



(12) PATENT

(19) NO

(11) 340988

(13) B1

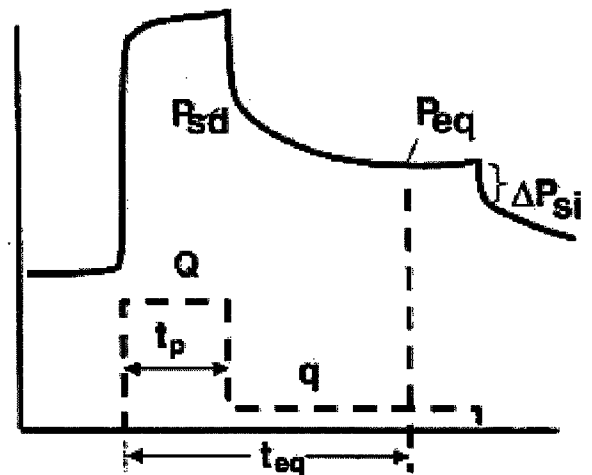
NORGE

(51) Int Cl.
E21B 43/26 (2006.01)
E21B 49/00 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20031494	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2002.07.19 PCT/EP2002/08080
(22)	Inng.dag	2003.04.02	(85)	Videreføringsdag	2003.04.02
(24)	Løpedag	2002.07.19	(30)	Prioritet	2001.08.03, US, 310214
(41)	Alm.tilgj	2003.06.02			
(45)	Meddelt	2017.07.31			
(73)	Innehaver	Schlumberger Technology B.V., Parkstraat 83-89, NL-2514JG HAAG, Nederland			
(72)	Oppfinner	Xiaowei Weng, 22318 David's Crest Court, US-TX77450 KATY, USA			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			
(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte for å bestemme parameterne ved en fullskala fraktureringsbehandling			
(56)	Anførte publikasjoner	US 4372380 A US 5050674 A US 5275041 A			
(57)	Sammendrag				

Det er foreslått en fremgangsmåte for måling av sprekklukningstrykk. Denne fremgangsmåten innbefatter først å injisere et fluid inn i formasjonen ved en første hovedsakelig konstant hastighet Q for å skape en sprekk, og så minske pumpehastigheten til en betydelig mindre matingshastighet q slik at volumet til sprekken blir konstant med andre ord. Når sprekkvolumet blir konstant ved likevekt, blir brønnen avstengt. Borehullstrykket blir overvåket og lukningstrykket blir bestemt fra analysen av borehullstrykket ved å benytte en tidsfunksjon for den dimensjonsløse "avstengningstid", definert som forholdet mellom tiden siden avstengning til pumping. Denne fremgangsmåten fremskaffer en måte til å estimere friksjonskomponenten til det overvåkede borehullstrykket på, som skyldes sprekkbukningen og friksjonen. Fremgangsmåten kan anvendes på det område som angår frakturering av undergrunnsformasjoner, og mer spesielt i forbindelse med prosessen for å utforme og analysere stimuleringsbehandlinger.



Foreliggende oppfinnelse vedrører en fremgangsmåte til å bestemme parameterne ved en fullskala fraktureringsbehandling av en undergrunnsformasjon med et lukningstrykk P_c .

5 Hydraulisk oppsprekking eller frakturering er et hovedverktøy for å forbedre brønnproduktivitet ved å anbringe eller utvide kanaler fra brønnen til reservoaret. Denne operasjonen blir hovedsakelig utført ved hydraulisk injeksjon av et fraktureringsfluid inn i en brønn som gjennomskjærer en undergrunnsformasjon, og å presse fraktureringsfluidet mot formasjonslagene under trykk.

10 Formasjonslagene eller bergarten blir presset til å sprekke og danne brudd. Et avstivningsmiddel blir plassert i sprekken eller bruddet for å hindre sprekken fra å lukke seg, og for derved å frembringe forbedret flyt av det utvinnbare fluid, f.eks. olje, gass eller vann.

 En riktig utforming av en fraktureringsbehandling er en kompleks
15 ingeniørdisiplin. Produksjonen etter fraktureringen er avhengig av mange faktorer, slik som reservoarets permeabilitet, porøsitet, trykk, injeksjonshastigheter og egenskaper ved de injiserte fluidet. Blant disse faktorene er én av de mest kritiske lukningstrykket, også kalt den minste bergartsspenning på stedet. Lukningstrykket er definert som det fluidtrykk ved hvilket en eksisterende sprekke lukker seg
20 fullstendig. Lukningstiden er den tiden da fluidet i sprekken er fullstendig lekket inn i formasjonen og sprekken lukker seg på sine flater. Lukningstrykket utgjør grunnlaget for all bruddanalyse, og spesielt for trykkminskningsanalysen. Den blir også brukt til valg av avstivningsmidler. Ukorrekt lukningstrykk kan føre til ukorrekt tolkning av fluideffektivitet og dermed uriktig putefluidvolum, noe som kan resultere
25 i at jobben mislykkes eller i dårligere hydrokarbonproduksjon.

 Feltprosedyrer blir rutinemessig utført for å estimere lukningstrykket og andre relevante parametere, slik som fluidvirkningsgrad og lekk-koeffisient. Disse prosedyrene innebærer en kalibreringstest eller en minifrakturering. En minifrakturering er en injeksjons/avstengnings/minsknings-prosedyre. Det utpekte,
30 viskositetsforsterkede fraktureringsfluid (uten avstivningsmiddel) blir injisert i målformasjonen med en konstant hastighet over en tidsperiode. Så blir brønnen avstengt og en trykkminskningsanalyse blir utført. Minifraktureringen blir hovedsakelig brukt til å bestemme bruddhalveringstiden, bruddbredden eller

sprekkbredden, bruddhøyden, fluidtap-koeffisienten, formasjonens elastisitetmodul og fluidvirkningsgraden. Sprekklukningen kan også identifiseres fra minskningskurven som helningsendringer. Andre hendelser slik som minsket sprekkhøyde og flere permeable lag kan imidlertid føre til flere punkter med helningsendring. I mange tilfeller, slik som i naturlige oppsprukne formasjoner med trykkavhengig lekkasje, oppviser minskningskurven den gradvise helningsendring som gjør det vanskelig å plukke ut det riktige lukningstrykk. Av disse grunner kommer forskjellige teknikker ofte til forskjellige lukningstrykk, noe som fører til inkonsistente eller feilaktige tolkninger.

10 Separate lukningstester er derfor blitt utviklet for spesielt å bestemme lukningstrykket.

Den vanligst brukte lukningstest-teknikk er trinnhastigheten, vanligvis utført med avslutningsfluider eller vann. Det tynne fluidet blir injisert inn i målformasjonen med økende hastigheter, som ideelt innbefatter både matrikshastigheter og fraktureringshastigheter om mulig. Matrikshastighetene svarer til strømmingen inn i formasjonen før sprekken blir åpnet, og fraktureringshastigheter er de som induserer et trykk over lukningstrykket slik at sprekken blir åpnet og utvidet. Et stabilisert trykk blir bestemt fra trykkregistreringen for hver hastighet. Trykket blir plottet som funksjon av strømningshastigheten. Den ideelle respons vil vise datapunkter som faller tilnærmet på to rette linjeseksjoner. Den første rette linjen svarer til matriksstrømmingen ved de laveste hastigheter og har en steilere stigning fordi en liten hastighetsøkning vil forårsake en forholdsvis stor trykkøkning. Den annen rette linje svarer til fraktureringen eller sprekkdannelsen ved høyere hastigheter og har flatere helning siden fraktureringstrykket, når sprekken er først er åpnet, er meget mindre følsom for strømningshastigheten. Skjæringen mellom de to linjene er sprekkutvidelsestrykket, noe som avspeiler den minste hastighet som er nødvendig for på hydraulisk måte å utvide en sprekk. Utvidelsestrykket er en øvre grense for lukningstrykk og benyttes ofte som en direkte tilnærmelse til lukningstrykket. Lukningstrykket kan også estimeres fra skjæringen mellom sprekkutvidelseslinjen og y-aksen (som svarer til null pumpehastighet).

