



NORGE

(12) PATENT

(19) NO

(11) 322437

(13) B1

(51) Int Cl.

G06T 17/20 (2006.01)

G01V 11/00 (2006.01)

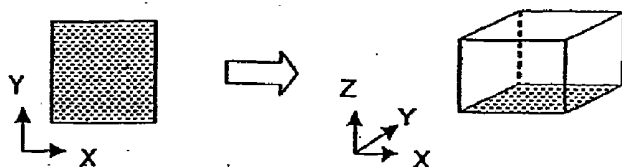
Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20026267	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2001.06.29 PCT/US01/20814
(22)	Inng.dag	2002.12.27	(85)	Videreføringsdag	2002.12.27
(24)	Løpedag	2001.06.29	(30)	Prioritet	2000.06.29, US, 215697
(41)	Alm.tilgj	2003.02.27			
(45)	Meddelt	2006.10.02			

(73)	Innehaver	Object Reservoir Inc, Suite 300, 3536 Bee Caves Road, Austin, TX 78746, US
(72)	Oppfinner	Stephen R Kennon, 3005 Gilbert Street, Austin, TX 78703, US Kok-Thye Lim, 1 Mahogany Lane, San Ramone, CA 94583, US
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, NO

(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte og system for ved koordinat-transformasjon å modellere radialstrømning nær en singularitet
(56)	Anførte publikasjoner	US 6078869
(57)	Sammendrag	

En fremgangs måte og en anordning for å forutsi et fysisk systems adferd er angitt. En utførelse av fremgangsmåten i henhold til denne oppfinnelse omfatter prosesstrinn som går ut på å opprette en ligning i et første koordinatsystem for å modellere et aspekt ved det fysiske system, utførelse av en koordinattransformasjon på denne ligning for å transformere ligningen fra det første koordinatsystem inn på et andre koordinatsystem som nærmere er i samsvar med en analytisk løsning av ligningen, løsning av denne ligning i det andre koordinatsystem for å utlede en løsning av ligningen, transformering av denne løsning tilbake til det første koordinatsystem, opprettelse av en andre ligning i det første koordinatsystem for å modellere et andre aspekt ved det fysiske system, løsning av denne andre ligning i det første koordinatsystem for å utlede en løsning av denne ligning, og kombinerende av den avbildede løsning av den første ligning og løsningen av den andre ligning i det første koordinatsystem for å frembringe en kombinert løsning. En utførelse av anordningen i henhold til denne oppfinnelse omfatter et datamaskinlesbart medium som inneholder flere instruksjoner som angir den ovenfor omtalte fremgangsmåte.



OPPFINNELSENS TEKNISKE OMRÅDE

Denne oppfinnelse gjelder fremgangsmåter og utstyr for å modellere fysiske systemer ved bruk av elementanalyse med endelige elementer, og nærmere bestemt fremgangsmåter og anordninger for å modellere fysiske systemer nær en singularitet. Enda nærmere bestemt gjelder denne oppfinnelse en fremgangsmåte og en anordning for å utføre koordinattransformasjon for det formål å modellere radial strømning nær en singularitet.

OPPFINNELSENS BAKGRUNN

Fysiske systemer kan modelleres matematisk for å simulere deres adferd under forskjellige forhold. Det finnes mange forskjellige anordninger for å modellere fysiske systemer, alt fra meget enkle til ytterst kompliserte. En av de mer kompliserte anordninger for å modellere fysiske systemer er ved bruk av elementanalyse i forbindelse med endelige elementer. Som navnet innebærer, omfatter en slik elementanalyse representasjon av forskjellige endelige elementer hver for seg i et fysisk system innenfor en matematisk modell, samt løsning av denne modell i sammenheng med et forutbestemt sett av grensebetingelser.

Ved slik elementmodellering blir det område som skal analyseres brutt opp i underområder som kalles elementer. En slik prosess som går ut på å dele opp vedkommende område i underområder, kan da betegnes som diskretisering eller maskenettgenerering. Vedkommende område representeres da ved funksjoner som er definert over hvert element. Dette genererer et antall lokalfunksjoner som er meget enklere enn de som ville vært påkrevet for å representere området som helhet. Neste trinn er å analysere responsen for hvert element. Dette utføres ved å bygge opp en matrise som fastlegger samvirkeegenskapene for de forskjellige elementer innenfor områder, samt en vektor som definerer de krefter som virker på hvert element innenfor denne struktur. Så snart samtlige elementmatriser og vektorer er blitt opprettet kan de så kombineres til å danne en matriseligning for vedkommende struktur. Denne ligning setter knutepunksresponsen for strukturen som helhet i forbindelse med knutepunktkrefter. Etter å ha innført grensebetingelsene kan så strukturens matriseligning løses for å utlede de ukjente knutepunktresponser. Responser mellom elementene kan interpoleres ut i fra knutepunktverdier ved bruk av de funksjoner som er definert over hvert element.

Som angitt ovenfor omfatter en slik elementmodellering opprettelse av et maskenett av endelige elementer. Disse elementer er da fastlagt ved knutepunkter innenfor det romområde som problemet gjelder. Disse knutepunkter er da ganske enkelt punkter i rommet. Linjene mellom knutepunktene blir da betegnet som "kantlinjer". Maskenettet er da typisk et strukturert nettverk. Dette nettverk er da med andre ord definert i tre dimensjoner på en slik måte at elementene innenfor det romområde som vedkommende problem gjelder, danner heksaedere. De kan f.eks. være kuber eller rektangulære prismer. (I todimensjonale problemer vil da elementene ut i fra lignende forutsetninger være rektangler, se fig. 1 for visning av slike elementer). Heksaedrenes sidekanter faller da sammen med kantlinjene mellom maskenettets knutepunkter. I en enkel modell kan maskenettets knutepunkter være regelmessig fordelt for å danne kubiske elementer. Det er imidlertid ikke nødvendig at knutepunktene skal være jevnt fordelt i alle slike elementmodeller med endelige elementer. Mange forskjellige størrelser og former av heksaedriske elementer kan defineres innenfor et enkelt maskenett.

Matematiske modeller for å simulere adferden for fysiske systemer kan imidlertid være både tidkrevende og kompliserte å frembringe. Spesielt er slike analyseproblemer i flere dimensjoner (f.eks. fire dimensjoner i tid og rom) nesten uoverkommelig å løse ved bruk av ikke-datamaskin-hjulpne beregningsteknikker. Problemer av slike typer er så kompliserte at de må utføres ved hjelp av datamaskiner. Spesielt økes vanskeligheten ved å løse de matematiske ligninger som anvendes for å modellere et fysisk system nesten eksponensielt med hensyn til de faktiske beregninger som må utføres, etterhvert som antallet dimensjoner som vedkommende problem omfatter øker.

En fremgangsmåte for å løse de ligninger som gjelder ved matematisk modellering av fysiske systemer, slik som oljefeltreservoarer, omfatter bruk av simulatorer som kan skape en modell av vedkommende fysiske system basert på brukerinnganger av både ligninger og variabler innenfor de ligninger som beskriver vedkommende system. Det kreves da typisk analytikere som er fagkyndige både når det gjelder matematikk på høyt nivå (for å generere de kompliserte ligninger som behøves) og når det gjelder høynivå-programmering (for å generere den nødvendige kode ut i fra de matematiske formuleringer). Alternativt kan grupper av spesialiserte matematikere og programmerere benyttes for å analysere et pro-

blem, formulere de matematiske ligninger og skrive ut den tilsvarende kode for hånd. En slik fremgangsmåte og tilsvarende utstyr for å frembringe simulator for å modellere fysiske systemer, er omtalt i en beslektet US-patentsøknad med serie-
nr. 09/419.717 og som har tittelen "Method and system for generating software
5 code using a symbolic language translator", inngitt 14. oktober 1999. Denne søk-
nad tas da inn her i sin helhet som referanse.

