

GEOFYSIKSAMARBEJDET

**Institut for Geoscience
Aarhus Universitet**

**Vejledning og kravspecifikation for
MEP-målinger, data-processering og
tolkning**

**Version 2.0
Oktober 2015**

REVIDERINGS Historik (1)

MÅLEUDSTYR (2)

Opbygning af måleudstyr (2.1).....	3
Observerede fejl ved måleudstyr (2.2).....	4
Tjek af måleudstyr (2.3).....	4
Opsummering (2.4).....	6

MÅLEPROCEDURE (3)

Måleopstilling og positionering (3.1).....	7
Målekonfiguration og datatæthed (3.2).....	9
Målecyklus (3.3).....	11
Feltnotater (3.4).....	12
Opsummering (3.5).....	13

DATABEHANDLING OG DOKUMENTATION (4)

Processering (4.1).....	14
Tolkningsmetodikker (4.2).....	14
Rapportering (4.3).....	16

REFERENCER (5)

1 REVIDERINGS Historik

MAJ 2004

Som følge af et nærmere studie af MEP-protokollerne, er ordlyden i afsnit 3.2, Målekonfiguration og data-tæthed ændret. Den vigtigste ændring er, at der ikke anvendes gradient-array-protokoller for 1-kanals MEP-udstyr. Afsnit 3.2 er yderligere suppleret med plot af datafordelingen for de anbefalede MEP-protokoller, og der er foretaget sproglige præciseringer.

FEBRUAR 2008

Afsnit 4, Databehandling og Dokumentation har gennemgået en revision, så kravspecifikationerne matcher de i dag anvendte processerings- og tolkningsprogrammer. Vigtige ændringer er, at MEP-processering nu som standard udføres i Aarhus Workbench samt, at der som standard udføres både 2D- og 1D-tolkninger.

OKTOBER 2015

Der er foretaget en gennemgang af vejledningen i sin helhed og opdateringer/rettelser er foretaget, hvor det har været nødvendigt.

De primære opdateringer er følgende:

- Omstruktureringer af underafsnit i kapitel 3 og en bedre forklaring af målecyklussen i afsnit 3.3.
- 2D-tolkning kan nu foretages med Aarhus Workbench's interne 2D-inversionskode (AarhusInv). Det er således ikke længere nødvendigt at have en særskilt licens til tolkningsprogrammet RES2DINV.
- Der beregnes *Depth of investigation* (DOI) estimater for 1D-LCI tolkninger.
- En 1D-LCI tolkning af en MEP-profile skal foretages i én samlet sektion (dette sker helt automatisk i Aarhus Workbench)
- En såkaldt *Sharp* modelopsætning kan anvendes som supplement til 1D-LCI mangelags- og fålags tolkninger.
- Der anvendes i dag flere forskellige MEP-instrumenter og kombinationer af relæbokse og sender/modtagere, GFS ligger derfor ikke længere inde med måleprotokolfiler til alle instrumentkombinationer.

2 MÅLEUDSTYR

Multielektrodering (MEP) går internationalt oftest under betegnelsen Electrical resistivity tomography (ERT).

I Danmark er der ved MEP-målinger traditionelt anvendt måleudstyr bestående af et mangelederkabel, en relæboks og et måleinstrument.

Det anvendte måleudstyr i Danmark er fortrinsvis af fabrikatet ABEM. Typen er SAS1000, SAS4000, Terra-meter LS og relæboks ES464, ES1064. Disse instrumenter fungerer efter de samme principper til resistivitetmålingerne, men med de nyere instrumenter er det også muligt at indsamle *Induced polarization data*

(IP-data). Nærværende vejledning er udarbejdet på baggrund af virkningsmåder og observerede problemer ved de normalt anvendte MEP-instrumenter i Danmark. De beskrevne testprocedurer er baseret på de muligheder, som er integreret i måleudstyrene.

Foretages der målinger med andre typer måleudstyr, skal man anvende en test- og kvalitetssikringsprocedure, som tilsvarende kravene defineret i nærværende vejledning. Anvendes der instrumenter, hvor dette ikke er muligt, skal det tydeliggøres over for kunden ved tilbudsgivningen og under afrapporteringen.

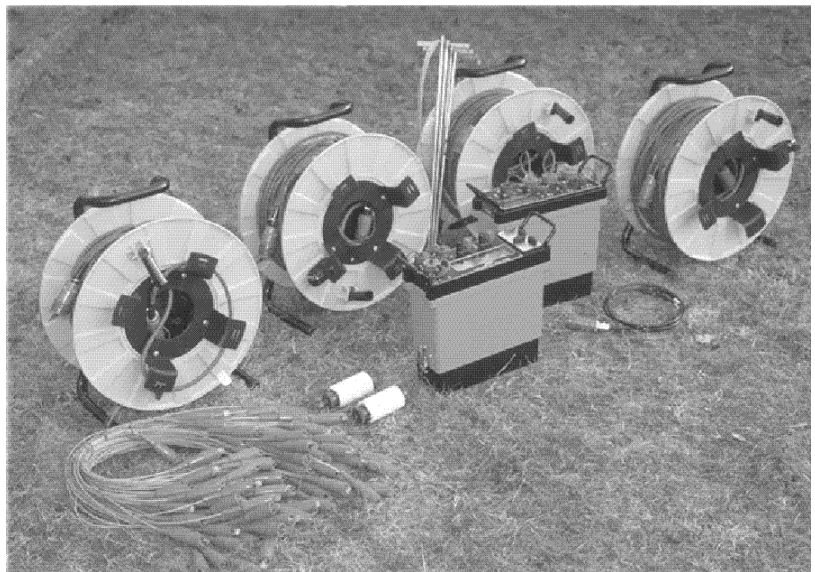
2.1 OPBYGNING AF MÅLEUDSTYR

Et ABEM måleudstyr til udførelse af MEP-målinger er baseret på følgende elementer:

- Spydelektrode af rustfrit stål
- Jumpere som forbinder spydelektrode med kabeludtag
- Mangelederkabler

- Adaptere til at forbinde to mangelederkabler
- Relæboks
- Måleinstrument
- Evt. 12 V ekstern strømforsyning (bilakkumulator).

