



(12) **PATENT**

(19) **NO**

(11) **332820**

(13) **B1**

NORGE

(51) **Int Cl.**

E21B 49/00 (2006.01)

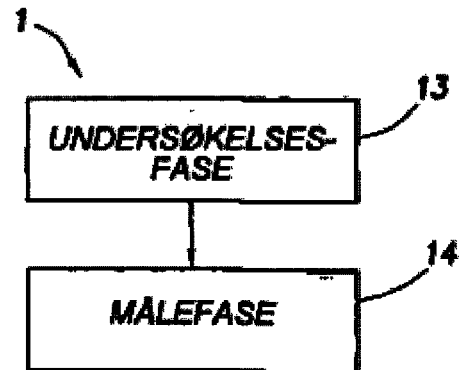
E21B 49/10 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20033971	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2003.09.08	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2003.09.08	(30)	Prioritet	2002.09.09, US, 237394 2003.05.09, US, 434923
(41)	Alm.tilgj	2004.03.10			
(45)	Meddelt	2013.01.21			
(73)	Innehaver	Schlumberger Technology BV, Parkstraat 83-89, NL-2514JG HAAG, Nederland			
(72)	Oppfinner	Julian J Pop, 9550 Ella Lee Lane, Apartment #2101, US-TX77063 HOUSTON, USA Jean-Michel Hache, 3515 Shadow Bayou Court, US-TX77082 HOUSTON, USA Jean-Marc Follini, 1114 Bonniefield Lane, US-TX77077 HOUSTON, USA			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			

(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte for evaluering av en undergrunnsformasjon
(56)	Anførte publikasjoner	US 5703286 A
(57)	Sammendrag	

Et apparat og en fremgangsmåte for å bestemme minst én egenskap ved en undergrunnsformasjon er beskrevet. Apparatet innbefatter et forteststempel som kan posisjoneres i fluidkommunikasjon med formasjonen, og en rekke strømningslinje-trykkmålere og ventiler utformet for selektivt å trekke inn i apparatet for måling enten formasjonsfluid eller slam. Fremgangsmåten innbefatter å utføre en første fortest for å bestemme en estimert formasjonsparameter; å bruke den første fortest til å utforme en annen fortest og generere forfinede formasjonsparametere slik at formasjonsegenskaper kan estimeres.



BAKGRUNN FOR OPPFINNELSEN

Teknisk område

Foreliggende oppfinnelse vedrører generelt olje- og gass-utvinningsområde. Mer spesielt vedrører oppfinnelsen en fremgangsmåte for evaluering av en undergrunnformasjon.

Teknisk bakgrunn

I løpet av de siste tiår er det blitt utviklet meget sofistikerte teknikker for å identifisere og produsere hydrokarboner, vanligvis kalt olje og gass, fra undergrunnformasjoner. Disse teknikkene letter oppdagelsen, vurderingen og produksjonen av hydrokarboner fra undergrunnsformasjoner.

Når en undergrunnsformasjon som inneholder en økonomisk produserbar mengde med hydrokarboner, antas å være blitt oppdaget, blir et borehull vanligvis boret fra jordoverflaten til den ønskede undergrunnsformasjon, og tester blir utført på formasjonen for å bestemme om formasjonen sannsynligvis er i stand til å produsere hydrokarboner av kommersiell verdi. Tester utført på undergrunnsformasjoner innebærer typisk å undersøke gjennomtrengte formasjoner for å bestemme om hydrokarboner virkelig er tilstede og for å vurdere mengden med produserbare hydrokarboner i disse. Disse foreløpige testene blir utført ved å bruke formasjonstestingsverktøy, ofte kalt formasjonstestere. Formasjonstestere blir typisk senket ned i et brønnhull ved hjelp av en kabel, rørledninger, en borestreng eller lignende, og kan brukes til å bestemme forskjellige formasjonskarakteristikker som bidrar til å bestemme kvaliteten, kvantiteten og tilstandene til hydrokarbonene eller andre fluider som er lokalisert. Andre formasjonstestere kan utgjøre en del av et boreverktøy, slik som en borestreng, for måling av formasjonsparametere under boreringsprosessen.

Formasjonstestere omfatter typisk slanke verktøy innrettet for å bli senket ned i et borehull og posisjonert ved en dybde i borehullet i nærheten av den undergrunnsformasjon for hvilken data er ønsket. Når disse er posisjonert i borehullet, blir disse verktøyene satt i fluidkommunikasjon med formasjonen for å samle inn data fra formasjonen. En sonde, snorkel eller en annen innretning blir vanligvis tetningsmessig brakt i kontakt mot borehullsveggen for å opprette slik fluidkommunikasjon.

Formasjonstestere blir vanligvis brukt til å måle nedhullsparemetere, slik som brønnhullstrykk, formasjonstrykk og formasjonsmobiliteter blant annet. De kan også brukes til å samle inn prøver fra en formasjon slik at de fluidtyper som befinner seg i formasjonen, og andre fluidegenskaper kan bestemmes. De forma-
5 sjonsegenskaper som bestemmes under en formasjonstest, er viktige faktorer når det gjelder å bestemme den kommersielle verdi av en brønn og på hvilken måte hydrokarboner kan utvinnes fra brønnen.

Virkemåten til formasjonstestere kan forstås lettere under henvisning til oppbygningen av en konvensjonell kabelformasjonstester som vist på fig. 1A og
10 1B. Som vist på fig. 1A blir kabeltesteren 100 senket ned fra en oljerigg 2 i et åpent brønnhull 3 som er fylt med et fluid som vanligvis på området kalles "slam". Brønnhullet er fôret med en slamkake 4 avsatt på veggen til brønnhullet under bo-
ringsoperasjoner. Brønnhullet gjennomtrenger en formasjon 5.

Virkemåten til en konvensjonell, modulær kabelformasjonstester som har
15 flere sammenkoblede moduler, er beskrevet mer detaljert i US-patent nr. 4,860,581 og 4,936,139 utstedt til Zimmerman mfl. Fig. 2 skisserer en grafisk representasjon av en trykktrase over tid målt ved hjelp av formasjonstesteren under en konvensjonell kabelformasjonstestingsoperasjon som benyttes til å bestemme
parametere, slik som formasjonstrykk.

20 Patentpublikasjonen US5703286 omtaler en teknikk for å tolke trykkdata fra formasjonsmålinger. Den nye teknikken anvender en eksakt sfærisk strømningsmodell som tar hensyn til effektene av strømningslinjelagring som kan løses på en lukket analytisk form. Denne teknikk gir en kurvetype som matcher hela det målte trykkplottet og kan eksakt forutsi et ultimale formasjonstrykk under formasjonstes-
25 ting fra et trykkplot som ikke har oppnådd en stabil tilstand nær formasjonstrykket.

Det vises nå til fig. 1A og 1B hvor en formasjonstester 100 i en konvensjo-
nell kabelformasjonstestingsoperasjon blir senket ned i et brønnhull 3 ved hjelp av
en kabel 6. Etter å ha senket formasjonstesteren 100 til den ønskede posisjon i
brønnhullet, kan trykk i gjennomstrømningslinjen 119 i formasjonstesteren utlignes
30 til det hydrostatiske trykk for fluidet i brønnhullet ved å åpne en utjevningventil
(ikke vist). En trykksensor eller måler 120 blir brukt til å måle det hydrostatiske
trykket til fluidet i brønnhullet. Det målte trykk ved dette punkt er grafisk skissert
langs linjen 103 på fig. 2. Formasjonstesteren 100 kan så "settes" ved å forankre
testeren ved hjelp av hydraulisk drevne stempler, posisjonere sonden 112 mot

sideveggen i borehullet for å opprette fluidkommunikasjon med formasjonen, og lukke utjevningsventilen for å isolere det indre av verktøyet fra brønnfluidene. Det punkt hvor en tetning blir opprettet mellom sonden og formasjonen og fluidkommunikasjon blir etablert, kalt "verktøysetningspunktet", er grafisk skissert ved 105 på fig. 2. Fluid fra formasjonen 5 blir så trukket inn i formasjonstesteren 100 ved å trekke tilbake et stempel 118 i et fortestingskammer 114 for å skape et trykkfall i gjennomstrømningsledningen 119 under formasjonstrykket. Denne volumekspan- sjonssyklusen, kalt en "nedtrekningssyklus", er grafisk illustrert langs linjen 107 på fig. 2.

10 Når stempelet 118 stopper tilbaketrekingen (skissert som punkt 111 på fig. 2), fortsetter fluid fra formasjonen å tre inn i sonden 112 inntil trykket i gjennomstrømningsledningen 119, forutsatt at det har gått en tilstrekkelig lang tid, er det samme som trykket i formasjonen 5, skissert ved 115 på fig. 2. Denne syklusen, kalt en "oppbygningssyklus", er skissert langs linjen 113 på fig. 2. Som illustrert på 15 fig. 2, er det endelige oppbygningstrykk ved 115, ofte kalt "sandflatetrykket", vanligvis antatt å være en god tilnærming til formasjonstrykket.

Formen på kurven og tilsvarende data generert ved hjelp av trykktrasen, kan brukes til å bestemme forskjellige formasjonskarakteristikker. For eksempel kan trykk målt under nedtrekning (107 på fig. 2) og oppbygning (113 på fig. 2), 20 brukes til å bestemme formasjonsmobilitet som er forholdet mellom formasjonspermeabiliteten og formasjonsfluidviskositeten. Når formasjonstestersonden (112 på fig. 1B) blir frigjort fra brønnhullsveggen, øker trykket i gjennomstrømningslinjen 119 hurtig mens trykket i gjennomstrømningslinjen utlignes til brønnhullstrykket, vist som linje 107 på fig. 2. Etter at formasjonsmålesyklusen er fullført, kan forma- sjonstesteren 100 frigjøres og omposisjoneres ved en annen dybde, og forma- 25 sjonstestsyklusen kan gjentas etter ønske.

Under denne type testoperasjon for et kabeltransportert verktøy, blir trykk- data som er innsamlet nede i hullet, typisk kommunisert til overflaten elektronisk via kabelkommunikasjonssystemet. På overflaten overvåker vanligvis en operatør 30 trykket i gjennomstrømningslinjen 119 ved en konsoll, og kabelloggingssystemet registrerer trykkdataene i sanntid. Data registrert under nedtreknings- og oppbygningssyklusene i testen, kan analyseres enten i en datamaskin på brønnstedet i sanntid, eller senere i en databehandlingssentral for å bestemme viktige forma-

sjonsparametere, slik som formasjonsfluidtrykk, slamovertrykk, dvs. forskjellen mellom brønnhullstrykket og formasjonstrykket, og mobiliteten til formasjonen.

Kabelformasjonstestere tillater høye datakommunikasjonshastigheter for overvåkning i sanntid og styring av testen og verktøyet ved bruk av kabeltelemetri. Denne type kommunikasjonssystem gjør det mulig for feltteknikere å evaluere kvaliteten av testmålinger etter hvert som de opptrer, og om nødvendig, å ta øyeblikkelige forholdsregler for å avbryte en testprosedyre og/eller justere fortestingsparametere før en annen måling forsøkes. Ved f.eks. å observere dataene etter hvert som de samles inn under nedtrekningen i fortesten, kan en tekniker ha mulighet til å endre de innledende fortestingsparametere, slik som nedtrekningshastighet og nedtrekningsvolum, forbedre og få dem til å stemme overens med formasjonskarakteristikkene før forsøk på en annen test. Eksempler på tidligere kjente kabelformasjonstestere og/eller formasjonstestmetoder er f.eks. beskrevet i US-patent nr. 3,934,468 utstedt til Brieger, 4,860,581 og 4,936,139 utstedt til Zimmermann mfl., og 5,969,241 utstedt til Auzerais. Disse patentene innehas av innehaveren av foreliggende oppfinnelse.

Formasjonstestere kan også brukes under boringsoperasjoner. Et slikt nedhullsverktøy innrettet for innsamling av data fra en undergrunnsformasjon under boringsoperasjoner, er f.eks. beskrevet i US-patent nr. 6,230,557 B1 utstedt til Ciglenec mfl., som er overdratt til innehaveren av foreliggende oppfinnelse.

Forskjellige teknikker er blitt utviklet for å utføre spesialiserte formasjonstestingsoperasjoner, eller fortester. For eksempel beskriver US-patentene nr. 5,095,745 og 5,233,866, begge utstedt til DesBrandes, en fremgangsmåte for å bestemme formasjonsparametere ved å analysere det punkt hvor trykket avviker fra en lineær opptegning og nedover.

Til tross for de fremskritt som er gjort under utvikling av fremgangsmåter for å utføre fortestinger, er det fremdeles et behov for å eliminere forsinkelser og feil i fortestingsprosessen, og for å forbedre nøyaktigheten av de parametere som utledes fra slike tester. Fordi formasjonstestingsoperasjoner blir brukt under boringsoperasjoner, er varigheten av testene og fraværet av sanntidskommunikasjon med verktøyene en hovedbegrensning som må tas i betraktning. Problemene i forbindelse med sanntidskommunikasjon for disse operasjonene, skyldes stort sett de foreliggende begrensninger med hensyn til telemetri som vanligvis brukes under boringsoperasjoner, slik som slampulstelemetri. Begrensninger slik som oppad-

gående og nedadgående telemetridatahastigheter for de fleste verktøy for logging-
under-boring eller måling-under-boring, resulterer i lav utveksling av informasjon
mellom nedhullsverktøyet og overflaten. En enkel prosess med å sende en fortes-
tingstrykktrase til overflaten, fulgt av en tekniker som sender en kommando ned i
5 hullet i for å tilbaketrekke sonden basert på de overførte data, kan f.eks. resultere i
betydelige forsinkelser som har en tendens til å påvirke boringsoperasjoner på en
ugunstig måte.

Forsinkelser øker også muligheten for at verktøy blir fastkilt i brønnhullet.
For å redusere muligheten for fastkiling, blir boringsoperasjonsspesifikasjoner ba-
10 sert på fremherskende formasjons- og borings-tilstander, ofte etablert for å be-
stemme hvor lenge en borestreng kan være urørlig i et gitt borehull. Under disse
spesifikasjonene kan borestrengen bare tillates å være urørlig for en begrenset
tidsperiode for å utplassere en sonde og utføre en trykkmåling. På grunn av be-
grensningene ved den nåværende kommunikasjonsforbindelse i sanntid mellom
15 noen verktøy og overflaten, kan det være ønskelig at verktøyet er i stand til å utfø-
re nesten alle operasjoner på en automatisk måte.

Det er derfor ønskelig med en fremgangsmåte som gjør det mulig å bruke
en formasjonstester til å utføre formasjonstestmålinger nede i hull innenfor en spe-
sifisert tidsperiode og som lett kan implementeres ved å bruke kabel- eller borings-
20 verktøy som resulterer i minimale inngrep fra overflatesystemet.

OPPSUMMERING AV OPPFINNELSEN

I det etterfølgende omtales en rekke fremgangsmåter for bestemmelse av
formasjonsparametre. Det omtales en fremgangsmåte for å bestemme forma-
25 sjonsparametere ved å benytte et nedhullsverktøy posisjonert i et brønnhull ved en
undergrunnsformasjon, er tilveiebrakt. Fremgangsmåten omfatter de trinn å opp-
rette fluidkommunikasjon med formasjonen, å utføre en første fortest for å be-
stemme et innledende estimat av formasjonsparameterne, å utforme fortestkriteri-
er for å utføre en annen fortest basert på det innledende estimat av formasjonspa-
30 rameterne, og å utføre en annen fortest i henhold til de utformede kriterier slik at et
forfinet estimat av formasjonsparameterne blir bestemt.

Fremgangsmåter for å bestemme formasjonsegenskaper ved å bruke en
formasjonstester er også tilveiebrakt. En fremgangsmåte for å bestemme minst én
formasjonsfluidegenskap ved å bruke en formasjonstester i en formasjon som

gjennomskjæres av et borehull, innbefatter å samle inn et første sett med datapunkter som representerer trykk i et fortestkammer i formasjonstesteren som en funksjon av tid under en første forttest, å bestemme et estimert formasjonstrykk og en estimert formasjonsfluidmobilitet fra det første sett med datapunkter, å bestemme et sett med parametere for en annen forttest, idet settet med parametere blir bestemt basert på det estimerte formasjonstrykk, den estimerte formasjonsfluidmobilitet og en gjenværende tid for å utføre den annen forttest, å utføre den annen forttest ved å benytte settet med parametere, å samle inn et annet sett med datapunkter som representerer trykk i fortestkammeret som en funksjon av tid under den annen forttest, og å bestemme den minst ene formasjonsfluidegenskap fra det annet sett med datapunkter.

Fremgangsmåter for å bestemme en tilstand for å avslutte en nedtrekningsoperasjon under en forttest, er også tilveiebrakt. En fremgangsmåte for å bestemme en avslutningstilstand for en nedtrekningsoperasjon som benytter en formasjonstester i en formasjon som gjennomskjæres av et borehull, innbefatter å sette en sonde i formasjonstesteren mot en vegg i borehullet slik at et fortestkammer er i fluidkommunikasjon med formasjonen, idet et borefluid i fortestkammeret har et høyere trykk enn formasjonstrykket, å dekomprimere borefluidet i fortestkammeret ved å trekke tilbake et fortteststempel med en konstant nedtrekningshastighet, å samle inn datapunkter som representerer fluidtrykk i fortestkammeret som en funksjon av tid, å identifisere et område med påfølgende datapunkter som passer til en linje for trykk som funksjon av tid med en fast helning, idet den faste helning er basert på en kompressibilitet for borehullet, den konstante nedtrekningshastighet og et volum for fortestkammeret, og å avslutte nedtrekningsoperasjonen basert på et avslutningskriterium etter at området med de påfølgende datapunkter er identifisert.

Fremgangsmåter for å bestemme formasjonsfluidmobiliteter er tilveiebrakt. En fremgangsmåte for å estimere en formasjonsfluidmobilitet innbefatter å utføre en forttest ved å benytte en formasjonstester anordnet i en formasjon som gjennomskjæres av et borehull, idet forttesten omfatter en nedtrekningsfase og en oppbygningsfase, å samle datapunkter som representerer trykkene i et fortestkammer i formasjonstesteren som en funksjon av tid under nedtrekningsfasen og oppbygningsfasen, å bestemme et estimert formasjonstrykk fra datapunktene, å bestemme et område begrenset av en linje som passerer gjennom det estimerte forma-

sjonstrykk og kurver som interpolerer datapunktene under nedtrekningsfasen og oppbyggningsfasen, og å estimere formasjonsfluidmobiliteten fra området, et volum ekstrahert fra formasjonen under fortesten, en radius av formasjonstestingssonden og en formfaktor som tar hensyn til virkningen av borehullet på en respons fra formasjonstestingssonden.

5 Fremgangsmåter for å estimere formasjonstrykk fra nedtrekningsoperasjoner under fortester, er tilveiebrakt. En fremgangsmåte for å bestemme et estimert formasjonstrykk fra en nedtrekningsoperasjon ved å anvende en formasjonstester i en formasjon som gjennomskjæres av et borehull, innbefatter å sette formasjonstesteren mot en vegg i borehullet slik at et fortestkammer i formasjonstesteren blir
10 brakt i fluidkommunikasjon med formasjonen, et borefluid i fortestkammeret som har et høyere trykk enn formasjonstrykket, dekomprimering av borefluidet i fortestkammeret ved å trekke tilbake et stempel i formasjonstesteren med en konstant nedtrekningshastighet, å samle datapunkter som representerer fluidtrykk i fortestkammeret som en funksjon av tid, å identifisere et område med påfølgende data-
15 punkter som svarer til en linje for trykk som funksjon av tid med fast helning, idet den faste helning er basert på en kompressibilitet for borefluidet, den konstante nedtrekningshastighet, og et volum av fortestkammeret, og å bestemme det estimerte formasjonstrykk fra et første datapunkt etter området med de påfølgende
20 datapunkter.

Ifølge et annet aspekt vedrører oppfinnelsen en fremgangsmåte for å bestemme nedhullsparemetere ved å benytte et nedhullsverktøy posisjonert i et brønnehull i nærheten av en undergrunnsformasjon. Fremgangsmåten innbefatter å opprette fluidkommunikasjon mellom et fortestkammer i nedhullsverktøyet og formasjonen via en strømningslinje (strømningslinjen har et innledende trykk), å be-
25 vege et forteststempel posisjonert i fortestkammeret på styrt måte for å redusere det innledende trykk til et nedtrykket trykk, og avslutte bevegelsen av stempelet for å tillate nedtrekningstrykket å justere seg til et stabilisert trykk, og å gjenta trinnene inntil en differanse mellom det stabiliserte trykk og det innledende trykk er betyde-
30 lig mindre enn et forutbestemt trykkfall. Én eller flere nedhullsparemetere kan så bestemmes fra en analyse av én eller flere av trykkene. Et innledende estimat av formasjonsparameterne fra en analyse av én eller flere av trykkene og fortestkriteriene for å utføre en annen forttest basert på det innledende estimat av formasjonsparameterne, kan bestemmes, og en forttest av formasjonen i henhold til de utfor-

mede fortestkriterier slik at et forfinet estimat av formasjonsparameterne blir bestemt, kan utføres.

En fremgangsmåte for å estimere et formasjonstrykk ved å benytte en formasjonstester anbrakt i et brønnhull som gjennomskjærer en formasjon omtales.

5 Fremgangsmåten omfatter å måle et første trykk i en strømningslinje som er i fluidkommunikasjon med undergrunnsformasjonen, å bevege et fortteststempel på styrt måte i et forttestkammer for å skape et forutbestemt trykkfall i strømningslinjen, å stanse fortteststempelet etter en valgt bevegelse av fortteststempelet, å tillate trykket i strømningslinjen å stabilisere seg og å gjenta trinnene inntil en differanse

10 mellom det stabiliserte trykk i strømningslinjen og det første trykk i strømningslinjen er betydelig mindre enn det forutbestemte trykkfall. Formasjonstrykket kan så bestemmes basert på et endelig stabilisert trykk i strømningslinjen.