Selv de modeller som oppnås ved tidligere kjente simulatorer av denne art er imidlertid ikke alltid i stand til i tilstrekkelig grad å representere de fysiske sys-
tem som skal modelleres, slik at nøyaktige løsninger også kan utledes for visse
10 kritiske punkter. Tidligere kjente fremgangsmåter og utstyr for å løse de ligninger
som brukes for å modellere et fysisk system, bruker f.eks. lineære tilnærmelser og
andre middelverditeknikker (som innebærer forskjellige antakelser som eventuelt
ikke kan stemme i visse punkter av vedkommende system). Også disse tidligere
kjente fremgangsmåter og anordninger krever imidlertid et stort antall knutepunk-
15 ter (løsningspunkter) for å modellere et system nøyaktig. Løsning av de ligninger
som representerer systemet i hvert av disse punkter krever i høy grad tilgjengelig
tid og beregningskraft.

Fra US patent nr. 6,078,869 er kjent en fremgangsmåte og et apparat for å
generere et gitter sammensatt av et antall enkeltceller, som er tilpasset for bruk i
20 et datasimuleringsapparat som simulerer egenskaper ved en grunnformasjon som
ligger nær borehuller.

Visse fysiske egenskaper ved et system som skal modelleres egner seg
imidlertid ikke godt for modellering i et kartesisk koordinatsystem. Spesielt er
trykkprofilen i nærheten av en brønn som forløper inn i et oljefeltreservoar i høy
25 grad ikke-lineær i kartesiske koordinater. Bruk av lineære elementer ved analyse
av de foreliggende endelige elementer kan da innføre vesentlige interpoleringsfeil.
Dette er spesielt tilfelle når et grovt maskenett (slik det vil være kjent for fagfolk)
og derfor store lineære elementer anvendes i kartesisk rom. Hvis modelleringen
utføres bare ved bruk av systemkoordinatene X, Y, Z (kartesiske koordinater), så
30 vil i det tilfelle ekstrudering i tidsdimensjonen benyttes i systemet, modelleringen
bli uregelmessig (hvilket vil si at systemmodellen ikke vil være uniform), slik at løs-
ningen av systemet da kan oscillere.

Modellering av et fysisk system er en predikterende øvelse. Ved generering av en modell av trykkfordelingen inne i et oljefeltreservoar, tilsiktes det f.eks. å generere et verktøy som kan brukes for å bestemme vedkommende trykkfordeling under et visst sett av relevante betingelser, for derved å bli i stand til å forutsi virkningen på systemet når disse betingelser forandres. Modellen må derfor være

5 nøyaktig innenfor det område av betingelser som er av interesse.

Trykkfordelingen i et oljefeltreservoar er funnet å være ikke-lineært i et kartestisk koordinatsystem (det er faktisk logaritmisk), spesielt i nærheten av en brønn. Trykket vil da typisk være større langt bort fra brønnen og vil så falle logaritmisk etterhvert som avstanden til brønnutboringen avtar. Nøyaktig modellering av et slikt system ved bruk av kartesiske koordinater vil da kreve et stort antall knutepunkter. En lineær tilnærming vil være utilstrekkelig på grunn av at verdiene på den logaritmiske trykkurve vil forandres for raskt mellom knutepunktene. Bruk av et kartesisk koordinatsystem kan da føre til oscillasjoner og unøyaktigheter i

10 løsningen. Uten en hensiktsmessig tilnærming vil da prediktiv adferd være usikker og modellen vil svikte.

Standard elementanalyseteknikker anvendt på det kartesiske koordinatrom vil således være utilstrekkelig for å modellere radial strømning i nærheten av en singularitet, slik som området nær inntil en brønn for et oljefeltreservoar. Grensebetingelser som representerer fluidstrømninger inn i eller ut av en brønn, vil da være unøyaktige i nærheten av en slik singularitet, hvis det da ikke genereres et meget fint romlig maskenett, som da vil kreve et stort antall knutepunkter. Et slikt maskenett vil da kreve knutepunkter med meget små innbyrdes avstandsavsnitt for å kunne være i stand til å forutsi resultater med nøyaktighet. Den tid og de beregningsressurser som kreves for å oppnå en løsning under disse forhold vil også

20 øke etterhvert som knutepunktantallet øker.

SAMMENFATNING AV OPPFINNELSEN

Det foreligger derfor et behov for en koordinat-transformasjonsmetode og utstyr for å modellere radial strømning nær en singularitet, og som da kan transformere de ligninger som brukes for å modellere et fysisk system fra det benyttede kartesiske koordinatsystem til et annet koordinatsystem, hvori løsningene av de

30

transformerte ligninger er lineære for en parameter av interesse, slik som trykkfordelingen inne i et reservoar.

Det foreligger videre et behov for en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømming nær en singularitet og som da
5 kan være i stand til å frembringe minst like nøyaktige løsninger som en elementanalyse i samsvar med kjent teknikk og ved anvendelse av kartesiske romkoordinater, men som vil kreve et mindre antall knutepunkter for å modellere vedkommende system.

Enda videre foreligger det et behov for en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømming nær en singularitet,
10 og som kan frembringe større modelleringsnøyaktighet og beregningseffektivitet enn det som for tiden er mulig ved hjelp av eksisterende elementteknikker under benyttelse av begrensende elementer og anvendt på et område med kartesiske romkoordinater.

Enda videre foreligger det et behov for en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømming nær en singularitet og som kan anvendes sammen med en ikke-transformert kartesisk koordinatmodell for å frembringe nøyaktige løsninger ved modellering av et fysisk system i nærheten av en singularitet, samt innenfor partier som sprer seg utover fra denne
20 singularitet.

I samsvar med foreliggende oppfinnelse er det da frembrakt en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende anordning for modellering av radial strømming nær en singularitet, og som er i stand til i vesentlig grad å eliminere eller redusere de ulemper og problemer som foreligger i forbindelse med de for tiden eksisterende elementanalysesystemer og tilsvarende utstyr for utøvelse i et romområde med kartesiske koordinater. Spesielt gjelder foreliggende oppfinnelse en fremgangsmåte og tilsvarende utstyr for å forutsi et fysisk systems adferd. En utførelse av fremgangsmåten i henhold til denne oppfinnelse omfatter prosessstrinn som går ut på å frembringe en ligning i et første koordinatsystem for å modellere
30 et visst aspekt ved vedkommende fysiske system, utførelse av en koordinattransformasjon på vedkommende ligning for å transformere ligningen fra det første koordinatsystem til et andre koordinatsystem som nærmere muliggjør en analytisk løsning av ligningen, løsning av denne ligning i det andre koordinatsystem for å

utlede en løsning, transformering av denne løsning tilbake til det første koordinatsystem, opprettelse av en andre ligning i det første koordinatsystem for å modellere et andre aspekt ved vedkommende fysiske system, løsning av denne andre ligning i det første koordinatsystem for å oppnå en løsning av den andre ligning, og kombinerer av den tilordnede løsning av den første ligning og løsningen av den andre ligning i det første koordinatsystem for derved å oppnå en kombinert løsning. En viss utførelse av utstyret i henhold til denne oppfinnelse omfatter et datamaskin-lesbart medium som inneholder flere instruksjoner som uttrykker den ovenfor angitte fremgangsmåte. I henhold til foreliggende oppfinnelse oppnås et viktig teknisk fortrinn ved en koordinat-transformasjonsmetode og utstyr for å modellere radial strømning nær en singularitet, og som kan benyttes for å transformere de ligninger som brukes for å modellere et fysisk system fra det kartesiske koordinatsystem til et koordinatsystem hvori løsningene av de transformerte ligninger er lineære for en parameter av interesse, slik som trykkfordelingen inne i et reservoar.

