



NORGE

(12) PATENT

(19) NO

(11) 303745

(13) B1

(51) Int Cl⁶ E 21 B 44/00

Patentstyret

(21) Søknadsnr	19912751	(86) Int. inng. dag og søknadsnummer	
(22) Inng. dag	12.07.1991	(85) Videreføringsdag	
(24) Løpedag	12.07.1991	(30) Prioritet	13.07.1990, GB, 9015433
(41) Alm. tilgj.	14.01.1992		
(45) Meddelt dato	24.08.1998		

(73) Patenthaver	Anadrill International SA, 8 Calle Aquilino de la Guardia, Panama City, PA
(72) Oppfinner	Emmanuel Detournay, Cambridge, England, GB
(74) Fullmektig	Pål Gulbrandsen, Bryn & Aarflot AS, 0104 Oslo

(54) Benevnelse **Fremgangsmåte for å bestemme boreforholdene i forbindelse med boring av en formasjon ved hjelp av en skrapekrone**

(56) Anførte publikasjoner EP 350978, EP 163426

(57) Sammendrag

Oppfinnelsen er basert på en ny modell som beskriver boreprosessen for en skrapeborkrone og vedrører en fremgangsmåte for bestemming av boreforholdene i forbindelse med boring av et hull gjennom undergrunnsformasjoner hvert for seg motsvarende en spesiell litologi, idet borehullet bores med en roterende skrapeborkrone, hvor fremgangsmåten kjennetegnes ved prosesstrinn som omfatter måling av borkronebelastningen W , borkrone-vridningsmomentet T , borkronens rotasjonsvinkelhastighet ω og borkroneinntrengningen u , for fremskaffing av sett av data $(W_i, T_i, u_i, \omega_i)$ i motsvarighet til forskjellige dybder, beregning av den spesifikke energi E_i og boretrykket S_i , basert på dataene $(W_i, T_i, u_i, \omega_i)$, identifisering av minst én lineær gruppe av verdier (E_i, S_i) , hvor gruppen motsvarer en spesiell litologi, og bestemming av boreforholdene, basert på nevnte, lineære grupper. Den lineære gruppes helningsvinkel bestemmes for bedømming av formasjonens indre friksjonsvinkel ϕ . Formasjonens spesifikke egenenergi c og boringsytelsen blir likeledes bestemt. Endring av litologi, borkroneslitasje og borkronetilklining kan konstateres.

Foreliggende oppfinnelse vedrører en fremgangsmåte for bestemmelse av boreforholdene i tilknytning til boringen av en formasjon ved hjelp av en roterende borkrone. Oppfinnelsen gjør det mulig å bestemme formasjonens og/eller borkronens karakteristika.

5 De rotasjonsborkroner som er av betydning for oppfinnelsen, kan generelt betegnes som "skrapekroner" og består av faste skjær som er montert på yttersiden av en kronesokkel. Som eksempel på en kjent type av skrapekrone som anvendes i forbindelse med oljeutvinning, kan nevnes den kompakte borkrone (PDC) av polykrystallinsk diamant. En PDC-fjellborkrone består av et antall kom-
10 paktskjær av polykrystallinsk diamant som er fastgjort på bæreknaster av volframkarbid og danner borskjærene som er fast montert på yttersiden av kronesokkel. Denne borkronetype er beskrevet eksempelvis i europeisk patentsøknad nr. 0 193 361. Når en roterende skrapekrone presses inn i formasjonen som skal bores, vil skjærene trekkes langs formasjonsflaten og bore i denne ved skjærevirk-
15 ning. Uttrykket "borkrone" eller "krone" er i det etterfølgende benyttet som betegnelsen på en rotasjonsskrapekrone.

Flere metoder er utviklet og benyttet på feltet, for å bestemme boreforholdene for rullemeisel-borkrone. Boringen av en formasjon med en rullemeisel-borkrone er resultatet av en utgravende og innskjærende virkning. US-patentskrift
20 4 627 276 beskriver således en metode for bestemmelse av slitasjen på rullemeisel-borkroner under oljebrønnboring, ved måling av flere parametre (belastningen på skjæret, det nødvendige dreiemoment for dreining av kronen og kronens rotasjonshastighet) og etterfølgende tolking av de målte parametre. EP-A-0 350 978 beskriver en fremgangsmåte for klassifisering av litologi under boring.
25 Det anvendes gjennomsnittsverdier av samtid borsynk og dreiemoment. I henhold til forutbestemte grenser, kan det skilles mellom leirholdige, porøse, og faste formasjoner. Fremgangsmåten varieres i en viss grad avhengig av hvilken type borkrone som benyttes under boreoperasjonen. EP-A-0 163 426 omhandler en fremgangsmåte for bestemmelse av boreforhold ved å måle påført dreiemoment,
30 tyngden som virker på borkronen, borsynk og rotasjonshastighet. Informasjon om boreforholdene oppnås ved å følge tendensene som fremgår av de registrerte datapunkter som avledes fra de målte parametre.

Tolkingen av boredata, såsom belastning på kronen og overførte dreie-

moment, som er innhentet under boring med en skrapekrone har hittil ikke vært vellykket og har ført til feilaktige resultater. Det antas følgelig at det for tiden ikke eksisterer noen metode for oppnåelse av verdifull informasjon om bergarten som bores med en skrapekrone og/eller om selve kronens virkningsgrad og om boreforholdene i det hele tatt, på tross av at skrapekroner har vært anvendt i mange år.

Foreliggende oppfinnelse har som formål å løse dette problem ved å foreslå en fremgangsmåte for bestemmelse av boreforholdene under boring av en undergrunnsformasjon eller en bergart med en roterende borkrone av skrapekronetypen. Uttrykkene "formasjon" og "bergart" er i det etterfølgende benyttet omvekslende, for å betegne en undergrunnsformasjon eller en bergprøve. Egenskapene som bestemmes, vedrører selve formasjonen, f.eks. bergartens "spesifikke egenenergi" ε (som angitt i det etterfølgende) og den indre friksjonsvinkel φ av bergarten til boreprosessen, eksempelvis konstateringen av krone-tilklining og boringsytelsen η og X i forbindelse med en endring i litologien under boring og med selve borkronen, f.eks. slitasjegrad og ytelse.

Nærmere bestemt angår oppfinnelsen en fremgangsmåte for bestemmelse av boreforholdene i forbindelse med boring av et borehull gjennom undergrunnsformasjoner, som hver svarer til en spesiell litologi, idet borehullet bores med en rotasjons-skrapekrone, hvor belastningen W som påføres borkronen, borkrone-dreiemomentet T , borkronens vinkelrotasjonshastighet ω og borsynk v måles for fremskaffing av et sett av data $(W_i, T_i, v_i, \omega_i)$ som svarer til forskjellige dybder, karakterisert ved at den omfatter følgende trinn:

- beregning av en spesifikk energi E_i og boretrykket S_i fra hvert datasett $(W_i, T_i, v_i, \omega_i)$ i henhold til likningene

$$E = \frac{T\omega}{v\pi a^2} \quad \text{og} \quad S = \frac{W\omega}{2v\pi a}$$

(hvor a er borkrone-radien);

- ordning av vedsettene (E_i, S_i) som et grafisk plott av E_i -verdiene mot S_i -verdiene;
- identifisering av minst én lineær gruppe av verdier (E_i, S_i) hvilken gruppe svarer til en spesiell litologi; og

- bestemmelse av boreforholdene på grunnlag av den lineære gruppe.

Som omtalt nedenfor, angår oppfinnelsen også en fremgangsmåte for bestemmelse av ytelsen til minst én skrapeborkrone ved boring gjennom en hovedsakelig ensartet bergart med kjente egenskaper, idet fremgangsmåten utleder ytelsen fra E_i , S_i -verdiene ved den relevante dybde.

Forholdet mellom E -variasjonen og S -variasjonen kan med fordel bestemmes, da dette har tilknytning til produktet av en borkrone-konstant γ og en friksjonskoeffisient μ .

Oppfinnelsen er nærmere beskrevet i det etterfølgende i forbindelse med de medfølgende tegninger, hvori:

- Figur 1 viser et skjematisk riss av et skarpt PDC-skjær under boring i fjell.
- Figur 2 viser de ulike krefter som påvirker et sløvt PDC-skjær under boring i fjell.
- Figur 3 viser et diagram E - S (for $\beta < 1$) i overensstemmelse med oppfinnelsen med de forskjellige parametre som kan bestemmes ved fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen.
- Figur 4 viser diagrammet E - S , i likhet med figur 3, men for $\beta > 1$.
- Figur 5 viser diagrammet E - S opptegnet på grunnlag av boredata som er oppnådd i laboratorie.
- Figur 6, 8 og 9 viser diagrammene E - S opptegnet på grunnlag av boredata som er innhentet ved boring i to forskjellige brønner.
- Figur 7 viser en gammastråle-logg i motsvarighet til felteksempelet ifølge figur 6.

Oppfinnelsen er basert på en modell som beskriver vekselvirkningen mellom en skrapekrone og formasjonen som bores. For bedre forståelse av oppfinnelsen er betydningen av de parametre som bestemmes angitt i den etterfølgende omtale av den tekniske bakgrunn.

Teknisk bakgrunn

Figur 1 viser skjematisk et skjær 10 som er fastgjort til yttersiden av en borkronesokkel 12. Borkronen omfatter et flertall skjær, identiske med skjæret 10, som er anordnet i flere perifertforløpende rekker, sentrert rundt borkronens rota-
 5 sjonsakse. Hvert skjær er sammensatt av en knast med en plan skjæreflate 14 som er påført et belegg av hardt, slipende materiale. Ved et PDC-skjær består det harde, slipende materiale av syntetisk, polykrystallinsk diamant som under syntese er forbundet med en volframkarbid/kobolt-metallunderdel.

En modell som beskriver virkemåten av et enkeltskjær som først er helt
 10 skarpt og deretter sløvt, er betraktet og ekstrapolert til en modell av en borkrone.

Skarpt skjær. Det er i figur 1 vist et absolutt skarpt skjær 10 som følger et spor 16 av konstant tverrsnittsflate s på en horisontal fjellformasjonsflate 18. Det antas at skjæret er under ren kinetisk styring og derved tvinges til å beveges med en forutbestemt, horisontal hastighet i en retning som vist med pilen 20, med en
 15 vertikal hastighet lik null og med konstant skjæredybde h . Grunnet skjærevirkningen vil skjæret påvirkes av en kraft \vec{F}^c . Kraftkomponentene normalt og parallelt mot fjellflaten er betegnet med henholdsvis F_n^c og F_s^c , og \vec{F}^c er resultanten av disse kraftkomponenter. Resultatene av teoretiske og eksperimentelle studier tyder på at for skrapekroner er både F_n^c og F_s^c proporsjonale med skårets
 20 tverrsnittsflate og bestemt av:

$$F_s^c = \varepsilon s \quad (1)$$

$$F_n^c = \zeta \varepsilon s \quad (2)$$

hvor den spesifikke egenenergi er uttrykt ved ε , mens ζ betegner forholdet mellom den vertikale og den horisontale kraft som virker mot skjæreflaten.

