



(12) PATENT

(19) NO

(11) 339003

(13) B1

NORGE

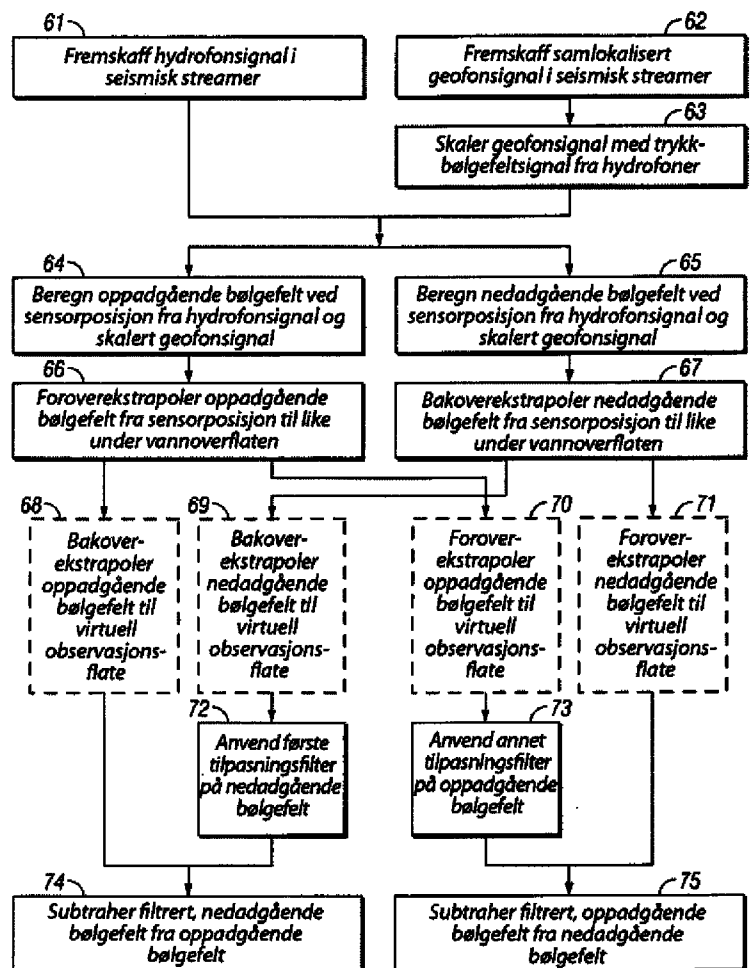
(51) Int Cl.
G01V 1/36 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20074893	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2007.09.26	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2007.09.26	(30)	Prioritet	2006.10.11, US, 11/546,448
(41)	Alm.tilgj	2008.04.14			
(45)	Meddelt	2016.11.07			
(73)	Innehaver	PGS Geophysical AS, Strandveien 4, 1366 LYSAKER, Norge			
(72)	Oppfinner	Walter Sollner, Huitfeldtsgate 8B, 0253 OSLO, Norge Xiao-Ping Li, Dønskiveien 74E, 1346 GJETTUM, Norge Martin Widmaier, Sorgenfrigata 36A, 0365 OSLO, Norge			
(74)	Fullmektig	Acapo AS, Postboks 1880 Nordnes, 5817 BERGEN, Norge			

(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte for demping av støy i marinseismiske lyttekabler
(56)	Anførte publikasjoner	US 2006050611 A1 US 2005195686 A1
(57)	Sammendrag	

Signaler detektert av partikkelbevegelsessensorer i en slept, marin seismisk dobbelt-sensorstreamer blir skalert for å passe til signaler detektert av trykksensorer i streameren. Trykksensorsignalene og de skalerte partikkelbevegelsessensorsignalene blir kombinert for å generere oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponenter. De oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene blir ekstrapolert til en posisjon like under en vannoverflate. Et første tilpasningsfilter blir anvendt på den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten. Den filtrerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten blir subtrahert fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten for å generere en oppadgående trykkbølgefeltkomponent med dempet partikkelbevegelsessensor-støy. Et annet tilpasningsfilter blir anvendt på den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten. Den filtrerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten blir subtrahert fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten for å generere en nedadgående trykkbølgefeltkomponent med dempet partikkelbevegelsessensor-støy.



Bakgrunn for oppfinnelsen

1. Teknisk område

Oppfinnelsen angår generelt det området som gjelder geofysisk prospektering, og spesielt til det området som angår
5 behandling av maritime seismiske data. Mer spesielt angår oppfinnelsen støydempning i dobbeltsensorer slept i marine seismiske streamere.

2. Beskrivelse av beslektet teknikk

10 I olje- og gassindustrien er geofysisk prospektering vanligvis brukt til å bidra til leting etter og evaluering av undergrunnsformasjoner. Geofysiske prospekteringsteknikker gir kunnskap om undergrunnsstrukturen til jorden, som er nyttig
15 mineralressurser, spesielt hydrokarbonavsetninger slik som olje og naturgass. En velkjent teknikk for geofysisk prospektering er en seismisk undersøkelse. Ved en landbasert seismisk undersøkelse blir et seismisk signal generert på eller nær jordens overflate og forplanter seg så nedover inn i
20 jordens undergrunn. Ved en marin seismisk undersøkelse vil det seismiske signalet først forplante seg nedover gjennom en vannmasse som ligger over jordens undergrunn.

Seismiske energikilder blir brukt til å generere det seismiske signalet som etter forplantning inn i jorden, i det
25 minste delvis blir reflektert av seismiske undergrunnsreflektorer. Slike seismiske generatorer er vanligvis grenseflater mellom undergrunnsformasjoner som har forskjellige egenskaper, spesielt bølgehastighet og bergartsdensitet, som fører til forskjeller i akustisk impedans ved
30 grenseflatene. Refleksjonene blir detektert ved hjelp av seismiske sensorer på eller nær jordoverflaten, i en overliggende vannmasse eller ved kjente dybder i borehull. De

resulterende seismiske dataene blir registrert og behandlet for å gi informasjon vedrørende den geologiske strukturene og egenskapene til undergrunnsformasjonene og deres potensielle hydrokarboninnhold.

5 Passende energikilder for seismiske undersøkelser kan innbefatte eksplosiver eller vibratorer på land og luftkanoner eller marine vibratorer i vann. Passende typer seismiske sensorer kan innbefatte partikkelbevegelsessensorer ved landundersøkelser og vanntrykkssensorer i marine
10 undersøkelser. Partikkelbevegelsessensorer er typisk partikkelhastighetssensorer, men partikkelforskyvnings-, partikkelakselerasjons- eller trykkgradientsensorer kan brukes i stedet for partikkelhastighetssensorer. Partikkelhastighetssensorer er vanligvis kjent på området som geofoner,
15 og vanntrykkssensorer er vanligvis kjent på området som hydrofoner. Både seismiske kilder og seismiske sensorer kan utplasseres for seg selv, eller mer vanlig i grupper.

I en typisk marin seismisk undersøkelse seiler et seismisk undersøkelsesfartøy på vannoverflaten, vanligvis med
20 omkring 5 knop, og inneholder seismisk innsamlingsutstyr slik som navigasjonskontroll, seismisk kildestyring, seismisk sensorstyring og registreringsutstyr. Det seismiske kildestyringsutstyret får en seismisk kilde som slepes i vannmassen av det seismiske fartøyet, til å bli aktivert ved
25 valgte tidspunkter. Seismiske streamere, også kalt seismiske slepekabler, er langstrakte, kabellignede konstruksjoner som slepes i vannmassen av det seismiske undersøkelsesfartøyet som sleper den seismiske kilden, eller av et annet seismisk
undersøkesskip. Et antall seismiske streamere blir typisk
30 slept bak et seismisk fartøy. De seismiske streamerne inneholder sensorer for å detektere de reflekterte bølgefeltene som igangsettes av den seismiske kilden og som blir reflektert fra reflekterende grenseflater. De seismiske

streamerne inneholder konvensjonelt trykksensorer slik som hydrofoner, men seismiske streamere er blitt foreslått som inneholder vannpartikkelhastighetssensorer slik som geofoner eller partikkelakselerasjonssensorer, slik som akselerometere, 5 i tillegg til hydrofoner. Trykksensorene og partikkelbevegelsessensorene kan være utplassert nær hverandre, plassert på samme sted i par eller gruppepar langs en seismisk kabel.

US-patentsøknad nr. 11/021 919 med tittel "Motion Sensors 10 in a Towed Streamer", inngitt 22. desember 2004, og som er overdratt til et søsterselskap til søkeren av foreliggende oppfinnelse, beskriver et eksempel på partikkelbevegelsessensorer egnet for å bli plassert i en marin, seismisk streamerkombinasjon med trykksensorer.

15 Kildene og streamerne er neddykket i vannet, med de seismiske kildene vanligvis ved en dybde på 5-15 meter under vannoverflaten, og de seismiske streamerne vanligvis ved en dybde på 5-40 meter. Seismiske datainnsamlingsoperasjoner er etter hvert blitt mer komplekse ettersom flere kilder og 20 streamere blir utplassert. Disse kilde- og streamersystemene blir typisk posisjonert bak og til siden for linjen eller bevegelsen av det seismiske fartøyet. Posisjonsstyringsanordninger slik som dybderegulatorer, paravaner, og endebøyer blir brukt til å regulere og posisjonere bevegelsen av de 25 seismiske streamerne.

Alternativt blir de seismiske kablene holdt ved en hovedsakelig stasjonær posisjon i en vannmasse, enten flytende ved en valgt dybde eller liggende på bunnen av vannmassen. I dette alternativet kan kilden slepes bak et fartøy for å 30 generere seismisk energi ved varierende posisjoner, eller kilden kan også holdes i en stasjonær posisjon.