Trinnhastighetstesten kan påvirkes av rørfriksjon og "sprekkbuktninger" nær borehullet. Sprekkbuktningene er det ekstra trykk som forårsakes av forskjellige

restriksjoner nær borehullet, slik som en buktet strømningsbane gjennom et mikroringrom mellom sementen og bergarten, begrenset antall perforeringer forbundet med sprekken, flere sprekkgrener, reorientering av sprekken etter hvert som den beveger seg bort fra borehullet, osv. Buktingen får det målte trykk til å bli høyere enn trykket inne i sprekken og er hastighetsavhengig. Følgelig innbefatter utvidelsestrykket som er bestemt fra trinnhastighetstesten, en friksjons/buktnings-komponent. For et reservoar med høy permeabilitet der utvideshastigheten er forholdsvis høy, er friksjonskomponenten ganske signifikant, noe som gjør utvidelsestrykket meget høyere enn lukningstrykket. Både rørfriksjon og bukting er videre hastighetsavhengige og øker når hastigheten avtar. De kan påvirke plottingen av trykk som funksjon av hastighet på en slik måte at utvidelsesdelen ikke passer til en rett linje, eller slik at helningen er forskjellig fra hva den skulle ha vært. Datapunktene kan derfor endres dramatisk, noe som fører til tolkningsfeil.

Innpumping/tilbakestrømning er en annen teknikk som er blitt brukt til å bestemme lukningstrykk. Etter en injeksjonsperiode blir fluidet, istedenfor at brønnen lukkes, ført tilbake til overflaten med en konstant hastighet. Trykkminskningskurven har en karakteristisk stor S-form, som endres fra å være konkav oppover (etter innledningen av tilbakestrømningen når sprekken fremdeles er åpen) til å være konkav nedover (etter at sprekken lukkes når trykket faller hurtig). Bøyningspunktet i den S-formede kurven gir et estimat av lukningstrykket. Når tilbakestrømningen opphører, gjenvinnes borehullstrykket og når et platå som blir kalt tilbakeslagstrykk. Tilbakeslagstrykket gir en annen tilnærming (vanligvis en lavere grense) for lukningstrykket.

Selv om den ser attraktiv ut, er innpumpings/tilbakestrømnings-testen ikke særlig benyttet på området. Dette skyldes hovedsakelig bryet med å måtte rigge opp en tilbakestrømningslinje med en regulerbar innsnevring for å holde tilbakestrømningshastigheten konstant. Den regulerbare innsnevring må kalibreres for å bestemme den trykkavlesning som svarer til tilbakestrømningshastigheten, og må være bemannet under tilbakestrømningen for å opprettholde en konstant hastighet.

En annen teknikk som er blitt brukt til å bestemme lukningstrykk, er injeksjonspulser under trykkminskningen (dvs. avstengingsperioden). Et lite

fluidvolum blir intermittert injisert. Ved hver injeksjon vil borehullstrykket oppvise en trykkpuls. Pulsen vil hurtig dø ut og trykket falle tilbake til den normale minskningskurven hvis sprekken fremdeles er åpen. Hvis sprekken er lukket, vil pulsen dø hen langsommere, og trykket vil ha en forskyvning til over den normale minskningskurven. Siden det er langt mellom pulsene, kan pulsene på det beste avgrense lukningspunktet til mellom to påfølgende pulser. Fremgangsmåten kan ikke gi en nøyaktig bestemmelse av lukningstrykket. Pulsene forstyrrer videre den normale minskningsoppførselen slik at bestemmelsen av minskningshelningen og lekkasjeegenskapene kan bli ødelagt.

10 US 4372380 omhandler en metode for å bestemme minimum in-situ stress i en formasjon hvor det er boret en brønn.

US 5050674 omhandler en metode for å bestemme brudd-lukningstrykket i en frakturert formasjon.

15 US 5275041 omhandler en metode for å bestemme visse parametre som er nødvendig for å planlegge fraktureringsbehandling.

Foreliggende oppfinnelse tilveiebringer en ny fremgangsmåte for å bestemme spreklukningstrykk for en sprekkbehandling i full skala av en undergrunnsformasjon.

20 Foreliggende oppfinnelse tilveiebringer en fremgangsmåte for å bestemme parameterne ved en fullskala fraktureringsbehandling av en undergrunnsformasjon med et lukningstrykk P_c , som omfatter:

- a) å injisere et fluid inn i formasjonen ved en konstant første injeksjonshastighet Q for å skape en sprekk som har et volum;
- b) å minske injeksjonshastigheten til en annen injeksjonshastighet q som er mindre enn den første injeksjonshastigheten Q , og slik at volumet til sprekken blir konstant;
- c) å avstenge en brønn;
- d) å overvåke et borehullstrykk under trinn a) til c);
- e) å bestemme lukningstrykket P_c fra analysen av borehullstrykket ved å benytte en tidsfunksjon for den dimensjonsløse "avstengningstid" Δt_D .

30

Særlige utførelsesformer av den foreliggende oppfinnelse er angitt i kravene 2-11.

Fremgangsmåten ifølge foreliggende oppfinnelse omfatter å injisere et fluid inn i formasjonen ved en første hovedsakelig konstant injeksjonshastighet Q for å skape en sprekk som har et volum, og å minske pumpehastigheten til en betydelig mindre inmatingshastighet q slik at volumet til sprekken blir konstant, med andre ord når likevekt mellom injeksjon og lekkasje. Når sprekkvolumet blir konstant ved likevekt, lukkes brønnen. Borehullstrykket blir overvåket, og lukningstrykket blir bestemt fra analysen av borehullstrykket ved å benytte en tidsfunksjon av den dimensjonsløse "avstengningstid" Δt_D . I henhold til en foretrukket utførelsesform av foreliggende oppfinnelse er denne funksjonen basert på kvadratroten av den dimensjonsløse "avstengningstid" Δt_D .

Den lille hastigheten q bør være mindre enn lekkasjehastigheten til fluidet i sprekken ved tidspunktet for trykkfall. Den innledende konstante hastighet er fortrinnsvis den forventede fraktureringshastigheten for fullskala-behandlingen. Ifølge en foretrukket utførelsesform er hastighetsforholdet q/Q fortrinnsvis mindre enn 0,2.

Som et resultat av minskningen av injeksjonshastigheten, avtar borehullstrykket innledningsvis etter hvert som mer fluid lekker ut i formasjonen enn hva som injiseres. Fluidlekkasjen minsker med tiden, og når sprekken nærmer seg lukning, når injeksjonen og lekkasjen likevekt. Når sprekkvolumet blir konstant ved likevekt, avflates trykket, noe som lett kan identifiseres. Fra det målte trykk ved det innledende hastighetsfall og ved likevekt, kan lukningstrykket estimeres. Trykkfallet ved avstengning avspeiler buktnings- og friksjons-virkningene som svarer til den lille injeksjonshastigheten. Det estimerte lukningstrykk kan således korrigeres for å ta hensyn til buktning og friksjon. Fremgangsmåten er operativt enkel å implementere i felten.

Med en modifisert tidsfunksjon som erstatter den konvensjonelle G-funksjonen, blir i tillegg den ideelle minskningskurven en rett linje, og helningen er den samme som den konvensjonelle G-plottet. Fra helningen kan lekkasjekoeffisienten bestemmes.