Avslutningsvis omtales en fremgangsmåte for å bestemme slamkompressibilitet ved å benytte et nedhullsverktøy posisjonert i et brønnhull ved en undergrunnsformasjon. Fremgangsmåten innbefatter å innfange brønnhullsfluid i formasjonstesteren (brønnhullsfluidet er i fluidkommunikasjon med et forttestkammer forsynt med et bevegelig stempel), selektivt å bevege stempelet i forttestkammeret for å endre volumet av innfanget fluid i nedhullsverktøyet, å måle trykket til det innfangede fluid og å estimere slamkompressibilitet ut fra det målte trykk.

20 Andre aspekter og fordeler ved oppfinnelsen vil fremgå av den følgende beskrivelse og de vedføyde patentkrav.

KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

Fig. 1A viser en konvensjonell kabelformasjonstester anordnet i et brønnhull.

Fig. 1B viser en tverrsnittsskisse av den modulære, konvensjonelle kabelformasjonstester på fig. 1A.

Fig. 2 viser en grafisk representasjon av trykkmålinger som funksjon av tid plottet for en typisk tidligere kjent forttestsekvens utført ved bruk av en konvensjonell formasjonstester.

Fig. 3 viser et flytskjema over tester som inngår i en forttest i henhold til en utførelsesform av oppfinnelsen.

Fig. 4 viser skjematiske komponenter i en modul i en formasjonstester egnet for å praktisere utførelsesformer av oppfinnelsen.

Fig. 5 viser en grafisk representasjon av en plotting av trykkmålinger som funksjon av tid for å utføre fortesten på fig. 3.

Fig. 6 viser et flytskjema som gir detaljer ved de trinn som inngår ved utførelse av undersøkelsesfasen i flytskjemaet på fig. 3.

5 Fig. 7 viser en detaljert skisse av undersøkelsesfasedelen av plottingen på fig. 5 som skisserer avslutningen av nedtrekningen.

Fig. 8 viser en detaljert skisse av undersøkelsesfasedelen i plottingen på fig. 5 som skisserer bestemmelsen av avslutningen av oppbygningen.

Fig. 9 viser et flytskjema som gir detaljer ved de trinn som inngår i utførelse av målefasen i flytskjemaet på fig. 3.

Fig. 10 viser et flytskjema over trinn som inngår i en fortest i henhold til en utførelsesform av oppfinnelsen som innbefatter en slamkompressibilitetsfase.

Fig. 11A viser en grafisk representasjon av en plotting av trykkmålinger som funksjon av tid for å utføre fortesten på fig. 10. Fig. 11B viser den tilsvarende volumendringshastighet.

Fig. 12 viser et flytskjema som gir detaljer ved de trinn som inngår i utførelse av slamkompressibilitetsfasen i flytskjemaet på fig. 10.

Fig. 13 viser et flytskjema over trinn som inngår i en fortest i henhold til en utførelsesform av oppfinnelsen som innbefatter en slamfiltreringsfase.

20 Fig. 14A viser en grafisk representasjon av en plotting av trykkmålinger som funksjon av tid for å utføre fortesten på fig. 13. Fig. 14B viser den tilsvarende volumendringshastighet.

Fig. 15 viser den modifiserte slamkompressibilitetsfase på fig. 12, modifisert for bruk med slamfiltreringsfasen.

25 Fig. 16A-C viser et flytskjema som gir detaljer ved de trinn som inngår i utførelse av slamfiltreringsfasen i flytskjemaet på fig. 13. Fig. 16A viser en slamfiltreringsfase. Fig. 16B viser en modifisert slamfiltreringsfase med en gjentatt kompresjonssyklus. Fig. 16C viser en modifisert slamfiltreringsfase med en dekomprimeringssyklus.

30 Fig. 17A viser en grafisk representasjon av en plotting over trykkmålinger som funksjon av tid for å utføre en fortest som innbefatter en modifisert undersøkelsesfase i samsvar med en utførelsesform av oppfinnelsen. Fig. 17B viser den tilsvarende volumendringshastighet.

Fig. 18 viser et flytskjema som gir detaljer ved de trinn som inngår i utførelsen av den modifiserte undersøkelsesfase på fig. 17A.

Fig. 19A viser en grafisk representasjon over en plotting av trykkmålinger som funksjon av tid for å utføre en forttest som innbefatter en modifisert undersøkelsesfase i samsvar med en utførelsesform av oppfinnelsen. Fig. 19B viser den tilsvarende volumendringshastighet.

Fig. 20 viser et flytskjema som gir detaljer ved de trinn som inngår i utførelsen av den modifiserte undersøkelsesfase på fig. 19A.

Fig. 21 viser et korreksjonsdiagram for fluidkompressibilitet som kan brukes til å fremskaffe korrigert slamkompressibilitet når den opprinnelige slamkompressibilitet er utført ved en annen temperatur og/eller et annet trykk.

DETALJERT BESKRIVELSE

En utførelsesform av foreliggende oppfinnelse som angår en fremgangsmåte 1 for å estimere formasjonsegenskaper (f.eks. formasjonstrykk og -mobiliteter), er vist i blokkskjemaet på fig. 3. Som vist på fig. 3 innbefatter fremgangsmåten en undersøkelsesfase 13 og en målefasen 14.

Fremgangsmåten kan praktiseres med en hvilken som helst formasjonstester som er kjent på området, slik som den tester som er beskrevet i forbindelse med fig. 1A og 1B. Andre formasjonstestere kan også brukes og/eller tilpasses for utførelsesformer av oppfinnelsen, slik som kabelformasjonstesteren ifølge US-patent nr. 4,860,581 og 4,936,139 utstedt til Zimmermann mfl., og det nedhulls boreverktøyet som er beskrevet i US-patent nr. 6,230,557 B1 utstedt til Ciglenec mfl., hvis hele innhold herved inkorporeres ved referanse.

En versjon av en sondemodul som kan benyttes i forbindelse med slike formasjonstester, er skissert på fig. 4. Modulen 101 innbefatter en sonde 112a, en pakning 110a som omgir sonden, og en strømningsledning 119a som strekker seg fra sonden inn i modulen. Strømningslinjen 119a strekker seg fra sonden 112a til en sondeisolasjonsventil 121a, og har en trykkmåler 123a. En annen strømningslinje 103a strekker seg fra sondeisolasjonsventilen 121a til prøvelinjeisolasjonsventilen 124a og utligningsventilen 128a, og har en trykkmåler 120a. Et reversibelt forttestempel 118a i et forttestkammer 114a strekker seg også fra strømningslinjen 103a. Strømningslinjen 126a strekker seg fra utligningsventilen 128a og ut til brønnehullet og har en trykkmåler 130a. Prøvestrømningslinjen 125a strekker seg

fra prøvelinjeisolasjonsventilen 124a og gjennom verktøyet. Fluid samlet i strømningslinjen 125 kan innfanges, spyles eller brukes til andre formål.

Sondeisolasjonsventilen 121a isolerer fluidet i strømningslinjen 119a fra fluid i strømningslinjen 103a. Prøvelinjeisolasjonsventilen 124a isolerer fluid i strømningslinjen 103a fra fluid i prøvelinjen 125a. Utjevningsventilen 128a isolerer fluid i brønnhullet fra fluid i verktøyet. Ved å manipulere ventilene for selektivt å isolere fluid i strømningslinjene, kan trykkmålerne 120a og 123a brukes til å bestemme forskjellige trykk. Ved f.eks. å lukke ventilen 121a, kan formasjonstrykk leses av ved hjelp av måleren 123a når sonden er i fluidkommunikasjon med formasjonen under minimalisering av det sondevolum som er forbundet med formasjonen.

I henhold til et annet eksempel med utjevningsventilen 128a åpen, kan slam trekkes ut fra brønnhullet inn i verktøyet ved hjelp av fortteststampelet 118a. Ved lukning av utjevningsventilen 128a, sondeisolasjonsventilen 121a og prøvelinjeisolasjonsventilen 124a, kan fluid innfanges i verktøyet mellom disse ventilene og fortteststampelet 118a. En trykkmåler 130a kan brukes til å overvåke brønnfluidtrykket kontinuerlig under driften av verktøyet og kan sammen med trykkmålerne 120a og/eller 123a brukes til å måle direkte trykkfallet over slamkaken og til å overvåke overføringen av brønnforstyrrelser over slamkaken for senere bruk til korrigerende av det målte sandflatetrykk for disse forstyrrelsene.

Blant funksjonene til fortteststampelet 118a, er å trekke ut fluid fra eller injisere fluid inn i formasjonen, eller å komprimere eller ekspandere fluid innfanget mellom sondeisolasjonsventilen 121a, prøvelinjeisolasjonsventilen 124a og utjevningsventilen 128a. Fortteststampelet 118a har fortrinnsvis evnen til å bli operert ved lave hastigheter, f.eks. 0,01 cm³/s, og høye hastigheter, f.eks. 10 cm³/s, og har evnen til å kunne trekke tilbake store volumer i et enkelt slag, f.eks. 100 cm³. I tillegg, hvis det er nødvendig å trekke ut mer enn 100 cm³ fra formasjonen uten å trekke tilbake sonden, kan fortteststampelet 118a gjennomgå en ny syklus. Posisjonen av fortteststampelet 118a kan fortrinnsvis overvåkes kontinuerlig og styres positivt, og dets posisjon kan "låses" når det er i ro. I noen utførelsesformer kan sonden 112a videre innbefatte en filterventil (ikke vist) og et filterstempel (ikke vist).

Forskjellige manipuleringer av ventilene, fortteststampelet og sonden gjør det mulig å drive verktøyet i henhold til de beskrevne fremgangsmåter. En fagkyndig på området vil forstå at selv om disse spesifikasjonene definerer en foretrukket

sondemodul, kan andre spesifikasjoner brukes uten å avvike fra oppfinnelsens ramme. Selv om fig. 4 skisserer en sondemodultype, vil man forstå at enten et sondeverktøy eller et pakningsverktøy kan benyttes, eventuelt med visse modifikasjoner. Den følgende beskrivelse forutsetter at det benyttes et sondeverktøy. En fagkyndig på området vil imidlertid forstå at lignende prosedyrer kan brukes med pakningsverktøy.

De teknikker som beskrives her kan også benyttes i forbindelse med andre innretninger som innbefatter en strømningslinje. Uttrykket "strømningslinje" slik det brukes her, skal referere til en ledning, et hulrom eller en annen passasje for å opprette fluidkommunikasjon mellom formasjonen og fortteststampelet og/eller for å muliggjøre fluidstrømning mellom disse. Andre slike innretninger kan f.eks. innbefatte en innretning hvor sonden og fortteststampelet er integrert. Et eksempel på en slik innretning er beskrevet i US-patent nr. 6,230,557 B1 og US-patentsøknad serienr. 10/248,782, tilhørende innehaveren av foreliggende oppfinnelse.

Som vist på fig. 5 vedrører undersøkelsesfasen 13 å frembringe innledende estimater av formasjonsparametere, slik som formasjonstrykk og formasjonsmobilitet. Disse innledende estimater kan så brukes til å utforme målefasen 14. Om ønsket og om mulig blir det så utført en målefase i henhold til disse parameterne for å generere et forfinet estimat av formasjonsparameterne. Fig. 5 skisserer en tilsvarende trykktrase som illustrerer endringene i trykk over tid som når fremgangsmåten på fig. 3 blir utført. Man vil forstå at selv om trykktraseen på fig. 5 kan utføres ved hjelp av apparatet på fig. 4, kan den også utføres ved hjelp av andre nedhullsverktøy, slik som testeren på fig. 1A og 1B.

Undersøkelsesfasen 13 er vist mer detaljert på fig. 6. Undersøkelsesfasen omfatter å innlede nedtrekkingen 310 etter at verktøyet er innstilt for en varighet T_i ved tiden t_3 , å utføre nedtrekkingen 320 og avslutte nedtrekkingen 330, å utføre oppbygningen 340 og avslutte oppbygningen 350. For å starte undersøkelsesfasen i henhold til trinn 310, blir sonden 112a plassert i fluidkommunikasjon med formasjonen og forankret på plass, og det indre av verktøyet blir isolert fra brønnhullet. Nedtrekkingen 320 blir utført ved å fremføre stampelet 118a i forttestkammeret 114a. For å avslutte nedtrekkingen 330, blir stampelet 118a stanset. Trykket vil begynne å bygge seg opp i strømningslinjen 119a inntil oppbygningen 340 blir avsluttet ved 350. Undersøkelsesfasen varer over en tidsvarighet på T_{IP} . Undersøkelsesfasen kan også utføres som tidligere beskrevet i forbindelse med fig. 1B

og 2, idet nedtrekningsstrømningshastigheten og nedtrekningsavslutningspunktet er forhåndsbestemt før innledningen av undersøkelsesfasen.

Trykkfasen i undersøkelsesfasen 13 er vist mer detaljert på fig. 7. Parametre, slik som formasjonstrykk og formasjonsmobilitet, kan bestemmes fra en analyse av de data som er utledet fra trykktraseen i undersøkelsesfasen. For eksempel 5 representerer avslutningspunktet 350 et foreløpig estimat av formasjonstrykket. Alternativt kan formasjonstrykk estimeres mer nøyaktig ved å ekstrapolere den trykktrend som fremskaffes under oppbygning 340 ved å benytte teknikker kjent av fagkyndige på området, idet det ekstrapolerte trykk svarer til det trykk som ville ha 10 blitt oppnådd hvis oppbygningen var blitt tillatt å fortsette uendelig. Slike prosedyrer kan kreve ytterligere behandling for å ankomme til formasjonstrykket.

Formasjonsmobilitet $(K/\mu)_1$ kan også bestemmes fra oppbygningsfasen som er representert av linjen 340. Teknikker som er kjent for fagkyndige på området, kan brukes til å estimere formasjonsmobiliteten fra hastigheten til trykkendringen 15 med tid under oppbygningen 340. Slike prosedyrer kan kreve ytterligere behandling for å ankomme estimerer av formasjonsmobiliteten.

Alternativt kan det arbeid som er presentert i en publikasjon av Goode mfl. med tittel "Multiple Probe Formation Testing and Vertical Reservoir Continuity", SPE 22738, forberedt for presentasjon på den 1991 Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, holdt i Dallas, Texas 6. til 9. 20 oktober 1991 og som innebærer at arealet til den kurve som er skissert ved hjelp av det skraverte område og identifisert ved henvisningstall 325, her betegnet med A, brukes til å forutsi formasjonsmobilitet. Dette arealet er avgrenset av en linje 321 som strekker seg horisontalt fra avslutningspunktet 350 (som representerer det estimerte formasjonstrykk P_{350} ved avslutningen), nedtrekningslinjen 320 og oppbygningslinjen 340. Dette arealet kan bestemmes og relateres til et estimat 25 over formasjonsmobiliteten ved å bruke følgende ligning:

$$\left(\frac{K}{\mu}\right)_1 = \frac{V_1}{4r_p} \frac{\Omega_1 S}{A} + \varepsilon_K \quad (1)$$

30

hvor (K/μ) er det første estimat av formasjonsmobiliteten (D/cP), hvor K er formasjonspermeabiliteten (Darcies, betegnet med D) og μ er formasjonsfluidviskositete-

ten (cP) (siden den størrelse som er bestemt av formasjonstestere er forholdet mellom formasjonspermeabiliteten og formasjonsfluidviskositeten, dvs. mobiliteten, den eksplisitte verdi av viskositeten ikke nødvendig), $V_1(\text{cm}^3)$ er det volum som er uttrukket fra formasjonen under fortesten, $V_1 = V(t_7+T_1) - V(t_7-T_0) = V(t_7) -$
 5 $V(t_7 - T_0)$, hvor V er volumet av fortestkammeret, r_p er sonderadien (cm), og ε_K er et feilledd som vanligvis er lite (mindre enn et par prosent) for formasjoner med mobilitet større enn 1 mD/cP.

Den variable Ω_S som tar hensyn til virkningen av et borehull med endelig størrelse i trykkresponsen til sonden, kan bestemmes ved hjelp av den følgende
 10 ligning som er beskrevet i en publikasjon av F.J. Kuchuk med tittel "Multiprobe Wireline Formation Tester Pressure Behavior in Crossflow-Layered Reservoirs", In Situ, (1996) 20, 1,1:

$$\Omega_S = 0,994 - 0,003\vartheta - 0,353\vartheta^2 - 0,714\vartheta^3 + 0,709\vartheta^4 \quad (2)$$

15

hvor r_p og r_w representerer henholdsvis sonderadien og brønnradien, $\rho = r_p/r_w$, $\eta = K_r/K_z$, $\vartheta = 0,58 + 0,078 \log\eta + 0,26 \log\rho + 0,8\rho^2$, og K_r og K_z representerer henholdsvis den radiale permeabilitet og den vertikale permeabilitet.

Under fastsettelse av resultatet som er presentert i ligning 1, er det blitt an-
 20 tatt at formasjonspermeabiliteten er isotropisk, dvs. at $K_r = K_z = K$, at strømningsregimet under testen er "sfærisk", og at de tilstander som sikrer gyldigheten av Darcys relasjon stemmer.

Det vises fremdeles til fig. 7 hvor nedtrekningstrinnet 320 i undersøkelsesfasen kan analyseres for å bestemme trykkfallet over tid for å bestemme forskjellige karakteristikk ved trykktrasen. En beste tilpasningslinje 32 utledet fra punkter langs nedtrekningslinjen 320, er skissert og strekker seg fra innledningspunktet 310. Et avvikspunkt 334 kan bestemmes langs kurven 320 som representerer det punkt hvor kurven 320 når et minimumsavvik δ_0 fra den beste tilpasningslinje 32. Avvikspunktet 34 kan brukes som et estimat over "strømningsstart", det punkt hvor
 30 fluid blir levert fra formasjonen inn i verktøyet under undersøkelsens nedtrekningsfase.

Avvikspunktet 34 kan bestemmes ved hjelp av kjente teknikker, slik som de teknikker som er beskrevet i US-patent nr. 5,095,745 og 5,233,866 som begge er

utstedt til Desbrandes, og hvis hele innhold herved inkorporeres ved referanse. Desbrandes beskriver en teknikk for å estimere formasjonstrykket fra avvikspunktet fra en beste tilpasningslinje skapt ved å bruke datapunkter fra nedtrekningsfasen i fortesten. Avvikspunktet kan alternativt bestemmes ved å teste det sist inn-

5 samlede punkt for å se om det forblir på den lineære trend som representerer strømningslinjeekspansjonen etter hvert som suksessive trykkdata blir innsamlet. Hvis ikke kan nedtrekningen avsluttes og trykket tillates å stabilisere seg. Avvikspunktet kan også bestemmes ved å ta den deriverte av det trykk som er registrert i løpet av 320 med hensyn på tid. Når den deriverte endrer (antagelig blir mindre)

10 med 2-5%, blir det tilsvarende punkt tatt til å representere begynnelsen av strømning fra formasjonen. Om nødvendig, for å bekrefte at avvikspunktet fra ekspansjonslinjen representerer strømning fra formasjonen, kan ytterligere fortester med små volum utføres.

Andre teknikker kan brukes til å bestemme avvikspunktet 34. En annen teknikk for å bestemme avvikspunktet 34 er f.eks. basert på slamkompressibiliteten og vil bli diskutert nærmere i forbindelse med figurene 9-11.

Når avvikspunktet 34 er bestemt, blir nedtrekningen fortsatt ut over avvikspunktet 34 inntil et visst forutbestemt avslutningskriterium er oppfylt. Slike kriterier kan være basert på trykk, volum og/eller tid. Når kriteriet er blitt oppfylt, blir ned-

20 trekningen avsluttet og avslutningspunktet 330 er nådd. Det er ønskelig at avslutningspunktet 330 inntreffer ved et gitt trykk P_{330} innenfor et gitt trykkområde ΔP i forhold til avvikstrykket P_{34} som svarer til avvikspunktet 34 på fig. 7. Alternativt kan det være ønskelig å avslutte nedtrekningen innenfor en gitt tidsperiode som følger etter bestemmelsen av avvikspunktet 34. Hvis f.eks. avviket inntreffer ved tiden t_4 ,

25 kan avslutningen være forutbestemt til å inntreffe ved tiden t_7 , hvor tiden mellom tid t_4 og t_7 blir betegnet som T_D og er begrenset til en maksimal varighet. Et annet kriterium for å avslutte fortesten, er å begrense det volum som trekkes ut av formasjonen etter at avvikspunktet 34 er blitt identifisert. Dette volumet kan bestemmes ved hjelp av endringen i volum av fortestkammeret 114a (fig. 4). Den maksimale endring i volum kan spesifiseres som en begrensende parameter for fortesten.

30

Ett eller flere av de begrensende kriterier trykk, tid og/eller volum, kan brukes alene eller i kombinasjon for å bestemme avslutningspunktet 330. Hvis et ønsket kriterium, slik som et forutbestemt trykkfall som f.eks. i tilfelle med meget

permeable formasjoner, ikke kan oppfylles, kan varigheten av fortesten begrenses ytterligere ved hjelp av ett eller flere av de andre kriterier.

Etter at avvikspunktet 34 er nådd, fortsetter trykket å falle langs linjen 320 inntil ekspansjon avsluttes ved punkt 330. Ved dette punkt blir sondeisolasjons-
5 ventilen 121a lukket og/eller forteststampelet 118a blir stanset og undersøkelsens oppbygningsfase 340 starter. Oppbygningen av trykket i strømningslinjen fortsetter inntil avslutning av oppbygningen inntreffer ved punkt 350.

Det trykk der oppbygningen blir tilstrekkelig stabil, blir ofte tatt som et estimat av formasjonstrykket. Oppbygningstrykket blir overvåket for å tilveiebringe
10 data for å estimere formasjonstrykket fra den progressive stabilisering av oppbygningstrykket. Spesielt kan den fremskaffede informasjon brukes til å utforme en transient målefasen slik at en direkte måling av formasjonstrykket blir oppnådd ved slutten av oppbygningen. Spørsmålet om hvor lenge undersøkelsesfasens oppbygning bør tillates å fortsette for å fremskaffe et innledende estimat av forma-
15 sjonstrykket, står igjen.

