(12) **PATENT**

(19) NO (11) **335424** (13) **B1**

**NORGE** (51) Int Cl.
*G01V 3/24 (2006.01)*
*E21B 49/00 (2006.01)*

**Patentstyret**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| (21) | Søknadsnr | 20024771 | (86) | Int.inng.dag og søknadsnr | 2001.03.29 PCT/EP2001/03718 |
| (22) | Inng.dag | 2002.10.03 | (85) | Videreføringsdag | 2002.10.03 |
| (24) | Løpedag | 2001.03.29 | (30) | Prioritet | 2000.04.07, FR, 0004527 |
| (41) | Alm.tilgj | 2002.12.04 | | | |
| (45) | Meddelt | 2014.12.15 | | | |

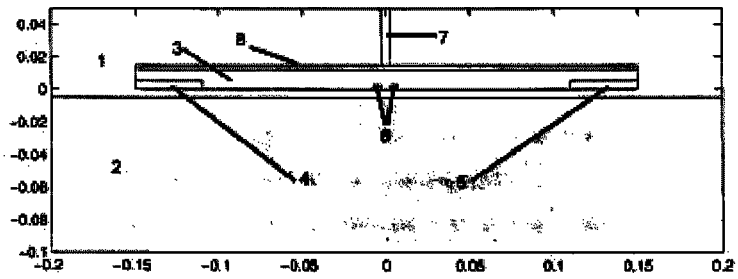
(73) Innehaver Schlumberger Technology B.V., Parkstraat 83-89, NL-2514JG HAAG, Nederland
(72) Oppfinner Dennis Pittman, 5 Tower Place, Lawrenceville, NJ 08648, US-, USA
Philip Cheung, 4, place de Palfour, FR-78360 MONTESSON, Frankrike
Andrew Hayman, 44, rue de Mont d'Urville, FR-78960 VOISINS-LE-BRETONNEUX, Frankrike
(74) Fullmektig Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge

(54) Benevnelse **Apparat for et verktøy innrettet for elektrisk undersøkelse av veggen i et borehull gjennom en geologisk formasjon**

(56) Anførte publikasjoner US 3462678 A

(57) Sammendrag

Foreliggende oppfinnelse gjelder et apparat for et verktøy innrettet for undersøkelse av veggen i et borehull gjennom en geologisk formasjon, idet apparatet omfatter en ikke-ledende målepute (3) med en innerflate samt en ytterflate utført for å presses mot den angitte vegg, et sett av måleelektroder (6) montert på måleputens ytterflate og midler for å måle potensialforskjellen mellom to måleelektroder, samt så vel en kildeelektrode (4) innrettet for å injisere strøm inn i den geologiske informasjon og en returelektrode (5), idet settet av måleelektroder (6) er plassert mellom kildeelektroden (4) og returelektroden (5) for den injiserte strøm, hvor apparatet videre er karakterisert ved at måleputen omfatter et elektrisk ledende parti (8) som dekker hele måleelektrodesonen og er elektrisk isolert fra måleelektrodene.



Foreliggende oppfinnelse gjelder generelt elektrisk undersøkelse av et borehull som passerer gjennom formasjoner i jorden, og nærmere bestemt gjelder den en loggesonde som gjør det mulig å angi data som er blitt samlet opp ved høyoppløsningsundersøkelse av veggen av et borehull i form av avbildninger.

For å kunne undersøke hydrokarbonforekomster er det generelt ønskelig å oppnå nøyaktig kjennskap til egenskapene av geologiske formasjoner i forskjellige dybder av borehullet. Mange av disse karakteristiske særtrekk er meget fine i sin struktur, f.eks. lagdelinger, ikke-uniforme elementer, boreegenskaper, bruddforekomster etc. Som et eksempel spiller orienteringer, densiteten og lengdeutstrekninger av brudd en stor rolle når det gjelder å bestemme de dynamiske egenskaper ved et berggrunnsreservoar.

I mange år har det vært mulig å bestemme slike fine karakteristiske særtrekk bare ved å analysere utborede kjerner som er tatt under utboringen av borehullet. Uttak av slike kjerner utgjør imidlertid en teknikk som er ytterst kostnadskrevende, og bruk av en slik teknikk gjøres da stort sett unntaksvis.

