



(12) **PATENT**

(19) **NO**

(11) **329796**

(13) **B1**

NORGE

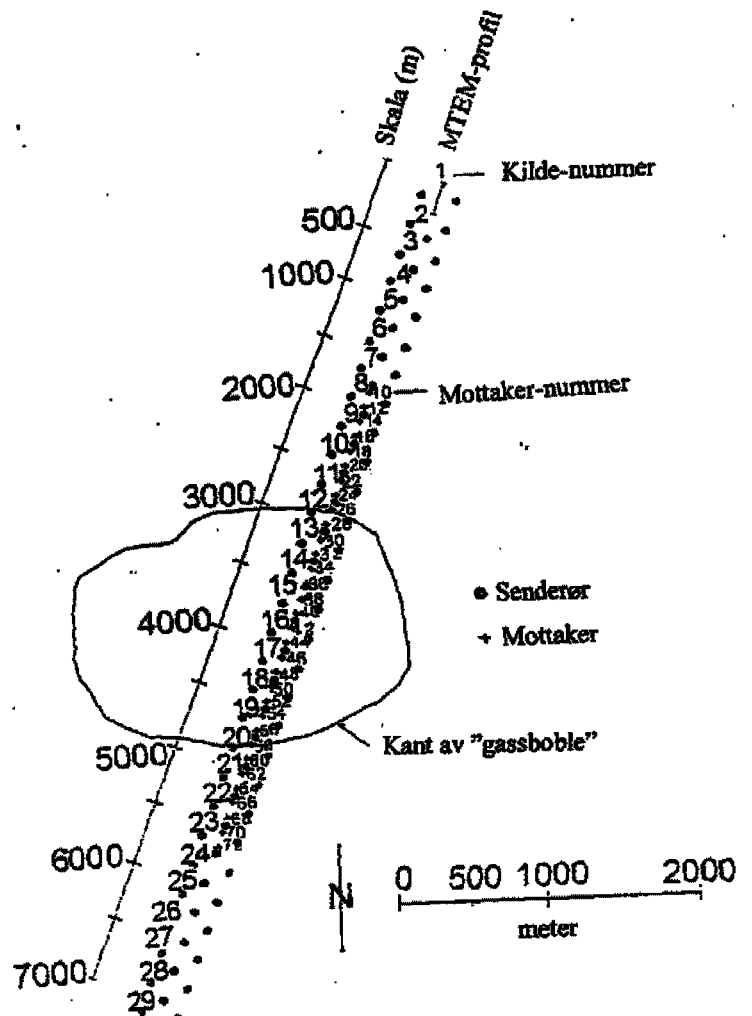
(51) Int Cl.
G01V 3/02 (2006.01)
G01V 3/08 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20040983	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2002.09.09 PCT/GB2002/04121
(22)	Inng.dag	2004.03.05	(85)	Videreføringsdag	2004.03.05
(24)	Løpedag	2002.09.09	(30)	Prioritet	2001.09.07, GB, 0121719
(41)	Alm.tilgj	2004.04.21			
(45)	Meddelt	2010.12.20			
(73)	Innehaver	MTEM Ltd, 40 Sciennes, GB-EH91NJ EDINBURGH, Storbritannia			
(72)	Oppfinner	Antoni Marjan Ziolkowski, 17 Gordon Terrace, GB-EH165QR EDINBURGH, Storbritannia David Allan Wright, 4 Rankeillor Street, GB-EH89HY EDINBURGH, Storbritannia Bruce Alan Hobbs, Dykeneuk, Peebles Road, GB-EH268PN PENICUIK, Storbritannia			
(74)	Fullmektig	Protector Intellectual Property Consultants AS, Oscarsgate 20, 0352 OSLO, Norge			

(54)	Benevnelse	DETEKSJON AV UNDERJORDISKE RESISTIVITETSKONTRASTER FOR Å LOKALISERE FLUIDER
(56)	Anførte publikasjoner	US 417210 A US 4417210 A, US 5563513 A US 5563513 A
(57)	Sammendrag	

Oppfinnelsen angår en fremgangsmåte for å kartlegge resistivitetskontraster i undergrunnen ved å ta multikanals, transiente, elektromagnetiske (MTEM) målinger på eller nær jordoverflaten ved å bruke minst en kilde, mottakeranordninger for å måle systemresponsen og minst en mottaker for å måle den resulterende undergrunnsrespons. Alle signaler fra det ene eller de flere kilde/mottaker-par blir behandlet for å finne den tilsvarende elektromagnetiske impulsresponsen til undergrunnen, og slike impulsrespons, eller eventuelle transformasjoner av slike impulsrespons, blir vist for å frembringe en undergrunns representasjon av resistivitetskontraster. Oppfinnelsen gjør det mulig å lokalisere og identifisere fluidavsetninger i undergrunnen og å overvåke bevegelsen av slike fluider.



DETEKSJON AV UNDERJORDISKE RESISTIVITETSKONTRASTER FOR Å LOKALISERE FLUIDER

Teknisk område

- 5 Foreliggende oppfinnelse vedrører en fremgangsmåte for å kartlegge resistivitetkontraster i undergrunns formasjoner. Fremgangsmåten gjør det mulig å detektere og lokalisere en undergrunns resistivitetkontrast, som igjen gjør det mulig å diskriminere mellom for eksempel vann (saltvann eller ferskvann), som er ledende, og hydrokarboner (gass eller olje) som er resistive.
- 10
- Porøse bergarter er mettet med fluider. Fluidene kan være vann (saltvann eller ferskvann) eller hydrokarboner (gass eller olje). Resistiviteten til bergarter som er mettet med hydrokarboner er ofte flere størrelsesordener høyere enn resistiviteten i bergarter som er mettet med vann (for eksempel 1 000 Ω m for hydrokarboner og 1 Ω m for
- 15 vann). Det vil si at hydrokarboner er resistive og vann er konduktivt. Hvis en potensielt hydrokarbon-førende geologisk undergrunns struktur er blitt oppdaget, for eksempel ved hjelp av seismiske undersøkelser, er det viktig å vite, før boringen, om den er resistiv (hydrokarboner) eller konduktiv (vann). Elektromagnetiske metoder har mulighet til å utføre denne diskrimineringen og derved redusere risikoen for boring av
- 20 tørre hull.

- Til tross for tiår med forskning og utvikling på dette området, er det imidlertid fremdeles ingen rutinemessig prosedyre for innsamling og behandling av elektromagnetiske data for å utføre denne distinksjonen og for å avdekke
- 25 undergrunnskart som representerer resistivitetsvariasjoner.

Teknisk bakgrunn

Den tidligere kjente teknikk kan oppsummeres ved hjelp av de følgende artikler som blir diskutert nærmere nedenfor.

30

- [1] McNeill, J.D., 1999, Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding, Technical Note TN-27, Geonics Ltd.

- [2] Zhdanov, M.S., og Keller, G.V., 1994, The geoelektrical methods in geophysical exploration: Elsevier
- [3] Eaton, P.A., og Hohmann, G.W., 1989, A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 53, 384-404.
- [4] Strack. K.-M, 1992, Exploration with deep transient electromagnetics: Elsevier
- 10 [5] Christensen, N.B., 2002, A generic 1-D imaging method for transient electromagnetic data: *Geophysics*, 67, 438-447.
- [6] Strack, K.-M., 1985, Das Transient-Elektromagnetische Tiefensondierungsverfahren angewandt auf de Kohlenwasserstoff- und Geothermie-Exploration, in: Ebel, A., Neubauer, F.M., Raschke, E., and Speth, P., (Hrsg.), *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln* 42.
- 15 [7] Cheesman, S.J., Edwards, R.N., og Law, L-K., 1990, A test of a short-base-line sea-floor transient electromagnetic system: *Geophysical Journal International*, 103, 2, 431-437.
- 20 [8] Cairns, G.W., Evans, R.L. & Edwards, R.N., 1996, A time domain electromagnetic survey of the TAG hydrothermal mound, *Geophys.Res.Lett.*, 23, 3455-3458.
- 25 [9] Cheesman, S.J., Edwards, R.N. og Chave, A.D., 1987, On the thory of sea-floor conductivity mapping using transient electromagnetic systems: *Geophysics*, 52, 204-217.
- 30 [10] Yu, L, Evans, R.L. og Edwards, R.N., 1997, Transient electromagnetic responses in seafloor with triaxial anisotropy: *Geophysical Journal International*, 129, 300-306.