Det er klart fra den foregående diskusjon at oppbygningen ikke bør avsluttes før trykket har vendt tilbake til det nivå hvor avviket fra strømningslinjens dekompresjon ble identifisert, dvs. det trykk som er betegnet med P_{34} på fig. 7. I
henhold til én løsning kan en fastsatt tidsgrense brukes for varigheten av oppbyg-
20 ningen T_1 . T_1 kan være fastsatt ved et visst tall, slik som 2 til 3 ganger strømnings- tiden fra formasjonen T_0 . Andre teknikker og kriterier kan tenkes.

Som vist på fig. 5 og 7, skisserer avslutningspunktet 350 slutten av oppbygningen, slutten av undersøkelsesfasen og/eller begynnelsen av målefasen. Visse kriterier kan brukes til å bestemme når avslutningen 350 bør inntreffe. En mulig
25 løsning for å bestemme avslutningen 350, er å tillate stabilisering av det målte trykk. For å opprette et punkt ved hvilket et rimelig nøyaktig estimat av formasjonstrykket ved avslutningspunktet 350 kan gjøres forholdsvis raskt, kan det brukes en prosedyre for å bestemme kriterier for å fastslå avslutningen.

Som vist på fig. 8 innebærer en slik prosedyre å opprette et trykkinkrement
30 som begynner ved avslutningen av nedtrekningspunktet 330. Et slikt trykkinkrement kan f.eks. være en stor multippel av trykkmåleroppløsningen eller en multippel av trykkmålerstøyen. Etter hvert som oppbygningsdata blir innsamlet, vil successive trykkpunkter falle innenfor et slikt intervall. Det høyeste trykkdatapunkt innenfor hvert trykkinkrement blir valgt, og differanser blir konstruert mellom de

tilsvarende tider for å gi tidsinkrementene $\Delta t_{i(n)}$. Oppbygningen fortsetter inntil forholdet mellom to suksessive tidsinkremerter er større enn eller lik et forutbestemt tall, slik som 2. Det sist registrerte trykkpunkt i det siste intervall for det tidspunkt da dette kriterium er oppfylt, er det beregnede avslutningspunkt 350. Denne analysen kan representeres matematisk ved hjelp av følgende:

Ved å starte ved t_7 , begynnelsen av oppbygningen av undersøkelsesfasen, å finne en sekvens av indekser $\{i(n)\} \subset \{i\}$, $i(n) > i(n-1)$, $n=2,3,\dots$, slik at for $n \geq 2$, $i(1)=1$, og

$$\max_i (P_{i(n)} - P_{i(n-1)}) \leq \max(n_p \delta_p, \varepsilon_p) \quad (3)$$

hvor n_p er et tall med en verdi lik eller større enn f.eks. 4, typisk 10 eller større, δ_p er den nominelle oppløsning for trykkmålingsinstrumentet, og ε_p er en liten multiplisator, f.eks. 2, av trykkinstrumentstøyen, en størrelse som kan bestemmes før utplasseringen av verktøyet, slik som under slamkompressibilitetseksperimentet.

Fagkyndige på området vil forstå at andre verdier av n_p og ε_p kan velges avhengig av de ønskede resultater, uten å avvike fra oppfinnelsens ramme. Hvis ingen punkter finnes i det intervall som er definert av den høyre side av ligning (3) annet enn basispunktet, kan det nærmeste punkt utenfor intervallet brukes.

Ved å definere $\Delta t_{i(n)} \equiv t_{i(n)} - t_{i(n-1)}$, kan oppbygningen avsluttes når følgende betingelser er oppfylt: $p_{i(n)} \geq p(t_4) = P_{34}$ (fig. 7) og

$$\frac{\Delta t_{i(n)}}{\Delta t_{i(n-1)}} \geq m_p \quad (4)$$

hvor m_p er et tall større enn eller lik, f.eks. 2.

Det første estimat av formasjonstrykket blir så definert som (fig. 7):

$$p(t_{i(\max(n))}) = p(t_7 + T_1) = P_{350}. \quad (5)$$

Grovt uttrykt blir undersøkelsesens fortestfase i henhold til det aktuelle kriterium avsluttet når trykket under oppbygning er større enn det trykk som svarer til avvikspunktet 34 og økningshastigheten i trykket avtar med en faktor som minst er lik 2. En tilnærming til formasjonstrykket blir tatt som det høyeste trykk målt under oppbygningen.

Ligningene (3) og (4) fastsetter sammen den nøyaktighet ved hvilken formasjonstrykket blir bestemt under undersøkelsesfasen: (3) definerer en nedre grense for feilen og m_p definerer grovt hvor nær den estimerte verdi er det virkelige formasjonstrykk. Jo større verdien av m_p er, jo nærmere vil den estimerte verdi av formasjonstrykket være den virkelige verdi, og jo lenger vil varigheten av undersøkelsesfasen være.

Nok et annet kriterium for avslutning av undersøkelsesfasens oppbygning kan være basert på flatheten av oppbygningskurven, slik som den ville bli bestemt ved å sammenligne gjennomsnittsverdien av et område med trykkoppbygningspunkter med en liten multippel, f.eks. 2 eller 4, av trykkmålerstøyen. Man vil forstå at et hvilket som helst av de kriterier som er beskrevet her hver for seg eller i kombinasjon kan brukes til å avslutte oppbygningsfasen i undersøkelsen (dvs. 340 på fig. 5), målefaseoppbygningen (dvs. 380 på fig. 5 og beskrevet nedenfor) eller, mer generelt, en hvilken som helst oppbygning.

Som vist på fig. 7 skisserer avslutningspunktet 350 slutten av undersøkelsesfasen 13 etter fullføring av oppbygningsfasen 340. Det kan imidlertid være tilfeller hvor det er nødvendig eller ønskelig å avslutte fortesten. For eksempel kan problemer i prosessen, slik som når sonden går tett, testen er tørr eller formasjonsmobiliteten er så lav at testen er hovedsakelig tørr, slamtrykket nøyaktig balanserer formasjonstrykket, et falskt brudd blir detektert, formasjoner med meget lav permeabilitet blir testet, en endring i kompressibilitet til strømningslinjefluidet blir detektert eller andre ting inntreffer, rettferdiggjøre avslutning av fortesten før fullføring av hele syklusen.

Når det ønskes at fortesten skal avsluttes under undersøkelsesfasen, kan forteststempelet stanses eller sondeisolasjonsventilen 121 lukkes (om den er til stede) slik at volumet i strømningslinjen 119 blir redusert til et minimum. Når et problem er blitt detektert, kan undersøkelsesfasen avsluttes. Om ønsket kan en ny undersøkelsesfase utføres.

Det vises tilbake til fig. 5 hvor en beslutning ved fullføring av undersøkelsesfasen 13, kan foretas med hensyn til om betingelsene tillater eller utgjør ønskelig ytelse av målefase 14. Beslutningen kan utføres manuelt. Det blir imidlertid foretrukket at beslutningen tas automatisk og på grunnlag av de fastsatte kriterier.

Et kriterium som kan brukes er ganske enkelt tid. Det kan være nødvendig å bestemme om det er tilstrekkelig tid T_{MP} til å utføre målefase. På fig. 5 var det

tilstrekkelig tid til å utføre både en undersøkelsesfase og en målefase. Den totale tid T_1 til å utføre begge faser, var med andre ord mindre enn den tid som var avsatt for syklusen. Når T_{IP} er mindre enn halvparten av den totale tid T_1 , er det nok tid til å utføre målefasen.

5 Et annet kriterium som kan brukes til å bestemme om målefasen skal fortsette, er volumet V . Det kan også være nødvendig eller ønskelig, f.eks. å bestemme om volumet i målefasen vil være minst så stor som det volum som er ekstrahert fra formasjonen under undersøkelsesfasen. Hvis én eller flere av betingelsene ikke er oppfylt, kan målefasen ikke utføres. Andre kriterier kan også
10 være bestemmende for om en målefase bør utføres. Til tross for at ingen kriterier kan oppfylles, kan målefasen alternativt fortsette gjennom resten av den tildelte tid til slutten slik at den normalt blir både undersøkelsesfase og målefase.

Man vil forstå at selv om fig. 5 skisserer en eneste undersøkelse 13 i sekvens med en enkel målefase 14, kan forskjellige antall undersøkelsesfaser og målefaser utføres i henhold til foreliggende oppfinnelse. Under ekstreme forhold kan
15 undersøkelsesfase-estimer være de eneste estimer som kan oppnås fordi trykkøkningen under oppbygningsfasen i undersøkelsen kan være så langsom at hele den tildelte tid for testen blir forbrukt av denne undersøkelsesfasen. Dette er typisk tilfelle for formasjoner med meget lave permeabiliteter. I andre situasjoner, slik som med moderat til høyt permeable formasjoner hvor oppbygningen til formasjonstrykket vil være forholdsvis raskt, kan det være mulig å utføre flere fortester uten å møte den tildelte tidsbegrensning.
20

Det vises fremdeles til fig. 5 hvor, når beslutningen er tatt om å utføre målefasen 14, parameterne i undersøkelsesfasen 13 blir brukt til å utføre målefasen.
25 De parametere som er utledet fra undersøkelsesfasen, nemlig formasjonstrykket og mobiliteten, blir brukt til å spesifisere driftsparameterne for målefasen i fortesten. Spesielt er det ønskelig å bruke parameterne fra undersøkelsesfasen til å bestemme volumet i fortestens målefase og dens varighet, og følgelig den tilsvarende strømningshastighet. Driftsparameterne for målefasen blir fortrinnsvis bestemt på en måte for å optimalisere det volum som brukes under målefasen i fortesten som resulterer i et estimat av formasjonstrykket innenfor et gitt område. Mer
30 spesielt er det ønskelig å ekstrahere akkurat nok volum, fortrinnsvis et større volum enn det volum som ekstraheres fra formasjonen under undersøkelsesfasen, slik at trykket ved slutten av målefasen gjenopprettes til innenfor et ønsket område

δ for det virkelige formasjonstrykk p_f . Det volum som ekstraheres under målefasen, blir fortrinnsvis valgt slik at tidsbegrensningene også kan oppfylles.

La H representere trykkresponsen til formasjonen på et enhetstrinn i redusert strømningshastighet ved hjelp av et sondeverktøy som beskrevet tidligere.

- 5 Betingelsen om at det målte trykk skal være innenfor δ av det virkelige formasjonstrykk ved slutten av målefasen, kan uttrykkes som:

$$H(T'_{ID}) - H((T'_t - T_o)_D) + \frac{q_2}{q_1} \left\{ H((T'_t - T_o - T_1)_D) - H((T'_t - T_o - T_1 - T_2)_D) \right\} \leq \frac{2\pi r^* \sqrt{K_r K_z}}{\mu q_1} \delta \quad (6)$$

- 10 hvor T'_t er den totale tid som er tildelt for både undersøkelses- og målefasene minus den tid det tar for strømningslinjeeekspansjon, dvs. $T'_t = T_t - (t_7 - t_f) = T_0 + T_1 + T_2 + T_3$ på fig. 5 (bestemt før testen utføres, i sekunder), er den tilnærmede varighet av formasjonsstrømning under undersøkelsesfasen (bestemt under innsamling, sekunder), T_1 er varigheten av oppbygningen under undersøkelsesfasen (bestemt under innsamling, sekunder), T_2 er varigheten av nedtrekningen under målefasen (bestemt under innsamling, sekunder), T_3 er varigheten av oppbygningen under målefasen (bestemt under innsamling, sekunder), q_1 og q_2 representerer henholdsvis de *konstante* strømningshastighetene under henholdsvis undersøkelsesfasen og målefasen (spesifisert før innsamling og bestemt under innsamling, cm^3/s), δ er den nøyaktighet med hvilken formasjonstrykket skal bestemmes under målefasen (forutbestemt, atmosfærer), dvs. $p_f - p(T_1) \leq \delta$ hvor p_f er det virkelige formasjonstrykk, ϕ er formasjonsporøsiteten, C_t er den totale formasjonskompressibilitet (bestemt før innsamling fra kunnskap om formasjonstype og porøsitet ved hjelp av vanlige korrelasjoner, $1/\text{atmosfære}$), $T_{nD} = \frac{K_r T_n}{\phi \mu C_t r_*^2} \equiv \frac{T_n}{\tau}$ hvor $n = t, 0, 1, 2$
- 25 betegner en dimensjonsløs tid og $\tau \equiv \phi \mu C_t r_*^2 / K_r$ representerer en tidskonstant, og r_* er en effektiv sonderadius definert ved

$$r_* = \frac{r_p}{K(m; \pi/2)} \frac{1}{\Omega_s} = \frac{2r_p}{\pi(1 + (1/2)^2 m + (3/8)^2 m^2 + O(m^3))} \frac{1}{\Omega_s}$$

elliptisk integral av første type med modulus $m \equiv \sqrt{1 - K_z / K_r}$. Hvis formasjonen er isotrop så er $r_* = 2r_p / (\pi \Omega_s)$.

På ekvivalent måte kan målefasen begrenses ved å spesifisere forholdet mellom de andre og første strømningshastigheter i fortesten og varigheten T_2 , for målefasen i fortesten, og derfor dens volum.

For å spesifisere målefasen fullstendig, kan det være ønskelig å begrense målefasen ytterligere basert på en tilleggsbetingelse. En slik betingelse kan være basert på å spesifisere forholdet mellom varigheten av nedtrekningsdelen av målefasen i forhold til den totale tid som er tilgjengelig for å utføre hele målefasen siden varigheten av målefasen er kjent etter fullføring av undersøkelsesfasen, nemlig $T_2 + T_3 = T_t' - T_o - T_1$. For eksempel kan man ønske å tillate dobbelt eller mer enn dobbelt) så lang tid for oppbygningen i målefasen som for nedtrekningen, da blir $T_3 = n_T T_2$, eller $T_2 = (T_t' - T_o - T_1) / (n_T + 1)$, hvor $n_T \geq 2$. Ligning (6) kan så løses med hensyn på forholdet mellom strømningshastighetene i målefasen og undersøkelsesfasen i fortesten, og følgelig volumet i målefasen $V_2 = q_2 T_2$.

Nok en annen betingelse for å fullføre spesifikasjonen av fortestparametrene i målefasen vil være å begrense trykkfallet under nedtrekningen i målefasen. Med de samme betingelser som er brukt i ligning (6) og de samme antagelser kan dette skrives som

$$H((T_o + T_1 + T_2)_D) - H((T_1 + T_2)_D) + \frac{q_2}{q_1} H((T_2)_D) \leq \frac{2\pi r \cdot \sqrt{K_r K_z}}{\mu q_1} \Delta p_{\max} \quad (7)$$

20

hvor Δp_{\max} (i atmosfærer) er det maksimalt tillatte nedtrekningstrykkfall under målefasen.

Anvendelsen av ligningene (6) og (7) for bestemmelse av målefasens fortestparametere kan best illustreres med et spesielt, enkelt men ikke trivielt tilfelle. Som illustrasjon blir det antatt at både undersøkelses- og målefasene i fortestene som før blir utført ved nøyaktig regulerte hastigheter. I tillegg blir det antatt at virkningene av verktøylagring på trykkresponsen kan neglisjeres, at strømningsregimene under både nedtrekning og oppbygning er sfærisk, at formasjonspermeabiliteten er isotrop og at betingelsene sikrer gyldigheten av Darcys relasjon, er tilfredsstillt.

30

Under de ovennevnte antagelser inntar ligning (6) følgende form:

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{KT_i}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{K(T_i - T_o)}}\right) +$$

$$+ \frac{q_2}{q_1} \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{K(T_i - T_o - T_1)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{K(T_i - T_o - T_1 - T_2)}}\right) \right\} \leq \frac{2\pi Kr.}{\mu q_1} \delta \quad (8)$$

hvor erfc er den komplementære feilfunksjon.

Fordi argumentene til feilfunksjonen generelt er små, er det vanligvis små
 5 tap i nøyaktighet ved å bruke den vanlige kvadratrottilnærmelse. Etter en viss om-
 ordning av leddene, kan ligning (8) vises å innta formen

$$q_2 \left(\sqrt{\lambda/(\lambda - T_2)} - 1 \right) \leq \frac{2\pi^{3/2} Kr.}{\mu} \delta \sqrt{\frac{\lambda}{\tau}} - q_1 \left(\sqrt{\lambda/(T_i - T_o)} - \sqrt{\lambda/T_i} \right)$$

$$\equiv \frac{2\pi^{3/2} Kr.}{\mu} \delta \sqrt{\frac{\lambda}{\tau}} - q_1 u(\lambda) \quad (9)$$

10 hvor $\lambda \equiv T_2 + T_3$, varigheten av målefasen, er en kjent størrelse når undersøkel-
 sesfasen i fortesten er blitt fullført.

Anvendelsen av denne relasjonen er klar når uttrykket i parentesene på
 venstre side blir tilnærmet ytterligere for å fremskaffe et uttrykk for det ønskede
 volum i målefasen i fortesten,

15

$$V_2 \left\{ 1 + \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{T_2}{\lambda} \right) + O(T_2^2) \right\} = 4\pi^{3/2} \phi C_t \delta \left(\frac{K T_2 + T_3}{\mu \phi C_t} \right)^{3/2} - \lambda q_1 u(\lambda) \quad (10)$$

Med de samme antagelser som er gjort for å komme fram til ligning (8) fra
 ligning (6), kan ligning (7) skrives som,

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{K(T_o - T_1 - T_2)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{K(T_1 + T_2)}}\right) +$$

$$+ \frac{q_2}{q_1} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\phi\mu C_t r^2}{KT_2}}\right) \leq \frac{2\pi Kr.}{\mu q_1} \Delta p_{\max} \quad (11)$$

20

som, etter anvendelse av kvadratrottilnærmelsen for den komplementære feilfunksjon og omordning av ledd, kan uttrykkes som:

$$\begin{aligned} q_2 \left(1 - \sqrt{\tau/(\pi T_2)}\right) &\leq \frac{2\pi K_r}{\mu} \Delta p_{\max} - \frac{q_1}{\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{\tau/(T_1 + T_2)} - \sqrt{\tau/(T_o + T_1 + T_2)}\right) \\ &\equiv \frac{2\pi K_r}{\mu} \Delta p_{\max} - q_1 v(T_2) \end{aligned} \quad (12)$$

5

Kombinasjon av ligningene (9) og (12) gir opphav til:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda - T_2}} &= 1 + \left\{ \sqrt{\pi} \frac{\delta}{\Delta p_{\max}} \sqrt{\frac{\lambda}{\tau} - \frac{q_1 \mu}{2\pi K_r} \frac{1}{\Delta p_{\max}}} u(\lambda) \right\} \\ &\times \left\{ 1 + \frac{q_1 \mu}{2\pi K_r} \frac{1}{\Delta p_{\max}} v(T_2) \right\}^{-1} \left(1 - \sqrt{\tau/(\pi T_2)}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

10 Fordi leddene i de siste to klammerparentesuttrykkene er meget nær én, kan ligning (13) tilnærmes til:

$$\frac{T_2}{\lambda} \approx 1 - \left\{ 1 + \sqrt{\pi} \frac{\delta}{\Delta p_{\max}} \sqrt{\frac{\lambda}{\tau} - \frac{q_1 \mu}{2\pi K_r} \frac{1}{\Delta p_{\max}}} u(\lambda) \right\}^{-2} \quad (14)$$

15 som gir opphav til et uttrykk for bestemmelsen av varigheten av målefase- nedtrekningen, og dermed i kombinasjon med resultatet ovenfor for målefase- volumet i fortesten, verdien av strømningshastigheten i fortestens målefase. For å tilveiebringe realistiske estimater for T_2 fra ligning (14), bør følgende betingelse være oppfylt:

20

$$\delta > \frac{q_1 \mu}{2\pi^{3/2} K_r} \frac{1}{\Delta p_{\max}} u(\lambda) \quad (15)$$

Ligning (15) uttrykker den betingelse at målnaboskapet til det endelige trykk bør være større enn den transientrest som er tilbake fra undersøkelsesfasen i for-
testen.

25

Generelt kan de estimater som leveres ved hjelp av ligningene (10) og (14) for V_2 og T_2 brukes som startverdier i en mer omfattende parameterestimeringsplan som benytter ligningene (8) og (11). Selv om ligningene (8) og (11) er blitt brukt til å illustrere trinnene i prosedyren for å beregne målefaseparameterne, vil man forstå at andre virkninger, slik som verktøylagring, formasjonskompleksiteter, osv., lett kan innbefattes i estimeringsprosessen. Hvis formasjonsmodellen er kjent, kan de mer generelle formasjonsmodell-ligninger (6) og (7) brukes i parameterestimeringsprosessen.

Den ovenfor beskrevne løsning for å bestemme fortestmålefasen forutsetter at visse parametere vil være tildelt før den/det optimale fortestvolum og varighet kan estimeres. Disse parametere innbefatter: nøyaktigheten av formasjonstrykkmålingen δ , den maksimale tillatte nedtrekning (Δp_{max}), formasjonsporøsiteten ϕ , som vanligvis vil være tilgjengelig fra logger i det åpne hull, og den totale kompressibilitet C_1 , som kan fremskaffes fra kjente korrelasjoner som igjen er avhengig av litologi og porøsitet.

Når parametere for målefasen i fortesten er bestemt, bør det være mulig å oppnå forbedrede estimater av formasjonstrykket og formasjonsmobiliteten innenfor den tid som er tildelt hele testen.

Ved punkt 350 avsluttes undersøkelsesfasen og målefasen kan begynne. De parametere som er bestemt fra undersøkelsesfasen, blir brukt til å beregne strømningshastigheten, fortestvarigheten og/eller det volum som er nødvendig for å bestemme parametere for å utføre målefasen 14. Målefasen 14 kan nå utføres ved å benytte et forfinet sett med parametere bestemt fra de opprinnelige formasjonsparametere som er estimert i undersøkelsesfasen.

