

NGU-rapport 91.201

Målinger med grunn  
refleksjonsseismikk på land.  
Teknikker, utførelse og  
resultater.

Rapport nr. 91.201		ISSN 0800-3416		Åpen/ <del>Føderlig</del> tilgjengelig	
<p>Tittel:</p> <p>Målinger med grunn refleksjonsseismikk på land. Teknikker, utførelse og resultater</p>					
Forfatter:			Oppdragsgiver:		
Eirik Muring og Jan S. Rønning			NGU		
Fylke:			Kommune:		
Kartbladnavn (M. 1:250 000)			Kartbladnr. og -navn (M. 1:50 000)		
Forekomstens navn og koordinater:			Sidetall: 42		Pris: kr. 60,-
			Kartbilag:		
Feltarbeid utført:		Rapportdato:		Prosjektnr.:	
		24.06.1991		62.2533.00	
				Seksjonssjef:	
				<i>Jan S. Rønning</i>	
<p>Sammendrag:</p> <p>I 1988 gikk NGU til anskaffelse av utstyr for målinger av grunn refleksjonsseismikk på land. Prosjektet 'Refleksjonsseismikk på land' ble opprettet med tanke på utvikling av teknikk og kompetanse. Etter 3 år med anvendelse av metoden er prosjektet avsluttet, og rapporten er ment som en sluttrapport. Rapporten beskriver bl.a. følgende;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anvendelsesområder for grunn refleksjonsseismikk på land</li> <li>- Kort teoretisk bakgrunn for metoden</li> <li>- Betingelser for anvendelse</li> <li>- Utstyr</li> <li>- Feltprosedyrer</li> <li>- Refleksjonsseismiske måleteknikker</li> <li>- Sammenligning mellom refraksjonsseismikk og grunn refleksjonsseismikk</li> <li>- Presentasjon av oppnådde resultater</li> <li>- Framtidige planer for videreutvikling av måleteknikker</li> </ul>					
Emneord		Kvartærgeologi		Refleksjonsseismikk	
Geofysikk		Hydrogeologi			
		Ingeniørgeologi		Fagrapport	

## INNHOLD

	Side
1. INNLEDNING	5
2. HISTORIKK	5
3. ANVENDELSESOMRÅDER	6
4. BETINGELSER FOR ANVENDELSE	7
4.1 Energisering	7
4.2 Grunnforhold	7
4.3 Geofoner	7
4.4 Seismograf	8
5. KORT TEORETISK BAKGRUNN	9
5.1 Bølgetyper	9
5.2 Energiforplantning	10
5.3 Seismiske bølgers geometri	11
5.4 Vertikal oppløsning	14
6. REFRAKSJONSSEISMIKK VS. REFLEKSJONSSEISMIKK	14
6.1 Fordeler med refraksjonsseismikk	14
6.2 Ulemper med refraksjonsseismikk	14
6.3 Fordeler med grunn refleksjonsseismikk	15
6.4 Ulemper med grunn refleksjonsseismikk	15
7. UTSTYR	16
7.1 Energikilde	16
7.2 Geofoner	17
7.2.1 Oppbygning	17
7.2.2 Plassering	17
7.2.3 Geofonavstand	18
7.3 Seismograf	18
8. PLANLEGGING, FELTPROSEDYRER	18
8.1 Planlegging	18
8.2 Feltprosedyrer	19
8.2.1 'Walk-away' støytest	19
8.2.2 Opptaksparametre	20
9. 'OPTIMUM OFFSET'-TEKNIKKEN, PRINSIPP	20

10. 'COMMON DEPTH-POINT'-TEKNIKKEN (CDP), PRINSIPP	22
11. PROSESSERING AV REFLEKSJONSSEISMISKE DATA	24
12. SAMMENLIGNING, CDP OG 'OPTIMUM OFFSET'	25
13. PROSESSERINGSEFFEKTER	27
13.1 AGC	27
13.2 Båndpassfiltrering	27
13.3 Residuell statistisk korreksjon	28
14. EKSEMPLER PÅ OPPTAK	29
14.1 'Optimum offset'	29
14.1.1 PTS	29
14.1.2 Litledalselva	30
14.2 CDP	30
14.2.1 Godøy	30
14.2.2 Salsnes	30
14.2.3 Oppstad	31
14.2.4 Henning	32
15. FRAMTIDIGE PLANER	32
Referanser	34

## Bilag

1. Oversiktskart
2. Refleksjonsseismisk tidsseksjon, PTS
3. Refleksjonsseismiske tidsseksjoner, Litledalselva
4. Refleksjonsseismiske tidsseksjoner, Godøy
5. Refleksjonsseismiske tidsseksjoner, Salsnes
6. Refleksjonsseismisk tidsseksjon, Oppstad
7. Refleksjonsseismisk tidsseksjon, Henning

## **1. INNLEDNING**

I 1988 gikk NGU til anskaffelse av utstyr for målinger av grunn refleksjonsseismikk på land. Prosjektet 'Refleksjonsseismikk på land' ble opprettet med tanke på utvikling av teknikk og kompetanse. Etter 3 år med målinger av grunn refleksjonsseismikk er prosjektet avsluttet, og dette dokumentet er ment som en sluttrapport. Rapporten beskriver bl.a. følgende;

- Anvendelsesområder for grunn refleksjonsseismikk på land (anvendelsesområder pr. i dag og for framtida)
- Kort teoretisk bakgrunn for metoden
- Betingelser for anvendelse
- Utstyr
- Feltprosedyrer
- Refleksjonsseismiske måleteknikker ('optimum offset' og 'common depth-point' (CDP)).  
Prinsipper, utførelse og sammenligning
- Sammenligning mellom refraksjonsseismikk og grunn refleksjonsseismikk
- Presentasjon av oppnådde resultater
- Framtidige planer for videreutvikling av måleteknikker

Rapporten er også ment å være en veiledning for andre som vil arbeide med grunn refleksjonsseismikk og høste av våre erfaringer. Interessen for metoden har vokst siden dens spede begynnelse, og resultater/erfaringer er presentert i forskjellige sammenhenger både i inn- og utland. Metoden har vist seg spesielt godt egnet til kartlegging av strukturer og lag i løsmasser.

## **2. HISTORIKK**

Metoden er basert på modifisering av konvensjonelle refleksjonsseismiske teknikker for kartlegging av reflektorer på dyp i området 10 m til flere hundre meter. For bare 10-15 år siden var refraksjonsseismikk den eneste seismiske metode som kunne anvendes innen geoteknikk, grunnvannsundersøkelser og ingeniørgeologi. Før 1978 ble det gjort sporadiske forsøk med grunn refleksjonsseismikk, men datidens seismografer var ikke egnet til dette formål. Grunne refleksjoner ble observert på analoge opptak (konvensjonelle seismografer). Fra 1978 til i dag har utvikling av instrumenter (seismografer, energiseringskilder, personlige datamaskiner (PD), geofoner) gjort det mulig å utføre kartlegging av grunne objekter ved hjelp av refleksjonsseismikk til akseptabel pris. Følgende institusjoner/personer har vært framtrødende i denne utviklingen (Hunter et al. 1988b);

- Universitetet i Utrecht (Helbig)
  - CDP-målinger på tidevannsflater
- Kansas geologiske undersøkelse (Steeple, Miller, Knapp)
  - CDP-målinger med konvensjonell seismograf
- Canadas geologiske undersøkelse (Hunter, Pullan)
  - 'Optimum offset'-teknikk, digital seismograf tilknyttet mikromaskin

### **3. ANVENDELSESOMRÅDER**

Under følger en oversikt over anvendelsesområder for grunnrefleksjonsseismikk. Siden metoden er forholdsvis ung, er det forventet at den med tiden vil få et enda bredere anvendelsesområde.

- *Kvartærgeologisk kartlegging.* Metoden er spesielt godt egnet til kartlegging av laggrenser og strukturer i løsmasser. Både egne og andre institusjoners undersøkelser viser dette. Metoden er også godt egnet ved kartlegging av fjelltopografi under løsmassene. Referanser: Hunter et al. 1988a, Pullan & Hunter 1990, Roberts et al. in press, Miller et al. 1989, Hunter et al. 1988b, Steeples & Miller 1989, Hunter & Pullan 1989, Mauring et al. 1990a, Blikra et al. 1991.
- *Kartlegging av strukturer og laggrenser i bergarter.* Metoden har vist å ha anvendelser spesielt ved kartlegging av flattliggende sprekkesoner, hulrom (tunneler, gruveganger) og stratigrafi i yngre bergarter. Referanser: Dobecki 1989, Ploug & Klitten 1988, Miller & Steeples 1990, Gochioco & Cotten 1989, Juhlin et al. 1991.
- *Grunnvannsundersøkelser.* Refleksjonsseismikk har vist seg å være et godt hjelpemiddel ved kartlegging av aquiferer og nedgravde kanaler, spesielt i deltaområder der elektriske og elektromagnetiske målinger ikke kan benyttes på grunn av saltvannsinntrengning. Referanser: Meekes et al. 1990, Slaine et al. 1990, Steeples & Miller 1989, Hunter et al. 1988b, Soldal et al. 1990.
- *Miljøundersøkelser.* Refleksjonsseismikk kan benyttes ved forundersøkelser ved plassering av avfallsdeponi. Kan også kartlegge fjelltopografi under løsmassene nær farlige avfallsplasser. Referanser: Slaine et al. 1990, Steeples & Miller 1989.
- *Ressursundersøkelser.* Metoden er ved flere tilfeller benyttet ved kartlegging av kullforekomster. Kan også tenkes benyttet ved kartlegging av nedgravde kanaler (placer-forekomster) og ved kartlegging av sand/grus-forekomster. Referanser: Hunter et al. 1988a, Palmer 1987, Hawkins et al. 1987, Wilson 1990.

- *Anvendelser innen ingeniørgeologi.* Metoden benyttes ved kartlegging av dyp til fjell. Dette inngår ofte som forundersøkelser ved prosjektering av damanlegg, fundamenter osv. Referanser: Pullan & Hunter 1990, Hunter & Pullan 1989, Hunter et al. 1988b, Steeples & Miller 1989.

#### **4. BETINGELSER FOR ANVENDELSE**

Anvendelsen av grunn refleksjonsseismikk er basert på god forplantning og registrering av høyfrekvent energi. De frekvenser som benyttes ved grunn refleksjonsseismikk ligger vanligvis i området 100-500 Hz, og reflektorer kan kartlegges på dyp i området 10 m til flere hundre meter. Ved offshore seismikk benyttes frekvenser i området 10-90 Hz, og man kan kartlegge reflektorer på flere kilometers dyp.

##### **4.1 Energisering**

Energiseringskilden som benyttes må gi høye frekvenser og samtidig produsere mye energi. Aktuelle energiseringskilder kan variere fra lokalitet til lokalitet. Spesiellagde haglbørser (8- 10- eller 12-kalibers) tilfredsstillende ofte de betingelser som er nevnt over (Miller et al. 1986, Pullan & MacAuley 1987).

##### **4.2 Grunnforhold**

Løsavsetninger og fjell forplanter lavfrekvent energi bedre enn høyfrekvent energi. Krystalline bergarter forplanter høyfrekvent energi bedre enn dårlig konsoliderte, sedimentære bergarter. Finkornige, vannmettede løsmasser forplanter høyfrekvent energi godt. Erfaringer viser at det er viktigst at løsmassene er vannmettede. Tørt og grovkornet materiale forplanter høyfrekvent energi dårlig. Det ovenfornevnte gjelder P-bølger. Det er vist at S-bølger forplantes bedre enn P-bølger i tørt og grovkornet materiale, og det er med hell utført flere undersøkelser i Canada i områder der en har slikt materiale (Neave & Pullan 1989, Hunter et al. 1991, Pullan et al. 1991).

##### **4.3 Geofoner**

En videre undertrykking av lavfrekvent energi skjer ved bruk av geofoner med høy egenfrekvens. En 50 Hz geofon har liten respons på frekvenser lavere enn 50 Hz. Ved grunn refleksjonsseismikk brukes vanligvis 50 eller 100 Hz geofoner.

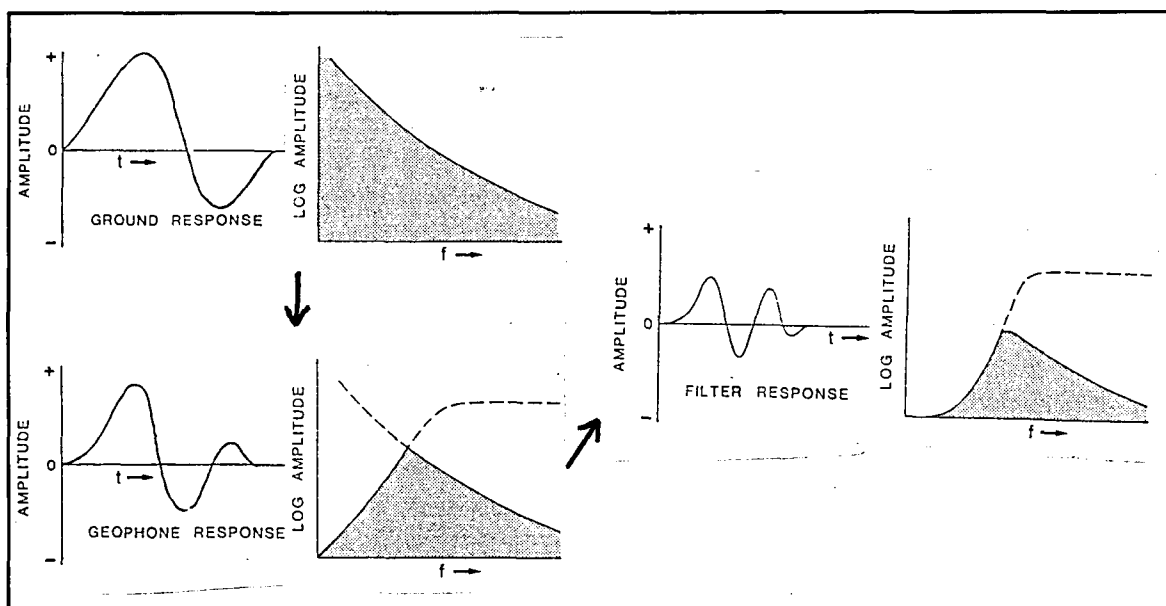


Fig. 1: Forandring av frekvensinnhold fra skudd til opptak (fra Hunter et al. 1988b)

#### 4.4 Seismograf

For å få registrert hørfrekvente refleksjoner med liten amplitude, kreves det at seismografen har et bredt dynamikkområde (høy oppløsning) og tett samplingsintervall. Oppløsning angir hvor mange nivå amplitudeutslagene kan deles inn i ved analog-digital-konverteringen. Samplingsintervall angir hvor tett amplitudeutslagene registreres med hensyn på tiden. Samplingsfrekvensen ( $= 1/\text{samlingsintervall}$ ) må være minst dobbelt så høy som den høyeste frekvensen i signalet (Nyquist-teoremet).

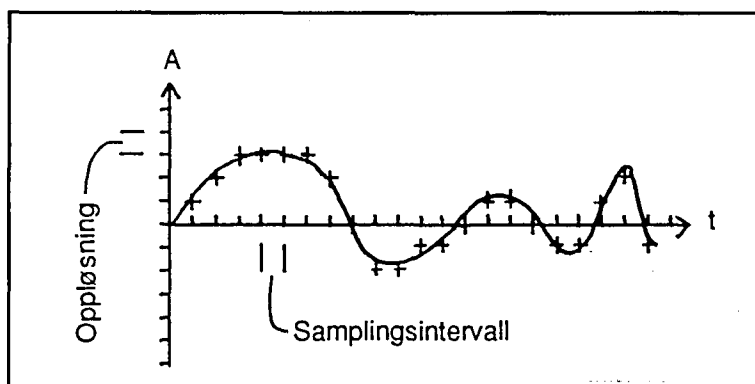


Fig. 2: Sammenhengen mellom oppløsning og samplingstetthet. Krysse-  
ne angir digital representasjon av bølgeformen for valgt oppløsning og  
samplingstetthet.

En seismograf må i tillegg ha mulighet til analog frekvensfiltrering, slik at uønskede frekvenser kan fjernes ved opptak. Det er spesielt av interesse å fjerne frekvenser som er representert i støy. Dette er ofte lavfrekvent, kraftig energi som gir metning i oppløsningen og som kan medføre at lavenergetiske signaler ikke blir registrert. Et

'NOTCH'-filter benyttes for å fjerne 50 Hz-støy fra elektriske kabler og anlegg.



## 5. KORT TEORETISK BAKGRUNN

Kapittelet er basert på Sheriff & Geldart 1982, Beck 1981 og Hunter et al. 1988b.

