



NORGE



NO9900012

(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **304040**

(13) B1

(51) Int Cl<sup>6</sup> E 21 B 49/00, G 01 V 5/10

**Patentstyret**

(21) Søknadsnr	19911714	(86) Int. inng. dag og søknadsnummer	
(22) Inng. dag	30.04.1991	(85) Videreføringsdag	01.05.1990, US. 517268
(24) Løpedag	30.04.1991	(30) Prioritet	
(41) Alm. tilgj.	04.11.1991		
(45) Meddelt dato	12.10.1998		

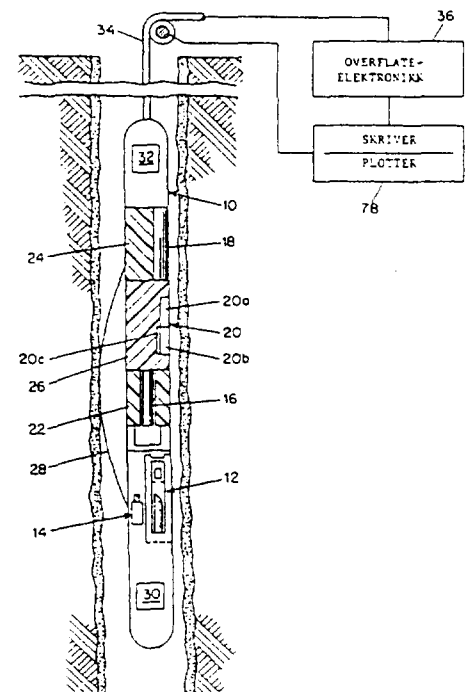
(73) Patenthaver	Schlumberger Technology BV, Koninginnegracht 15, NL-2514 AB Haag, NL
(72) Oppfinner	Russel C. Hertzog, Missouri City, TX, US William A. Loomis, Ridgefield, CT, US Peter Wraight, Missouri City, TX, US Arthur D. Liberman, Ridgefield, CT, US Paul Albats, Ridgefield, CT, US
(74) Fullmektig	Arild Friberg, Bryn & Aarflot AS, 0104 Oslo

(54) **Benevnelse** **Fremgangsmåte og apparat for porøsitetets-brønnlogging ved bruk av epitermiske nøytroner**

(56) **Anførte publikasjoner** EP 421844, WO 87/07733

(57) **Sammendrag**

Porøsitetene til undergrunnsformasjoner som omgir et borehull, blir undersøkt ved å bruke en loggesonde som kjøres i borehullet ved gjentatt bestråling av formasjonene med diskrete utbrudd med høyenergi-nøytroner, måling av mengdene med epitermiske nøytroner ved nær- og fjern-steder fra nøytronkilden, og også måling av desintegrasjonshastigheten til den epitermiske nøytronmengde ved et tredje sted etter hver nøytronpuls og utledning fra denne av en måling av bremsetiden for epitermiske nøytroner. Verdier av formasjonsporøsiteten utledet fra nær- og fjernmengdemålingene blir korrigert for virkninger av sondens avstand fra borehullsveggen under bruk, i samsvar med en forut bestemt empirisk relasjon, ved målingen av bremsetiden til epitermiske nøytroner. Alternativt kan formasjonsporøsitetene utledes både fra nær- og fjern-målingene og fra målingen av bremsetiden til epitermiske nøytroner, og de to forskjellige utledede porøsitetsverdier kan brukes uavhengig for å tilveiebringe forbedret informasjon om formasjonsporøsiteten, eller de kan sammenlignes for å utlede en veggavstand-korrigert porøsitetsverdi.



Foreliggende oppfinnelse vedrører generelt brønnlogging ved hjelp av epitermiske nøytroner og mer spesielt en fremgangsmåte og et apparat for å bestemme porøsiteten til undergrunnsformasjoner basert på målinger av både bremselengdene og bremsetidene til epitermiske nøytroner med minimale virkninger på borehullsmiljøet.

Kjennskap til porøsiteten av grunnformasjoner som omgir et borehull, er viktig i petroleumsindustrien for å bidra til å identifisere olje- og gass-førende soner. Porøsitetslogging ved hjelp av epitermiske nøytroner gjør bruk av det faktum at hydrogen sterkt påvirker nøytronmoderasjon og at porerommene til grunnformasjoner vanligvis er fylt med hydrogenrike fluider, nemlig hydrokarboner eller vann. I en form for porøsitetslogging ved hjelp av epitermiske nøytroner blir borehullet og formasjonen bestrålt med nøytroner fra en kjemisk kilde eller en akseleratorkilde, og mengdene av epitermiske nøytroner blir detektert ved en eller flere posisjoner i en viss avstand eller i visse avstander fra nøytronkilden. De detekterte tellinger kan korreleres med porøsitet enten individuelt eller som tellingsforhold. I denne typen nøytronlogging er de detekterte tellehastigheter og tellehastighetsforhold funksjoner av nedbremsnings-lengdene til epitermiske nøytroner i de bestrålte formasjoner. I en annen form for logging med epitermiske nøytroner blir borehullet og formasjonen bestrålt med diskrete, korte utbrudd av nøytroner fra en akseleratorkilde, og desintegrasjonstiden (bremsetiden) til epitermiske nøytroner blir bestemt ved å måle hendøingen eller desintegrasjonen til epitermiske nøytroner som en funksjon av tiden (som tellinger i flere kanaler). Igjen er der en korrelasjon mellom bremsetiden for epitermiske nøytroner og formasjonsporøsiteten.

Med begge typer logging blir tellehastighetsdataene påvirket på forskjellige, men ulike måter av tilstandene til borehullsomgivelsene, borehulls-størrelsen, sondens avstand fra borehulls-veggen, formasjons-fluider, slamkakeetykkelse og sammensetning, og formasjons-litologi. Som mellom bremselengde-målinger og bremsetids-målinger blir bremselengde-utledede porøsitetsmålinger mindre påvirket av borehullsomgivelsene og sondens veggavstand enn nedbremsningstid-utledede målinger. Bremselengdemålinger blir på den annen side sterkere påvirket av formasjonslitologien enn bremsetidsutledede porøsitetsmålinger. Den teknikk som vanligvis brukes til å måle bremselengden anvender også en tellehastighetsdetektor

langt fra kilden og en nær kilden, mens en teknikk for måling av bremsetid benytter en forholdsvis kort avstand mellom detektoren (eller detektorene) og kilden for å oppnå statistisk meningsfylte tellehastigheter i hvert tidsintervall. Porøsitetsmålinger ved hjelp av bremselengde gir en større undersøkelsesdybde i formasjonen enn porøsitetsmålinger på grunnlag av bremsetid. Mer generelt er det tilstrekkelig å si at begge typer målinger av epitermiske nøytroner gir kvalitativt forskjellig kunnskap om formasjonsporøsiteter og blir påvirket forskjellig av formasjonslitologi og borehullsstørrelse samt omgivelsene.

Fremgangsmåter og apparater for porøsitetsmåling ved hjelp av epitermiske nøytroner er beskrevet og vist i mange tidligere publikasjoner og patenter.

Ved den teknikk som er vist i US patent nr. 4 023 323 blir epitermiske nøytroner detektert ved hjelp av detektorer nær kilden og fjernt fra kilden (bremselengdemålinger). Forholdene mellom nær- og fjern-tellingene blir korrelert med empirisk forutbestemte responser som tar i betraktning variasjoner i borehullsstørrelse eller sondens avstand fra borehullsveggen, for således å gi porøsitetsverdier kompensert for virkningene av borehullsstørrelse eller veggavstand.

