



(12) **PATENT**

(19) **NO**

(11) **334635**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.

G01V 3/30 (2006.01)

G01V 3/38 (2006.01)

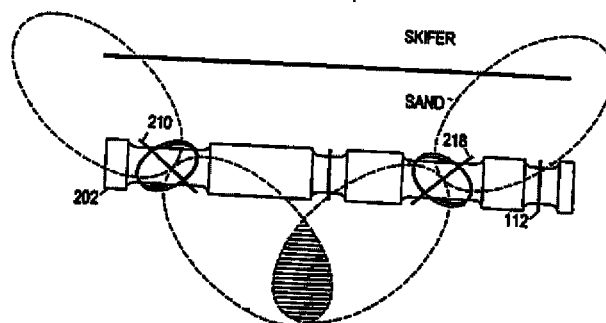
E21B 47/026 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20014055	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2000.02.10 PCT/US2000/03467
(22)	Inng.dag	2001.08.21	(85)	Videreføringsdag	2001.08.21
(24)	Løpedag	2000.02.10	(30)	Prioritet	1999.02.22, US, 255621
(41)	Alm.tilgj	2001.10.22			
(45)	Meddelt	2014.05.05			
(73)	Innehaver	Halliburton Energy Services Inc, 10200 Bellaire Boulevard, US-TX77072 HOUSTON, USA			
(72)	Oppfinner	Teruhiko Hagiwara, 9415 Bassoon Drive, US-TX77025-4002 HOUSTON, USA			
		Haoshi Song, 2823 Chimney Stone Circle, US-TX77479 SUGAR LAND, USA			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			

(54)	Benevnelse	Måling av resistivitet i en viss bestemt retning for asimutal nærhetsdeteksjon av laggrenser
(56)	Anførte publikasjoner	US 4980643 A US 5757191 A
(57)	Sammendrag	

Et asimutalt avstembart resistivetsmåleverktøy (202) som omfatter et sett på tre skråstilte mottakerantennner (216, 218, 220) samt en senderantenne (104, 108). De tre skråstilte mottakerantennner er orientert i innbyrdes jevnt fordelte asimutretninger. Senderantennen sender ut et radiofrekvenssignal som forplanter seg gjennom den formasjon som omgir borehullet. Signaler fra de tre mottakerantennner kan måles og kombineres for å syntetisere det signal som ville blitt mottatt av en virtuell antenne som var orientert i en hvilken som helst ønsket retning. Virtuelle mottakere orientert vinkelrett på verktøyaksen samt med varierende asimut-orientering kan syntetiseres. Orienteringen av en slik virtuell mottaker som har en maksimert mottatt signalamplitude, kan anvendes for å fastslå retningen til en nærliggende laggrense, og den maksimerte amplitude kan brukes for å anslå avstanden til denne grense. I en annen utførelse omfatter verktøyet et sett på tre skråstilte senderantennner (208, 210, 212) samt en mottakerantenne (112). I enda en ytterligere utførelse omfatter verktøyet et sett av skråstilte senderantennner (208, 210, 212) samt et sett av skråstilte mottakerantennner (216, 218, 220).



OPPFINNELSENS TEKNISKE OMRÅDE

Foreliggende oppfinnelse gjelder generelt borehullsutstyr på bunnen av et borehull og som omfatter underutstyr for logging under utboring ("LWD") for å bestemme egenskaper ved borehullet og omliggende formasjon under utboring av en brønn. Nærmere bestemt gjelder foreliggende oppfinnelse et resistivitetslogge-
5 verktøy for måling av formasjoners resistivetsparametre under utboring. Enda nærmere bestemt omfatter foreliggende oppfinnelse et asimutalt avstembart resistivitetsverktøy for å lette borenavigasjon i forhold til en leiegrense under utboring.

10 OPPFINNELSENS BAKGRUNN

Oppsamling av nedhullsinformasjon er blitt utført at oljebrønnsindustrien i mange år. Arbeider med moderne petroleumsutboring og -produksjon krever en stor informasjonsmengde når det gjelder parametre og tilstander nede i borehullet. Slik informasjon omfatter typisk beliggenhet og orientering av borebrønns- og ut-
15 boringsutstyr, jordformasjonens egenskaper og utboringens omgivelsesparametre nede i borehullet. Oppsamlingen av informasjon som gjelder formasjonsegenskaper og tilstander nede i borehullet betegnes vanligvis som "logging", og kan utføres ved flere fremgangsmåter.

Ved vanlig ledningskabel-logging blir en sonde eller "sensor" med flere fø-
20 lere nedsenket i borehullet etter at en del eller hele brønnen er blitt utboret. Denne sonde er typisk konstruert som en hermetisk avtettet stålsylinder for å romme følerne, og blir typisk opphengt i ytterenden av en lang kabel eller "ledningskabel". Ledningskabelen danner mekanisk opphenging for sonden og inneholder elektriske ledere mellom følerne (samt tilordnet instrumentering inne i sonden) og
25 elektrisk utstyr som befinner seg på brønnoverflaten. Normalt transporterer kabelen effekt og reguleringssignaler til sonden, samt fører informasjonssignaler fra sonden til jordoverflaten. I samsvar med vanlig teknikk blir forskjellige parametre for de jordformasjoner som ligger inntil borehullet målt og samordnet med sondens posisjon i borehullet, etter hvert som sonden trekkes oppover i hullet.

30 De følere som anvendes i en ledningskabelsonde kan omfatte en kildeanordning for å overføre energi inn i formasjonen, samt en eller flere mottakere for å detektere den energi som reflekteres fra formasjonen. Forskjellige følere er blitt

anvendt for å bestemme særtrekk ved formasjonen, innbefattet nukleære følere, akustiske følere og elektriske følere.

For at en underjordisk formasjon skal kunne inneholde petroleum, samt for at formasjonen skal muliggjøre gjennomstrømning av petroleum, må berggrunnen som utgjør formasjonen ha visse fysiske særtrekk. Et slikt særtrekk er f.eks. at berggrunnen i formasjonen har indre mellomrom for å lagre petroleum. Hvis berggrunnen i en formasjon har åpninger, hulrom og mellomrom hvori olje og gass kan være lagret, blir den karakterisert som "porøs". Ved således å bestemme om berggrunnen er porøs, kan således en fagkyndig på området avgjøre om formasjonen har eller ikke har de påkrevde fysiske egenskaper for å kunne lagre og avgi petroleum. Forskjellige ledningskabelfølere er blitt anvendt for å måle formasjonsporøsitet. Eksempler på dette omfatter akustiske følere som er beskrevet i US-patenter nr. 3237153, 3312934, 3593255, 4649525, 4718046, 4869349 og 5069308. Det er videre kjent fra US 4980643 A en anordning omfattende mottakerantenner for måling av asymmetri i formasjoner rundt borehullet.

Skjønt ledningskabel-logging kan være nyttig for å oppsamle informasjon angående formasjoner nede i borehullet, har den likevel visse ulemper. Før ledningskabel-loggeverktøyet kan føres inn i borebrønnen, må f.eks. borestrengen og nedhullssammenstillingen først bli fjernet eller "trippet" fra borehullet, hvilket medfører betraktelige utgifter og tap av boretid for boreoperatøren (som vanligvis betaler daglige avgifter for å leie boreutstyret). Fordi ledningskabelverktøyer er ute av stand til å samle opp data under det faktiske borearbeidet, må i tillegg boreoperatører til tider treffe avgjørelser (slik som hensyn til boreretningen, etc.) basert på begrenset og eventuelt utilstrekkelig informasjon, eller også finne seg i de omkostninger som vil påbeløpe ved tripping av borestrengen for det formål å kjøre et ledningskabel-loggeverktøy. En annen ulempe er at fordi ledningskabel-loggingen finner sted over en relativt lang tidsperiode etter at borebrønnen er blitt utboret, så kan nøyaktigheten av ledningskabel-målingene være tvilsom. Som en fagkyndig på området vil forstå, har borebrønnstilstandene en tendens til å degraderes etter hvert som boreslam invaderer formasjonen i nærheten av borebrønnen. I tillegg kan borehullets form begynne å forandres, hvilket vil redusere målingenes nøyaktighet.

På grunn av disse begrensninger som har sammenheng med ledningskabel-logging, er det i den senere tid blitt lagt øket vekt på oppsamling av data under selve boringsprosessen. Ved oppsamling og behandling av data under utboringprosessen, kan behovet for å trippe boresammenstillingen ut av borehullet og føre inn et ledningskabel-loggeverktøy elimineres, og boreoperatøren kan utføre nøyaktige modifikasjoner og korreksjoner i "sann tid" etter hvert som det er behov, for derved å optimalisere utboringssystemet. Boreoperatøren kan f.eks. forandre vekten på borkronen for å gi borehullssammenstillingen en tendens til å bore i en bestemt retning, eller i det tilfelle en styrbar borehullssammenstilling anvendes, kan boreoperatøren bringe utstyret til å arbeide i glidemodus for å frembringe kildekorreksjoner. Målingen av formasjonsparametre under utboring, samt forhåpentligvis før formasjonen invaderes, vil videre øke nytten av de målte data. Ved å utføre formasjons- og borehullsmålinger under utboringen kan videre spare ytterligere borehullstid, som ellers ville være påkrevet for å kjøre et ledningskabel-loggeverktøy.

Utførelser for å måle tilstander nede i borehullet sammen med bevegelse og styring av boresammenstillingen, samtidig med utboringen av brønnen, er blitt kjent som teknikker for "måling under utboring" eller "MWD". Lignende teknikker som konsentrerer seg mer på måling av formasjonsparametre, er vanligvis blitt betegnet som teknikker for "logging" under utboring, eller "LWD". Skjønt det kan foreligge forskjeller mellom MWD og LWD, brukes uttrykkene MWD og LWD ofte om hverandre. For formålene for denne fremstilling, vil uttrykket LWD bli brukt med den forståelse at dette uttrykk omfatter både oppsamling av formasjonsparametre og oppsamling av informasjon med hensyn til bevegelse og posisjon for boresammenstillingen.

Målingen av formasjonsegenskaper under utboring av brønnen ved hjelp av LWD-utstyr forbedrer tidsbestemmelsen av måledata og øker følgelig borearbeidenes effektivitet. LWD-målinger anvendes typisk for å frembringe informasjon angående den spesielle formasjon som borehullet er på vei gjennom. Under de seneste flere år har mange innenfor denne industri hatt et ønske om et LWD-utstyr som spesielt vil kunne anvendes for å påvise leiegrenser i sann tid, for derved å gjøre det mulig for boreoperatøren å utføre retningskorreksjoner for å forbli innenfor utvinningssonen. Alternativt kan LWD-utstyret anvendes som en del av et

"smart"-utstyr for automatisk å bibeholde borkronen i utvinningssonen. Se f.eks. det samtidig overdratte US-patent nr. 5332048, hvis lære herved tas inn som referanse. Innehaveren har også utviklet utstyr som tillater måling av LWD-data ved borkronen for derved å frembringe en tidligere anvisning om leiegrenser og formasjonsegenskaper. Se US-patent nr. 5160925. Bruken av et LWD-utstyr med dette andre utstyr gjør det mulig å utføre i det minste visse partier av boreprosessen automatisk.

Vanligvis blir en brønn boret vertikalt i det minste over en del av sin lengde. De lag eller sjikt som utgjør jordskorpen forløper vanligvis hovedsakelig horisontalt. Under vertikal utboring forløper brønnen således hovedsakelig vinkelrett på de geologiske formasjoner som den passerer gjennom. En av de egenskaper ved formasjonen som vanligvis logges er formasjonens resistivitet. LWD-verktøy som er blitt konstruert for å måle resistiviteten for den omgivende formasjon behøver ikke å være asimutalt fokusert, da vedkommende formasjon omgir borebrønnen og er hovedsakelig den samme i alle retninger. Rotasjonen av LWD-verktøyet sammen med borkronen har således ingen vesentlig virkning på den målte resistivitet. Av denne grunn er typiske resistivitetsverktøy som er tilpasset for bruk i vertikale brønner, asimutalt symmetriske og har ingen asimutal følsomhet.

Ved visse anvendelser, slik som ved utboring gjennom formasjoner hvori reservoargrenser strekker seg i vertikalretningen eller ved utboring fra en plattform til sjøs, vil det imidlertid være ønskelig å bore brønner i mindre skråstilling i forhold til leiegrenser i vedkommende formasjonssjikt. Dette betegnes ofte som "horisontal" utboring. Når utboringen er horisontal, er det ønskelig å bibeholde borebrønnen innenfor en utvinningssone (en formasjon som inneholder hydrokarboner) i så høy grad som mulig, for derved å maksimalisere utvinningen. Dette kan være vanskelig da formasjoner kan danne utsving eller avvik. Mens det forsøkes å utføre utboring og bore brønnen innen i en bestemt formasjon, kan således borkronen nærme seg en leiegrense. Etter hvert som den roterende borkrone nærmer seg leiets grense, vil leiegrensen befinne seg på den ene side av borkronens akse, hvilket vil si innenfor et visst asimutalområde i forhold til borkronens akse.

Hvis et resistivitetsverktøy nær borkronen var i stand til å avføle resistivetsverdier asimutalt, så ville de avføyte verdier kunne analyseres for å avsløre leiegrensens retning. Hvis verktøyet var tilstrekkelig følsomt, ville tilnærmingen til

leiegrensen kunne detekteres i tilstrekkelig grad på forhånd for å gjøre det mulig for boreoperatøren å gjøre rettelser i samsvar med kjent teknikk for å unngå at borkronen forlater den ønskede formasjon. Det er således ønskelig å frembringe et LWD-verktøy som muliggjør asimutale og følsomme resistivitetsmålinger, nemlig et verktøy som det er lett å fremstille og sammenstille, og som er tilstrekkelig holdbart og pålitelig innenfor utbøringsomgivelser.