Europeisk patent nr. 0 110 750, eller det tilsvarende US-patent nr. 4 567 759 beskriver en teknikk som går ut på å frembringe en avbildning av veggen i et borehull og som da går ut på å generere karakteriserende signaler med regelmessige tidsmellomrom og som representerer en måling med høy romoppløsning av visse særtrekk ved veggen, måling av det dybdenivå i hullet som disse karakteriserende signaler tilsvarer og med en nøyaktighet av samme størrelsesorden som de karakteristiske signalers romoppløsning, samt omforming av de signaler som angir de karakteriserende særtrekk som en lineær funksjon av borehullsdybden og med en fargeskala som er satt i sammenheng med verdiene av de omformede signaler, for derved å danne en visuell avbildning.

Denne avbildningsteknikk blir nærmere bestemt iverksatt ved hjelp av et verktøy for å undersøke vedkommende formasjons ledningsevne, slik som f.eks. beskrevet i europeisk patent nr. 0 071 540 eller dets tilsvarende US-patent nr. 4 468 623, hvor da det er angitt at dette verktøy er i stand til å detektere karakteriserende særtrekk med millimeteroppløsning. Verktøy av denne typen har en rekke reguleringselektroder, også kjent som "knapper", og som er anbrakt på en ledende målepute som trykkes mot borehullets vegg.

En konstant strømkilde påtrykkes spenning på hver av knappene samt en ledende overflate av måleputen, slik at målestrømmer injiseres i formasjonen vinkelrett på borehullsveggen. En returelektrode er anordnet for strømmen og i form av en elektrode som er anbrakt nær inntil vedkommende overflate, eller eventuelt på en annen del av verktøyet. Måleputen beveges langs borehullet og de fastlagte strømmer som står i sammenheng med hver knapp er da proporsjonale med ledningsevnen for det materiale som er vendt mot knappene.

Ved utøvelse av det som er angitt i US-patent nr. 4,567,759 blir signalene modifisert ved at det elimineres virkninger fra slike forhold som hastighetsvariasjoner for verktøyet og forstyrrelser som skriver seg fra variasjoner i verktøyets omgivelser ved forsterkning og fremvisning på en måte som kommer nær inntil dannelse av en visuell avbildning av borehullets innside.

Denne avbildningsteknikk har vist seg å være i høy grad vellykket i løpet av de siste få år når den har vært brukt i borehull som har vært utboret ved hjelp av ledende utboringsslam, slik som vannbasert slam eller slam av en type som utgjør olje i vannemulsjon. Ved slamtyper som har en kontinuerlig ikke-ledende fase, slik som oljebaserte slamtyper eller emulsjoner av vann i olje, vil imidlertid de oppnådde avbildninger være av meget dårlig kvalitet. Disse dårlige resultater tilskrives i alminnelighet forstyrrelser som skriver seg fra nærvær av et lag av ikke-ledende slam, eller fra et slamlag og en slamkake som befinner seg mellom knappene og den formasjon som utprøves. Da tykkelsen av dette slamlag spesielt varierer som en funksjon av veggens ruhetsgrad, så kan de resulterende strømvariasjoner fullstendig maskere enhver strømvariasjon som skriver seg fra den formasjon som måles.

En ny teknikk for avbildning av et borehull som er utboret ved vedhjelp av ikke-ledende utboringsslam er beskrevet i internasjonal patentsøknad PCT/US99/14420. Dette verktøy for undersøkelse av formasjonsledningsevne avviker fra det verktøy som er kjent fra US-patent nr. 4,468,623 ved at det benytter en ikke-ledende målepute samt knapper som danner spennings-elektroder i stedet for strømelektroder. Strøminjeksjonselektrodene er plassert i avstand fra puten, eller i en foretrukket utførelsesvariant, direkte ved putens

ytterender. I et annet tilfelle er de to injektorer plassert på en slik måte at den strøm som passerer gjennom formasjonen hovedsakelig parallelt med måleputen således fortrinnsvis strømmer hovedsakelig vinkerett på lagdelingenes grensesjikt. Under slike forhold vil potensialforskjellen mellom to måleknapper være proporsjonal med resistiviteten av det materiale som er vendt mot knappene.