US patent nr. 4 760 252 beskriver sonder for porøsitetsmåling ved hjelp av nøytroner med en pulset nøytronkilde, nær- og fjern-detektorer for epitermiske nøytroner som er spesielt skjermet og anbrakt på sonden for å optimalisere respons på formasjonsporøsitet og minimalisere nær/fjern-forholdsresponsen på virkninger av borehullsomgivelsene, og en nøytronkilde-monitor som muliggjør normalisering av telldata og måling av innfangnings-gammastråling. Verdier av formasjonsporøsiteten blir utledet ved å ta forholdet mellom nær- og fjern-tellinger av epitermiske nøytroner eller ved å kryssplotte de normaliserte nær- og fjern-tellinger direkte.

Fra internasjonal publikasjon WO87/07733 er kjent en brønnloggesonde med nøytronkilde av akseleratorstype. Borehull og omgivende grunnformasjon bestråles gjentatt med diskrete pulser av høyenergi-nøytroner fra en nøytronkilde, og disse nøytronene vekselvirker med kjerner i materialene i borehull og formasjon, og det frembringes derved mengder med epitermiske nøytroner. De epitermiske nøytronene detekteres så på forskjellige steder i borehullet, i forskjellige langsgående avstander fra nøytronkilden. Publikasjonen viser videre generering av

tellesignaler som indikerer størrelsene av de detekterte epitermiske nøytronmengdene, og desintegrasjon av de epitermiske nøytronmengdene detekteres etter nøytronpulsene ved minst ett sted i borehullet, og signaler som er representative for desintegrasjonen, genereres. Endelig utledes det et signal som indikerer bremsetiden for epitermiske nøytroner i formasjonen.

Undersøkelser av formasjonsporøsitet ved måling av bremsetidene til epitermiske nøytroner, er beskrevet i en artikkel av Mills m.fl. med tittel "Pulsed Neutron Porosity Logging", SPWLA Twenty-fift Annual Logging Symposium, 5.- 8. juni 1988, og i US patent nr. 4 097 737, 4 266 126, 4 283 624 og 4 625 110. Disse publikasjonene og patentene viser den kjente følsomheten til epitermiske nøytroners bremsetid overfor formasjonsporøsitet og den relative ufølsomhet for formasjonslitologi. De tar imidlertid ikke tilstrekkelig hensyn til eller kompensere for den betydelige virkning av sondeavstand til borehullsveggen på målinger av epitermiske nøytroners bremsetid.

Ett formål med foreliggende oppfinnelse er å undersøke formasjonsporøsitet ved hjelp av logging med epitermiske nøytroner på en måte som gir et større område av nøytron-spredningsdata enn hva som oppnås ved separate bremsetidsmålinger eller bremselengdemålinger. Et annet formål er å detektere epitermiske nøytronmengder på en måte som muliggjør utledning av formasjons-porøsiteter som er iboende korrigert for virkningene av sondens veggavstand. Nok et annet formål med oppfinnelsen er å tilveiebringe porøsitetmålinger basert på bremselengder for epitermiske nøytroner som er blitt korrigert for virkninger av sondens veggavstand. Ett ytterligere formål er å tilveiebringe samtidige målinger av bremselengden og bremsetiden epitermiske nøytroner, som så kan behandles separat eller i kombinasjon for å gi forbedret og mer pålitelig informasjon om formasjonsporøsitet.

Disse og andre formål blir ifølge oppfinnelsen oppnådd ved en fremgangsmåte av den type som defineres nøyaktig i det vedføyde patentkrav 1, og et apparat av den type som defineres nøyaktig i det vedføyde patentkrav 8. Fordelaktige utførelsesformer av oppfinnelsen fremgår av de uselvstendige patentkravene tilknyttet krav 1 og krav 8.

En nøytron-loggesonde føres gjennom borehullet mens borehullet og grunnformasjonene gjentatt bestråles med diskrete utbrudd eller pulser med

høyenergi-nøytroner fra en nøytronkilde, hvilke nøytroner vekselvirker med kjerner i materialene i borehullet og formasjonene for å frembringe mengder av epitermiske nøytroner. Mengdene av epitermiske nøytroner blir detektert ved nær- og fjerntliggende steder i borehullet i langsgående avstand fra nøytronkilden med forskjellige avstander, og tellesignaler som indikerer slike epitermiske nøytronmengder ved de respektive nærliggende og fjerntliggende steder blir generert. Tidsfordelingen av epitermiske nøytroner som følger hvert nøytronutbrudd eller hver nøytronpuls blir også detektert, enten ved ett av stedene eller fortrinnsvis ved et tredje sted i avstand fra nøytronkilden, og signaler som indikerer bremsetiden til mengden med epitermiske nøytroner blir generert. Nær- og fjernmålingene av den epitermiske nøytronmengde og målingene av den epitermiske nøytronbremsetid kan behandles separat for å utlede uavhengige verdier av formasjonsporøsiteten, eller de kan kombineres i samsvar med forut bestemte, empiriske forhold, for å tilveiebringe porøsitetsverdier som er kompensert for avstanden mellom sonden og borehullsveggen. Sistnevnte trinn kan for eksempel utføres ved kryssplotting av forholdet mellom nær- og fjernmålingene av mengdene med epitermiske nøytroner som funksjon av den epitermiske bremsetid, eller alternativt kan de uavhengig utledede verdier av formasjons-porøsiteten kryssplottes for å oppnå en korreksjonsfaktor som kan anvendes på den bremselengde-utledede (nær/fjernforhold) porøsitetsverdi for å kompensere for veggavstand.

De samtidige målinger av både antallet og tidsutviklingen av epitermiske nøytroner gir porøsitetsmålinger som er bedre enn hva noen av målingene alene gir. Den porøsiteten som er utledet på grunnlag av nær/fjern-forholdet, er for eksempel forholdsvis følsom for formasjonslitologi og forholdsvis mindre følsom, men ikke helt ufølsom, for avstanden mellom sonden og borehullsveggen. Porøsitet utledet på grunnlag av bremsetid er derimot meget følsom for veggavstands-virkninger og forholdsvis ufølsom for formasjonslitologi. Ved å kombinere nær/fjern-forholdsmålingen og bremsetidsmålingen (eller de uavhengige porøsitetsverdier utledet fra disse) resulterer foreliggende oppfinnelse i forholdsutledede porøsitetsverdier som er korrigert for veggavstand. De to målingene har også forskjellige undersøkelsesdybder, og ved å foreta begge forbedres målingen av de totale vertikale og radielle porøsitetsvariasjoner.

For bedre å forstå oppfinnelse vises til den følgende beskrivelse av eksempler på utførelsesformer i forbindelse med de vedføyde tegninger, hvor:

Fig. 1 er et generelt og skjematisk sideriss av en brønnloggesonde som omfatter oppfinnelsen, idet sonden er vist i et borehull;

Fig. 2 er et skjema over styre- og signal-behandlingskretsene i loggesonden;

Fig. 3 er et diagram over nær/fjern-tellinger av epitermiske nøytroner som funksjon av formasjonsporøsitet;

Fig. 4 er et diagram over den inverse bremsetidskonstant for epitermiske nøytroner som funksjon av formasjons-porøsitet;

Fig. 5 er et diagram over sondens empirisk forutbestemte responser på forskjellige formasjonsporøsiteter og veggavstander oppløst som en "fiskeben-plotting" av nær/fjern-telleforhold som funksjon av det inverse av bremsetidskonstanten for forskjellige veggavstander og formasjonsporøsiteter;

Fig. 6 og 6B er utdrag av nøytron-porøsitetslogger kjørt ved bruk av en sonde som på figur 1; og

Fig. 7 er et diagram over forskjellene mellom porøsiteter bestemt empirisk fra nær/fjern-telleforholdet og bremsetidskonstanten ved kjente porøsiteter og veggavstander som funksjon av den korreksjon som er nødvendig i forholdsporøsiteten for å korrigere for sondens veggavstand.

