



Bergvesenet

Postboks 3021, 7002 Trondheim

Rapportarkivet

Bergvesenet rapport nr BV 1823	Intern Journal nr	Internt arkiv nr	Rapport lokalisering Trondheim	Gradering
Kommer fra ..arkiv	Ekstern rapport nr	Oversendt fra	Fortrolig pga	Fortrolig fra dato:
Tittel Malmprospektering med refleksjonsseismikk Sulitjelma og Løkken malmfelt				
Forfatter Søyland Hansen, T., Grammeltvedt, G. Dahle, A., Gjøysdal		Dato Juni 1983	Bedrift Sulitjelma Gruber A/S Orkla Industrier A/S	
Kommune Alta Meldal	Fylke Finnmark Sør-Trøndelag	Bergdistrikt Troms og Finnmark	1: 50 000 kartblad	1: 250 000 kartblad
Fagområde Geofysikk	Dokument type	Forekomster Sulitjelma Løkken		
Råstofftype Malm/metall	Emneord			
Sammendrag				

MALMPROSPEKTERING MED REFLEKSJONSSEISMIKK

NTNF - PROSJEKT VED
A/S SULITJELMA GRUBER
OG ORKLA INDUSTRIER A/S



MALMPROSPEKTERING MED REFLEKSJONSSEISMIKK

av

T. Søyland Hansen¹⁾, G. Grammeltvedt²⁾, A. Dahle³⁾ og H. Gjølstdal⁴⁾

Juni 1983

- 1) A/S Sulitjelma Gruber, 8230 Sulitjelma
- 2) Orkla Industrier A/S, 7332 Løkken Verk
- 3) A/S Geoteam, Wdm. Thranesgt. 98, Oslo 1
- 4) NORSAR, Boks 51, 2007 Kjeller

FORORD

Allerede i 1971 ble de første innledende feltarbeider utført i Sulitjelma, som kan sies å være forløpere til det prosjektet som denne rapporten omfatter. Prosjektarbeidet har hovedsakelig pågått i tidsrommet 1976-83. I prosjektperioden har det stadig skjedd tekniske nyutviklinger til prosjektets fordel, f.eks. har en hatt stor nytte av det faglige miljø som er knyttet til oljeaktiviteten i Norge.

Dessverre har samme epoke vært karakterisert av tunge tider for sulfidgruvene. Flere gruver er nedlagt mens andre bergverk kjemper en innbitt kamp for å påvise nye brytbare forekomster.

Prosjektet har vært vurdert og støttet av en rekke institusjoner og enkeltpersoner, som har vist stor positiv interesse og optimisme. På vegne av arbeidsgruppen som har forfattet denne rapporten, overrekkes en takk til hver enkelt.

Juni 1983

Tor Søyland Hansen

Gudmund Grammeltvedt

Anders Dahle

Håvar Gjøystdal

INNHALDSFORTEGNELSE

	<u>Side</u>
1. PROSJEKTBAGGRUNN OG MÅLSETTING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetting	7
2. PROSJEKTGJENNOMFØRELSE OG - UTGIFTER	9
2.1 Prosjektorganisasjon	9
2.2 Delprosjekter	11
2.3 Utgifter	18
2.4 Samarbeidsprosjekter	19
2.5 Rapportering	21
3. GEOLOGISK FELTBESKRIVELSE	23
3.1 Sulitjelma malmfelt	23
3.2 Løkken malmfelt	31
4. GEOLOGISKE OG GEOFYSISKE FORUTSETNINGER	35
4.1 Generelt om seismiske metoder	35
4.2 Den refleksjonsseismiske metode, prinsipper og anvendelser	40
4.3 Anvendelse på malmforekomster i krystalline bergarter	44
5. FELTEKSPERIMENTER	49
5.1 Basisegenskaper for vertikal bølgeutbredelse i Løkken og Sulitjelma	49
5.2 Egenskaper ved bølgefeltet fra en sprengladning i overflaten	54
5.3 Energikilde	61
5.4 Geofoner og montering av geofoner	67
5.5 Grunnleggende krav til registreringsinstrument	73
5.6 Forsøksprofil over kjent malmforekomst på Løkken	76
5.7 Skudd/mottager-geometri	79

INNHALDSFORTEGNELSE (fort.)

	<u>Side</u>
6. DATAPROSESSERING	89
6.1 Generelt om dataproessering	89
6.2 Standard prosessering	90
6.3 Krav til prosessering for malmprospektering med seismikk	101
6.4 Programsystem for seismisk malmprospektering	106
7. ANVENDELSE AV METODEN I LØKKEN OG SULITJELMA	115
7.1 Gjertrudfjell, Sulitjelma 1976	115
7.2 Gjertrudfjell, Sulitjelma 1977	119
7.3 Kobbertoppen, Sulitjelma 1978	122
7.4 Gjertrudfjell, Sulitjelma 1980-81	125
7.5 Orkla Vest, Løkken 1979-82	133
8. PLANLEGGING OG FELTBETINGELSER	143
8.1 Planlegging	143
8.2 Stikking, hullboring, geofonmontasje	143
8.3 Feltregistreringer	145
8.4 Prosessering	145
8.5 Tolkning og rapportering	146
8.6 Effekter	146
8.7 Kostnader	147
9. VIDEREUTVIKLING OG FRAMTIDIG FORSKNING	149
9.1 Ny teknologi	149
9.2 Geofoner i borehull	149
9.3 Anvendelse på områder med løsmasseoverdekning	150
9.4 Ikke-impulsive energikilder	150
9.5 Tredimensjonale teknikker	150
9.6 Rekognoserende opplegg	151
10. KONKLUSJON	153

1. PROSJEKTBAGGRUNN OG MÅLSETTING

1.1 Bakgrunn

Malmprospektering er den innsats som har som målsetting å lete etter malmer (malmleting) og å undersøke disse (malmundersøkelse). Olje, gass og kull unntas normalt fra malmbegrepet.

Ved malmprospektering er konvensjonelle geofysiske teknikker i stor grad anvendelige for forekomster som ligger i overflaten, eller på et relativt grunt dyp - grunnere enn ca 250 m, ofte bare 50 m. Dypmalmprospektering kan derfor defineres som leting etter malm som ligger dypere enn 250 m.

Minkende forråd av kjent malm har for flere av de norske kisgruvene vært en trussel mot de tilhørende lokalsamfunn. Det har derfor vært satset betydelige ressurser på å lokalisere mer malm, på stadig større dyp.

Det er innlysende at leting etter malm på større dyp er kostbart siden man i stor grad er henvist til direkte metoder (dvs kjerneboring) ofte kombinert med etablering av stoller og synker for å gi borestandplasser. Disse kostbare boringene gjør at det kan forsvares å anvende både kostbare geofysiske, geokjemiske og geologiske metoder for å øke muligheten for funn ved boring. Kostbar dypmalmleting anses i første rekke å være aktuell for etablerte gruvefelter hvor potensialet av lett tilgjengelig dagnær malm er oppbrukt, eller sent i en undersøkelsesfase av et nytt lovende malmfelt, hvor påvisning av tilleggsmalm i dypet kan gjøre prosjektet realiserbart.

Betraktes anvendelsen av geofysiske metoder i relasjon til den totale prospekteringsaktivitet og forskning, viser en oversikt at ca 93% av kostnadene i 1969 var knyttet til seismiske metoder (se figur 1.1), fordelt med 91,1% på olje- og gassprospektering, 0,3% til gruvedrift og 2,7% til annet formål. Av andre metoder er bare 2% knyttet til olje- og gassprospektering, mens 5,3% er knyttet til gruvesektoren, hovedsakelig metallforekomster (malmprospektering).

WORLD-WIDE GEOPHYSICAL ACTIVITY BY PURPOSE AND METHOD						
(In Millions of U.S. Dollars)						
TABLE 3.						
METHODS	PETRO- LEUM	MINING	ENGR. & GRD.W.	OCEANO- GRAPHY	TOTAL	PERCENT OF TOTAL
SEISMIC						
Land	\$491.0	\$.2	\$16.3	—	\$507.5	55.8%
Marine	117.5	1.2	2.8	—	121.5	13.3%
Enhanc. Process and Interpretation	217.8	—	—	—	217.8	24.0%
GRAVITY	11.0	1.1	.2	—	12.3	1.3%
MAGNETIC	—	.6	.1	—	.7	.1%
RESISTIVITY	—	.2	1.1	—	1.3	.1%
LOGGING	—	2.5	.9	—	3.4	.4%
OTHER GROUND						
Induced Polarization	—	7.2	—	—	7.2	.8%
Geochemical	—	.6	—	—	.6	.1%
Electromagnetic	—	2.7	—	—	2.7	.2%
Other	—	—	.3	—	.3	.1%
AIRBORNE						
EM/Mag.	—	8.7	—	—	8.7	1.0%
Magnetic	10.0	4.4	—	—	14.4	1.6%
Radiometric	—	1.5	—	—	1.5	.2%
Other	—	—	—	—	—	—
UNSPECIFIED	—	3.6	.4	\$6.0	9.2	1.0%
TOTAL	\$847.3	\$33.7	\$22.1	\$6.0	\$909.1	100.0%

Fig. 1.1 Oversikt over geofysisk aktivitet på verdensbasis i 1969.
(Fra Geophysics, vol. 36, 1971).

Selv om tallene i stor grad er et uttrykk for kvantitet og ikke kvalitet, så indikerer de likevel hvor forskningsinnsatsen må ha vært størst og derav hvilken metode som i størst grad har høstet glede av de teknologiske nyvinninger. Elektronisk databehandling er et av stikkordene i denne sammenheng.

Kismalmer og jernmalmer har høy egenvektkontrast mot omliggende bergarter. Isolert sett gir denne kontrasten muligheter for anvendelse av refleksjonsseismikk. Refleksjonsseismikk har etter 1925 blitt benyttet som metode for stratigrafisk strukturkartlegging av yngre sedimentære bergartsformasjoner. For krystalline bergarter har metoden vært ansett som uegnet.

Forsøk med refleksjonsseismikk på krystalline bergarter ble utført vinteren 1960-61 av ABEM, Stockholm, på oppdrag for Luossavaara-Kiirunavaara AB, Sverige, for å kartlegge forløpet av Baron-malmen og Välkomma-malmen mot dypet i Malmberget. Registreringene, som var på analog form, viste refleksjoner som ble tolket som malm i dybdeintervallet 300-2000 m i fortsettelsen langs fallet. Boringer i 1963 viste på -1300 m to massive malmlag på ca 5 m hver med ca 5 m mellomliggende impregnasjon. Lydhastigheten for sidebergart (leptitt) og jernmalm ble målt til henholdsvis 4800-5000 m/s og 5750 m/s, dvs ca 20% forskjell. (L. Edberg, pers. samtale)

I 1962 utførte Seismos, Tyskland, på oppdrag fra Boliden Gruveaktiebolag, Sverige, et refleksjonsseismisk forsøk av et mindre omfang i kisgruvene i Långsele og Renström. (L. Malmquist, pers. samtale)

Disse to arbeidene var fram til 1970 de eneste kjente undersøkelser med bruk av refleksjonsseismikk i tilknytning til malmprospektering. I 1971 startet A/S Sulitjelma Gruber de første forsøksmålinger, og Orkla Industrier A/S fulgte etter i 1974.

I 1975 ble det for Rautarukki Oy, med personell og utstyr fra Leningrad universitetet, utført VSP-målinger (vertikal seismisk profilering) for å undersøke de vertikale bergartsgrenser på Sokli-karbonatitten i Nord-Finland. (O. Lindholm, pers. samtale)

Fra midten av 70-årene har det parallelt med utviklingen i Norge vært utført en rekke arbeider innenfor kullprospektering (i løse sedimentære bergarter), bl.a. i England og USA. I disse undersøkelsene har en etter hvert gjort bruk av digitalinstrumenter med svært høy registreringstakt (Digital High Resolution (DHR)-seismikk).

Tidlige arbeider i Sulitjelma

I Sulitjelma er malmetingsproblemene å finne innenfor området dypmalmeting. Mangel på geofysiske metoder med penetrasjonsmuligheter har resultert i at boring mot geofysiske anomalier tidligere har vært

begrenset til grunnere områder. I forsøkene på å lokalisere dypere forekomster har en stort sett gjort bruk av driftsstrategiske og geologiske nøkkelregler.

I Sulitjelma blir undersøkelsesdypet ekstra stort, da feltarbeidene må legges oppe på fjellet for å dekke de arealer i undergrunnen som er geologisk interessante. Fjellområdene ligger 600-1000 m.o.h. og de mest interessante malmarealer fra 200 m.o.h. til -800 m. Kravet til prospekteringsmetoder for bruk i Sulitjelma blir da at de må virke effektivt på dyp ned til ca 2 km under overflaten.

Spekulasjoner om anvendeligheten av refleksjonsseismikk på de flattliggende malmsoner pågikk allerede på 60-tallet. Refleksjonsseismiske målinger ble først utført høsten 1971 over forekomsten 'Mons Petter', hvor ny malm var funnet samme år, og hvor forsøket hadde som målsetting en delvis kartlegging av utstrekningen med to måleprofiler. Samtidig ble det skutt 10 refraksjonsprofiler for bestemmelse av seismiske hastigheter i de ulike bergarter og dyp. Se tabell i figur 1.2.

Bergart	Seismisk hastighet
Granitt	ca. 4800 m/s i overflaten
Glimmerskifer	5100 m/s "-
Amfibolskifer	5200-5300 m/s "-
Klorittsiert amfibolitt	4600-5000 m/s "-
Amfibolitt	5800 m/s i gruva
Malm(sone) (Charlotta II)	6200 m/s i gruva

Fig. 1.2 Seismiske hastigheter bestemt med refraksjonsseismikk i Sulitjelma i 1971.

Registreringene i gruva er utført i et område med ca 1 km til dagoverflaten. Spesifikk vekt for de to sistnevnte bergarter (amfibolitt og malm) var henholdsvis 2,9 og 3,8 g/cm³.

Refleksjonsmålingene ble gjennomført av A/S Geoteam med en 24 kanalers utrustning (Sercel AS 626x (forsterker), Dresser SIE (oscillograf) og Dresser SIE PR20 (magnetbåndopptaker)). Prosessering av data ble utført av Western Geophysical i London.

Konklusjonene fra disse målingene var hovedsakelig at malm i klorittisert amfibolitt ville forventes å gi de beste refleksjonsbetingelser i bergartsmiljøet i Sulitjelma, men at undersøkelsesdypet måtte være større enn 250 m pga problemer med støy fra overflatebølgene. Da Mons Petter-malmen lå innenfor dette støyområdet, var det umulig å tolke dataene med tanke på refleksjoner fra denne forekomsten. Det ble heller ikke påvist interessante refleksjoner der støynivået var lavt, dvs i områdene dypere enn Mons Petter.

Det var også aktuelt med undersøkelse av Sagmo-malmen på ca 400-450 m dyp. A/S Geoteam og Western Geophysical utførte i 1973 målinger på Gjertrudfjell over Sagmo med et referanseprofil over kjent malm og to profiler i forlengelsen av malmaksen. Utrustningen var den samme, men det ble benyttet rekker av 12 geofoner for hvert av de 24 kanaluttakene i geofonutlegget, dvs 288 geofonregistreringer pr skudd. Hastighetsmålinger i kalkglimmerskiferen i overflaten viste 5500 m/s langs strøket. Resultatet var lite tilfredsstillende pga problemer med overflatestøy og luftpulser, men at en svak reflektor (noe tvilsom) ble påvist i ett profil. En konkluderte med at det ville være behov for ny instrumentering for å registrere høyere frekvenser.

Nytt registreringsutstyr (Input/output, DHR-1632) ble bestilt av A/S Geoteam i 1974, men forsinket produksjon gjorde at planlagte feltarbeider i 1975 ikke kunne komme i gang før vinteren satte inn. Derimot valgte en i 1975 å bore mot anomalien fra 1973, da det også var behov for et

stratigrafisk hull i dette området. Anomaliårsaken ble ikke funnet ved boringen, men hullet er senere benyttet for seismiske tester.

I 1976 mottok A/S Sulitjelma Gruber første gang NTN-midler til det prosjekt som denne rapporten omfatter. Hovedmålsetningen var i første rekke å utvikle en metode for prospektering i Sydfeltet i Sulitjelma. Prosjektet ble utvidet til å omfatte krystalline bergarter generelt etter at Orkla Industrier A/S kom med i det faglige samarbeid i 1976.

Tidlige arbeider på Løkken

Løkken-malmen har form som en linjal med lengde på ca 4 km. Bredden er 100-200 meter og tykkelsen opptil 50 meter. Tverrsnittet er linseformet, slik at malmen tynnes ut på begge sider. Malmen er fulgt ned til ca 1100 meter under overflaten. Prospekteringsmålsetningen har vært å følge malmen videre mot dypet eller å finne nye dypmalmer. Forholdene for seismiske undersøkelser synes gunstige. Malmen ligger i vulkanske bergarter (grønnstein). I en viss avstand, 20-50 meter over malmen, er det gabbro som fortsetter opp til dagoverflaten. Malmen er hovedsakelig massiv, men i heng finnes det impregnasjonsmalm. Egenvekt for massivmalm er ca 4.2 g/cm^3 , for impregnasjonsmalm ca 3.5, gabbro ca 3.0 og grønnstein ca 2.8.

Orkla Industrier A/S tok de første kontakter angående seismisk dypmalm-leting med Terratest AB og A/S Geoteam i 1972-1973. Vinteren 1974 utførte A/S Geoteam seismiske hastighetsmålinger i Løkken grube. Resultatene er vist nedenfor:

Gabbro	6.200 m/s
Grønnstein	6.400 m/s
Impregnasjonsmalm	5.600 m/s
Massiv malm	6.200 m/s

I 1976 utførte A/S Geoteam det første testprofil over kjent malm på Løkken.

Det faglige samarbeid med Sulitjelma-prosjektet startet i 1976, og Orkla ble deltager i NTNf-prosjektet fra 1978.

Andre prosjektinteresserte

Etter feltsesongen 1976 hvor det blant annet i Løkken framkom en lovende refleksjon i en testlinje lagt over malmen, undersøkte en mulighetene for samarbeid med andre interesserte bergverksselskaper. Det ble også vurdert om et eventuelt samarbeid skulle skje i BVLI's regi, men det ble anbefalt en samarbeidsform i regi av A/S Sulitjelma Gruber. Foruten Orkla Industrier A/S, viste A/S Sydvaranger og Skorovas Gruber A/S interesse for deltagelse fra 1978. Sistnevnte, som har et svært begrenset malmforråd, måtte av økonomiske grunner trekke seg. Det samme skjedde med A/S Sydvaranger, som var sterkt interessert i metodeforsøk og undersøkelser mot dypet i Hersjøfeltet ved Røros. Hersjø-malmen kunne egne seg som modell for å studere refleksjonsegenskaper ved varierende malmektighet og ved varierende malmdyp.

1.2 Målsetting

Prosjektets hovedmålsetting har vært å utvikle og tilpasse den refleksjonsseismiske metode for malmprospektering i krystalline bergarter. Målsettingen kan deles inn i flere underpunkter:

- a) Utprøve og tilpasse feltutrustning velegnet for seismikk i krystalline bergarter, dvs energikilder (sprengstofftyper), geofoner og signalregistreringsutstyr.
- b) Utprøve og tilpasse et metodeopplegg for optimale refleksjonsbetingelser og den påfølgende matematiske behandling. Herunder kan nevnes bestemmelse av variable feltparametre (geometri i felt for energikilde- og geofonplassering, støydempningsproblematikk i felt, signaladdisjons-metodikker) og utprøving av ulike programpakker for seismisk databehandling, evt utarbeidelse av egne dataprogrammer.
- c) Anvende metoden forsøksvis som prospekteringsmetode i Sulitjelma og Løkken med henblikk på å påvise malmforekomster i et kjent geologisk miljø.

1.3 Brukerinteresse og nytteverdi

Metoden vil i første rekke ha betydning for de to bergverksselskaper som har deltatt i prosjektet, men resultatet vil samtidig kunne utnyttes av andre tilsvarende bergverksselskaper i Norge. De selskaper som aktivt arbeider med dypmalmleting i sine respektive gruvefelter ønsker en metode til å lokalisere nye malmlegemer i dypet, for derved å opprettholde driftsgrunnlaget.