30

Kort beskrivelse av tegningene

Fig. 1 viser bunnhullstrykket som funksjon av tid plottet i en typisk lukningstest med trinnhastighet;

Fig. 2 viser bunnhullstrykket som funksjon av injeksjonshastighet i en typisk trinnhastighetslukning;

Fig. 3 viser bunnhullstrykket som funksjon av tid, og den tilsvarende injeksjonshastighet i likevektstesten i henhold til oppfinnelsen;

5 Fig. 4 viser borehullstrykket som funksjon av G-funksjonen i en kontinuerlig injeksjonstest med lav hastighet i henhold til oppfinnelsen;

Fig. 5 viser borehullstrykket som funksjon av en modifisert G-funksjon i en injeksjonstest med kontinuerlig lav hastighet i henhold til oppfinnelsen;

10 Fig. 6 til 8 viser borehullstrykket som funksjon av en modifisert G-funksjon fremskaffet ved å utføre felttester.

Som diskutert ovenfor er en foretrukket, konvensjonell lukningstest-teknikk basert på en trinnhastighetstest, eller mer spesielt, en trinnhastighet fulgt av en tilbakestrømning og et trykktilbakeslag. En typisk trykkrespons ifølge lukningstesten er illustrert på fig. 1. På denne figuren er fluidhastigheten representert ved hjelp av trinnkurven IR. I fase ① blir et fluid injisert ved økende hastigheter. Under denne fase når injeksjonshastigheten et punkt hvor bunnhullstrykket i borehullet overskrider sprekkutvidelsestrykket P_{ext} , men i de fleste tilfeller vil operatøren fortsette å øke hastigheten i henhold til planen. I fase ② fortsetter pumpingen ved den samme hastighet i fra fem til ti minutter etter sprekkutvidelsen. I fase ③ blir injeksjonen stoppet og ventilen åpnet for øyeblikkelig å starte tilbakestrømningen (negativ injeksjonshastighet). Ved lukningstrykket P_c viser trykkresponsen en tydelig reversering i krumningen at lukning har funnet sted, noe som indikerer en endring av fluidtilbakestrømning fra den åpne sprekken til tilbakestrømning gjennom grunnmatriksen. Til slutt, i fase ④ er avstengningen fullført og tilbake-slagstrykket P_r etter avstengning tjener som en nedre grense for lukningstrykket.

15
20
25

Som vist på fig. 2 vil plottingen av bunnhullstrykk som funksjon av hastighet vise to helninger. Skjæringen mellom de to helningene indikerer sprekkutvidelsestrykk P_{ext} . Endringen av helningen er et resultat av forskjellige trykkresponser for matrikslekkasje ved lav pumpehastighet og sprekkutvidelse ved høyere pumpehastighet. Utvidelsestrykket er vanligvis fra 3,4 atm (50 psi) til 13,6 atm (200 psi) større enn lukningstrykket på grunn av fluidfriksjon i sprekken og sprekkseighet, selv om langt større differanser er blitt observert. Et estimat av

30

lukningstrykket P_c blir tilveiebrakt fra skjæringen mellom helningslinjen for sprekkutvidelsen og y-aksen (null pumpehastighet).

Mer nøyaktig bestemmelse av lukningstrykket kan oppnås fra tilbakestrømningsdelen av trykkresponsen. Tilbakeslagstrykket gir videre en nedre
5 grense for lukningstrykket. Tilbakestrømningstesten blir imidlertid sjeldent utført i felten siden den krever opprigging av en tilbakestrømningssløyfe med en strømningsregulator eller en justerbar innsnevring for å opprettholde en konstant tilbakestrømningshastighet.

En enkel avstengning/minskning blir ofte benyttet istedenfor
10 tilbakestrømning. For å gi lukningstrykk kan avstengnings/minsknings-dataene analyseres ved å plote bunnhullstrykket som funksjon av en tidsfunksjon av avstengningstiden, oftest en funksjon kalt G-funksjonen. Avstengnings/minsknings-dataene er imidlertid ofte vanskelige å analysere og kan gi unøyaktig lukningstrykk. Dette er fordi minskningskurven kan oppvise flere
15 helningsendringer eller kontinuerlig endrende helninger på grunn av en glatt overgang (sprekkflate-konsolidering) fra sprekkoppførsel før lukningen til reservoar-diffusjonsoppførsel etter lukningen.

Sprekklukningstrykket blir videre komplisert av det faktum at utvidelsestrykket som er bestemt fra trinnhastighetstesten inneholder en
20 buktningskomponent som er hastighetsavhengig og øker når hastigheten øker. Den påvirker således resultatet av trinnhastighetstesten (trykk som funksjon av hastighet) og øker det tilsynelatende sprekkutvidelsestrykk. Den kan også endre datapunktene på en slik måte at utvidelsesdelen ikke passer på en rett linje, eller slik at helningen blir forskjellig fra hva den skulle være, noe som fører til
25 tolkningsfeil. Rørfriksjon kan likeledes innføre tolkningsfeil siden bare overflatetrykk blir målt i de fleste tilfeller, og det beregnede bunnhullstrykk er vanligvis ikke nøyaktig ved høyere hastigheter på grunn av feil i friksjonsberegningen.

En annen faktor som påvirker tolkningen av trinnhastigheten, er den
30 inhomogene beskaffenheten til reservoaret. Sprekkintervallet inneholder ofte flere dellag. Den sprekken som åpnes innledningsvis ved lav hastighet, kan kanskje bare dekke en del av sonen, og sonedekningen øker når hastigheten øker. Dette forårsaker en mer gradvis overgang fra matriksstrømningshelning til

sprekkutvidelse, noe som bidrar til usikkerhet i utvidelses- og luknings-trykkbestemmelsen. Bukningen av sprekkene kan også påvirke tilbakestrømningstesten, noe som får lukningstrykket til å være lavere enn den virkelige verdi siden strømningsretningen er den motsatte av injeksjon.

5 Oppfinnelsen foreslår en ny måte å bestemme lukningstrykk på ved hjelp av minskningsanalyse med kontinuerlig injeksjon ved en liten hastighet q under trykkminskningsperioden. Denne fremgangsmåten, kalt en "likevektstest" er illustrert på fig. 3 som viser utviklingen av fluidstrømningshastigheten (buntrinnekurven med prikket linje) og bunnhullstrykket (øvre heltrukne kurve) som funksjon av tid.

10 Under det første trinn av likevektstesten blir fluidet injisert ved en pumpehastighet Q . Like etter at pumpehastigheten reguleres et trinn ned, er borehullstrykket lik P_{sd} . I stedet for å stenge av injeksjonen, blir pumpehastigheten Q senket til en liten hastighet q for å fortsette å mate fluidet inn i sprekkene. Denne hastigheten er meget mindre enn hovedinjeksjonshastigheten Q i trinnhastighetstesten (normalt i størrelsesorden 1590 l/min-2385 l/min (10-15 bpm)), og vanligvis blir det foretrukket et hastighetsforhold q/Q som er mindre enn 0,2.

Behandlingstrykket som innledningsvis minsker som i den konvensjonelle avstengningsminskning fordi den lille hastigheten q er meget mindre enn hovedinjeksjonshastigheten Q , og som sådan er meget mindre enn sprekklekkasjehastigheten så vel som hastighetsfallet over tid. Sprekkvolumet og trykket minsker med tiden etter hvert som mer fluid lekker bort enn hva som blir injisert. Når sprekkvolumet er tilstrekkelig redusert, kan sprekk lengden også falle tilbake når sprekkene nærmer seg lukning. Lekkasje hastigheten avtar med tiden og til slutt til det punkt hvor lekkasje hastigheten og injeksjonshastigheten q blir like. Etter det avtar sprekkvolumet ikke lenger og borehullstrykket flater ut til en verdi og begynner så øke siden lekkasje hastigheten fortsetter å minske med tiden, mens injeksjonshastigheten forblir konstant. Minimumstrykket, hvor hastighetslikevekt er nådd, blir kalt likevektstrykket P_{eq} . Tidspunktet hvor likevektstrykket blir nådd, kalles t_{eq} (alle tider er beregnet ut fra begynnelsen av injeksjonen med den høye hastighet Q , slik at likevektstiden t_{eq} som vist på fig. 3, også innbefatter pumpetiden t_p med den høye injeksjonshastighet Q). Når likevekt nås, kan brønnen stenges. Trykkfallet ved den endelige stengningen er ΔP_{si} , og testen er fullført.