### 5.1 Bølgetyper

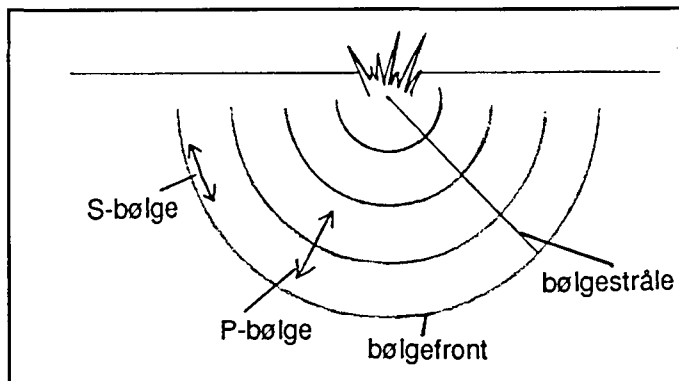


Fig. 3: Partikkelbevegelser for P- og S-bølger.

#### P-bølger

Ved P-bølger er partikkelbevegelsen i jorda i samme retning som bølgenes utbredelsesretning. Denne typen bølger beveger seg med størst hastighet, og er den viktigste bølgetype i refleksjonsseismikk (andre navn: kompresjonsbølge, longitudinalbølge). Hastigheten er gitt ved;

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$\rho$  = tettheten i mediet som bølgen går gjennom  
 $\lambda, \mu$  = Lamé's konstanter ( $\mu$  kalles også skjærmodul)

#### S-bølger

Partikkelbevegelsen er vinkelrett på bølgeretningen (annet navn: skjærbølger). Hastighet;

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Siden  $\lambda$  og  $\mu$  er større enn 0, ser vi at  $v_p > v_s$ . Vanligvis er størrelsen på  $v_s$  ca. 50-60 % av  $v_p$ . For S-bølger dekomponeres vanligvis partikkelbevegelsen i horisontal- og vertikalkomponent (SH og SV). Væsker kan ikke oppta skjærkrefter ( $\mu = 0$ ), derfor kan ingen skjærbølger transmitteres gjennom vann.

#### Overflatebølger

Disse betraktes som støy ved undersøkelser med refleksjonsseismikk.

- Rayleigh-bølger ('ground roll') betegner en type overflatebølger der partikkelbevegelsen er ellipseformet i et vertikalt plan parallelt med retningen for bølgen. Hastigheten avhenger av  $v_p$  og  $v_s$ . Vi har vanligvis at  $v_r \approx 0.93v_s$ . Rayleigh-bølgene er lavfrekvente og amplituden avtar raskt mot dypet.

- Luftbølger. Disse kan gi framtreddende støy dersom skuddet 'smeller'. Lydhastigheten er 330-340 m/s.

Tabell 1 viser P-bølge hastigheter i vanlige media.

Luft		330 m/s
Vann		1400-1500 m/s
Organisk materiale		150-500 m/s
Sand og grus	- over vannmettet sone	200-800 m/s
Sand og grus	- i vannmettet sone	1400-1700 m/s
Morene	- over vannmettet sone	700-1500 m/s
Morene	- i vannmettet sone	1500-1900 m/s
Hardpakket bunnmorene		1900-2800 m/s
Leire		1100-1800 m/s
Oppsprukket fjell		< 4000 m/s
Fast fjell		3500-6000 m/s

Tabell 1: P-bølge hastigheter i vanlige media.

## 5.2 Energiforplantning

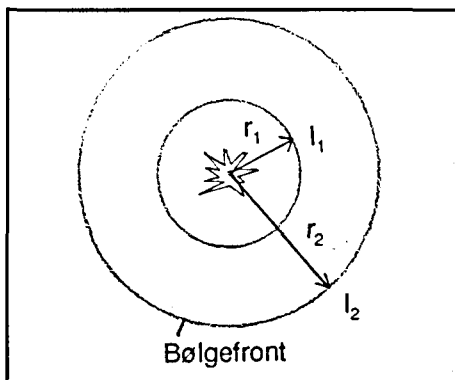


Fig. 4: Sfærisk divergens.

### Geometrisk spredning

Geometrisk spredning medvirker til at intensiteten av sfæriske bølger avtar proporsjonalt med kvadratet av avstanden fra lydkilden. Dette kalles sfærisk divergens. Med utgangspunkt i figur 4 har vi;

$$I_2 = I_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2$$

$I$  = intensitet

$r$  = avstand fra lydkilde

### Absorpsjon

I tillegg til geometrisk spredning vil en del av energien fra en lydkilde bli absorbert av mediet og overføres til varme. Amplituden ser ut til å avta eksponentielt med avstanden fra lydkilden ved absorpsjon;

$$A = A_0 e^{-\eta x}$$

$A_0$  = amplitude for  $x=0$

$x$  = avstand fra lydkilde

$\eta$  = absorpsjonskoeffisient

Størrelsen  $\eta$  er avhengig av faktorer som frekvens og materialtype.

### Refleksjon og transmisjon

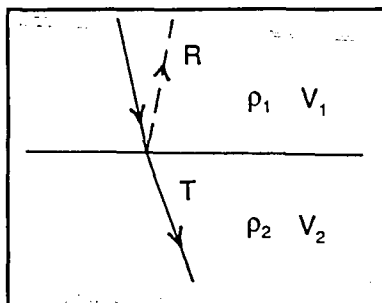


Fig. 5: Reflektert og transmittert energi ved grenseflate.

Når energi treffer en grenseflate som skiller medier med forskjellig akustisk impedans ( $\rho V$ ), vil en del av energien reflekteres og en del transmitteres. For små innfallsvinkler gjelder følgende uttrykk;

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

$$T = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

R = andel av energi som blir reflektert

T = andel av energi som blir transmittert

Ovenstående uttrykk er spesialtilfeller av Zoeppritz' likninger for små innfallsvinkler.

### 5.3 Seismiske bølgers geometri

#### Huygens' prinsipp

Hvert punkt på en bølgefront kan ses på som en ny bølgekilde.

Dette er et av de viktigste prinsipper som utnyttes i seismikk. Prinsippet benyttes ved opptegning av bølgefronter og til å forutsi hvordan bølger brer seg gjennom jorda.

#### Snells lov

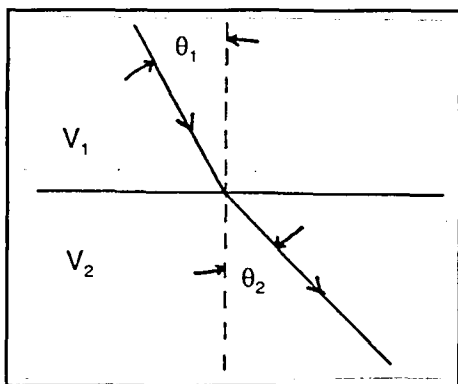


Fig. 6: Snells lov.

Figur 6 er en illustrasjon på Snells lov. Brytningen (refraksjonen) av bølger ved en grenseflate er avhengig av innfallsvinkel og seismisk hastighet i mediene over og under grenseflaten. Dette uttrykkes ved;

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

#### Refraksjoner

Med utgangspunkt i Snells lov og figur 6 framgår at refrakterte bølger vil følge laggrensen og gå opp igjen til overflaten når  $\theta_2 = 90^\circ$ . Disse bølgene kalles kritisk

refrakterte, og Snells lov forenkles til;

$$\sin\theta_1 = \frac{V_1}{V_2}$$

$\theta_1$  kalles i dette tilfellet kritisk vinkel. Forutsetningen for at kritisk refrakterte bølger skal kunne registreres er at  $V_2 > V_1$ . Direkte bølger eller refrakterte bølger vil alltid registreres først i et seismisk opptak. Ved refraksjonsseismiske målinger registreres derfor første ankomne bølger.

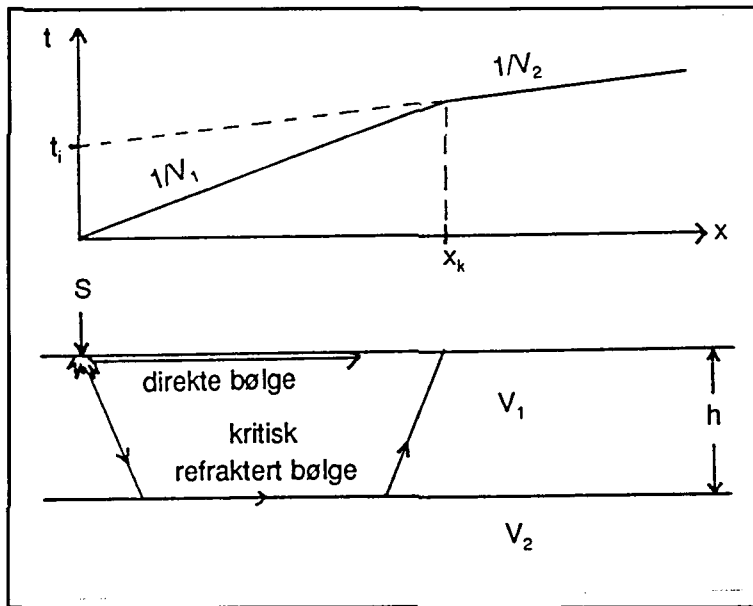


Fig. 7: Refraksjonsseismikk, prinsippskisse.

Figur 7 viser en 2-lagsmodell med horisontal grenseflate. Ved en viss avstand  $X_k$  (knekkpunktavstand) vil refrakterte bølger fra lag 2 nå geofoner på overflaten før den direkte bølgen gjennom lag 1 fra skuddpunkt S. Det inverse stigningstall av kurvesegmentene angir hastigheter i lagene (ved skrå laggrense angir segment 2 tilsynelatende hastighet i lag 2). Knekkpunktavstand kan benyttes ved dybdebestemmelser.

$$\text{Gangtid for direkte bølge: } t_1 = \frac{X}{V_1}$$

$$\text{Gangtid for refraktert bølge: } t_2 = \frac{X}{V_2} + \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

$$\text{I knekkpunktavstand } X_k \text{ har vi } t_1 = t_2 \text{ som medfører: } h = \frac{X_k}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

Dersom intercept-tid benyttes til dybdebestemmelse ( $t_1$  i figuren), får vi følgende uttrykk:

$$h = \frac{t_1}{2} \frac{V_1 V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

Mer kompliserte forhold har man ved flere lag og skrå laggrenser, og forskjellige tolknings-teknikker må anvendes (Sjøgren 1984, Palmer 1980). Av likningene for gangtid for direkte og refrakterte bølger ser vi at gangtiden øker proporsjonalt med avstanden  $x$ , og disse bølgene opptrer derfor som lineære hendelser i seismisk tidsseksjon.

### Refleksjoner

Ved refleksjonsseismikk registreres reflekterte bølger, og man utnytter informasjon fra hele opptak istedenfor kun første ankomne bølger som ved refraksjonsseismikk. Figur 8 viser en 2-lagsmodell med horisontal grenseflate. Tovegs gangtid i følge figur 8;

$$t = \frac{\sqrt{X^2 + 4h^2}}{v}$$

Tovegs gangtid for  $x = 0$  ( $t_0$ ) kan benyttes ved dybdebestemmelse;

$$h = \frac{vt_0}{2}$$

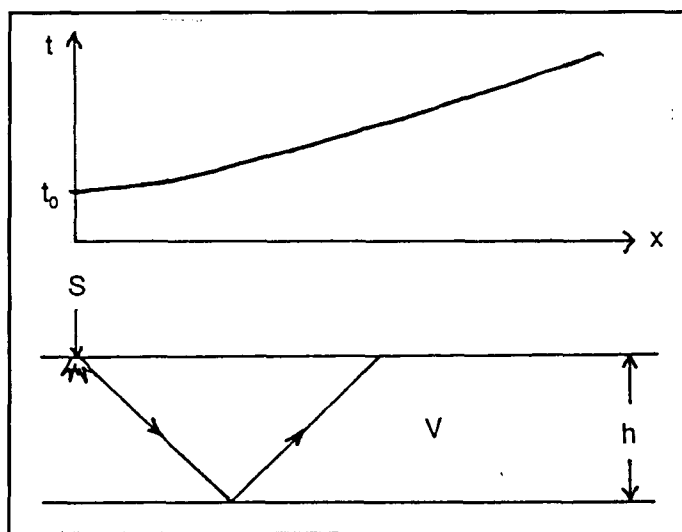


Fig. 8: Refleksjonsseismikk, prinsipp.

En omskriving av gangtidfunksjonen for refleksjoner gir;

$$\frac{v^2 t^2}{4h^2} - \frac{x^2}{4h^2} = 1$$

Dette er en hyperbel, og refleksjoner opptrer derfor som hyperbler i seismisk tidsseksjon (x-t-diagram).

### Diffraksjoner

Fra 'punkt'-reflektorer, reflektorbrudd og diskonformiteter blir energien diffraktert istedenfor reflektert eller refraktert. Diffraksjoner gir seg til kjenne som

buer i tidsseksjonen ('paraplyer'), der toppunktet på buen lokaliserer bruddet på reflektoren (se figur 9). Diffraksjoner kan i enkelte tilfeller misoppfattes som refleksjoner i flerkannelsopptak, men har krummere hyperbler (halve NMO-hastigheten i forhold til refleksjoner).

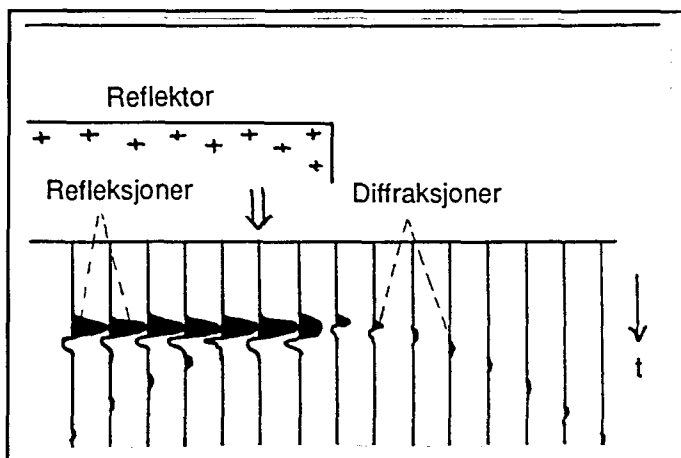


Fig. 9: Diffraksjon.

### Multipler

Multipler er hendelser som har gjennomgått mer enn én refleksjon. Ved offshore seismikk er havbunnsmultipler vanlige og utgjør et problem ved tolkning av seksjoner. På land kan det opptre multipler fra grunnvannsoverflaten eller fra andre kraftige reflektorer. En enkel multiplere av en reflektor gir seg til kjenne ved at den opptrer ved

dobbel gangtid og med dobbel helning i forhold til primære refleksjoner. Eksempler på multipler er vist i figur 10.

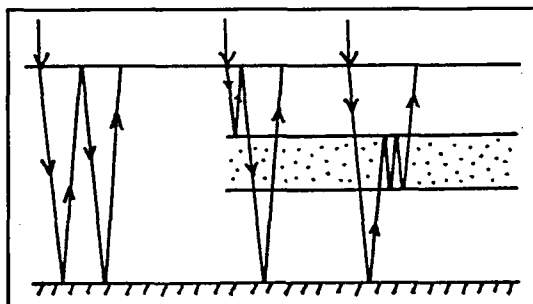


Fig. 10: Eksempler på multipler.

#### 5.4 Vertikal oppløsning

Vertikal oppløsning refererer seg til minimum avstand mellom to reflektorer slik at vi kan si at to reflektorer opptrer og ikke én. Teoretisk kan man skille reflektorene dersom de har en avstand som er større enn  $\lambda/4$ . Oppløsningen øker altså med økende frekvens av utsendt signal.

Eks.:  $f = 300 \text{ Hz}$ ,  $v = 1500 \text{ m/s} \Rightarrow \lambda = 5 \text{ m} \Rightarrow \lambda/4 = 1.25 \text{ m} = \text{vertikal oppløsning}$

## 6. REFRAKSJONSSEISMIKK VS. REFLEKSJONSSEISMIKK

### 6.1 Fordeler med refraksjonsseismikk

- Enkelt utstyr.
- Det oppnås som regel god bestemmelse av seismiske hastigheter.
- Eneste seismiske metode som er anvendbar ved grunne dyp til refraktor (<10-15 m).
- Kan bestemme seismisk hastighet i fjell. Godt egnet metode ved påvisning av svakhetssoner i fjell.

### 6.2 Ulemper med refraksjonsseismikk

- Metoden baserer seg på at seismisk hastighet øker med dypet. Dersom denne betingelsen ikke er oppfylt, får vi hastighetsinversjon, og vi får ikke registrert refrakterte bølger fra et lag dersom det har lavere seismisk hastighet enn laget over. Beregnete dyp til lag under blir da for store.
- Selv om ovenstående betingelse er oppfylt, kan et lag være for tynt og/eller ha for liten hastighetskontrast til laget over og under, slik at refrakterte bølger fra laget under når overflaten først. I et slikt tilfelle vil laget ikke erkjennes i måledata, og vi har et blindsonelag. Dette resulterer i at beregnet dyp til underliggende lag blir for lite.
- Ved store dyp til refraktor blir skudd-geofonavstanden stor. Dette medfører også at det må brukes store ladninger for å få fram nok energi.

