



NORGE

(12) PATENT

(19) NO

(11) 312853

(13) B1

(51) Int Cl⁷ E 21 B 47/022

Patentstyret

(21) Søknadsnr	19944289	(86) Int. inng. dag og søknadsnummer	
(22) Inng. dag	1994.11.10	(85) Videreføringsdag	
(24) Løpedag	1994.11.10	(30) Prioritet	1993.11.17, US, 154200
(41) Alm. tilgj.	1995.05.18		
(45) Meddelt dato	2002.07.08		

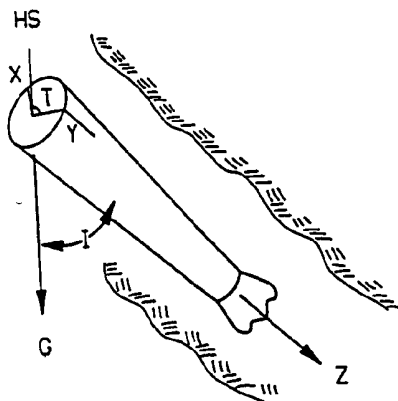
(71) Patenthaver	Baker Hughes Inc, P O Box 4740, Houston, TX 77210-4740, US
(72) Oppfinner	Andrew Goodwin Brooks, Tomball, TX, US
(74) Fullmektig	Bryns Zacco AS, 0106 Oslo

(54) Benevnelse **Fremgangsmåte for korreksjon av aksiale og tverrgående feilkomponenter i magnetometermålinger ved borehullsundersøkelser**

(56) Anførte publikasjoner EP A1 384537, GB A 2138141, US 4682421, US 5398421

(57) Sammendrag

Den foreliggende oppfinnelse er rettet mot to teknikker for å minimalisere innflytelsen av magnetfeltskjevhetsfeil, hvilke kan anvendes sammen eller alene til å forbedre brønnhullsundersøkelselesninger ved å eliminere innflytelsen av tverrgående magnetometerskjevheter og aksielt magnetometerskjevheter.



Den foreliggende oppfinnelse vedrører en fremgangsmåte for å undersøke et borehull som gjør bruk av en avføleroppstilling som er plassert innenfor en borestreng innenfor nevnte borehull, omfattende å måle magnetiske og gravitasjonsmessige felt med nevnte avføleroppstilling på en bestemt dybde og ved et flertall av bestemte verktøyflateorienteringer, og å anvende målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt for å beregne direkte, algebraisk og ikke-iterativt minst en borehullorienteringsindikator, som er reagerende på borehullorientering ved å utlede en verdi for nevnte minst ene borehullorienteringsindikator fra nevnte målinger fra et flertall av verktøyflateorienteringer.

For å forstå den foreliggende oppfinnelse, er det viktig å etablere terminologidefinisjonene som brukes i borehullundersøkelseoperasjoner. Undersøkelser anvendes for å bestemme posisjonen av et borehull i jorden. Orienteringen av borehullet bestemmes på en bestemt dybde ved borehullets avvik fra en forutbestemt akse. Avvikene kan måles med hensyn til to referansevektorer:

- (1) jordens gravitasjonsfeltvektor "G", og
- (2) jordens magnetfeltvektor "B".

I henhold til denne konvensjon er G positiv i den vertikale nedadretning, mens B er positiv i nordretningen og er skråstilt med en fallvinkel D under horisonten, slik det fremgår av fig. 1.

Posisjonen av borehullet i forhold til jordens gravitasjonsfeltvektor G identifiseres som en helningsvinkel "I", hvilken er vinkelen mellom borestrengens langsgående akse og jordens gravitasjonsfeltvektor G. Posisjonen av borehullet i forhold til jordens magnetfeltvektor B og jordens gravitasjonsfelt G identifiseres som en magnetisk asimut "A", hvilken er vinkelen mellom den horisontale komponenten av borestrengens

langsgående akse og den horisontale komponenten av jordens magnetfeltvektor B .

5 Borehullundersøkelseoperasjoner blir også hyppig anvendt for å bestemme fallvinkelen "D", hvilken er komplementet av vinkelen mellom jordens magnetfeltvektor B og jordens gravitasjonsfeltvektor G (dvs. 90 grader mindre enn vinkelen mellom vektorene B og G). Fallvinkelen D er tilgjengelig i oppslagstabeller, datamaskinprogrammer, og kart for alle
10 breddegrader og lengdegrader på jordens overflate.

I konvensjonelle borehullundersøkelseoperasjoner blir akselerometre anvendt til å måle retningen av jordens gravitasjonsfeltvektor G , og magnetometre anvendes til å
15 måle jordens magnetfeltvektor B . Hver vektor innbefatter x -akse, y -akse, og z -aksekomponenter.

For å forstå teknikkene ifølge den foreliggende oppfinnelse for kompensering av magnetfeltets skjevhetsfeil "e", er det
20 viktig først å forstå de koordinatsystemer som anvendes i undersøkelseoperasjoner. Fig. 2 gir et riss over det kartesiske koordinatsystem som etableres i forhold til borestrengens nedre del. z -aksen i koordinatsystemet er innrettet med den langsgående akse for den nedre delen av
25 borestrengen. x -aksen og y -aksen er perpendikulære på z -aksen, og er faste i posisjon med hensyn til nevnte nedre del av borestrengen. Derfor vil rotasjon av den nedre delen av borestrengen om z -aksen også rotere x -aksen og y -aksen med en størrelse målt med hensyn til verktøyflatevinkel "T". Bemerkt
30 at helningsvinkelen I gir et mål for posisjonen av den nedre delen av borestrengen i forhold til gravitasjonsfeltvektoren G , og verktøyflatevinkelen T gir et mål for vinkelen i xy -planet mellom y -aksen og verktøyets høyside HS .

35 Under undersøkelseoperasjoner blir magnetometerlesninger tatt langs de tre akser for å bestemme magnetfeltvektorens B komponenter, idet disse målinger identifiseres som B_x , B_y og

B_z . Akselerometerlesninger tas langs de tre aksene for å bestemme gravitasjonsfeltvektorens G komponenter, idet disse målinger identifiseres som G_x , G_y og G_z . Ettersom disse vektorer har både en retning og en størrelse, vil disse tre-
5 aksielle målinger måtte skaleres, eller kalibreres, for nøyaktig å gjengi størrelsen av den vektor som de representerer.

Undersøkelseverktøy anvender disse x - y - z -oppstillinger av akselerometeret og magnetometre for å bestemme retningene og størrelsene av B - og G -vektorene i x - y - z -referanserammen. Denne informasjon anvendes til å bestemme verktøyets "positur", uttrykt ved helningsvinkelen I , asimutvinkelen A og verktøyflatevinkelen T .
10

Så snart et sett av verdier for B_x , B_y , B_z , G_x , G_y og G_z bestemmes for en bestemt borehulldybde, kan asimut A , helningen I og verktøyflatevinkelen T for borehullet på den dybden bli bestemt. Videre kan verdien av den magnetiske fallvinkel D beregnes. En forventet magnetisk fallvinkel D
20 kan finnes i referansetabeller, datamaskinprogrammer eller kart basert på borestedets lengdegrad og breddegrad. De tre akselerometrene blir vanligvis anvendt til å finne I , T og G , magnetometrene anvendes til å finne B , og en kombinasjon av
25 målinger fra samtlige avfølere kreves for å beregne A og D .