Den ovenfor spesifiserte internasjonale patentsøknad anbefaler bruk av likestrøm eller vekselstrøm med meget lag frekvens, slik at putens resistivitet er meget større enn boreslammets resistivitet. I praksis medfører imidlertid arbeidet med likestrøm problemer med hensyn til støy, som spesielt skriver seg fra dannelse av spontane potensialer i formasjonen. I tillegg vil størrelsen av den strøm som kan injiseres være begrenset av slammotstanden, slik at de potensialforskjeller som kan måles mellom to par knapper vil være meget små og derfor vanskelig å måle.

Det vil derfor være ønskelig om det var mulig å arbeide med vekselstrøm med forholdsvis høy frekvens, f.eks. av størrelsesorden noen få tusen hertz. Ved slike frekvenser oppfører imidlertid måleputen seg uheldigvis som et dielektrikum og den effektive ledningsevne for slammet vil også øke. Dette gir da opphav til en elektrisk impedans gjennom måleputen som er av samme størrelsesorden som impedansen gjennom slamlaget. Under slike forhold vil potensialforskjeller mellom par av måleknapper være mer representative for den potensialforskjell som påføres mellom strømelektrodene enn de er for resistiviteten av den formasjon som er vendt mot dem, og som en følge av dette blir også verktøyet ubrukelig.

Et formål for foreliggende oppfinnelse er å forbedre den teknikk som går ut på å avbilde et borehull som er utboret ved hjelp av et ikke-ledende boreslam, slik som beskrevet i internasjonal patentsøknad PCT/US99/14420 for å gjøre det mulig for denne teknikk å arbeide med vekselstrøm ved frekvenser høyere enn 1000 Hz.

I henhold til oppfinnelsen er det da frembrakt et apparat for et verktøy innrettet for undersøkelse av veggen i et borehull gjennom en geologisk formasjon, idet apparatet omfatter:

a) en ikke-ledende målepute med en innerflate, samt en ytterflate for å trykkes mot borehullsveggen,

b) et sett av måleelektroder montert på måleputens utside samt midler for å måle potensialforskjellen mellom to måleelektroder, og

c) både en kildeelektrode anordnet for injeksjon av strøm inn i den geologiske formasjon og en returelektrode, idet settet av måleelektroder er anordnet mellom kildeelektroden og returelektroden for den injiserte strøm, idet apparatet er kjennetegnet ved at måleputen omfatter et elektrisk ledende parti som dekker hele måleelektrodesonen, og som er elektrisk isolert fra måleelektrodene, idet dette parti av måleputen anbringes på samme elektriske potensial som den geologiske formasjon (blir jordet).

For god dekning må det ledende parti strekke seg godt ut over den sone som er utstyrt med måleelektrodene, hvor da den minste lengdeutstrekning øker med avtagende tykkelse av det ledende lag, og økende avstand av det ledende lag fra måleelektrodene. Ved bruk av en metallplate i en avstand av størrelsesorden centimeter, er gode resultater blitt oppnådd med en plate som dekker omkring ti ganger lengden av måleelektrodesonen. Når injektorene er anbrakt på puten, bør det ledende lag fortrinnsvis strekke seg over hele området mellom injektorene.

Det ledende parti kan også utgjøres av en metallplate som tjener som en bærer for den ikke-ledende målepute, som da selv er fremstilt f.eks. av et elektrisk isolerende plastmateriale. Under slike forhold kan det ledende parti av måleputen også dekke putens sidekanter. Det ledende parti av puten kan også være et integrert parti av den avskjerming av de elektroniske kretser som er anordnet for behandling av de signaler som kommer fra måle-elektrodene.

Metallplaten kan også fortrinnsvis ha ledende utstikkere som strekker seg over hele eller en del av den isolerende putes tykkelse, for derved å definere separate seksjoner henholdsvis for kildeelektroden, måleelektrodene og returelektroden. En slik utførelse kan gjøre det mulig å flytte injektorene tettere sammen og således redusere måleputens totale lengde.

