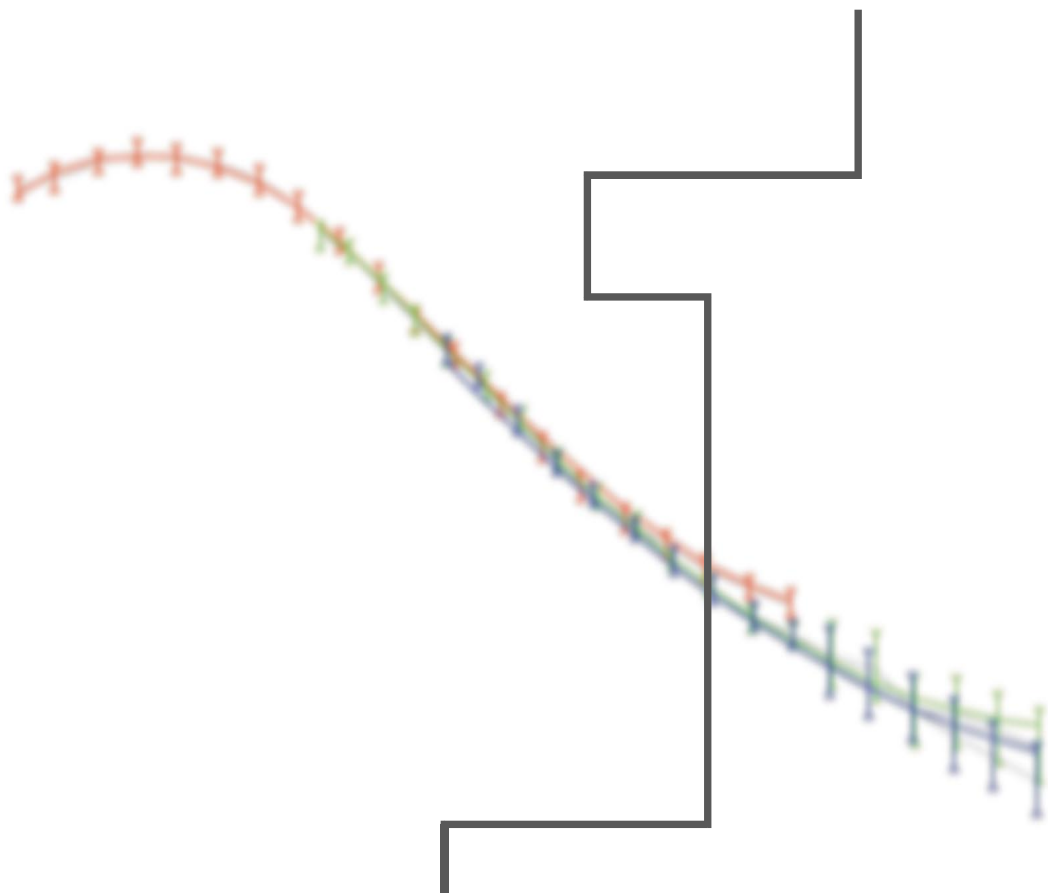




Sandbjerg, juni 2001 - rådgivere

# Processering og tolkning



# af TEM data



## INDHOLD

<b>1 FORORD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 EMMA - DATA OG MODELANALYSE.....</b>	<b>2</b>
2.1 Emmas grundlæggende struktur.....	3
2.2 Øvelse - Principielle responser.....	5
2.3 Øvelse - Filtre .....	6
2.4 Øvelse - Ramper og tidsforskydning.....	6
2.5 Øvelse - Analyser .....	7
2.6 Øvelse - Datausikkerhed versus modelparameterusikkerhed.....	8
2.7 Øvelse - Momentstørrelse versus parameterusikkerhed.....	9
2.8 Øvelse - Apriori information.....	9
<b>3 SiTEM - PROCESSERING AF DATA .....</b>	<b>11</b>
3.1 SiTEM .....	11
3.2 Øvelse - Indlæsning.....	12
3.3 Øvelse - Processering .....	13
3.4 Øvelse - Koblede sonderinger .....	15
<b>4 SEMDI - TOLKNING AF DATA .....</b>	<b>16</b>
4.1 SEMDI.....	16
4.2 Øvelse - Tolkning.....	16
4.3 Øvelse - MCI tolkning.....	19
4.4 Øvelse - Inkorporering af apriori information.....	20
4.5 Øvelse - Geologisk tolkning - apriori information.....	20



# 1 Forord

De følgende øvelser er alle blevet til i forbindelse med kurset Processering og tolkning af TEM data. Det aktuelle kursus og disse øvelser er specielt tilrettet rådgivere, idet vi forudsætter, at deltagerne allerede har noget kendskab til behandling af TEM data.

Fomålet med kurset er at efteruddanne rådgivernes medarbejdere i, hvordan de geofysiske metoder anvendes i forbindelse med den landsomfattende indsats, der udføres for at kortlægge grundvandsressourcerne i Danmark. Vi håber derfor, at kurset gør deltagerne bedre rustet til detaljeret at kunne gennemgå afrapportering af TEM kortlægninger og kvalitetsvurdere dataprocesseringen og tolkningen. Dertil kommer, at kurset også skal give deltagerne et indblik i de mere avancerede sider af processering og efterprocessering samt specielt inversion af data.

Kurset indeholder 1) en overordnet gennemgang af TEM metoden, 2) en detaljeret gennemgang af ideerne bag datainversion, 3) en indføring i, hvordan modelanalyser bruges i forbindelse med design af kortlægningsopgaver, 4) en gennemgang af de teknikker der anvendes i TEM instrumenterne, 5) en detaljeret gennemgang af

dataprocessering og tolkning, og endelig 6) en introduktion til hvordan geologisk apriori information kan føres over i datatolkningen.

Øvelsessamlingen har til formål at underbygge de oplæg, der bliver holdt på kurset.

Da vi meget gerne vil se, hvordan kurset virker, før vi udarbejder egentlige kursusnoter, har vi udeladt sådanne og har istedet koncentreret os om at lave kursus øvelserne samt analyseprogrammet Emma.

En del personer har været dybt engageret i at tilrettelægge kurset. Øvelserne er udarbejdet af Esben Auken, Peter Thomsen og Kurt Sørensen, GeoFysikSamarbejdet, Aarhus Universitet. Programmerne, der benyttes i øvelserne (Emma, SiTEM og Semdi), er programmeret og designet af Lars Nebel, Morten Breiner og Esben Auken. Den underliggende beregningskode, em1dinv, er designet og programmeret af Esben Auken.

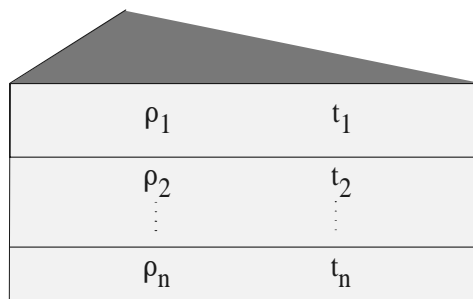
Århus, juni 2001



## 2 Emma - data og modelanalyse

Programmet Emma (ElectroMagnetic Model Analysis) er et nyudviklet program til analyse af geoelektriske og elektromagnetiske data og modeller. Med Emma er det muligt at simulere, hvad der ville måles med et bestemt instrument i en given målekonfiguration over en kendt geologisk model. Ud over dette kan Emma også estimere, hvor godt den geologiske model ville blive opløst, såfremt usikkerheden på de målte data kan estimeres.

En geofysiske model er en oversættelse af egenskaberne af de geologiske formationer til geofysiske parametre som f.eks. elektrisk modstand. I Emma antages det, at den geofysiske model er én dimensional (1-D) som vist i Figur 2.1. Hvert lag i modellen har en elektrisk modstand ( $\rho$ ) og en tykkelse ( $t$ ), og laget er homogen og isotrop. Med homogen menes, at den elektriske modstand overalt i formationen er den samme, men ikke nødvendigvis at den har samme størrelse i alle retninger. Med isotrop menes, at modstanden er ens i alle retninger, men ikke at den er ens overalt i formationen. Tilsammen betyder homogen og isotrop, at modstanden i formationen er ens overalt og i alle retninger.



Figur 2.1 1-D jordmodel. Modellen har  $n$  lag, hver med en modstand  $\rho$  og en tykkelse  $t$ .

Emma kan lave modelanalyser af de forskellige datatyper hver for sig, eller der kan laves analyser, hvor flere forskellige datatyper eller datasæt er anvendt på samme tid. Det sidste er det, der på engelsk kaldes joint analysis eller joint inversion. Ud over modelanalyser med mere end ét datasæt, kan Emma også lave analyser, hvor mange én-dimensionale modeller er koblet sammen med laterale bånd. Ved at koble modellerne sammen opnås en pseudo 2-dimensionale (2-D) model.

Med Emma er det forsøgt at give selv ikke-eksperter adgang til at kunne udføre komplicerede analyser af f.eks. hydrogeologiske problemstillinger med få klik med musen. Emma er dermed et arbejdsredskab, der kan anvendes, inden en undersøgelse endelig designes, men det er også et redskab, der kan bruges til at få en intuitiv forståelse af, hvordan de elektrofysiske metoder virker, og hvordan de evner at opløse en bestemt geofysisk model.

Emma er en grafisk brugerflade, der kan afvikles under Windows (helst NT) på en kraftig computer. Det program, der udfører de egentlige beregninger af modelrespons og modelanalyser, er programmet em1dinv. Em1dinv er udviklet delvist i USA, delvist på DTU, ved Aarhus Universitet og i GeoFysikSamarbejdet. Det skal understreges, at brugeren af Emma på ingen måde skal kende til opbygningen eller brugen af em1dinv for at kunne anvende og få fornøjelse af Emma.

De algoritmer, der anvendes i em1dinv, og som der dermed er adgang til via Emma, mener vi selv, er nogle af de mest avancerede, der findes. Nogle af algoritmerne er baseret på matematiske



løsninger, der er udviklet gennem de sidste 30 år, mens andre er udviklet i forbindelse med den egenforskning, der foretages på Aarhus Universitet og i GeoFysikSamarbejdet.