Som vist på fig. 9, innbefatter målefasen 14 de trinn å utføre en annen nedtrekning (trykkreduksjon) 360, å avslutte nedtrekningen 370, å utføre en annen oppbygning 380 og å avslutte oppbygningen 390. Disse trinnene blir utført som tidligere beskrevet i forbindelse med undersøkelsesfasen 13 på fig. 6. Parametere for målefasen, slik som strømningshastighet, tid og/eller volum, er fortrinnsvis blitt forutbestemt i henhold til resultatene i undersøkelsesfasen.

Det vises igjen til fig. 5 hvor målefasen 14 fortrinnsvis begynner ved avslutningen av undersøkelsesfasen 350 og varer over varigheten T_{MP} som er spesifisert ved hjelp av målefasen, inntil avslutning ved punkt 390. Den totale tid for å utføre undersøkelsesfasen og målefasen faller fortrinnsvis innenfor en tildelt tids-

periode. Når målefasen er fullført, kan formasjonstrykket estimeres og verktøyet trekkes tilbake for ytterligere testing, operasjoner nede i hullet eller opphenting fra brønnhullet.

Det vises nå til fig. 10 hvor en alternativ utførelsesform av fremgangsmåten 1 som innbefatter en slamkompressibilitetsfase 11, er skissert. I denne utførelsesformen omfatter fremgangsmåten 1b en slamkompressibilitetsfase 11, en undersøkelsesfase 13 og en målefase 14. Estimeringer av slamkompressibiliteten kan brukes til å forfine prosedyren i undersøkelsesfasen for å føre til bedre estimater av parametere fra undersøkelsesfasen 13 og målefasen 14. Fig. 11A skisserer en trykktrase som svarer til fremgangsmåten på fig. 10, og fig. 11B viser en relatert grafisk representasjon av endringshastigheten til fortestkammervolumet.

I denne utførelsesformen kan formasjonstesteren på fig. 4 brukes til å utføre fremgangsmåten på fig. 10. I henhold til denne utførelsesformen kan isolasjonsventilene 121a og 124a brukes i forbindelse med utjevningsventilen 128a til å innfange et væskevolum i strømningslinjen 103a. I tillegg kan isolasjonsventilen 121a brukes til å redusere effekter av verktøylagringsvolumet for å lette en hurtig oppbygning. Utjevningsventilen 128a tillater i tillegg enkel spyling av strømningslinjen for å drive uønskede fluider slik som gass, og å lette gjenfyllingen av strømningslinjeseksjonene 119a og 103a med brønnhullsfluid.

Slamkompressibilitetsmålingen kan f.eks. utføres ved først å trekke et slamvolum inn i verktøyet fra brønnhullet gjennom utjevningsventilen 128a ved hjelp av forteststempelet 118a, å isolere et slamvolum i strømningslinjen ved å lukke utjevningsventilen 128a og isolasjonsventilene 121a og 124a, å komprimere og/eller ekspandere det innfangede slamvolum ved å justere volumet til fortestkammeret 114a ved hjelp av forteststempelet 118a og samtidig registrere trykket og volumet til det innfangede fluid ved hjelp av trykkmåleren 120a.

Volumet til trykkammeret kan måles meget nøyaktig, f.eks. ved å måle forskyvningen av forteststempelet ved hjelp av et egnet lineært potensiometer som ikke er vist på fig. 4, eller ved hjelp av andre velkjente teknikker. På fig. 4 er heller ikke vist de midler ved hjelp av hvilke hastigheten til forteststempelet kan reguleres nøyaktig for å gi den ønskede styring over forteststempelhastigheten q_p . Teknikkene for å oppnå disse nøyaktige hastigheter er velkjente på området, ved f.eks. å bruke stempler festet til ledeskruer med korrekt form, girbokser og datastyrte motorer kan slike hastigheter som kreves i henhold til denne oppfinnelse lett oppnås.

Fig. 11A og 12 skisserer slamkompressibilitetsfasen 11 mer detaljert. Slamkompressibilitetsfasen 11 blir utført forut for plasseringen av verktøyet og dermed forut for utførelse av undersøkelses- og målefasene. Spesielt behøver verktøyet ikke å være satt mot brønnhullet, heller ikke må det være ubevegelig i brønnhullet for å utføre slamkompressibilitetstesten, for derved å redusere risikoen for fastkiling av verktøyet på grunn av en ubevegelig borestreng. Det vil imidlertid bli foretrukket å sample borehullsfluidet ved et punkt nær testpunktet.

De trinn som brukes til å utføre kompressibilitetsfasen 11 er vist mer detaljert på fig. 12. Disse trinnene svarer også til punkter langs trykktraseen på fig. 11A. Som angitt på fig. 12 innbefatter trinnene i slamkompressibilitetstesten å starte slamkompressibilitetstesten 510, å trekke slam fra brønnhullet inn i verktøyet 511, å isolere slamvolumet i strømningslinjen 512, å komprimere slamvolumet 520 og å avslutte kompresjonen 530. Deretter blir ekspansjonen av slamvolumet startet 540, slamvolumet ekspanderer 550 over en tidsperiode inntil avslutningen 560. Åpen kommunikasjon av strømningslinjen til brønnhullet blir påbegynt 561, og trykk blir utjevnet i strømningslinjen til brønnhullstrykket 570 inntil avslutningen 575. En ny fortteststempelsyklus kan nå begynne 580. Slam blir drevet ut fra strømningslinjen inn i brønnhullet 581 og fortteststempelet blir påført en ny syklus 582. Når det er ønskelig å utføre undersøkelsesfasen, kan verktøyet så anbringes 610 og åpen kommunikasjon av strømningslinjen med brønnhullet avsluttes 620.

Slamkompressibilitet vedrører kompressibiliteten til strømningslinjefluidet som typisk er boreslam. Kjennskap til slamkompressibiliteten kan brukes til bedre å bestemme helningen av linjen 32 (som tidligere beskrevet i forbindelse med fig. 7), noe som igjen fører til en forbedret bestemmelse av avvikspunktet 34 som signaliserer strømning fra formasjonen. Kjennskap til verdien av slamkompressibiliteten resulterer derfor i en mer effektiv undersøkelsesfase 13 og gir en ytterligere vei til videre forfining av de estimerer som utledes fra undersøkelsesfasen 13, og endelig til å forbedre de som utledes fra målefasen 14.

Slamkompressibiliteten C_m kan bestemmes ved å analysere trykktraseen på fig. 11A og trykk- og volumdataene som er generert tilsvarende. Spesielt kan slamkompressibiliteten bestemmes fra følgende ligning:

$$C_m = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \text{ eller ekvivalent, } q_p = -C_m V \dot{p} \quad (16)$$

hvor C_m er slamkompressibiliteten (1/psi), V er det totale volum av det innfangede slam (cm^3), p er det målte slamlinjetrykk (psi), \dot{p} er den tidsmessige hastighetsendring av det målte slamlinjetrykk (psi/s), og q_p representerer forteststempelhastigheten (cm^3/s).

5 For å tilveiebringe et nøyaktig estimat av slamkompressibiliteten er det ønskelig at mer enn noen datapunkter blir innsamlet for å definere hver gren av trykk/volum-trenden under slamkompressibilitetsmålingen. Ved å bruke ligning (16) til å bestemme slamkompressibiliteten, har de vanlige antagelser blitt gjort, spesielt at kompressibiliteten er konstant og det inkrementale fortestsvolum som
10 brukes i målingen er lite sammenlignet med det totale volumet V til det slam som er innfanget i strømningslinjen.

Utnyttelsen av målingen av slamkompressibiliteten for å fremskaffe et mer nøyaktig avvikspunkt 34a, blir nå forklart. Fremgangsmåten begynner ved å tilpasse den innledende del av nedtrekningsdataene fra undersøkelsesfasen 13 til en
15 linje 32a med *kjent helning*, til dataene. Helningen til linjen 32a er bestemt ved hjelp av den tidligere bestemte slamkompressibilitet, strømlinjevolumet og nedtrekningshastigheten til forteststempelet. Fordi nedtrekningen blir drevet med en fast og nøyaktig regulert hastighet og kompressibiliteten til strømningslinjefluidet er en kjent konstant som er blitt bestemt ved hjelp av det ovenfor beskrevne ekspe-
20 riment, er den ligning som beskriver denne linjen med kjent helning gitt av:

$$\begin{aligned} p(t) &= p^+ - \frac{q_p}{V(0)C_m} t \\ &= b - at \end{aligned} \quad (17)$$

hvor $V(0)$ er strømningslinjevolumet ved begynnelsen av utvidelsen, C_m er slam-
25 kompressibiliteten, q_p er stempelets dekomprimeringshastighet, p^+ er det tilsynelatende trykk ved innledningen av ekspansjonsprosessen. Det blir antatt at $V(0)$ er meget større enn økningen i volumet på grunn av ekspansjonen av fortestkammeret.

Fordi helningen a nå er kjent, er den eneste parameter som må spesifiseres
30 for fullstendig å definere ligning (17), avskjæringen p^+ , dvs. b . Generelt er p^+ ukjent, imidlertid, når datapunkter som tilhører den lineære trenden til strømningslinjeekspansjonen blir tilpasset linjer med helning a , bør de alle frembringe lignen-

de avskjæringer. Verdien av avskjæringen p^+ vil derfor fremkomme når den lineære trenden til strømningslinjeekspansjonen blir identifisert.

En strekning med datapunkter som faller på en linje med den definerte helling a , innenfor en gitt nøyaktighet, blir identifisert. Denne linjen representerer den virkelige nedtrekningstrykktrenden for slamekspansjonen. En fagkyndig på området vil forstå at ved å tilpasse datapunktene til en linje, er det unødvendig at alle punktene faller nøyaktig på linjen. I stedet er det tilstrekkelig at datapunktene passer til en linje innenfor en nøyaktighetsgrense som blir valgt basert på verktøykarakteristikker og driftsparametere. Med denne løsningen kan man unngå den ujevne trend som er tilknyttet tidlige datapunkter, dvs. de punkter som befinner seg omkring starten av nedtrekningen ved hjelp av forteststempleet. Det første punkt 34a etter de punkter som definerer den rette linje, som avviker betydelig (eller utover en nøyaktighetsgrense) fra linjen, er endelig det punkt hvor avviket fra nedtrekningstrykktrenden inntreffer. Avviket 34a inntreffer typisk ved et høyere trykk enn hva som ville bli forutsagt ved ekstra polering av linjen. Dette punktet indikerer bruddet til slamkaken.

Forskjellige prosedyrer er tilgjengelige for å identifisere de datapunkter som tilhører strømningslinjeekspansjonslinjen. Detaljer ved en prosedyre er selvsagt avhengig av hvordan man ønsker å bestemme ekspansjonslinjen for strømningslinjen, hvordan det maksimale intervall blir valgt og hvordan man velger nøyaktighetsmålene, osv.

To mulige løsninger er gitt nedenfor for å illustrere detaljene. Før dette gjøres, skal følgende uttrykk defineres:

$$\bar{b}_k \equiv \frac{1}{N(k)} \left(\sum_{n=1}^{N(k)} p_n + a \sum_{n=1}^{N(k)} t_n \right) = \bar{p}_n + a \bar{t}_n \quad (18)$$

$$\hat{b}_k \equiv \text{median}_{N(k)}(p_k + at_k), \text{ og} \quad (19)$$

$$S_{p,k}^2 \equiv \frac{1}{N(k)} \sum_{n=1}^{N(k)} (p_n - p(t_n))^2 = \frac{1}{N(k)} \sum_{n=1}^{N(k)} ((p_n - \bar{p}_k + a(t_n - \bar{t}_k))^2) \quad (20)$$

hvor $N(k) < k$ generelt representerer det antall datapunkter som er valgt fra de k datapunkter (t_k, p_k) som er innsamlet. Avhengig av sammenhengen kan $N(k)$ være lik k . Ligningene (18) og (19) representerer henholdsvis minstekvadratlinjen med fast helning a og linjen med minst absolutt avvik med fast helning a gjennom de $N(k)$ datapunktene, og ligning (20) representerer variansen av dataene omkring linjen med fast helning.

En teknikk for å definere en linje med helning a som spenner over det lengste tidsintervall, er å tilpasse de enkelte datapunkter, etter hvert som de samles inn, til linjer med fast helning a . Denne tilpasningen frembringer en sekvens med avskjæringer $\{b_k\}$, hvor den enkelte b_k blir beregnet fra $b_k = p_k + at_k$. Hvis successive verdier av b_k blir progressivt nærmere og til slutt faller innenfor et smalt bånd, blir de datapunkter som svarer til disse indeksene brukt for å tilpasse den endelige linje.

Teknikken kan spesielt innebære følgende trinn: (i) å bestemme en median, \tilde{b}_k , fra den gitte sekvens med skjæringer $\{b_k\}$, (ii) å finne indekser som tilhører settet $I_k = \{i \in [2, \dots, N(k)] \mid |b_i - \tilde{b}_k| \leq n_b \varepsilon_b\}$ hvor n_b er et tall slik som 2 eller 3 hvor et mulig valg av ε_b er definert ved hjelp av følgende ligning:

$$\varepsilon_b^2 = S_{b,k}^2 = \frac{1}{N(k)} (S_{p,k}^2 + a^2 S_{t,k}^2) = \frac{1}{N(k)} S_{p,k}^2 \quad (21)$$

hvor det siste uttrykk er et resultat fra den antagelse at tidsmålingene er nøyaktige.

Andre og mindre naturlige valg av ε_b er mulige, f.eks. $\varepsilon_b = S_{p,k}$, (iii) å tilpasse en linje med fast helning a til datapunktene med indekser som tilhører I_k , og (iv) å finne det første punkt (t_k, p_k) som frembringer $p_k - b_k^* + at_k > n_S S_{p,k}$, hvor $b_k^* = \hat{b}_k$ eller \bar{b}_k er avhengig av den fremgangsmåte som brukes til å tilpasse linjen, og n_S er et tall slik som 2 eller 3. Dette punktet, representert ved 34a på fig. 11A, blir tatt til å indikere et brudd i slamkaken og innledningen av strømming fra formasjonen.

En alternativ løsning er basert på den idé at sekvensen med varianser for dataene omkring linjen med konstant hastighet, til slutt bør bli mer eller mindre

konstant når den tilpassede linje møter de virkelige strømninglinjeeekspansjonsdata. En fremgangsmåte i henhold til oppfinnelsen kan således implementeres på følgende måte: (i) en linje med fast helning, a , blir først tilpasset de data som er akkumulert opp til tiden t_k . For hvert datasett blir det bestemt en linje fra $p(t_k) =$

5 $\bar{b}_k - at_k$, hvor \bar{b}_k er beregnet fra ligning (18), (ii) sekvensen av varianser $\{S_{p,k}^2\}$ er konstruert ved å bruke ligning (20) med $N(k) = k$, (iii) suksessive indekser blir funnet som tilhører settet:

$$J_k \left\{ i \in [3, \dots, k] \mid S_{p,k-1}^2 - S_{p,k}^2 > \frac{1}{k} S_{p,k-1}^2 - (p_k - (\bar{b}_k - at_k))^2 \right\};$$

(iv) en linje med fast helning a blir tilpasset dataene med indekser i J_k . La $N(k)$ være antallet indekser i settet,

10 (v) å bestemme avvikspunktet fra den siste av rekkene med linjer som har fast helning og som har indekser i det ovennevnte sett, som det første punkt som oppfyller $p_k - \bar{b}_k + at_k > n_s S_{p,k}$, hvor n_s er et tall slik som 2 eller 3, (vi) definer

$$S_{\min}^2 = \min_{N(k)} \{S_{p,k}^2\};$$

(vii) finn delsettet av punkter i J_k slik at

$$N = \{ i \in J_k \mid |p_i - (\bar{b}_i - at_i)| < S_{\min} \};$$

(viii) tilpass en linje med helning a gjennom punktene med indekser i N , og (ix) definer bruddet av slamkaken som det første punkt

15 (t_k, p_k) hvor $p_k - \bar{b}_k + at_k > n_s S_{p,k}$. Som i den foregående mulighet, er dette punktet, igjen representert ved 34a på fig. 11A, tatt til å indikere et brudd av slamkaken og innledningen av strømning fra formasjonen.

Når linje 32a og den beste tilpasning og avvikspunktet 34a er bestemt, kan

20 avslutningspunktet 330a, oppbygningen 370a og avslutningen av oppbygningen 350a bestemmes som diskutert tidligere i forbindelse med fig. 7. Målefasen 14 kan så avsluttes ved hjelp av de forfinede parametere som er generert i undersøkelsesfasen 13 på fig. 11A.

Det vises nå fig. 13 hvor en alternativ utførelsesform av fremgangsmåten 1c

25 som svarer til en slamfiltreringsfase 12, er skissert. I denne utførelsesformen omfatter fremgangsmåten en slamkompressibilitetsfase 11a, en slamfiltreringsfase 12, en undersøkelsesfase 13 og en målefase 14. Den tilsvarende trykktrase er skissert på fig. 14A, og en tilsvarende grafisk avbildning av endringshastigheten til fortestvolumet er vist på fig. 14B. Det samme verktøy som er beskrevet i forbindelse med fremgangsmåten på fig. 10, kan også brukes i forbindelse med frem-

30 gangsmåten på fig. 13.

Fig. 14A og 14B skisserer slamfiltreringsfasen 12 mer detaljert. Slamfiltreringsfasen 12 blir utført etter at verktøyet er fiksert og før undersøkelsesfasen 13 og målefasen 14 er utført. En modifisert slamkompressibilitetsfase 11A blir utført forut for slamfiltreringsfasen 12.

5 Den modifiserte kompressibilitetstest 11a er skissert mer detaljert på fig. 15. Den modifiserte kompressibilitetstest 11a innbefatter de samme trinn 510-580 som i kompressibilitetstesten 11 på fig. 12. Etter trinn 580, blir trinnene 511 og 512 i slamkompressibilitetstesten gjentatt, slam blir nemlig trukket fra borehullet inn i verktøyet 511a og strømlinjen blir isolert fra borehullet 512a. Verktøyet kan nå fikseres 610 og ved avslutningen av festesyklusen, kan strømningslinjen isoleres 10 620 som forberedelse på slamfiltrerings-, undersøkelses- og målefasene.

Slamfiltreringsfasen 12 er vist mer detaljert på fig. 16A. Slamfiltreringsfasen blir startet ved 710, slamvolumet i strømningslinjen blir komprimert 711 inntil avslutning ved punkt 720, og strømningslinjetrykket faller 730. Etter den innledende 15 kompresjon blir kommunikasjonen til strømningslinjen inne i borehullet åpnet 751, trykket inne i verktøyet og brønnhullet blir utjevnet 752, og strømningslinjen blir isolert fra brønnhullet 753.

Eventuell, som vist på fig. 16B, kan en modifisert slamfiltreringsfase 12b utføres i den modifiserte slamfiltreringsfase 12b, en annen kompresjon blir utført 20 forut for åpningen av kommunikasjonen til strømningslinjen 751, innbefattende de trinn å begynne rekomprimering av slam i strømningslinjen 731, å komprimere slamvolumet i strømningslinjen til høyere trykk 740, å avslutte rekomprimeringen 741. Strømningslinjetrykket blir så tillatt å falle 750. Trinnene 751-753 kan så utføres som beskrevet i forbindelse med fig. 16A. Trykktrasene på fig. 14A viser slamfiltreringsfasen 12b på fig. 16B. 25

I henhold til en annen mulighet 12c, vist på fig. 16C, kan en dekomprimeringssyklus utføres etter trykkfallet 730 i strømningslinjen etter den første kompresjon 711, innbefattende de trinn å begynne dekomprimeringen av slam i strømningslinjen 760, dekomprimering til et egnet trykk under borehullstrykket 770, og å 30 avslutte dekomprimeringen 780. Strømningslinjetrykket blir så tillatt å falle 750. Trinnene 751-753 kan så gjentas som tidligere beskrevet i forbindelse med fig. 16A. Trykktrasen på fig. 14A viser slamfiltreringsfasen 12c på fig. 16C.

Som vist i trykktrasen på fig. 14A, kan slamfiltreringsmetoden 12 på fig. 16A utføres med enten slamfiltreringsfasen 12b på fig. 16B eller slamfiltreringsfasen

12c på fig. 16C. Eventuelt kan én eller flere av de teknikker som er skissert på figurene 16A-C utføres under slamfiltreringsfasen.

Slamfiltrering vedrører filtreringen av basisfluidet i slammet gjennom en slamkake avsatt på borehullsveggen, og bestemmelsen av den volumetriske hastighet for filtreringen under de eksisterende borehullsforhold. Hvis det antas at
 5 slamkakeegenskapene forblir uendret under testen, er filtreringshastigheten gjennom slamkaken gitt av det enkle uttrykk:

$$q_f = C_m V_t \dot{p} \quad (22)$$

10

hvor V_t er det totale volum av det innfangede slam (cm^3), og q_f representerer slamfiltreringshastigheten (cm^3/s), C_m representerer slamkompressibiliteten ($1/\text{psi}$) (hvor C_m er bestemt under den modifiserte slamkompressibilitetstest 11a eller er matet inn), \dot{p} representerer trykkfallhastigheten (psi/s) målt under 730 og 750 på
 15 fig. 14. Volumet V_t i ligning (22) er en representasjon av volumet til strømningslinjen som befinner seg mellom ventilene 121a, 124a og 128a som vist på fig. 4.