25 Størrelsen ε har samme dimensjon som en spenning (en praktisk enhet for ε er MPa). Den spesifikke egenenergi - representerer den medgåtte energimengde for uttaking av et enhetsvolum av fjell ved ren skjærevirkning, uten friksjonsvirkning.

Den spesifikke egenenergi er avhengig av bergartens mekaniske og fysiske egenskaper (kohesjon, indre friksjonsvinkel, porøsitet, etc.), det hydrostatiske trykk som utøves av borefluidet mot fjellet i nivå med borkronen, og fjell-boretrykket, skjærets bakuthelning θ og friksjonsvinkelen Ψ i grenseflaten fjell/skjæreflate.

Som vist i figur 1 er vinkelen mellom skjæreflaten 14 og normalen til

bergoverflaten betegnet med θ , og friksjonsvinkelen, dvs. vinkelen mellom kraftresultanten F^c og normalen til skjæreflaten betegnet med ψ .

Det bør bemerkes at ζ , dvs. forholdet mellom F_n^c og F_s^c kan uttrykkes som

$$\zeta = \tan(\theta + \Psi) \quad (3)$$

5 **Sløvt skjær.** Et skjær med en sliteflate er vist i figur 2. Under boring vil den skarpe sideflate av skjæret i kontakt med fjellet avjevnes, og det dannes en sliteflate 22. Friksjonen mellom skjæret og fjellflaten får derfor betydning. Boreprosessen blir en kombinasjon av skjære- og friksjonsvirkning.

Kraften \vec{F} dekomponeres i to vektorkomponenter, \vec{F}^c som overføres gjennom skjæreflaten 14, og \vec{F}^f som virker langs sliteflaten 22. Det antas at de skjærende komponenter F_n^c og F_s^c tilfredsstiller likningene (1) og (2) for et absolutt skarpt skjær. Det antas videre at friksjonsprosessen finner sted i grenseflaten mellom sliteflaten 22 og fjellet, slik at komponentene F_n^f og F_s^f kan uttrykkes ved

$$15 \quad F_s^f = \mu F_n^f \quad (4)$$

hvor μ er friksjonskoeffisienten.

Den horisontale kraftkomponent F_s er lik $F_s^c + F_s^f$, og den vertikale kraftkomponent F_n er lik $F_n^c + F_n^f$. Ved bruk av likningene (1) og (4) kan horisontalkomponenten F_s uttrykkes ved

$$20 \quad F_s = \varepsilon s + \mu F_n^f \quad (5)$$

Ved omskriving av F_n^f som $F_n - F_n^c$ og bruk av likning (2) får ovennevnte likning denne form:

$$F_s = (1 - \mu\zeta)\varepsilon s + \mu F_n \quad (6)$$

Det innføres to nye størrelser: den spesifikke energi E , definert som

$$25 \quad E = \frac{F_s}{s} \quad (7)$$

og boretrykket S

$$S = \frac{F_n}{s} \quad (8)$$

30 Begge størrelser, den spesifikke energi E og den spesifikke egenenergi ε ,

har åpenbart samme hovedbetydning. E representerer imidlertid den energi som er forbrukt for utskjæring av et fjell-enhetsvolum, uansett hvorvidt skjæret er skarpt eller slitt, når skjære- og friksjonskontaktprosessene finner sted samtidig, mens ε er meningsfullt bare for skjærevirkningen uten energitap i en friksjonskontaktprosess.

For et fullstendig skarpt skjær vil grunnlikningene (1) og (2), kombinert med uttrykkene (7) og (8) gi:

$$E = \varepsilon \text{ og } S = \zeta \varepsilon \quad (9)$$

For et slitt skjær eksisterer følgende, lineære forhold mellom E og S , som fremkommer helt enkelt ved å dividere de to ledd i likning (6) med s :

$$E = E_0 + \mu S \quad (10)$$

hvor størrelsen E_0 uttrykkes ved

$$E_0 = (1 - \mu \zeta) \varepsilon \quad (11)$$

Modell av en borkrone

Virkemåten av et enkeltskjær som beskrevet i det ovenstående, kan generaliseres til en modell som beskriver virkemåten av en borkrone, som er basert på den kjensgjerning at to prosesser, skjære- og friksjonskontakt, kjennetegner vekselvirkningen mellom borkrone og fjell. Dreiemomentet T og borkronebelastningen W kan følgelig dekomponeres i to komponenter, nemlig:

$$T = T_c + T_f \text{ og } W = W_c + W_f \quad (12)$$

hvor c og f betegner henholdsvis skjæring og friksjon. Hovedresultatene av generaliseringen er at en borkrone-konstant γ innføres i likning (10) som derved får følgende form

$$E = E_0 + \mu \gamma S \quad (13)$$

og likning (11) blir

$$E_0 = (1 - \beta) \varepsilon \quad (14)$$

hvor

$$\beta = \gamma \mu \zeta \quad (15)$$

I det ovenstående er γ en borkronekonstant som er avhengig av borkroneprofilen, skjæreeggformen, antallet av skjær og plasseringen av disse på borkronen. γ er større enn 1. For en borkrone av stump form med rettlinjet skjærekant kan γ teoretisk variere mellom 1 og 4/3. Den nedre grense oppnås ved assimilering

ing av borkronen til et enkelt blad, og den øvre til en friksjonsflate.

Parameteren μ er friksjonskoeffisienten som uttrykkes ved likning (4). For de verdier av W som forekommer i praksis, antas parameteren μ å være representativ for bergartens indre friksjonsvinkel φ ($\mu = \tan\varphi$), og ikke friksjonsvinkelen i
 5 sliteflate/fjellgrenseflaten. Den indre friksjonsvinkel φ er et viktig og velkjent karakteristikum for en bergart.

Likning (12) uttrykker de mulige tilstander under borkrone/fjellvekselvirkningen, men med den begrensning at den maksimale virkningsgrad ved boreprosessen oppnås når all energi som overføres til borkronen, medgår for skjæring
 10 av fjellformasjonen, uten friksjonsprosess. Dette tilsvarer likning (9) som uttrykker $E = \varepsilon$ og $S = \zeta\varepsilon$.

Boreforholdene må derfor motsvare $E \geq \varepsilon$ eller tilsvarende $S \geq \zeta\varepsilon$.
 Boringsvirkningsgraden kan uttrykkes som en dimensjonsløs parameter η :

15

$$\eta = \frac{\varepsilon}{E} \quad (16)$$

Den maksimale virkningsgrad $\eta=1$ tilsvarer $E=\varepsilon$ og $S=\zeta\varepsilon$.

Da det ikke alltid er mulig å bestemme η , er det praktisk å innføre
 20 størrelsen X som defineres som forholdet mellom den spesifikke energi og borekraften, dvs.

$$\chi = \frac{E}{S} \quad (17)$$

Det eksisterer et helt enkelt forhold mellom X og virkningsgraden η :

$$\eta = \frac{\chi - \mu\gamma}{(1 - \beta)\chi} \quad (18)$$

Parameteren X varierer mellom ζ^{-1} og $\mu\gamma$, når virkningsgraden avtar fra 1 til 0.

Boringsvirkningsgraden η er avhengig av flere parametre, hvorav borkronens slitasjetilstand og bergartens "hardhet". Likningen (16) for η
 30 omskrives derfor slik:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{e + \mu\gamma W^f / a\delta} \quad (19)$$

I den ovenstående likning er borkroneradien betegnet med a og snittdybden pr. omdreining med δ . Borkronebelastnings-komponenten W^f som overføres av skjærsliteflatene, kan uttrykkes som:

$$W^f = A^f \sigma \quad (20)$$

5 hvor A^f betegner samtlige skjærkontaktflaters samlede projeksjonsflate på et plan vinkelrett mot borkronens rotasjonsakse, og σ er middel-kontaktspenningen som overføres av skjærsliteflatene. Videre er kontaktlengden λ definert som

$$\lambda = A^f/a \quad (21)$$

10 Det er en terskelverdi for den borkronebelastnings-komponent som overføres av skjærkontaktflatene, nemlig

$$W^f \leq W_{.f}^f \quad (22)$$

Terskelverdien $W_{.f}^f$ avhenger av borkronens slitasjetilstand, bergarten som bores, slamtrykket etc. og kan uttrykkes som

$$W_{.f}^f = a\lambda^* \sigma^* \quad (23)$$

15 hvor σ^* er kontaktrykket eller hardheten, (funksjon av bergarten, slamtrykket, poretrykket, ...) og λ^* er den helt tilbakelagte kontaktlengde som er karakteristisk for en viss borkroneslitasje. Når borkronebelastningen økes, vil borkronebelastningens kontaktkomponent W^f øke gradvis til den når terskelverdien $W_{.f}^f$ (økningen av W^f skyldes en kombinasjon av en økning av kontaktlengden λ og kontaktspenningen σ).

Boringsvirkningsgraden η kan følgelig omskrives slik:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \mu\gamma\lambda_s/\delta} \quad (24)$$

25 Med de forhold hvorunder terskelverdien for borkronebelastningen er nådd, er $\lambda\sigma = \lambda^*\sigma^*$.

Boringsvirkningsgraden η som gir et relativt mål på energien som tapes i friksjonskontakt ved borkronen er påvirkelig av kontaktlengden og kontaktspenningen. Det er i realiteten nyttig å foreta direkte bestemmelse av produktet $\lambda\sigma$ som gir et kombinert mål på borkronens slitasjetilstand og bergartens hardhet. Dette produkt beregnes ifølge

$$\sigma\lambda = \frac{\delta(E - \varepsilon)}{\mu\gamma} \quad (25)$$

Bestemmelse av E og S

Ifølge oppfinnelsen vil den spesifikke boringsenergi E og borekraften S beregnes periodisk, for å avlede verdifull informasjon om fjellformasjonen og borkronen.

Basert på et sett målinger av borkronebelastningen W, dreiemomentet T, inntrengingshastigheten v og rotasjonshastigheten ω , beregnes den spesielle boringsenergi E og borekraften S som følger:

$$E = \frac{2T}{a^2\delta} \quad (26)$$

$$S = \frac{W}{a\delta} \quad (27)$$

I de ovennevnte likninger er borkroneradien betegnet med a, mens innsnittdybden pr. omdreining er betegnet med δ , beregnet som

$$\delta = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (28)$$

Både E og S uttrykkes som en spenning (kraft pr. flateenhet), og en praktisk enhet for E og S er MPa (N/mm^2). Under normale driftsbetingelser for en PDC-borkrone er $E < 1.000 \text{ MPa}$ og $S < 2.000 \text{ MPa}$.

