

GEOFYSIKSAMARBEJDET

**Geologisk Institut
Aarhus Universitet**

INVERSION AF DATA FRA RESISTIVITETSLOGS

MAJ 2008

INDHOLD

RESUME (1)

INDLEDNING (2)

Borehullet (2.1).....	3
Resistivitetslog (2.2).....	4
Tilsyneladende modstand (2.3).....	5

LOGSTUDIER (3)

Typekurver (3.1).....	6
Følsomhedskurver (3.2).....	8

MODELSTUDIER (4)

Resultater (4.1).....	10
-----------------------	----

INVERSION AF FELTDATA (5)

Inversionsresultater (5.1).....	13
---------------------------------	----

SUPPERENDE LITTERATUR (6)

OPSUMMERING (7)

REFERENCER (8)

1 RESUME

I et borehul hvori der står boremudder vil boremudderet trænge ud i formationen. Jorden omkring borehullet kan derfor i grove træk beskrives med en cylindersymmetrisk model med tre lag: Borehullet er første lag, invasionszonen er andet lag og den uforstyrrede formation er tredje lag.

Med resistivitetslogging ønsker man bl.a. at fastlægge modstanden af den uforstyrrede formationen.

I dette projekt anvendes inversion til at fastlægge modstanden af den uforstyrrede formation. Inversionskoden er testet på en række syntetiske modeller (modelstudier), dvs. at der er foretaget analyser og inversion af syntetiske data. Disse modelstudier giver en ide om mulighederne for at fastlægge de forskellige parametre i den cylindersymmetriske model.

Modelstudierne viser at en trelagsmodel med borehul, invasionszone og den uforstyrrede formation er stærkt lagundertrykt. Dvs., at det ikke er muligt at fastlægge invasionszonens parametre (modstand og tykkelse). Derimod viser modelstudierne at det er muligt præcist at fastlægge formationens modstand.

Når der måles med en resistivitetslog antages det ofte, at en log med stor elektrodeafstand giver modstanden af den uforstyrrede formation. Men forholdene kan påvirke, f.eks. for en opadstigende model, at den målte modstand er højere end den faktiske formationsmodstand. Dette kan forklares ved at betragte typekurverne for den cylindersymmetriske model (figur 3.1). Kurverne har et stort overshoot for opadgående modeller og et lille under-shoot for nedadgående modeller.

Ved at foretage inversion af data får man et langt bedre estimat af formationens sande modstand end blot ved at anvende loggens målinger direkte, da inversionen bl.a. tager højde for over-shoot og under-shoot.

Når data indsamles er de påvirket af de omkringliggende lag, hvilket vil give sig til kende i 1D-inversionen ved de såkaldte 2D-effekter. Effekterne kan mindskes, men ikke fjernes. Det gøres ved anvendelse af bånd mellem lagene og modellerne, kaldet LCI-tolkning.

For meget tynde lag er det ikke muligt at invertere sig frem til den sande modstand, da de målte tilsyneladende modstande er påvirket af de omkringliggende lag. En visualisering af inversionsresultatet giver dog et klart billede af lagets tilstedeværelse.

Inversion af feltdata gav uoverensstemmelser mellem fluidloggen og modstanden af boremudderet fastlagt ved inversionen. Årsagen til dette er ikke afklaret.

Denne rapport er primært en opsummering af hovedresultaterne i specialet: "Cylindersymmetrisk DC-respons. Implementering", Emil Nielsen, 2007. Rapporten indeholder derudover tolkningseksempler med magelagsmodeller, der har vist sig at give meget gode resultater.

Denne rapport og specialet kan hentes på GeoFysikSamarbejdets hjemmeside: www.gfs.au.dk.

GeoFysikSamarbejdet, Aarhus Universitet, maj 2008, Emil Nielsen, Nikolaj Foged og Anders Vest Christiansen.

2 INDLEDNING

I Danmark er der lavet mange boringer, hvori der er foretaget resistivitetsmålinger med forskellige typer logs. Data fra resistivitetsmålingerne er hidtil kun blevet behandlet kvalitativt. Ved at invertere data opnås en kvantitativ vurdering af data.

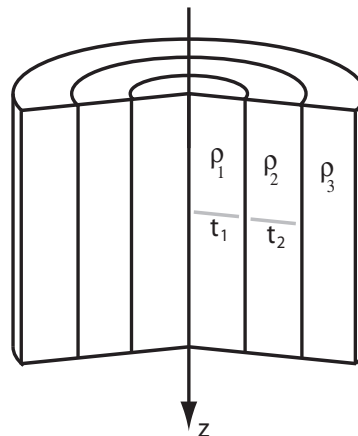
I denne rapport gives en introduktion til problemstillingen omkring inver-

sion af borehulsdata og der præsenteres inversionsresultater af felddata. Til det formål anvendes et udtryk for potentialet i en cylindersymmetrisk model, som beskrevet i /1/

Der skal gøres nogle betragtninger omkring borehullet og instrumenterne brugt til resistivitetsmålingerne, inden inversionen kan foretages.

2.1 BOREHULLET

Til beskrivelse af borehullet og de omkringliggende lag anvendes en cylindersymmetrisk model. En simpel model består af borehullet, en invasionszone og yderst den uforstyrrede formation, som illustreret i figur 2.1. Parametrene i en sådan model er de tre modstande: ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 og de to tykkelser: t_1 , t_2 .



Figur 2.1 Den cylindersymmetriske model for en trelagsmodel (vertikale laggrænser). Første lag er borehullet med parametrene ρ_1 og t_1 . Andet lag er invasionszonen med parametrene ρ_2 og t_2 mens tredje lag er den uforstyrrede formation med modstanden ρ_3 . Det giver fem modelparametre.

BOREHUL

Borehullets størrelse er langt hen ad vejen givet ved størrelsen af borehovedet. Der kan være afvigelser herfra som følge af caving eller mudcake. I borehullet er der boremudder, som typisk er en blanding af vand, løsboret materiale og eventuelle tilsætsmidler (f.eks. bentonit eller CMC). Modstanden af boremuddet fastlægges normalt med en fluid resistivitetslog.

INVASIONSZONE

Tykkelsen og modstanden af invasionszonen er svære at kvantificere. Zonen opstår som følge af indtrængning af boremudder i formationen. Størrelsen af invasionszonen afhænger bl.a. af formationens porøsitet og permeabilitet, mens modstanden afhænger af boremuddets modstand og formationsfaktoren.

Invasionszonens modstand antages at være graderende dvs. at der ikke er en skarp modstandscontrast mellem lagene. Dette besværliggør bestemmelsen af dette lag. Der er artikler som beskriver forskellige metoder til at repræsentere invasionszonen på. I det omtalte speciale repræsenteres invasionszonen med ét lag hvor modstanden er konstant.

FORMATION

Modstanden af den uforstyrrede formation er den parameter man primært er interesseret i at få fastlagt. For typiske danske sedimenter kan modstanden ligge mellem 1 og flere tusinde Ωm .

I borehullet vil man forvente, at boremuddret har lav modstand. Infiltrationen af boremuddret i formationen medfører derfor oftest en lavere modstand af invasionszonen end den uforstyrrede formation.