Disse instrumenter er vist på Figur 2.1.



Figur 2.1 Foto af SAS1000/SAS4000, multilederkabler, relæboks mv.

2.2 OBSERVEREDE FEJL VED MÅLE- UDSTYR

Ved anvendelse af geofysisk måleudstyr vil der til tider opstå instrumentelle fejl. I dette afsnit skitseres en række observerede fejl knyttet til ABEM's udstyr. De beskrevne fejl vil blive fundet, når man følger proceduren beskrevet i afsnittet "Tjek af måleudstyr" på side 4.

RELÆER

Et eller flere relæer i omskifterboksen kan være defekte. Denne fejl betyder, at målekonfigurationer, som inddrager et sådant relæ, ikke kan opnå kontakt, eller at relæet permanent er tilsluttet. Dette forårsager, at et ekstra udtag / spydelektrode vil være aktivt under alle målekonfigurationer. Hvis relæet ikke kan slås til, vil potentiale-målinger, som er baseret på det aktuelle relæ, give urealistiske data, mens det ikke vil være muligt at udsende strøm ved brug af relæet.

En relæfejl kan have periodisk karakter. Dvs. relæet kan i perioder have problemer med at slå til og fra. Dette betyder, at relæfejlen er sværere at fastlægge.

MANGELEDERKABEL

I mangelederkablet kan der være ingen eller dårlig forbindelse til ét eller flere kabeludtag. Det kommer til udtryk ved manglende data eller en forringelse af datakvaliteten.

I mangelederkablet kan der være lækage eller direkte kortslutning mellem to eller flere ledere. Dette ødelægger data, da et ekstra elektrodespyd bliver involveret i målingerne.

STIK

Stikkene på mangelederkablet, adapterstykker og instrumentet kan være tilsmudsede og irrede eller generelt slidte. Det giver store overgangsmønstre og dermed en forringelse af datakvaliteten.

STRØMGENERATOR

Strømgeneratoren i måleinstrumentet kan være ustabil. Derved udsendes der en anden strøm end den strømværdi, der tilknyttes datasættet. Dette bevirker, at data er forskudt i niveau.

2.3 TJEK AF MÅLEUDSTYR

Tjekproceduren af måleudstyret omfatter:

- Tjek af måleinstrument
- Tjek af relæboks
- Tjek af kabler
- Tjek af adapterstik

TEST AF MÅLEINSTRUMENT

Det tjekkes, at måleinstrumentet måler korrekt spændingsfald (modstand) ved måling over kendte standardmodstande jf. vejledning beskrevet i instruktionsmanualen /1/.

Til denne test anvendes en testboks, som følger med ved erhvervelse af

instrumentet. Der måles for hver kanal (SAS4000) over følgende modstande: 1 Ω , 15 Ω og 15 k Ω . Modstanden af standardmodstands-komponenter kan antages at være fastlagt med en usikkerhed på 1%, hvorfor måleinstrumentet også skal kunne producere disse modstandsværdier inden for 1%.

Det testes, at instrumentet viser fejl (error 1), hvis intet er tilsluttet instrumentets terminaler. Viser instrumentet ikke en fejl ved denne test, skal det straks sendes til service hos producenten. Denne test varer 10 min og foretages mindst en gang om måneden.

RELÆER I OMSKIFTERBOKS

Omskifterboksen testes med det dertil indrettede program i instrumentet. Testen foregår ved først at teste, at alle relæer i omskifterboksen kan nulstilles (slås fra). Dernæst tjekkes hvert enkelt relæ. Denne test har en varighed af ca 45 min jf. /1/. Der genereres en fil "\test\relay.log", som dokumenterer resultatet af testen. Testen foretages mindst en gang om ugen.

LÆKAGE OG KORTSLUTNINGER I KABLER OG STIK

Kablerne kontrolleres for kortslutning og lækage mellem lederne. Til denne test findes der testsoftware, som kan eksekveres i instrumentet jf. /1/. Testen foretages med ét kabel ad gangen, således at samtlige ledere kontrolleres. Desuden testes adapterstikkene ved at forbinde to kabler med adapterstik. Testen har en varighed af 5 min per kabel. Der genereres en fil "\test\cable.log", som dokumenterer resultatet af testen. Testen foretages mindst en gang om ugen.

GENNEMGANG I KABLER OG STIK

Kablerne kontrolleres for gennemgang. Til denne test findes der en måleprotokol, hvorved samtlige 32 ledere gennemmåles. For hver leder i kablet bestemmes en modstand, som for et standardkabel skal ligge i intervallet 20-30 ohm. Enkelte par af lederne (f.eks. lederne nummer 29-32) kan være forbundet parallelt. Disse ledere skal udvise den halve modstand jf. /1/. Hvis der anvendes andre kabeltyper, skal det anføres, i hvilket interval gennemgangsmodstanden skal være.

Den enkelte spydelektrode er forbundet med en leder i multilederkablet, som skitseret ved nedenstående Figur 2.1. Som det fremgår, vil en test for gennemgang i kablet også være en test af, at der er forbindelse ud til selve udtaget, da den gennemgående leder er ført helt frem til udtaget. Testen udføres for hvert kabel og vil have en varighed af 5-6 minutter per kabel. Desuden testes adapterne ved at forbinde to kabler på én gang. For hvert kabel genereres en fil, som dokumenterer resultatet. Testen foretages mindst en gang om ugen.