Omsetningen for kisgruvene i Norge var i 1980 på ca 400 mill.kr., og for å opprettholde denne omsetningen på sikt er det nødvendig å påvise nye malmreserver.

Internasjonalt er anvendelse av refleksjonsseismikk i krystalline bergarter viet oppmerksomhet både i Finland, Sverige, Canada, Australia, Tyskland og USA.

2. PROSJEKTGJENNOMFØRELSE OG -UTGIFTER

2.1 Prosjektorganisasjon

Prosjektansvar

A/S Sulitjelma Gruber vært ansvarlig organisasjon for NTNf-prosjektet med geolog Tor Søyland Hansen (TSH) som prosjektleder. Etter at Orkla Industrier A/S gikk inn som partner i prosjektet har geolog Gudmund Grammeltvedt (GG) i enkelte perioder fungert som prosjektleder.

Styringskomite

Følgende personer har vært medlem i hele perioden: Prof. Jens A.W. Bugge, Institutt for geologi, Universitetet i Oslo; Prof. Markvard A. Sellevoll, Jordskjelvstasjonen, Universitetet i Bergen; Dir. Anders Farestveit, Geco A/S, Oslo; Geolog Tor Søyland Hansen, A/S Sulitjelma Gruber.

I perioden 1978-1980 ble det avholdt felles styringskomitemøte med NTNf-prosjektet 'Seismikk i metamorft bergartsmiljø' (1978) og 'Seismisk dypmalmleting' (1980) i regi av NTNf/NORSAR. Styringskomiteen møttes første gang i mars 1976 i Oslo og avholdt ca 2 møter pr år fram til mars 1980, tilsammen 10 møter.

Arbeidsgruppe

Følgende personer har vært medlemmer i arbeidsgruppen: Geolog Tor Søyland Hansen, A/S Sulitjelma Gruber, hele perioden; geolog Gudmund Grammeltvedt, Orkla Industrier A/S, siden høsten 1976; geofysiker Anders Dahle, A/S Geoteam, hele perioden; geofysiker Jürgen Zimmermann, Geco A/S, fram til 1978; Siv. ing. Nils Marås, NTNf/NORSAR, 1977-1978; geofysiker Håvar Gjølstdal, NTNf/NORSAR, fra 1978. Geolog Øyvind Gvein, A/S Sydvaranger, har deltatt som observatør i perioden 1977-1979.

I likhet med styringskomiteen har også arbeidsgruppen hatt møter for å diskutere resultatene fra de beslektede og integrerte seismikkprosjekter. Arbeidsgruppen har hatt en rekke formelle og uformelle møter hos Geoteam, Geco, NORSAR, og i felt i Løkken og i Sulitjelma.

Sluttrapporten er forfattet i fellesskap av arbeidsgruppens 4 nåværende medlemmer.

Konsulenter og andre medarbeidere

I hele prosjektfasen har planlegging, prosjektbearbeidelse, tolkning og utredning vært ivaretatt av arbeidsgruppens medlemmer enkeltvis og i fellesskap. Geoteam's, Geco's og NORSAR's bidrag er i så måte å betrakte som konsulentbistand. Prospekteringsgruppen ved henholdsvis A/S Sulitjelma Gruber og Orkla Industrier A/S har koordinert feltarbeidene og stilt med nødvendige feltassistenter. Etablering av skudd og geofonpunkter m/nivellering har vanligvis vært utført i egen regi eller av under-entreprenør. Sulitjelma Gruber har i stor grad benyttet A/S Kosmobygg for etablering av skuddpunkter.

I de ulike delprosjekter har Geoteam vært engasjert på kontrakt for data-registrering, mens Geco og NORSAR har vært engasjert for dataprosessering. Geoteam har unntaksvis utført linjepreparering.

Internasjonalt samarbeid ble vurdert i 1976-1977, og aktuelle samarbeidspartnere var Falconbridge Mine Ltd. i Sudbury, Canada; Metallgesellschaft A.G., Vest-Tyskland; og Myllykoski Oy, Finland. Det ble imidlertid valgt ikke å spre interessene for mye.

Foruten at det ble trukket på ekspertisen innen Geoteam, Geco, NORSAR og Jordskjelvstasjonen, ble prosjektet på ulike stadier diskutert med: Statoil, Stavanger, v/ T. Sundt og S. Bergseth; Inst. for petroleum-teknologi og geofysikk, v/prof. Hospers og Langeland; Western Geophysical, England, v/F.A. Merten, D.S. Skerl og J.C. Georgiou; Seismic Geocode Ltd., England, v/R.P. Bligh, J.B. Norwood og R. Griffiths; Seismograph Service Ltd., England, v/D.F. Christie og W.E. Lerwill; British National Coal Board, England, v/J.M. Slater og A. Ziolkowski; Terratest, Sverige, v/ B. Tornqvist; Prakla-Seismos, Vest-Tyskland, v/Schmoll; og Institute of Seismology, Helsinki, Finland, v/P. Heikkinen; L. Edberg.

2.2 Delprosjekter

I det følgende skal det kort refereres fra rekken av delprosjekter som har vært utført i prosjektperioden.

Krokstogen 1976 - testmålinger

For å få en god start på feltsesongen i Sulitjelma i 1976, ble det allerede i mai utført feltforsøk med ulike opplegg for geofoner og skudd og med bruk av registreringsinstrumentet DHR-1632. Arbeidet ble lagt til Krokstogen, og det var forventet å finne refleksjoner fra ligg-grensen mellom Oslo-feltets rombeporfyrserie og underliggende sedimenter, eller kontakten mot grunnfjellet.

De seismiske feltforsøkene ble utført i to faser:

- 1) pulstester for 15 ulike geofoner/hydrofoner og koblingsalternativer
- 2) refleksjonsseismisk profil med tre ulike geofon- og hydrofon-opplegg.

De innsamlede data ble prosessert ved Geco's regnearbeid. Frekvensanalysen av pulstestene indikerte hvilket opplegg en primært skulle satse på ved de senere feltarbeider i Sulitjelma. Et av de tre profilene ble prosessert og viste en reflektor ved ca 970 meters dyp som antas å være rombeporfyrrens ligg-grense.

Sulitjelma 1976 (Sagmo), testmålinger

Undersøkelsene fortsatte i juli med to testlinjer over Sagmo gruve; ett profil på tvers av malmaksen, og ett profil langs malmaksen fra utdreven del av gruva og innover gjenstående malm. Det ble under profileringsforsøkene arbeidet med ulike geofonkoblingstyper, ulike former for geofon-skjerming, varierende skuddopplegg, ladningsstørrelse, fordemning, rettede ladninger, ulike sprengstofftyper og lyddempning. De ulike seismiske seksjonene indikerte bl a fallet langs malmnivået samt en dyprefleksjon nede i Furulundskifer. Gruva syntes å ligge for grunt (440 m) til at signal-støyforholdet skulle gjøre en refleksjon registrerbar.

Sulitjelma 1976, Sagmo - Jakobsbakken, forsøkslinje

Med grunnlag i tolkning og vurdering av de sistnevnte undersøkelser ble det skutt en prospekteringslinje mellom Sagmo og Jakobsbakken for å se hvilke refleksjonshorisonter som ville framkomme i et 3 km langt profil. Resultatet viste refleksjoner bl a i malmnivået nord for Jakobsbakken, i utdrevne områder av Jakobsbakken gruve og dypereliggende fra antatte gabbrobenker nede i Furulundskiferen.

Konklusjonen fra disse undersøkelsene indikerte at en nå hadde kommet fram til et noenlunde brukbart feltopplegg, men at dette burde testes på en dypereliggende forekomst med noe større masse (mektighet). Sagmo-forekomsten syntes å ligge noe grunt (400-430 m) og var kanskje for tynn (1-5 m) og for kisfattig (30-60% sulfid) for å være en god modell ved undersøkelsene på dette stadium.

Løkken 1976, testlinje

Kontakten med Orkla Industrier A/S førte til at det allerede høsten 1976 ble målt en testlinje over de dypere deler av Løkken-forekomsten. Geoteam utførte feltarbeidet. Undersøkelsesdyptet var ca 730 meter og malmmektigheten 10-20 m i ca 200 meters lengde langs profilet. Den prosesserte seksjonen viste en refleksjon i det forventede området.

Hovedfagsarbeid ved Universitetet i Bergen 1976-78

Hovedfagsstudent Helge Hoff utførte 1976-78 et hovedfagsarbeid i nær tilknytning til Sulitjelma's prosjekt 'Malmprospektering med seismikk'. Arbeidet har gitt gode bidrag til forståelsen av støybildet ved den aktuelle typen målinger.

Sulitjelma 1976, Gjertrudfjell, borehullslogging

Sommeren 1976 ble det utført seismisk hastighetslogging i borehullet DBH-178, på Gjertrudfjell, Sulitjelma. Hullet gir et stratigrafisk snitt gjennom de geologiske enheter mellom Sagmo og Jakobsbakken. Målingene ga 5000 m/s som gjennomsnittshastighet, men et 80 m mektig parti av kvarts-rikere glimmerskifer (Lapphellaren skifer, se kap. 7) ga 5500 m/s som intervallhastighet.

Kjerneprøver fra borehullet ble undersøkt mht spesifikk vekt og lyd-
hastighet ved Ingeniørgeologisk Laboratorium ved NTH. Gjennomsnitts-
hastighet for 42 usystematisk fordelte prøver viste 4900 m/s i vannmettet
tilstand. Prøvene som ble tatt ut fra geologiske kriterier syntes også
å gjenspeile en troverdig variasjon in situ. Med grunnlag i de vannmettede
prøvene er seismisk impedans beregnet for de ulike bergartslag (se kap. 7).

Sulitjelma 1977, Gjertrudfjell, kjerneboring

Våren 1977 ble det boret et hull (DBH 185) for undersøkelse av en seismisk
anomali fra seksjonen Sagmo-Jakobsbakken (1976). Det ble påvist ca 8 m
serisitt-kloritt-skifer med kisimpregnasjon, ca 15% kis og anslagsvis
0,2% Cu. Innmåling av borehullet viste at det ga en skjæring på kanten
av anomalien.

Sulitjelma 1977, Gjertrudfjell, borehullslogging

Hastighetsmåling i hullet ga ca 5200 m/s i gjennomsnitt.

Med grunnlag i kjernematerialet ble det ved NTH registrert lyd-
hastighet og spesifikk vekt. Seismisk impedans ble beregnet (se kap. 7) og det ble
observert en impedansøkning på hele 30% for impregnasjonssonen. Anomalien
synes derfor forklart.

Løkken 1977, testmålinger

På oppdrag fra Orkla Industrier utførte Geoteam testmålinger i Løkken Grube
i 1977 (se kap. 5). Målingene ble utført i to perioder med to forskjellige
utrustninger, DHR 1632 og DFS-V. Testmålingene la grunnlaget for de
videre seismiske målinger både i Løkken- og Sulitjelmafeltet.

Reprosessering av testlinje 1/76, Løkken

Reprosesseringen ble utført for å bedømme effekten av datareduksjon.
Det ble prosessert to versjoner med 50% datareduksjon i hver. Den ene
inneholder alle skudd med like nummer, og den andre alle skudd med odde
nummer. Seksjonene viser at 50% datareduksjon medfører et betydelig
tap av signal/støyforhold.

Sulitjelma 1977, Gjertrudfjell, testlinjer

På basis av metodestudiene ved Løkken ble det lagt en ny testlinje over Sagmo. Målingene viste en refleksjon i forventet dyp for at Sagmomalmen, samt en refleksjon 200 m nord for Sagmo. En ny testlinje over anomaliområdet ved Jakobsbakken ga dårligere refleksjoner ved disse målingene enn ved 1976-opplegget.

Reprosessering av Sulitjelma-materialet

Måledataene fra Sulitjelma ble fram til 1978 prosessert ved Geco's EDB-anlegg i Oslo og senere ved Geco's EDB-anlegg i Stavanger. Data fra 1976 og 1977 over anomaliområdet ved Jakobsbakken ble også reprosessert ved Western Geophysical i London. Resultatet av de forskjellige prosesseringene viste marginale forskjeller.

Sulitjelma 1978, Mons Petter-området, testlinje

I juli 1978 ble det skutt en testlinje i Nordgruve-feltet i Sulitjelma som blant annet krysset forlengelsen av Mons Petter malmakse og deler av Charlotta II. To ulike feltgeometriopplegg ble testet. Som registreringsinstrument ble benyttet Texas Instruments DFS-V, utlånt fra Universitetet i Bergen. Det ble observert svake indikasjoner både i Mons Petter aksene og fra Charlotta II, men ingen anomalier forøvrig.

Løkken Grube 1978, testmålinger

Ved analyse av resultater fra refleksjonsseismiske undersøkelser i Løkken i 1976 og 1977 kom en fram til et program for et måleeksperiment med formål å studere følgende problemstillinger:

- romlig signalkoherens
- romlig støykoherens
- analyse av signal/støyforhold ved forskjellige skudd/geofon utlegg
- dempning av signalgenerert støy ved bruk av skudd-arrayer
- dempning av signalgenerert støy ved bruk av 2-dimensjonale geofon-arrayer.

Da det var vanskelig å peke ut steder som ga gode, analyserbare reflekterte signalpulser, ble det i dette eksperimentet besluttet å simulere de reflekterte signaler ved avfyring av ladninger dypt nede i gruva i Løkken samtidig som det ble skutt i overflaten. På denne måten ble signalene fra dypet "maskert" av den samme type signalgenerert støy som reelle refleksjonspulser fra dypet ville bli under ordinær profilering. En hadde under dette eksperimentet fordelene av best mulig kontrollerbare forsøksbetingelser som skulle muliggjøre en systematisk variasjon av kritiske parametere med henblikk på å optimalisere signal/støyforholdet i registreringene på overflaten.

Et eksperiment etter de ovennevnte retningslinjer ble utført i 1978 som et samarbeid mellom NTNF/NORSAR og Geoteam.

Dataene ble også brukt til å beregne det forventede signal/støy-forhold for refleksjoner fra eventuelle malmforekomster i Løkken-området.

Simuleringseksperimenter 1979

Med henblikk på å komme fram til gunstige skudd/mottager-konfigurasjoner ble det vinteren 1979 utført en rekke simuleringseksperimenter ved bruk av data innsamlet i Sulitjelma i 1978. Ved hjelp av computerteknikker genererte man "syntetiske" refleksjoner som ble superponert på Sulitjelma-dataene i forskjellig dyp. Ved systematisk variasjon av mottagerutvalg kom en fram til verdifulle retningslinjer, spesielt med hensyn til valg av "offset" (avstand skudd-mottager). Se forøvrig kap. 5.6.

Løkken 1979, testlinje

På grunnlag av nye retningslinjer for feltkonfigurasjoner som fremkom under dataanalyse og simuleringseksperimenter i 1979, utførte man en reprofilering av testlinjen i Løkken fra 1976. Resultatene er beskrevet i kap. 5.7.

Løkken 1979, Orkla Vest I, forsøkslinje

Den første testlinje i malmaksens forlengelse mot vest ble skutt i 1979

(se kap. 7). Linjen var ca 700 meter lang. Registreringsinstrument var DFS-V. Geometri og opplegg var 'off end' med 10 meter mellom geofonpunktene. Målingene ga klare refleksjoner på 800-900 meters dyp med fall mot syd. Refleksjonene var sterkest i den nordlige del av profilet, og det ble besluttet å forlenge profilet nordover før boring.

Prosesseringsprogrampakke

I løpet av 1980 ble det ved NORSAR utviklet og uttestet en ny programpakke for prosessering av seismiske land-data. Programpakken er i det vesentlige bygd opp som et interaktivt system hvor de forskjellige prosesseringsfunksjonene kan initieres etter behov, og hvor dataene kan inspiseres og kontrolleres på et hvilket som helst nivå i prosessen. På denne måten har en oppnådd en fleksibel prosesseringsmetodikk hvor man ikke på forhånd binder seg til faste prosedyrer. En har i tillegg tatt sikte på å utvikle en modulær programstruktur hvor nye prosesseringsalgoritmer meget enkelt lar seg legge inn på et senere tidspunkt. På denne måten har en lagt opp til et system som effektivt ivaretar såvel rutinemessige prosesseringsfunksjoner som mer spesielle forsknings- og utviklingsfunksjoner.

Løkken 1980, testlinje

I 1980 ble det utført ytterligere testmålinger i området over kjent malm. Blant annet ble det eksperimentert med rettede ladninger uten at dette ga noe vellykket resultat.

Løkken 1980, Orkla Vest II-V, prospekteringslinjer

Målingene i 1980 var en direkte oppfølging av 1979-resultatene (se kap. 7). Profil Orkla Vest I ble forlenget mot nord samtidig som det ble målt et profil øst og et vest for dette. Både Geoteam og NORSAR var operative med hver sin DFS-V utrustning. Dataprosesseringen ble utført av NORSAR. Resultatene viste en tydelig reflektor som det ble diamantboret på i 1981.

Sulitjelma 1980, Gjertrudfjell, prospekteringslinjer

I 1980 ble det skutt 10 profilkilometre fordelt på tre parallelle profiler i området mellom Sagmo og Jakobsbakken. Resultatet ga flere refleksjoner av interessant karakter. Et større anomaliområde nord-vest for Jakobsbakken i tilknytning til tidligere påvist anomali har gitt en struktur som i utbredelse ligner på arealet for en malm-mineralisering.

Sulitjelma 1981, Gjertrudfjell, prospekteringslinjer

De gode måleresultatene fra 1980 ble fulgt opp året etter ved å forlenge to av profilene 1 km videre mot syd og ved å legge et 3 km langt profil vest for Jakobsbakken. Måleresultatene viste også her flere refleksjoner. Det vestligste profilet ga langt klarere refleksjoner, noe som skyldes større dyp ned til refleksjonsflaten - dvs litt bedre signal/støy-forhold. Tolkningen viste at anomalien fra 1981 fortsatte mot vest samtidig som en annen interessant anomali kunne registreres. Den sistnevnte var i godt samsvar med en overlappende AMT-anomali utfra målinger gjennomført i 1981. (AMT = audio-magneto-tellurisk målemetode)

Sulitjelma 1981, Nord-gruvefeltet, prospekteringslinjer

AMT-målinger i Nord-gruvefeltet i 1980 hadde indikert en rekke anomalier bl.a. i området mellom Ny-Sulitjelma og Koppertoppen. For å sammenholde disse med seismiske målinger og i tillegg dekke det nordvestlige akseforløp for Ny-Sulitjelmasonen ble det skutt et ca 1.3 km langt seismisk profil. Det ble samtidig boret mot AMT-anomalier i Koppertopp-lia uten at det ble påvist malm. I den seismiske seksjonen er det senere påvist en reflektor noe dypere enn det er boret. Videre ble det for Koppertoppen lagt 2 parallelle profiler for å dekke de dypere deler av Mons Petter-aksen mot nordøst. Disse to profilene lå til dels i et morene-terreng. Profilene ga ikke refleksjoner av interesse, men dette kan delvis tilskrives dårlige måleforhold.

Løkken 1981, Orkla Vest VI-VIII, prospekteringslinjer

I 1981 fortsatte profileringen i samme område som 1979-1980 med forlengelse av profil III mot nord og et nytt profil i øst og et i vest. Det ble også

målt en forbindelseslinje mellom profil I og III i syd (se kap. 7).

Geoteam og NORSAR utførte målinger og prosessering.

Løkken 1981/82, kjerneboring

Det har blitt boret 2 dyphull mot seismiske refleksjoner. Et hull ble boret i profil II ned til 1030 meters dyp, og et i profil III ned til 980 meter. Begge borehull var rettet mot tydelige reflektorer som viste seg å være forårsaket av bergartsgrenser (se kap. 7.5).

Løkken 1981, hastighetslogg borehull I

Geoteam gjennomførte en hastighetslogg av borehull I høsten 1981.

Denne viste en P-bølgehastighet på 6200 m/s som er noe høyere hastighet enn ved Løkken Grube. Beregnet dyp ned til reflektoren korrelerer meget godt med et klebersteinslag ved 674 meters dyp (se kap. 7.5).

Løkken 1982, hastighetslogg borehull II

Geoteam gjennomførte en hastighetslogg av borehull II sommeren 1982.

Hastighetene i dette borehull var noe høyere enn i borehull I, ca 6400 m/s. Reflektoren på 890 meters dyp skyldes overgangen mellom gabbro og grønnstein (se kap. 7.5).