**2.2
RESISTIVITETSLOG**

En resistivitetslog indeholder som minimum fire elektroder, men alle er ikke nødvendigvis placeret i borehullet. Til beskrivelse af loggen anvendes punktelektroder. A og B betegner strømmelektroderne, mens M og N betegner potentialelektroderne. Afhængigt af loggen er elektroderne placeret i forskellige konfigurationer. De hyppigst anvendte typer resistivitetslogs er normal, lateral og fokuseret lateralog.

Normallogkonfigurationen består af én strøm- og én potentialelektrode i borehullet. De andre to elektroder er placeret på overfladen langt fra borehullet.

Laterallogkonfigurationen består af én strøm- og to potentialelektroder i borehullet, mens den sidste strømmelektrode placeres på overfladen.

Den fokuserede lateralogkonfiguration indeholder en kombination af flere strøm- og potentialelektroder.

Eksempler på elektrodekonfigurationer for en kommerciel lateralog er givet i tabel 2.1

Generelt gælder der for de forskellige typer logs, at en større afstand mellem elektroderne, giver en større indtrængning ud i formationen. Derudover gælder der, at logs med små elektrodeafstande bedre vil kunne

identificere tynde horisontale lag (målingerne vil dog være påvirket af boremuddret). Logs med store elektrodeafstande kan ikke identificere tynde horisontale lag, men er mindre påvirket af boremuddret.

log	A	M	N	B
8''	9	8.8	0	> -8
16''	9	8.6	0	> -8
32''	9	8.2	0	> -8
64''	9	7.4	0	> -8

Tabel 2.1 Elektrodekonfigurationer for en lateralog hvor tallene angiver placeringen på dybde-aksen. Negative værdier angiver, at elektroden er placeret på overfladen

Anvendes der flere forskellige konfigurationer i borehullet, giver det flere datapunkter og derved bedre betingelser for inversionen.

Som omtalt indeholder en trelagsmodel fem modelparametre. Optimalt skal man have mindst lige så mange datapunkter som modelparametre. Antallet af modelparametre kan dog reduceres hvis man har forhåndsinformation om nogle parametre. Dette kan f.eks. være borehullets radius. Denne information indføres herefter som a priori-viden i inversionen.

2.3 TILSYNELADENDE MOD- STAND

I forbindelse med resistivitetslogging måles potentialeforskel imellem de to potentialelektroder. Potentialeforskellen (ΔV) omregnes til en tilsyneladende modstand (ρ_a) vha. følgende ligning

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

I er strømmen og K er den geometriske faktor, der er givet ved:

$$K = 4\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

AM, BM, AN og BN er afstanden mellem elektrodeparrene. (A og B er strømmelektroder, M og N er potentialelektroder).

3 LOGSTUDIER

I dette kapitel præsenteres typekurver for en normallog over en tolagsmodel. Endvidere præsenteres følsomhedskurver for en laterallog i en model med hhv. horisontale og vertikale lag.

Resultatet af disse plots kan anvendes til at beskrive, hvilke resultater der kan opnås med en given log, bl.a. indtrængningsdybden.

3.1 TYPEKURVER

Typekurverne for tolagsmodeller (model som i figur 2.1 blot med to lag) målt med en normallog, er vist på figur 3.1. Typekurverne er beregnet for en række tolagsmodeller med varierende forhold imellem første og andet lags modstand. Til beregningen er der anvendt forskellige elektrodeafstande (a -afstande).

Langs x -aksen i figur 2.1 plottes forholdet mellem a -afstanden og borehullets diameter (d). Langs y -aksen forholdet mellem den beregnede tilsyneladende modstand og modstanden af første lag. Modstanden af første lag er normeret til $1 \Omega\text{m}$.

Typekurven for en to-lagsmodel, hvor forholdet imellem ρ_2 og ρ_1 er 1000, er vist som den øverste kurve i figur 3.1. På denne typekurve ses det tydeligt at den tilsyneladende modstand på et tidspunkt overstiger de $1000 \Omega\text{m}$. Denne effekt kaldes overshoot, da den tilsyneladende modstand overstiger den faktiske lagmodstand.

Samme fænomen gør sig gældende for de nedadstigende kurver. Her bli-

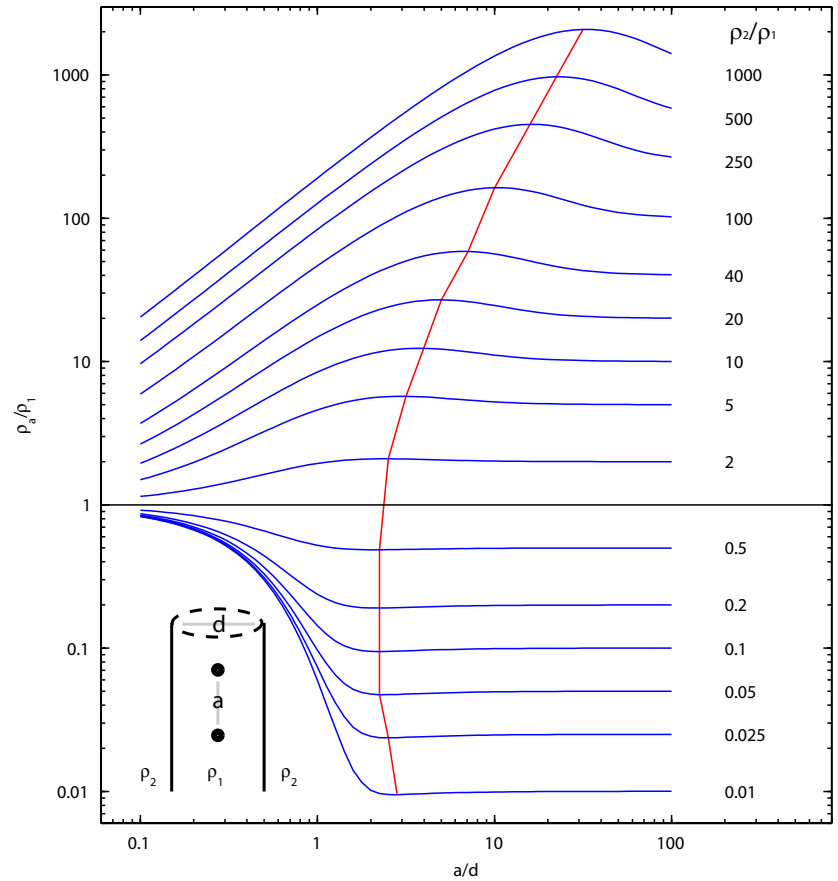
ver den tilsyneladende modstand lavere end modstanden i andet lag - dette kaldes et under-shoot. Under-shootet er dog langt mindre end over-shootet.

I en given situation kan man ende med at måle på over- eller under-shootet, hvilket betyder at den målte tilsyneladende modstand afviger væsentligt fra den sande modstand.

Eksempel: Et 8" borehul ($d=16''$) logget med en 128" log giver et a/d forhold på 8. Denne måling vil iflg. figur 3.1 være kraftigt påvirket af over-shoot, hvis modstanden i formationen er 100 gange højere end boremudderet.