For slamkaker som er ineffektive når det gjelder å tette borehullsveggen, kan hastigheten av slaminfiltrering være en betydelig andel av forteststempelhastigheten under strømningslinjedekompresjon i undersøkelsesfasen, og kan hvis
 20 det ikke tas hensyn til dette, føre til feil i det punkt som detekteres som innledningspunktet for strømning fra formasjonen, 34 på fig. 7. Helningen, a, for linjen med fast helning som brukes under strømningslinjedekomprimeringsfasen for å detektere innledningspunktet for strømning fra formasjonen, dvs. avvikspunktet 34 på fig. 7, blir under disse forhold bestemt ved å bruke følgende ligning:

25

$$\begin{aligned} p(t) &= p^+ - \frac{q_p - q_f}{V(0)C_m} t \\ &= b - at \end{aligned} \quad (23)$$

hvor $V(0)$ er strømningslinjevolumet ved begynnelsen av ekspansjonen, C_m er slamkompressibiliteten, q_p er stempeldekomprimeringshastigheten, q_f er filtreringshastigheten fra strømningslinjen gjennom slamkaken inn i formasjonen, og p^+
 30

er det tilsynelatende trykk ved innledningen av ekspansjonsprosessen, som, som tidligere forklart, er bestemt under prosessen med å bestemme avvikspunktet 34.

Når slamkakefiltreringshastigheten q_f og slamkompressibiliteten C_m er blitt bestemt, er det mulig å fortsette å estimere formasjonstrykket fra undersøkelsesfasen 13 under forhold hvor filtrering gjennom slamkaken er betydelig.

Foretrukne utførelsesformer av oppfinnelsen kan implementeres på en automatisk måte. I tillegg kan de anvendes i forbindelse med både nedhulls boreverktøy og en kabelformasjonstester transportert nede i hullet ved hjelp av en arbeidsstreng av en hvilken som helst type, slik som en borestreng, en kabel, skjødete rørledninger eller oppkveilingsrør. Fremgangsmåter i henhold til oppfinnelsen muliggjør fortrinnsvis nedhulls boreverktøy å utføre tidsbegrenset formasjonstesting på en mest tidseffektiv måte, slik at potensielle problemer i forbindelse med et stanset boreverktøy kan minimaliseres eller unngås.

En annen utførelsesform for gjennomføring av undersøkelsesfasemålinger vil bli beskrevet under henvisning til fig. 17A, 17B og 18. Forut for anbringelsen av formasjonstesteren 805 blir slamkompressibiliteten fortrinnsvis bestemt som beskrevet ovenfor (ikke vist). Etter bestemmelsen av slamkompressibiliteten og forut for anbringelsen av formasjonstesteren, er det trykk som måles ved hjelp av verktøyet borehullfluidtrykket eller det hydrostatiske slamtrykk 801. Etter at verktøyet er plassert 805, blir fortettstempet 118a som vist på fig. 4, aktivert 810 for å trekke ut fluid med en nøyaktig og fiksert hastighet for å oppnå et spesifisert trykkfall 814 på en ønsket tid t_{pi} 815. Det blir foretrukket at det ønskede trykkfall (Δp) er av samme størrelsesorden, men mindre enn den forventede overbalanse ved denne dybden hvis overbalansen er tilnærmet kjent. Overbalanse er differansen i trykk mellom slammets hydrostatiske trykk og formasjonstrykket. Alternativt kan det ønskede trykkfall (Δp) være et visst tall (f.eks. 300 psi) som er større enn den maksimalt ventede verdi av "strømningsinnledningstrykket" (f.eks. 200 psi). Om det aktuelle formasjonstrykk er innenfor dette område, er uvesentlig for utførelsesformene i henhold til oppfinnelsen. Den følgende beskrivelse antar derfor at formasjonstrykket ikke er innenfor området.

I samsvar med utførelsesformer av oppfinnelsen kan stempelnedtrekkingshastigheten for å oppnå dette begrensede trykkfall (Δp) estimeres fra

$$q_{pi} = -\frac{1}{t_{pi}} C_m V_t \Delta p \quad (24)$$

hvor C_m er kompressibiliteten til strømningslinjefluidet, som antas å være det samme som borehullsfluidet, V_t er volumet til det innfangede fluid i strømningslinjen 103a mellom ventilene 121a, 124a og 128a som vist på fig. 4, Δp er det ønskede trykkfall og t_{pi} er varigheten av fortetnedtrekningen.

Det vises til fig. 17A, 17B og 18 hvor en fremgangsmåte for å utføre en undersøkelsesfase 13b i samsvar med utførelsesformer av oppfinnelsen omfatter det trinn å starte nedtrekningen 810 og utføre en kontrollert nedtrekning 814. Det blir foretrukket at stempelnedtrekningshastigheten er nøyaktig styrt slik at trykkfallet og trykkendringshastigheten er godt regulert. Imidlertid er det ikke nødvendig å utføre forteten (stempelnedtrekningen) ved lave hastigheter. Når det forutbestemte inkrementale trykkfall (Δp) er blitt nådd, blir fortetstampelet stoppet og nedtrekningen avsluttet 816. Trykket blir så tillatt å utjevne seg 817 over en periode t_1^o , 818 som kan være lenger enn nedtrekningsperioden t_{pi} 817, f.eks. $t_1^o = 2 t_{pi}$. Etter at trykket er utjevnet, blir det stabiliserte trykk ved punkt 820 sammenlignet med trykket ved begynnelsen av nedtrekningen ved punkt 811. Ved dette punkt blir det tatt en beslutning med hensyn til om syklusen skal gjentas, vist som 819 på fig. 18. Kriteriet for beslutningen er om det utjevnete trykk (f.eks. ved punkt 820) skiller seg fra trykket ved begynnelsen av nedtrekningen (f.eks. ved punkt 810) med en størrelse som er hovedsakelig konsistent med det ventede trykkfall (Δp). Hvis så er tilfelle, så blir denne strømningslinjeekspansjonssyklusen gjentatt.

For å gjenta strømningslinjeekspansjonssyklusen blir f.eks. fortetstampelet reaktivert og nedtrekningssyklusen blir gjentatt som beskrevet, nemlig innledning av forteten 820, nettrekning 824 med nøyaktig samme mengde (Δp) ved hovedsakelig samme hastighet og varighet 826 som for den foregående syklus, avslutning av nedtrekningen 825 og stabilisering 830. Igjen blir trykket ved 820 og 830 sammenlignet for å bestemme om syklusen skal gjentas. Som vist på fig. 17A er disse trykkene betydelig forskjellige og er hovedsakelig i overensstemmelse med det ventede trykkfall (Δp) som oppstår fra ekspansjon av fluidet i strømningslinjen. Syklusen blir derfor gjentatt, 830-834-835-840. "Strømningslinjeekspansjonssyklusen" blir gjentatt inntil differansen i påfølgende stabiliserte trykk er betydelig mind-

re enn det påførte/forutbestemte trykkfall (Δp), vist f.eks. på fig. 17A som 840 og 850.

Etter at differansen mellom påfølgende stabiliserte trykk er betydelig mindre enn det påførte/forutbestemte trykkfall (Δp), kan "strømningslinjeekspansjonssyklusen" gjentas en gang til, vist som 850-854-855-860 på fig. 17A. Hvis det stabiliserte trykk ved 850 og 860 er omtrent overensstemmende, f.eks. innenfor en liten multippel av målernøyaktigheten, blir den største av de to verdier tatt som det første estimat av formasjonstrykket. En vanlig fagkyndig på området vil forstå at de prosessene som er vist på fig. 17A, 17B og 18 kun er ment som en illustrasjon. Utførelsesformer av oppfinnelsen er ikke begrenset av hvor mange strømningslinjeekspansjonssykluser som utføres. Etter at differansen mellom påfølgende stabiliserte trykk er betydelig mindre enn det påførte/forutbestemte trykkfall (Δp), er det videre valgfritt å gjenta syklusen én eller flere ganger.

Det punkt hvor overgangen fra strømningslinjefluid ekspansjon til strømning fra formasjonen finner sted, blir identifisert som 800 på fig. 17A. Hvis trykket ved 850 og 860 stemmer ved slutten av den tildelte stabiliseringstid, kan det være fordelaktig å tillate trykket 860 å fortsette å bygge seg opp og benytte de prosedyrer som er beskrevet i tidligere avsnitt (se beskrivelsen i forbindelse med fig. 8) til å avslutte oppbygningen for å frembringe et bedre første estimat av formasjonstrykket. Den prosess ved hvilken beslutningen blir tatt om enten å fortsette undersøkelsesfasen eller å utføre målefasen, 864-868-869, for å oppnå et endelig estimat av formasjonstrykket 870, er beskrevet i foregående avsnitt. Etter at målefasen er fullført 870, blir sonden frigjort fra borehullsveggen og trykket returnerer til borehullstrykket 874 i løpet av en tidsperiode 895 og når stabilisering ved 881.

Når et første estimat av formasjonstrykket og formasjonsmobiliteten er oppnådd i undersøkelsesfasen 13b som vist på fig. 17A og 18, kan de således fremskaffede parametere brukes til å opprette forttestparameterne i målefasen 14 som vil frembringe mer nøyaktige formasjonsparametere innenfor den tildelte tid for testen. Prosedyrene for bruk av de parametere som er fremskaffet i undersøkelsesfasen 13b til å utforme forttestparameterne for målefasen 14 er blitt beskrevet i foregående avsnitt.

I de utførelsesformer som er vist på fig. 17A, 17B og 18, er størrelsen av trykkfallet (Δp) under strømningslinjeekspansjonsfasen forutbestemt. I en alternativ

utførelsesform, som vist på figurene 19 og 20, er størrelsen av volumøkningen (ΔV) under strømningslinjeekspansjonsfasen forutbestemt. I denne utførelsesformen blir et fiksert og nøyaktig regulert volum med fluid (ΔV) ekstrahert ved hvert trinn med en styrt hastighet for å frembringe et trykkfall som kan estimeres fra:

5

$$\Delta p = -\frac{1}{C_m V_t} \Delta V = -\frac{1}{C_m V_t} q_i t_{qi}$$

De prosedyrer som brukes i denne utførelsesformen, er maken til de som er beskrevet for utførelsesformer vist på fig. 17A, 17B og 18. Forut for festing av formasjonstesteren, blir slamkompressibiliteten fortrinnsvis bestemt (ikke vist). Etter bestemmelsen av slamkompressibiliteten og forut for fastsettingen av formasjonstesteren, er det trykk som måles av verktøyet borehullstrykket eller det hydrostatisk slamtrykk 201.

Det vises til figurene 19A, 19B og 20 hvor fortteststempelet 118a, vist på fig. 4, etter at verktøyet er festet 205, blir aktivert. I overensstemmelse med en utførelsesform av oppfinnelsen omfatter en fremgangsmåte for å utføre en undersøkelsesfase 13c, de trinn å starte nedtrekning 210, å trekke ut fluid med en nøyaktig og fast bestemt hastighet 214 inntil volumet av forttestkammeret 114a er øket med den forutbestemte mengde ΔV . Den inkrementale endring i volum av forttestkammeret kan være i størrelsesorden 0,2 til 1 cm³ f.eks. En vanlig fagkyndig på området vil forstå at størrelsen av den forutbestemte volumøkning (ΔV) ikke er begrenset til disse volumeksemplene og bør velges i overensstemmelse med det totale volumet til innfangede fluid. Den resulterende ekspansjon av strømningslinjefluidet induserer et trykkfall i strømningslinjen.

Når det forutbestemte inkrement i forttestkammervolumet er blitt oppnådd, blir fortteststempelet 118a stoppet og nedtrekningen blir avsluttet 215. Trykket i strømningslinjen blir så tillatt å utjevne seg 217 over en periode t_{oi} 218 som er lenger enn nedtrekningsperioden t_{qi} 216, f.eks. $t_{oi} = 2 t_{qi}$. Etter at trykket har stabilisert seg (vist ved punkt 220 på fig. 19A), blir det tatt en beslutning med hensyn til om "strømningslinjeekspansjonssyklusen" 219 skal gjentas (vist på fig. 20). Kriteriet for å ta beslutningen er lik det som er beskrevet for utførelsesformen vist på fig. 17A og 18. Det vil si, hvis trykket etter stabilisering eller utjevning (f.eks. ved

30

punkt 220) er betydelig forskjellig fra det ved begynnelsen av nedtrekningen (f.eks. ved punkt 210) og trykkdifferansen er hovedsakelig i overensstemmelse med det ventede trykkfall som stammer fra ekspansjonen av fluidet i strømningslinjen, så blir "strømningslinjeekspansjonssyklusen" gjentatt.

5 For å gjenta "strømningslinjeekspansjonssyklusen" blir f.eks. fortetstempel-
 let reaktivert 220, strømningslinjen blir ekspandert med nøyaktig det samme volum
 ΔV 224, og trykket blir tillatt å stabilisere seg 230. Igjen, hvis trykket ved 220 og
 230 er betydelig forskjellig og er hovedsakelig i overensstemmelse med det for-
 ventede trykkfall som oppstår ved ekspansjon av fluidet i strømningslinjen, så blir
 10 syklusen gjentatt, f.eks. 230-234-235-240. "Strømningslinjeekspansjonssyklusen"
 blir gjentatt inntil forskjellen mellom påfølgende stabiliserte trykk, f.eks. trykk ved
 230 og 240 som vist på fig. 19A, er betydelig mindre enn det forventede trykkfall
 på grunn av ekspansjonen av fluid i strømningslinjen.

Etter at differansen i påfølgende stabiliserte trykk er betydelig mindre enn
 15 det ventede trykkfall, kan "strømningslinjeekspansjonssyklusen" gjentas én gang
 til, vist som 240-244-245-250 på fig. 19A. Hvis det stabiliserte trykk ved 240 og
 250 stemmer omtrent overens, blir den største av de to verdiene tatt til å represen-
 tere det første estimat av formasjonstrykket. En vanlig fagkyndig på området vil
 forstå at de prosesser som er vist på fig. 19A, 19B og 20 kun er illustrerende. Utfø-
 20 relsesformer av oppfinnelsen er ikke begrenset av hvor mange "strømningslinje-
 ekspansjonssykluser" som utføres. Etter at differansen i påfølgende stabiliserte
 trykk er betydelig mindre enn det forventede trykkfall, er det videre valgfritt å gjen-
 ta syklusen én eller flere ganger.

Det punkt hvor overgangen fra strømningslinjefluidekspansjon til strømning
 25 fra formasjonen finner sted, blir identifisert som 300 på fig. 19A. Hvis trykket ved
 240 og 250 stemmer overens innenfor en valgt grense (f.eks. en liten multippel av
 målernøyaktigheten) ved slutten av den tildelte stabiliseringstid, kan det være for-
 delaktig å tillate trykket ved 250 å fortsette å bygge seg opp og bruke den prose-
 dyre som er beskrevet i det tidligere avsnitt (se fig. 9) til å avslutte oppbygningen
 30 for å fremskaffe et bedre første estimat av formasjonstrykket. Den prosess ved
 hjelp av hvilken beslutningen om å fortsette undersøkelsesfasen eller om det skal
 utføres en målefase 250-258-259-260 for å oppnå et endelig estimat av forma-
 sjonstrykket 260, er som beskrevet i tidligere avsnitt. Etter at målefase er fullført

260, blir sonden frigjort fra borehullsveggen og trykket vender tilbake til borehulls-trykket 264 i løpet av en tidsperiode 295 og når stabilisering ved 271.

Når et første estimat av formasjonstrykket og formasjonsmobiliteten er oppnådd i undersøkelsesfasen 13c, vist på fig. 19A og 20, kan de således fremskaffe-
 5 de parametere brukes til å etablere fortestparametere for målefasen 14 som vil frembringe mer nøyaktige formasjonsparametere innenfor den tid som er tildelt til testen. Prosedyrene for bruk av de parametere som er fremskaffet i undersøkelsesfasen 13c til å utforme parametere for målefasen 14 i fortesten, er blitt beskrevet tidligere.

10 Tidligere i beskrivelsen er det skissert fremgangsmåter for å bestemme slamkompressibilitet. Slamkompressibiliteten er avhengig av slammets sammensetning og av temperaturen og trykket til fluidet. Slamkompressibiliteten endrer seg derfor ofte med dybden. Derfor er det ønskelig å måle slamkompressibiliteten på stedet ved en posisjon nær der hvor testingen skal utføres. Hvis verktøykonfi-
 15 gurasjonen ikke tillater slamkompressibiliteten å bli bestemt som beskrevet ovenfor, kan slamkompressibiliteten på stedet estimeres ved hjelp av alternative fremgangsmåter som beskrevet i det følgende.

I en fremgangsmåte ifølge utførelsesformer av oppfinnelsen kan formasjonstestere være anbrakt i et fôringsrør, f.eks. nær fôringsrørskoen, for å opprette
 20 en fluidtetning med fôringsrøret. En kompresjon og dekompresjon av det brønnfluid som er innfanget i testerens strømningslinje blir utført ved hjelp av fortteststempel 118A, vist på fig. 4. Prosedyrer for å utføre slamkompressibilitetstesten er beskrevet ovenfor under henvisning til fig. 11A og 11B. Når fortteststempelhas-
 tigheten q_p , trykkendringshastigheten \dot{p} og det innfangede volum V er kjent, kan
 25 slamkompressibiliteten estimeres fra $C_m = -q_p / (V\dot{p})$.

I denne spesielle utførelsesformen kan den virkelige vertikale dybde (dermed temperaturen og trykket) ved hvilken kompressibilitetsmålingen blir utført, være betydelig forskjellig fra den dybde hvor formasjonstrykket skal måles. Fordi kompressibilitet til borefluidet blir påvirket av temperatur og trykk, ville det være
 30 nødvendig å anvende en korleksjon av kompressibiliteten som er målt på denne måten, for å estimere kompressibiliteten til boreslammet ved den dybde hvor testingen skal utføres.

I henhold til en fremgangsmåte ifølge foreliggende oppfinnelse blir informasjon om borehullstrykk og temperatur innhentet før målingen begynner, f.eks. ved punkt 801 som vist på fig. 17A, ved å bruke konvensjonelle trykk- og temperatursensorer. Basert på kjente boreslamegenskaper og temperatur- og trykkmålinger på stedet, kan diagrammer som vist på fig. 21, konstrueres for det formål å utføre 5 temperatur- og trykk-korreksjoner. Analysemetoder som er kjent på området, kan alternativt brukes til å beregne korreksjonsfaktorer som når de anvendes på den opprinnelige kompressibilitetsmåling, vil gi kompressibiliteten til strømningslinjefluidet på stedet ved den dybde der formasjonstrykket skal måles. Se f.eks. E. Kartstad og B.S. Aadnoy, "Density Behavior of Drilling Fluids During High Pressure High Temperature Drilling Operations", IADC/SPE artikkel 47806, 1998. 10

I henhold til en annen fremgangsmåte ifølge utførelsesformer av oppfinnelsen blir kompressibiliteten til en prøve tatt på overflaten (f.eks. fra en slamgrop) over området av forventede trykk- og temperaturforhold nede i hullet målt. Et estimat av slamkompressibiliteten på stedet under forholdene nede i borehullet, kan 15 så estimeres fra kjente relasjoner mellom slamdensitet og slamtrykk og slamtemperatur i henhold til fremgangsmåter som er kjent på området. Se f.eks. fig. 21 og E. Kartstad og B.S. Aadnoy, "Density Behavior of Drilling Fluids During High Pressure High Temperature Drilling Operations", IADC/SPE artikkel 47806, 1998.

Fig. 21 skisserer en typisk relasjon mellom fluidkompressibilitet (C_m) og fluidtrykk (p) for oljebasert og vannbasert slam. Den heltrukne linje 10 skisserer variasjonen i slamkompressibilitet med borehullstrykk for et typisk oljebasert slam. Den stiplede linje 11 skisserer den tilsvarende variasjon i slamkompressibilitet for et typisk vannbasert slam. Kompressibiliteten til det oljebaserte slam ved overflaten er representert ved henvisningstall 7. Kompressibiliteten til det oljebaserte 25 slam ved føringssskoen, er representert ved henvisningstall 8. Kompressibiliteten til det oljebaserte slam ved en gitt måledybde under føringsrørskoene, er representert ved henvisningstall 9. Kompressibilitetskorreksjonen ΔC representerer differansen mellom kompressibiliteten til det oljebaserte slam ved føringsrørskoene 8 og ved 30 måledybden 9. Kompressibilitetsmålingen som er foretatt ved føringsrørskoene 8, kan justeres ved hjelp av kompressibilitetskorreksjonen ΔC for å bestemme kompressibiliteten ved måledybden 9. Som indikert ved hjelp av den stiplede linje 11, kan endringen i kompressibilitet og tilsvarende kompressibilitetskorreksjon for

vannbaserte slam være betydelig mindre enn den korreksjon som er skissert ved hjelp av den heltrukne linje 10 for oljebasert slam.

Som bemerket ovenfor, kan slamkompressibilitet under borehullstiltandene, enten målt direkte på stedet eller ekstrapolert fra andre målinger, brukes i utførelsesformer av oppfinnelsen til å forbedre nøyaktigheten av estimatene av formasjonsegenskaper fra undersøkelsesfasen og/eller målefasen, som f.eks. vist på fig. 11A.

Selv om oppfinnelsen er blitt beskrevet under henvisning til et begrenset antall utførelsesformer, vil fagkyndige på området, som har hatt fordel av å sette seg inn i denne fremstillingen, forstå at andre utførelsesformer kan tenkes som ikke avviker fra oppfinnelsens ramme, slik den er beskrevet her. Følgelig skal oppfinnelsens ramme bare være begrenset av de vedføyde patentkrav.