I henhold til foreliggende oppfinnelse frembringes videre et viktig teknisk fortrinn ved hjelp av en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømning nær en singularitet, og som da kan frembringe like nøyaktige løsninger som elementanalyseteknikker i henhold til kjent teknikk og som utøves i et romområde med kartesiske koordinater, samtidig som et mindre antall knutepunkter behøves for å modellere vedkommende system.

Enda videre medfører foreliggende oppfinnelse et viktig teknisk fortrinn i forbindelse med en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømning nær en singularitet, og som da er i stand til å frembringe større modelleringsnøyaktighet og beregningseffektivitet enn de for tiden eksisterende elementanalyseteknikker utøvet på endelige elementer og i et romområde med kartesiske koordinater.

Enda videre gir foreliggende oppfinnelse et viktig teknisk fortrinn i forbindelse med en koordinat-transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømning i nærheten av en singularitet, og som kan anvendes sammen med en ikke-transformert kartesisk koordinatmodell for å frembringe nøyaktig løsning nær en singularitet, samt i områder som sprer seg utover fra vedkommende singularitet.

KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

En mer fullstendig forståelse av foreliggende oppfinnelse og fordelene ved denne kan oppnås ved hjelp av følgende beskrivelse, sett i sammenheng med de vedføyde tegninger, hvor like henvisningstall angir tilsvarende figurtrekk, og hvor-
 5 på:

fig. 1 viser rektangulære og heksaederiske elementer som danner strukturerte endelige elementer innenfor maskenett i henhold til kjent teknikk,

fig. 2 viser trykkfordelingen i nærheten av en produserende brønn, opp-
 10 tegnet for en funksjon i radial avstand fra brønnen,

fig. 3 viser en trykkfordeling i nærheten av en produserende brønn og opp-
 tegnet som funksjon av den naturlige logaritme av avstanden fra brønnen,

fig. 4 og 5 viser trykkfordelingen i nærheten av en produserende brønn, og
 som er beregnet ved bruk av utførelser av den radiale transformasjonsmetode i
 15 henhold til foreliggende oppfinnelse,

fig. 6 viser trykkfordelingen i nærheten av en produserende brønn, oppteg-
 net som funksjon av den radiale avstand fra brønnen, beregnet ved bruk av (i)
 analytiske løsninger, (ii) kartesiske koordinater og (iii) en utførelse av den radiale
 transformasjonsmetode i henhold til foreliggende oppfinnelse, og

fig. 7 er en forstørret grafisk fremstilling av samme løsninger som er vist i
 20 fig. 6 og som viser detaljer i den foreliggende trykkfordeling utover til en avstand
 på 20 fot.

DETALJERT BESKRIVELSE AV OPPFINNELSEN

Foretrukne utførelser av foreliggende oppfinnelse er anskueliggjort i figu-
 25 rene, hvor like henvisningstall anvendes for å angi like eller tilsvarende deler på de
 forskjellige tegninger.

De forskjellige utførelser av foreliggende oppfinnelse gjelder en koordinat-
 transformasjonsmetode og tilsvarende utstyr for å modellere radial strømming i
 30 nærheten av en singularitet, og som er mer tilpassbare, mer beregningseffektive,
 mer nøyaktige, samt mindre avhengig av å benytte et stort antall knutepunkter for
 å modellere systemet enn metoder og utstyr i henhold til tidligere kjent element-
 analyse i forbindelse med endelige elementer. Spesielt gjør utførelser av forelig-

gende oppfinnelse det mulig å ta en ligning som representerer et system som skal modelleres (eller et visst aspekt ved dette system) i kartesiske koordinater, og å utføre en koordinattransformasjon for å angi vedkommende ligning i et annet koordinatsystem og hvor ligningens løsning foreligger i en mer anvendbar form.

5 Utførelsen av foreliggende oppfinnelse kan brukes for å utføre en kartleggingsovergang fra et visst koordinatrom til et annet for det formål f.eks. å frembringe en representasjon i det nye koordinatrom som kan gi en lineær løsning. Løsningen av en viss ligning som er ikke-lineær i det kartesiske koordinatsystem, slik som trykkfordelingen i et oljefeltreservoar, kan således påføres en kartleggingsovergang til et koordinatsystem hvor en nøyaktig prediktiv modell som er lineær, kan frembringes. På grunn av at den ikke-lineære løsning er kartlagt i et koordinatsystem hvor løsningen er lineær, kan nøyaktige løsninger oppnås ved bruk av et mindre antall dataknutepunkter (løsningspunkter hvori forskjellige parametre må være kjent for å løse den eller de ligninger som modellerer et system).

15 Utførelsene av fremgangsmåten og utstyret i henhold til foreliggende oppfinnelse kan da bruke en kombinasjon av kartesiske operatore og ikke-kartesiske operatore for å generere nøyaktige og anvendbare løsninger for ligninger som representerer et fysisk system. Kartesiske operatore anvendes da for å frembringe en løsning av ligningene i områder av det fysiske system som ikke ligger i nærheten av en singularitet. Ikke-kartesiske operatore blir transformert inn i et nytt koordinatsystem og løst i det transformerte romområde. De ikke-kartesiske løsninger av modelleringsligningene blir så avbildet tilbake inn i det kartesiske koordinatsystem.

25 Det fysiske system som modelleres (f.eks. området i nærheten av borebrønnen i et oljefeltreservoar) kan således representeres mer nøyaktig ved å bruke et sett av operatore nær en singularitet (f.eks. borebrønnen) og et annet sett av operatore i områdene lenger bort fra borebrønnen. I de områder som ligger meget nær borebrønnen, f.eks. innenfor en radius på omkring 50-100 fot fra borebrønnen (singularitet), kan da ikke-kartesiske operatore anvendes ved den radiale transformasjon anvendt på dem. De partier av det fysiske system som strekker seg utenfor denne avstand kan da modelleres ved bruk av kartesiske operatore. De avstander fra en singularitet hvor såvel kartesiske som ikke-kartesiske opera-

torer kan brukes, kan fastlegges i samsvar med de forhold som foreligger ved en bestemt anvendelse.