Over- og under-shootet bliver større, jo større forskellen er mellem modstanden i første og i andet lag. Det ses også, at placeringen af det maksimale over-/undershootet bevæger sig ud ad x -aksen for større a -afstand (fastholdt borehulsdiameter). På figur 3.1 er maksimum for over- og undershootet markeret med en rød linje gennem typekurverne.

GEOFYSIKSAMARBEJDET



Figur 3.1 Typekurver for tolagsmodeller og normallog. Modstanden af første lag er ρ_1 , mens andet lags modstand er ρ_2 . For hver kurve varieres forholdet ρ_2/ρ_1 . Modellen er vist i nederste venstre hjørne. Borehullet har diameteren d , og afstanden mellem potential- og strømelektroden er a . Den røde linje angiver maks. og min. for over- og undershootet.

3.2 FØLSOMHEDSKURVER

For at få et indtryk af hvad der kan opløses med en given type log kan man undersøge dens følsomhedsfunktion. Når der foretages modstandsmålinger, er den målte modstand et vægtet middel af modstanden i det jordvolumen hvor strømmene løber. Området hvor følsomheden er størst, har den største vægt på den målte modstand.

Definitionen af følsomhedsfunktionen er givet ved udtrykket for potentialet differentieret mht. modelparametrene.

Følsomhedsfunktioner for en vertikal cylindersymmetrisk model (model som i figur 2.1) er vist i figur 3.2. De fem figurvinduer, indeholder følsomhedsfunktioner for de fem elektrodekonfigurationer (a-afstande), fra tabel 2.1.

Følsomhedskurverne beregnes ved først at bestemme potentialet for en trelagsmodel (V) indeholdende et meget tyndt andet lag, med en lille modstandskontrast, samt at beregne potentialet for et homogent helrum (V_{fs}). Herefter divideres de to potentialer med hinanden (V/V_{fs}). Det tynde andet lag placeres i forskellige

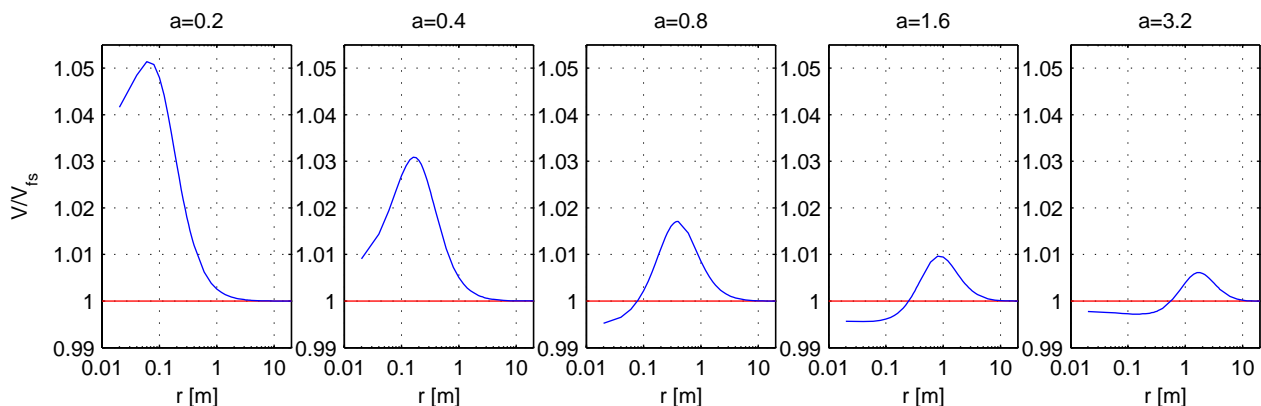
afstande fra centrum af borehullet, hvorved man får følsomhedskurverne i figur 3.2. Den røde vandrette linje indikerer som før hvor $V/V_{fs}=1$.

Bemærk at $V/V_{fs}=\rho_a/\rho_{a,fs}$. Dette fremgår ved sammenligning med formlen for tilsyneladende modstand i afsnit 2.3

Som det fremgår af figuren er følsomheden størst for de korte elektrodekonfigurationer. Som forventet ligger den maksimale følsomhed længere inde i formationen for stigende elektrodeafstand. Den maksimale følsomhed er ca. lig med den halve elektrodeafstand for en laterallag.

I figur 3.4 ses følsomhedskurver for en 3-lagsmodel med horisontale lag - som vist figur 3.3. Følsomhedskurverne er beregnet på samme måde som for den vertikale model, med den tilføjelse, at der er beregnet i forskellige dybder.

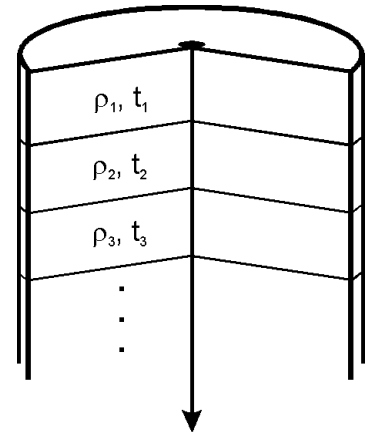
I figur 3.4 plottes således forholdet mellem potentialet beregnet for trelagsmodellen og det homogene helrum langs x-aksen mens dybden til loggens midtpunkt, plottes langs z-aksen. Den røde lodrette streg



