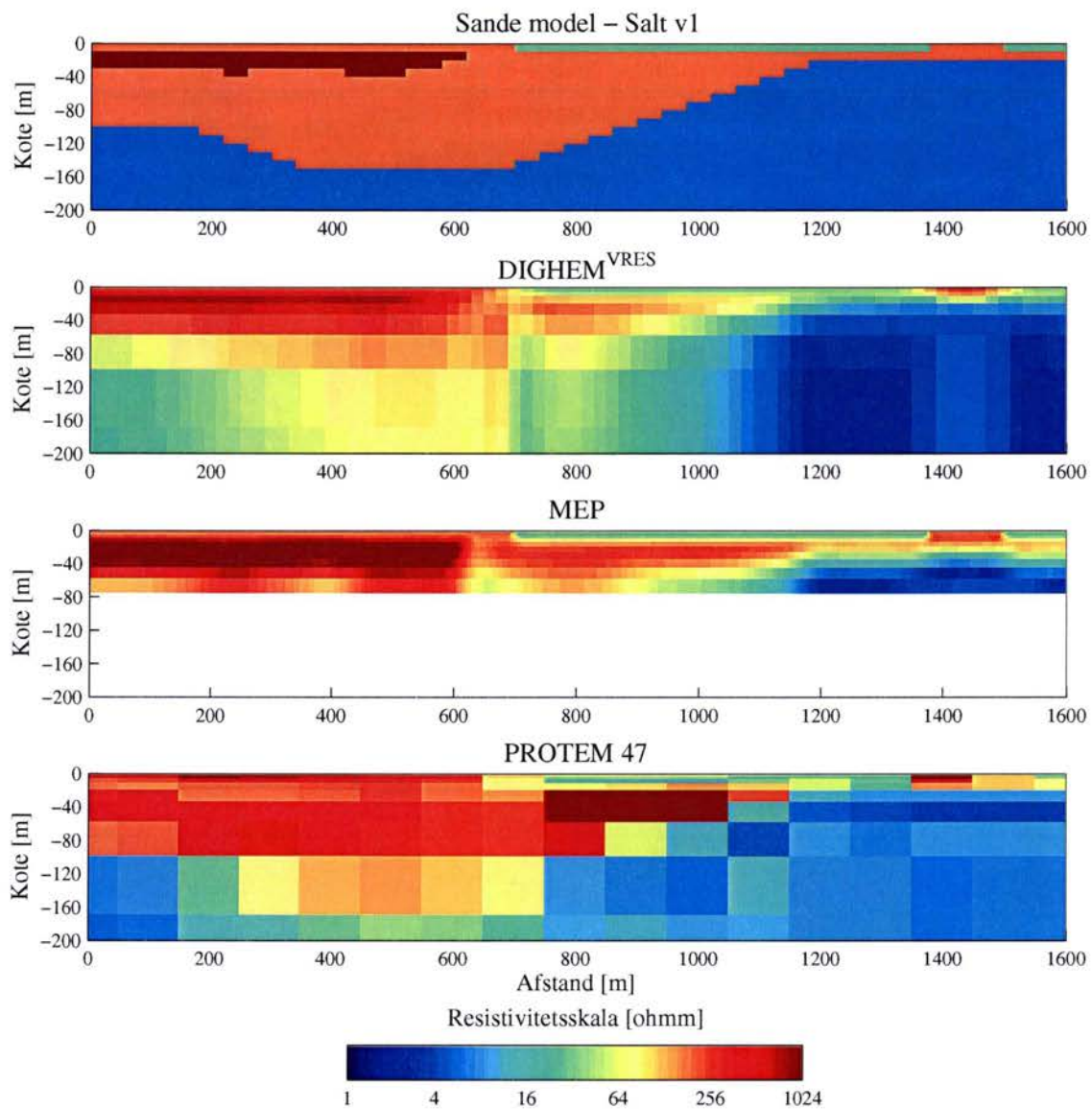


Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Salt – v2. Mangelagsmodeller.