Det elektrisk ledende parti av måleputen er som nevnt koplet til jord, eller mer nøyaktig uttrykt er det plassert på samme elektriske potensial som den geologiske formasjon. Under slike forhold vil måleelektrodene faktisk være i stand til å måle potensialet på den formasjon som de har vendt mot seg, selv når måleputen er skråstilt, hvilket vil si når "forskyvnings"-avstanden

mellom formasjonen og kildeelektroden er forskjellig fra forskyvningsavstanden mellom formasjonen og returelektroden.

Andre detaljer og fordelaktige egenskaper ved oppfinnelsesgjenstanden vil fremgå av den følgende beskrivelse som vil bli gitt under henvisning til de vedføyde tegninger, hvorpå:

fig. 1 er en skisse som viser det prinsipp som den mikroelektriske måling av formasjonen er basert på,

fig. 2 viser den geometriske modell som anvendes for å simulere de elektriske felter i den geologiske formasjon,

fig. 3 omfatter to kurver (fig. 3A og 3B) hvis verdier er beregnet som en funksjon av modellen i fig. 2 med hensyn til potensialforskjeller mellom måleelektrodene, og som er opptegnet for en målepute som strekker seg parallelt med borehullsveggen (fig. 3A) eller som er lett skråstilt i forhold til denne (fig. 3B), og

fig. 4 viser en utførelsesvariant av oppfinnelsen med en ledende plate som deler opp måleputen i forskjellige partier.

Fig. 1 er et skjema som viser det prinsipp som de elektriske målinger er basert på i den avbildningsteknikk som er beskrevet i den internasjonale patentsøknad PCT/US99/14420. Dette verktøy er særlig innrettet for å undersøke veggen 2 i et borehull som er utboret ved hjelp av ikke-ledende boreslam, f.eks. et borefluid hvis væskefase hovedsakelig utgjøres av en olje (dieselolje, syntetisk olje) eller av en emulsjon av vann i olje. Uttrykket "oljebasert slam" vil bli anvendt nedenfor for å angi borefluider som er av én av disse to typer. Borefluidet danner en slamkake 1 langs veggen 2.

Verktøyet for å undersøke veggen av et borehull har en målepute 3 utført i et elektrisk isolerende materiale, slik som en keramikk eller polymerer med høy styrke samt høy termisk og kjemisk stabilitet, særlig polyarylen av eterketon-type (polyeter-eterketon eller PEEK).

Måleputen tjener som en bærer for to strøminjektorer, nemlig kildeelektroden 4 og returelektroden 5. Disse to elektroder er plassert på motsatte ender av puten og opptar hele putens bredde, slik det klarere vil fremgå fra frontskissen av puten, eller de kan i det minste oppta en større andel av putens bredde, for derved å danne størst mulige overflatearealer for

disse strøminjeksjonselektroder. Det sentrale parti av måleputen har to rekker av måleelektroder 6, og i det viste tilfelle er det anordnet fem par av måleelektroder. Måleputens form er slik at målelektrodene 6 er trukket litt tilbake slik at måleelektrodene ikke kommer direkte i kontakt med den geologiske formasjon når puten trykkes mot veggen 2. Det bør observeres at denne foretrukne form er ikke vesentlig når vedkommende berggrunn er porøs, da under slike omstendigheter utboring ved hjelp av oljebasert slam gjør at det dannes en slamkake med resistivitet som er større enn den geologiske formasjons resistivitet, og denne kake vil da alltid ligge mellom måleelektrodene og den geologiske formasjon og således hindre alle måleknapper fra å bli kortsluttet ved å komme i kontakt med berggrunnen.

Med likestrøm eller en vekselstrøm med en frekvens mindre enn omkring 100 kHz, vil den geologiske formasjons resistivitet vanligvis ligge i området 0,1 Ωm til 10.000 Ωm, mens et oljebasert slam har en effektiv resistivitet på omkring 0,1 MΩm til omkring 10 MΩm. Når en strøm I under slike forhold injiseres i formasjonen ved hjelp av injektorene 4 og 5, med måleelektrodene isolert fra hverandre av den ikke-ledende målepute, så vil det ved anvendelse av Ohms lov observeres at resistiviteten $\rho$ i den formasjon som befinner seg under et par måleelektroder er lik forholdet mellom potensialforskjellen $\delta V$ mellom de to elektroder og strømdensiteten J. Formasjonens resistivitet kan med andre ord utledes fra ligningen $\rho = \delta V/J = k.\delta V/i$ hvor k er en geometrisk faktor.