En hovedforskjell mellom trykkresponsen i en likevektstest og den i den konvensjonelle avstengning/minskning er at trykket forblir over lukningstrykket inntil etter den siste stengning hvis den lille injeksjonshastigheten q er valgt riktig slik at den er større enn lekkasjehastigheten i matriksen. Hastighetslikevekten er
 5 lett å identifisere fra trykksignaturen og er unik, noe som gjør at tvetydigheter kan unngås i forbindelse med den konvensjonelle avstengning/minskning hvor flere helningsendringer kan oppstå.

For at sprekken fremdeles skal være i det minste delvis åpen når likevekten nås, må den lille injeksjonshastigheten q være større enn injeksjonshastigheten til
 10 matriksen hvis sprekkutvidelseshastighet er kjent fra en tidligere trinnhastighets-test utført i brønnen eller på det samme feltet, så kan q velges lik eller større enn den estimerte utvidelseshastighet. For en formasjon med høy permeabilitet med høy lekkasje, kan sprekkutvidelseshastigheten være forholdsvis høy. I dette tilfelle kan likevektstesten utføres etter en minifrakturering som benytter et tverrbundet
 15 fluid som danner en filterkake på sprekkoverflaten og reduserer fluidlekkasjen.

Det fluidvolum som pumpes inn under hovedinjeksjonstrinnet med en hastighet Q , må være tilstrekkelig til å skape en sprekk i den sone som er av interesse. Store volumer kan derimot ikke bare øke fluidkostnaden, men også tiden for å nå likevekt.

Den tid som trengs for å nå likevekten, kan variere betydelig fra brønn til
 20 brønn basert på observasjonene i felttestene. Den er en funksjon av injeksjonshastighet, lekkasjehastighet og sprekkvolum. En forholdsvis høy q og lite sprekkvolum (kort hovedinjeksjonstrinn) vil sannsynligvis resultere i at likevekt nås ganske hurtig. Men å nå likevekt for hurtig kan noen ganger påvirke analysen. Ett
 25 av problemene er å plukke ut det umiddelbare trykkfalltrinn, P_{sd} , og å bestemme minskningshelningen når det er en stor del med trykksvingninger like etter hastighetsnedtrappingen (vannhammer-virkning). Ved å velge P_{sd} etter at trykkoscillasjonen dør hen, kan resultatet blir et P_{sd} som er for lavt og som fører til feil i det beregnede lukningstrykk. Hvis dette problemet finnes, kan man måtte
 30 redusere den lille hastigheten q og/eller øke sprekkvolumet (dvs. øke pumpetiden ved hovedpumpehastigheten Q).

For en tett formasjon kan det ta lang tid å nå likevekt, akkurat som ved konvensjonell avstengning/minskning hvor en lang avstengningstid er ventet. I

denne situasjonen kan trykkminskningen finne sted meget langsomt etter hvert som sprekken når likevektstilstanden, som kan gi et falskt inntrykk av at likevekten er blitt nådd når den ikke er det. Sanntidsvisningen av en modifisert G-funksjonsplotting vil bidra til å identifisere endringen i trykktrenden og bestemme om

5 likevekten er blitt nådd.

Umiddelbart etter at pumpehastigheten faller til den lave matingshastigheten, er lekkasjehastigheten i sprekken vanligvis meget større enn matingshastigheten. Trykket i sprekken ventes derfor å avta på en lignende måte som ved den konvensjonelle avstengnings/minsknings-testen. Dette er illustrert som den innledende minskningsdel av den kontinuerlige injeksjonskurven på fig. 4 hvor borehullstrykket P_w er plottet som funksjon av G-funksjonen definert av Nolte i

10 ”*Determination of Fracture Parameters from Fracturing Pressure Decline*”, i artikkel SPE 8341 presentert på the Society of Petroleum Engineering Annual Conference and Exhibition, Las Vegas, USA (23.-26. september, 1978). G-funksjonen er uttrykt i ligning (1) uttrykt ved den dimensjonsløse avstengningstid Δt_D som er definert som forholdet mellom tiden siden avstengning og pumpetiden

15

$$t_p: \Delta t_D = \Delta t / t_p = \frac{t - t_p}{t_p}.$$

$$G(\Delta t_D) = \frac{4}{\pi} [g(\Delta t_D) - g_0] \quad \text{Ligning (1)}$$

20 Hvor $g(\Delta t_D, \alpha) = \begin{cases} (1 + \Delta t_D) \sin^{-1}(1 + \Delta t_D)^{-1/2} + \Delta t_D^{1/2} & \alpha = 1/2 \\ \frac{4}{3} ((1 + \Delta t_D)^{3/2} - \Delta t_D^{3/2}) & \alpha = 1 \end{cases}$

$$\text{og } g_0(\alpha) = \begin{cases} \pi/2 & \alpha = 1/2 \\ 4/3 & \alpha = 1 \end{cases}$$

EkspONENTEN α er log/log-helningen til det totale sprekkarealet ved en tid t som funksjon av t . Verdien av α er avhengig av fluidvirkningsgraden og avtar vanligvis under injeksjonstiden når lekkasjen avtar på grunn av dannelsen av filterkaken. Grenseverdiene for α for et veggdannelsesfluid er $\frac{1}{2}$ og 1, vanligvis har

5 fraktureringsfluider en verdi nær 0,6. I praksis skal det bemerkes at G-ligningen fører hovedsakelig til de samme resultater når α varierer mellom sine yttergrenser slik at beregningen kan utføres ved å benytte en hvilken som helst verdi eller den gjennomsnittlige, resulterende verdi.

Det skal bemerkes at fig. 3 kun er ment som en illustrasjon og ikke angir re-

10 elle data. Helningen til minskningen er mindre enn den tilsvarende helning ved en avstengning/minskning på grunn av injeksjonen. Når sprekken nærmer seg lukning, avtar sprekk lengden og vil til slutt stabilisere seg når lekkasjen utbalanserer den lille injeksjonen. Med injeksjonshastighet større enn matrikshastigheten, ventes det at sprekken blir holdt delvis åpen av injeksjonen.

15 Dette betyr at borehullstrykket vil flate ut når injeksjonen og lekkasjen når likevekt. Det tilsvarende trykk, betegnet som P_{eq} , bør være over lukningstrykket P_c .

Et fluid med lav viskositet blir vanligvis foretrukket for likevektstesten. Med et fluid med lav viskositet blir nettotrykket i sprekken lite og øker dermed nøyaktigheten til lukningstrykk-estimatet. Fluidet kan f.eks. være en lineær gel

20 eller KCl-vann som vanligvis brukes som spylefluid. Hvis formasjonen har høy permeabilitet og dermed høy lekkasje slik at en forholdsvis stor q må brukes, så kan et fluid med mindre lekkasje (kanskje høyere viskositet) vurderes. En forsinket, tverrbundet gel behøver ikke å være et godt valg siden den kan forårsake friksjonstrykkendring med tiden på grunn av at reologiendring finner sted

25 i rørledningen under injeksjonen med den lille hastigheten.

Siden injeksjonshastigheten er liten og det benyttes et fluid med lav viskositet, bør nettotrykket i sprekken også være lavt. Likevektstrykket gir derfor en direkte tilnærming av lukningstrykket.

I likhet med utvidelsestrykket i trinnhastighetstesten, inneholder P_{eq} en friksjonskomponent som skyldes sprekkbuktning og friksjon. I henhold til en

30 foretrukket utførelsesform av foreliggende oppfinnelse kan denne buktnings/friksjons-komponenten estimeres fra trykkfallet ved den endelige avstengning, vist som ΔP_{ψ} på fig. 4. Lukningstrykket kan således estimeres som

Peq - ΔPsi, eller det endelige avstengningstrykket Psi. Utflatingen av trykkurven gir en tydelig indikasjon på at sprekken nærmer seg lukning, og eliminerer således usikkerheten i den konvensjonelle avstengnings/minsknings-analyse hvor trykket fortsetter å avta etter lukning og hvor helningen kan øke, avta eller forbli den samme avhengig av reservoarets oppførsel.