Kombinasjonen av kartesiske og ikke-kartesiske operatorer gir da en god løsning gjennom hele det fysiske system (f.eks. et oljefeltreservoar) som modelleres og kan da frembringe større nøyaktighet innenfor et kritisk område av interesse, f.eks. en singularitet, slik som en borebrønn. Som det vil fremgå av det viste eksempel i fig. 2, kan det radiale trykk nær en brønnutboring forandre seg raskt over små avstander, men flater ut og kan tilnærmes lineært med utgangspunktet noen hundre fot bort fra borebrønnen. Innenfor det kritiske område av interesse nær borebrønnen, kan anvendelse av en koordinattransformasjon i samsvar med utførelsen i henhold til foreliggende oppfinnelse gi større nøyaktighet ved bruk av færre knutepunkter og mindre beregningsressurser enn det som vil være tilfelle ved elementanalyseprosesser i henhold til kjent teknikk. I områder flere hundre fot bort fra borebrønnen, vil sammenhengen mellom trykk og avstand variere langt mindre raskt, og kan lettere tilnærmet gjengis ved hjelp av standardteknikker. For å oppnå den samme nøyaktighet som det er mulig å oppnå ved utførelser av fremgangsmåten og utstyret i henhold til foreliggende oppfinnelse, vil det ved benyttelse av tidligere kjent teknikk kreves et meget større antall dataknutepunkter i området nær brønnen for å kunne frembringe en nøyaktig modell. Dette skriver seg fra den raskt forandrende trykkprofil over korte avstander innenfor dette område nær borebrønnen.

Under visse forhold kan den radiale koordinattransformasjon som utføres i henhold til utførelser av foreliggende oppfinnelse frembringe en nøyaktig løsning. For eksempel hvis et oljefeltreservoar som modelleres er homogent, kan det bare ta to knutepunkter for å beregne en løsning utover til en hvilken som helst radius. Mellomliggende knutepunkter vil da ikke være nødvendig, og antallet knutepunkter som behøves for å oppnå en nøyaktig løsning vil bli sterkt redusert, hvilket da fører til en raskt økende beregningshastighet og reduksjon av de beregningsressurser som er påkrevet for å utlede en løsning. I et slikt tilfelle kan koordinattransformasjonsoperatorene anvendes for å oppnå en løsning gjennom hele oljefeltets reservoarmodell, uten behov for kartesiske operatorer i områder lenger bort fra borebrønnen (singularitet).

Manglende nøyaktighetsoppløsning i nærbrønnområdet kan også opptre ved bruk av kartesisk diskretisering i nærbrønnområdet. En meget høy maskeoppløsning, og derfor et stort antall knutepunkter, vil da være nødvendig for å oppnå tilstrekkelig nøyaktighet sammenlignet med en tilsvarende analytisk løsning ved bruk av kartesiske operatore. Utførelser av fremgangsmåten og utstyret for koordinattransformasjon i henhold til foreliggende oppfinnelse kan i høy grad redusere eller eliminere både manglende nøyaktighetsoppløsning i nærbrønnområdet og oscillasjoner på grunn av uregelmessig tidsekstruderer.

Utførelser av fremgangsmåten og utstyret i henhold til denne oppfinnelse tar da med i beregningen det forhold at strømningsfeltet omkring brønnen i et oljefeltreservoar hovedsakelig er radial. Trykkprofilen er sterkt ikke-lineær som funksjon av avstanden fra borebrønnen og kan vanskelig tilnærmes ved hjelp av lineære elementer. Radial strømning innebærer at trykket varierer lineært som funksjon av logaritmen av radial avstand. Utførelser av foreliggende oppfinnelse drar da fordel av denne sammenheng for i vesentlig grad å forbedre trykkfeltinterpolasjonen. Dette er anskueliggjort i fig. 2 og 3, som da viser en radial trykkprofil versus avstand fra en borebrønn i både et kartesisk koordinatsystem (fig. 2) og ved bruk av transformeringsoperatorer i utførelsene i henhold til foreliggende oppfinnelse (fig. 3).

Et grunnlag for koordinat-transformasjonsmetoden i henhold til utførelser av foreliggende oppfinnelse er at radial strømning i stabil tilstand fra et reservoar mot en singularitet (f.eks. en borebrønn) kan beskrives ved følgende sammenheng:

$$Q = \frac{2\pi}{\ln(r/r_w)} (p - p_w) \quad (\text{lign. 1})$$

I ligning 1 er da "Q" mengdestrømmen, "p" trykket ved en referanseradius "r" og indeksbetegnelsen "w" angir da borebrønnen (singulariteten). Ved å omordne ligning 1 vil trykkfordelingen ved en gitt mengdestrøm "Q" og et brønntrykk "p_w" finnes å være:

$$p = p_w + \frac{Q \ln(r/r_w)}{2\pi} \quad (\text{lign. 2})$$

Den sammenheng som er angitt ved ligning 2 angir at en kurveopptegning av trykk som funksjon av den naturlige logaritme av "r", vil gi en lineær sammenheng. Ligningene 1 og 2 antar enhetlig ledningsevne i reservoaret. Fig. 2 er en opptegning av den radiale trykkprofil for et reservoar angitt i kartesiske koordinater. Som det vil fremgå av fig. 2, avtar trykket raskt nær borebrønnen (de første noen hundre fot utover fra brønnen). Trykket varierer meget mindre raskt i større avstander fra borebrønnen og har da en tendens til å flate ut. De samme data inntegnet langs en logaritmisk horisontalakse gir da en rettledet sammenheng, slik som vist i fig. 3. Fig. 3 viser da at stabil radial strømning innebærer at trykket varierer lineært med logaritmen av radial avstand fra en borebrønn.

På grunn av at trykkprofilen for et oljereservoar er sterkt ikke-lineær i kartesiske koordinater i nærheten av borebrønnen (f.eks. innenfor avstander mindre enn tohundreogfemti fot i det eksempel som er angitt i fig. 2), vil bruk av lineære elementer ved endelig elementanalyse kunne innføre vesentlige interpolasjonsfeil. Dette er spesielt tilfelle når et grovt maskenett, og derfor store lineære elementer, brukes i kartesisk rom. Den lineære sammenheng mellom den radiale trykkfordeling og logaritmen av den radiale avstand, utgjør derfor et grunnlag for utførelse av koordinattransformasjon. Ved transformering fra kartesiske koordinater (x, y, z) til en modifisert form for radiale koordinater (s, θ , z) hvor:

$$s = \ln(r) \qquad \text{(lign. 3)}$$

Utførelsene av fremgangsmåten og utstyret i henhold til denne oppfinnelse kan da dra nytte av det forhold at i det område hvor radial strømning er dominerende, vil trykket variere lineært med "s". Når derfor lineære elementer anvendes, og når knutepunktsverdiene er nøyaktige, vil det ikke foreligge noen interpolasjonsfeil.