- Vanskelig å kartlegge interne strukturer i løsmassene og 'røff' berggrunnstopografi.
- Vanskeligere tolkning ved økende antall hastighetslag. Større usikkerhet ved dybdebestemmelser.

### 6.3 Fordeler med grunn refleksjonsseismikk

- Kort skudd-geofonavstand letter den praktiske utførelsen av målingene. Krever ikke kraftige energiseringskilder.
- God kartlegging av strukturer og lag i løsmasser.
- God kartlegging av 'røff' fjelltopografi under løsmassene.
- Reduserte problemer med hastighetsinversjon og blindsonelag.

Figur 11 viser fordelene med grunn refleksjonsseismikk under ekstremt ugunstige forhold på målestedet. Den øverste figuren viser et opplegg for refraksjonsseismiske målinger med forventede resultater. Følgende forhold begrenser bruken av refraksjonsseismikk (med referanse til figuren); 1) nærvær av fiskeoppdrett vanskeliggjør fjernskudd for god fjelldekning. 2) Et tynt løsmasselag kan ikke erkjennes i måledata (blindsonelag). 3) Hellende fjellrefraktor medfører feil hastighetsbestemmelse på grunn av fjernskudd kun fra én side av profilet. Følgelig oppnås dårlig bestemmelse av dyp til fjell. 4) Skuddpunkt ved vei/bebyggelse medfører at man må ta mer hensyn til eventuell sprut. 5) Store ladninger må ofte benyttes ved fjernskudd, spesielt i eksempelet der skuddet må plasseres i tørt materiale med dårligere forplantning av energi. Økende løsmassemeknighet medfører i tillegg at avstanden til fjernskudd må økes for å få fjelldekning.

Figuren under viser tilsvarende målinger med refleksjonsseismikk, der ovenstående problemer er redusert/eliminert. Figuren viser også refleksjonsseismikkens fordel med direkte avtegning av laggrenser.

### 6.4 Ulemper med grunn refleksjonsseismikk

- Krever mer avanserte, digitale seismografer.
- Prosesseringskrevende (spesielt ved CDP).
- Dårligere bestemmelse av seismiske hastigheter, og kan ikke bestemme hastighet i fjell.

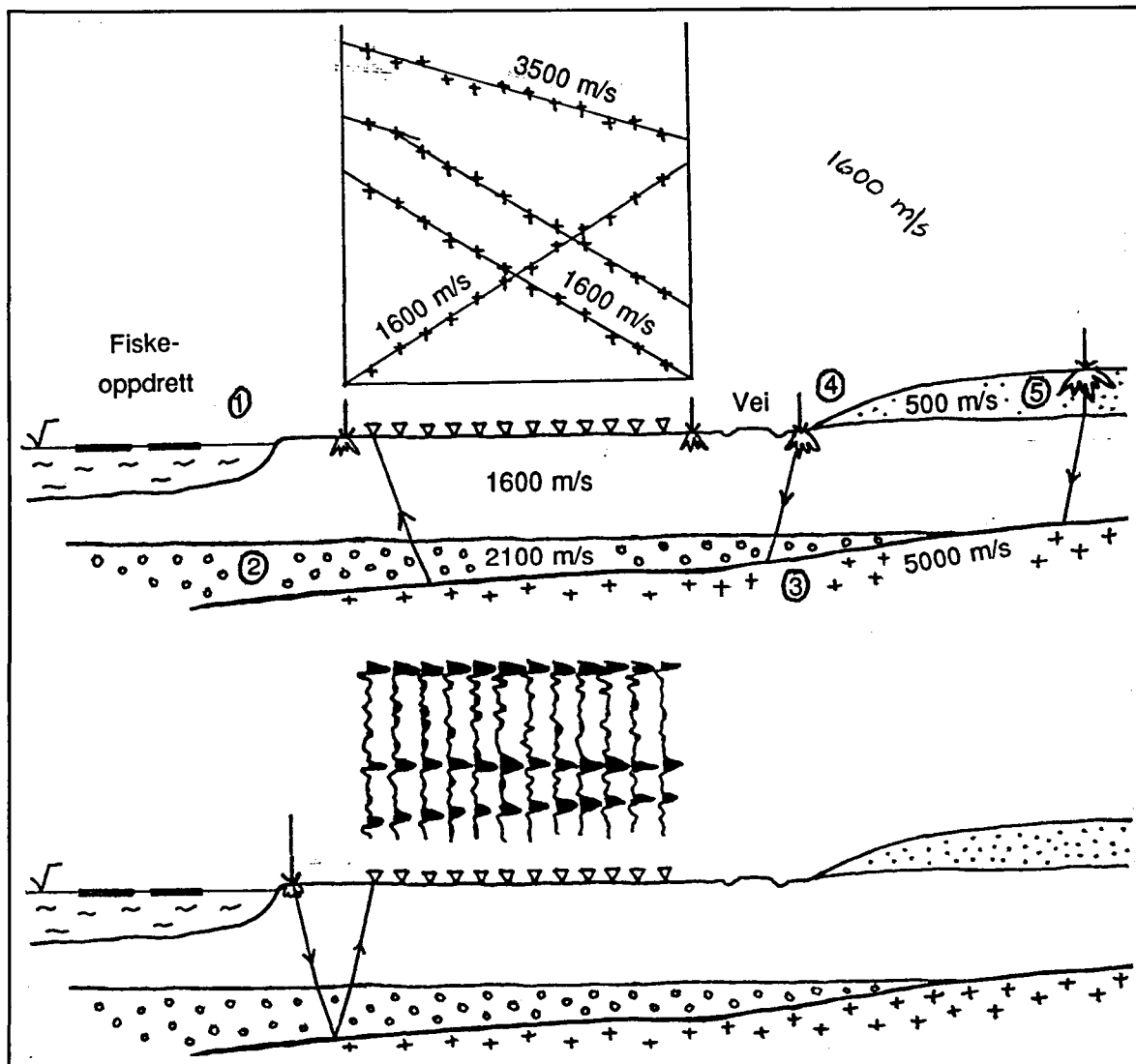


Fig. 11: Fordeler med refleksjonsselsmikkk framfor refraksjonsselsmikkk.

- Metoden er basert på god forplantning av hørfrekvent energi. Er best egnet ved finkornige og vannmettede masser i overflaten.

- Kan vanligvis ikke kartlegge reflektorer som ligger grunnere enn 10-15 m.

## 7. UTSTYR

### 7.1 Energikilde

Som energiseringskilde brukes en spesiallagd 12-kalibers haglbørse (se fig. 12). Børsa stikkes 0.5-1 m ned i jorda i oppspettede hull. Trekiler blir plassert rundt børsa for å dempe luftbølger og for å redusere sprut. En haglpatron settes i enden av børsa. Børsa er hul, og en avfyringsstang ('steel drop rod' i figur) slippes ned på en fjærbelastet tennstift i bunnen av børsa. Ved deto-



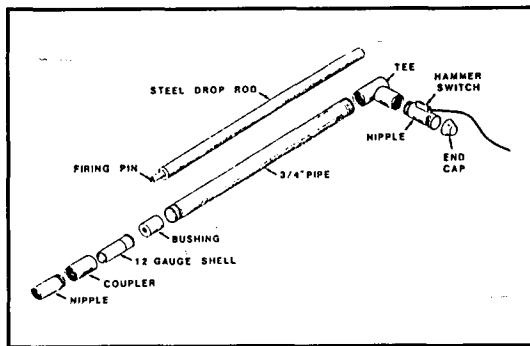


Fig. 12: Skisse som viser de enkelte bestanddeler i en 12-kalibers børs (etter Pullan & MacAuley 1987).

neringen blir stanga slått tilbake, og trykket registreres av en hammerbryter på toppen av stanga. Hammerbryteren sender i sin tur det registrerte signalet til seismografen via en kabel. Signalet starter (trigget) tidsregistreringen. Denne energiskilden er karakterisert ved at den produserer forholdsvis høyfrekvent energi av middels styrke. To børser blir vanligvis benyttet. Lading og skyting foretas mest rasjonelt av to personer, der én lader og én skyter.

## 7.2 Geofoner

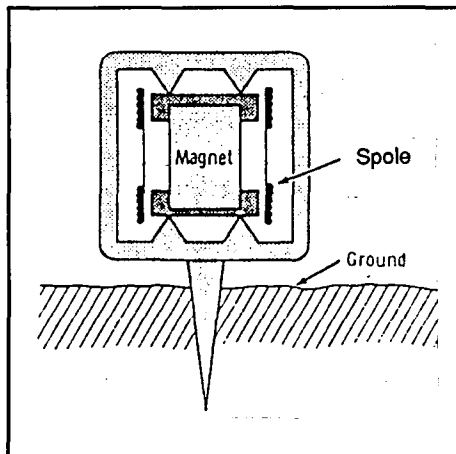


Fig. 13: Snitt som viser geofonens bestanddeler (etter Hunter et al. 1988b).

### 7.2.1 Oppbygning

Geofonen omgjør bevegelser i bakken til elektriske signal. De viktigste bestanddelene i en geofon er vist i fig. 13. Med utgangspunkt i figuren kan det sies at bevegelser i bakken fører til en relativ bevegelse mellom magnet og spole. Denne bevegelsen inducerer strøm i spolen. Amplituden på det elektriske signalet som dannes er proporsjonal med hastigheten av bevegelsen i bakken (Hunter et al. 1988b). Geofoner er karakterisert ved sin egenfrekvens. Ved NGU benyttes geofoner med høy egenfrekvens (50 Hz). Dette vil si at geofonene ikke gir nevneverdig respons på frekvenser lavere enn 50 Hz.

Den øvre grense av geofonens frekvensområde er i praksis 10-15 ganger egenfrekvensen (500-750 Hz for 50 Hz geofoner) på grunn av intern resonans (Atlas Copco AB). Geofoner med høy egenfrekvens medfører at lavfrekvent energi undertrykkes. Geofoner dempes med shuntmotstander for å unngå 'ringing' (vedvarende svingninger). Dette reduserer derimot geofonenes følsomhet.

### 7.2.2 Plassering

Geofonene plasseres vanligvis langs en linje på bakken. Avstanden mellom geofonene er fast. Ved NGU benyttes kun én geofon ved hvert målepunkt. På grunn av høyt frekvensinnhold og svake signaler fra dype reflektorer, er det viktig at det oppnås så god kobling mellom bakke og geofoner som mulig. Avhengig av bakkens beskaffenhet bør det derfor spås opp groper i bakken (10-30 cm dype) for plassering av geofoner. Geofonene bør sitte så godt at de ikke gir etter for trykk. Ved å plassere geofonene i groper reduseres problemer med støy. Dette

gjelder først og fremst støy generert av luftbølger fra skuddet. Geofonene står heller ikke så utsatt til for vind. I lett regnvær plasseres gress, mose eller annet dempende materiale over geofonene for å redusere støy fra regndråper.

### 7.2.3 Geofonavstand

Generelt bør geofonavstanden være kort (3 m) ved detaljerte undersøkelser og ved 'røff' reflektortopografi når teknikken 'optimum offset' (se kapittel 9) benyttes. Geofonavstanden kan ved denne teknikken økes til 4 eller 5 m ved mer uniform reflektortopografi og ved regionale undersøkelser. Ved CDP-teknikken kan det rutinemessig brukes en geofonavstand på 5 m, fordi teknikken gir bedre dekning i dypet enn 'optimum offset' (se kapittel 10).

## 7.3 Seismograf

Ved NGU blir refleksjonsseismiske opptak utført med en digital seismograf av typen Scintrex S-2 'Echo'. Dette er en 24-kanals seismograf som har 12-bits oppløsning (amplituden på signalene kan samples i  $2^{12} = 4096$  nivåer). Opptakstiden velges i trinn fra 51.2 millisekunder til 5.12 sekunder. Antall samples per kanal er fast (1024). Frekvensområdet er 2-2000 Hz. Forsterkningen kan settes separat for hver kanal (0-84 dB med 6 dB sprang). Seismografen har innebygd lavkuttfilter (2-500 Hz med 2 Hz sprang), høykuttfilter (80-2000 Hz med 8 Hz sprang) og notch-filter (50 eller 60 Hz) (Scintrex 1989b). Seismografen består av 2 hovedkomponenter:

- Bærbar PD
- Konsoll

Seismografen får strøm fra et 12 V batteri som er montert på konsollet.

## **8. PLANLEGGING, FELTPROSEDYRER**

(Avsnittet er vesentlig basert på Hunter et al. 1988b og egne erfaringer.)

### 8.1 Planlegging

Det er en rekke spørsmål som bør være besvart før man starter en undersøkelse med grunn refleksjonsseismikk.

1) Hvilke reflektorer skal kartlegges?

- a) Type reflektor. Dette vil bestemme om en kraftig eller svak type reflektor forventes. Fjell gir f.eks. vanligvis kraftigere refleksjoner enn en laggrense i løsmassene.

- b) Dyp til reflektor. Dette kan gi en indikasjon på opptaksparametre, som f.eks. opptakstid, offset og filtreringsparametre.
  - c) Oppløsning som kreves for å kartlegge reflektorer.
- 2) Hvordan er overflateforholdene på opptaksstedet?
- a) Hvor dypt ligger grunnvannsspeilet? Dette kan avgjøre om haglbørse er egnet som energisering, og det kan sies noe om det forventede frekvensinnholdet i signalene.
  - b) Hvilket materiale opptrer nær overflaten? Finkornet materiale forplanter energi bedre enn grovkornet materiale.
  - c) Målinger over antropogent materiale (fyllinger) gir som regel dårlige resultater.
- 3) Hvordan er overflatetopografien?
- Dette kan være av avgjørende betydning for hvor profiler kan plasseres. Det bør tilstrebes minimale variasjoner i topografi langs et profil for å redusere problemer med statistisk korreksjon.
- 4) Fins borhull i området?
- Dersom dette fins kan resultater fra boringer benyttes til korrelering og kalibrering mot resultater fra refleksjonsseismikk.
- 5) Hvordan er adkomsten til måleområdet?
- a) Avstand fra losji til måleområdet er en produktivitetfaktor.
  - b) Overflateforholdene på stedet vil ha betydning for produktiviteten. Målinger utføres f.eks. raskere langs en veg (dersom den ikke er særlig trafikkert) enn i skogsområde.
- 6) Hvor tett skal geofonene stå?
- Dette er avhengig av ønske om god horisontal oppløsning og avhengig av måleteknikk.
- 7) Fins støykilder i området?
- Eksempler: kraftige radiosendere, trafikkerte veier, flyplasser, kraftledninger.

## 8.2 Feltprosedyrer

### 8.2.1 'Walk-away' støytest

Innenfor måleområdet bør det foretas testopptak ved flere lokaliteter. Dette kan gjøres ved en såkalt 'walk-away' støytest. Første skudd avfyres i en avstand til første geofon som tilsvarer geofonavstanden. Avstanden fra skuddet til bakerste geofon kalles 'A' (se figur 14). Etter å ha registrert og lagret data fra skudd 1, flyttes skuddpunktet bakover med avstanden 'A'. Deretter skytes på nytt med påfølgende registrering og lagring. Deretter flyttes skuddpunktet igjen

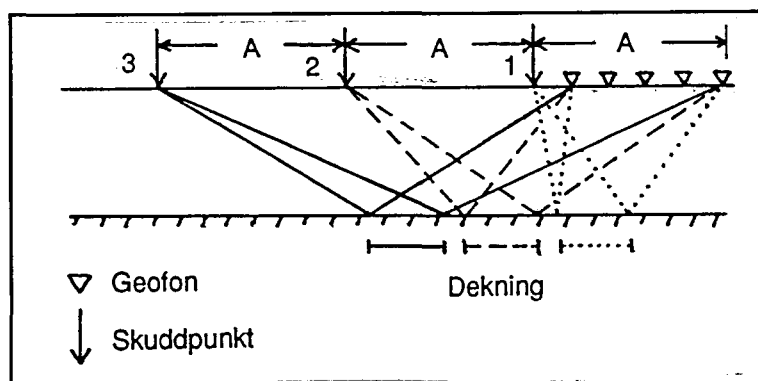


Fig. 14: Prinsippskisse for utførelse av 'walk-away' støytest

bakover. Det er vanligvis nok med 2-3 opptak. Opptakene plottes deretter ut ved siden av hverandre, slik at man får et overblikk over de seismiske hendelser som forventes ved bestemte offsets og tidspunkt. Støytesten benyttes til valg av opptaksparametre.

### 8.2.2 Opptaksparametre

Fra støytesten bør man merke seg;

- 1) dyp til grunnvannsspeil basert på første ankomsttider
- 2) 'ground roll'; posisjon, hastighet og amplituder
- 3) reflektorens posisjon (om mulig også fjellrefraktorposisjon).