Borkronebelastningen W, dreiemomentet T, inntrengingshastigheten v og rotasjonshastigheten ω måles periodisk for å fremskaffe et sett målinger, eksempelvis et datasett for hver 30. borede cm. Ut fra hvert sett (W, T, v , ω) beregnes den spesifikke boringsenergi E og boretrykket S ved hjelp av likningene (26) og (27). Uttrykkene E_i og S_i er i det etterfølgende benyttet for å betegne verdien for den spesifikke energi og boretrykket i motsvarighet til det oppnådde antall i av et spesielt sett målinger. Paret (E_i , S_i) er følgelig representativt for dybdeintervallet motsvarende antallet i.

Parametrene T, W, v og ω kan måles ved overflaten eller ved bunnen av hullet ved hjelp av konvensjonelt utstyr som for tiden er vanlig brukt innen boringsteknikken.

Metodene og apparaturen som er kommersielt tilgjengelig innen boringsteknikken, for måling av disse parametre, er kjent i seg selv. For overflatemålinger

og utelukkende som eksempel kan dreiemomentet T bestemmes ved anvendelse av en torsjonsmåler som beskrevet i US-patentskrift 4 471 663, borkronebelastningen W ved hjelp av metoden ifølge US-patentskrift 4 886 129, og inntrengingshastigheten v ved bruk av metoden ifølge US-patentskrift 4 843 875. For brønnhullmålinger benyttes et MWD-verktøy. For måling av dreiemomentet T og borkronebelastningen W kan apparatet som er kjent fra US-patentskrift 3 855 857 eller 4 359 898 benyttes. Målinger foretas periodisk med en frekvens som kan variere mellom 10 cm og 1 m av formasjonen som bores eller mellom 1 til 3 minutter. Det bør bemerkes at de data som anvendes for bestemmelse av E og S , kan motsvare middelverdier for de parametre som er målt i løpet av et visst tidsrom eller en viss dybdeboring. Dette er særlig tilfelle for inntrengingshastigheten v og rotasjonshastigheten ω .

Diagram E-S

Ifølge en versjon av oppfinnelsen kan et diagram representerende verdien av E kontra S opprettes ved avsetting av hvert par (E_i, S_i) , beregnet på grunnlag av et sett målinger.

Figur 3 viser diagrammet E-S. Likning (13) representeres av en rett linje FL, benevnt friksjonslinje eller helning $\mu\gamma$, tilsvarende β/ζ ifølge likning (15)). I figur 3 er friksjonslinjen FL gjengitt for verdier av β under 1, hvilket dekker det vanlige tilfelle. Friksjonsvinkel FL skjærer E-aksen i ordinaten E_0 (fra likning (12) med $S = 0$). Tillatte boreforhold i forbindelse med en skrapekrone representeres av samtlige punkter på friksjonslinjen FL. Borkronens virkningsgrad η har imidlertid et maksimum lik 1. Dette motsvarer likning (13) når hele boringsenergien medgår til skjæring i fjellformasjonen, uten friksjonsvirkning. Likning (9) gir $E = \frac{S}{\zeta}$. Punktet CP (benevnt "skjæringspunkt") på friksjonslinjen FL motsvarer følgelig virkningsgraden $\eta = 1$ ved skjæringen mellom friksjonslinjen og linjen 32 som representerer likningen $E = \frac{S}{\zeta}$ og som er en rett linje som passerer gjennom origo O med en helning $\frac{1}{\zeta}$. Denne linje 32 danner det geometriske sted for

skjæringspunktene. De tillatte reaksjonstilstander for borkronen under boring er

derfor gjengitt til høyre for skjæringspunktet CP på friksjonslinjen, tilsvarende $\eta \leq 1$.

Når borkronens virkningsgrad avtar, vil friksjonslinjen forflyttes mot høyre, fordi mer eller mindre boringsenergi medgår i friksjonen. $E = \varepsilon$ (likning 16)) mot-
 5 svarer i realiteten $\eta = 1$ (samt skjæringspunktet CP) og den horisontale linje for
 ordinaten ε , som passerer gjennom CP, representerer derfor den komponent E^c av
 den spesifikke boringsenergi som utnyttes effektivt i skjæreplassen, mens den
 annen komponent E^f , representert i figur 3 ved vertikalavstanden mellom $E = \varepsilon$ og
 friksjonslinjen FL, motsvarer den spesifikke boringsenergi som tapes i friksjons-
 10 prosesser.

Den ubenevnte størrelse X som fremkommer av $E = XS$ (likning (17)) er
 representert ved hellingsvinkelen for den rette linje 34 som går gjennom origo O
 og et spesielt punkt 36 på friksjonslinjen som defineres ved sine koordinater (S_i ,
 E_i). Størrelsen X gir en indikasjon på virkningsgraden η av boreprosessen i det
 15 spesielle punkt (S_i , E_i , likning (18)) og er av spesiell interesse når skjæringspunktet
 CP ikke lett lar seg bestemme og ε og η følgelig er vanskelig å bestemme. Para-
 meteren X varierer mellom $\frac{1}{\zeta}$ når $\eta = 1$ til $\mu\gamma$ når $\eta = 0$.

Til sist bør det bemerkes at den spesifikke egenenergi ε og kontaktkraften
 σ er parametre som i vesentlig grad avhenger av slamtrykket p^h og poretrykket p^p .
 20 Både ε og σ øker ved økende slamtrykk p^h , men avtar med økende poretrykk p^p .
 Alle de øvrige størrelser, ζ , μ og γ er praktisk talt uavhengig av slamtrykket.
 Ifølge figur 3 vil en økning av slamtrykket (alle øvrige forhold forblir uforandret)
 medfører en økning av den spesifikke egenenergi ε , hvorved skjæringspunktet CP
 forflyttes oppad på linjen 32 til punktet 38 (linjen 32 er det geometriske sted for
 25 skjæringspunktene), og samtidig forskyves friksjonslinjen FL til den parallelle frik-
 sjonslinje 40 som angitt i figur 3. Det bør også bemerkes at en variasjon av for-
 masjonens poretrykk p^p har samme virkning, dvs. en parallellforskyvning av frik-
 sjonslinjen FL.

Figur 4 viser diagrammet E-S som representerer likningen (13), men med β
 30 > 1 ($\beta < 1$ i figur 3). E_0 er her negativ, hvilket innebærer at hvis borkronebelastningen
 W holdes konstant, vil dreiemomentet T øke med avtakende boringsvirknings-

grad. Disse tilstander med minskende ytelse kjennetegnes ved økende verdier for helningsvinkelen X .

Det er konstatert at under konstante forhold på stedet (uforandret bergart, borefluidtrykk og poretrykk), vil boringsytelsen (T og v) fluktuere hele tiden, men på slik måte at likning (13) tilfredsstilles. Ved borkronen vil kraftfordelingen mellom skjære- og friksjonsprosesser (dvs. virkningsgraden) med andre ord vekse kontinuerlig. De forskjellige boretilstander for en borkrone som drives under uforandrede betingelser, vil derfor gjengis som en stort sett rettlinjert gruppe av punkter i diagrammet E-S ifølge figur 3 eller 4. Samtlige punkter som synes å danne en lineær gruppe i sonen E-S, kan skyldes tilsynelatende ensartede forhold på stedet (samme litologi samt konstant borefluidtrykk og poretrykk). En lineær gruppe vil ideelt reduseres til en rett linje (dvs. en friksjonslinje FL. Spredningen av punkter i en spesiell gruppe har flere årsaker og vil best forstås ved betraktning av likning (24) som viser at i en gitt formasjon er boringsvirkningsgraden η avhengig av

- 1 innsnittsdybden δ pr. omdreining, hvilket gjør det mulig å påføre boringsparametrene (borkronebelastning og rotasjonshastighet) systematisk variasjon og derved fremtvinge forskjellige tilstander i systemet langs friksjonslinjen som derved kan trekkes nøyaktig,
- 2 Kontaktlengden λ , med andre ord ytelsen, er følsom overfor totalstørrelsen av kontaktflaten under skjærene. Denne kontaktlengde kan ikke ventes opprettholdt uforandret, fordi skjærene gjennomgår slitasje- og selvslipingssyklus.
- 3 Kontaktspenningen σ , idet det er teoretiske og eksperimentelle argumenter for det syn at kontaktspenningen (eller kontaktkraften) er meget mer følsom enn den spesifikke egenenergi overfor variasjon i bergartens fysiske karakteristika (såsom porøsitet). Boring av en spesiell formasjon kjennetegnes med andre ord ved en temmelig konstant ε , men mindre ensartet σ (σ -variasjonen er følgelig mer følsom overfor

små variasjoner i bergartens egenskaper).

Bestemmelse av borkroneslitasje og borkronetilklistring

Et annet trinn ved oppfinnelsen har befatning med identifiseringen av de
5 ulike, lineære grupper i diagrammet E-S. Da borefluidtrykket og poretrykket
utvikles stort sett langsomt, vil hver gruppe motsvare en egen litologi. En viss
sikkerhet vedrørende den korrekte identifisering av en gruppe kan oppnås ved å
kontrollere hvorvidt gruppen faktisk er sammensatt av sekvensvise par (E_i , S_i).
Det finnes imidlertid unntakelser som forstyrrer denne verifiseringsprosess, idet
10 eksempelvis en rekke av vekslende lag kan bevirke at boreresultatet hopper
mellom to grupper for hvert av et fåtall punkter. Når borkronen er meget skarp vil
gruppen av punkter i E-S-diagrammet være kompakt og ligge tett ved skjærings-
punktet CP, fordi størstedelen av boringsenergien utnyttes for skjæring i fjellforma-
sjonen og meget lite går tapt i friksjonen. Ettersom borkronen nedslites, vil grup-
15 pen forskyves mot høyre på friksjonslinjen og vil også utstrekkes, fordi mer og mer
energi tapes på grunn av friksjonen. Slitasjens innvirkning på boreresultatet for
skrapekroner bestemmes imidlertid i stor grad av hardheten av bergarten som
bores. I hardere fjell vil boreresultatet for en slik borkrone kjennetegnes ved stør-
re fluktuasjoner i dreiemoment og inntrengingshastighet, og generelt ved en ned-
20 satt ytelse. I E-S-diagrammet motsvares disse kjennetegn av en punktgruppe
som er mer langstrakt og beliggende i større avstand fra punktet for optimal drift
ved hard bergart. En av årsakene til berghardhetens innvirkning på boreresultatet
for en slitt borkrone er forholdet mellom de maksimale spenninger som kan over-
føres gjennom skjærsliteflatene og berghardheten, idet jo hardere fjellet er desto
25 større blir borkronebelastningens maksimumskomponenter i tilknytning til frik-
sjonsprosessene.