- [11] Eidesmo, T., Ellingsrud, S., MacGregor, L.M. og Constable, S., Sinha, M.C., Johansen, S., Kong, F.N. og Westerdahl, H., 2002, Sea Bed Logging (SBS), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas: *First Break*, 20, 144-152.
- 5
- [12] MacGregor, L.M., Constable, S. Og Sinha, M.C., 1998, The RAMESSES experiment-III. Controlled-source electromagnetic sounding of the Reykjanes Ridge at 57 45N: *Geophysical Journal International*, 135, 773-789.
- 10
- [13] MacGregor, L.M., Sinha, M.C. og Constable, S., 2001, Electrical resistivity structure of the Valu Fa Ridge, Lau basin, from marine controlled source electromagnetic sounding *Geophys. J. Int.*, 146, 217-236.
- [14] Ziolkowski, A., Hobbs, B.A., Andrieux, P., Rüter, H., Neubauer, F. Og Hördt, A., 1998. Delineation and monitoring of reservoirs using seismic and electromagnetic methods: Project Number OG/0305/92/NL-UK, Final Technical Report to European Commission, mai 1998.
- 15
- [15] Wright, D.A., Ziolkowski, A og Hobbs, B.A., 2001, Hydrocarbon detection with a multi-channel transient electromagnetic survey: Expanded Abstracts 71st SEG Meeting, 9-14 September, San Antonio, s. 1435-1438.
- 20

Konvensjonelle elektromagnetiske tidsdomene-undersøkelser benytter en sender og en mottaker eller en sender og et antall mottakere. Senderen kan være en jordet bipol (elektrisk kilde) eller en ledningssløyfe eller flere sløyfer (magnetisk kilde) og mottakeren eller mottakerne kan være jordede bipoler (elektriske mottakere som registrerer potensialdifferanser eller elektriske felter) eller ledningssløyfer eller multisløyfer eller magnetometere (magnetiske mottakere som registrerer magnetiske felter og/eller deriverte av magnetiske felter). Det utsendte signal blir vanligvis dannet ved hjelp av en trinnendring i strøm i enten en elektrisk kilde eller i en magnetisk kilde.

25

30

Tidligere kjente utviklinger innbefatter

- (1) en metodologi som ofte blir kalt TDEM og som ofte blir ment å medføre en magnetisk kilde og en magnetisk mottaker,

- (2) den elektromagnetiske metode i tidsdomenet med lang offset (LOTEM) utviklet for undersøkelser på vann,
- 5 (3) tidsdomene-elektromagnetikk i det marine miljø (University of Toronto/Scripps Institution of Oceanography),
- (4) Havbunns logging (SBL) som benytter elektromagnetiske målinger med en eneste frekvens i det marine miljø (Scripps Institution/Southampton
10 Oceanography Centre/Electromagnetic Geophysical Services Ltd.), og
- (5) vårt eget tidligere arbeid i forbindelse med flerkanals, transiente elektromagnetiske målinger (MTEM) gjort i samarbeid med universitetet i Køl, Deutsch Montan Technologie og Companie Générale de Géophysique. Disse
15 kjente arbeidene blir diskutert nærmere nedenfor.
- (1) TDEM-metoden er eksemplifisert ved hjelp av kommersielt utstyr slik som PROTEM fra Genocs Ltd., SMARTem fra ElectroMagnetic Imaging Technology Pty Ltd (EMIT), UTEM fra University of Toronto og PATEM, en
20 slepe-sammenstilling fra universitetet i Aarhus. Disse systemene benytter magnetiske kilder og magnetiske mottakere i sentral sløyfe, sammenfallende sløyfe, offset-sløyfe eller borehulls konfigurasjoner, og følgelig avtegnes konduktive istedenfor resistive mål. De måler spenning induisert i mottakerspolen ved et antall tidspunkter (kalt porter) etter at senderstrømmen er
25 blitt slått av [1]. En dempningskurve blir så dannet som modelleres enten direkte eller ved bruk av forskjellige tilsynelatende resistivitetsmål slik som tidlig og sent tilsynelatende resistivitet [2], eller avbildes ved å bruke en hurtig inverteringsmetode [3]. Modelleringsløsningen benytter et lite antall parametere og foretar antagelser om avslåings karakteristikk til kilden, for eksempel at den
30 er en perfekt trinnfunksjon eller en perfekt rampefunksjon. TDEM-metodene svikter alle når det gjelder å gjenkjenne viktigheten av å måle systemresponsen og setter i stedet mer anstrengelser inn på å generere et transient signal med så liten avslåingstid eller rampeavslåingstid som mulig. Systemene og tilhørende

programvare bestemmer ikke undergrunnens responsfunksjon som definert i foreliggende oppfinnelse.

- (2) LOTEM-metoden (hvis hovedforskere er Vozoff, Strack og Hördt) og et lignende system utviklet av the Colorado School of Mines benytter en elektrisk kilde med stor dimensjon, typisk 1-2 km lang med elektriske og magnetiske mottakere plassert flere km fra kilden. Den er konstruert for undersøkelse på land. Dempningskurver målt av mottakerne kan omformes til forskjellige tilsynelatende resistivitetskurver. Dempnings- eller resistiviteskurvene blir modellert ved å benytte et lite antall parametere tatt for å representere undergrunns tilstander under bare mottakerne. Samlingen av transformerte kurver fra tilstøtende mottakere danner en bilderepresentasjon.

Fremgangsmåten innbefatter å betrakte en måling av systemresponsen. Det blir anbefalt ([4], s. 154) at dette utføres enten i laboratoriet eller på feltet ved begynnelsen av undersøkelsen. LOTEM definerer systemresponsen som den respons som skyldes en delta-funksjons innmating som det blir innrømt ([4], s. 49) ikke kan oppnås i praksis. I stedet blir en firkantbølge matet inn, og den resulterende utgang blir differensiert. I virkeligheten er det ikke mulig å mate inn en nøyaktig firkantbølge heller. Vanligvis blir det bare oppnådd en systemrespons, bestemt som gjennomsnittet av et statistisk representativt antall usendte pulser ([4], s. 68). En antagelse blir tatt om at svitsjings karakteristikker ikke varierer under belastning ([4], s. 155).

De fleste tolkningsmetoder i litteraturen er basert på kjennskap til trinnresponsen. Dette er umulig å oppnå uten en dekonvolving av de målte data som blir fastslått å være iboende ustabile [5]. LOTEM anbefaler at enten tilsynelatende resistivitetskurver blir fremskaffet etter tidsdomenet dekonvolving ved å benytte en iterativ metode [6] eller at syntetiske data fra modellering blir konvolvert med systemresponsen før sammenligning med de målte data. En tommelregel er at dette bør gjøres når lengden av systemresponsen er mer enn $1/3$ av transientens lengde ([4], s. 52).

LOTEM-metoden svikter når det gjelder å innse viktigheten av å måle systemresponsen for hver kilde transient i feltet, og svikter når det gjelder å innse at dempningskurvene er en funksjon av alle de mellomliggende materialer mellom kilden og tilsvarende mottaker der hvor de induerte strømmene flyter.

5

- (3) EM-systemen for kartleggingen av havbunnen fra the University of Toronto (hovedforskere: Edwards, Yu, Cox, Chave og Cheesman), består av et antall konfigurasjoner som innbefatter en stasjonær elektrisk mottaker på havbunnen og en slepet elektrisk sender, og en magnetisk kilde og flere kolineære magnetiske mottakere som danner en sammenstilling som blir slept langs havbunnen. I tidlige forsøk ble systemresponsen målt i det frie rom og ble konvolvert med den teoretiske impulsresponsen til en enkel modell av havvannet og den underliggende grunnen for å modellere de målte data [7]. I senere eksperimenter, i tilfellet med en elektrisk kilde, blir den målte strøminnmatning til senderen konvolvert med impulsresponsen til mottakeren, igjen målt i det frie rom, og så med impulsresponsen til en modell for å gi et syntetisk signal for sammenligning med det målte [8]. Ingen mottakere er plassert nær senderen for å bestemme systemresponsen under belastning.

10

15

20

Gruppen har utviklet et omfattende bibliotek over analyttiske løsninger og rekursive, numeriske metoder for responsen til enkle geologiske modeller ovenfor en trinnendringskilde. Modellene har uten unntak et lite antall parametere, og tolkninger av målte dempningskurver er basert på denne modelleringsløsningen [9], [10].

25

Deres teknikk svikter når det gjelder å innse viktigheten av å måle systemresponsen for hver kildetransient å benytte denne til å dekonvolvare de målte transienter for å fremskaffe de estimerte impuls responsfunksjoner for undergrunnen.

30

- (4) Havbunnslogging (SBL, Sea Bed Logging) er en realisering av CSEM-metoden (styrt kilde-elektromagnetikk, controlled source electromagnetic) og er blitt utviklet av Electromagnetic Geoservices Ltd (EMGS), et datterselskap av Statoil i samarbeid med University of Cambridge, University of Southampton og

Scripps Institution of Oceanography [11]. Den omfatter et antall selvstendige, elektriske to-komponent-mottakere i statiske posisjoner på havbunnen og en elektrisk kilde slept omkring 50 m over havbunnen. Mottakerne forblir i sine posisjoner på havbunnen og registrerer kontinuerlig inntil de blir instruert om å flyte opp for gjenvinning på havoverflaten ved slutten av undersøkelsen. Kilden (DASI-dypt slepet, aktivt kildeinstrument) er en 100 m lang horisontal elektrisk bipol [12]. Elektroder adskilt langs kilde bipolen blir brukt å overvåke de utsendte felter. Disse gjør det mulig å normalisere de mottatte data ved hjelp av kildebipolens moment for sammenligning med modelleringsresultater [13]. I motsetning til de transiente systemer ovenfor utsender kilden i henhold til SBL-teknikken bare en frekvens som operatørene optimaliserer til det mål som undersøkes [11]. Fremgangsmåten beror på at den slepte, bevegelige kilde skaper data for flere kilde/mottaker-avstander og at disse dataene blir tolket ved modellering. Fremgangsmåten involverer ikke en transient kilde og tar ingen hensyn til systemresponsen.