Sulitjelma 1982, Gjertrudfjell, kjerneboring

På bakgrunn av seismikk-målingene i 1980 og 1981 og AMT-målingene i 1981 ble to anomalier gjenstand for boringer i 1982. Den ene anomalien ble ikke undersøkt på grunn av stadige problemer med borehullet. Den andre anomalien ble skåret med et borehull, DBH 220, uten at det ble påvist malm. Riktignok ble det på forventet dyp påtruffet svakere impregnasjon i ca 1 m mektighet på to steder med ca 10 m intervall. Den dypeste holdt også 10 cm massiv kis. Seismisk logging og måling av lyd hastighet på kjernene er ennå ikke utført.

2.3 Utgifter

NTNF-prosjektet ble foreslått startet allerede i 1975 uten NTNF-tilskudd.

Dette året ble det boret mot en tidligere seismisk anomali, men hullet

var plassert med tanke på stratigrafisk hastighetslogging for de senere arbeider.

Flere av årsprosjektene har hatt regnskapsetterslep til påfølgende år. Delprosjektkostnadene har derfor unntaksvis vært kontert på påfølgende års prosjekter pga regnskapsavslutning.

Tabellen i figur 2.1 viser en samlet kostnadsoversikt for de enkelte delprosjekter, samt fordelingen av kostnadene på de enkelte finansskilder.

De seismiske målingene i 1976 og boringen i 1977 ble støttet av tilskuddsordningen for prospektering i Nord-Norge. Industridepartementet ga i 1978 på bakgrunn av stortingsproposisjon nr. 144 (1977-78) et bidrag på 500.000 kroner til A/S Sulitjelma Gruber for anvendelse på seismikkprosjektet. Samlet utgjør NTNf's andel 500.000 kroner.

2.4 Samarbeidsprosjekter

Etter bearbeidelsen av feltdataene fra 1976 innså man at hverken Geco eller Geoteam av tidshensyn hadde muligheter til å gjøre mer inngående og kritiske analyser av bølgeforplantning og støy/signal-forhold under de feltbetingelser som en stod ovenfor i Sulitjelma og Løkken. I mai 1977 inviterte man derfor NORSAR til et samarbeid med tanke på å dekke denne siden av problemstillingen.

NORSAR (Norwegian Seismic Array), som er en NTNf-institusjon, fikk i 1978 NTNf-midler til prosjektet 'Seismikk i metamorft bergartsmiljø'. Dette prosjektet har vært nært knyttet til prosjektet som denne rapporten omtaler, og både ved feltarbeider og databehandling har informasjon og feltresultater blitt utvekslet etter behov. NORSAR overtok etter hvert Geco's rolle ved dataprosesseringen.

Budsjett- år	Prosjektfase/ delprosjekt	Forbrukte midler i tusen kroner				
		A/S S.G.	O.I. A/S	NTNF	Dep.	
1975	Prosjektplanlegging Kjerneb. Gjertrudfjell	101				
1976	Feltforsøk, Krokskogen og Sulitjelma m/prosess.	263		100		240
1976	Testlinje Løkken		~60			
1977	Boring anomali, Gjertrudfjell	162				70
	Feltforsøk, Sulitjelma	110		100		90
	Testforsøk, Løkken		~90			
1978	Feltforsøk, Sulitjelma					248
	Simuleringsarbeid, NORSAR					100
	Prosesseringspakke, NORSAR etc.	2				152
1979	Feltforsøk, Løkken		125	125		
1980	Avslutningsarbeid Sluttrapport	~139	62	175		
		776	337	500		900
Totalt		2.513.000 kr				

Kostnadseksempler fra prospekteringsprosjekter:

<u>Sulitjelma</u>			
1980	10 km seismiske linjer	806.000 kr	= 80.600 kr pr km
1981	8 km seismiske linjer	720.000 kr	= 90.000 kr pr km
<u>Løkken</u>			
1980-81	10 km seismiske linjer	650.000 kr	= 65.000 kr pr km

Fig. 2.1 Kostnadsoversikt for seismikkprosjektet. Tabellen viser nederst omfanget av selskapenes egne prospekteringsarbeider med metoden. Den høyere kostnaden i Sulitjelma **tilskrives** feltets beliggenhet (800 m.o.h.) med høye mobiliseringskostnader og endel værhindringsdager.

Orkla Industriens utgifter i 1976 og 1977 på tilsammen 150.000 kr. er tatt med selv om Orkla Industrier ikke var regnskapsmessig medlem i prosjektet på det tidspunkt. NORSARs arbeider gjennom beslektede prosjekter i tidsrommet 1978 - 1980 på kr. 1.000.000 har hatt stor betydning for dette prosjektet.

Nederst i tabellen er det økonomisk omfanget av anvendelse av metoden vist fra henholdsvis Orkla Industrier og Sulitjelma Gruber i 1980 og 1981. Disse kostnadene er ikke belastet dette seismikkprosjektet.

I 1980 påbegynte NORSAR et nytt NTNf-prosjekt, 'Seismisk dypmalmleting', hvor intensjonene i første rekke har vært å utarbeide tolkningsmodeller i retning av en tre-dimensjonal plassering av anomalier. Dette prosjektet har også i like stor grad vært knyttet til de foregående seismikkprosjekter med integrerte feltopplegg og utveksling av data fra Orkla.

2.5 Rapportering

Statusrapporter

Det er utarbeidet fortløpende statusrapporter til NTNf i det tidsrommet prosjektet har vært støttet.

Foredrag

Prosjektet er belyst ved følgende foredrag:

- Norsk Geologisk forening, avdeling Oslo, høsten 1976
- Malmgeologisk Symposium, Røros, høsten 1976
- Norges Geologiske Undersøkelser, vinteren 1977
- Boliden Mineral AB, Boliden, Sverige, våren 1977
- Nordisk Geokomitee, Oslo, våren 1977
- Union Explosives, Rio Tinto, Spania, våren 1978
- Kurs i Anvendt Geofysikk, NTH, juni 1981
- BVLI, komitee for nordisk bergforskning, Orkdal, høsten, 1982
- Nordisk seminar i deteksjonsseismologi, Kristiansand, mai 1983
- EAEG-kongress, Oslo, juni 1983.

Tekniske rapporter

Følgende rapporter er utarbeidet:

- Seismiske målinger ved Mons Petter Gruve, Sulitjelma, 1971
Rapport 3358.01, A/S Geoteam
- Seismiske undersøkelser ved Sagmo Gruve, Sulitjelma, 1973
Rapport 3358.02, A/S Geoteam
- Malmprospektering med seismikk, Metodeforsøk
Rapport nr. 3358.04, A/S Geoteam
- Refleksjonsseismiske målinger i Sulitjelma, 1976
Rapport nr. 3358.05, A/S Geoteam
- Refleksjonsseismiske målinger i Sulitjelma, 1977
Rapport nr. 3358.06, A/S Geoteam
- Refleksjonsseismiske målinger i Nordgruvefeltet ved Mons Petter og Charlotta, 1978
Rapport nr. 3358.07, A/S Geoteam
- Seismic methods i metamorphic rock
Technical Report No. 2/80, NTNF/NORSAR
- Refleksjonsseismiske målinger i Sydgruvefeltet, 1980
Rapport nr. 3358.08, A/S Geoteam
- Refleksjonsseismiske målinger i Nord- og Sydgruvefeltet, Sulitjelma, 1981
Rapport 3358.09, A/S Geoteam
- Seismiske undersøkelser i Løkken Grube 1974
Rapport 4034-01, A/S Geoteam
- Refleksjonsseismiske målinger på Løkken 1976
Rapport 4034-03, A/S Geoteam
- Seismiske undersøkelser i Løkken Grube 1977
Rapport 4034-04, A/S Geoteam
- Seismic prospecting for sulphide ore at Løkken West 1980 (test profile)
Report no. 4034.05, A/S Geoteam
- Seismic prospecting for sulphide ore at Løkken West 1981 (borehole logg)
Report no. 4034.06, A/S Geoteam
- Seismic prospecting for sulphide ore at Løkken West 1982 (borehole logg)
Report no. 4034.07, A/S Geoteam

3. GEOLOGISK FELTBESKRIVELSE

I det følgende gis en generell geologisk og malmgeologisk beskrivelse av Sulitjelma og Løkken malmfelter. Samtidig gis også noen data for malmreserver og produksjon slik at en bedre kan forstå den motivasjon som ligger til grunn for en såvidt kostbar metodeutvikling.

3.1 Sulitjelma malmfelt

Sulitjelma ligger i Fauske kommune i Nordland, ca 100 km øst for Bodø. Her finnes en rekke kisforekomster, og etter at første malmfunn ble gjort i 1858 ble det startet gruvedrift i 1887. Fram til utgangen av 1982 er det drevet ut ca 23,5 mill. tonn malm med ca 1,85% Cu, svarende til en verdi av ca 4 milliarder kroner (1982-pris). I tillegg kommer verdien av svovelkis, sink, sølv og gull med anslagsvis 0,5 milliarder kroner.

Generell geologi

Sulitjelma-feltet er betegnelsen på en ca 2.500 km² stor geologisk provins som ligger øst for Saltdalssynformen. Feltet begrenses av blottlagt grunnfjell i syd (Nasafjell) og nordvest (Tysfjord). Mot øst avgrenses feltet noe østenfor svenskegrensen.

Over det prekambriske grunnfjell ligger det eokambriske og kambro-silurske sedimenter som er metamorfosert og tektonisert under den kaledonske orogenese.

Innenfor en radius på ca 20 km fra Sulitjelma opptrer i et bestemt stratigrafisk intervall en rekke synssedimentære stratabundne kopperførende sulfidmineraliseringer. Området betegnes som Sulitjelma Malmfelt. Koppermineraliseringene er knyttet til Sulitjelma amfibolittgruppens metavulkanske bergarter, i første rekke klorittbreskjer, klorittskifre, serisittskifre og kvartskeratofyrer, og er omgitt av amfibolitter og grønnsteiner og Furulund-gruppens glimmerskifer. Alle bergarter opptrer med lav til midlere metamorfosegrad (Fig. 3.1).

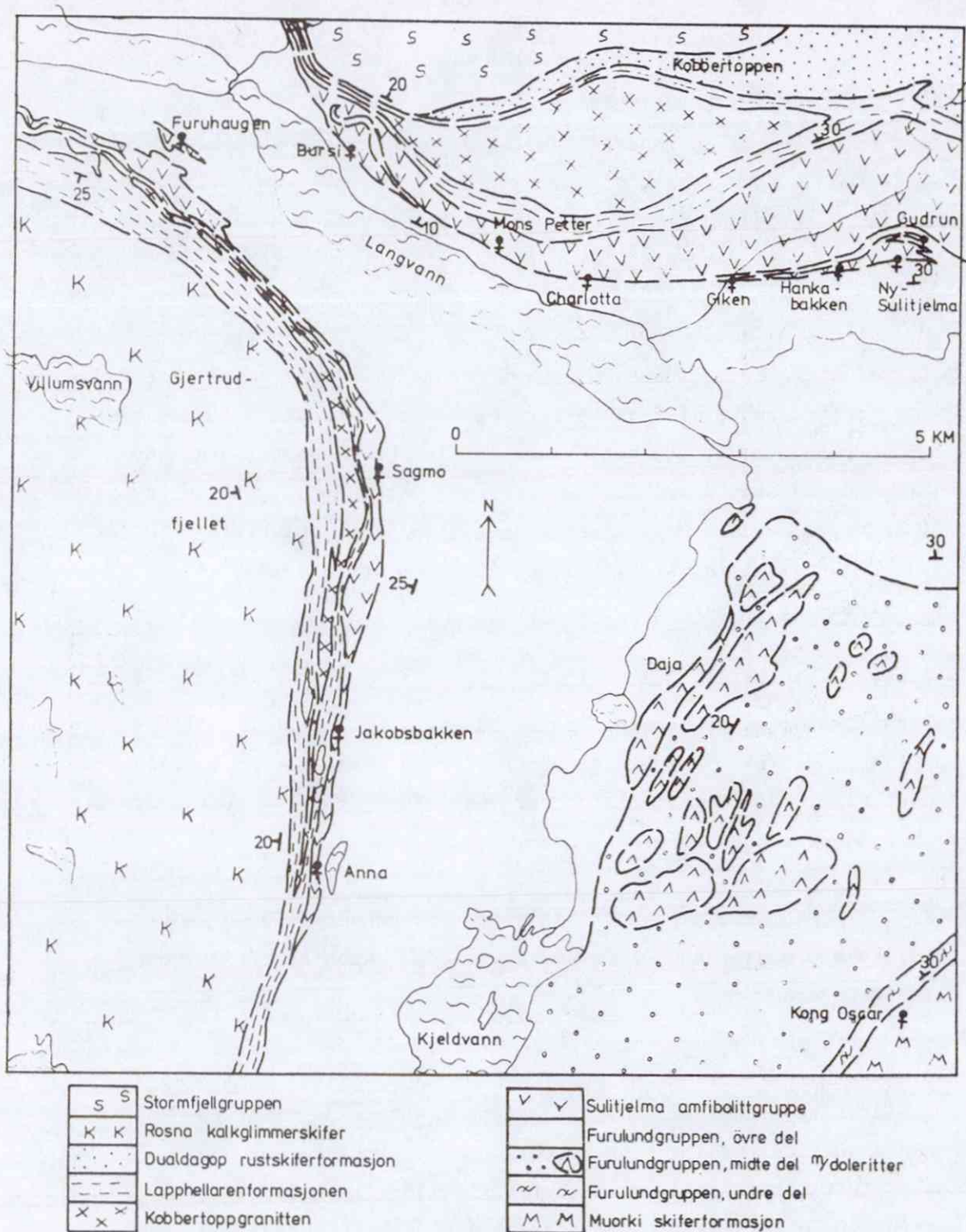


Fig. 3.1 Geologisk kart over Sulitjelma malmfelt. Kartet viser de viktigste bergartsformasjoner og bergartsgrupper, samt utgående av de enkelte gruver.

I de sentrale deler av malmfeltet, dvs innenfor en radius av ca 10 km, opptrer mineraliseringene en rekke steder i så stor mengde og rikhet at de har vært gjenstand for økonomisk drift. De økonomiske malmgrenser former oftest et ellipseformet område i horisontalplanet som sjelden er mer enn 1 km langt og 0,5 km bredt. Mektigheten til malmlatten er vanligvis 0,5 til 4 m, unntaksvis opptil 12-15 m.

Et dypere erosjonssnitt langs Langvanns-antiformen har delt de sentrale deler av malmfeltet i et nord-gruvefelt og et syd-gruvefelt. På begge sider av Langvannet er derfor stratigrafien godt blottlagt.

I nord-gruvefeltet faller bergartene mot nord med ca 10-40°, mens i syd-gruvefeltet er fallet ca 10-20° mot vest eller syd-vest.

Figur 3.2 angir en generell stratigrafisk tabell for de to undersøkte gruvefelter. Nesten samtlige malmer er knyttet til Sulitjelma amfibolitt-gruppens undre del og har ofte kontakt mot Furulund-skifer. Over amfibolitt-gruppen ligger Skaiti supergruppe som i de to gruvefeltene hovedsaklig er representert med glimmerskifrer. I nord-gruvefeltet er Kobbertopp-granitten ganske tykk og i syd-gruvefeltet dominerer en tykkere sekvens av Rosna kalkglimmerskifer.

Strukturgeologisk og malmgeologisk tolkning indikerer at malmforekomstene hovedsakelig representerer en og samme submarine synssedimentære exhalative malmdannelse i en epoke etter at vulkanismens hovedaktivitetet var over, men før senere sedimentær innfylling av havbassenget tok til. Kaledonsk orogenese har senere på grunn av foldning også medvirket til å gi forekomstene den nåværende romlige fordeling og form samt en inversjon av mesteparten av malmfeltets bergarter.

Nord-gruvefeltets malmføring

Som figur 3.3 viser, har forekomstene i nordgruvefeltet en lengderetning som i hovedsak går mot vest-nordvest eller mot nordvest. Langs denne lengdeakse er forekomstene Giken-II og Charlotta-II ikke er avgrenset mot

SYDGRUVEFELTET		NORDGRUVEFELTET	
Enhet	Mektighet	Enhet	Mektighet
Kalkglimmerskifer (R)	→ 1.5 km	Glimmerskifer (St&D)	→ 1 km
Glimmerskifer (L)	30-100 m	Glimmerskifer (L)	30-100 m
Gneisgranitt (K)	0-30 m	Gneisgranitt (K)	0-700 m
Glimmerskifer (L)	10-150 m	Glimmerskifer (L)	150-250 m
Klorittisert amfibolitt (S.a)	0-20 m	Klorittisert amfibolitt (S.a)	20-70 m
Heterogen amfibolitt	0-50 m	Heterogen amfibolitt	50-500 m*
Klorittisert amfibolitt	10-50 m*	Klorittisert amfibolitt	10-50 m*
		Glimmerskifer (F.ø)	5-50 m*
		Klorittisert amfibolitt	10-50 m*
Glimmerskifer (F.ø)	1-2 km	Glimmerskifer (F.ø)	>1.5 km
Glimmerskifer (F.m)	~ 1 km		
m/doleritter			

Fig. 3.2 Stratigrafisk tabell over de ulike enheter i Nord- og Syd-gruvefeltet. Forkortelsene peker hen på formasjons- eller gruppenavnene, se figur 3.1. Stjernene i diagrammet markerer de stratigrafiske posisjoner for malmene.

nordvest, dvs mot dypet. Dypeste malmskjæring her er 665 m under Langvanns nivå eller ca 540 m under havet. De fleste forekomster i nord-gruvefeltet har sin parallelle 'repetisjons'-forekomst mot nordvest. Ny-Sulitjelma-forekomsten danner i så måte et unntak, men undersøkelserne mot dypet av denne har ikke vært særlig omfattende.

Mons Petter malmen har en akse mot nordøst. Den opptrer også med noe større mektighet - opptil 10-12 m - og er plassert i de øvre deler av Sulitjelma amfibolittgruppe og ikke som de andre i kontakt mot Furulundskifer. Forekomstens rikhet, mektighet og transportgunstige beliggenhet gjør at den representerer betydelige økonomisk verdier. Malmreservene er imidlertid sterkt begrenset.