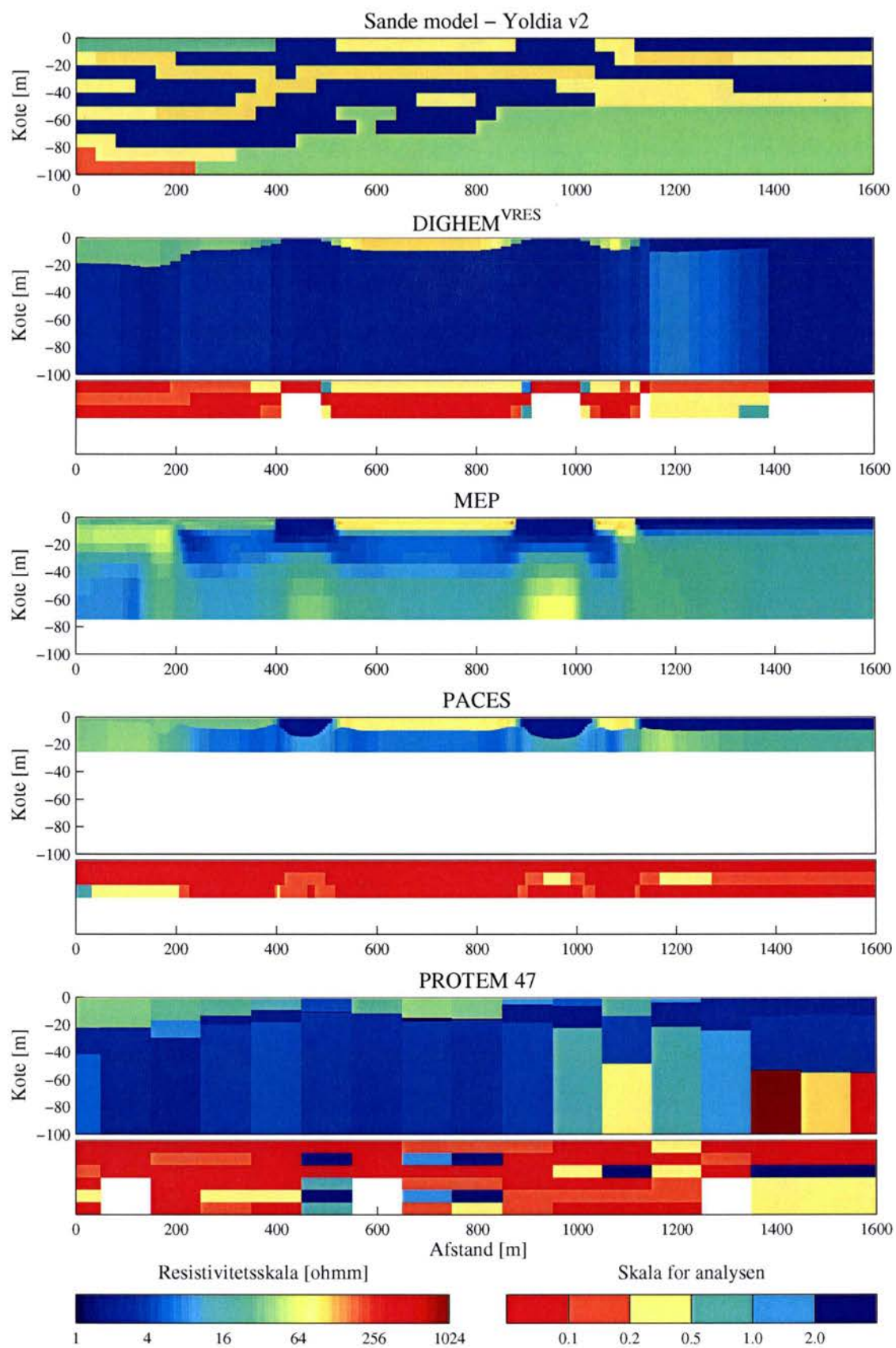


Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Salt - v1. Fålagsmodeller.

