

# **GEOFYSIKSAMARBEJDET**

**NOVEMBER 2002**

**NOTAT  
RETOLKNING AF TEM SONDERINGER**

**INDLEDNING (1)**

**BAGGRUND OG BEGRE-  
BER (2)**

Kobling til kabler mv. (2.1).....	3
Overstyring (2.2).....	6
Filtre (2.3).....	6
Ramper (2.4).....	7
Instrumentfejl (2.5) .....	8
Minimumsdybde (2.6) .....	8

**KALIBRERING AF SONDE-  
RINGER (3)**

Niveauforskydning (3.1).....	10
Tidsforskydning (3.2) .....	10

**RETOLKNINGSPROCESSEN  
(4)**

Indledende vurderinger (4.1) .....	12
Kalibreringssonderinger (4.2) .....	13
Tolkning og rapportering (4.3).....	14

**EKSEMPLER (5)**

**REFERENCER (6)**

### 1 INDLEDNING

Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet har siden år 2000 foretaget retolkning af fire forskellige TEM-kortlægninger. Formålet med retolkningerne har været at opnå en ensartet databehandling, samtidig med at de nyeste tolkningsmetodikker er anvendt.

Amterne i GeoFysikSamarbejdet har på baggrund af resultaterne af disse retolkninger ønsket, at der udarbejdes et notat, som indeholder dels en gennemgang af de opnåede erfaringer, dels en vejledning for, hvordan man bør udføre retolkningsarbejdet. Derudover er der afholdt et endagskursus for amtsmedarbejdere og rådgivere, hvor retolkningsmetodikken er gennemgået.

Disse tiltag skulle føre til, at metodikken omkring retolkning af TEM-sonderinger er formidlet ud til de relevante fagfolk, således at fremtidige retolkninger vil blive besluttet og foretaget på ensartet og optimal vis.

Nærværende notat indeholder en beskrivelse af de centrale fagspecifikke problemstillinger, som indgår ved retolkning af TEM-sonderinger. Desuden er der beskrevet en procedure for kalibrering af sonderinger, ligesom resultater af retolkninger er skitseret ved udvalgte eksempler.

Notatet er udarbejdet af Max Halkjær, Esben Auken og Nikolaj Foged, GeoFysikSamarbejdet, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, Oktober 2002.

## 2

### BAGGRUND OG BEGREBER

De fire TEM-retolkningsundersøgelser, udført på Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet, har vist, at retolknningen i alle tilfælde har ført til geofysiske modeller med større kontinuitet og troværdighed end de oprindelige tolkninger. Tolkningerne har endvidere afsløret signifikant fejl på instrumenter og databehandlingen. Det har været muligt i høj grad at kompensere for disse fejl med den i dette notat beskrevne metodik.

I retolkningerne er i gennemsnit 25 procent af de målte sonderinger fjernet på grund af kobling, støj eller instrumentproblemer. Dette sammen med anvendelsen af de nyeste tolknings- og processeringsprocedurer har medført, at der samlet er opnået mere sammenhængende kortlægningsresultater. Yderligere er bestemmelsen af de terrænnære lag blevet væsentligt forbedret.

Følgende overordnede problemer er observeret i de retolkningsundersøgelser, der er gennemført på Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet:

- Der optræder generelt en stor del misvisende sonderinger pga. af koblinger.
- Der kan være anvendt data, som er overstyrrede.
- Der er ikke anvendt systemparametre (filtre) i tolkningerne.
- Slukkeforløbet har været utilstrækkeligt defineret.
- Der har været instrumentelle problemer, som har forringet datakvaliteten væsentligt.
- De anvendte måleudstyr har i nogle tilfælde afvejet væsentligt fra måleudstyr, som i dag er kalibreret.

### 2.1

#### KOBLING TIL KABLER MV.

Et generelt problem er koblede sonderinger. Tolknninger udført før efteråret 2001 er ofte kendetegnet ved, at man ikke konsekvent har kasseret koblede sonderinger. I de ældre tolkninger er måledata ofte anvendt før og efter, at koblingen kan erkendes på sonderingskurven. Dette betyder, at koblede sonderinger indgår på lige fod med ikke-koblede sonderinger.

Anvendelse af koblede sonderinger vil ofte bevirke, at det samlede kortlægningsresultat fremstår uensartet, og der kan forekomme strukturer, som ikke afspejler faktiske geologiske forhold.

Der findes to former for koblinger til elektriske ledere: capacitive og galvaniske.

Kapacitive koblinger viser sig som ringninger i sonderingskurverne og er derfor normalt lette at identificere.

Galvaniske koblinger er derimod ofte svære at identificere, da de bidrager med et eksponentielt henfald, som er svært at adskille fra det uforstyrrede signal. Galvanisk koblede sonderinger kan tilpasses med en modelkurve med deraf følgende fejltolkning. Tolkning af sonderinger med galvaniske koblinger vil i et kortlægningsområde træde frem som modeller med lav modstand i ringe dybde.

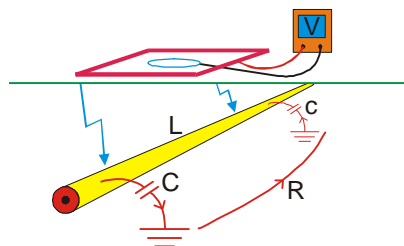
Koblinger kan fysisk beskrives på følgende måde: Det udsendte felt fra senderspolen inducerer strømme i jorden, men også i alle nærliggende elektriske ledere. Elektriske ledere er i denne sammenhæng højspændings-

kabler, jordkabler, elektriske hegn, dyrehegn, metalrør i jorden etc. Inducerede strømme i disse ledere skaber et sekundært elektromagnetisk felt, som sammen med det sekundære felt fra de inducerede hvirvelstrømme i jorden måles i modtagerspølen.

Feltet fra de menneskeskabte ledere (koblingsresponsen) er "synkront" med det udsendte felt. Dette betyder, at hver gang senderen udsender en strømpuls, induceres der også en puls i lederen. Derfor kan man ikke fjerne koblingsresponsen fra data ved f.eks. at forøge stakningstiden.

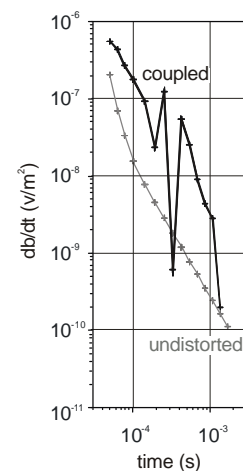
## KAPACITIV KOBLINGSSTØJ

Mange steder i Danmark er der nedgravet kabler til forsyningsnettet, kommunikation etc. Disse kabler er inden for de sidste 20 - 30 år udført med en isolerende kappe, hvori de egentlige kabler ligger. Der er derfor ikke en galvanisk kontakt mellem lederne i kablet og jordformationen. En induceret strøm fra senderen vil løbe i selve kablet, og lække kapacitivt ud gennem den isolerende kappe til jorden. Som vist i Figur 2.1 danner denne strømvej et LCR kredsløb, der giver anledning til et svingende forløb på henfaldskurven. Dette er vist i Figur 2.2.