Så snart asimut A og helningen I bestemmes for borehullet på et antall av bestemte dybder, kan et retningskart for borehullet plottes. Dette retningskart viser hvor langt, og
30 i hvilken retning borehullet avviker fra vertikalen og magnetisk nord, og til sist hvor brønnen har sin bunn.

For å tilveiebringe den størst mulige nøyaktighet i magnetfeltmålinger, blir borehullundersøkelseverktøyet vanligvis
35 oppbevart i en ikke-magnetisk delenhhet. I tillegg kan omgivende delenheter også konstrueres av et ikke-magnetisk materiale. Imidlertid kan borestrengen, innbefattende disse

ikke-magnetiske delenheter, ikke desto mindre bli magnetisert under boreoperasjoner i en slik grad at nøyaktigheten av magnetfeltnmålingene blir i alvorlig grad forringet. Eventuell magnetisering av den nedre delen av borestrengen i nærheten av undersøkelseutstyret vil introdusere en skjevhetsfeil "e", 5 hvilken er en uønsket feilkomponent som befinner seg i magnetometerlesningene på grunn av magnetiseringen av borestrengen. Denne skjevhetsfeil innbefatter de to følgende typer av feilkomponenter:

10

- (1) en aksiell skjevhetsfeil e_z , og
- (2) en tverrgående (eller "tverr-aksiell") skjevhetsfeil e_{xy} .

15 Ettersom skjevhetsfeilen e_z og e_{xy} oppstår fra kilder som er festet til delenheten som bærer avføleroppstillingen, er den tverrgående skjevhetsfeil e_{xy} fast i stilling i forhold til x-y-z-referanserammen og vil dreie når verktøyet dreies. Med andre ord vil den tverrgående forspenningsfeilen e_{xy} forbli 20 invariant når verktøyet dreies.

I den kjente teknikk finnes der et flertall av fremgangsmåter for å bestemme borehull asimut A som eliminerer eller minimaliserer innflytelsen av magnetfelt skjevhetsfeil, 25 innbefattende aksielle skjevhetsfeil e_z og tverrgående skjevhetsfeil e_{xy} , men de fleste av de tidligere kjente løsninger er knyttet til minimaliseringen eller elimineringen av den aksielle skjevhetsfeil e_z . Kun løsningen ifølge US-patent nr.r 4682421 (van Dongen) og US-patent nr. 4345454 30 (Coles) er knyttet til minimaliseringen eller elimineringen av både den aksielle skjevhetsfeil e_z og den tverrgående skjevhetsfeil e_{xy} .

De fleste av de tidligere kjente løsninger krever enten (1) 35 at man tar i bruk en antagelse om verdien av en komponent av jordens magnetfelt, slik som magnetfeltstyrke B, fallvinkel D, den horisontale komponent av magnetfeltet B_h eller den

vertikale komponent av magnetfeltet B_v , eller (2) at man tar i bruk og antar med hensyn til verdien av to komponenter i jordens magnetfelt kombinert med en initiell estimering av asimut som tilveiebringes gjennom gjentatte beregninger utført på undersøkelsesdata, med det mål å konvergere til en riktig løsning. Disse gjentatte forsøk krever ytterligere behandlingsressurser, senker hastigheten på bestemmelsen av borehullets orienteringsparametre, slik som asimut A, og er utsatt for konvergens mot en feilaktig eller utilstrekkelig konklusjon.1 Samtlige av de gjentatte prosesser krever et godt, initielt estimat for å gi gode undersøkelsesdata.

Til belysning av den kjente teknikk nevnes følgende publikasjoner: EP A1 384537, GB A 2 138 141, US 4.682.421 og US 5.398.421.

EP A1 384537 omhandler en fremgangsmåte for forbedret bestemmelse av borehullasimut og -inklinasjon, der fremgangsmåten bl.a. baseres på sammenligning av målte verdier av magnetfelt- og gravitasjonsfeltvektor med a priori kjente verdier for de nevnte vektorer.

GB A 2138 141 omhandler en fremgangsmåte for å redusere feil ved måling av magnetfelt- og gravitasjonsfeltvektor for retningsbestemmelse ved borehullsundersøkelser. Feilbidragene bestemmes ut fra måling av komponentverdier for magnetfelt- og gravitasjonsfeltvektor ved minimum tre ulike radielle vinkelorienteringer av måleinstrumentet omkring borehullsaksen.

US 4.682.421 vedrører en fremgangsmåte for korreksjon av forstyrrede magnetfelter ved asimutmålinger i et borehull. Korreksjon for radielle feilbidrag baseres på måling av magnetfeltkomponenter ved ulike vinkelstillinger for borestrengen. Korreksjon for aksielle feilkomponenter baseres på antatte verdier for aksiell magnetfeltkomponent på stedet.

US 5.398.421 omhandler en fremgangsmåte for å korrigere feil ved magnetiske målinger for bestemmelse av asimut i en brønn. Boreverktøyet stoppes i flere posisjoner langs borestrengen, der måleverktøyet i disse posisjonene har tilfeldige vinkelstillinger under måling. Ved å benytte en statistisk beregningsmetode på en kombinasjon av de magnetiske målingene fra disse vinkelstillingene, kan det forstyrrede feltet, som kan ha sin årsak i for eksempel borestrengsmagnetisering, bestemmes og korrigeres for.

Fremgangsmåten, ifølge oppfinnelsen tilsikter å avhjelpe de mangler som er til stede, og fremgangsmåten kjennetegnes ved at utledningen tilfredsstiller et analysekrav definert ved at en tverrgående magnetfelt skjvhetsfeil forblir invariant når nevnte borestreng roteres.

Ifølge ytterligere utførelsesformer av fremgangsmåten blir ved å anvende under nevnte trinn målinger av nevnte magnetiske og gravitasjons-messige felt, en verdi for nevnte minst ene borehullorienteringsindikator beregnet ved å anvende en statistisk analyse av en flerhet av målinger på forskjellige verktøyflatevinkler.

Ved at det under nevnte trinn kan anvendes måling av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt, blir borehullasimut beregnet, ved samtidig bruk av målinger av magnetiske og gravitasjonsmessige felt, på en måte som minimaliserer innflytelsen av magnetisk interferens.

Alternativt, ved at det under nevnte trinn anvendes målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt, blir minst én borehullorienteringsindikator beregnet ved å anvende målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt fra kun to verktøyflateorienteringer. Nevnte minst ene borehullorienteringsindikator kan f.eks. omfatte borehullasimut.