SAMMENFATNING AV OPPFINNELSEN

Det er følgelig frembrakt et asimutalt resistivitetsmåleverktøy. I en viss utførelse omfatter dette verktøy et sett av tre skråstilte mottakerantennes og en senderantenne. De tre skråstilte mottakerantennes er orientert i forskjellige asimutalretninger med like innbyrdes mellomrom for å gi disse antenner en foretrukket følsomhet i disse retninger. Senderantennene avgir et radiofrekvenssignal som forplanter seg gjennom den formasjon som omgir et borehull. Signalene fra de tre mottakerantennes kan måles og kombineres for å syntetisere det signal som ville blitt mottatt av en virtuell antenne orientert i en hvilken som helst ønsket retning. Virtuelle mottakere orientert perpendikulært på verktøyaksen samt med variabel asimutal orientering, kan således syntetiseres. Orienteringen av en slik virtuell mottaker som har en maksimal innstilt mottakersignal-amplitude kan anvendes for å fastslå retningen av en nærliggende leiegrense, og den maksimalt avstemte amplitude kan anvendes for å anslå avstanden til denne grense.

I en annen utførelse omfatter verktøyet et sett av skråstilte senderantennes og en mottakerantenne. De tre skråstilte senderantennes er orientert i asimutalretninger med samme innbyrdes mellomrom for å gi disse antenner foretrukket antennevinning i disse retninger. De signaler som mottas av mottakerantennen som respons fra et signal fra hver av senderantennene, kan måles og kombineres for å syntetisere et signal mottatt av mottakerantennen som respons på et signal fra en virtuell senderantenne orientert i en hvilken som helst ønsket retning. Virtuelle sendere orientert vinkelrett på verktøyaksen og med varierende asimutale orienteringer, kan følgelig syntetiseres. Orienteringen av en slik virtuell antenne som frembringer et maksimalisert responssignal kan da anvendes for å fastslå retningen til en nærliggende leiegrense, og den maksimalavstemte amplitude kan anvendes for å anslå avstanden til denne grense.

I enda en annen utførelse omfatter verktøyet et sett skråstilte senderantenn-
ner og et sett skråstilte mottakerantenn-
ner. De skråstilte senderantenn- og motta-
kerantenn-er samarbeider for å opprette virtuelle sender/mottaker-par som er ori-
entert i en hvilken som helst ønsket asimutalretning. Denne oppfinnelse omfatter
5 videre en fremgangsmåte for å utføre asimutalt følsomme resistivitetsmålinger
samt en fremgangsmåte for å detektere beliggenheten av en leiegrense i forhold
til vedkommende borehull.

Ytterligere trekk og fordeler ved oppfinnelsen fremkommer av de tilhørende
patentkravene.

10

KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

For en innføring til den detaljerte beskrivelse av foretrukne utførelser av
oppfinnelsen, vil det nå bli henvist til de vedføyde tegninger, hvorpå:

fig. 1 er en skjematisk skisse av en avvikende borebrønn og en borestreng
15 hvori det inngår et LWD-verktøy,

fig. 2 er en perspektivskisse av et asimutalt følsomt resistivitetsverktøy,

fig. 3 angir et sett av referansekoordinater for et resistivitetsverktøy,

fig. 4 er en perspektivskisse av en første utførelse av et asimutalt følsomt
resistivitetsverktøy,

20 fig. 5 er et sideoppriss av et asimutalt følsomt resistivitetsverktøy og viser
tilnærmede vinningsmønstre for sendere og mottakere,

fig. 6 er en endeskisse av et asimutalt følsomt resistivitetsverktøy og angir
asimutale orienteringer for forskjellige resistivitetsmålinger,

fig. 7 er et sideoppriss av et asimutalt følsomt resistivitetsverktøy som nær-
25 mer seg en leiegrense,

fig. 8 viser et funksjonelt blokkskjema for det elektriske utstyr i et resistivi-
tetsverktøy,

fig. 9 er en perspektivskisse av en andre utførelse av et asimutalt følsomt
resistivitetsverktøy,

30 fig. 10 er en kurve som angir den teoretiske faseforskyvning som kan ob-
serveres nær en leiegrense for en første utførelse av et asimutalt følsomt resistivi-
tetsverktøy,

fig. 11 er en grafisk fremstilling av den teoretiske 180 graders faseforskjell som observeres nær en leiegrense for en første utførelse av et asimutalt følsomt resistivitetsverktøy,

fig. 12 er en grafisk fremstilling av den teoretiske amplitudesvekning som kan observeres nær en leiegrense for en første utførelse av et asimutalt følsomt resistivitetsverktøy,

fig. 13 er en grafisk fremstilling av den teoretiske 180 graders amplitudesvekning som observeres nær en leiegrense ved en første utførelse av det asimutalt følsomme resistivitetsverktøy,

fig. 14 er en grafisk fremstilling av den faseforskyvning som teoretisk kan observeres nær en leiegrense for en andre utførelse av det asimutalt følsomme resistivitetsverktøy,

fig. 15 er en grafisk fremstilling av den 180 graders faseforskjell som teoretisk kan observeres nær en leiegrense ved en andre utførelse av det asimutalt følsomme resistivitetsverktøy,

fig. 16 er en grafisk fremstilling av den amplitudesvekning som teoretisk kan observeres nær en leiegrense for en andre utførelse av det asimutalt følsomme resistivitetsverktøy, og

fig. 17 er en grafisk fremstilling av den 180 graders amplitudesvekning som teoretisk kan observeres i nærheten av en leiegrense ved en andre utførelse av det asimutalt følsomme resistivitetsverktøy.

Under den følgende beskrivelse vil uttrykk som "over" og "under" bli angitt for å angi den relative posisjon av visse komponenter i forhold til strømningsretningen for det innkommende boreslam. Når således et uttrykk er anvendt for å beskrive noe på oversiden av noe annet, er dette ment å innebære at borefluidet først strømmer gjennom den første komponent før det strømmer gjennom den andre komponent. Disse og andre uttrykk blir anvendt for å angi den relative posisjon av komponenter i nedhullssammenstillingen (eller BHA) på bunnen av borehullet i forhold til avstanden til brønnoverflaten målt langs utbøringsbanen.

30

DETALJERT BESKRIVELSE AV DEN FORETRUKNE UTFØRELSE

Det skal nå henvises til fig. 1, hvor det er vist en boreinstallasjon. En bore-rigg 10 på brønnoverflaten 12 understøtter en borestreng 14. Denne borestreng

14 strekker seg gjennom en arbeidsplattform 16 og inn i et borehull 18 som bores gjennom jordformasjoner 20 og 21. Borestrengen 14 kan omfatte kveilet rørledning 24 fra en spole 22 ved dens øvre ende, samt en sammenstilling 26 (vanligvis betegnet som en "BHA") på bunnen av borehullet og som er koplet til den nedre
5 ende av den utkveilede rørledning 24. BHA 26 kan omfatte en borkrone 32, en nedhullsmotor 40, en eller flere vektør 28, samt et asimutalt avstembart resistivtetsverktøy 50 montert på en vektørseksjon 55, slik det vil bli nærmere beskrevet nedenfor, LWD-følere plassert på en vektørseksjon 55, retningsfølsomme MWD-følere anbrakt i en ikke-magnetisk seksjon 60, samt en eller flere stabilisatorer
10 (ikke vist) for ved gjennomtrengning gjennom jordformasjoner å frembringe borehullet 18. Vektørene 28, som også kan være ikke-magnetiske for ikke å påvirke MWD-målingene, anvendes i samsvar med vanlig teknikk for å legge til vekt på borkronen 32 og å avstive BHA 26, for derved å gjøre det mulig for BHA 26 å overføre vekt til borkronen 32 uten utbøyning. Den vekt som ved hjelp av vektørene
15 ene 28 er påført borkronen 32, gjør det mulig for borkronen å trenge gjennom undergrunnsformasjoner.

Den utkveilede rørledning 24 drives innover i borehullet 18 ved hjelp av en rørledningsinjektor 13. Rørledningsinjektoren 13 består vanligvis av innbyrdes motstående par av endeløse kjettinger konfigurert for å gripe om rørledningen.
20 Disse kjettingkjeder kan drives i en hvilken som helst retning for å føre inn eller trekke ut rørledningen fra borehullet.

Etter hvert som borkronen 32 arbeider seg frem, vil borefluid eller boreslam bli pumpet fra en slamgrop 34 på jordoverflaten gjennom en slange 37, inn i rørledningen 24 og frem til borkronen 32. Etter å ha strømmet gjennom borkronen
25 32, vil boreslammet stige tilbake til jordoverflaten gjennom det ringformede område mellom rørledningen 24 og borehullet 18, hvor slammet samler seg opp og returneres til slamgropen 34 for filtrering. Boreslammet anvendes for å smøre og kjøle borkronen 32, samt for å fjerne skjærspen fra borehullet 18. Boreslammet kan også utføre et antall andre funksjoner, som da kan omfatte overføring av driv-
30 kraft til nedhullsmotoren eller andre komponenter nede i borehullet. Som en fagkyndig på området vil erkjenne, kan nedhullsmotoren eller turbinen 40 anvendes for å rotere borkronen 32 nede i borehullet.

Som vist i fig. 1, omfatter BHA 26 alle nedhullskomponenter fra toppen av vektørene 28 og ned til borkronen 32, innbefattet nedhullsmotoren 40. I den foretrukne utførelse omfatter BHA 26 fortrinnsvis utstyr for måling under utboring, og som her vil bli betegnet som "MWD-utstyr".

5 Som det vil være kjent innenfor fagområdet, omfatter MWD-utstyret 60 typisk retningsfølsomme MWD-følere og boreparameterfølere, slik som for avføling av vekten på borkronen (WOB), dreiemoment på borkronen (TOB), sjokk, vibrasjon, etc. I den foretrukne utførelse er de retningsfølsomme følere anordnet i BHA 26 for å angi helningsvinkel, horisontalvinkel samt rotasjonsvinkel (også kalt

10 "verktøyfront-vinkel") for BHA 26. Slik de vanligvis defineres innenfor fagområdet, er helningsvinkelen vinkelavviket fra vertikalretningen nedover, horisontalvinkelen vinkelen i horisontalplanet ut i fra sann nordretning, mens verktøyfront-vinkelen angir orienteringsvinkelen (rotasjonen om verktøyaksen) ut i fra borebrønnens overside. I samsvar med kjent teknikk kan borebrønnens retningsmålinger utføres

15 på følgende måte: et treakset akselerometer måler jordens gravitasjonsfeltvektor i forhold til verktøyaksen, samt et punkt på verktøyets omkrets og som kalles "verktøyets frontbeskrivelseslinje". (Verktøyets frontbeskrivelseslinje er typisk trukket på verktøyoverflaten som en linje parallelt med verktøyaksen). Ut i fra denne måling kan helningen og verktøyfrontvinkelen for BHA fastlegges. I tillegg vil et treakset

20 magnetometer måle jordens magnetfeltvektor på lignende måte. Ut i fra de kombinerte magnetometer- og akselerometer-data, kan horisontalvinkelen for BHA bestemmes.

LWD-verktøyet 50 er fortrinnsvis plassert nær inntil borkronen 32 for å lette evnen til å undersøke formasjonen så nær borkronen som mulig. Som en fagkyn-

25 dig på området vil forstå, kunne LWD-verktøyet 50 også være plassert lenger oppover på BHA 26 fra borkronen 32, uten derfor å avvike fra foreliggende oppfinnelser grunnprinsipper. Videre kan LWD-verktøyet 50 i praksis omfatte flere vektørseksjoner for å romme forskjellige LWD-følere. LWD-formasjonsfølerne omfatter fortrinnsvis den foreliggende asimutalt avstembare resistivitetsføler, såvel som

30 gamma-, lyd-, densitets- og nøytronfølere i samsvar med normal industripraksis. Se generelt "State of the Art in MWD", International MWD Society (19. januar 1993). En batteripakke eller annen effektkilde kan inngå i LWD-verktøyet 50, eller

kan alternativt være plassert på et hvilket som helst hensiktsmessig sted for å avgi effekt til de forskjellige elektriske sammenstillinger i BHA.

Fremdeles under henvisning til fig. 1, er det vist at en nedhullsdatasignaleringsenhet 35 fortrinnsvis er anordnet som en del av BHA 26, samt anvendes for å overføre avfølte verdier til en overflatemottaker ved hjelp av akustiske slampulssignaler. Boreslammet tjener som et kommunikasjonsmedium mellom regulatoren og komponentene på brønnens overflate. Ved å forandre strømmingen av boreslam gjennom det indre av borestrengen, kan det genereres trykkpulser som utgjør akustiske signaler i kolonnen av boreslam. Ved etter ønske å variere trykkpulsene ved bruk av en slampulser i slamsignaleringsenheten 35, kan kodede binære trykkpulssignaler genereres for å bære informasjon som angir nedhullsparametre til jordoverflaten for umiddelbar analyse. I tillegg kan nedhullsutstyret også omfatte muligheter for å motta slampulssignaler fra jordoverflaten for å styre driften eller å aktivere visse MWD-følere eller andre nedhullskomponenter. Signaleringsenheten 35 omfatter i den foretrukne utførelse en slampulsenhet som rommes i en ikke-magnetisk sub i samsvar med vanlig industripraksis.