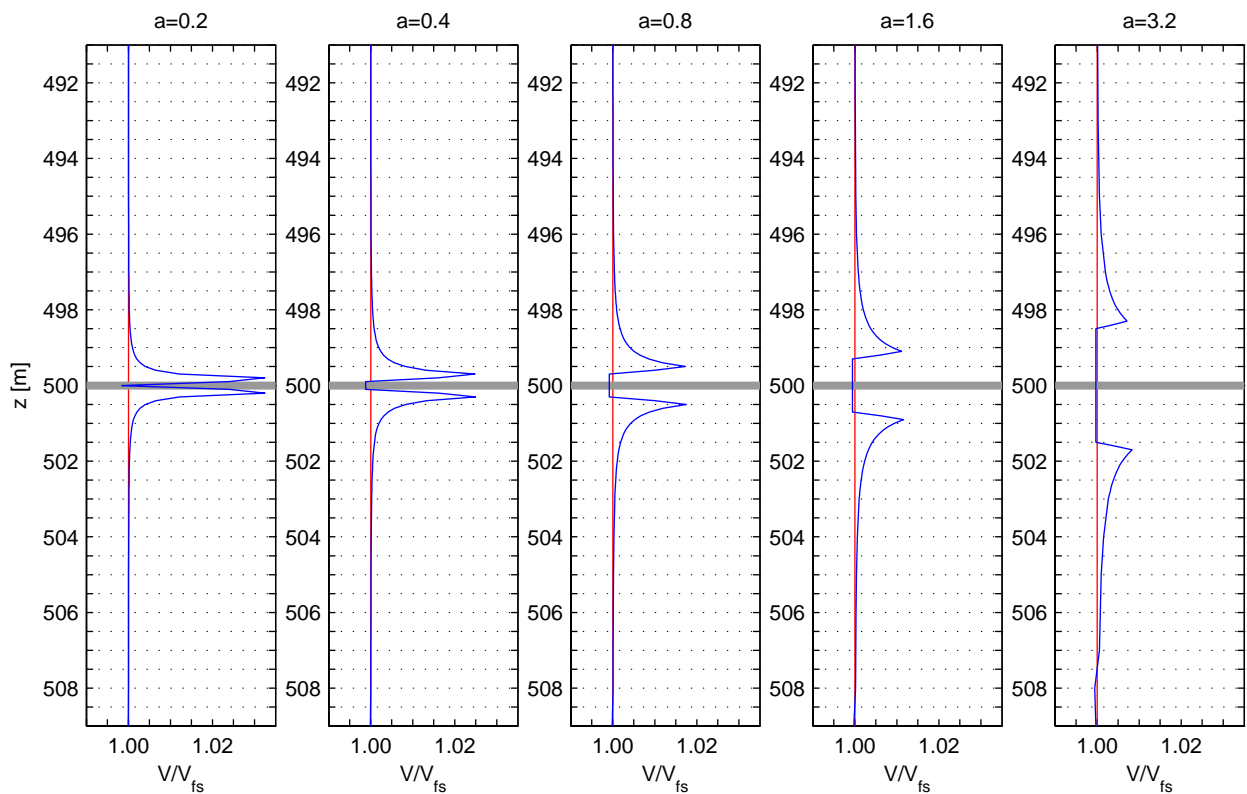
Figur 3.2 Følsomheden for model med vertikale lag. De fem figurvinduer repræsenterer a-afstandene 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 og 3.2m. Forholdet mellem potentialet beregnet for trelagsmodellen og det homogene helrum er plottet langs y-aksen. Den røde streg indikerer når dette forhold er 1.

angiver hvor forholdet mellem potentialet for trelagsmodellen delt med potentialet for et helrum er lig med 1. Den grå linie i figur 3.4 angiver det tynde lag i trelagsmodellen med midtpunkt i 500 m dybde.

Den maksimale følsomhed for alle fem konfigurationer er centreret omkring elektroderne. De korte elektrodekonfigurationer har således den bedste vertikale opløsningsevne.



Figur 3.3 Model med horisontale laggrænser



Figur 3.4 Følsomheden for model med horisontale lag. De fem figurvinduer repræsenterer a-afstandene 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 og 3.2m. Andet lag, $t_2=0.20\text{m}$., er markeret med den grå strek omkring $z=500\text{m}$. Forholdet mellem potentialet beregnet for trelagsmodellen og det homogene helrum er plottet langs x-aksen. Den røde strek indikerer når dette forhold er 1.

4 MODELSTUDIER

Man kan undersøge mulighederne for at bestemme en models parametre ved at foretage inversion af syntetiske data fra en kendt model (modelstudier). Herved kan det f.eks. undersøges hvor stor afstanden mellem loggens elektroder skal være, før man kan sige noget om den uforstyrrede

formationsmodstand. Modelstudier kan også give et indblik i, hvordan den cylindersymmetriske model er påvirket af ækvivalenser.

I det følgende præsenteres eksempler på inversion af syntetiske data.

4.1 RESULTATER

SYNTEISKE DATA

Fremgangsmåden er følgende: Først produceres der et datasæt ved forward beregning på en kendt model. Dette datasæt danner grundlaget for inversionen. Antallet af datapunkter i datasættet, er givet ved antallet af forskellige elektrodekonfigurationer (logs) der anvendes til forwardberegningerne. Der adderes støj til data for at afspejle rigtige feltdata. Dernæst udføres inversionen af datasættet.

I dette eksempel vil datasættet bestå af fire datapunkter svarende til en 8'', 16'', 32'' og 64'' log (elektrodekonfigurationer i tabel 2.1). Der er adderet 2% støj til de syntetiske data.

Modellerne er trelagsmodeller med vertikale laggrænser - som i figur 2.1.

I første omgang ser vi på modellerne i figur 4.1 a-b. Modstanden i det tredje lag varierer mellem 1 og 100 Ωm i 21 skridt. Modstanden i andet lag er en middelværdi mellem modstanden af første og tredje lag ($\rho_2 = (\rho_1 \rho_3)^{1/2}$), mens modstanden af første lag er konstant 10 Ωm (boremudder). Tykkelserne i modellen er: $t_1 = 0.2$ m (borehul) m og $t_2 = 0.02$ (invasionszone). I figur 4.1-a er modstanden for de 21 modeller plottet med cirkler; rød- ρ_1 , blå- ρ_2 , grøn- ρ_3 . Afstanden fra centrum af borehullet til de to laggrænser er plottet med cirkler i

figur 4.1-b; rød-afstand til 1. lag og blå afstand til 2. lag.

INVERSIONSRESULTATER

Inversionsresultaterne af de 21 modeller er plottet med X'er i figur 4.1 a-b.

Startmodellen for inversionerne er et homogent helrum på 10 Ωm , der er anvendt a priori på første lags parametre (boremudders modstand og radius af borehullet). Boremudders modstand er i startmodellen bundet med en usikkerhed på 10%, mens tykkelsen af første lag er bundet med en usikkerhed på 1%.

I figur 4.1 a-b er første lags parametre (rød) godt bestemte for alle 21 modeller. Dette skyldes primært anvendelsen af a priori information. Mere vigtigt er det, at modstanden af formationen (ρ_3 , grøn) generelt er godt bestemt. Tykkelsen af invasionszonen (t_2 , blå) genfindes ikke af inversionen. I dette tilfælde er invasionszonen kun 2 cm tyk, og data har således ikke nok information om dette lag til at udgangsmodellen kan genfindes.

Figur 4.1 c-d og e-f er opbygget på samme måde. I plot c-d er tykkelsen af invasionszonen (t_2) 0.1 m og i plot e-f er den 0.2m. I begge disse bestemmes formationsmodstanden (ρ_3 , grøn) meget godt. Den øgede tyk-

kelse af invasionszonen bevirker, at dette lag blive lidt bedre bestemt end i det første tilfælde, hvor invasionszonen kun var 2 cm tyk. Bestemmelsen af tykkelsen af invasionszonen (blå, i plot d ,f) er dog stadig dårlig.