Borkronetilklining har samme signatur som borkroneslitasje i E-S-diagram-
met. Borkronetilklining forekommer vanligvis grunnet boring i bløt skifer og dårlig
rengjøring av borkronen, slik at borkakset kleber til denne. I slike tilfeller vil en del
30 av dreiemomentet medgå for å overvinne en friksjonsmotstand i forbindelse med
den innbyrdes glidebevegelse av skiferleiren som kleber til borkronesokkelen og
skiferleiren som fremdeles befinner seg på plass (idet skiferleire i dette tilfelle
antas som eksempel). I tilfelle av en borkrone-tilklining bør boreforholdenes

avbildningspunkter atter ligge på en friksjonslinje i E-S-diagrammet. Det foregående bilde av friksjonsprosessene under skjærene vil åpenbart ikke stemme nøyaktig for borkrone-tilklining, og borkronekonstanten γ kan derfor ikke ventes å være den samme. Det kan påvises at $\gamma = 4/3$ hvis borkronen fungerer som en plan friksjonsflate. I fravær av ytterligere informasjon kan det antas at γ -konstanten utgjør 1-1.33 ved borkrone-tilklining.

Den fundamentale virkning både av borkroneslitasje og -tilklining er i realiteten å øke kontaktlengden λ (denne variasjon av λ vil, ifølge likning (24) innvirke på boringsytelsen η . Som tidligere omtalt kan denne kontaktlengde ikke utledes direkte av boredataene, men bare "kontaktkraften" $\lambda\sigma$. Denne kontaktkraft $\lambda\sigma$ representerer følgelig den beste størrelse som er tilgjengelig for bestemmelse av borkroneslitasje eller -tilklining, og kan beregnes av (25) forutsatt at den spesifikke egenenergi ε og helningsvinkelen $\mu\gamma$ er bestemt.

Betydelig økning av kontaktkraften $\lambda\sigma$ kan i det minste benyttes som et middel for å fastslå uvanlig borkroneslitasje og -tilklining. Det er generelt mulig å skjelne mellom disse to årsaker. Borkrone-tilklining har riktignok tendens til å forekomme i "bløte" formasjoner som kjennetegnes ved temmelig små verdier for friksjonskoeffisienten μ (typisk under 0,5) men relativt store verdier for den spesifikke egenenergi ε , mens innvirkningen av borkroneslitasje på borerresultatet vil være mer markert i "harde" formasjoner som kjennetegnes generelt ved høyere verdier for μ (typisk over 0,5) men relativt små verdier for ε .

Det er åpenbart, at bare hvis kontaktspenningen σ kan bedømmes separat, vil kontaktlengden λ kunne utledes av boredataene. Ved relativt homogene formasjoner er det imidlertid grunn til å anta at σ vil være tilnærmevis konstant. I såfall kan variasjoner av kontaktrykket $\lambda\sigma$ hovedsakelig skyldes endring i kontaktlengden, slik at en relativ forandring av λ ihvertfall kan oppspores.

Tolking av boredata

De trinn som må gjennomføres for dataredusering og konstantidentifisering ved rådende forhold på stedet, omfatter derfor

- beregning av paret (E_i, S_i) for hvert dybdeintervall, på grunnlag av rådata $(W_i, T_i, v_i, \omega_i)$,

- avsetting av parene (E_i , S_i) i diagrammet E-S, og
- identifisering av lineære grupper i dette diagram.

Etter betraktning av en lineær gruppe av punkter, kan flere størrelser beregnes eller identifiseres.

5 **Beregning av E_0 og $\mu\gamma$.** De beste beregninger av de to parametre E_0 og $\mu\gamma$ som karakteriserer friksjonslinjen, foretas først ved gjennomføring av en lineær regresjonsanalyse av de datapunkter som tilhører samme gruppe. Skjæringspunktet mellom regresjonslinjen og E-aksen gir E_0 og den lineære gruppes helningsvinkel gir ($\mu\gamma$).

10 **Bergartens indre friksjonsvinkel.** Den sikreste parameter som beregnes for gruppen, er friksjonslinjens helningsvinkel $\mu\gamma$. Hvis borkronekonstanten γ er kjent (enten grunnet informasjon fra kronefabrikanten, eller ved analyse av tidligere borede segmenter) kan μ beregnes og deretter bergartens indre friksjonsvinkel φ , da $\mu = \tan\varphi$.

15 Hvis γ er ukjent, kan den generelt settes til 1. Denne verdi som representerer den teoretiske nedre grense for γ , skiller seg sannsynligvis ikke mer enn 20% fra den faktiske verdi av γ . Ved å sette $\gamma = 1$ vil φ overbestemmes.

Identifisering av skjæringspunktet eller den spesifikke egenenergi.

20 Det neste trinn består i å identifisere det "nedre-venstre" (LL) punkt i gruppen, som vil motsvare skjæringspunktet CP hvis boreytelsen var lik 1. Punktet LL overensstemmer med den beste boringsvirkningsgrad som er oppnådd under den del av boringen som representeres av datagruppen. Dette punktet vil ideelt kunne identifiseres utvetydig, det motsvarer minimumsverdien for boretrykk og spesifikk energi i gruppen og befinner seg nær ved en friksjonslinje som beregnes av bore-

25 dataene ved minste kvadraters metode. I tilfelle av en viss flertydighet, idet eksempelvis punktet "lengst til venstre" motsvarende minimumsverdien for S_i , ikke sammenfaller med det "nederste" motsvarende minimumsverdien for E_i , velges punktet nærmest regresjonslinjen. Det påpekes at punktet må forkastes hvis det kjennetegnes ved en helningsvinkel X over 2,5, fordi en stor helningsvinkel sann-

30 synligvis vil medføre visse problemer med målingen av rådata. Under antagelse av at LL-punktet er kjent, kan E_* og S_* betegne punktets koordinater og X_* forholdet mellom E_* og S_* .

Det er av interesse å beregne den spesifikke egenenergi ε , basert på bore-

dataene, fordi denne størrelse kan tolkes ytterligere uttrykt ved bergartens mekaniske parametre, slamtrykket og poretrykket. En nedre grense for ε er skjæringspunktet E_0 mellom friksjonslinjen og E-aksen, mens den øvre grense er ordinaten E_* for LL-punktet.

5 Følgelig er

$$E_0 < \varepsilon \leq E_*$$

Hvis borkronen er ny, kan LL-punktet befinne seg meget nær skjæringspunktet CP ($\eta = 1$), dvs. $\varepsilon \approx E_*$. Kvaliteten av E_* som en beregning av ε kan bedømmes av verdien for X_* . I skjæringspunktet er parameteren X lik ζ^{-1} . For en
10 borkrone med en vanlig middel-bakuthelningsvinkel av 15° vil parameteren ζ typisk ligge mellom 0,5 og 1, og X_* bør derfor ligge mellom 1 og 2. E_* vil følgelig gi en god beregning av den spesifikke egenenergi, hvis X_* ligger mellom 1 og 2.

For en slitt borkrone er forskjellen mellom den øvre og den nedre grense for stor til at disse grenser kan utnyttes. ε kan bestemmes som følger. Ved å anta
15 en verdi for ζ , kan ε beregnes med likning (13) under anvendelse av de to regresjonsparametre E_0 og $(\mu\gamma)$:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{1 - \mu\gamma\zeta} \quad (29)$$

Borkroneytelse. Når ζ og $\mu\gamma$ er bestemt, kan borings-virkningsgraden η_i
20 for hvert datapunkt beregnes ifølge likning (18). Alternativt kan η beregnes ut fra den definisjon som er gitt i likning (16). Den lineære gruppes minimums- og maksimumsyttelse, betegnet med henholdsvis η_l og η_u , identifiseres.

Kontaktkraft. Når ε og $\mu\gamma$ er bestemt, kan kontaktkraften $(\lambda\sigma)_i$ for hvert datapunkt beregnes ifølge likning (25).

Kroneslitasje. Minimums- og maksimumsyttelsen, η_l og η_u , og kontaktkraften $\lambda\sigma$ kan benyttes for vurdering av borkronens slitasjetilstand. Det ventes,
25 som tidligere omtalt, at datagruppen vil strekkes og forflyttes oppad langs friksjonslinjen, (motsvarende en synkning i boringsyttelse) når borkronen nedslites. Utviklingen av η_l og η_u under boring vil derfor indikere kroneslitasjen. Et bedre
30 mål på slitasjen er imidlertid kontaktkraften $\lambda\sigma$, da λ øker med økende kroneslitasje. Slitasjens innvirkning på kontaktkraften avhenger imidlertid av kontakttrykket for bergarten som bores.

Kronetilklining. De nødvendige, innledende trinn for konstatering av

kronetilklining er de samme som for kroneslitasje: Analysering av gruppens plassering på friksjonslinjen og beregning av boringsytelsen og kontaktkraften. Eksistensen av kronetilklining vil avspeiles i små verdier for boringsytelsen og store verdier for kontaktkraften, og i motsetning til den lave boringsytelse ved boring av harde bergarter med en slitt borkrone, vil kronetilklining forekomme i bløte bergarter (hovedsakelig skiferleire) uansett om borkronen er ny eller utslitt. En lav middelytelse kan følgelig være symptomatisk for kronetilklining, hvis friksjonskoeffisienten μ er mindre enn 0,5 og/eller hvis gruppen inneholder punkter som kjennetegnes ved høy virkningsgrad.

10 **Endring av litologi.** Bergarter med forskjellige egenskaper motsvarer friksjonslinjer med ulike helningsvinkler og forskjellige verdier for E_0 . Det er derfor lett å identifisere en endring av litologi under boring, når boredataene ikke lenger tilhører samme, lineære gruppe men en ny gruppe.

De ovennevnte eksempler på hvordan oppfinnelsen kan utøves, er beskrevet ved avsetting av et diagram E-S. Alternativt kan imidlertid tolkingen av boredataene gjennomføres automatisk med en datamaskin-algoritme, uten at verdiene (E_i , S_i) må avsettes.