En nedhullsregulator (ikke vist) styrer fortrinnsvis driften av en signaleringsenhet 35 og dirigerer arbeidsfunksjonene for MWD- og LWD-følerne samt andre BHA-komponenter. Denne regulator kan være plassert i en subb 60 eller på andre steder i BHA 26. I samsvar med vanlig industripraksis, kan nedhullsregulatoren omfatte hensiktsmessig datakodingskretser, slik som en koder som frembringer digitalt kodede elektriske datasignaler som representerer de måleverdier som er utledet ved hjelp av formasjonsfølerne og retningsfølerne. I tillegg vil regulatoren behandle de data som mottas fra følerne og frembringe kodede signaler som angir en del av eller samtlige mottatte signaler for overføring til jordoverflaten ved hjelp av slampulssignaler. Regulatoren er også i stand til å treffe avgjørelser på grunnlag av de behandlede data.

Stabilisatoren omfatter fortrinnsvis justerbare skovler i samsvar med fremstillingen i de samtidig overdratte US-patenter nr. 5318137 og 5318138, hvis lære herved tas inn som referanse. Som angitt ved disse oppfinnelser, kan helningen av nedhullssammenstillingen forandres ved selektivt å variere stabilisatorskovlenes utstrekning. Som en fagkyndig på området umiddelbart vil erkjenne, kan også kursretningen for BHA 26 også forandres i samsvar med andre teknikker,

slik som ved selektivt å slå på eller av en nedhullsmotor, justering av avbøyningsvinkelen for et bøyd motorhus, eller forandring av vekten på utstyrets borkrone. Bruk av en slik justerbar komponent nede i borehullet i sammenheng med et LWD-utstyr av den art som er omtalt her, gjør det da mulig å konstruere et "smart-system" for utboring av visse deler av borebrønnen automatisk.

I visse tilfeller er den nedre ende av borehullet brakt til å avvike vesentlig fra vertikalretningen, slik det er vist i fig. 1, for derved å forlenge sin passasje gjennom en oljebærende formasjon, slik som angitt ved 21. Det er således ønskelig å frembringe et verktøy som er i stand til å detektere og lokalisere leiegrenser, slik som 23. Skjønt BHA 26 i henhold til fig. 1 er gitt en avvikning på omtrent 90 grader fra vertikalretningen, vil det forstås at foreliggende oppfinnelsesgjenstand med fordel kan anvendes i en hvilken som helst lignende situasjon hvor det er ønskelig å kunne lokalisere en leiegrense 23 som befinner seg på den ene side av vektrørseksjonen 55, i stedet for fremfor denne.

De forskjellige "leier" 20, 21 i jorden har karakteristiske resistiviteter som kan anvendes for å fastlegge deres posisjon. I en såkalt "skifersand"-formasjon kan f.eks. et skiferleie være karakterisert ved en lav resistivitet på omkring 1 Ω .m. Et leie av oljemettet sandsten kan på den annen side karakteriseres ved en høy resistivitet på omkring 10 Ω .m eller mer. Den plutselige forandring i resistiviteten ved grensen mellom leier av henholdsvis skifer og sandsten, kan anvendes for å lokalisere disse grenser. Ved horisontal utboring kan borkronen fortrinnsvis styres til å unngå denne grense og derved holde borebrønnen inne i det oljeproduserende leie.

To typer borerør 24 er populære, nemlig gjenget rørledning og kveilet rørledning. Gjenget rørledning består av rørlengder med gjengede ytterender og som gjør det mulig å sammenkople den gjengede rørledning for å danne borestrengen 14. Kveilet rørledning utgjøres av et langt kontinuerlig rør som vikles av en spole etter hvert som den mates inn i brønnen. Hver av disse typer har fordeler og ulemper, men en av ulempene ved kveilet rørledning, i det minste fra et loggestandpunkt, er at kveilet rørledning ikke roteres under borearbeidene. En loggeføler med asimutal følsomhet vil fortrinnsvis ha en asimutal "styrbar" sensitivitet. Ved gjenget rørledning kan dette problem løses ved dreining av borestrengen. Andre midler kreves ved kveilet rørledning.

Forskjellige verktøytyper anvendes for måling av resistivitet. Induksjonsverktøy er en type resistivitetsverktøy som generelt er kjent innenfor fagområdet. Et induksjonsverktøy innbefatter et par antennespoler, hvorav en er sender og den andre mottaker. Induksjonsverktøy måler formasjonens resistivitet ved å måle den

5 strøøm som induseres i mottakerantennen som en følge av den magnetiske fluks som frembringes av strømmen i senderantennen. Spesielt blir en vekselstrøm med kjent intensitet tilført senderspolen eller antennen. Strømflyt gjennom senderspolen inducerer strømmer i formasjonen og som da flyter i koaksiale sløyfer omkring verktøyet. Disse strømmer induseres i sin tur i mottakerspolen. Dette sig-

10 nal som induseres i mottakerspolen kan måles og er vanligvis proporsjonalt med formasjonens ledningsevne.

Av lignende konstruksjon er en andre type resistivitetsverktøy som kalles et elektromagnetisk forplantnings- (EMP) verktøy. Disse verktøyene arbeider ved meget høyere frekvenser enn induksjonsverktøy (omkring 10^6 Hz sammenlignet

15 med omkring 10^4 Hz). EMP-verktøy anvender senderspoler for å overføre høyfrekvenssignaler inn i formasjonen, og anvender mottakerspoler for å måle relativ amplitude og fase for de signaler som mottas av mottakeren. Svekningen og faseforskyvningen for disse signaler utgjør da mål på formasjonens ledningsevne. Signaler med høyere frekvens gir en høyere målenøyaktighet, men har en tendens til

20 å redusere undersøkelsesdybden. Når det foreligger flere senderspoler kan da følgende sender/mottaker-konfigurasjoner med mindre inntrengningsdybde anvende en høyere frekvens (f.eks. 2 MHz) for å oppnå bedre nøyaktighet, mens sender/mottaker-konfigurasjoner med større inntrengningsdybde kan kreve en lavere frekvens (f.eks. 0,5 MHz) for å oppnå tilstrekkelig ytelsesevne.

25 Det skal nå henvises til fig. 2, hvor det er vist en undersammenstilling 102 for et resistivitetsverktøy. Denne undersammenstilling 102 er utstyrt med en eller flere partier 106 med redusert diameter. En ledningsspole 104 er anbrakt i partiet 106 og i avstand fra overflaten av undersammenstillingen 102 med en konstant avstand. For mekanisk å understøtte og beskytte spolen 104 kan et ikke-ledende

30 fyllmateriale (ikke vist) slik som epoksy, gummi eller keramikk benyttes i partier 106 med redusert diameter. Spolen 104 er en senderspole, mens spolene 110 og 112 er mottakerspoler. I drift avgir senderspolen 104 et utspørrende elektromagnetisk signal som forplanter seg gjennom borebrønnen og den omgivende forma-

sjon. Mottakerspoler 110, 112 detekterer det utspørrende elektromagnetiske signal og frembringer et mål på det elektromagnetiske signals amplitudesvekning og faseforskyving mellom spolene 110 og 112. Ut i fra denne amplitudesvekning og faseforskyvning kan formasjonens resistivitet anslås ved bruk av vanlige teknikker.

5 Hvis resistiviteten er generelt kjent, kan alternativt amplitude- og faseforskyvningsinformasjonen anvendes i samsvar med vanlig teknikk for å anslå avstanden til den nærmeste sjiktgrense. En andre senderspole 108 kan med fordel legges til denne undersammenstilling for å frembringe ytterligere resistivitetsmåleverdier. Signal-måleverdiene fra to (eller flere) forskjellige sender/mottaker-
10 spoleavstander vil da gi tilstrekkelig informasjon til å bestemme formasjonens resistivitet samt avstanden til en eventuelt nærliggende laggrense. Den første sender 104 kan være anordnet omtrent 76 cm fra den siste mottakerspole 112. Sender- og mottakerspolene kan omfatte så lite som en eneste trådsløyfe, skjønt flere sløyfer kan gi ytterligere signaleffekt. Avstanden mellom spolene og verktøyover-
15 flaten ligger fortrinnsvis i området fra 1,6 til 19 mm, men kan være større.

De ligninger som anvendes for å bestemme resistivitet og avstanden til sjiktgrensen, kan utledes ved å utføre numerisk modellering for verktøygeometrien på forskjellige steder i forhold til en grense mellom materialer av helt forskjellig resistivitet. Alternativt kan ligningene bestemmes empirisk. Begge teknikker har
20 vært vanlig anvendt av fagkyndige på området.

Skjønt avstanden til nærmeste sjiktgrense er av viktighet, så er retningen til den nærmeste sjiktgrense av større viktighet. Ved horisontale boreomgivelser blir borehullet fortrinnsvis styrt bort fra leiegrensene for å unngå streiftog inn i et tilstøtende skiferleie for derved å holde borehullet innenfor en tilsiktet utvinningsso-
25 ne. Da spolene i fig. 2 er koaksiale med undersammenstillingen 102, så vil spolekonfigurasjonen på denne undersammenstilling 102 være ute av stand til å gi denne informasjon. Denne spolekonfigurasjon mangler således asimutalfølsomhet.

Før man går videre til en forbedret konfigurasjon, vil en viss nyttig terminologi først bli definert under henvisning til fig. 3. Fig. 3 viser et koordinatsystem med en viss koordinatakse langs resistivitetsverktøyets akse, samt en andre koordinatakse som peker fra verktøyaksen til verktøyfrontens skriverlinje (definert tidligere under omtale av MWD-følerne). I det følgende vil asimut bli definert som vinkelen i
30

forhold til verktøyets skriverlinje. De ledningsspoler som omtales her er tilnærmet plane, hvilket vil si at de ligger i et flatt plan. Orienteringen av et slikt plan (og således også av spolene) kan da beskrives ved en vektor som står vinkelrett på vedkommende plan. Denne perpendikulærvektor kalles da en "normal"-vektor. Fig. 3

5 viser en spole med en normalvektor i en skråvinkel θ fra verktøyaksen samt med en asimutvinkel lik α . Denne asimutvinkel α kan finnes ved å projisere normalvektoren inn på et plan vinkelrett på verktøyaksen. Denne projeksjon er vist som en stiplet pil i fig. 3.

Fig. 4 viser et resistivitetsverktøy 202 som er i stand til å måle asimutale

10 resistivitetsvariasjoner. I henhold til en foretrukket utførelse er spolen 110 erstattet med et første sett på tre skråstilte spoler 216, 218, 220 som er plassert i samme posisjon langs lengden av resistivitetsverktøyet 202. Disse tre skråstilte spoler er orientert i en skråvinkel θ fra verktøyaksen. De tre skråstilte spoler er fortrinnsvis anordnet med innbyrdes like mellomliggende asimutvinkler α (f.eks. ved 0° , 120°

15 og 240°). Ikke jevnt fordelte asimutvinkler kan også anvendes. I en spesiell utførelse er skråvinkelen α valgt til å være $54,74^\circ$, slik at normalvektorene på de skråstilte spoler 216, 218 og 220 står perpendikulært på hverandre. De tre skråstilte spoler 216, 218 og 220 anvendes fortrinnsvis på samme måte som de mottaker-spoler som vil bli omtalt i det følgende.

20 Et andre sett av tre skråstilte spoler 208, 210, 212 kan også være anordnet på resistivitetsverktøyet 202. Hvis disse inngår, anvendes de skråstilte spoler 208, 210, 212 fortrinnsvis som senderspoler i stedet for spolen 104. Fortrinnsvis er dette andre sett av skråstilte spoler 208, 210, 212 asimutalt posisjonsinnstilt for å ligge på linje med det første sett av skråstilte spoler, henholdsvis 220, 218 og 216,

25 samt er hver orientert i en skråvinkel på θ i forhold til resistivitetsverktøyets akse. Parene av skråstilte spoler er med andre ord skråstilt i retning mot hverandre.

De skråstilte spoler kan være konstruert på lignende måte som spolen i fig. 2, hvilket vil si at de kan være plassert i forsenkede partier på verktøyet 202, samt jevnt fordelt bort fra overflaten av verktøyet 202 med en konstant avstand.

30 Skråvinkelen θ har sammenheng med spolediameteren D og spredningen X i lengderetningen i samsvar med $\tan \theta = X/D$.

Det bør bemerkes at den asimutale følsomhet kan oppnås ved å skråstille enten senderspolene eller mottakerspolene. Det er ikke strengt nødvendig å skråstille både senderspolene og mottakerspolene, skjønt denne sistnevnte konfigurasjon foretrekkes for tiden.

5 Signaler som mottas fra settet av skråstilte mottakerspoler 218, 216, 220 (som det heretter vil bli henvist til som R_1 , R_2 og R_3) kan uttrykkes som en lineær kombinasjon av signaler mottatt av tre virtuelle mottakerspoler R_L , R_Z og R_T . R_L er en virtuell mottakerspole som er orientert i lengderetningen av verktøyet 202 (skråvinkel $\theta = 0$), R_Z er en virtuell mottakerspole orientert i null-asimutretningen ($\theta = 90^\circ$, $\alpha = 0^\circ$), og R_T er en virtuell mottakerspole orientert vinkelrett på både R_L og R_Z ($\theta = 90^\circ$, $\alpha = 90^\circ$). De signaler som mottas i de skråstilte mottakerspoler R_1 , R_2 , R_3 , må følgelig manipuleres for å utlede signaler som ville ha blitt mottatt av de tre (ikke-eksisterende) virtuelle mottakerspoler R_L , R_Z , R_T , hvis disse spoler faktisk eksisterte. Det kan vises at:

$$15 \quad S(R_1) = S(R_L) \cos \theta + S(R_Z) \sin \theta$$

$$S(R_2) = S(R_L) \cos \theta + (S(R_Z) \cos 120^\circ + S(R_T) \sin 120^\circ) \sin \theta$$

$$S(R_3) = S(R_L) \cos \theta + (S(R_Z) \cos 240^\circ + S(R_T) \sin 240^\circ) \sin \theta$$

hvor θ er skråvinkelen for de faktiske mottakerspoler R_1 , R_2 og R_3 , mens $S(R_1)$ er det signal som mottas av mottakeren R_1 . Disse ligninger kan manipuleres for å uttrykke responsen for de virtuelle mottakere ut i fra de signaler som mottas av mottakerspolene R_1 , R_2 , R_3 .

$$S(R_L) = (S(R_1) + S(R_2) + S(R_3)) / (3 \cos \theta)$$

$$S(R_Z) = (2 S(R_1) - (S(R_2) + S(R_3))) / (3 \sin \theta)$$

$$S(R_T) = (S(R_2) - S(R_3)) / (\sqrt{3} \sin \theta)$$

25 Slike ligninger kan utledes for virtuelle mottakere med varierende orienteringer. Denne fremgangsmåte som går ut på å lineært kombinere signaler fra et sett mottakerspoler for å bestemme responsen for en eller flere virtuelle mottakere, vil heretter bli kalt virtuell mottakersyntese eller "syntetisering av en virtuell mottakers respons".