108300/BKM

30.04.09

PATENTKRAV

- 5 1. Fremgangsmåte for evaluering av en undergrunnsformasjon,
karakterisert ved:
- (a) å opprette fluidkommunikasjon mellom et fortestkammer (114, 114a) i nedhullsverktøyet og formasjonen via en strømningslinje, idet strømningslinjen har et innledende trykk;
 - 10 (b) å bevege et forttestempel (118a) posisjonert i fortestkammeret (114, 114a) på regulert måte (214, 814) for å redusere det innledende trykk til et nedtrekningstrykk;
 - (c) å avslutte bevegelsen av stempelet (118a) for å tillate nedtrekningstrykket å justere seg (271, 818) til et stabilisert trykk;
 - 15 (d) å gjenta (219,819) trinnene a-c inntil en forskjell mellom det stabiliserte trykk og det innledende trykk er betydelig mindre enn et forutbestemt trykkfall; og
 - (e) å bestemme minst én nedhullsparemeter fra en analyse av ett eller flere av trykkene.
- 20
2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor bevegelsen av forttestempelet (118a) blir styrt ved å styre én av reduksjon av trykket i strømningslinjen, trykkendringshastigheten i strømningslinjen, inkremental volumendring i fortestkammeret (114, 114a) og kombinasjoner av disse.
- 25
3. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor varigheten av trinn (c) er lenger enn varigheten av trinn (b).
4. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å bestemme når trinn (c) skal avsluttes.
- 30

5. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor bestemmelsestrinnet omfatter å bestemme én av slamkompressibilitet, formasjonstrykk, borehullstrykk, mobilitet og kombinasjoner av disse.
- 5 6. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å måle én av et borehullstrykk, et formasjonstrykk og kombinasjoner av disse.
7. Fremgangsmåte ifølge krav 6, videre omfattende å bestemme differansen i trykk mellom formasjonstrykket og borehullstrykket.
- 10 8. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor et estimat av formasjonstrykket blir bestemt fra de innledende og stabiliserte trykk.
9. Fremgangsmåte ifølge krav 8, hvor det største av det innledende og det stabiliserte trykk er et estimat av formasjonstrykket.
- 15 10. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å bestemme om en målefase skal utføres.
- 20 11. Fremgangsmåte ifølge krav 10, hvor nedhullsparemetene blir brukt til å utforme kriterier for å utføre en målefase i forteten.
12. Fremgangsmåte ifølge krav 11, videre omfattende å utføre en målefase i forteten basert på utformingskriteriene.
- 25 13. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å estimere slamkompressibilitet fra det målte trykk.
14. Fremgangsmåte ifølge krav 10, videre omfattende å bruke slamkompressibiliteten til å bestemme nedhullsparemetene.
- 30

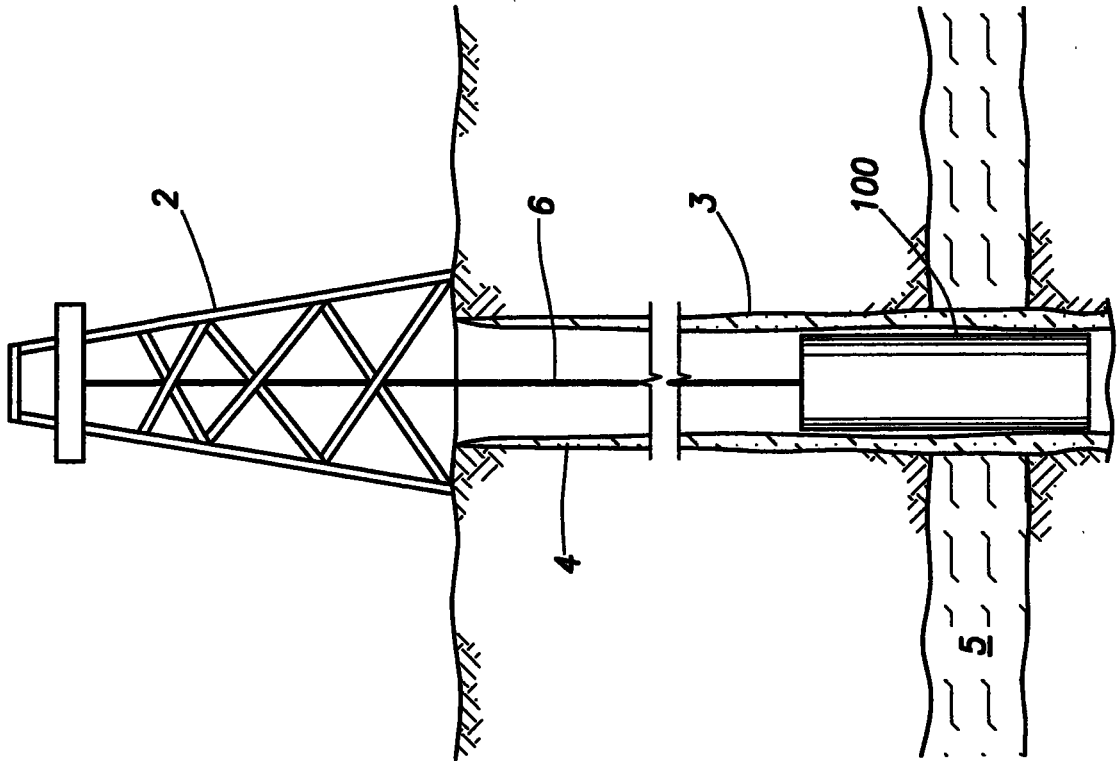


FIG.1A

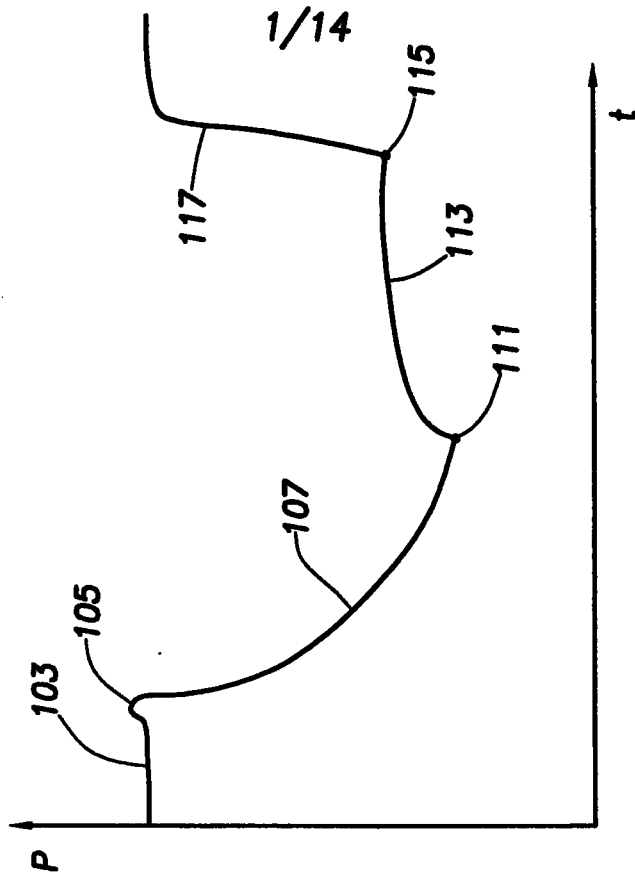


FIG.2

2/14

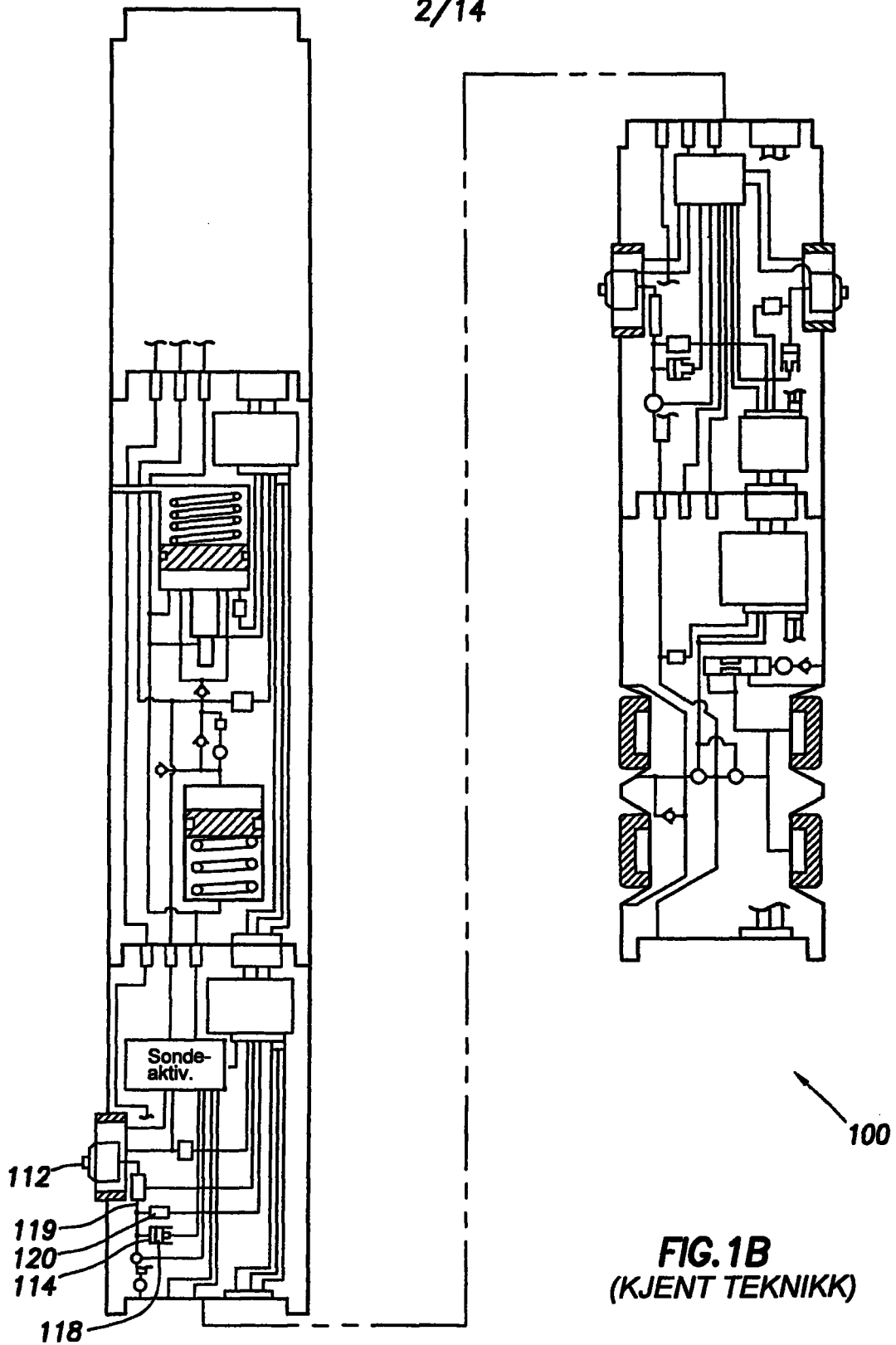


FIG. 1B
(KJENT TEKNIKK)

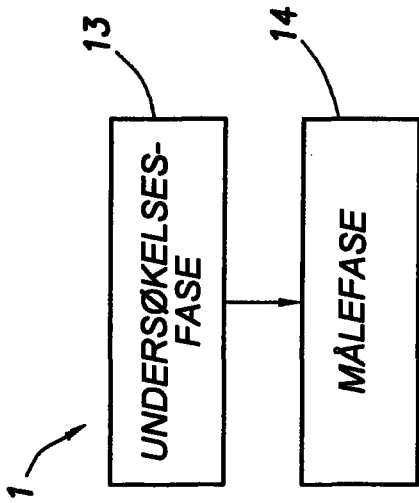


FIG.3

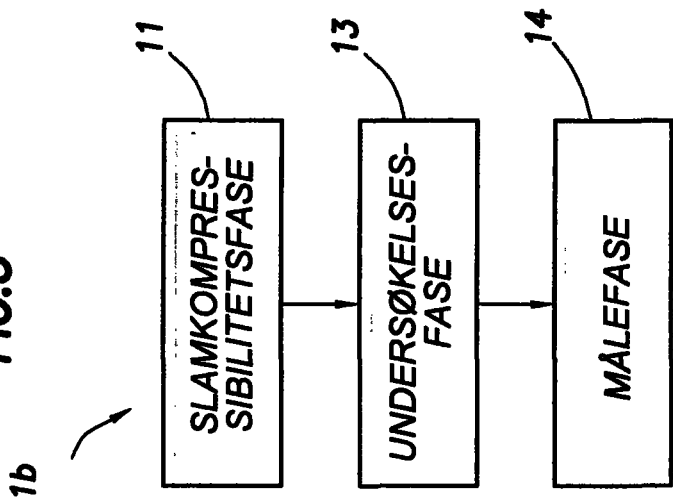


FIG.10

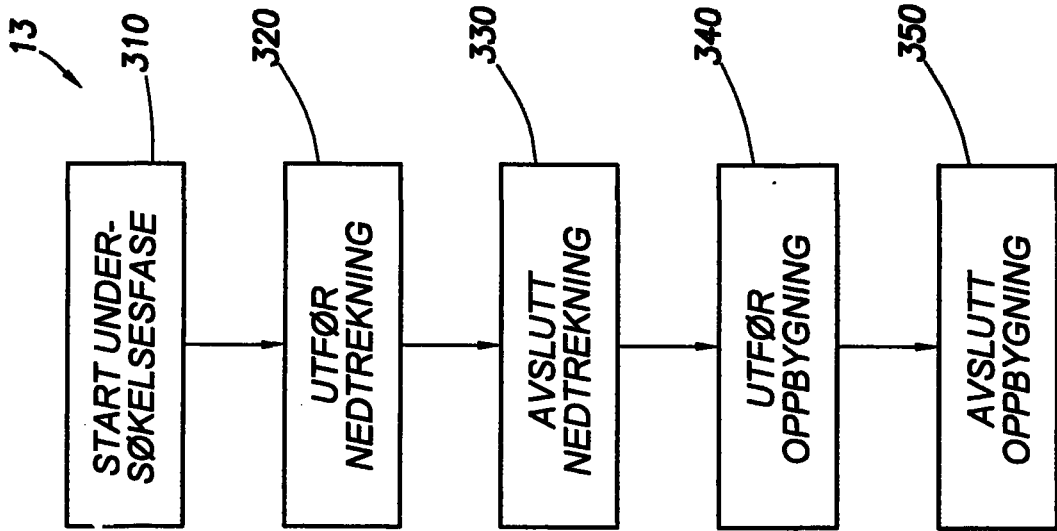


FIG.6

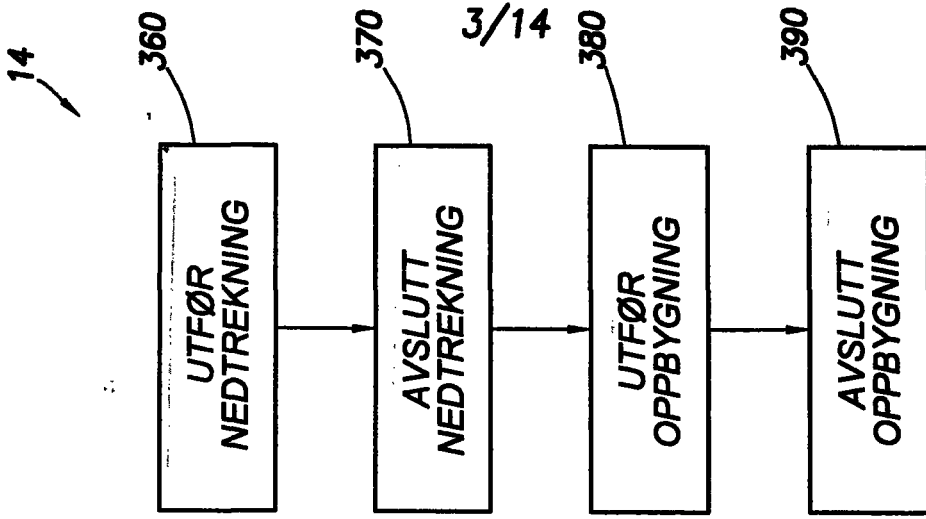
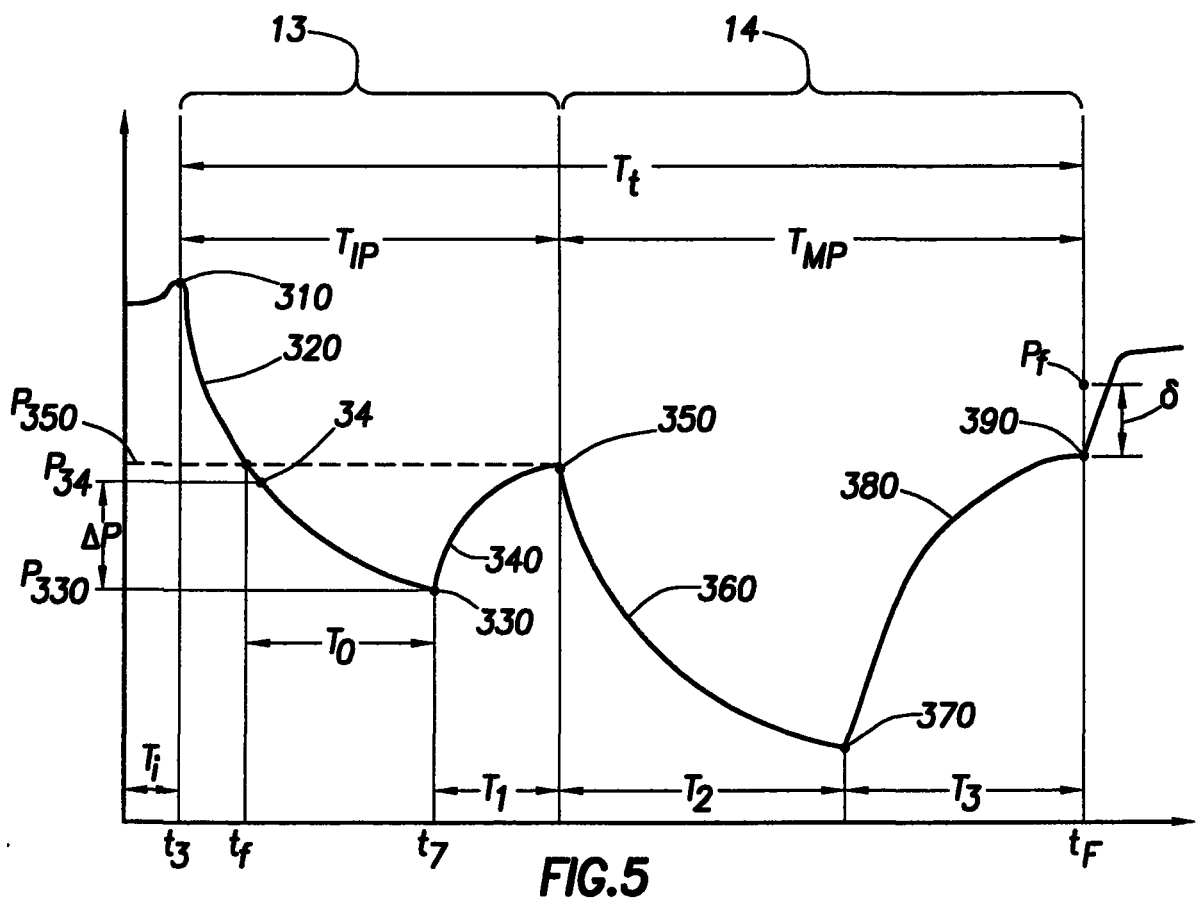
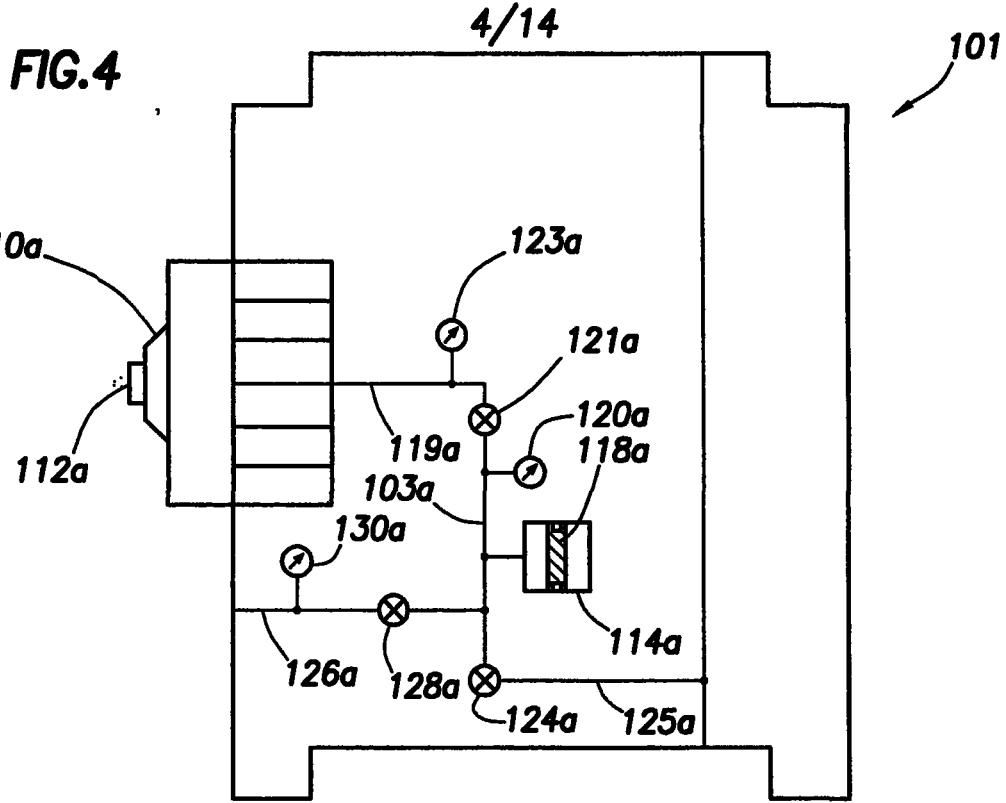
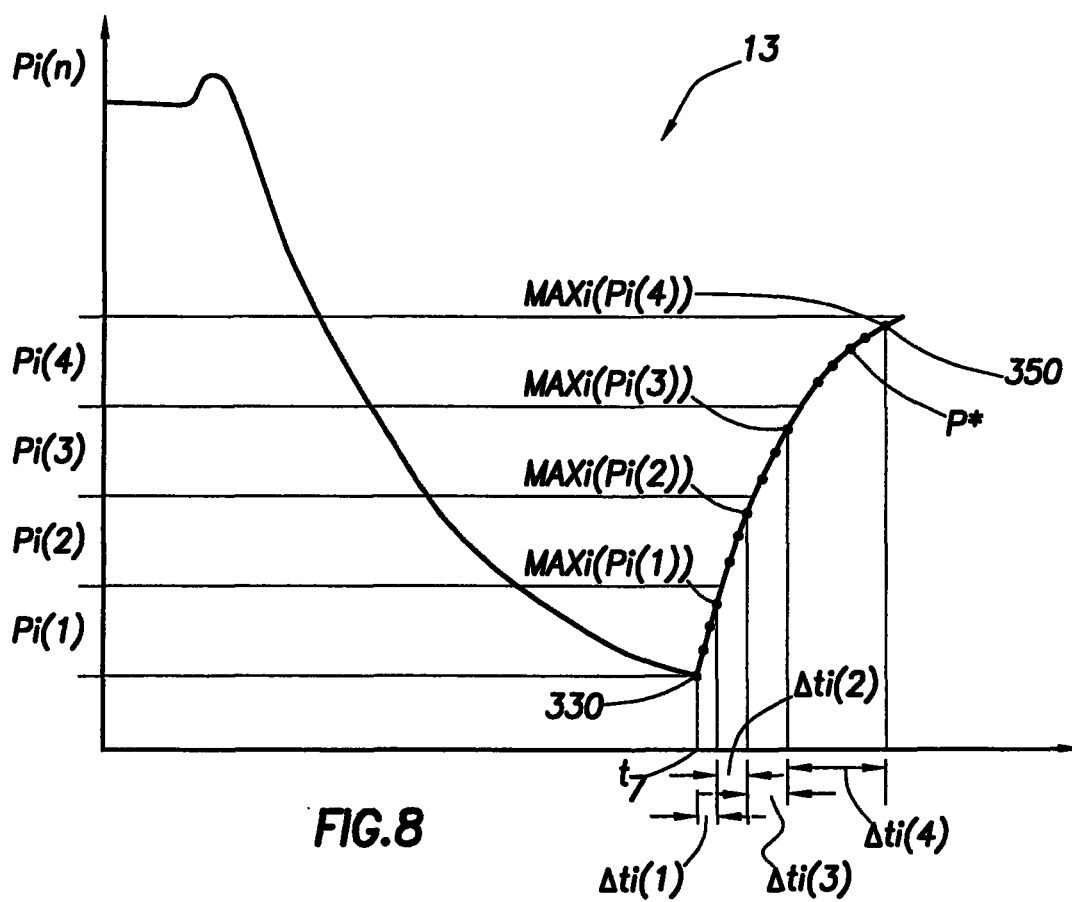
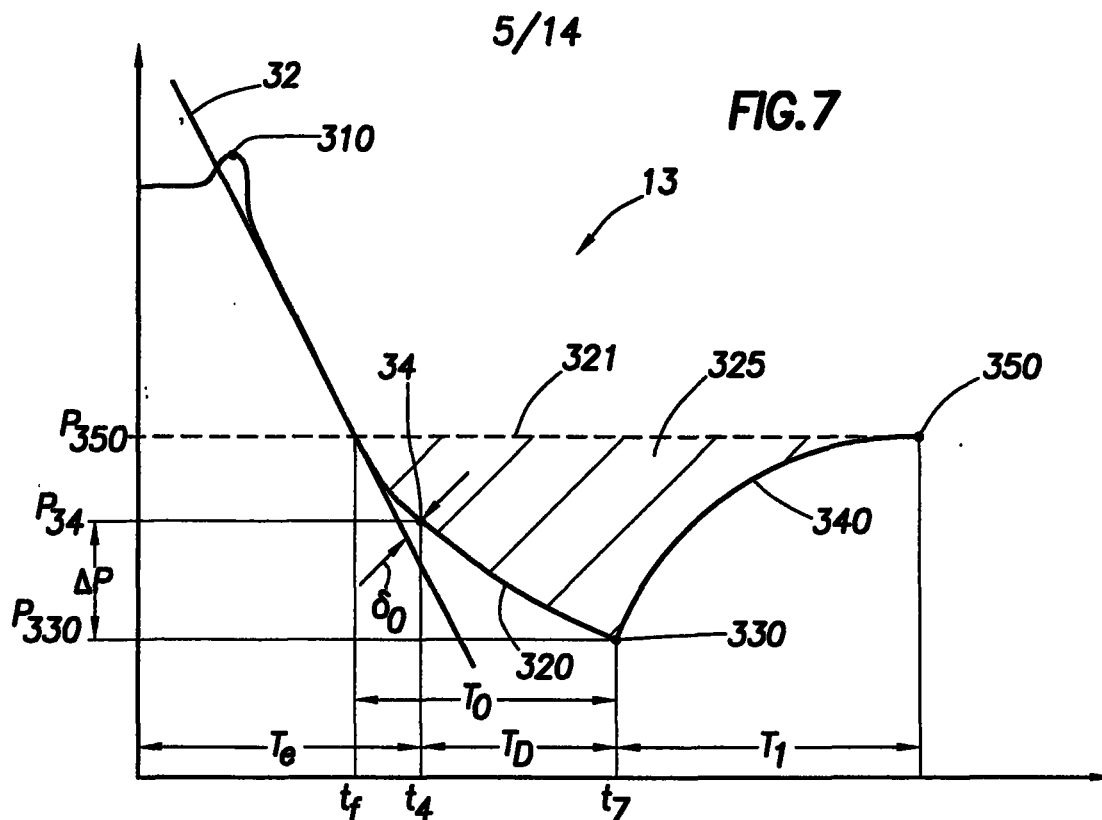