(5) Universitetet i Edinburgh, Universitetet i Köln, Deutsch Montan Technologie og Compagnie Générale de Géophysique samarbeidet i THERMIE-prosjektet OG/0305/92/NL-UK til Europa kommisjonen (som løp fra 1992 til 1998) for å fremskaffe flerkanals transiente, elektromagnetiske data (MTEM-data) i 1994 og 1996 over et gasslagrings reservoar ved St. Illiers la Ville i Frankrike. Eksperimentet er beskrevet i detalj i den tekniske sluttrapporten til europakommisjonen med tittel "Delineation and Monitoring of Oil Reservoirs using Seismic and Electromagnetic Methods" [14]. Prosjektet hadde to formål: først å utvikle en fremgangsmåte for å detektere hydrokarboner direkte, og for det andre å overvåke bevegelsen av hydrokarboner i et kjent reservoar. Ingen av disse formålene ble oppnådd.

Ziolkowski et al. [14] og endog Wright et al [15] sviktet når det gjaldt å innse viktigheten av å måle systemresponsen til hver kildetransient.

Beskrivelse av oppfinnelsen

Foreliggende oppfinnelse forsøker å tilveiebringe en rutineprosedyre for innsamling og behandling av elektromagnetiske data for å muliggjøre kartlegging av resistivitetskontraster i undergrunnen.

- 5 Ifølge foreliggende oppfinnelse er det tilveiebrakt en fremgangsmåte for kartlegging av resistivitetskontraster i henhold til krav 1, og apparat for å utføre framgangsmåten i henhold til krav 19. Posisjonene til resistivitetskontrastene kan bestemmes fra kilde-mottaker-konfigurasjonen, og elektromagnetisk forplantning både over og under mottakerne.
- 10 Fremgangsmåten gjør det mulig å detektere og lokalisere undergrunns resistivitetskontraster. Fremgangsmåten muliggjør for eksempel diskriminering mellom vann (saltvann eller ferskvann) som er levende og hydrokarboner (gass eller olje) som er resistive. Fremgangsmåten gjør det også mulig å overvåke bevegelsen av slike
- 15 fluider. Fremgangsmåten kan også brukes til å finne vannførende undergrunns bergarter (aquiferer).

Kort beskrivelse av tegningene

- Utførelsesformer av oppfinnelsen vil nå bli beskrevet kun som et eksempel, under
- 20 henvisning til de medfølgende tegninger hvor:

Figur 1 er en typisk utforming som viser posisjoner for en elektromagnetisk kilde og elektromagnetiske mottakere for å gjennomføre en fremgangsmåte i henhold til oppfinnelsen for å kartlegge resistivitetskontraster;

25

Figurene 2a-c er skjematisk diagrammer som viser en kilde strømbølgeform og resulterende transiente responser;

30

Figur 3 er et skjematisk tverrsnitt gjennom jorden under St Illiers la Ville, Frankrike og illustrerer gass innfanget over vann i en porøs sandstens antiklinal;

Figur 4 er et skjematisk planriss over et typisk arrangement av kilder og mottakere i et flerkanals, transient, elektromagnetisk målesystem over et

undergrunnsvolum med gass, brukt til å utføre en fremgangsmåte i henhold til foreliggende oppfinnelse;

5 Figur 5 viser den elektriske potensialdifferansen mellom to elektroder noen få centimeter fra hverandre, og noen få centimeter fra en 250 meter lang strøm bipolkilde;

10 Figur 6 viser normaliserte systemresponser for 8A, 16A og 32A kildestrømmer som viser ikke-lineæriteten til systemresponsen med strømmen;

Figur 7 er en typisk linjegradiant for den elektriske potensialresponsen på et trinn eller et sprang i strømmen ved kilden;

15 Figur 8 viser en enkelt, tilnærmet impulsrespons i undergrunnen for en kilde/mottaker-avstand på 1 km;

20 Figur 9 viser en felles offset-seksjon på 1 km for den deriverte av den tilnærmede undergrunnsresponsen for data vedrørende målinger ved det sted som er vist på figur 3, tatt i 1994;

Figur 10 viser en seksjon på 1 km med felles forsyning av den deriverte for den tilnærmede undergrunnsresponsen til data vedrørende målinger ved det sted som er vist på Figur 3, tatt i 1996; og

25 Figur 11 viser et snitt med felles offset over impulsresponsen til undergrunnen i 1996 subtrahert fra impulsresponsene til undergrunnen i 1994, med en offset på 1 km.

Måter å utføre oppfinnelsen på

30 Multikanals, transiente elektromagnetiske data (MTEM-data) kan innsamles på et antall forskjellige måter. Kun som et eksempel blir det beskrevet nedenfor elementer ved datainnsamlingsystemet som brukt i THERMIE-prosjektet OG/0305/92/NL-UK, og som beskrevet i [14] ovenfor. Figur 1 viser en typisk utforming av en kilde og en linje med mottakere. Kilden er en strøm i en ledning som er jordet ved hver ende, i dette

tilfellet er de to endende 250 meter fra hverandre. Mottakerne er representert som blokker på figur 1, hver med 2 kanaler, og er spredt ut over en linje med lengde 2 km som i dette tilfellet er på linje med kilden. Mottakerne måler to typer elektromagnetiske potensialrespons-differanser, og endringshastigheten til magnetfeltet.

- 5 Potensialdifferanser blir målt mellom to jordede elektroder, vanligvis 125 meter fra hverandre, mens endringshastigheten til det magnetiske feltet blir målt med ledningssløyfer, vanligvis kvadratiske sløyfer 50 m x 50 m med mange viklinger. Figur 1 viser 32 mottakere, 16 potensialdifferanse-mottakere på linje, 8 tverrliggende potensialdifferanse-mottakere og 8 sløyfer som måler endringshastigheten til
- 10 magnetfeltet. Sløyfene veksler ned langs linjen med tverrlinje-mottakerne. (Denne utformingen var resultatet av begrensinger påført av det begrensede antall to-kanals registreringsbokser og avstanden som signalene kunne overføres over fra disse enhetene til datalagringsplaten i datamaskinen). Kilden kan være posisjonert utenfor eller innenfor mottakerområdet, og i praksis kan kilden eller mottakerområdet, eller begge,
- 15 flyttes, avhengig av anvendelsesområdet. De registrerte transientresponser fra mottakerne blir hensiktsmessig lastet ned til harddisken eller et annet lagringsmedium i en datamaskin.

- Ved å velge x som linjekoordinat og y som tverrlinjekoordinat og z som den vertikale
- 20 koordinat blir det utviklet en notasjon for målingene. En mottakerposisjon kan betegnes $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z_r)$ og en kildeposisjon kan betegnes $\mathbf{x}_s = (x_s, y_s, z_s)$.

Figur 2 viser skjematisk forholdet mellom strøminnmatingen (her vist som en øyeblikksendring i polaritet) og den forventede respons. E_x er potensialdifferansen i

- 25 linje- eller x-retningen, og $\frac{\partial H_z}{\partial t}$ er endringshastigheten til den vertikale komponenten av magnetfeltet målt med en horisontal sløyfe. Fra Figur 2 kan det ses at disse responsene varierer med tid etter at strømpolariteten blir reversert ved kilden. I praksis varierer hver av disse størrelsene med kildeposisjonen og mottakerposisjonen.

- 30 Nøkkelen til løsningen på problemet er å gjenvinne impulsresponsen til jorden. Konfigurasjonen består i en elektromagnetisk kilde, for eksempel en strømbipol eller en

magnetisk bipol ved en posisjon \mathbf{x}_s , og en mottaker, for eksempel to potensial elektroder eller en magnetisk sløyfe ved en posisjon \mathbf{x}_r . Målingen av responsen kan beskrives som:

$$a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) = s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) * g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) + n_k(\mathbf{x}_r, t) \quad (1)$$

5

og den kan gjentas mange ganger. I denne ligningen betegner asterisken eller * konvolvering, og subindeks k indikerer at dette er den k. måling i en målerekke for et gitt kilde/mottaker-par; $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er kjent som systemresponsen og kan i prinsippet være forskjellig for hver måling; $g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er impulsresponsen til undergrunnen og er fast for et hvilket som helst kilde/mottaker-par, og $n_k(\mathbf{x}_r, t)$ er ukorrelet elektromagnetisk støy ved mottakeren og varierer fra måling til måling. Denne ligningen må løses for impulsresponsen til undergrunnen $g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$. For å gjøre dette må systemresponsen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ være kjent.

10

15

Under innsamlingen og behandlingen av dataene for å gjenvinne impulsresponsen til undergrunnen er det tre viktige trinn som blir formulert her for første gang. Disse er:

1. måling av systemresponsen for hver kilde/mottaker-par og i prinsippet for hver transient;
- 20 2. dekonvolvering av det målte signal for den målte systemrespons for å gjenvinne en estimert impulsrespons for undergrunnen for hver kilde/mottaker-par, og i prinsippet, for hver transient; og
3. å stable disse estimerte impulsresponsene for å forbedre signal/støy-forholdet og fremskaffe et forbedret estimat av jordens impulsrespons for hver
- 25 kilde/mottaker-par.

Disse trinnene skal nå beskrives.