Støytesten bør utføres med flere filtreringsparametre for å oppnå best mulig resultat, og det bør tas en avgjørelse om det må brukes forskjellige filtreringsparametre i forskjellige deler av måleområdet. Opptakstiden må være lang nok til å få registrert den dypeste reflektor av interesse. Avstanden fra skudd til første geofon (offset) må være så stor at luftbølger og 'ground roll' fra skuddet når fram til første geofon etter signalet fra den dypeste reflektor man vil kartlegge. Dette er spesielt viktig ved teknikken 'optimum offset'. Etter at opptaksparametrene er bestemt kan målingene utføres langs de utvalgte profiler.

Ved NGU er det benyttet to teknikker ved grunnrefleksjonsseismikk; 'optimum offset' og 'common depth-point' (CDP). Disse teknikkene omtales i de to neste kapitler.

## **9. 'OPTIMUM OFFSET'-TEKNIKKEN, PRINSIPP**

Før målinger av 'optimum offset'-opptak startes, forutsettes at det er utført 'walk-away' støytest (se 8.2.1). Ut fra støytesten må det velges en fast avstand ('optimum offset') mellom skudd og geofoner. Avstanden må minst være så stor at overflatebølger (vesentlig Rayleighbølger, også kalt 'ground roll') og luftbølger, som alle betraktes som støy, ankommer geofonene etter refleksjonssignal fra den dypeste laggrense som skal kartlegges (se figur 15). Et 'optimum offset'-opptak oppnås ved at første skudd registreres på første (nærmeste) geofon, skuddpunktet flyttes fram en avstand som tilsvarer geofonavstanden, det skytes og registreres på geofon 2 osv. Dersom det registreres på 12 kanaler, vil opptaket være ferdig

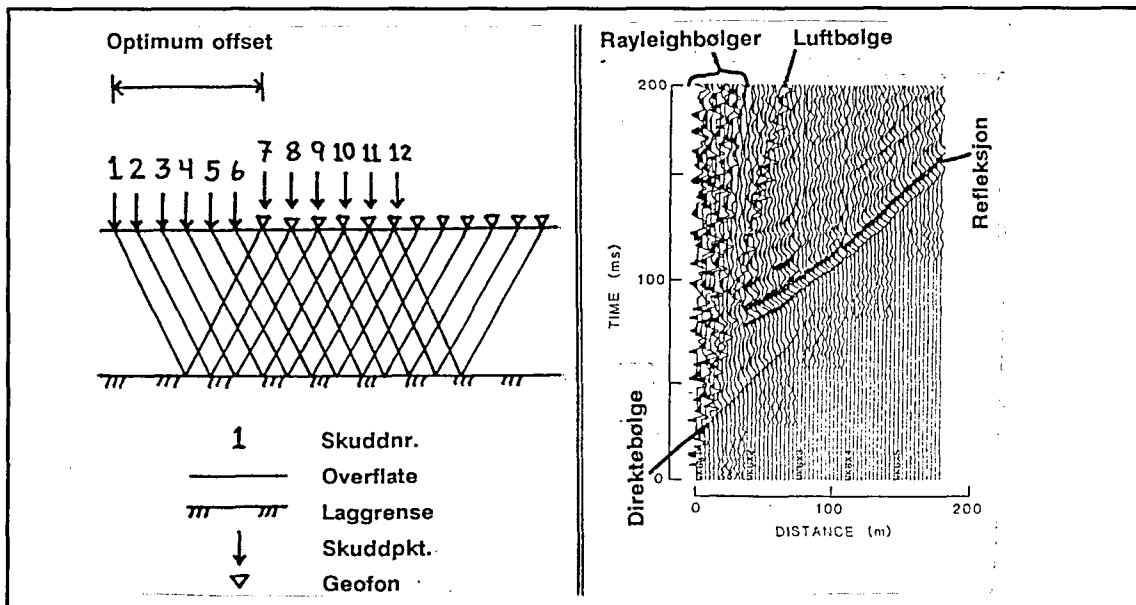


Fig. 15: Figuren til venstre viser et opplegg for målinger med 'optimum offset'-teknikken. Figuren til høyre viser et utvalg av seismiske hendelser som er vanlige i et opptak.

etter at det er skutt og registrert på geofon 12. Det er vanlig å gjøre to opptak i tillegg til 'optimum offset'-opptak; 1) opptak på alle kanaler av skudd nær enden av utlegget for å bestemme hastighet i øverste lag og dyp til grunnvannsspeil, 2) opptak på alle kanaler fra skuddpunkt 1 (i avstanden 'optimum offset') til bruk ved seinere hastighetsanalyse (såkalt 'spread'-opptak). En bemanning på 3 personer har vist seg å være optimal ved utførelsen av denne type målinger, og under 'normale' forhold kan det profileres 400-500 m pr. dag.

Av figur 15 kan det sees at dekingen av reflektor (horisontal oppløsning) tilsvarer geofondekingen. Utførelsen av 'optimum offset'-målinger er beskrevet tidligere.

#### Fordeler med teknikken

- Kartlegging av grunne reflektorer. Ved CDP-teknikken (se neste kapittel) vil refleksjoner fra grunne reflektorer være vanskelig å stappe på grunn av interferens med andre seismiske hendelser for store skudd-geofonavstander.
- Enkel prosessering. NMO-korreksjoner utføres ikke.
- Rask og direkte avtegning av løsmassestrukturer og underliggende fjelltopografi.

#### Ulemper med teknikken

- Kun registrering på en geofon for hvert skudd. Tilgjengelig datamengde utnyttes derfor dårlig. Enkelte traser i et opptak kan være av dårlig kvalitet. Ved CDP-teknikken har en 'råd' til å fjerne dårlige traser fra enkeltopptak.

## 10. 'COMMON DEPTH-POINT'-TEKNIKKEN (CDP), PRINSIPP

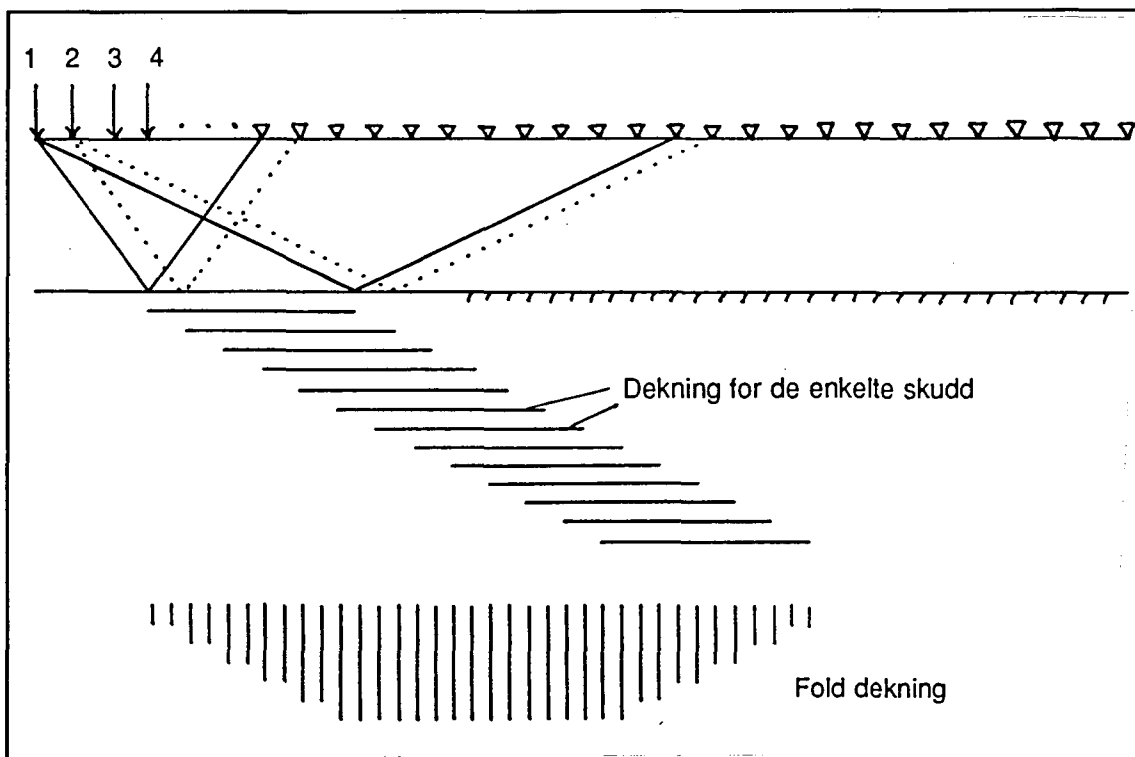


Fig. 16: Figuren viser et opplegg for målinger ved 'common depth-point'-teknikken.

Ved CDP-teknikken registreres refleksjoner som ideelt sett kommer fra samme 'punkt' på reflektor. Dette 'punktet' blir ved prosesseringen behandlet som om det ligger halvveis mellom skuddpunkt og geofon. Ved skrånende eller uregelmessig reflektor er ikke dette tilfelle, og det er riktigere å kalle teknikken 'common mid-point' (CMP). I seismisk litteratur er det allikevel mest vanlig å bruke CDP som forkortet navn på teknikken, og dette blir også gjort i dette dokumentet.

Før CDP-opptak startes, forutsettes at det er utført 'walk-away' støytest (se 8.2.1). Ved NGU er utstyret tilpasset CDP-opptak på 12 kanaler (6-fold dekning). Ut fra støytesten må det velges en fast avstand mellom skudd og geofoner. Avstanden bør minst være så stor at overflatebølger (vesentlig Rayleigh-bølger) og luftbølger, som alle betraktes som støy, ankommer første geofon etter refleksjonssignal fra en reflektor (ikke nødvendigvis den dypeste). Dette er av betydning dersom man under seinere prosessering vil utføre residuell statistisk korreksjon ('residual statics'). Støy på de første kanalene i et CDP-opptak er ikke kritisk, fordi støyen kan 'mutes' bort under CDP-stackingen. Fra og med kanal 7 bør det ikke være overflatebølger i opptaket (den dypeste reflektor bør minst ha 3-fold dekning).

Grunne reflektorer (<20 m dyp) er vanskelige å kartlegge med CDP. Disse kan ofte kun observeres på de første (nærmeste) kanaler og forsvinner ved stacking. For å få kartlagt disse

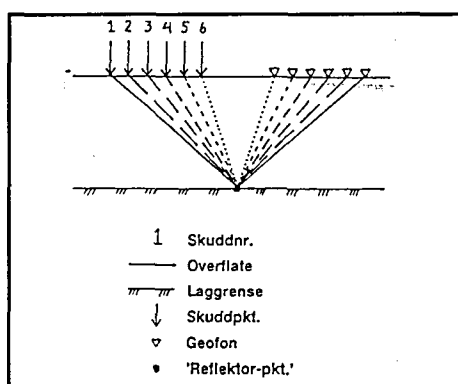


Fig. 17: Prinsipp, CDP.

bør man settes sammen 'optimum offset'-opptak av CDP-opptak. Et eksempel på dette blir vist i kapittel 12.

#### Utførelse

Beskrivelsen gjelder 'off-end'-teknikk der geofonrekka 'skyves' framover i profilet. Første skudd registreres på kanal 1-12. Skuddpunktet flyttes fram en avstand som tilsvarer geofonavstanden og det registreres på kanal 2-13 osv. (se figur 16). Maksimal dekning (6-fold dekning ved opptak på 12 kanaler) oppnås fra skuddpunkt 6. Dekningen avtar mot endene av profilet. En skuddpunkt-geofon-konfigurasjon for 6-fold dekning er vist i figur 17.

En slik konfigurasjon der refleksjonssignaler ideelt sett kommer fra samme 'punkt' på reflektor, kalles en CDP-samling (eng.: CDP-gather). Et utlegg avsluttes etter opptak på kanal 12-23 (12 opptak). Et profil avsluttes etter opptak på kanal 13-24 (13 opptak). Av figur 16 kan det sees at dekningen av reflektor (horisontal oppløsning) er det dobbelte av geofondekningen.

CDP-teknikken krever en bemanning på minst 2 personer. Med en ideell bemanning på 3 personer kan det profileres ca. 400-500 m pr. dag (under 'normale' forhold).

#### Fordeler med teknikken

- Høyt signal/støy-forhold

#### Ulemper med teknikken

- Dårlig kartlegging av meget grunne reflektorer
- Prosesseringskrevende

## 11. PROSESSERING AV REFLEKSJONSSEISMISKE DATA

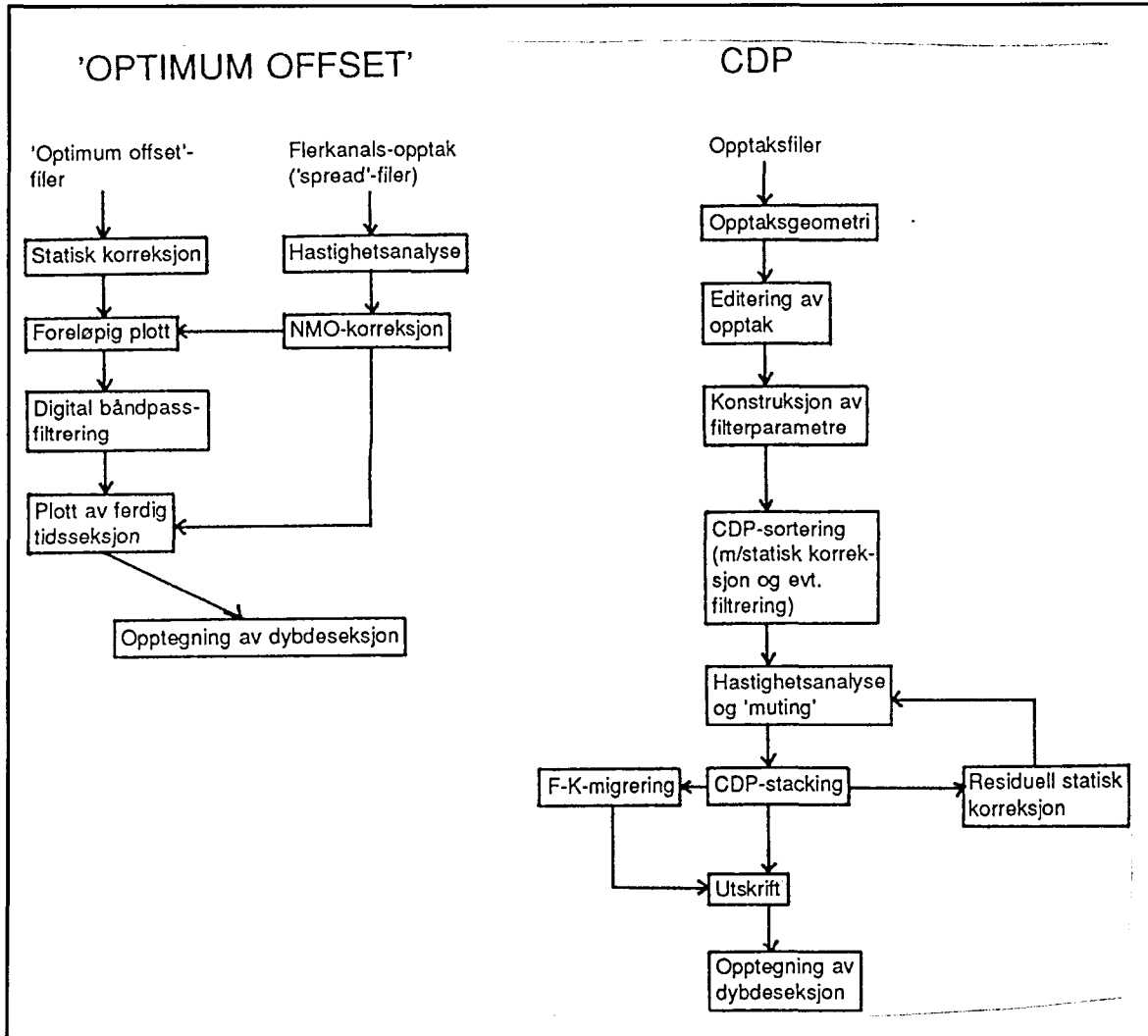


Fig. 18: Flytskjema for prosessering av 'optimum offset'- og CDP-data.

Figur 18 gir en oversikt over de forskjellige prosesseringstrinn som er aktuelle ved prosessering av 'optimum offset'- og CDP-data. Det er skrevet en intern rapport der de forskjellige prosesseringstrinn er beskrevet i detalj (Mauring 1991). Beskrivelsen av prosesseringen er i den nevnte rapporten knyttet til den programvare som benyttes.



## **12. SAMMENLIGNING, CDP OG 'OPTIMUM OFFSET'**

Teknikkene CDP og 'optimum offset' er beskrevet tidligere. Noen fordeler og ulemper med teknikkene vil bli vist ved eksempler.