Følgende ligninger og forklaringer vil angi flere detaljer angående utførelsen av koordinat-transformasjonsmetoden og utstyret i henhold til denne oppfinnelse, og da anvendt på massekonserveringsligningen for enkeltfasestrømning. Disse ligninger kan brukes for å beskrive radial fluidstrømning nær en singularitet, slik

som en borebrønn. Kontinuitetsligningen for enfaset strømming er en diffusivitetsligning av formen;

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \nabla^2 p = 0 \quad (\text{lign. 4})$$

5

Laplace-operasjonen ($\nabla^2 p$ i radialkoordinatform) er da gitt ved:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial s^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (\text{lign. 5})$$

10

Ved innføring av transformasjonen $s = \ln(r)$, kan differensialene skrives som:

$$\frac{\partial}{\partial r} = \text{Exp}[-s] \frac{\partial}{\partial s} \quad (\text{lign. 6})$$

15

Kontinuitetsligningen kan da omordnes til følgende form:

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \text{Exp}[-2s] \left(\frac{\partial^2 p}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2} \right) - \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{lign. 7})$$

Ved å anvende transformasjonen på den enfasede svartolje-ligning, er det tatt hensyn til permeabilitetsanisotropi ved å ta korrekt hensyn til de kryssledd som innføres ved transformasjonen. Ved en gitt 3×3 permeabilitetstensor K , vil denne bli transformert til radial koordinatform ved følgende uttrykk:

25

$$K_r = RKR^T$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Utførelsene av koordinattransformasjon for å modellere radial strømning nær en singularitet og i henhold til denne oppfinnelse, kan således anvendes for i vesentlig grad å forbedre modelleringen av enfaset fluidstrømning.

Fig. 4 og 5 angir kurver som viser særtrekk ved radial strømning rundt en
5 singularitet ved bruk av koordinat-transformasjonsmodellen i henhold til utførelsen av foreliggende oppfinnelse. Det system som er modellert i dette tilfelle, og slik som vist i fig. 4, er et kvartsegment av en brønn sentralt i et sirkulært reservoar. Reservoarradius er da 1500 fot, og et forholdsvis grovt maskenett er brukt i nærheten av brønnen (singulariteten) i forgrunnen i fig. 4. Innerradius er 0,25 fot,
10 mens ytterradius er 100 fot, mens fire mellomliggende beregningsknutepunkter befinner seg mellom disse to radiusverdier. Grensebetingelser er da at reservoaret innledningsvis befinner seg ved trykk på 2000 psi og et konstant uttrekk finner sted i brønnen til enhver tid (fra begynnelse til slutt i løpet av ti dager).

Fig. 5 viser en grafisk fremstilling av brønntrykket som funksjon av tiden,
15 idet den angir den analytiske løsning 40, den kartesiske operatorløsning 50, og en transformasjonskoordinatløsning 60. Den grafiske opptegning som er vist i fig. 5 omfatter førti tidsintervaller, hvilket kan bidra til å forbedre den totale nøyaktighet for løsningen (nøyaktigheten kan forbedres i samsvar med antallet tidsintervaller som anvendes). Som det vil fremgå av fig. 5, vises akkumulerte beregningsfeil
20 mot slutten av beregningstiden meget klart i den kartesiske operatorløsning 50, men ikke i løsningen 60, hvor det er benyttet radial koordinattransformasjons. Koordinattransformasjonsløsningen 60 faller også meget mer sammen med den observerte analytiske løsning 40.

Fig. 6 og 7 viser et annet eksempel på løsninger som er utledet ved bruk av
25 utførelser av koordinat-transformasjonsmetoden og utstyret i henhold til foreliggende oppfinnelse. Den modell som brukes for å oppnå de løsninger som er angitt i fig. 6 og 7 er et kvartsegment av brønnen i midten av en sirkulær reservoar-modell. Reservoarradius er 1500 fot, og et relativt grovt maskenett brukes i den ferdigstilte modell, og da med en innerradius på 0,25 fot og en ytterradius på 100
30 fot, samt med fire mellomliggende beregningsknutepunkter mellom disse radiusverdier. Som i det angitte eksempel i fig. 4 og 5, befinner reservoaret seg innledningsvis ved et trykk på 2000 psi og et konstant uttrekk finner sted fra brønnen til enhver tid (0-10 dager).

Som det vil fremgå av fig. 6, er for radiale avstander utover omtrent 200 fot løsningen 50 for kartesisk operator og transformator-koordinatløsningen 60 ganske nær den analytiske løsning 40 for den foreliggende trykkprofil over ti dagers perioden. Som vist i fig. 7, viser data i nærheten av brønnen (her ut til 25 fot radialavstand fra brønnutboringen) klart at transformator-koordinatløsningen 60 er
5 meget mer nøyaktig i nærbrønnområdene enn den kartesiske operatorløsning 50. Fig. 7 er en forstørret grafisk fremstilling av samme løsninger som er angitt i fig. 6, og da for nærbrønnområdene på 0,25 fot og ut til omtrent 25 fot. I dette nærbrønnområdet gir transformator-koordinatløsningen 60 en meget bedre tilnærming
10 til den observerte analytiske løsning 40.

Det skal nå henvises tilbake til fig. 2 og 3, hvor det kan ses at hvis hvilke som helst to punkter fra fig. 2 tas som et element, vil et stort antall av disse punkter være nødvendig for å frembringe en tilnærming til kurven. I det koordinattransformasjonsrom som er vist i fig. 3, vil i motsetning til dette løsningen være
15 lineær, og mellomliggende punkter vil ikke være nødvendig. Hvilke som helst to punkter kan brukes for å ta opp alle variasjoner og gi eksakte løsninger.

Koordinattransformasjon for forskjellige utførelser av foreliggende oppfinnelse omfatter en matematisk avbildning fra et koordinatrom til et annet koordinatrom og kan utføres som datamaskin-utførbare programvareinstruksjoner som
20 lagres i datalageret inne i en beregningsanordning. Datahukommelsen kan være RAM eller ROM, eller et fast medium, slik som en hard drivenhet eller magnetisk medium, slik det vil være kjent for fagfolk innenfor området. Beregningsanordningen kan utgjøres av en hvilken som helst datamaskin som er i stand til å utføre programvareinstruksjoner, slik som f.eks. en PC eller en Macintosh, basert på
25 Windows UNIX eller Linux. Utførelsene av fremgangsmåten og anordningen i henhold til denne oppfinnelse kan beskrives som en metode for å transformere koordinater for å frembringe meget nøyaktige simuleringer av reservoarer eller andre fysiske systemer, særlig i nærheten av et punkt av interesse, slik som en singularitet (f.eks. en utboret brønn).

30 Utførelser av fremgangsmåten og anordningen i henhold til foreliggende oppfinnelse kan også benyttes for andre singulariteter enn en brønnutboring. Utførelser av denne oppfinnelse kan anvendes for å modellere og løse med hensyn på egenskaper ved horisontale brønner, sprekkdannelser og/eller feilforekomster.

Slike utførelser av denne oppfinnelse er også tenkt brukt i en hvilken som helst situasjon hvor det foreligger et visst potensiale for innføring av en transformasjon som ligger nærmere en adferd i samsvar med en analytisk løsning. En slik transformasjon ved utførelser i henhold til foreliggende oppfinnelse er analog med et tilfelle i faststoff-mekanikk som går ut på modellering av varmeoverføring.

Andre parametre enn trykkprofiler kan modelleres ved bruk av utførelser av fremgangsmåten og anordningen i henhold til foreliggende oppfinnelse. Utførelser av oppfinnelsen omfatter en fremgangsmåte for modellering av singulariteter av forskjellige typer, og da med anvendelser innenfor mange forskjellige industrier.

Punktblastninger, temperaturfordelinger og varmesluk kan f.eks. modelleres ved bruk av utførelser av denne oppfinnelse. Et reservoar kan f.eks. i stedet tenkes å være en metallplate med en påført varmekilde, slik som en flamme eller laserstråle, for oppvarming av platen. Matematisk er denne situasjon identisk med modellering av en trykkprofil i et reservoar. Singulariteter av en hvilken som helst type kan således modelleres ved bruk av utførelser av fremgangsmåten og anordningen i henhold til denne oppfinnelse.