30

1. Måling av systemresponsen

Systemresponsen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ skal bestemmes ved måling på feltet. Dette er avhengig av kildeposisjonen \mathbf{x}_s og posisjonen \mathbf{x}_r til mottakeren, og kan også være avhengig av nummeret k til transienten i sekvensen, spesielt hvis det er synkroniseringsproblemer. Det er flere måter som systemresponsen kan måles på. I tilfellet med den aktuelle

bipolkilde som er vist på Figur 1 kan målingen av systemresponsen for det elektriske feltet gjøres med to elektroder plassert meget nær (i størrelsesorden noen få cm) kilden, med den kjente avstand mellom dem meget liten (i størrelsesorden noen få cm), for å unngå å generere spenninger som er for store. For magnetfeltets systemrespons kan en
 5 liten horisontal sløyfe plasseres nær (i størrelsesorden noen få cm) kilden. En annen mulighet er å måle matestrømmen direkte. Det registreringssystemet som brukes til å måle systemresponsen bør fortrinnsvis ha de samme karakteristikkene som det system som brukes til å registrere målingen $a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ som beskrevet i ligning (1), og hvis registreringen er digital, bør den gjennomgås for å fjerne overlappinger. Hvis
 10 registreringssystemene ikke er identiske, må overføringsfunksjonen mellom de to være kjent slik at differanser kan elimineres. Dette blir sett på følgende måte.

Det registreringsinstrumentet som brukes til å måle systemresponsen ved kilden har en impulsrespons $r(\mathbf{x}_s, t)$ som må være kjent, mens registreringsinstrumentet som brukes til
 15 å ta målingen $a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ ved mottakeren har en respons $r(\mathbf{x}_r, t)$ som også må være kjent. Responsen $r(\mathbf{x}_r, t)$ kan så relateres til responsen $r(\mathbf{x}_s, t)$ ved hjelp av ligningen

$$r(\mathbf{x}_r, t) = r(\mathbf{x}_s, t) * f(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) \quad (2)$$

hvor asterisken eller * representerer konvolvering, og $f(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er Fourier
 20 transformasjonen av overføringsfunksjonen som vedrører de to responsene. Hvis tidsfunksjonen til inngangssignalet ved kilden er $h_k(\mathbf{x}_s, t)$ så er den systemrespons som er nødvendig for å løse ligning (1) lik

$$s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) = h_k(\mathbf{x}_s, t) * r(\mathbf{x}_r, t) \quad (3)$$

25 Systemresponsen målt med mottakeranordningen og registreringssystemet ved kilden vil være

$$s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) = h_k(\mathbf{x}_s, t) * r(\mathbf{x}_s, t) \quad (4)$$

30 Systemresponsen som er nødvendig for å løse ligning (1) blir fremskaffet fra ligningene (2), (3) og (4) som

$$s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) = s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) * f(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) \quad (5)$$

2. Dekonvolvingering

Undergrunns impulsresponsen $g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ kan estimeres, med støy, fra ligning (1) ved dekonvolvingering når den kjente impulsresponsen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er kjent. Det vil si at et

- 5 estimat $\hat{g}_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ til undergrunns impulsresponsen er fremskaffet ved dekonvolvingering av ligning (1). For eksempel kan $\hat{g}_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ fremskaffes som det minste kvadratus Wiener-filter som når det konvolveres med den kjente funksjonen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ gir den kjente funksjon $a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$. Eventuelle usikkerheter i tidsopprinnelsen til responsen blir løst automatisk ved hjelp av dette dekonvolvingeringstrinnet forutsatt at
- 10 systemresponsen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ og målingen $a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er riktig synkronisert. Synkronisering er viktig fordi tidsparameteren t har samme opprinnelse i alle fire funksjoner ($a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$, $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$, $g_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ og $n_k(\mathbf{x}_r, t)$) i ligning (1).

3. Stabling

- 15 For å forbedre signal/støy-forholdet ved å bruke en rekke målinger hvor k varierer fra for eksempel 1 til n kan et bedre estimat av $g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ finnes ved stabling. Det vil si at det forbedrede estimat er

$$\bar{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \hat{g}_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t). \quad (6)$$

- 20 Etterfølgende behandling av de estimerte impulsresponser $\bar{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ og visning av resultatene for forskjellige kilde/mottaker-par kan bruke mange av de fremgangsmåter som er vanlig brukt for seismiske undersøkelsesdata.

- Hvis systemresponsen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er identisk for alle n målinger tatt for det gitte
- 25 kilde/mottaker-par, kan stablingen gjøres først og dekonvolvingeringen etterpå.

Impulsresponsen til undergrunnen $g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$ er vanligvis bare noen få sekunder eller titalls millisekunder i varighet. I prinsippet kan derfor tusenvis av gjentatte målinger av responsen tas på noen få minutter.

30

Oppfinnelsen er illustrert i det følgende ikke-begrensede eksempel.

- Innenfor Europakommisjonens THERMIE-prosjekt OG/0305/92/NL-UK [14], ble MTEM-data fremskaffet i 1994 og 1996 over et gasslagrings reservoar ved St. Illiers la Ville i Frankrike. Figur 3 viser et skjematisk snitt gjennom det underjordiske gasslagrings reservoaret og viser reservoaret og overvåkningsbrønner. Figur 4 viser en plan over MTEM-profilen i relasjon til kanten av den underjordiske "gassboblen". Det utstyret som ble brukt til å registrere responsene $a_k(x_s, x_r, t)$ bestod av 16 to-kanals TEAMEX-bokser fremstilt av Dutsch Montan Technologie. På det tidspunktet da dataene ble innsamlet, var det ikke innsett at det var nødvendig å registrere systemresponsen for hvert kilde/mottaker-par. Med dette utstyret ville det i virkeligheten ha vært umulig å måle systemresponsen riktig, fordi lavpassfilteret var utilstrekkelige til å hindre overlapping av dataene ved det samplingsintervallet på 1 ms som ble brukt under registreringen.
- Kildeinnmatingen til undergrunnen var hovedsakelig en endring i polaritet av en strøm på omkring 10 amper, produsert av en generator og en Zonge-sender i en ledning med lengde 250 meter, jordet ved hver ende. I virkeligheten var kildetidsfunksjonen ikke et perfekt trinn, og det var små svingingen som kan ses på de få overlappende målinger av systemresponsen som ble tatt i 1996. En av disse kan ses på Figur 5. Det ble bemerket at systemoscillasjonene varierte med strømnivået som igjen varierte med kildeposisjonen. Figur 6 viser en forstørrelse av den målte systemresponsen for tre forskjellige strømnivåer normalisert til den maksimale verdi. Det kan ses at svingingene eller oscillasjonene varierer med strømnivået. I ettetid kan vi med andre ord se at systemresponsen i prinsippet var forskjellig for hver kilde/mottaker-par og burde ha vært målt. I virkeligheten kunne vi ikke ha gjort denne målingen med det tilgjengelige utstyr.
- En typisk måling $a_k(x_s, x_r, t)$ er vist på Figur 7.
- Dekonvolvingstrinnet 2 er umulig å anvende på disse dataene fordi systemresponsen for hvert kilde/mottaker-par ikke ble målt (trinn 1). For å skape et tilnærmet estimat av impuls responsfunksjonen, argumenterer vi med at responsen $a_k(x_s, x_r, t)$ er tilnærmet responsen til et trinn:

$$a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) \approx H(t) * g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t), \quad (7)$$

hvor $H(t)$ er Heaviside-funksjonen eller trinnfunksjonen. Denne tilnærmelsen ser bort fra de oscillasjoner som er observert i systemresponsen som er vist på Figur 6.

5 Differensiering av begge sider av ligning (7) gir

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)}{\partial t} &\approx \frac{\partial H(t)}{\partial t} * g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) \\ &\approx \delta(t) * g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t) \\ &\approx g(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t). \end{aligned} \quad (8)$$

Det vil si at den deriverte av den målte respons er tilnærmet lik impulsresponsen til undergrunnen. Disse estimerte impulsresponsene hadde synkroniseringsfeil i
 10 størrelsesordenen ± 3 ms. Disse feilene var en feil ved datainnsamlingssystemet, men ville ha blitt eliminert hvis vi hadde vært i stand til å måle systemresponsen som nevnt ovenfor. I virkeligheten kan tidsfeilene estimeres fordi den estimerte impulsrespons har en meget skarp topp ved begynnelsen som bør ankomme samtidig for alle responser for det samme kilde/mottaker-par. Figur 8 viser et estimat av impulsresponsen for
 15 undergrunnen etter stabling av de tidskorrigererte undergrunns impulsresponser for et kilde/mottaker-par.

Figur 9 viser et snitt med felles forskyvning for den tidsderiverte av den estimerte undergrunns impulsrespons for dataene fra 1994, hvor kilde/mottaker-avstanden er fast,
 20 den horisontale skala er posisjonen til midtpunktet mellom kilden og mottakeren, og den vertikale skala er tid. Virkningen av den økte resistivitet over det gassfylte reservoar kan tydelig ses. Figur 10 viser det tilsvarende snitt for dataene fra 1996. Igjen kan virkningen av det resistive gassfilterreservoar tydelig ses. Det var en svak bevegelse av gass/vann-innholdet mellom oktober 1994 da reservoaret var fullt, og august 1996 da det
 25 var mindre fullt. Ved å subtrahere impulsresponsene fra undergrunnen i 1996 og 1994, fås differansen i respons, og viser hvordan bergarts resistiviteten er endret på grunn av endringen i fluidinnhold. Figur 11 viser et snitt med felles forskyvning for disse differansene, og viser klart at det var mer gass i den sterkt fallende, søndre del av reservoaret i 1994.

Med denne tilnæringsanalysen har vi vist at det er mulig (1) å detektere og lokalisere forekomsten av hydrokarboner ved hjelp av MTEM-metoden og (2) å overvåke bevegelsen av fluidene i reservoaret. Gitt alle de tilnærmelser som ble gjort for å

5 fremskaffe dette resultatet, er det klart at meget bedre resulater ville bli oppnådd ved å benytte fremgangsmåten for datainnsamling og behandling i henhold til foreliggende oppfinnelse.