Figur 2.1 Principskitse for en kapacitiv returstrøm. For inducerede strømme i et jordkabel. Kredsløbet dannes af kablet (selvinduktionen  $L$ ), kapaciteten til jorden gennem isoleringen (kapacitet  $C$ ), og returvejen gennem jorden (modstand  $R$ ).

Flere og flere kabelføringer bliver i dag lagt som jordkabler, idet vedligeholdelsesudgifterne er mindre end ved luftledninger. Endvidere føres disse kabler på kryds og tværs i landskabet og ikke kun langs f.eks. veje og jernbaner. De er derfor ofte en væsentlig forstyrrende faktor for feltarbejdet, selv langt fra bebyggelser og veje/jernbaner.

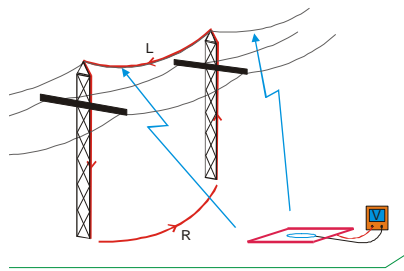


Figur 2.2 Figuren viser et kapacitivt koblet respons.

## GALVANISK KOBLINGSSTØJ

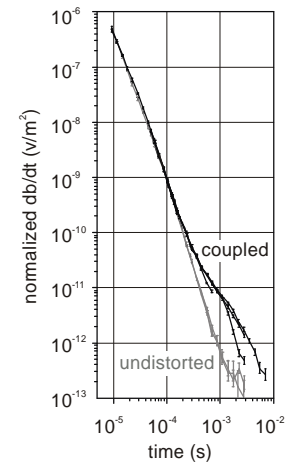
Den galvaniske koblingsstøj opstår, når der induceres strømme fra senderfeltet i en elektrisk installation, der er galvanisk forbundet med jorden. Et eksempel på en sådan installation er elektriske højspændingskabler ført i luften. Ved disse kabelføringer er der i toppen af masterne ført en "jordledning", der gennem hvert tårn er forbundet til jorden gennem jordspyd. Overgangsmodstanden mellem jorden og spydende er lille. Som vist i Figur 2.3, vil der opstå et kredsløb

gennem kablet i masten, masterne og retur i jorden.



Figur 2.3 Principskitse for en induktiv kobling. De inducerede strømme i en højspændingsføring i luften har en galvanisk returvej. Kredsløbet dannes af lederen i toppen af tårnene, selve tårnene og returvejen gennem jorden (modstand R). Selvinduktionen i strømkredsen er L.

ring. Koblingsstøj fra disse kredsløb er ligeledes af induktiv karakter.



Figur 2.4 Sammenligning af et ikke koblet respons med et galvanisk koblet respons.

Dette kredsløb vil give et monotont henfaldende forløb som vist i Figur 2.4.

Højspændingsføringer i luftledninger er lette at få øje på i landskabet, og man kan derfor lettere holde sikkerhedsafstanden (100 - 150 m) til disse. I veje og jernbaner er der nedlagt ældre kabler. Disse ældre kabler er omspundet med jernarmering og juteisolering. Ved disse kabelføringer vil der derfor kunne opstå en strømkreds, der består af jernarmeringen, der har galvanisk kontakt til jorden, gennem den vandmættede juteisole-

**MÅLESTRATEGIER I FELTEN**

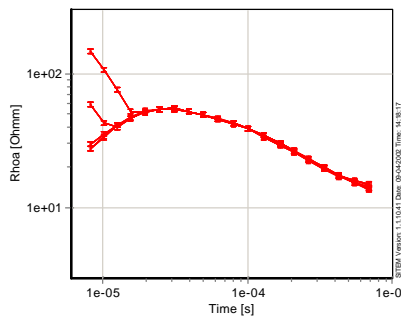
Har man spredte sonderinger i et område, er det kun geofysikeren, der med sin erfaring i at udpege koblinger kan afsløre disse i målekurverne. Desuden kræver det, at responset fra koblingen har en vis størrelsesorden. Ved udførelse af tætte målinger langs profiler, kan man iagttage målekurvernes laterale variationer. Dette giver et langt bedre grundlag for udpegning af galvaniske koblinger.

For at undgå koblinger skal man placere sine målelokaliteter i en afstand af mindst 100 - 150 meter fra lederne. Dette kan dog ikke i alle tilfælde sikre mod koblede målinger, idet der kan være nedgravede ledende installationer, som man ikke umiddelbart har kendskab til. Sådanne installationer kan være gamle kabler, vandrør, nedgravede hegn etc.

## 2.2 OVERSTYRING

Overstyring forekommer, når der er anvendt for højt forstærkningstrin og /eller for høj strømstyrke, hvilket giver anledning til forvrængning i forstærkerkredsløbene i modtagersystemet.

Ved overstyring af forstærkerkredsløbene vil data blive forvrænget hvilket er vist for tidlige tider i Figur 2.5.



Figur 2.5 Overstyring til tidlige tider bevirker en kraftig forvrængning af målekurven. Figuren viser tre gradvist mindre og mindre overstyrte responser sammenholdt med et ikke overstyret respons.

Niveauet for overstyring fremgår af manualerne hørende til måleinstrumenterne og ses enten i modtagerinstrumentet (i felten), i rådatafilerne fra måleinstrumentet eller ved omregning af dB/dt til spænding i processeringsprogrammet.

Erfaringsmæssigt vil overstyring typisk forekomme på de første tidsvinduer på UH-repetitionsfrekvensen og i enkelte tilfælde på de første gates på VH-repetitionsfrekvensen.

Tidsvinduer, som er overstyret, vil sammen med de efterfølgende 2-3 tidsvinduer skulle fjernes.

Overstyrte målinger bliver normalt kasseret allerede i felten. Der vil dog forekomme tilfælde, hvor overstyrte data måles og gemmes. Sådanne data skal, som nævnt ovenfor, fjernes under processeringen.

## 2.3 FILTRE

Et modtagersystem består af en modtagerspole, en række forstærkere samt nogle gates. Samlet bevirker dette, at målesignalet lavpasfiltreres /5/. Denne filtrering skal inddrages i tolkningsprocessen.

Filtrene fjerner uønsket højfrekvente støjsignaler. Derudover vil filtreringen både kunne fjerne og addere en del af jordresponset.

For de højfrekvente modtagerspoler er afskæringsniveauerne 450 kHz (Groundwater Instruments) og 700 kHz (Geonics, HF spole) afhængig af spoletype, mens man for modtagerinstrumentet har fastlagt en frekvens på 270 kHz (Geonics, Protem47 A og D). For nogle af de analoge PROTEM47 modtagere er der yderligere indbygget et 38 kHz filter på HI repetitionsfrekvensen.

Oplysninger om de instrumentelle filtre inddrages i tolkningsprocessen. Det betyder, at modelleringen af de overfladenære jordlag, som er knyttet til de højeste frekvenser, bliver korrekt bestemt i forhold til tolkninger udført uden anvendelse af filtre.

Der kan i vid udstrækning foretages korrektion for usikkerhed omkring fastlæggelse af filtre ved forskydning af måledata. Forskydning af måledata vil blive gennemgået i kapitlet "Kalibrering af sonderinger" på side 10.