Syd-gruvefeltets malmføring

Som figur 3.3 viser har en i syd-gruvefeltet ikke en tilsvarende tetthet av malmer som i nord-gruvefeltet. Malmens lengdeakse er her mot vest eller vest-nordvest. Sagmo-gruve er i hovedsak avgrenset mot vest, men undersøkelserne mot dypet av Jakobsbakken er for mangelfulle til å gi et

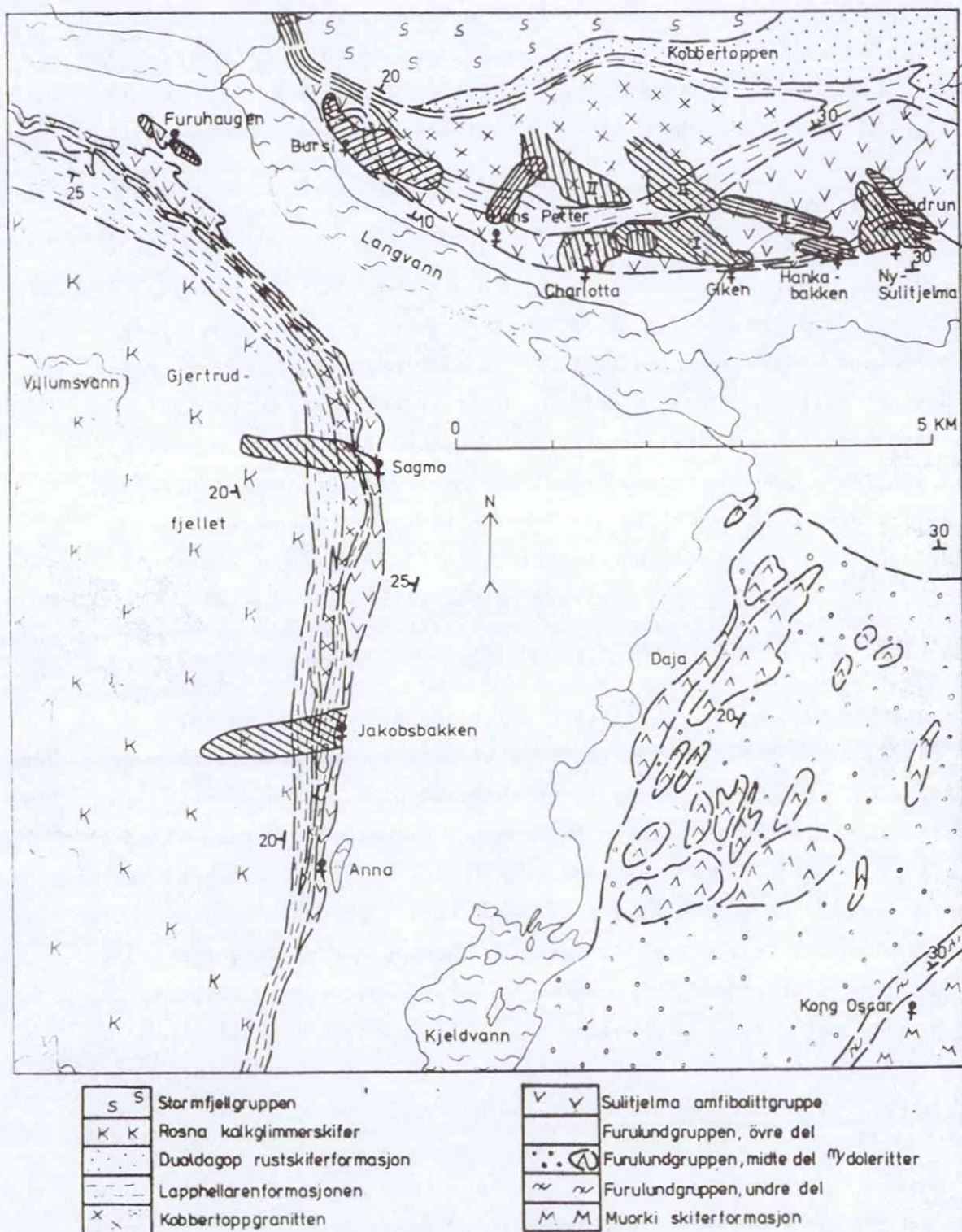


Fig. 3.3 Sulitjelmás gruver illustrert ved å vise omrisset av forekomstene projisert i horisontalplanet.

eksakt svar på malmstrukturens endelige begrensning. Svake mineraliseringer langs utgående av amfibolitten indikerer at det er mulighet for også andre kisforekomster i dette feltet. Driften i Jakobsbakken ble stoppet i 1968, mens Sagmo ble gjenåpnet i 1979 etter ca 20 års produksjonsstans.

Malmenes varierende karakter

Forekomstene i både nord- og syd-gruvefeltet som er av driftsøkonomisk karakter holder samtlige massiv malm, men har samtidig et betydelig tilskudd av impregnasjonsmalm i deler av malmarealet enten mot heng eller ligg. Massiv-malmen utgjør anslagsvis 40% av in situ malmmengder. Forekomster med hovedsakelig impregnasjonsmalm er driftøkonomisk av submarginal karakter og er i dag ikke i produksjon. Massiv-malmen har en egenvekt på ca 4 kg/dm³, mens impregnasjonsmalmen, avhengig av dens kisinnhold, har en varierende egenvekt fra 4 - 3 kg/dm³. Blant sulfidmineralene utgjør svovelkis og stedvis noe magnetkis ca 75 vekt-prosent mens kopperkis utgjør ca 20% og sinkblende ca 5%. Tallene må oppfattes som generelle forenklete nøkkeltall.

Både innenfor og utenfor de drivbare deler av en forekomst varierer både mektighet og kvalitet. Variasjonen er ulik for de enkelte forekomster og i figur 3.4 er det gitt et eksempel på kobbermengde-variasjonen i Giken-II. Innenfor forekomsten er det som figuren viser store arealer med marginal og submarginal malm. Figur 3.5 viser et histogram for kobbermengden fremkommet ved systematisk prøvetaking langs etter i strøkretning av Charlotta-II's malmplan. Som en ser representerer 57% av prøvene verdier under 100 kg Cu/m² (tilsvarer 3 m a 1,1% Cu), dvs ikke brytbar malm. Ved kjerneboring ville således 6 av 10 hull i Charlotta-II påvise submarginal mineralisering. Dette gjør evaluering av borehull til en vanskelig om ikke til en nesten håpløs oppgave.

Forekomstenes heng og ligg-side varierer noe, men generelt kan det sies at kontakten mot skifer vanligvis er markert, mens kontakten på den andre siden, oftest mot en klorittbresje, skjer via en impregnasjonsmalm-type med avtagende kismineralisering. For et par av forekomstene i nordgruve-

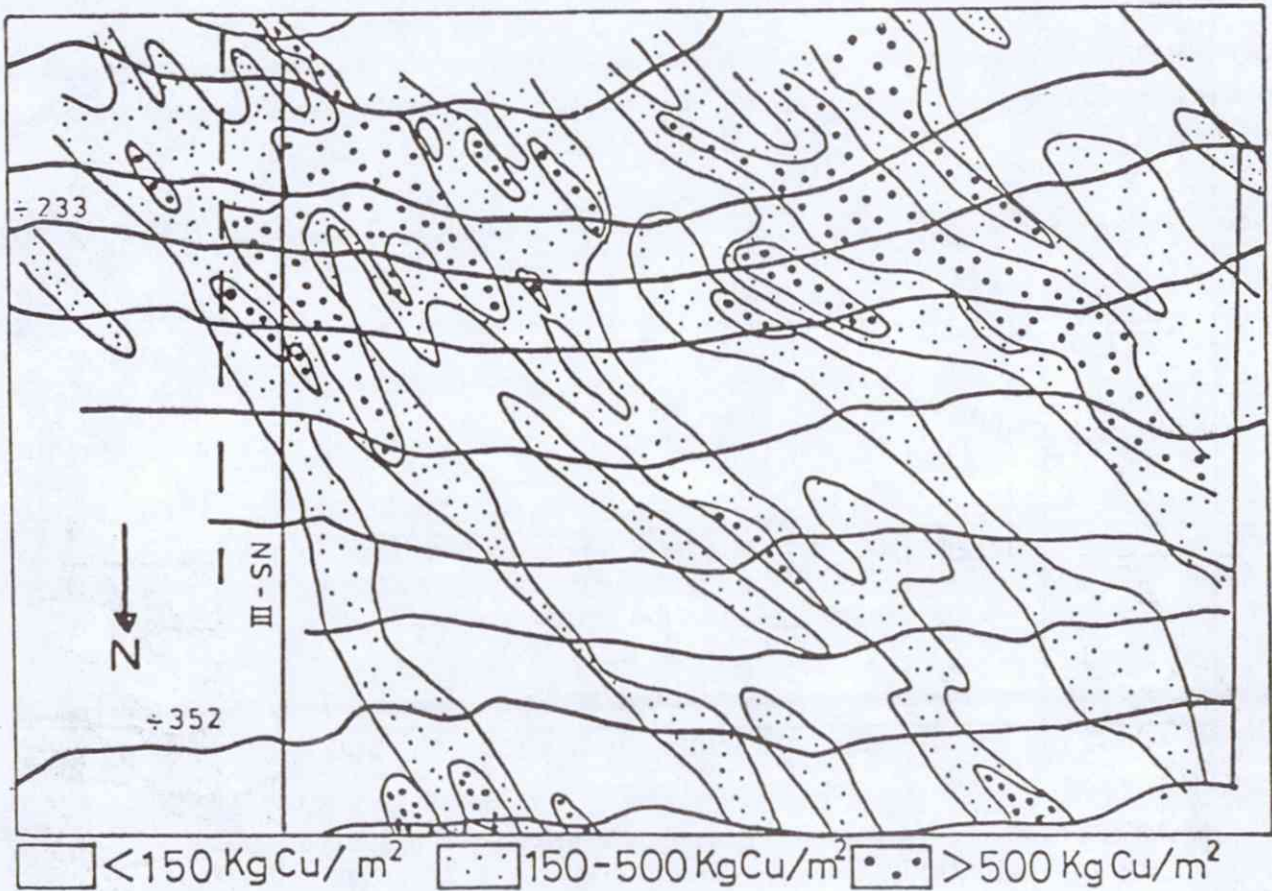


Fig. 3.4 Kobberfordelingskart over et utsnitt av Giken-II malmlag projisert i horisontalplanet. Målestokk er 1:5000. 150 kg Cu/m² tilsvarer 1.5% Cu over 3 meters mektighet. De bølgete 'horisontale' linjene er feltorter (eks -352) og de 'vertikale' linjer er synker (eks. NS-III).

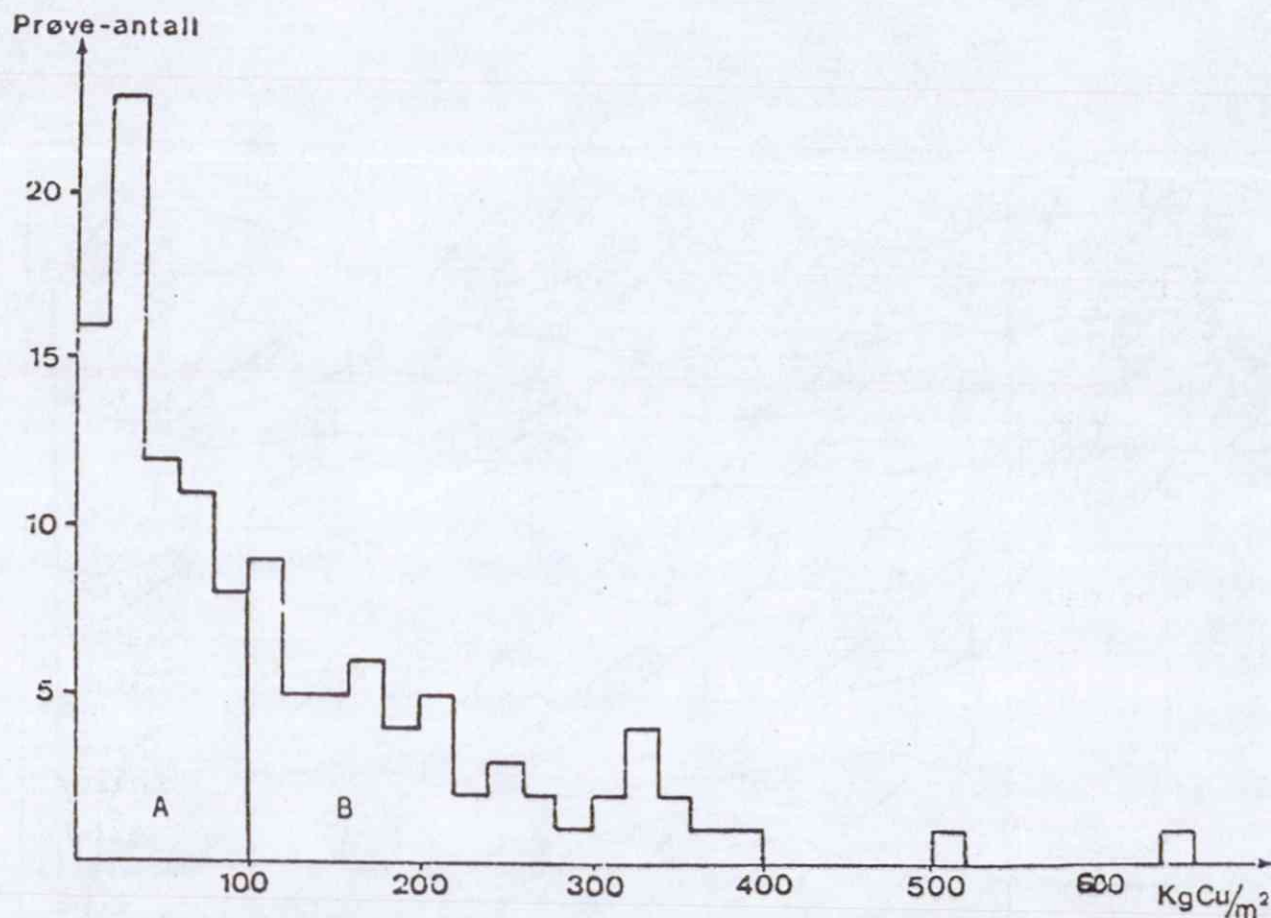


Fig. 3.5 Histogram over kobbermengden i prøvene langs nivå -233 i Charlotta-II. 100 kg Cu/m² tilsvarer 1.1% Cu over 3 meters mektighet. Prøver med lavere verdier enn 100 kg Cu/m² utgjør 57% av prøveantallet.

feltet er heng-kontakten for en stor del en homogen massiv amfibolitt. Varierende malmkvalitet og kontaktbergart gjør at man må forvente en oppstykket reflektor ved anvendelse av refleksjonsseismikk.

Malmreserver og produksjon

I 1982 var forekomstene Giken-II og Charlotta-II, Mons Petter og Sagmo gjenstand for gruvedrift. Samlet produksjon er for tiden ca 0,45 mill. tonn pr år. Legges samme produksjonstakt for de enkelte gruver til grunn har disse en levetid på henholdsvis ca 20-25 år for Giken-Charlotta, ca 8-10 år for Sagmo og ca 2 år for Mons Petter. Koppergehalt og driftskostnader

gjør at Mons Petter subsidierer produksjonen ved de andre gruvene. Manglende malmforråd der produksjonen kan gi et vesentlig bedre dekningsbidrag gjør driftssituasjonen svært vanskelig når Mons Petter gruve er tom.

Prospekteringsproblematikk

Det er etter hvert blitt et presserende behov for å finne en forekomst som kan erstatte driften av Mons Petter når denne gruva er tom. Da det ikke er grunn til å tro at en eventuell ny forekomst skal kunne holde noen høyere gehalt enn tidligere forekomster, må denne nye forekomsten ligge transportgunstig til, eller ha en slik størrelse at en transportgunstig adkomst kan avskrives. En slik forekomst burde kunne finnes i syd-gruvefeltet i Jakobsbakken/Sagmo-området eller i nord-gruvefeltet som en parallell til Mons Petter-forekomsten eller i forlengelsen av aksene på Mons Petter mot nordøst.

Da de potensielle malmsoner stuper mot dypet og derfor ligger langt under terreng-overflaten, har det vært vanskelig å kartlegge nye forekomster. En rekke geofysiske metoder har vært forsøkt uten tilfredsstillende resultat. Kostbar og tidkrevende diamantboring har inntil nylig vært eneste metode. Som en ser av figur 3.4 og 3.5, må det bores et betydelig antall hull for at en mineralisering skal kunne påvises. Utviklingen av denne refleksjonsseismiske metode for dypmalmleting har derfor skjedd ut fra et ønske om å kunne redusere antall borehull for derved å kunne spare både tid og penger.

3.2 Løkken malmfelt

Løkken grube ligger i Meldal kommune i Sør-Trøndelag, ca 70 km sydvest for Trondheim. Forekomsten er en massiv pyrittmalm som inneholder 2,1% Cu og 1,9% Zn. Gruben har vært i drift siden 1654 og har produsert ca 25 mill tonn malm, til en verdi av ca 5 milliarder kroner.

Generell geologi

Løkkenfeltet (Fig. 3.6) er for en stor del bygget opp av vulkanske bergarter (grønnsteiner) som vesentlig består av submarine, basaltiske

lavabergarter med endel tuffer og agglomerater. Innenfor lagrekken opptrer også gabbro, felsitt og lag av jaspis og svartfels/pyritt (vasskis). Stratigrafisk over vulkanittene ligger en tykk lagrekke med sedimenter.

Gabbromassivene er som regel diffust avgrenset mot grønnsteinene med et gangkompleks på grensen. Gangtettheten varierer fra område til område.

Grovt kan den vulkanske lagrekken deles inn i to subgrupper:

- den undre med gabbro, gangkompleks og massive lavabergarter, og
- den øvre med mer veksling mellom lava, vulkaniklastiske sedimenter, jaspis og vasskis.

De hittil kjente sulfidforekomster i Løkkenfeltet opptrer nær grensen mellom de to subgrupper.

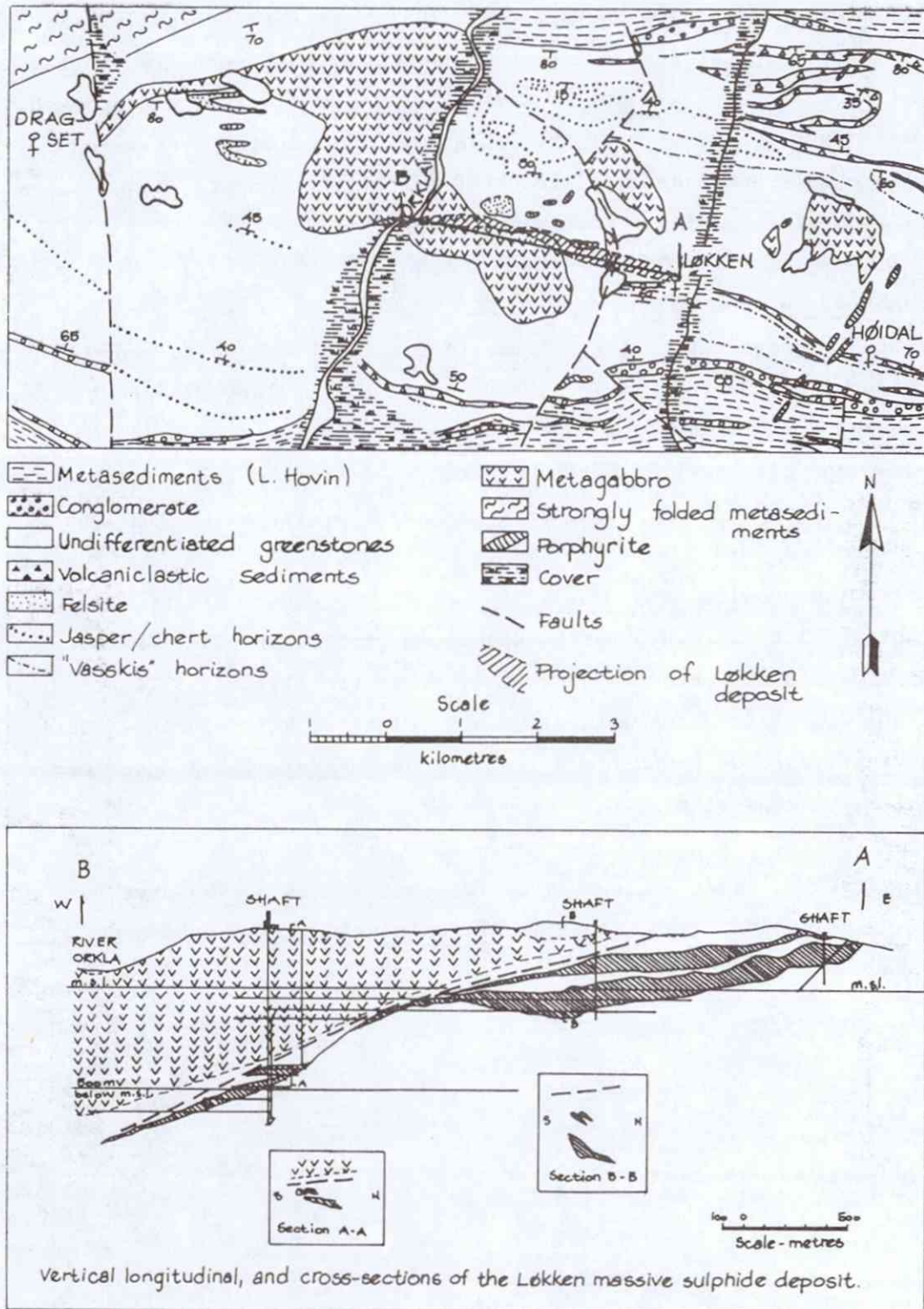
Bergartene i Løkkenfeltet stryker overveiende øst-vest med et forholdsvis steilt fall mot nord. Helé lagrekken ligger invertert.

Løkkenmalmen

Malmen i Løkken grube er en finkornet, massiv, kobberholdig pyrittmalm som inneholder i gjennomsnitt 75% pyrit, 6% kobberkis og 3% sinkblende. Gangmineralene (vesentlig kvarts) utgjør 16%. Strukturelt over malmen opptrer impregnasjonsmalm med pyritt, som det dominerende mineral. Grensen mellom massiv malm og impregnasjonsmalm er alltid skarp, mens grensen mellom impregnasjonsmalm og grønnstein er diffus.

