



(12) PATENT

(19) NO

(11) 339848

(13) B1

NORGE

(51) Int Cl.

E21B 47/026 (2006.01)

G01V 3/30 (2006.01)

Patentstyret

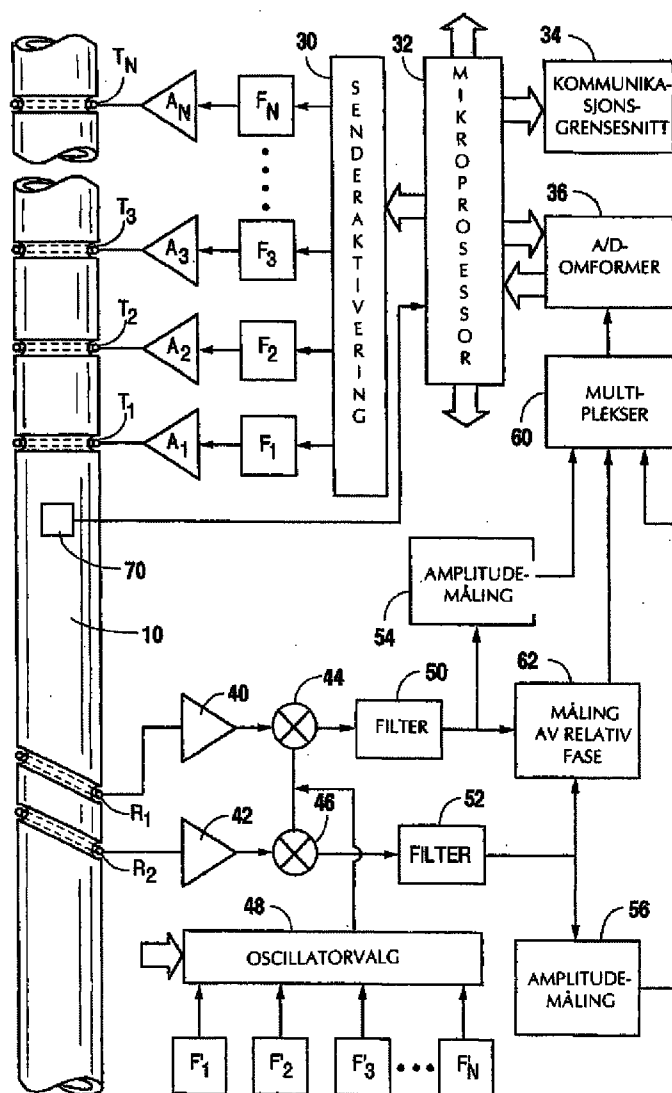
(21)	Søknadsnr	20030015	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2001.07.10 PCT/US2001/41319
(22)	Inng.dag	2003.01.02	(85)	Videreføringsdag	2003.01.02
(24)	Løpedag	2001.07.10	(30)	Prioritet	2000.07.13, US, 615501
(41)	Alm.tilgj	2003.03.05			
(45)	Meddelt	2017.02.06			
(73)	Innehaver	Halliburton Energy Services Inc, 10200 Bellaire Boulevard, US-TX77072 HOUSTON, USA			
(72)	Oppfinner	Michael S Bittar, 8711 Wheatland Drive, US-TX77064 HOUSTON, USA			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			

(54) Benevnelse **Fremgangsmåte for generering av et signal for styring av en borestreng"**

(56) Anførte publikasjoner
US 3510757 A
US 3014177 A

(57) Sammendrag

Fremgangsmåte for generering av et signal for styring av en borestreng i referanse til leiegrenser i en undergrunns formasjon. Fremgangsmåten omfatter samtidig å bestemme nedhulls den horisontale resistivitet, den vertikale resistivitet og den relative helningsvinkel for anisotrope undergrunns formasjoner ved bruk av en antenne-konfigurasjon hvori en senderantenne ($T_1 - T_N$) og en mottagerantenne (R_1, R_2) er orientert i hvert sitt plan som ikke er parallelle og på en slik måte at den vertikale resistivitet og den relative helningsvinkel blir koblet fra hverandre. Fortrinnsvis er enten sender eller mottager montert i en vanlig brukt orientering i et første plan som står vinkelrett på verktøyaksen, mens den andre antenne er montert i et andre plan som ikke er parallelt med det første plan. Det er også omtalt en fremgangsmåte og en anordning for å styre et nedhulls verktøy i en boreoperasjon med det formål å bibeholde borehullet inne i en ønsket jordformasjon. Denne styringsevne frembringes ved å beregne forskjellen eller forholdet mellom fasebaserte eller amplitudebaserte responser for mottagerantennene (R_1, R_2) som er i plan som ikke er parallelle med de plan som senderantennene ($R_1 - T_N$) ligger i.



Denne oppfinnelse angår generelt fremgangsmåte og apparat for å bestemme horisontal og vertikal resistivitet og den relative helningsvinkelen for et borehull i en elektrisk anisotropisk jordformasjon. Nærmere bestemt gjelder denne oppfinnelsen en elektromagnetisk bølgeinduksjonsteknikk for å måle resistivitet ved bruk av et verktøy med en antenne som er anordnet i en plan som er skråstilt i forhold til et plan som forløper vinkelrett på verktøyets akse. Denne oppfinnelse gjelder også fremgangsmåte og apparat for å styre et nedhullsverktøy under et utbøringsarbeid for det formål å bibeholde borehullet innenfor en ønsket jordformasjon.

Innenfor det området som gjelder utboring og logging av petroleumsbrønner blir sensorer som registrerer elektromagnetisk bølgeresistivitet ofte brukt for å frembringe en indikasjon på den elektriske resistivitet for berggrunnsformasjoner som omgir et borehull i jorden. Slik informasjon angående resistivitet er nyttig for å fastslå nærvær eller fravær av hydrokarboner. En viss type elektromagnetisk bølgeresistivitetsverktøy omfatter en senderantenne og et par mottagerantenner plassert i forskjellig avstand fra senderantennen langs verktøyaksen. Senderantennen brukes for å sende ut elektromagnetiske bølger i den omgående formasjon. I sin tur inducerer det magnetisk felt i formasjonen en elektrisk spenning i hver mottagerantenne. På grunn av geometrisk spredning og absorpsjon i den omgivende formasjon vil de induserte spenninger i de to mottagerantenner av forskjellig fase og amplitude. Forsøk har vist at faseforskjellen (Φ) og amplitudeforholdet (svemming A) for de induserte spenninger i mottagerantennene kan indikere formasjonens resistivitet. Det punkt i formasjonen (definert ved en radial avstand fra verktøyaksen) som en slik resistivitetsmåling gjelder, er da en funksjon av senderens frekvens og avstanden fra senderen til midtpunktet mellom de to mottagere. Det kan således oppnås flere radiale dybdeområder for undersøkelse av resistivitet enten ved å anordne flere sendere i forskjellige avstander fra mottagerparet eller ved å drive en enkel sender ved flere frekvenser.

Hvis en formasjon er elektrisk isotropisk, så vil de motstander som måles i forskjellige undersøkelsesdybder ved hjelp av et slikt elektromagnetisk

bølgeresistivitetsverktøy ha samme verdi. Imidlertid hvis de resistiviteter som tilsvare forskjellige undersøkelsesdybder er innbyrdes forskjellige, så vil slike forskjeller indikere at den formasjon som ble målt er elektrisk anisotropisk. I elektriske anisotropiske formasjoner skriver en foreliggende anisotropi seg hovedsakelig fra ytterst fine lagdannelser under den sedimentære oppbygning av formasjonen. I et formasjonskoordinatsystem orientert slik at x-y-planet forløper parallelt med formasjonslagene, mens z-aksen er rettet perpendikulært på formasjonslagene, vil resistiviteten R_x og R_y henholdsvis x-retningen og y-retningen være den samme, mens resistiviteten R_z i z-retningen vil være forskjellig fra R_x og R_y . Resistiviteten i en retning parallelt med formasjonsplanet (hvilket vil si x-y-planet) vil således være kjent som den horisontale resistivitet R_h , mens resistiviteten i retningen vinkelrett på formasjonsplanet (nemlig z-retningen) være kjent som den vertikale resistivitet R_v . Anisotropiindeks vil da være definert som $\alpha = [R_v/R_h]^{1/2}$.

Den relative helningsvinkel, θ , er vinkelen mellom borehullsaksen (verktøyaksen) og normalen på formasjonsplanet. Hvis aksen for et elektromagnetisk bølgeresistivitetsverktøy forløper perpendikulært på planet for en anisotropisk formasjon (hvilket vil si $\theta=0^\circ$), vil målingene både av faseforskyvning og amplitudesvekking gjengi bare den horisontale resistivitet. Hvis imidlertid verktøyaksen er skråstilt i forhold til normalen på formasjonsplanet (hvilket vil si for en helningsvinkel som ikke er lik null) vil berggrunnens anisotropi påvirke den resistivitetsverdi som utledes fra faseforskyvningsmålingene ("faseforskyvningsresistivitet" eller R_ϕ) på annen måte enn den vil påvirke en resistivitet som utledes fra målingene av amplitudesvekkingen ("amplitudesvekkingsresistivitet" eller R_A). For små relative helningsvinkler (for eksempel θ mindre enn omkring 45°), vil forskjellen mellom faseforskyvningsresistivitet og amplitudesvekkingsresistivitet være relativt liten. Denne forskjellen blir imidlertid betydelig for relative helningsvinkler større enn 50° , og forskjellen vil være stor horisontale borehull (hvilket vil si $\theta=90^\circ$).

Forut for foreliggende oppfinnelse har utøvere av denne fremgangsmåte brukt flere forskjellige teknikker for å bestemme jordformasjonens anisotropi, og de

flESTE av disse omfatter bruk av spoleantennner for å måle resistivitet. Hver av disse eksisterende teknikker lider imidlertid av en eller flere ulemper. US patent nr. 4,980,643, meddelt 25. desember 1990 til Gianzero og Su, angir for eksempel bruk av ekstra mottagerspoler som er orientert forskjellig fra (ikke koaksiale med) 5 vanlige mottagerspoler for derved å detektere skjevhetssignaler induisert ved skjevheten i det magnetiske feltmønster i nærvær av asymmetriske formasjoner. Aksen for slike ekstra mottagerspoler er da i henhold til denne patent med sluttsifferet 643 i patentnummeret fortrinnsvis anordnet vinkelrett på aksene for de vanlige mottagerspoler, som da er rettet koaksialt med verktøyaksen. Slike 10 ortogonale spolekonfigurasjoner (antennekonfigurasjoner) anses imidlertid vanligvis ikke for å være praktiske når det gjelder et verktøy for måling under utboring (MWD) eller for logging for utboring (LWD) ut i fra det forhold at hvis spolen er plassert i det indre av verktøyet, så vil verktøyets nærvær nødvendiggjøre en ikke vanlig slamstrømningsbane og nedsatt mekanisk styrke 15 for verktøyet. Hvis på den annen side en ekstra spole er anordnet på utsiden av verktøyet, så vil spolen være utsatt for å påføre skade ved formasjonsavkutting i returslamstrømningen.

På lignende måte angir US patent nr. 5,329,448, som er meddelt 12. juli 1994 til 20 Rosthal, en fremgangsmåte og apparat for å bestemme horisontal og vertikal resistivitet i en jordformasjon ved bruk av en gjentatt feilminimaliseringsteknikk. Dette patent med sluttsifre 448 i patentnummeret, og som angir en vanlig antennekonfigurasjon hvori sender- og mottagerspolene er rettet koaksialt med verktøyet, angir imidlertid ingen metode for å bestemme den relative 25 helningsvinkel. I stedet må denne relative helningsvinkel utledes fra en annen målekilde eller fra tidligere kjennskap til formasjonen. US patent nr. 5,656,930, som er meddelt 12. august 1997 til Hagiwara, legger frem en fremgangsmåte for å bestemme anisotropiske egenskaper ved underjordiske formasjoner som omfatter tynne, laminerte sand-/skiferfrekvenser ved bruk av et induksjonsloggeverktøy. 30 Liksom ved patentet med sluttsifre 448, krever imidlertid denne fremgangsmåte i henhold til patentet med sluttsifre 930 utledning av den relative helningsvinkel fra en annen måling.

I en teknikk artikkel med tittelen "A New Method to Determine Horizontal Resistivity in Anisotropic Formations Without Prior Knowledge of Relative Dip", 37. SPLWA i 37. årlige loggingssymposium, New Orleans, 16-19 juni 1996, beskriver Hagiwara en fremgangsmåte for å bestemme den horisontale resistivitet for
5 avvikende borehull eller skråstilte formasjoner ved bruk av to vanlige resistivitetsmålinger av induksjonstype. Hagiwaras fremgangsmåte gir imidlertid ikke den relative helningsvinkel. For å utlede den relative helningsvinkel må formasjonens anisotropi være kjent. Hagiwara viste imidlertid videre at for vanlige induksjonsloggingsverktøy (hvor sender- og mottagerantennene er orientert
10 koaksialt med verktøyet) vil det være umulig å utlede alle tre parametere (nemlig horisontal resistivitet, vertikal resistivitet og relativ helningsvinkel) samtidig. Grunnen til at en slik samtidig løsning ikke er mulig ved bruk av vanlige induksjonsloggeverktøy er at i responsen fra slike verktøy er den vertikale resistivitet og den relative helningsvinkel sammenkoblet (hvilket vil si at de ikke er
15 innbyrdes uavhengige).

I europeisk patent søknad nr. 97118854.5 fra Wu, publisert 6. mai 1998, angir Wu en fremgangsmåte og et apparat for å bestemme horisontal ledningsevne, vertikal ledningsevne samt relativ helningsvinkel under en utbøringsprosess. Hvis den
20 relative helningsvinkel er ukjent, innebærer Wu's teknikk formulering av en sammenheng mellom formasjonens dielektrisitetskonstanter og formasjonens anisotrope konduktiviteter. I det bevis som blir fremlagt av Hagiwara og som er nevnt ovenfor, utgjør imidlertid dielektrisitetskonstantene antatte størrelser og deres bidrag til faseforskyvningsresistiviteten er minimal. Selv om
25 dielektrisitetskonstantene er kjent vil derfor den vertikale resistivitet og den relative helningsvinkel fremdeles være sammenkoblet og muliggjør da ikke noen samtidig løsning.

Det vil derfor være et vesentlig fremskritt innenfor dette området å frembringe en
30 forbedret fremgangsmåte og tilsvarende apparat for samtidig å bestemme horisontal resistivitet, vertikal resistivitet samt relativ helningsvinkel i MWD eller LWD arbeidsmodus.

For å maksimalisere fremstillingen av hydrokarboner fra en petroleumsbrønn vil det videre være gunstig å styre boreapparatet slik i forhold til de geologiske leiegrenser at vedkommende borehull bibeholdes inne i en ønsket hydrokarbonholdig jordformasjon eller såkalt "utbyttesone". Som omtalt av Luling i US patent nr. 5,241,273, vil når vanlige resistivitetsverktøy passerer geologiske leiegrenser mellom formasjoner med forskjellige resistiviteter, og vil responsene fra slike verktøy oppvise hornpartier ved leiegrenser. Før fremkomsten av den fremgangsmåte som ble omtalt av Luling, har utøvere innenfor dette området betraktet slike hornpartier som uheldige anomaliteter og søkt etter måter for å eliminere disse hornene. I motsetning til dette har Luling kjent verdien av disse hornområder og angitt en fremgangsmåte for å utnytte disse hornpartier til hjelp under retningsutboring. Luling angir imidlertid bruk av vanlig sender- og mottagerantennor orientert i plan ortogonalt på verktøyaksen, og slike vanlige resistivitetsverktøy bringer da samme type hornrespons uavhengig om verktøyet vandrer fra et område med lavere resistivitet til høyere resistivitet eller fra et område med høyere resistivitet til lavere resistivitet. Når et vanlig resistivitetsverktøy nærmer seg en leiegrense mellom et første leie med en viss resistivitet og et andre leie med forskjellig resistivitet, vil Lulings fremgangsmåte følgelig bare i nærvær av vedkommende leiegrense, og Lulings fremgangsmåte gir ingen tidlig indikasjon på om resistiviteten i det andre leiet er høyere eller lavere enn den som foreligger i det første leiet. Bare etter at verktøyet har krysset grensen og har vandret en tilstrekkelig avstand inn i det andre leiet vil Lulings fremgangsmåte kunne frembringe en anvisning om resistiviteten har økt eller avtatt, slik at utborende kan treffe en avgjørelse med hensyn til hvilket leie som er mer etter ønske. Som en følge av dette kan Lulings fremgangsmåte lede til unødvendige inntrengninger i uønskede formasjonsleier.

I US patent nr. 5,230,386, gir Wu og Wisler en annen fremgangsmåte for å bibeholde en borestreng inne i en viss formasjon under en retningsutbøringsprosess ved bruk av en sensor for elektromagnetisk forplantningsresistivitet. Denne fremgangsmåte i henhold til Wu og Wisler krever imidlertid en resistivitetslogg som avlesningene fra resistivitetssensorene i retningsutbøringsprosessen kan sammenlignes med. Denne

referanseresistivitetslogg oppnås ved utboring og logging av en forskjøvet vertikal brønn nær beliggenheten av den ønskede retningsutbøringsbrønn eller ved å opprette en antatt logg basert på kjent geologisk informasjon angående det området som er av interesse. Fremgangsmåten i henhold til Wu og Wisler
5 omfatter vesentlige ulemper når det gjelder tid, utgifter og usikkerheter i sammenheng med en slik referanseresistivitetslogg.

En teknisk artikkel med tittelen "A New Generation of Electrode Resistivity Measurements for Formation Evaluation While Drilling" av Bonner et al., SPWLA
10 35. årlige loggingssymposium, 19.-22. juni 1994, angir et fokusert elektroderesistivitetsverktøy som har azimuthal følsomhet og kan anvendes for å styre en borestreng under en retningsutbøringsprosess. Slike elektroderesistivitetsverktøy fungerer imidlertid ved å drive elektrisk strøm inn i en jordformasjon ved direkte ledning, hvilket da krever ledende slam. Følgelig vil
15 slike elektroderesistivitetsverktøy ikke kunne fungere korrekt i oljebasert slam eller i nærvær av resistiv inntrengning.

US patent nr. 5,508,616 til Sato et al., angir en induksjonsloggingsmetode samt tilsvarende apparat for å bestemme den elektriske konduktivitetsfordeling i en
20 jordformasjon i omkretsretningen omkring et borehull. Apparatet i henhold til dette patent med sluttsifre 616 anvender sender- og mottagerspoler som er anordnet langs verktøyaksen på en slik måte at spolene er vendt mot hverandre på skråstilt måte og i symmetriske vinkler. Skjønt 616 apparatet har retningsfølsomhet som kan være til nytte ved styring av et boreverktøy, angir ikke dette 616 patent
25 hvorledes man kan utnytte en sender og en mottager orientert i vilkårlige helningsvinkler i forhold til hverandre for det formål å dra fordel av de spesielle særtrekk med hornområder i den resulterende respons.

I lys av de tidligere angitte begrensninger, vil det også være et vesentlig fremskritt
30 innenfor dette området å frembringe en forbedret fremgangsmåte og tilsvarende apparat for å styre et nedhullsverktøy under en retningsutbøringsprosess for det formål å bibeholde borehullet inne i en ønsket jordformasjon, nemlig ved å frembringe en forutindikasjon angående resistiviteten i en gitt formasjon før

inntrengning i vedkommende formasjon. En slik forbedret fremgangsmåte og tilsvarende apparat vil da kreve en forskjøvet vertikal brønn eller en antatt referanseresistivitetslogg og vil kunne fungere i oljebasert eller vannbasert slam samt forhold hvor resistiv ledende inntrengning finner sted.

5

US 3510757 A beskriver målemetoder for formasjonshelning og apparat som benytter induksjonsspoler. US 3014177 A beskriver et elektromagnetisk jordovervåkingsapparat.

10

Den foreliggende oppfinnelse tilveiebringer en fremgangsmåte for generering av et signal for styring av en borestreng i referanse til leiegrenser i en undergrunns jordformasjon,

karakterisert ved at den omfatter handlingene:

15

å utføre et flertall formasjonsresistivitetsmålinger korrelert med rotasjonsposisjon ettersom nevnte borestreng roterer under en boreoperasjon, idet nevnte målinger er utført gjennom bruk av et loggeverktøy innkoplet i borestrengen;

20

å beregne, fra nevnte flere formasjonsresistivitetsmålinger, et signal som i tiltagende grad er større når loggeverktøyet nærmer seg en første formasjons-leiegrense, og i tiltagende grad er mindre når loggeverktøyet nærmer seg en andre formasjons-leiegrense.

25

Ytterligere trekk ved fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen fremgår av de uselvstendige patentkravene.