30 Denne fremgangsmåte for å skape virtuelle spoler er ikke begrenset til mottakere. Virtuelle senderspoler kan også utledes ved å kombinere eksiteringene for et sett faktiske sendere. Signaler som avgis av dette sett av skråstilte senderspo-

ler 210, 208, 212 (som i det følgende vil bli betegnet som T_1 , T_2 , T_3), kan uttrykkes som en lineær kombinasjon av de signaler som sendes ut av tre virtuelle sendere T_L , T_Z , T_T . Det kan da vises at:

$$S(T_1) = S(T_1) \cos \theta + S(T_Z) \sin \theta$$

$$S(T_2) = S(T_L) \cos \theta + (S(T_Z) \cos 120^\circ + S(T_T) \sin 120^\circ) \sin \theta$$

$$S(T_3) = S(T_L) \cos \theta + (S(T_Z) \cos 240^\circ + S(T_T) \sin 240^\circ) \sin \theta$$

hvor θ er skråvinkelen for de faktiske sendere T_1 , T_2 og T_3 . Disse ligninger kan manipuleres til å uttrykke de utsendte signaler fra de virtuelle sendere ved hjelp av de signaler som sendes ut av de faktiske sendere T_1 , T_2 og T_3 :

$$S(T_L) = (S(T_1) + S(T_2) + S(T_3)) / (3 \cos \theta)$$

$$S(T_Z) = (2 S(T_1) - (S(T_2) + S(T_3))) / (3 \sin \theta)$$

$$S(T_T) = (S(T_2) - S(T_3)) / \sqrt{3} \sin \theta$$

Slike ligninger kan utledes for virtuelle sendere med forskjellige andre orienteringer. Det er ikke nødvendig å eksitere senderne T_1 , T_2 , T_3 samtidig. Senderne kan eksiteres i rekkefølge hvis resultatene senere kan kombineres i samsvar med de utledede ligninger.

Det skal nå henvises til fig. 2 og 4, og et eksempel skal her bli angitt for å anskueliggjøre driften av resistivitetsverktøyet 202 og for å vise hvorledes målingene fra resistivitetsverktøyet 102 kan dupliseres ved hjelp av resistivitetsverktøy 202. Settet av senderspoler T_1 , T_2 og T_3 anvendes for å syntetisere en virtuell sender T_L for å erstatte senderen 104, senderspolen 108 (heretter angitt som T_4) forblir den samme, mens settet av mottakerspoler R_1 , R_2 , R_3 anvendes for å syntetisere en virtuell mottaker R_L for å erstatte mottakeren 110, samt mottakerspolen 112 (heretter R_4) forblir uforandret.

Signalet $S(R_4, T_4)$ som genereres i mottakerspolen R_4 på grunn av de signaler som sendes ut fra senderspolen T_4 , kan uttrykkes som et produkt av en koplingskonstant C_{44} og det signal $S(T_4)$ som eksiterer senderspolen. Da koplingskonstantens C_{44} er en funksjon av formasjonens resistivitet ρ og den relative geometri for sender og mottakerspolene:

$$(1) \quad S(R_4, T_4) = C_{44} S(T_4)$$

$S(R_4, T_4)$ kan direkte måles i verktøyet 202. Signalmåleverdier for virtuelle mottakere og sendere må imidlertid beregnes ut i fra faktiske mottakermålinger.

Det signal som genereres i mottakerspolen R_4 ved hjelp av den virtuelle sender-spole T_L kan da følgelig uttrykkes på følgende måte:

$$S(R_4, T_1) = C_{L4}S(T_L) = C_{L4}(S(T_1) + S(T_2) + S(T_3)) / (3 \cos \theta)$$

Da koplingskonstanten C_{L4} er lik koplingskonstanten C_{L1} multiplisert med
5 $\cos \theta$, kan ligningen ovenfor skrives om til:

$$(2) \quad S(R_4, T_L) = (S(R_4, T_1) + S(R_4, T_2) + S(R_4, T_3)) / 3$$

De signaler som måles i mottakerspolen R_4 på grunn av signaler som sendes ut fra senderspolene T_1, T_2, T_3 kan følgelig kombineres til å bestemme responsen for mottakerspolen R_4 på den virtuelle sender T_L .

10 En tilsvarende ligning for en virtuell mottakerspoles reaksjon på en sender kan også finnes. Det signal som mottas av den virtuelle mottakerspole R_L i kraft av de felter som genereres av sendere T_4 , kan da uttrykkes på følgende måte:

$$(3) \quad S(R_L, T_4) = (S(R_1, T_4) + S(R_2, T_4) + S(R_3, T_4)) / (3 \cos \theta)$$

Skjønt det er litt mer omfattende, kan det signal som mottas av den virtuelle
15 mottakerspole R_L i kraft av felter som genereres av den virtuelle sender T_L også uttrykkes ut i fra de faktiske mottaker- og senderspoler:

$$S(R_L, T_L) = (S(R_1, T_L) + S(R_2, T_L) + S(R_3, T_L)) / (3 \cos \theta)$$

$$S(R_L, T_L) = (C_{L1}S(T_L) + C_{L2}S(T_L) + C_{L3}S(T_L)) / (3 \cos \theta)$$

$$S(R_L, T_L) = (C_{L1} + C_{L2} + C_{L3}) (S(T_1) + S(T_2) + S(T_3)) / (9 \cos \theta)$$

$$20 \quad (4) \quad S(R_L, T_L) = (S(R_1, T_1) + S(R_1, T_2) + S(R_1, T_3) + S(R_2, T_1) + S(R_2, T_2) + S(R_2, T_3) + S(R_3, T_1) + S(R_3, T_2) + S(R_3, T_3)) / (9 \cos \theta)$$

Målte signaler fra faktiske mottakerspoler R_1, R_2, R_3 og R_4 som reaksjon på
signaler som sendes ut fra senderspolene T_1, T_2, T_3, T_4 , kan således kombineres i
samsvar med ligningene (1), (2), (3) og (4) for å bestemme de signaler som ville
25 ha blitt målt av mottakerspolene 110, 112 som reaksjon på signaler som sendes
ut fra senderspolene 104, 106. Ved å måle hver for seg og derpå kombinere de
signaler som de faktiske senderspoler frembringer i de faktiske mottakerspoler,
kan med andre ord den opprinnelige funksjonalitet for resistivitetsverktøyet 102
faktisk gjengis av resistivitetsverktøyet 202.

30 I samsvar med vanlig teknikk, måler resistivitetsverktøyet 102 formasjons-
resistivitet ved å sammenligne de signaler som induseres i mottakerspolene fra en
enkelt sender. (Første og andre sender anvendes hver for seg for å oppnå for-

skjellige resistivitetsmåledybder). Svekking og faseforskjell mellom de mottatte signaler er kjente funksjoner av formasjonsresistiviteten i en homogen formasjon. De kan anvendes hver for seg for å måle resistiviteten. I en anisotrop formasjon kan måleverdiene for faseforskjell og svekning kombineres for å bestemme resistiviteten både i horisontal og vertikal retning.

Resistivitetsverktøyet 202 kan utnytte disse tidligere kjente teknikker i sammenheng med de synteseligninger som er utledet ovenfor for å duplisere funksjonaliteten for resistivitetsverktøyet 102. Viktigere er imidlertid den allsidighet og tilleggskfunksjonalitet som kan oppnås ved hjelp av verktøyet 202.

Uniformiteten eller "homogeniteten" for en formasjon kan anvendes som en anvisning om hvor nær en leiegrense befinner seg. Homogenitet kan bestemmes ved syntetisering av virtuelle spoleresponser $S(R_Z, T_L)$ og $S(R_T, T_L)$. I en homogen formasjon er disse signaler lik null. Ikke-neglisjerbare signalmåleverdier angir nærvær av en nærliggende leiegrense. Det virtuelle responssignal $S(R_Z, T_L)$ kan utledes som funksjon av faktiske signalmåleverdier på følgende måte:

$$S(R_Z, T_L) = (2 S(R_1, T_L) - (S(R_2, T_L) + S(R_3, T_L))) / (3 \sin \theta)$$

$$S(R_Z, T_L) = (2 C_{L1}(\rho) S(T_L) - (C_{L2}(\rho) S(T_L) + C_{L3}(\rho) S(T_L))) / (3 \sin \theta)$$

$$S(R_Z, T_L) = (2 C_{L1}(\rho) - (C_{L2}(\rho) + C_{L3}(\rho))) (S(T_1) + S(T_2) + S(T_3)) / (9 \sin \theta \cos \theta)$$

$$(6) \quad S(R_Z, T_L) = (2(S(R_1, T_1) + S(R_1, T_2) + S(R_1, T_3)) - (S(R_2, T_1) + S(R_2, T_2) + S(R_3, T_1) + S(R_3, T_2) + S(R_3, T_3))) / (9 \sin \theta)$$

Det virtuelle responssignal $S(R_T, T_L)$ kan også utledes:

$$S(R_T, T_L) = (S(R_2, T_L) - S(R_3, T_L)) / (\sqrt{3} \sin \theta)$$

$$S(R_T, T_L) = (C_{L2}(\rho) S(T_L) - C_{L3}(\rho) S(T_L)) / (3^{1/2} \sin \theta)$$

$$S(R_T, T_L) = (C_{L2}(\rho) - C_{L3}(\rho)) (S(T_1) + S(T_2) + S(T_3)) / (3^{3/2} \sin \theta \cos \theta)$$

$$(6) \quad S(R_T, T_L) = ((S(R_2, T_1) - (S(R_2, T_2) + S(R_2, T_3)) - S(R_3, T_1)) - (S(R_3, T_2) + S(R_3, T_3))) / (3^{3/2} \sin \theta)$$

Ligningene (5) og (6) kan følgelig anvendes for å syntetisere de virtuelle responssignaler ut i fra de faktiske signalmålinger. I en homogen formasjon (hvilket vil si at ingen leiegrenser finnes i nærheten), er $S(R_Z, T_L)$ og $S(R_T, T_L)$ faktisk lik null. Når en nærliggende leiegrense ligger i retningen $\alpha = 0$, så vil $S(R_T, T_L)$ være neglisjerbar og amplituden av $S(R_Z, T_L)$ kan anvendes for å anslå avstanden til leiegrensen. For andre asimutvinkler vil den vinkel α som gir størst amplitude for

$$S(R_Z', T_L) = S(R_Z, T_L) \cos \alpha + S(R_T, T_L) \sin \alpha$$

være asimutretningen (med 180° tvetydighet) til leiegrensen. Fasen av $S(R_Z', T_L)$ kan anvendes for å løse dobbeltydigheten over 180° , mens den maksimerte størrelse av $S(R_Z', T_L)$ kan anvendes for å anslå avstanden til leiegrensen.

5 En annen fremgangsmåte for å bestemme retningen til leiegrensen er å måle resistivetsverdiene i asimutretningen og derpå danne en retningsvektor ut i fra disse måleverdier. Amplituden av signalet $S(R_1, T_1)$ angir primært resistiviteten for det område av formasjonen som ligger mellom senderen T_1 og mottakeren R_1 i asimutretningen $\alpha = 0$. Fig. 5 viser en første ordens tilnærmelse for vinningsmønstrene for senderen T_1 (210), samt mottakeren R_1 (218). Det skyggelagte overlappingsområde er det område som i størst grad påvirker resistivetsmåleverdien fra signalet $S(R_1, T_1)$. Som en fagkyndig på området vil forstå, kan mottakerspolen 112 (R_4) anvendes for å bestemme en sveknings- og faseforskjellverdi i det tilfelle nøyaktige kvantitative måleverdier er ønsket. Den relative amplitude og fase for de målte signaler $S(R_4, T_1)$ og $S(R_1, T_1)$ kan da anvendes for å anslå asimutresistivitet med bedre nøyaktighet enn det som kan oppnås ut i fra $S(R_1, T_1)$ alene.

Amplituden av signalet $S(R_2, T_2)$ angir primært formasjonens resistivitet i asimutretningen $\alpha = 120^\circ$, og amplituden av signalet $S(R_3, T_3)$ angir primært formasjonens resistivitet i asimutretningen $\alpha = 240^\circ$. Asimutfølsomheter kan også oppnås for en hvilken som helst asimutvinkel ved bruk av denne virtuelle respons-syntesemetode.

Man kan f.eks. konstruere en virtuell sender T_α som er rettet i asimutretningen α fra de faktiske senderne T_1, T_2 og T_3 , samt anordne en virtuell mottaker R_α i samme asimutretning α fra mottakerne R_1, R_2 og R_3 . Amplituden av den syntetiserte respons $S(R_\alpha, T_\alpha)$ angir da resistiviteten i den ønskede α -retning.