Figur 2.1 Foto med illustration af et kabeludtag, og af hvordan en leder i mangelederkablet principielt er forbundet. (grønne streger).

2.4 OPSUMMERING

En opsummering af proceduren ved instrumenttjek er vist i Tabel 2.1

Enhed	Beskrivelse	Hypighed
Måleinstrument	Tjek mod standardmodstande på 15 k Ω , 1 Ω og 15 Ω . Max. afvigelse 1%.	1 gang om måneden
Relæer	Relætest.	1 gang om ugen.
Lækage og kortslutninger i kabler og stik	Lækage og kortslutningstest.	1 gang om ugen
Gennemgang i kabler og stik	Modstanden af hver enkelt leder måles	1 gang om ugen

Tabel 2.1 Tjek af de enkelte udstyrsdele og hyppigheden for udførelse af testene. Har udstyret ikke været anvendt i en periode, skal udstyret tjekkes, inden feltarbejdet påbegyndes.

3 MÅLEPROCEDURE

3.1 MÅLEOPSTILLING OG POSI- TIONERING

I forbindelse med måleproceduren er der mulighed for at anvende forskellige strategier, hvilket vil afspejle sig i kvaliteten af de indsamlede data.

I dette afsnit beskrives disse problemstillinger, og der opstilles retningslinier for måleproceduren. Måleopstilling og positionering

MÅLEOPSTILLING

Ved opstilling af måleudstyret skal der anvendes en feltprocedure, som sikrer, at kablerne er udlagt i korrekt udlægsretning, at adapterstikkene vender korrekt, og at kablerne er tilsluttet de korrekte udtag i relæboksen.

Er et adapterstik vendt forkert, vil det under spydelektrodetesten vise sig som manglende forbindelse til et helt kabel. Er et af kablerne vendt forkert, vil en del af målingerne have negativt fortegn, hvilket instrumentet skal indstilles til at give advarsel for. Er mangelederkablerne tilsluttet de forkerte udtag i relæboksen, vil instrumentet ikke vise en fejlmelding.

De anvendte kabler skal identificeres. Er der anvendt de samme kabler for hele kortlægningen, identificeres kablerne en gang for alle. Er der udskiftet kabler under kortlægningen, skal sammenhængen mellem profiler og anvendte kabler fremgå.

SPYDELEKTRODEKONTAKT

Ved en spydelektrodetest bliver det for hver spydelektrode testet, om det er muligt at udsende strøm. Hvis overgangsmodstanden mellem spydelektroden og jorden er for høj, vil instrumentet melde fejl på den pågældende spydelektrode. Spydelektroden tilses. Den kan trykkes dybere i jorden, tilføres en saltholdig væske, og der kan suppleres med flere spyd på samme position for at opnå en bedre spydelektrodekontakt.

Der skal altid udføres spydelektrodetest ved første opstilling på et nyt pro-

fil, og når dagens målinger påbegyndes. Hvis det er tørt, eller der på anden måde er problemer med at opnå god spydelektrodekontakt, skal der foretages elektrodetest for hver opstilling langs profilet. Anvendes tynde spydelektroder (<10 mm i diameter), vil overgangsmodstanden i tørre sedimenter blive for høj.

Helt generelt bør man ikke foretage geoelektriske målinger, hvis jorden er for tør til, at der let kan opnås tilstrækkelig spydelektrodekontakt. Er det afgørende, at målingerne gennemføres, mens jorden er udtørret, bør man vande spydelektroderne med en saltvandsopløsning og evt. anvende flere spydelektroder for hvert udtag.

POSITIONERING

Det er afgørende, at kablerne ligger udstrakt, således at målegeometrien med den forudsatte spydelektrodeenhedsafstand er korrekt.

For at sikre, at kablerne ikke har ændret længde i forhold til den nominelle enhedsafstand, skal hvert kabel opmåles en gang om året. Foretages der en reparation af et kabel, skal kabellængden opmåles. Den samlede afstand fra første til sidste elektrodeudtag må ikke afvige mere end 1% fra den nominelle længde.

Måles der i opstillinger, hvor enhedsafstanden mellem spydelektroderne er mindre end enhedsafstanden på kablet, fastlægges positionen for hver enkelt spydelektrode ved opmåling med målebånd.

Positioneringen skal foretages på baggrund af kortværk og GPS. Der skal som minimum udtages koordinater i profilets endepunkter, ved knækpunkter på profilet og for hver kabel-længde.

Ofte anvendes mangelederkablet som målebånd, idet kabeludtagene er placeret med en fast afstand f.eks. 5 m. Det er vigtigt, at kablet ligger udstrakt, og at spydelektroderne er placeret ud for udtagene, således at den antagne geometri overholdes.

TOPOGRAFI

Det er muligt at måle over stærkt varierende terræn. I sådanne tilfælde bør profilet orienteres således, at opmålingen tilnærmelsesvis forløber på tværs af terrænhældningen.

KNÆK PÅ PROFILLINIER

Hvis profillinien ikke er en ret linie, vil geometrien / afstanden mellem spydelektroderne blive mindre, end man antager under tolkningen af data. Derfor må et profilknæk ikke overstige 20 grader. Er der tale om flere knæk på profilet, må "det samlede knæk" set i forhold til udstrækningen af målekonfigurationerne ikke overstige 20 grader. Er man nødt til at foretage knæk på profilet med mere end 20 grader, vil man under dataproceseringen skulle fjerne datapunkter, som er baseret på målekonfigurationer hen over knækket. Ved et knæk på over 20 grader kan man evt. lave et nyt profil.