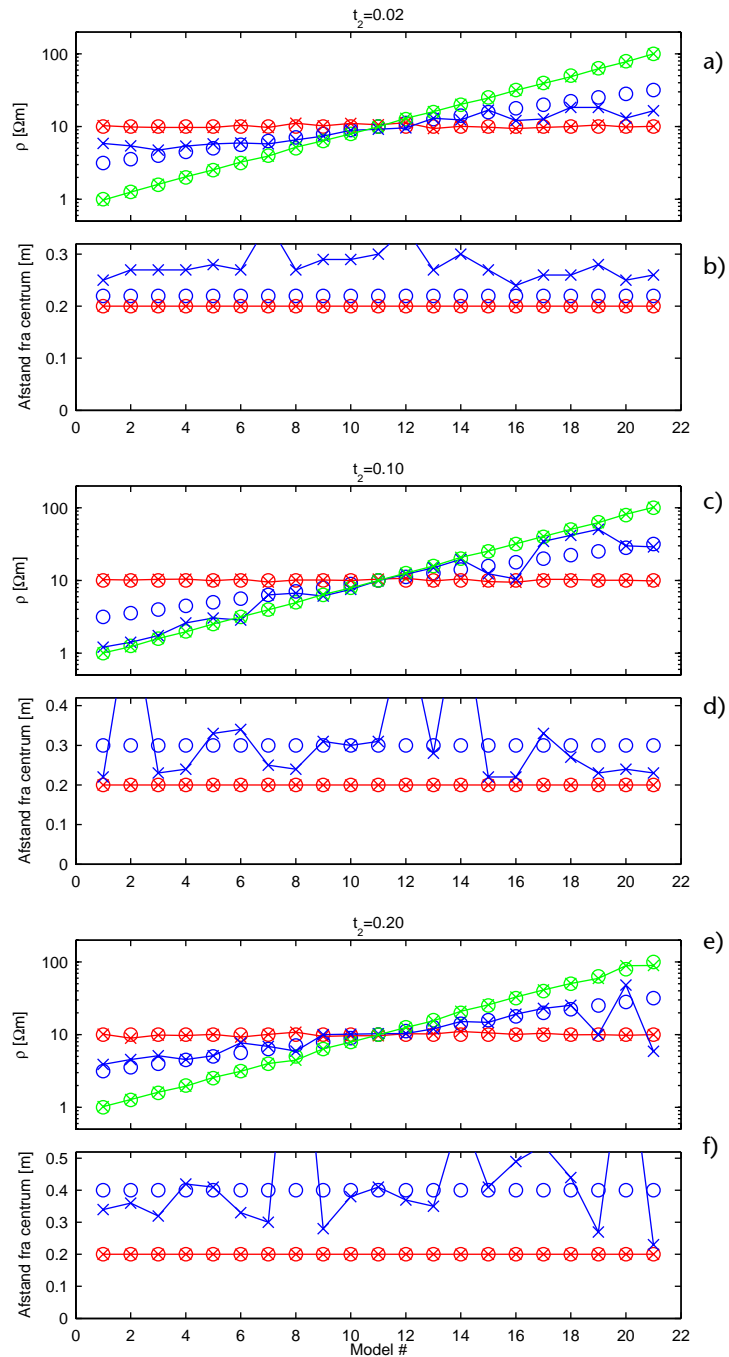
Modelstudierne viser, at der er store problemer i forbindelse med fastlæggelse af invasionszonens parametre. Det skyldes primært en kraftig lagundertrykkelse.

Dette kan illustreres ved at sammenstille responskurverne udregnet på baggrund af to modeller: 1) modellen der ligger til grund for data og 2) modellen der blev bestemt ved inversionen. Det viser sig at responskurverne for disse to modeller er sammenfaldende (ikke vist her). Øges tykkelsen af invasionszonen bestemmes parametrene gradvist bedre. Dette skyldes at man kommer ud af lagundertrykkelsen med voksende tykkelse af invasionszonen.

Modstanden af den uforstyrrede formation (ρ_3) er godt bestemt for alle modellerne. Dette viser sig at være generelt så længe invasionszonen ikke er mere end dobbelt så tyk som første lag.

Teoretisk set kan man altså ved at invertere resistivitetslogs opnå et godt estimat af formationsmodstanden, mens tykkelse og modstand af invasionszonen vil være meget dårligt bestemt.

I omtalte speciale er der også udført analyser med firelagsmodeller, repræsenterende borehullet, et cavitetslag, invasionszonen og den uforstyrrede formation. Cavitetslaget er et tyndt lag, der har til formål at kompensere for eventuelle variationer i borehullets størrelse, dvs. at lagets modstand er den samme som borehullets. For disse modeller har der været problemer med at finde en generel startmodel der kan anvendes på forskellige datasæt og give et acceptabelt data-residual.



Figur 4.1
 Figurinduerne hører parvist sammen, a-b, c-d og e-f. Den sande model er plottet med cirkler og inversionsresultaterne er plottet med krydser. Hvert par indeholder 21 3-lagsmodeller. I plot a er modstanden for lag 1-3 (rød, blå, grøn), og i plot b afstanden fra borehullets centrum til lag 1 og lag 2 (rød, blå). I plot a-b er tykkelsen af andet lag 0.02m i plot c-d er tykkelsen 0.1m og i plot e-f 0.2m.

5 INVERSION AF FELTDATA

I det følgende gives et eksempel på inversion af resistivitetsdata indsamlet i felten. Dataene stammer fra boring 97.951, og er hentet fra GERDA-databasen.

Data er indsamlet med fire laterallogs hvor afstanden mellem elektroderne er 16", 32" 64" og 128". Endvidere er der data fra en fluid- og gammalog m.fl.

Inden inversionen er data midlet til 1 meters intervaller. Dette mindsker antallet af modeller for at give et bedre overblik over resultatet. I intervallerne er der beregnet en standardafvigelse på data, der indgår som data-usikkerheden.

Til inversionen er LCI-metoden anvendt. Metoden giver mulighed for at parametrene kan kobles, ikke blot internt i de cylindersymmetriske modeller, men også modellerne imellem. Metoden er beskrevet i /8/. Der er foretaget en del inversionskørsler hvor forskellige modeller og sammensætningen af bånd og brug af a priori er blevet undersøgt.

Det har vist sig, at hvis man indfører modstanden fra fluidloggen som a priori på boremudderet, bevirker dette at log-dataene ikke kan tilpasses. Undlades a priori informationen fra fluidloggen opnås der gode data-tilpasninger. Dette er observeret for alle borehuller der er udført inversion af.

5.1 INVERSIONSRISULTATER

Der er foretaget inversion af data med en trelagsmodel, dvs. en model med borehul, invasionszone og den uforstyrrede formation og en mangelagsmodel (smooth). Resultatet af inversionene er vist i figur 5.1 og figur 5.2.

OPSÆTNING, 3-LAGS-MODEL

Opsætningen af startmodellen er summeret i tabel 5.1. I startmodellen

anvendes fikseret a priori på tykkelsen af første lag sat til borekronens størrelse. Til modstandene i startmodellen anvendes for første lag fluidloggen, for andet lag en middel mellem første og tredje lags modstand. Tredje lags modstand startes med værdien fra loggen med den største a-afstand. Modstandene er ikke bundet horisontalt. Der anvendes desuden vertikale bånd på modstandene i lagene.

Parameter	Startværdi	A priori	Bånd, horisontal	Bånd, vertikal
Modstand, lag 1 (ρ_1)	Fluidlog	-	-	1.02
Modstand, lag 2 (ρ_2)	$(\rho_1\rho_3)^{1/2}$	-	-	3.00
Modstand, lag 3 (ρ_3)	værdi fra længste log	-	-	3.00
Afstand til lag 2 ('dybde')	Radius af borehovedet (20 cm)	Fikseret	-	-
Afstand til lag 3 ('dybde')	Radius af borehovedet + 40 cm	-	-	1.50

Tabel 5.1 Oversigt over opsætningen af startmodel til 3-lagstolkning. Bånd er angivet som faktorer.