## 2.4 RAMPER

Oprampning og nedrampning af strømmen i senderloopet har betydning for data til de tidlige tider. Derfor bør der under tolkningen inddrages oplysninger om oprampning og nedrampning af strømmen.

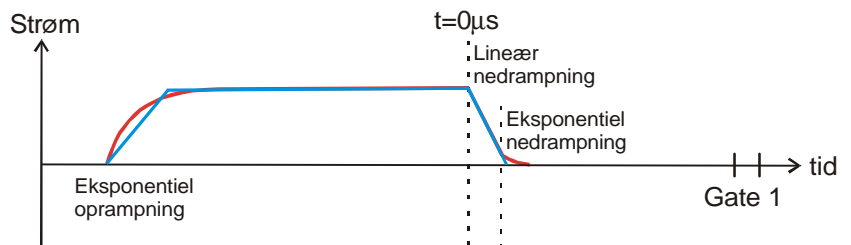
Bølgeformen i et TEM-instrument er skitseret i Figur 2.6. Strømmen stiger eksponentielt, når der tændes, indtil den når sin maksimale amplitude. Strømmen er konstant, indtil den slukkes. Den største del af strømmen slukkes lineært (avelancen) mens den sidste del slukkes eksponentielt. Figuren er ikke i skala, idet det tager 50 gange længere tid at tænde for strømmen end at slukke den. Bølgeformen kan approksimeres med et vilkårligt antal liniestykker. Således opnås en meget nøjagtig gengivelse af den teoretiske bølgeform. I praksis anvendes tre liniestykker til beskrivelse af bølgeformen for en TEM47 (Geonics) sender.

Fastlæggelse af bølgeformen foretages ved laboratoriemålinger, som repræsenterer en bestemt sender eller sendertype. For Geonics TEM47 sendere vil man, hvis man skal modellere rampen helt korrekt, skulle kende den aktuelle rampe for det specifikke instrument.

For TEM47 senderen (Geonics) er oprampningen opgivet til ca. 123 ms, mens nedrampningen er opgivet til 2.5  $\mu$ s. For denne sender modelleres op- og nedrampningen som lineære, på trods af at der er tale om et kurveforløb, som vist på Figur 2.6.

For TEM-TX senderen (Groundwater Instruments) modelleres oprampningen i to delstykker og nedrampningen i tre delstykker. Dette giver en god tilnærmelse til den sande bølgeform.

Der kan i vid udstrækning foretages korrektion for usikkerhed og unøjag-



Figur 2.6 Ramper. Principskitse af bølgeformen i et TEM instrument. Den røde kurve viser det teoretiske forløb af strømmen i senderspølen. Den blå kurve er en stykvis lineær tilnærmelse.



**2.5  
INSTRUMENTFEJL**

tig angivelse af ramper ved forskydning af måledata. Forskydning af måledata vil blive gennemgået i

kapitlet "Kalibrering af sonderinger" på side 10.

I forbindelse med test og kalibreringsundersøgelserne /1/ og /2/ udført på Testlokalitet Århus er der klarlagt en række instrumentelle fejl og begrænsninger. Disse fejl og begrænsninger har signifikant betydning for tolkningen, når man anvender instrumenterne til kortlægning under danske forhold. For en nærmere beskrivelse af disse undersøgelser henvises til ovenstående referencer.

kommer periodiske eller vedvarende fejl. Dette drejer sig f.eks. om:

- Forkert turn-off tid
- Systematisk niveauforskydning af data
- Stærkt bias signal i modtageren

Der er i forbindelse med de fire retolkningsundersøgelser observeret enkelte felt dage eller flere på hinanden følgende felt dage, hvor der fore-

Med mindre man har eller kan opnå fuld klarhed over problemets karakter og betydningen for datakvaliteten, bør sådanne feltperioder konsekvent kasseres.

**2.6  
MINIMUMSDYBDE**

Efter denne gennemgang af mulige fejl i forbindelse med TEM målinger, vil vi gennemgå begrebet minimumsdybde. Dette begreb er et mål for den mindste dybde, hvori et godt ledende lag kan befinde sig.

er tilfredstillende. Herved findes den minimale dybde, som en evt. god leder kan befinde sig i for den givne sondering.

Fastlæggelse af minimumsdybden anvendes til beskæring af middelmotstandskort og beregning af minimumsdybden til den gode leder.

Konkret beregnes minimumsdybden ved følgende procedure:

- Tolkninger af sonderinger uden god leder udvælges.
- For de modeller, hvor det sidste lag er et højmodstandslag (tilfælde 1), indføres et pseudolag med en god leder nederst i modellen. Pseudolagets modstand sættes til  $10 \Omega m$  og bindes med et bånd på 1.10.
- I startmodellen sættes dybden til pseudolaget til 1,5 gange dybden til det nederste lag i den almindelige tolkning. Denne dybde bindes relativt hårdt med et bånd på 1.25. Tykkelsen af det næstsidste lag i startmodellen sættes til at være 3 gange dybden til det nederste lag i den almindelige tolkning. Denne tykkelse bindes ikke.
- I de tilfælde, hvor den almindelige tolkning resulterer i en model med et nedstigende sidste lag, f.eks på  $20 \Omega m$ . (tilfælde 2), bindes dette lags modstand på  $10 \Omega m$ , og dybden bindes med et

Minimumsdybde-beregning er baseret på en inversions tilgang. På denne vis undgås approksimationer, og det sikres, at minimumsdybden er fastlagt på baggrund af data og datausikkerheden.

På lokaliteter, hvor den gode leder ligger dybt, eller hvor støjniveauet er højt, vil den modellerede sondering muligvis ikke kunne opløse en god leder i stor dybde. Sonderinger af disse typer indeholder dog information om minimumsdybden til en evt. god leder. Minimumsdybden fastlægges ved at indføre et pseudolavmodstandslag nederst i modellen. Herefter fastlægges den minimale dybde, pseudolaget kan placeres i, under forudsætning af at datatilpasningen

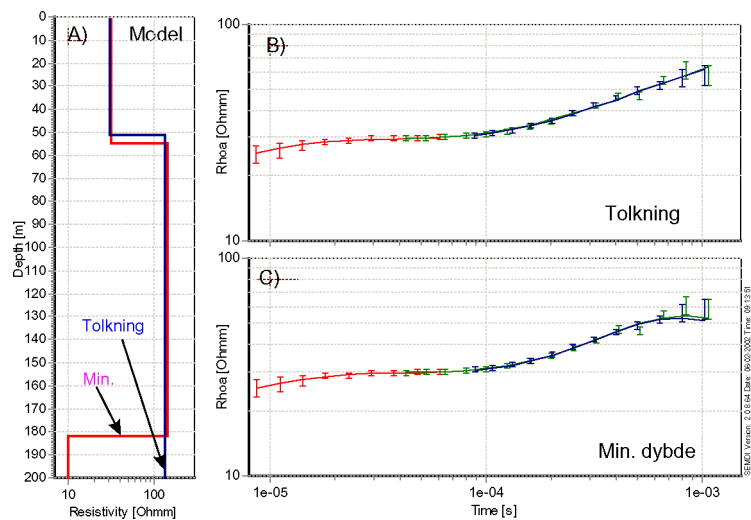
- bånd på 1.25. Dette lag bliver således pseudolaget.
- I begge tilfælde køres tolkningsprogrammet med pseudomodellen. Datatilpasningen vurderes visuelt, og pseudomodeller med utilfredsstillende datatilpasning tolkes igen med en manuelt justeret startmodel.