30

Det beskrives en forbedret nedhullsmetode og tilsvarende apparat for samtidig å bestemme den horisontale resistivitet, den vertikale resistivitet og relativ helningsvinkel for anisotropiske jordformasjoner. I henhold til foreliggende oppfinnelse oppnås dette formål ved bruk av en antennekonfigurasjon hvori en senderantenne og en mottagerantenne er orientert i ikke-parallele plan, slik at den vertikale resistivitet og den relative helningsvinkel blir avkoblet fra hverandre. Fortrinnsvis er enten senderen eller mottageren montert ved den vanlige orientering i et første plan som forløper vinkelrett på verktøyaksen, mens en annen

antenne er montert i et andre plan som ikke forløper parallelt med det første plan. Skjønt denne oppfinnelsen er primært tilsiktet for MWD eller LWD anvendelse, kan oppfinnelsen også anvendes i forbindelse med ledningskabelbruk og eventuelt med andre anvendelser.

5

Det beskrives også en forbedret nedhullsmetode og tilsvarende apparat for å styre et nedhullsverktøy under en retningsutbøringsprosess for det formål å bibeholde borehullet inne i en ønsket geologisk formasjon ved å frembringe på forhånd en anvisning av resistiviteten i et visst formasjonsleie før inntregning i dette leiet. Slik styringsevne oppnås ved hjelp av sender- og mottagerantennene som er montert i plan som ikke er innbyrdes parallelle samt ved beregning av forskjellen eller forholdet ved henholdsvis fasebaserte eller amplitudebaserte responser fra mottagerantennene. Med et slikt antennearrangement, vil det utledede forhold eller den utledede differanse fra responsene angi om resistiviteten i et leie som man nærmer seg er høyere eller lavere enn resistiviteten i det leiet hvor man befinner seg. Med en slik informasjon kan boreoperatøren styre utbøringsapparatet med det formål å bibeholde borehullet inne i et ønsket geologisk leie.

Foreliggende oppfinnelse vil best bli forstått under henvisning til de vedfølgende tegninger, hvorpå:

Figur 1 viser en skjematisk opprisskisse av et elektromagnetisk bølgeresistivitetsverktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

25

Figur 2 er et skjematisk oppriss av et parti av det viste verktøyet i figur 1 og som angir et blokkskjema for de kretser som anvendes i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

Figur 3 viser et skjematisk pulsdigram som angir en tidssekvens av senderpulser i det viste verktøyet i figur 1.

30

Figur 4 viser et skjematisk pulsdigram som angir en alternativ pulssekvens for senderpulser i det verktøy som er angitt i figur 1.

5 Figur 5 er en skjematisk skisse som angir antennegeometrien for et vanlig elektromagnetisk bølgeresistivitetsverktøy med en senderantenne og en mottagerantenne, som da begge er montert på verktøyet i et plan som forløper vinkelrett på verktøyaksen.

10 Figur 6 er en skjematisk skisse som viser antennegeometrien for et elektromagnetisk bølgeresistivitetsverktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse og med en senderantenne montert på verktøyet i et plan som forløper vinkelrett på verktøyaksen, samt en mottagerantenne montert på verktøyet i et plan som ikke forløper vinkelrett på verktøyets akse.

15 Figur 7 er en skjematisk skisse som viser flere mulige sende-/mottagerantennekonfigurasjoner i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

20 Figur 8 er et skjematisk blokkskjema som viser en prosess som går ut på å frembringe en løsning med hensyn på horisontal konduktivitet, vertikal konduktivitet samt relativ helningsvinkel i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

Figur 9 er en skjematisk perspektivskisse av et kartesiansk koordinatsystem i en sedimentær jordformasjon.

25 Figur 10 er en kurve for amplitudesvekking som funksjon av resistivitet for en typisk jordformasjon.

Figur 11 er en kurve som angir faseforskyvning som funksjon av resistivitet for en typisk jordformasjon.

30

Figur 12 er en kurve for tilsynelatende resistivitet samt funksjon av relativ helningsvinkel for en typisk jordformasjon ved bruk av et enkelt sender-/mottagerpar.

Figur 13 er en kurve som angir tilsynelatende resistivitet som funksjon av relativ helningsvinkel for en typisk jordformasjon, ved bruk av tre sender-/mottagerpar ved en enkel frekvens.

- 5 Figur 14 er en kurve som angir tilsynelatende resistivitet som funksjon av relativ helningsvinkel for en typisk jordformasjon, ved bruk av et enkelt sender-/mottagerpar ved tre forskjellige frekvenser.

- 10 Figur 15 er en skjematisk skisse som viser et typisk antennearrangement for et vanlig resistivitetsverktøy.

Figur 16 er en skjematisk skisse som viser et mulig antennearrangement for et verktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

- 15 Figur 17 er en skjematisk skisse som viser et annet mulig antennearrangement for et verktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

Figur 18 er en skjematisk skisse som viser enda et annet mulig antennearrangement for et verktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

20

Figur 19 er en skjematisk skisse som viser enda et ytterligere mulig antennearrangement for et verktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

Figur 20 er en skjematisk skisse som viser enda et annet mulig antennearrangement for et verktøy i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

25

Figur 21 er en kurve som angir borehullsmålt dybde som funksjon av sann vertikal dybde for en borehull i en hypotetisk jordformasjon.

- 30 Figur 22 er en kurve som viser resistivitetsresponsen for det vanlige verktøy som er angitt i figur 15 etter hvert som det beveger seg gjennom borehullet i figur 21.

Figur 23 er en kurve som viser resistivitetsresponsen i sammenheng med sender T_1 for verktøyet i figur 19, etter hvert som dette vandrer gjennom borehullet i figur 21.

5 Figur 24 er en kurve som viser resistivitetsresponsen i sammenheng med sender T_2 for verktøyet i figur 19, etter hvert som dette beveger seg gjennom borehullet i figur 21.

10 Figur 25 er en kurve som viser forskjellen mellom fase- og amplituderrespons i sammenheng med figurene 23 og 24.

Figur 26 viser en kurve som angir forskjellen mellom resistivitetsresponsen i figur 23 og 24.

15 Figur 27 er en kurve som viser forholdet mellom fase- og amplituderrespons i sammenheng med figurene 23 og 24.

Figur 28 er en kurve som viser forholdet mellom resistivitetsresponsene i figurene 23 og 24.

20 Figur 29 viser en skjematisk skisse som angir et resistivitetsverktøy som nærmer seg en grense mellom to formasjonsleier.

25 Figur 30 er en skjematisk skisse som viser et annet alternativt antennearrangement for et verktøy i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

Figur 31 er en skjematisk skisse som viser enda et ytterligere alternativt antennearrangement for et verktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

30 Figur 32 er en skjematisk skisse som viser enda et annet alternativt antennearrangement for et verktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse.

Figur 33 er en skjematisk skisse som viser enda et ytterligere alternativt antennearrangement for et verktøy i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

Figur 34 er en kurve som viser faseforskyvnings- og amplitudesvekkingsrespons for mottager R_1 i forbindelse med verktøy til figur 30 etter hvert som det vandrer gjennom borehullet i figur 21.

Figur 35 er en kurve som viser faseforskyvnings- og amplitudesvekkingsrespons for mottager R_2 i forbindelse med verktøyet i figur 31 etter hvert som det beveger seg gjennom borehullet i figur 21.

Figur 36 er en kurve som viser forskjellene mellom fase- og amplituderrespons i forbindelse med figurene 34 og 35.

Figur 37 er en kurve som viser forholdene mellom de fase- og amplituderesponser som er angitt i figurene 34 og 35.

Figur 1 viser et loggeverktøy 10 i samsvar med foreliggende oppfinnelse og opphengt i et borehull 12 inne i en jordformasjon 13 på en borerørsstreng 14. Borestrengen 14 omfatter et eller flere vektør 11. Elektromagnetiske sendere (antenner) 16, 18 og 20 (i blant angitt her som senderne henholdsvis T_1 , T_2 , T_3) er fordelt langs lengden av loggeverktøyet 10 i avstand fra elektromagnetiske mottagere (antenner) 22 og 24 (i blant henvist til her som henholdsvis R_1 og R_2). Fortrinnsvis er senderne 16, 18, 20 og mottagerne 22, 24 montert i forsenkninger i verktøy 10 (slik som angitt i figur 2) samt tildekket med ikke-ledende materiale (ikke vist), slik det vil være velkjent innenfor fagområdet. Hvis en sender er utført for å drives ved mer enn en frekvens, for eksempel $f_1 = 2$ MHz og $f_2 =$ MHz, kan hver mottager omfatte et spolepar, hvor da den ene spole er avstemt til f_1 og den andre spole er avstemt til f_2 . Hvis ønsket kan i tillegg hvert par av slike mottagerspoler være plassert side ved side rundt omkretsen av verktøy 10 eller kan også være konsentrisk stakket. Senderne 16, 18, 20 og mottagerne 22, 24 kan være fremstilt i samsvar med det som er angitt i US patent nr. 4,940,943, som da er overdratt til innehaverne av foreliggende oppfinnelse og tas inn her som

referanse. Det bør erkjennes at verktøylegemet for verktøy 10 fortrinnsvis er utført i stål for det formål å hindre verktøyet 10 fra å utgjøre et svakt ledd i borestrengen 14. Typisk og på en måte som vil være velkjent innenfor fagområdet, er et eller flere vektør 11 gjengeforbundet med den nedre ende av loggeverktøyet 10, mens en borkrone (ikke vist) er gjengekoblet til det nederste vektør 11.

Det bør erkjennes at loggeverktøyet 10 også har de nødvendige elektroniske kretser (vist i figur 2) for å behandle de signaler som mottas av mottagerne 22, 24 i samsvar med foreliggende oppfinnelse, slik at de mottatte signaler omformes til en logg eller en annen anvisning av formasjonsresistivitet. Det bør også forstås at de behandlede signaler kan registreres inne i elektronikkseksjonen i verktøyet 10 eller kan overføres ved hjelp av vanlig telemetriutstyr (ikke vist) til jordoverflaten for påfølgende behandling og utlesning på overflaten. En typisk telemetriutstyr genererer slampulser som kan detekteres på jordoverflaten og angir de behandlede signaler.

Det skal nå henvises til figur 2, hvor loggeverktøyet 10 er vist å ha flere sendere $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$. Skjønt en foretrukket utførelse bare omfatter tre slike sendere (T_1, T_2, T_3), er også T_n angitt for det formål å vise at ytterligere sendere også kan brukes, hvis så ønskes. Det bør erkjennes at $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$ i tiltagende grad anordnet i ytterligere avstand fra mottagerparet R_1 og R_2 . Avstanden mellom de spoler som anvendes som R_1 og R_2 er fortrinnsvis seks tommer langs lengdeaksen av verktøyet 10, men andre mottageravstander kan også benyttes. Avstanden mellom mottagerparet og de sendere som er anordnet i stadig tiltagende avstand vil variere i visse anvendelser, slik det vil bli nærmere omtalt i det følgende. I henhold til en foretrukket konfigurasjon er avstanden mellom T_1 og R_1/R_2 12/18 tommer, mens avstanden mellom T_2 og R_1/R_2 er på 24/30 tommer, og avstanden mellom T_3 og R_1/R_2 er på 36/42 tommer. I den nettopp avsluttede setningen bør det forstås at uttrykket "12/18 tommer" for eksempel angir at avstanden mellom T_1 og R_1 er 12 tommer, mens avstanden mellom T_1 og R_2 er 18 tommer, ut i fra det forhold at R_1 og R_2 befinner seg seks tommer fra hverandre. Slike avstandskonfigurasjoner blir i blant benyttet her ved bruk av et forkortet uttrykk, for eksempel "12/18".

Det skal fremdeles henvises til figur 2, hvor det er vist flere forsterkere $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ koblet til senderspolene, henholdsvis $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$. Flere forsterkere drives i sin tur henholdsvis av oscillatorene $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$. Driftsfrekvensene for oscillatorene er da fortrinnsvis mellom 0,5 MHz til omkring 4 MHz. På grunn av at

5 effekt svekkes i større undersøkelsesdybder, slik som det er tilfelle med de mer fjerntliggende sendere, er forholdet mellom frekvensene fortrinnsvis i samsvar med sammenhengen $F_1 \geq F_2 \geq F_3 \geq \dots F_n$. Oscillatorene $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ styres fra en senderdrivekrete 30, som danner grensesnitt med mikroprosessen 32, som i sin tur grenser til en kommunikasjonsgrensesnittkrets 34 og en analog/digital

10 omformer 36 (A/D). Kommunikasjonsgrensesnittkretsen 34 er av vanlig type og danner et grensesnitt mellom datamaskiner (ikke vist), et indre datalager (ikke vist), en slampulsgenerator (ikke vist), mikroprosessen 32 og operatører eller datamaskiner på jordoverflaten (ikke vist) etter at verktøyet 10 er trukket opp til jordens overflate.

15 Differensialmottagerne R_1 og R_2 er henholdsvis forbundet med forsterkere 40 og 42, som i sin tur er koblet henholdsvis til blandekretsene 44 og 46. Oscillatorer $F_1', F_2', F_3' \dots F_n'$ er koblet til en oscillatorvelgekrets 48, hvis utgang er forbundet med de forskjellige innganger til blandekretser 44 og 46. Oscillatorvelgekretsen

20 48 mottar sine innganger fra mikroprosessen 32.

Det respektive utganger fra blandekretsene 44 og 46 driver lavpassfiltre, henholdsvis 50 og 52, hvis utganger driver målekretser, henholdsvis 54 og 56. Utgangene fra amplitudemålekretsene 54 og 56 er koblet til en multiplekserkrets

25 60. Utgangene fra lavpassfilterkretsene 50 og 52 er også koblet til inngangene for en krets som måler relativ fase, og hvis utgang føres inn i multiplekseren 60.

Ved drift av den anordning og de kretser som er vist i figur 2, bør det forstås at det er ønskelig å behandle mellomfrekvenssignaler i stedet for de nominelle signaler

30 som mottas fra mottagerparet R_1 og R_2 . Følgelig blir oscillatorene $F_1', F_2', F_3' \dots F_n'$ valgt for å ligge i frekvens meget nær de tilsvarende frekvenser $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$. F_n kan for eksempel innstilles til en frekvens på 1,998 MHz og således at det kommer ut en mellomfrekvens fra blandekretsen 44 eller 46 på 0,002 MHz (2 KHz). På

lignende måte kan F_2' og F_3' innstilles til henholdsvis 1,998 MHz og 0,998 MHz. De eneste signaler som da vil kunne passere lavpassfiltrene 50 og 52 vil da være de mellomfrekvenser som oppnås ved blanding av frekvensene $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ med henholdsvis frekvensene $F_1', F_2', F_3' \dots F_n'$. Det bør erkjennes at

5 amplitudemålekretsen 54 gir et mål på amplituden av det signal som mottas av mottager R_1 mens amplitudemålekretsen 56 måler amplituden av det innkomne signal som mottas av mottager R_2 . På lignende måte angir kretsen 62 på måling av relativ fase en anvisning av faseforskjellen mellom de signaler som mottas av mottager R_1 og de signaler som mottas av mottager R_2 . Som det vil være velkjent

10 innenfor fagområdet, vil både amplitudemålingene (amplitudeforholdene A) og de relative fasemålinger (Φ) kunne angi formasjonens resistivitet. Slike målinger kan da anvendes for å generere opptegninger av den art som er vist i figurene 12-14 for en typisk jordformasjon med en horisontal resistivitet på 1 ohm-m og en vertikal resistivitet på 4 ohm-m. Figur 12 angir amplitudesvekkingsresistivitet og

15 faseforskyvningsresistivitet som en funksjon av relativ helningsvinkel ved bruk av et enkelt sender-/mottagerpar ved en enkelt frekvens. Figur 13 angir faseforskyvningsresistivitet som en funksjon av relativ helningsvinkel ved bruk av tre sender-/mottagerpar ved en enkelt frekvens. Figur 14 angir faseforskyvningsresistivitet som en funksjon av relativ helningsvinkel ved bruk av

20 et enkelt sender-/mottagerpar ved bruk av tre forskjellige frekvenser.

Det bør også erkjennes at frekvensene $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ alle kan være en og samme frekvens, bortsett fra den praktiske betraktning at effekttap i formasjonen øker med den økede avstand signalene må vandre gjennom formasjonen. I vanlige

25 multiplekserkretser 60 som anvendes med dette utstyr muliggjør imidlertid tidsseparering mellom pulsaktiveringer av senderne $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$ i rekkefølge. Som vist i figur 3, kan for eksempel senderen T_1 pulses i et sekund, fulgt av ingen puls under et sekund, deretter etterfulgt av pulsering av senderen T_2 i et sekund, som da etterfølges av ingen puls under et sekund, etterfulgt av en pulsering av

30 senderen T_3 i et sekund, og så videre. Helt åpenbart kan varigheten av pulseringen av hver sender varieres, så vel som varigheten av de pulsfrie mellomperioder, for eksempel som vist i figur 4. Det bør forstås at uttrykket "tidsskille" mellom pulsene inkluderer den foretrukne utførelse at en puls begynner

umiddelbart etter avslutningen av den umiddelbart forutgående puls. Etter ønske kan varigheten av de pulser som styrer T_1 være forskjellig fra varigheten av de pulser som driver T_2 , hvilket i sin tur kan være forskjellig fra varigheten av pulsene i senderen T_3 , og så videre, for derved å opprette en signatur når det gjelder de mottatte pulser i mottagerne R_1 og R_2 , for derved bedre å kunne identifisere senderne og således undersøkelsesdybden for de forskjellige pulser som mottas. Målinger utføres således i forskjellige dybder innover i formasjonen ved å aktivere hver sender en forskjellig tid, slik at bare en sender er aktiv til enhver tid, samt ved å registrere eller telemetrere den mottatte faseforskjell og/eller amplitudene (amplitudeforholdet) som tilsvarer hvert utsendte signal. Alternativt, kunne senderne $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$ alle vært drevet med forskjellige frekvenser og kunne da vært pulsdrevet samtidig, hvor separeringen av signaler da er en funksjon av frekvensforskjellen i stedet for det anvendte tidsskillet i samsvar med en foretrukket utførelse av oppfinnelsen. Fagkyndige på området vil imidlertid erkjenne at samtidig utsendelse av samtlige sendesignaler vanligvis vil kreve ytterligere filtre og behandlingskretser for å gjøre det mulig for instrumentene å kunne korrekt diskriminere mellom de forskjellige sekvenser.

Som omtalt ovenfor, bruker utøvere denne teknikk på grunn av de sedimentære funksjoners art "horisontal" for å angi formasjonsplanet (hvilket vil si x-y-planet i figur 9), mens utøverne bruker uttrykket "vertikal" for å angi retningen perpendikulært på formasjonsplanet (hvilket vil si z-retningen i figur 9, hvilket da er retningen av den sedimentære oppbygning). For å kunne hensiktsmessig sjeldne mellom disse uttrykk innenfor fagområdet og de vanlige retningsangivelser fastlagt ved jordens tyngdekraft, benyttes i figurene 5 og 6 følgende uttrykk hvor "sann vertikal" angir retningen av jordens tyngdekraft, "sann horisontal" angir retningen vinkelrett på jordens tyngdekraft, "formasjonsvertikal" angir retningen perpendikulært på formasjonsplanet" og "formasjonshorisontal" angir formasjonsplanet. I denne beskrivelse er uttrykkene "horisontal" og "vertikal" ment å ha de betydninger som er tillagt uttrykkene henholdsvis "formasjonshorisontal" og "formasjonsvertikal". I figurene 5 og 6 angir δ borehullets avviksvinkel (vinkelen mellom borehullets/verktøyets akse og den sanne vertikale retning), mens ψ angir

leiets helningsvinkel (vinkelen mellom formasjonens leieplan og den sanne horisontale retning).

Det skal nå henvises til figur 5 hvor en senderspole (antenne) med et magnetisk moment M_T kan anses å være en overlaging av en horisontal magnetisk dipol (HMD) og en vertikal magnetisk dipol (VMD) med tilsvarende horisontal og vertikal komponent av magnetiske momenter, henholdsvis M_{Th} og M_{Tv} , som da er gitt ved ligningene:

$$M_{Th} = M_T \sin\theta = I_t A_t \sin\theta \quad [1]$$

$$M_{Tv} = M_T \cos\theta = I_t A_t \cos\theta \quad [2]$$

hvor

I_t = strømmen i senderspoken,

A_t = senderspokenes tverrsnittsareal, og

θ = den relative helningsvinkel (vinkelen mellom verktøyaksen og normalen på formasjonen).