En utledning av trykkminskningsfunksjonen i likhet med den konvensjonelle G-funksjonsanalyse blir utført for kvadratrot-lekkasje (Newtonske fluid). Trykkminskningen kan vises å ha følgende uttrykk:

$$p_{ws} - p_w(\Delta t_D) = p^* \left[G(\Delta t_D) - \frac{q}{Q(1-\eta)} \frac{4\kappa g_o}{\pi} \Delta t_D \right] \quad \text{Ligning (2)}$$

hvor p^* er det karakteristiske minskningstrykk,

$$p^* = \frac{\pi r_p C_L \sqrt{t_p}}{2c_f}$$

15

Ligning (2) atskiller seg fra den konvensjonelle avstengning/minskning ved at det annet ledd i parentesene, hvor Q er injeksjonshastigheten under hovedpumpefasen, q er den lille matingshastigheten, η er fluidvirkningsgraden ved slutten av hovedpumpefasen, κ er sprutfaktoren ($\kappa=1$ hvis spruten er neglisjerbar), og $\Delta t_D = t/t_p - 1$ er den dimensjonsløse "avstengningstid". Med fluidvirkningsgrad typisk lav for fluid med lav viskositet og $\kappa = 1$, kan ligning (2) reduseres ytterligere til ligning (3):

20

$$p_{ws} - p_w(\Delta t_D) = p^* \left[G(\Delta t_D) - \frac{q}{Q} 2\Delta t_D \right] \quad \text{Ligning (3)}$$

25

Siden q/Q er liten, er det annet ledd vanligvis meget mindre enn G-funksjonen. Hvis vi innfører en funksjon $G'(\Delta t_D)$ som er lik uttrykket i parentesene, så er plottingen av p_w som funksjon av G' en rett linje, og helningen er den samme som helningen til den konvensjonelle G-plotting, dvs. p^* . Dette er illustrert på fig. 5.

Selv om $P_{eq} - \Delta P_{si}$, eller avstengningstrykket P_{si} , gir en tilnærming til lukningstrykket, er det fremdeles større enn det virkelige lukningstrykk på grunn av det endelige nettotrykk tilknyttet injeksjonen. Hvis imidlertid nettotrykket i sprekken kan estimeres, kan lukningstrykket bestemmes mer nøyaktig ved å subtrahere

5 nettotrykket.

For en vanlig sprekk (sprekklengde større enn sprekkhøyde) viser en analytisk undersøkelse at forholdet mellom det netto likevektstrykk, $P_{net,eq}$ og nettotrykket umiddelbart etter det nedadgående hastighetstrinnet (dvs. ved $t = t_p$, tilfredsstillende $P_{net,sd}$ følgende ligning:

10

$$\lambda = \frac{P_{net,eq}}{P_{net,sd}} = \left(\frac{q}{Q} \right)^{1/2} \left(\frac{n+3}{n+2} \frac{2n+2}{2n+3} \right) \left(\frac{\pi}{(n+2)} \frac{\kappa}{1-\eta} (t_{eq}/t_p)^{1/2} \right)^{1/(2n+2)} \quad \text{Ligning (4)}$$

hvor t_{eq} er tidspunktet da likevekt blir nådd, n er kraftlovindeksen til fluidet som injiseres, κ er sprutfaktoren¹ ($\kappa = 1$ når spruten er neglisjerbar), og η er den

15 forventede fluidvirkningsgrad.

For et Newtonsk fluid ($n=1$), blir ovennevnte ligning lik

$$\lambda = \frac{P_{net,eq}}{P_{net,sd}} = 1.08 \left(\frac{q}{Q} \right)^{1/2} \left(\frac{\kappa}{1-\eta} \sqrt{t_{eq}/t_p} \right)^{1/4} \quad \text{Ligning (5)}$$

20 For en meget kort eller radial sprekk når trykket et minimum før injeksjonshastigheten q blir utlignet med lekkasjen. Dette skyldes det faktum at nettotrykket avtar når sprekkelengden eller radien avtar, og omvendt fører minskningen i sprekkelengde eller radius til trykkøkning. Etter at pumpehastigheten faller fra Q til q , avtar sprekkevolumet gradvis på grunn av at fluidlekkasjen er

25 større enn injeksjonshastigheten q , og det er også nettotrykket. Når nettotrykket i sprekken avtar til det punkt hvor det er lik friksjonstrykkfallet i sprekken i forbindelse med injeksjonshastigheten q , kan nettotrykket ikke avta ytterligere. I det tilfelle kan nettotrykk-forholdet λ tilnærmes ved hjelp av følgende ligning:

$$\lambda = \frac{P_{\text{net,eq}}}{P_{\text{net,sd}}} = \left(\frac{q}{Q} \right)^{n/(2n+2)} \quad \text{Ligning (6)}$$

Forholdet λ er vanligvis meget mindre enn 1. Ved å bruke ligning (4) eller (6) kan lukningstrykket P_c estimeres fra P_{eq} og trykket umiddelbart etter hastighetsfallet P_{sd} via følgende ligning (8):

$$P_c = P_{eq} - \Delta P_{si} - (P_{sd} - P_{eq}) \frac{\lambda}{1 - \lambda} \quad \text{Ligning (7)}$$

hvor ΔP_{si} er trykkfallet som skyldes buktning og friksjon som er bestemt av trykkendringen ved den endelig avstengning.

Som det er blitt understreket i beskrivelsen ovenfor, må den lille matingshastigheten q under minskningen være over matrikshastigheten slik at sprekken blir holdt delvis åpen. Denne hastigheten kan velges som sprekkutvidelseshastighet bestemt fra trinnhastighetstesten, eller litt over. Den kontinuerlige injeksjonstesten kan også utføres etter kalibreringstesten med viskøs gel. Det blir foretrukket å gjøre dette spesielt for reservoarer med høy permeabilitet hvor fluidlekkasje og dermed matrikshastigheten er høy. Etter pumpingen i kalibreringstesten, blir lekkasjen gjennom sprekkflaten betydelig redusert av gelfilterkaken. "Matriksstrømningen" blir betydelig forringet og en liten hastighet vil forårsake at sprekken åpnes.

Den foreslåtte fremgangsmåte med liten injeksjon under trykkminskning tilveiebringer en alternativ fremgangsmåte for å bestemme lukningstrykk. Den gir en letter identifiserbar sprekklukningsSignatur enn den konvensjonelle stengning / minskning, selv om den lett kan utføres på feltet uten spesiell opprigging som i tilfelle med innpumpings/tilbakestrømnings-testen. Lett identifisering av sprekklukning gjør det også mulig for personalet å kunne fortsette umiddelbart til hovedsprekkbehandlingen uten forlenget avstengningstid for å innfange trykkoppførselen etter stenging for å oppnå riktig lukningsidentifisering og minskningsanalyse. Den tilveiebringer også et middel til å korrigere for sprekkbuktningen i nærheten av borehullet ved å bruke det endelige avstengningstrykk.

Én ulempe ved fremgangsmåten er at hvis matingshastigheten under minskningen er for lav (under minimumshastigheten for å opprettholde en åpen sprekk), kan likevektstrykket falle under lukningstrykket og en betydelig feil kan bli resultatet. Det blir derfor foretrukket å utføre den kontinuerlige injeksjonstest etter trinnhastighetstesten for å velge matingshastigheten over matrikshastigheten, eller å utføre testen etter en kalibreringstest slik at en liten hastighet er tilstrekkelig til å holde sprekken delvis åpen på grunn av redusert lekkasje ved hjelp av gelfilterkaken på sprekkoverflaten.

10 Feltilfelle #1

Den formasjon som fraktureres er en sandstensformasjon ved en dybde på 2760 m-2771 m (9056'-9191') med en netto høyde på 35 m (115'). Formasjonspermeabiliteten er 0,07 md. Behandlingsplanen består i å belaste hullet og stenge det, en kalibreringstest, en innpumpingstest kalt FET utført i de vanlige jobber som består av en nedtrappingstest og en avstengningsminskning, og hovedavstengningsmiddel-fraksjonen.