Emma er free-ware og kan dermed benyttes af alle. Programmet eller dele af det må ikke sælges.

Til sidst skal nævnes, at den version af Emma, der skal anvendes til de følgende øvelser, er en beta version. Med beta version menes, at på nuværende tidspunkt er alle funktioner ikke fuldt implementerede, ligesom det heller ikke er sikkert, at der ikke kan opstå "underlige" fejl, når programmet bruges. On-line hjælpen er delvist implementeret. Det forventes, at Emma vil blive færdig i en version 1.0 medio juni 2001. Emma vil på dette tidspunkt kunne hentes på GeoFysikSamarbejdets hjemmeside ([www.GeoFysikSamarbejdet.au.dk](http://www.GeoFysikSamarbejdet.au.dk)) eller [www.gfs.au.dk](http://www.gfs.au.dk).

## 2.1 Emmas grundlæggende struktur

I det følgende gennemgås kort den grundlæggende struktur og organisering af Emma.

Emma er organiseret omkring et Workspace. I dette workspace gemmes 1) alle opsætningsparametre, der anvendes for at kunne fastlægge en bestemt målekonfiguration og model, 2) alle respons og modelanalyseberegninger. Workspacet er grundlæggende en database, der består af mere end 20 relaterede tabeller.

Adgangen til data i workspacet er organiseret via guider, som leder brugeren igennem de forskellige trin, der er nødvendige for at kunne visualisere og analysere på den ønskede måde. Derudover findes der modeltemplates, der definerer standard geofysiske modeller sammen med de mest almindeligt anvendte målekonfigurationer. Enhver modelkørsel er baseret på en af disse templates, og brugeren kan frit oprette nye templates, der passer til specielle behov.

## Organisering af Emma

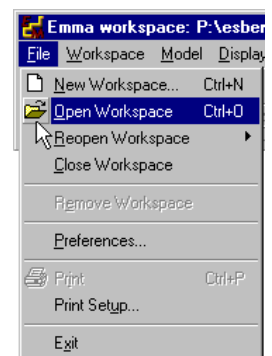
Organiseringen af Emma er bedst beskrevet ved kort at gennemgå menusystemet samt de vigtigste vinduer. Nogle af menupunkterne er selvforklarende, mens andre kræver nogen forklaring.

Plot og modelrespons hentes fra workspacet via en guide, hvor brugeren angiver, hvilke parametre (f.eks. Rhoa som funktion af tid for TEM plot) man ønsker at plote på hvilke akser. Dette system er søgt gjort så fleksibelt, at alle parametre i princippet kan plottes mod alle parametre. I plotvinduerne kan kurver kopieres fra et vindue til et andet, og der kan f.eks. beregnes relativ forskel imellem to kurver.



Display Wizard

For at kunne bruge Emma skal der oprettes eller genåbnes et workspace (Open Workspace eller Reopen Workspace). Dette gøres i menuen File. Når et workspace åbnes, skal brugeren indtaste et brugernavn samt angive, i hvilken folder workspacet skal placeres eller hentes fra.

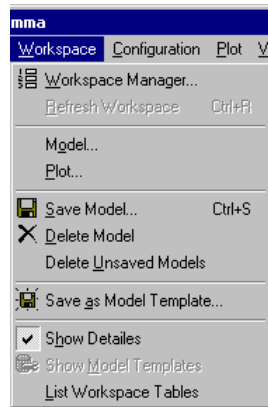


Menuen File

I File menuen findes, foruden New Workspace og Open Workspace, menuerne Close Workspace og Remove Workspace.

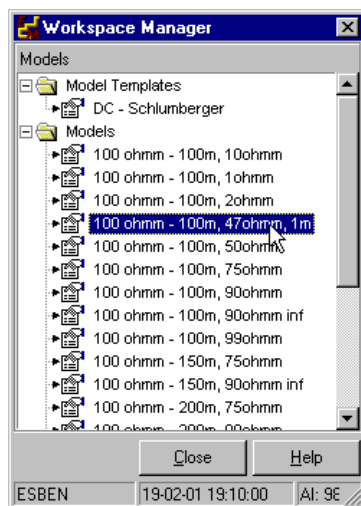


Når et workspace først er åbnet, er der adgang til alle menu-punkter i Workspace menuen. Denne menu bruges til at vedligeholde og navigere rundt i workspacet. De vigtigste menupunkter er Workspace Manager og Save Model.



Menuen Workspace

Workspace Manager viser en liste over alle de modeller, hvor der allerede er beregnet responser og analyser, mens Save Model giver mulighed for at gemme en model permanent i workspacet. Dette skal forstås på den måde, at når en beregning foretages, gemmes resultatet som Unsaved. Disse ikke-gemte modeller slettes automatisk, når workspacet lukkes!

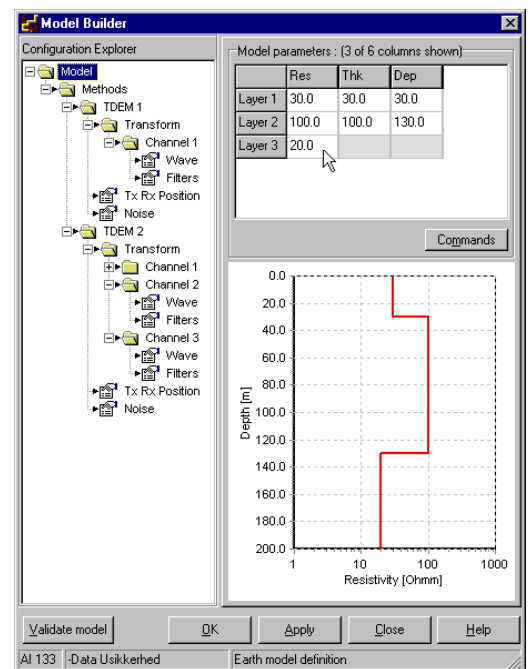


Vinduet Workspace Manager

På Workspace Manageren kan der laves plot eller defineres nye modelkonfigurationer. Plot eller analyser opbygges ved at markere en model og derefter trykke på Workspace/Display Wizard. De parametre, der er brugt til at definere den valgte model i modeloversigten, fås frem ved at

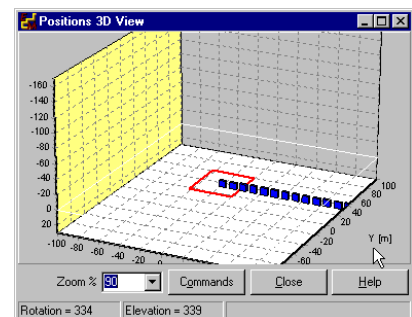
markere en model og derefter trykke på Workspace/Model Builder.

Model Builderen bruges til at definere den geofysiske model, samt hvilke geofysiske metoder der anvendes. Dette vindue indeholder mange forskellige parametre. I langt de fleste tilfælde skal der dog kun ændres på ganske få parametre, idet de fleste er prædefinerede.



Model Builder

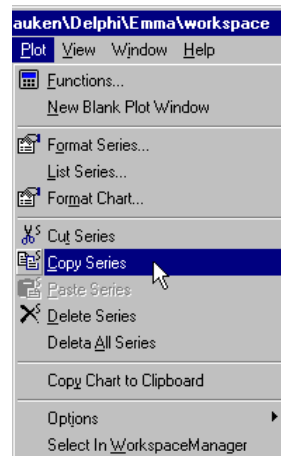
Sender-modtager konfigurationer kan visualiseres i et 3-dimensionalt plot vindue.



3-D visualisering af sendere og modtagere



Plot-menuen er den sidste menu, der skal omtales. Denne menu bruges til at formatere modelresponsplot. Disse plots kan printes eller kopieres til andre programmer. På Plot-menuen er der også facilitet til f.eks. at beregne relative forskelle mellem to modelrespons samt kopiere/flytte kurver fra et plotvindue til et andet..



Menuen Plot

## 2.2 Øvelse - Principielle responser

Den første øvelse, der skal laves med Emma, går ud på at få en intuitiv fornemmelse for det transiente modelrespons for typiske danske hydrogeologiske modeller.

Den transiente opstilling, der benyttes, er forsimplet i forhold til den meget anvendte 40 x 40 m<sup>2</sup> Protom 47 opstilling, men den har samme fysiske egenskaber i form af moment, slukkeramper og filtre.

I øvelserne skal bruges workspacet J:\Emma Workspace. I dette workspace er der defineret skabeloner (templates) for alle de model- og sender-modtager konfigurationer, der bruges i de følgende øvelser.

For at opnå fortrolighed med det transiente respons, er det en god ide at generere responser i både dB/dt og Rhoa. dB/dt er den størrelse, der måles i felten, mens Rhoa er en transform af dB/dt. Rhoa transformen gør det nemmere at vurdere, om datakvaliteten er i orden.

Lav et plot af modellen Intuition. Dette gøres ved at vælge denne model (under Templates) og derefter vælge Workspace/Display Wizard (eller vælge Display Wizard på Workspace Managerens højreklikmenu). Følg wizard ved at trykke på

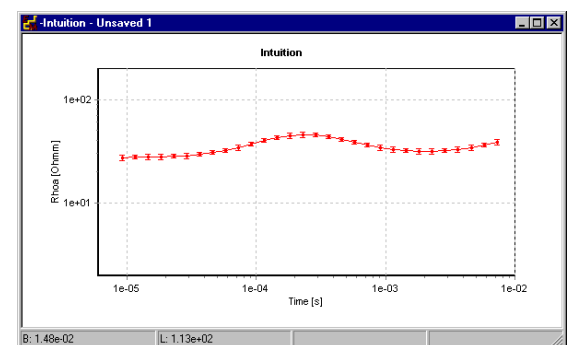
Next knappen. Der fremkommer nu et plot, der viser dB/dt responset fra en model med parametre som vist i Tabel 2.1. På plottet skal man bemærke det store dynamiske område, som kurven strækker sig over i både tid og dB/dt.