Som vist ved Luling, M.G., "Processing and Modeling 2-MHz Resistivity Tools in Dipping, Laminated, Anisotropic Formations", SPWLA 35. årlige loggingssymposium 19.-22. juni 1994, produserer HMD magnetiske felter H_{hx} og H_{hz} og VMD frembringer magnetiske felter H_{vx} og H_{vz} utifra følgende ligninger:

$$H_{hx} = \frac{M_T \sin\theta}{4\pi} \left(\frac{e^{ik_h L}}{L^3} [3\sin^2\theta - 1 + k_h^2 L^2 \cos^2\theta + \frac{ik_h L}{\sin^2\theta} + ik_h L - 3ik_h L \sin^2\theta] - \frac{ik_h}{\sin^2\theta} e^{ik_h L} \right) e^{ik_h L} \quad [3]$$

$$H_{hz} = \frac{M_T \cos\theta}{4\pi} \left(\frac{e^{ik_h L}}{L^3} [3\cos\theta \sin\theta - k_h^2 L^2 \cos\theta \sin\theta - 3ik_h L \cos\theta \sin\theta] \right) \quad [4]$$

$$H_{vx} = \frac{M_T \sin\theta}{4\pi} \left(\frac{e^{ik_h L}}{L^3} [3\cos\theta \sin\theta - k_h^2 L^2 \cos\theta \sin\theta - 3ik_h L \cos\theta \sin\theta] \right) \quad [5]$$

$$H_{vz} = \frac{M_T \cos\theta}{4\pi} \left(\frac{e^{ik_h L}}{L^3} [3\cos^2\theta - 1 + k_h^2 L^2 \sin^2\theta - 3ik_h L \cos^2\theta + ik_h L] \right) \quad [6]$$

hvor

$$k_h = \sqrt{\omega^2 \mu \left(\epsilon_h - \frac{i\sigma_h}{\omega} \right)}$$

$$k_v = \sqrt{\omega^2 \mu \left(\epsilon_v - \frac{i\sigma_v}{\omega} \right)}$$

$$\beta = \sqrt{\cos^2 \theta + \left(\frac{k_v}{k_h} \right)^2 \sin^2 \theta}$$

5 k_h = det komplekse bølgetall i horisontal retning

k_v = det komplekse bølgetall i vertikal retning

ω = vinkelfrekvensen (i radianer/sekund) i

senderspølen = $2\pi f$

f = frekvensen i senderspølen (i Hertz)

10 μ = formasjonens magnetiske permeabilitet

(det antas $\mu = \mu_{\text{air}} = 1$)

σ_h = formasjonens horisontale ledningsevne

σ_v = formasjonens vertikale ledningsevne

ϵ_h = den horisontale dielektrisitetskonstant (antatt)

15 ϵ_v = den vertikale dielektrisitetskonstant (antatt)

L = avstanden mellom senderspølen og mottagerspølen

$$I = \sqrt{-1}$$

20 Hvis en mottager er rettet parallelt med senderen, er for en hensiktsmessig konfigurasjon som er angitt i figur 5 hvor $\zeta_T = \zeta = 90^\circ$, H_z feltet i mottagersløyfen gitt ved ligningen:

$$H_z = (H_{hx} + H_{vx}) \sin \theta + (H_{vz} + H_{hz}) \cos \theta \quad [7]$$

25 hvor da den induserte spenningsmottagersløyfen er gitt ved

$$V = \omega A_r \mu H_z \quad [8]$$

Hvor da A_r er mottagerspolens tverrsnittareal. Innsetting av ligningene [3], [4], [5], [6] og [7] i ligning [8] gir da

$$V = \frac{i\omega A_r \mu I_t A_t}{4\pi L^3} \left([2 - ik_h L] e^{ik_h L} - ik_h L i^{ik_h L \beta} \right) \quad [9]$$

5

Ligning (9) viser da at den induserte spenning V avhenger av k_h og β .

I sin tur avhenger k_h av σ_h , mens β avhenger av σ_h , σ_v og θ . Disse innbyrdes forhold angir at σ_v og θ er innbyrdes avhengig, og denne avhengighet hindrer da konvergens for en simultanløsning for σ_h , σ_v og θ , slik som omtalt ovenfor.

10

For å bryte denne innbyrdes avhengighet og muliggjøre en løsning med hensyn på σ_h , σ_v og θ har oppfinneren av foreliggende oppfinnelsesgjenstand oppdaget at man kan skråstille enten senderen eller mottageren i forhold til verktøyaksen, slik som vist i figur 6 (sender ikke skråstilt, men mottager skråstilt). For en sender-/mottagerkonfigurasjon som vist i figur 6, og hvor $\zeta_T = 90^\circ$ og $\zeta < 90^\circ$, vil H_z feltet i mottagersløyfen være gitt ved den følgende ligning:

15

$$H_z = (H_{hx} + H_{vx})\sin\theta' + (H_{vz} + H_{hz})\cos\theta' \quad [10]$$

20

Innsetting av ligningene [3], [4], [5], [6] og [10] i ligning [8] gir da

$$V = \frac{i\omega A_r \mu I_t A_t}{4\pi L^3} \left([2\sin\theta\sin\theta' + 2\cos\theta\cos\theta'] e^{ik_h L} - [2ik_h L \sin\theta\sin\theta' - 2ik_h L \cos\theta\cos\theta'] e^{ik_h L} + ik_h L \frac{\sin\theta'}{\sin\theta} e^{ik_h L} - ik_h L \frac{\sin\theta'}{\sin\theta} e^{ik_h L \beta} \right) \quad [11]$$

25

hvor

$$\theta' = \theta + \zeta_R - 90^\circ$$

ζ_R = skråstillingen av mottagerantennen (hvilket vil si vinkelen mellom mottagerantenneplanet og verktøyaksen).

ζ_T = skråstillingen av senderantennen (hvilket vil si vinkelen mellom planet for senderantennen og verktøyaksen).

5

10

Ligning (11) viser at den induserte spenning V avhenger av k_h , β , θ og θ' . Så lenge θ er forskjellig fra θ' , så kan θ beregnes ut ifra tre målinger hvor det benyttes flere avstander eller flere frekvenser for det elektromagnetiske bølgeresistivitetsverktøy. Ved å skråstille enten sender eller mottager i en elektromagnetisk bølgeresistivitetssensor (hvilket vil si at θ gjøres forskjellig fra θ'), blir σ_v og θ koblet fra hverandre, hvilket da muliggjør en løsning for σ_h , σ_v og θ slik det vil bli beskrevet nedenfor.

15

20

Skjønt den ovenfor angitt formel gjelder for en ikke-skråstilt sender sammen med en skråstilt mottager, så vil ut i fra resiprositetsteorien samme resultat også gjelde for en skråstilt sender sammen med en ikke-skråstilt mottager. Faktisk kan også både sender og mottager være skråstilt forutsatt at deres respektive skråstillingsvinkler ikke har samme verdi, hvilket vil si $\zeta_T \neq \zeta_R$. For den generelle tilfellet hvor både sender og mottager er skråstilt med hver sin vilkårlige skråstillingsvinkel, henholdsvis ζ_T og ζ_R , vil ligningene [1] til og med [11] gjelde med innsetting av θ'' i stedet for θ hvor da $\theta'' = \theta + \zeta_T - 90^\circ$. Figur 7 viser flere mulige sender-/mottagerparkombinasjoner i samsvar med foreliggende oppfinnelsen.

25

30

Figur 8 anskueliggjør den prosess som går ut på å utlede horisontal resistivitet, vertikal resistivitet og relativ helningsvinkel for en jordformasjon i samsvar med foreliggende oppfinnelse. Skjønt skjemaet i figur 8 viser horisontal og vertikal konduktivitet i stedet for horisontal og vertikal resistivitet, vil fagkyndige på området uten videre være klar over at konduktivitet er den resiproke eller inverse verdi av resistivitet, og enten konduktivitet eller resistivitet kan anvendes for å angi vedkommende viktige elektriske egenskap ved en jordformasjon. Løsningsprosessen begynner med en initialisering av de tre parametere som det

søkes en løsning for, nemlig horisontal konduktivitet (σ_h), vertikal konduktivitet (σ_v) og relativ helningsvinkel (θ). Som vist i figur 8, kan σ_h og σ_v hensiktsmessig innledningsvis uttrykkes som de inverse verdier av de målte resistivitetsverdier (målt logg) slik disse kan utledes fra to av de tre sender-/mottagerkombinasjoner i henhold til fremgangsmåter som er vel kjent innfor fagområdet. For hver slik sender-/mottagerkombinasjon blir spesielt senderen pulsdrevet og faseforskyvningen (Φ) og amplitudesvekkingen (A) ved mottagerparet blir målt. Ved bruk av slike data som er angitt i figur 10 og 11, kan så henholdsvis amplitudesvekkingsresistiviteten og faseforskyvningsresistiviteten utledes.

Faseforskyvningsresistiviteten gir da foretrukket innledningsvis anslåtte verdier for σ_h og σ_v , men amplitudesvekkingsresistiviteten kunne også vært brukt for dette formål. På lignende måte er en hensiktsmessig innledningsvis anslått verdi for θ er 60° , som da ligger innenfor det området hvor anisotropi typisk gir seg til kjenne. Fagkyndige på området vil erkjenne at disse foretrukne verdier for innledningsvis anslåtte parameterverdier tjener som formål hensiktsmessig å øke konvergensen mot en løsning. Disse bestemte verdier er imidlertid ikke vesentlig for oppfinnelsens vellykkethet, og de innledningsvis anslåtte parameterverdier kan være vilkårlige.

Fremdeles under henvisning til figur 8, skal det angis at etter at parameterverdiene innledningsvis er anslått, blir disse parametere brukt for å beregne de teoretisk "induserte" spenninger V_1 og V_2 i henholdsvis mottager R_1 og R_2 , for hver av senderne i henhold til ligning (11). Derpå blir de beregnede spenninger brukt for å utlede beregnede resistiviteter R_{c1} , R_{c2} samt R_{c3} (beregnet logg) tilsvarende henholdsvis hver av de foreliggende sender-/mottagerkombinasjoner. Atter blir de beregnede resistivitetsverdier utledet i samsvar med fremgangsmåter som vil være velkjent innenfor fagområdet og ved bruk av data av den art som er vist i figur 10 og 11, idet faseforskyvningsresistiviteten er foretrukket fremfor de beregnede amplitudesvekkingsresistiviteter. De beregnede resistivitetsverdier blir så sammenlignet med de målte resistiviteter, og forskjellen mellom de beregnede og målte resistivitetsverdier brukes da til å utføre en egnet måling av feil. Hvis størrelsen av feilen er mindre eller lik en tillatelig feilverdi, E_{allow} , så kan de løpende verdier for σ_h , σ_v og θ anses å være den ønskede løsning. Hvis dette ikke er

- tilfellet blir verdiene for σ_h , σ_v og θ trinnforskjøvet innenfor en rutine med gjentatt optimalisering inntil den utledede feil ligger innenfor det tillatelige feilverdiområdet. Enhver egnet optimaliseringsrutine kan anvendes, slik som for eksempel metoden med minste kvadrater. En foretrukket optimaliseringsmetode er Levenberg-
- 5 Marquardt-metoden som er omtalt av Tianfei Zhu og Larry D. Brown, "Two-dimensional Velocity Inversion and Synthetic Seismogram Computation", Geophysics, bind 52, nr. 1, januar 1987, sidene 37-50, som da tas inn her som referanse.
- 10 Det skal nå henvises til oppfinnelsens geostyringsaspekt, hvor da figur 21 viser et borehull med en helningsvinkel på $\theta = 60^\circ$ og som trenger gjennom en hypotetisk jordformasjon som omfatter geologiske soner (leier) A, B og C med resistiviteter på henholdsvis 1,0, 10,0, og 1,0. I den hypotetiske formasjon i figur 21, er sone B en produserende sone. Figur 15 viser et hensiktsmessig resistivitetsverktøy 110
- 15 med en senderantenne T_1 og et par mottagerantenner R_1 og R_2 , som da alle er anordnet vinkelrett på verktøyaksen. Etter hvert som dette vanlige resistivitetsverktøy 110 beveger seg gjennom borehullet i figur 21 uten dreining, vil verktøyet 110 frembringe en respons S_1 av den art som er vist i figur 22, og som da omfatter hornformede partier ved borehullets skjæring gjennom grensene
- 20 mellom de forskjellige soner A, B og C. Det er vesentlig å legge merke til at hornpartiene i responsen S_1 øker i samme retning uavhengig om det vanlige verktøy 110 skjærer gjennom fra en sone med lavere resistivitet til en sone med høy resistivitet eller vise versa.
- 25 I motsetning til dette og i samsvar med foreliggende oppfinnelse, er det i figur 16 angitt et resistivitetsverktøy 120 med en senderantenne T_1 som er innstilt vinkelrett på verktøyaksen, mens et par mottagerantenner R_3 og R_4 skråstilt i $+45^\circ$ i forhold til verktøyaksen. Etter hvert som verktøyet 120 beveger seg gjennom borehullet i
- 30 figur 21 uten å dreies, vil verktøyet 120 frembringe en respons S_2 som er den samme som responsen S_4 som er vist i figur 24. Det kan legges merke til at responsen S_2 (eller S_4) bare omfatter hornpartier på de steder hvor verktøyet 120 nærmer seg en sone med lavere resistivitet. Følgelig vil verktøyet 120 og dens

tilordnede respons S_2 (eller S_4) her bli betegnet som et "nedoverseende verktøy" og en "nedoverrettet respons".

På lignende måte angir figur 17 et resistivitetsverktøy 130 med en senderantenne T_1 som er innstilt vinkelrett på verktøysaksen samt et par mottagerantenner R_5 og R_6 som er skråstilt -45° i forhold til verktøysaksen. Etter hvert som verktøyet 130 beveger seg gjennom borehullet i figur 21 uten å dreies, vil verktøyet 130 frembringe en respons R_3 , som da er angitt i figur 23. Det kan legges merke til at responsen S_3 bare omfatter hornpartier på de steder hvor verktøyet 130 nærmer seg en sone med høyere resistivitet. Verktøyet 130 og dets tilordnede respons S_3 vil de følgelig bli betegnet som et "oppoverseende verktøy" og en "oppoverrettet respons". Fagkyndige på området vil erkjenne at verktøyet 130 er det samme som verktøyet 128 dreid 180° om verktøysaksen.

For å utlede begge responser S_2 (eller S_4) samt S_3 fra et ikke-roterende verktøy, kan verktøyet være forsynt med mottagerantenner R_3 , R_4 , R_5 og R_6 av den art som er vist på verktøyet 140 i figur 18. Alternativt og som vist i figur 19, kan verktøyet 150 omfatte en ytterligere senderantenne T_2 på motsatt side av mottagerparet i forhold til senderantennen T_1 . Responsene S_2 og S_4 vil da være like ut i fra resiprositetsteorier. På lignende måte vil verktøyet 160 i figur 20 kunne gi begge responser S_2 og S_5 (som da er den samme som S_3) i en driftsmodus uten verktøydreining. Atter vil fagkyndige på området erkjenne at verktøyet 160 er det samme som verktøyet 150 dreid 180° om verktøysaksen. Hvis mottagerantenne er montert i forsenkninger i verktøyet, slik som omtalt ovenfor, vil verktøyet 150 (eller 160) vanligvis være å foretrekke fremfor verktøyet 140, da verktøyet 150 (eller 160) vil utgjøre en sterkere konstruksjon og være lettere å fremstille. I lys av arten av de forskjellige responser for de oppover- og nedoverseende antenne konfigurasjoner for verktøyet 140, 150 eller 160, kan slike verktøyer anvendes for styre boreapparatet for det formål å forbli i den ønskede produksjonssone. Forskjellen mellom oppoverseende og nedoverseende respons (i blant her henvist til som "responsforskjell") angir om vedkommende verktøy nærmer seg en sone med høyere eller lavere resistivitet enn den foreliggende sone. I figur 26 er det for eksempel vist en kurve over forskjellen mellom responsene S_3 og S_4 utledet fra

verktøyet 150 (figur 19) som omtalt ovenfor. Hvis responsdifferansen ($S_3 - S_4$) er tiltagende positiv, så angir denne responsdifferanse, slik som vist i figur 26 (og i lys av figur 21), at verktøyet nærmer seg en sone med høyere resistivitet hvilket vil si at det er i ferd med å trenge inn i en potensiell produksjonssone). På den

5 annen side responsdifferansen ($S_3 - S_4$) er tiltagende negativ, så vil denne responsdifferanse angi at verktøyet nærmer seg en sone med lavere resistivitet (hvilket vil si at det er i ferd med å begi seg ut av en produksjonssone). På grunn av at toppene (hornene) i opptegningen av responsforskjellen ($S_3 - S_4$) her faktisk begynner å inntre før verktøyet faktisk trenger inn i det neste leiet, så vil

10 boreoperatøren har mulighet for å forandre boreparameterne på en slik måte at borehullet vil forbli i den ønskede produksjonssone. Som angitt i figur 26, kan enten faseresistiviteten eller amplituder resistiviteten anvendes for dette formål. Alternativt, og som angitt i figur 25, kan faktisk den ubehandlede faseforskyvningsrespons eller en tilsvarende amplitudesvekkingsrespons (nemlig

15 før omformingen til resistivitet har funnet sted) anvendes i stedet for resistivitetssignalene. Uttrykket "differensialsignal" anvendes her enten for å angi de rå faseforskyvnings-/amplitudesvekkingsresponser eller de tilsvarende resistivitetssignaler. Ved sammenligning av figurene 25 og 26, bør det bemerkes at den rå faseforskyvnings-/amplitudesvekkingsresponsdifferanse (25) peker i

20 motsatt retning av resistivitetsresponsdifferansen (26).

I stedet for responsdifferansen, kan i tillegg forholdet mellom oppoverseende og nedoverseende responser (iblant her kalt "responsforholdet") anvendes. Figur 27 viser for eksempel responsforholdet (S_3/S_4) frembrakt ved bruk av den rå

25 faseforskyvningsrespons og den tilsvarende amplitudesvekkingsrespons, mens figur 28 viser responsforholdet (S_3/S_4) etter omformingen til resistivitet. Ut i fra betraktning av figur 28 vil det fremgå at hvis resistivitetsresponsforholdet (S_3/S_4) i tiltagende grad er større enn 1,0, så vil responsforholdet angi at verktøyet nærmer seg en sone med høyere resistivitet (hvilket vil si at det er i ferd med å trenge inn i

30 en potensiell produksjonssone), men hvis resistivitetsresponsforholdet (S_3/S_4) i tiltagende grad ligger under 1,0, så angir responsforholdet at verktøyet nærmer seg en sone med lavere resistivitet (hvilket vil si at det er i ferd med forlate en produksjonssone). Ved betraktning av figur 27 vil det på lignende måte fremgå at

hvis det rå faseforskyvnings-/amplitudesvekkingsresponsforhold (S_3/S_4) i økende grad er mindre enn 1,0, så vil et responsforhold antyde at verktøyet nærmer seg en sone med høyere resistivitet (hvilket vil si at det er i ferd med å trenge inn i en potensiell produksjonssone), men hvis det rå faseforskyvnings-

5 /amplitudesvekkingsresponsforhold (S_3/S_4) i tiltagende grad er større enn 1,0, så vil dette responsforhold angi at verktøyet nærmer seg en sone med lavere resistivitet (hvilket vil si at verktøyet er i ferd med å forlate en produksjonssone. Atter skal det gjøres oppmerksom på at på grunn av at toppene (hornene) i opptegningen av responsforholdet (S_3/S_4) begynner å opptre før verktøyet faktisk

10 har trengt inn i det neste leiet, så vil boreoperatøren ha mulighet for å forandre boreparameterne slik at borehullet vil forbli i den ønskede produksjonssone. Generelt foretrekkes responsdifferansen fremfor responsforholdet, på grunn av det forhold at ved å ta forholdet mellom responsene normaliseres vedkommende data hvilket derved nedsetter oppløsningsevnen. Uttrykket "utgangssignal" er anvendt

15 enten for å angi responsforskjellen eller responsforholdet.

Som et alternativ til de forut angitte konfigurasjoner som omfatter et par mottagerantenner, kan en konfigurasjon som omfatter en enkelt mottagerantenne også anvendes for å styre borkronen i samsvar med foreliggende oppfinnelse.