Under likevektstesten blir en 9 kg/3785 l (20 lb/1000 gal) lineær "guar" blir pumpet inn ved (Q) på 2385 l/min (15 bpm) før hastigheten faller til den lille hastigheten (q) på 265,5 l/min (1,67 bpm). Pumpetiden ved hovedinjeksjons-hastigheten er 4 minutter. Behandlingstrykket flater ut 3 minutter etter at hastigheten trappes ned. Trykkminskningen som er plottet som en funksjon av den modifiserte G-funksjon, G' , er vist på fig. 6. Den rette linjen som svarer til helningen av kurven, er vist som en prikket linje.

Fra behandlingstrykket blir følgende trykk estimert:

25	Psd	251 atm (3692 psi) (verdien til den rette linje for $G'=0$)
	Peq	249 atm (3665 psi) (platå ved slutten av testen)
	ΔP ved stengning	3,6 atm (53 psi) (fremskaffet ved hjelp av en plotting i likhet med fig. 3)

Med hydrostatisk trykk på 271 atm (3991 psi) blir stengningstrykket beregnet (ved å bruke ligning 6 og 8) til å være $P_c = 516$ atm (7583 psi).

Til sammenligning er lukningstrykket som bestemmes fra trykkminskning etter likevektstesten, avstengning og FET-avstengning tilnærmet lik henholdsvis 515 atm (7570 psi) og 523 atm (7683 psi). G-funksjonsplottingen for minsknings-

perioden til FET er vist på fig. 6. Det lukningstrykk som bestemmes fra FET er høyere enn det fra likevektstesten med omkring 6,8 atm (100 psi). En lignende økning i ISIP etter FET sammenlignet med ISIP etter likevektstesten, blir også observert (en økning på omkring 10 atm (150 psi)). Denne økningen kan ha blitt forårsaket av en poreelastisitetseffekt. Til tross for dette blir det oppnådd en rimelig god overensstemmelse mellom de to metodene.

Trykkminskningshelningen p^* fra fig. 5 er 2,0 atm (30 psi), noe som gir en virkningsgrad eller effektivitet på 44% (ved slutten av hovedinjeksjonen før nedtrappingen av hastigheten). Til sammenligning gir analysen av trykkminskningen etter FET en p^* på 1,6 atm (24 psi) og en virkningsgrad på 55% for FET.

Feltilfelle #2

Den formasjonen som behandles er en sandstensformasjon ved en dybde fra 1658 m-1672 m (5440' - 5487') med en nettohøyde på 11,6 m (38'). Formasjonspermeabiliteten er 0,02 md. Behandlingsplanen består i en likevektstest, FET og en stengningsfrakturering (prop frac).

Hovedinjeksjonshastigheten Q er 2385 l/min (15 bpm) og den faller til den lille verdien på 184 l/min (1,16 bpm). Det fluid som brukes er 13,6 kg/3785 l (30 lb/1000 gal) lineær CMHPG. Pumpetiden ved hovedinjeksjonshastigheten er 3 minutter. På grunn av den lave lekkasjehastigheten blir likevekten ikke nådd før 16 minutter etter nedtrappingen av hastigheten. Fig. 7 viser trykk som funksjon av modifisert G-funksjon, G' .

Fra behandlingstrykket ble følgende trykk estimert:

25	P_{sd}	172 atm (2535 psi)
	P_{eq}	169 (2487 psi)
	ΔP ved stengning	7 atm (104 psi)

Med hydrostatisk trykk på 161 atm (2370 psi) blir lukningstrykket beregnet til å være $P_c = 320$ atm (4710 psi).

Til sammenligning er lukningstrykket som er bestemt fra trykkminskningen etter FET-stengningen omtrent 323 atm (4751 psi) som vist i plottingen av G -funksjonen på fig. 8. Lukningstrykket som er estimert ut fra de to metodene, stemmer godt overens.

Trykkminskningshelningen p^* fra fig. 7 er 1,6 atm (24 psi), noe som gir en virkningsgrad på 67% (ved slutten av hovedinjeksjonen før hastighetsnedtrappingen). Til sammenligning gir analysen av trykkminskningen etter FET en liten p^* på 1,4 atm (21 psi) og en virkningsgrad på 60% for FET.

5

Feltilfelle #3.

I dette feltilfelle ble injeksjonen ikke pumpet for det formål å bestemme lukningstrykket. I stedet består behandlingen av å pumpe et viskoelastisk basert fluid forut for avstivningsmiddel-fraktureringsfluidet for å plassere en kunstig
 10 barriere ved bunnen av sprekken for å hindre nedadgående høydevekst på grunn av hovedsprekken. Divertal-FRAC-trinnet innebærer å pumpe puten med en høyere hastighet for å skape sprekkelengde, og så et slam eller mudder ved en lavere hastighet for å gjøre det mulig å avsette sand for å bygge barrieren. Tilfeldigvis er denne prosedyren lik likevektstesten, og derfor kan
 15 trykkregistreringen analyseres ved å bruke fremgangsmåten for likevektstesten til å oppnå et estimat av lukningstrykket.

Den formasjonen som behandles, inneholder sand/skifer-sekvenser ved en dybde på 1690 m (5544'). Målintervallet har en brutto høyde på 18 m (60') og en netto høyde på 7 m (24'). Sandpermeabiliteten er 33 md. Behandlingsplanen
 20 består i innpumping #1, innpumping #2, pute, og så hovedfraktureringen. Innpumping #1 er en injeksjonstest som innbærer å pumpe inn 3975 l (25 bbls) med 2% KCl-vann ved 2003 l/min (12,6 bpm) og så lukke. Innpumping #2 består i å pumpe inn 6042 l (38 bbls) med et felles løsemiddel ved en hastighet på 509 l/min (3,2 bpm), fulgt av 2067 l (13 bbls) med 2% KCl-vann ved en hastighet på
 25 2003 l/min (12,6 bpm) (bemerk: rørvolumet er 8426 l (53 bbls)). DivertalFRAC består av 5565 l (35 bbls) med et overflateaktivt stoff som pute, 4452 l (28 bbls) med 0,8% viskoelastisk, overflateaktivt stoff (med sandslam), og 8426 l (53 bbls) med 2% KCl-spyling, alt med en hastighet på 2003 l/m (12,6 bpm), fulgt av 5565 l (35 bbls) med 2% KCl over spyling med en hastighet på 509 l/min (3,2 bpm.) Fra
 30 behandlingstrykket og fra G' -kurven som er vist på fig. 8, blir følgende trykk estimert:

P_{sd}	80 atm (1182 psi)
P_{eq}	69 atm (1015 psi)

ΔP ved stengning 15 atm (225 psi)

Med hydrostatisk trykk på 166 atm (2433 psi) blir lukningstrykket beregnet til å være $P_c = 198$ atm (2901 psi).

5 Til sammenligning er lukningstrykkene som er bestemt henholdsvis fra trykkminskningen etter innpumping #1, innpumping #2 og etter stengningen av DivertalFRAC 201 atm, 211 atm og 213 atm (2950 psi, 3105 psi og 3130 psi). Igjen stemmer lukningstrykket fra likevektstesten godt overens med de fra minskning etter avstengning.

10 Trykkminskningshelningen p^* fra fig. 8 er 21,8 atm (320 psi), noe som gir en virkningsgrad på 44% (ved slutten av DivertalFRAC før overspyling). Til sammenligning gir analysen av trykkfallet etter innpumping nr. 1 en p^* på 22 atm (325 psi) og en virkningsgrad på 44%.

15 Likevektstesten kan kombineres med andre injeksjonstester eller et hvilket som helst injeksjonstrinn som allerede er planlagt for andre formål. Den kan f.eks. kombineres med en trinnhastighetstest. Etter opptrapping av hastigheten til den siste hastighet, blir hastigheten holdt konstant over en tidsperiode og faller så til den lille hastigheten q inntil likevekten blir observert.