OPSÆTNING, MANGELAGSMODEL

Der er også foretaget inversion med en mangelagsmodel, i dette tilfælde 10 lag. Opsætningen af denne model er summeret i tabel 5.2. Ved denne form for inversion er de vertikale laggrænser i hver af de cylindersymmetriske modeller låste så der inverteres kun for modstandene. Første lag er borehullet, og de efterfølgende er en underinddeling af formationen med stigende lagtykkelser udefter.

I startmodellen er modstanden af første lag givet ved fluidloggen, modstanden af det sidste lag er givet ved loggen med største a-afstand, og for lagene herimellem er modstanden givet ved middelværdien mellem boremudders modstand og modstanden fra den længste log. I dette tilfælde er modstanden af boremudderet pålagt et svagt apriori-bånd. Derudover er der horisontale bånd mellem modstandene fra andet til sid-

ste lag, (ingen bånd mellem første og andet lag). Der er også et vertikale bånd på modstandene i modellen for at minimere udsving ned gennem boringen.

Der er foretaget kørsler med forskellige værdier af de horisontale bånd. Her viser det sig at stramme bånd mindsker 2D-effekter, men giver større residualer. Anvendes der et horisontalt bånd mellem alle lagene, også første og andet lag, medfører det, at modstanden af første lag bliver hævet. Jo strammere horisontale bånd jo højere bliver boremudders modstand. Undlades det horisontale bånd mellem første og andet lag og gives modstanden af første lag en svag a priori og et strammere vertikalt bånd, opnås det bedste resultat. Er modstanden af boremudderet (første lag) helt fri, vil der være store udsving i modstanden ned gennem borehullet.

Parameter	Startværdi	A priori	Bånd, horisontal	Bånd, vertikal
Modstand, lag 1 (ρ_1)	Fluidlog	-	-	1.02
Modstand, lag 2-9 ($\rho_2-\rho_9$)	$(\rho_1\rho_{10})^{1/2}$	-	1.50	3.00
Modstand, lag 10 (ρ_{10})	værdi fra længste log	-	-	3.00
Tykkelse, lag 1	Radius af borehovedet (20 cm)	Fikseret	-	-
Tykkelse, lag 2 - 9	10 cm - 58 cm	Fikseret	-	-

Tabel 5.2 Oversigt over opsætningen af startmodel til mangelagstolkning (13 lag). Bånd er angivet som faktorer.

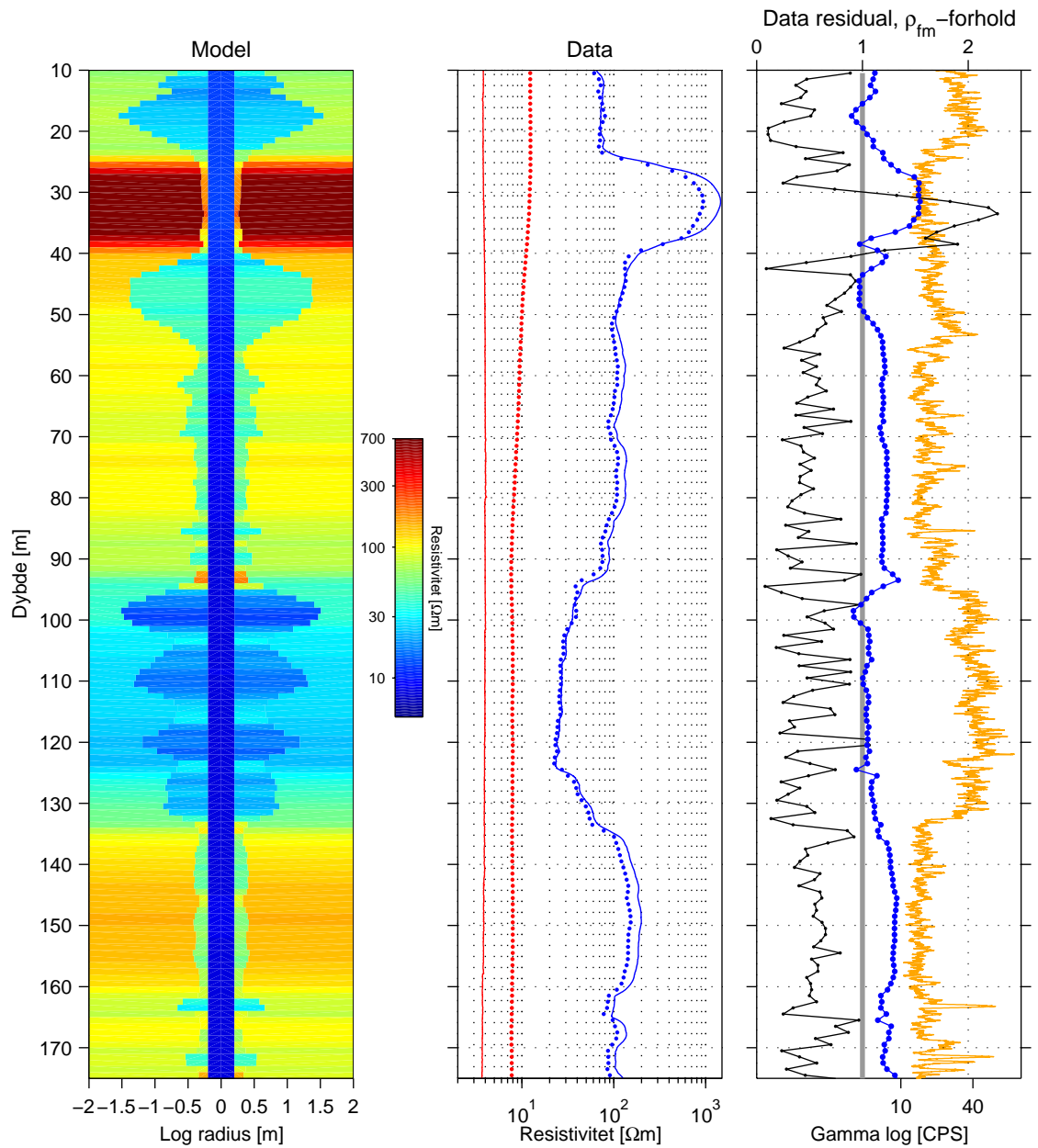
RESULTATER - KOMMENTAR

I det midterste figurvindue er følgende plottet: Fluidloggen (rød linie), den inverterede modstand af 1. lag/ boremudderet (røde prikker), 128" loggen (blå linie) og den inverterede modstand af sidste lag - formationsmodstanden (blå prikker). Forholdet mellem disse to serier (128"log /formationsmodstanden) er plottet med blå i sidste vindue. I det sidste figurvindue er også gammaloggen (orange) og dataresidualet (sort) plottet. Datatilpasningen er normalt til-