20 Figur 30 viser et verktøy 170 med en eneste sender T_1 vinkelrett på verktøysaksen samt en enkelt mottager R_1 som er skråstilt i $+45^\circ$ i forhold til verktøysaksen. I stedet for å måle faseforskjellen og amplitudesvekkingen mellom et par mottagere, anvendes verktøyet 170 for å måle faseforskjellen og amplitudesvekkingen mellom senderen T_1 og mottageren R_1 . I denne forbindelse blir uttrykket

25 "differensialsignal" også brukt her for å angi den rå faseforskyvningsverdi eller amplitudesvekkingsrespons mellom en sender og en mottager i stedet for mellom to forskjellige mottagere. Etter hvert som verktøyet 170 trenger seg gjennom borehullet i figur 21 uten å dreies, vil dette verktøyet 170 frembringe en respons S_{3a} , slik som vist i figur 34. Responsen S_{3a} oppviser en spiss når verktøyet 170 nærmer seg og vandrer rett over leiegrensen fra leie A til leie B. På lignende måte

30 viser figur 31 et verktøy 180 med en enkelt sender T_1 vinkelrett på verktøysaksen samt en enkelt mottager R_2 skråstilt i -45° i forhold til verktøyet akse. Atter vil det erkjennes at verktøyet 180 er det samme som verktøyet 170, men dreid 180° om

verktøyaksen. Etter hvert som verktøyet 180 beveger seg gjennom borehullet i
 figur 1 uten å dreies, så vil dette verktøyet 180 frembringe en respons S4a av den
 art som er vist i figur 35. Responsen S4a oppviser en spiss når verktøyet 180
 nærmer seg og beveger seg tvers over grensen fra leiet B til leiet C. Begge
 5 responser S3a og S4a kan tas opp ved å dreie verktøyet 170 eller 180 i borehullet,
 eller ved å bruke verktøyet 190, slik som vist i figur 32, og som da har
 mottagerantenne R₁ og R₂ anordnet i en krysskonfigurasjon, eller ved å bruke
 verktøyet 200 som er vist i figur 33, og som da har senderantennen T₁ og T₂ på
 hver sin side av en mottagerantenne R₁. Ved å ta differansen (S3a – S4a) eller
 10 forholdet (S3a/S4a) for responsene, kan man frembringe de opptegnede kurver
 som er vist i henholdsvis figurene 36 og 37, hvilket da kan brukes da for å styre
 borkronen. Det skal nå henvises til figur 36 sett i sammenheng med figur 21,
 hvorfra det da vil fremgå at etter hvert som responsdifferansen (S3a – S4a) blir
 negativ, angir dette at verktøyet nærmer seg et leie med høyere resistivitet (hvilket
 15 vil si at det er i ferd med å trenge inn i en potensiell produksjonssone), og etter
 hvert som responsdifferansen (S3a – S4a) angir dette omvendt at verktøyet
 nærmer seg et leie med lavere resistivitet (hvilket vil si at det er i ferd med å forlate
 en produksjonssone). Det skal nå henvises til figur 37 i sammenheng med figur
 21, hvorav det på lignende måte vil fremgå at etter hvert som responsforholdet
 20 (S3a/S4a) blir mindre enn 1,0, angir dette at verktøyet nærmer seg et leie med
 høyere resistivitet (hvilket vil si er i ferd med å trenge inn i en potensiell
 produksjonssone), og etter hvert som responsforholdet (S3a/S4a) blir større enn
 1,0, angir dette at verktøyet nærmer seg et leie med lavere resistivitet (hvilket vil si
 at det er i ferd med å forlate en produksjonssone).

25

Selv om Luling (US patent nr. 5,241,273) definerer uttrykket "horn" til å bety "et
 skarpt lokalt maksimum med en toppresistivitet i det minste det dobbelte av
 resistiviteten på begge sider av dette lokale maksimum", kreves det i henhold til
 foreliggende oppfinnelse ikke noen slik dramatisk forandring i resistivitet for det
 30 formål å oppnå geostyring. Som vist i figurene 25-28 og 35-36, er i stedet
 foreliggende oppfinnelsesgjenstand følsom for differansen eller forholdet mellom
 responsene for henholdsvis nedoverseende og oppoverseende antenne.
 Foreliggende oppfinnelse evne til å frembringe en anvisning på forhånd av en

leiegrense under løpende horisontal utboring er vist i figur 29. For et typisk resistivitetsverktøy, har antennen en følelsessone omkring 3 meter radiallyt utover fra verktøyaksen. Hvis således verktøyet gjennom en produksjonssone og nærmer seg en leiegrense med en innfallsvinkel på ca. 2 grader, så vil

5 boreoperatøren ha en borehulldybde på omkring 85 meter for å styre bort fra leiegrensen med det formål å forbli i den ønskede produksjonssone. Som ved de øvrige utførelseseksempler i denne fremstilling, er eksempelet ovenfor bare angitt for anskuelighetsformål og bør ikke betraktes som noen begrensning av foreliggende oppfinnelse.

10

Hvis et resistivitetsverktøy i henhold til foreliggende oppfinnelse dreies, så vil oppoverrettet og nedoverrettet respons variere sinuslignende. I en rotasjonsdriftsmodus, vil verktøyet 120 i figur 16 (eller verktøy 130 i figur 17) for eksempel generere både overrettede og nedoverrettede responser. Som vist i

15 figur 2 bør derfor følgende en foretrukket utførelse av denne oppfinnelsen inneholde minst en rotasjonsposisjonsindikator 70, slik som akselerermeter eller magnetometer, som da også kan ha en sinuslignende utgang ved å korrelere oppoverrettet og nedoverrettet respons med utgangen fra de foreliggende en eller flere rotasjonsposisjonsindikatorer 70, så kan verktøyet orientering beregnes i

20 samsvar med fremgangsmåter som vil være velkjent innenfor fagområdet. Den minst ene rotasjonsposisjonsindikatoren 70 omfatter fortrinnsvis magnetometere, inklinometere eller akselerermeter, men andre sensortyper, slik som gyroskoper, kan imidlertid også anvendes. Arbeidsfunksjonen for den minst ene indikator 70 som angir verktøyets dreieposisjon, er å frembringe et sinusformet elektrisk signal

25 etter hvert som verktøyet dreies, og som da angir verktøyets dreiestilling i forhold til en foretrukket retning, slik som gravitasjonskraftens retning eller magnetisk nord retning. En gravitasjonssensor (slik som et inklinometer akselerermeter) vil ikke fungere tilfredsstillende når verktøyaksen er innrettet i tyngdekraftens retning (hvilket vil si med en vertikal orientering), og en magnetisk sensor (slik som et

30 magnetometer) vil ikke fungere tilfredsstillende når verktøyaksen er rettet inn langs den magnetiske nord retning. Verktøyet inneholder derfor fortrinnsvis minst en gravitasjonssensor (for eksempel et akselerermeter) samt minst en magnetisk

sensor (for eksempel et magnetometer) slik at verktøyets orientering sikret i en hvilken som helst posisjon.

5 Mer å foretrekke er det at indikatoren 70 for å angi rotasjonsposisjon både kan inneholde et 3-akset fluksportmagnetometer og et 3-akset akselerermeter. Som det vil være kjent innenfor fagområdet, vil kombineringen av disse to sensoranordninger gjøre det mulig å måle borehullets verktøyflatevinkel, inklinasjonsvinkel og asimutorienteringsvinkel. Verktøyflatevinkelen og hullets inklinasjonsvinkel blir beregnet ut i fra akselerermetersensorens utgangssignal.

10 Magnetometersensorens utgangssignal anvendes da for å beregne hullets asimutretning. Med verktøyflatevinkel, hullinklinasjonsvinkel og hullets asimutinformasjon, kan et verktøy i henhold til oppfinnelsen anvendes for å styre borkronen til det tilsiktede leiet. Spesielt kan responsdifferansen eller responsforholdet anvendes for effektivt å trenge inn i en ønsket produksjonssone

15 eller forbli inne i en produksjonssone som er av interesse.

De eksempler på responser som er vist i figurene 22-28 for verktøy med en frekvens på 2 MHz og med antenneavstander 24/30. Personer med vanlig fagkyndighet vil imidlertid kunne erkjenne at også andre frekvenser og

20 antenneavstander ville kunne vært brukt. I tillegg vil det også innses at skjønt i anskueliggjørende eksempler som er angitt her omfatter antenner med skråvinkler på $+45^\circ$ og -45° , kan også andre helningsvinkler anvendes.

Skjønt de foran angitte spesifikke detaljer beskriver en foretrukket utførelse av

25 denne oppfinnelse, vil personer med vanlig fagkyndighet innenfor det området som gjelder petroleumsbrønnboring og logging kunne erkjenne at forskjellige forandringer kan gjøres i detaljer av fremgangsmåten og apparatet i henhold til oppfinnelsen uten derved å avvike fra oppfinnelsens ideinnhold og omfangsramme, slik som definert i de etterfølgende patentkrav. Det bør derfor

30 forstås at denne oppfinnelsen på ingen måte er begrenset til bare de spesifikke detaljer som er blitt vist og beskrevet her.

P A T E N T K R A V

1. Fremgangsmåte for generering av et signal for styring av en borestreng i referanse til leiegrenser i en undergrunns jordformasjon,
5 k a r a k t e r i s e r t v e d a t den omfatter handlingene:
å utføre et flertall formasjonsresistivitetsmålinger korrelert med rotasjonsposisjon ettersom nevnte borestreng roterer under en boreoperasjon, idet nevnte målinger er utført gjennom bruk av et loggeverktøy innkoplet i borestrengen;
10 å beregne, fra nevnte flere formasjonsresistivitetsmålinger, et signal som i tiltagende grad er større når loggeverktøyet nærmer seg en første formasjons-leiegrense, og i tiltagende grad er mindre når loggeverktøyet nærmer seg en andre formasjons-leiegrense.
- 15 2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende handlingen å styre borestrengen som svar på nevnte signal.
3. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor signalet er indikativt på at et leie som nærmer seg på den motsatte siden av den første formasjons-leiegrense har en
20 høyere resistivitet i forhold til en resistivitet på det nåværende leie der nedihullsverktøyet er posisjonert for øyeblikket.
4. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor signalet er indikativt på at et leie som nærmer seg på den motsatte siden av den andre formasjons-leiegrense har en
25 lavere resistivitet i forhold til en resistivitet på det nåværende leie der nedihullsverktøyet er posisjonert for øyeblikket.
5. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor flertallet formasjonsresistivitetsmålinger omfatter målinger av faseresistivitet.
30
6. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor flertallet formasjonsresistivitetsmålinger omfatter målinger av amplituderresistivitet.

7. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor flertallet formasjonsresistivitetsmålinger omfatter målinger av rå faseforskyvningsresponser.
8. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor flertallet formasjonsresistivitetsmålinger omfatter målinger av rå amplitudesvekningsresponser.
9. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor handlingen å utføre et flertall målinger omfatter å benytte en sammenligning av fasemålinger for å danne nevnte signal.
10. Fremgangsmåte ifølge krav 9, hvor sammenligningen av fasemålinger omfatter å benytte et forhold av fasemålinger for å danne nevnte signal.
11. Fremgangsmåte ifølge krav 9, hvor sammenligningen av fasemålinger omfatter å benytte en differanse av fasemålinger.
12. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor handlingen å utføre et flertall målinger omfatter å benytte en sammenligning av amplitudesvekningsmålinger for å danne nevnte signal.
13. Fremgangsmåte ifølge krav 12, hvor sammenligningen av amplitudemålinger omfatter å benytte et forhold av amplitudesvekningsmålinger for å danne nevnte signal.
14. Fremgangsmåte ifølge krav 12, hvor sammenligningen av fasemålinger omfatter å benytte en differanse av amplitudemålinger for å danne nevnte signal.
15. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende handlingene:
å tilveiebringe et resistivitetsloggeverktøy konfigurert for innkopling i borestrengen, idet loggeverktøyet omfatter:
et legeme som har en langsgående akse;
en første senderantenne som strekker seg rundt legemet og er lokalisert i en forsenkning i legemet;

en første mottakerantenne som strekker seg rundt legemet og er lokalisert i en forsenkning i legemet;

en prosessorkrets koblet til den første mottakerantennen; og

hvor den første senderantennen er orientert i en første vinkel i

5 forhold til den langsgående aksen, og hvor den første mottakerantenne er orientert i en andre vinkel i forhold til den langsgående aksen, og hvor den første og den andre vinkel er forskjellige;

under en boreoperasjon, å rotere loggeverktøyet i forhold til lungeaksen;

10 å sende en elektromagnetisk bølge inn i en jordformasjon ved bruk av den første senderantennen;

å oppnå nevnte formasjonsresistivitetsmålinger ved å motta elektromagnetisk energi fra jordformasjonen som er et resultat av den elektromagnetiske bølge transmittert inn i jordformasjonen, ved den første mottakerantennen; og

15 å benytte nevnte prosessorkrets for å beregne nevnte signal.

16. Fremgangsmåte for å styre en borestreng ifølge krav 15, hvor loggeverktøyet videre omfatter:

20 en andre senderantenne som strekker seg rundt legemet og er lokalisert i en forsenkning i legemet;

en andre mottakerantenne som strekker seg rundt legemet og er lokalisert i en forsenkning i legemet;

25 hvor den andre senderantenne er orientert i en tredje vinkel i forhold til den langsgående aksen, og hvor den andre mottakerantenne er orientert i en fjerde vinkel i forhold til den langsgående aksen, og hvor den tredje vinkel og den fjerde vinkel er forskjellige.

17. Fremgangsmåte for å styre en borestreng ifølge krav 16, hvor handlingen å benytte en prosessorkrets for å generere nevnte signal omfatter å bestemme et
30 differansesignal i forhold til elektromagnetisk energi mottatt i den første mottakerantennen og elektromagnetisk energi mottatt i den andre mottakerantennen.

18. Fremgangsmåte for å styre en borestreng ifølge krav 16,
en tredje senderantenne som strekker seg rundt legemet og er lokalisert i
en forsenkning i legemet; og
en fjerde senderantenne som strekker seg rundt legemet og er lokalisert i
5 en forsenkning i legemet.

19. Fremgangsmåte ifølge krav 15, hvor loggeverktøyet videre omfatter en
andre mottakerantenne, og hvor nevnte første og andre mottakerantenne er
orientert parallelt med hverandre.