Registrerte seismiske data inneholder signaler uttrykt ved de nyttige, primære refleksjonene så vel som mye støy. Den

registrerte støyen kan være koherent (dvs. at den virker som en vandrebølge) eller tilfeldig. Eksempler på koherent støy innbefatter bakkerulling, ledede bølger, sidespredt støy, kabelstøy, luftbølger, kraftledninger og multipler. Multipler er spesielt sterke i forhold til primærrefleksjoner i marine seismiske undersøkelser på grunn av vann/jord- og spesielt luft/vann-grenseflatene er sterke seismiske reflektorer på grunn av de høye akustiske impedanskontrastene. Eksempler på tilfeldig støy innbefatter dårlig innsatte geofoner, vindbevegelse, transiente bevegelser i nærheten av kabelen, bølgebevegelse i vannet som forårsaker at kablene vibrerer og elektrisk støy fra registreringsinstrumenter. Seismiske undersøkelser som anvender slepte marine seismiske streamere har et stort antall støykilder å håndtere.

Marine seismiske streamere er typisk inndelt i streamerseksjoner med en lengde på omkring 100 meter, og kan strekke seg til en lengde på tusenvis av meter. En typisk streamerseksjon innbefatter en ytre kappe, styrke- eller armeringsorganer, avstandsholdere, en elektrisk ledningsbunt og koblingsanordninger. Den ytre kappen beskytter innsiden av streamerseksjonen fra vanninntrengning. Styrkeorganene, vanligvis to eller flere, ført langs lengden av hver streamerseksjon fra endekoblingsanordning til endekoblingsanordning, tilveiebringer aksial mekanisk styrke. Avstandsholderne opprettholder den sylindriske formen til streamerseksjonen. Den elektriske ledningsbunten strekker seg også over lengden av hver streamerseksjon og innbefatter elektriske kraftledere og elektriske datakommunikasjonsledninger. I noen tilfeller er optiske forbindelser for datakommunikasjon innbefattet i ledningsbunten. Koblingsanordninger ved endene av hver streamerseksjon forbinder seksjonen mekanisk, elektrisk eller optisk med tilstøtende seksjoner og dermed til slutt til det seismiske slepefartøyet.

Den ytre kappen og styrkeorganene er typisk konstruert for å ha en rett og jevn tykkelse over lengden av streamerseksjonen, mens de ikke blir utsatt for ytre påkjenninger. Den elektriske ledningsbunten er på den annen side vanligvis konstruert for å kunne deformeres slik at den lett kan bøye seg når streamerkabelen selv blir bøyd når den endrer retning i vannet eller når den blir utsatt fra eller hentet inn på streamervinsjen for lagring på undersøkelsesfartøyet.

Sensorer, typisk hydrofoner eller grupper av hydrofoner, sammen med geofoner eller grupper av geofoner er plassert inne i streameren. Hydrofonene registrerer trykkbølgefeltet og geofonene registrer partikkelhastighetsbølgefeltet. Sensorene har noen ganger blitt plassert inne i avstandsholderne for beskyttelse. Avstanden mellom avstandsholderne er normalt omkring 0,7 meter. En gruppe sensorer, som typisk omfatter 8 eller 16 hydrofoner og samlokaliserte geofoner, strekker seg normalt over en lengde på henholdsvis omkring 6,25 meter eller 12,5 meter. Disse to lengdene tillater henholdsvis 16 eller 8 grupper i en standardseksjon.

Innsiden av de seismiske streamerne er typisk fylt med et kjernemateriale for å tilveiebringe oppdrift og ønskede akustiske egenskaper. I mange år er seismiske streamere blitt fylt med et fluidkjernemateriale. En ulempe ved å bruke fluidfylte streamerseksjoner er den støy som genereres ved vibrasjoner når streameren blir slept gjennom vannet. Disse vibrasjonene utvikler interne trykkbølger som forplanter gjennom fluidet i streamerseksjonene, som ofte kalles "utbulingsbølger" eller "pustebølger".

Flere løsninger er blitt anvendt for å redusere problemet med utbulingsbølgestøy i fluidfylte streamerseksjoner. En løsning er f.eks. anvendelse av strekkseksjoner ved den fremre og bakre ende av den seismiske streameren. En annen løsning er anvendelse av filtre som kutter ved lav frekvens. En annen

løsning er å introdusere kammerblokker i seksjonene for å hindre de vibrasjonsfrembrakte utbulingsbølgene fra å forplante seg kontinuerlig langs streameren. En annen løsning er å innføre skum med åpne celler i det indre hulrommet i streamerseksjonen. Skummet med åpne celler begrenser strømmingen av fluidfyllingsmaterialet som reaksjon på transient trykkendring og får energien til å bli spredt inn i den ytre kappen og skummet over en kortere avstand. Nok en annen løsning er å eliminere fluidet fra streamerseksjonene slik at det ikke finnes noe medium som utbulingsbølger kan utvikle seg i. Denne løsningen er eksemplifisert ved bruk av streamerseksjoner fylt med et fast kjernemateriale eller et mykere fast materiale i stedet for et fluid. I ethvert materiale som er av fast type, vil imidlertid noen skjærbølger bli utviklet, noe som kan øke den støyen som detekteres ved hjelp av både hydrofonene og geofonene. Skjærbølger kan ikke utvikle seg i et fluidfyllingsmateriale siden fluider ikke har noen skjærmodulus. Mange konvensjonelle, fastkjernematerialer er i tillegg ikke akustisk transparente for de ønskede trykkbølgene.

Mekanisk energi kan forplante seg i en "hurtig" modus, typisk som en longitudinal bølge langs styrkeorganene ved omkring 1100-1300 meter/sekund eller i en "langsom" modus, typisk som en transversal bølge, ved omkring 20-60 meter/sekund. Denne hurtige modusen er den dominerende mekaniske støyen som påtreffes med hydrofoner, mens den langsomme modusen er den dominerende mekaniske støyen som påtreffes med geofoner.

En annen løsning for å ta hensyn til støyproblemet er å kombinere flere hydrofoner i en gruppe (også kjent som en oppstilling) for å dempe en bølge som beveger seg langsomt. Et antall hydrofoner er posisjonert med lik avstand mellom eller på begge sider av avstandsholderne slik at par med hydrofoner

avføler like og motsatte trykkendringer. Summering av hydrofonsignalene fra en gruppe kan så kansellere noe av støyen.

5 Mange av de konvensjonelle fremgangsmåtene anvender bare seismisk behandling av trykksensordata. Trykksensordataene har imidlertid spektrale kjerv eller hakk forårsaket av vannoverflaterefleksjoner, vanligvis referert til som havoverflatespøkelsesekko. Disse spektrale kjervene er ofte i det seismiske innsamlingsfrekvensbåndet. Den brukbare delen av 10 trykksensordataene er derfor frekvensbånd begrenset bort fra de spektrale kjervene og kan ikke dekke hele det seismiske innsamlingsfrekvensbåndet. Denne begrensningen kan unngås ved å bruke både trykksensorer og partikkelbevegelsessensorer i en "dobbeltsensor"-streamer.

15 L. Amundsen og A. Reitan beskriver i sin artikkel "Decomposition og multicomponent sea-floor data into upgoing and downgoing P- and S-waves", *Geophysics*, Vol. 60, nr. 2, mars/april 1995, p. 563-572, en fremgangsmåte for fjerning av overflateekko fra dobbeltsensorkabeldata i vannlaget og på 20 havbunnen. Amundsen og Reitan konstruerer et dekomponeringsfilter for å anvendes på trykk registrert ved hjelp av hydrofoner like over havbunnen og de radiale og vertikale komponentene av partikkelhastigheten registrert ved hjelp av geofoner like under havbunnen. Dekomponeringsfilteret 25 separerer dataene i oppadgående og nedadgående P- og S-bølger, noe som gir bølgefelt med fjernede overflateekko i de oppadgående komponentene. Dekomponeringsfilterkoeffisientene er avhengige av P- og S-bølgehastighetene og densiteten ved havbunnen.

30 US-patentsøknad nr. 10/935 515 med tittel "System for Attenuation of Water Bottom Multiples in Seismic Data Recorded by Pressure Sensors and Particle Motion Sensors", inngitt 7. september 2004, og overdratt til et datterselskap av

foreliggende søker, beskriver en fremgangsmåte for dempning av vannmultipler i marine seismiske data. Fremgangsmåten innbefatter å beregne oppadgående og nedadgående bølgefeltkomponenter fra trykksensor- og partikkelbevegelses-
5 sensorsignaler, å ekstrapolere bølgefeltene til vannbunnen, og å benytte de ekstrapolerte bølgefeltene og en refleksjonskoeffisient for vannbunnen til å generere et oppadgående bølgefelt hovedsakelig uten vannbunnsmultipler.

Flere andre fremgangsmåter som er kjent på området, tilveiebringer prosedyrer for behandling av dobbeltsensordata for å redusere spøkelseskjervene i marine seismiske data innsamlet ved å benytte slepte marine streamere, havbunnskabel eller vertikale kabler. Disse behandlingsmetodene benytter trykksensordata og vertikale partikkelbevegelsessensordata for
15 å konstruere filtre som separerer dobbeltsensordataene i oppadgående og nedadgående bølgefeltkomponenter. Den oppadgående bølgefeltkomponenten er bølgefeltet med fjernede spøkelsesekko. Som velkjent på området er partikkelbevegelsessensorer betydelig mer følsomme for
20 mekanisk støy enn trykksensorer. Ekkofjerningsløsningen ifølge disse tidligere kjente prosedyrene innfører derfor ytterligere støy i den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten.

Det er derfor behov for en fremgangsmåte for ekkofjerning som effektivt demper infiltrasjon av støy fra
25 partikkelbevegelsessensorer fra de separerte trykkbølgefeltene. Spesielt er det behov for en fremgangsmåte som kan fjerne spøkelsesekkoet fra mottakersiden og dempe den mekaniske støyen fra partikkelbevegelsessensorene i en slept streamer.