Strukturelt under den massive malm opptrer ofte flere vasskislag i de underliggende grønnsteiner.

Løkkenmalmen har form som en langstrakt linse. Den stuper mot vest og er fulgt ca 4 km etter malmaksen ned til vel 1100 meters dyp.



Figur 3.6 Geologisk kart over Løkken-området (øverst) med et vertikalt lengdesnitt gjennom Løkkenmalmen.

Orkla Vest

Figur 3.6 viser et geologisk kart over Løkken-området. Den geologiske tolkning går ut på at akseretning og lineasjoner har snudd fra vestlig til østlig fall i Orkladalen. Prospekteringsfilosofien har derfor vært at malmen snur og stiger vest for Orkla. De siste års geofysiske og geologiske undersøkelser har imidlertid forandret denne tolkning. Flere skyveplan og forkastninger kompliserer det hele.

Malmreserver og produksjon

De kjente malmreserver i Løkken grube tilsier 8-10 års drift med dagens produksjon, 365.000 tonn pr år (1981). Stort dyp og lang transport kompliserer og fordyrer produksjonen. Malmen grovknuses på nivå 965 og heises opp til dagsilo. Derfra kjøres den 3 km frem til oppredningsverk for videreforedling. Produktene er kobberkonsentrat og sinkkonsentrat.

Prospekteringsproblematikk

På grunn av sitt store dyp har Løkkenmalmen vært et problem å kartlegge mot dypet. Tallrike metoder har vært forsøkt uten tilfredsstillende resultat. Fra nivå 930 er malmen forsøkt fulgt med kjerneboring. Dette er en tidkrevende og kostbar undersøkelse som dekker et begrenset området i malmaksens retning.

En mer målrettet undersøkelse har derfor vært ønskelig. Ved utvikling av en refleksjonsseismisk metode for dypmalmleting vil man på sikt spare både tid og penger.

$$V_p = \left[\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

k - kompressibilitet

μ - skjærfasthet

ρ - tetthet

P-bølgehastigheten for noen geologiske formasjoner er gitt i figur 4.2.

SEISMISKE HASTIGHETER I KVARTÆRE AVSETNINGER OG I FJELLGRUNNEN

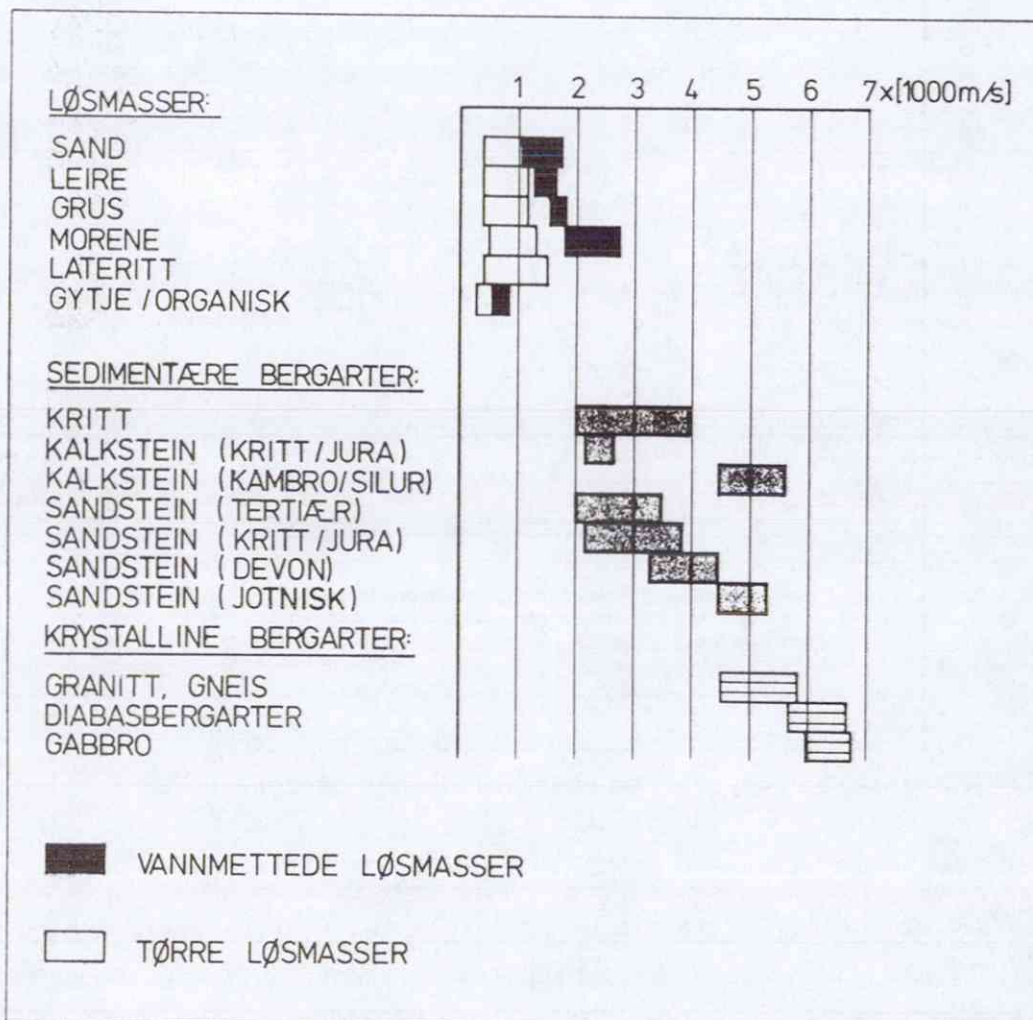


Fig. 4.2 P-bølgehastigheter - erfaringstall.

Av den totale utsendte bølgeenergi er P-bølgenes andel omkring 10%.

S-bølgene brer seg med en hastighet som er lavere, normalt omkring halvparten av P-bølgehastigheten. S-bølgene setter mediet i svingninger på tvers av bølgens utbredelsesretning. S-bølgehastigheten er gitt ved formelen:

$$V_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

S-bølgenes andel av den utsendte bølgeenergi utgjør ca 30%.

Overflatebølgene brer seg langs den fri overflate og følger umiddelbart etter S-bølgene i sekvensen av bølgetyper som brer seg direkte fra energikilden mot et gitt punkt på overflaten. Overflatebølgenes hastighet er omkring $0,9 \times V_s$, og de inneholder normalt ca 60% av den utsendte bølgeenergi. Overflatebølgene setter mediet nær overflaten i en elliptisk bevegelse som er retrograd, dvs mediets enkelte 'partikler' beveger seg mot urviseren i en elliptisk bevegelse. Utsvinget langs den vertikale akse er størst.

Snell's Lov

En seismisk bølge som forplantes gjennom et medium med hastighet V_1 , vil oppleve refleksjon og brytning (refraksjon) etter Snell's lov når bølgen treffer grensen til et medium med hastighet V_2 , jfr figur 4.3. Da gjelder relasjonen:

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin j}{V_2} \quad (4.3)$$

Her er i innfallsvinkel for innkommende bølge (I) og j er utgangsvinkel for den transmitterte bølge (T). For den reflekterte bølge (R) er innfallsvinkel lik utgangsvinkel for sammen bølge-typer. Ved den refleksjonsseismiske metode måles og beskrives reflekterte bølger.

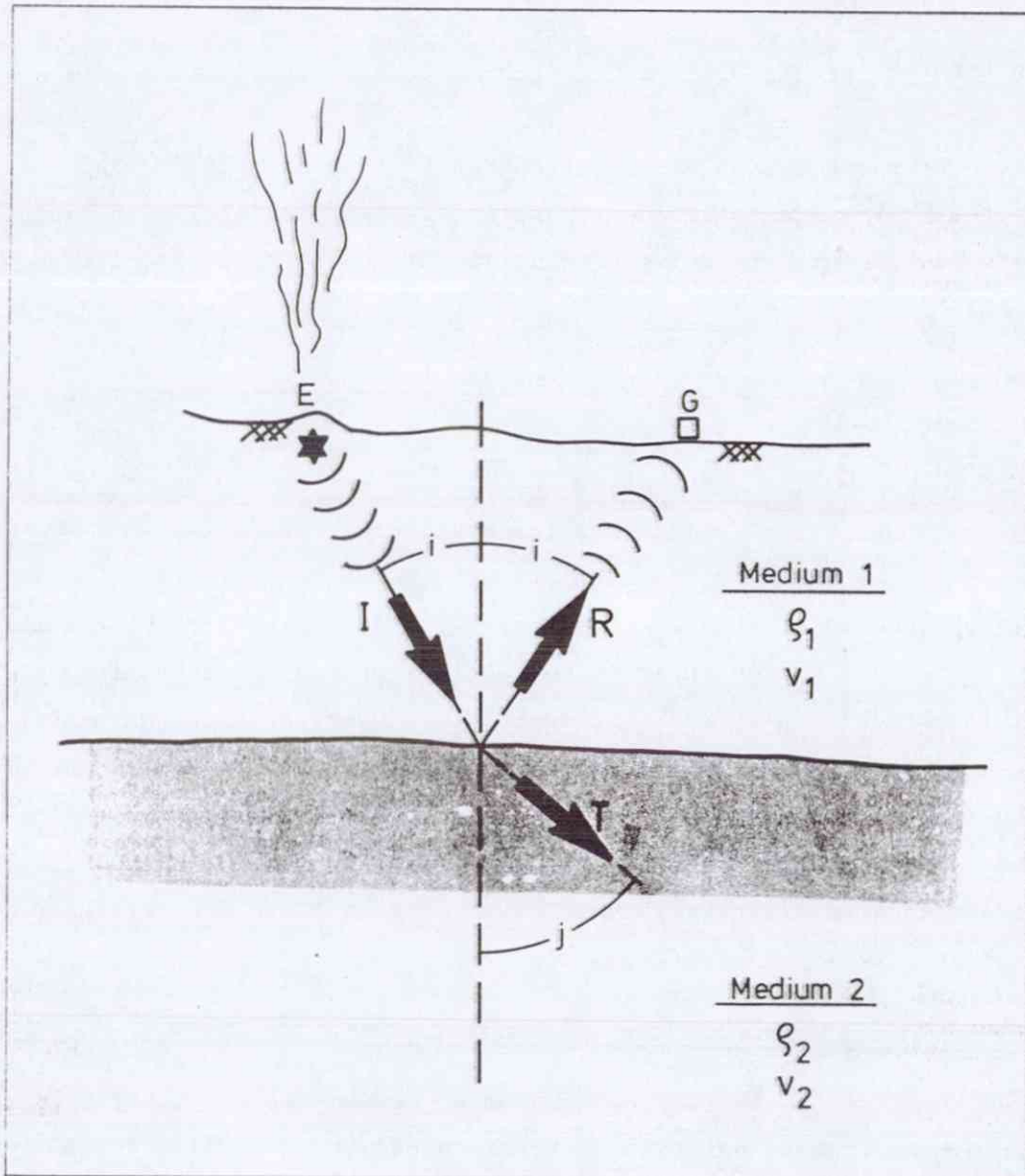


Fig. 4.3 Seismisk bølge mot grenseflate.

Når vi har

$$\sin i = \frac{v_1}{v_2}, \quad \sin j = 1,$$

vil den transmitterte bølge kritisk refrakteres ($j = 90^\circ$), dvs bølgen følger grenseflaten. Ved den refraksjonsseismiske metode måles og beskrives kritisk refrakterte bølger.

Impedans

Seismisk impedans (Z) defineres som produktet av mediets egenvekt og seismiske hastighet:

$$Z = \rho V \quad (4.4)$$

La I , R og T betegne amplituden for innfallende, reflektert og transmittert bølge h.h.v. Refleksjonskoeffisienten for tilnærmet normalrefleksjon (r) er forholdet mellom reflektert og innkommende bølge, jfr. Fig. 4.3

$$r = \frac{R}{I} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.5)$$

Transmisjonskoeffisienten er gitt som

$$t = \frac{T}{I} \quad (4.6)$$

Refleksjonskoeffisienten antar verdier mellom 0 og 1. Refleksjonskoeffisienten (r) er avgjørende for hvorvidt en struktur lar seg studere med refleksjonsseismikk eller ikke. Refleksjonskoeffisienten må anta en slik verdi at den reflekterte bølge er registrerbar. På den annen side må refleksjonskoeffisienten ikke være så stor at for lite energi slipper ned til underliggende reflektorer. Alminnelig forekommende refleksjonskoeffisienter i sedimentære bergarter er:

Overgang mellom tørre kvartære avsetninger (eller forvitringssone) og sandsten	$r = 0.6$
Sandsten/kalksten (maksimumverdi)	$r = 0.2$
Grunne reflektorer i sedimentære bergarter	$r = 0.05$
Dype reflektorer i sedimentære bergarter	$r = 0.02$

De to siste verdiene er typiske for de grenseflater i sedimentære bergarter som i alminnelighet studeres med refleksjonsseismikk. Reflekterte bølger får en reduksjon i amplitude tilsvarende refleksjonskoeffisienten. I tillegg reduseres amplituden ved demping.

Dempning

Seismiske bølger dempes (dvs at amplituden på den utsendte impuls minker) ved spredning og absorpsjon. Spredning medfører at amplituden avtar omvendt proporsjonalt med avstanden til kilden (z). Absorpsjon betegner i seismisk sammenheng de mekanismer som medfører reduksjon i amplitude som følge av at bølgeenergi overføres til varme. Amplitudereduksjon ved absorpsjon og spredning kan formuleres slik, når A_0 er amplituden for avstanden $z = 1$ fra energikilden.

$$A(z) = A_0 \frac{e^{-\alpha(z-1)}}{z} \quad (4.7)$$

Faktoren α kan uttrykkes som

$$\alpha = \frac{\pi}{Q \cdot \lambda} \quad (4.8)$$

hvor Q er den såkalte 'seismiske kvalitetsfaktor'.

Fra uttrykket for α er det klart at seismiske bølger med korte bølgelengder (høy frekvens) dempes mer ved absorpsjon enn langbølgede seismiske bølger. Den seismiske kvalitetsfaktor er en materialegenskap.

4.2 Den refleksjonsseismiske metode, prinsipper og anvendelser

Den refleksjonsseismiske metode utnytter den informasjon som er knyttet til kontrollert energi utsending og påfølgende registrering av reflekterte bølger. Metoden forutsetter at seismiske bølger kan forplante seg, og at det eksisterer passende kontraster i seismisk impedans.

Idealisert modell

Den ideelle refleksjonsmodell er illustrert i figur 4.3. En energikilde (E) sender ut en impuls som reflekteres ved overganger mellom geologiske strukturer med forskjellig impedans og fanges opp av en geofon (G). Den idealiserte refleksjonsmodell inneholder kun reflekterte bølgeimpulser som ønsket informasjon. Denne informasjon (dvs refleksjoner) betegnes her som 'signal'. Alle andre påvirkninger på geofonen, enten det dreier seg om bølgetyper skapt av energikilden eller påvirkning fra andre kilder, betegnes som 'støy'.

Signal/støy-forhold

Rent visuelt representerer signal/støy-forholdet den styrke og klarhet en reflektert impuls fremtrer med i en seismiske registrering. Signal/støy-forholdet kan også defineres matematisk, f.eks. som forholdet mellom kvadratmiddelverdien av signal dividert med kvadratmiddelverdien av støy:

$$\text{Signal/støy-forhold} = \frac{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} S^2(t) dt}{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} N^2(t) dt} \quad (4.9)$$

$S(t)$ og $N(t)$ er h.h.v. signal og støy som funksjon av tiden (t).

Ved anvendelser av den refleksjonsseismiske metode er det ønskelig med et høyt signal/støy-forhold. Både under datainnsamlingen i feltfasen og i den senere prosesseringsfasen skal en hel rekke parametre velges og fastsettes slik at resultatet fremkommer med best mulig signal/støy-forhold.

Linjeprofilering

Den alminneligste form for måleopplegg ved anvendelse av den refleksjonsseismiske metode er linjeprofilering. Med dette menes at målingene utføres langs en linje i terrenget, og at resultatene kan tilbakeføres til denne linjen. Figur 4.4 illustrerer prinsippet for linjeprofilering. I praksis benyttes registreringsinstrumenter med flere registreringskanaler (typisk 24, 48, 72 eller 96), slik at tilsvarende mange geofon-registreringer (refleksjoner) kan mottas hver gang energikilden avfyres. Energikilden og geofonene arrangeres ofte i et regulært mønster som gir felles refleksjonspunkt (Common Datum Point, CDP) for mange kombinasjoner av energikilde/geofon. Dette kalles flerfoldig registrering og representerer et av de viktigste prinsipper for forbedring av signal/støy-forholdet ved refleksjonsseismikk.

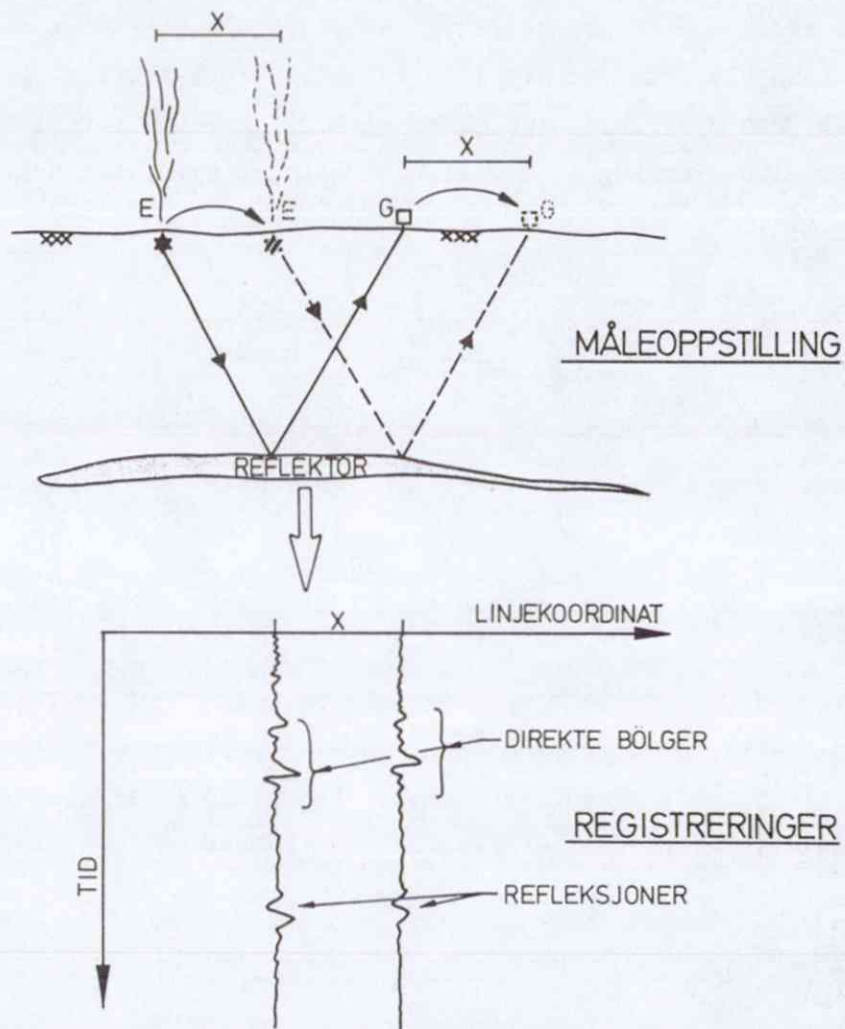


Fig. 4.4 Linjeprofilering med refleksjonsseismikk

Prosessering

Avfyring av en seismisk energikilde mot en rekke geofoner gir en registrering som består av flere enkeltregistreringer (tidstraser) knyttet til hver enkelt geofon. Ved digital datainnsamling på magnetbånd inneholder en registrering typisk i størrelsesorden 24.000 tall-

representasjoner. En seismisk linje består gjerne av hundretalls eller tusentalls slike registreringer.

Prosessering av refleksjonsseismiske data omfatter matematisk tallbehandling vha EDB. Prosessering er omhandlet i Kapittel 6. Sluttproduktet fra seismisk prosessering er en seismisk seksjon.

Seismiske seksjoner

Seismiske seksjoner er sammensatt av vertikale tidstraser lagt så tett inntil hverandre at eventuelle forekommende refleksjoner visuelt kan følges fra trase til trase. Et viktig begrep innen refleksjonsseismikk er kontinuitet. Med kontinuitet menes i denne sammenheng at sammenstilling av seismiske data i seismiske seksjoner gir mulighet for å følge svake refleksjoner fra trase til trase (dvs over en viss strekning i terrenget) selv om signal/støy-forholdet for hver enkelt trase er betydelig mindre enn 1.