Porøsitetslogging ved hjelp av epitermiske nøytroner ifølge foreliggende oppfinnelse, kan utføres ved å bruke en loggesonde som i de fleste henseender er maken til de som er beskrevet og vist i US patent nr. 4 760 252, som herved inntas som referanse, eller enhver annen lignende sonde. Som vist på figur 1 omfatter en utførelsesform av sonden (eller apparatet) en nøytron-akseleratorkilde 12, slik som en D-T-type (14 MeV) kilde med en utgang i størrelsesorden  $5 \times 10^8$  n/sekund eller større, en nøytronkilde-monitor 14, en epitermisk nær-nøytrondetektor 16, en epitermisk fjern-nøytrondetektor 18 og en gruppe 20 med 2 (eller flere) epitermiske nøytrondetektorer 20a og 20b. Om ønsket kan en eller flere termiske nøytrondetektorer 20c også være innbefattet i detektorgruppen 20. Man vil forstå at selv om det foretrekkes, er ikke alle detektorene eller nøytronmonitoren nødvendig. Det er bare nødvendig at minst to detektorer for epitermiske nøytroner i forskjellig avstand fra kilden er tilveiebrakt for å generere nær/fjern-telleforholdet, idet en eller begge av

disse detektorene også kan brukes til å generere bremsetidmålingen. Som beskrevet nedenfor er imidlertid kombinasjonen av en måling av nær/fjern-tellehastighetsforholdet fra detektorene 16 og 18 og en bremsetidmåling fra en (eller flere) av de epitermiske gruppedektorene 20a, 20b, spesielt fordelaktig når det gjelder å optimalisere tellehastighets-statistikker og følsomheten for formasjons-porøsiteten.

Nærdetektoren 16 er sentralisert inne i sonden og omgitt av en ringformet nøytronskjerm 22, mens fjerndetektoren 18 og gruppen 20 er eksentriske i sonden og er skjermet på baksiden ved hjelp av nøytronskjermer 24 og 26, respektive. Posisjoneringen og skjermingen av fjerndetektoren 18 og gruppen 20 er slik at det tilveiebringes høye følsomheter for nøytroner spredt fra formasjonen ved så meget som mulig å utelukke nøytroner som er spredt fra borehullet. Nærdetektoren 16 er derimot anbrakt nær nøytron-kilden 12, er sentralisert inne i sonden og er skjermet for å gjøre den ufølsom for formasjonsnøytroner og følsom for borehullsnøytroner. (De strukturelle og funksjonsmessige karakteristikkene til detektorene og skjermene er beskrevet mer detaljert i ovennevnte US patent nr. 4 760 252. For det foreliggende formål er det tilstrekkelig å bemerke at de epitermiske detektorene 16, 18 og 20 er av He-3-proporsjonalteller-typen som er skjermet mot termiske nøytroner, og lavenergi-deteksjonsterskelen til nærdetektoren 16 blir ved hjelp av den ytre skjermen 22 hevet til minst omkring 10 eV.) Følgelig blir forholdet mellom de epitermiske nøytrontellingene ved nærdetektoren og fjerndetektoren iboende mer følsom for fjern-tellingene og dermed porøsiteten, mens følsomheten til nærdetektoren for borehullsnøytroner gir informasjon som er nyttig når det gjelder å kompensere nær/fjern-telleforholdene for miljøvirkninger og veggavstand. Som vist på figur 1 blir sonden 10 kjørt eksentrisk i borehullet, idet den blir holdt i kontakt med borehullsveggen ved hjelp av en buesfær 28 eller en annen passende innretning.

Sonden 10 har en kraftforsyning 30 og en elektronikkmodul 32 nede i hullet, og blir kjørt i borehullet opphengt i en kabel 14 som omfatter ledere for å gi elektrisk energi til sondeforsyningen 30 og for å overføre data fra elektronikkmodulen 32 til overflate-elektronikken 36. Selv om rekkefølgen av kilden 12, nærdetektoren 16, detektorgruppen 20 og fjerndetektoren 18 er vist på figur 1 som fra bunnen til toppen av sonden 10, kan rekkefølgen snus om ønsket.

Det vises til figur 2 hvor hver nøytronpuls blir innledet ved hjelp av et signal fra en sondeprogrammerer 38 til en ionekilde-pulser 40. Pulstidsskjemaet kan velges etter ønske, men er fortrinnsvis en puls med størrelsesorden 20 mikrosekunder med 100 mikrosekunders mellomrom. Utgangssignalene fra nøytronkildemonitoren 14, hvis en slik brukes, blir tilført en forforsterker 42, en forsterker 44 og en tids-digitaliseringsanordning 46 for frembringelse av et nøytronpuls-histogram (nøytronkildeutgang som funksjon av tidskurve) for eventuell bruk ved normalisering av detektortellinger, utledning av inngangningsdata om termiske nøytroner og ved definering av et tidsavlesningsvindu for behandling av data vedrørende den epitermiske desintegrasjonskurven. Ytterligere informasjon vedrørende kildenmonitoren 14 og dens bruk fremgår av de foran nevnte US patent nr. 4 760 252. Tidsdigitaliseringsanordningen 46 blir klargjort med en START-puls fra programmerings-anordningen 38, som er synkronisert med ionekilde-pulsen og inntreffer litt før nøytronpulsene. KLOKKE-pulser fra programmeringsanordningen bestemmer breddene til tidskanalene, og inngangspulsene fra forsterkeren 44 stopper KLOKKE-pulstetterne i digitaliseringsanordningen 46 for å digitalisere tidsintervallene fra START-pulsen til inngangspulsene. Ved slutten av det ønskede datamål-intervall blir digitaliseringsanordningen 46 tilbakestillt til null og data om tellinger pr. kanal blir lest ut ved hjelp av en tilbakestillingspuls fra programmeringsanordningen 38 til en multiflekser 48 og tilført (sammen med detektorsignalet) til et digitalt lese-skrivelager 50.

Signalene fra hver av bremsetid-detektorene 20a og 20b for epitermiske nøytroner blir forsterket (forforsterkere og forsterkere 52, 54, 56 og 58, tilført som reaksjon på KLOKKE-signaler til tidsdigitaliseringsanordningene 60 og 62, og lagret i lageret 50 ved hjelp av kanaler. Signalene fra nær- og fjern-detektorene 16 og 18 for epitermiske nøytroner, blir etter behandling i forforsterkerne 64 og 66 og forsterkerne 68 og 70, tilført telleverk 68 og 70 hvor de blir akkumulert for et forut bestemt tidsintervall, for eksempel i størrelsesorden flere sekunder. Tilbakestillings-signaler tilfører de totale tellinger for nær- og fjern-detektorene til lageret 50. Multipleksingen og lagringen av telldata blir styrt ved hjelp av en lagerprogrammerer 76, som også styrer den periodiske, destruktive utlesning av dataene fra lageret 50 ved hjelp av telemetri til overflate-elektronikken 36 over sondekabelen 34.



Det er i og for seg kjent, (se også foran nevnte patent) at forholdet mellom den epitermiske nøytronmengde som telles av nærdektoren 16 og den epitermiske nøytronmengde som telles av fjerndektoren 18, korrelerer med formasjons-porøsiteten. Korrelasjonen varierer med formasjonslitologien og borehullsstørrelsen. Den er også følsom for sondens avstand fra borehullsveggen som et resultat av at den enten ligger mot en slamkake eller på grunn av lokale uregelmessigheter i borehullsveggen, eller begge deler. Som beskrevet i US patent nr. 4 760 252 blir forskjellige litologier og borehullsdimensjoner tatt i betraktning ved å bruke forskjellige, empirisk forut bestemte korrelasjonsdata og kjent eller sannsynlig litologi og borehullsstørrelse i formasjonen som undersøkes, for å beregne og plote formasjons-porøsitet på brønnlogge-plotter/skriveren 74 (figur 1). En typisk korrelasjon er som vist på figur 3.

Konstruksjonen av sonden, skjerming og plassering av detektorene 16 og 18, er slik at veggavstanden blir kompensert for i en viss utstrekning i selv nær/fjern-telleforholdet. Likevel påvirker sondens respons på veggavstand de målte telldata, og sondens veggavstand-virkning blir ikke alltid tatt fullstendig i betraktning i tilgjengelige korrelasjonsprosedyrer hvor beregningene av formasjonsporøsiteter fra nær/fjern-telleforhold blir foretatt.