30

Kort oppsummering av oppfinnelsen

Oppfinnelsen er en fremgangsmåte for å behandle seismiske data fra en slept, marin seismisk streamer som har

partikkelbevegelsessensorer og trykksensorer. I en utførelsesform blir de signalene som detekteres av partikkelbevegelsessensorene skalert for å passe til signaler detektert av trykksensorene. Trykksensorsignalene og de skalerte partikkelbevegelsessensorsignalene blir kombinert for å generere oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponenter. De oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene blir ekstrapolert til en posisjon like under en vannoverflate. Et første tilpasningsfilter blir anvendt på den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten. Den filtrerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten blir subtrahert fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten for å generere en oppadgående trykkbølgefeltkomponent med dempet partikkelhastighetssensorstøy.

I en annen utførelsesform blir et annet tilpasningsfilter anvendt på den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten. Den filtrerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten blir subtrahert fra den ekstrapolerte nedadgående trykkbølgefeltkomponenten for å generere en nedadgående trykkbølgefeltkomponent med dempet partikkelhastighetssensorstøy.

I en annen utførelsesform blir de ekstrapolerte oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene første bakoverekstrapolert til en visuell observasjonsflate, og den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten blir tilpasset den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten før subtrahering.

I en annen utførelsesform blir de ekstrapolerte oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene først foroverekstrapolert til en virtuell observasjonsflate og den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten blir tilpasset den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten før subtrahering.

Kort beskrivelse av tegningene

Oppfinnelsen og dens fordeler kan lettere forstås under henvisning til den følgende detaljerte beskrivelse og de

5 vedføyde tegningene, hvor:

Fig. 1 er et eksempel på et amplitudespektrum for geofonstøy og hydrofonstøy;

10 fig. 2 er en skjematisk representasjon av den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten like før vannoverflaten, ifølge fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen;

fig. 3 er amplitudespektrene for signalet og støyen som er et resultat av anvendelse av fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen;

15 fig. 4 er amplitudespektrene for signalet og støyen som et resultat av konvensjonell seismisk behandling ved hjelp av bølgefeltseparasjon i oppadgående og nedadgående komponenter;

fig. 5 er en sammenligning av støyreduksjon i forhold til den inngående geofonstøyen mellom fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen som er vist på fig. 3 og konvensjonell

20 bølgefeltseparasjon som vist på fig. 4; og

fig. 6 er et flytskjema som illustrerer behandlingstrinnene i en utførelsesform av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen for dempning av støy i marine seismiske streamere.

25 Selv om oppfinnelsen vil bli beskrevet i forbindelse med dens foretrukne utførelsesformer, vil man forstå at oppfinnelsen ikke er begrenset til disse. Tvert imot er oppfinnelsen ment å dekke alle alternativer, modifikasjoner og ekvivalenter som kan innbefattes innenfor rammen av oppfinnelsen slik den er definert i de vedføyde patentkravene.

30

Detaljert beskrivelse av oppfinnelsen

Oppfinnelsen er en fremgangsmåte for behandling av seismiske dobbeltsensordata innsamlet ved hjelp av slepte

streamere under en marin seismisk undersøkelse. Oppfinnelsen er spesielt en fremgangsmåte for å dempe mekanisk støy fra et partikkelbevegelsessensorsignal i dobbeltsensordataene.

Partikkelbevegelsessensorer er typisk partikkelhastighets-
5 sensorer, men andre partikkelbevegelsessensorer innbefattende partikkelakselerasjonssensorer, kan brukes i stedet for partikkelhastighetssensorer i dobbeltsensorstreamere. Partikkelhastighetssensorer er vanlig kjent på området som geofoner og partikkelakselerasjonssensorer er vanlig kjent på
10 området som akselerometere. Foreliggende oppfinnelse vil bli beskrevet med utførelsesformer som anvender geofoner, men dette sensorvalget er for å forenkle illustrasjonen og er ikke ment å være en begrensning av oppfinnelsen.

Fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen benytter seismiske
15 dobbeltsensordata omfattende trykkbølgefeltet som er innsamlet ved hjelp av trykksensorer slik som hydrofoner og det vertikale hastighetsbølgefeltet av partikkelbevegelsen som er innsamlet samtidig ved hjelp av samlokaliserte partikkelbevegelsessensorer, slik som geofoner, som reaksjon
20 på en marin seismisk kilde. Signalene som er detektert av partikkelbevegelsessensorene blir skalert ved hjelp av en amplitudeskaleringsfunksjon for å passe til de signalene som er detektert av trykksensorene. Trykksensorsignalet og de skalerte partikkelbevegelsessensorsignalene blir så kombinert
25 for å separere det totale trykkbølgefeltet i oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponenter. De separerte oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene blir så ekstrapolert fra streamersensorposisjonen opp til en posisjon like under vannoverflaten.

30 Adaptive tilpasningsfiltre blir anvendt på de ekstrapolerte oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene for å kompensere for inkonsistens mellom de registreerte bølgefeltene. Den filtrerte, nedadgående

trykkløsefeltkomponenten blir subtrahert fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkløsefeltkomponenten for å generere en oppadgående trykkløsefeltkomponent ved posisjonen like under vannoverflaten med det infiltrerte

5 geofonstøyspekteret dempet ved hjelp av et cosinusfilter.

Denne beregnede oppadgående trykkløsefeltkomponenten er også det spøkelsesekkobefridde trykkløsefeltet. Den filtrerte, oppadgående trykkløsefeltkomponenten blir så subtrahert fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkløsefeltkomponenten for å generere en nedadgående trykkløsefeltkomponent ved posisjonen like under vannoverflaten med også geofonstøy dempet ved hjelp av cosinusfilteret.

Trykkløsefeltkomponentene som er ekstrapolert til like under vannoverflaten kan også først bli ytterligere ekstrapolert til en vilkårlig virtuell observasjonsflate før anvendelse av det ovennevnte filteret og subtraherings-

15 trinnene. De resulterende oppadgående og nedadgående trykkløsefeltkomponentene ved den virtuelle observasjonsflaten har derfor fremdeles sin geofonstøy betydelig dempet ved hjelp av det samme cosinusfilteret. Kjervene i dette

20 cosinusfilteret bestemmer toppene for maksimal geofonstøy- undertrykkelse og er avhengige av ekstrapoleringsavstanden, som ene og alene bestemmes av slepedybden til den seismiske streameren. Detaljene ved illustrerende utførelsesformer av fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen blir nærmere beskrevet

25 nedenfor.

Bølgefeltet slik som trykkløsefeltet P og det vertikale hastighetsbølgefeltet V_z , omfatter en oppadgående bølgefeltkomponent og en nedadgående bølgefeltkomponent.

30 Trykkløsefeltet P omfatter f.eks. en oppadgående bølgefeltkomponent P_u og en nedadgående bølgefeltkomponent P_d :

$$P = P_u + P_d . \quad (1)$$

Subindeksene u og d betegner henholdsvis oppadgående og nedadgående forplantningsretninger av bølgefeltene ved enhver posisjon.

5 En partikkelbevegelsessensor slik som en geofon, har retningsmessig følsomhet (med positiv bøyning i den vertikale $+z$ -retningen etter konvensjon), mens en trykksensor slik som en hydrofon ikke har denne egenskapen. En trykksensor er allrettet. Vann/luft-grenseflaten ved en vannoverflate er en
10 utmerket reflektor for seismiske bølger, og dermed er refleksjonskoeffisienten ved vannoverflaten nær en i størrelse og med negativt fortegn for trykksignaler. De bølgefeltene som forplanter seg nedover og som er reflektert fra vannoverflaten, vil derfor være fasedreiet 180° i forhold til
15 de bølgefeltene som forplanter seg oppover. De oppadgående bølgefeltsignalkomponentene som detekteres av en geofon og en hydrofon plassert tett ved hverandre, vil følgelig bli registrert 180° ute av fase, mens de nedadgående bølgefeltsignalkomponentene vil bli registrert i fase. I en
20 alternativ fortegnskonvensjon som ikke brukes i denne illustrasjonen av oppfinnelsen, vil de oppadgående bølgefeltsignalkomponentene bli registrert i fase, mens de nedadgående bølgefeltsignalkomponentene vil bli registrert 180° ute av fase.

25 Selv om en hydrofon registrerer det totale bølgefeltet allrettet, registrerer en vertikal geofon som typisk benyttes i seismisk behandling, bare den vertikale komponenten av bølgefeltet ensrettet. Den vertikale komponenten til bølgefeltet vil bare være lik det totale bølgefeltet for
30 signaler som tilfeldigvis forplanter seg vertikalt nedover. Hvis θ er innfallsvinkelen mellom signalbølgefronten og sensororienteringen, så er den vertikale oppadgående

forplantningen konvensjonelt definert ved innfallsvinkel $\theta = 0$.

I fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen må derfor det registrerte signalet V_z for en vertikal geofon en planbølge med innfallsvinkel θ til det registrerte signalet for en geofon som detekterer det totale bølgefeltet, og så for ytterligere å bli justert til en tilpasning av det registrerte trykkbølgefeltet P for en hydrofon. Denne justeringen blir gjort i fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen ved å skalere det vertikale geofonsignalet V_z ved hjelp av en passende amplitudeskaleringsfunksjon, slik som:

$$\frac{\rho c}{\cos(\theta)} . \quad (2)$$

Her er ρc den akustiske impedansen til vann, hvor ρ er densiteten til vann og c er den akustiske hastigheten i vann. I rom/tid-domenet er den vinkelavhengige amplitudeskaleringsfunksjonen et flerkannelsfilter som transformerer det enveis rettede vertikale hastighetsbølgefeltet for geofonregistreringen V_z til et allrettet trykkbølgefelt P . I den følgende beskrivelse av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen vil følgelig alle bølgefelter som betraktes, enten bli registrert som trykkbølgefelter eller skalert ved hjelp av denne amplitudeskaleringsfunksjonen for å virke som trykkbølgefelter.