1/21

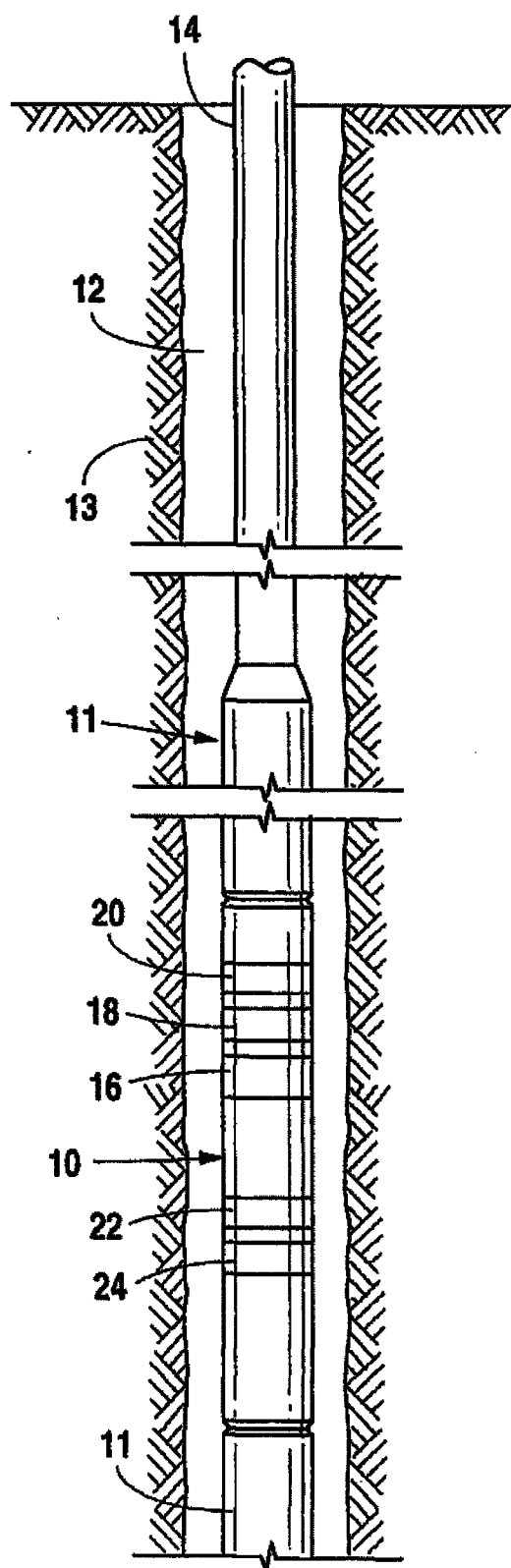


Fig. 1

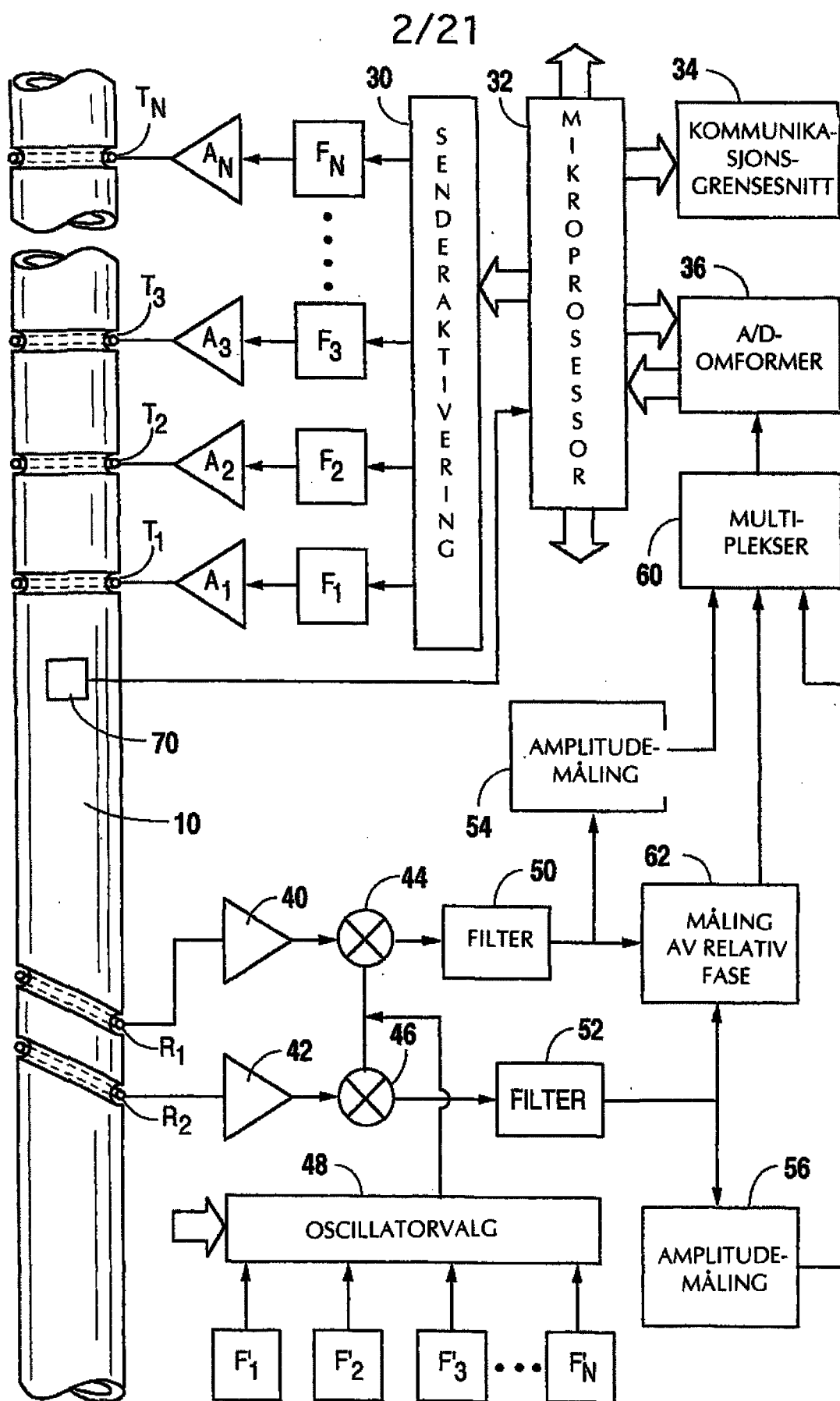


Fig. 2

3/21

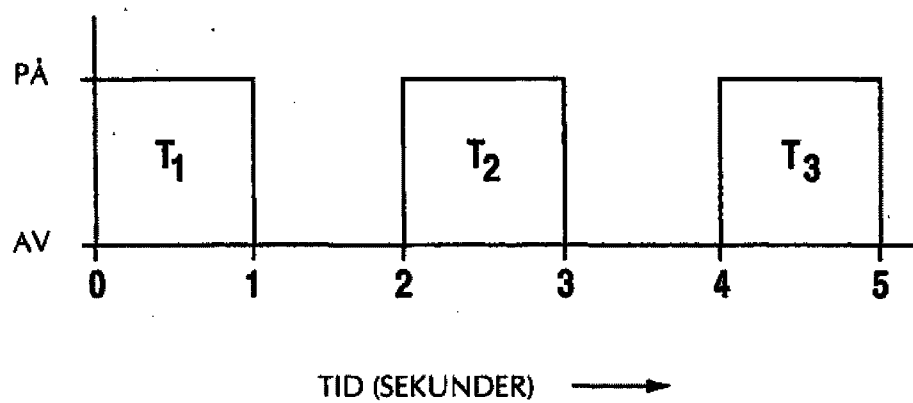


Fig. 3

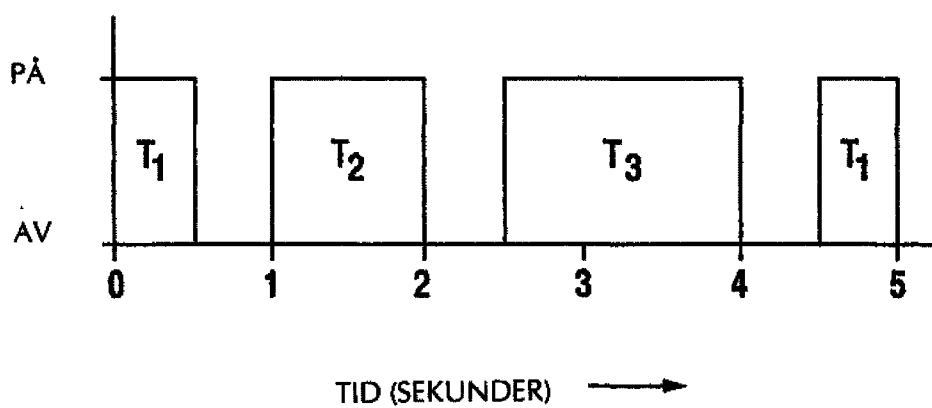


Fig. 4

4/21

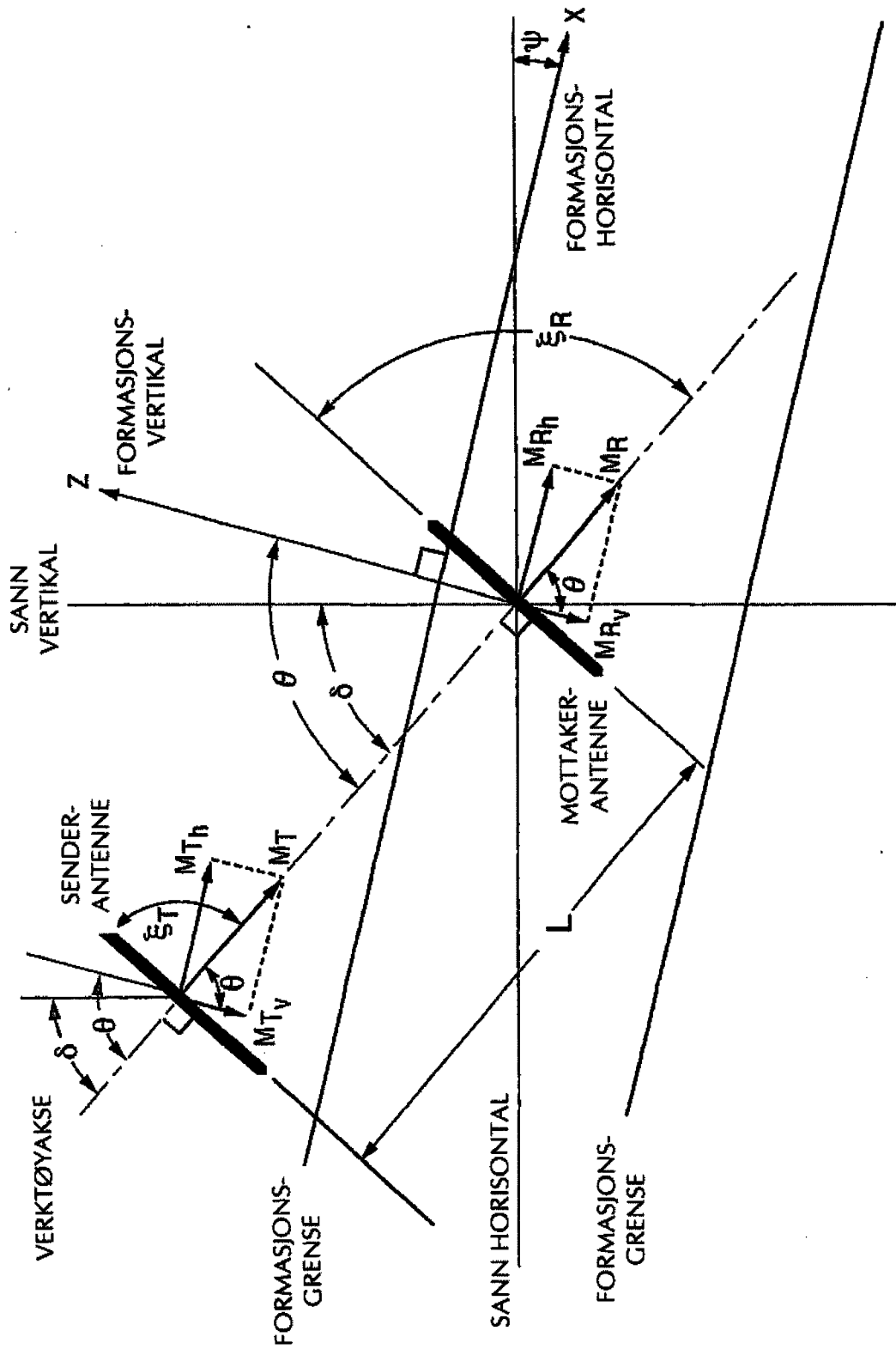


Fig. 5

5/21

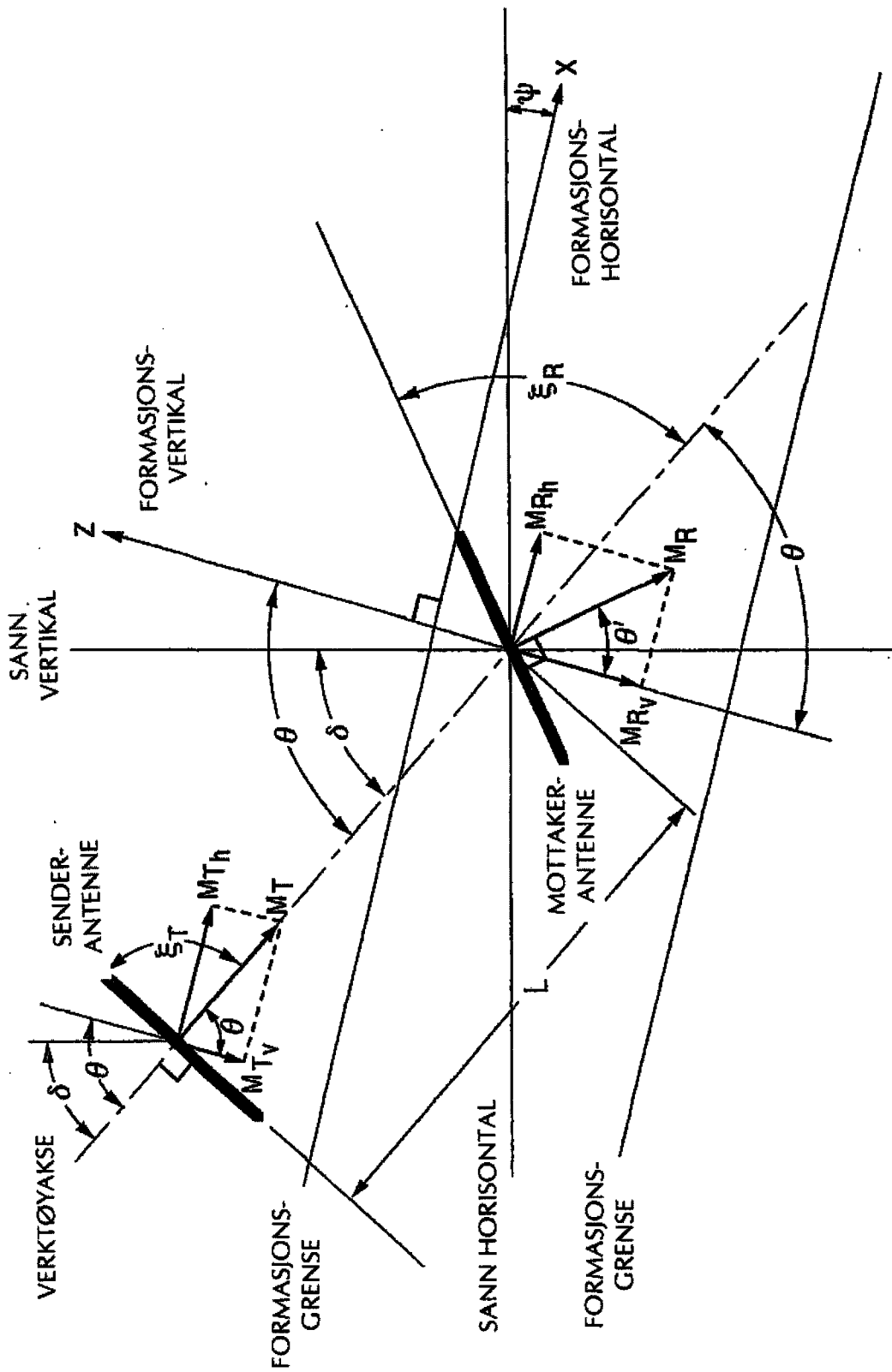


Fig. 6

6/21

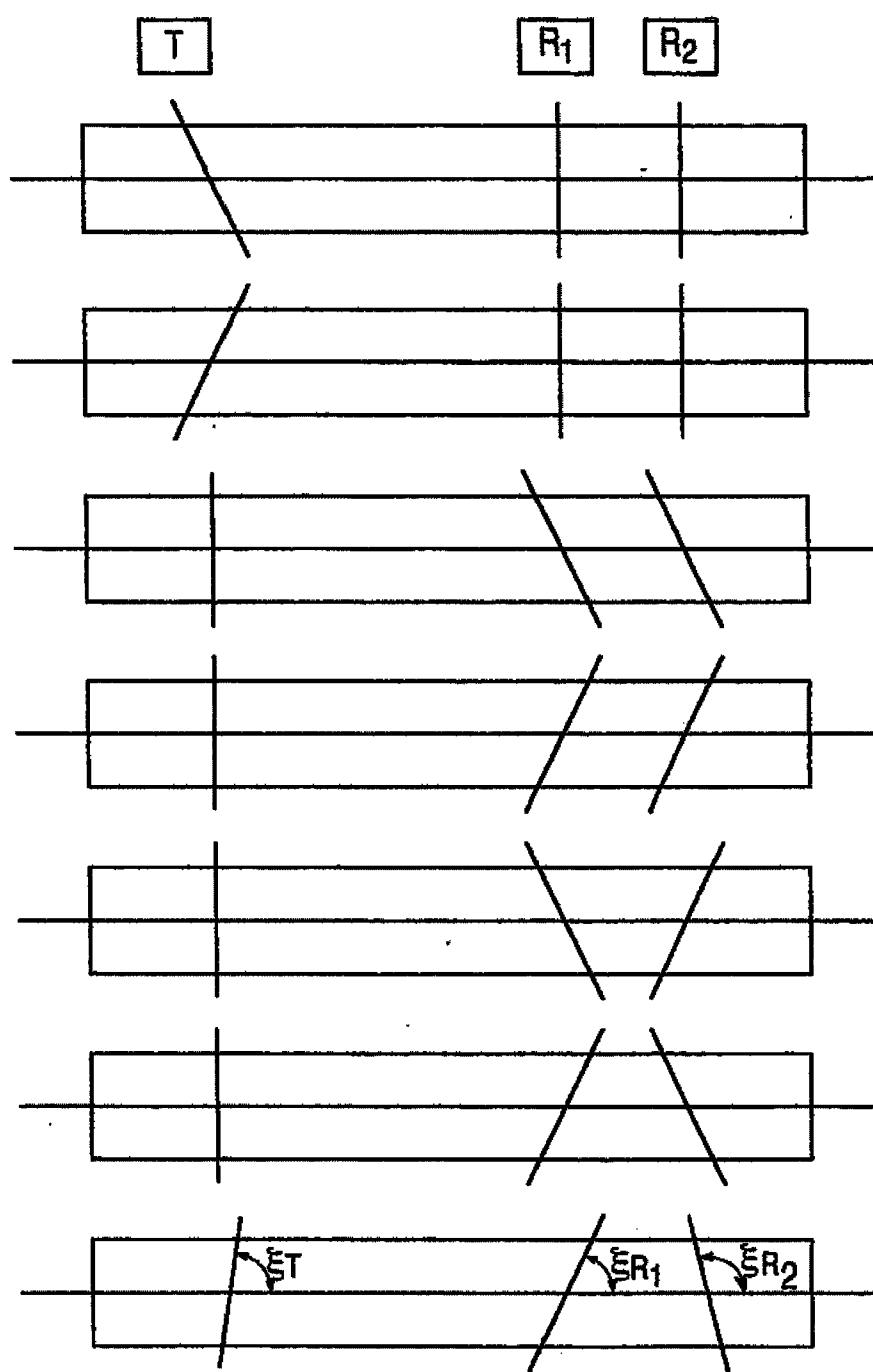


Fig. 7

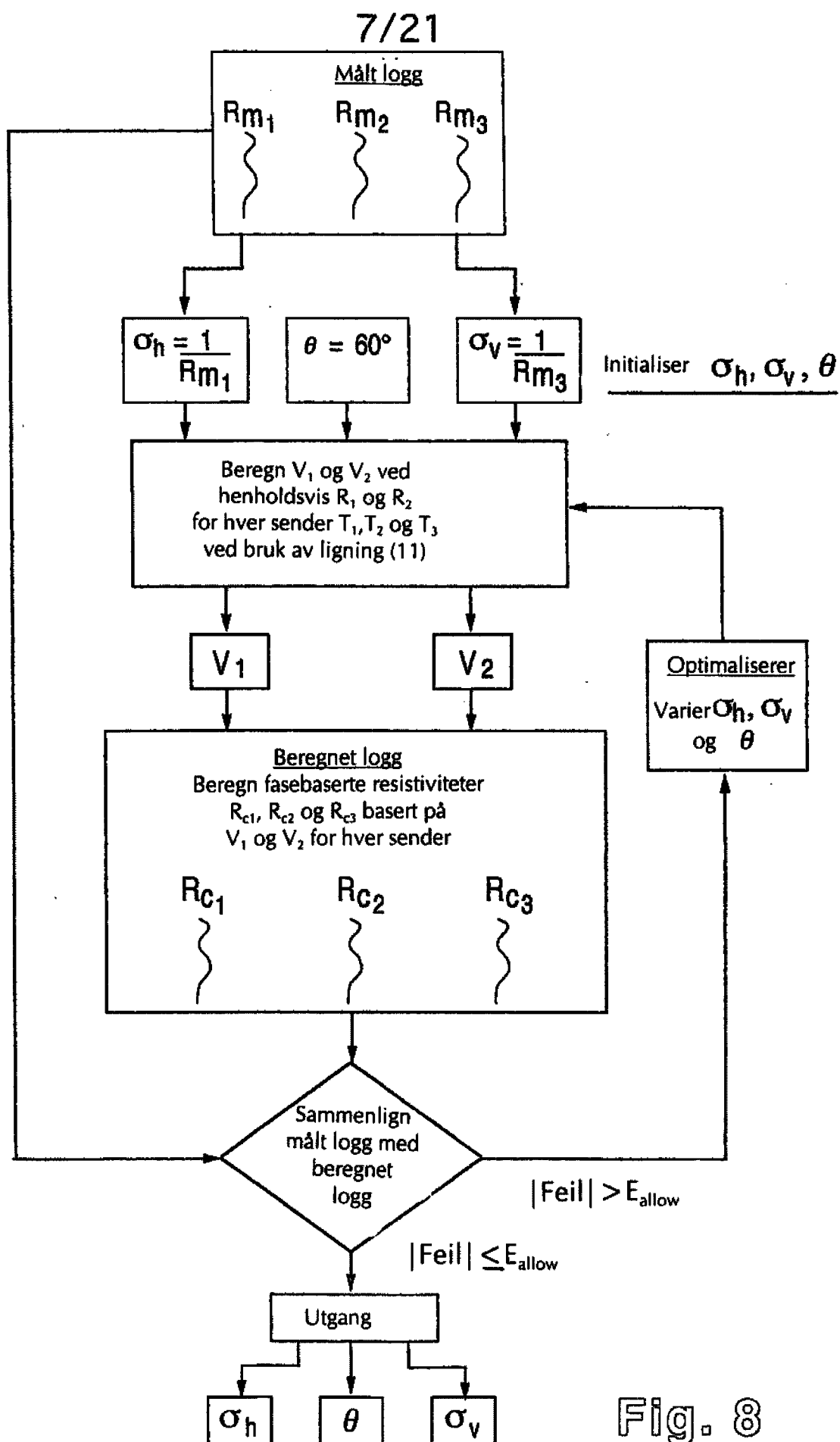


Fig. 8

8/21

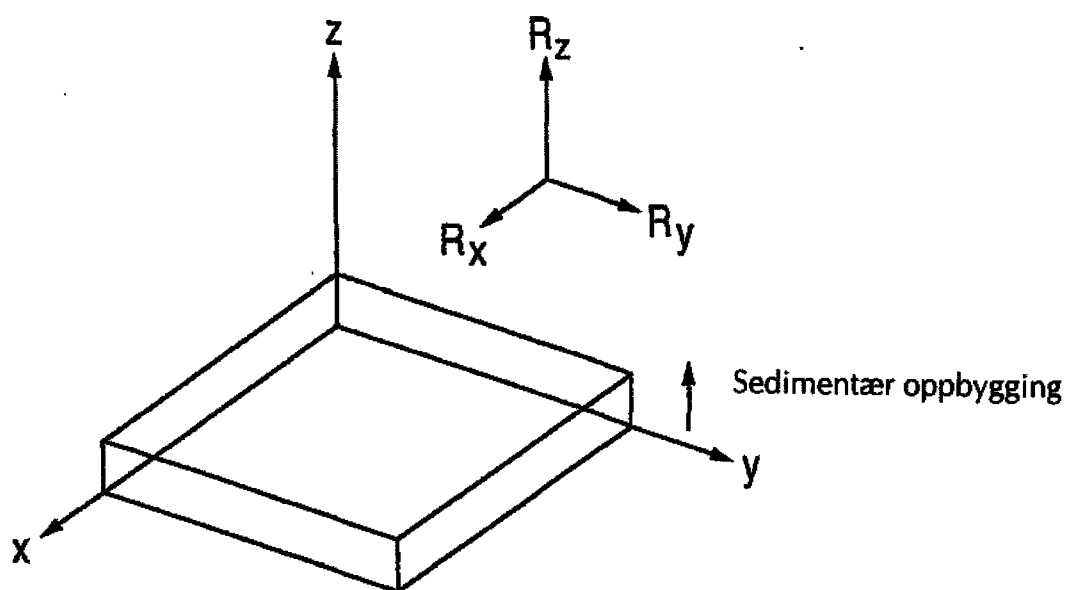


Fig. 9