Telldata for de epitermiske nøytroner fra en av eller begge detektorene 20a og 20b, som kan brukes separat eller kombinert, vil vise en desintegrasjonskurve som avspeiler både formasjonens bremsetid ( $\beta$ ) for epitermiske nøytroner og bremsetidsvirkningen til veggavstanden. Nøytrontelldata kan behandles på forskjellige måter som er velkjente, for å oppnå en enkelt tidsbarometer som reagerer på både formasjonsporøsitet og størrelsen på veggavstanden. Telldataene kan for eksempel behandles for å tilpasse desintegrasjonskurven til en enkeltkomponent tidsdesintegrasjonsfunksjon slik som en enkel eksponensiell funksjon, eller fortrinnsvis en enkelt komponent diffusjonsfunksjon som beskrevet i US-patent-søknad nr. 07/455807, inngitt 20. desember 1988. Den enkle epitermiske bremsetidsverdi som oppnås ved hjelp av en av disse metodene, kan omdannes ved bruk av forut bestemte korrelasjonskurver, slik som den på figur 4, for å gi en måling av formasjonsporøsiteten. Figur 4 viser en representativ kryssplotting av den inverse bremsetidskonstanten  $\beta$  bestemt i laboratoriet, en testgrop eller testbrønn-

målinger som funksjon av porøsitet ved en veggavstand lik null. Figur 4 resulterte i en korrelasjon av bremsetidskonstanten beregnet fra de målte desintegrasjons-hastigheter som viste seg å være stort sett uavhengig av formasjons-litologien. Med data av høy statistisk nøyaktighet kan desintegrasjonskurven alternativt tilpasses slik at både formasjonens bremsetid og en parameter som indikerer veggavstand, trekkes ut. En slik teknikk er beskrevet detaljert i søkerens US patentsøknad nr. 07/324776 inngitt 16. mars 1989. Det er således flere måter å oppnå parameteret, slik som  $\beta$ , som indikerer porøsitet, veggavstand eller begge fra desintegrasjonskurver for epitermiske nøytroner.

Det er således et formål med foreliggende oppfinnelse at en verdi av  $\beta$  som reagerer på (eller påvirkes av) både formasjonen og veggavstanden kna brukes for å tilveiebringe veggavstand-kompensasjon av porøsitetsmålinger basert på nær/fjern-forholdet.

I samsvar med oppfinnelsen blir formasjonsporøsiteter som er hovedsakelig fri for virkningene av sonde-veggavstand bestemt fra samtidige målinger av totale epitermiske nøytronmengder ved to adskilte steder, og av desintegrasjonshastigheten til epitermiske nøytronmengder ved minst ett sted. Forholdet mellom de totale tellinger (eller en kryssplotting av slike tellinger) ved nær- og fjern-stedene er en funksjon av bremselengden til spredte, epitermiske nøytroner, og målingen av desintegrasjons-hastigheten til de spredte, epitermiske nøytroner som følger hver nøytronpuls, indikerer bremsetiden. Som nevnt ovenfor undersøker de to måleformene noe forskjellige aspekter ved omgivelsene, både borehulls- og formasjons-omgivelsene, som bestråles av nøytronpulsene. Ved å måle dem begge samtidig og bruke begge til å bestemme formasjonsporøsiteten, blir kraftigere data tilgjengelig, og mer nøyaktige korrelasjoner av målingene med virkelige formasjonsporøsiteter blir oppnådd.

Som i de fleste kjente teknikker for porøsitetslogging, medfører foreliggende oppfinnelse korrelasjon av data oppnådd fra loggekjøringen med empirisk forut bestemte sonderesponser på kjente forhold i testgroper og testbrønner. I en korrelasjonsform som er skissert på figur 5, blir telldata bestemt med sonden ved kjente veggavstander, porøsiteter og litologi, og de målte nær/fjern-telleforhold som utledet fra detektorene 16 og 18, blir kryssplottet som funksjon av den inverse

bremsetid beregnet ved tilpasning av telldataene fra bremsetidsdetektoren 20a til en enkel eksponensiell funksjon eller en annen egnet tilpasningsfunksjon. (Målingene fra bare en detektor i gruppen 20 ble brukt i dataene på figur 5, men man vil forstå at målinger fra to eller flere detektorer kan brukes separat eller velges i kombinasjoner.) Når tellehastighets-statistikkene er tilstrekkelige, kan også de tidsavhengige telldata som brukes til utledning av  $\beta$ , utvikles fra den epitermiske fjerndektoren 18 om ønsket. Bruken av nærdektoren 16 og fjerndektoren 18 for å generere nær/fjern-telleforholdsmålinger og en mellomliggende detektor eller detektorer 20a, 20b for å generere måling av bremsetiden, blir imidlertid foretrukket ettersom det optimaliserer følsomheten til både nær/fjern-forholdet og målingene av bremsetiden av formasjonsporøsiteten stemmer overens med akseptable tellehastighetsstatistikker. Kryssplottingen på figur 5 vil gjenkjennes som et "fiskeben"-diagram (spin and ribs chart), idet ryggraden er linjen "S" med målinger ved veggavstand null og ribbena er porøsitetlinjer for 0, 15,4 og 30 p.u. De data som er kryssplottet på figur 5, ble oppnådd ved logging av en testbrønn med kjent formasjonsporøsitet og litologi. En loggekjøring ble foretatt ved veggavstand 0 og en annen kjøring med påtvunget veggavstand lik 12,7 mm. Testbrønnen var hovedsakelig fri for slamkaker.

Fiskeben-plottingen gjør det mulig å foreta korreksjoner for ukjente sondeavstander for nær/fjern-forhold og bremsetider målt i et borehull med samme dimensjon i formasjoner med lignende litologi. For alle gitte målte data er der et datapunkt på kryssplottingen, for eksempel måldata-punktet X. Korreksjonen blir foretatt ved overføring av datapunktet i ribbens-retningen over til 0-veggavstands-linjen (ryggraden) ved interpolering langs ryggraden mellom ribben for å gi porøsitetsverdien ved det punkt som er markert Y på figur 5.

Som fagfolk på området vil forstå, blir en samling kryssplottinger for bruk i borehull med forskjellige størrelser og med forskjellige litologier, bestemt empirisk og lagret som program i datamaskinen på overflaten for å muliggjøre plotting av de korrigerede porøsitetsverdier som en funksjon av dybden når sonden beveges gjennom borehullet. Telldata blir også rutinemessig registrert for ytterligere behandling om ønsket. En skriver/plotter 74 som passende kan være koplet til en kabelfulle-mekanisme, er tilveiebrakt for disse formål på konvensjonell måte.

Logger over to kjøringar av sonden i testbrønnen er vist på figur 6a, idet den heltrukne kurven representerer den observerte porøsitet ved veggavstand null, og den brutte linje representerer den observerte porøsitet ved en fast veggavstand på 12,7 mm. Begge loggene plottar formasjonsporøsitete i porøsitetsenheter (p.u.) bestemt fra forut bestemte, empiriske korrelasjonar av nær/fjern-telleforholdene for epitermiske nøytroner og porøsiteten, som vist for eksempel på figur 3. Virkningen av veggavstand på den forholdsbaserte porøsitetsloggen ved den kjente veggavstand på 12,7 mm, er klart synlig. Figur 6b viser den samme loggen for veggavstand 0 (heltrukne kurve) som på figur 6a, men viser loggen for veggavstand 12,7 mm, brutt linje. Etter korrelasjon for veggavstand basert på nær/fjernforholdet som funksjon av  $1/p$ -kryssplottingen på figur 5. Den målte loggen ved veggavstand 0 viser således gyldigheten av å bruke målingar av bremsetider for epitermiske nøytroner for å korrigere forholdsutledede porøsitetsverdier for ukjent veggavstand.