I frekvens/bølgetall-domenet kan amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} uttrykkes som

$$\tilde{w} = \frac{\rho \omega}{k_z} , \quad (3)$$

30 hvor

$$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 - k_y^2} \quad (4)$$

er det vertikale bølgetallet, $\omega = 2\pi f$ er vinkelfrekvensen for frekvens f , og k_x og k_y er de horisontale bølgetallene i to ortogonale, horisontale retninger. De to horisontale retningene vil typisk bli valgt i linje- og krysslinje- retningene for den marine seismiske undersøkelsen. Alfabetiske tegn markert med en tilde vil her betegne bølgefelter slik som w transformert til frekvens/bølgetall-domenet. For positive, reelle verdier av k_z gir ligning (3) amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} for det vertikale hastighetsbølgefeltet \tilde{V}_z i frekvens/bølgetall-domenet.

Alternativt, i plan/bølge-domenet kan amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} uttrykkes som:

$$\tilde{w} = \frac{\rho}{p}, \quad (5)$$

hvor

$$p_z = \sqrt{\frac{1}{c^2} - p_x^2 - p_y^2} \quad (6)$$

er den vertikale langsomheten og p_x og p_y er de horisontale langsomhetene i to ortogonale horisontale retninger. Alfabetiske tegn markert med en dobbelt bølgestrek eller tilde vil her betegne bølgefelter slik som V_z eller funksjoner slik som w transformert til plan/bølge-domenet. For positive reelle verdier av p_z gir ligning (5) amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} for det vertikale hastighetsbølgefeltet \tilde{V}_z i plan/bølge-domenet.

I andre alternative utførelsesformer kan amplitude-

skaleringsfunksjonen tilveiebringes som et romfilter w i rom/tid-domenet ved å anvende en invers Fourier-transformasjon på frekvens/bølgetall-domenerepresentasjonen av amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} fra ligning (3) eller ved å
 5 anvende en invers Radon-transformasjon på plan/bølge-representasjonen av amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} fra ligning (5). I det følgende vil fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen bli illustrert ved representasjon i frekvens/bølgetall-domenet. Dette valget av domene er ikke
 10 ment å være begrensende for oppfinnelsen, men kun ment for å forenkle illustrasjonen.

Det totale trykkbølgefeltet \tilde{P} , slik som registrert av en hydrofon ved streamersensorposisjonen, er summen av en oppadgående trykkbølgefeltkomponent \tilde{P}_u og en nedadgående
 15 trykkbølgefeltkoeffisient \tilde{P}_d ved sensorposisjonen, som representert i frekvens/bølgetall-domenet ved:

$$\tilde{P} = \tilde{P}_u + \tilde{P}_d. \quad (7)$$

20 Det vertikale hastighetsbølgefeltet \tilde{V}_z , slik som registrert av en geofon ved streamersensorposisjonen og etter skalering ved hjelp av amplitudeskaleringsfaktoren $-\tilde{w}$ for å virke som et trykkbølgefelt, blir differansen mellom den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_u og den nedadgående
 25 trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_d ved sensorposisjonen, som representert i frekvens/bølgetall-domenet ved:

$$-\tilde{w}\tilde{V}_z = \tilde{P}_u - \tilde{P}_d. \quad (8)$$

30 Ved å kombinere ligningene (7) og (8) fås en

fremgangsmåte for beregning av den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_u og den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_d ved sensorposisjonen:

$$5 \quad \tilde{P}_u = \frac{\tilde{P} - \tilde{w}\tilde{V}_z}{2} \quad (9)$$

og

$$\tilde{P}_d = \frac{\tilde{P} + \tilde{w}\tilde{V}_z}{2} . \quad (10)$$

Den oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponenten kan derfor fremskaffes i frekvens/bølgetall-domenet ved henholdsvis subtrahering og addering av det skalerte vertikale partikkelhastighetsbølgefeltet $\tilde{w}\tilde{V}_z$ henholdsvis fra og til trykkbølgefeltet \tilde{P} .

De reelle dataene slik de er registrert av en hydrofon \tilde{H} inneholder en signalkomponent \tilde{P} og en additiv støykomponent \tilde{N}_H , representert i frekvens/bølgetall-domenet ved:

$$\tilde{H} = \tilde{P} + \tilde{N}_H . \quad (11)$$

Likeledes inneholder de reelle data som er registrert av en geofon \tilde{G} , en signalkomponent \tilde{V}_z og en additiv støykomponent \tilde{N}_G , representert i frekvens/bølgetall-domenet ved:

$$\tilde{G} = \tilde{V}_z + \tilde{N}_G . \quad (12)$$

25

Det vertikale hastighetsbølgefeltet \tilde{G} som er innsamlet av geofoner i en streamer er vanligvis dominert av mekanisk

støy, mens trykkbølgefeltet \tilde{H} som er innsamlet samtidig ved samme posisjon av hydrofoner, er hovedsakelig rene.

Hydrofonstøyen er dermed tilnærmet lik null, dvs. at $\tilde{N}_H \approx 0$ i ligning (11), og kan ignoreres sammenlignet med geofonstøyen.

5 Ligning (11) reduseres dermed til:

$$\tilde{H} = \tilde{P} \quad (13)$$

10 Geofonstøyen er dessverre vanligvis meget større enn null, dvs. at $\tilde{N}_G \gg 0$ i ligning (12), og kan ikke ignoreres.

Fig. 1 viser et eksempel på amplitudespektrene for geofonstøy \tilde{N}_G 11 og hydrofonstøy \tilde{N}_H 12 beregnet fra et annet tidsvindu summert over 150 traser. (Dette analysevinduet er det samme for de følgende figurene 2-5.) Toppen 13 i geofonstøyen \tilde{N}_G 11 er ved omtrent 20-30 Hz (Hertz).

15 Geofonstøyen \tilde{N}_G 11 er meget større enn hydrofonstøyen \tilde{N}_H 12 ved de laveste frekvensene, dvs. i området mindre enn 50 Hz i dette eksempelet. Den høye toppen 13 i geofonstøyen, \tilde{N}_G 11 mellom 20 Hz og 50 Hz, er additiv ikke-tilfeldig mekanisk støy lokalisert i frekvensdomenet, og ikke korrelert med den svake additive hydrofonstøyen \tilde{N}_H . Fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen demper denne toppen 13 i geofonstøyen \tilde{N}_G 11 i behandlingen for å fjerne spøkelsesekko på mottakersiden.

25 Ligningene (12)-(13) gir alternative versjoner av ligningene (9)-(10) for beregning av den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_u og den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_d ved sensorposisjonen, fulgt av den skalerte geofonstøyen $\tilde{w}\tilde{N}_G$:

$$\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} = \frac{\tilde{P} - \tilde{w}\tilde{V}_z - \tilde{w}\tilde{N}_G}{2} = \tilde{P}_u - \frac{1}{2}\tilde{w}\tilde{N}_G \quad (14)$$

og

$$\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} = \frac{\tilde{P} + \tilde{w}\tilde{V}_z + \tilde{w}\tilde{N}_G}{2} = \tilde{P}_d + \frac{1}{2}\tilde{w}\tilde{N}_G \quad (15)$$

5 i uttrykk for de registrerte hydrofon- og skalerte geofondataene, henholdsvis \tilde{H} og $\tilde{w}\tilde{G}$.

Ekstrapolering av den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten blir oppnådd ved anvendelse av ligning (14), fra streamersensorposisjonen ved en dybde z_r til en posisjon like
10 under vannoverflaten, kan beregnes ved hjelp av følgende uttrykk i frekvens/bølgetall-domenet:

$$\left(\tilde{P}_u - \frac{1}{2}\tilde{w}\tilde{N}_G \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0}, \quad (16)$$

15 hvor k_z er det vertikale bølgetallet og eksponentialleddet $\exp[-ik_z(z_r - z)]$ representerer foroverekstrapoleringsooperatoren for oppadgående bølgefelter innbefattet i den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_u ved streamsensorposisjonen er den oppadgående komponenten til geofonstøyen, $-1/2\tilde{w}\tilde{N}_G$, som vist
20 fra ligningene (9)-(12). Alternativt, fra ligning (14), er det uttrykket som er beregnet i ligning (16) også ekvivalent med:

$$\left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0}, \quad (17)$$

25 "Posisjonen like under vannoverflaten" blir mer spesielt definert som den observasjonsflate hvor summen av den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten og den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten er nærmest null.

Ekstrapolering av den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten som er fremskaffet ved anvendelse av ligning (15), fra streamersensorsposisjonen til den samme posisjonen like under vannoverflaten, kan likeledes beregnes ved hjelp av følgende uttrykk i frekvens/bølgetall-domenet:

$$\left(\tilde{P}_d - \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow +0}, \quad (18)$$

hvor eksponentialleddet $\exp[ik_z(z_r - z)]$ representerer bakover-ekstrapoleringsoperatoren for nedadgående bølgefelter.