- 'Optimum offset'-teknikken krever lite prosessering, og seismisk seksjon kan skrives ut etter å ha utført statistisk korreksjon. En direkte avtegning av laggrenser og strukturer oppnås. CDP-teknikken krever omfattende prosessering som ofte ikke kan utføres i felt.
- Teknikkene er omtrent like gode når det gjelder effektivitet ved datainnsamlingen. En viss ekstra tid går allikevel med til lagring og oppsett av opptaksparametre ved CDP-teknikken.
- 'Optimum offset'-teknikken utnytter tilgjengelig datamengde dårlig, med registrering på kun én kanal for hvert skuddpunkt. Ved CDP-teknikken utnyttes data registrert på 12 kanaler for hvert skudd. Dette gir 6-fold dekning av reflektorer. Signal-støy-forholdet blir derfor betydelig bedre ved anvendelse av CDP-teknikken.
- Ved CDP-teknikken har man ofte lange skudd-geofon-avstander. Dette gir vidvinklede refleksjoner fra grunne reflektorer. Refleksjonssignaler vil da interferere med andre seismiske hendelser, og det blir vanskelig å stacke data.
- Ved dårlig stacking av CDP-data (p.g.a. hastighets- eller tykkelsesvariasjoner i laget over datum) kan energien opptre mer langbølget i tidsseksjonen enn ved 'optimum offset'-data. Dette reduserer oppløsningen, spesielt dagnært. Effekten kan reduseres betraktelig dersom residuell statistisk korreksjon kan utføres med hell.

Ved målinger er CDP-teknikken å foretrekke, fordi fordelene med høyere signal/støy-forhold mer enn oppveier fordelene ved 'optimum offset'-teknikken. Dessuten kan 'optimum offset'-data settes sammen fra CDP-opptak.

### **Eksempler**

- Signal/støy-forhold. Et eksempel på CDP-teknikkens overlegenhet når det gjelder høyt signal/støy-forhold er vist i figur 19. 'Optimum offset'-data i samme område er satt sammen fra CDP-opptak.
- Kartlegging av grunne reflektorer. 'Optimum offset'-teknikkens fordel ved kartlegging av grunne reflektorer er vist i figur 20. 'Optimum offset'-data er satt sammen ved utplukk av data fra første kanal i CDP-opptak.

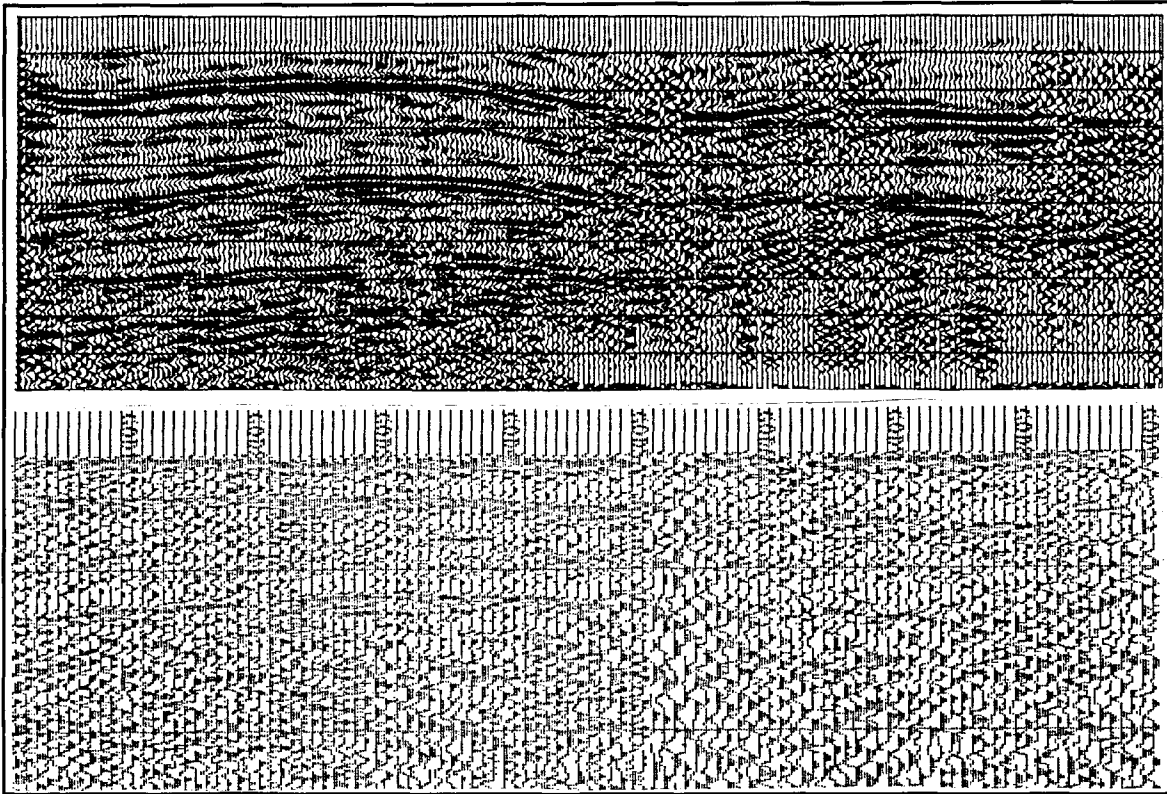


Fig. 19: CDP-opptak (øverst) og 'optimum offset'-opptak (nederst) viser klart CDP-teknikkens fordel med høyere signal/støy-forhold. Opptak fra Godøy.

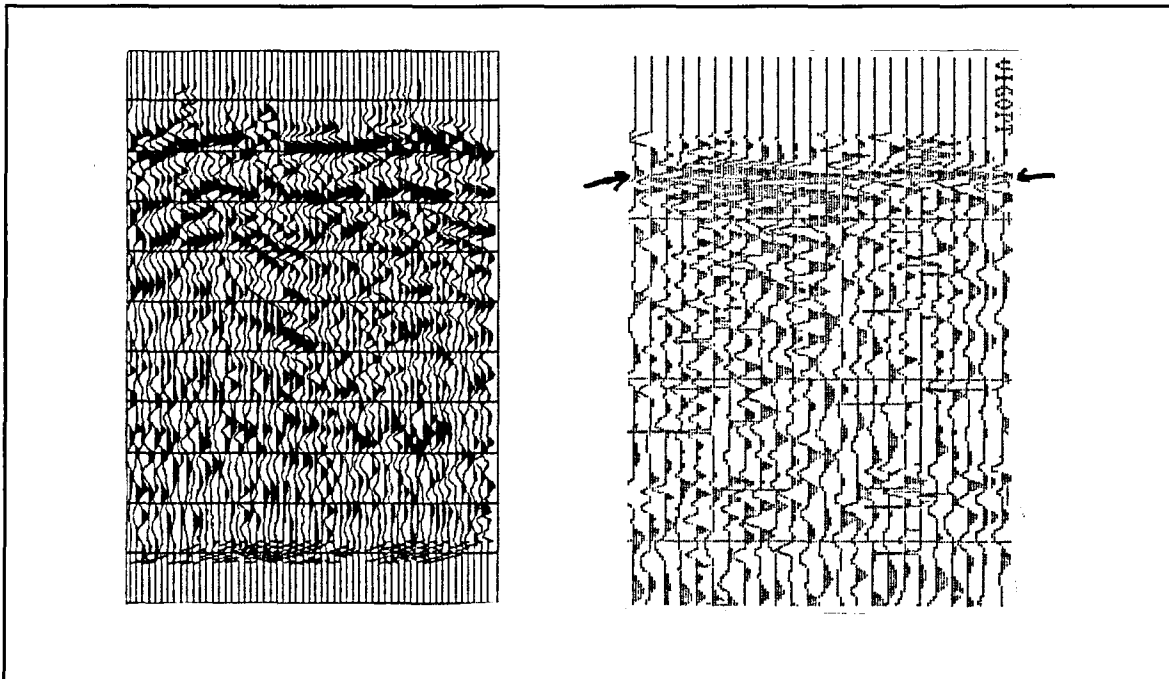


Fig. 20: CDP-opptak (venstre) og 'optimum offset'-opptak (høyre). Fjellreflektor ligger for grunt til å komme tydelig fram i CDP-stack. Opptak fra Vigra.

### 13. PROSESSERINGSEFFEKTER

I dette kapittelet vil effekter av forskjellige prosesseringstrinn bli vist ved eksempler.

#### 13.1 AGC

Funksjon som benyttes ved utskrift av seismiske data for normalisering av amplituder.

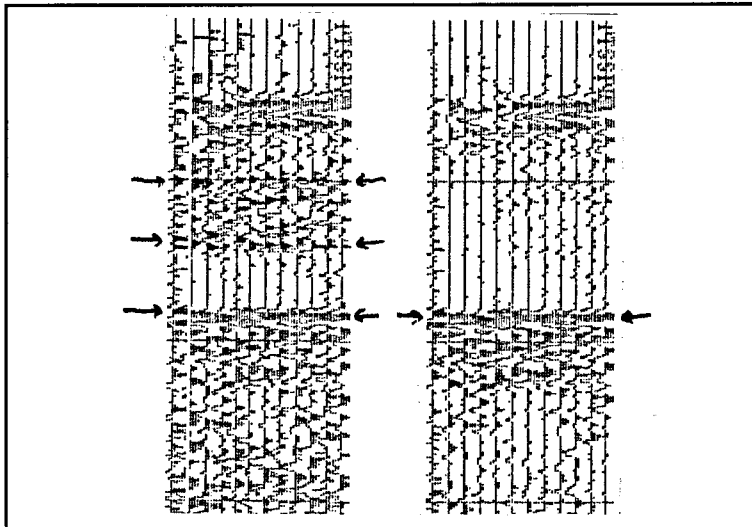


Fig. 21: Utskrift av samme data med forskjellige AGC-parametre. Valg av for bredt vindu (seksjon til høyre) undertrykker svake reflekterer. Opptakstiden er 180 ms.

undertrykke hørfrekvente refleksjoner. Dette vises i figur 22. Ved opptak ble det benyttet et analogt lavkuttfilter på 100 Hz. Seksjonen til venstre viser rådata, mens seksjonen til høyre er båndpassfiltrert (200-400 Hz).

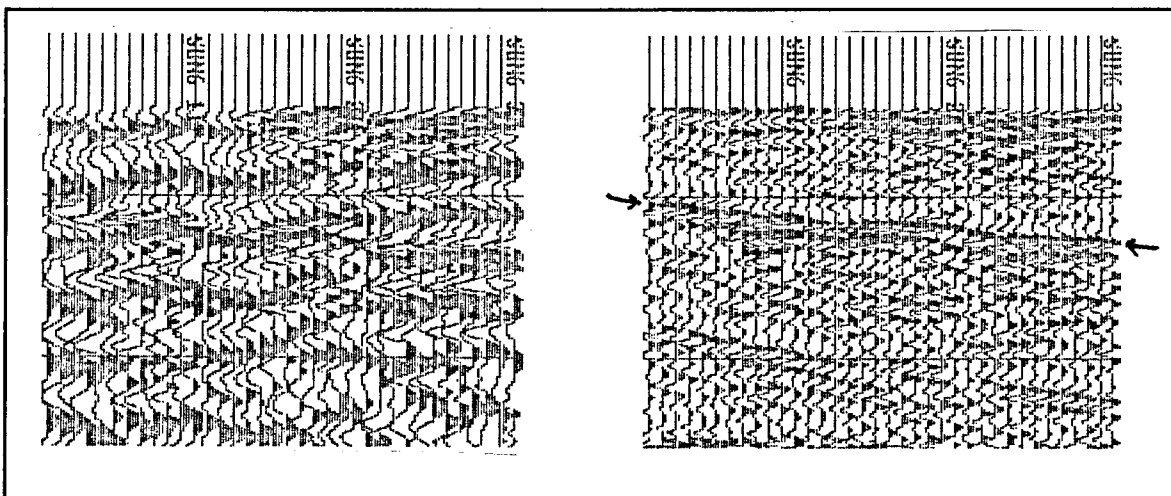


Fig. 22: Fjerning av lavfrekvent energi ved båndpassfiltrering. Råopptak er vist i venstre seksjon, mens båndpassfiltrert seksjon er vist til høyre. Opptakstiden er 100 ms.

Figur 21 viser utskrift av samme data med forskjellige AGC-parametre. En kraftig refleksor på ca. 110 ms utviser svake reflekterer på ca. 60 og 80 ms ved valg av for stort vindu ved AGC. Seksjon til høyre har vindu 200 samples før og etter. I figurene vises et rolig parti før den kraftige refleksoren. Dette er kun effekter av AGC.

#### 13.2 Båndpassfiltrering

Av og til kan lavfrekvent energi

Neste eksempel på båndpassfiltrering (figur 23) viser fjerning av vindgenerert støy. Ved spekteranalyse viste det seg at energi fra refleksjoner og vind hadde to atskilte topper i spekteret. Et båndpassfilter ble konstruert rundt refleksjonstoppen, og støy fra vind ble effektivt fjernet. Seksjonen til venstre viser råopptak, og seksjonen til høyre viser filtrert opptak.

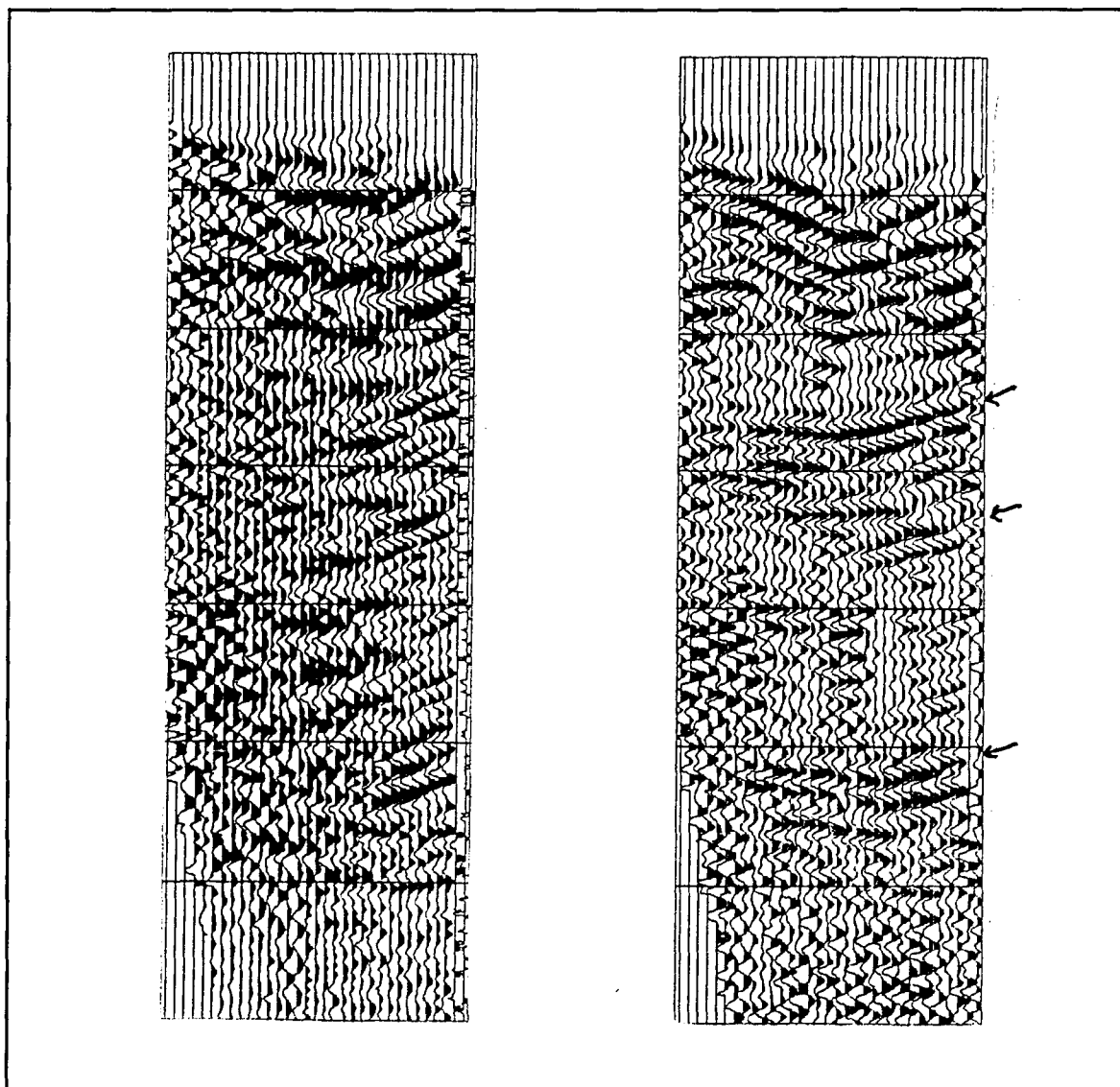


Fig. 23: Fjerning av vindgenerert støy ved båndpassfiltrering. Råopptak vises til venstre og filtrert opptak til høyre. Pilene angir refleksjoner. Opptakstiden er 300 ms.