Det er også mulig å etablere borehullorienteringen ved å utføre et flertall av mellomliggende beregninger, innbefattende: a) for samtlige verktøyflateorienteringer å utføre en statistisk feil-minimaliserende operasjon, og b) å anvende resultater av nevnte statistiske feil-minimaliserende operasjon for direkte og algebraisk å beregne nevnte minst ene borehullorienteringsindikator som er upåvirket av nevnte minst ene komponent av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil. Nevnte minst ene borehullorienteringsindikator kan f.eks. omfatte borehullasimut, idet borehullasimut direkte og algebraisk beregnes på en måte som gjør resultatet uavhengig av minst en tverrgående komponent av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil.

Det vil være mulig å la nevnte mellomliggende beregninger innbefatte:

(c) å anvende (a) resultater fra nevnte statistiske feil-minimaliserende operasjon, og (b) et tilveiebragt mål på en aksiell komponent av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil, for direkte og algebraisk å beregne nevnte minst ene borehullorienteringsindikator som er upåvirket av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil.

Ifølge en annen utførelsesform blir borehullorienteringen etablert ved å utføre et flertall av mellomliggende beregninger, innbefattende: (a) å utføre en fremgangsmåte for minste kvadraters estimeringsberegning ved å anvende (a) nevnte flerhet av målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt, og (b) minst en magnetfeltparameter, for å identifisere de mest sannsynlige verdier for nevnte minst ene magnetfeltparameter, og (b) direkte å beregne nevnte ikke-forvanskede borehullasimut ved å anvende nevnte mest sannsynlige verdier av nevnte minst ene magnetfeltparameter.

Det er alternativt mulig å la borehullorienteringsindikatoren bli etablert ved å utføre mellomliggende beregninger, innbefattende: å sammenligne målinger av nevnte magnetfelt med forventede verdier for nevnte magnetfelt på en

måte som minimaliserer forskjellen mellom en beregnet verdi for nevnte magnetfelt og en forventet verdi for magnetfelt og som innbefatter de følgende trinn: å identifisere en mest sannsynlig verdi for nevnte minst ene borehullorienteringsindikator ved: a) å sammenligne målinger av magnetfeltvektorstørrelser og fallvinkelverdier, og b) å bestemme en mest sannsynlig verdi for nevnte borehullorienteringsindikator ved å identifisere minimumvariasjon mellom målte og forventede verdier.

10

Som ytterligere alternativ kan nevnte borehullasimut etableres på en måte som minimaliserer den forvanskende innflytelse av aksielle magnetiske skjevhetsdannende feil, ved å utføre mellomliggende beregninger, innbefattende:

15 å sammenligne målinger av nevnte magnetfelt med forventede verdier for nevnte magnetfelt på en måte som minimaliserer forskjellen mellom beregnet verdi for en magnetfeltvektor og en forventet verdi for nevnte magnetfeltvektor, og som innbefatter de følgende trinn: å identifisere en mest sannsynlig verdi for nevnte minst ene borehullasimut ved:

20 a) å sammenligne (a) målinger av horisontale og vertikale komponenter av nevnte magnetfelt og (b) forventede verdier for de horisontale og vertikale komponenter av nevnte magnetfelt, og b) å bestemme en mest sannsynlig verdi for nevnte asimut ved identifisering av minimum variasjon mellom målte og forventede verdier.

25

Under pauser i boreoperasjonene kan avføleroppstillingen anvendes til å måle x-akse, y-akse, og z-akse-komponentene for både jordens magnet- og gravitasjonsfelt på en bestemt dybde i borehullet, og på en bestemt verktøyflateorientering. Borestrengen blir vinkelmessig forflyttet til minst en andre verktøyflateorientering, og ytterligere målinger av x-akse, y-akse og z-aksekomponentene for jordens magnet- og gravitasjonsfelt foretas på ny med avføleroppstillingen på den bestemte verktøyflateorienteringen. Derne

30

35

skjellige målinger av nevnte magnet- og gravitasjonsfelt

anvendt til å beregne direkte, algebraisk og ikke-iterativt minst én borehullorienteringsindikator, slik som magnetisk asimut, som etablerer et borehulls posisjon i forhold til jordens magnetfelt, på en måte som eliminerer innflytelsen av magnetfeltets skjevhetsfeil, innbefattende det aksielle magnetfelts skjevhetsfeil e_z , og det tverrgående magnetfelts skjevhetsfeil e_{xy} .

Innflytelsen av det tverrgående magnetfeltets skjevhetsfeil e_{xy} kan, som antydnet, bli eliminert ved beregning av, for hver bestemte dybde, minst en mellomliggende variabel som er avhengig av minst en del av målingene av nevnte magnet- og gravitasjonsfelt, men som er uavhengig av minst en komponent (i særdeleshet tverrkomponenten) av magnetfeltets skjevhetsfeil. Disse mellomliggende variabler kan omfatte B_{xy} , hvilken er x-y-plankomponenten av magnetfeltet, og ϕ som defineres som forskjellen mellom det magnetiske verktøyets flatevinkel M og verktøyflatevinkelen T . Dette er identisk med vinkelen i xy-planet mellom magnetisk nord og verktøyets høyside HS . En statistisk feil-minimaliserende operasjon, slik som en fremgangsmåte for minste kvadraters estimering, kan utføres på undersøkelsesdataene for å tilpasse fra to eller flere undersøkelser til kriteriet at e_x , e_y , B_{xy} og ϕ bør forbli invariante under rotering. Resultatene av denne fremgangsmåte for minste kvadraters estimering anvendes for direkte og algebraisk å beregne de mellomliggende variabler og minst en borehullorienteringsindikator (slik som asimut A) som er upåvirket av den tverrgående komponent av magnetfeltets skjevhetsfeil. Verdiene av de tverrgående skjevheter e_x , e_y kan også bestemmes.

Det er også tenkelig å beregne direkte, algebraiske og ikke-iterativt borehullorienteringsindikatorer, hvilket etablerer borehullposisjoner i forhold til jordens magnetfelt, slik som asimut A , som er frie for det aksielle magnetfeltets skjevhetsfeil e_z . I henhold til denne teknikk blir avføleroppstillingen anvendt til å måle jordens magnet- og gravita-

sjonsfelt på en bestemt dybde og på en bestemt verktøyflateorientering, eller på en bestemt dybde og et flertall av verktøyflateorienteringer. Målingene av nevnte magnet- og gravitasjonsfelt anvendes til å beregne direkte, algebraisk og ikke-gjentatt minst én borehullorienteringsindikator, hvilken også i dette tilfellet etablerer borehullposisjon i forhold til jordens magnetfelt, som er fri for den aksielle komponent e_z av magnetfeltets skjevhetsfeil. Fortrinnsvis innbefatter beregningene en sammenligning av målingene av magnetfeltet med forventede verdier for magnetfeltet, på en måte som optimaliserer nøyaktigheten av en beregnet verdi for i det minste den ene borehullorienteringsindikatoren. Nærmere bestemt blir målingene av jordens magnetfeltvektorstørrelse og fallvinkelen sammenlignet med forventede verdier for magnetfeltvektorens størrelse og fallvinkel (eller med verdiene av den forventede, horisontale komponent B_h og den forventede, vertikale komponent B_y av jordens magnetfelt) på en måte som optimaliserer nøyaktighet. Fortrinnsvis blir det anvendt ikke-iterative metoder av radikaler for å oppnå to eller flere reelle røtter som tilfredsstillende en bestemt ligning. Roten som minimaliserer forskjellen mellom de faktiske magnetfeltverdier og de forventede magnetfeltverdier ansees å være den korrekte verdi, og anvendes for å beregne i det minste den ene borehullorienteringsindikatoren.