Innbefattet i den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{P}_d ved streamsensorposisjonen er igjen den nedadgående komponenten av geofonstøyen, $1/2\tilde{w}\tilde{N}_G$. Fra ligning (15) kan igjen alternativt uttrykket som er beregnet i ligning (18) også være ekvivalent med:

$$\left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow +0}, \quad (19)$$

For å forenkle illustrasjonen av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen vil signalet fra den oppadgående bølgefeltkomponenten som er ekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten bli betegnet ved:

$$\tilde{p}_u = \tilde{P}_u \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow +0}, \quad (20)$$

og signalet for det nedadgående bølgefeltsignalet som er ekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten, vil bli betegnet ved:

$$\tilde{p}_d = \tilde{P}_d \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0^+}, \quad (21)$$

Ved å ta hensyn til at refleksjonskoeffisienten ved vannoverflaten er -1, gjelder følgende relasjon mellom disse
5 to ekstrapolerte trykkbølgefeltkomponentene \tilde{p}_u og \tilde{p}_d :

$$\tilde{p}_u = -\tilde{p}_d. \quad (22)$$

Subtrahering av den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten
10 i ligning (18) fra den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten i
ligning (16) (normalisert ved hjelp av en faktor på 1/2), med
begge bølgefeltene ekstrapolert til en posisjon like under
vannoverflaten, gir følgende resultat, etter omordning av
leddene:

15

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_u - \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0^+} \\ & - \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_d + \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0^+} \\ & = \frac{1}{2} (\tilde{P}_u - \tilde{P}_d) - \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \frac{\exp(-ik_z z_r) + \exp(ik_z z_r)}{2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Det første leddet på høyre side av ligning (23) kan uttrykkes
som den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ettersom dybden
20 avtar til 0 fra den positive siden, fra ligning (22). Det
andre leddet på høyre side av ligning (23) kan uttrykkes som
den skalerte geofonstøyen filtrert ved hjelp av en cosinus-
funksjon avhengig av det vertikale bølgetallet k_z og dybden z_r ,
på grunn av den eksponentiale definisjonen av cosinus-
25 funksjonen. Derfor kan ligning (23) skrives som:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_u - \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\
& - \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_d + \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \quad (24) \\
& = \tilde{p}_u - \frac{1}{2} \tilde{w} \tilde{N}_G \cos(k_z z_r).
\end{aligned}$$

Resultatet av å subtrahere den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten like under vannoverflaten er derfor at den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{p}_u like under vannoverflaten sammen med den skalerte geofonstøyen $\tilde{w} \tilde{N}_G$ dempet ved hjelp av et cosinusfilter $\cos(k_z z_r)$. Den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten \tilde{p}_u er et trykkbølgefelt hvor spøkelsesekko er fjernet, siden spøkelsesrefleksjonene befinner seg i den nedadgående bølgefeltkomponenten \tilde{p}_u . Husk at skalering med amplitudeskaleringsfunksjonen for geofonstøyen til å ligne et trykkbølgefelt. Alle leddene i ligning (23) og (24) virker dermed som trykkbølgefelter.

Fig. 2 viser en skjematisk representasjon av denne subtraksjonen av den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten like under vannoverflaten i fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen. Den første trasen 21 inneholder den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten 22 og geofonstøyen 23, skalert for å ligne et trykkbølgefelt, med begge bølgefelter ekstrapolert til like under vannoverflaten. Disse to delene 22, 23 svarer henholdsvis til de to delene i det første leddet på venstre side av ligning (24) ovenfor. Den andre trasen 24 inneholder den nedadgående trykkkomponenten 25 og den skalerte geofonstøyen 26, begge som ekstrapolert til like under

vannoverflaten. Disse to delene 25, 26 av den andre trasen 24 svarer til de respektive delene i det andre leddet på venstre side av ligning (24) ovenfor. Den tredje trasen 27 inneholder den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten like under

5 vannoverflaten 28 og den skalerte geofonstøyen 29. Disse to delene 28, 29 av den tredje trasen 27 svarer til henholdsvis de to leddene på høyre side av ligning (24). Den skalerte geofonstøyen 29 opptrer nå som dempet av et cosinusfilter, akkurat som i det andre leddet på høyre side av ligning (24).

10 Fig. 3 viser amplitudespekteret for resultatet av å anvende fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen. Både det resulterende signalet 31 og den resulterende støyen 32 er vist etter subtrahering av den nedadgående fra den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten like under vannoverflaten. Signalet

15 31 på P_u minus P_d ekstrapolert til like under havoverflaten viser karakterstikkene for et signal hvor spøkelsesekko er fjernet. Støyen 32, spesielt den høye toppen i geofonstøyen omkring 30 Hz (vist ved 13 på fig. 1), er betydelig redusert. Reduksjonen i støyen 32 i forhold till den inngående

20 geofonstøyen (vist som 11 på fig. 1), viser et mønster som er typisk for et cosinusfilter.

Fig. 4 viser resultatene av konvensjonell seismisk behandling ved bølgefeltseparasjon til oppadgående og nedadgående bølgefeltkomponenter, til sammenligning med

25 resultatene av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen, som vist på fig. 3. Signalet 41 og støyen 42 i den separerte oppadgående bølgefeltkomponenten og signalet 43 og støyen 44 i den separerte nedadgående bølgefeltkomponenten er vist. Legg merke til at amplitudespektrene for signalene 41 og 43 for de

30 oppadgående og nedadgående bølgefeltkomponentene er like, og følgelig er amplitudespektrene til støykomponentene, henholdsvis 42 og 44, også like. Legg videre merke til at signalet 31 på fig. 3 for P_u minus P_d ekstrapolert til like

under havoverflaten fra fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen, er identisk med signalet 41 på fig. 4 for P_u fra den konvensjonelle bølgefeltsepareringen, som en følge av ligningene (20) og (24).

5 Fig. 5 viser en sammenligning i støyreduksjon i forhold til den inngående geofonstøyen (vist som 11 på fig. 1), mellom fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen og konvensjonell bølgefeltseparasjon. Linje 51 viser støyreduksjon for fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen, mens linje 52 viser 10 støyreduksjon for konvensjonell bølgefeltseparasjon. Filteret ifølge oppfinnelsen virker bare på geofonstøyen og innbefatter et kjerv eller et hakk omkring 25 Hz 53, et kjerv omkring 75 Hz 54 og et annet kjerv omkring 125 Hz 55 (for en mottakerdybde på 15 meter). Kjervet omkring 25 Hz 53 for dette 15 filteret er hovedgrunnen til den betydelige forbedringen i signal/støy-forholdet.

Ved å konstruere P_u minus P_d ekstrapolert til like under vannoverflaten, fremskaffer fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen ikke bare et mottatt spøkelsesekkofritt 20 trykkbølgefelt (dvs. et bredere amplitudespektrum), men tilveiebringer også et signal/støy-forhold som er bedre enn hva som oppnås ved konvensjonell seismisk behandling av data fra dobbeltsensorstreamere, siden skalerte geofonstøyen $\tilde{w}\tilde{N}_G$ også blir dempet.

25 Fremgangsmåten ifølge fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen slik den er illustrert i ligning (24), kan uttrykkes i en alternativ form ved hjelp av de registrerte sensorsignalene. Ved å erstatte ekvivalente uttrykk i (17) og (19) i ligning (24), fås følgende fremgangsmåte for å beregne 30 den støyundertrykte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten like under vannoverflaten, som:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\
& - \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\
& = \tilde{p}_u - \frac{1}{2} \tilde{w}\tilde{N}_G \cos(k_z z_r).
\end{aligned} \tag{25}$$

Ligning (25) viser hvordan den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten skal subtraheres fra den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten i frekvens/bølgetall-domenet, ekstrapolert til like under vannoverflaten, som i fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen, uttrykt ved de registrerte hydrofon- og geofonsignalene, henholdsvis \tilde{H} og \tilde{G} , og amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} , sammen med ekstrapoleringsoperatorer basert på det vertikale bølgetallet k_z og streamerdybden z_r .

Fremgangsmåten for beregning av den støyundertrykte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten like under vannoverflaten kan likeledes uttrykkes som:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\
& - \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\
& = \tilde{p}_d + \frac{1}{2} \tilde{w}\tilde{N}_G \cos(k_z z_r).
\end{aligned} \tag{26}$$

På grunn av amplitudeskaleringsfunksjonen \tilde{w} , virker alle leddene i ligningene (25) og (26) som trykkbølgefelter.

Ligning (25) og (26) kan videre generaliseres for å tillate variasjoner i faktorer, slik som refleksjonskoeffisienten ved vannoverflaten, som illustrert i en annen utførelsesform av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen.

5 Det andre leddet på venstre side i ligning (25), som representerer den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ekstrapolert til like under vannoverflaten, kan filtreres før subtrahering fra det første leddet på venstre side av ligning (25), som representerer den oppadgående trykkbølgefelt-

10 komponentene ekstrapolert til like under vannoverflaten. Denne filtreringen er utformet for bedre å tilpasse de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltsignalkomponentene før subtraksjon. Ligning (25) blir derfor til den følgende mer generelle ligning i frekvens/bølgetall-domenet:

15

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\ & - \tilde{F}_1 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\ & = \tilde{p}_u - \frac{1}{2} \tilde{w}\tilde{N}_G \cos(k_z z_r). \end{aligned} \quad (27)$$

hvor \tilde{F}_1 er et første tilpasningsfilter slik som et adaptivt Wiener-tilpasningsfilter.

20 Det andre leddet på venstre side av ligning (26) som representerer den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ekstrapolert til like under vannoverflaten, kan filtreres før subtraksjon for bedre å tilpasse det første leddet på venstre side av ligning (26), den nedadgående trykkbølgefelt-

25 komponenten ekstrapolert til like under vannoverflaten. Ligning (26) blir derfor den følgende mer generelle ligning

beregnet i frekvens/bølgetall-domenet:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \\
 & - \tilde{F}_2 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} \quad (28) \\
 & = \tilde{p}_d + \frac{1}{2} \tilde{w}\tilde{N}_G \cos(k_z z_r).
 \end{aligned}$$

5 hvor \tilde{F}_2 er et annet tilpasningsfilter, slik som et annet adaptivt Wiener-tilpasningsfilter.

Tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 kompenserer for uoverensstemmelsene mellom de separerte bølgefeltkomponentene. Disse uoverensstemmelsene kan være forårsaket av faktorer som

10 innbefatter, men ikke er begrenset til, vannoverflatetopografi (ruhet), vannoverflaterefleksjonskoeffisient, variasjoner i lydshastigheten i vannet, variasjoner i vanddensiteten og avvik i sensorposisjonene. For en plan vannflate med

refleksjonskoeffisient hovedsakelig lik -1, konstant

15 vannhastighet og densitet, og en plan innsamlingsflate med en jevn sensorfordeling, er de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene hovedsakelig like bortsett fra en endring i fortegn og støyen er hovedsakelig ukorrelert mellom

komponentene. Tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 har derfor en

20 tendens mot en verdi lik 1 som representerer en båndbegrenset topp.