### 13.3 Residuell statisk korleksjon

Prosesseringstrinn som ofte utføres for å fjerne effekten av variasjoner i hastighet og tykkelse i laget over datum. Figur 24 viser en tidsseksjon før (venstre) og etter (høyre) residuell statisk korleksjon. Signal/støy-forholdet er bedret, og seksjonen inneholder mer høyfrekvent energi.

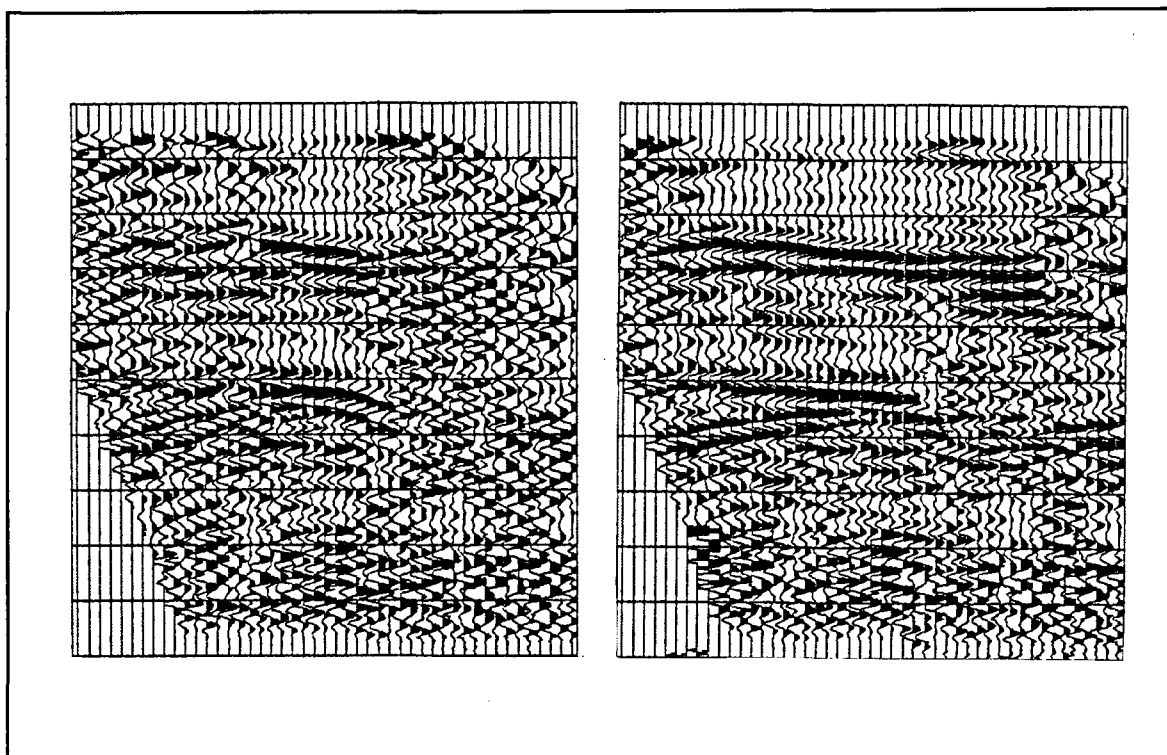


Fig. 24: Seismisk seksjon før (venstre) og etter (høyre) residuell statisk korreksjon. Opptakstiden er 200 ms.

## **14. EKSEMPLER PÅ OPPTAK**

I det følgende blir det presentert resultater fra ulike undersøkelser som hver for seg framhever fordelene ved bruk av refleksjonsseismikk.

En grov lokalisering av de områder som er undersøkt er vist i bilag 1.

### **14.1 'Optimum offset'**

Da NGU startet undersøkelser med grunn refleksjonsseismikk, ble teknikken 'optimum offset' anvendt. Resultater fra to slike undersøkelser blir her presentert.

#### **14.1.1 PTS**

Målinger ble utført som en demonstrasjon av grunn refleksjonsseismikk for studenter ved NTH. Et profil ble målt ved Petroleumsteknisk Senter (PTS). Prosesserte tidsseksjoner er vist i bilag 2. I bilaget presenteres et NMO-korrigert flerkannelsopptak fra første skudd (venstre seksjon) og et 'optimum offset'-opptak (høyre seksjon). Offset var 32 m, geofonavstanden var 4 m, opptakstiden var 300 ms og det ble anvendt et analogt lavkuttfilter på 100 Hz. Overflate-materialet var tørt, hardpakket sand som stort sett gav god forplantning av høyfrekvent energi.

Det ble utført statistisk korreksjon på 'optimum offset'-data. Flerkanalsopptaket er av best kvalitet, med høyere frekvensinnhold. Dette skyldes bedre skudd/bakke-kobling ved første skuddpunkt. Refleksjon på ca. 110 ms representerer fjell. Løsmassene over fjell er trolig dominert av leiravsetninger og viser svake refleksjoner. Interne reflektorer i løsmassene som her indikeres kan ikke avdekkes ved andre geofysiske metoder.

#### 14.1.2 Littledalselva

Målinger ble utført ved utløpet av Littledalselva ved Sunndalsøra som et ledd i en hydrogeologisk undersøkelse for Akvaforsk A/S. Det ble målt 7 profiler, hvorav 2 er vist i bilag 3. Mellom profilene ble det utført boring, og resultater fra disse er inntegnet. Offset var 18 m, geofonavstanden var 3 m, opptakstiden var 100 ms og det ble anvendt et analogt lavkuttfilter på 100 Hz. Overflatematerialet var vannmettet sand/grus. Statisk korreksjon og båndpassfiltrering ble utført etter opptak. Den mest framtrædende reflektor markerer grensen mellom sand/grus (øverst) og hardpakket finstoff (finsand/silt/leir). Skrålagning vises også i seksjonen. Målinger og resultater er utførlig beskrevet i Soldal et al. 1990. I dette tilfellet ble det ved refleksjonsseismiske målinger langs flere profiler mulig å lage en 3-D-modell av den aktuelle aquiferen.

### 14.2 CDP

#### 14.2.1 Godøy

Målinger ble utført i et område på sørøst-spissen av Godøy. Det ble målt 4 profiler, hvorav 2 er vist i bilag 4. Offset var 32 m, geofonavstanden var 4 m, opptakstiden var 200 ms og et analogt lavkuttfilter ble satt til 100 Hz. Overflatematerialet ga stort sett god kobling mellom skudd/geofon og bakke, bortsett fra ved begynnelsen av det lengste profilet. Prosesseringen omfattet CDP-sortering, hastighetsanalyse, 'muting', båndpassfiltrering (100-350 Hz), stacking og residuell statistisk korreksjon. Seksjonene kan inndeles i flere seismiske sekvenser. Reflektorene antas å representere erosjonsgrenser dannet ved breframstøt. Avsetningene er sannsynligvis i det vesentlige glasimarine. Seksjonene viser stedvis diskordante strukturer. Den nederste reflektor antas å representere fjell, og dypet er ca. 120-130 m. Refraksjonsseismiske målinger utført i samme område avdekket kun dyp til fjell. De refleksjonsseismiske målingene er mer detaljert beskrevet i Mauring et al. 1990a.

#### 14.2.2 Salsnes

To områder ved Salsnes er undersøkt ved refleksjonsseismiske målinger. I det ene området (Moelva) ble det målt to profiler, hvorav ett presenteres her, og i det andre området (Salsvatnet) ble det målt ett profil. Profilene er vist i bilag 5. Målingene er rapportert i Mauring & Rønning 1990d.

### Moelva (profil 3)

Offset var 50 m, geofonavstanden var 5 m, opptakstiden var 300 ms og analogt lavkuttfilter ble satt til 100 Hz. Til tross for sterk vind ved målingene, ble kvaliteten på opptakene gode p.g.a. flere opptak ved hvert skuddpunkt og effektiv båndpassfiltrering (se 13.2). Prosesseringen omfattet CDP-sortering, hastighetsanalyse, 'muting', båndpassfiltrering (120-235 Hz), stacking og residuell statistisk korreksjon. Tydelige refleksjoner vises ved ca. 110 ms, og dette representerer trolig grensen mot marine sedimenter i samsvar med tolkning av tidligere utført vertikal elektrisk sondering (Blikra & Rønning 1988). Over denne reflektoren har vi vesentlig finstoffholdig morene (Sveian 1990). Flere reflektorer opptrer i området 200-240 ms, uten at det kan sies noe om hvilke(n) materialtype(r) lagene representerer. Reflektor på 240 ms antas å representere fjell. Gjennomsnittlig seismisk hastighet til fjell er ca. 1800 m/s. Dette gir et dyp til fjell på ca. 220 m. Tidligere utført refraksjonsseismikk (Dalsegg 1988) kunne ikke påvise laggrensene, og dyp til fjell ble antatt å være større enn 180 m. Eksakt dyp til fjell kunne ikke bestemmes p.g.a. for stor avstand fra skudd til geofoner.

### Salsvatnet

Offset var 15 m, geofonavstanden var 5 m, opptakstiden var 150 ms og analogt lavkuttfilter ble satt til 100 Hz. Profilet ble målt ved bredden av Salsvatnet med vannmettet sand i overflaten. Datakvaliteten var meget god med mye høyfrekvent energi. Prosesseringen omfattet CDP-sortering, båndpassfiltrering (100-320 Hz), stacking og residuell statistisk korreksjon. Flere klare reflektorer vises. Den dypeste og sterkeste av disse antas å representere fjell. Fjellet faller bratt ned fra ca. 100 ms til 150 ms ved skuddpunkt 30. Opptakstiden var for kort til å få registrert fjell langs hele profilet. Flere reflektorer sees å ligge drapert over fjellet, noe som indikerer avsetning i en dal. Reflektor på 140 ms mellom skuddpunkt 35 og 40 er svakt trauformet, og viser at vi muligens har dalbunnen i dette området. Øvre del av løsmassene er trolig dominert av strand- og moreneavsetninger (Sveian 1990). Heller ikke i dette området kunne tidligere utførte refraksjonsseismiske målinger (Dalsegg 1988) gi informasjon annet enn dyp til fjell. I dette tilfellet påviser refraksjonsseismikken strukturer som belyser avsetningsmiljøet.

### 14.2.3 Oppstad

På forespørsel fra Oljedirektoratet utførte NGU refraksjonsseismiske målinger langs Tvihaugbekken sør for Oppstad på Jæren. Opprinnelig var det planlagt et ca. 2 km langt profil, men etter ca. 300 m profilering ble overflatematerialet av en slik karakter at man fikk minimal forplantning av energi. Oppdraget er rapportert i Mauring & Rønning 1990c.

Offset var 30 m, geofonavstanden var 5 m, opptakstiden var 200 ms og analogt lavkuttfilter ble satt til 100 Hz. Prosesseringen omfattet CDP-sortering, hastighetsanalyse, 'muting', båndpassfiltrering (65-200 Hz), stacking og residuell statistisk korreksjon.

Det refleksjonsseismiske profilet viser flere klare horisontale til subhorisontale reflektorer (bilag 6). Få av dem er utholdende gjennom hele seksjonen. Dette skyldes først og fremst varierende signal/støy-forhold. Avsetningstypene er i stor grad ukjente. For å få et klart svar på hvilke avsetningstyper som er representert, bør det foretas boringer i området. Brudd og forskyvninger av reflektorer mellom 90 og 130 ms ved skuddpunkt 55 indikerer en mulig forkastningssone (Gandsfjordforkastningen?). Bevegelser må i tilfelle ha vært aktive etter avsetninger av løsmasser, og refleksjonsseismikken kan i så fall bidra til å aldersrelatere forkastningen.

#### 14.2.4 Henning

Målinger ble utført som en del av kompetanseoppbyggingen på grunn refleksjonsseismikk i et område hvor flere geofysiske målemetoder har vært anvendt (Blikra et al. 1991). Tidlige målinger med 'optimum offset' er rapportert i Muring & Rønning 1990b. Målinger med CDP-teknikken ble utført seinere med langt bedre resultat.

Offset var 30 m, geofonavstanden var 5 m, opptakstiden var 200 ms og analogt lavkuttfilter ble satt til 100 Hz. Prosesseringen omfattet CDP-sortering, hastighetsanalyse, 'muting', stacking og residuell statistisk korreksjon.

Resultater fra målingene viser klart refleksjonsseismikkens styrke ved kartlegging av 'røff' fjelltopografi. Fjellreflektoren viser flere tydelige sprang. Det mest markerte opptrer ved skuddpunkt 42 på ca. 100 ms. Spranget er ledsaget av tydelige diffraksjonsbuer. Fjellreflektoren ligger videre i området 140-160 ms. En skrå refleksor ved 20 ms og skuddpunkt 60 forsvinner ut av profilet ved 60 ms og skuddpunkt 115 og antas å representere nedre grense av marine avsetninger. Avsetningene er ellers trolig morenedominerte.

Tidligere refraksjonsseismiske målinger langs profilet (Blikra et al. 1991) viser få detaljer i løsmassene og en utglattet berggrunnstopografi.

## **15. FRAMTIDIGE PLANER**

Målinger med grunn refleksjonsseismikk på land er i stadig utvikling. Forbedring av måleteknikker og stadig mer sofistikerte seismografer gjør anvendbarheten av metoden aktuell innen flere områder. Ved NGU har man følgende planer når det gjelder utvikling av metoden;

- Tilpasning av utstyr slik at 12-folds CDP-opptak kan gjøres mulig. Dette vil øke signal/støy-forholdet ytterligere, men stiller større krav til lagrings- og prosesseringskapasitet.
- Utprøving av forskjellige energiseringer. Hittil har energiseringskilden vært 12-kalibers hagpatroner. Ved undersøkelse av dypere liggende reflektorer og ved ugunstig overflatemateriale kan det være aktuelt å ta i bruk kraftigere energiseringskilder som f.eks. dynamitt.



Ulempene er at flere hensyn må tas ved utføringen av målingene og at undersøkelsene blir dyrere.

- Kombinere refleksjons- og refraksjonsseismikk. Begge typer målinger kan utføres med stort sett samme type utstyr. Forholdene på målestedet avgjør hvilken metode som kan anvendes. Refraksjonsseismikk kan anvendes i tillegg til refleksjonsseismikk for bedre hastighetsbestemmelse.

Trondheim, 24/6-91

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE

Geofysisk avdeling

  
Eirik Mauring  
Forsker

  
Jan S. Rønning  
Forsker

Referanser

Atlas Copco AB: ABEM Terraloc Mk II Seismic system. Instruction manual.

Beck, A.E. 1981: Physical principles of exploration methods. The Macmillan press ltd. ISBN 0-26394-4.

Blikra, L.H. & Rønning, J.S. 1988: Vertikale elektriske sonderinger ved Salsnes, Nord-trøndelag. NGU-rapport 88.174.

Blikra, L.H., Muring, E., Rønning, J.S. & Tønnesen, J.F. 1991: Geofysiske metoder ved kartlegging av løsmasser. Eksempel fra Henning i Nord-Trøndelag. Norges geologiske undersøkelse, skrifter 103 (under utarbeiding).

Dalsegg, E. 1988: Seismiske målinger Salsnes og Otterøy, Nord-Trøndelag. NGU-rapport 88.095.

Dobecki, T.L. 1989: Seismic velocity anomalies due to stress concentrations above shallow voids. First break, vol. 7, No. 10, october 1989.

Gochioco, L.M. & Cotten, S.A. 1989: Locating faults in underground coal mines using high-resolution seismic reflection techniques. Geophysics, vol. 54, No. 12, p. 1521-1527.

Hawkins, L.V., Wootton, P. & Holmes, W.H. 1987: Coal seam structure delineation by downhole-crosshole seismic methods. Geoexploration, 24: 409-419.

Hunter, J.A. & Pullan, S.E. 1989: The optimum offset shallow seismic reflection technique: in proc. of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, march 13-16, 1989, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Gagné, R.M. & Good, R.L. 1988a: Applications of a shallow seismic reflection method to groundwater and engineering studies: in Proc. of Explor. '87, special volum 3, Ministry of Northern Development and Mines, p 704-715.

Hunter, J.A., Pullan, S.E. & Huggins, R. 1988b: Shallow seismic reflection techniques for engineering and geotechnical studies (upubliserte kursnotater).

Hunter, J.A., Woeller, D.J. & Luternauer, J.L. 1991: Comparision of surface, borehole and seismic cone penetrometer methods of determining the shallow shear wave velocity structure in the Fraser river delta, British Columbia; in Current Research, Part A, Geological Survey of Canada, Paper 91-1A.

Juhlin, C., Lindgren, J. & Collini, B. 1991: Interpretation of seismic reflection and borehole data from precambrian rocks in the Dala Sandstone area, central Sweden. *First break*, vol. 9, No. 1, january 1991.