En lite komplisert måte å syntetisere en sender $T_{\alpha=60}$ er å ganske enkelt addere signalene T_1 og T_2 . Skråvinkelen θ blir noe forandret, men denne virkning kan kompenseres empirisk eller ignoreres. En virtuell mottaker $R_{\alpha=60}$ kan konstrueres på lignende måte. Det kan vises at signalet $S(R_{60}, T_{60})$ kan uttrykkes ved:

$$(7) \quad S(R_{60}, T_{60}) = S(R_1, T_1) + S(R_1, T_2) + S(R_2, T_1) + S(R_2, T_2)$$

Signalene $S(R_{180}, T_{180})$ og $S(R_{300}, T_{300})$ kan uttrykkes på lignende måte ved:

$$(8) \quad S(R_{180}, T_{180}) = S(R_2, T_2) + S(R_2, T_3) + S(R_3, T_2) + S(R_3, T_3)$$

$$(9) \quad S(R_{300}, T_{300}) = S(R_1, T_1) + S(R_1, T_3) + S(R_3, T_1) + S(R_3, T_3)$$

Som vist i fig. 6, gir disse ligninger måleverdier for asimutresistivitet i seks forskjellige retninger med samme innbyrdes vinkelavstand. Disse seks måleverdier kan behandles for å gi en retningsvektor som angir retningen til en nærliggende laggrense, f.eks.:

Retning =

$$(\rho_0 \cos 0^\circ + \rho_{60} \cos 60^\circ + \rho_{120} \cos 120^\circ + \rho_{180} \cos 180^\circ + \rho_{240} \cos 240^\circ + \rho_{300} \cos 300^\circ) i \\ + (\rho_0 \sin 0^\circ + \rho_{60} \sin 60^\circ + \rho_{120} \sin 120^\circ + \rho_{180} \sin 180^\circ + \rho_{240} \sin 240^\circ + \rho_{300} \sin 300^\circ) j$$

Mange forskjellige metoder kan anvendes for å anslå avstanden til laggrensen, eller f.eks. forandringen i tilsynelatende resistivitet (utledet fra $S(R_L, T_L)$) kan anvendes for å anslå denne avstand. Alternativt kan størrelsen av den retningsvektor som er definert ovenfor benyttes for å anslå avstanden.

Når verktøyet omfatter mer enn én sender for å opprette flere sender/mottaker-avstander, kan den tilsynelatende resistivitet i forskjellige avstander fra verktøyet måles. Ut i fra fig. 7 vil det erkjennes at når verktøyet er nesten parallelt med laggrensen, så kan forskjellen mellom tilsynelatende resistiviteter for de forskjellige mottaker/sender-konfigurasjoner anvendes for å anslå avstandene D_1, D_2 (innfallsvinkelen) mot laggrensen. For å øke påliteligheten av denne anslåtte verdi, kan forandringstakten for de tilsynelatende resistiviteter sporfølges for ytterligere informasjon.

Fig. 8 viser et funksjonelt blokkskjema for det elektriske utstyr i resistivitetsverktøyet 202. Det elektroniske utstyr omfatter en reguleringsmodul 802 som er koplet til en analog omkopler 804. Denne analoge omkopler 804 er konfigurert for å drive en hvilken som helst av senderspolene T_1, T_2, T_3, T_4 med et høyfrekvens-signal fra høyfrekvenssignalkilden 806. Reguleringsmodulen 802 velger fortrinnsvis en viss senderspole, har en tilstrekkelig lang pause for at transientene skal dø ut, og signalerer så datalagrings-/sendermodulen 810 til å ta opp en amplitude- og faseprøve på de signaler som mottas av hver av mottakerne. Reguleringsmodulen 802 gjentar fortrinnsvis denne prosess i rekkefølge for hver av senderne. Amplitude- og faseforskyvningsverdiene frembringes av amplitude- og faseforskyvningsdetektoren 808 som er koplet til hver av mottakerspolene R_1, R_2, R_3, R_4 for dette formål.

Disse $S(R_i, T_i)$ -amplitude- og faseprøver blir fortrinnsvis overført til jordoverflaten for behandling med det formål og derved bestemme (i) formasjonens resistivitet, (ii) avstanden til den nærmeste laggrense, (iii) retningen til den nærmeste laggrense, samt (iv) resistiviteten for hvilke som helst nær tilstøtende leier. Data-

5 lagrings-/sendermodulen 810 kan koples til signalenheten 35 (fig. 1) for å overføre signalmåleverdier til jordoverflaten. Signalenheten 35 kan anvende en hvilken som helst kjent teknikk for å overføre informasjon til jordoverflaten, innbefattet, men ikke begrenset til (1) slamtrykkpuls, (2) trådledningsforbindelse, (3) akustisk bølge, samt (4) elektromagnetiske bølger.

10 Fig. 10 viser fasen av $S(R_1, T_1)$ i forhold til det overførte signal. Denne fase er vist som en funksjon av avstanden fra en laggrense mellom et homogent medium med resistivitet $1 \Omega \cdot m$ (f.eks. skifer) og et homogent medium med resistivitet $10 \Omega \cdot m$ (f.eks. sandsten). Resistivitetsverktøyet 202 antas å ligge parallelt med laggrensen i en dybde D og orientert slik at laggrensen befinner seg i asimutret-

15 ningen $\alpha = 0$. Sender og mottaker er anordnet 101,6 cm fra hverandre, og det anvendes en signalfrekvens på 0,5 MHz. De negative dybdeverdier (venstre side av opptegningen) angir at verktøyet 202 faktisk befinner seg i skifersjiktet (grensen ligger i retningen $\alpha = 180^\circ$), og de positive dybdeverdier (høyre side) angir at verktøyet befinner seg i sandstenlaget (laggrense i retningen $\alpha = 0^\circ$). Kurver vist for

20 skråvinklene $\theta = 0, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 90^\circ$. Nærmere undersøkelse åpenbarer at med verktøyet i sandstenlaget, kan faseforskyvningen teoretisk anvendes for å observere laggrensen for en avstand på over 1 m.

Fig. 11 viser faseforskjellen mellom $S(R_1, T_1)$ og $S(R_{180}, T_{180})$ som en funksjon av avstanden fra en laggrense under samme betingelser som tidligere. Her

25 kan det observeres at spoler i skråvinkler mellom $\theta = 45^\circ$ og 60° oppviser den høyeste fasefølsomhet overfor laggrensen.

Fig. 12 viser amplituden av $S(R_1, T_1)$ i forhold til amplituden av det utsendte signal som en funksjon av avstanden fra laggrensen under samme betingelser som tidligere. Nærmere undersøkelse åpenbarer at med verktøyet i sandstein,

30 kan signalamplituden teoretisk sett anvendes for å observere laggrensen fra en avstand på over 1,5 m.

Fig. 13 viser amplituden av $S(R_1, T_1)$ i forhold til $S(R_{180}, T_{180})$ som en funksjon av avstanden fra en laggrense under samme betingelser som tidligere. Her observeres det atter at spolene i skråvinkler mellom $\theta = 45^\circ$ og 60° oppviser den største følsomhet overfor laggrensen.

5 Det bemerkes at undersøkelsesdybden for signalet $S(R_j, T_i)$ ikke bare er bestemt av sender/mottaker-avstanden, men også av antennespolenes skråvinkel θ . Virtuelle antenner med digitalt variable skråvinkler kan syntetiseres ved å ta en egnet kombinasjon av T_L - og T_Z - eller T_T -komponentene. Dette kan være en fremgangsmåte for å frembringe følsomme spolekonfigurasjoner hvis mekaniske be-
10 traktninger hindrer spolene fra å monteres i de ønskede skråvinkler.

Fig. 9 viser et resistivitetsverktøy 302 med en alternativ konfigurasjon. I denne konfigurasjon tjener en faktisk senderspole 104 som sender T_L . Dette reduserer regningsomkostninger og konstruksjonsytelser, men bibeholder den ønskede asimutfølsomhet. De virtuelle responssynteseligninger for denne konfigurasjon kan vises å være:

$$(10) \quad S(R_L, T_L) = (S(R_1, T_L) + S(R_2, T_L) + S(R_3, T_L)) / (3 \cos \theta)$$

$$(11) \quad S(R_Z, T_L) = (2 S(T_1, T_L) - (S(R_2, T_L) + S(R_3, T_L))) / (3 \sin \theta)$$

$$(12) \quad S(R_T, T_L) = (S(R_2, T_L) - S(R_3, T_L)) / (\text{sqrt}(3) \sin \theta)$$

Som nevnt tidligere er en homogen formasjon (hvilket vil si uten noen nærliggende laggrenser) $S(R_Z, T_L)$ og $S(R_T, T_L)$ lik null. Når en nærliggende laggrense ligger i retningen $\alpha = 0$, så vil $S(R_T, T_L)$ være neglisjerbar og amplituden av $S(R_Z, T_L)$ kan anvendes for å anslå avstanden til laggrensen. For andre asimutvinkler, vil den vinkel α som maksimerer uttrykket

$$S(R_{Z'}, T_L) = S(R_Z, T_L) \cos \alpha + S(R_T, T_L) \sin \alpha$$

25 er asimutretningen til laggrensen. Størrelsen av $S(R_{Z'}, T_L)$ kan anvendes for å anslå avstanden til laggrensen.

Fig. 14 viser faser for $S(R_1, T_L)$ i forhold til det utsendte signal som en funksjon av avstanden fra laggrensen. Det bør bemerkes at i denne og de følgende opptegninger vil bare mottakerspolens orientering forandres etter hvert som skråvinkelen θ forandres. De øvrige betingelser forblir de samme. Atter kan fasever-
30 dien anvendes for å observere laggrensen fra en avstand på over 1 m.

Fig. 15 viser faseforskjellen mellom $S(R_1, T_L)$ og $S(R_{180}, T_L)$ som en funksjon av avstanden fra laggrensen under de samme betingelser som tidligere. Her kan det observeres at spoler skråstilt i større skråvinkler er mer fasefølsomme for nærvær av grensen. Signalamplituden avtar også ved de større skråvinkler, slik at

5 en kompromissvinkel på omkring 60° kan være å foretrekke.

Fig. 16 viser amplituden av $S(R_1, T_L)$ i forhold til amplituden av det utsendte signal som en funksjon av avstanden fra en laggrense, under samme betingelser som tidligere. Nærmere undersøkelser åpenbarer at med verktøyet i sandstein, kan signalamplituden teoretisk anvendes for å observere laggrensen fra en av-

10 stand på over 1,25 m. Den tidligere nevnte kraftige svekning av signalene ved økende skråvinkler er klart vist her.

Fig. 17 viser amplituden av $S(R_1, T_L)$ i forhold til $S(R_{180}, T_L)$ som en funksjon av avstanden fra en laggrense under samme betingelser som tidligere. Her kan det atter observeres at spoler som er skråstilt i større vinkler oppviser den

15 største sensitivitet overfor laggrensen, men signaleffekt-betraktninger kan begrense skråvinklene til omkring 60° eller mindre.

Andre alternative verktøyutførelser av samme art som i fig. 9, men med et sett av skråstilte senderspoler, og bare ikke-skråstilte mottakerspoler, kan også være nyttig for å frembringe et asimutfølsomt resistivitetsverktøy. Synteseligninger

20 for virtuelle responssignaler $S(T_T, R_L)$ og $S(T_Z, R_L)$ kan utledes og anvendes for å bestemme asimutretningen til laggrenser.

Et asimut-avstembart resistivitetsverktøy er blitt beskrevet. Dette verktøy kan anvendes for å detektere nærvær av et nærliggende leie samt for å anslå nær ved å måle formasjonens resistivitet i asimutretningen. Fig. 5 viser f.eks. et bore-

25 hull og et sandlag på undersiden av et mer ledende skiferleie. Den tilsynelatende resistivitet målt i retning oppover er da lavere enn resistiviteten målt i retning nedover. Denne forskjell mellom resistivitetsverdiene i retning oppover og nedover kan anvendes for å påvise det nærliggende, ledende leie og anslå avstanden til leiegrensen. Asimutretningen for minste og største målte resistivitet kan da anvendes for å bestemme retningen til leiegrensesjiktet.

30

Skjønt foreliggende oppfinnelse er blitt beskrevet og omtalt under henvisning til en foretrukket utførelse, vil det forstås at variasjoner med hensyn til detaljer i denne utførelse kan finne sted uten avvik fra oppfinnelsens omfangsområde.

PATENTKRAV

1. Resistivitetsverktøy (102, 202) for bruk i et borehull med en viss borehulls-akse, og hvor resistivitetsverktøyet omfatter:

5 minst én senderantenne (104, 108) konfigurert for å sende ut et radiofrekvenssignal, og

minst en mottakerantenne (110, 112) konfigurert for å motta dette radiofrekvenssignal

karakterisert ved at resistivitetsverktøyet er asimutalt avstembart, og

10 a) resistivitetsverktøyet omfatter minst tre mottakerantennener (216, 218, 220) orientert i en skråvinkel i forhold til borehullaksen, og hvor mottakerantennene er orientert i forskjellige asimutretninger eller

b) verktøyet omfatter minst tre senderantennener (208, 210, 212) konfigurert for å sende ut et radiofrekvenssignal, og hvor disse senderantennene er orientert i en
15 viss skråvinkel i forhold til borehullaksen, og hvor senderantennene er orientert i forskjellige asimutretninger og minst én mottakerantenne konfigurert til å motta radiofrekvenssignalet.

2. Verktøy som angitt i krav 1, og hvor mottakerantennene er orientert i jevnt
20 fordelte asimutretninger i forhold til en verktøyakse.