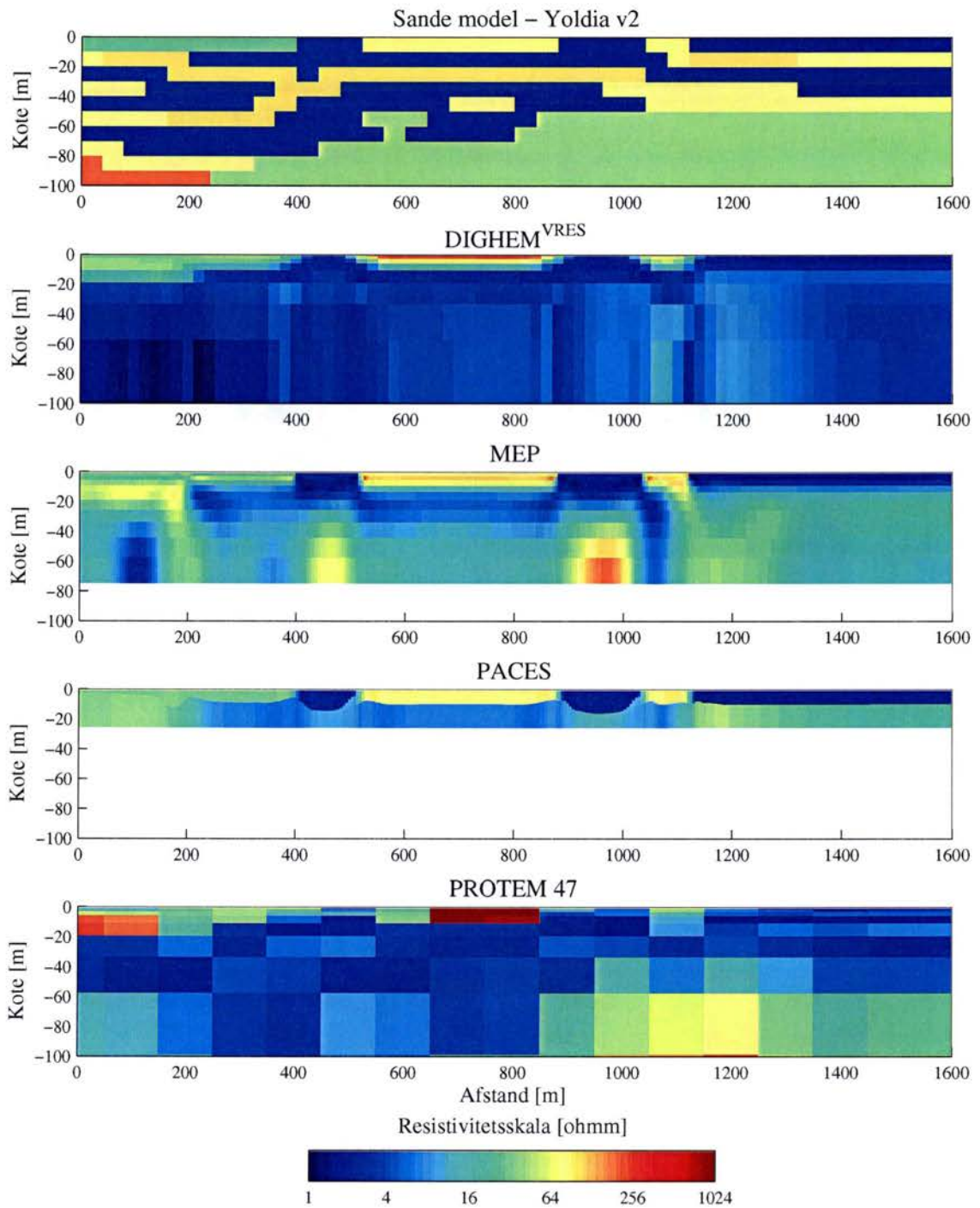




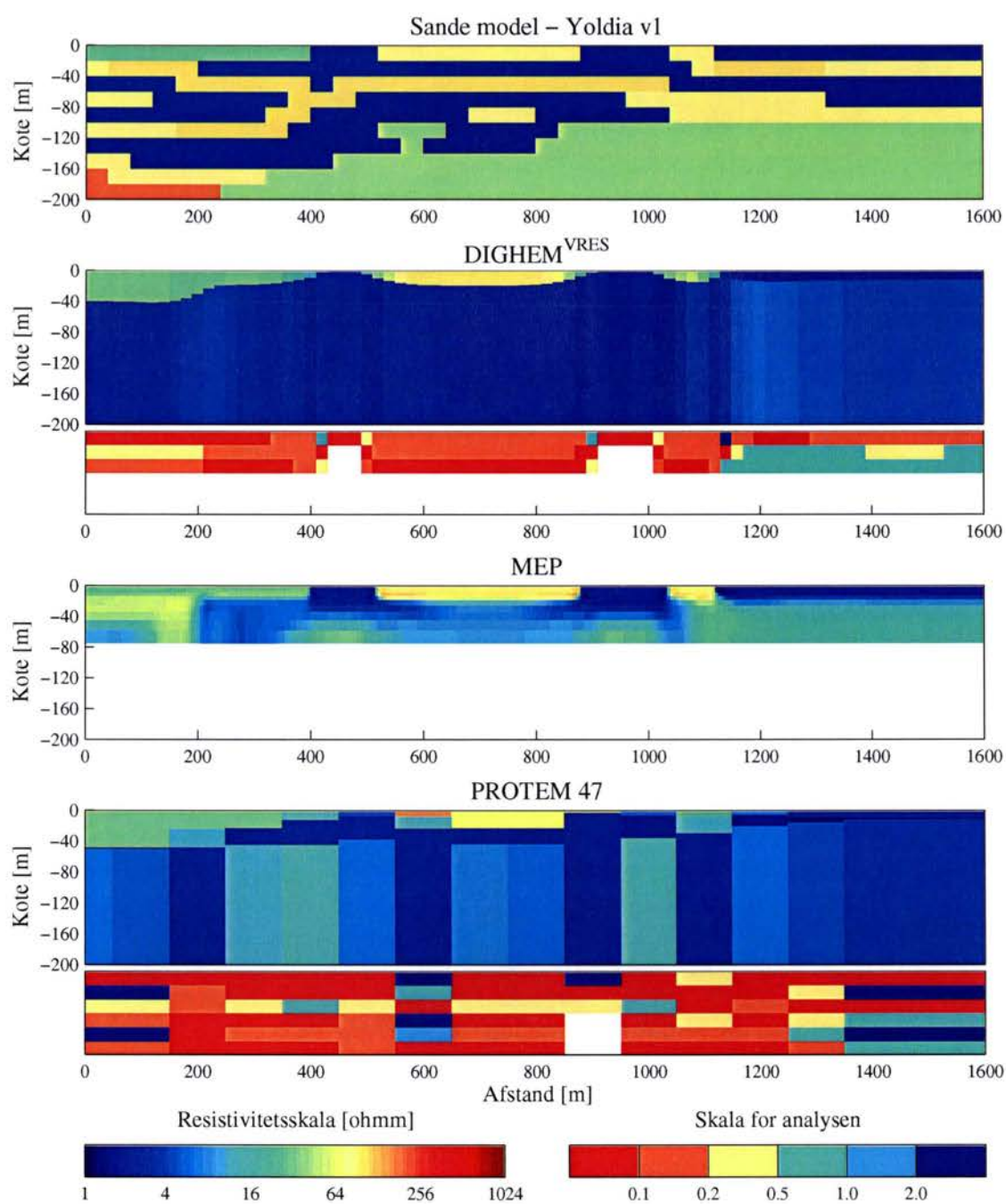
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Salt - v1. Mangelagsmodeller.