Utførelser av fremgangsmåten og utstyret i henhold til denne oppfinnelse kan frembringe raskere og mindre beregningskrevende, samt mer nøyaktige modelleringer og løsninger enn tidligere kjente fremgangsmåter og utstyr for modellering av fysiske systemer i nærheten av en singularitet, idet disse, til forskjell fra tidligere kjente fremgangsmåter og anordninger, ikke bare benytter standardteknikker for endelige elementer i et kartesisk koordinatrom. I stedet anordner utførelser av foreliggende oppfinnelse koordinattransformasjon til beregningsrommet. En slik transformasjon utføres og beregningen finner sted, og de resultater som oppnås vil fremdeles befinne seg i et kartesisk koordinatrom. Når det gjelder vedkommende bruker, er fremgangsmåten i henhold til utførelsene av foreliggende oppfinnelse gjennomskiktig.

Utførelsene av fremgangsmåten og anordningen i henhold til denne oppfinnelse kan iverksettes inne i et brukergrensesnitt av den art som er angitt i den beslektede US-patentsøknad med tittelen "System and method for defining and displaying reservoir model" ("Blitzer-anvendelse"). Med det grensesnitt som er angitt i forbindelse med Blitzer-anvendelsen, vil f.eks. en oljefelt-ingeniør kunne spesifisere de modellparametre som vil være nødvendig for å beregne de kvantiteter som

han er interessert i, og utførelser av denne oppfinnelse kan da utføre disse beregninger på en måte som vil være lettforståelig for oljefelt-ingeniøren.

Utførelser av fremgangsmåten og anordningen i henhold til denne oppfinnelse kan anvendes for i høy grad å overvinne de unøyaktigheter ved standard
5 analyseteknikker av endelige elementer ved utførelse av beregninger ved bruk av en type grensebetingelser som representerer innføring eller tilbaketrekking av en fysisk kvantitet (f.eks. fluid eller varme) fra et singularpunkt. Utførelser av fremgangsmåter i henhold til denne oppfinnelse kan omfatte en fremgangsmåte for å utføre en koordinattransformasjon i et bestemt beregningsrom for å være i stand til
10 å beregne mer nøyaktige foreliggende forhold omkring en singularitet i en fysisk modell, f.eks. av et reservoar, eller annet fysisk system.

Forskjellige utførelser av fremgangsmåten i henhold til denne oppfinnelse kan iverksettes i programvare og kan gis tilgang til gjennom et brukergrensesnitt, slik som grensesnittet for den beslektede Blitzer-anvendelse, og kan da utføre
15 transformasjoner ved å benytte en fremgangsmåte som vil være lettforståelig for en bruker. Disse utførelser kan omfatte programvare eller formelle utførelser som benytter seg av slike fremgangsmåter som er beskrevet her, såvel som datamaskin-lesbare media som inneholder slike anvendelsesprogrammer, samt datamaskiner eller andre databehandlingsanordninger som er konfigurert til å utføre de
20 beskrevne fremgangsmåter. Særtrekk ved forskjellige utførelse av foreliggende oppfinnelse omfatter operasjoner som vil være klart forståelige for brukeren, samt muligheter for å tillate brukeren å fastlegge grensebetingelser og variabler på parametre som beskriver det system som er av interesse.

En fordel ved utførelser av fremgangsmåten i henhold til foreliggende oppfinnelse er at, til forskjell fra vanlige opplegg for å utlede en analyseløsning av et
25 system i endelige elementer i nærheten av en singularitet, vil færre knutepunkter være nødvendig for å oppnå samme eller bedre nøyaktighet. Tidligere kjente fremgangsmåter og utstyr krever spesifisering av et fint romlig nettverk omkring singulariteten for det formål å oppnå samme grad av nøyaktighet som det er mulig
30 å oppnå med utførelser i henhold til oppfinnelsen. Utførelser av denne oppfinnelse tillater således bruk av et grovere nettverk uten å ofre nøyaktigheten fremfor tidligere kjente metoder. Tidligere kjente fremgangsmåter kan f.eks. kreve spesifisering av 50 knutepunkter over en radial avstand fra 6 tommer til 30 fot utover fra en

singularitet for å oppnå en anvendbar løsning. Ved bruk av koordinat-transformasjonsmetoden i henhold til utførelsen av denne oppfinnelse, kan knutepunktene i stedet spesifiseres med meget større innbyrdes radial avstand mellom knutepunktene, f.eks. 10-20 fot mellom knutepunktene (eller til og med større avstand). Visse utførelser av koordinattransformasjonsmetoden i henhold til denne oppfinnelse kan faktisk bruke knutepunkter med så stor innbyrdes avstand som 50 fot og fremdeles oppnå like nøyaktig oppløsning som ved de tidligere kjente fremgangsmåter, hvor da mange flere knutepunkter må være spesifisert mellom 6 tommer og 50 fot utover.

Utførelsene av fremgangsmåten og utstyret i henhold til denne oppfinnelse fungerer særlig godt i det tilfelle hvor det foreligger et isotropisk system hvor ledningsevnen er den samme i alle retninger. Et anisotropisk system, hvor permeabiliteten (ledningsevnen) i X- og Y-retningen kan være forskjellig, vil imidlertid føre til litt mindre nøyaktige løsninger. Anvendbare løsninger er fremdeles mulig i et anisotropisk eller heterogent system, men det kan forekomme ekstreme tilfeller hvor permeabiliteten (ledningsevnen) i X-retningen kan f.eks. være 1000 ganger større enn tilsvarende permeabilitet i Y-retningen, og i dette tilfelle kan da løsningen ved koordinattransformasjon i henhold til foreliggende oppfinnelse innføre en betraktelig feil.

Utførelser av koordinat-transformasjonsmetoden og det tilsvarende utstyr i henhold til denne oppfinnelse, gir imidlertid mulighet for å transformere ligningene i nødvendig grad til å løse et system til en fremstillingsform som virker kartesisk. Grunnleggende blir koordinatrommet transformert på en slik måte at det meget godt er representert ved endelig-element-tilnærmelsen. Dette er da forskjellig fra tidligere teknikker hvor det gjøres forsøk på fremdeles å bruke kartesiske ligninger, men på en eller annen måte innleirer en singularitet i rommet for de endelige elementer. Utførelser av fremgangsmåten i henhold til denne oppfinnelse gir imidlertid en teknikk som fastlegger singulariteten (eller fjerner denne singularitet) før endelig-elementmetoden anvendes på den, til forskjell fra å forsøke å bibeholde endelig-elementmetoden ved å forandre den måten den fungerer på. Den underliggende analyse av endelig-elementer i henhold til elementmetoden eksisterer fremdeles på toppen av den transformasjon som utføres ved de forskjellige metoder i henhold til foreliggende oppfinnelse.