De forholdsvis små helningene av porøsitets-ribbena på figur 5, indikerer at forholdet mellom de målte epitermiske nøytronmengder ikke blir så sterkt påvirket av sondens veggavstand som målingene av bremsetiden. Følgelig tilveiebringer oppfinnelsen en fremgangsmåte til å benytte bremsetidsmålingenes store følsomhet for veggavstand til å foreta en riktig og viktig samtidig korreksjon av det målte epitermiske nøytronforhold.

Fordi sondens veggavstand sterkt påvirker målingene av bremsetidene, blir gyldigheten av korrigerede porøsitetsverdier som er oppnådd ved bruk av foreliggende fremgangsmåte betydelig redusert når sondens veggavstand overstiger omkring 25 mm med borehullsvann eller omkring 50 mm med slamkake. Det er allerede kjent at porøsiteter basert på målingar av bremsetider for epitermiske nøytroner alene, er av tvilsom gyldighet under slike avstands-betingelser.

I kryssplottingen på figur 5 ble ribbena som representerer porøsiteter (0, 15, 4 og 30 porøsitetsenheter) fastslått fra epitermiske målingar av sonderesponser (detekterte nær/fjern-telleforhold  $R$  og bremsetidskonstanter  $p$ ) under kjente borehulls- og formasjons-betingelser, for derved å tilveiebringe avstands-kompenserte porøsitetsmålingar basert direkte på målte verdier av nær/fjern-telleforholdet og den epitermiske bremsetidskonstanten  $p$ . En annan måte for

kompensering for virkningene av veggavstand på den observerte porøsitet, er å utlede en kryssplotting av den type som er vist på figur 7, som gir en korreksjonsfaktor  $\alpha_R$  som skal subtraheres fra den observerte nær/fjern-forholdsutledede porøsitet for å oppnå den virkelige porøsitet. På figur 7 er differansen mellom den bremsetids-utledede porøsitet  $\alpha_{sdt}$  (for eksempel fra figur 4) og den nær/fjern-forholdsutlede porøsitet  $\alpha_R$  (for eksempel fra figur 3) plottet som funksjon av korreksjons-faktoren  $\alpha$  for en formasjons-porøsitet på 15,4 porøsitetseenheter og to forskjellige veggavstander (12,7 mm og 25,4 mm). Kryssplottingen på figur 7 kan lett programmeres for bruk med de ukorrigerede verdier av  $\alpha_{sdt}$  og  $\alpha_R$  som er utledet fra de målte verdier av nær/fjern-forholdet og  $\beta$  for å korrigere de målte  $\alpha_R$ -verdier for veggavstand og derved oppnå virkelige porøsiteter. Hvis for eksempel telldataene resulterer i beregnede verdier av  $\alpha_{sdt}$  og  $\alpha_R$  på henholdsvis 30 porøsitetseenheter og 15 porøsitetseenheter, er den korrigerede verdi (fra figur 7) av  $\alpha_R$  15 porøsitetseenheter - 2 porøsitetseenheter = 13 porøsitetseenheter.

Selv om oppfinnelsen er blitt beskrevet ovenfor i forbindelse med spesielle utførelsesformer, vil fagfolk på området forstå at forskjellige modifikasjoner og variasjoner av oppfinnelsen kan foretas uten å avvike fra oppfinnelsens ramme. Alle slike modifikasjoner og variasjoner er ment å være omfattet av de vedføyde krav.

## P A T E N T K R A V

1. Fremgangsmåte for undersøkelse av porøsiteten til en undergrunnsformasjon som omgir et borehull, omfattende:

gjentatt bestråling av borehullet og undergrunnsformasjonen med diskrete pulser av høyenergi-nøytroner fra en nøytronkilde, hvilke nøytroner vekselvirker med kjerner i materialene i borehullet og formasjonen for å frembringe epitermiske nøytroner der,

detektering av epitermiske nøytroner ved nærliggende og fjerntliggende steder i borehullet som ligger i forskjellige avstander fra nøytronkilden og i langsgående avstand fra hverandre,

generering av tellesignaler som indikerer størrelsene av de epitermiske nøytroner som detekteres ved de nærliggende og fjerntliggende steder,

detektering av de epitermiske nøytronpopulasjonenes nedbrytning som etterfølger nøytronpulsene på minst ett sted i borehullet og generering av signaler som representerer nedbrytningen, og

utledning fra nedbrytningssignalene av et signal som indikerer nedbremsingstiden for epitermiske nøytroner i formasjonen på det nevnte minst ene sted; karakterisert ved at et målesignal som representerer porøsiteten til formasjonen som omgir borehullet, utledes fra nær- og fjern-tellessignalene og nedbremsingstids-signalet, hvilket målesignal er iboende kompensert for virkningene av sondens veggavstand på en loggesondes responser.

2. Fremgangsmåte ifølge krav 1,

karakterisert ved at utledningstrinnet i porøsitetsmålingen omfatter kombinerings av et signal som representerer et forhold mellom nær- og fjern-tellessignalene, og det epitermiske nedbremsingstids-signalet, for å utlede den avstandskompenserte målingen av formasjonsporøsitet.

3. Fremgangsmåte ifølge krav 1 eller 2,

karakterisert ved at utledningstrinnet i porøsitetsmålingen omfatter utledning av et første porøsitetsmålings-signal fra nær- og fjern-tellessignalene og et

andre porøsitetmålings-signal fra det epitermiske nedbremsingstids-signalet, og kombinerer av det første og det andre porøsitetmålings-signalet for å utlede en korreksjonsfaktor som indikerer virkningen av sondens veggavstand på det første porøsitetmålings-signalet.

4. Fremgangsmåte ifølge krav 3,

karakterisert ved at utledningstrinnet i porøsitetmålingen videre omfatter kombinerer av korreksjonsfaktoren med det første porøsitetmålings-signalet for å utlede det avstandskompenserte porøsitetmålings-signalet.

5. Fremgangsmåte ifølge krav 3 eller 4,

karakterisert ved at det første porøsitetmålings-signalet utledes som en funksjon av nedbremsings-lengden for epitermiske nøytroner i formasjonen.

6. Fremgangsmåte ifølge krav 5,

karakterisert ved at den omfatter dannelse av et forhold mellom de epitermiske nøytronpopulasjons-tellesignalene og utledning av et signal som representerer dette, samt omforming av forholdssignalet for å utlede den første porøsitetmålingen.

7. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 3-6,

karakterisert ved at det andre porøsitetmålingssignalet utledes fra det epitermiske nedbremsingstids-signalet.

8. Apparat for undersøkelse av porøsiteten til en undergrunns-formasjon som omgir et borehull, omfattende

anordninger (12, 38, 40) for gjentatt bestråling av borehullet og undergrunns-formasjonen med diskrete utbrudd av høyenergi-nøytroner fra en nøytronkilde, hvilke nøytroner vekselvirker med kjerner i materialene i borehullet og formasjonen for å frembringe epitermiske nøytroner der,

anordninger (16, 18) for å detektere epitermiske nøytroner på nærliggende og fjerntliggende steder i borehullet i forskjellige avstander fra nøytronkilden (12) og i

langsgående avstand fra hverandre,

anordninger (64, 66, 68, 70, 72, 74) for å generere tellesignaler som indikerer størrelsene av de epitermiske nøytroner som detekteres på de nærliggende og fjerntliggende stedene,

anordninger (20a, 20b) for å detektere nedbrytningen av epitermiske nøytronpopulasjoner etter nøytronutbruddene på minst ett sted i borehullet og for å generere signaler som representerer nedbrytningen, og

anordninger (52, 54, 56, 58, 60, 62) for å utlede fra nedbrytningssignalene et signal som indikerer nedbremsingstiden for epitermiske nøytroner i formasjonen på det nevnte minst ene sted;

karakterisert ved en anordning (36) for å utlede fra nær- og fjern-tellesignalene og nedbremsingstids-signalet et målesignal som representerer porøsiteten av formasjonen som omgir borehullet, iboende kompensert for virkningene av sondens veggavstand på apparatets respons.