Dataene bør fortrinnsvis registreres og behandles digitalt i en datamaskin, enten i sann

10 tid eller i ettertid for å frembringe en undergrunns representasjon av resistivitetskontrastene.

MTEM-målingene er tatt på eller nær jordoverflaten som innbefatter havbunnen. I tilfellet av målinger ved eller nær havbunnen, kan målinger tas i sjøen nær den aktuelle

15 havbunnen på bakgrunn av den ledende beskaffenheten til sjøvannet.

Det skal bemerkes på bakgrunn av den ovenfor gitte beskrivelse at en nøkkel til oppfinnelsen er målingen og dekonvolvingen av systemresponsen $s_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$, innbefattende kilde/mottaker-synkronisering for hver målt transientrespons $a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$

20 som definert i ligning (1). Dette innbefatter en hvilken som helst tilnærkelse til dette, slik som beskrevet ovenfor under henvisning til tidligere fremskaffede data hvor det var en tilnærkelse av dekonvolvingen ved differensiering av $a_k(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r, t)$, hvor synkroniseringsfeilene som ble funnet senere ble korrigert.

25 Oppfinnelsen angår også en anordning for kartlegging av undergrunns resistivitetskontraster og et system for kartlegging av undergrunns resistivitetskontraster.

Industriell anvendbarhet

30 Oppfinnelsen kan anvendes for lokalisering og identifisering av undergrunnsavsetninger av fluider slik som hydrokarboner og vann.

P a t e n t k r a v

1. Fremgangsmåte for kartlegging av undergrunns resistivitetskontraster,
k a r a k t e r i s e r t v e d

- 5 å ta multikanals, transiente elektromagnetiske (MTEM) målinger ved å benytte minst en kilde (10), og minst en mottaker (12) for å måle den resulterende undergrunnsrespons (30), måle systemresponsen (20) for det ene eller hvert kilde/mottaker-par (10,12) og for hver transient (14),
dekonvolvare det målte signalet (30) for den målte systemresponsen (20) fra det ene eller
10 de flere kilde/mottaker-par (10,12) for å finne den tilsvarende elektromagnetiske impulsresponsen (32) til undergrunnen,
og å fremvise slike impulsresponsen eller en eventuell transformasjon av slike impulsresponsen for å frembringe en undergrunnsrepresentasjon (34) av resistivitetskontrastene.

15

2. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
hvor impulsresponsen (32) til undergrunnen blir fremskaffet fra ligningen

$$a_k(x_s, x_r, t) = s_k(x_s, x_r, t) * g(x_s, x_r, t) + n_k(x_r, t)$$

20

hvor k indikerer den k . måling i en målerekke for et gitt kilde/mottaker-par, $a_k(x_s, x_r, t)$ er den målte transientrespons for et gitt kilde/mottaker-par for MTEM-målingene, $*$ betegner konvolvering, $s_k(x_s, x_r, t)$ er systemresponsen, $g(x_s, x_r, t)$ er impulsresponsen til undergrunnen for et gitt kilde/mottaker-par og $n_k(x_r, t)$ er ukorrelet, elektromagnetisk
25 støy ved mottakeren.

3. Fremgangsmåte ifølge krav 2,

hvor kilden (10) omfatter en strøm i en wire jordet i hver ende,
og mottakeren (12) omfatter en anordning for å måle potensialdifferansen mellom to
30 jordede elektroder.

4. Fremgangsmåte ifølge krav 2,

hvor kilden (10) omfatter en strøm i en wire jordet i hver ende,
og mottakeren (12) omfatter en anordning for å måle strømmen induisert i minst en horisontal sløyfe.

- 5 5. Fremgangsmåte ifølge krav 2,
hvor kilden (10) omfatter minst en strømsløyfe,
og hvor mottakeren (12) omfatter en anordning for å måle potensialdifferansen mellom to jordede elektroder.
- 10 6. Fremgangsmåte ifølge krav 2,
hvor nevnte kilde (10) omfatter minst en strømsløyfe
og mottakeren (12) omfatter en anordning for å måle strømmen induisert i minst en mottakersløyfe.
- 15 7. Fremgangsmåte ifølge kravene 2,
hvor nevnte kilde (10) omfatter en strøm i en wire jordet i hver ende og systemresponsen er målt med en anordning, for eksempel en strømmåler for å måle strømmen i wiren.
- 20 8. Framgangsmåte ifølge krav 2,
hvor nevnte kilde (10) omfatter mist en strømsløyfe og systemresponsen er målt med en anordning, for eksempel en strømmåler for å måle strømmen i sløyfen.
9. Fremgangsmåte ifølge noen av kravene 2-8,
25 hvor registreringssystem (13) som brukes til å måle systemresponsen (20) har de samme karakteristikkene som det system som brukes til å registrere målingen $a_k(x_s, x_r, t)$.
10. Fremgangsmåte ifølge noen av kravene 2-8,
hvor registreringssystemet (13) som brukes til å måle systemresponsen (20) har
30 karakteristikkene som er forskjellige fra det registreringssystemet som brukes til å registrere målingen $a_k(x_s, x_r, t)$ og hvor disse differansene blir eliminert ved å benytte Fourier-transformen til overføringsfunksjonen mellom de to registreringssystemene.
11. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 2-10,

hvor et estimat av undergrunnens impulsrespons (32) med støy blir fremskaffet ved å dekonvolvare den nevnte ligning.

12. En fremgangsmåte ifølge et av kravene 2 – 10,

5 hvor transientene (30) er stablet

og et estimat av undergrunnens impulsrespons (32) blir fremskaffet ved å dekonvolvare systemresponsen.

13. Fremgangsmåte ifølge krav 11,

10 hvor estimatet av undergrunnens impulsrespons (32) blir forbedret ved å stable de estimerte impulsresponsen.

14. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 2-13,

hvor den målte systemrespons (20) og de tilsvarende målte transienter (30) blir

15 synkronisert.

15. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 2-13,

hvor en eventuell forskjell i tidsopprinnelse mellom den målte systemrespons (20) og den tilsvarende målte transient (30) blir målt og kompensert for.

20

16. Fremgangsmåte ifølge et av de foregående krav,

hvor MTEM-målingene blir tatt på jordoverflaten.

17. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 1-15,

25 hvor MTEM-målingene blir tatt ved eller nær en havbunn på jordens overflate.

18. Framgangsmåte ifølge et av de foregående krav,

hvor systemresponsen (20) er omtrentlig et steg

og en tilnærming til dekonvolvingen er gjort ved differensiering.

30

19. Anordning for å kartlegge resistivitetskontraster i undergrunnen,

k a r a k t - e r i s e r t v e d

anordninger for å ta multikanals, transiente, elektromagnetiske (MTEM) målinger,

omfattende minst en kilde (10) , og minst en mottaker (12) for å måle den resulterende

undergrunnsrespons (30), anordninger for å måle systemresponsen (20) for den eller hvert kilde/mottaker-par (10,12) og for hver transient (14),
og prosesseringsanordninger (13) for dekonvolving av det målte signalet (30) for den målte systemresponsen (20) fra den ene eller de flere kilde/mottaker-par (10,12) for å
5 finne den tilsvarende elektromagnetiske impulsrespons (32) for undergrunnen,
og visningsanordninger (13) for å fremvise slike impulsresponsen eller en eventuell transformasjon av slike impulsresponsen, for å frembringe en undergrunns representasjon (34) av resistivitetskontraster.

1/10

FIG. 1

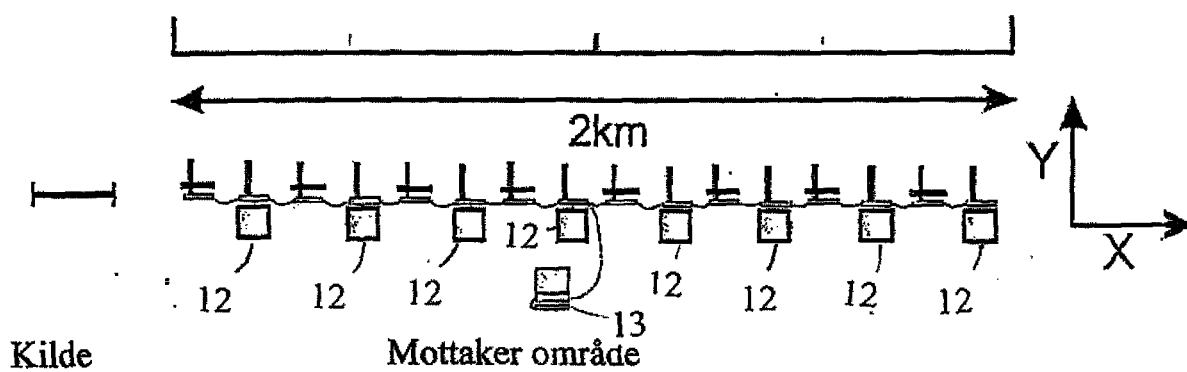


FIG. 2a

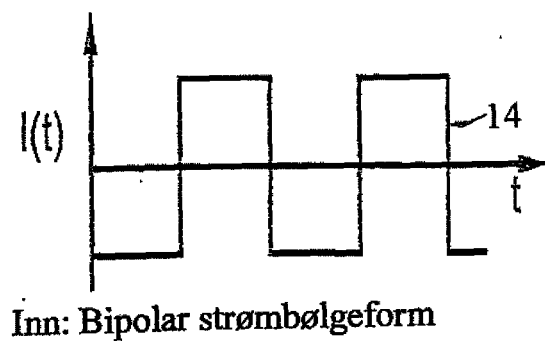
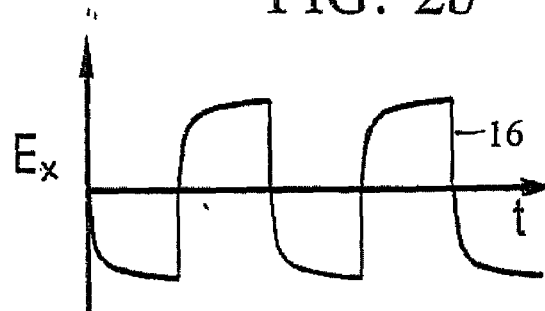