Selve oppfinnelsen samt en foretrukket bruksmåte, ytterligere formål og fordeler ved denne, vil imidlertid ennå bedre forstås med henvisning til den etterfølgende detaljerte beskrivelse av en illustrerende utførelsesform lest i forbindelse med de vedlagte tegninger.

Fig. 1 viser en forenklet grafisk fremstilling over jordens feltvektorer.

Fig. 2 viser et riss over det kartesiske koordinatsystem som etableres med henvisning til den langsgående akse for en borestreng som er anbragt i et borehull.

Fig. 3 viser et grafisk riss over asimut, helning og verktøyflatevinkler i forhold til koordinatsystemet.

Fig. 4a og 4b tilveiebringer en grafisk fremvisning over virkningen av en aksiell magnetisk skjevhetsfeilkomponent (e_z) ved målingen og beregningen av borehull asimut.

Fig. 5 er et diagram som anvendes til å beskrive teknikken ifølge den foreliggende oppfinnelse for beregning av borehullorienteringsindikatorer som er uavhengige av tverrgående magnetfelts skjevhetsfeil.

Fig. 6 er en grafisk fremstilling over et minimaliseringskriterium som anvendes til å beregne borehullorienteringsindikatorer som er uavhengige av eventuell aksiell magnetfelts skjevhetsfeilkomponent.

Den foreliggende oppfinnelse er relatert til den retningsmessige undersøkelse av borehull ved bruk av oppstillinger av magnetometre og akselerometre. Undersøkelsesverktøyet måler tre ortogonale komponenter av jordens gravitasjonsfelt G og dens magnetfelt B . G er positiv i den vertikale nedadretningen, mens B er positiv i nordretningen og er skråstilt med en fallvinkel D under horisonten. Disse feltvektorer er vist i fig. 1.

De tre målte komponenter for hvert felt er betegnet med x , y og z . z -retningen er parallell med den langsgående akse for boreverktøyet, pekende mot borekronen og antas å være omtrentlig tangerende med borehullet. x - og y -retningene er perpendikulære på hverandre og på z -retningen, idet de danner en høyrehånds triade, der y -retningen er innrettet med et markeringsmerke på undersøkelsesverktøyet. Disse verktøykoordinataksene er vist i fig. 2.

Verktøyorienteringen blir vanligvis uttrykt i form av de følgende tre borevinkler: helning I som er vinkelen mellom z -retningen og vertikalen, asimut A som er vinkelen mellom de horisontale projeksjoner av z -aksen og magnetisk-nordvektoren, og gravitasjonsverktøyflaten T som er vinkelen i xy -

planet mellom verktøyets høyside HS og y-aksen. Fig. 3 viser disse borevinkler. En ytterligere borevinkel er det magnetiske verktøyets flatevinkel M, definert her som vinkelen i xy-planet mellom magnetisk-nord N og y-aksen. Det er instruktivt å bemerke her at forskjellen $\emptyset$ mellom vinkelen M og vinkelen T er vinkelen i xy-planet mellom magnetisk-nord N og høysiden HS, hvilke må forbli invariante når verktøyet roteres om sin z-akse.

Komponentene som måles av verktøyet kan uttrykkes som:

$$(1) \quad G_x = G \cdot \sin I \cdot \sin T$$

$$(2) \quad G_y = G \cdot \sin I \cdot \cos T$$

$$(3) \quad G_z = G \cdot \cos I$$

$$(4) \quad B_x = B \cdot \cos D \cdot \cos I \cdot \cos A \cdot \sin T - B \cdot \sin D \cdot \sin I \cdot \sin T + B \cdot \cos D \cdot \sin A \cdot \cos T$$

$$(5) \quad B_y = B \cdot \cos D \cdot \cos I \cdot \cos A \cdot \cos T - B \cdot \sin D \cdot \sin I \cdot \cos T - B \cdot \cos D \cdot \sin A \cdot \sin T$$

$$(6) \quad B_z = B \cdot \cos D \cdot \sin I \cdot \cos A + B \cdot \sin D \cdot \cos I$$

Bemerk at ved konvensjon defineres G_x og G_y som positive mot verktøyet, mens de andre fire målinger er positive bort fra verktøyet.

Dersom målingene ikke er skjevsatte, kan feltparametrene og borevinklene lett bestemmes fra de målte komponenter som følger:

$$(7) \quad G = (G_x^2 + G_y^2 + G_z^2)^{.5}$$

$$(8) \quad I = \cos^{-1}(G_z/G)$$

$$(9) \quad T = \tan^{-1}(G_x/G_y)$$

$$(10) \quad M = \tan^{-1}(B_x/B_y)$$

$$(11) \quad B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{.5}$$

$$(12) \quad D = \sin^{-1}[(B_z \cdot G_z - B_x \cdot G_x - B_y \cdot G_y)/(B \cdot G)]$$

$$(13) \quad A = \tan^{-1}[\{G \cdot (B_x \cdot G_y - B_y \cdot G_x)\} / \{B_z \cdot (G_x^2 + G_y^2) + G_z \cdot (B_x \cdot G_x + B_y \cdot G_y)\}]$$

De følgende forholder, der $B_{xy} = (B_x^2 + B_y^2)^{.5}$, og vinkelen θ defineres som (M-T), følger fra det ovenstående og vil være nyttig senere:

$$(14) \quad B_{xy} \cdot \sin \theta = B_x \cdot \cos T - B_y \cdot \sin T = B \cdot \cos D \cdot \sin A$$

$$(15) \quad B_{xy} \cdot \cos \theta = B_x \cdot \sin T + B_y \cdot \cos T = B \cdot \cos D \cdot \cos I \cdot \cos A - B \cdot \sin D \cdot \sin I$$

Avfølere oppbevares i en ikke-magnetisk seksjon av borekroner. Imidlertid er det mulig for lokal borekronemagnetisering å bevirke vesentlige magnetiske anomaliteter. Eksempelvis kan slik magnetisering oppstå som et resultat av sveiseprosedyrer på borekronen, utilstrekkelig demagnetisering som anvendes på kronen eller dens innhold, eller nærværet av magnetisk "søppel" som har festet seg til kronens utside. Anomaliteter av denne type fremtrer som skjevheter på B_x , B_y og B_z målingene, og fører derfor til forvanskede beregninger av M, B, D og A dersom ligningene (10) til og med (13) anvendes. Den foreliggende oppfinnelse omhandler derfor en ikke-iterativ fremgangsmåte for å redusere innflytelsen av skjevsatte B_x og B_y lesninger på den beregnede verdi for A.