Eksempler

20 **Laboratorieeksempel.** Boredataene som i dette eksempel benyttes for å illustrere tolkingemetoden, ble innsamlet i løpet av en rekke laboratorieforsøk i full målestokk med Mancos skifertyper, ved anvendelse av en PDC-borkrone av trinntype, med 21,6 cm diameter. Boreforsøkene ble gjennomført ved konstant borehulltrykk, begrenset spenning, overdekningsbelastning og slamtemperatur, med varierende rotasjonshastighet, borkronetyngde og strømningshastighet. De her analyserte data ble oppnådd ved anvendelse av et roterende drivsystem. I disse eksperimenter varierte rotasjonshastigheten mellom 50 og 450 omdreininger/minutt, og det ble anvendt fire nominelle verdier for WOB: 8.9, 17.8, 26.7, 35.6kN. Dataene i motsvarighet til $W = 8.9$ kN kjennetegnes ved ytterst små verdier for inntrengningen pr. omdreining (δ ca. 0,1 mm). Disse ble utelatt fra analysen, fordi små feil ved måling av inntrengningsgraden kan forårsake store variasjoner i de beregnede verdier for E og S.

Laborieredata-diagrammet E-S er vist i figur 5. Punktene er kodet, uttrykt

ved WOB: sirklene (o) for 8.000 lbfs (35,6 kN) stjernene (*) for 6.000 lbfs (26,7 kN) og plusstegnet (+) for 4.000 lbfs (17,8 kN). En lineær regresjon på dette data-sett gir følgende beregninger: $E_0 \approx 150$ MPa og $\mu\gamma \approx 0,48$. Under antakelse av at borkronekonstanten γ er lik 1, er friksjonsvinkelen tilnærmelesvis 26° (dvs. $\mu = \tan\phi$). Denne verdi bør betraktes som en øvre grense for den indre friksjonsvinkel hos Mancos skifer (publiserte verdier for ϕ , utledet av konvensjonelle, triaksiale forsøk, er ca. $20-22^\circ$). Som tidligere omtalt representerer E_0 skjæringspunktet mellom friksjonslinjen og E-aksen, en nedre grense for den spesifikke egenenergi ε , mens en øvre grense angis av ordinaten for punktet "nederst til venstre" (LL) i datagruppen. LL-punktet er her kjennetegnet ved $E \approx 230$ MPa og $S \approx 160$ MPa og ved et forhold $X = \text{ca. } 1.44$. Dette punkt befinner seg sannsynligvis nær ved det optimale skjæringspunkt, fordi borkronen er ny og verdien for X er relativt høy. Punktet LL "nederst til venstre" er følgelig vurdert til å overensstemme med skjæringspunktet CP og skjæringsparametrene er beregnet til: $\varepsilon = 230$ MPa og $\zeta = 0,69$.

Kodingen av punktene på diagrammet E-S viser at boringsytelsen øker med WOB i denne forsøksrekke. Originaldataene indikerer også at ytelsen synker med øket rotasjonshastighet av borkronen.

20 Felteksempel 1.

Det ble i dette tilfelle benyttet et datasett fra et boringssegment i en fordampingssekvens i Zechsten-formasjonen i Nordsjøen. Dreiemomentet og WOB er målt i brønnen med et MWD-verktøy. Hvert data representerer et 30 cm intervall. Segmentet av interesse har en lengde av 76,5 m i dybdeområdet 2.780 - 2.851 m og ble boret ved anvendelse av en tildels slitt PDC-krone med en diameter av 31,11 cm. Det valgte intervall omfattet i realiteten to forskjellige sekvenser i Zechstenen: nemlig "Liene Halite" av tykkelse 53,34 m i den øvre del og "Hauptanhydrit" av ca. 15,24 m tykkelse i den nedre del.

Liene Halite. En analyse av E-S-diagrammet (figur 6) for Liene Halite-formasjonen viser at dataene er adskilt i fem grupper, betegnet H1 - H5. Tabell 1 gjengir symbolene som er benyttet for markering av gruppene i figur 6 og dybdeområdet i tilknytning til hver gruppe. Splittingen av nevnte Liene Halite i 5 sekvenser, H1 - H5, og deres tilknyttede dybdeintervall basert på E-S-diagrammet støttes av den

geologiske rapport og gammastråle-diagrammet (avsatt i figur 7). Laget H1 mot-
 svarer gammastråleverdier av moderat størrelse og noe feilaktige. Det sannsyn-
 lige emne for H1-litologien ble identifisert som et blandet salt, muligens carnalitt.
 Laget H2 motsvarer en annen saltlitologi, og kjennetegnes ved meget jevne
 5 gammastråleverdier av størrelse 60-70. Litologien for H3 er sannsynligvis en rød
 leirskifer som først ble observert i borkakset fra dybden 2801 m. Gammastrålen
 for dette dybdeintervall viser en overgangsform fra de høye verdier for H2 til lave
 verdier (ca. 10) som kjennetegner lagene H4 og H5. På grunnlag av borkaksana-
 lyse og gammastråleverdier ble H5 til sist entydig identifisert som et stensaltlag.

10

Sekvens	Symbol	Dybdeområde i meter
H1	'.'	2.780 - 2.790
H2	'x'	2.790 - 2.800
H3	'o'	2.800 - 2.805
15 H4	'+'	2.805 - 2.808
H5	'*'	2.808 - 2.834

Tabell 1:

Dybdeområde for sekvensene H1-H5 i "Liene Halite"

De bestemte verdier for E og $\mu\gamma$ i den lineære regresjon for hver sekvens
 20 H1-H5 er gjengitt i spalte 2 og 3 i Tabell 2. Det fremgår at det i hver gruppe av
 sekvensdatapunkter som definerer hvert av lagene H1 - H5, forekommer noen få
 "merkede" punkter som kunne ha stor innvirkning på resultatene av en regresjons-
 beregning, (f.eks. de seks punkter i H5-sekvensen, som kjennetegnes ved et
 boretrykk S under 100 MPa). Av denne grunn er disse punkter ikke tatt i betrakt-
 25 ning ved beregningen av de minste kvadrater.

30

Sekvens	E_0 (MPa)	$\mu\gamma$	ϕ	ε (MPa)
H1	182.	0,25	14°	214.
H2	109.	0,15	8°	120.
H3	116.	0,43	23°	156.
H4	99.	0.74	37°	178.
H5	(-3.6)	(1.56)	(57°)	(N/A)

Tabell 2:

Beregnete parametre for sekvensene H1-H5 identifisert i "Liene Halite"-formasjonen.

Friksjonsvinkelen φ , beregnet av $\mu\gamma$ hvor borkronekonstanten γ er satt lik 1, er også gjengitt i spalte 4 i Tabell 2. Det fremgår at det for friksjonsvinkelen for H1 og H2 er anslått en meget lav verdi, forenelig med en salttype-litologi. For H3 er φ satt til 23° , hvilket er forenelig med at litologien for H3 er diagnostisert som en leirskifer.

Den anslåtte friksjonsvinkel for H5 reiser imidlertid et problem, fordi stensaltet kjennetegnes ved en friksjonsvinkel som i realiteten er lik null, ved de trykk- og temperaturforhold som råder i disse dybder. En "friksjonslinje" for et materiale som stensalt burde følgelig forløpe parallelt med S-aksen. Det antas at boredataene for stensaltlaget i realiteten er lokalisert på skjæringsstedet, dvs. på en helningslinje ζ^{-1} som passerer gjennom E-S-diagrammets origo. En meget lav verdi for skjæringspunktet ($E_0 \sim -4$ MPa) og den høye verdi for helningen ($\mu\gamma \sim 1.56$) tyder i virkeligheten på at denne hypotese er sannsynlig, og i såfall $\zeta \sim 0,64$. I dette scenarium ville en variasjon i boringsmønsteret skyldes variasjon i stensaltkohesjonen. (I kompetente bergarter vil den spesifikke egenenergi påvirkes i stor grad av slamtrykket og bare moderat av kohesjonen c , fordi c avtar hurtig etter en liten skjærdeformering, i motsetning til stensaltet som fortsatt vil være koherent også etter stor deformering, og - er uavhengig av slamtrykkets størrelse).

Til sist er den spesifikke egenenergi - for sekvensen H1-H4 beregnet av likning (22) under antakelse av at $\zeta = 0,6$. Resultatene er gjengitt i spalte 5 i Tabell 2.

25

Hauptanhydrit. Ifølge den geologiske rapport består litologien i sekvensen nedenfor "Liene Halite" av temmelig rent anhydritt. Det viser seg at i E-S-diagrammet i Figur 8 danner samtlige data vedrørende dybdeintervallet 2 836 - 2 850 m en sammenhengende gruppe. Denne identifikasjon av en ensartet litologisekvens korrelerer meget bra med gammastråleloggen (ikke vist) som indikerer en stort sett ensartet, lav gammastråle-telleverdi (under 10) i dette dybdeintervall.

30

Ved beregning ifølge minste kvadraters metode fremkommer en helnings-

vinkel $\mu\gamma \approx 0,96$ og ved en avskjæring $E_0 \approx 38$ MPa for regresjonslinjen, som også er avsatt i Figur 8. Hvis det atter antas $\gamma = 1$, kan friksjonsvinkelen anslås til 44° . Ved bruk av likning (22) og antatt at $\zeta = 0,6$, beregnes den spesifikke egenenergi ε til 90 MPa. Denne lave, anslåtte verdi for ε er sannsynligvis suspekt, fordi beregningen av ε , ved en relativt sterkt hellende friksjonslinje, er meget følsom overfor den antatte verdi for ζ og den anslåtte verdi for skjæringen E_0 .

Felteksempel 2

I dette eksempel, likeledes fra Nordsjøen, er samtlige boredata resultat av overflatemålinger.

Det angjeldende hullsegment ble boret med en krone av 31,11 cm diameter. Borkronens påmonterte enkeltskjær var på vanlig måte anordnet med 30° bakuthelning. Jevnført med en borkrone som kjennetegnes ved 15° bakuthelning, er denne store verdi for bakuthelningen årsak til en økning av den spesifikke egenenergi. Hullengden som ble boret med denne borkrone, hadde en lengde av ca. 122 m mellom dybden henholdsvis 3 139 og 3 264 m. De første 102 m av segmentet ble boret gjennom en kalkstensformasjon og de siste 23 m gjennom en skifer. Boredataene ble registrert med en frekvens av ett datasett pr. 30 cm.

Figur 9 viser det motsvarende E-S-diagram, hvor datapunktene for kalkstensintervallet er representert ved en sirkel (o) og for skiferformasjonen med et pluss-tegn (+). De to punktsett skiller seg i realiteten i to grupper. En regresjonsanalyse gir etterfølgende verdier for de to friksjonslinjers koeffisienter. For kalkstenen: $E_0 \approx 14$ MPa og $\mu\gamma \approx 1$, og for skiferen: $E_0 \approx 280$ MPa og $\mu\gamma \approx 0,43$. Den lave verdi for friksjonslinjens helningsvinkel antyder at borkronekonstanten γ her er lik ca. 1. Friksjonsvinkelen anslås til ca. 45° for kalkstenen og 23° for skiferen. Den spesifikke egenenergi er i dette tilfelle ikke beregnet, fordi disse overflatemålinger ikke er tilstrekkelig nøyaktige til å garantere en slik beregning.