DYREHEGN, RØRFØRINGER, VEJE OG GRØFTER

Der bør ikke måles langs f.eks. vildt-hegn, da den udsendte strøm vil kunne skyde "genvej" i heget og derfor give anledning til for lave målte modstande. Dette gælder også ned-gravede rørføringer og kabler med

ledende isoleringskappe. Derfor skal måleopstillingen placeres mindst 10-15 m fra sådanne installationer.

Foretages der målinger for tæt på grøfter og veje, vil målingerne påvirkes. Afstanden til veje skal være mindst 5 gange bredden af vejen / grøften. Er der tale om f.eks. en mindre skovvej, vil man kunne måle tættere på vejen. Grøfter, dyrehegn, veje mv. kan krydses, uden det vil påvirke data. Afstanden til dyrehegn, rørføringer, veje og grøfter noteres under feltarbejdet.

OVERSTYRING AF INSTRUMENT

Er man for tæt på transformatorer eller højspændingsledninger, kan kraftige jordstrømme overstyre måleinstrumentet og/eller påføre data meget støj.

En overstyring kan give bias (en forskydning) af måledata, som ikke kan klarlægges ved en inspektion af data. Måleinstrumentet er designet således, at den enkelte måling er inddelt i intervaller af 5 millisekunder. Sker der en overstyring inden for et interval, vil instrumentet stoppe og angive fejl. Det er dog muligt, at der slipper bias-signaler igennem, uden at instrumentet registrerer en overstyring. Derfor skal afstanden være mindst 50 m, når der udføres målinger parallelt med en højspænding. Er modstanden i jorden meget lav, vil dette kræve en større sikkerhedsafstand.

Ønsker man at krydse eller måle tæt på kabelføringer, skal profilet placeres nærmest vinkelret på kabelføringen. På denne måde minimeres påvirkningen fra de strømme, der måtte induceres i jorden. Afstanden til højspændingsledninger noteres under feltarbejdet, og man skal være meget opmærksom på en eventuel støj-påvirkning under dataproceseringen.

3.2 MÅLEKONFIGURATION OG DATATÆTHED

Tætheden af datapunkterne langs et profil og målekonfigurationer er fastlagt ved måleprotokoller, som er defineret inden målekampagnen. De anvendte målekonfigurationer og datatætheden har betydning for, hvor detaljeret modstandsvariationerne kan beskrives.

MÅLEKONFIGURATIONER

Før i tiden blev Wenner målekonfigurationer med a-afstande fra 5 til 120 m anvendt ved MEP-målinger. I dag anvendes næsten udelukkende multi-kanals MEP-instrumenter, og derfor anbefales det at anvende gradient-array-konfigurationer, da disse protokoller udnytter multi-kanalinstrumenterne langt bedre, og der opnås en større lateral datatæthed end ved brug af Wenner-protokoller.

Nogle rådgivere har også anvendt/ anvender en kombination af to omskifterbokse, hvorved der for hvert sæt strømelektroder kan måles flere samtidige sæt af potentialemålinger. Ved denne målestrategi er der typisk anvendt målekonfigurationer, som er en kombination af Wenner og Schlumberger opstillinger. Disse målinger er foretaget på baggrund af protokoller udarbejdet af den enkelte rådgiver.

DATATÆTHED

Det er afgørende, at der måles med en tilstrækkelig høj datatæthed langs profilet. Modelstudier har vist, at der findes et niveau hvor en øget datatæthed/datamængde, ikke medfører en bedre opløsning af modstandsforholdene /5/. Det vil dog aldrig være en ulempe at måle ekstra mange datapunkter.

For at opnå en optimal opløsning af modstandsforholdene måles de korte elektrodeafstande tættere end de lange konfigurationer.

WENNER-KONFIGURATION

Målinger foretaget med Wenner_L og Wenner_S protokollerne indeholder relativt få datapunkter i forhold til at opnå den optimale datatæthed og dermed opløsning af modstandsvariationerne, ref /4/ og /5/.

Ønsker man at foretage målinger med Wenner-konfiguration, anbefales det at anvende måleprotokollerne Wenner_S og Wenner_XL. Disse protokoller er standardprotokoller, som følger med instrumentsoftwaren. Protokollerne kan også downloades fra GeofysikSamarbejdets hjemmeside www.gfs.au.dk.

Wenner protokol, 1-kanals udstyr:

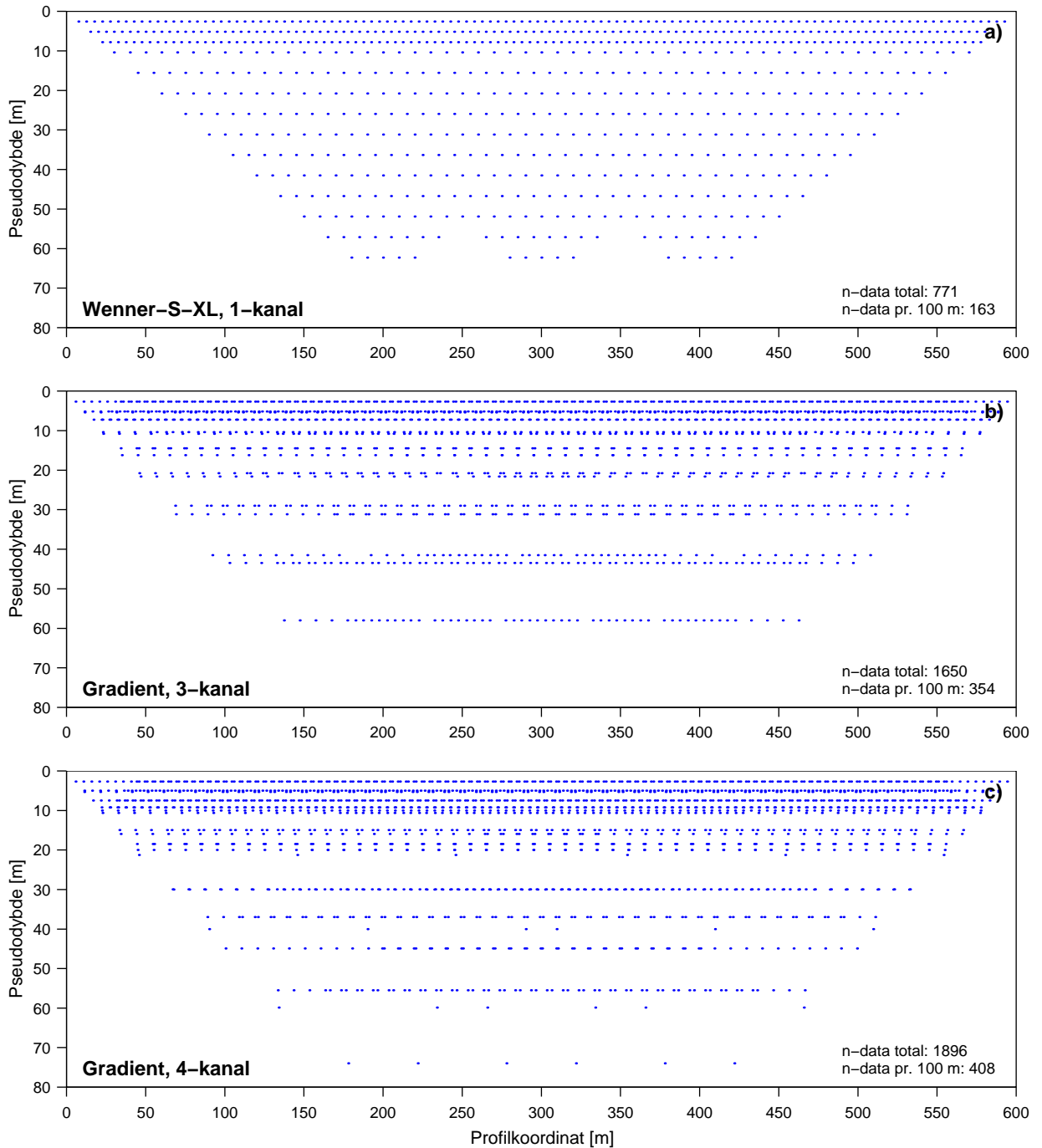
- Wenner_S (50 punkter pr. kabel)
- Wenner_XL (113 punkter pr. kabel)

I Figur 3.1 a ses datafordelingen for et 600 m udlæg (400 m + 2 x roll-a-long) målt med Wenner_S og Wenner_XL protokollerne.

GRADIENTKONFIGURATION

Der er forskel på målekonfigurationerne, når det gælder robusthed over for støj og evnen til at opløse de geologiske lag. Wenner-målekonfigurationen er meget robust over for støj, men er ikke de bedste, når det gælder kortlægning af jordens modstandsvariationer.

Den seneste udvikling mht. målekonfigurationer er gradient-arrays /4/, /5/ Denne konfigurationstype er udviklet til multikanals-udstyr, idet det udnyttes, at man kan måle potentialer over flere elektrode-sæt samtidig. Der indsamles derfor, på den samme tid, langt flere data med gradient-array-protokollerne end med Wenner-protokollerne. På denne baggrund anbefales det, at MEP-målinger udføres med multikanalsudstyr, med anvendelse af gradient-konfigurationer.



Figur 3.1 Datafordelingen for MEP-målinger. Datapunkterne er afsat ved configurationernes laterale- og vertikale fokuspunkt. Udlæggene er 600 m (400 + 2 x 100 m roll-a-long) og elektrodeafstanden er 5 m. Angivelsen "n-data pr. 100 m" er for midterdelen, hvor man har ful datadækning. a) Wenner_S og Wenner_XL protokollerne. b) Gradient-array protokollerne for 3-kanals udstyr. c) Gradient-array protokollerne for 4-kanals udstyr.

Gradient-array-protokollerne er følgende:

3-kanals udstyr:

- Grad3S6 (3x40 punkter pr. kabel)
- Grad3L6 (3x78 punkter pr. kabel)

4-kanals udstyr:

- Grad4S8 (4x40 punkter pr. kabel)
- Grad4L8 (4x62 punkter pr. kabel)

I Figur 3.1 b og c ses datafordelingen for et 600 m udlæg (400 m + 2 x roll-a-long) målt med gradient-array-protokollerne til hhv. et 3-kanals og 4-kanals MEP-udstyr.

3.3 MÅLECYKLUS

Figur 3.1 viser en typisk målecyklus for DC-målinger. Øverste plot i Figur 3.1. viser senderstrømmen, mens nederste plot viser det resulterende potentiale i jorden. I én målecyklus anvendes en positiv, en dobbelt negativ og en positiv senderpuls, og der foretages fire potentialemålinger (T_i , $2T_i$, T_i , Figur 3.1). Ved at midle disse fire målinger udkompenseres evt. 0-offset og linjær drift i målingerne. Indsamles der IP-data sammen med DC-dataene, anvendes en målecyklus men en alternerende plus/minus-puls.

INTERGRATION TIME

Bredden af målevinduet (Integration Time, Figur 3.1) skal minimum være 300 ms. For at udkompensere forstyrrelser fra 50 Hz strømnettet skal *Integration Time* være et multiplum af 100 ms.