Forbi den ikke-magnetiske seksjonen kan endene av hosliggende magnetiske borekroneseksjoner ha en tendens til å virke som magnetpoler, hvilket bevirker en ytterligere magnetisk anomali i en retning som er omtrentlig parallell med z-aksen. Denne type av anomali vil derfor fremtre primært som en skjevhet på B_z målingen, og vil ha tendens til å forvanske verdiene av B, D og A som er beregnet ved å anvende ligningene (11) til og med (13). Denne oppfinnelse omhandler videre en ikke-iterativ metode for å beregne A uten bruken av den skjevsatte B_z lesning.

Fig. 4a og 4b viser grafisk virkningene av et aksielt magnetfelts skjevhet " e_z " med hensyn til bestemmelsen av asimut A. I disse figurer representeres den horisontale

komponenten av magnetfeltet ved " B_h ". Virkningen av aksial skjevhet bevirker den horisontale komponenten av magnetfeltet til å være i posisjonen for vektor B_{happ} som er representativ for den "tilsynelatende horisontale komponent av magnetfeltet". Asimut A defineres med hensyn til den horisontale komponent av z -aksen Z_h . I disse figurer er den tilsynelatende asimut A_{app} asimutverdien som bestemmes fra B_{happ} , og avviker fra den ikke-skjevsatte asimut A . Slik det fremgår av fig. 4a og 4b, er virkningen av det aksielle feilfeltet e_z vanligvis å øke tilsynelatende asimut A_{app} dersom hullet har en vestvendt komponent, slik det er vist i fig. 4a, eller å minske tilsynelatende asimut A_{app} dersom hullet er østvendt, slik det er vist i fig. 4b. Uansett blir det tilsynelatende bunnhullsted beveget ytterligere nord. Dette er det typiske tilfellet for borehull som befinner seg i den nordlige halvkule. Når uønsket magnetisering er tilstede, gir magnetometer og akselerometerlesninger tilsynelatende verdier for den horisontale komponenten av magnetfelt B_{happ} og asimut A_{app} , men det ønskes å finne den ikke-skjevsatte horisontale komponent av magnetfeltet B_h og særlig den ikke-skjevsatte asimut A .

Oppfinnelsen består av (1) en fremgangsmåte for å redusere innflytelsen av tverrgående magnetometerskjevheter " e_{xy} ", og (2) en fremgangsmåte for å beregnet asimut A i nærværet av aksial magnetometerskjevhet " e_z ". Disse to teknikker skal nå beskrives i tur.

Virkningene på beregnet asimut av tverrgående magnetometerskjevheter e_x og e_y kan reduseres ved å ta et antall av undersøkelser når verktøyet roteres rundt forskjellige verktøyflateposisjoner. Slik det er antydnet ved (14) og (15), befinner den tverrgående magnetometerinformasjon seg i de to parametrene B_{xy} og ϕ , der hver av disse forblir invariant under slik rotasjon. Denne oppfinnelse anvender en minstekvadraters teknikk for best mulig å tilpasse to eller flere

punkter til kriteriet at e_x , e_y , B_{xy} og $\emptyset$ bør forbli invariant under rotasjon.

Fig. 5 viser typiske målte verdier av B_x og B_y på et antall
5 av forskjellige verktøyflateposisjoner " T_n ". Punktene (B_{xn} , B_{yn}) representerer den n 'te måling som forventes å ha koordinater

$$(16) \quad [e_x + B_{xy} \cdot \sin(T_n + \emptyset), e_y + B_{xy} \cdot \cos(T_n + \emptyset)]$$

10

Imidlertid blir dens faktiske koordinater målt av verktøyet som (B_{xn} , B_{yn}). Eventuell forskjell bevirkes av målefeil som er andre enn de systematiske skjevheter e_x og e_y . Den kvadrerte distanse mellom de forventede og målte koordinater
15 er

$$(17) \quad D_n^2 = [B_{xn} - e_x - B_{xy} \cdot \sin(T_n + \emptyset)]^2 + [B_{yn} - e_y - B_{xy} \cdot \cos(T_n + \emptyset)]^2$$

20 Denne oppfinnelse definerer de mest sannsynlige verdier av e_x , e_y , B_{xy} og $\emptyset$ som de som minimaliserer summen av disse kvadrerte distanser over samtlige N undersøkelser. Minimalisering oppnås ved å sette de passende deriverte av ligning (17) til null (e_x for ligning (18), e_y for ligning
25 (19), B_{xy} for ligning (20), og $\emptyset$ for ligning (21)). Resultatene av denne minimalisering er:

$$(18) \quad e_x = [\Sigma B_x - (b/c) \cdot \Sigma G_x - (a/c) \cdot \Sigma G_y] / N$$

$$(19) \quad e_y = [\Sigma B_y + (a/c) \cdot \Sigma G_x - (b/c) \cdot \Sigma G_y] / N$$

$$30 \quad (20) \quad B_{xy} = [(a^2 + b^2) \cdot (\Sigma G_x^2 + \Sigma G_y^2) / N]^{.5} / c$$

$$(21) \quad \emptyset = \tan^{-1}(a/b)$$

$$(22) \quad \text{hvor } a = N \cdot \Sigma (B_x G_y) - \Sigma B_x \cdot \Sigma G_y - N \cdot \Sigma (B_y G_x) + \Sigma B_y \cdot \Sigma G_x$$

$$(23) \quad b = N \cdot \Sigma (B_x G_x) - \Sigma B_x \cdot \Sigma G_x + N \cdot \Sigma (B_y G_y)$$

$$35 \quad (24) \quad c = N \cdot \Sigma G_x^2 + N \cdot \Sigma G_y^2 - \Sigma^2 G_x - \Sigma^2 G_y$$

og " Σ " representerer summering over samtlige undersøkelser.

Verdiene av B_{xy} og $\varnothing$ som oppnås fra ligningene (20) og (21) er ikke-forurenset av skjevhetene e_x og e_y . Gitt en pålitelig måling av B_z , kan ligningene (6), (14) og (15) nå løses for B , D og A , idet resultatet for asimut A , magnetfeltet B og fallvinkelen D er:

$$(25) \quad A = \tan^{-1}[B_{xy} \cdot \sin \varnothing / (B_{xy} \cdot \cos \varnothing \cdot \cos I + B_z \cdot \sin I)]$$

$$(26) \quad B = (B_{xy}^2 + B_z^2)^{0,5}$$

$$(27) \quad D = \sin^{-1}[(B_z \cdot \cos I - B_{xy} \cdot \cos \varnothing \cdot \sin I) / B]$$

Imidlertid er disse uttrykk av begrenset verdi, ettersom erfaring har vist at z -akseforspenningen " e_y " vanligvis oppveier de tverrgående skjevheter e_x og e_y . Hvis det er nødvendig å redusere innflytelsen av e_x og e_y slik som ovenfor, vil derfor målingen av B_z i (6) sannsynlig også være blitt forvansket av en aksial skjevhet e_z . Den andre delen av denne oppfinnelse omhandler derfor en ikke-gjentatt fremgangsmåte for beregning av asimut A uten bruken av B_z målingen.