Det relativt tykke næstsidste lag i pseudostartmodellen sikrer, at lagrækkefølgen i minimumsmodellen bliver den samme som i den almindelige tolkning. Båndet på dybden bevirker, at inversionen prøver at trække pseudolaget så højt op i modellen som muligt, mens data vil skubbe laggrænsen nedad. Den dybde, hvor laget ender, er den minimale dybde, hvor pseudolaget kan befinde sig uden at være i modstrid med data. Denne dybde betegnes

som minimumsdybden til den gode leder.

I Figur 2.7 A ses et eksempel på forskellen mellem den almindelige model og minimumsmodellen. I Figur 2.7 B og C ses modeltilpasningen til data for hhv. den almindelige model og minimumsmodellen. Som det fremgår af figurerne, opnås der i begge tilfælde en tilfredsstillende datatilpasning.

Minimumsdybden anvendes også som indikator for indtrængningsdybden. Idet pseudolaget ikke påvirker datatilpasningen væsentligt, har sonderingen ikke en væsentlig følsomhed dybere end minimumsdybden. På middelmodstandskortene blændes de berørte sonderinger derfor af ved minimumsdybden.



Figur 2.7 A) Tolkningsmodellen og modellen til bestemmelse af minimumsdybden. B) Datatilpasning for retolkningsmodellen. C) Datatilpasning for minimumsdybdemodellen.

**3  
KALIBRERING AF SONDE-  
RINGER**

I forbindelse med en retolkning vil man skulle udføre et antal kalibreringssonderinger i området. Kalibreringssonderingerne udføres med et måleudstyr, som inden undersøgelsen er testet og kalibreret i forhold til referencesonderingen på Århus Test-lokalitet.

Kalibrering af måleudstyrene foretages ved dels en niveauforskydning

og dels en tidsforskydning. I det følgende beskrives proceduren for dette arbejde, idet der er taget udgangspunkt i SiTEM programmet.

For en mere detaljeret beskrivelse af kalibreringsmetodikken ved anvendelse af SiTEM programmet henvises til reference /4/.

**3.1  
NIVEAUFORSKYDNING**

En forskydning af data med en faktor kan kompensere for fejl i senderens måling af strømstyrke. For at være i stand til at bedømme, om en forskydning i niveau er nødvendig, må udstyret være kalibreret med hensyn til delay mellem sender og modtager.

Forkert måling af strømstyrken vil vise sig ved, at alle tre segmenter er parallelforskudte i forhold til referencesonderingens tre segmenter.

**PROCEDURE FOR SKIFT AF FELT**  
Proceduren for et faktorskift af et felt er, som følger:

Fra GFS' hjemmeside hentes data for referencesonderingen. I rhoa-plotvindue sammenlignes data fra instrumentet med referencesonderingen. En forkert senderstrøm vil ses som en parallelforskydning i forhold til referencesonderingen.

Er data parallelforskudt forskydes alle data for det aktuelle måleudstyr med en faktor, indtil der er overensstemmelse med referencesonderingen.

Kalibrering af sonderinger i kortlægningsområdet følger den samme metode.

**3.2  
TIDSFORSKYDNING**

TEMTest2001 klarlagde, at de enkelte TEM måleudstyr udviste en betydelig spredning til de tidlige tider.

I instrumenterne er der indbygget en tidsforsinkelse, fra modtageren giver et slukkesignal, til senderen reelt begynder at slukke. Denne tidsforsinkelse viser sig at variere noget, når man sammenligner de forskellige måleudstyr, hvilket resulterer i fejlmålinger til de tidlige tider.

**PROCEDURE FOR SKIFT AF TIDER**  
Kalibrering af et måleudstyr i forhold til referencesonderingen kan beskrives, som følger:

Fra GFS' hjemmeside hentes data for referencesonderingen. I rhoa-plotvindue sammenlignes data fra instrumentet med referencesonderingen.

Hvis kurverne efter en eventuel niveauforskydning afviger fra hinanden, vil der være behov for en tidsforskydning.

Data fra måleudstyret tidsforskydes, således at der opnås sammenfald med referencesonderingen.

Et typisk skift ligger i intervallet fra -1 mikrosekund til 1 mikrosekund, og man bør tilstræbe en nøjagtighed på 0,1 mikrosekund. Ved kalibrering af sonderinger fra kortlægningsområdet må man dog forvente, at nøjag-

tigheden på bestemmelsen af tidsforskydningen er dårligere.

Kalibrering af sonderinger i kortlægningsområdet følger den samme metodik.

Kalibrering af sonderinger er vist med eksempler i /6/

**4  
RETOLKNINGSPROCESSEN**

En skabelon for retolkningsprocessen kan beskrives ved følgende punkter:

- Indledende vurderinger
- Kalibreringssonderinger
- Retolkning af de oprindelige sonderinger
- Rapportering og indberetning til GERDA

Ved udførelse af en retolkning er det afgørende, at de oprindelige målinger sammenlignes med målinger udført med et kalibreret måleudstyr. Derudover anbefales det, at man anvender et andet måleudstyr og en anden rådgiver i forhold til de oprindelige målinger.

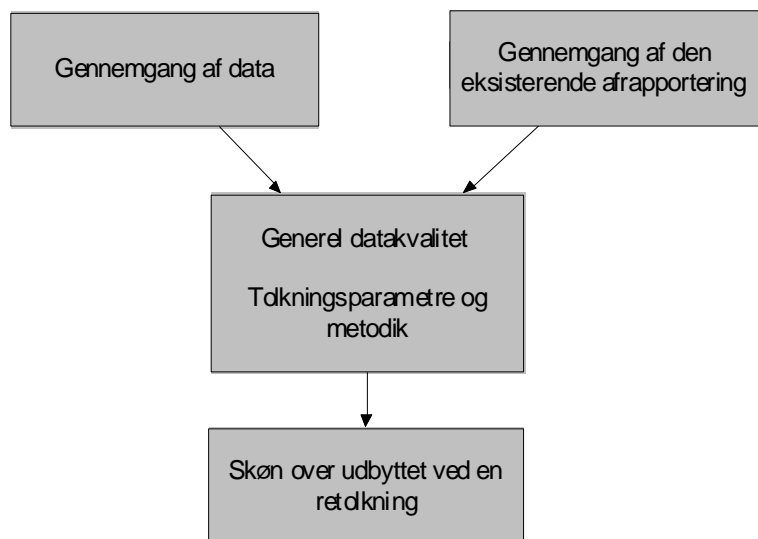
At der bør anvendes et andet måleudstyr skyldes, at der kan forekomme mindre fejl på målingerne, som ikke er blevet klarlagt under testundersøgelserne på testlokaliteten, eller som forekommer periodisk. Sådanne fejl vil ikke med sikkerhed blive klarlagt, hvis der anvendes det samme udstyr under retolkningsarbejdet.