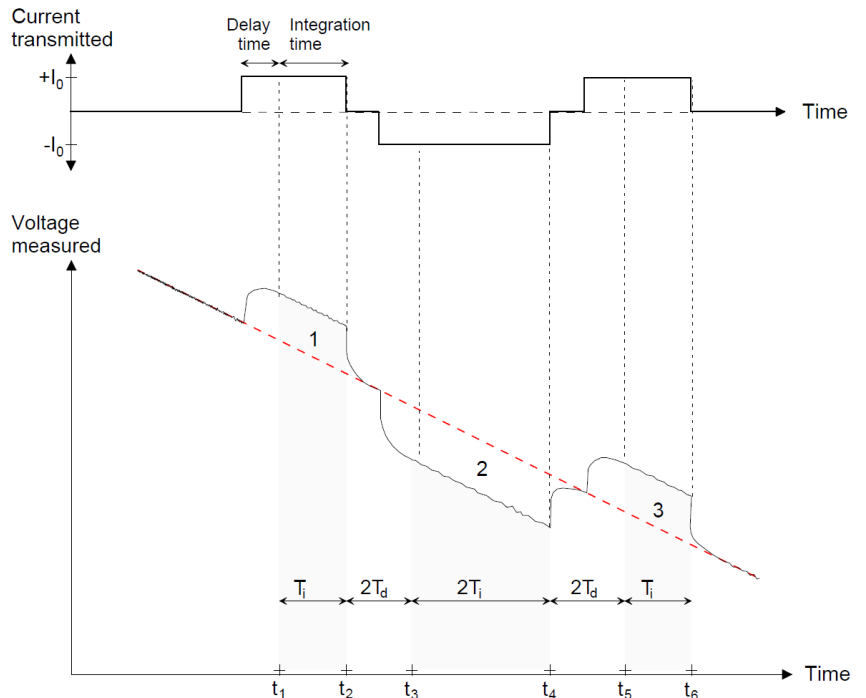
TIME DELAY

På grund af IP-effekter (induceret polarisation) i primært lerholdige aflejringer er det vigtigt, at der ikke måles umiddelbart efter, at strømmen tændes. Derfor skal der være en *Delay time* (se Figur 3.1) på minimum 200 ms inden målevinduet åbnes (T_1 Figur 3.1) og et tilsvarende Delay før næste senderpuls.

I områder med store IP-effekter kan det være nødvendigt at anvende en længere *Delay Time*. IP-efekten kan undersøges ved over en bestemt målekonfiguration at variere Delay Time fra f.eks. 100 ms til 1000 ms med en Integration Time på 200 ms. Når måleværdierne er konstante, er *Time Delay* tilstrækkelig stor. I valg af *Time Delay* skal der dog tages højde for eventuelle variationer i IP-signalet i kortlægningsområdet.

GENTAGNE MÅLINGER

For hver konfiguration stakkes data fra minimum to målecykluser. Afvigelsen mellem data fra de to målecykluser beregnes i instrumentet og ligger normalt under 1%. Er afvigelsen over 1%, skyldes det typisk dårlig elektrodekontakt, baggrundsstøj eller instrumentfejl. Dårlig elektrodekontakt kan, som tidligere beskrevet, reduceres ved at tilføje saltholdig væske omkring elektroderne eller ved at tilslutte flere elektroder til samme kabeludtag. Er det ikke muligt at foretage to gentagne målinger, som varierer mindre end 1%, vil flere målinger normalt ikke give forbedrede resultater. Med denne begrundelse er det ikke nødvendigt at foretage mere end to gentagne målinger per måleopstilling. Kan der ikke opnås en reproducerbarhed på bedre end 1% for 90% af målingerne, bør feltarbejdet indstil-



Figur 3.1 Skitse af en målecyklus. Øverste kurve viser senderstrømme. Nederste kurve viser det resulterende potentiale i jorden. For at undgå IP-effekter foretages målingerne i Integration Time vinduerne (T_i) når. Der foretages ialt fire målinger på én cyklus (+ - - +)

les. Normalt vil dette kun blive aktuelt efter meget lange periode uden regn.

SENDERSTRØM

For at opnå et højt målesignal og derved et godt signal-støjforhold, skal senderstrømmen være så høj så muligt. Typisk anvendes en senderstrøm på 100 mA, afhængig af de lokale forhold. Der bør ikke måles med en senderstrøm under 10 mA.

ELEKTRODEOPLADNINGSEFFEKT

Hvis man ikke anvender de standard-måleprotokoller, der følger med som en del af instrumentsoftwaren, eller protokollerne beskrevet ovenfor, skal protokollerne tilrettes således, at der går minimum 5 s, fra en spydelektrode er anvendt som strømmelektrode, til den anvendes som potentialelektrode /3/. Dette er specielt aktuelt i takt med, at der anvendes måleudstyr med mulighed for måling af spændingsfald på mange spydelektroder samtidig.

3.4 FELTNOTATER

For hver enkelt feltdag skal vejr- og jordbundsforhold beskrives. Desuden noteres det, hvorvidt der er særlige forhold og problemer, som kan have

betydning for datakvaliteten, herunder afstand til veje, grøfter, kabelføringer, gylletanke osv.

**3.5
OPSUMMERING**

Proceduren for tjek af instrumenter kan opsummeres, som vist i Tabel 3.1.