Hvis den injiserte strøm er vekselstrøm med tilstrekkelig høy frekvens (større enn omkring 1 kHz), kan måleputen ikke lenger betraktes som en perfekt elektrisk isolator, men må tvert i mot betraktes som et dielektrikum nedsenket i et dielektrisk medium, nemlig det oljebaserte slam. Ved strøm ved en frekvens på f.eks. omkring 10 kHz, vil det være tilstrekkelig at måleputens relative permittivitet er større enn 2 for å sikre at impedansen over puten er av samme størrelsesorden som impedansen gjennom slammet. Den relative permittivitet for polymerer av polyaryleneter av ketontype er av størrelsesorden 3, som sammenlignet med andre vanlige materialer er en liten verdi. Materialforandring er således ingen løsning.

For å vinne en bedre forståelse av virkningen av denne dielektriske atferd, har måleputen i kontakt med formasjonen blitt modellert. Den anvendte modell er vist i fig. 2. Den består av slam med en tykkelse på 5 mm påført en berggrunn som er 1 m tykk og 2 m lang. Måleputen er plassert på det sentrale parti av selve modellen, som da er modellert i form av et rektangulært legeme som er 300 mm langt og 12,5 mm tykt, samt med strøminjektorer som er 40 mm lange og 5 mm tykke og et par måleelektroder som hver har en lengde på 5 mm og en tykkelse på 2,5 mm. Måleputen er koplet til resten av verktøyet over en metallarm. Denne modell ignorerer spesielt den bunn av elektriske ledninger som forbinder måleputen med elektronikkenheten for behandling av signalene.

Måleputen kan også være forsynt med en ledende bakplate utført i metall, og med et potensial som er "flytende" eller identisk med berggrunnens potensial (jordet).

For strømmer ved en frekvens på 10 kHz er konduktivitetene for vedkommende materialer som følger:

| | Konduktivitet ($\sigma + j\,\omega\varepsilon$ $Sm^{-1}$) | | $\varepsilon_r$ |
|---|---|---|---|
| | Reell | Imaginær | |
| Slam | $1 \times 10^{-6}$ | $2{,}8 \times 10^{-6}$ | 5 |
| Pute (PEEK) | 0 | $1{,}8 \times 10^{-6}$ | 3,2 |
| Berg (størrelses-orden) | 10 – 0,0001 | $\approx 2 \times 10^{-6}$ | ≈ 3 - 15 |
| Metalldeler | $1 \times 10^{6}$ | 0 | - - |

Det betraktede oljebaserte slam er en emulsjon av vann-i-olje og i et forhold på 10:90, idet oljen er en syntetisk olje av n-olefintype.

De verdier som kan beregnes ut i fra denne modell for potensialforskjellen mellom de måleelektroder som en funksjon av berggrunnens resistivitet Rt er opptegnet i fig. 3 under den antakelse at puten forløper eksakt parallelt med berggrunnen, og at det foreligger en uniform "forskyvnings"-avstand på 5 mm fra denne (fig. 3A), samt under antakelse at måleputen er svakt skråstilt, idet forskyvningsavstanden mellom ruten og berggrunnen varier over et område fra 2 mm til 5 mm (fig. 3B).

I fravær av en bakplate (verdier angitt ved trekanter) er signalet praktisk talt konstant så lenge formasjonens resistivitet er mindre enn omkring 100 Ωm, slik at verktøyet vil være ubrukelig hvis vekselstrømmens frekvens på injektorene er 10 kHz.

Med en bakplate på et potensial som er etterlatt flytende (verdier angitt ved kvadrater), synes potensialforskjellen mellom måleelektrodene å være direkte proporsjonal med berggrunnens motstand når måleputen er innstilt parallelt med berggrunnen. Når måleputen er skråstilt i forhold til berggrunnen, så vil imidlertid i tilfelle med en pute uten bakplate, signalet være praktisk talt konstant for formasjoner med en resistivitet mindre enn 100 Ωm. Med en bakplate koplet til jord (hvilket vil si en bakplate hvis potensial er lik berggrunnens potensial) som tilsvarer punkter angitt ved sirkler, vil signalet faktisk være karakteristisk for formasjonens resistivitet, selv om måleputen er lett skråstilt, hvilket ofte kan være tilfelle i et borehull.