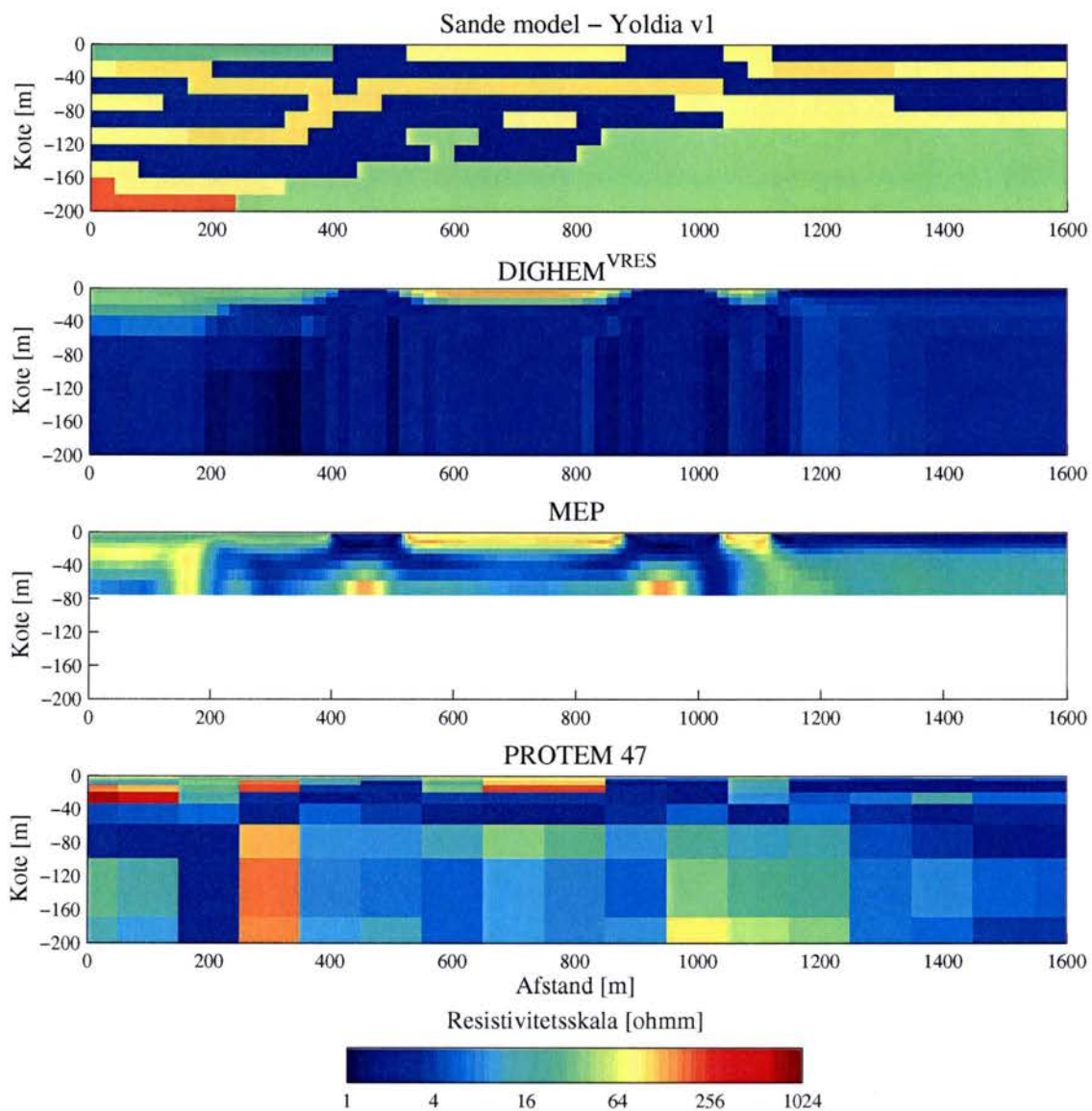
Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Yoldia - v2. Fålagsmodeller.



Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Yoldia – v2. Mangelagstolkninger.



Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Yoldia - v1. Fålagsmodeller.



Figur B.Fejl! Ukendt argument for parameter.. Model Yoldia - v1. Mangelagsmodeller.