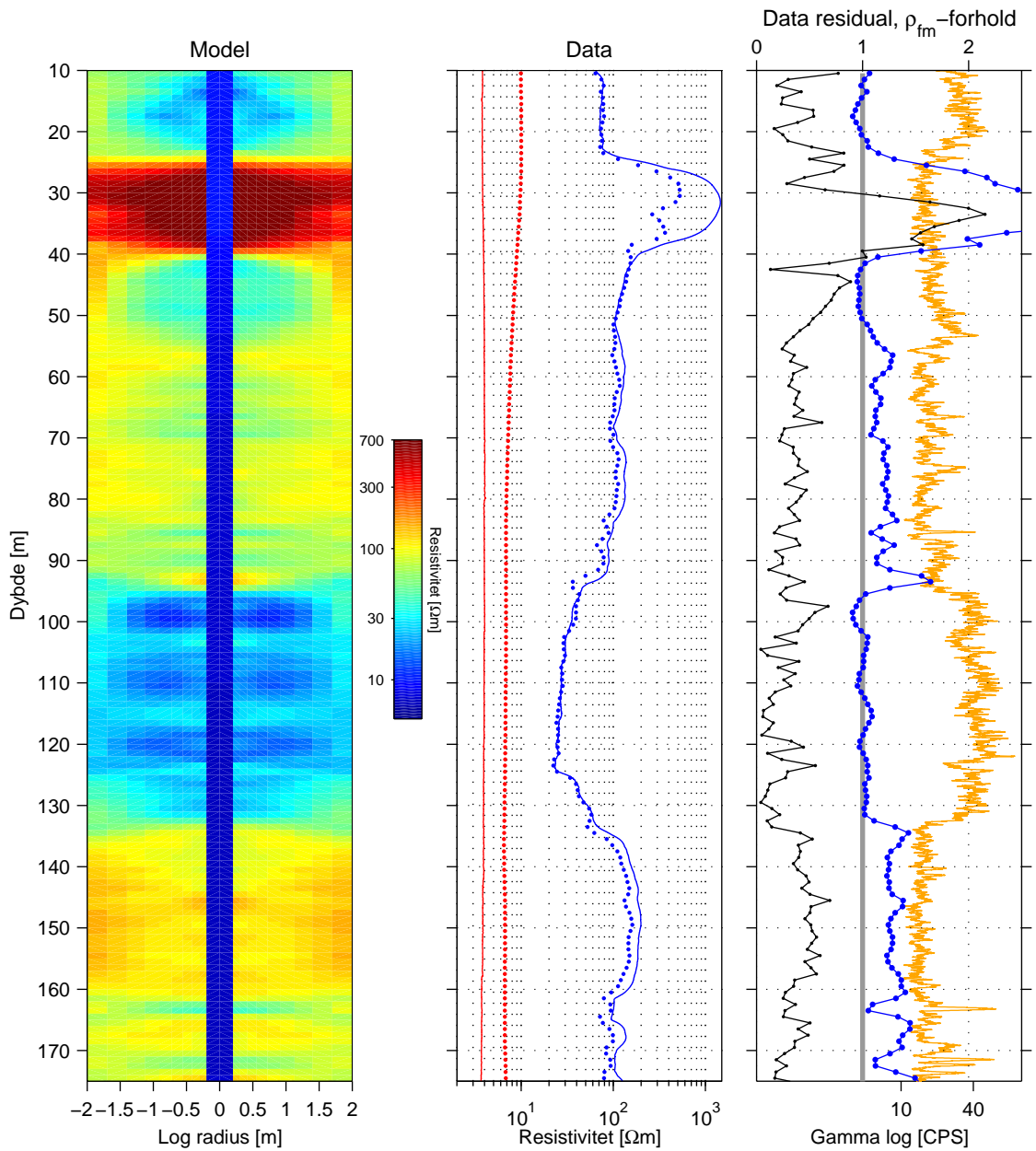
fredsstillende, hvis dataresidualet er mindre end 1.

Generelt er datatilpasningen (residualet) for mangelagstolkningen bedre end for 3-lagstolkningen, specielt i dybdeintervallet 90-130 m.

De teoretiske eksempler viste, at der opnås et bedre estimat af formationsmodstanden ved at anvende modstanden fra den inverterede model end ved blot at bruge måleværdien fra den længste log. Dette bekræftes



Figur 5.1 Inversion af boring 97.951 med trelagsmodel. Venstre plot: Inversionsresultat. Miderste plot: Rød linje - data fra fluidloggen, røde prikker - modstand af boremudder fra inversion (lag 1), blå linje - data fra 128" log, blå prikker formationsmodstanden fra inversionen (lag 3). Højre plot: Sort - dataresidualet, blå - forholdet mellem data fra 128" log og formationsmodstanden fra inversionen (de to blå serier fra midterste plot), orange - gamma-loggen.



Figur 5.2 Inversion af boring 97.951 med mangelagsmodel. Venstre plot: Inversionsresultat. Miderste plot: Rød linje - data fra fluidloggen, røde prikker - modstand af boremudder fra inversion (lag 1), blå linje - data fra 128" log, blå prikker formationsmodstanden fra inversionen (lag 3). Højer plot: Sort - dataresidualet, blå - forholdet mellem data fra 128" log og formationsmodstanden fra inversionen (de to blå serier fra midterste plot), orange - gamma-loggen.

af inversionen af felldata. Specielt inversionsresultatet for mangelagsmodellen (figur 5.2) viser dette tydeligt. I intervaller med ler, f.eks. 10-20m og 100-130m dybde, er modstanden fra 128" loggen og fra inversionsresultatet sammenfaldende. I formationer bestående af ler er der ikke noget undershoot af betydning og 128" loggen vil i dette tilfælde give den sande formationsmodstand. Forskellen mellem 128" loggen og den inverterede modstand er størst i områder med sand/høje modstande. I de sandede formationer har vi et stort overshoot og måleværdien modsvarer derfor ikke den sande formationsmodstand.

Forskellen mellem modstanden målt med 128" loggen (blå streg) og modstanden af sidste lag fra inversion (blå prikker) i andet figurvindue (figur 5.1 og figur 5.2) viser således, den "gevinst" man opnår ved at invertere log-dataene. Forholdet mellem disse to kurver er plottet med blå i plottet til højre. I dybdeintervallet 140-160 m, figur 5.2 er der ca. en faktor 1,3 forskel mellem modstanden fra 128"-loggen og formationsmodstanden fra den inverterede model. Den blå kurve viser således den "fejl", man gør ved at bruge at måleværdien fra 128" loggen som formationsmodstand.

Som det fremgår af figur 5.2, kan "fejlen" være op til en faktor 2 (100 %) for denne log.

Modstanden i sidste lag giver ikke fyldestgørende information omkring meget tynde lag - f.eks. i dybden 163 meter. Dette skyldes at modstanden af de yderste lag primært fastlægges af de lange logs. Strømsystemet fra disse midler et stort volument og kan derfor ikke opløse tynde lag. For at få den fulde tilgængelige information skal man derfor se på visualiseringen af borehullet i det første panel, eller lave et plot af modstanden af første lag efter borehullet (ikke vist her).