Emne	Beskrivelse
Måleopstilling og positionering	Der kan udføres spydelektrodetest for at tjekke spydelektrodekontakt og fejl i måleopstillingen
	Koordinater i profilets endepunkter, knækpunkter og for hver kabellængde
	Kabellængden må ikke afvige mere end 1% i forhold til den nominelle længde. Tjekkes en gang om året og ved kabelreparation
	Max. knæk på profil er 20 grader. Større knæk kræver korrektion eller fjernelse af data
Målekonfiguration og datatæthed	Gradient array eller Wenner array målekonfigurationer beskrevet i form af protokollerne Grad4S8, Gad4L8, WennerS, WennerXL
	Tiden fra spydelektrode er anvendt som strømeelektrode, til den anvendes som potentialelektrode, min. 5 s.
	Alternativt, egne protokoller med en datafordeling svarende til de anbefalede protokoller
Koblinger og støj	Afstand til vildthejn mv. min. 20-25 m
	Afstand til grøfter, veje mv. min 5 gange bredden
	Afstand ved opstilling parallelt med højspænding min 50 m
	Kabelføringer krydses vinkelret
Målecyklus	Tidsforsinkelse (Delay Time) min. 0,2 s. Måleinterval (Integration Time) min. 0,3 s.
	Min 2 gentagne målinger per datapunkt. Reproducerbarhed bedre end 1% for 90% af datapunkterne.
	Basisstrøm 100 mA og gerne højere. Min. strøm 10 mA.

Tabel 3.1 Måleprocedure

4 DATABEHANDLING OG DOKUMENTATION

I det følgende gennemgås processering, inversion samt dokumentation af data. Der er i teksten taget udgangspunkt i, at processering og inversion

af data foretages i Aarhus Workbench. Enkelte rådgivere foretager dataprocessering og 2D-tolkning uden brug af Aarhus Workbench.

4.1 PROCESSERING

Processeringen af data foretages i ERT-moduliet i Aarhus Workbench.

end 10% af data, skal årsagen klarlægges og beskrives i rapporteringen.

Under indlæsningen koordinat- og kotesættes data, således at denne information kan anvendes ved evaluering og tolkning af data. Den uniforme datausikkerhed sættes til 5% (1.05).

Rådata og processerede data præsenteres som pseudosektioner og evt. som datasektioner. Det skal fremgå, hvor der er slettet data. Pseudosektionerne skal fremstilles uden interpolation/glatning.

Data, hvor fejlen på to gentagne målinger overstiger 5% fjernes.

1D SONDERINGER

Processeringen foretages ved en visuel inspektion af data, hvor afvigende datapunkter fjernes. Efterprocessering af data kan evt. foretages på baggrund af en indledende tolkning af data, hvor bl.a. datatilpasningen kan bruges som støtte til at udpege områder, hvor data evt. skal kasseres eller tilskrives større usikkerhed.

Opsplitningen af et datasæt til 1D-sonderinger til 1D-LCI tolkning, skal ske i uniforme intervaller på baggrund af konfigurationernes laterale fokuspunkter. Laterale fokuspunkter for gradient-array konfigurationer er angivet i GFS rapporten ref. /10/. Som standard sættes sonderingsintervallerne til 2 gange den uniforme elektrodeafstand.

Andelen af kasserede datapunkter bør ikke overstige 10% af de mulige data pr. datasæt/profil jvf. de anvendte målekonfigurationer. I de max. 10% indregnes både data, der kasseres i felten, og data, der slettes under processeringen. Er der kasseret mere

Det er ofte en fordel at midle data fra samme konfigurationer indenfor sonderingsintervallerne. Standardafvigelsen på det midlede datapunkt er summen af den uniforme standardafvigelse plus standardafvigelsen for datamidlingen.

4.2 TOLKNINGSMETODIKKER

Der foretages både 1D-LCI tolkninger og en 2D-tolkninger af MEP-dataerne. 2D tolkningerne kan enten foretages med RES2DINV eller med Aarhus Workbench interne 2D-tolkningskode (AarhusInv). RES2DINV virker som et plug-in-program til Aarhus Workbench, men kræver dog en særskilt licens, mens Aarhus Workbench

interne 2D-kode ikke kræver en særskilt licens.

Datagrundlaget for de forskellige tolkninger skal være det samme, dog kan sonderinger med få datapunkter udelades i 1D-LCI tolkningen.

Ved at sammenligne resultatet af forskellige tolkningsmetoder opnås en

vurdering af mulige alternative tolkninger, ligesom fordelene ved den enkelte metode udnyttes.

1D-LCI

1D-LCI tolkning foretages i Aarhus Workbench. Der bør laves både en fålagstolkning og en mangelagstolkning af data, og der skal beregnes "Depth of investigation" (DOI) estimater.

I en fålags LCI-tolkning anvendes en model med typisk 4-6 lag, og der opnås en modelsektion med skarpe laggrænser. Ved en LCI-fålagstolkning udregnes også en modelparameteranalyse, der indeholder information om, hvor godt de enkelte modelparametre er bestemt. anbefalede LCI-indstillinger for fålagstolkninger for en sonderingsafstand på 10 m (elektrodeafstand 5 m):

- Laterale bånd på modstande: 1.2
- Laterale bånd på dybder: 1.2. Det vil ofte være en fordel at gøre dette bånd strammere for de dybereliggende lag, da båndet angives relativt til dybden.
- De korte konfigurationer (vertikalt fokuspunkt tæt på overfladen) er i nogle tilfælde meget påvirket af overfladenære inhomogeniteter. For at kunne tilpasse disse konfigurationer kan det i nogle tilfælde være nødvendigt at indføre et meget tyndt 1. lag (0.5-1m) uden laterale bånd.
- Antallet af lag i modellen må afstemmes efter det pågældende dataset og/eller de geologiske forhold.

I ref. /8/ er der foretaget et tolkningsstudie med henblik på at fastlægge de optimale bånd for lagmodstande og laggrænser for fålagstolkninger

Ved en mangelags LCI-tolkning anvendes 1D-modeller, hvor laggrænserne er fikseret, således at der kun inverteres for modstanden af lagene. Dette resulterer i et blødt billede af modstandsforholdene uden skarpe

laggrænser. Modelparameter-analysen fra en mangelagsmodel bør ikke anvendes, da den primært er styret af de mange bånd.