Lag	Rhoa [ $\Omega$ m]	Tykkelse [m]
1	30	30
2	100	60
3	10	

Tabel 2.1 Modelparametre for modellen Intuition. Modellen skal simulere et morænelag oven på et aquiferlag. Nederst er der tertiært ler.

Prøv nu at beregne den samme kurve i Rhoa. Dette gøres ved at gå tilbage til Workspace Manageren og dobbeltklikke på Intuition (eller vælg Workspace/Model Builder). Prøv at undersøge de mange forskellige parametre, der er brugt for at definere modellen Intuition. Pas på ikke at ændre noget!

For at lave en beregning i Rhoa skal man under TDEM 1 markere checkboksen "Convert to Rhoa". Når det er gjort, trykkes på OK, og få sekunder efter kan der laves et nyt plot.



Plot

Prøv at lave responser for modeller i Tabel 2.2 og Tabel 2.3. Beregn responserne i både Rhoa og dB/dt. For at kunne sammenligne modelresponsene plottes alle Rhoa kurverne i samme plotvindue. For at gøre dette skal man, FØR der trykkes på OK i Display Builder'en, 1) markere checkboksen "Add to active plot window" nederst på Display Builder'en, og 2) trykke på det plotvindue, hvorpå modelresponsen skal



plottes. Det sidste sætter plotvinduet til aktivt. Efter dette kan der rykkes på Apply eller OK.. t

Lag	Rhoa [ $\Omega\text{m}$ ]	Tykkelse [m]
1	30	30
2	100	

Tabel 2.2 Modelparametre, der skal simulere en model med moræne i toppen, men som ikke finder en god leder - Vestjysk model.

Lag	Rhoa [ $\Omega\text{m}$ ]	Tykkelse [m]
1	100	

Tabel 2.3 Modelparametre, der skal simulere en model uden morænedække og uden tertiære ler nederst.

Bemærk, hvor meget kurverne ændrer sig, når 10  $\Omega\text{m}$  laget i Tabel 2.1 fjernes (modellen i Tabel 2.2). Bemærk også, hvor svært det er ud fra Rhoa kurverne at bestemme den bagvedliggende model.

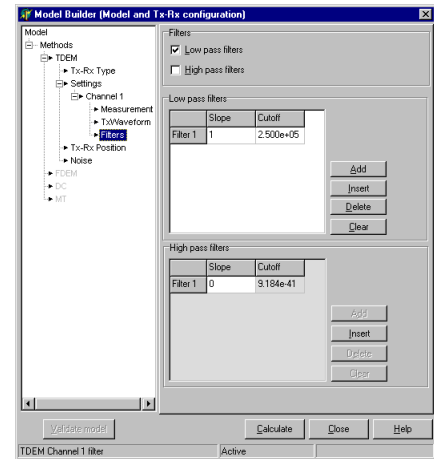
Husk at gemme de kørte modeller i workspacete hedder Unsaved efterfulgt af et nummer. Modellerne gemmes f.eks ved at markere den kørte model i Workspace Manageren samtidig med, at Alt tasten holdes nede. Modellerne kan også gemmes ved at bruge Workspace menuen.

### 2.3 Øvelse - Filtre

Efter denne indledende øvelse er der forhåbentligt opnået nogen fortrolighed med Emma. I denne øvelse skal der opnås en fornemmelse af, hvad filtre betyder for TEM responset til tidlige tider. Start med at lukke alle plotvinduerne fra den første deløvelse. Dette kan f.eks gøres ved at trykke på Window/Close All Plots.

Vælg den model i Workspace Manageren, der hedder Filters. Denne model er meget simpel, nemlig et 100  $\Omega\text{m}$  halvrum (som modellen i Tabel 2.3). På siden "Model/Methods/TDEM 1/Transform/Channel 1/Filters" i Model Builderen kan det verificeres, at afskæringsfrekvensen er sat til 250 kHz. Kør modellen og lav et dB/dt plot. Kør nu modelresponser med de afskæringsfrekvenser, der er angivet i Tabel 2.4.

Dette gøres ved at bruge Filter-modellen som skabelon og så ændre afskæringsfrekvensen.



Siden Channel 1/Filters

Modelnavn	Afskæringsfrekvens [Hz]
Filter - ingen	ingen filter
Filter 250 kHz	250.000
Filter 100 kHz	80.000

Tabel 2.4 Forskellige afskæringsfrekvenser. Modelnavn angiver forslag til, hvad modellerne kan gemmes under i workspacete.

Plot alle responserne i det samme plotvindue, så de kan sammenlignes. Beregn den relative forskel imellem de ufiltrerede kurver og 250 kHz kurven/ 80 kHz kurven. Dette gøres ved at markere f.eks. den ufiltrerede kurve og 250 kHz kurven og derefter trykke på Plot/Function.

Hvor stor er den relative forskel imellem responserne? Hvordan aftager filtereffekten med tiden? Hvornår er effekten blevet mindre end 5 %?

### 2.4 Øvelse - Ramper og tidsforskydning

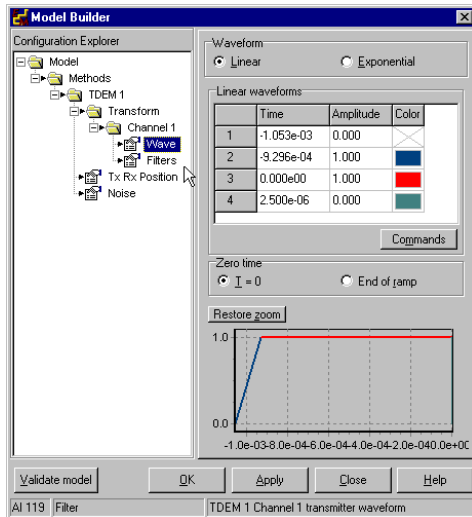
Efter denne demonstration af filtereffekten i TEM data kan det være instruktivt at undersøge effekten af at variere slukkerampens længde.

Åben modellen Waveform i Model Builderen. Gå til siden "Channel 1\Wave". På denne side er slukkerampen defineret sådan, at strømmen tændes ved  $-1.e-2$  sek. og slukkes igen ved 0.0 sek. Den tid, det tager at tænde for strømmen, er  $1.e-$



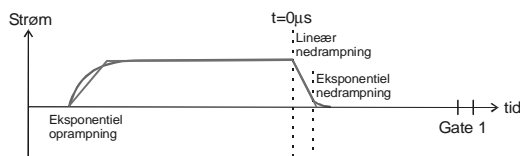


3 sek., og det tager  $2.5 \cdot 10^{-6}$  sek. at slukke for strømmen. Dette er skitseret i Figur 2.5. Beregn responset for modellen og plot responset i et nyt vindue. Lav et nyt respons, hvor turn-off tiden (Rampe 4) under Wave ændres til f.eks.  $5 \cdot 10^{-6}$  sek. Plot dette i samme vindue som før. Hvad gør rampens længde ved responset?



Siden Channel 1/Wave

Husk at gemme de korte responser!



Tabel 2.5 Slukkerampe. Den røde kurve viser de teoretiske forløb af strømmen i senderspølen. De blå kurve er en tilnærmelse til den røde kurve og er det, der modelleres i Emma.

En synkroniseringsfejl internt i modtagerinstrumentet eller imellem modtageren og senderen, har stor betydning for forløbet af responset til tidlige tider. Dette kan illustreres ved at simulere, at slukningen af senderstrømmen ikke påbegyndes ved 0.0 sek, men ved f.eks.  $0.5 \cdot 10^{-6}$  sek. eller  $1 \cdot 10^{-5}$  sek.

Med udgangspunkt i Wave skabelonen forskydes slukkerampen med henholdsvis  $0.5 \cdot 10^{-6}$  sek. og

$1 \cdot 10^{-6}$  sek. Lav et plot med alle tre kurver og vurder (eller beregn), hvor meget synkroniseringsfejlene betyder.

## 2.5 Øvelse - Analyser

I den tredje deløvelse er det meningen, at der skal opnås en fornemmelse af, hvilke modelparametre der betyder noget for modelresponset. Dette skal til sidst sammenholdes med den egentlige usikkerhedsanalyse af modelparametrene

Tag udgangspunkt i modellen med navnet Analysis. Parametrene for denne model er vist i Tabel 2.6. Beregn et respons for denne model og plot responset i et nyt plotvindue. Responset er beregnet i Rhoa.

Lag	Rhoa [ $\Omega$ m]	Tykkelse [m]
1	30	30
2	100	60
3	10	

Tabel 2.6 Modelparametre for modellen Analysis. Modellen er den samme som vist i Tabel 2.1.

For at finde ud af, hvilke parametre der betyder mest for forløbet af modelresponset, kan modelparametrene én for én ændres en lille smule. Ved f.eks. at ændre modstanden af 3. lag med en faktor 1.2 til hver side ( $8.3 \Omega$ m og  $12 \Omega$ m) kan dette sammenholdes med en tilsvarende ændring af f.eks. modstanden af 2. lag ( $83 \Omega$ m og  $120 \Omega$ m). Kør de modelresponser, der er vist i Tabel 2.7.

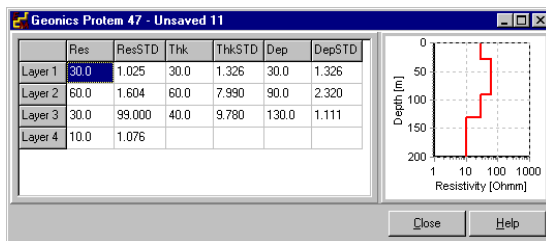
Modelnavn	Lag	Parameter
Analyse 1	3	Modstand = $8.3 \Omega$ m
Analyse 2	3	Modstand = $12 \Omega$ m
Analyse 3	2	Modstand = $83 \Omega$ m
Analyse 4	2	Modstand = $120 \Omega$ m
Analyse 5	2	Tykkelse = 50 m
Analyse 6	2	Tykkelse = 72 m

Tabel 2.7 Parameterændringer af modellen vist i Tabel 2.6. Parametrene er ændret med en faktor 1.2 til hver side. Modelnavn angiver forslag til, hvad modellerne kan gemmes under i workspacet.