En trase i en seismisk seksjon representerer normalt flere kombinasjoner av energi/geofon-punkter summert sammen (CDP-prinsippet), og en seismisk seksjon representerer derfor en reduksjon av den opprinnelige datamengde. Visuelt sett fremtrer en seismisk seksjon som et grafisk bilde av impedanskontraster i den geologiske strukturen. Den horisontale akse i de seismiske seksjoner angir en linjekoordinat for trasene som tilsvarer et fysisk punkt i terrenget. Den vertikale akse angir gangtid for de seismiske bølger, korrigert til et valgt referansenivå. Dersom hastigheten for seismiske P-bølger er kjent som funksjon av avstanden fra referansenivået til eventuelle reflektorer, kan avstanden til reflektorene beregnes.

Tradisjonelle anvendelser

Den refleksjonsseismiske metode ble lansert i forbindelse med leting etter hydrokarboner omkring 1930, men først etter at moderne regnemaskiner ble konstruert, vokste metoden frem som den ledende innen olje- og gassprospektering. Utviklingen og anvendelsen av metoden har derfor vært nært knyttet til sedimentære strukturer.

I det siste ti-år har metoden blitt utviklet og tilpasset grunne sedimenter ved leting etter gass eller kull. Denne problemstillingen krever høy oppløsning, og refleksjonsseismikk for dette formål har fått betegnelsen 'høy-oppløselighets-seismikk' (high resolution seismics).

4.3 Anvendelse på malmforekomster i krystalline bergarter

Krystalline bergarter

Betegnelsen krystalline bergarter er en dels upresis generell betegnelse for eruptive og metamorfe bergarter i motsetning til sedimentære bergarter. Dette er en betegnelse som er veldefinert i relasjon til den refleksjonsseismiske metode.

Kjente grunnleggende seismiske egenskaper ved krystalline bergarter

Krystalline bergarter kjennetegnes ved høye seismiske hastigheter.

Figur 4.2 angir de viktigste bergartstyper og de tilhørende seismiske hastigheter. Bergarter med velutviklet planstruktur (foliasjon) viser erfaringsmessig typisk anisotrop hastighetsfordeling. Den seismiske hastigheten er størst parallelt med foliasjonen. Hastigheten normalt på foliasjonen kan være 10-15% lavere.

Et rikholdig materiale fra refraksjonsseismiske målinger viser at oppsprekning i krystalline bergarter reduserer den seismiske hastigheten betydelig. Oppknust berg kan under visse omstendigheter nær overflaten vise en P-bølgehastighet på bare ca 50% av hastigheten i solid fjell. Hastigheten i oppknust fjell avhenger igjen av sprekke materialet og bergtrykket. Mot dypet vil bergtrykket lukke sprekkene og komprimere sprekke materialet, slik at den seismiske hastigheten øker opp mot egenverdien, dvs hastigheten i solid sprekkefritt, uforvitret fjell. Tettheter for krystalline bergarter varierer grovt sett fra ca $2,6 \text{ g/cm}^3$ - $3,10 \text{ g/cm}^3$.

Erfaringstall for seismisk hastighet og tetthet viser at lav tetthet korresponderer med lav seismisk hastighet og høy egenvekt med høy seismisk hastighet. Antas det at tettheten $2,6 \text{ g/cm}^3$ korresponderer

med 4000 m/s og tettheten 3.0 g/cm^3 med 6000 m/s, blir mulige impedans-variasjoner på fra ca $10 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ til ca $18 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Teoretisk kan da kontaktene mellom forskjellige krystalline bergarter representere impedanskontraster som gir refleksjonskoeffisienter i området 0.0 - 0.3.

Krystalline bergarter er tradisjonelt ansett som problematiske mht anvendelse av den refleksjonsseismiske metode. Dette skyldes først og fremst at strukturene er kompliserte sammenlignet med sedimentære lagpakker hvor metoden har fått sin utvikling og hovedanvendelse.

Generelt vil sulfidmalmer ha en tetthet på 3.75 g/cm^3 . I 1974 ble det utført seismiske hastighetsmålinger på bergarter og malmer i Løkken Grube. Ut fra disse målingene, og tetthetsbestemmelser på tilsvarende malmprøver og bergarter, var det mulig å beregne en del verdier for forventede refleksjonskoeffisienter. Tilsvarende målinger ble utført i Sulitjelma så tidlig som 1971. Nøkkeltall for refleksjonskoeffisienter er angitt i figur 4.5. Dette representerer de første realistiske anslag for refleksjonsmetoden, og ble ansett gode nok til å anbefale feltmessige målinger og forsøk.

Problemstillinger ved anvendelse i Løkken og Sulitjelma

Anvendelse av refleksjonsseismikk som prospekteringsmetode i Sulitjelma- og Løkkenfeltet byr på problemstillinger knyttet til seismisk bølge-utbredelse og refleksjon i krystalline bergarter generelt og refleksjon mot malmkropper med tykkelse i størrelsesorden 1-10 m spesielt. Malmkroppenes bredder og lengder er henholdsvis av størrelsesorden 100 og 1000 m.

Teoretiske betraktninger omkring refleksjoner fra tynne lag viser at refleksjoner, uten særlig tap av styrke, kan forventes fra lag med tykkelse ned til $1/8$ av bølgelengden. Ved mindre lagtykkelser avtar styrken i den reflekterte impuls men kan fremdeles være målbar under gunstige bølgeforplantningsbetingelser. Dersom laget skal kunne 'løses

LØKKEN GRUBE	
BERGARTSGRENSE	REFLEKSJONS - KOEFFISIENT
GRØNNSTEIN / MALM	0.13 - 0.25
IMPREGNASJON / MALM	0.10 - 0.24
GRØNNSTEIN / IMPREGNASJON	— 0.07 - 0.08
GABBRO / GRØNNSTEIN	— 0.05 - 0.05
SULITJELMA	
AMFIBOLITT / MALM	0.12 - 0.21

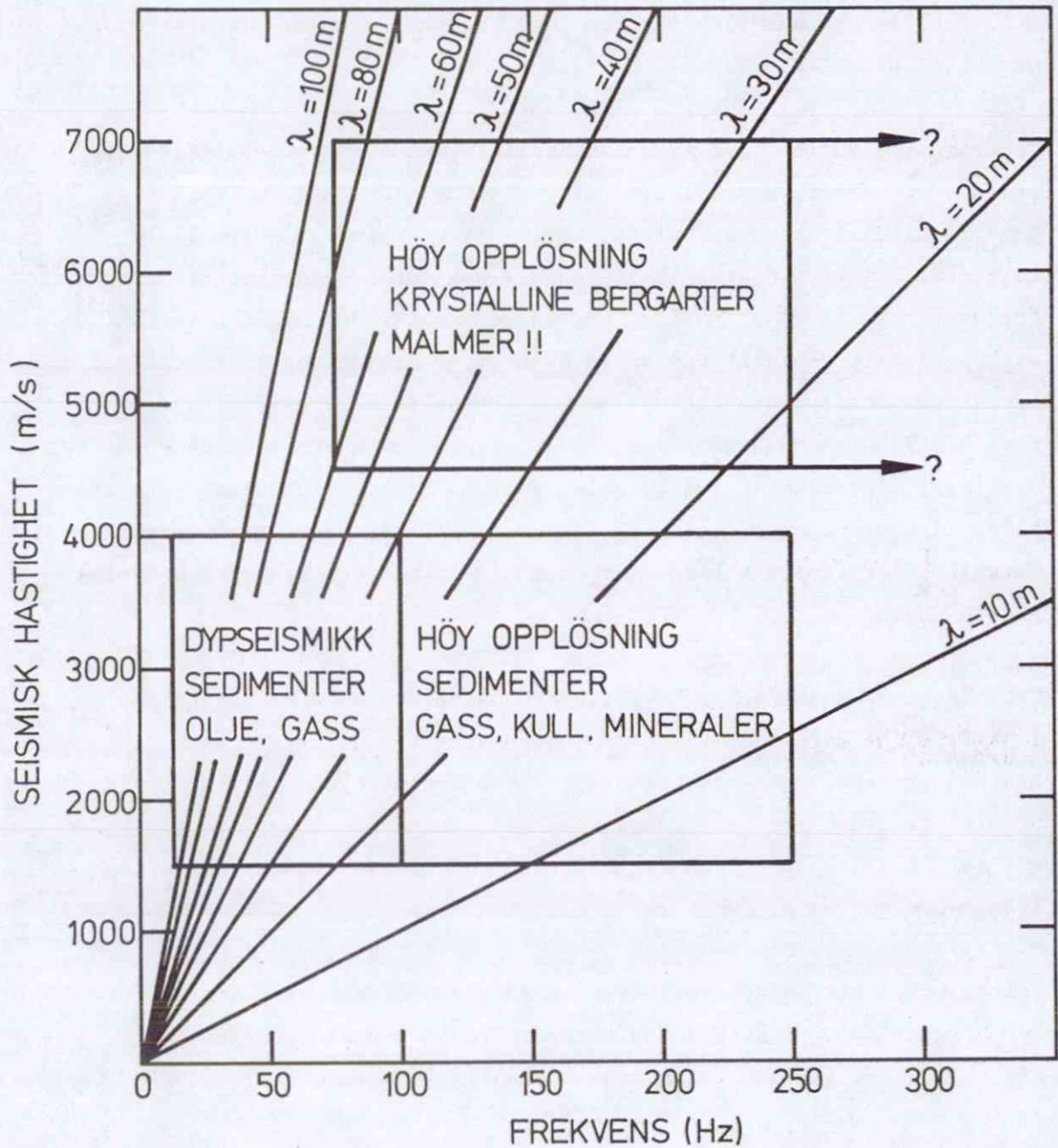
Fig. 4.5 Nøkkeltall for refleksjonskoeffisienter i Løkken Grube basert på målte verdier for seismisk hastighet og tetthet (egenvekt).

opp' med refleksjonsseismikk, dvs at refleksjoner fra over- og underside skal fremtre som adskilte impulser, må lagtykkelsen være av størrelsesorden som bølgelengden.

Ut fra slike vurderinger er det ønskelig å kunne benytte bølgelengder på under 10 meter, men tilstrekkelig å kunne benytte bølgelengder på noen få titalls meter for prospektering etter malmer i krystalline bergarter. Figur 4.6 viser bølgelengder som funksjon av hastighet og frekvens, og avgrenser områder for konvensjonell seismikk, høyopløselighets seismikk, og seismikk knyttet til malmer i krystalline bergarter. Det typiske for seismikk i krystalline bergarter er det høye hastighetsområdet for seismiske bølger. For å kunne oppnå ønskelige og/eller tilstrekkelig små bølgelengder, må frekvensinnholdet økes relativt til konvensjonell seismikk. Figur 4.6 illustrerer at refleksjonsseismikk i krystalline bergarter er et 'nytt område' innenfor seismisk prospektering.

Grunnleggende kunnskap om høyfrekvente seismiske bølgers egenskaper i krystalline bergarter var derfor nødvendig for å kunne trekke sikre slutninger om metodens anvendbarhet i Sulitjelma og Løkken. Sentrale problemstillinger er her frekvensinnhold, dempning, bølgeformer; alt sett i relasjon til en fremtidig anvendelse ved linjeprofilering i de samme områdene.

Løkken Grube ble valgt som forsøksområde for felteksperimenter fordi det her var mulig å avfyre kontrollerte ladninger på forskjellige nivåer i gruva via gruvas interne kommunikasjonssystem.



BÖLGELENGDER VED SEISMISKE UNDERSØKELSER

Fig. 4.6 Bølgelengder ved seismiske undersøkelser.

5. FELTEKSPERIMENTER

5.1 Basisegenskaper for vertikal bølgeutbredelse i Løkken og Sulitjelma

Feltekspesimenter for bestemmelse av seismiske bølgers vertikale utbredelsesegenskaper er i hovedsak utført i Løkken Grube. I Sulitjelma er det kun utført seismiske hastighetsmålinger i to vertikale diamantborhull i Sydgruvefeltet, basert på sprengladninger avfyrt fra overflaten. Figur 5.1 viser et skjematisk snitt av Løkken Grube med angivelse av de tre nivåer som er benyttet for avfyring av sprengladninger. Registreringen er utført vha geofoner på overflaten ca 100 m nord for Astrup Sjøkt.

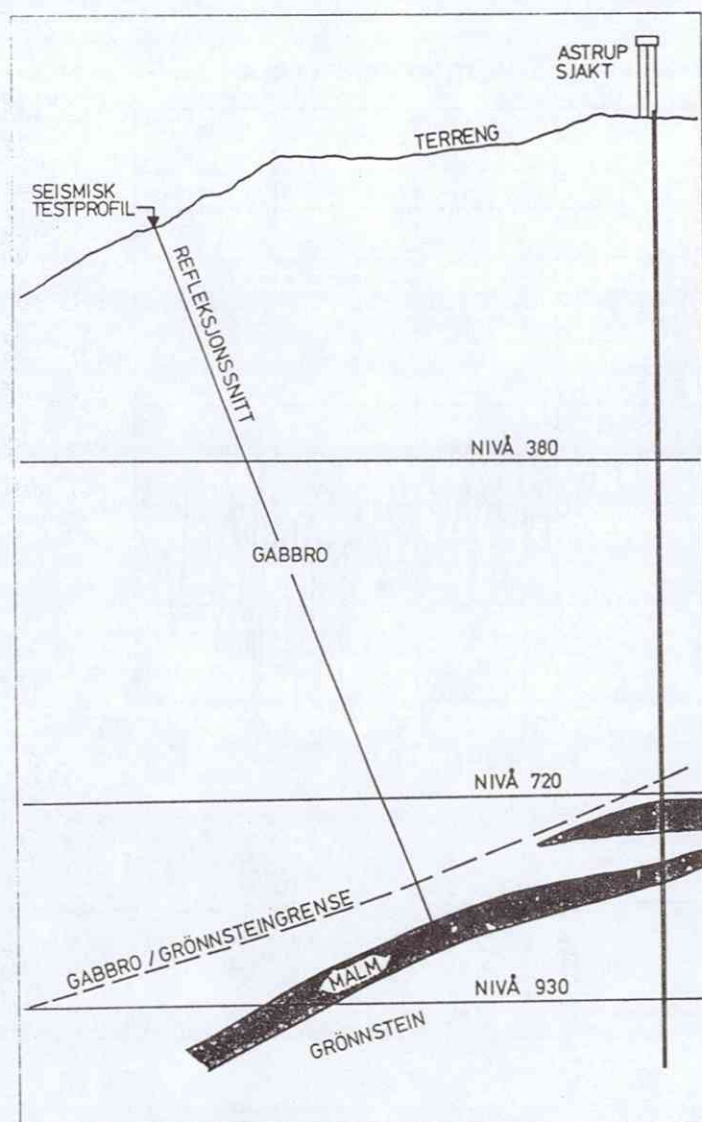


Fig. 5.1 Snitt Løkken Grube.

Seismiske hastigheter i krystalline bergarter er velkjent fra seismiske refraksjonsmålinger. Som angitt i figur 4.2 spenner de fra ca 4500 m/s til ca 7000 m/s. Avgjørende for hvilke bølgelengder som kan benyttes ved malmprospektering i krystalline bergarter er frekvensinnholdet i de utsendte impulser. Felteksperimenter er utført for å bestemme dette. I Løkken Grube ble det avfyrt ladninger fra tre forskjellige nivåer (380, 720 og 930) i gruva mot samme geofonoppstilling på overflaten. Figur 5.2 viser frekvens-amplitudespektra beregnet ut fra registreringer på en og samme geofon.

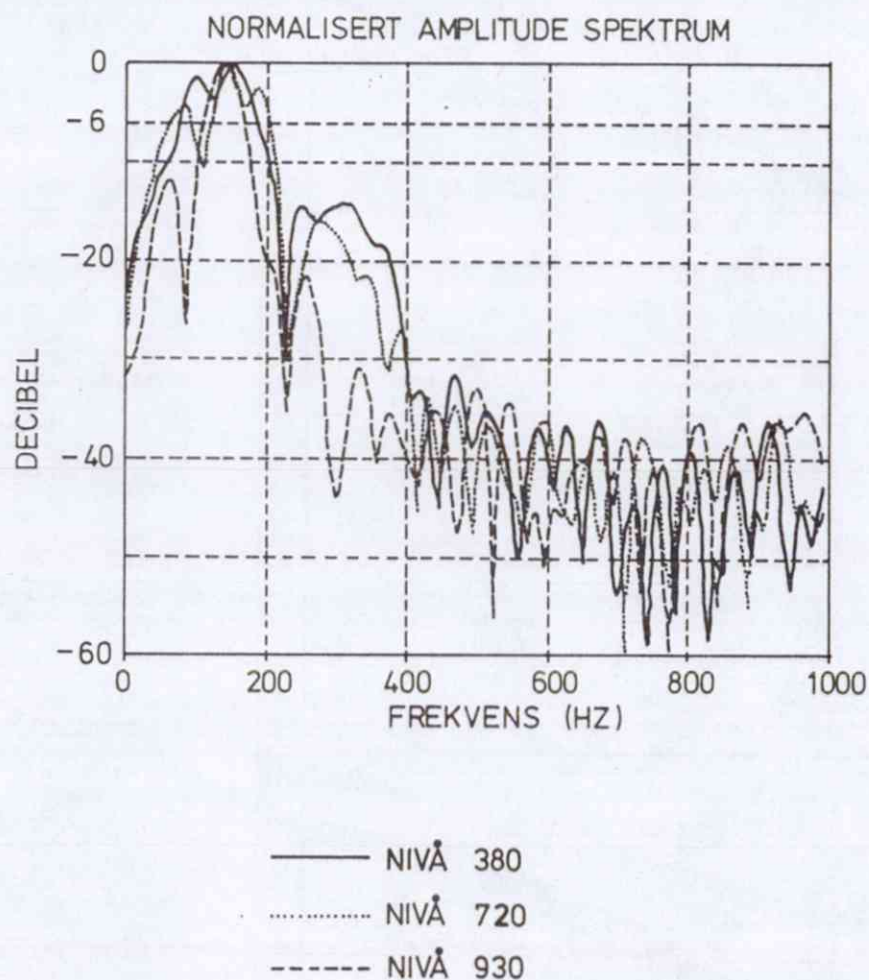


Fig. 5.2 Frekvens-amplitudespektra for pulser fra forskjellige nivåer i Løkken Grube. DHR-1632, juni 1977.

Frekvens-amplitudespektra

Bølgelengden (λ) for seismiske bølger er knyttet til frekvensen (ν) og hastigheten (V) ved formelen

$$V = \lambda \cdot \nu \quad (5.1)$$

Formelen (5.1) gjelder for monofrekvente bølger. Når formelen anvendes for seismiske bølger sammensatt av et bånd av frekvenser, antas det at bølgen tilnærmet kan representeres ved en typisk dominerende frekvens. Dette vil i de fleste tilfeller være en brukbar antagelse.

Registreringen av dataene angitt i figur 5.2 er foretatt med instrument DHR-1632 (Input/Output Inc.) i juni 1977. Samplingshastigheten for dette instrumentet var 4000 Hz. Samplingsfilteret starter ved 500 Hz med helning 60 decibel pr oktav. Frekvens-amplitudespektrene anses under disse forutsetningene representative for de aktuelle berggrunnsbevegelser helt opp til 500 Hz i frekvens. Frekvens-amplitudespektrene viser at den seismiske bølgeenergien avtar markert ved frekvenser over ca 200 Hz. Den forholdsvis styrke i utsvingene (amplituden) ved korte bølgelengder (høye frekvenser) avtar også med økende avstand mellom skudd og geofon, som teoretisk vist ved ligningene (4.7).

Pulsformer

Ideelle seismiske pulser er impulser, dvs amplituden går fra null mot positiv verdi og tilbake til null. Reelle pulser ønskes så nær impulsformen som mulig. Dette ønsket er ikke realistisk fordi seismiske pulser forandrer form med økende avstand mellom energikilde og mottaker. Figur 5.3 viser tre pulser registrert på en og samme geofon, med samme ladningsstørrelse, men skutt på tre forskjellige nivåer i gruva. Pulsformen fra nivå 380 er en typisk 'Ricker Wavelet' med lav negativ - høy positiv - lav negativ amplitude. Registreringen fra nivå 720 viser i hovedsak det samme forløp, men skarpheten i pulsen er betydelig svekket. Registreringen fra nivå 930 antar en form som kan karakteriseres som en monofrekvent bølgetog med svært like positive og negative amplitudemaksima.