At der bør anvendes en anden rådgiver skyldes, at man således sikrer sig, at nye øjne vil vurdere data. Dette vil kunne komme til udtryk ved små variationer i den måde hvormed støjprocesseringen og inversionen er foretaget.

**4.1  
INDLEDENDE VURDERINGER**

Den indledende vurdering er skematisk beskrevet i Figur 4.1.

Indledningsvist bør det forventelige udbytte ved en retolkning vurderes.



Figur 4.1 Processen i forbindelse med den indledende vurdering af det forventede udbytte ved en retolkning.

Dette gøres ved at gennemgå den eksisterende rapportering hørende til projektet, for at få et overblik over den anvendte tolkningsmetodik. Herefter vurderes datakvaliteten. Datakvaliteten vil kunne variere afhængig af måleudstyrets stand, afholdt sikkerhedsafstand til kabler mv. samt metodikken hvormed sonderingerne er opmålt.

mulighed for at tilvejebringe en række oplysninger. Der vil være tale om

- Rådata i form af output filer fra måleinstrument.
- Lokaliseringsfiler.
- Information om målekonfiguration, definition af tider mv.
- Andre notater som må være afgørende for databehandlingen.

**TILVEJBRINGELSE AF DATA**  
For at kunne foretage en optimal retolkning er det afgørende, at der er

Disse oplysninger bør kunne rekvireres fra den rådgiver, der oprindeligt har gennemført kortlægningen.

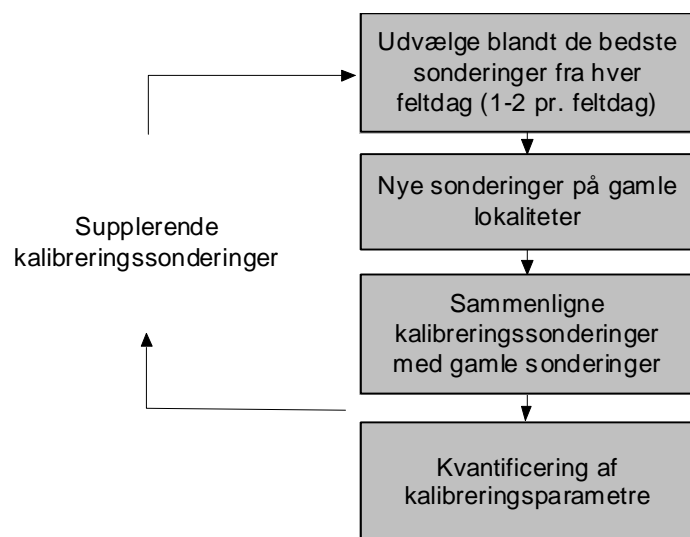
**4.2  
KALIBRERINGS-  
SONDERINGER**

Hvis man på baggrund af den indledende gennemgang af datamaterialet beslutter at gennemføre en retolkning, skal der foretages genmåling af udvalgte sonderinger. Det anbefales at der anvendes et måleudstyr, som ikke er blevet anvendt til kortlægningen, og at udstyret er kali-

breret ved måling på Testlokalitet Århus.

Processen i forbindelse med kalibreringssonderinger er vist skematisk i Figur 4.2.

Der udvælges 1-2 sonderinger for hver feltdag. De udvalgte sonde-



Figur 4.2 Processen i forbindelse med udførelse af kalibreringssonderinger

ringer skal være fri for koblinger og andre støjproblemer.

I felten opsøges de udvalgte lokaliteter, og der udføres en sondering efter sædvanlige standarder /3/.

Under dataprocesseringen sammenlignes de oprindelige sonderinger med kalibreringssonderingerne. Der fastlægges eventuelle kalibreringsparametre jf. beskrivelse i afsnittet "Kalibrering af sonderinger" på side 10.

Nogle af de oprindelige sonderinger vil ikke kunne kalibreres, således at der bliver overensstemmelse med kalibreringssonderingerne. Det kan

skyldes usikkerhed omkring positioneringen, at der optræder installationer, som ikke var til stede, da de oprindelige sonderinger blev udført eller der kan være andre forhold, som ikke umiddelbart lader sig forklare. Sonderinger fra sådanne lokaliteter indgår ikke i fastlæggelsen af kalibreringsparametrene.

Er sonderingerne udført i forskellige perioder, eller grupperer de fundne kalibreringsparametre sig på anden måde i forhold til udførelsestidspunktet for de oprindelige sonderinger, vil der kunne være behov for måling af supplerende kalibreringssonderinger - op til ca. 2 sonderinger per felt dag.

### 4.3 TOLKNING OG RAPPORTERING

#### TOLKNING

Det oprindelige datasæt indlæses og de fastlagte kalibreringsparametre anvendes ved tolkning af de oprindelige data.

I forbindelse med databehandlingen er det meget centralt, at datakvaliteten vurderes nøje i forhold til koblinger jf. "Kobling til kabler mv." på side 3 og "Overstyring" på side 6.

Usikkerheden på de enkelte datapunkter bestemmes enten på baggrund af støjmålinger eller på basis af spredningen af flere gentagne målinger. Er der ikke udført støjmålinger på hver enkelt sonderingslokalitet, bør man ikke anvende støjdata fra tidligere sonderinger, da støjniveauet kan variere meget fra lokalitet til lokalitet. Har man ikke støjdata til rådighed, og er der kun udført få gentagne målinger, vil usikkerheden, som tilskrives det enkelte datapunkt, blive foretaget ved en visuel inspicering.

Under inversionen inddrages information om filtre og ramper, se "Filtre" på side 6 og "Ramper" på side 7.

Efter inversionen er udført vil man med fordel kunne beregne den maksimale kortlægningdybde ("minimumsdybde") jf. kapitlet "Minimumsdybde" på side 8.

#### RAPPORTERING

Rapporteringen vil være baseret på en aftale mellem kunde og rådgiver. Det er dog afgørende, at alle overvejelser som ligger til grund for den samlede retolkning er beskrevet i rapporten.

De anvendte parameterværdier knyttet til instrumenterne og databehandlingsprocessen bør fremgå af rapporteringen.

#### GERDA

Afslutningsvist indberettes data til GERDA. Hvorvidt de oprindelige data bør forblive i GERDA databasen kan aftales fra gang til gang. Principielt er det ikke et problem, at det samme datasæt forekommer flere gange i GERDA databasen.