Endelig er det en stor mulighet for at boringen gjennom skiferformasjonen ble hemmet av kronetilklining. Skifergruppen i E-S-diagrammet er faktisk meget utstruktet. Hvis det grovt anslås en verdi av 50 MPa for skiferens spesifikke energi, innebærer dette at størstedelen av punktene kjennetegnes ved en virkningsgrad av 0,2 - 0,4. Denne lave virkningsgrad ved boring i bløtt fjell indikerer i realiteten at kronetilklining har funnet sted.

Liste over parametre

(enkelte kan ha indeksen «i», hvilket angir at de hører til et sett ved en spesiell dybde)

5	ε	spesifikk egenenergi
	φ	bergartens indre friksjonsvinkel
	η	bore-virkningsgrad
	X	forholdet mellom spesifikk energi og boretrykk
10	W	belastning på borkronen
	T	dreiemoment på borkronen
	ω	borkronens vinkelrotasjons hastighet
	v	borsynk
	E	spesifikk energi
15	S	boretrykk
	a	borkrone-radius
	γ	borkronekonstant
	μ	friksjonskoeffisient
	β	$\gamma\mu\zeta$ - en kombinert parameter
20	\vec{F}^c	kraft på kutter
	F_n^c	kraftkomponent normalt på bergarten
	F_s^c	kraftkomponent parallelt med bergarten
	s	kuttets tverrsnittsareal
	ζ	forholdet mellom vertikale og horisontale krefter på borkronens skjærflate
25	θ	kutterens bakuthelning
	ψ	friksjonsvinkel ved bergart/kutter-grenseflate
	\vec{F}	skjærkraft
	\vec{F}^f	kraft på skjæret der det er plant
30	F_n^f	kraftkomponent normalt på bergarten
	F_s^f	kraftkomponent parallelt med bergarten
	F_s	horisontal kraftkomponent
	F_n	vertikal kraftkomponent

	T_c	dreiemomentskjærekomponent
	T_f	dreiemoment-friksjonskomponent
	W_c	belastning på borkrone-skjærkomponent
	W_f	belastning på borkrone-friksjonskomponent
5	δ	dybde av kutt pr borkrone-omdreining
	W^f	belastning på borkroneskjær-sliteflatekomponent
	A^f	kombinert skjærkontakt-overflateareal (sliteflater)
	σ	gjennomsnittlig kontaktspenning (sliteflater)
	λ	borkrone-kontaktlengde
10	w_*^f	borkrone-belastningskomponent-terskel
	λ_*	kontakttrykk, hardhet
	σ_*	fullt virksom borkrone-kontaktlengde
	E^c	spesifikk boreenergi-skjæreeffektiv-komponent
	E^f	spesifikk boreenergi-friksjonsspredningskomponent
15	p^h	slamtrykk
	p^p	poretrykk
	η_l	boreytelse
	η_u	maksimum boreytelse

20

25

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for bestemmelse av boreforholdene i forbindelse med boring av et hull gjennom undergrunnsformasjoner, som hver tilsvarer en spesiell
 5 litologi, hvor hullet bores med en roterende skrapekrone og hvor belastningen W på borkronen, borkronens dreiemoment T , borkronens vinkelrotasjonshastighet ω og borsynk v måles for fremskaffing av et sett av data $(W_i, T_i, v_i, \omega_i)$ som svarer til forskjellige dybder, k a r a k t e r i s e r t v e d at den omfatter følgende trinn:

- beregning av en spesifikk energi E_i og boretrykket S_i fra hvert datasett $(W_i, T_i, v_i, \omega_i)$ i henhold til likningene

$$E = \frac{T\omega}{v\pi a^2} \quad \text{og} \quad S = \frac{W\omega}{2v\pi a}$$

(hvor a er borkrone-radien);

- ordning av vedisettene (E_i, S_i) som et grafisk plott av E_i -verdiene mot S_i -verdiene;
- identifisering av minst én lineær gruppe av verdier (E_i, S_i) hvilken gruppe svarer til en spesiell litologi; og
- bestemmelse av boreforholdene på grunnlag av den lineære gruppe.

2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av den lineære gruppes helningsvinkel som defineres som forholdet mellom E -variasjonen og den motsvarende S -variasjon og som er tilknyttet produktet av en borkronekonstant γ og en friksjonskoeffisient μ .

3. Fremgangsmåte ifølge krav 2, k a r a k t e r i s e r t v e d beregning av verdien for friksjonskoeffisienten μ på grunnlag av helningsvinkelen og en kjent eller antatt verdi av γ .

4. Fremgangsmåte ifølge krav 3, k a r a k t e r i s e r t v e d utledning av en indikasjon på formasjonens indre friksjonsvinkel φ , basert på verdien for friksjonskoeffisienten μ , under anvendelse av likningen $\mu = \tan \varphi$.

5. Fremgangsmåte ifølge krav 2 og 3, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av den spesifikke egenenergi ε , basert på følgende forhold

$$\varepsilon = \frac{E_0}{1 - \mu\gamma\zeta}$$

5

hvor E_0 er skjæringspunktet mellom forlengelsen av den lineære gruppe og E-aksen, $\mu\gamma$ er helningen og ζ er en konstant.

10 6. Fremgangsmåte ifølge krav 5, k a r a k t e r i s e r t v e d bedømmelse av mengden E^f av boreenergien som forbrukes i friksjonsprosessen i en viss dybde, ved jevnføring av verdien E_i i nevnte dybde med den spesifikke egenenergi ε .

15 7. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av ytelsen η ved boreprosessen i en spesiell dybde ved konstatering av den posisjon av paret (E_i , S_i) i den lineære gruppe, som motsvarer den spesielle dybde, under anvendelse av likningen

$$\eta = \frac{E - \mu\gamma S}{E(1 - \gamma\mu\zeta)} .$$

20 8. Fremgangsmåte ifølge krav 7, k a r a k t e r i s e r t v e d at den høyeste ytelsen som oppnås ved boring av den spesielle litologi, bestemmes ved identifisering av den minimumsverdi for E_i og S_i som motsvarer den høyeste virkningsgrad.

25 9. Fremgangsmåte ifølge krav 7, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av den spesifikke energi ε , basert på minimumsverdien for E_i under anvendelse av likningen $\varepsilon = \eta E$.

30 10. Fremgangsmåte ifølge krav 9, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av den mengde E^f av boreenergien som forbrukes i en friksjonsprosess i en viss dybde, ved jevnføring av verdien E_i i nevnte dybde med den spesifikke egenenergi ε .

11. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av boreprosessens virkningsgrad i en viss dybde ved beregning av forholdet E_i/S_i i nevnte dybde.
- 5
12. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 7 og 11, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av de verdier (E_i , S_i) i tilknytning til skjæringspunktet, som motsvarer en ytelse η tilnærmelsesvis lik 1, og bestemmelse av det geometriske punkt for samtlige skjæringspunkter hvis koordinater (E_i , S_i) motsvarer en borings-ytelse
- 10 tilnærmelsesvis lik 1 når det inntreffer en endring i formasjonsporetrykket og/eller i borefluidtrykket, idet det geometriske sted bestemmes av et lineært forhold mellom paret $E = 0$, $S = 0$) og paret (E_i , S_i).
13. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d bestemmelse av borkronens slitasjetilstand med etterfølgende beregning av verdiene E og S under boring, idet en skarp borkrone kjennetegnes ved relativt små verdier for E og S , som øker med økende slitasje av borkronen, med derav følgende utstrekking av den lineære gruppe mot høyere verdier for E og S .
- 15
14. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 7 og 11, k a r a k t e r i s e r t v e d oppsporing av forekommende borkronetilklining ved jevnføring av de suksessive verdier for boringsytelsen, beregnet under igangværende boring i en bløt formasjon, og identifisering av små verdier for boringsytelsen.
- 20
15. Fremgangsmåte ifølge krav 14, k a r a k t e r i s e r t v e d at oppsporingen av en borkronegjenklining omfatter bestemmelse av verdien for friksjonskoeffisienten μ (som beregnet ved fremgangsmåten ifølge krav 3), og konstatering av borkronegjenklining dersom verdien for μ er mindre enn 0,5.
- 25
16. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d oppsporing av en litologiendring ved identifisering av begynnelsen til en annen, lineær gruppe hvis helning er forskjellig fra den første, lineære gruppes helning, mens borefluidtrykket p^h har vært holdt relativt konstant.
- 30

17. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d at i det minste en del av dataene (W_i, T_i, v_i, ω_i) er middelveidier for W, T, v og ω gjennom forutbestemte dybdeintervaller.
- 5
18. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d variering av minst én av boreparametrene, borkronebelastningen W og rotasjonshastigheten ω , for mer nøyaktig definering av den lineære gruppe.
- 10
19. Fremgangsmåte ifølge krav 7 eller 11, k a r a k t e r i s e r t v e d at den benyttes for å bestemme skrapeborkronens ytelse ved boring gjennom en hovedsakelig ensartet bergart med kjente egenskaper.
- 15
20. Fremgangsmåte ifølge krav 19, k a r a k t e r i s e r t v e d at ytelsene til minst to skrapeborkroner bestemmes og sammenliknes, idet fremgangsmåten for hver borkrone omfatter bestemmelse av helningsvinkelen til hver lineære gruppe og bestemmelse av borkrone-ytelsen fra nevnte helningsvinkel, idet borkronen med høyere ytelse identifiseres med den lineære gruppe med lavere helningsvinkel.
- 20
21. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav, k a r a k t e r i s e r t v e d at kontaktlengden λ og kontaktspenningen σ bestemmes og utviklingen av kontaktkraften $\lambda\sigma$ overvåkes for å bestemme endringer i borkroneslitasje og litologi.