FIG. 2b



Ut: Registrert transient
respons

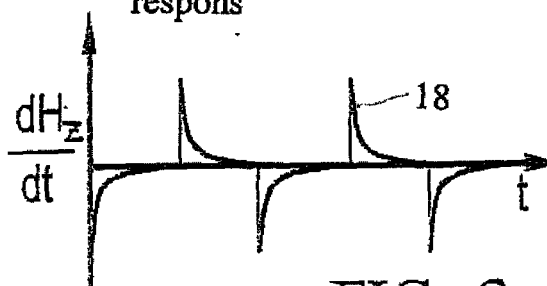
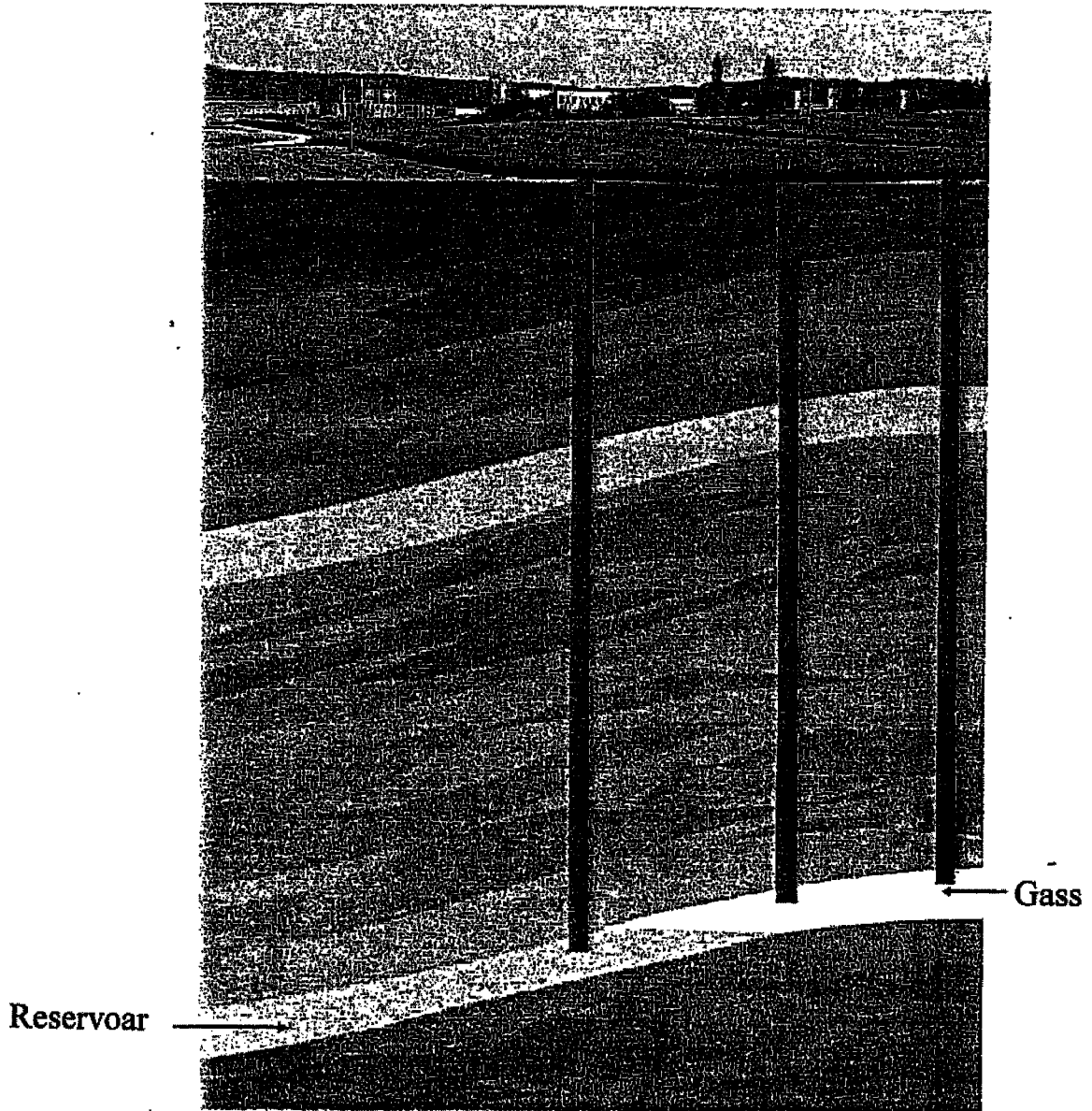