Beskriv, hvilke parameterændringer der giver anledning til de største ændringer i modelrespons. Hvad siger det om sensitiviteten af de forskellige modelparametre? - dvs. hvilke parametre kan kun ændres lidt, før det giver anledning til store ændringer i modelrespons og hvilke kan ændres meget?

Den her udførte analyse kan Emma udføre automatisk. Gå tilbage til den oprindelige modelanalyse og vis Display Wizard vinduet. På det trin i wizard der hedder Display vælges Table. Følg wizarden og lav en tabel med modelparameterusikkerheder.



Model

De viste usikkerheder er angivet som faktorer. Dvs. en usikkerhed (standardafvigelse, STD) på 1.1 på f.eks modstanden  $10 \Omega\text{m}$  betyder, at parameteren med 66 % sandsynlighed ligger mellem  $10 \Omega\text{m} / 1.1$  og  $10 \Omega\text{m} * 1.1$ , eller et interval på  $9.1 \Omega\text{m} - 11 \Omega\text{m}$ .

Usikkerhederne er beregnet ud fra en liniarisering af modellen. Det betyder, at store usikkerheder "bare er store", og at analysen skal bruges kvalitativt og ikke kvantitativt. Normalt siger man, at en parameter, der er bestemt bedre end en faktor 1.2, er godt bestemt, mens en parameter, der er bestemt i intervallet fra 1.2 til 1.5, er bestemt. Fra 1.5 til 2.0 er parameteren dårligt bestemt, og over 2.0 er den ubestemt (se Tabel 2.8).

Oftentimes tænkes der ikke på disse usikkerheder som faktorer, men som procentuelle afvigelser. Det er i orden at tænke sådan, når afvigelserne er små, hvilket ses af ovenstående eksempel. Havde modstanden været bestemt med en usikkerhed på 10 % i stedet for med en faktor 1.1, ville para-

Benævnelse	Parameterinterval
Godt bestemt	<1.2
Bestemt	1.2 - 1.5
Dårligt bestemt	1.5 - 2.0
Ubestemt	> 2.0

Tabel 2.8 Intervaller for usikkerheder.

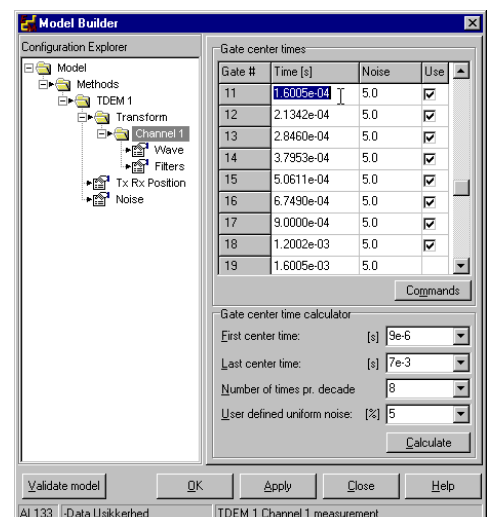
meterintervallet havde været  $9.0 \Omega\text{m} - 11 \Omega\text{m}$ . Dette interval er ikke væsentligt forskelligt fra det rigtige interval.

Betragt de angivne usikkerheder. Stemmer de overens med forventningerne fra korslerne foretaget ud fra Tabel 2.6?

## 2.6 Øvelse - Datausikkerhed versus modelparameterusikkerhed

I denne øvelse vil sammenhængen imellem usikkerheden på data og parameterbestemmelsen blive belyst.

Som udgangspunkt i denne analyse bruges modellen vist i Tabel 2.8. Denne model hedder i workspacet Data Uncertainty. Hvert data i modellen er tilskrevet en standardafvigelse på 5% (faktor 1.05). Datausikkerheden er angivet på siden "Channel 1" i Model Builder. Lav en kørsel af denne model og plot data. Errorbarens længde er en faktor 1.05 gange/divideret med dataværdien.



Siden "Setting/Channel 1/Measurement"



Lag	Rhoa [ $\Omega\text{m}$ ]	Tykkelse [m]
1	30	30
2	100	100
3	10	

Tabel 2.9 Modelparametre for modellen Data Uncertainty.

Lav derefter en model, hvor standardafvigelsen er sat til 10 % på alle data. Hvordan ændres standardafvigelserne på parametrene?

### 2.7 Øvelse - Momentstørrelse versus parameterusikkerhed

Denne øvelse skal illustrere sammenhængen imellem parameterusikkerheden og en ikke-uni-form fordelt usikkerhed på data. Datausikkerheden er bestemt af hvor godt modtagerinstrumenterne kan undertrykke støjen samt sendermomentets størrelse.

I øvelsen vil vi simulere en senderloop på 30 x 30 m, med en strøm på henholdsvis 1 A, 3 A og 75 A. Modellen er vist i Tabel 2.10.

Lag	Rhoa [ $\Omega\text{m}$ ]	Tykkelse [m]
1	30	30
2	100	100
3	20	

Tabel 2.10 Current1A, Current 3A, Current 75A

Beregn responser og analyser for modellerne Current1A, Current 3A og Current75A. Plot responserne og bemærk hvordan støjniveauet bliver mindre når senderstrømmen og dermed momentet stiger.

Vurder parameteranalyserne for de tre kørsler. Hvilke parametre har fået ændret deres bestemmelse?

### 2.8 Øvelse - Apriori information

Når den geofysiske model bruges til at lave en geologiske tolkning er det vigtigt, at kunne bruge de geofysiske tolkningsredskaber til at kunne be- eller afkræfte tilstedeværelsen af bestemte lag. Dette gøres ved, at indsætte ekstra lag i modellen eller ændre et bestemt lags parametre.

Denne øvelse skal illustrere hvordan en model bestemmelse ændres når der inkluderes apriori information om et eller flere lag i modellen. Modellen er vist i Tabel 2.11.

Lag	Rhoa [ $\Omega\text{m}$ ]	Tykkelse [m]
1	30	30
2	60	60
3	30	40
4	10	

Tabel 2.11 Modelparametre for modellen Apriori Information.

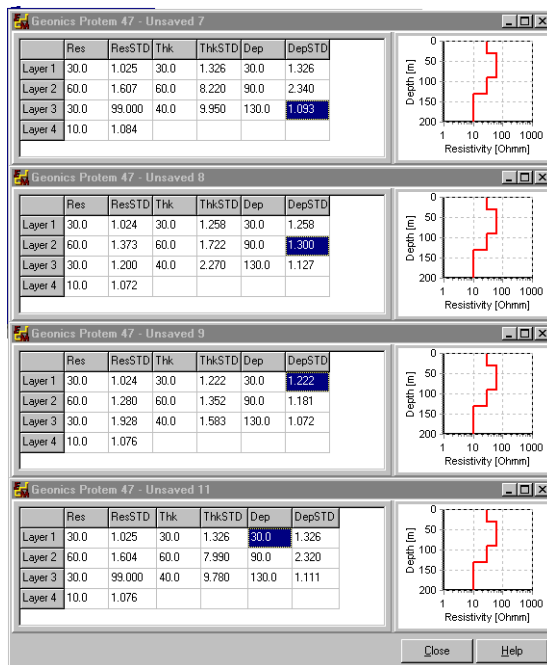
Lav et plot af modelresponset for modellen og kig derefter på analysen. Hvilke parametre er godt bestemte og hvilke er dårligt bestemte?

Hvad sker der med parameter bestemmelserne hvis modstanden for lag 3 påføres en apriori usikkerhed på en faktor 1.2.

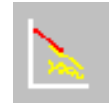
Hvorfor har det ikke kun indflydelse på bestemmelsen af lag 3, men i lige så høj grad på bestemmelsen af de fleste andre lag i modellen?

Hvad sker der med parameter bestemmelserne hvis dybden til undersiden af lag 2 påføres en apriori usikkerhed på en faktor 1.2.

Hvad sker der med parameter bestemmelserne hvis modstanden for lag 4 påføres en apriori usikkerhed på en faktor 1.2.



Analysen

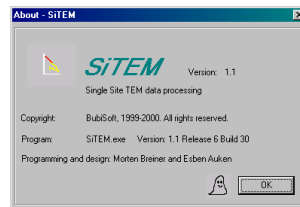


## 3 SiTEM - processing af data

### 3.1 SiTEM

Programmet SiTEM (Single site TEM dataprocessing) benyttes til processing af transiente elektromagnetiske data. SiTEM er bygget op omkring en Windows brugerflade, og udnytter alle fordele herfra.

Med SiTEM er det formålet at gøre det muligt for alle, med enkelte klik med musen, at få et godt og hurtigt overblik over data. Sammen



med SEMDI udgør SiTEM en homogen tolkningspakke for processing og tolkning af TEM data.

Mens data behandles, er det muligt at have flere plotvinduer åbne på samme tid. Hvert plotvindue viser data på hver sin måde, enten med de enkelte segmenter eller med normaliserede kurver. Herved bliver faldgrupper som koblede data eller enkelte dårlige segmenter lette at identificere.

Musen benyttes til at markere data, som enten skal slettes eller skal tilskrives ekstra usikkerhed. Man er på den måde fri for underlige kommandoer og indviklede genvejtaster.

Støjprocesseringen er et nyttigt redskab, der vægter usikre data ned, så de derved ikke får så megen indflydelse på den senere inversion.

Programmet kan foretage støjprocessering med to forskellige støjmodeller, hvilket er nyt i forhold til andre processeringsprogrammer.

Såfremt der ved hver sondering er målt støj (normal procedure), kan data tilskrives en usikkerhed på baggrund af disse. Usikkerheden, der bliver påført data, findes ud fra signal/støjforholdet og vil derfor altid blive større i det sene kurveforløb end i det tidlige.