Skjønt foreliggende oppfinnelse er blitt beskrevet i detalj her, og under henvisning til de viste utførelser, bør det forstås at denne fremstilling bare er å betrakte som et eksempel og ikke må tolkes som noen begrensning. Det bør videre derfor forstås at tallrike forandringer med hensyn til detaljer i utførelsene i henhold til
5 denne oppfinnelse, samt ytterligere utførelser av oppfinnelsen, vil kunne fremgå klart, og til og med utføres av personer med vanlig fagkunnskap innenfor vedkommende område og med tilgang til denne beskrivelse. Alle slike forandringer og ytterligere utførelser kan imidlertid anses å ligge innenfor oppfinnelsens idéområde og samme omfangsramme, i samsvar med de etterfølgende patentkrav.

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for å forutsi adferden av et fysisk system, karakterisert ved følgende prosessstrinn:

opprettelse av en ligning i et første koordinatsystem for å modellere et aspekt ved det angitte fysiske system,

utøvelse av en koordinattransformasjon på denne ligning for å transformere ligningen fra det første koordinatsystem til et andre koordinatsystem som nærmere muliggjør en løsning som tilsvarer en analytisk løsning av vedkommende ligning, løsning av ligningen i det andre koordinatsystem for å utlede en løsning, og transformering av denne løsning tilbake i det første koordinatsystem.

2. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at den videre omfatter et prosessstrinn som går ut på å generere et maskenett for å modellere vedkommende fysiske system.

3. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at det første koordinatsystem er et kartesisk koordinatsystem, og

at det andre koordinatsystem er et radiaalt koordinatsystem.

4. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at det andre koordinatsystem er et koordinatsystem hvor den angitte løsning er en lineær løsning.

5. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at det fysiske system er et reservoar som har et trekk valgt fra en gruppe som består av en singularitet, en punktbelastning, et varmesluk, en sprekkdannelse, en forkastning og en utboret brønn, og

at det angitte aspekt er en fysisk egenskap ved vedkommende system som utgjøres av et trykk eller en fluidstrømning.

6. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at den videre omfatter prosessstrinn som går ut på:

opprettelse av en andre ligning i det første koordinatsystem for å modellere et andre aspekt ved det fysiske system,

løsning av denne andre ligning i det første koordinatsystem for å oppnå en løsning av denne andre ligning, og

kombinasjon av den transformerte løsning av den første ligning med løsningen av den andre ligning i det første koordinatsystem, for derved å utlede en kombinert løsning.

7. Datamaskin-lesbart medium som inneholder flere instruksjoner som angir en fremgangsmåte for å forutsi et fysisk systems adferd, karakterisert ved at denne fremgangsmåte omfatter følgende prosessstrinn:

opprettelse av en ligning i et første koordinatsystem for å modellere et aspekt ved det fysiske system,

utførelse av en koordinattransformasjon på denne ligning for derved å transformere ligningen fra det første koordinatsystem til et andre koordinatsystem som nærmere bestemmer en analytisk løsning av ligningen,

løsning av denne ligning i det andre koordinatsystem for å utlede en løsning, og

transformering av denne løsning tilbake til det første koordinatsystem.

8. Datamaskin-lesbart medium som angitt i krav 7, karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter et prosessstrinn som går ut på å generere et maskenett for å modellere det fysiske system.

9. Datamaskin-lesbart medium som angitt i krav 7, karakterisert ved at det som første koordinatsystem benyttes et kartesisk koordinatsystem, og

hvor det andre koordinatsystem er et radiale koordinatsystem.

10. Datamaskin-lesbart medium som angitt i krav 7, karakterisert ved at det andre koordinatsystem er et koordinatsystem hvor løsningen er en lineær løsning.

11. Datamaskin-lesbart medium som angitt i krav 7,
karakterisert ved at det fysiske system er et reservoar som har et trekk
valgt fra en gruppe som består av en singularitet, en punktblastning, et varmesluk,
en sprekkdannelse, en forkastning og en utboret brønn, og
at det angitte aspekt er en fysisk egenskap ved systemet som utgjøres av et
trykk eller en fluidstrømning.

12. Datamaskin-lesbart medium som angitt i krav 7,
karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter følgende
prosesstrinn:

opprettelse av en andre ligning i det første koordinatsystem for å modellere et
andre aspekt ved det fysiske system,

løsning av denne andre ligning i det første koordinatsystem for å utlede en
løsning av den andre ligning, og

kombinering av den transformerte løsning av den første ligning med løsningen
av den andre ligning i det første koordinatsystem, for å oppnå en kombinert løsning.