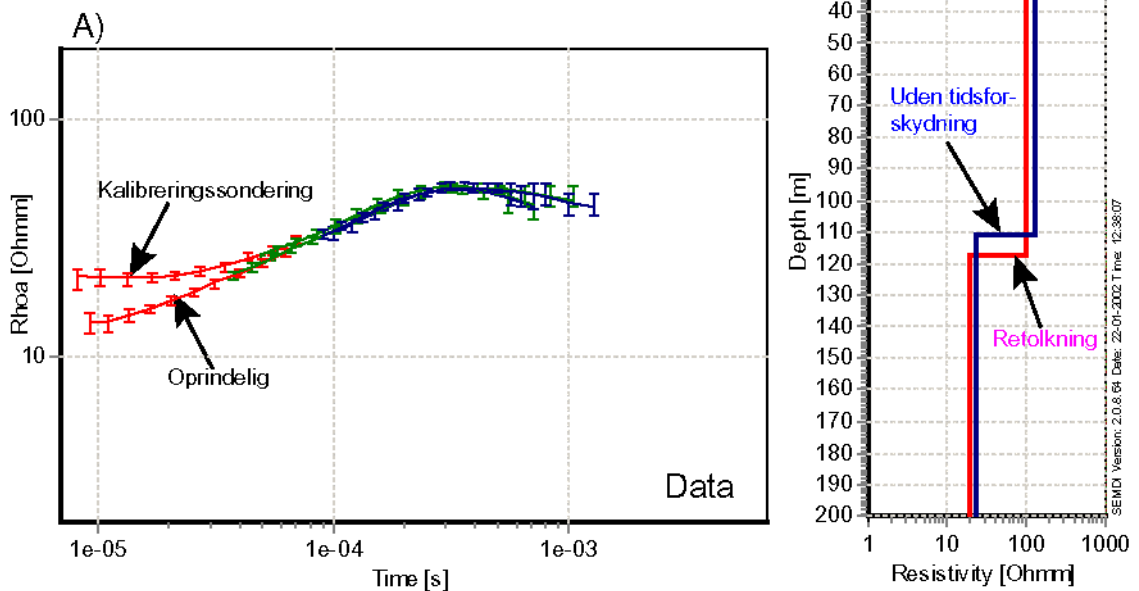
**5  
EKSEMPLER**

I dette kapitel gives eksempler på effekten af en retolkning. Enten beskriver eksemplerne betydningen af en enkelt parameter som eksempelvis en tidsforskydning, eller der foretages en sammenligning mellem den oprindelige tolkning og det endelige retolkningsresultat.

Figur 5.1 viser et eksempel på betydningen af tidsforskydning. Den oprindelige sondering skal i henhold til de udførte kalibreringssonderinger tidsforskydes  $-2,5 \mu\text{sek}$ .

På Figur 5.1 a ses kurveforløbet for en udvalgt kalibreringssondering og den oprindelige sondering udført på samme lokalitet.

På Figur 5.1 b ses den tolkede sondering før og efter tidsforskydningen. Det bemærkes, at det tynde første modellag ikke optræder i retolknningen, og dybden til den gode leder ligger ca. 8 meter dybere efter retolknningen.



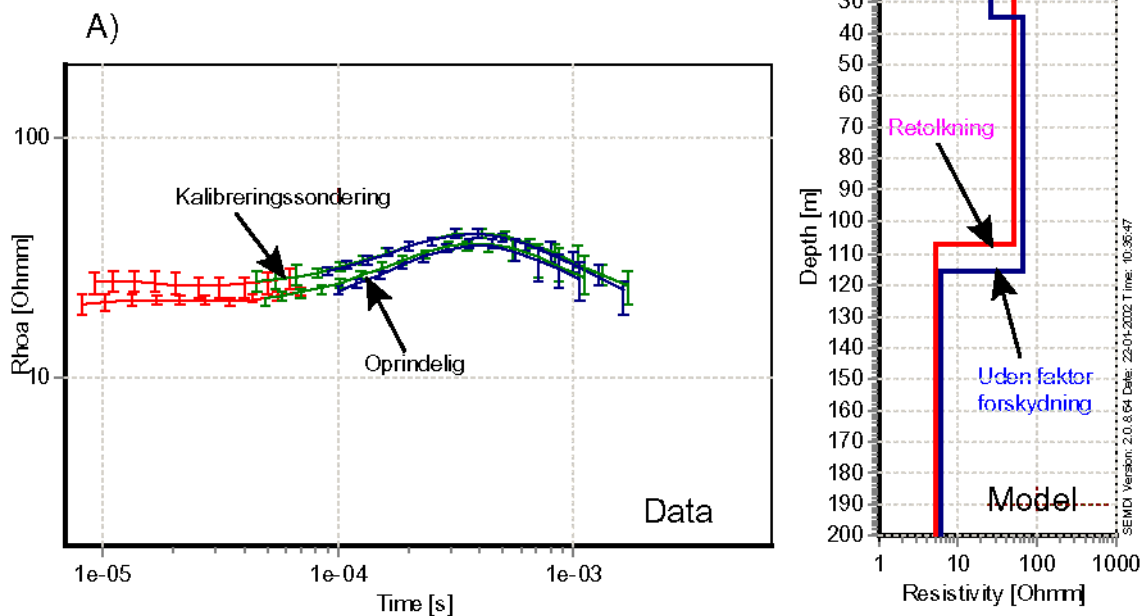
Figur 5.1 a) Eksempel på forskellen mellem de oprindelige sonderinger og kalibreringssonderingerne. b) Modelresultat for tolkning af de oprindelige data med og uden tidsforskydning på  $-2.5 \mu\text{sek}$ .



Figur 5.2 er fra en kortlægning, hvor kalibreringen gav en forskydning i niveau på en faktor 1,29 i dB/dt. Figur 5.2 a viser forskellen i niveau for den oprindelige sondering og den udførte kalibreringssondering.

Som det ses af figuren, er det specielt dybden til den gode leder, som påvirkes ved forskydningen i niveau.

På Figur 5.2 b ses den tolkede sondering før og efter niveauforskydningen.



Figur 5.2 A) Eksempel på forskellen mellem de oprindelige sonderinger og kalibreringssonderingerne. B) Model for tolkningen af sonderingen med og uden niveauforskydning på 1.29 i db/dt.