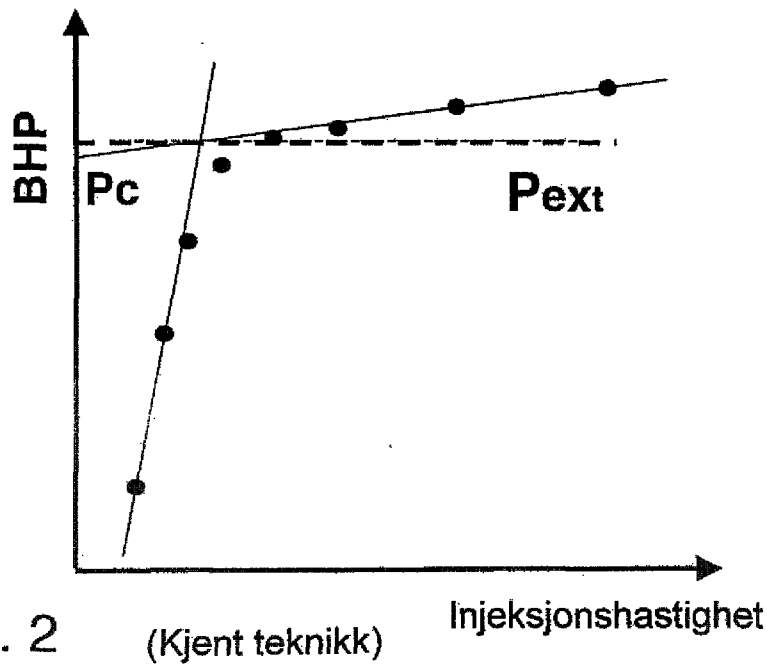
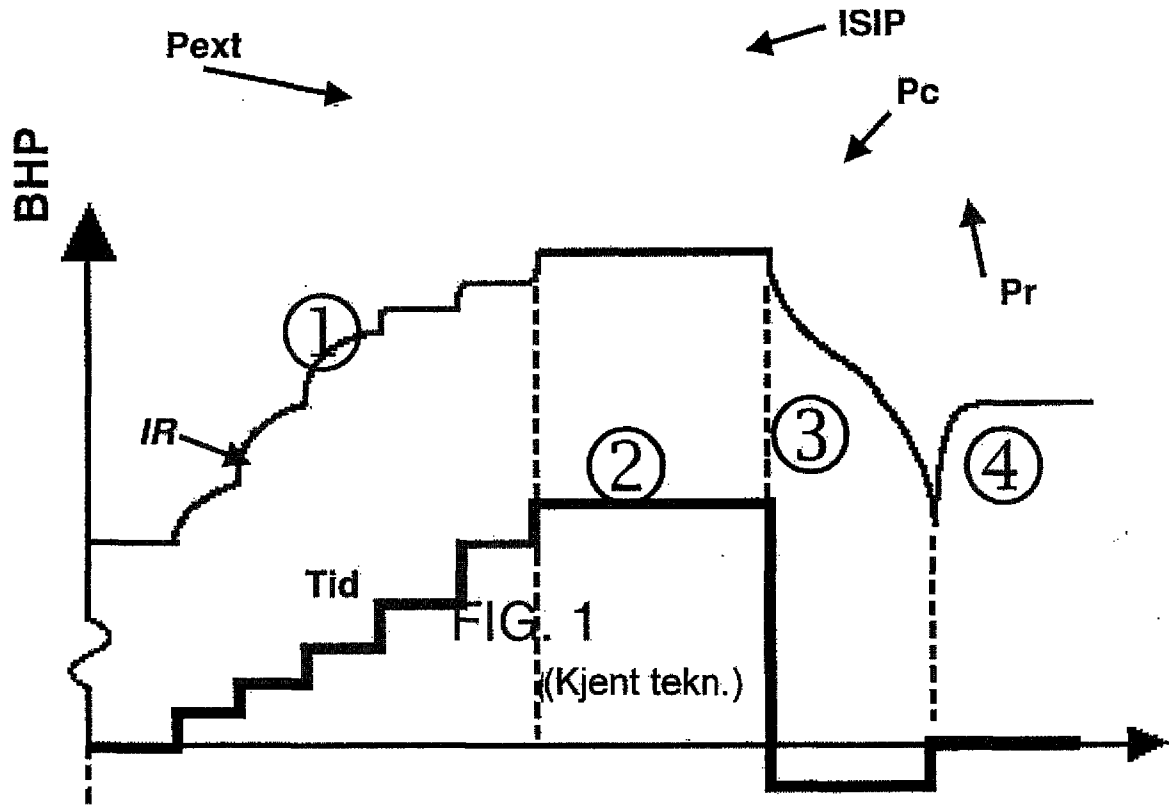
20 Likevektstesten kan brukes sammen med den konvensjonelle avstengnings / minsknings-testen for å tilveiebringe et uavhengig lukningstrykk-estimat som bidrar til å identifisere det riktige lukningspunkt på minskningskurven når flere muligheter er tilstede, eller som tjener som lukningspunktet når det ikke kan identifiseres fra minskningskurven. I de situasjoner hvor minifrakturering ikke utføres, gir likevektstesten ikke bare et estimat på lukningstrykket, men også av fluidvirkningsgrad-estimatet for å bidra til å kalibrere behandlingsutformingen.