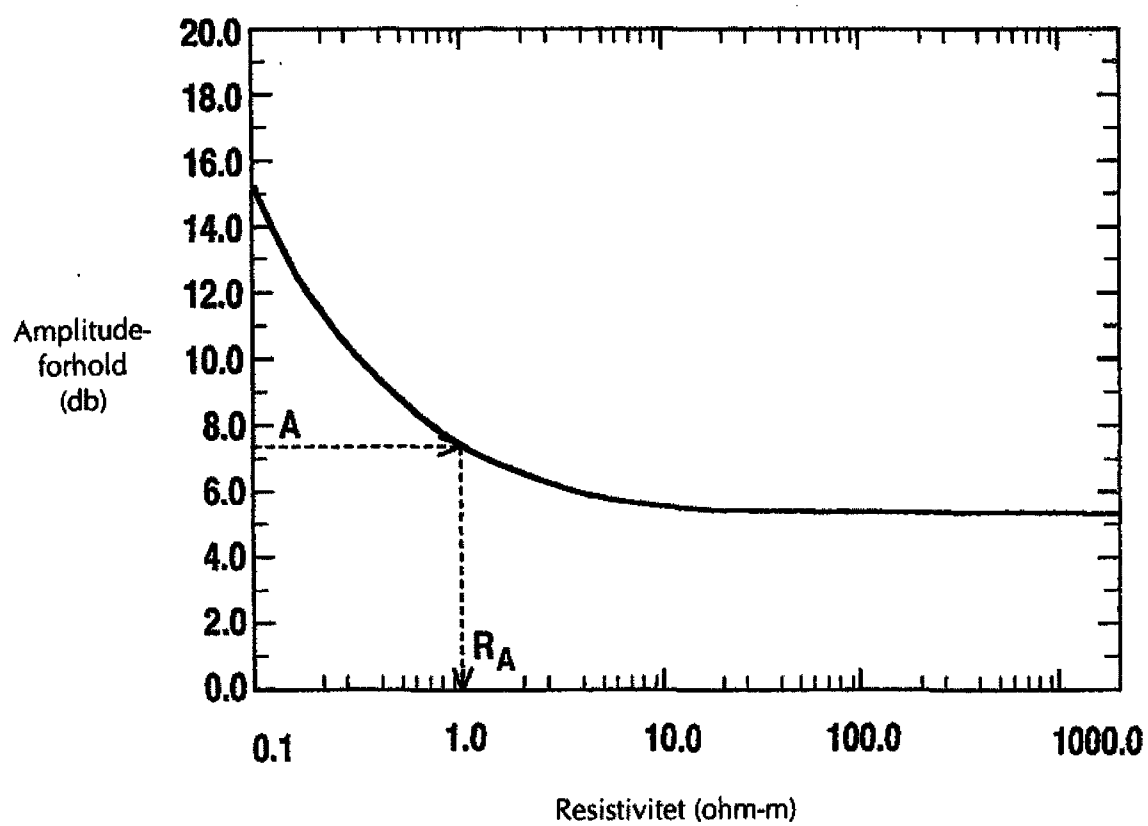


Fig. 10

9/21

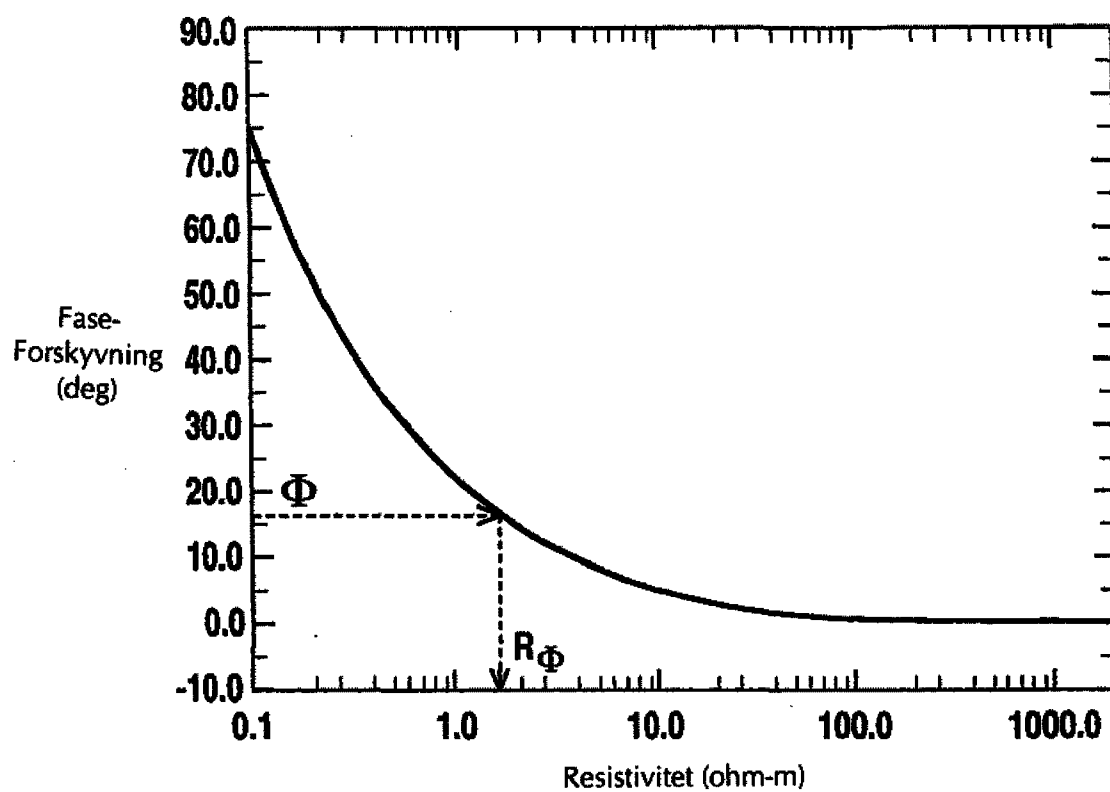


Fig. 11

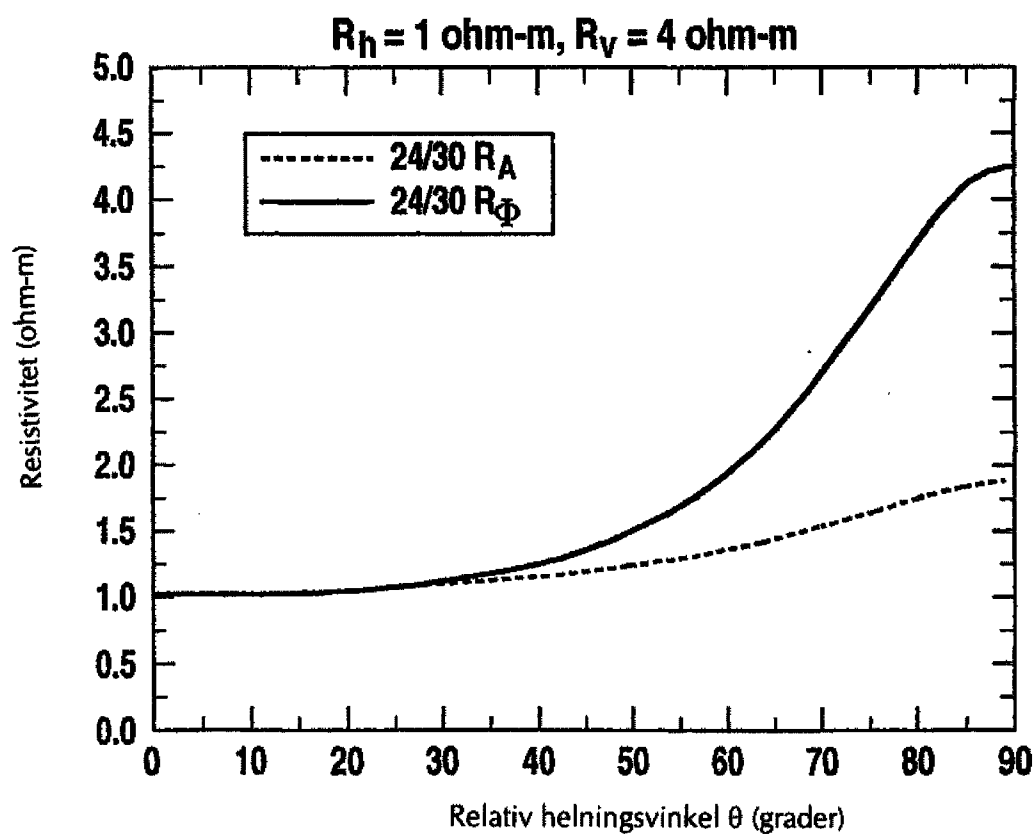


Fig. 12

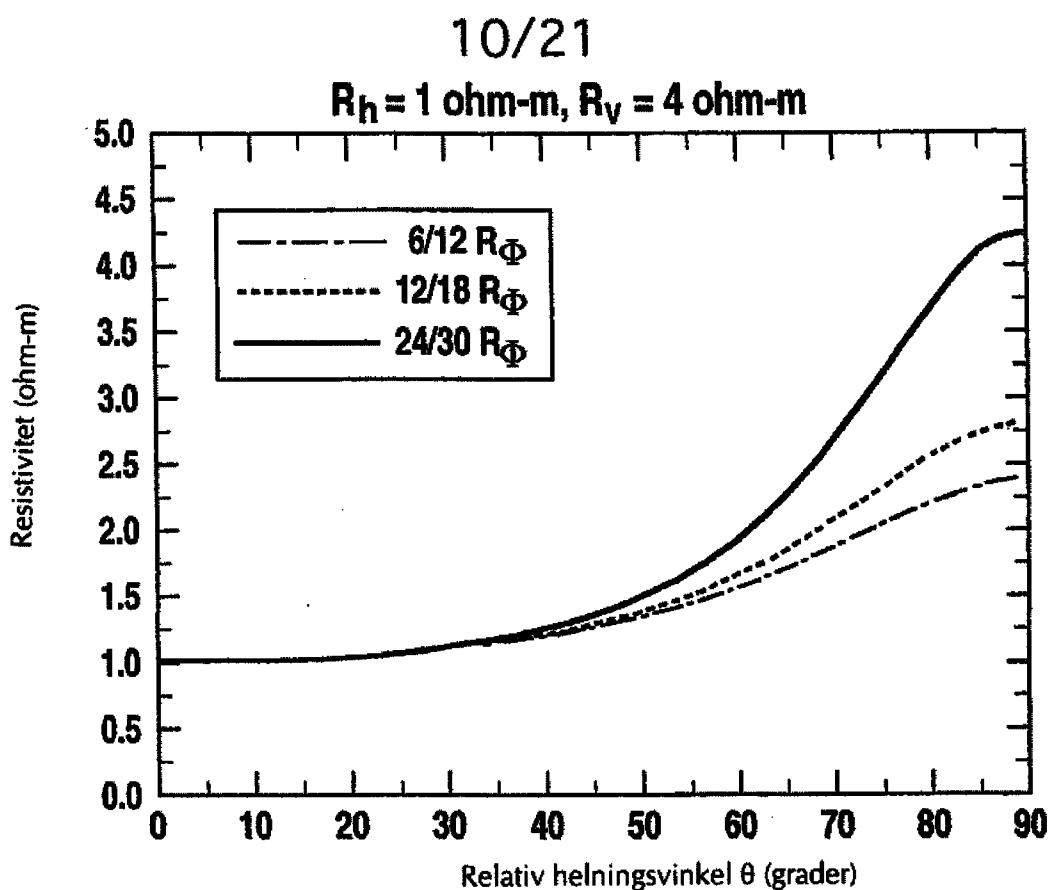


Fig. 13

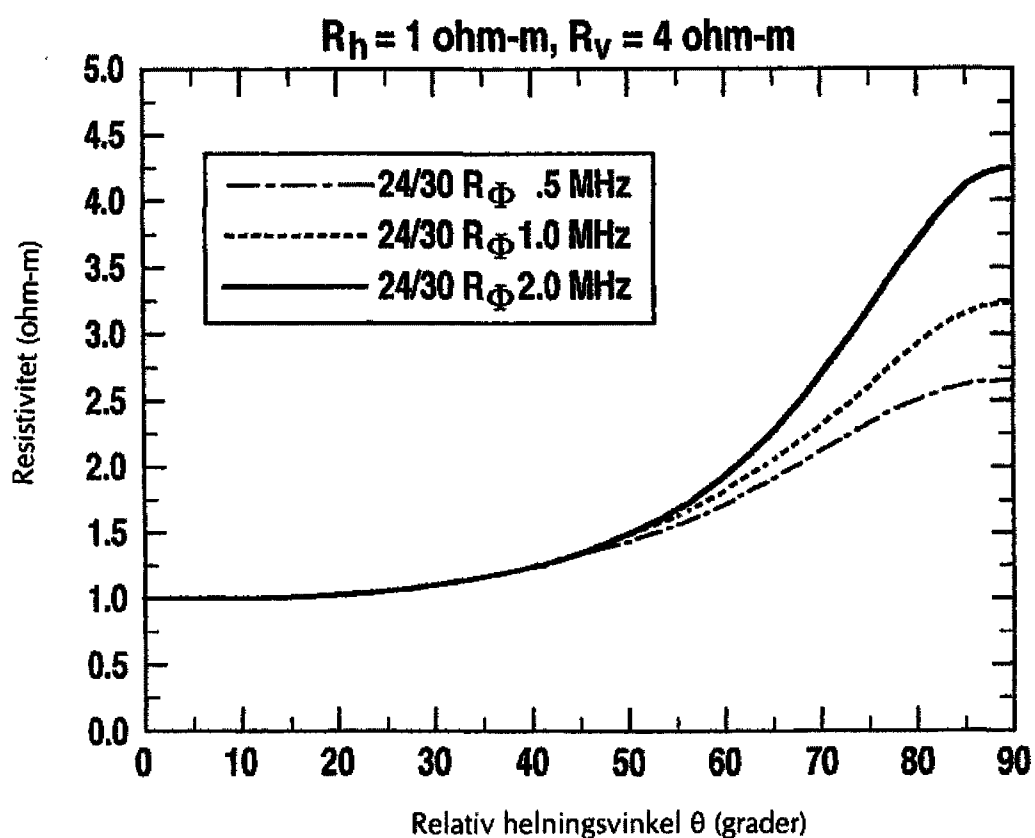


Fig. 14

11/21

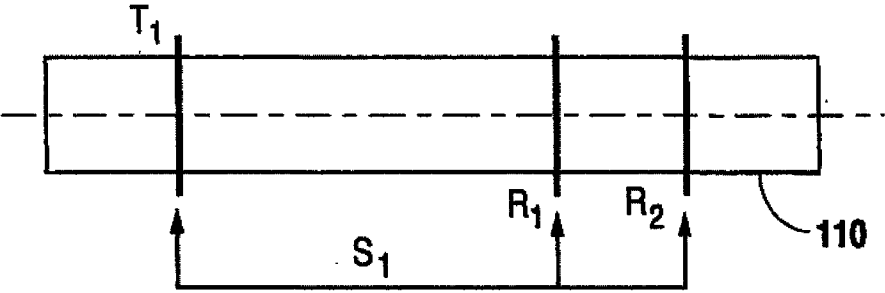


Fig. 15

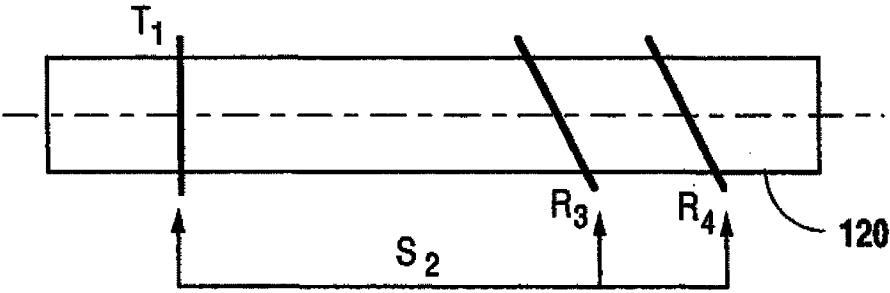


Fig. 16

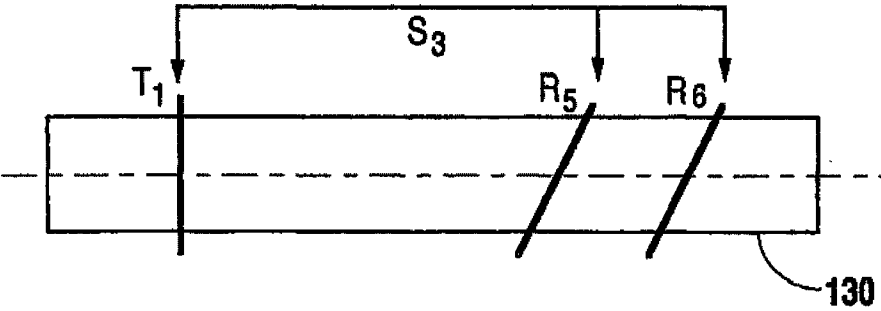


Fig. 17

12/21

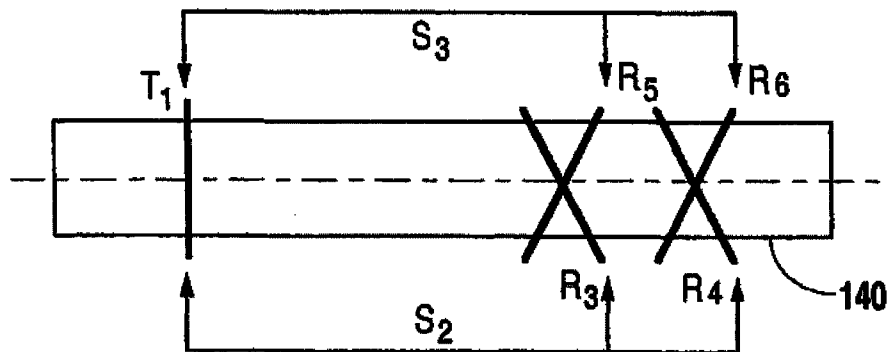


Fig. 18

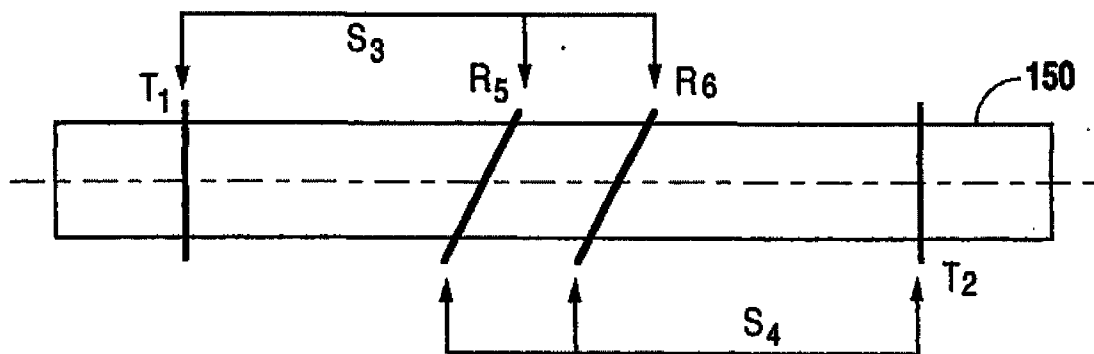