Ligningene (27) og (28) kan generaliseres videre for å illustrere nok en annen utførelsesform av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen. Den støyundertrykte, oppadgående

25 trykkbølgefeltkomponenten ved en vilkårlig virtuell

observasjonsflate ved $z = z_{obs}$ kan fremskaffes ved å multiplisere begge sider av ligning (27) med bakover-ekstrapoleringsoperatoren $\exp[ik_z z_{obs}]$ fra $z = 0$ til $z = z_{obs}$, noe som gir:

5

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z_{obs})] \\ & - \tilde{F}_1 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r + z_{obs})] \\ & \cong \left[\tilde{p}_u - \frac{1}{2} \tilde{w}\tilde{N}_G \cos(k_z z_r) \right] \exp[ik_z z_{obs}]. \end{aligned} \quad (29)$$

Et filterutformingsvindu som er tilstrekkelig stort, vil i en hovedsakelig optimal tilpasning mellom de to trykkbølgefelt-
10 signalkomponentene på venstre side av ligning (29) uten å bevirke den hovedsakelig ukorrelerte støyen. Denne utførelsesformen av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen som er uttrykt i ligning (29), gir derfor den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ved den virtuelle observasjonsflaten
15 ved $z = z_{obs}$ med den skalerte geofonstøyen dempet ved hjelp av det samme cosinusfilteret som tidligere beskrevet.

Den støyundertrykte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ved den virtuelle observasjonsflaten ved $z = z_{obs}$ kan likeledes oppnås ved å multiplisere begge sider av ligning
20 (28) med foroverekstrapoleringsoperatoren $\exp[-ik_z z_{obs}]$ fra $z = 0$ til $z = z_{obs}$, noe som gir:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z_{obs})] \\
& - \tilde{F}_2 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r + z_{obs})] \\
& \cong \left[\tilde{P}_d + \frac{1}{2} \tilde{w}\tilde{N}_G \cos(k_z z_r) \right] \exp[-ik_z z_{obs}]
\end{aligned} \tag{30}$$

I en alternativ utførelsesform kan tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 være utformet for å kompensere for differanser bare i amplitude. I dette tilfellet kan havoverflaterefleksjonskoeffisienter beregnes fra tilpasningsfiltrene. I en annen alternativ utførelsesform kan tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 være utformet for å kompensere for differanser bare i fase. I dette tilfellet kan havoverflatetopografien beregnes fra tilpasningsfiltrene. I nok en ytterligere utførelsesform kan tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 ganske enkelt settes lik en eller null. Det tilfellet hvor \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 blir satt lik en, reduseres de generelle tilfellene som er representert i ligningene (27) og (28) til de utførelsesformene som henholdsvis er gitt i ligningene (25) og (26). Det tilfellet hvor \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 er satt lik null, reduseres de generelle tilfellene som er representert i ligningene (29) og (30) til den konvensjonelle bølgefeltseparasjonen som er gitt henholdsvis i ligningene (14) og (15).

Fig. 6 er et flytskjema som illustrerer behandlingstrinnene i en utførelsesform av fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen for dempning av støy fra seismiske data som er registrert ved hjelp av trykksensorer og partikkelbevegelsessensorer i marine, slepte streamere. Støyen som dempes, omfatter spesielt spøkelsessekkstøy på mottakersiden så vel som den mekaniske støyen fra partikkelbevegelses-

sensorene. For enkel illustrasjon og ikke som en begrensning av oppfinnelsen, vil trykksensorene og partikkelbevegelses-sensorene bli referert til ved sine konvensjonelle respektive utførelsesformer som hydrofoner og geofoner. De seismiske dataene er fortrinnsvis i form av fellesskuddsammlere eller fellessensorsamlere.

Ved trinn 61 blir en måling av et trykkbølgefelt oppnådd fra en trykksensor, slik som en hydrofon, i en slept marin seismisk streamer. For illustrasjonsformål kun, vil trykkmålingen bli referert til som et hydrofonsignal.

Ved trinn 62 blir måling av et vertikalt hastighetsbølgefelt fremskaffet fra en vertikal hastighetssensor, slik som en vertikal geofon, ved en posisjon i nærheten av hydrofonen fra trinn 61 i den slepte marine seismiske streameren. Kun for illustrasjonsformål vil den vertikale hastighetsmålingen bli referert til som et geofonsignal.

Ved trinn 63 blir geofonsignalet fra trinn 62 skalert for å korrigere for de relative forskjellene i amplituder mellom trykkmåling og de vertikale hastighetsbølgefeltmålingene. En vinkelavhengig amplitudeskaleringsfunksjon blir valgt for å transformere det ensrettede vertikale hastighetsbølgefeltet for geofonsignalet til et allrettet trykkbølgefelt som i hydrofonsignalet fra trinn 61. Amplitudeskaleringsfunksjonen er beskrevet ovenfor i forbindelse med ligning (2) til (6).

Ved trinn 64 blir en oppadgående trykkbølgefeltkomponent ved streamersensorposisjonen fulgt av skalert geofonstøy, beregnet fra en differanse mellom hydrofonsignalet fra trinn 61 og det skalerte geofonsignalet fra trinn 63. Beregningen av den oppadgående bølgefeltkomponenten er fortrinnsvis som gitt i ligning (14) ovenfor.

Ved trinn 65 blir en nedadgående trykkbølgefeltkomponent ved sensorposisjonen fulgt av den skalerte geofonstøyen, beregnet fra en sum av hydrofonsignalet fra trinn 61 og det

skalerte geofonsignalet fra trinn 63. Beregningen av den nedadgående bølgefeltkomponenten er fortrinnsvis som gitt i ligning (15) ovenfor.

5 Ved trinn 66 blir den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ved streamersensorposisjonen fra trinn 64 ekstrapolert forover i tid fra sensorposisjonen opp i rommet til en posisjon like under vannoverflaten. Ekstrapoleringen av den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fulgt av skalert geofonstøy, er fortrinnsvis som gitt i ligning (17) ovenfor.

10 Ved trinn 67 blir den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ved sensorposisjonen fra trinn 65 ekstrapolert bakover i tid fra sensorposisjonen opp i rommet til en posisjon like under vannoverflaten. Ekstrapoleringen av den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fulgt av den skalerte geofonstøyen, er fortrinnsvis som gitt i ligning (19) ovenfor.

I en valgfri alternativ utførelsesform illustrert ved valgfrie trinn 68 og 69, kan de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene, ekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten i trinnene 66 og 67, ekstrapoleres
20 ytterligere til en vilkårlig virtuell observasjonsflate før fortsettelse til ytterligere behandling i trinnene 72 og 74. Ved valgfrie trinn 70 og 71 kan videre de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene, ekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten i henholdsvis trinnene 66
25 og 67, ekstrapoleres videre til en vilkårlig virtuell observasjonsflate før fortsettelse til ytterligere behandling i trinnene 73 og 75.

Ved det valgfrie trinnet 68 kan den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten, foroverekstrapolert til en posisjon
30 like under vannoverflaten i trinn 66, ytterligere bakoverekstrapoleres til en vilkårlig virtuell observasjonsflate før fortsettelse til trinn 74 for ytterligere behandling. Ellers blir de valgfrie trinnene 68 og 69 utelatt

og prosessen fortsetter direkte til trinn 72.

Ved det valgfrie trinnet 69 kan den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten som er bakoverekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten i trinn 67, ytterligere
5 bakoverekstrapoleres til en vilkårlig virtuell observasjonsflate før anvendelse av et tilpasningsfilter i trinn 72 nedenfor. Ellers kan de valgfrie trinnene 68 og 69 utelates og prosessen fortsetter direkte til trinn 72.

Ved det valgfrie trinnet 70 kan den oppadgående
10 trykkbølgefeltkomponenten som er foroverekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten i trinn 66, ytterligere foroverekstrapoleres til en vilkårlig virtuell observasjonsflate før anvendelse av et tilpasningsfilter i trinn 73 nedenfor. De valgfrie trinnene 70 og 71 blir ellers utelatt og
15 prosessen fortsetter direkte til trinn 73.

Ved det valgfrie trinnet 71 kan den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten som er tilbakeekstrapolert til en posisjon like under vannoverflaten i trinn 67, ytterligere foroverekstrapoleres til en vilkårlig virtuell observasjons-
20 flate før anvendelse av et tilpasningsfilter i trinn 73. Ellers blir de valgfrie trinnene 70 og 71 utelatt og prosessen fortsetter direkte til trinn 73.

Ved trinn 72 blir et første tilpasningsfilter anvendt på den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ved
25 posisjonen like under vannoverflaten fra trinn 67 for å kompensere for uoverensstemmelser mellom de separerte bølgefeltkomponentene. Dette første tilpasningsfilteret er beskrevet ovenfor i forbindelse med ligningene (27) og (28). I den valgfrie, alternative utførelsesformen som er beskrevet
30 ovenfor i trinn 68 og 69, blir det første tilpasningsfilteret anvendt på den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ved den virtuelle observasjonsflaten fra trinn 69.

Ved trinn 73 blir et annet tilpasningsfilter anvendt på

den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ved posisjonen like under vannoverflaten fra trinn 66 for å kompensere for uoverensstemmelser mellom de separerte bølgefeltkomponentene. Dette andre tilpasningsfilteret er også
5 beskrevet ovenfor i forbindelse med ligningene (27) og (28). I den valgfrie, alternative utførelsesformen som er beskrevet ovenfor i trinnene 70 og 71, blir det andre tilpasningsfilteret anvendt på den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ved den virtuelle observasjonsflaten
10 fra trinn 70.

Ved trinn 74 blir den filtrerte og ekstrapolerte nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 67 subtrahert fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 66 ved posisjonen like under vannoverflaten.
15 Subtraksjonen av de ekstrapolerte bølgefeltkomponentene er fortrinnsvis som gitt i ligning (27) ovenfor. Denne subtraksjonen gir den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ved posisjonen like under vannoverflaten med dens skalerte geofonstøy dempet ved hjelp av et cosinusfilter, som vist i
20 ligning (27) ovenfor.