FIG. 2c

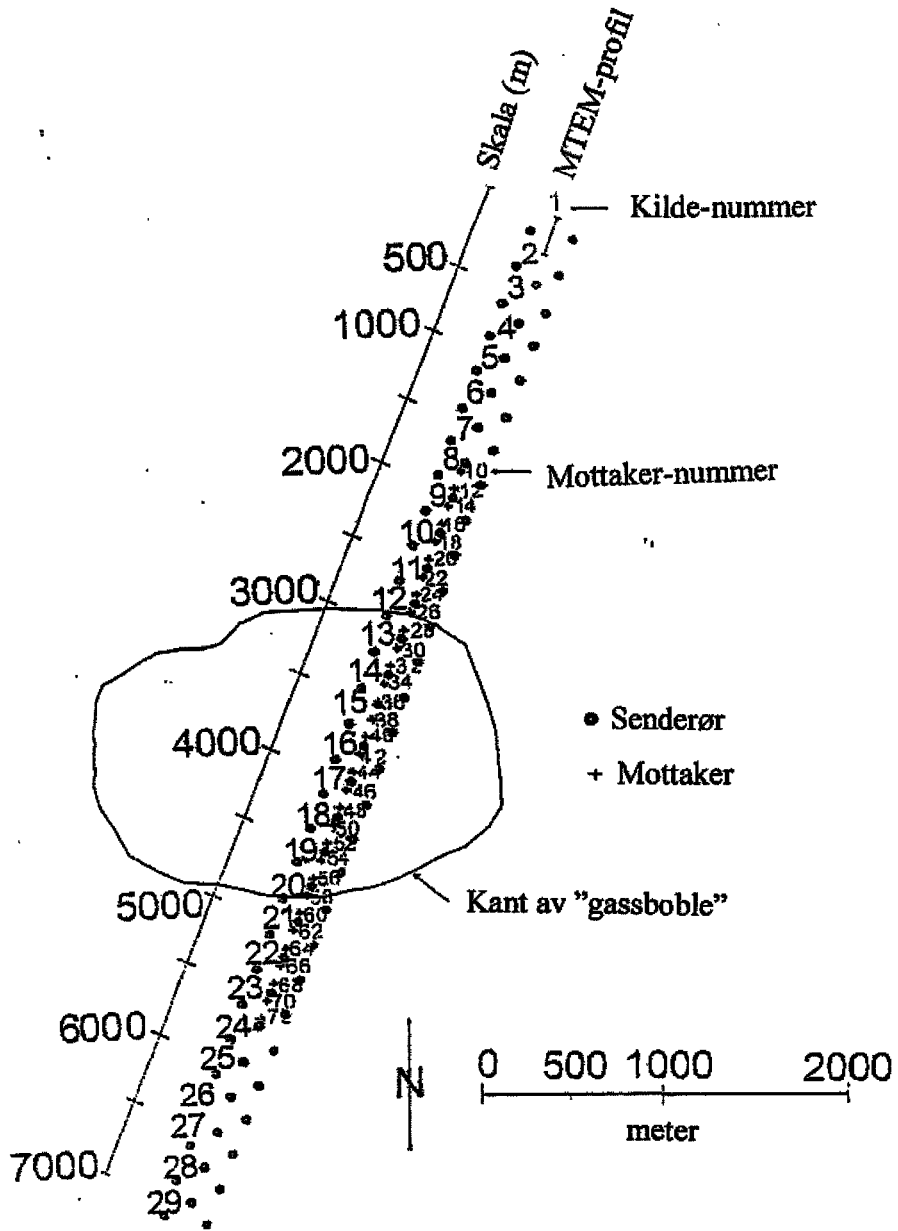
2/10

FIG. 3



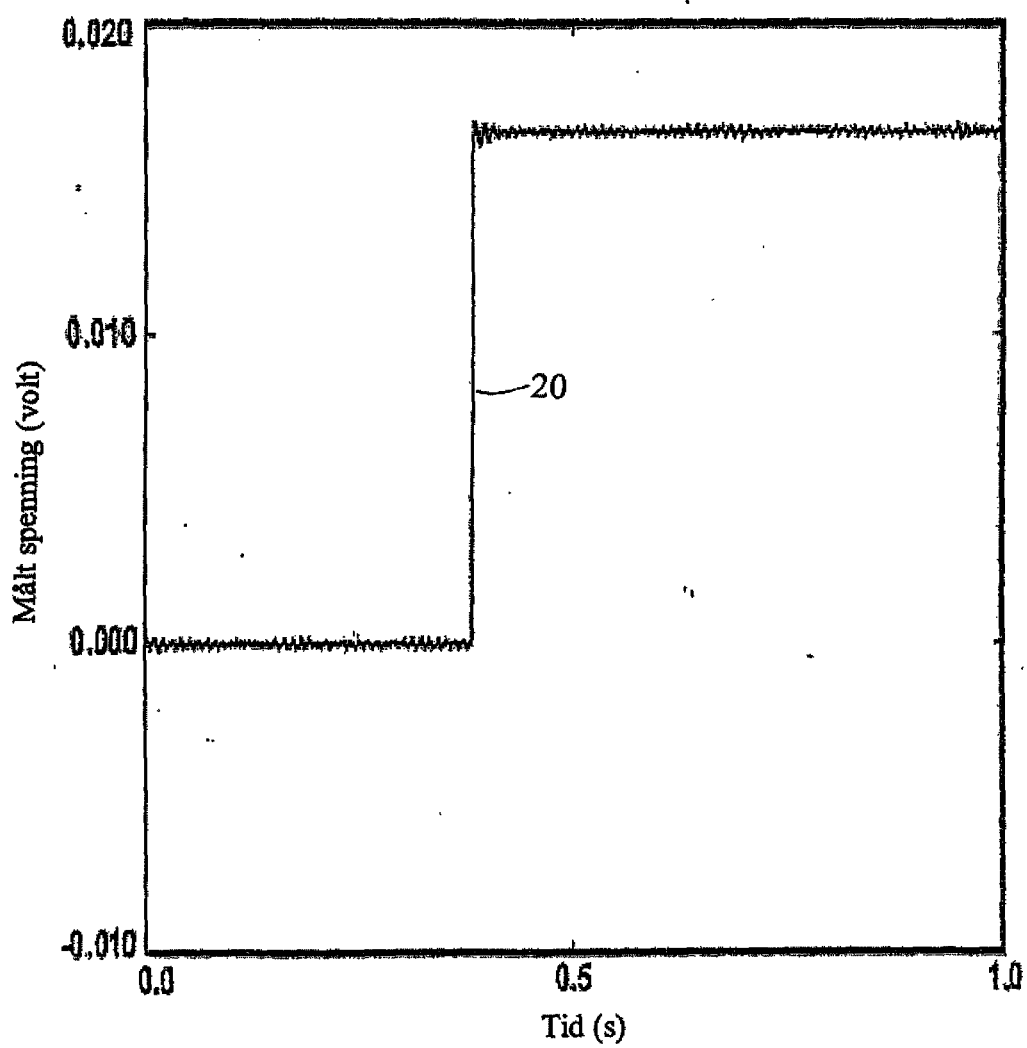
3/10

FIG. 4



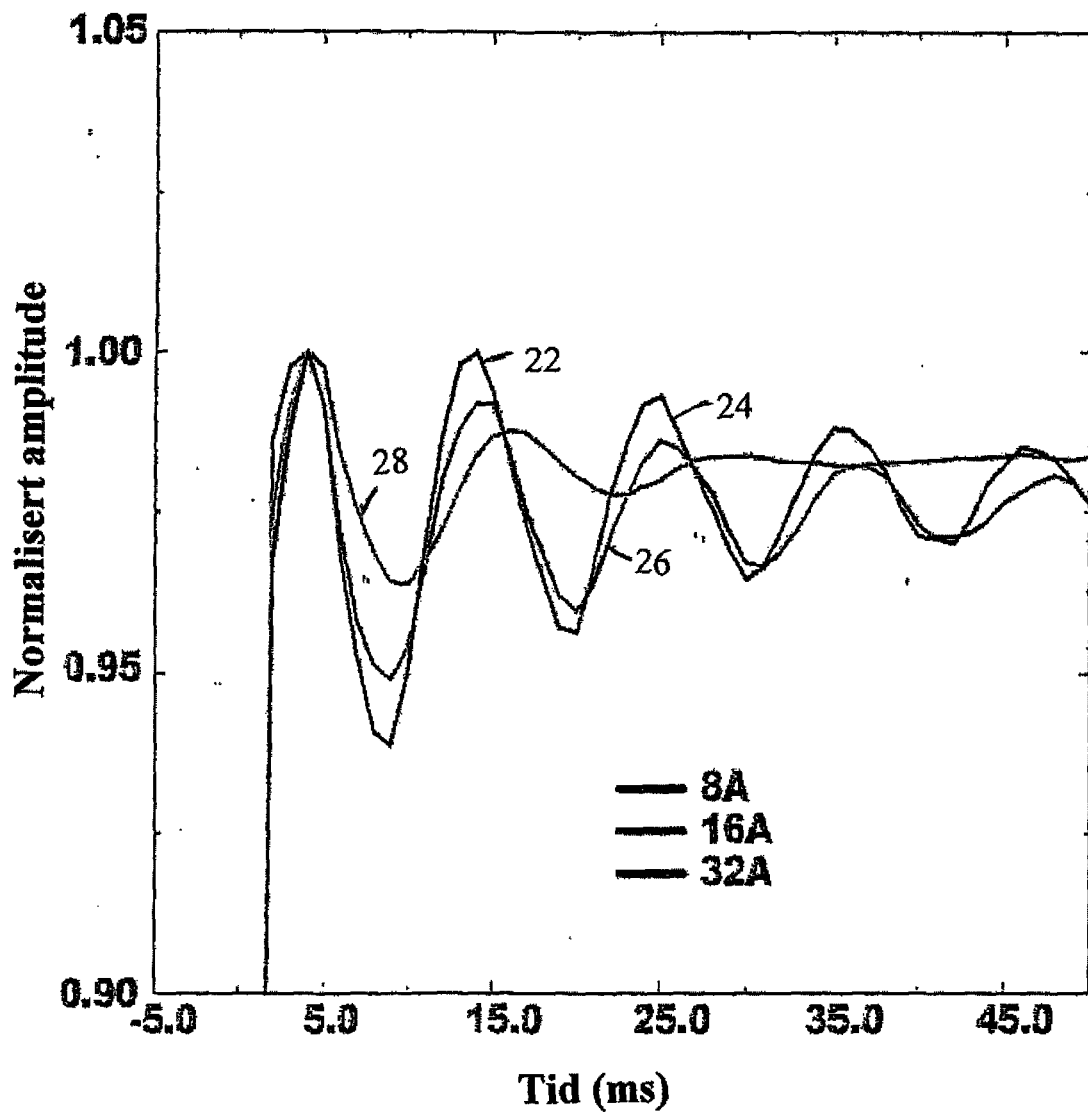
4/10

FIG. 5



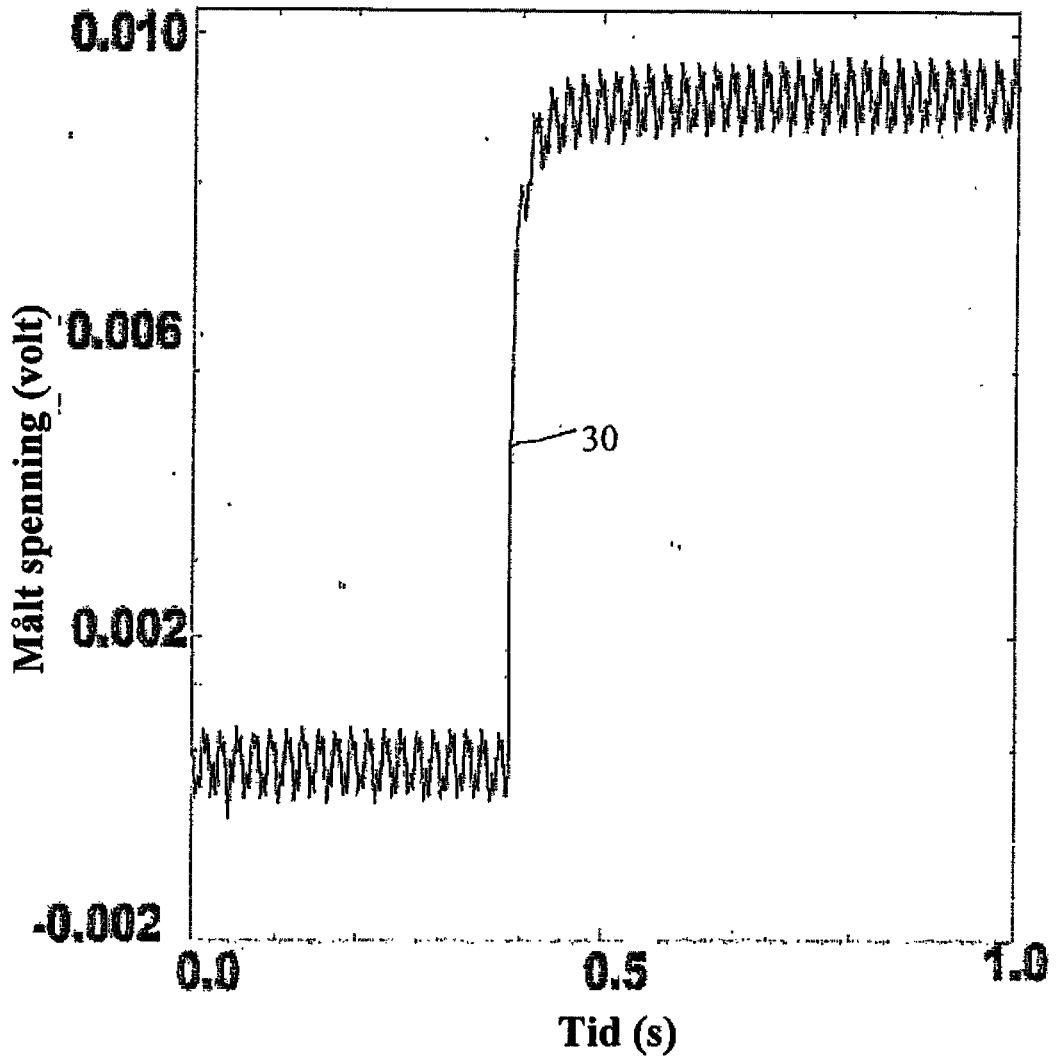