Fig. 19

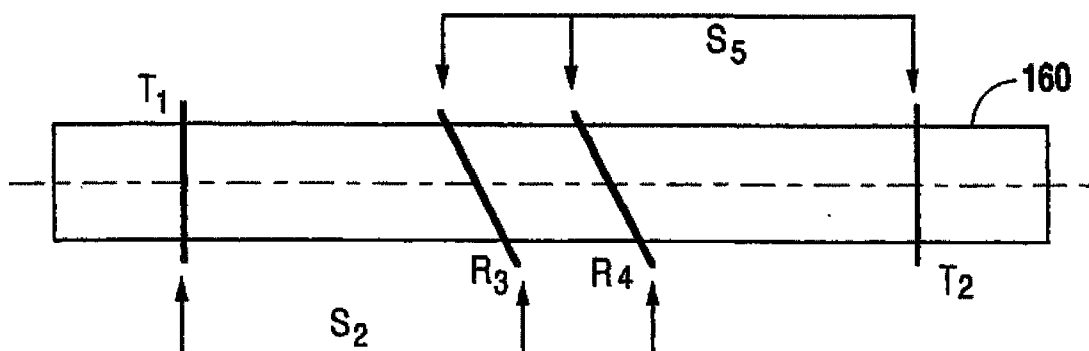


Fig. 20

13/21

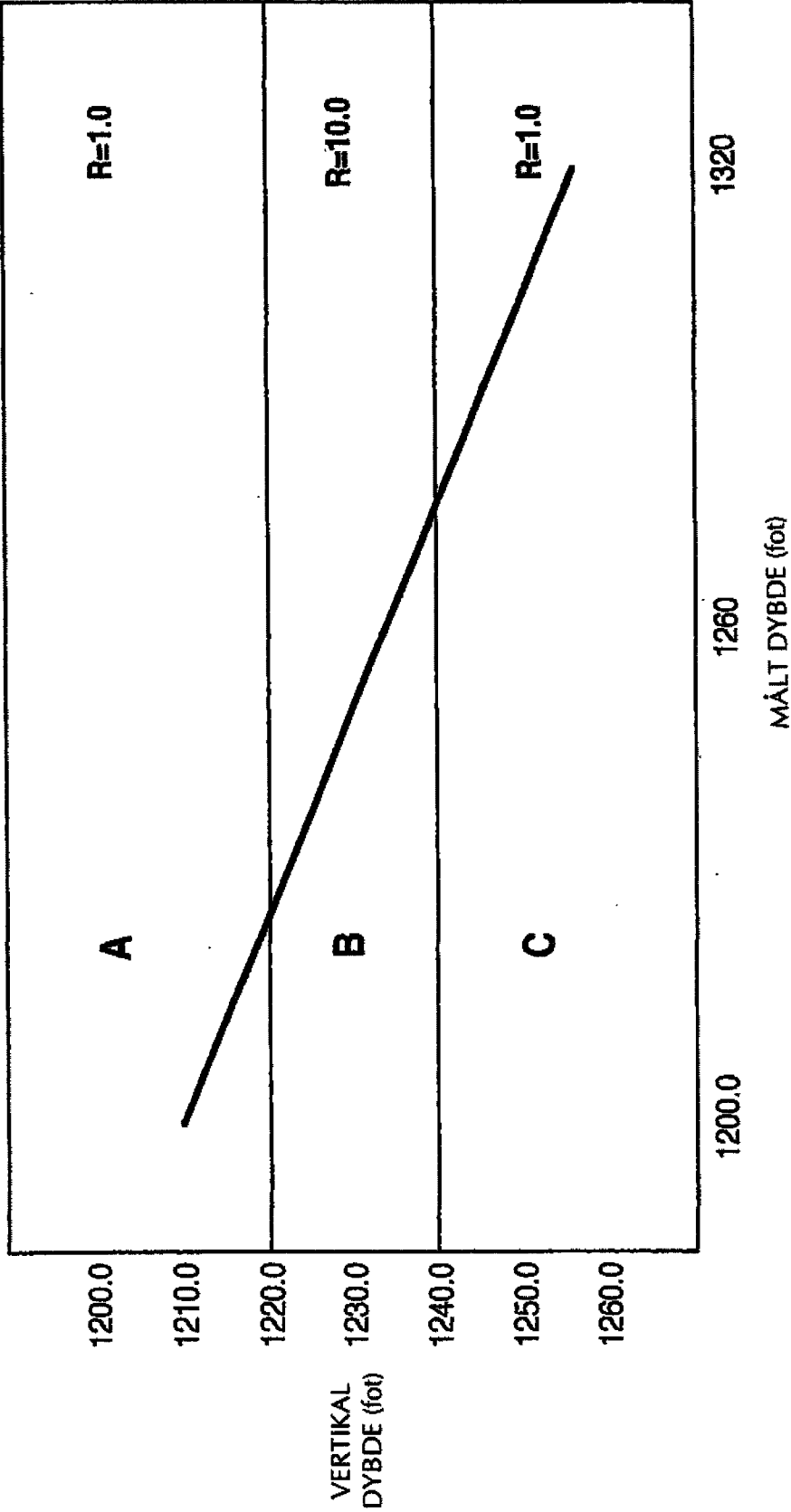


Fig. 21

14/21

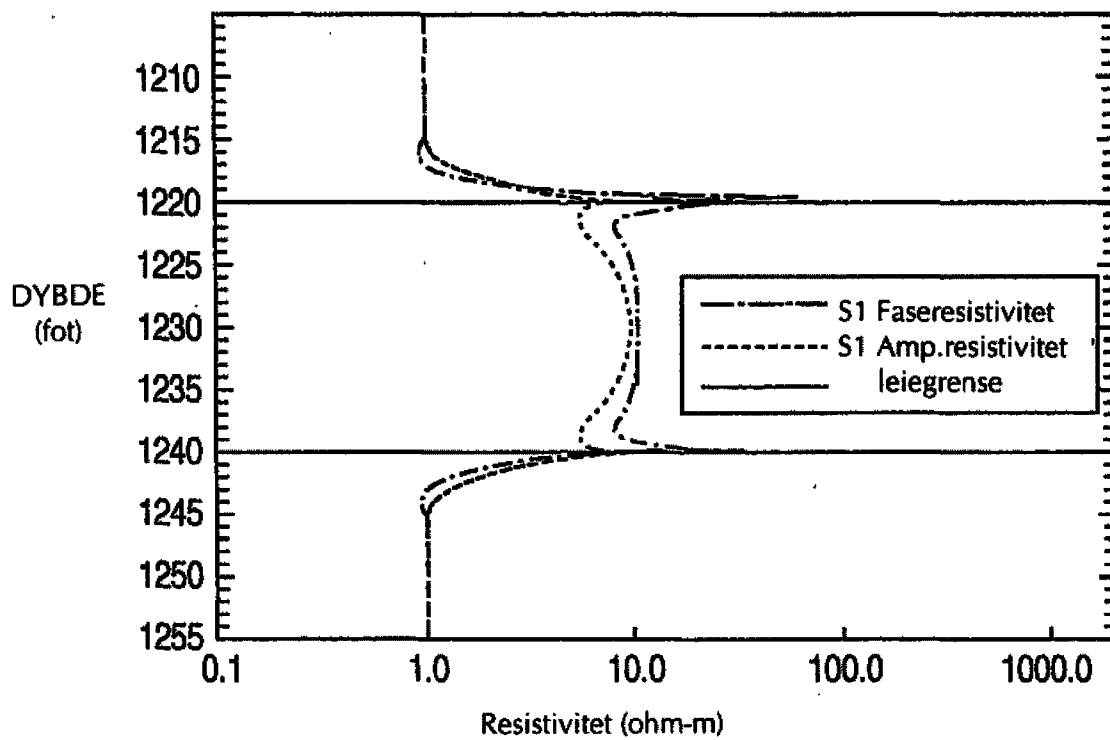


Fig. 22

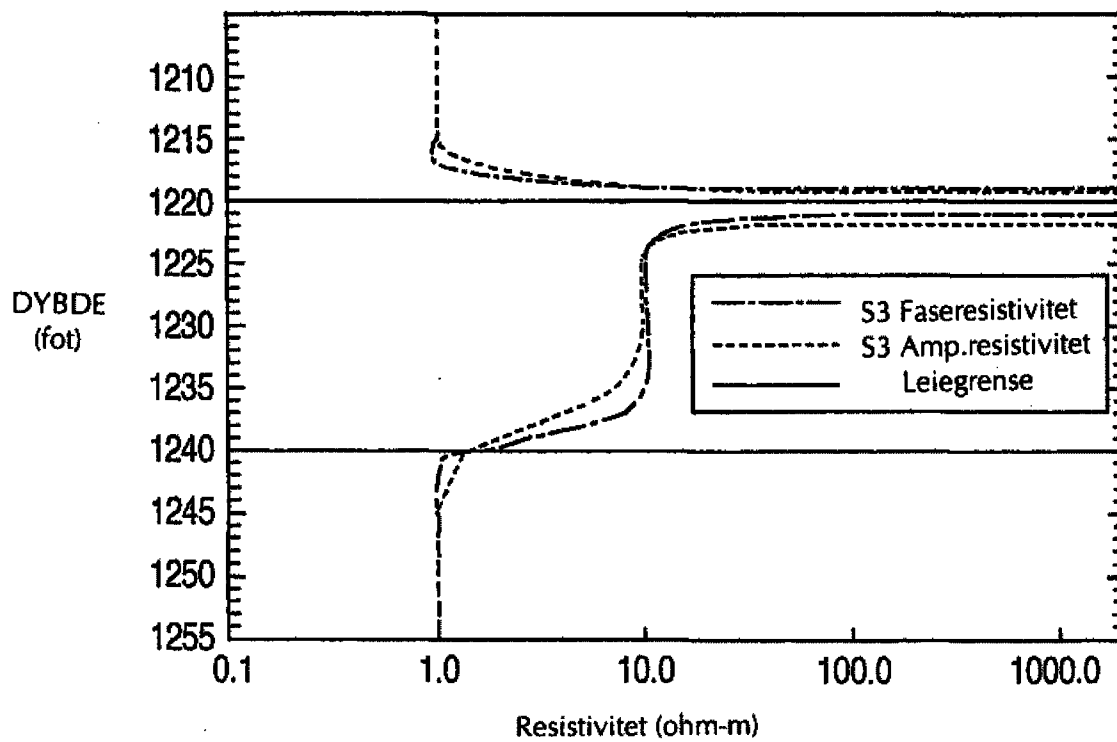


Fig. 23

15/21

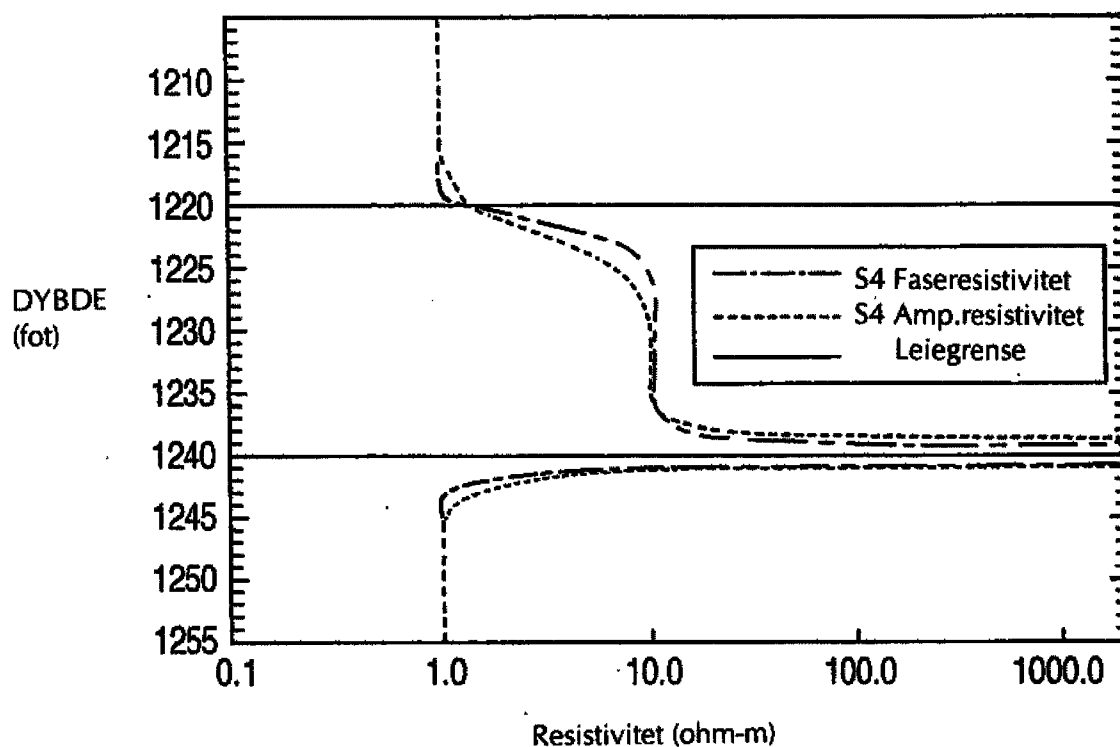


Fig. 24

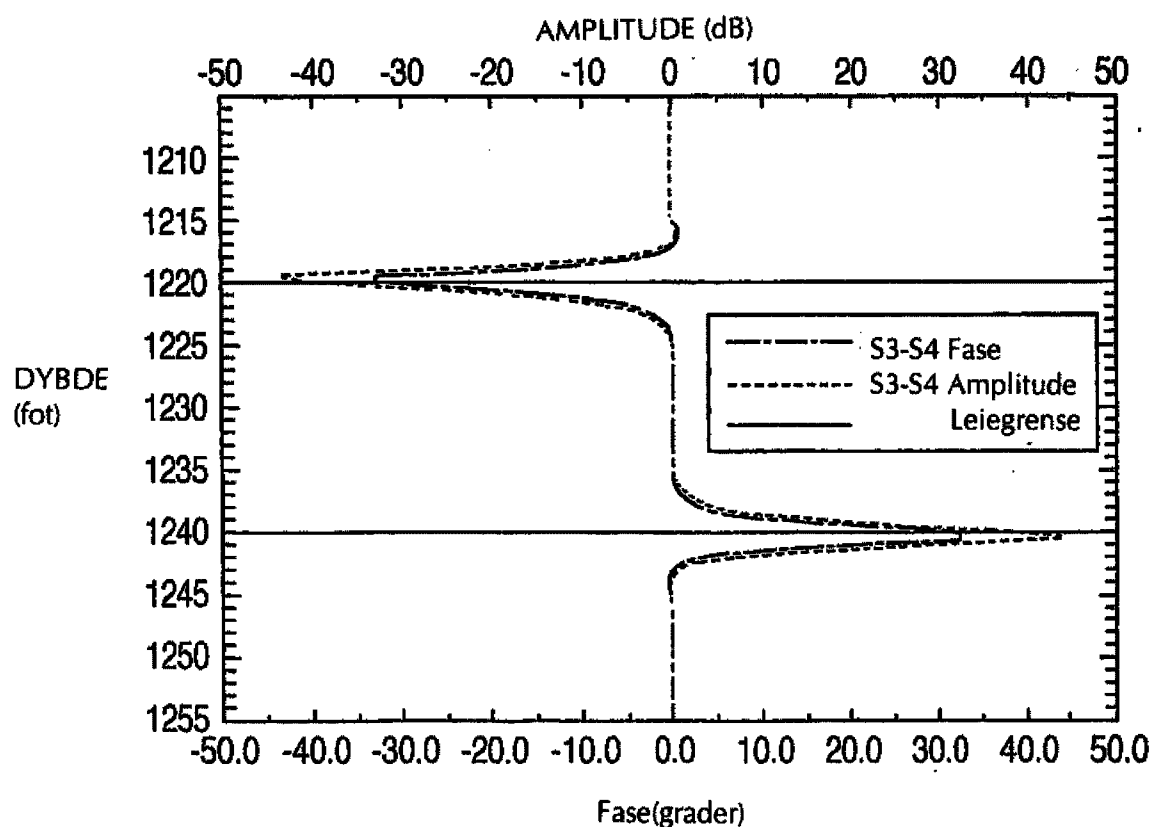


Fig. 25

16/21

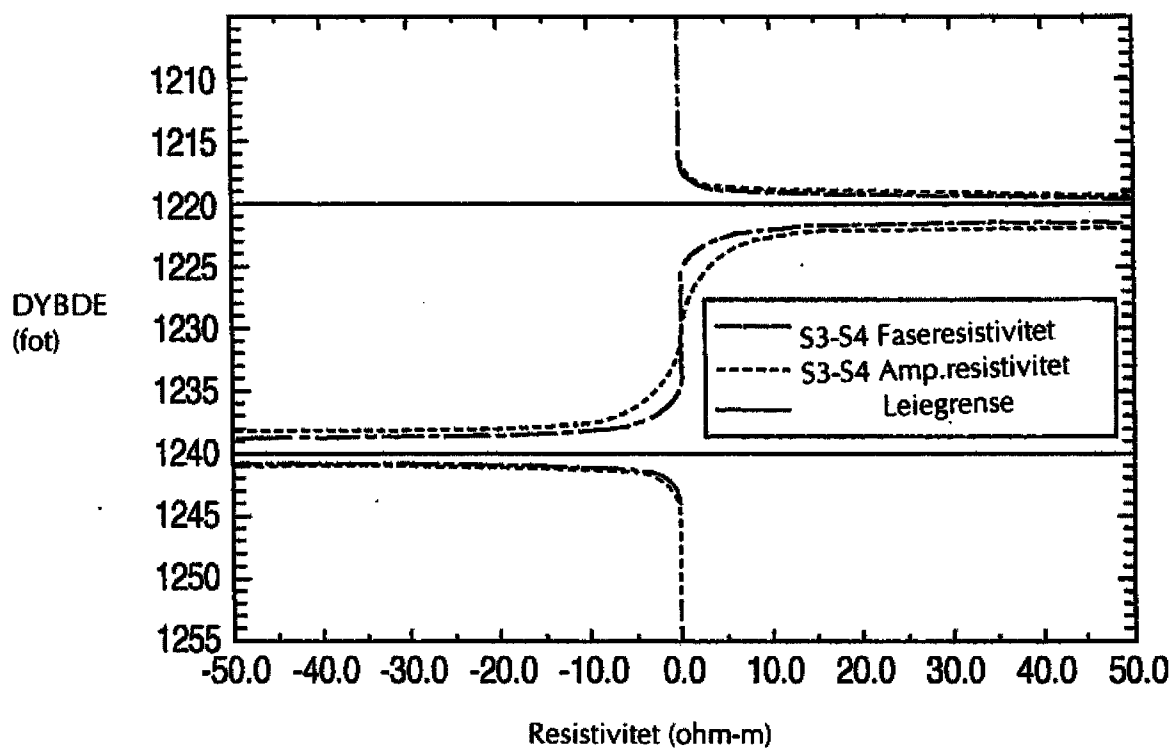


Fig. 26

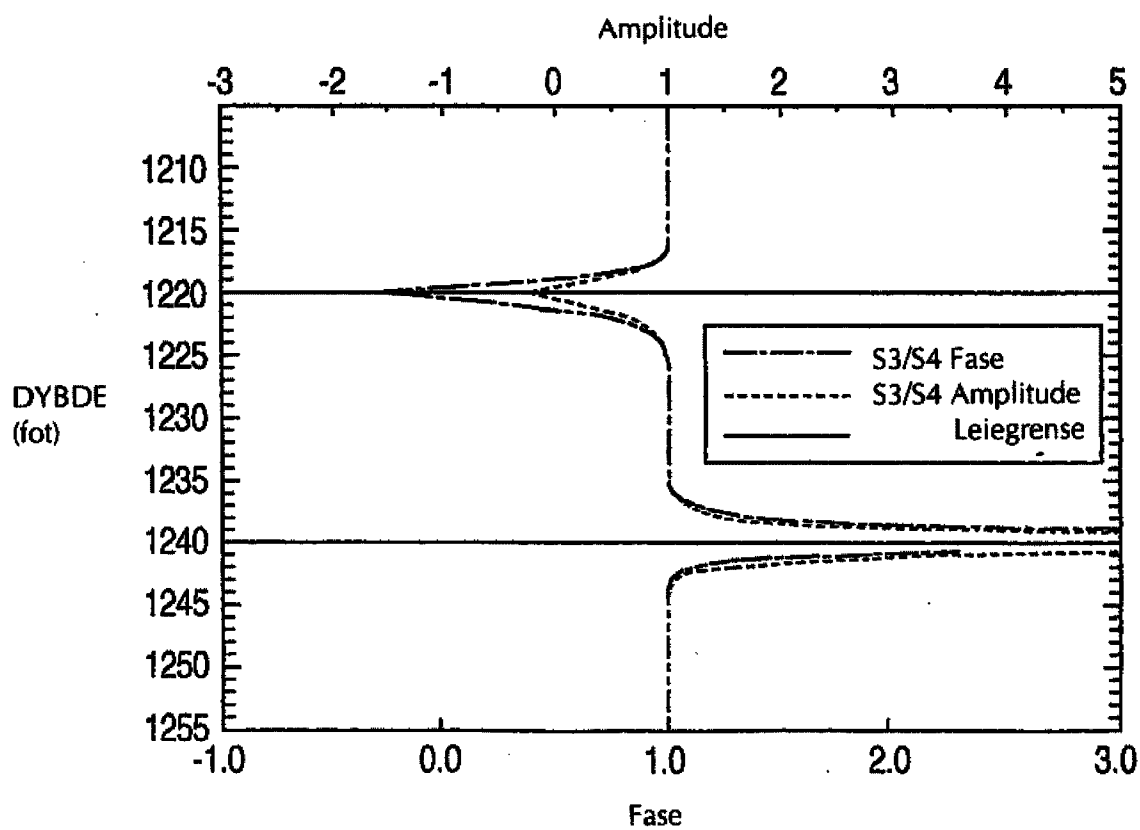


Fig. 27

17/21

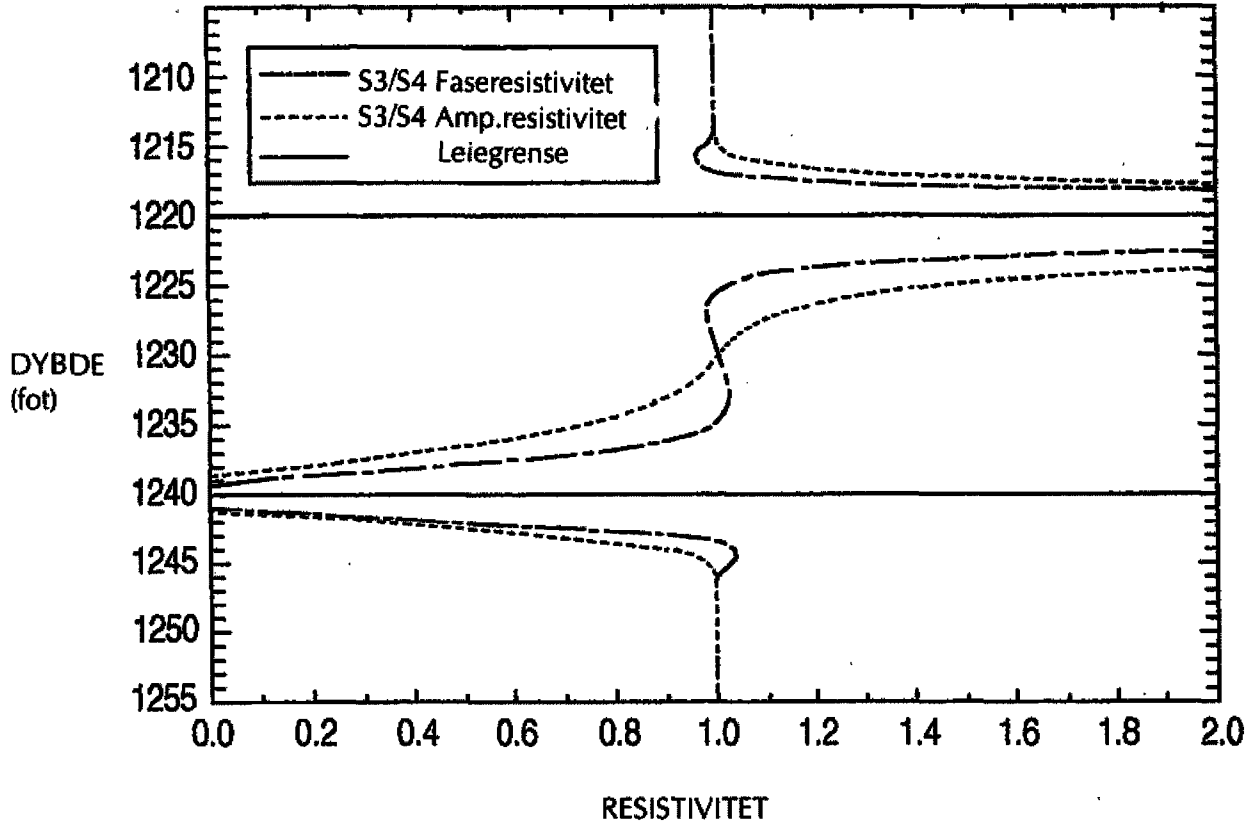