Fig.1

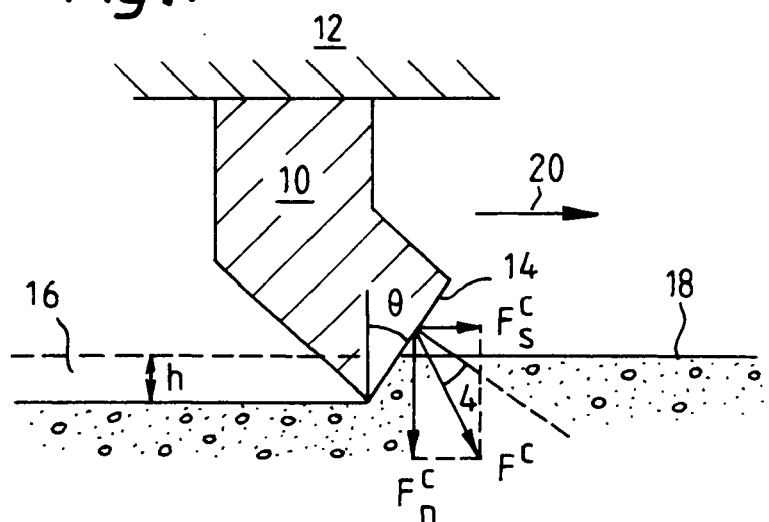
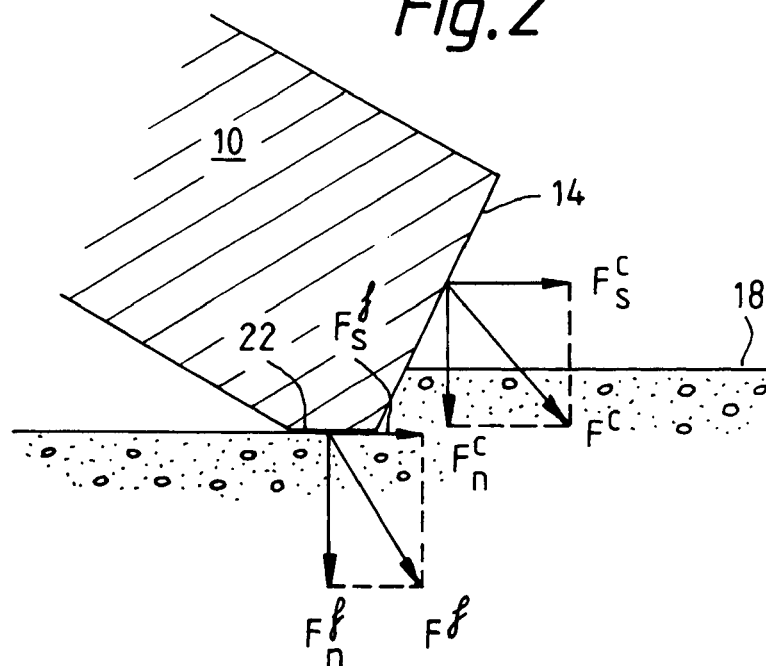


Fig.2



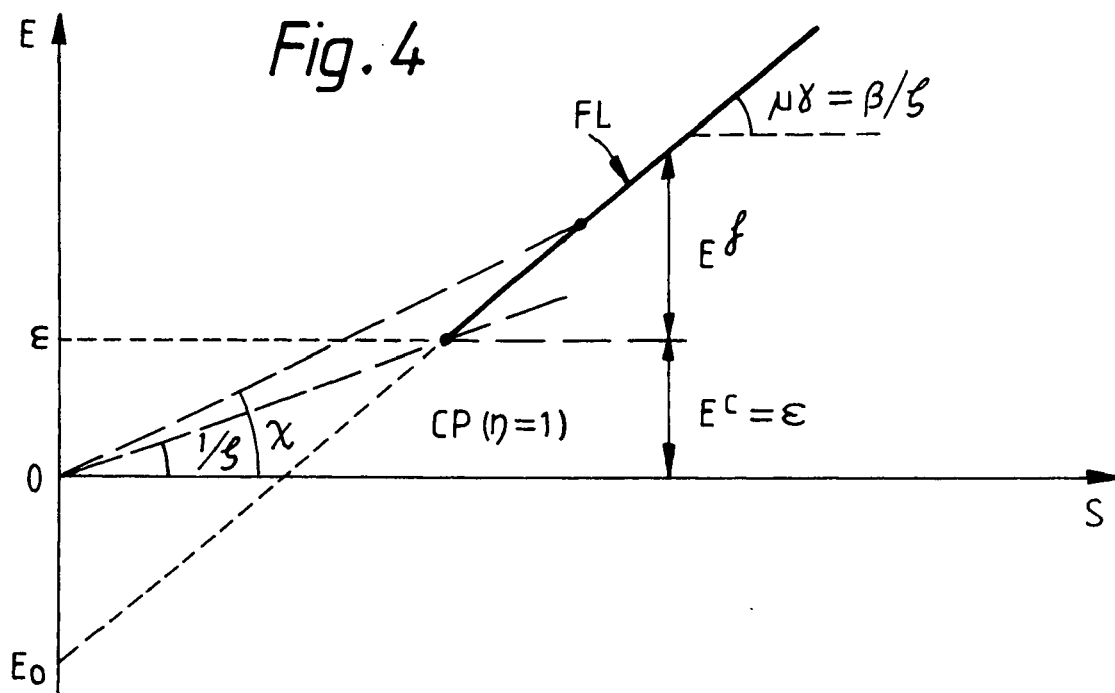
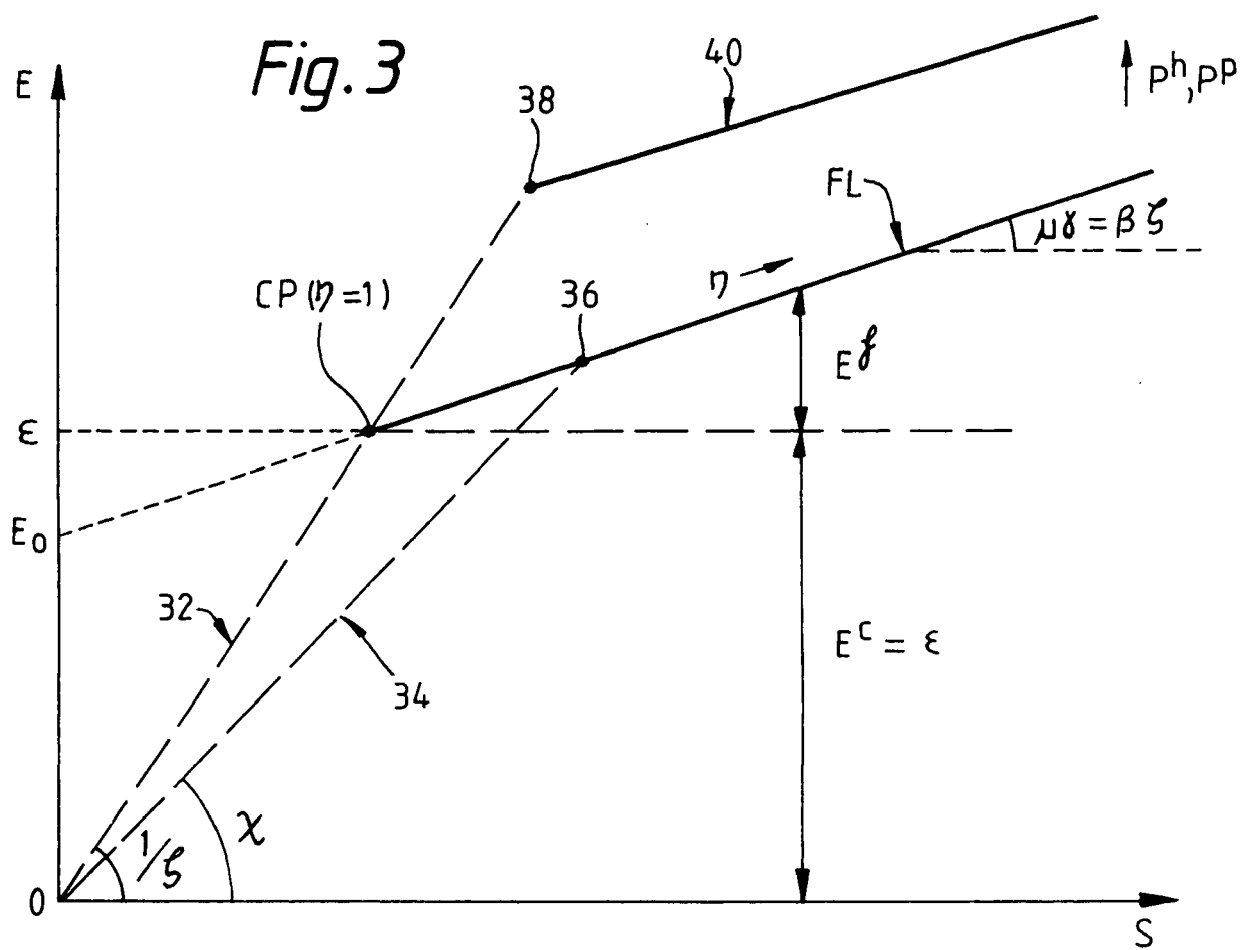