5/10

FIG. 6



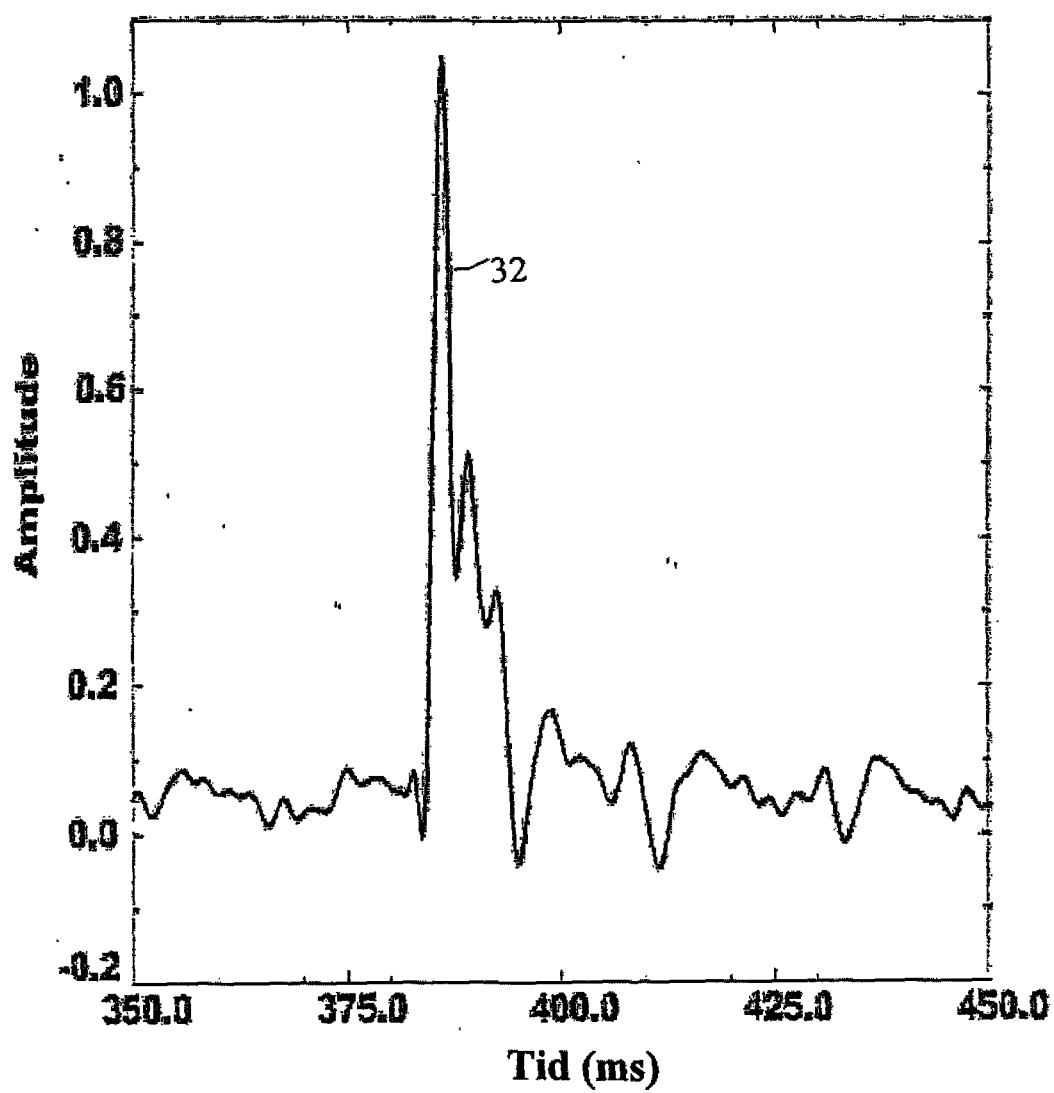
6/10

FIG. 7



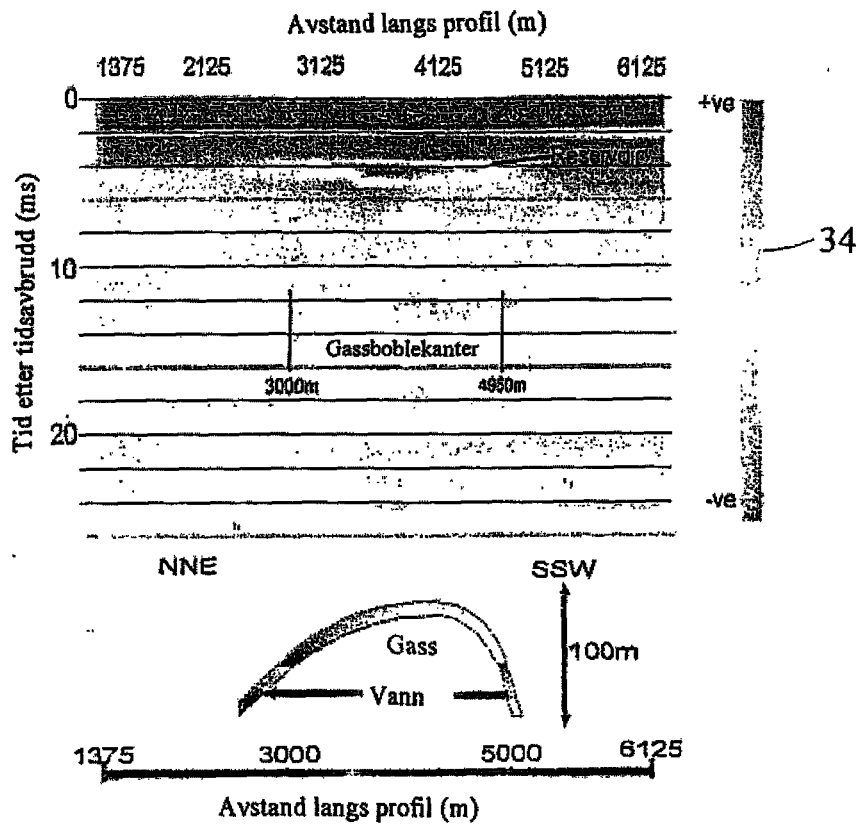
7/10

FIG. 8



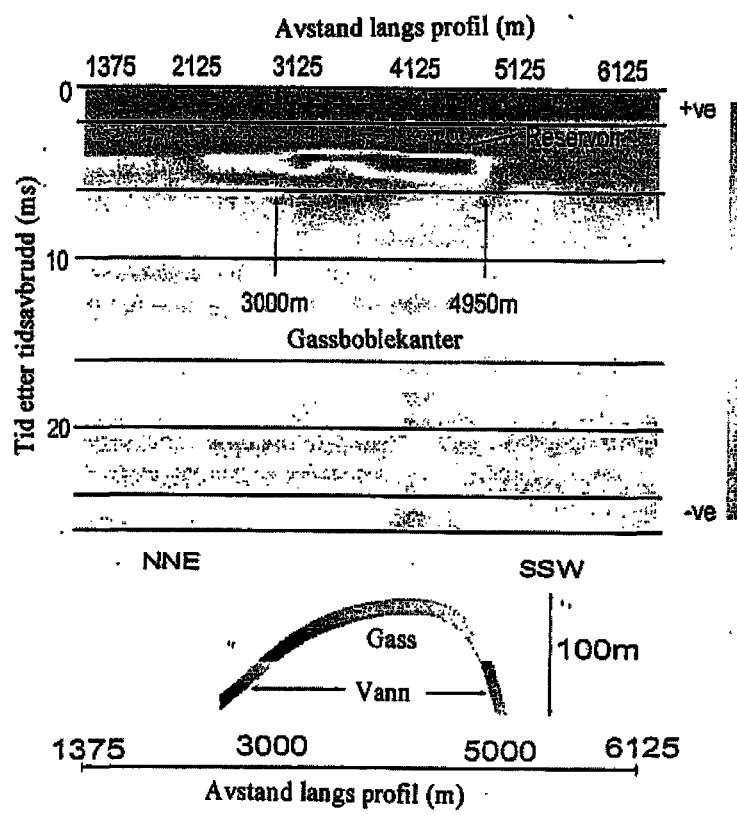
8/10

FIG. 9



9/10

FIG. 10



10/10

FIG. 11