3. Verktøy som angitt i krav 1, og hvor mottakerantennene har en og samme felles skrå vinkel.

25 4. Verktøy som angitt i krav 3, og hvor den felles skrå vinkel ligger mellom 45° og 60° , med grenseverdiene inkludert.

5. Verktøy som angitt i krav 3, og hvor den felles skråvinkel er hovedsakelig lik $\arccos(3^{-1/2})$, og mottakerantennene står vinkelrett på hverandre.

30

6. Verktøy som angitt i et hvilket som helst av de foregående krav, og hvor sender- og mottakerantennene er trådleddningsspoler.

7. Verktøy som angitt i krav 6, og hvor senderantennen omfatter en enkelt ledersløyfe.
8. Verktøy som angitt i krav 1, og hvor signalene fra mottakerantennene kombineres for å syntetisere mottatte signaler fra en eller flere virtuelle mottakere.
9. Verktøy som angitt i krav 8, og hvor en eller flere virtuelle mottakere inkluderer en virtuell mottaker orientert med en skråvinkel på 0° .
10. Verktøy som angitt i krav 8, og hvor den ene eller flere virtuelle mottakere omfatter en virtuell mottaker orientert med en skråvinkel på 90° .
11. Verktøy som angitt i krav 8, og hvor den ene eller flere virtuelle mottakere omfatter en virtuell mottaker orientert med en asimutretning som er forskjellig fra den tilsvarende vinkel for en hvilken som helst av de minst tre mottakerantenner.
12. Verktøy som angitt i krav 1 og som videre omfatter en referansemottakerantenne orientert med en skråvinkel på 0° , hvor signaler fra referansemottakerantennen anvendes for å bestemme en faseforskjell og relativ svekning av signaler fra de minst tre mottakerantenner.
13. Verktøy som angitt i krav 1, og som videre omfatter minst tre senderantenner konfigurert for å sende ut et radiofrekvenssignal, hvor disse minst tre senderantenner hver er orientert i en viss skråvinkel i forhold til borehullaksen, og hvor de minst tre senderantenner er orientert i forskjellige asimutretninger.
14. Verktøy som angitt i krav 1, og hvor senderantennene er orientert i jevnt fordelte asimutretninger i forhold til en verktøyakse.
15. Verktøy som angitt i krav 1, og hvor senderantennene har en og samme felles skråvinkel.

16. Verktøy som angitt i krav 15, og hvor den felles skråvinkel ligger mellom 45° og 60° , med grenseverdiene inkludert.

17. Verktøy som angitt i krav 15, og hvor senderantennene står hovedsakelig
5 vinkelrett på hverandre.

18. Verktøy som angitt i krav 1, og hvor signaler fra mottakerantennene som reaksjon på hver av senderantennene kombineres for å syntetisere mottatte signaler fra en eller flere virtuelle senderantenner.

10

19. Verktøy som angitt i krav 18, og hvor den ene eller flere virtuelle senderantenner omfatter en virtuell senderantenne orientert i en skråvinkel på 0° .

20. Verktøy som angitt i krav 18, og hvor den ene eller flere virtuelle senderantenner omfatter en virtuell senderantenne orientert i en skråvinkel på 90° .
15

21. Verktøy som angitt i krav 18, og hvor den ene eller flere virtuelle senderantenner omfatter en virtuell senderantenne orientert i en asimutretning som er forskjellig fra asimutretningen for en hvilken som helst av de minst tre senderantenner.
20

22. Verktøy som angitt i krav 1, og som videre omfatter en referanse-mottakerantenne orientert i en skråvinkel på 0° , og hvor signaler fra denne referanse-mottakerantenne anvendes for å bestemme en faseforskjell og relativ svekning av signaler fra den minst ene mottakerantenne.
25

23. Fremgangsmåte for å utføre resistivitetsmålinger, hvor fremgangsmåten omfatter trinnene av å:
utsende et elektromagnetisk signal som forplanter seg gjennom en formasjon som omgir et borehull,
30 måle en eller flere karakteristiske særtrekk ved det elektromagnetiske signal
karakterisert ved at resistivitetsmålingene er asimutalt avstembare og
at fremgangsmåten videre inkluderer trinnene:

- a) å bruke tre skråstilte mottakerantenner,
hvor de skråstilte mottakerantenner er orientert i jevnt fordelte asimutretninger,
å kombinere de skråstilte mottakerantenners måleverdier for å utlede en ønsket
måleverdi for en virtuell mottaker, hvor den ønskede virtuelle mottaker har en
5 ønsket skråvinkel og en ønsket asimutretning, eller
- b) å bruke tre skråstilte senderantenner orientert i innbyrdes jevnt fordelte asimut-
retninger for å sende ut de elektromagnetiske signaler som forplanter seg gjen-
nom formasjonen som omgir borehullet,
å bruke en mottakerantenne for å måle ett eller flere karakteristiske sær trekk ved
10 de elektromagnetiske signaler,
å kombinere måleverdiene for å danne en mottakermåleverdi av karakteristiske
særtrekk ved elektromagnetiske signaler som sendes ut fra en ønsket virtuell an-
tenne, hvor den ønskede virtuelle sender har en ønsket skråvinkel og en ønsket
asimutretning.
- 15
24. Fremgangsmåte som angitt i krav 23, og hvor nevnte karakteristiske sær-
trekk omfatter en faseforskyvning.
25. Fremgangsmåte som angitt i krav 23, og hvor nevnte karakteristiske sær-
20 trekk omfatter en svekning.

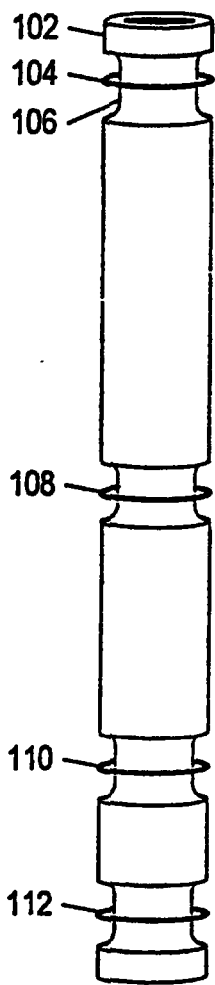


FIG. 2

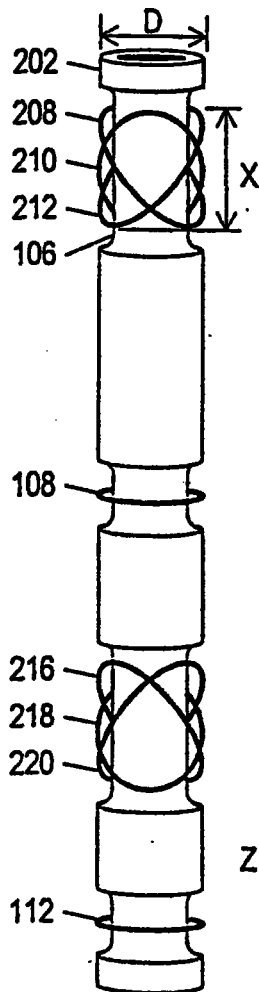


FIG. 4

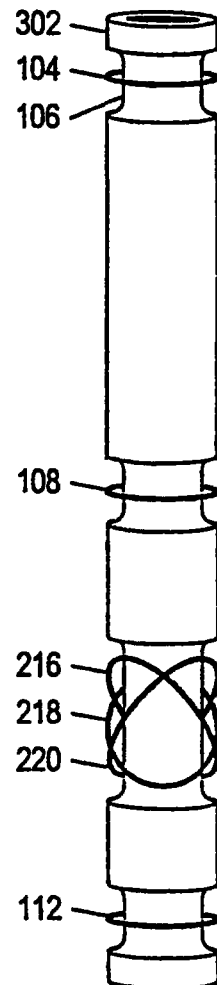


FIG. 9

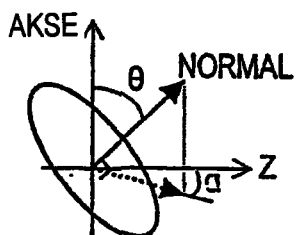
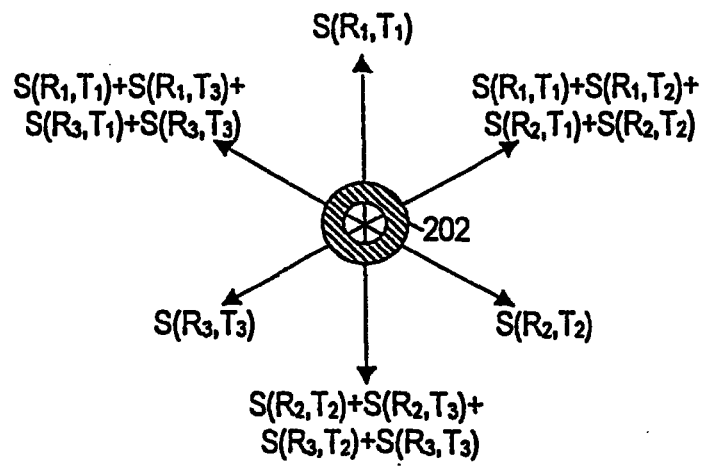
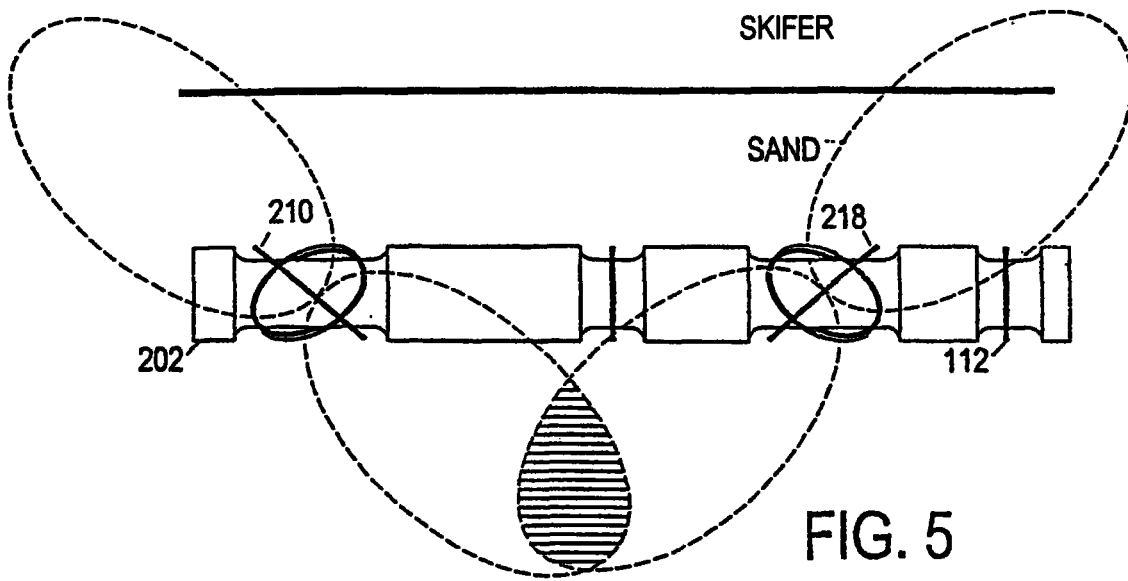