Dersom B_z målingen forvanskas, er ligning (6) ikke nyttig for beregning av asimut A . I stedet kan A beregnes fra (4) og (5), eller fra (14) og (15), og fra det estimerte lokale magnetfelt som defineres av de forventede verdier $\underline{B}$ og $\underline{D}$. De forventede verdier $\underline{B}$ og $\underline{D}$ kan etableres for en bestemt breddegrad og lengdegrad fra oppslagstabeller, kart eller datamaskinprogrammer. Oppfinnelsen som er omhandlet her gjør bruk av både $\underline{B}$ og $\underline{D}$ ved å minimalisere vektordistansen mellom B og dens forventede verdi $\underline{B}$. Slik det er vist i fig. 6, kan dette uttrykkes matematisk ved å addere en tredje ligning

$$(28) \quad (\underline{B} \cdot \cos \underline{D} - B \cdot \cos D)^2 + (\underline{B} \cdot \sin \underline{D} - B \cdot \sin D)^2 = \text{minimum}$$

og løse de tre ligningene (14), (15) og (28) for de tre ukjente B , D og A . Dette skjer ved å anvende (14) og (15) til å uttrykke $B \cdot \sin D$ og $B \cdot \cos D$ uttrykt ved $\sin A$ og $\cos A$, og så å

ta den deriverte av (28) med hensyn til A og sette denne lik null. Dette gir ligningen

$$(29) \quad X \cdot \sin A + Y \cos A + Z \sin A \cdot \cos A = 0$$

5

$$(30) \quad \text{hvor } X = (B_{xy} \cdot \cos \varnothing + \underline{B} \cdot \sin \underline{D} \cdot \sin I) \cdot \cos I$$

$$(31) \quad Y = - B_{xy} \cdot \sin \varnothing$$

$$(32) \quad \text{og } Z = \underline{B} \cdot \cos \underline{D} \sin^2 I$$

10 Et utvalg av gjentatte prosedyrer kan anvendes for å løse denne type av ligning. Imidlertid gjør den ikke-iterative fremgangsmåte som er omhandlet her bruk av substitueringen $\sin A = (1 - \cos^2 A)^{.5}$ i (29) til å oppnå den følgende fjerdegrads ligning i $\cos A$:

15

$$(33) \quad \cos^4 A + 2 \cdot X/Z \cdot \cos^3 A + (X^2 + Y^2 - Z^2)/(Z^2 \cdot \cos^2 A - 2X/Z \cdot \cos A - X^2/Z^2) = 0$$

20

[Selv om ligning (33) likegodt kan settes opp uttrykt ved $\sin A$ eller $\tan A$, er de ekvivalente ligninger lik:

$$\sin^4 A + 2 \cdot Y/Z \cdot \sin^3 A + (X^2 + Y^2 - Z^2)/Z^2 \cdot \sin^2 A - 2 \cdot Y/Z \cdot \sin A - Y^2/Z^2 = 0$$

$$\tan^4 A + 2 \cdot Y/X \cdot \tan^3 A + (X^2 - Y^2 - Z^2)/X^2 \cdot \tan^2 A + 2 \cdot Y/Z \cdot \tan A + Y^2/X^2 = 0$$

25

Der kan faktisk være numeriske fordeler med å løse med hensyn til $\sin A$ i mange tilfeller, ettersom i de kritiske øst-vest-orienteringer nærmer $|\sin A|$ seg 1, mens $\cos A$ nærmer seg null.]

30

Denne ligning løses ved fremgangsmåten for radikaler, vel kjent innenfor den matematiske litteratur, for å oppnå enten to eller fire reelle røtter i $\cos A$. Fremgangsmåten med hensyn til radikaler er mest fullstendig beskrevet i den følgende henvisning: "College Algebra" av J.B. Rosenbach, E.A.

35

Whitman, B.E. Meserve, og P.M. Whitman, fjerde utgave, Ginn & Co., 1958, s. 366-367, hvilken publikasjon også inngår her med denne henvisning. For hver av de reelle røtter i $\cos A$,

oppnås $\sin A$ fra ligning (29), og roten som gir minimumsverdien av ligning (28) ansees å være den korrekte.

Fremgangsmåten kan også anvendes til å korrigere for en skjevhet på B_z uten først å redusere innflytelsen av tverrgående skjevheter. Man trenger kun å ta en enkelt undersøkelse og oppnå B_{xy} og $\varnothing$ fra (14) og (15) i stedet fra (20) og (21). Dette er ekvivalent med å løse (4), (5) og (28) for de ukjente B , D og A .

Etter at en ikke-skjevsatt asimut A er beregnet, kan magnetfeltstyrken B og fallvinklen D beregnes som følger:

$$(34) \quad B = B_{xy} \cdot [(\sin \varnothing / \sin A)^2 + \{(\sin \varnothing \cdot \cos I / \tan A - \cos \varnothing) / \sin I\}^2]^{0,5}$$

$$(35) \quad D = \sin^{-1}[B_{xy} \cdot (\sin \varnothing \cdot \cos I / \tan A - \cos \varnothing) / (B \cdot \sin I)]$$

Fortrinnsvise blir teknikkene ifølge den foreliggende oppfinnelse anvendt i konvensjonelle borehullundersøkelsesoperasjoner. Typisk anbringes avføleroppstillingen innenfor den nedre delen av en borestreng under boreoperasjoner. Under pauser i boreaktiviteten anvendes avfølerene til å detektere x-akse, y-akse og z-aksekomponentene for jordens magnetiske og gravitasjonsmessige feltvektorer, mens z-aksekomponenten for magnetfeltet antas å være forvansket og anvendes således primært som en kvalitetskontroll ettersom e_z ikke bør endre seg hurtig mellom undersøkelser. Disse målinger innbefatter innflytelsen av magnetfeltets skjevhetsfeilkomponenter innbefattende den aksielle magnetfeltskjevhetsfeilkomponent e_z og den tverrgående magnetfeltskjevhetsfeilkomponent e_{xy} . Slik det er vanlig, blir målingene overført til jordens overflate ved bruk av såkalt måling-under-boring dataoverføringsteknikker. Typisk blir dataene tilført en slamsøyle som en rekke av trykkfall eller trykkøkninger som dekodes på overflaten til å gi numeriske data. Disse data kan innføres i en beregningsanordning som forprogrammeres i henhold til fremgangsmåten ifølge den foreliggende oppfinnelse. Program-

met vil innbefatte som innmatninger x-akse, y-akse og z-akse-
komponentene av jordens magnetiske og gravitasjonsmessige
feltvektorer. Beregningene utføres i henhold til den ovenfor
gitte beskrivelse, og programmet gir som en utmatning
5 borehullets asimut A og helning I som er så nyttige for
definering av posisjonen for et borehull i forhold til
jordens magnetiske og gravitasjonsmessige feltvektorer.