9. Apparat ifølge krav 8,

karakterisert ved at anordningen (36) for utledning av porøsitetsmålingen omfatter en anordning for å kombinere et signal som representerer et forhold mellom nær- og fjern-tellesignaler, og det epitermiske nedbremsingstids-signalet, for å utlede den avstandskompenserte formasjonsporøsitetsmålingen.

10. Apparat ifølge krav 8 eller 9,

karakterisert ved at anordningen (36) for utledning av porøsitetsmålingen omfatter en anordning for å utlede et første porøsitetsmålings-signal fra nær- og fjern-tellesignalene og et andre porøsitetsmålings-signal fra det epitermiske nedbremsingstids-signalet, og en anordning for å kombinere det første og det andre porøsitetsmålings-signalet for å utlede en korreksjonsfaktor som indikerer virkningen av sondens veggavstand på det første porøsitetsmålings-signalet.

11. Apparat ifølge krav 10,

karakterisert ved at anordningen (36) for utledning av porøsitetsmålingen videre omfatter en anordning for å kombinere korreksjonsfaktor-signalet



med det første porøsitetsmålings-signalet for å utlede det avstandskompenserte porøsitetsmålings-signalet.

12. Apparat ifølge krav 10 eller 11, karakterisert ved at det første porøsitetsmålings-signalet utledes som en funksjon av nedbremsingslengden for epitermiske nøytroner i formasjonen.

13. Apparat ifølge krav 12, karakterisert ved at anordningen (36) for å utlede det første porøsitetsmålings-signalet omfatter en anordning for å danne et forhold mellom de epitermiske nøytronpopulasjons-målingene og å utlede et signal som representerer dette, samt en anordning for å omforme forholdssignalet for å utlede den første porøsitetsmålingen.

14. Apparat ifølge et av kravene 10-13, karakterisert ved at det andre porøsitetsmålings-signalet utledes fra det epitermiske nedbremsingstids-signalet.

15. Apparat ifølge et av kravene 8-14, karakterisert ved at det omfatter:

- (a) en sonde (10) innrettet for å beveges gjennom borehullet;
- (b) en nøytronakselerator-kildeanordning (12) i sonden (10);
- (c) en første epitermisk nøytrondetektor (16) i sonden (10), i avstand fra men nær nøytronkilden (12) uten vesentlig mellomliggende høytetthets-skjerming;
- (d) en første skjermanordning (22) for skjerming av den første detektoren (16) for å øke dennes deteksjonsterskel for lavenergi-nøytroner til minst omkring 10 eV;
- (e) en andre epitermisk nøytrondetektor (18) i sonden (10) anbrakt lengre unna nøytronkilden (12) enn den første detektoren (16), hvor den andre detektoren (18) er eksentrisk mot én side av sonden (10);
- (f) en andre skjermanordning (24) for skjerming av den annen detektoren (18) fra nøytroner som innfaller på den fra alle sider unntatt den nevnte ene side av sonden (10);

- (g) en tredje epitermisk nøytrondetektor (20) i sonden (10) anbrakt mellom den første og andre detektoren (16, 18) i forhold til nøytronkilden (12) og eksentrisk mot den nevnte ene side av sonden (10);
- (h) en tredje skjermanordning (26) for skjerming av den tredje detektoren (20) fra nøytroner som faller inn på den fra alle sider unntatt den nevnte ene siden;
- (i) en anordning (28) for å anbringe sonden (10) eksentrisk i borehullet slik at den nevnte ene side ligger nært inntil borehullsveggen;
- (j) en anordning for separat telling av de nøytroner som detekteres av den første og annen detektor (16,18) over et tidsintervall som omfatter en rekke nøytronutbrudd, og for å generere første og andre tellesignaler som representerer disse;
- (k) en anordning (36) for å utlede fra de første og andre tellesignaler en første måling som indikerer undergrunnsformasjonens porøsitet;
- (l) en anordning for å telle de nøytroner som detekteres av den tredje detektoren (20) under en rekke tidsintervaller mellom påfølgende nøytronutbrudd, og for å generere en tilsvarende rekke tellesignaler som representerer disse; og
- (m) en anordning (36) for å utlede fra rekken av tellesignaler en måling av den epitermiske nøytronnedbremsings-tiden i undergrunnsformasjonen som en andre måling som indikerer formasjonens porøsitet.

16. Apparat ifølge krav 15,

karakterisert ved at den første målingen omfatter et forhold mellom de første og andre tellesignaler.

17. Apparat ifølge krav 15 eller 16,

karakterisert ved en anordning (36) for omforming av den første målingen til en første kvantitativ måling av formasjonens porøsitet, og en anordning for å omforme den andre målingen til en andre kvantitativ måling av formasjonens porøsitet.

18. Apparat ifølge krav 17,

karakterisert ved at den omfatter en anordning (36) for å kombinere de første og andre målinger for å utlede en forbedret måling av formasjonens porøsitet.