I den valgfrie, alternative utførelsesformen som er beskrevet ovenfor i trinnene 68, 69 og 72, blir den filtrerte og ekstrapolerte nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 72 subtrahert fra den ekstrapolerte oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 68 ved den virtuelle observasjonsflaten. Subtraksjonen av de ekstrapolerte bølgefeltkomponentene er fortrinnsvis som gitt i ligning (29) ovenfor. Denne subtraksjonen gir den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten ved den virtuelle observasjonsflaten med
25 dens skalerte geofonstøy dempet ved hjelp av det samme cosinusfilteret som før, som vist i ligning (29) ovenfor.
30

Ved trinn 75 blir den filtrerte og ekstrapolerte oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 66 subtrahert

fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponent fra trinn 67 ved posisjonen like under vannoverflaten.

Subtraksjonen av de ekstrapolerte bølgefeltkomponentene er fortrinnsvis som gitt i ligning (28) ovenfor. Denne

5 subtraksjonen gir den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ved posisjonen like under vannoverflaten med dens skalerte geofonstøy dempet ved hjelp av et cosinusfilter, som vist i ligning (28) ovenfor.

I den valgfrie, alternative utførelsesformen som er
10 beskrevet ovenfor i trinnene 70, 71 og 73, blir den filtrerte og ekstrapolerte oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 71 subtrahert fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra trinn 71 ved den virtuelle observasjonsflaten. Subtraksjonen av de ekstrapolerte
15 bølgefeltkomponentene er fortrinnsvis som gitt i ligning (30) ovenfor. Denne subtraksjonen gir den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten ved den virtuelle observasjonsflaten med dens skalerte geofonstøy dempet av det samme cosinusfilteret som før, som vist i ligning (30) ovenfor.

20 Resultatet av anvendelse av fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen som nettopp beskrevet under henvisning til flytskjemaet på fig. 6, er dempning av den mekaniske streamerstøyen i de vertikale hastighetsdataene, som registrert ved hjelp av geofoner, i både de oppadgående og
25 nedadgående trykkbølgefeltkomponentene, sammen med dempning av spøkelsesekko på mottakersiden i frembringelsen av den støyundertrykte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten.

Det skal bemerkes at det foregående bare er en detaljert beskrivelse av spesielle utførelsesformer av oppfinnelsen, og
30 at mange endringer, modifikasjoner og alternativer til de beskrevne utførelsesformene kan gjøres i samsvar med det som er beskrevet her, uten å avvike fra oppfinnelsens ramme. Den foregående beskrivelse er derfor ikke ment å begrense omfanget

av oppfinnelsen. Omfanget av oppfinnelsen skal i stedet bestemmes av de vedføyde patentkrav og deres ekvivalenter.

P a t e n t k r a v

1. Fremgangsmåte for behandling av seismiske data fra en slept marin seismisk streamer som har partikkelbevegelses-
5 sensorer og trykksensorer,
k a r a k t e r i s e r t v e d:
å skalere signaler detektert av partikkelbevegelsessensorene til å passe til signaler detektert av trykksensorene;
å kombinere trykksensorsignalene og de skalerte partikkel-
10 bevegelsessensorsignalene for å generere oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponenter;
å ekstrapolere de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene til en posisjon like under vannoverflaten;
å anvende et første tilpasningsfilter på den ekstrapolerte,
15 nedadgående trykkbølgefeltkomponenten; og
å subtrahere den filtrerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten for å generere en oppadgående trykkbølgefeltkomponent med dempet partikkelbevegelsessensorstøy.
20
2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende:
å anvende et annet tilpasningsfilter på den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten; og
å subtrahere den filtrerte, oppadgående trykkbølgefelt-
25 komponenten fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten for å generere en nedadgående trykkbølgefeltkomponent med dempet partikkelbevegelsessensorstøy.
3. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor skalering av et
30 partikkelbevegelsessensorsignal omfatter å anvende en amplitudeskaleringsfunksjon på partikkelbevegelsessensorsignalet for å korrigere for amplitudedifferanser mellom trykksensorsignalet og partikkelbevegelsessensorsignalet.

4. Fremgangsmåte ifølge krav 2, hvor trykksensorsignalet er et hydrofonsignal og partikkelbevegelsessensorsignalet er et geofonsignal.

5

5. Fremgangsmåte ifølge krav 4, hvor ekstrapoleringen av de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene videre omfatter:

å bakoverekstrapolere de oppadgående og nedadgående

10 trykkbølgefeltkomponentene til en virtuell observasjonsflate.

6. Fremgangsmåte ifølge krav 5, hvor ekstrapoleringen av de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene videre omfatter:

15 å foroverekstrapolere de ekstrapolerte oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene til en virtuell observasjonsflate.

7. Fremgangsmåte ifølge krav 4, hvor subtrahering av den 20 filtrerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten blir oppnådd ved å beregne følgende uttrykk i frekvens/bølgetalldomenet:

25

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0}$$

$$- \tilde{F}_1 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0},$$

hvor \tilde{H} er hydrofonsignalet, \tilde{G} er geofonsignalet, \tilde{w} er amplitudeskaleringsfunksjonen, k_z er et vertikalt bølgetall, z_r er dybden av streameren under vannoverflaten, z er vertikal

retning målt nedover fra vannoverflaten og \tilde{F}_1 er det første tilpasningsfilteret.

8. Fremgangsmåte ifølge krav 7, hvor subtraheringen av den
5 filtrerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten blir oppnådd ved å beregne følgende uttrykk i frekvens/bølgetall-
domenet:

$$10 \quad \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0} - \tilde{F}_2 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z)] \Big|_{z \rightarrow 0},$$

hvor \tilde{F}_2 er det andre tilpasningsfilteret.

9. Fremgangsmåte ifølge krav 8, hvor tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1
15 og \tilde{F}_2 kompensere for uoverensstemmelser mellom de oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene.

10. Fremgangsmåte ifølge krav 9, hvor tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1
og \tilde{F}_2 kompensere for amplitudeuoverensstemmelser mellom de
20 oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene.

11. Fremgangsmåte ifølge krav 9, hvor tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1
og \tilde{F}_2 kompensere for faseuoverensstemmelser mellom de
oppadgående og nedadgående trykkbølgefeltkomponentene.

25

12. Fremgangsmåte ifølge krav 8, hvor tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1
og \tilde{F}_2 kompensere er adaptiv Wiener-filtre.

13. Fremgangsmåte ifølge krav 8, hvor tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 er lik null.
- 5 14. Fremgangsmåte ifølge krav 8, hvor tilpasningsfiltrene \tilde{F}_1 og \tilde{F}_2 er lik en.
- 10 15. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor subtraheringen av den filtrerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten demper partikkelbevegelsessensorstøy i den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten med et cosinusfilter.
- 15 16. Fremgangsmåte ifølge krav 2, hvor subtraheringen av den filtrerte, oppadgående trykkbølgekomponenten fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten demper partikkelbevegelsessensorstøyen i den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten med et cosinusfilter.
- 20 17. Fremgangsmåte ifølge krav 5, hvor subtraheringen av den filtrerte, nedadgående komponenten fra den ekstrapolerte, oppadgående komponenten demper partikkelbevegelsessensorstøyen i den oppadgående trykkbølgefeltkomponenten med et cosinusfilter.
- 25 18. Fremgangsmåte ifølge krav 6, hvor subtraheringen av den filtrerte, oppadgående trykkbølgekomponenten fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten demper partikkelbevegelsessensorstøyen i den nedadgående trykkbølgefeltkomponenten med et cosinusfilter.
- 30 19. Fremgangsmåte ifølge krav 5, hvor subtraheringen av den

filtrerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den ekstrapolerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten blir oppnådd ved å beregne følgende uttrykk i frekvens/bølgetall-
domenet:

5

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z_{obs})] \\ - \tilde{F}_1 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z_{obs})]$$

10 hvor \tilde{H} er hydrofonsignalet, \tilde{G} er geofonsignalet, \tilde{w} er amplitudeskaleringsfunksjonen, k_z er et vertikalt bølgetall, z_r er dybden av streameren under vannoverflaten, z_{obs} er dybden av den virtuelle observasjonsflaten under vannoverflaten, og \tilde{F}_1 er det første tilpasningsfilteret.

15 20. Fremgangsmåte ifølge krav 6, hvor subtraheringen av den filtrerte, oppadgående trykkbølgefeltkomponenten fra den ekstrapolerte, nedadgående trykkbølgefeltkomponenten blir oppnådd ved å beregne følgende uttrykk i frekvens/bølgetall-
domenet:

20

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} + \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[ik_z(z_r - z_{obs})] \\ - \tilde{F}_2 \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{H} - \tilde{w}\tilde{G}}{2} \right) \exp[-ik_z(z_r - z_{obs})]$$

25 hvor \tilde{H} er hydrofonsignalet, \tilde{G} er geofonsignalet, \tilde{w} er amplitudeskaleringsfunksjonen, k_z er et vertikalt bølgetall, z_r er dybden til streameren under vannoverflaten, z_{obs} er dybden av den virtuelle observasjonsflaten under vannoverflaten, og \tilde{F}_2 er det andre tilpasningsfilteret.