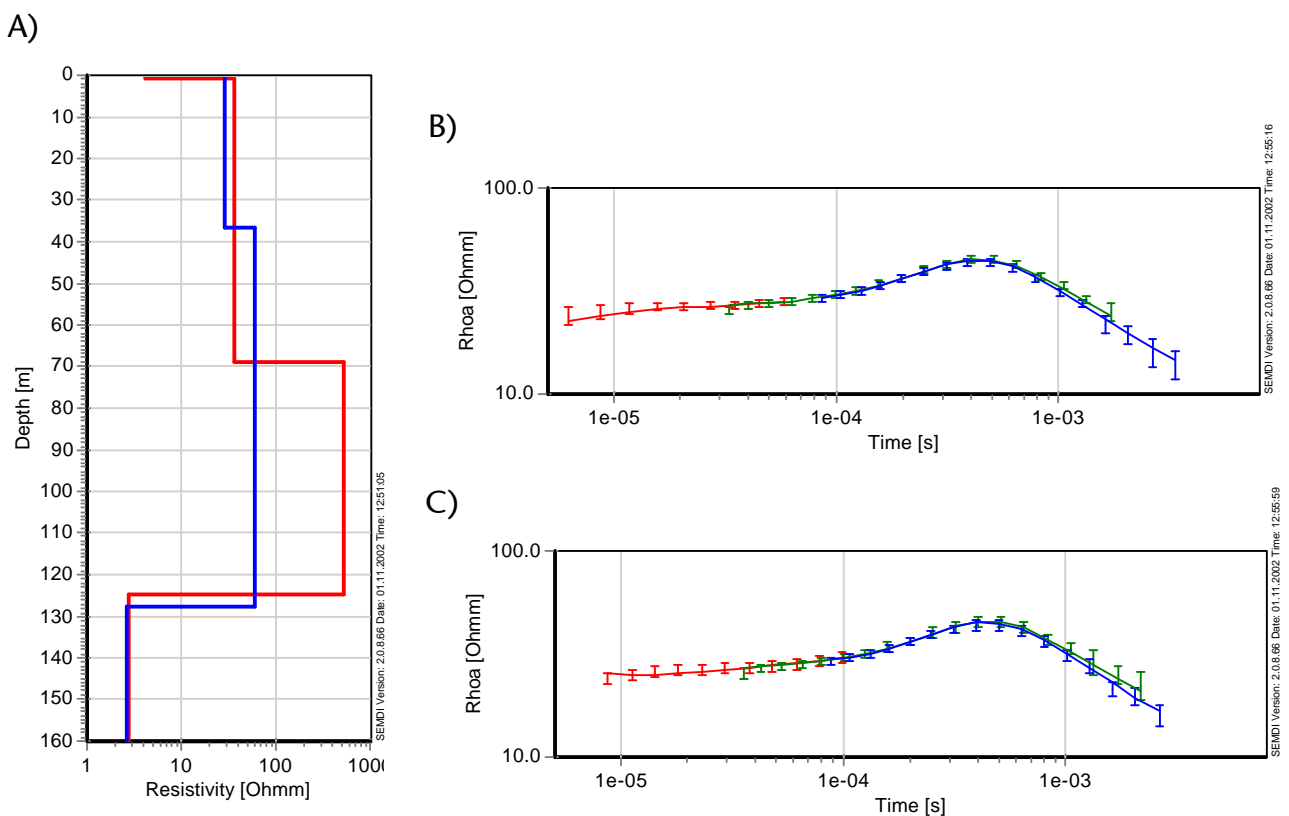
Figur 5.3 viser et eksempel på en sondering, som i forbindelse med retolkningen er forskudt -2,5  $\mu$ sek.

Den oprindelige model Figur 5.3A (rød kurve) viser et meget tyndt lavmodstands lag i toppen og et lag med meget høj modstand i dybden.

Resultatet af retolkningen er at lagene med ekstrem lav og høj modstand ikke optræder i modellen. Der er

således opnået et geologisk set mere troværdig model.

I forbindelse med den oprindelige tolkning har man fjernet det første datapunkt pga. problemer med tilpasning under modelleringen. Ved retolkningen er første datapunkt ligeledes fjernet, hvilket skyldes, at en tidsforskydning af data på -2,5  $\mu$ sek betyder, at data kommer meget tæt på slukkeforløbet.

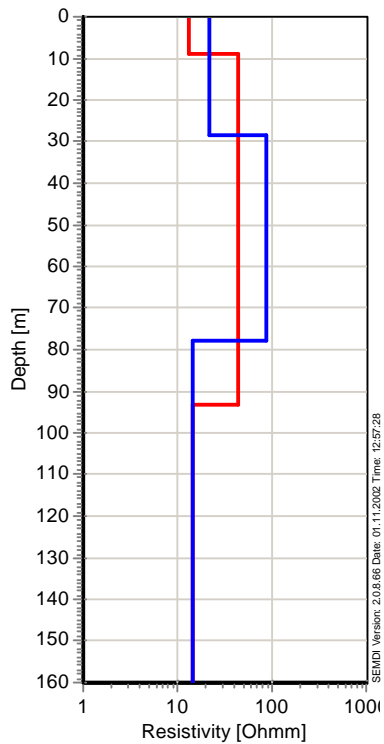


Figur 5.3 På figur A ses modellen fastlagt i forbindelse med den oprindelige tolkning som den røde kurve, mens retolkningsresultatet er vist med blå kurve. Figur B viser datatilpasningen for retolkningen, mens figur C viser datatilpasningen for den oprindelige model.

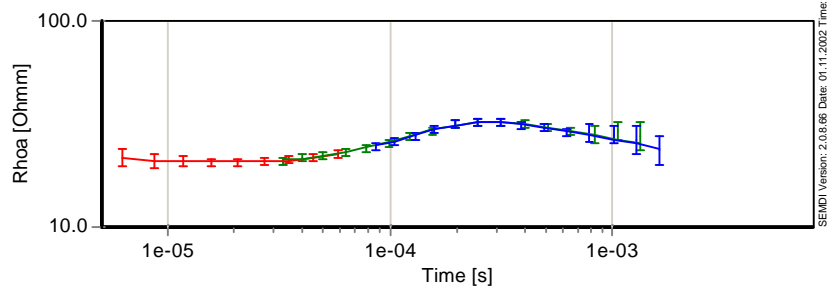
Figur 5.5 viser på samme måde som eksemplet i Figur 5.3 en sondering, som i forbindelse med retolkningen er forskudt  $-2,5 \mu\text{sek}$ .

Som det fremgår af figuren resulterer retolkningen i en væsentlig bedre datatilpasning og væsentlig ændret model.

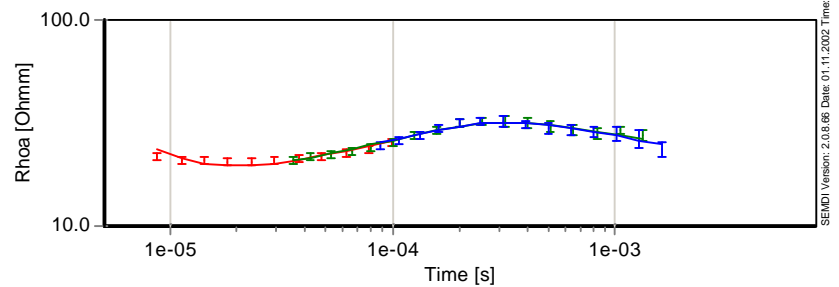
A)



B)



C)

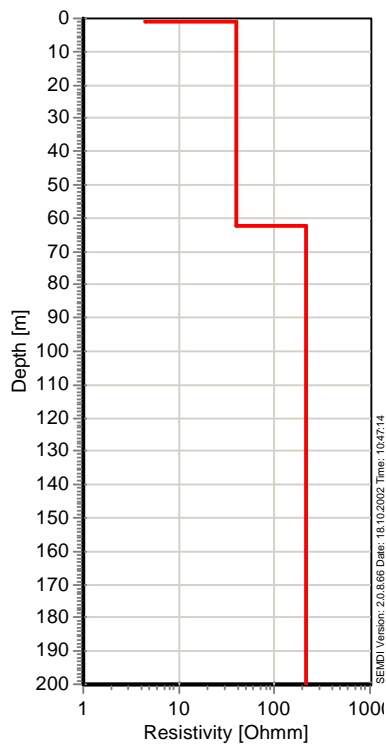


Figur 5.4 På figur A ses modellen fastlagt i forbindelse med den oprindelige tolkning som den røde kurve, mens retolkningsresultatet er vist med blå kurve. Figur B viser datatilpasningen for retolkningen, mens figur C viser datatilpasningen for den oprindelige model.