FIG.9





6/14

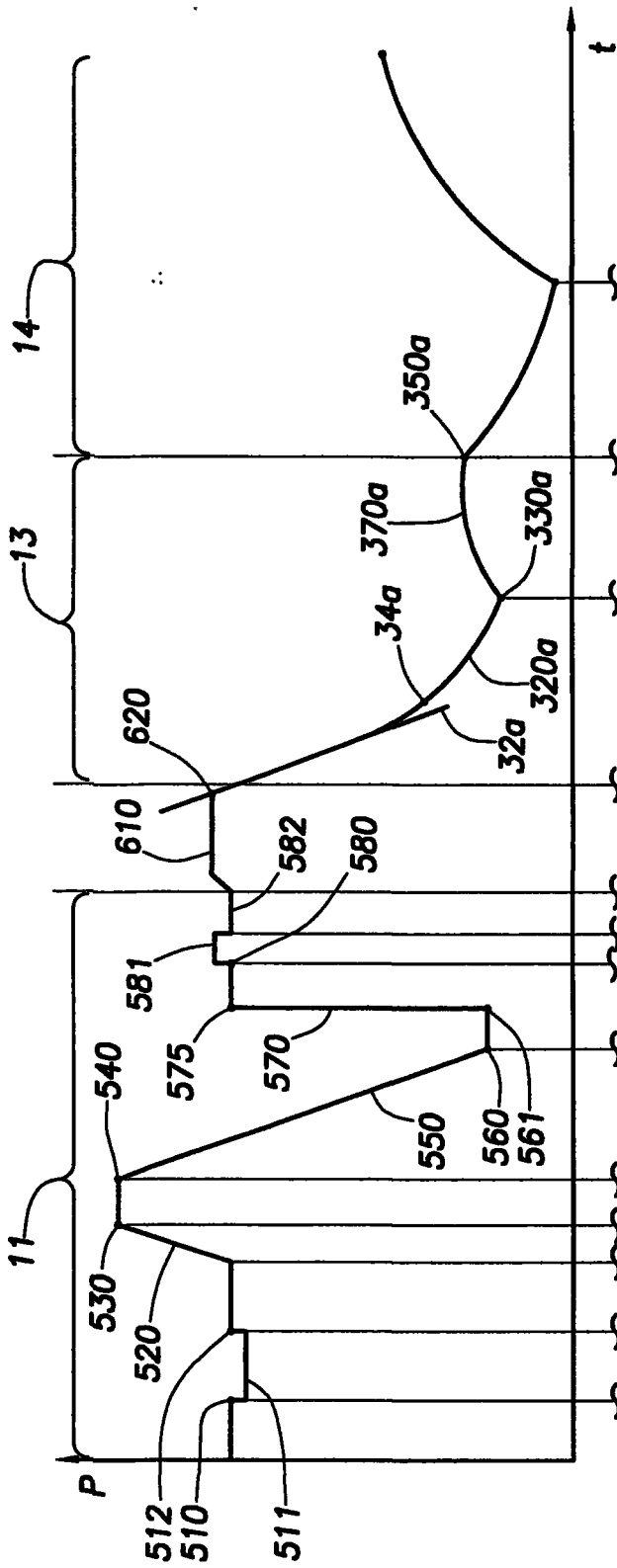


FIG. 11A

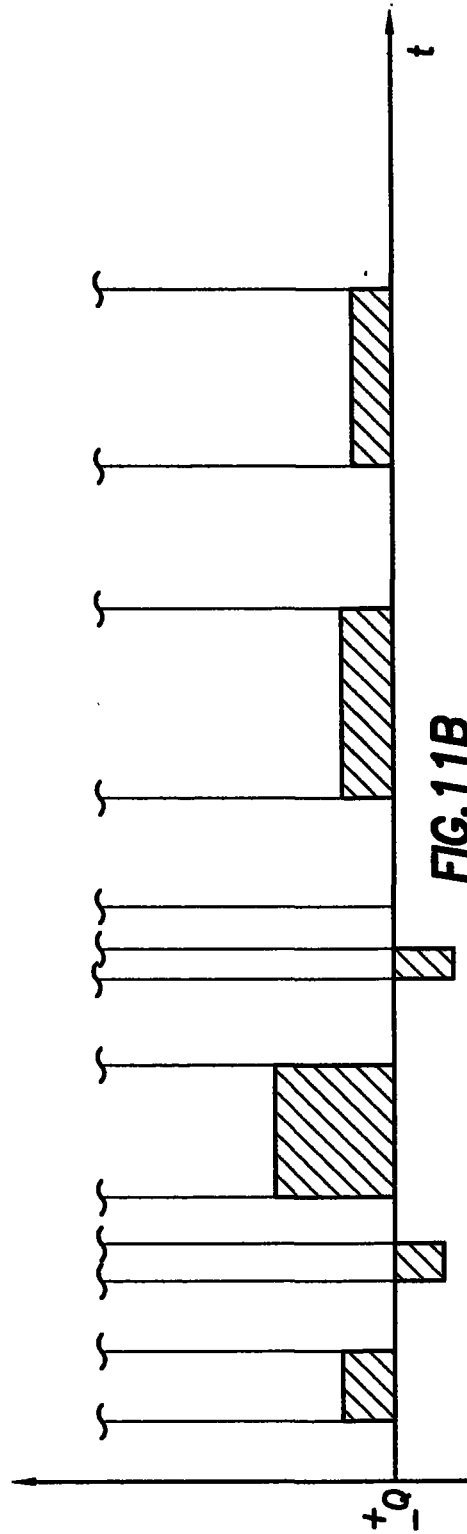


FIG. 11B

7/14

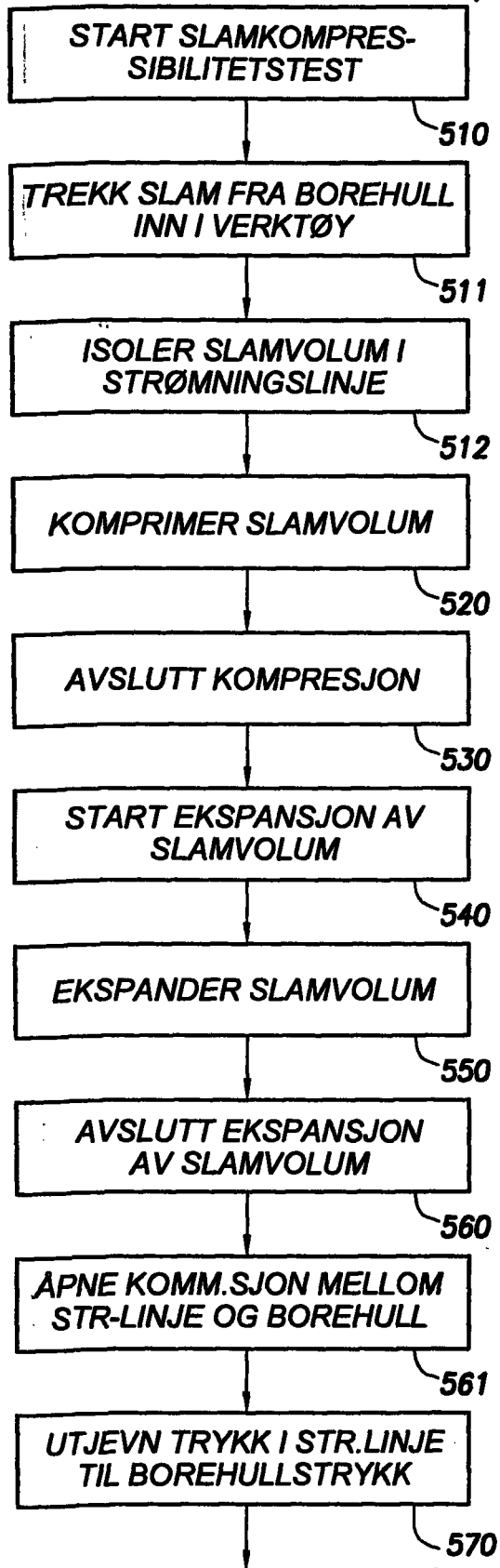


FIG. 12

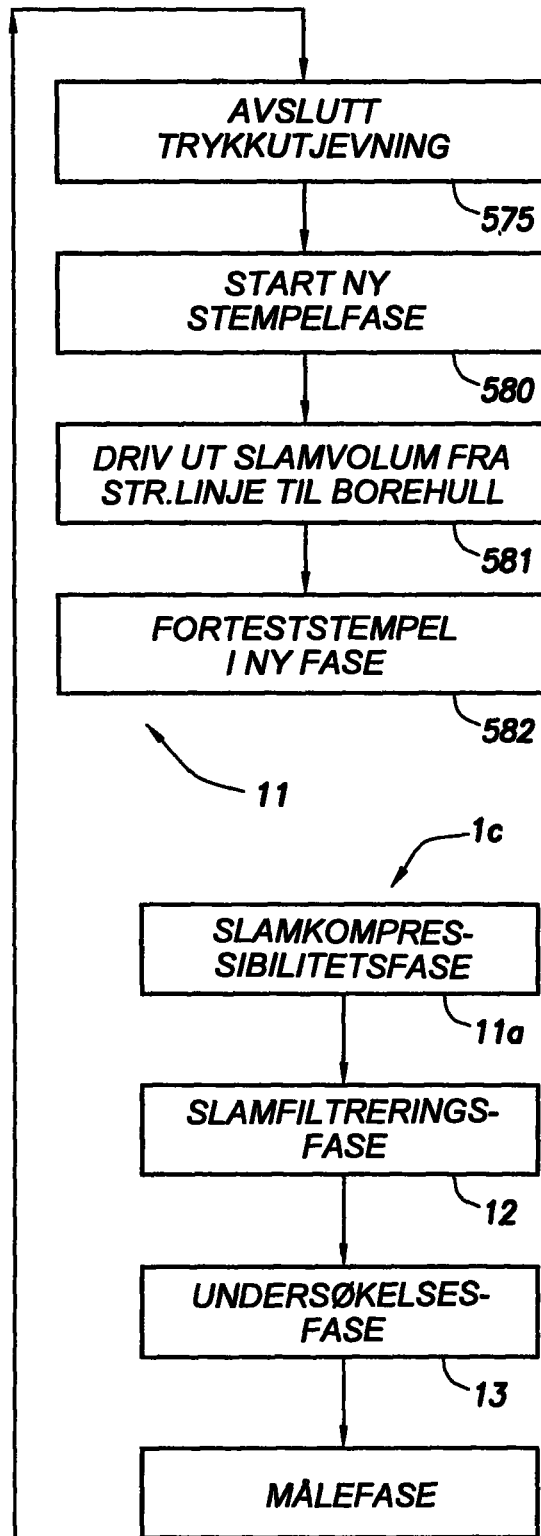


FIG. 13 14

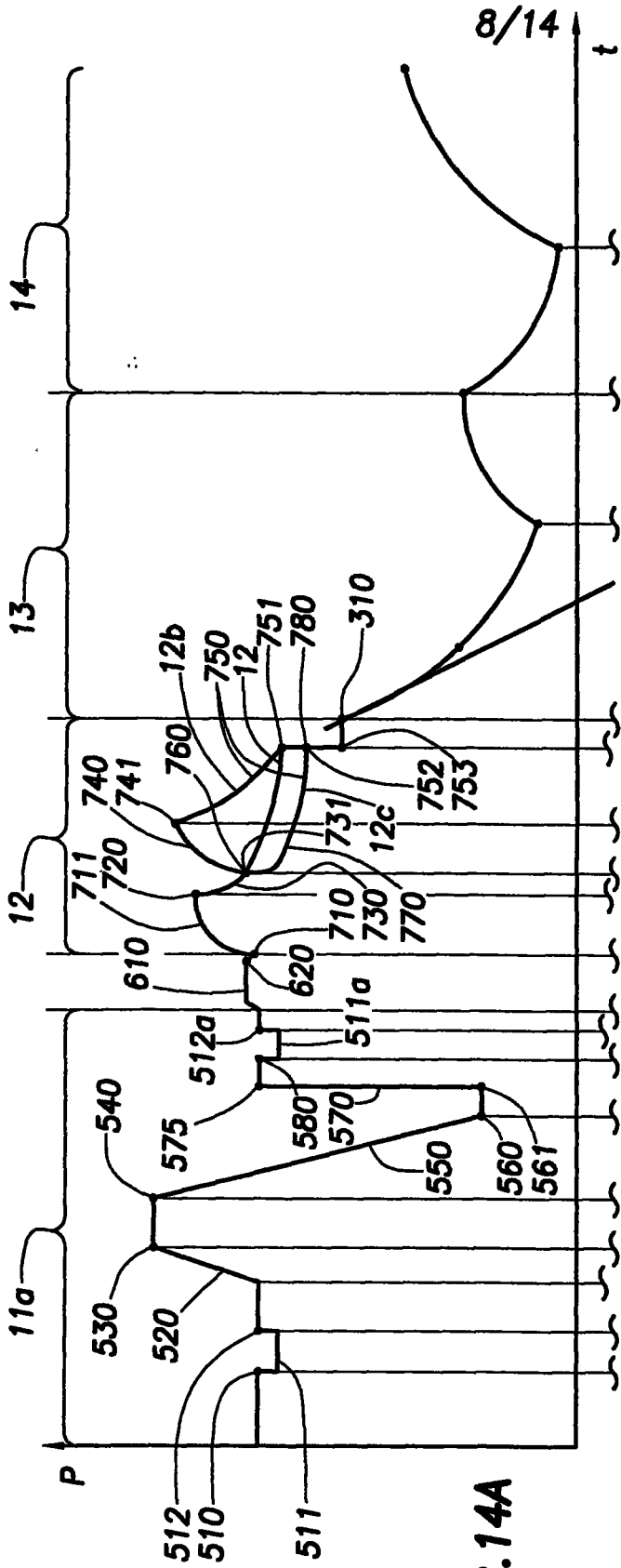


FIG. 14A

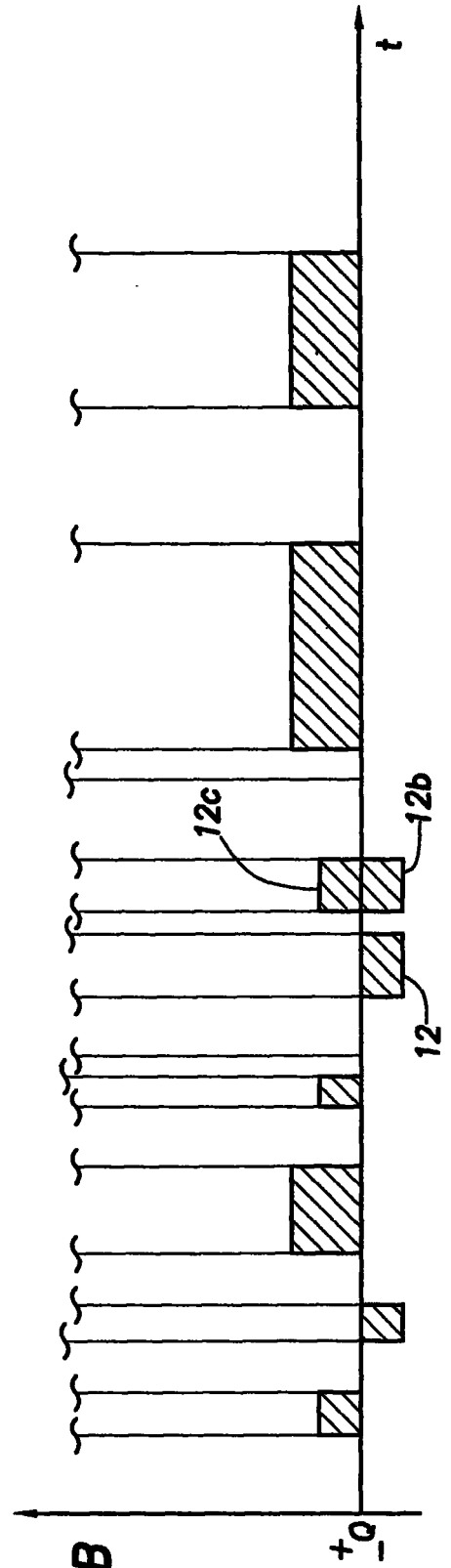


FIG. 14B

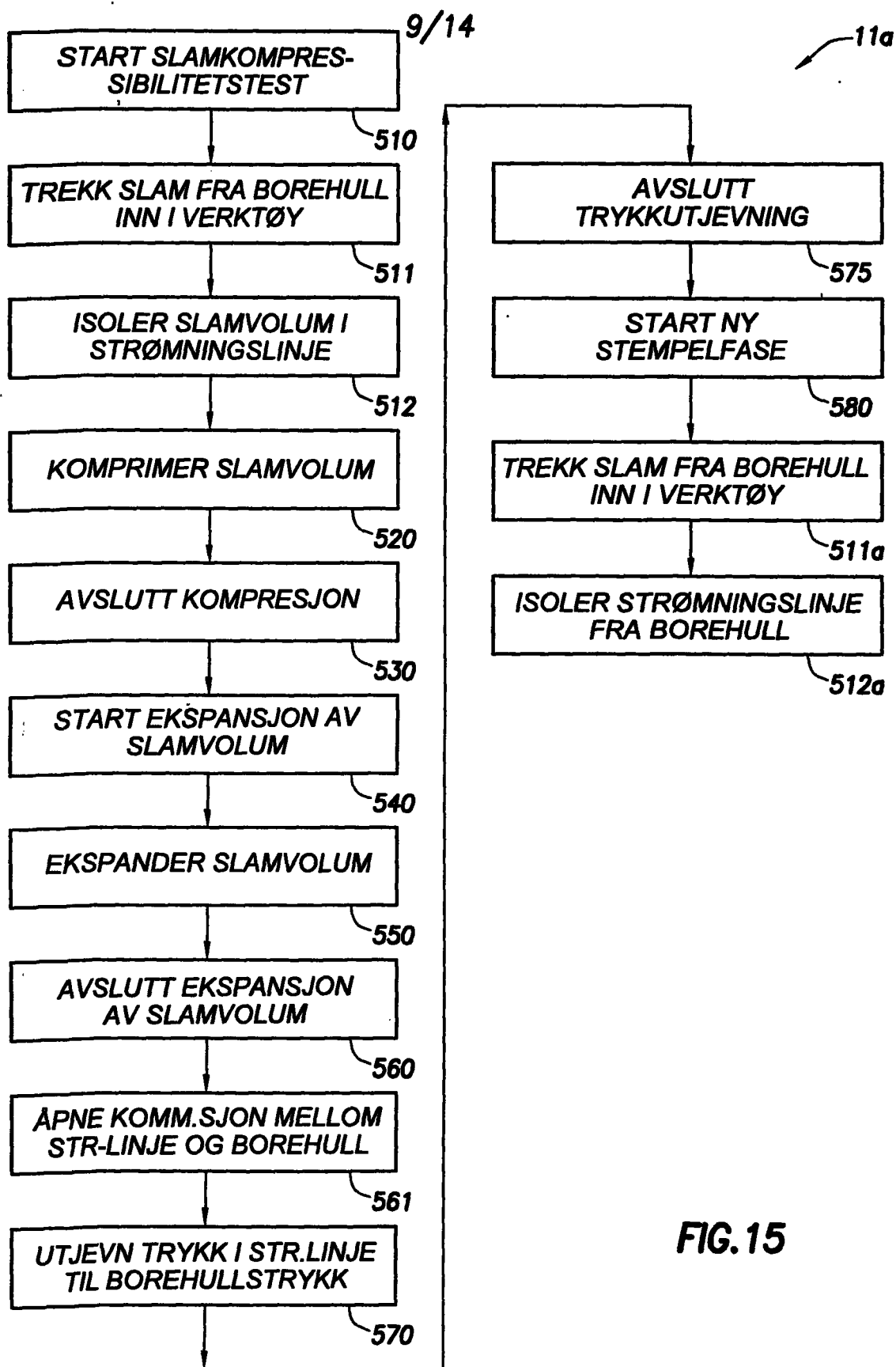


FIG. 15

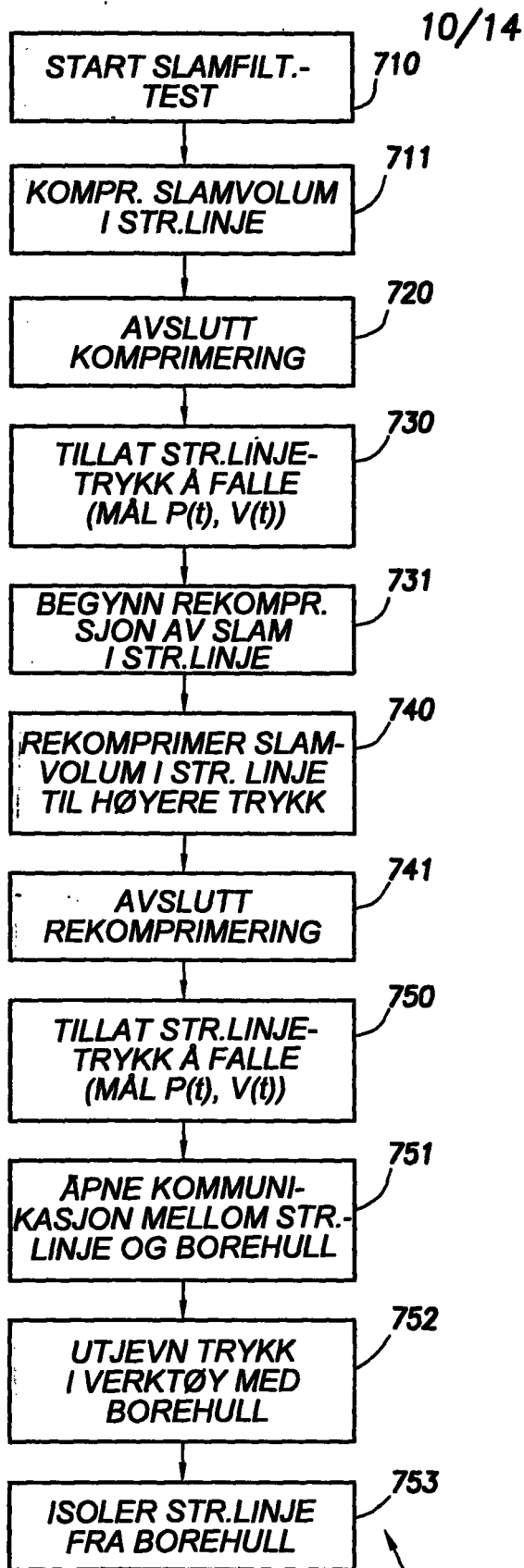