Fig. 5

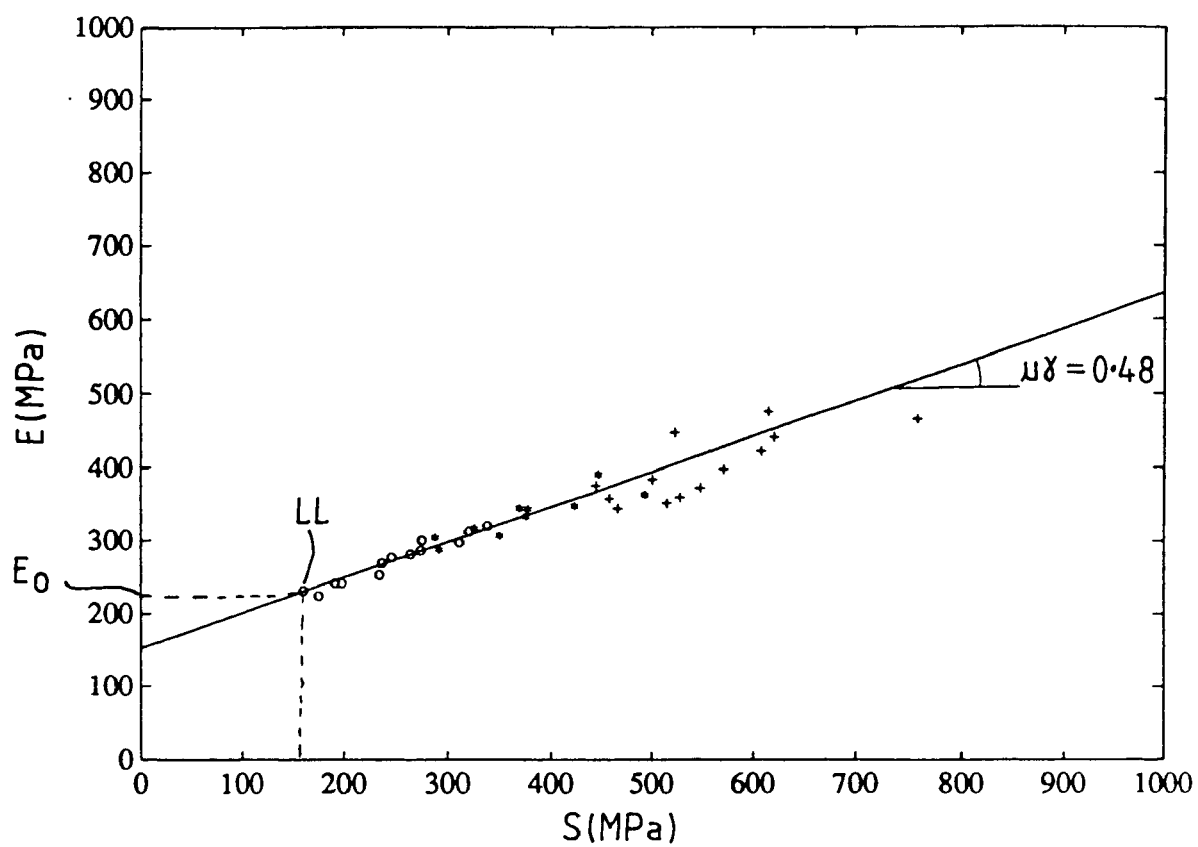


Fig. 6

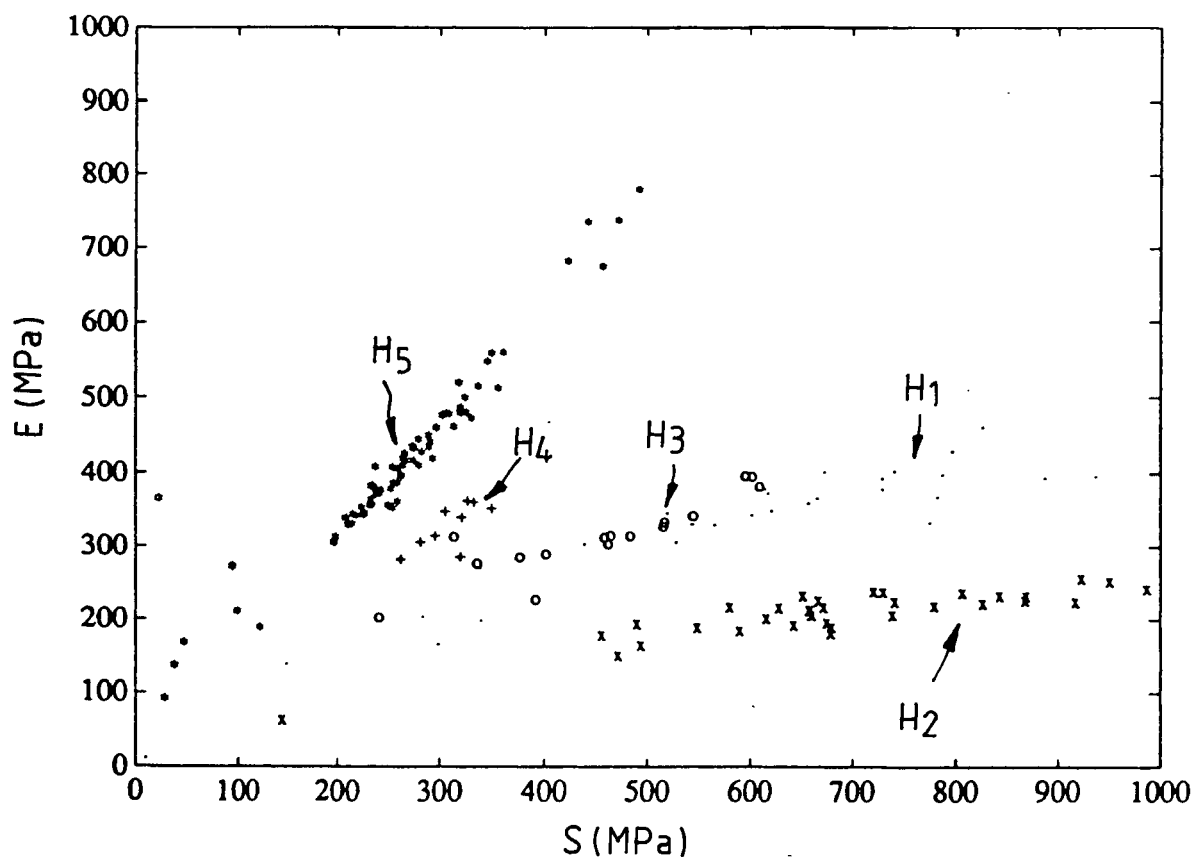


Fig. 7

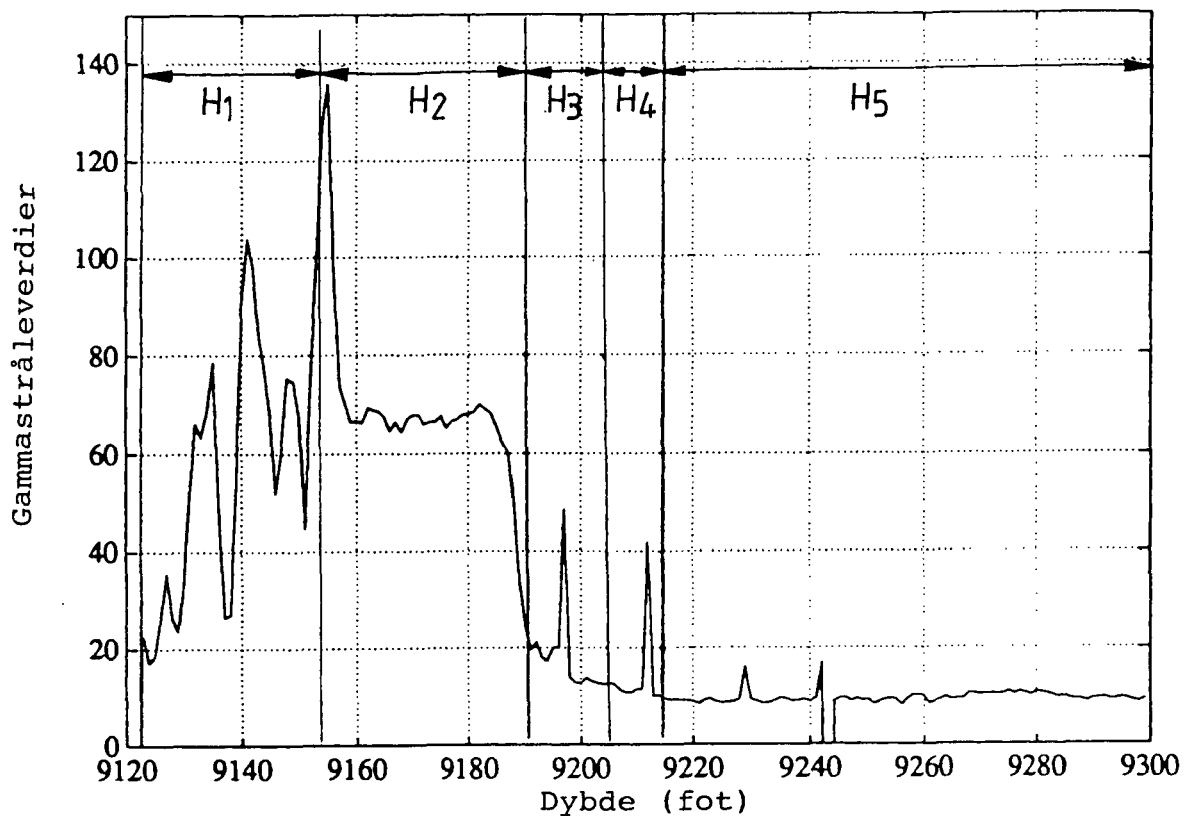


Fig 8

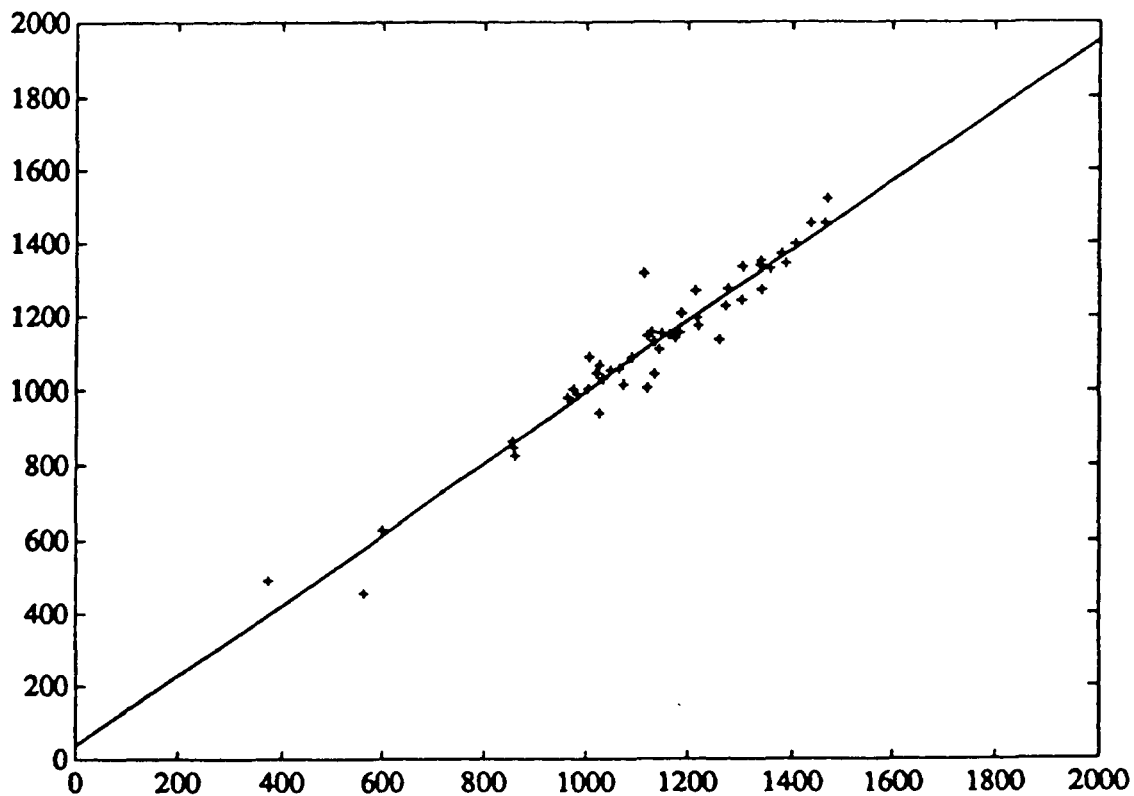


Fig. 9