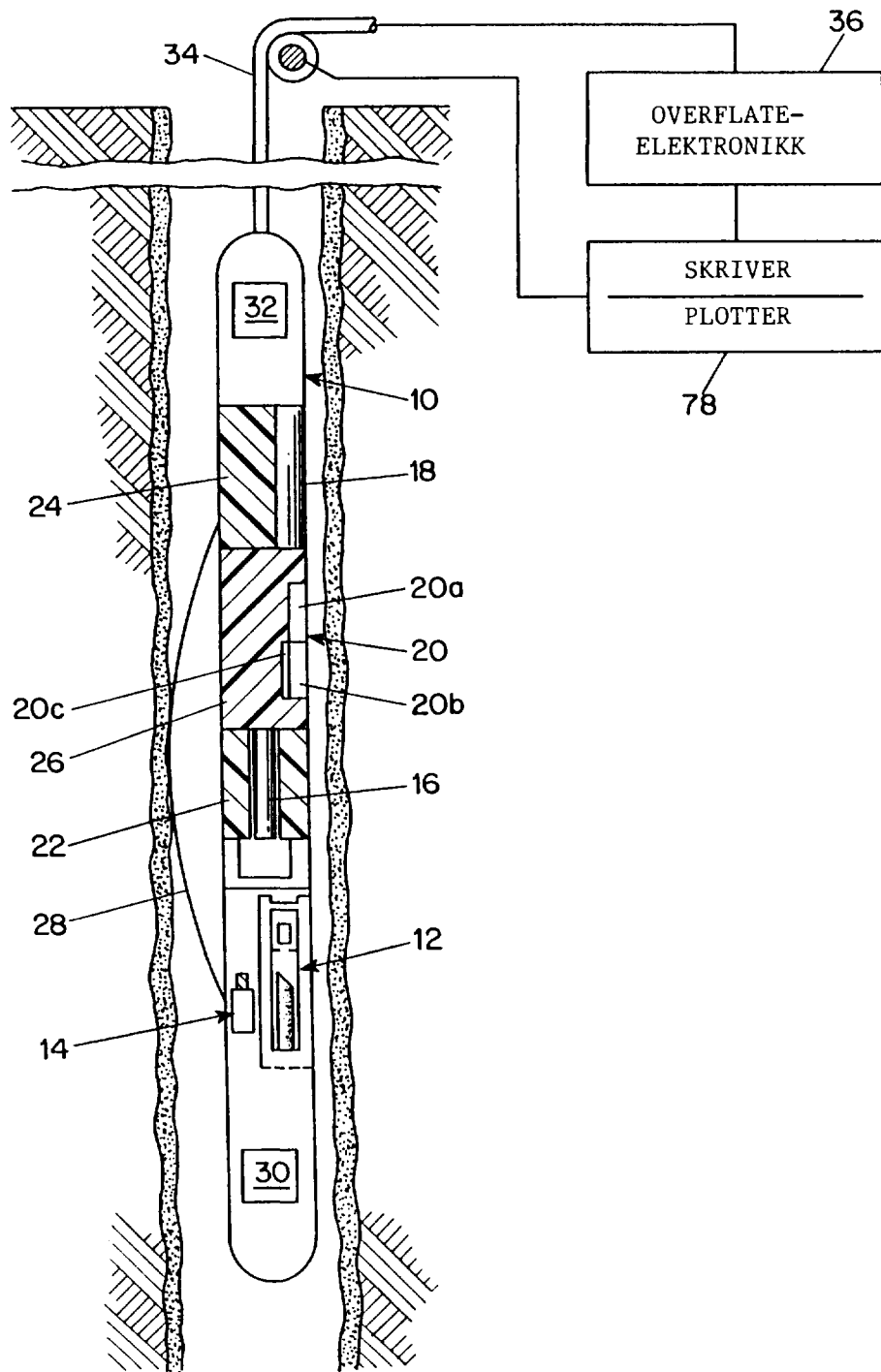


FIG. 1

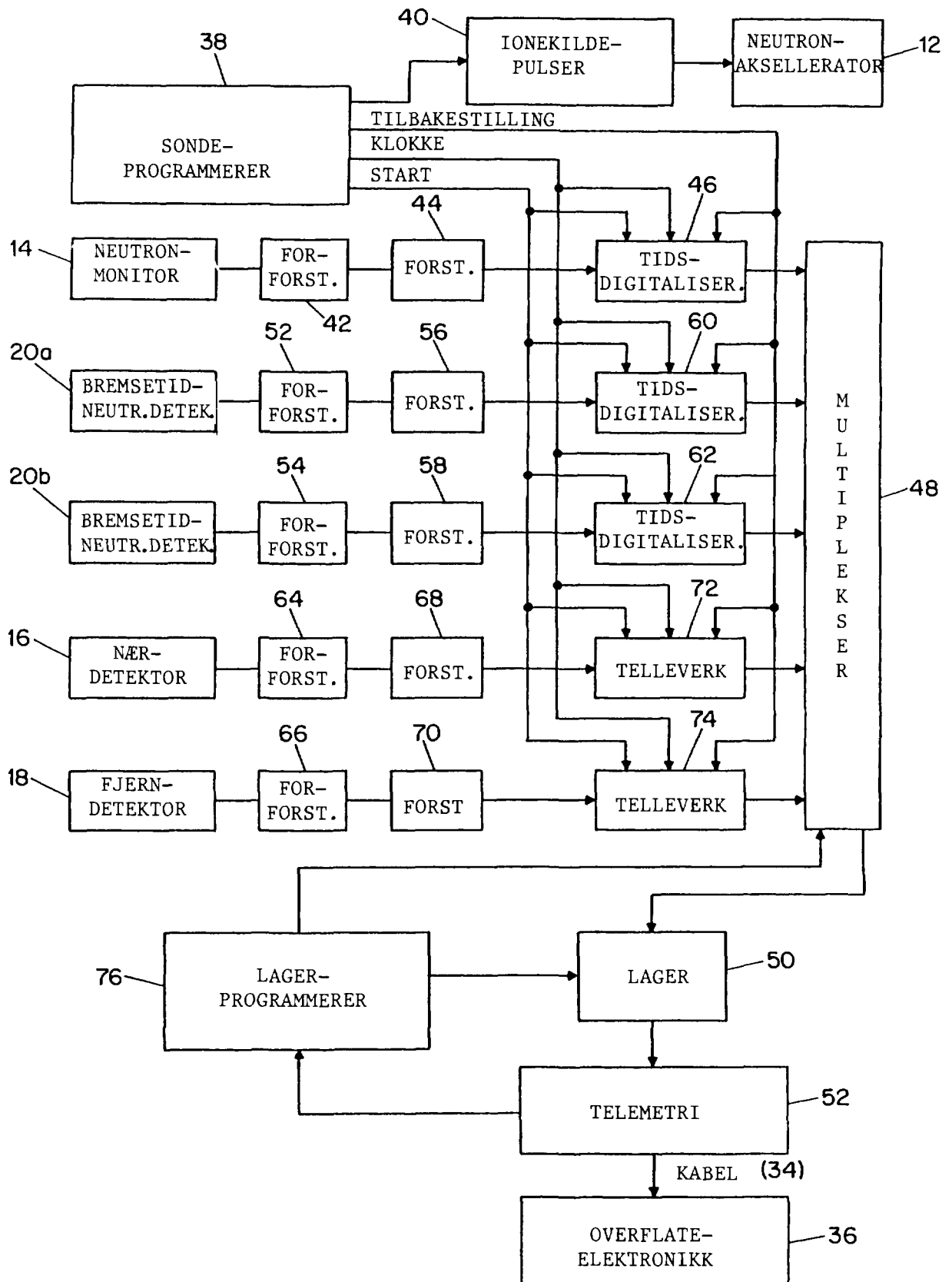


FIG. 2

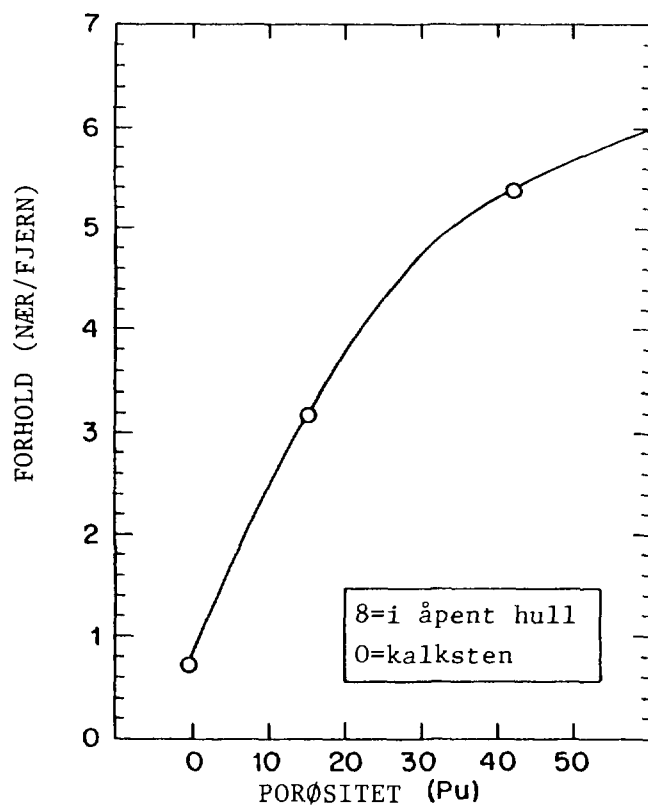


FIG. 3

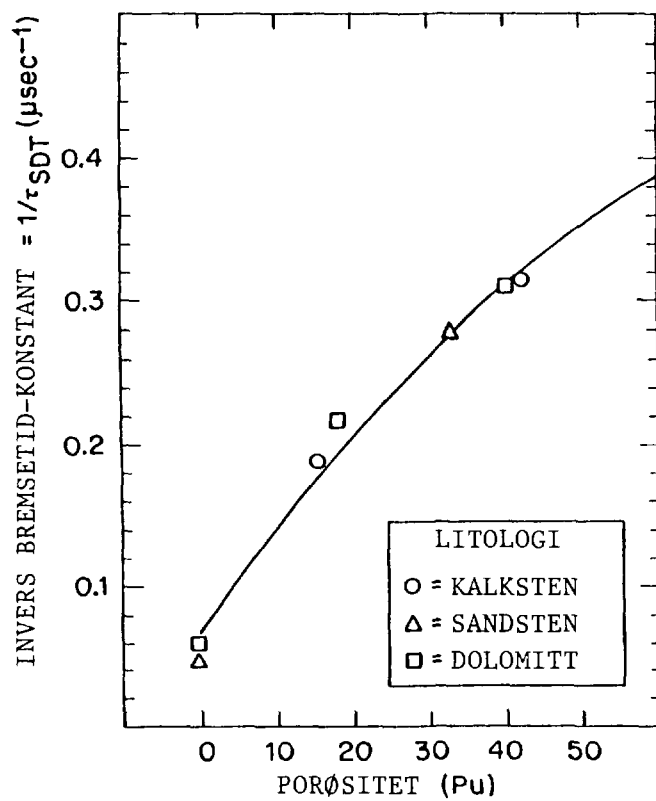


FIG. 4