Hvis der er målt mange repetitioner på hver repetitionsfrekvens, kan man på baggrund af spredningen af disse tilskrive hvert enkelt data en individuel usikkerhed. Dvs. usikkerhed tilskrives i forhold til de aktuelle målte data. Denne form for usikkerhedsestimater kan med fordel benyttes ved data optaget med den digitale PROTEM 47, hvor det er muligt at definere korte integrationstider og derved øge antallet af records.

For de enkelte records kan man ændre parametre som strømsætning, tidsforskydning, integrations-tid mm. Herved kan der rettes en evt. indtastningsfejl, sket i felten.

Det er muligt at kalibrere hver enkelt gate for hver enkel repetitionsfrekvens. Herved kan data korrigeres for eventuelle systematiske fejl. Erfaringer har vist at, standardkalibreringen, der kan foretages på den analoge Protem 47, kan benyttes til at beregne kalibreringsfaktorer, som korrigerer data, således at mindre "hak" på sonderingskurverne rettes op.

Efter dataprocessing udlæses en TEM-datafil (\*.tem), som er en ascii fil, der indeholder data fra den processerede sondering. Datafilen kan benyttes som input i tolkningsprogrammet SEMDI. SEMDI, som omtales senere, benytter 1D inversionskoden em1dinv til at udføre den egentlige tolkning af data optaget med TEM-instrumentet (omtalt under Emma).



SiTEM læser data fra standard analog eller digital PROTEM 47 fra Geonics. I princippet kan SiTEM læse data fra en hvilken som helst TEM modtager.

Datafilerne fra PROTEM 47 modtageren mangler en del informationer, dels omkring senderforløbet, dels omkring opstillingens geometri. Disse manglende informationer opstilles i en geometrifil (\*.geo) som knyttes til rådata ved indlæsningen i SiTEM. Denne fil indeholder desuden karakteristika for det benyttede instrument, så som filtre på modtager og modtagerspole. Det er også her muligt at korrigere for evt. sender\modtager offset, dette både som tidsforskydninger og kalibreringsfaktorer, som kan differentieres på hver enkelt repetitionsfrekvens, eller i form af kalibreringsfaktorer på hver enkelt gate. Da geometrifilen knyttes til data ved indlæsningen, mindskes chancen for fejl i den videre processing.

Ved indlæsningen af rådatafiler skal der, ud over geometrifilen, angives en formateringsfil (\*.pff). Denne fil formaterer rådatafilen, således at de rigtige parametre bliver læst ind de rigtige steder i databaserne. Formateringsfilen er, som geometrifilen, knyttet til data efter indlæsningen. Det er derfor vigtigt, for senere at kunne rekonstruere processingen af data, altid at have defineret hvilken geometrifil og hvilken formateringsfil der er benyttet ved indlæsningen af rådatafilerne.

Formateringsfilen er ny i forhold til tidligere versioner af SiTEM og gør det muligt at indlæse alle typer og versioner af output rådatafiler fra både den digitale og den analoge PROTEM 47

SiTEM er projektorienteret, hvilket vil sige, at al adgang til indlæste data administreres af programmet. Brugeren behøver derfor kun et minimalt kendskab til filhåndtering.

SiTEM er udviklet på Aarhus Universitet gennem de sidste 2 år og benyttes til processing af størstedelen af de TEM sonderinger, som for tiden udføres i Danmark.

### 3.2 Øvelse - Indlæsning

I det følgende vil øvelserne i forbindelse med processingen af TEM data blive gennemgået.

Først indlæses en rådatafil fra en analog PROTEM 47 modtager.

Programmet startes ved at dobbeltklikke på ikonet SiTEM, som ligger på skrivebordet. Før datafiler kan indlæses, skal der oprettes et projekt. Projektet er et fysisk sted på computeren, hvorunder al databehandling foregår. Projektet oprettes ved først at klikke med musen på File/New project.... Indtast brugernavn i vinduet User name og klik herefter OK. Nu kommer vinduet Select Directory op. Her angives stien til det sted på computeren, hvor projektet skal oprettes. Peg her på biblioteket K:\SiTEM\Projekt. Et databasebibliotek K:\SiTEM\Projekt\Db er nu oprettet, og de ønskede rådatafiler er parate til at blive indlæst. I vinduet, Open data file(s), peges på det sted på computeren, hvor rådatafilerne ligger. Her vælges rådatafilen Sandbjerg.01c, som ligger i biblioteket K:\SiTEM\Raadata. Når filen er valgt, klikkes på Open, hvorefter vinduet, Select import file, kommer op. Her er det muligt at vælge, hvilken geometrifil og formatfil der ønskes benyttet. De valgte filer knyttes til rådatafilen, og parametre heraf kan kun ændres ved at læse rådatafilen ind igen. Det er derfor vigtigt, at det er de rigtige indlæsningsfiler der vælges.

Check, at geometrien i den valgte geometrifil er sat op til en standard 40 x 40 meter centralloop sondering. Geometrifilen åbnes ved at klikke Edit, og geometrien checkes under tabsheetet Transmitter - Receiver. geometrifilen lukkes igen.

Herefter skal det kontrolleres at det er den korrekte formatfil der benyttes. Der klikkes på Edit, hvorefter et vindue åbnes. Vinduet er delt op i to halvdele. Øverste halvdel indeholder rådatafilen, mens nederste halvdel indeholder opsætningen af formateringsfilen. Formateringsfilen er opbygget således, at det defineres på hvilke posi-



tioner de enkelte parametre er placeret i rådatafilen. Parametrene defineres ved at vælge den ønskede parameter, hvorefter placeringen markeres i rådatafilen ovenfor. Det er her vigtigt at definere den maksimale ubredelse af parametrene. Således består et data af 8 karakterer. Sidste kolonne ud for hver parameter angiver, om parameteren er Required, dvs. om det er en nødvendig parameter for den videre processing. Formatfilen checkes ved at klikke på Validate.... Selvom der ikke findes nogen fejl i valideringen, skal formateringsopsætningen testes (et data kan f.eks. mangle en karakter). Dette gøres ved at klikke Test, hvorefter vinduet Protom file lister åbnes. Det er her muligt at checke, at de korrekte parametre bliver læst ind. Check, at de indlæste parametre svarer til dem, der står i rådatafilen. Når dette er gjort lukkes vinduerne og datafilen er nu parat til at blive læst ind. Der klikkes OK i vinduet Select import file.

Når rådatafilerne er læst ind, lukkes indlæsningsvinduet ved at klikke på Close. Data er nu parat til at blive processeret.

Under menuen Group i SiTEM hovedvinduet, er det muligt at vælge, hvilken gruppering af data der ønskes. Det er muligt at gruppere data efter støjmålinger, efter station og efter note. På den analoge PROTEM 47 modtager benyttes oftest noten til at adskille sonderingerne, mens det på den digitale PROTEM 47 modtager er stationen. Da de netop indlæste data er optaget med en analog PROTEM 47 modtager, sorteres data efter Noten. Dette gøres ved at vælge Group/Grouping data/Group by note.

Under menuen View/Listbox display er det muligt at vælge, hvilke parametre der ønskes vist for hver sondering. For bedst at kunne overskue data vælges her Note, Noise/Data, Current samt Repetition frequency. Dette gøres ved at vinkle de nævnte betegnelser af.

### 3.3 Øvelse - Processing

De enkelte sonderinger består hver af en række records. Hver record er karakteriseret ved bl.a. en repetitionsfrekvens. Som det fremgår af listen over records i SiTEM hovedvinduet, findes der 3 forskellige repetitionsfrekvenser. Hver repetitionsfrekvens dækker hver sit måletidsinterval. Ud over repetitionsfrekvensen er hver record karakteriseret som Data eller Noise, alt efter om recorden er en støjmåling eller en datamåling. I det følgende vil et antal records med samme repetitionsfrekvens svare til et segment af sonderingen.

En komplet standardsondering består af records fra alle tre repetitionsfrekvenser, dvs. 3 segmenter. Herudover følger et antal Noise records.

Første sondering markeres ved at vælge menuen Group/Current, eller ved at klikke på den tilsvarende knap i panelet. Denne sondering består af 5 Noise records, 1 record på UH (237,5 kHz), 1 record på VH (62,5 kHz) og 5 HI records (25 kHz)

For at få det bedste overblik over de

enkelte målinger skal der åbnes tre plotvinduer. Disse tre plottyper findes i menuen Plot i SiTEM hovedvinduet. Tilsvarende knapper findes i panelet. De tre plots er plots af henholdsvis det rå magnetiske henfald dB/dt, det normaliserede magnetiske henfald, hvor data er normeret med sendermoment, samt den heraf beregnede tilsyneladende modstand, Rho. Sendermomentet er den udsendte strøm ganget senderarealet ganget antallet af sendervindinger.

Alle plots er på log-log akser med tid ud ad x-aksen, og henholdsvis dB/dt og Rho op ad y-aksen. Støjmålingerne fremgår kun i plottet af det unormaliserede magnetiske henfald. Hvert af plottene har samme mulighed for sletning af

RT no	Negl	Freq	Curr
1	Grouping data	25.0	2.00
2		25.0	2.00
3	SOMD1 197	Noise	25.0 2.00
4	SOMD1 198	Noise	25.0 2.00
5	SOMD1 199	Noise	25.0 2.00
6	SOMD1 200	Data	237.5 2.00
7	SOMD1 201	Data	62.5 3.00
8	SOMD1 203	Data	25.0 3.00
9	SOMD1 204	Data	25.0 3.00
10	SOMD1 205	Data	25.0 3.00
11	SOMD1 206	Data	25.0 3.00
12	SOMD1 207	Data	25.0 3.00
13	SOMD2 358	Noise	25.0 1.00
14	SOMD2 357	Noise	25.0 1.00
15	SOMD2 359	Noise	25.0 1.00
16	SOMD2 359	Noise	25.0 1.00
17	SOMD2 360	Data	237.5 1.00
18	SOMD2 362	Data	62.5 3.00
19	SOMD2 363	Data	25.0 3.00
20	SOMD2 364	Data	25.0 3.00
21	SOMD2 365	Data	25.0 3.00
22	SOMD2 366	Data	25.0 3.00
23	SOMD2 367	Data	25.0 3.00
24	SOMD3 342	Noise	25.0 2.00
25	SOMD3 343	Noise	25.0 2.00
26	SOMD3 344	Noise	25.0 2.00
27	SOMD3 346	Data	237.5 1.00
28	SOMD3 348	Data	62.5 3.00
29	SOMD3 349	Data	25.0 3.00
30	SOMD3 350	Data	25.0 3.00
31	SOMD3 351	Data	25.0 3.00

Data listboks



data, ekstra usikkerhedstilskrivning samt zoom-funktioner.