Anbefalede LCI-indstillinger for mangelagstolkninger for en sonderingsafstand på 10 m (elektrodeafstand 5 m):

- 15-25 lag i modellen.
- Tykkelsen af lagene skal stige med dybden.
- Laggrænserne fikseres
- Laterale bånd på modstande: ~1.2
- Vertikale bånd modstande: ~2
- Tykkelse af første lag ~0.5 x mindste fokusdybde for anvendte konfigurationer.
- Sidste laggrænse placeres dybere end det dybestliggende vertikale fokuspunkt (~1.5 x dybestliggende vertikale fokuspunkt). Beregnede DOI-værdier kan evt. anvendes til at fastlægge, hvor dybt sidste laggrænse bør placeres.

For både fålags- og mangelags-LCI-tolkninger skal et MEP-profil tolkes i én samlet LCI-sektion.

1D-LCI-tolkningsresultaterne følges som minimum af et plot, der viser dataresidualet for de enkelte 1D-sonderinger.

En nyere mulighed i Aarhus Workbench er at anvende en såkaldt *sharp* modelopsætning. Med en *sharp* modelopsætning opnår man en modelsektion med færre men skarpere resistivitetsovergange (ref. /11/). Som udgangspunkt kan man anvende *medium* for den horisontale *sharpness* og *loose* for den vertikale *sharpness* i et lagdelt geologisk miljø.

2D TOLKNING MED AARHUSINV

Ved 2D-tolkning med AarhusInv kan man som udgangspunkt anvende samme inversionsopsætning mht. modeldiskretisering og laterale og

vertikale bånd som ved 1D-LCI tolkningerne.

2D TOLKNING MED RES2DINV

Tolkningen i RES2DINV (ref. /6/) foretages med udgangspunkt i standard programindstillinger. Den topografiske information skal inddrages i tolkningen. Tolkning med RES2DINV kan med fordel foretages gennem Aarhus Workbench, da overblik over tolkningsindstillinger og dokumentation herfor, er let tilgængelig for alle parter.

Modellen opsættes, således at de dybestliggende modelkasser placeres i ca. samme dybde, som det dybestliggende vertikale fokuspunkt. Afvigelser fra denne standard følges af en redegørelse.

I 2D-tolkning vil det ofte være en fordel at anvende en større vægtning af de laterale strukturer i forhold til de vertikale strukturer. I RES2DINV gøres dette ved at sætte et "V/H flatness" filter til 0,25.

Ønsker man, at modelresultatet fremtræder med skarpere laggrænser, anvendes en L1-norms løsning.

I iterationsforløbet vælges modelsektionen, hvor residualet er lille, uden at modelsektionen præges af modstandsektremiseringer (ikke nødvendigvis den sidste iteration). Datatilpasningen (RMS-værdien) skal fremgå sammen med det endelige tolkningsresultat.

En RMS-værdi for en 2D tolkning på 5 svarer ca. til et residual i en 1D-LCI tolkning på 1 for 5% uniform støj på alle data.

4.3 RAPPORTERING

I forbindelse med rapporteringen dokumenteres det, at måleudstyret har fungeret optimalt, og at de målte data er af en tilfredsstillende kvalitet.

Dokumentation for, at måleudstyret fungerer korrekt, vedlægges som et rapportbilag med resultatet af de seneste tests, udført som beskrevet i afsnittet "Måleudstyr" på side 3. I bilag 1 findes et standardbilag, som definerer, hvordan resultatet af de udførte test skal dokumenteres.

Følgende præsentationer vedlægges afrapporteringen som plots:

- Tolkningsresultaterne som modelsektioner inkl. DOI-information

(DOI kan evt. bruges til at afblænde 1D-modellerne).

- Pseudosektion for rådata og filtrerede data. Pseudosektionerne skal fremstilles uden interpolation/glatning.
- 2D-tolkning: Plot af forskellen mellem målte data og modelrespons (differenssektion).
- 1D-tolkning: Plot der viser dataresidualet for de enkelte sonderinger.

GERDA

Rådata, processerede data og tolkningsresultater indrapporteres til GERDA sammen med relevant "Survey info".

5 REFERENCER

- /1/ ABEM, 1999, Instruction manual - SAS4000/SAS1000
- /2/ Dahlin T. and Loke M. H., 1998, Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling, *Journal of Applied Geophysics* 38, p.237-249
- /3/ Dahlin T., 2000, Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays
- /4/ Dahlin, T. and Zhou, B., 2002, Gradient and mid-point-referred measurements for multi-channel 2D resistivity imaging, *Procs. 8th Meeting Environmental And Engineering Geophysics, Aveiro, Portugal, 8-12 September 2002*, 157-160
- /5/ Dahlin, T. and Zhou, B., 2004, A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, Submitted paper.
- /6/ Geotomo, 2002, Res2Dinv - Rapid 2D Resistivity and IP inversion using least-squares method
- /7/ Esben Auken, Anders V. Christiansen, Bo H. Jacobsen, Nikolaj Foged and Kurt I. Sørensen, 2003, Part A: Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data, submitted to *Exploration Geophysics*
- /8/ Foged, Nikolaj, 2001, Inversion med lateralt sammenbundne modeller af 2-dimensionale stokastiske resistivtetsfordelinger, speciale, Geologisk Institut, Geofysisk Afdeling, Aarhus Universitet.
- /9/ GeoFysikSamarbejdet, 2003, Indberetning af data til GERDA
- /10/ GeoFysikSamarbejdet, 2005, Processering og tolkning af MEP-data målt med gradient-array-konfigurationer.
- /11/ Vignoli, G., Fiandaca, G., Christiansen, A. V., Kirkegaard, C., and Auken, E., 2014, Sharp Spatially Constrained Inversion (sSCI) with applications to transient electromagnetic data: *Geophysical Prospecting*.