Fig. 28

18/21

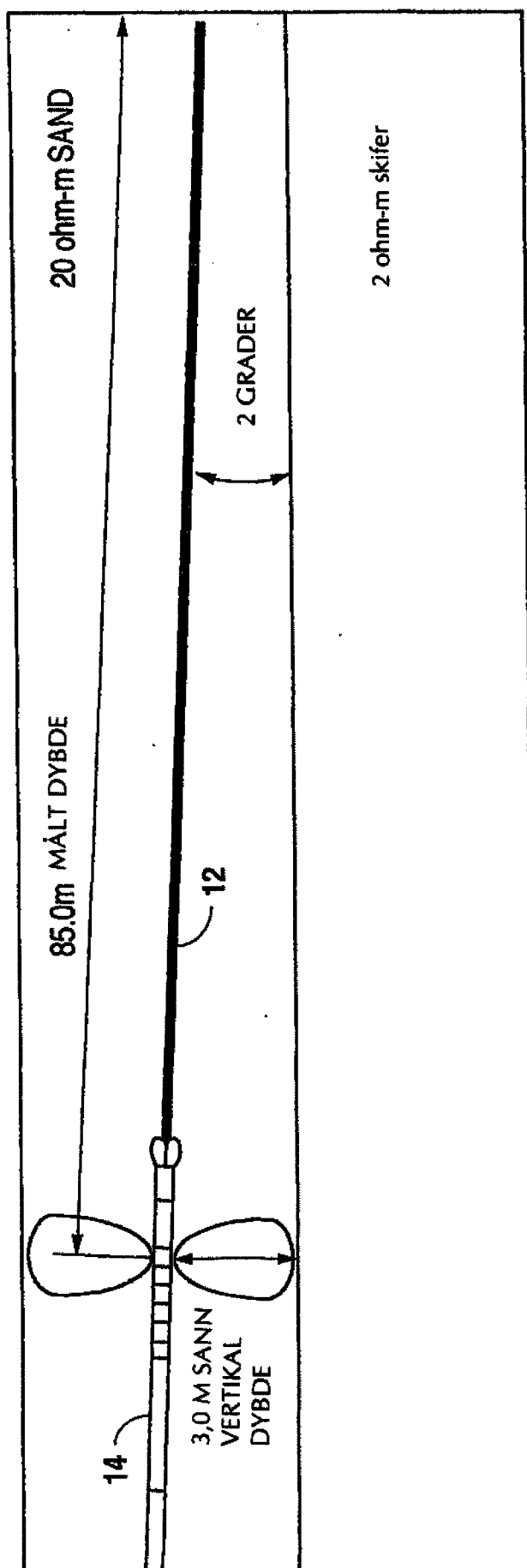


Fig. 29

19/21

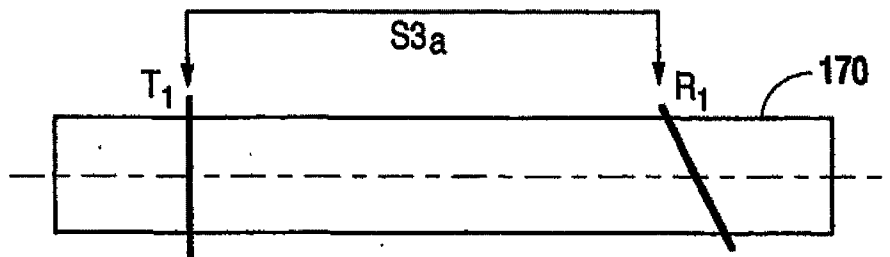


Fig. 30

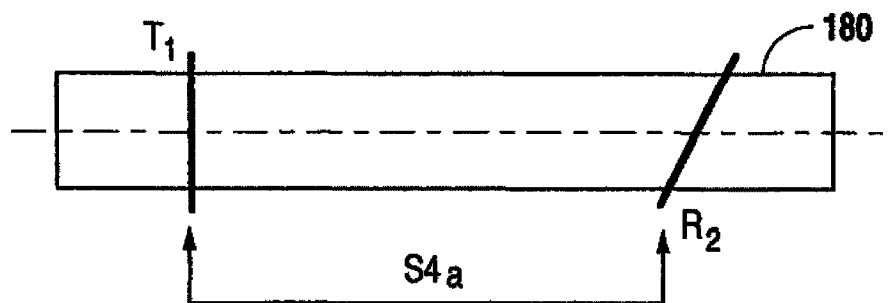


Fig. 31

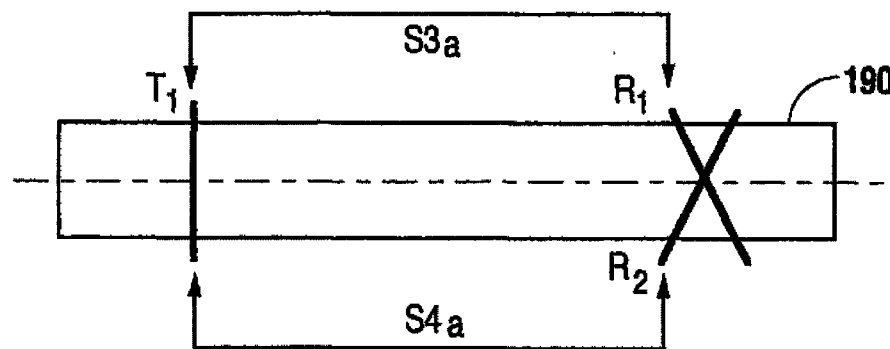


Fig. 32

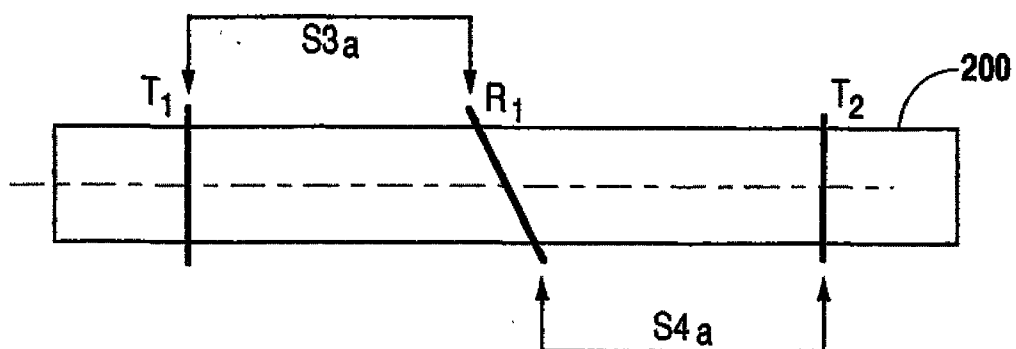


Fig. 33

20/21

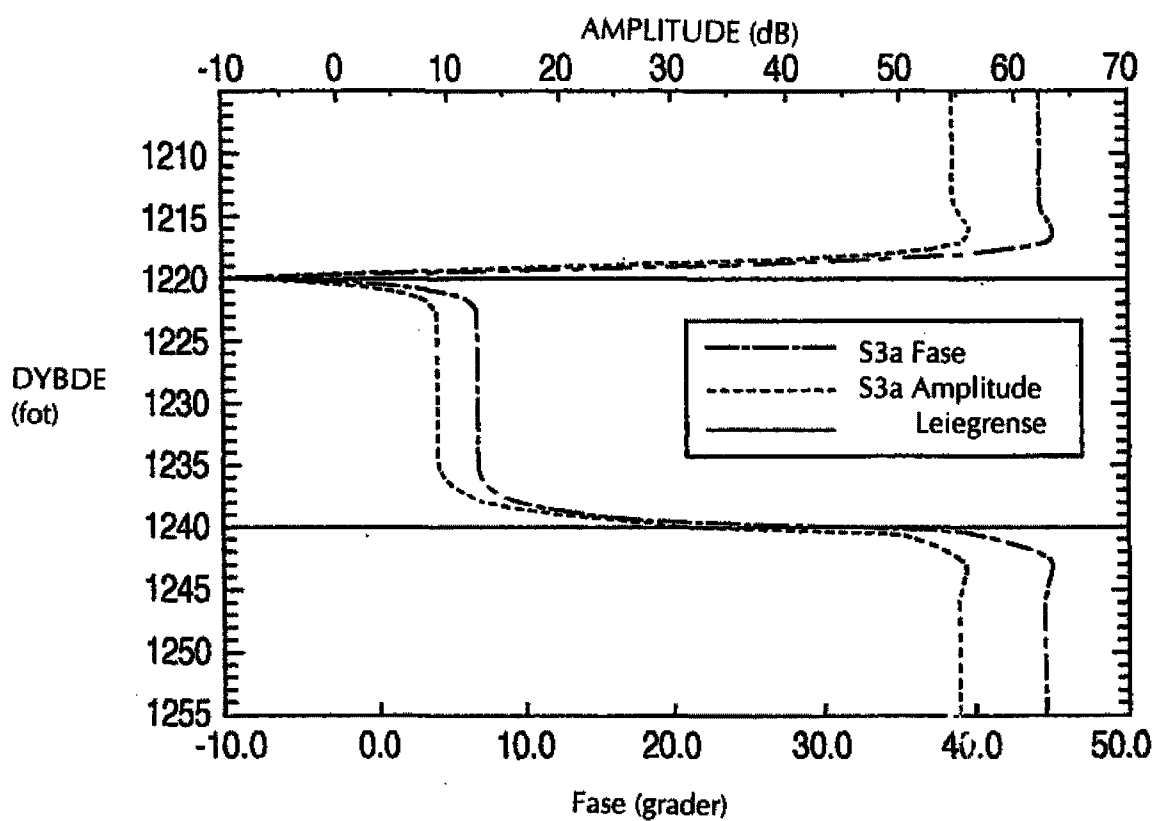


Fig. 34

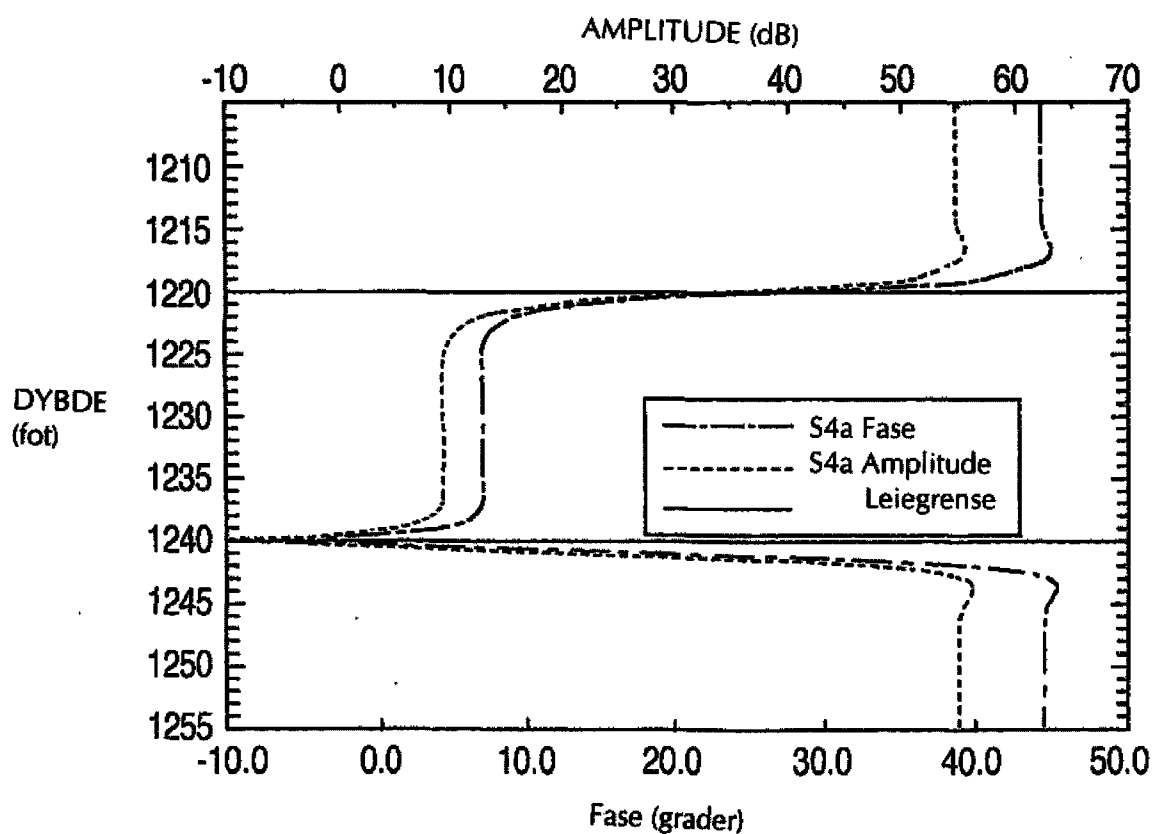


Fig. 35

21/21

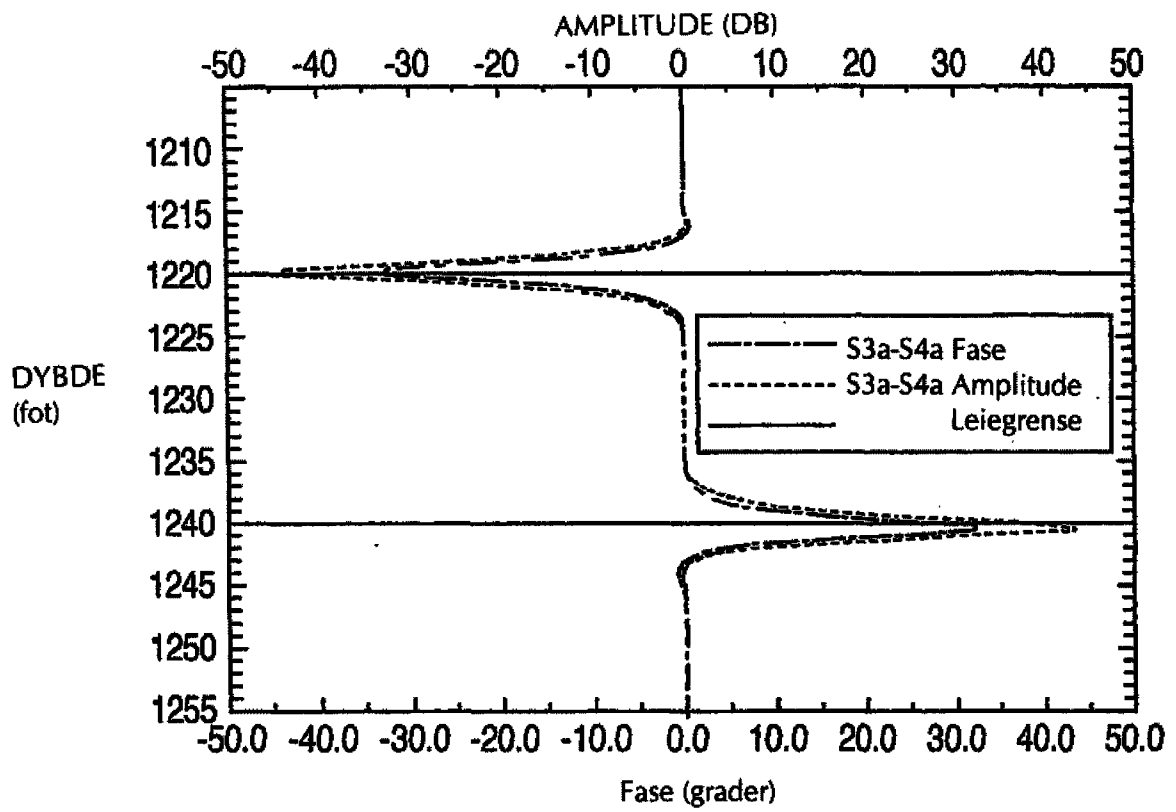


Fig. 36

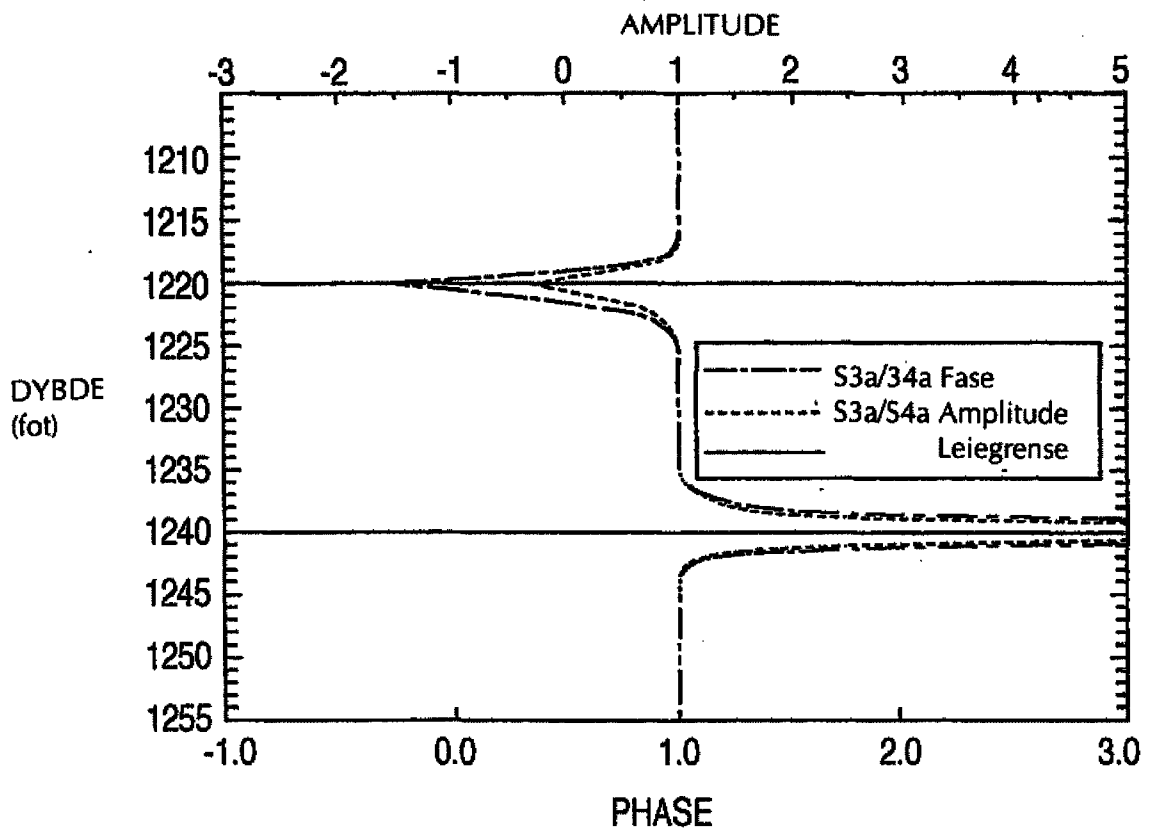


Fig. 37