Forskjellige midler kan således brukes for å jorde bakplaten. Som et eksempel kan det angis at den enkleste måte er å kople platen til loggeverktøyet som selv er forbundet med jord over den kabellengde som den er opphengt i, hvor imidlertid denne kabel kan være ført gjennom flere tusen meter formasjon.

En annen løsning er å anta formasjonens potensial ved middelverdi-bestemmelse, idet det anvendes en elektrisk krets som bestemmer middelverdien av de potensialverdier som måles av alle par av måleelektroder.

Det er også mulig å måle dette potensial direkte, f.eks. ved hjelp av ytterligere elektroder, nemlig elektroder som fortrinnsvis er ganske store og som omgir det elektrodesett som består av par av måleelektroder, hvorpå bakplaten bibeholdes på dette potensial ved hjelp av en tilordnet elektronisk krets.

I en særlig foretrukket utførelsesvariant av oppfinnelsen, og som er skjematisk vist i fig. 4, har den ledende bakplate utstikkere som isolerer måleelektrodesonen fra de endesoner som inneholder injektorene. Ved en slik utførelse kan minsteavstanden mellom de to injektorer reduseres med

omkring 20%, samtidig som det bibeholdes et signal som er proporsjonalt med den geologiske formasjonsresistivitet.

# PATENTKRAV

1. Apparat for et verktøy innrettet for undersøkelse av veggen i et borehull gjennom en geologisk formasjon, idet apparatet omfatter:

a) en ikke-ledende målepute med en innerflate, samt en ytterflate for å trykkes mot borehullsveggen,

b) et sett av måleelektroder montert på måleputens utside samt midler for å måle potensialforskjellen mellom to måleelektroder, og

c) både en kildeelektrode anordnet for injeksjon av strøm inn i den geologiske formasjon og en returelektrode, idet sett av måleelektroder er anordnet mellom kildeelektroden og returelektroden for den injiserte strøm,

idet apparatet er

k a r a k t e r i s e r t v e d at måleputen omfatter et elektrisk ledende parti som dekker hele måleelektrodesonen, og som er elektrisk isolert fra måleelektrodene, idet dette parti av måleputen anbringes på samme elektriske potensial som den geologiske formasjon (blir jordet).

2. Apparat som angitt i krav 1,

k a r a k t e r i s e r t v e d at strømkildeelektroden og returstrømelektroden er plassert på måleputen.

3. Apparat som angitt i krav 2,

k a r a k t e r i s e r t v e d at det angitte elektrisk ledende parti strekker seg over hele måleputens lengde mellom strømkildeelektroden og returstrømelektroden.

4. Apparat som angitt i krav 2,

k a r a k t e r i s e r t v e d at det angitte ledende parti også dekker putens sidekanter.

5. Apparat som angitt i krav 2 eller krav 3,

k a r a k t e r i s e r t v e d at måleputen er oppdelt i partier, slik at puten omfatter et første endeparti som bærer kildeelektroden, et midtparti for måleelektrodene, samt et andre endeparti for returelektroden, idet disse

partier i det minste er delvis atskilt fra hverandre ved hjelp av elektrisk ledende skillevegger.