FIG. 3

3 / 12



4 / 12

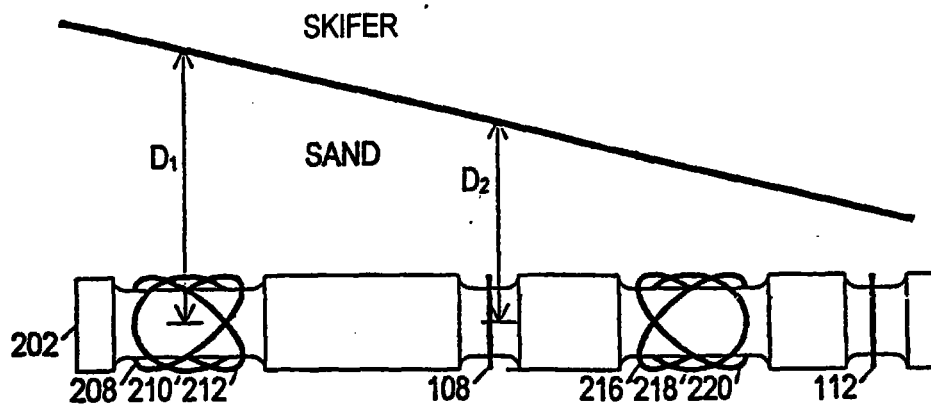


FIG. 7

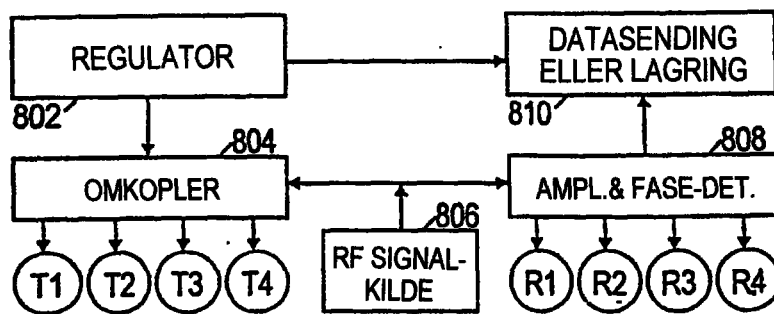


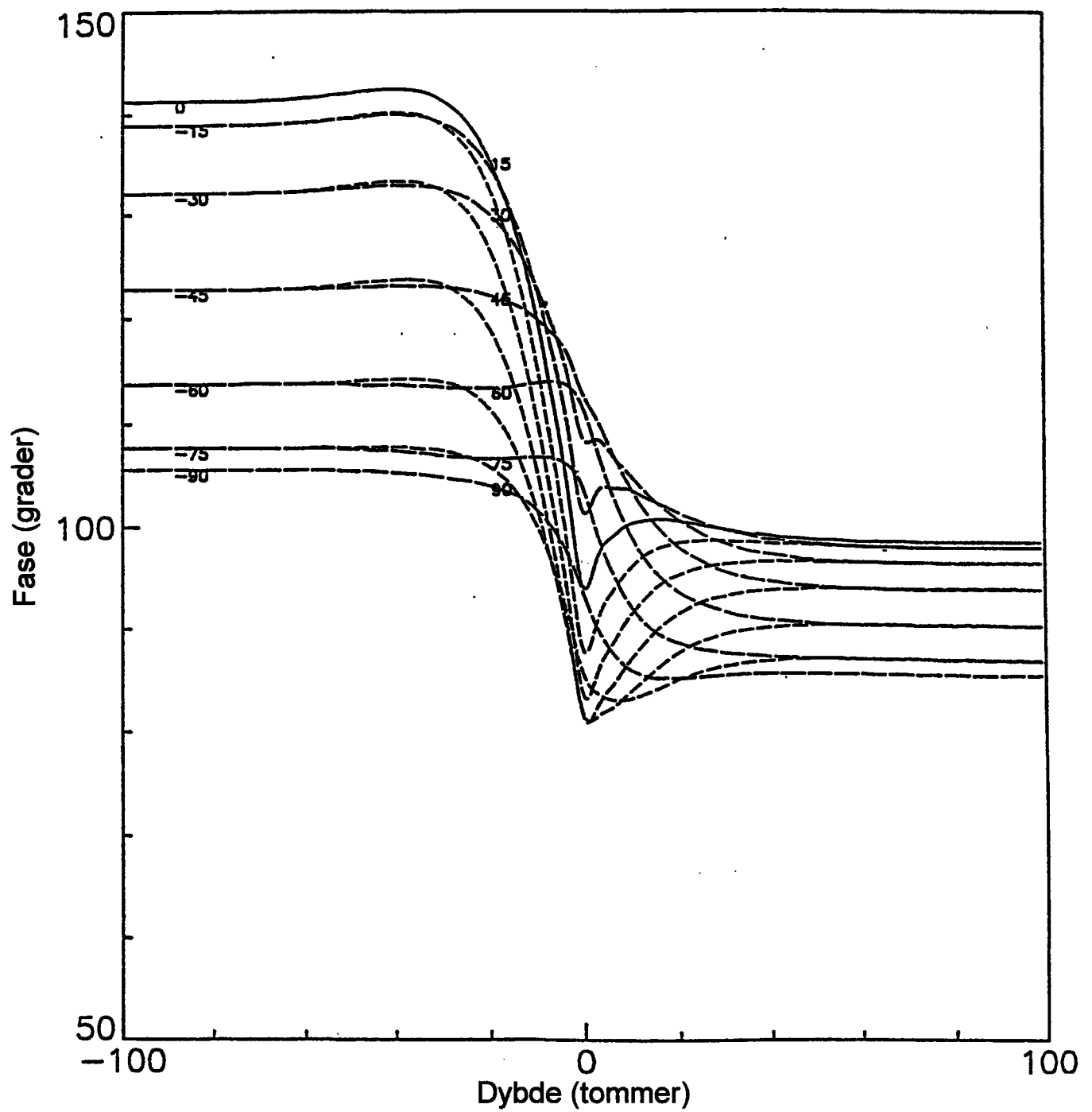
FIG. 8

5 / 12

Horizontal logging

FIG. 10

500 kHz, DRT_40

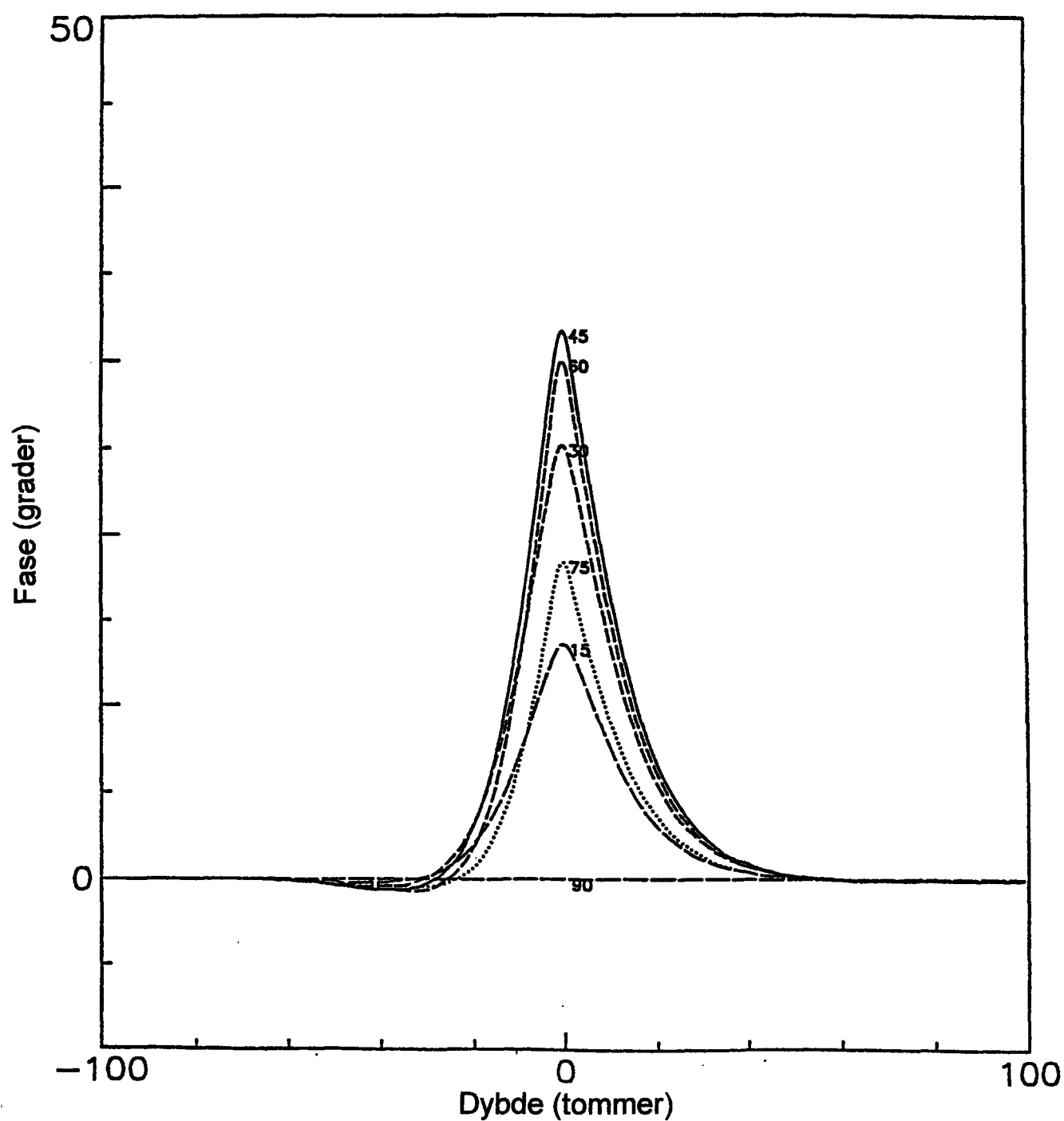


6 / 12

Horizontal logging

FIG. 11

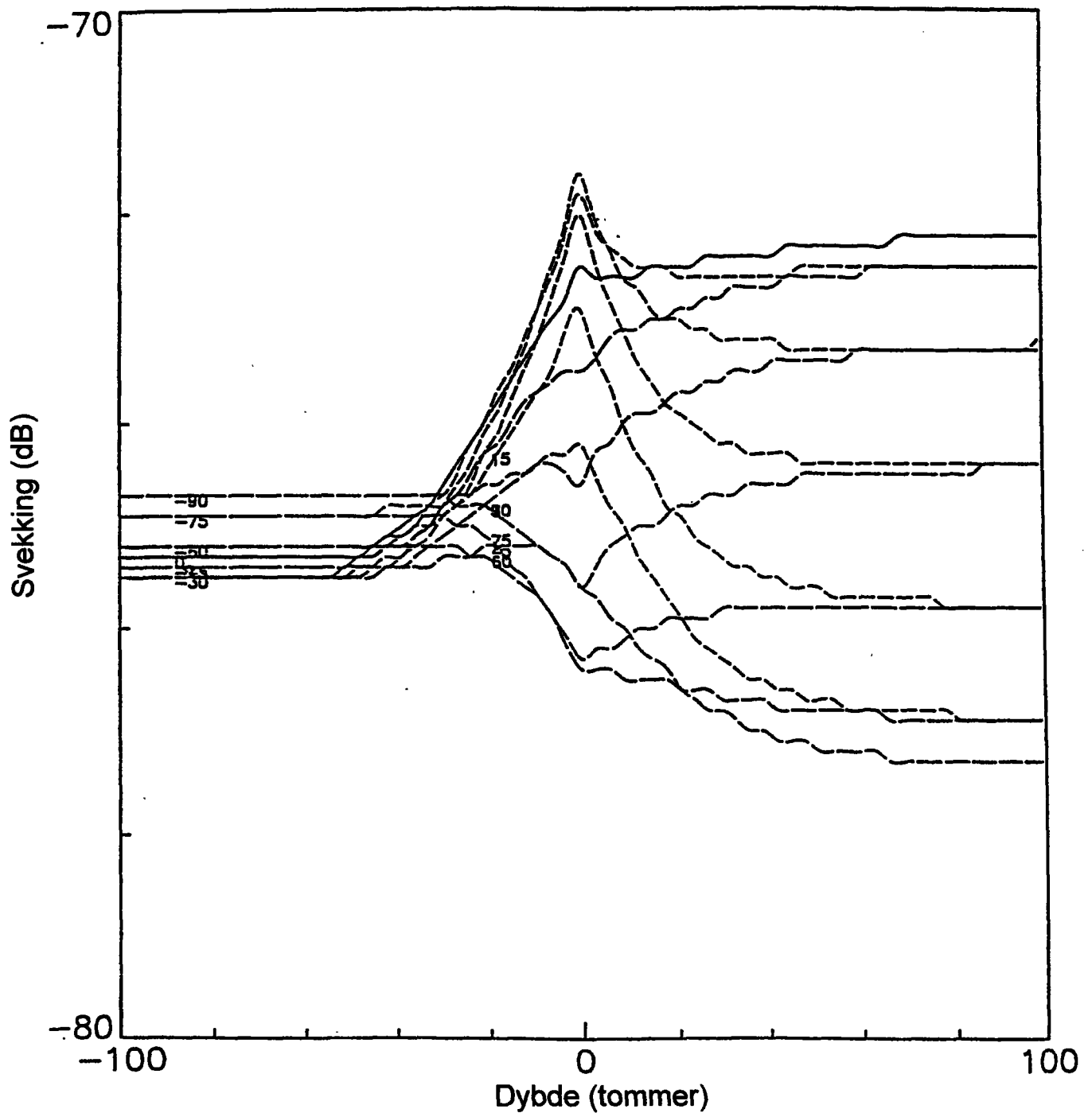
500 kHz, DRT_40; 180 graders forskjell



7 / 12

Horizontal logging
500 kHz, DRT_40

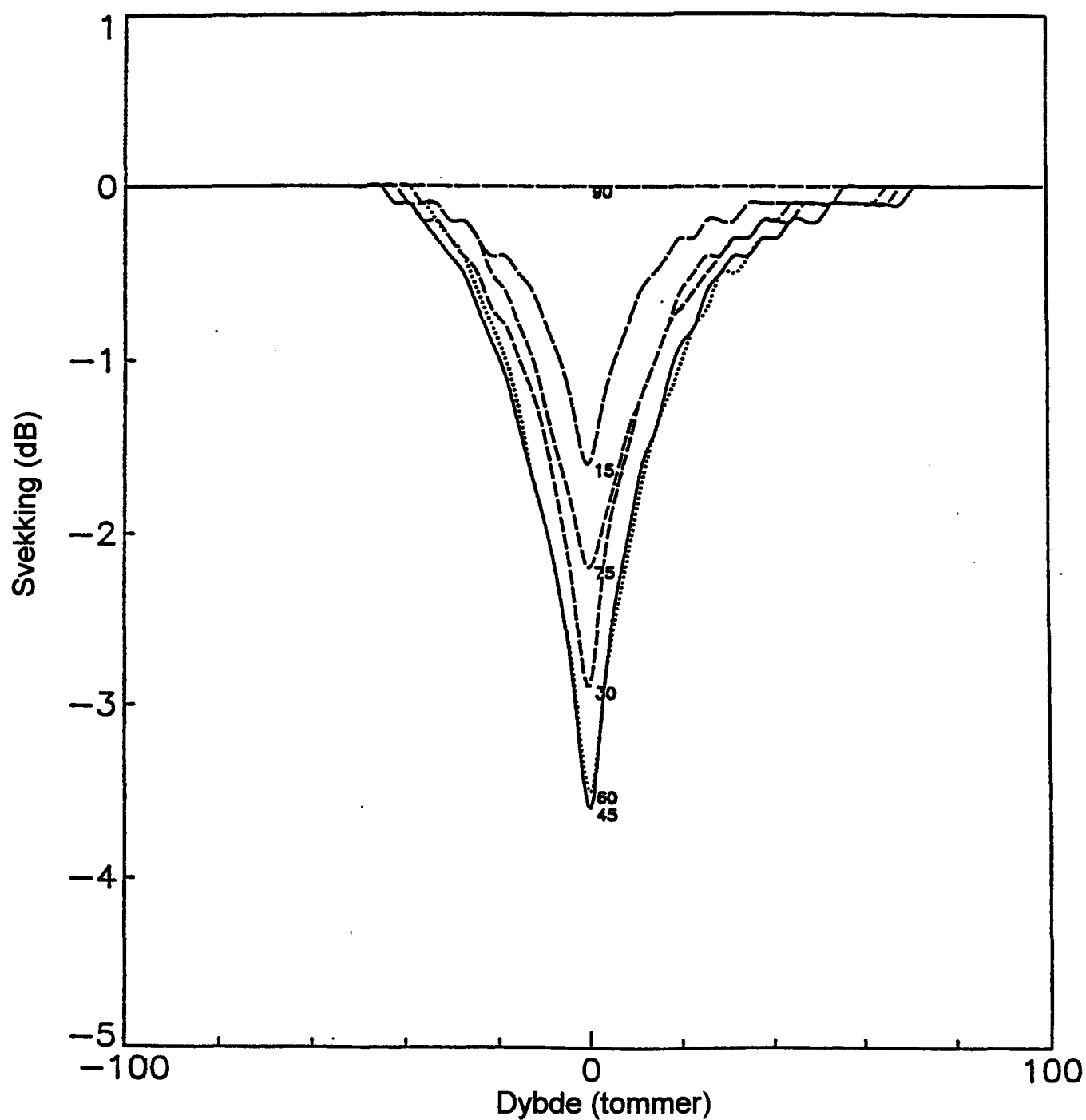
FIG. 12