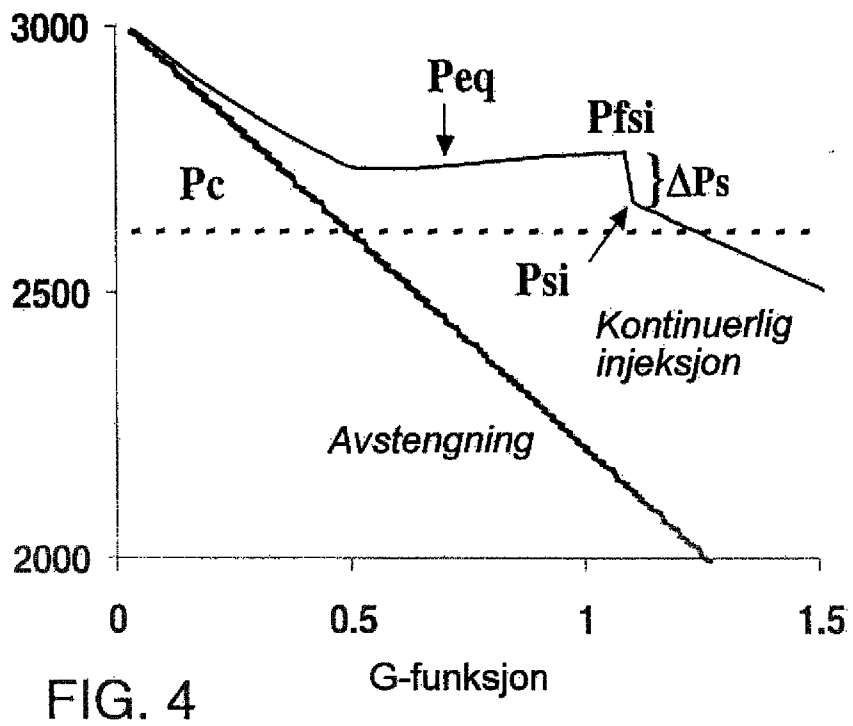
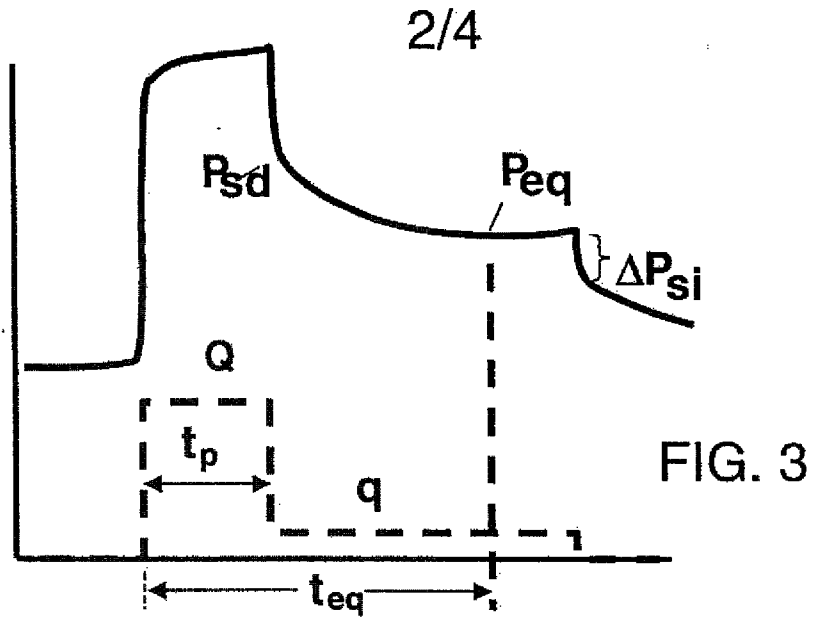
PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for å bestemme parameterne ved en fullskala fraktureringsbehandling av en undergrunnsformasjon med et lukningstrykk P_c ,
5 karakterisert ved:
- a) å injisere et fluid inn i formasjonen ved en konstant første injeksjonshastighet Q for å skape en sprekk som har et volum;
 - b) å minske injeksjonshastigheten til en annen injeksjonshastighet q som er mindre enn den første injeksjonshastigheten Q , og slik at
10 volumet til sprekken blir konstant;
 - c) å avstenge en brønn;
 - d) å overvåke et borehullstrykk under trinn a) til c);
 - e) å bestemme lukningstrykket P_c fra analysen av borehullstrykket ved
15 å benytte en tidsfunksjon for den dimensjonsløse "avstengningstid"
 Δt_D .
2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, som videre omfatter at det før det første trinnet a) blir foretatt en injeksjonstest med trinnvis hastighet for å bestemme en
20 matrikshastighet for formasjonen;
og hvor ovennevnte injeksjonshastighet minskes til en innmatingshastighet q som er mindre enn den første injeksjonshastigheten Q , men større enn matrikshastigheten som bestemt ovenfor.
3. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor tidsfunksjonen
25 er en funksjon av kvadratroten av "avstengningstiden" Δt_D .
4. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor den første injeksjonshastigheten Q er den forventede fraktureringshastigheten i full skala.
- 30 5. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor forholdet mellom den annen injeksjonshastigheten q og den første injeksjonshastigheten Q er mindre enn 0,2.

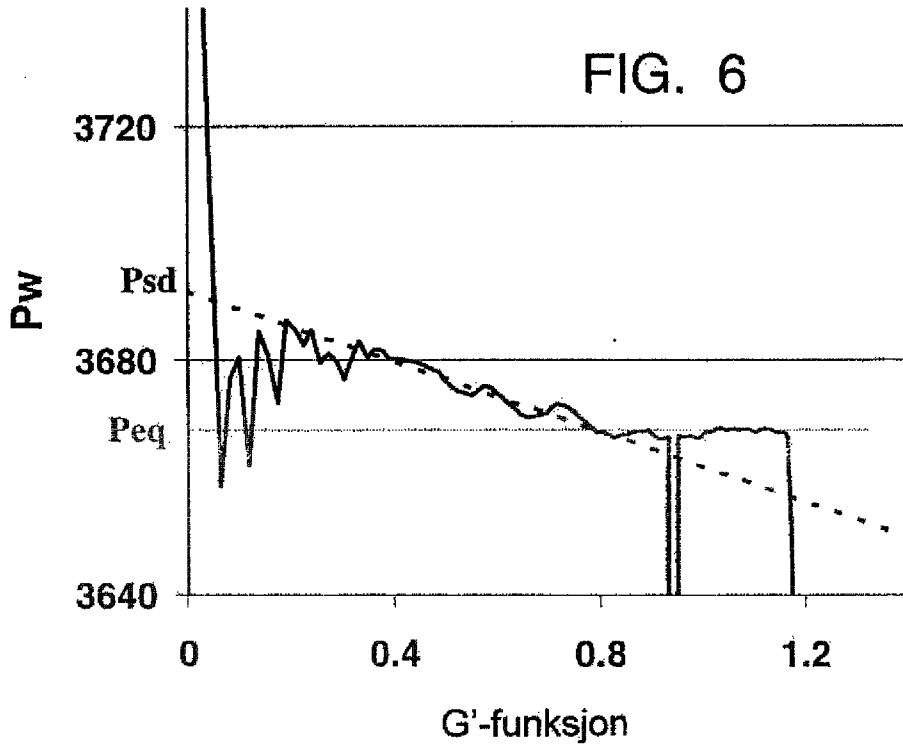
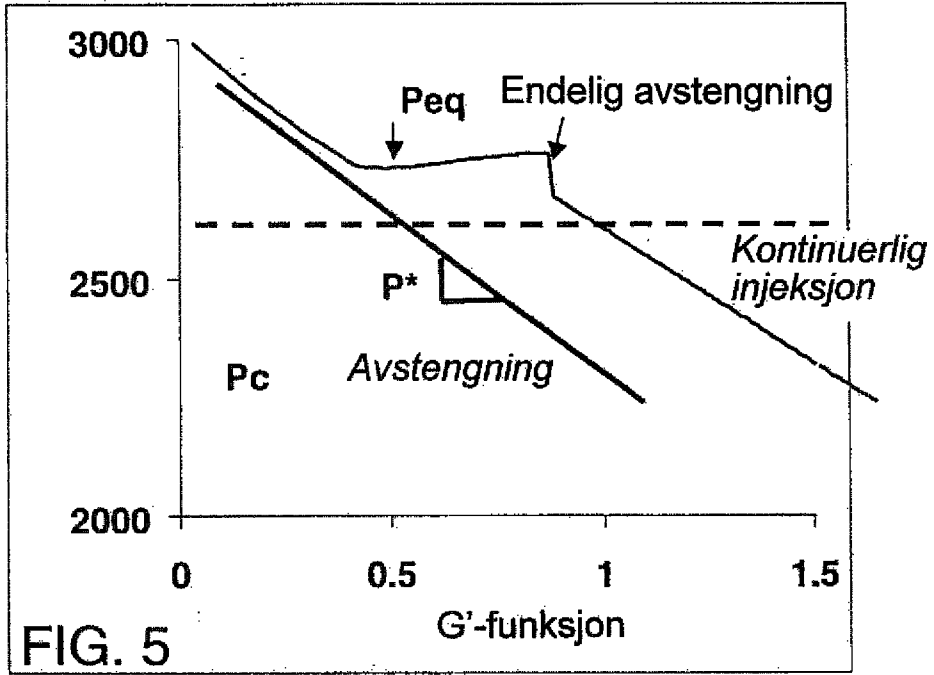
6. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor et volum av det fluid som injiseres ved den første injeksjonshastigheten Q er tilstrekkelig til å danne en sprekk.
- 5 7. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor en lukningstrykk-test blir utført med et fluid med lav viskositet.
8. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, som videre omfatter en estimering av en friksjonskomponent til det overvåkede borehullstrykket som skyldes en buktning og en friksjon for sprekkene.
- 10 9. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor bestemmelsen av lukningstrykket P_c blir gjort fra analysen av en G -funksjon for en avstengningstid.
- 15 10. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, hvor bestemmelsen av lukningstrykket P_c blir foretatt fra en analyse av en funksjon som er lik G -funksjonen for avstengningstiden minus et uttrykk lik $\frac{q}{Q} 2\Delta t_D$.
- 20 11. Fremgangsmåte ifølge ethvert av de foregående krav, som videre omfatter en estimering av lekkasjeegenskaper i forbindelse med fraktureringsbehandlingen i full skala.

1/4





3/4



4/4