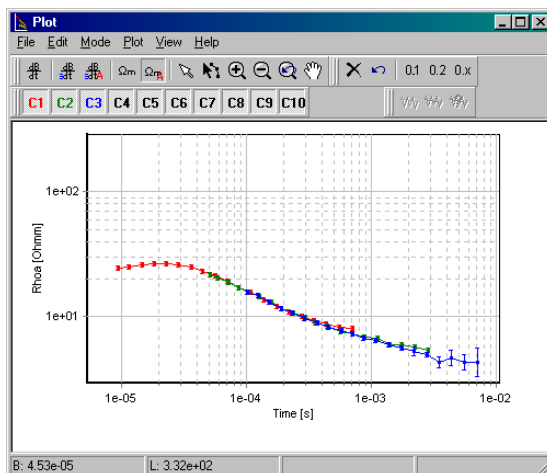
Data skæres eller klippes, hvor det vurderes, at støjen har for stor indflydelse på data. Dette er oftest, før data skærer støjkurverne i dB/dt plottet.

Selvom der sker en automatisk støjvægtning, er det ofte nødvendigt manuelt at tilskrive enkelte ata ekstra usikkerhed. Herved vægtes disse data mindre i den efterfølgende inversion.

Når det skal vurderes, hvor data skal slettes, og hvor der skal tilskrives mere usikkerhed, er det som ovenfor nævnt, vigtigt at have alle tre plotvinduer åbne. Som retningslinier skal følgende gælde: 1) data skal danne en blød kurve, uden kraftige knæk. 2) segmenterne skal være overlappende, dog med hensyntagen til filtre i instrumentet og afskæringsfrekvenser i modtagerens polen (gennemgået under Emma øvelse).

Første sondering SOND1 vælges, og de tre plotvinduer åbnes. For hvert plotvindue er der muligheder for reskaleringer, optegnelse af gridlinier mm. Dette sker under menuen Edit, eller ved at klikke på akserne.

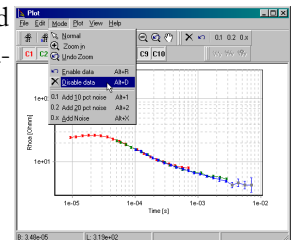
Af det magnetiske henfald dB/dt fremgår det, at der ikke er nogle records der skiller sig ud fra de andre. Alle records beholdes derfor.



Figur 3.1 Sondering SOND1

Det ses på plottet af den tilsyneladende modstand (Figur 3.1), at de sidste fire data på HI segmentet er noget støjfyldte. Dette bekræftes også af det normaliserede dB/dt plot. Disse data skal derfor slettes fra sonderingen.

Sletningen foretages ved først med musen at indhegne og markere de data, der ønskes slettet. For at slette data klikkes på Mode/Disable data, eller tilsvarende knap i panelet. De



Mode menuen

valgte data bliver grå, og de indgår ikke længere i datasættet. Data tilvælges igen ved, efter at have indhegnet dem, at klikke under Mode/Enable data (eller tilsvarende knap). Data slettet i ét plotvindue bliver også slettet i de andre åbne plotvinduer.

Selvom data bliver tilskrevet usikkerhed svarende til det aktuelt målte støjniveau på sonderingsstedet, er det ofte nødvendigt at tilskrive enkelte data ekstra usikkerhed. Dette gøres, som ved sletning af data, ved med musen at indhegne de data, der skal tilskrives større usikkerhed. Der er tre muligheder for at lægge ekstra usikkerhed på data. Under menuen Mode kan der vælges mellem Add 10 pct. noise, Add 20 pct. noise og Add noise. Disse knapper findes også i knappanelet og tilskriver data en usikkerhed på henholdsvis faktor 1.1., 1.2. og en brugerangivet faktor.

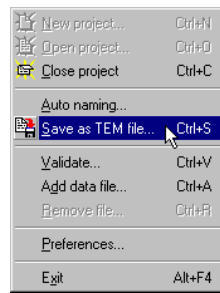
Det fremgår af plottet af den tilsyneladende modstand, at der er en del støj på de sidste fem data af VH segmentet. Derfor vurderes det, at der skal tilskrives disse data en ekstra usikkerhed på 1.1. Dette gøres ved i knappanelet af klikke HI segmentet af. Nu indhegnes de sidste fem VH data, og de tilskrives en usikkerhed på 1.1. HI segmentet klikkes på igen.

Sonderingen er nu færdigprocesseret, og den skal udskrives til en TEM-datafil.





Dette gøres under File/ Save as TEM file eller ved tilsvarende ikon i panelet. I "Save TEM output as" boksen kan der vælges mellem output i dB/dt eller i Rhoa. Den gemte TEM-datafile er nu klar som data-input til tolkningsprogrammet SEMDI (Herom senere).



Menuen file

TEM-datafilen for sonderingen SOND1 skrives ud i tilsyneladende modstand Rhoa og placeres under biblioteket K:\SiTEM\TEMfiler.

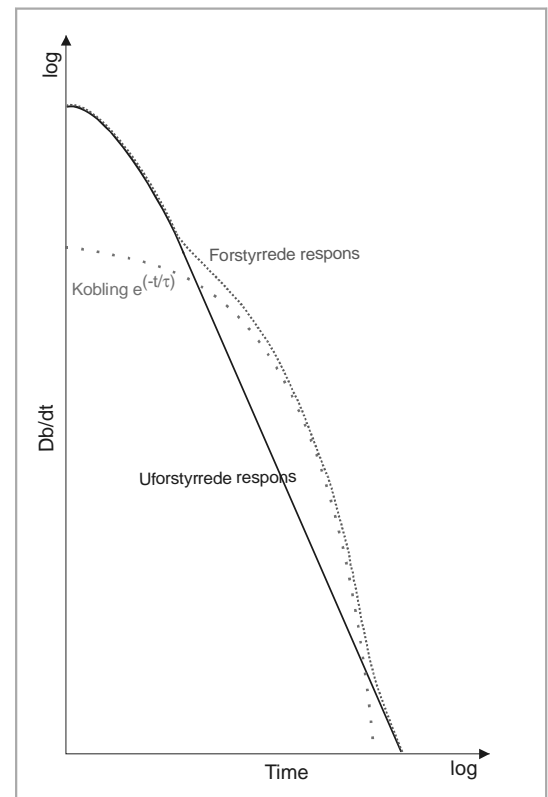
Resten af sonderingerne i projektet processeres på samme måde og udlæses derefter til TEM-datafiler <sonderingsnavn.TEM>. Filerne lægges under samme bibliotek. Husk at filerne skal skrives ud i tilsyneladende modstand Rhoa.

### 3.4 Øvelse - Koblede sonderinger

Der findes to former for koblinger til elektriske ledere. Kapacitive koblinger, som kobler kapacitivt til elektriske ledere, og galvaniske koblinger, hvor galvanisk kontakt medfører forstyrret signal (Noter i Geofysik - Grundvandskortlægning, Sandbjerg). Kapacitive koblinger viser sig som ringninger i sonderingskurverne og er derfor oftest lette at identificere. Galvaniske koblinger er derimod ofte svære at identificere, da koblinger af denne type bibrager med et eksponentielt henfald, som ofte er svært at adskille fra det uforstyrrede signal. Sonderinger med galvaniske koblinger kan ofte tilpasses med en modelkurve, med deraf fejltolkning. Tolkning af sonderinger

med galvaniske koblinger vil i et kortlægningsområde træde frem som modeller med lav modstand i ringe dybde. Dette pga det tidlige knæk på den forstyrrede sonderingskurve (Figur 3.2).

Denne øvelse går ud på, i det ovenfor indlæste projekt at identificere og vurdere sonderinger, som indeholder koblinger til elektriske ledere.



Figur 3.2 Principskitse af en galvanisk kobling



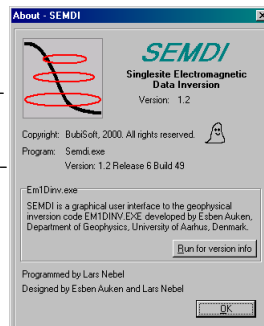
## 4 SEMDI - tolkning af data

### 4.1 SEMDI

Programmet SEMDI (Single-site EM Data Inversion) benyttes til tolkning af enkeltstående DC og TEM sonderinger.

Tolkning af især TEM data har haft det ry, at man skulle være lidt af en "nørd" for at kunne tolke data. Processering og tolkning af TEM data er imidlertid, med programpakken SiTEM og SEMDI, gjort mere brugervenlig. Herved kan man flytte koncentrationen væk fra selve det at håndtere en computer til det essentielle - databehandlingen og tolkningen. Det gælder ikke mere bare om at få data "kørt igennem".

SEMDI er bygget op omkring en Windows brugerflade, hvor de forskellige vinduer kan arrangeres efter individuelle ønsker. Dette giver mulighed for at have både data-, model- og modelanalysevinduer åbne på samme tid.



SEMDI

Med SEMDI er det muligt at gentolke sonderinger, opbygge modeller samt inkorporere apriori informationer i tolkninger. SEMDI gør det endvidere muligt at samtolke datasæt fra forskellige elektriske metoder, det være sig TEM og DC data, eller forskellige TEM datasæt. Samtolkningen kan foretages vha. en fælles model, men kan også foretages vha. 2 modeller, som bindes mere eller mindre tæt sammen; alt dette uden at man skal have kendskab til, hvordan de underliggende filer er formateret, eller hvordan regnekoernerne virker.