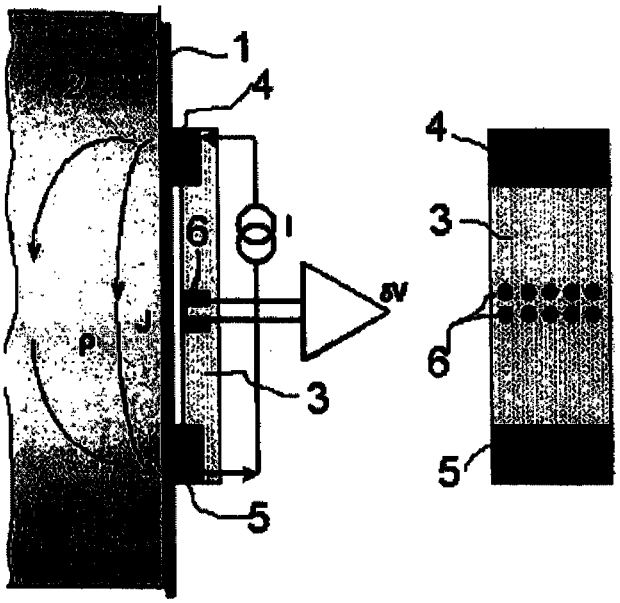
6. Apparat som angitt i et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d at det angitte ledende parti utgjøres av putens metallbærer.

7. Apparat som angitt i et av de foregående krav, hvor måleputen videre omfatter en elektronisk krets for behandling av signaler som kommer fra måleelektrodene, idet apparatet er karakterisert ved at det ledende parti utgjør en integrert del av skjermingen av den elektroniske krets.

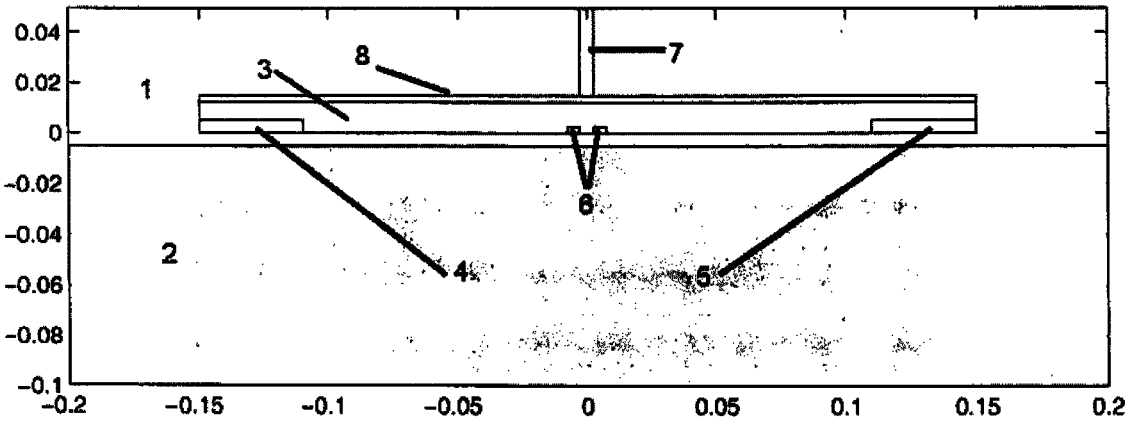
8. Apparat som angitt i et av kravene 1 til 7, k a r a k t e r i s e r t v e d at jordingen er utført ved elektrisk kopling av måleputens ledende parti til undersøkelsesverktøyets verktøylegeme.

9. Apparat som angitt i et av kravene 1 til 7, k a r a k t e r i s e r t v e d at jordingen er oppnådd ved å bibeholde det ledende parti av måleputen på et potensial som er lik middelverdien av de potensialer som måles av måleelektrodene.

10. Apparat som angitt i et av kravene 1 til 7, k a r a k t e r i s e r t v e d at jordingen er utført ved å bibeholde det ledende parti av måleputen på et potensial som er lik det målte potensial i den geologiske formasjon mellom kildeelektroden og returelektroden.