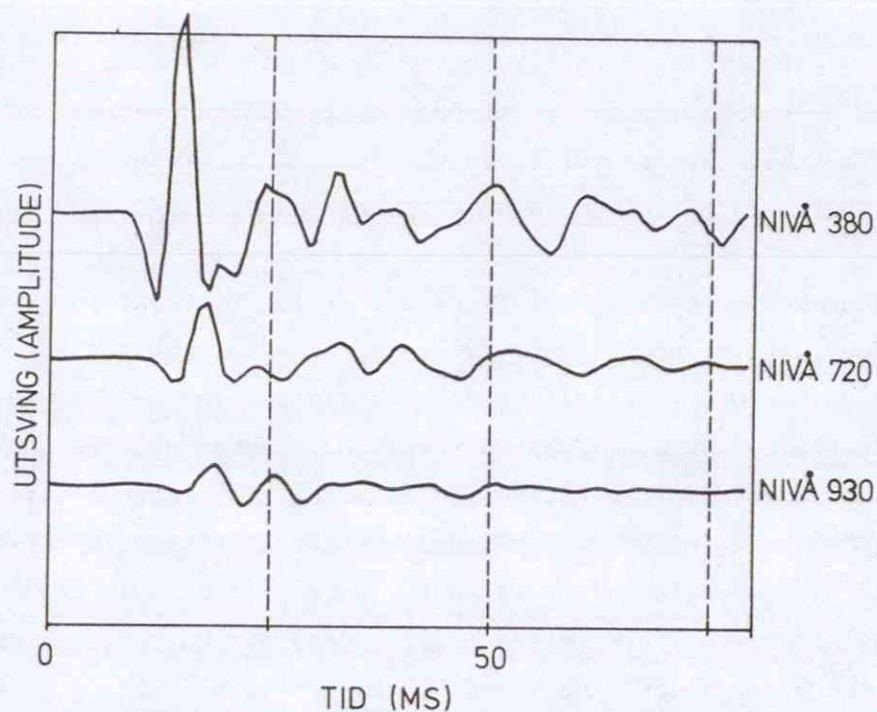


Fig. 5.3 Pulsformer for pulser fra forskjellige nivåer i Løkken Grube.
DHR-1632, juni 1977

Endringen i pulsformen kan forklares ved at båndbredden i det effektive amplitudespekteret stadig blir smalere fordi de høye frekvenser dempes raskere enn de lave. Registreringen fra nivå 930 er typisk for de bølgeformer som blir gjenstand for behandling og studium ved malmprospektering med refleksjonsseismikk med impulsgivende energikilde.

Dempningsfaktor

Dempningsfaktoren $\alpha = \pi/Q\lambda$ kan beregnes ut fra eksisterende observasjoner gjort i Løkken Grube. Fra formelen (4.7) kan en utlede uttrykket

$$\alpha = - \frac{\ln[zA(z)] - \ln[z_1A(z_1)]}{z - z_1} \quad (5.2)$$

Fra pulsobservasjoner fra identiske ladninger, jfr figur 5.3, er det gjort følgende målinger av amplituder på de tre forskjellige nivåene, idet amplituden på nivå 380 er satt lik 1,0:

<u>Nivå</u>	<u>Amplitude</u>
380	1,0
720	0,28
930	0,14

Innsetting i formel (5.2) gir

$$\alpha = 0,00186 \quad \text{for } z = 720$$

$$\alpha = 0,00195 \quad \text{for } z = 930$$

En rimelig middelerdi for dempningsfaktoren er da:

$$\alpha = 0,0019$$

For en bølgelengde på 40 m, tilsvarende seismisk hastighet 6000 m/s og frekvens 150 Hz, gir dette en seismisk kvalitetsfaktor som blir

$$Q = 40$$

Verdien for α og Q er beregnet ut fra et statistisk sett utilstrekkelig datamateriale, men kan betraktes som veiledende verdier for grønnsten/gabbrostrukturene i Løkken.

Utbredelseshastighet vertikalt

Seismiske P-bølger utbrer seg med hastigheter på fra ca 4500 m/s - 7000 m/s i krystalline bergarter, jfr figur 4.2. Som nevnt i Kapittel 4 har bergarter med utpreget planstruktur en anisotrop hastighetsfordeling. Hastigheten er høyest parallelt lagdelingen. Normalt på lagdelingen kan hastigheten være 10-15% lavere.

Hastighetsinformasjon for bergartene i Sulitjelma og Løkken er innhentet fra forskjellige typer målinger. Ved de innledende målinger i Sulitjelma ble det utført ordinære refraksjonsmålinger i gruvegangene. Samme type måling er utført i Løkken. Disse målingene gir horisontale eller nær horisontale hastigheter, dvs parallelt lagdelingen.

I 1976 ble det utført en vertikal hastighetslogg med analogt utstyr i et borehull DBH 178 i Sydgruvefeltet i Sulitjelma. I 1977 ble det igjen logget hastigheter i DBH 185 i Sydgruvefeltet i Sulitjelma. Ved felt-eksperimentene i Løkken i 1977, ble vertikale gjennomsnittshastigheter målt direkte ved pulser registrert på overflaten avfyrt på nivåene 380, 720 og 930. I 1981 ble det målt hastighetslogg til 1000 m dyp i Borehull 1 i Løkkenfeltet. Tilsvarende målinger ble utført i Borehull 2 i 1982. Figur 5.4 viser en sammenstilling av observerte hastigheter vertikalt eller nær vertikalt i Sulitjelma og Løkken. Denne hastighetsinformasjonen danner grunnlag for dydberegninger ved refleksjons-seismiske målinger i Løkken og Sulitjelma. Typisk er hastighetsforskjellen mellom skifrene i Sulitjelma og gabbro/grønnsteinene i Løkken.

5.2 Egenskaper ved bølgefeltet fra en sprengladning i overflaten

Frekvensinnhold

Figur 5.5 viser et normalisert amplitude-spektrum for overflatebølger fra en ladning i overflaten, sammenlignet med normalisert amplitude-spektrum fra en ladning avfyrt på nivå 380 i Løkken Grube og registrert på overflaten. Fremstillingen i figur 5.5 illustrerer den kvalitative forskjell i bølgepulsene. Overflatebølgene har en dominerende frekvens som ligger markert lavere enn den dominerende frekvens for (reflekterte) P-bølger.

Ved omtrentlig like signalnivåer for overflate- og P-bølger er forholdene derfor tilrettelagt for en bortfiltrering ('high pass' eller 'band pass') av overflatebølgene med relativt sterkere P-bølger som resultat. Båndpassfiltrering er derfor et viktig element i prosessering av seismiske data fra krystalline bergarter.

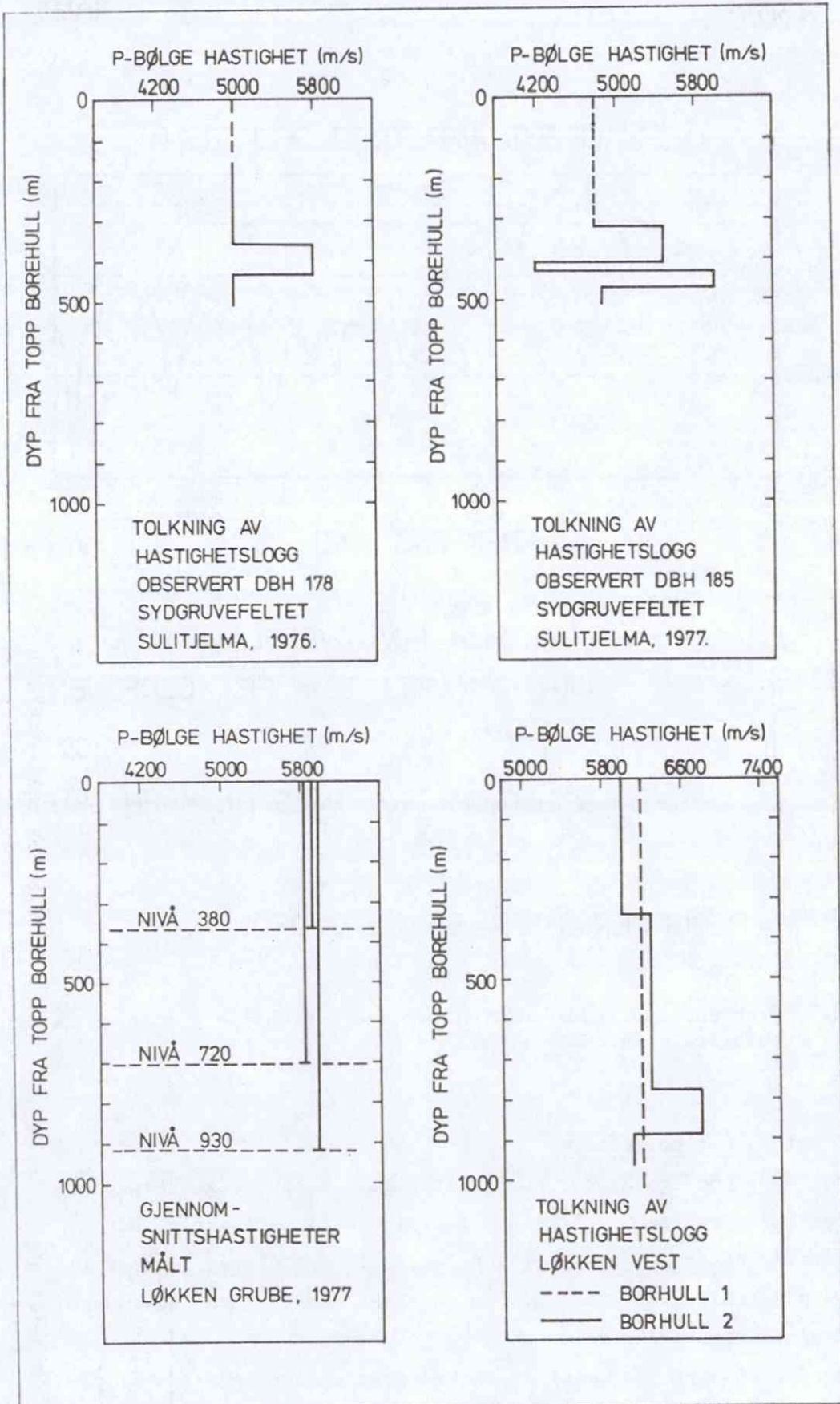
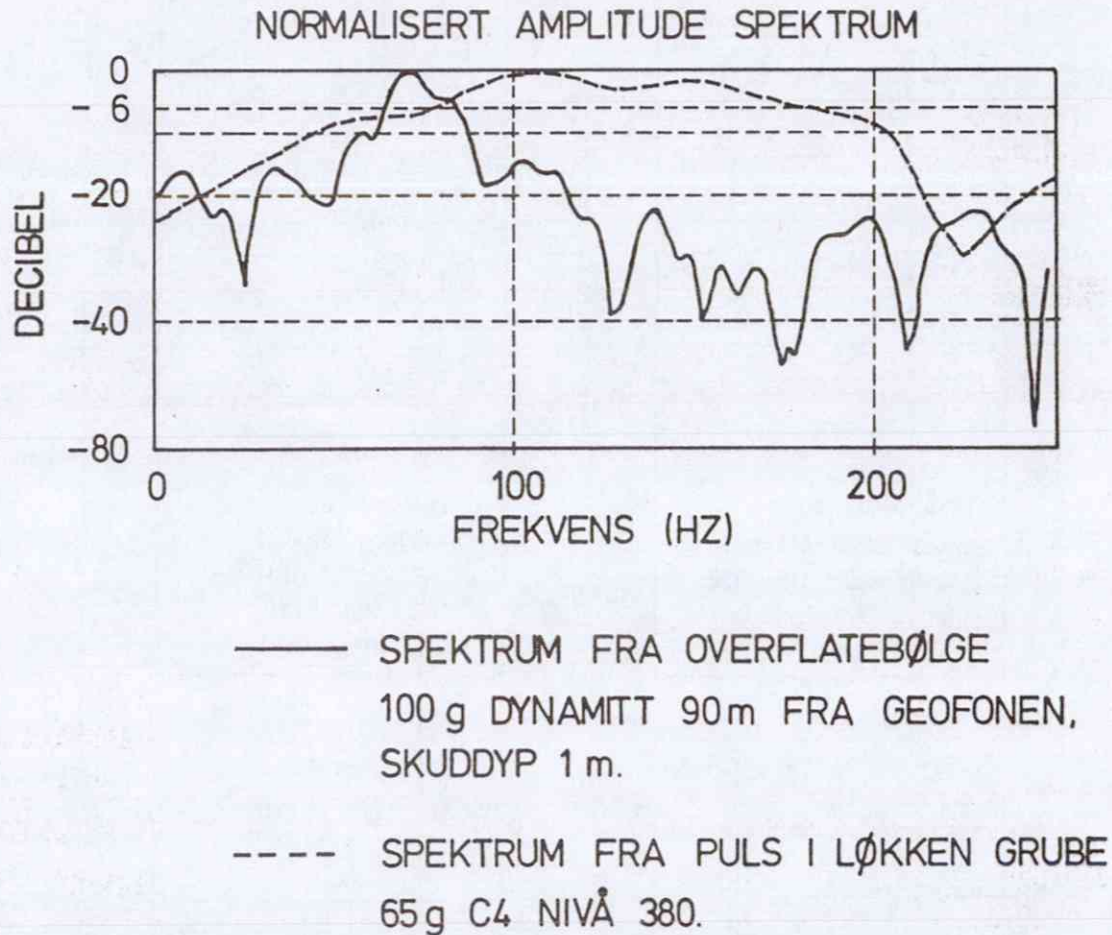


Fig. 5.4 Seismiske hastigheter målt vertikalt i Sulitjelma og Løkken.



REGISTRERING PÅ 50 HZ GEOFONER.

Fig. 5.5 Frekvens-amplitudespektrum for overflatebølge sammenlignet med puls fra nivå 380 i Løkken.

Styrkevariasjon i bølgefeltet

Av direktebølgene inneholder overflatebølgene mest energi. Figur 5.6 viser en registrering fra Løkkenfeltet plottet i sann skala. Når registreringene er som vist i figur 5.6, blir det viktig å sørge for at:

- a. Datainnsamlingen skjer med instrumenter som har den nødvendige dynamikk for gjengivelse av signalnivåer.
- b. Dataprosesseringen omfatter en velegnet skalering av data.

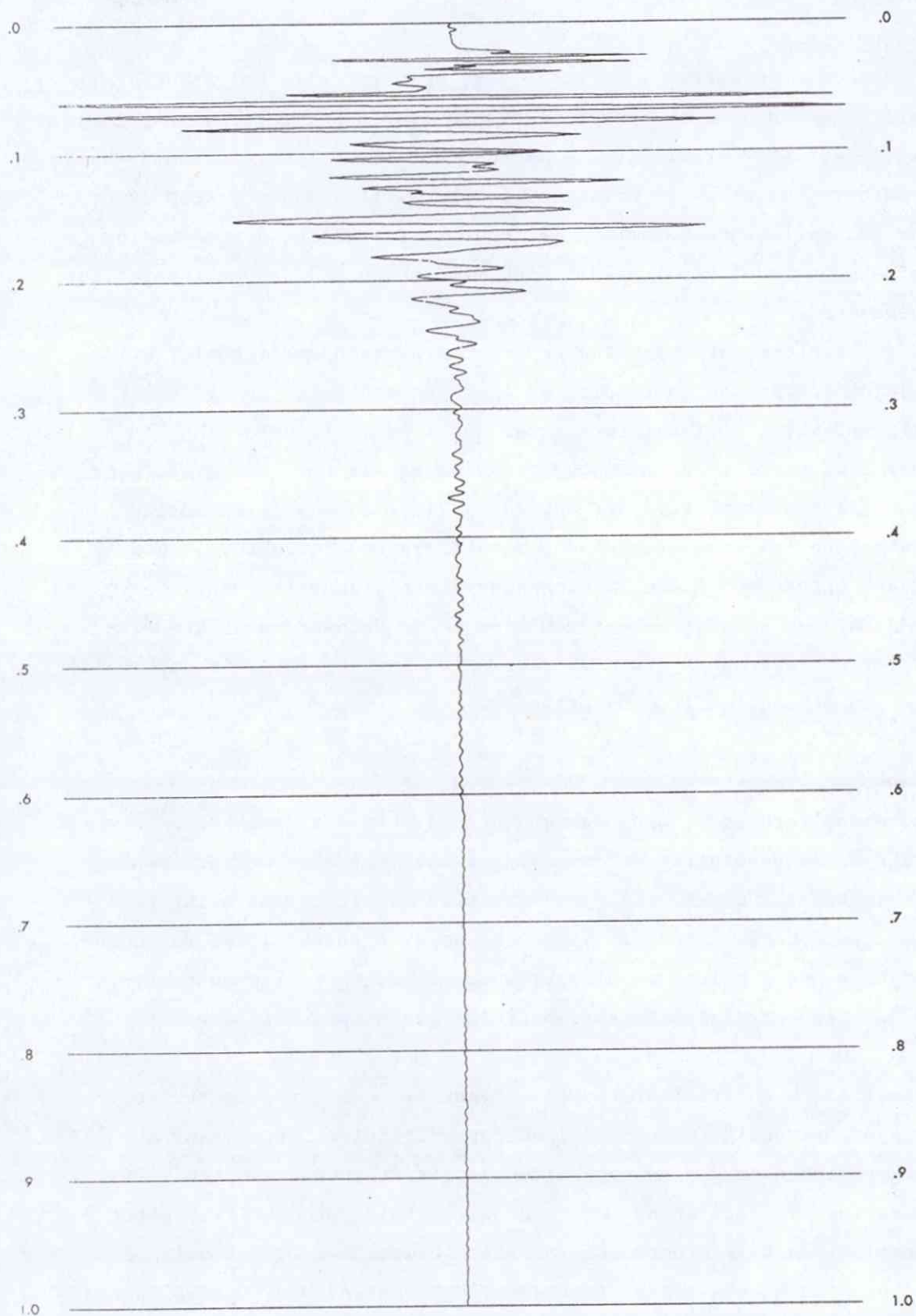


Fig. 5.6 Registrering fra Løkkenfeltet. Løkken Grube, 1978.

Kildegenerert støy

Støy, slik den defineres i Kapittel 4.2, omfatter alle bølgefenomener unntatt bølger dannet av energikilden som brer seg i vertikal retning. Kildegenerert støy er direkte P-, S- og overflatebølger, luftpuls, samt diffrakterte bølger av de nevnte bølgetyper. Kildegenerert støy er repetierbar ved refleksjonsseismiske målinger i krystalline bergarter for de refleksjonstider (fra ca 100 - 500 millisekunder) det er interessant å arbeide med.

- a) Dette medfører at summering av repeterte skudd med identisk kildegeofon konfigurasjon resulterer i en ren oppskalering av registreringen. Støy og signal forsterkes opp i samme forhold.
- b) Når bakgrunnsstøyen, dvs støy fra vind og vær etc., er kraftigere enn kildegenerert støy, er det meningsfylt å benytte summering (stacking) av repeterte skudd, men tilsvarende effekt vil også kunne oppnås ved å øke ladningsstørrelsen i energikilden. Dette gjelder for så vidt bare i den grad selve detonasjonen ikke medfører utblåsning på grunn av større ladning, og dermed en uforholdsmessig økning i kildegenerert støy.

Koherens

Med koherens forstås i denne sammenhengen likhet i signalform og styrke. Koherens er nødvendig for at summering (stacking) skal medføre økning i signal-støy forholdet. Figur 5.7 viser en enkelt registrering på 24-kanaler (geofoner). Figur 5.8 viser en sum av 4 forskjellige registreringer hvor energikilden er plassert med 10 meters fysisk avstand, forøvrig identiske registreringsparametre og geofonoppstillinger.