Invasionszonen kan ikke opløses korrekt i hverken 3-lagstolkningen eller i mangelagstolkningen. I 3-lagstolkningen (figur 5.1) har den således kraftige fluktuationer og urealistiske værdier i nogle intervaller. I mangelagstolkningen (figur 5.2) er det generelt set svært at erkende invasionszonen.

Som nævnt er der uoverensstemmelser mellem boremuddermodstanden målt med fluidloggen og modstanden af første lag bestemt ved inversionen. Dette ses for både i fålags- og i mangelagstolkningen.

6 SUPPERENDE LITTERATUR

Her præsenteres nogle eksempler på litteratur, der omhandler borehuls-resistivitetsdata, heriblandt forward beregninger og inversion af data. Artiklerne relaterer oftest til olieindustrien.

I flere artikler undersøges forskellige måder hvormed modstanden af invasionszonen kan repræsenteres. Antages den at være graduerende, kan det bl.a. gøres ved at inddele zonen i flere mindre lag /1/. Modstanden kan også være givet som en funktion af radius, R ; f.eks. kan den afhænge lineært af R /2/, eller eksponentielt /3/. Fælles for disse tre undersøgelser er, at størrelsen af invasionszonen er over to gange tykkelsen af borehullet, og derved er de ude over problemet med lagundertrykkelse.

I de ovennævnte referencer bestemmes potentialet med et analytisk bestemt udtryk for en 1D model. 2D analytiske udtryk er mere komplekse, og specielle metoder må tages i brug. Der præsenteres nogle eksempler i /4/ og /5/. Ofte anvendes finite difference metoden, der giver mulighed for at lave beregninger på 2D modeller, som det ses hos f.eks. /2/, /6/ og /7/.

Til inversion af data anvendes en metode kaldet Marquardt inversion, f.eks. i /7/. Metoden der anvendes i em1dinv bygger på samme principper.

Det har ikke været muligt at finde artikler, der omhandler inversion af resistivitetsdata hvor potentialudtrykket er givet analytisk, som det er foretaget i omtalte speciale.

7

OPSUMMERING

Når der anvendes resistivitetslogs i forbindelse med grundvandskortlægning er det bl.a. for at bestemme modstanden af den uforstyrrede formation. Denne information anvendes bl.a. til at lave en korrelation af geologiske formationer og modstandsmodeller fra andre geofysiske metoder.

Det er muligt og fordelagtigt at få formationsmodstanden fastlagt ved at foretage inversion af log-data. Inversionen kan foretages både med en cylindersymmetrisk fålags- og mangelagsmodel med LCI-bånd.

SYNTETISKE MODELLER/DATA

Inversion af log-data giver et langt bedre estimat af formationsmodstanden end ved blot at anvende måleværdien fra den længste log. Dette kan forstås ved at betragte typekurverne for forskellige cylindersymmetriske modeller. F.eks. kan forholdene bevirke, at der måles direkte på et overshoot, som giver en for høj modstand ift. den sande formationsmodstand.

Modelstudier med forskellige cylindersymmetriske modeller viser, at man under normale forhold kan fastlægge den uforstyrrede formationsmodstand. Dette afhænger naturligvis af den aktuelle geologi samt ikke mindst sammensætningen af tools. Hvis det længste tool er 128" har man en bedre bestemmelse af formationsmodstanden end hvis det længste tool er 64".

De følgende konklusioner antager at 64" er det længste tool. Hvis invasionszonen er stor, eller hvis modstandsforskellen mellem boremudret og invasionszonen er stor, vil strømmen primært løbe i boremudret og formationsmodstanden kan ikke fastlægges. Disse forhold afhæ-

ger af hinanden, men generelt kan det siges for en trelagsmodel, at modstanden af tredje lag (formationsmodstanden) ikke kan fastlægges, hvis tykkelsen af andet lag (invasionszonen) overstiger 2 gange tykkelsen af første lag (radius af borehullet). Eller hvis modstanden af tredje lag er over 300 gange så stor som modstanden af første lag ($\sim 7 \Omega m \cdot 300 \sim 2000 \Omega m$).

Analyserne og inversionen af syntetiske data viser, at det ikke er muligt at fastlægge tykkelse og modstand af invasionszonen. Dette skyldes, at laget er stærkt lagundertrykt.

FELT-DATA

Anvendelse af en 1D cylindersymmetrisk model med vertikale bånd (LCI-tolkning) til inversion af borehuldata er ikke set andre steder. Der findes kun få eksempler på inversion af data vha. et analytisk potentialeudtryk.

LCI metoden har den fordel at man kan koble sine 1D-modeller sammen til en pseudo 2D-model. En anden fordel ved metoden er at den kan dæmpe nogle af de 2D-effekter vi ser i forbindelse med inversion af feltdata. Det er dog ikke muligt at komme fuldstændigt af med 2D-effekterne ved brug af båndene.

Det har ikke været muligt at finde en generel måde at opsætte en fålagsmodel der giver gode og stabile resultaterne for en række forskellige datasæt. Derimod opnås stabile resultater ved anvendelse en mangelagsmodel på forskellige boringer. Datatilpasningen er endvidere generelt bedre for tolkningerne med en mangelagsmodel end med en fålagsmodel.

MODSTANDEN - BOREMUDDER

Inversion af feltdata viser, at der generelt er uoverensstemmelser mel-

lem boremudderets modstand målt med fluidloggen og modstanden bestemt ved inversionen. Der er efterfølgende foretaget testmålinger på blandinger af tilsatmidler med en fluidlog og to andre geoelektriske instrumenter. Det viser sig, at fluidloggen gav en lidt mindre modstandsværdi

end de to andre instrumenter. Denne forskel i modstand er dog langt mindre end forskellen mellem modstanden af boremudderet fra inversionen og fluidloggen. Uddybende forklaringer til undersøgelse af fluidloggen findes i specialet.

8

REFERENCER

- /1/ Drahos, D., 1984. Electrical modeling of the inhomogeneous invaded zone. *Geophysics*, 49, 1580-1585
- /2/ Roy, K. K. og Dutta, D. J., 1994. Borehole dc resistivity response for a transitional invaded zone. *Geophysics*, 59, 1796-1805
- /3/ Dutta, D. J., 1997. Extra: A fortran program to calculate resistivity departure curves with a quasiexponential transition zone. *Computers & Geosciences*, 20, 293-311
- /4/ Gianzero, S. og Anderson, B., 1982. An integral transform solution to the fundamental problem in resistivity logging. *Geophysics* 47,946-956
- /5/ Tsang, L., Chan, A. K. og Gianzero S., 1984. Solution of the fundamental problem in resistivity logging with a hybrid method. *Geophysics* 49, 1596-1604
- /6/ Weller, A., Furche, M. og Schön, J., 2003. Detection of layer boundaries in wells using multi-electrode resistivity data. *Geophysical Journal International* 153, 175-186
- /7/ Whitman, W. W., Towle, G. H. og Kim, J.-H., 1989. Inversion of normal and lateral well logs with borehole compensation. *The Log Analyst* 30, 1-11
- /8/ Auken, E., Christiansen, A. V., Jacobsen, B. H., Foged, N., and Sørensen, K. I., 2005, Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 53, 497-506.