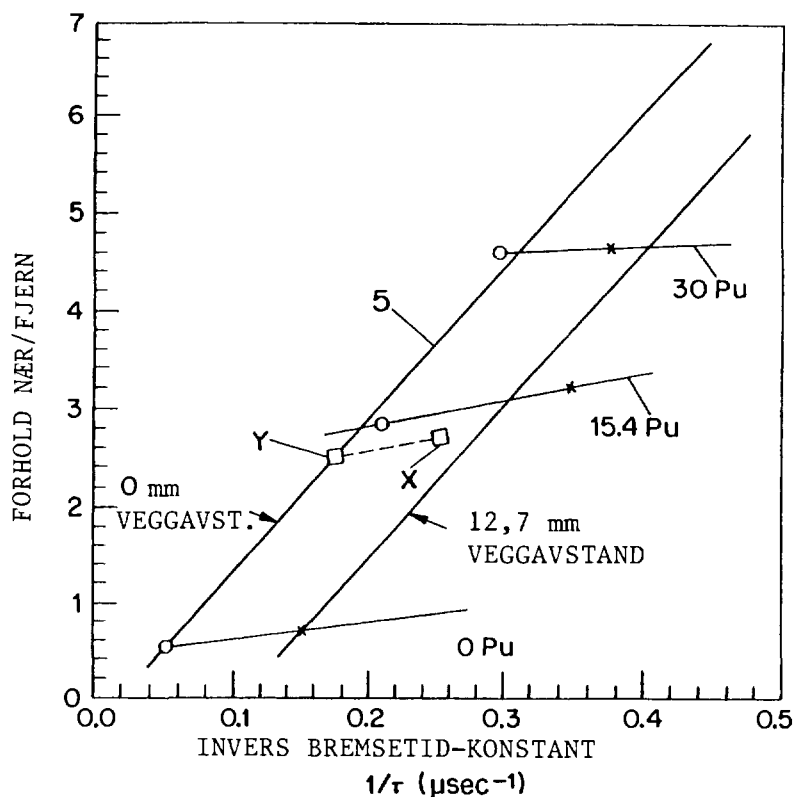


FIG. 5

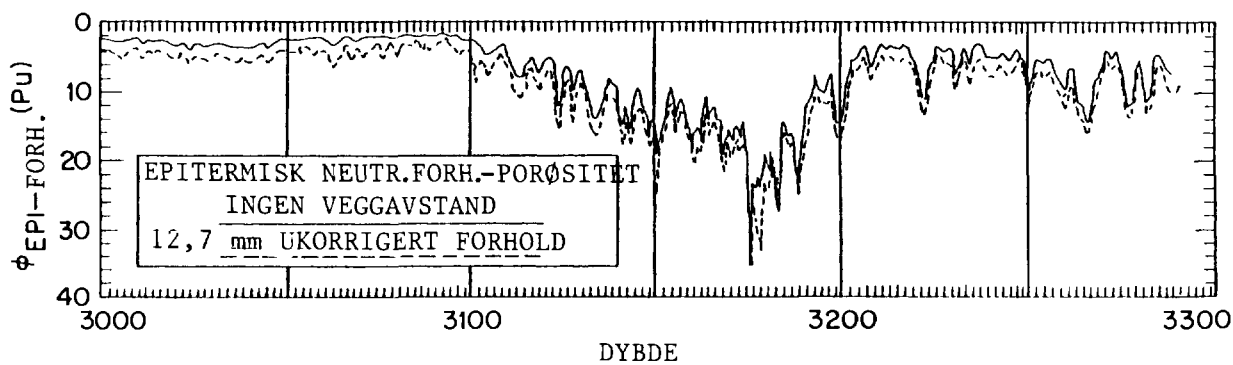


FIG. 6A

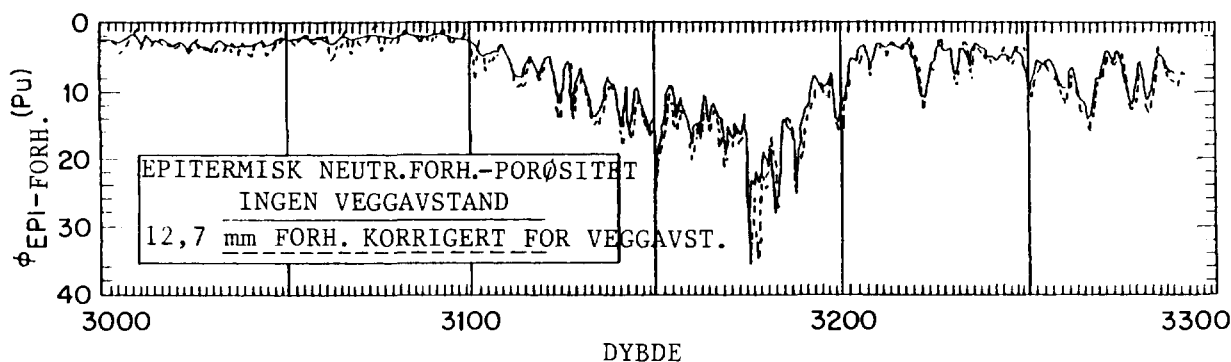


FIG. 6B

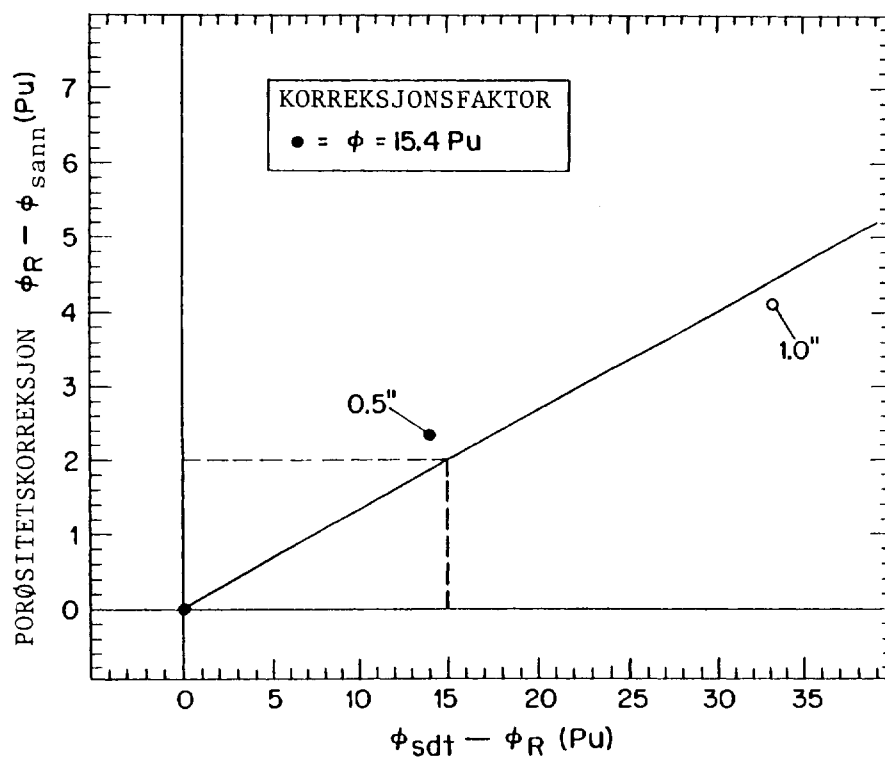


FIG. 7