Mauring, E., Longva, O., Rønning, J.S. & Tønnesen, J.F. 1990a: Seismiske og elektriske målinger over løsmasseavsetninger på Godøy, Giske, Møre og Romsdal. NGU-rapport 90.140.

Mauring, E. & Rønning, J.S. 1990b: Refleksjonsseismiske målinger ved Henning, Steinkjer, Nord-Trøndelag. NGU-rapport 90.038.

Mauring, E. & Rønning, J.S. 1990c: Refleksjonsseismiske målinger ved Oppstad på Jæren, Hå, Rogaland. NGU-rapport 90.148.

Mauring, E. & Rønning, J.S. 1990d: Refleksjonsseismiske målinger ved Salsnes, Fosnes, Nord-Trøndelag. NGU-rapport 90.151.

Mauring, E. 1991: Utstyr og programvare for refleksjonsseismiske bakkemålinger ved NGU. Norges geologiske undersøkelse, intern rapport 91.008.

Meekes, J.A.C., Scheffers, B.C. & Ridder, J. 1990: Optimization of high-resolution seismic reflection parameters for hydrogeological investigations in the Netherlands. *First break*, vol. 8, No. 7, july 1990.

Miller, R.D., Pullan, S.E., Waldner, J.S. & Haeni, F.P. 1986: Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics*, vol. 51, No. 11, p. 2067-2092.

Miller, R.D. & Steeples, D.W. 1990: A shallow seismic reflection survey in basalts of the snake river plain, Idaho. *Geophysics*, vol. 55, No. 6, p. 761-768.

Miller, R.D., Steeples, D.W. & Brannan, M.C. 1989: Mapping a bedrock surface under dry alluvium with shallow seismic reflections. *Geophysics*, vol. 54, No. 12, p 1528-1534.

Neave, K.G. & Pullan, S.E. 1989: Shallow seismic reflections using SV waves; in *Current Research, Part F*, Geological Survey of Canada, Paper 89-1F.

Palmer, D. 1987: High resolution seismic reflection surveys for coal. *Geoexploration*, 24: 397-408.

Palmer, D. 1980: An application of the time section in shallow seismic refraction studies. A thesis submitted for the degree of Master of Science in the Faculty of Science at the University of Sydney.

Ploug, C. & Klitten, K. 1988: Shallow reflection seismic profiles from Aspø, Sweden. Swedish hard rock laboratory. Progress report 25-89-02.

Pullan, S.E. & Hunter, J.A. 1990: Delineation of buried bedrock valleys using the optimum offset shallow seismic reflection technique: in Ward, S.H. (ed.) geotechnical and environmental geophysics, vol. III: Soc. Expl. Geophys.

Pullan, S.E., Hunter, J.A. & Neave, K.G. 1991: Shallow shear wave reflection tests; in Current Research, Part D, Geological Survey of Canada, Paper 91-1D.

Pullan, S.E. & MacAuley, H.A. 1987: An in-hole shotgun source for engineering seismic surveys. Geophysics, Vol. 52, No. 7, p. 985-996.

Roberts, M.C., Pullan, S.E. & Hunter, J.A. in press: Application of high resolution seismic reflection analysis to quaternary and geomorphic research.

Sløgren, B. 1984: Shallow refraction seismics. Chapman and Hall. ISBN 0-412-24210-9.

Sheriff, R.E. & Geldart, L.P. 1982: Exploration seismology. Cambridge University Press. ISBN 0-521-24373-4.

Slaine, D.D., Pehme, P.E., Hunter, J.A., Pullan, S.E. & Greenhouse, J.P. 1990: Mapping overburden stratigraphy at a proposed hazardous waste facility using shallow seismic reflection methods: in Ward, S.H. (ed.) geotechnical and environmental geophysics, Vol III:SEG

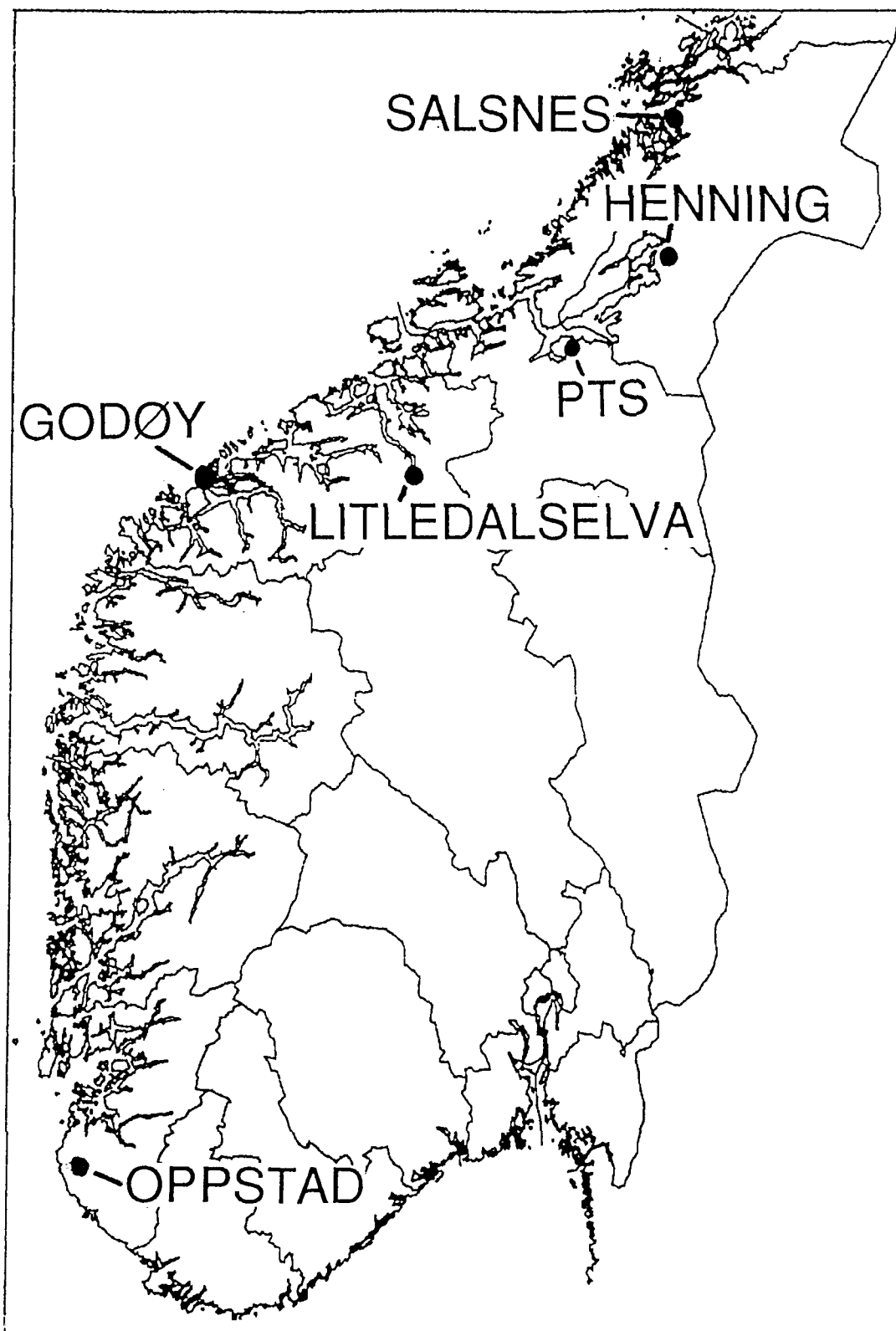
Soldal, O., Rye, N. & Muring, E. 1990: Hydrogeologiske undersøkingar ved Litledalselva, Sunndalsøra, Sunndal, Møre og Romsdal. NGU-rapport 90.067.

Steeple, D.W. & Miller, R.D. 1989: Seismic reflection methods applied to engineering, environmental and ground-water problems: in Ward, S.H. (ed.) geotechnical and environmental geophysics, Vol. I:SEG.

Sveian, H. 1990: JØA. Kvartærgeologisk kart 1724 III - M 1:50000. Norges geologiske undersøkel-  
se (under trykking).

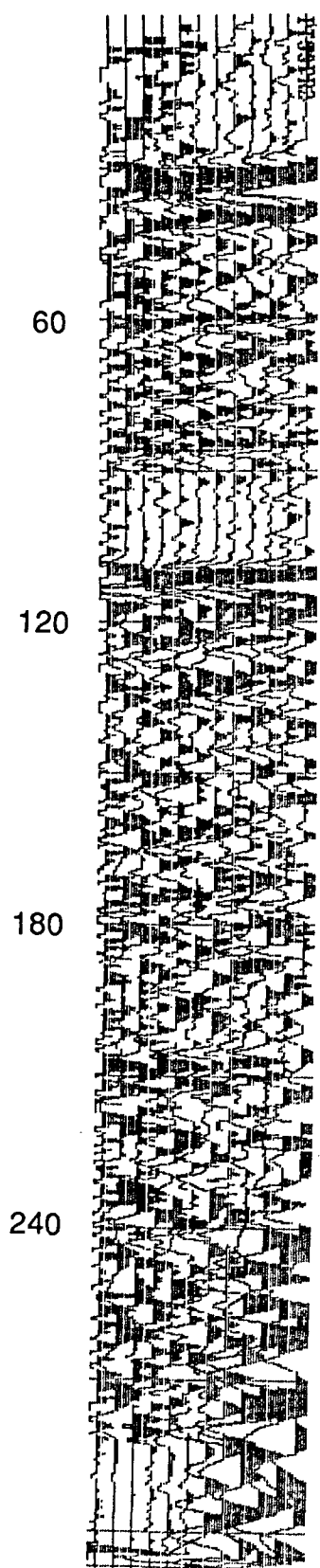
Wilson, T.H. 1990: Model studies of shallow common-offset seismic data. Geophysics, vol. 55,  
No. 4, p. 394-401.1

# Lokalitetskart



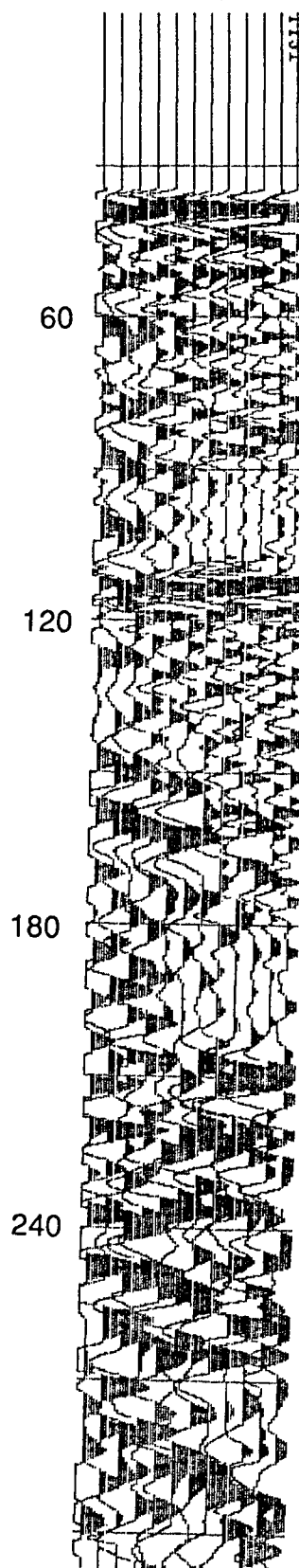
# PTS

'Spread'

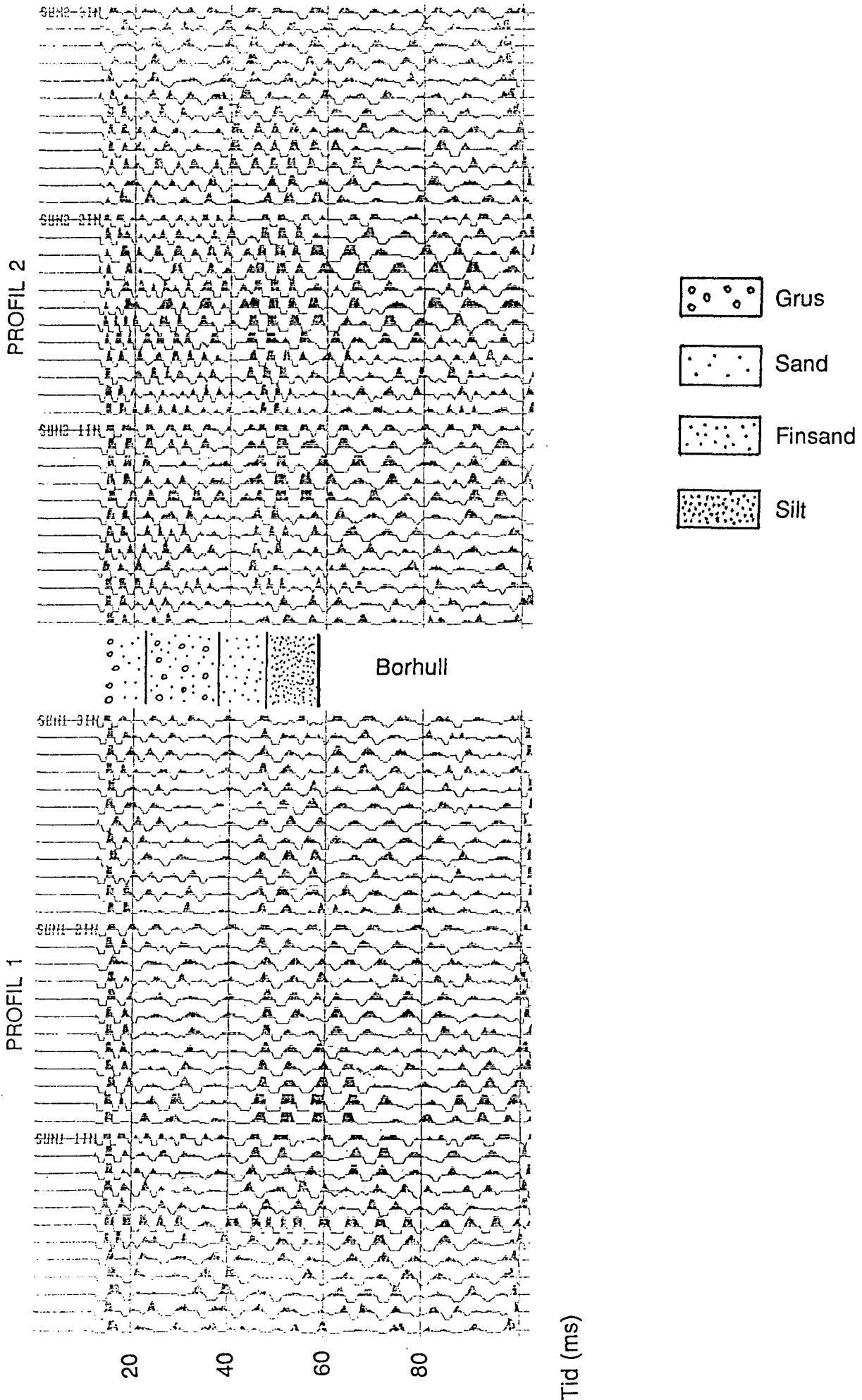


Tid (ms)

'Optimum offset'