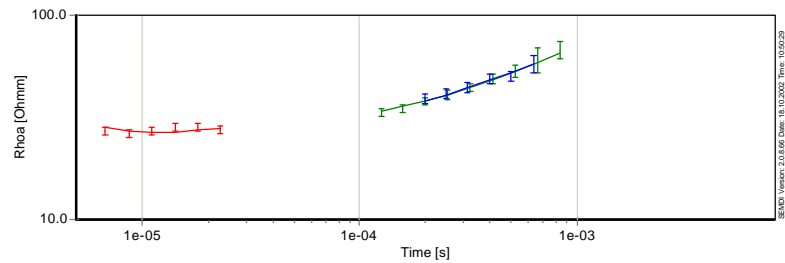
Figur 5.5 viser et eksempel, hvor man i forbindelse med den oprindelige rapportering har medtaget en koblet sondering. Koblingen er håndteret ved at fjerne den del af kurveforløbet som har vist et "ringende" forløb, hvorefter der er foretaget en tolkning af det tilbageværende datasæt.

I forbindelse med retolkningen er dette datasæt kasseret og indgår således ikke.

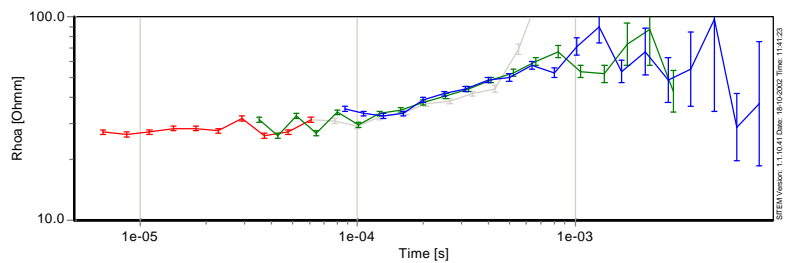
A)



B)



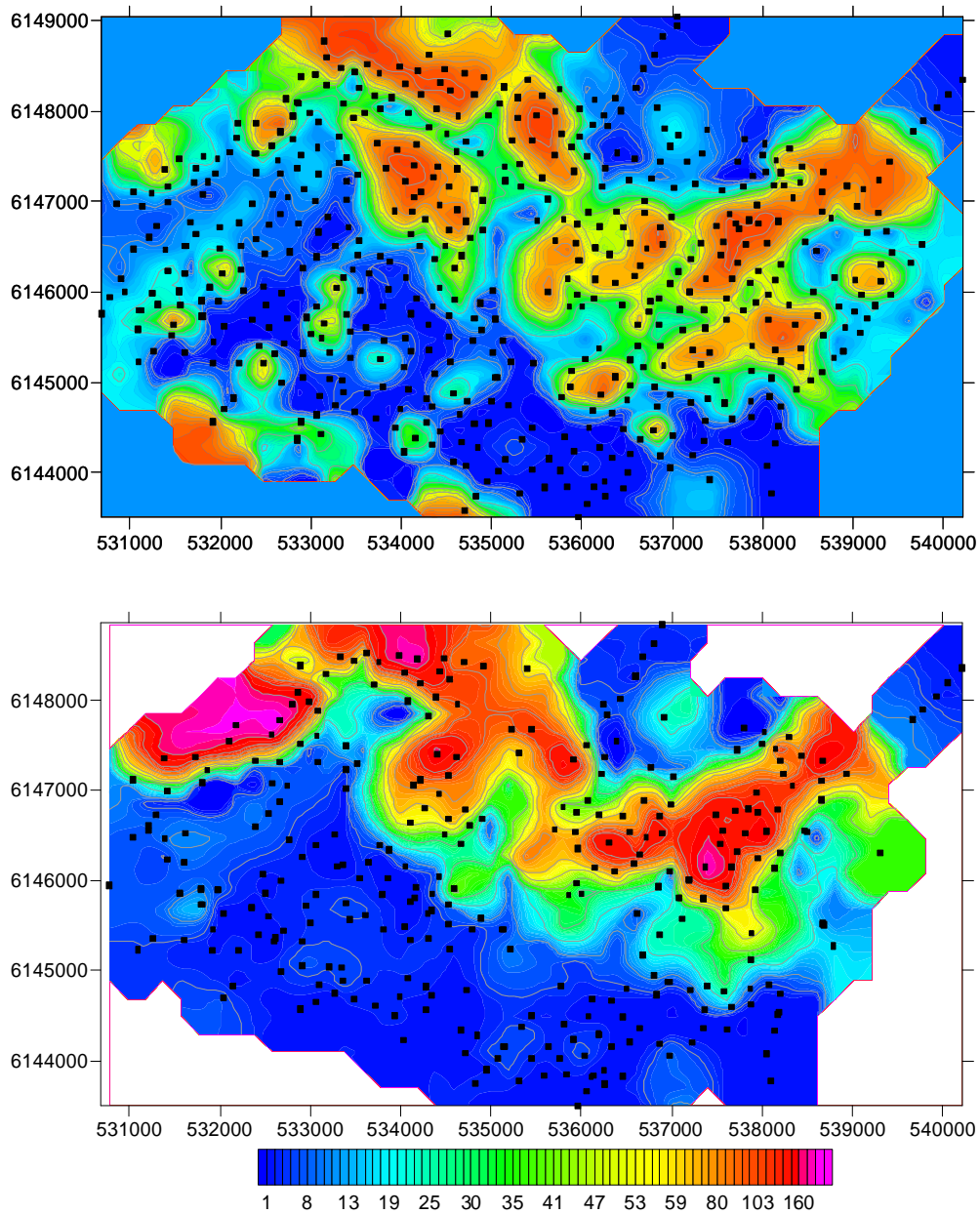
C)



Figur 5.5 Eksempel på en galvanisk koblet sondering, som er tolket i forbindelse med den oprindelige rapportering, mens den er blevet kasseret i forbindelse med retolkningen.

Figur 5.6 viser et eksempel for en samlet kortlægning, i form af en middelmodstandsberægning over et givent koteinterval. Det øverste konturkort er den oprindelige tolkning, mens det nederste konturkort viser resultatet af retolkningen.

Ved retolkningen er der fjernet koblede sonderinger, beregnet minimumsdybde til maskning af datapunkter i dybden og generelt udført en kalibrering af sonderingerne.



Figur 5.6 Konturkort over middelmodstanden for et 20 meter koteinterval. Øverst ses resultatet af den oprindelige tolkning, mens det nederste konturkort viser resultatet af retolkningen.

**6  
REFERENCER**

/1/ Test af TEM-måleudstyr - TEMTest2001, 2001, GeoFysikSamarbejdet

/2/ Test af TEM-måleudstyr - TEMTest2002, 2002, GeoFysikSamarbejdet

/3/ Vejledning i udførelse af TEM målinger, januar 2002, GeoFysikSamarbejdet. <http://www.gfs.au.dk/media/vejledningtem.pdf>

/4/ Vejledning i kalibrering af Geonics Protem 47 måleinstrument, Oktober 2001, GeoFysikSamarbejdet <http://www.gfs.au.dk/media/kalibrering.pdf>

/5/ Inversion of bandlimited tem responses, 1998, Effersø, F. E., Auken, A. and Sørensen, K. I., Geophysical Prospecting

/6/ Øvelsesnoter til kursus i retolkn- ing af TEM-sonderinger, Oktober 2002, GeoFysikSamarbejdet