8 / 12

FIG. 13

Horizontal logging
500 kHz, DRT_40; 180 graders forskjell

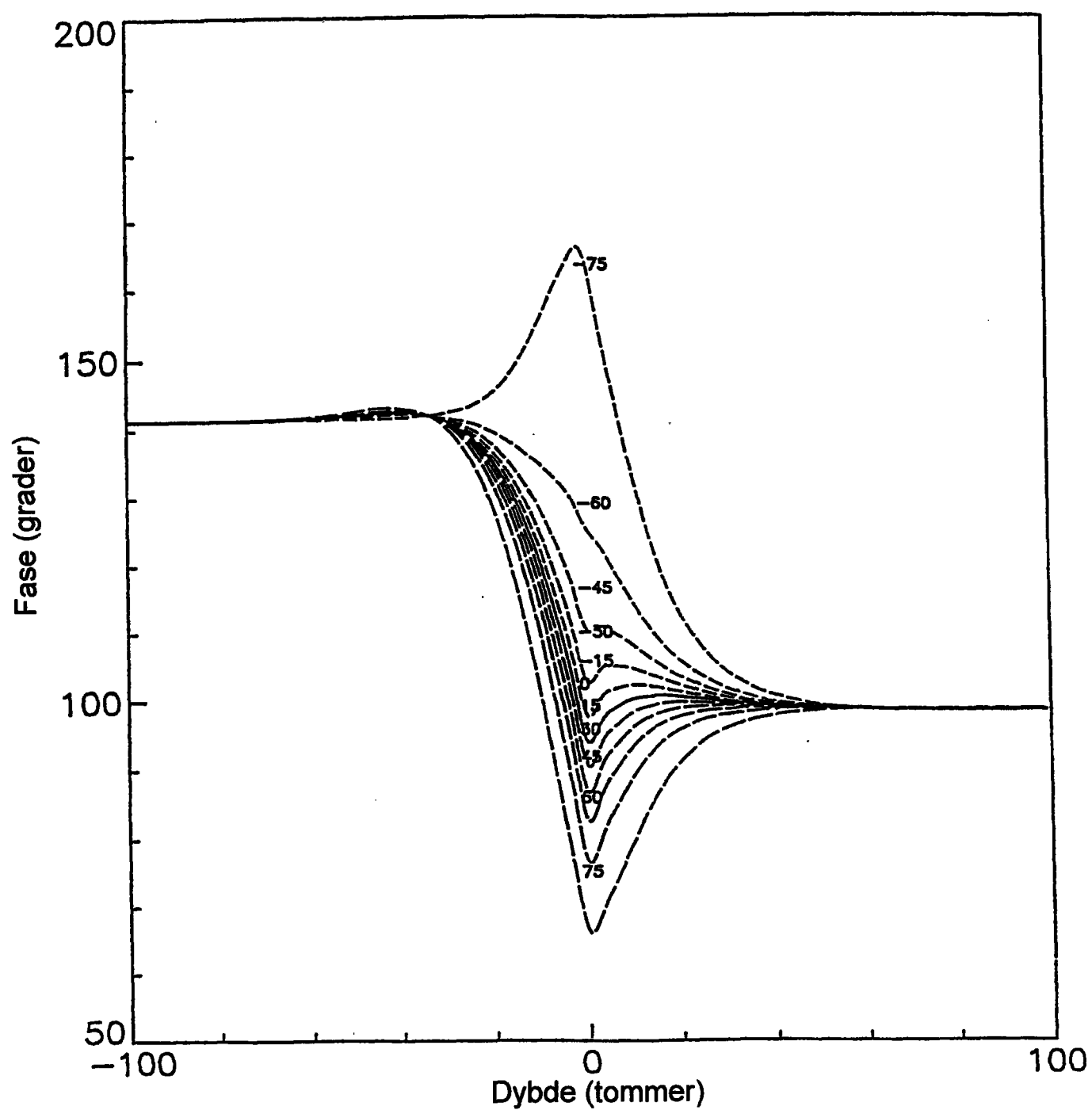


9 / 12

Horizontal logging

FIG. 14

500 kHz, DRT1_40

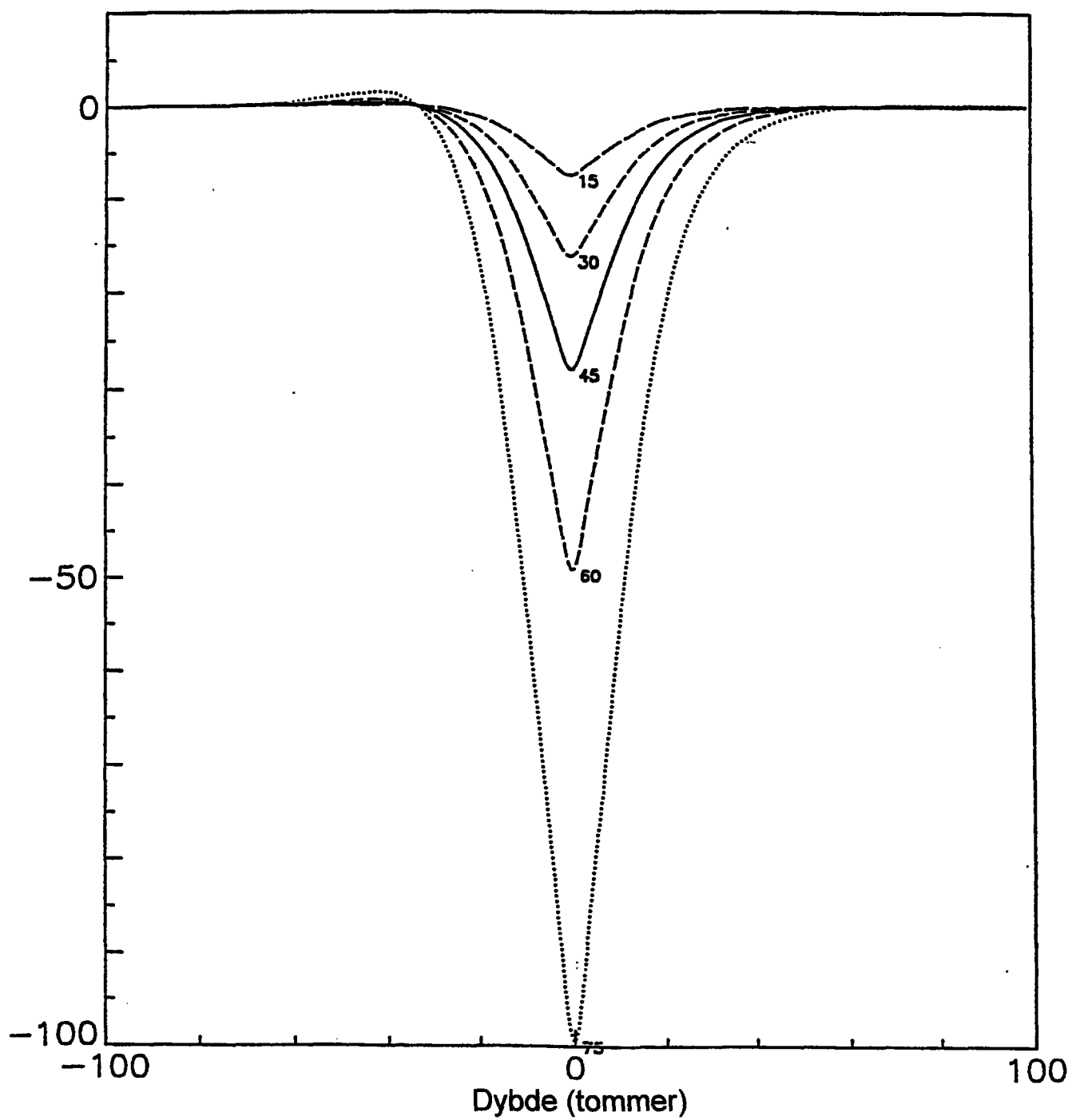


10 / 12

Horizontal logging

FIG. 15

500 kHz, DRT1_40; 180 graders forskjell

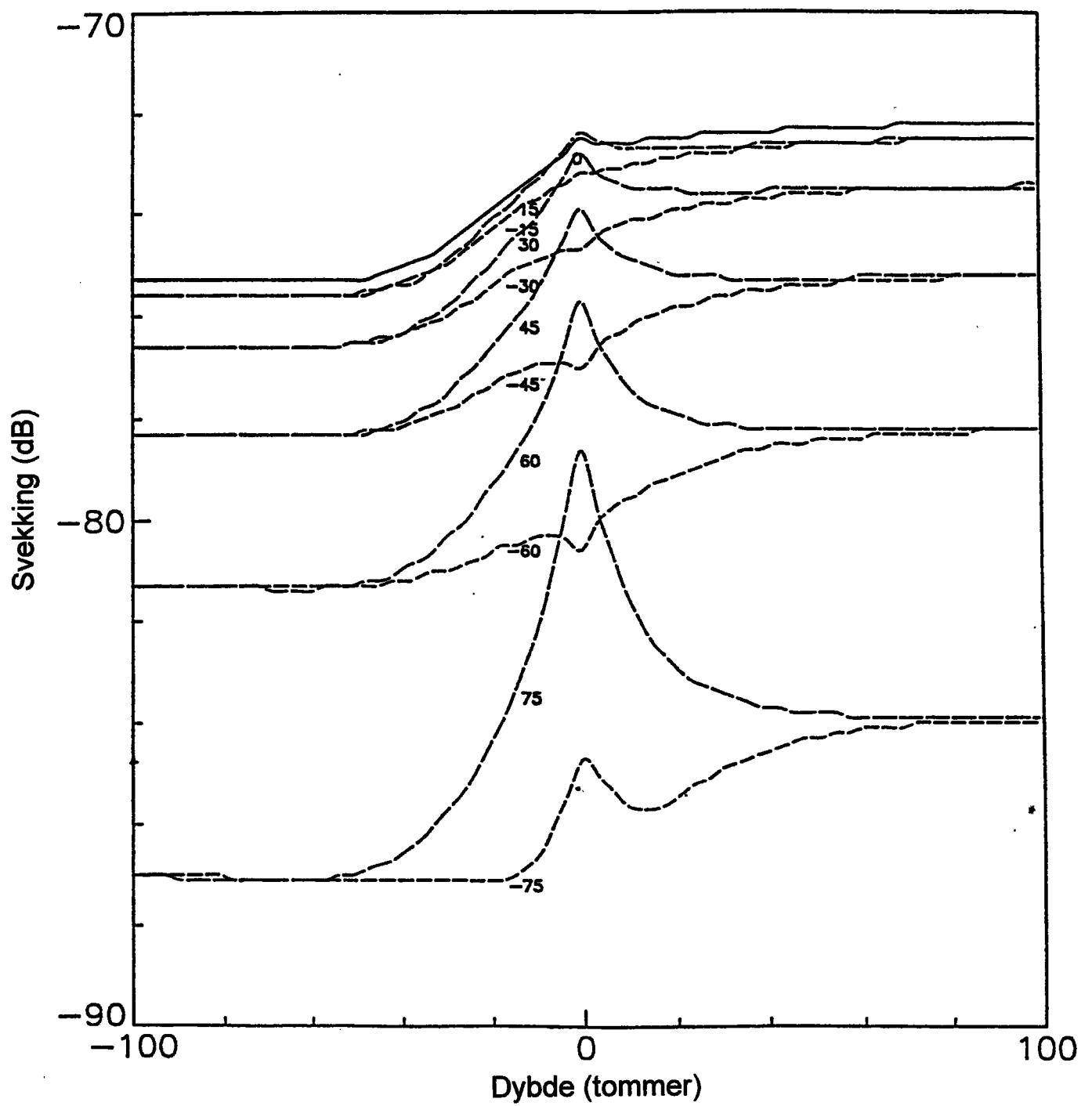


11 / 12

Horizontal logging

FIG. 16

500 kHz, DRT1_40



12 / 12

Horizontal logging

FIG. 17

500 kHz, DRT1_40; 180 graders forskjell