1/4

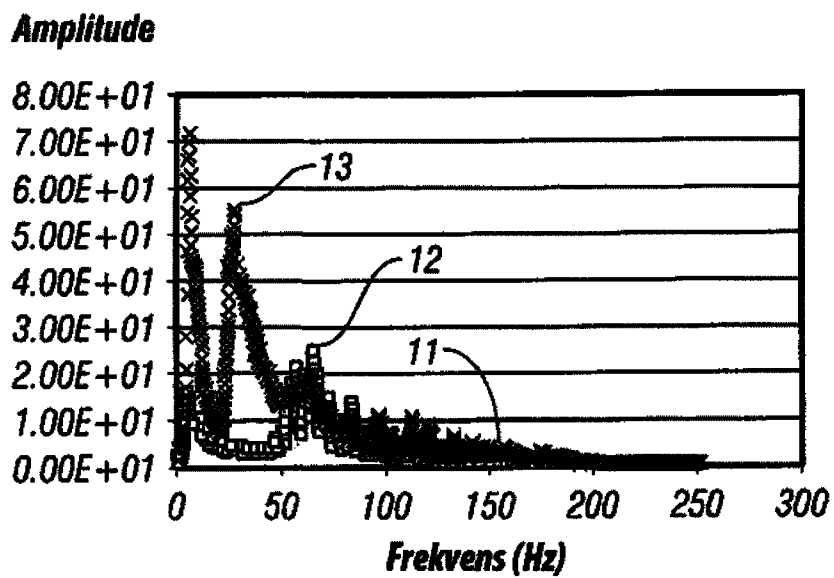


FIG. 1

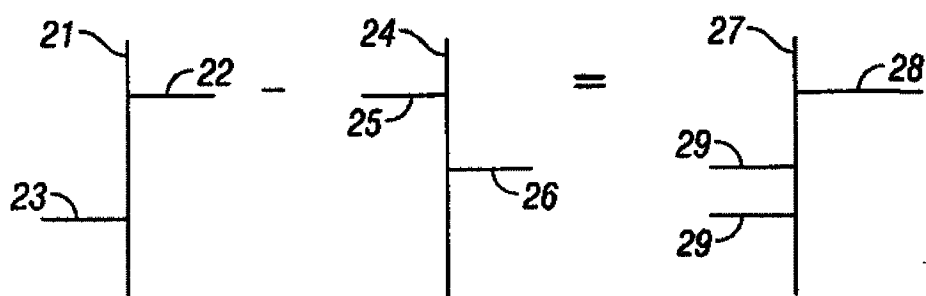


FIG. 2

2/4

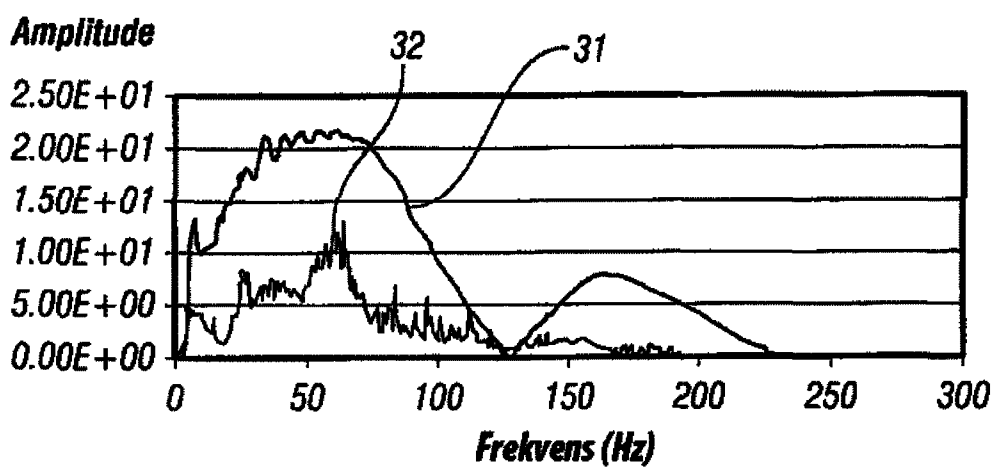


FIG. 3

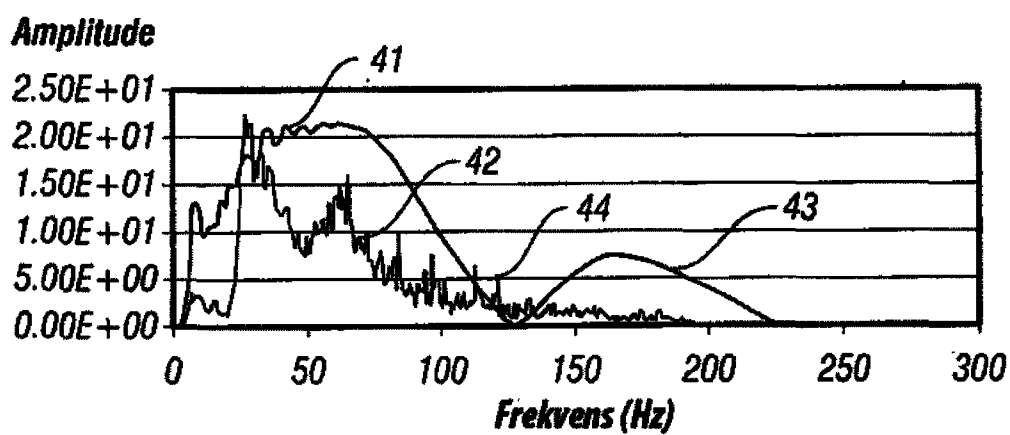


FIG. 4

3/4

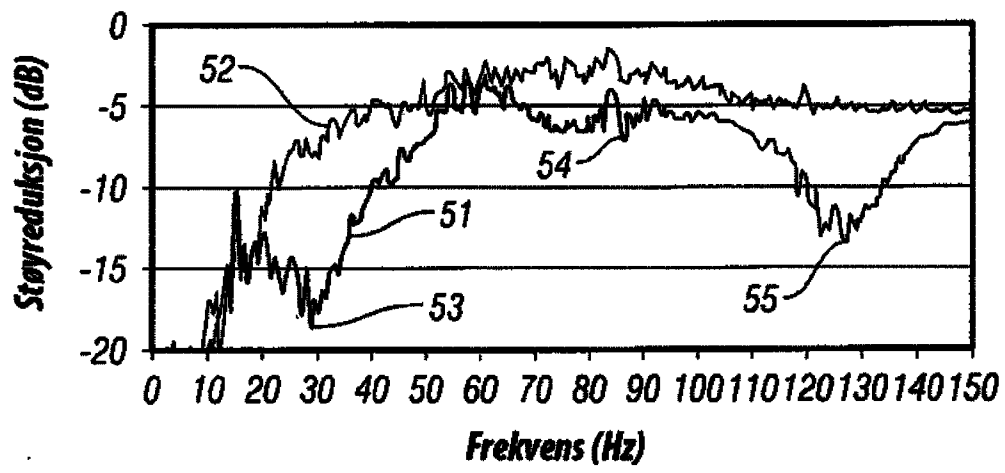


FIG. 5

4/4

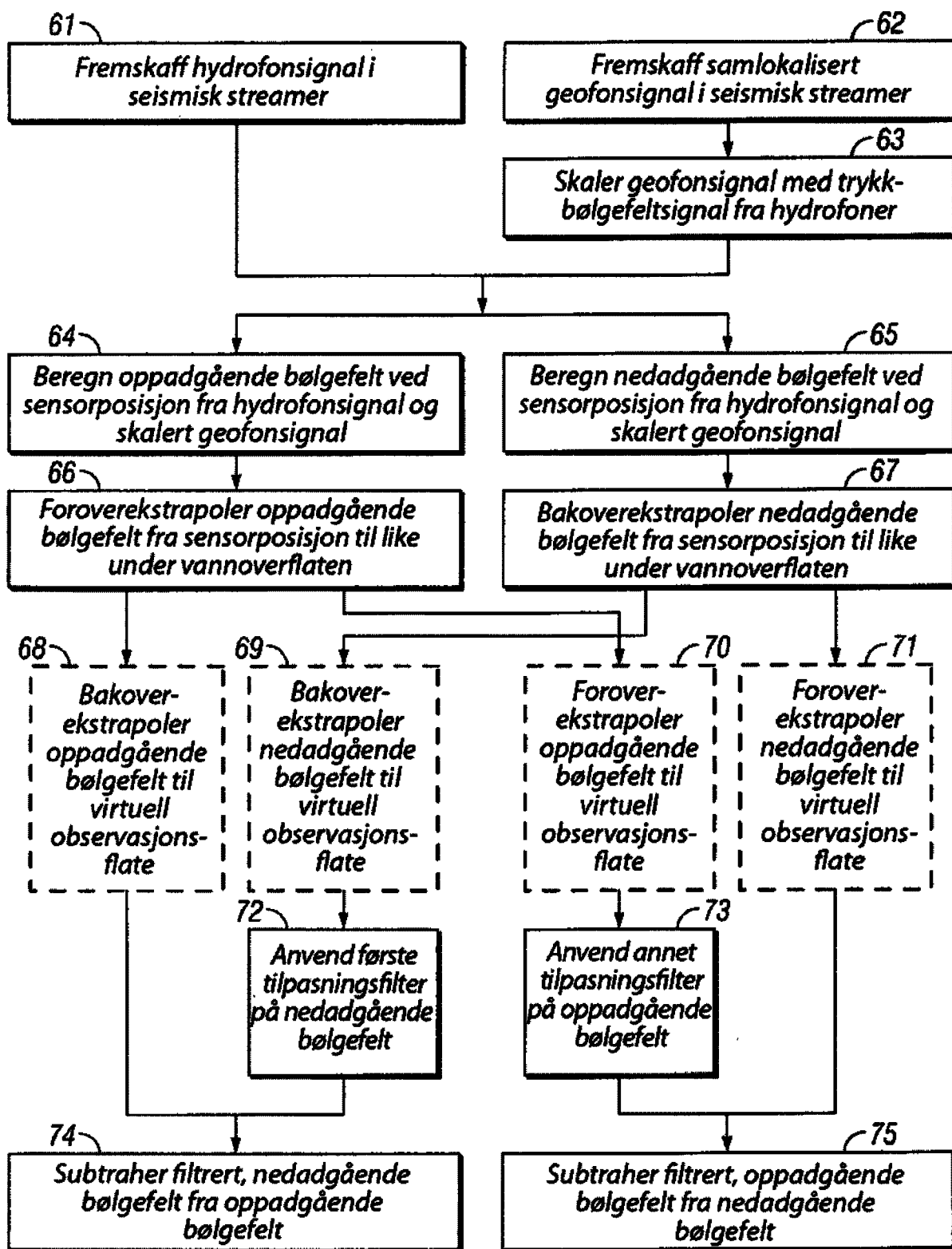


FIG. 6