Det er muligt i programmet at lave en batch kørsel, som laver inversion med flere modelfiler til udvalgte TEM datafiler. Normalt foretages der 2-, 3-, 4- og 5-lagstolkninger til hver sondering. Herefter udvælges de mest optimale modeller til videre brug.

SEMDI er udviklet på Aarhus Universitet gennem det sidste års tid. 1D inversionsrutinen, em1dinv, der benyttes til inversionen af data under SEMDI, er udviklet delvist i USA, delvist, på DTU, ved Aarhus Universitet og i GeoFysik-Samarbejdet. Det skal, som under gennemgangen af analyseprogrammet Emma, understreges, at brugeren af SEMDI på ingen måde skal kende til opbygningen af em1dinv for at få stor nytte af SEMDI.

SEMDI benyttes til tolkning af de fleste TEM sonderinger, der for tiden udføres i forbindelse med kortlægninger i Danmark.

### 4.2 Øvelse - Tolkning

I løbet af SiTEM øvelsen blev der udlæst et antal sonderinger som TEM-datafiler. Disse sonderinger skal nu tolkes og herefter vurderes med hensyn til antal lag mm.

Programmet startes ved at dobbeltklikke på ikonet SEMDI, som ligger på skrivebordet. Der er nu åbnet fem vinduer ud over toppanelet.

I Navigation vinduet holdes der rede på de enkelte modeltolkninger: dels stien til biblioteket, som indeholder emo-filerne, dels en liste over samtlige emo-filer i det valgte bibliotek. Det er muligt at liste to biblioteker ad gangen. De listede filer er benævnt <sonderingsnavn>.emo,

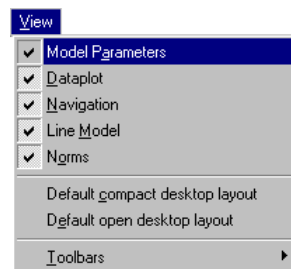


og er outputfilerne fra em1dinv inversionsprogrammet, som ligger under SEMDI.

I Data plot vinduet er den eller de valgte emofiler plottet. Dvs. her vises data med usikkerheder samt modelrespons for den endelige model.

Line model vinduet er et plot af modstand som funktion af dybden. Vinduet Model parameters and analysis, indeholder alle modelparametre samt standardafvigelserne på disse. Herudover er residualer mellem data og modelrespons angivet. Endelig er det i vinduet Norms muligt for en bestemt sondering at se normen eller residualt som funktion af antal lag i modellen.

De nævnte fem vinduer kan slås til og fra under View i toppanenet. Desuden kan her vælges mellem en Default compact desktop layout og en Default open desktop layout.



Menuen View

Tilpasning mellem data og modelkurver samt standardafvigelser på modelparameter er centrale aspekter ved tolkning af transiente elektromagnetiske sonderinger. Kort sagt tilstræbes en tolkning med så få lag som muligt, med det mindst mulige dataresidual. Mere omkring dette i "Noter i Geofysik - Grundvandskortlægning, Sandbjerg".

Ved udvælgelse af den mest optimale model, ses der først på tilpasningen til en fysisk/geofysisk model. Dernæst om denne model kan geologisk verificeres.

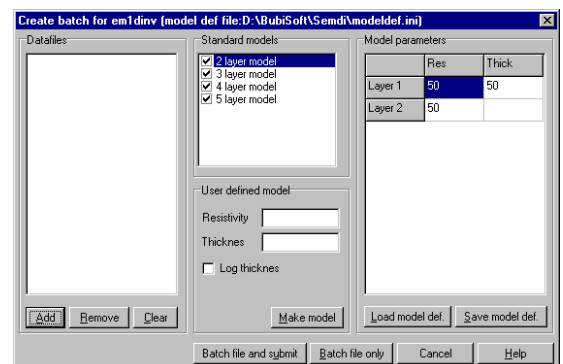
Med fysisk/geofysisk tilpasning menes, hvilken model der med færrest lag kan tilpasse data. Her er vinduet Norms et nyttigt redskab. I vinduet Norms plottes normen eller residualt, som funktion af antallet af lag.

Findes der tynde lag i store dybder?. Og endnu værre, har disse lag høj modstand?. TEM metoden er dårlig til at opløse tynde lag, især højmodstands lag i stor dybde. Disse lag vil derfor været dårligt bestemte og skal helst undgås i tolkningerne, hvis ikke der er anden information til stede, der bekræfter lagenes tilstedeværelse.

Efter at man har fundet den model, der tilpasser data bedst muligt fysisk/geofysisk (den fysiske model), skal modellen verificeres geologisk.

Ved en geologisk verificering af en fysisk model skal det vurderes, om modellen er geologisk mulig. Dvs. indeholder den lag, som ikke er geologisk troværdige for området?. Det kan være lag med meget høj modstand i store dybder. F.eks. 1000  $\Omega\text{m}$  i 100 meters dybde. Ved en østjysk kortlægning vil dette ikke kunne verificeres geologisk. Hvis sonderingen indeholder et sådant lag, er det ikke ensbetydende med, at målingen har været forkert. TEM metoden er dårlig til at bestemme modstanden af en dårlig leder (modstandsækvivalens), og modstanden vil derfor være ubestemt. Apriori information kan betyde, at et 1000  $\Omega\text{m}$  lag måske retolkes med en modstand, der er bundet omkring f.eks. 100  $\Omega\text{m}$ .

For at tolke sonderingerne der blev udlæst under SiTEM øvelsen, skal der nu sættes et job op. Jobbet består af forskellige kørsler af inversionskoden em1dinv. Således tolkes der med henholdsvis en 2-, 3-, 4- og 5-lags model for hver af sonderingerne. Jobbet sættes op under menuen File/Create em1dinv batch (Figur 4.1).



Figur 4.1 Job builder



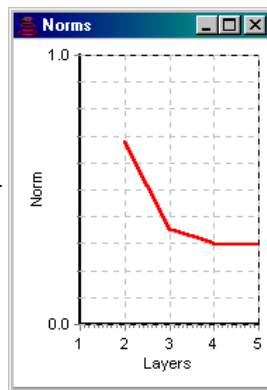
Klik på Add for at addere TEM-datafiler til listboksen. TEM-datafilerne ligger i biblioteket K:\SiTEM\TEMfiler. Når listboksen indeholder de ønskede TEM-datafiler, klikkes der på Batch file and submit for at kreere jobbet og eksekvere det. Det er muligt at definere startmodellerne, men her vælges defaultmodellerne, som er et 50 ohmm halvrum.

Der klikkes på en af de to knapper med tre prikker, som findes øverst til højre i Navigation vinduet. Her peges nu på biblioteket K:\SiTEM\TEMfiler. Tolkninger vil nu, efterhånden som de bliver færdige, blive listet i Navigation vinduet (Ctrl F for refresh).

Som det fremgår af vinduet Navigation, er sonderingerne navngivet således, at sonderingsnavnet er efterfulgt af \_X, hvor X angiver antallet af lag i modellen. SOND1\_3.emo er derfor output-filen for 3-lagstolkningen af sondering SOND1.

I det følgende gennemgås tolkningen af sondering SOND1. Sonderingen vurderes først fysisk/geofysisk, dernæst geologisk.

2-, 3-, 4- og 5-lags modellen for sondering SOND1 markeres i Navigator vinduet. Vinduet Norms, som viser normen som funktion af antal lag, åbnes (vignet). Her fremgår det, at kurven knækker og flader ud ved 3-lagsmodellen, mens normen kun bliver lidt bedre ved en 4-lags-  
Normen som funktion af antal



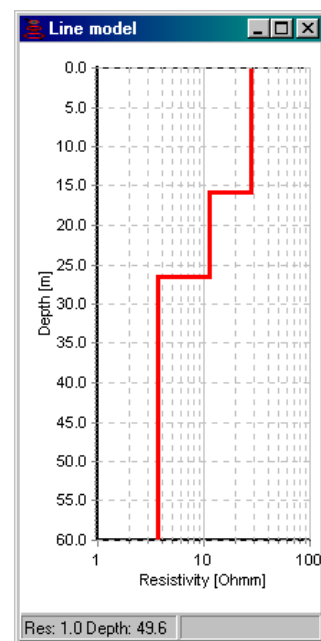
modellen. Normen eller residualen ved 3-lagsmodellen er 0.35, hvilket er langt inden for usikkerheden på data. 3-lagsmodellen er en dobbelt nedadstigende model, uden tynde lag i store dybder. Fysisk/geofysisk set er denne model den mest optimale fysiske model.

Modellen (Figur 4.2) har først et knapt 16 m tykt lag med en modstand på 27  $\Omega$ m. Herefter følger

et ca. 11 m tykt lag med en modstand på 11  $\Omega$ m. Endelig har tredje lag en modstand på knapt 4  $\Omega$ m. Geologisk set er denne model også acceptabel. Der er ingen lag, som ikke kan accepteres i en geologisk model.

3-lags modellen er derfor den mest optimale model for tolkningen af sonderingen SOND1.

SOND1\_3.emo arkiveres i boksen Files marked for save, ved Ctrl M, eller ved at klikke på plusset midt i Navigation vinduet.



Figur 4.2 Model

De resterende sonderinger skal nu vurderes med hensyn til, hvilken model der, for hver sondering, er den mest optimale, fysisk/geofysisk og geologisk. De udvalgte sonderinger lægges ned i "Files marked for save".

Efter at alle sonderingerne er gennemgået, gemmes de udvalgte emo-filer med tilhørende \*.mod og \*.tem i biblioteket K:\SiTEM\TEMfiler\saved. Dette gøres enten under Marked files/Save marked files eller ved tilsvarende knap i toppanelet.



### 4.3 Øvelse - MCI tolkning

Med ønsket om at få en større indtrængingsdybde, er der de sidste par år foretaget sonderinger med højt sendermoment.