10

15

20

25

30

35

P a t e n t k r a v

1.

5 Fremgangsmåte for å undersøke et borehull som gjør bruk av en avføleroppstilling som er plassert innenfor en borestreng innenfor nevnte borehull, omfattende:

å måle magnetiske og gravitasjonsmessige felt med nevnte avføleroppstilling på en bestemt dybde og ved et flertall av
10 bestemte verktøyflateorienteringer, og

å anvende målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt for å beregne direkte, algebraisk og ikke-iterativt minst en borehullorienteringsindikator, som er reagerende på borehullorientering ved å utlede en verdi for nevnte
15 minst ene borehullorienteringsindikator fra nevnte målinger fra et flertall av verktøyflateorienteringer, k a r a k t e r i s e r t v e d at utledningen tilfredsstiller et analysekrav definert ved at en tverrgående magnetfelt skjevhetsfeil forblir invariant når nevnte borestreng
20 roteres.

2.

Fremgangsmåte som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at under nevnte trinn å anvende målinger av
25 nevnte magnetiske og gravitasjons-messige felt, blir en verdi for nevnte minst ene borehullorienteringsindikator beregnet ved å anvende en statistisk analyse av en flerhet av målinger på forskjellige verktøyflatevinkler.

30 3.

Fremgangsmåte som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at under nevnte trinn å anvende måling av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt, blir borehull-asimut beregnet, ved samtidig bruk av målinger av magnetiske
35 og gravitasjonsmessige felt, på en måte som minimaliserer innflytelsen av magnetisk interferens.

4.

Fremgangsmåte som angitt i krav 1, karakteriseres ved at under nevnte trinn å anvende målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt blir minst en borehullorienteringsindikator beregnet ved å anvende målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt fra kun to verktøyflateorienteringer.

5.

Fremgangsmåte som angitt i krav 4, karakteriseres ved at nevnte minst ene borehullorienteringsindikator omfatter borehullasimut.

6.

Fremgangsmåte som angitt i krav 1, karakteriseres ved at borehullorienteringen etableres ved å utføre et flertall av mellomliggende beregninger, innbefattende:

- a) for samtlige verktøyflateorienteringer å utføre en statistisk feil-minimaliserende operasjon, og
- b) å anvende resultater av nevnte statistiske feil-minimaliserende operasjon for direkte og algebraisk å beregne nevnte minst ene borehullorienteringsindikator som er upåvirket av nevnte minst ene komponent av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil.

7.

Fremgangsmåte som angitt i krav 6, karakteriseres ved at nevnte minst ene borehullorienteringsindikator omfatter borehullasimut, og at borehullasimut direkte og algebraisk beregnes på en måte som gjør resultatet uavhengig av minst en tverrgående komponent av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil.

8.

Fremgangsmåte som angitt i krav 6, karakteriseres

s e r t v e d at nevnte mellomliggende beregninger innbefatter:

(c) å anvende (a) resultater fra nevnte statistiske feil-minimaliserende operasjon, og (b) et tilveiebragt mål på en
5 aksiell komponent av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil, for direkte og algebraisk å beregne nevnte minst ene borehull-orienteringsindikator som er upåvirket av nevnte magnetfeltskjevhetsfeil.

10 9.

Fremgangsmåte som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at borehullorienteringen etableres ved å utføre et flertall av mellomliggende beregninger, innbefattende:

15 (a) å utføre en fremgangsmåte for minste kvadraters estimeringsberegning ved å anvende (a) nevnte flerhet av målinger av nevnte magnetiske og gravitasjonsmessige felt, og (b) minst en magnetfeltparameter, for å identifisere de mest sannsynlige verdier for nevnte
20 minst ene magnetfeltparameter, og

(b) direkte å beregne nevnte ikke-forvanskede borehull-asimut ved å anvende nevnte mest sannsynlige verdier av nevnte minst ene magnetfeltparameter.

25 10.

Fremgangsmåte som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at borehullorienteringsindikatoren etableres ved å utføre mellomliggende beregninger, innbefattende:

30 å sammenligne målinger av nevnte magnetfelt med forventede verdier for nevnte magnetfelt på en måte som minimaliserer forskjellen mellom en beregnet verdi for nevnte magnetfelt og en forventet verdi for magnetfelt og som innbefatter de følgende trinn:

35 å identifisere en mest sannsynlig verdi for nevnte minst ene borehullorienteringindikator ved:

- a) å sammenligne målinger av magnetfeltvektorstørrelser og fallvinkelverdier, og
- b) å bestemme en mest sannsynlig verdi for nevnte borehull-orienteringsindikator ved å identifisere minimumvariasjon mellom målte og forventede verdier.

11.

Frengangsmåte som angitt i krav 1, karakterisert ved at nevnte borehullasimut etableres på en måte som minimaliserer den forvanskende innflytelse av aksielle magnetiske skjevhetsdannende feil, ved å utføre mellomliggende beregninger, innbefattende:

å sammenligne målinger av nevnte magnetfelt med forventede verdier for nevnte magnetfelt på en måte som minimaliserer forskjellen mellom beregnet verdi for en magnetfeltvektor og en forventet verdi for nevnte magnetfeltvektor, og som innbefatter de følgende trinn:

å identifisere en mest sannsynlig verdi for nevnte minst ene borehullasimut ved:

- a) å sammenligne (a) målinger av horisontale og vertikale komponenter av nevnte magnetfelt og (b) forventede verdier for de horisontale og vertikale komponenter av nevnte magnetfelt, og
- b) å bestemme en mest sannsynlig verdi for nevnte asimut ved identifisering av minimum variasjon mellom målte og forventede verdier.