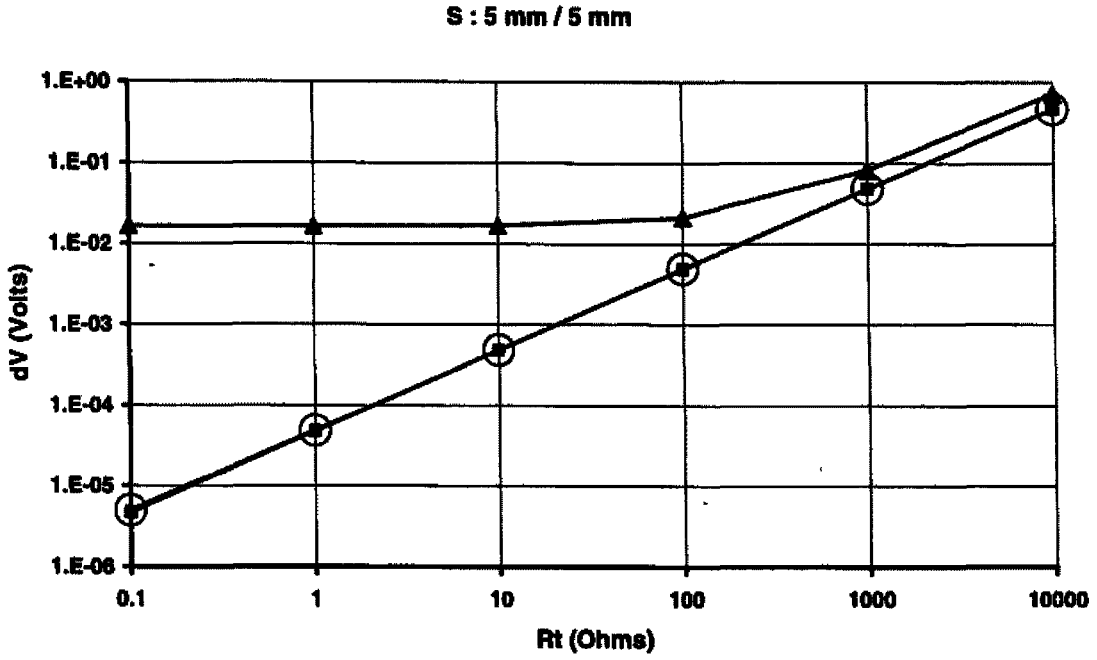



Figur 1

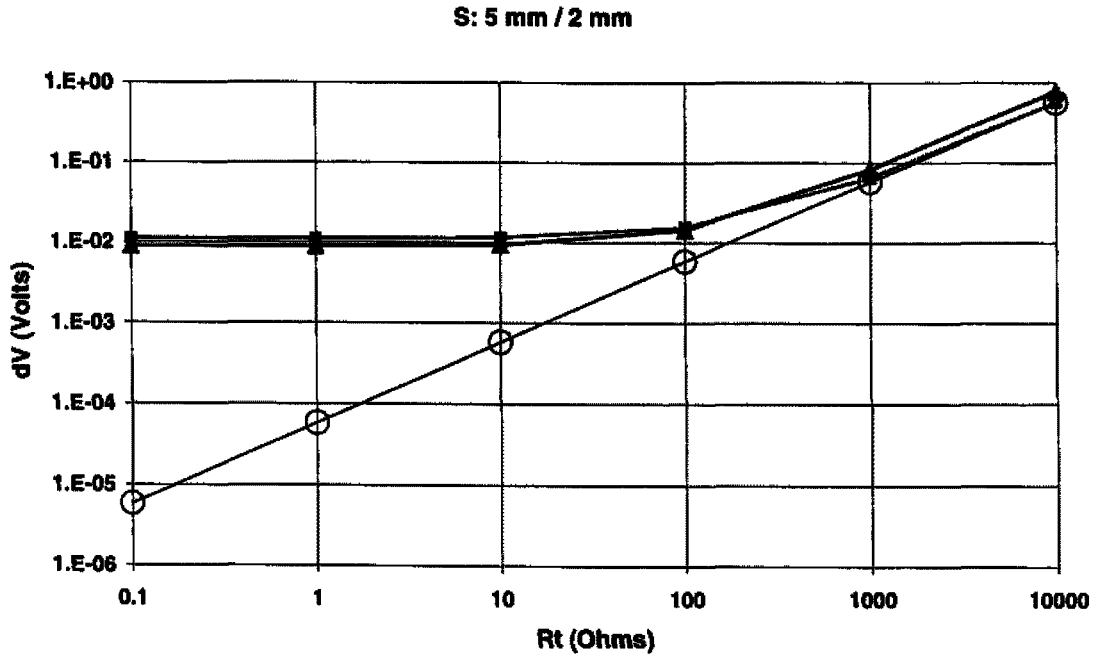



Figur 2

Figur 3A




Figur 3B



Figur 4