Målekonfigurationerne har gået under navne som BøvTEM, SM TEM og DybdeTEM, men er betegnelser for samme målekonfiguration. Der bliver her målt i en offset konfiguration, hvor modtagerspølen er beliggende et stykke uden for senderspølen. Det har imidlertid vist sig at være problematisk at opnå tilfredsstillende data til tidlige tider. Problemerne har bl.a. været omkring præcisionen af offsettet, afvigelse fra 1-D jord (konfigurationen er stærkt påvirket af mindre modstandsvariationer i den overfladenære geologi) og deraf følgende problemer med datatilpasning omkring fortegnsskift i data. Det var derved ikke muligt med denne metode at opnå tolkning af de øverste jordlag.

Det sidste halve år, er der blevet målt med en konfiguration kaldet HøjmomentTEM, som er en kombination af centralloop og offset sondering. Der opnås herved tilfredsstillende data gennem hele måleperioden. HøjmomentTEM sonderingerne tolkes med MCI (Mutual Constraint Inversion) tolkningsmetoden. MCI går ud på, at tolkning foretages ved brug af to modeller, som opererer på hver sit datasæt. Modellerne bindes sammen, således at variationen i modstande og lagtykkelser minimeres, under forudsætning af datatilpasning. Grunden til at der benyttes to modeller til tolkning af én sondering er bl.a., at de to opstillinger, centralloop og offset konfigurationen, har forskellige kortlægningsevner, som betyder at de har forskellig sensibilitet overfor modstandsvariationer i den overfladenære geologi. Der kan derfor ikke forventes fuldstændig overensstemmelse i data.

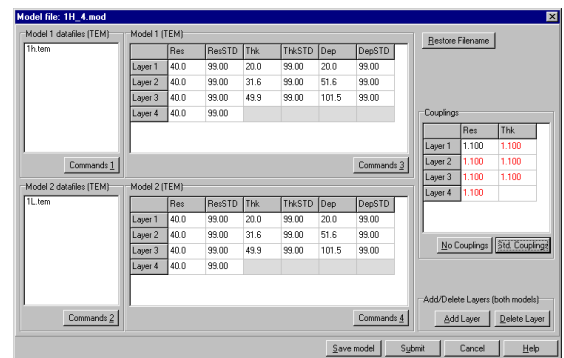
Denne øvelse går ud på at tolke tre HøjmomentTEM sonderinger.

Datafilerne 1L, 1H, 2L, 2H, 3L og 3H ligger i biblioteket K:\Semdi\Mci. 1L er lavmomentdel, foretaget i centralloop konfiguration, mens 1H er højmomentdel foretaget i offsetkonfigura-

tion. Tilsammen danner de HøjmomentTEM sondering nr. 1. Tilsvarende for 2L og 2H, samt 3L og 3H.

De seks delsonderinger skal tolkes hver for sig. Batch jobbet sættes op og eksekveres.

Foretag en tolkning, hvor 1L og 1H tolkes med henholdsvis to 4-lagsmodeller og to 5-lagsmodeller som er bundet sammen. Sonderingerne skal hedde 1LH\_4.mod og 1LH\_5.mod. Båndene på parametrene sættes til 1.1 for både modstande og tykkelser. Når dette er gjort laves en tilsvarende tolkning af sondering nr. 2 og sondering nr. 3 (Figur 4.3). Sonderingerne skal hedde 2LH\_4.mod, 2LH\_5.mod, samt 3LH\_4.mod, 3LH\_5.mod.



Figur 4.3 Model builder ved indlæsning af 2

Find de bedste modeller for sondering 1, sondering 2 og sondering 3. Sammenlign den bedste model for hver sondering med tolkningerne af de enkelte henholdsvis lavmoment- og højmoment delsonderinger.

Nu har vi set at sonderingerne tilpasser modellerne hvis de indbyrdes får lov til at variere en smule fra hinanden. Hvad ville der ske hvis modellerne ikke fik lov til at afvige fra hinanden. Vil data i så fald kunne tilpasses?.

Foretag en tolkning af sondering 3, hvor de to modeller er bundet sammen. Opstil til 4-lagsmodel hvor båndene på parametrene er sat til 1.001. Modellen kaldes 3LH\_4\_fixed.mod og eksekveres. Sammenlign denne model med 3LH\_4.mod. Kan modelkurven tilpasse data i model



3LH\_4\_fixed.mod?. Her skal der zoomes ind på overlappet mellem den de to segmenter for rigtigt at kunne se forskellen. Her vil det fremgå tydeligt at modelkurven ikke tilpasser data. Bemærk endvidere forskellen i residual!

#### 4.4 Øvelse - Inkorporering af apriori information

Ofte er geologien i et undersøgelsesområde ikke helt ukendt. Boringer eller anden geologisk/geofysisk information giver muligvis en viden om, hvilken geologi man forventer i undersøgelsesområdet. Denne viden eller apriori information, som kan være information om lagmodstand eller lagtykkelser, kan inkorporeres i tolkningen af TEM sonderingerne.

Denne øvelsen går ud på at prøve at benytte apriori information til at opnå en bedre tolkning af en sondering.

Et teoretisk datasæt ønsket tolket. Datasættet ligger i biblioteket K:\Semdi\Apriori, og hedder apriori.tem

Der skal opsættes et batchjob for tolkning af TEM-datafilen apriori.tem med 2-, 3-, 4- og 5-lags modeller.

Når inversionerne af sonderingen er færdige, gennemgås output filerne med henblik på at udvælge den mest optimale model.

Fra en boring tæt ved sonderingen ved man, at der i 80 meters dybde ligger en fed moræne ler.

Denne dybde skal nu benyttes som apriori information i en retolkning af sonderingen.

I SEMDI indføres apriori information ved at opbygge modeller, hvor ønskede modelparametre kan bindes med en given usikkerhed. Under "File/Edit new model" og under "File/Edit model(s) from emo files" er det muligt at opbygge sådanne modeller, med udgangspunkt i hhv. en ny model eller en output model. File/Edit model(s) from emo files, kan ligeledes aktiveres ved at dobbeltklikke på den ønskede emo model.

Modellen med apriori information opbygges ved at indtaste ønskede værdier med passende standardafvigelse i modelbuilderen. Det er muligt i inversionen at benytte apriori information for lagmodstande, lagtykkelser samt dybder.

Man skal huske på, at f.eks. boringer er punkt-målinger og derfor ikke kan ligge til grund for en stram fastbinding af dybder i en TEM sondering, som har et meget stort kortlægningsvolumen.

Ud fra den valgte 3-lagsmodel opbygges nu en ander 3-lagsmodel hvor dybden til det sidste lag blev bundet. Dette gøres ved at dobbeltklikke med musen på apriori\_3.emo i vinduet Navigation. Lav en model, hvor dybden til det nederste lag søttes til 80 meter, bundet med en faktor 1.2. Modellen kaldes apriori\_depthfix\_3.mod og eksekveres med det samme. Dette gøres under (Submit). Kan data opløse denne dybde eller bliver de opsatte bånd brudt?. Foretag herefter en tolkning med en 4-lagsmodel, hvor dybden til det nederst lag ligeledes bindes med en faktor 1.2. Denne model kaldes apriori\_depthfix\_4.mod og eksekveres med det samme. Tilpasser modelkurven nu data, og holder modellen sig indenfor de opsatte bånd? Bemærk forskellen på et evt magasin i henholdsvis den først valgte model apriori\_3.emo, og den endelige model apriori\_depthfix\_4.emo.

Den oprindelige model ligger i biblioteket K:\Semdi\Apriori\Model

#### 4.5 Øvelse - Geologisk tolkning - apriori information

Som nævnt under "Øvelse - Apriori information" på side 9 det vigtigt, at kunne bruge de geofysiske tolkningsprogrammer aktivt i den geologiske tolkning af en enkelt sondering eller af alle sonderingerne i et kortlægningsområde. Den ekstra information der er nødvendig som apriori information, kommer typisk fra boringer, fra nærliggende sonderinger eller fra "god geologisk fornemmelse".

Når der lægges apriori information ind i inversionen er det typisk nødvendigt at indføre ekstra



lag. Ofte sker der en ændring af tykkelser og modstande for alle lag i modellen og ikke kun i det lag, der er indført apriori information om.

Ved indførelse af apriori information opnås der ofte et lidt dårligere data residual end uden information. Det er op til tolkeren at afgøre, om apriori informationen er for meget i modstrid med data, til at den kan accepteres.

I denne øvelse vil blive behandlet tre sonderinger fra et profil, hvor der også er lavet reflektionsseismik. Dybden til den gode leder fra de transiente sonderinger er først blevet brugt til at justere de seismiske hastigheder så reflektorerne over den gode leder, der kan genkendes på reflektionsseismikken, kommer til at ligge i de rigtige dybder.

Lav først en normal tolkning af de tre højmoment sonderinger. Sonderinger hedder 003H, 003L, 004H, 004L og 005H, 005L og ligger

under K:\Semdi\Apriori-lagundertrykkelse. Alle tre sonderinger skal tolkes med 5-lags modeller. Sonderinger 003 ligger på kanten af en begravet dal, og sondering 005 ligger midt ude i dalen. 004 ligger midt imellem. Kan dette bekræftes af tolkningerne?

Fra seismikken kan man erkende en reflektor i sondering 003 og 004. Reflektoren ligger henholdsvis i ca. 75 m og 85 m. Prøv at indføje denne information i tolkningerne og se hvordan modellerne ændrer sig? Specielt er modstanden af 4 lag vigtig.

På seismikken kan man ikke se, om 4-laget fra sondering 003 og 004 fortsætter ud i den begravede dal som en udfyldning. Prøv at indføre et ekstra 5-lag i 005 der får den samme modstand som 4-laget 004. Tykkelsen kan sættes til 50 m. Fikser det med en faktor 1.2 og lav en ny inversion. Hvad sker der med tolkningen? Kan data bekræfte at dette lag findes i 005?