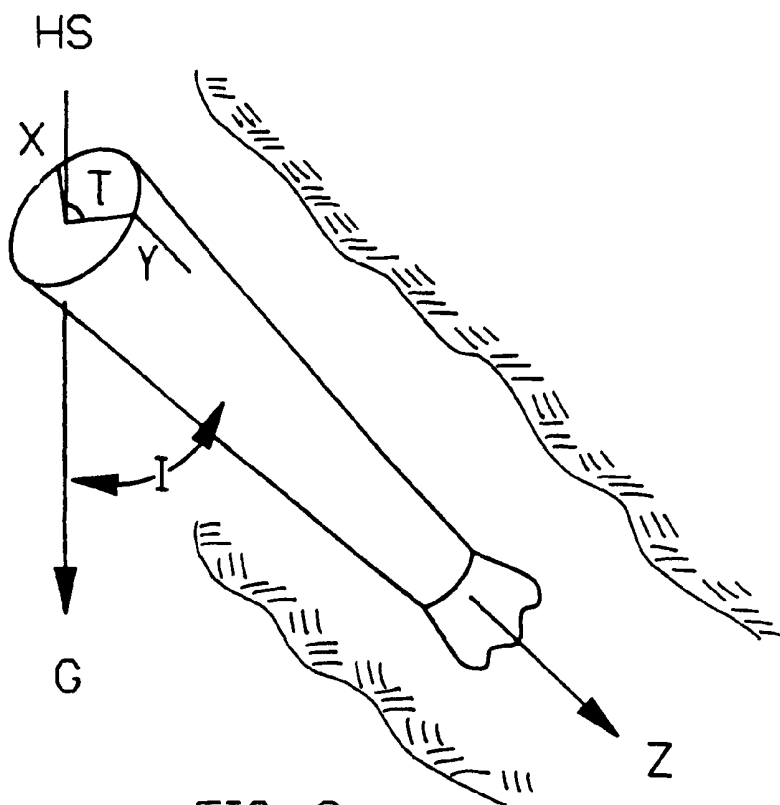
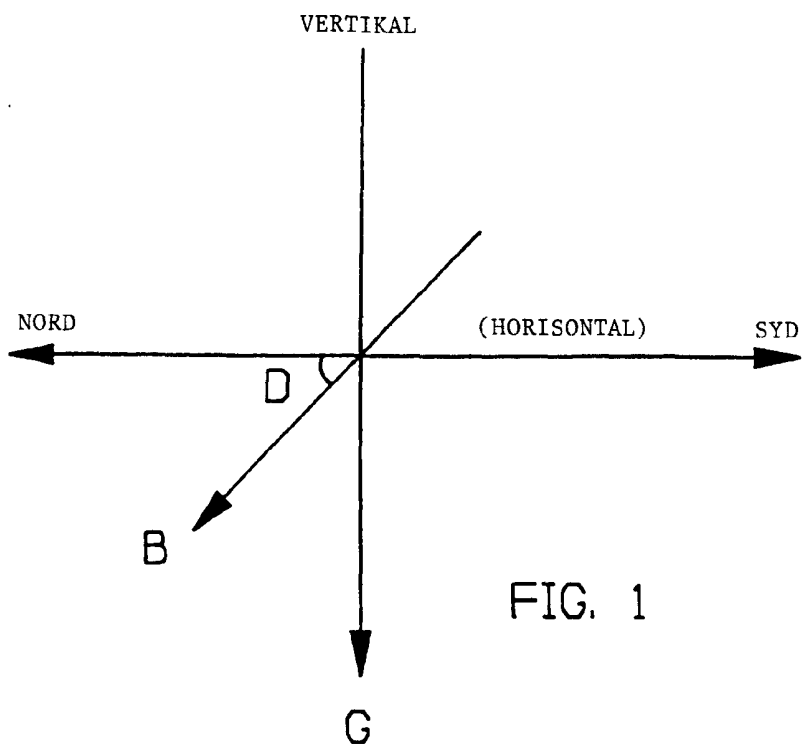


FIG. 2

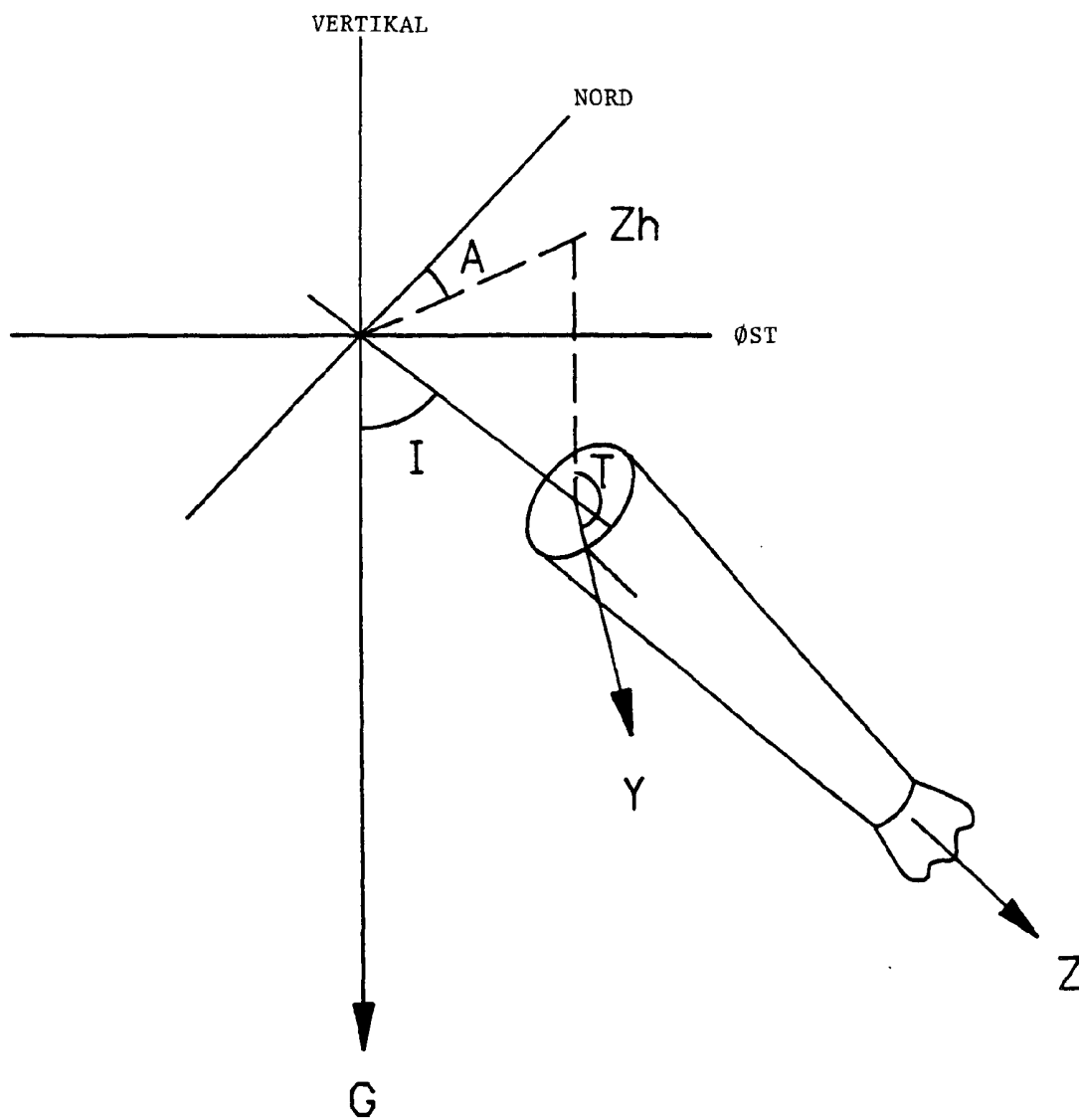


FIG. 3