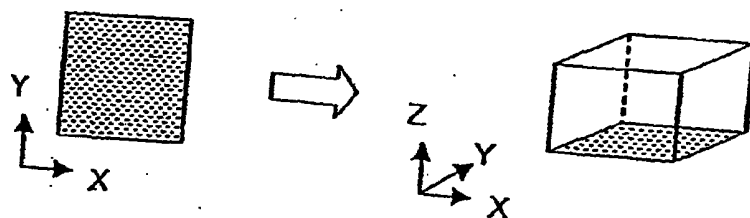


FIG. 1

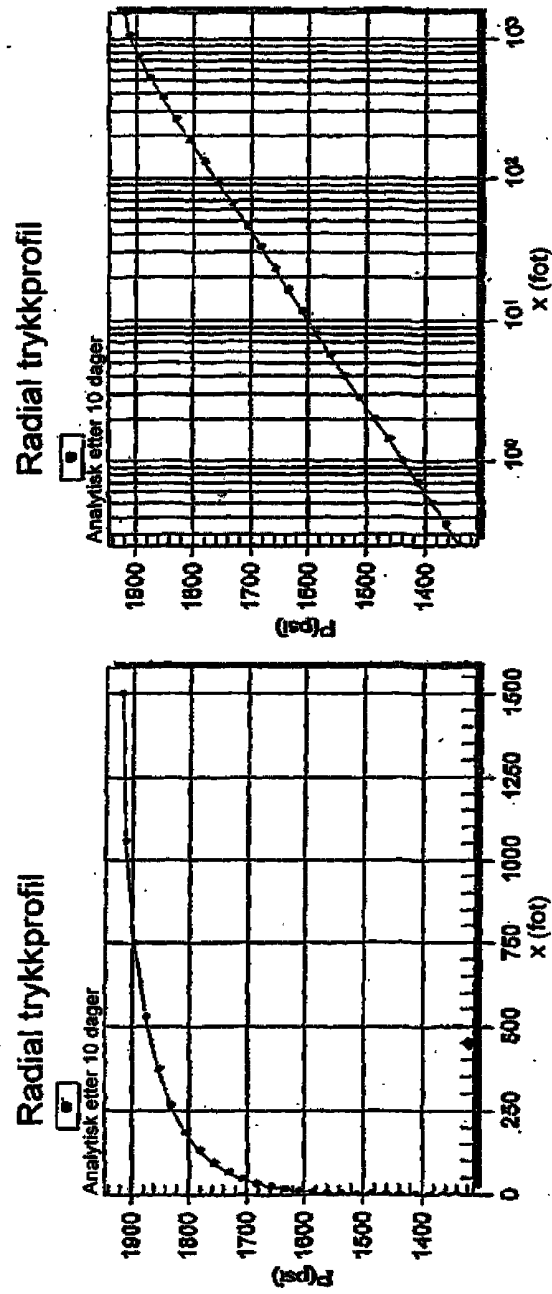


FIG. 2

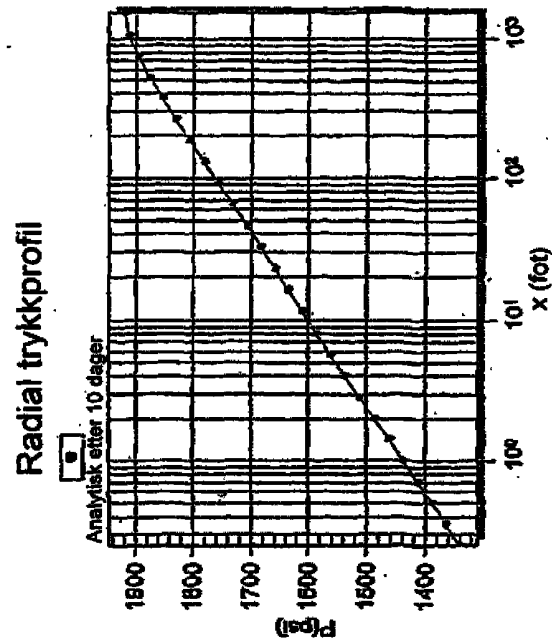


FIG. 3

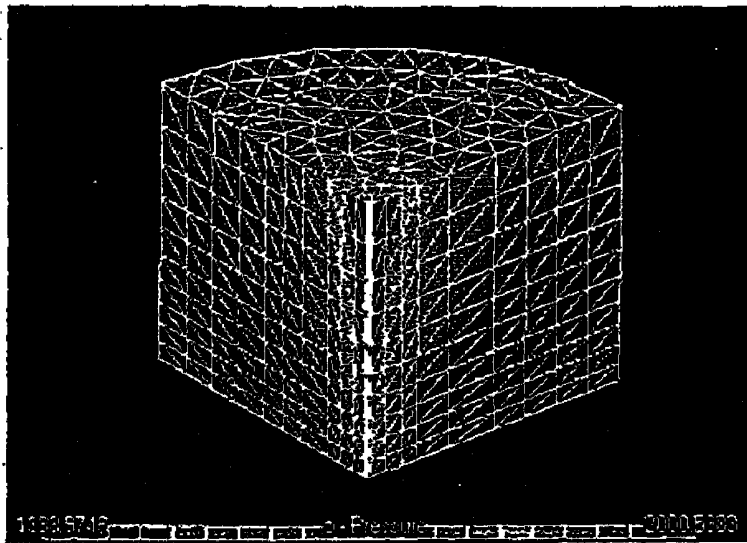


FIG. 4

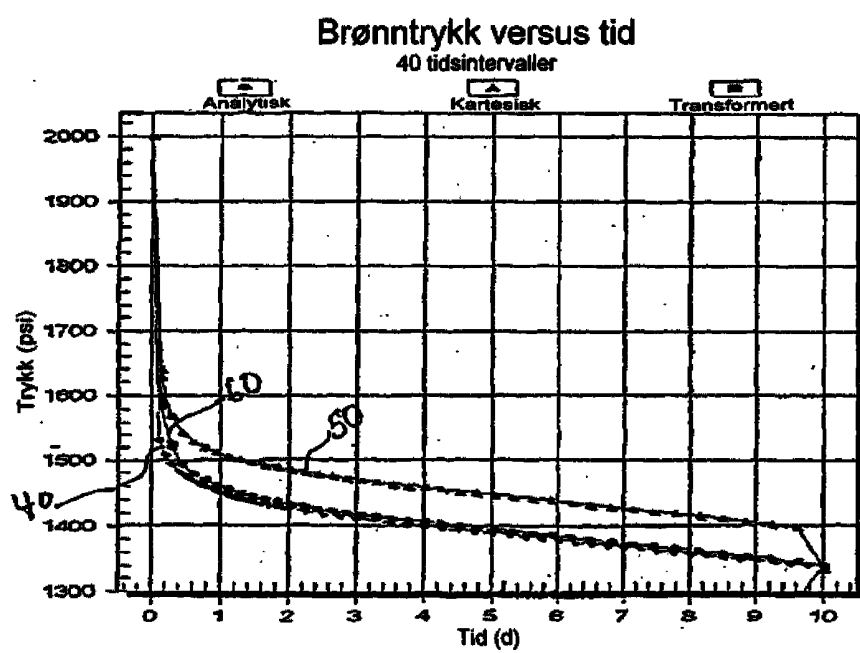


FIG. 5

Trykkprofil etter 10 dager

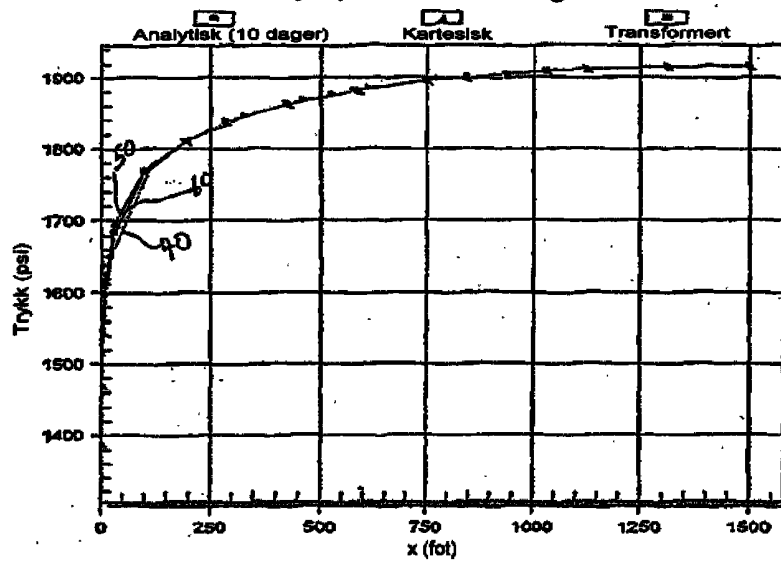


FIG. 6

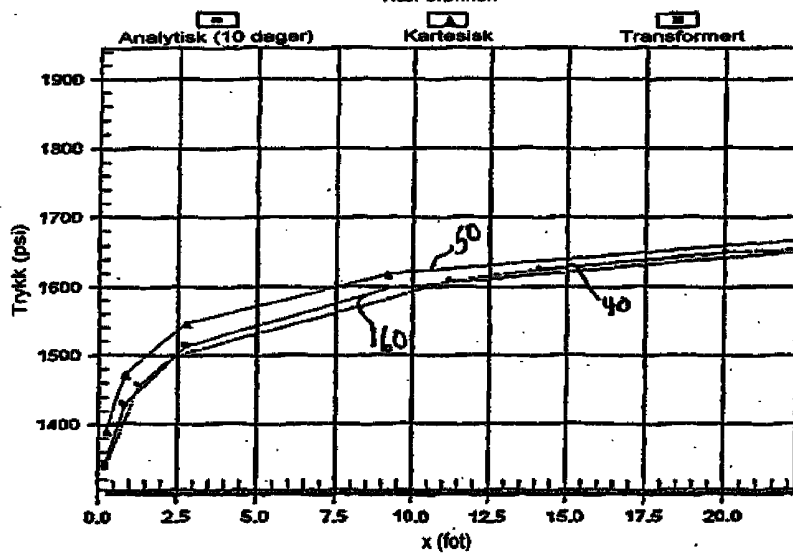
Trykkprofil etter 10 dager
Nær brønnen

FIG. 7