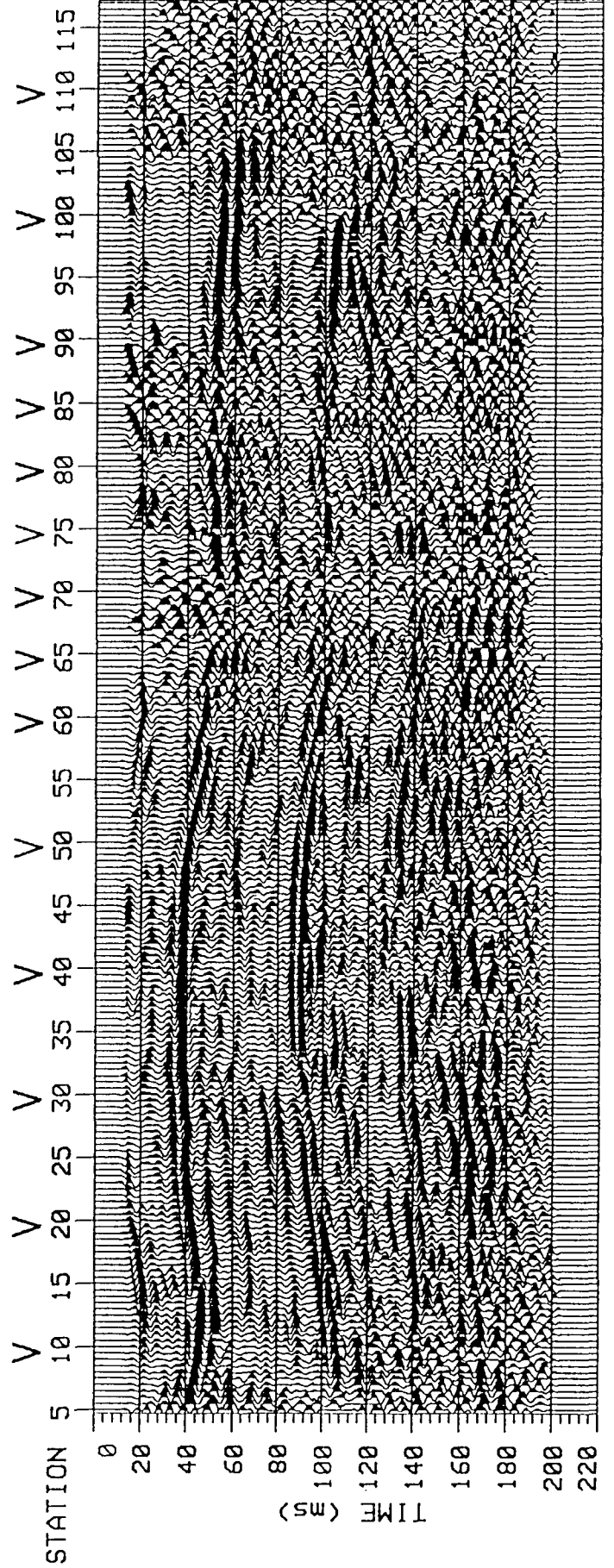
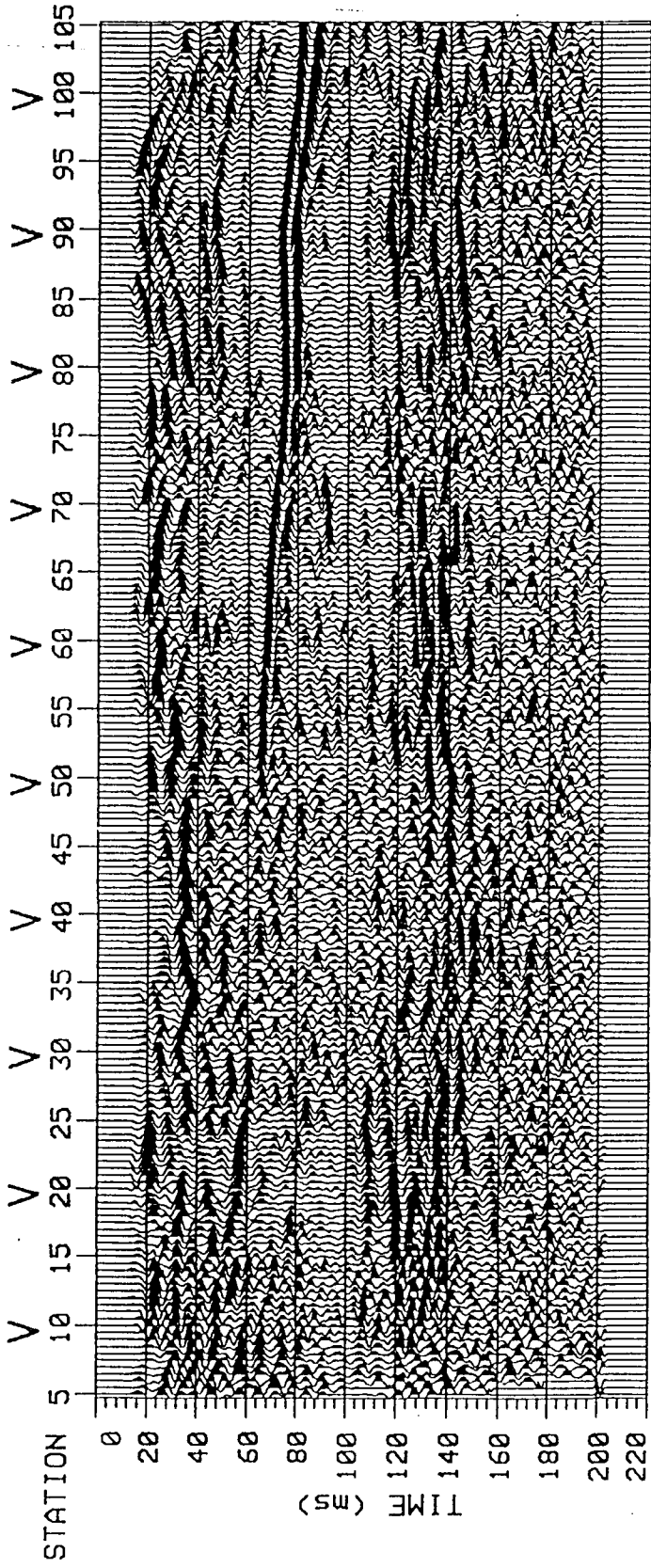


Tid (ms)



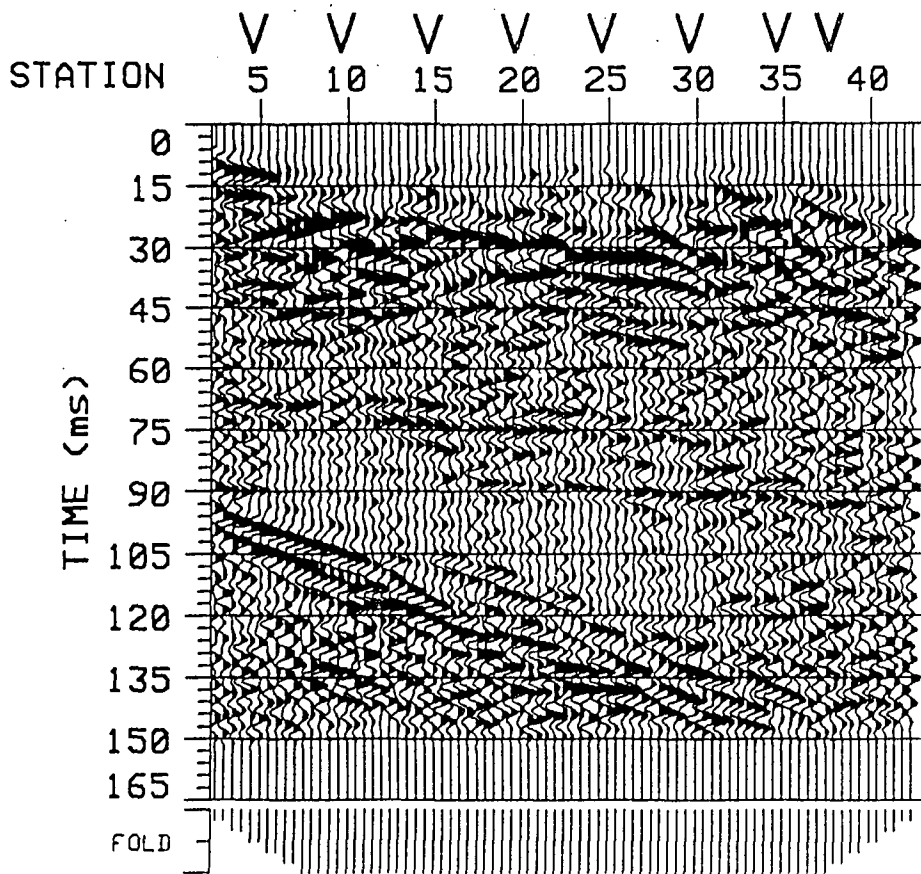
Profil 2

Profil 4

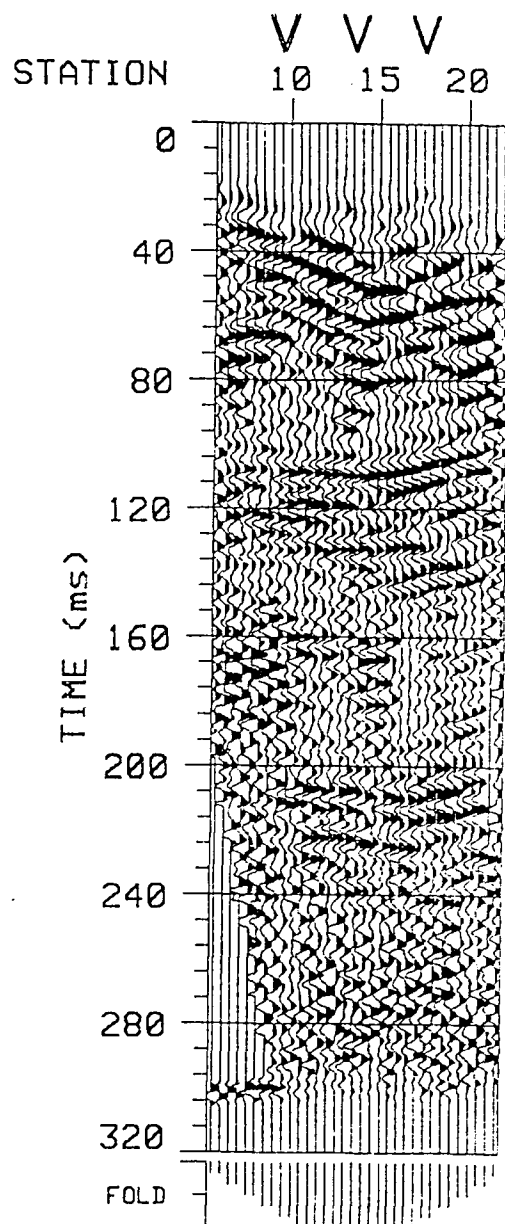




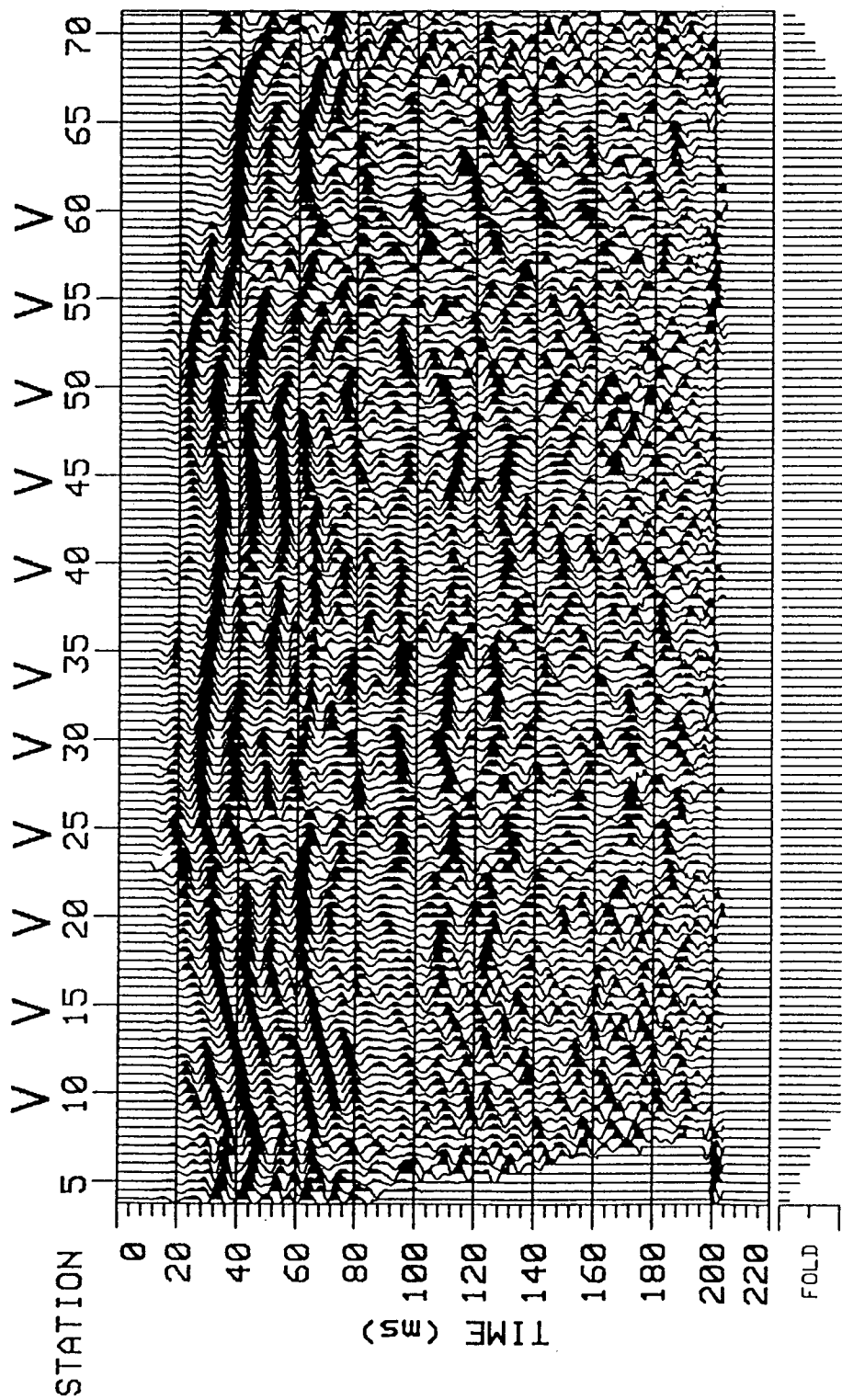
### Profil 2



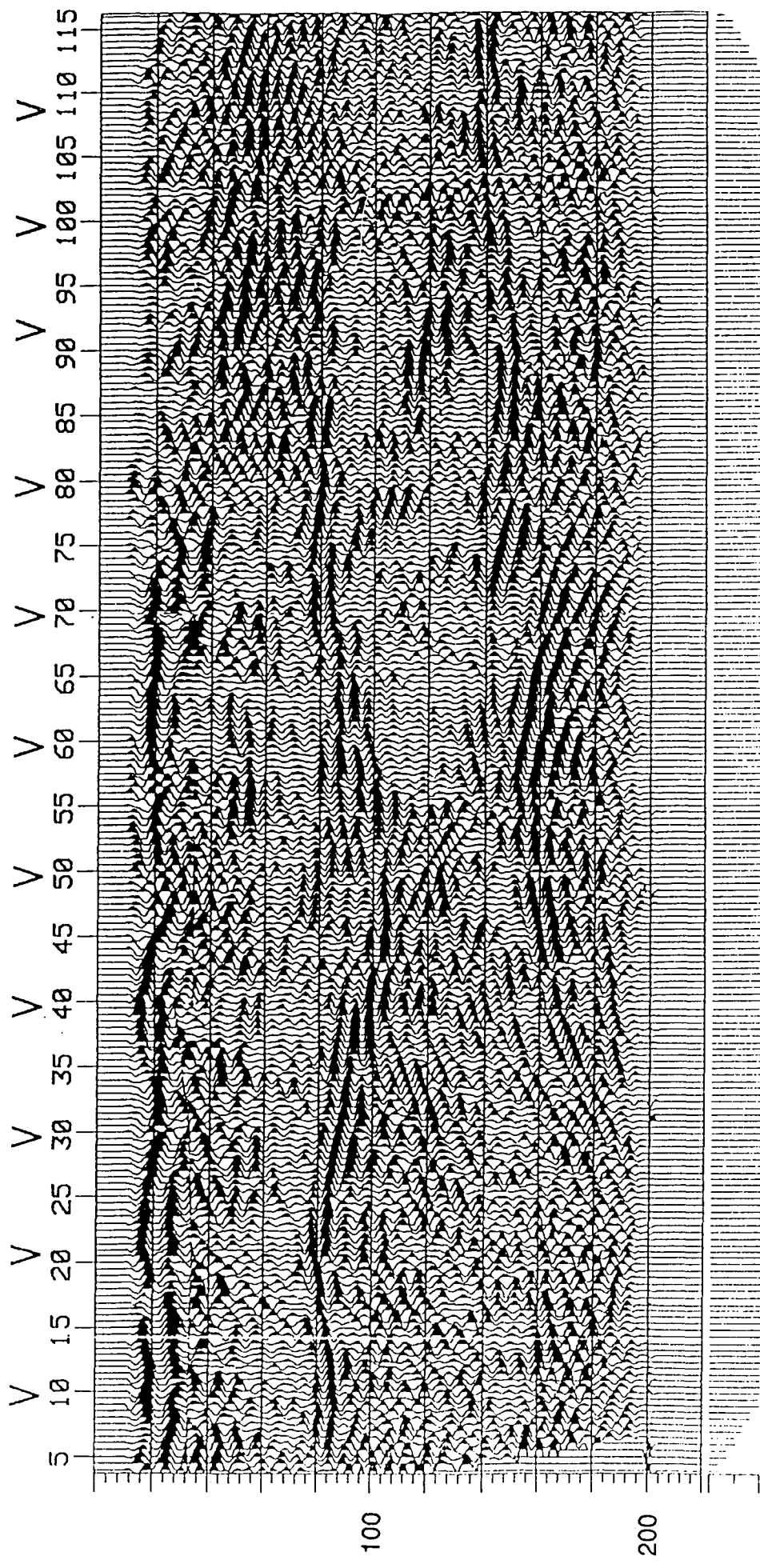
### Profil 3



# OPPSTAD



# HENNING



Time (ms)