FIG. 16B

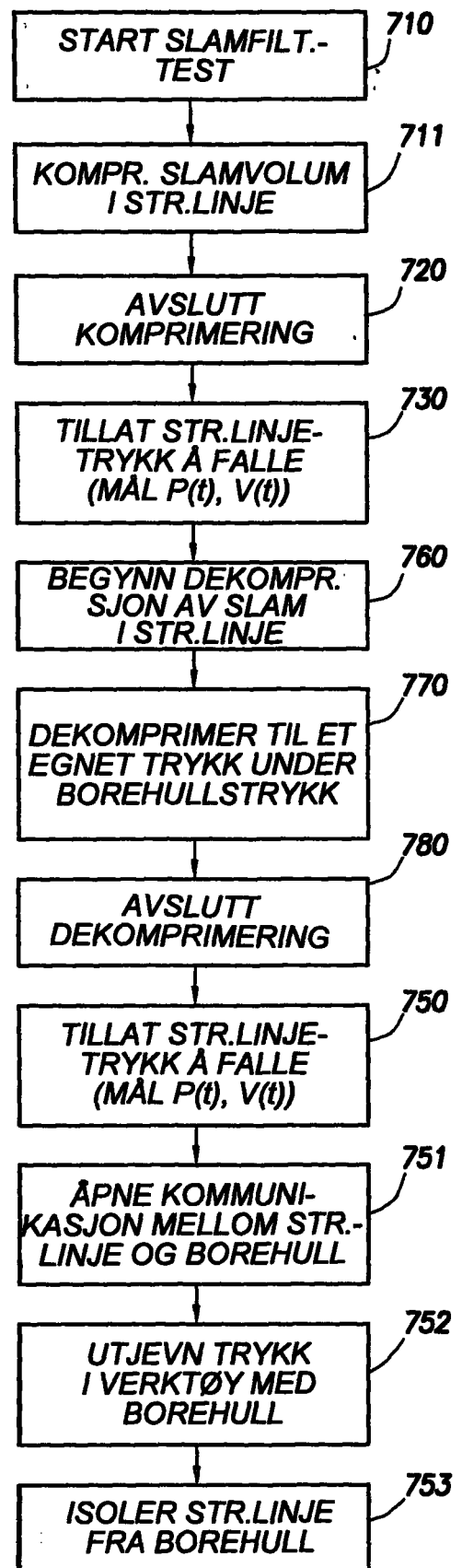


FIG. 16C

12b

12c

11/14

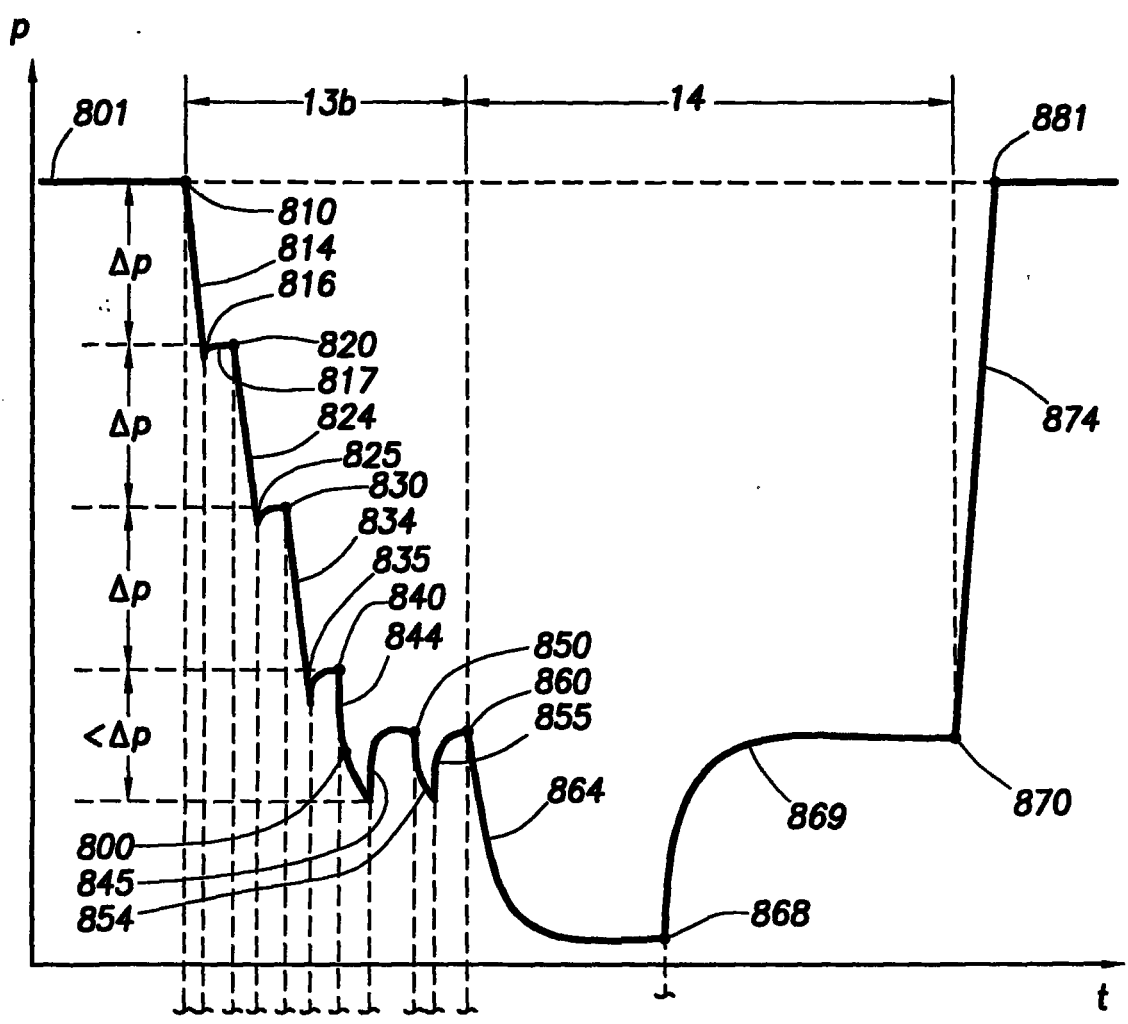


FIG. 17A

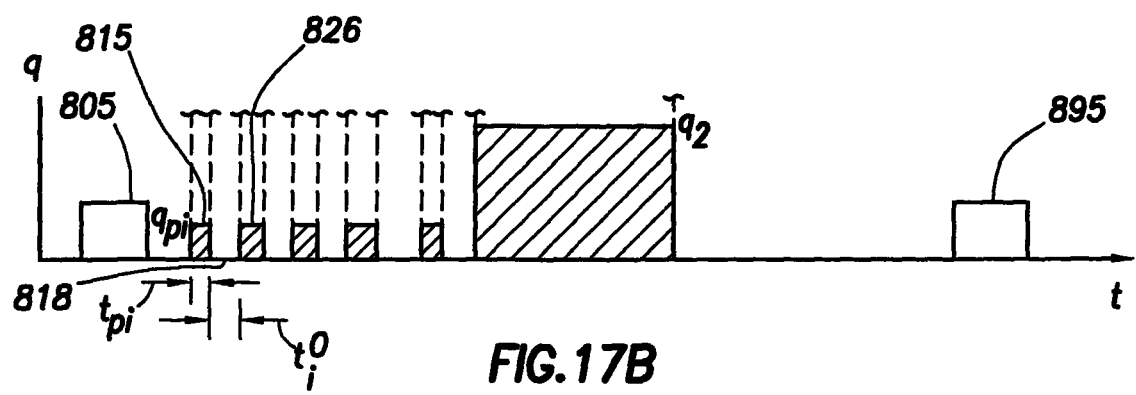


FIG. 17B

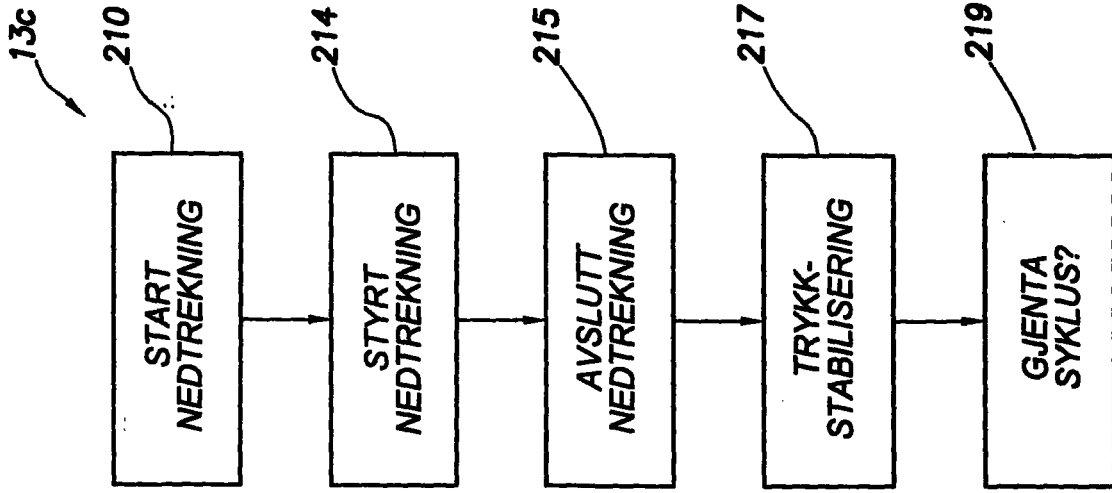


FIG.20

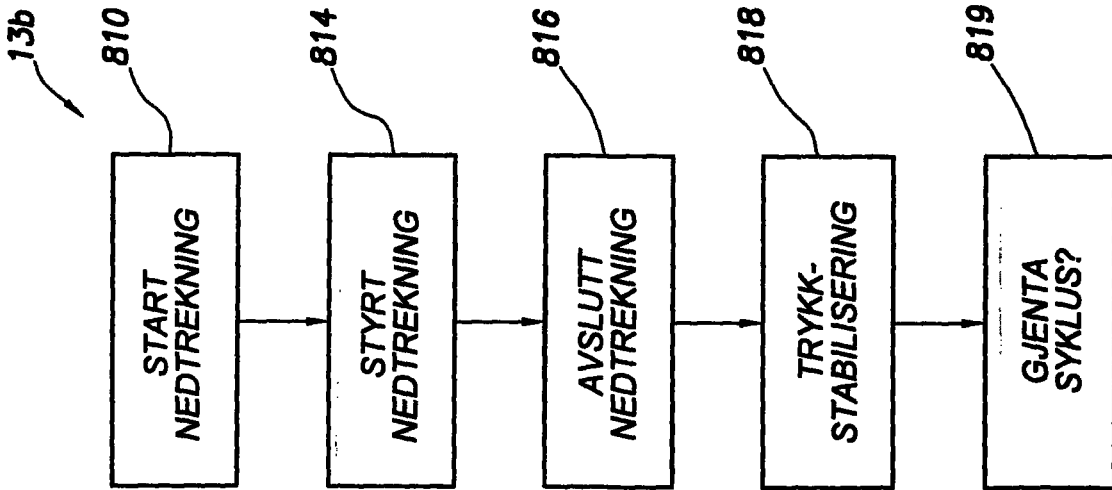
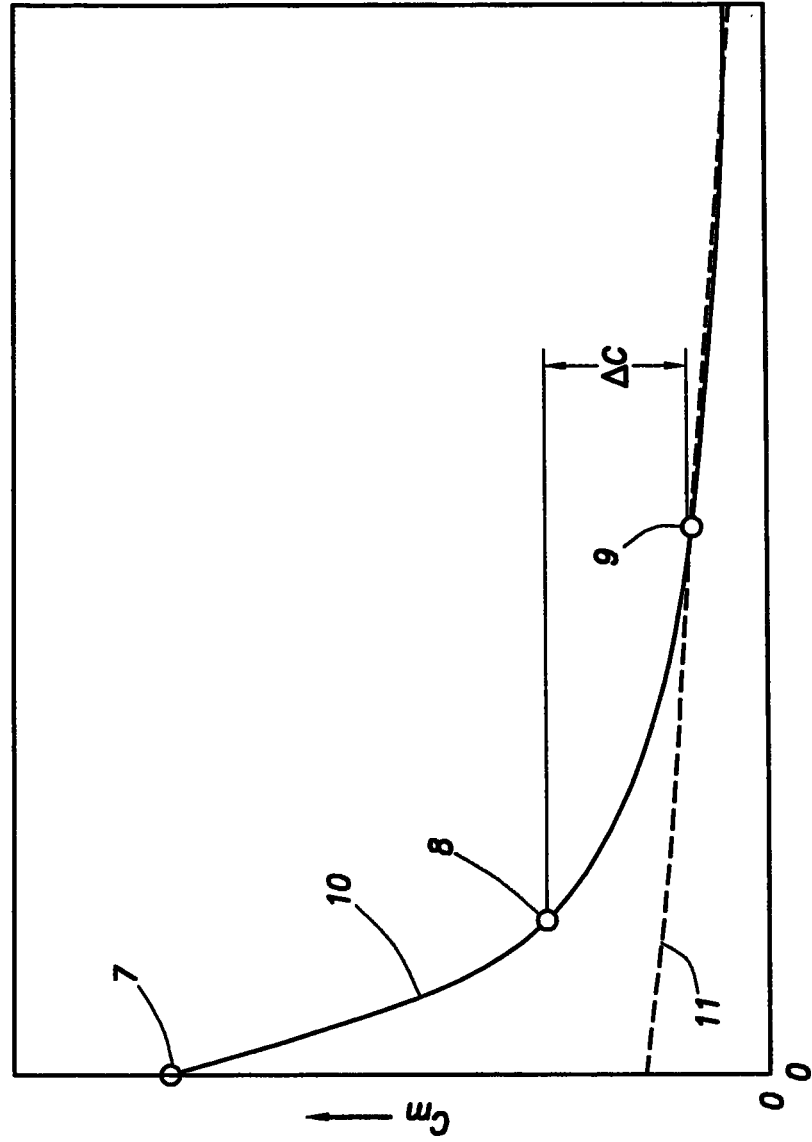
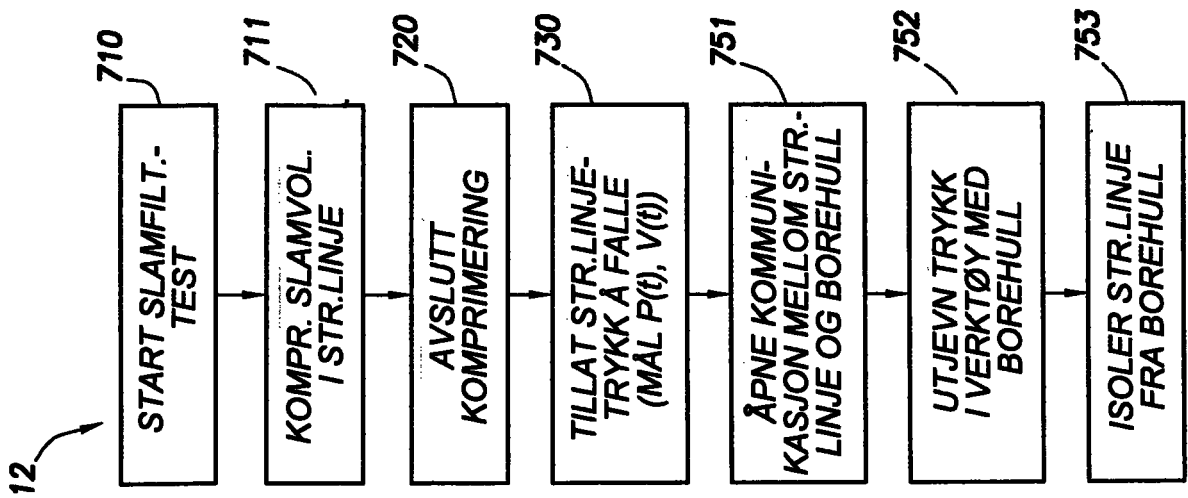


FIG.18

14/14



P →
FIG.21

FIG.16A