I forhold til enkeltregistreringen i figur 5.7 har den summerte registreringen betydelig forbedret signal/støy-forhold. Dette viser at signalkoherensen er god nok og kildegenerert støy ukorrelert nok til at summering av flere skudd med forskjell i beliggenhet virker etter sin hensikt. En tilsvarende sum som vist i figur 5.8 er det mulig å danne ved å summere 4 traser (registreringskanaler) med 10 m mellomrom (annen hver) fra registreringen i figur 5.7 (summering over geofoner i motsetning til summering over skudd).

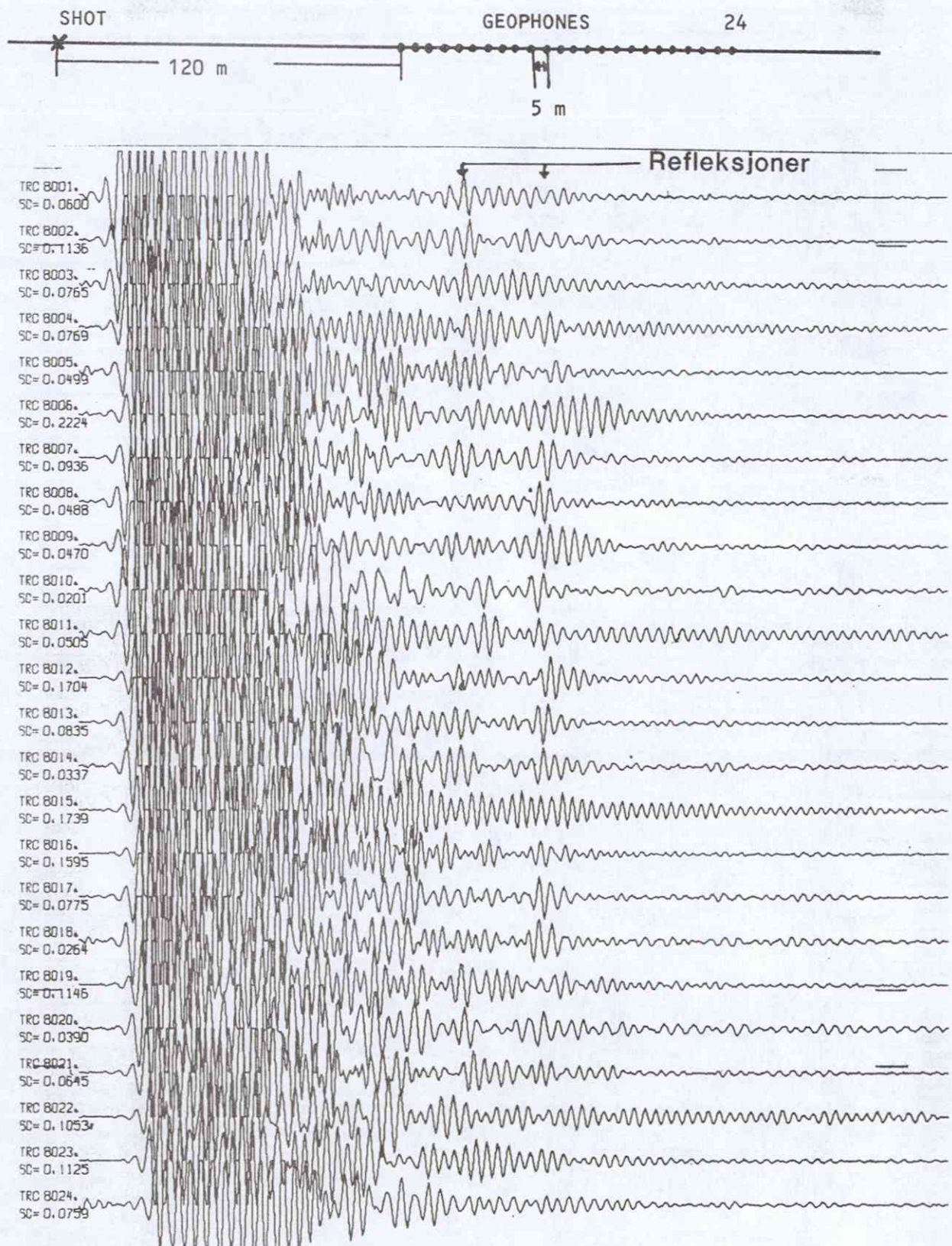


Fig. 5.7 Enkeltregistrering (filtrert og skalert) fra Løkkenfeltet.
Løkken Grube, 1978.

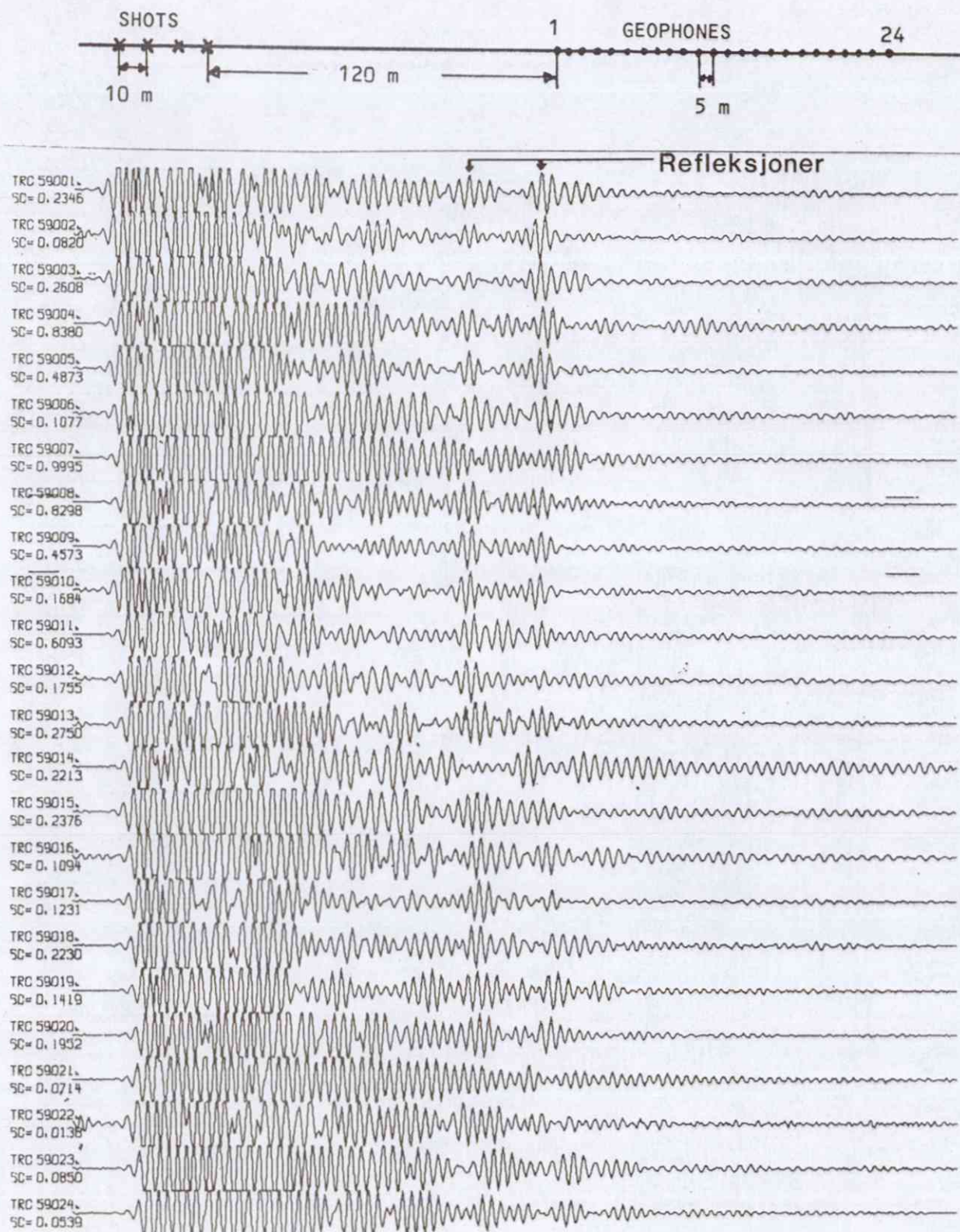


Fig. 5.8 Sum av 4 registreringer Løkken Grube, 1978.

Det viser seg at summering over geofoner ikke gir et signal/støyforhold tilsvarende figur 5.8. Årsaken til dette er at koherensen på mottakersiden er lavere enn på energikildesiden.

Konsekvenser for konvensjonell CDP-teknikk

CDP-summing (CDP-stacking) er summering av flere registreringer med forskjellige energikilde/mottaker kombinasjon, men med samme midtpunkt. Dersom koherensen på mottakersiden er lavere enn på energikildesiden, medfører dette at sum fra flere energikildeposisjoner registrert på samme mottaker kan gi et like godt signal som en konvensjonell CDP-sum.

Et 'skuddarray', dvs en sum av registreringer fra flere energikildeposisjoner, vil dermed geofysisk sett kunne konkurrere med innsamling av data for CDP-sum. Videre vil det være mulig å oppnå forbedringer av CDP-sum for denne typen data ved å iverksette tiltak/forbedringer i måleteknikken som sikrer bedre koherens på mottakersiden.

5.3 Energikilde

Impulsive energikilder

Seismiske målinger kan utføres med vibrasjons-energikilder ('vibroseis') eller med impulsive energikilder. Typisk for vibrasjons-energikildene er at bølgeutsendingen foregår kontinuerlig over et 'langt' tidsrom, størrelsesorden 10 sekunder, og at jordbunnsbevegelsen ved utsendingen er moderat. Ved impulsive energikilder dannes det en kraftig jordbunnsbevegelse (impuls) over et kort tidsrom, størrelsesorden 0,01-0,03 sekunder i varighet. Som vist i figur 5.9 er imidlertid den totale utsendte energi ved vibrasjons-energikilder sammenlignbar med energien utsendt ved bruk av impulsive energikilder.

De mest vanlige impulsive energikilder er sprengstoffene. Andre impulsive energikilder er fallende vekter og støt vha masser aktivisert av sprengladninger eller kruttpatroner. Under prosjektet 'Malmprospektering med refleksjonsseismikk' er det kun benyttet impulsiv energikilde representert ved sprengstoffene.

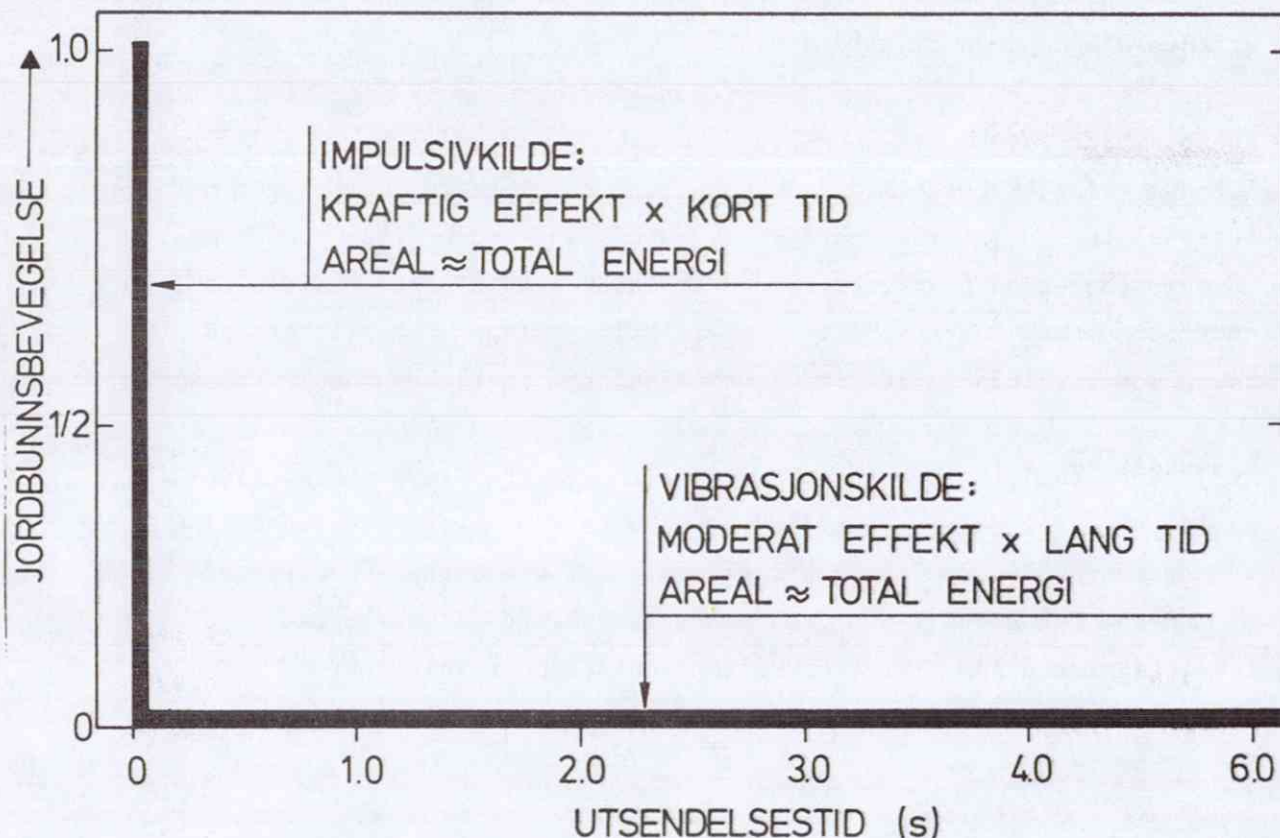


Fig. 5.9 Utsending av seismiske bølger ved vibrasjonskilder (Vibroseis) og impulsive energikilder.

Sammenligning av ulike sprengstoffer

Eksperimenter for sammenligning av ulike sprengstofftyper er utført i Løkken Grube. Sammenligninger er gjort mellom sprengemnene:

- a) dynamitt
- b) ekstra dynamitt
- c) Comp. C4.

Figur 5.10 viser en sammenstilling av pulser og amplitudespektra for registreringer fra disse tre sprengemnene.

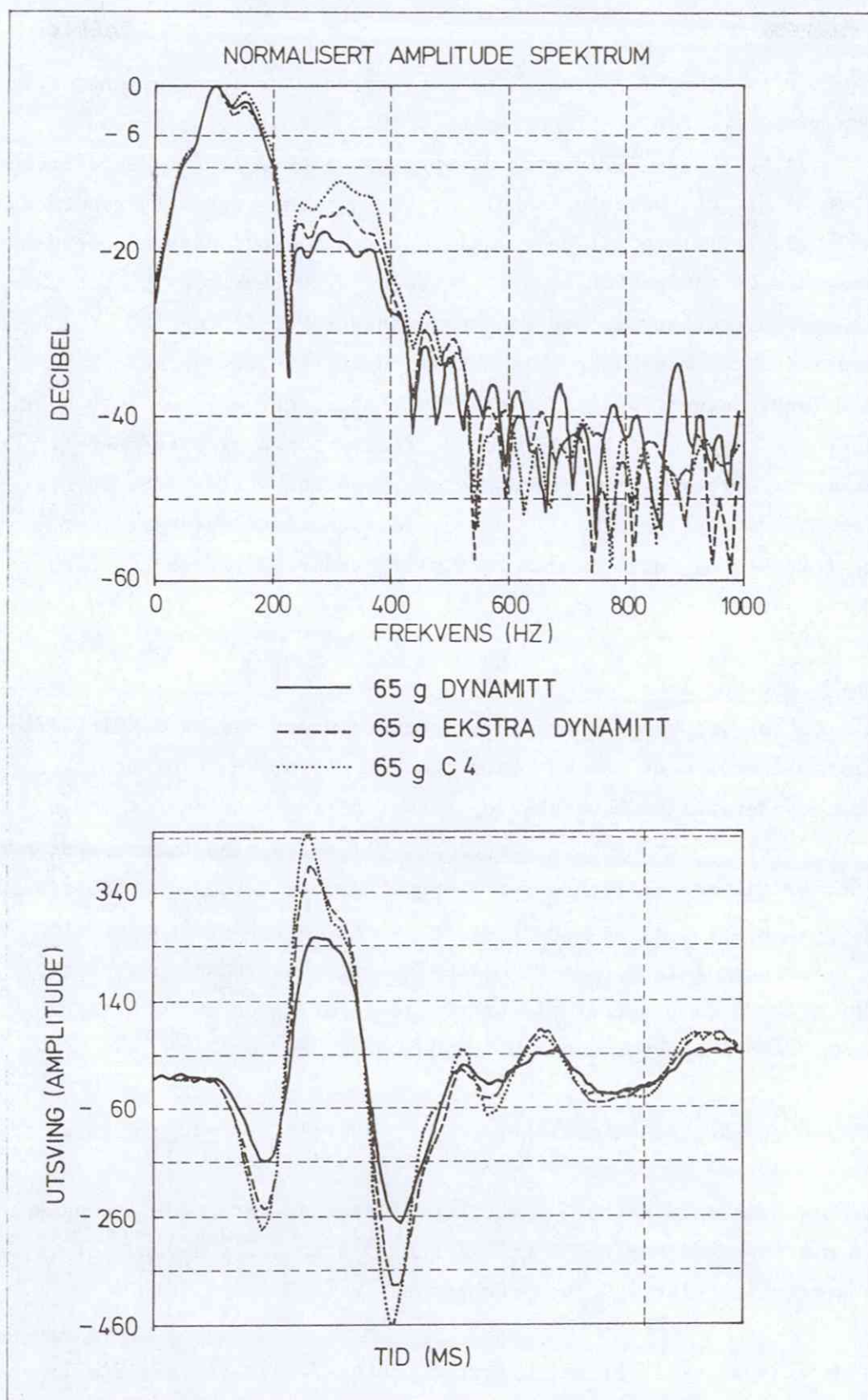


Fig. 5.10 Amplitudespektra og pulser for ulike sprengemner. Løkken Grube, 1977.

Forskjellen i pulshøyde gjenspeiler styrkegraden av sprengemnene; 1.0 for dynamitt, 0.8 for ekstra dynamitt og 0.6 for C4. (Styrkegrad definisjon: Styrke av TNT/styrke av sprengstoffet.) Amplitudespektrene viser at C4 gir det høyeste innhold av høyfrekvent energi (jfr området 200-400 Hz). I tillegg til de relativt gunstige impulsdannende egenskapene, har C4 sprengstoffet også fordeler sikkerhetsmessig og bruksmessig. Sprengstoffet har høy detonasjonshastighet (7000-8000 m/s) og er klassifisert som såkalt sikkerhetssprengstoff. Det inneholder ikke nitrøse forbindelser, og gir således ikke hodepine ved bruk og behandling. Sprengstoffet leveres i bulkform og er lett å forme og porsjonere i ønsket vekt. Sprengstoffet produseres av Dyno Industrier A/S. Sprengstoffet C4 er benyttet ved alle refleksjonsseismiske undersøkelser utført i Løkken og Sulitjelma i 1978 eller senere år, frem til dato for denne rapporten.

Detonasjonsbetingelser

Sprengstoffers detonasjonshastighet avhenger svært mye av pakningsgraden (komprimeringen). Godt pakkede ladninger er derfor en forutsetning for å oppnå høy detonasjonshastighet og dermed høyfrekvent energi i den utsendte impuls. Maskinpakkede ladninger vil normalt holde en pakningsgrad som er tilfredsstillende for å oppnå høyeste detonasjonshastighet. Ved manuell pakking av ladninger er det viktig å pakke sprengstoffet godt. Erfaringsmessig oppnås de beste ladninger ved pakking av sprengstoffet i 20-25 mm diameter plastrør. Ladninger på ca 100 g C4 sprengstoff vil da bli stavformede med lengder på ca 0.2 m.

Ved refleksjonsseismiske målinger er det generelt nødvendig å sørge for at:

- a) De utsendte impulser er repeterbare i styrke, form og frekvensinnhold.
- b) Så mye som mulig av den kjemiske energien bundet i sprengstoffet omsettes til elastiske kompresjonsbølger (P-bølger).

Under dette prosjektet er det utført en rekke forsøk ved forskjellige detonasjonsbetingelser. Konklusjonen er at detonasjon av sprengstoffet

i vannfylte borehull i fjell med dybder (lengder) på 1.5-2.5 m oppfyller punktene a) og b) på en optimal måte, både praktisk, geofysisk og økonomisk. Slike hull sørger for at detonasjonen skjer under relativt homogene forhold, upåvirket av fjelloverflatens ofte sterke oppsprekning og forvitring. Vannfylling øker ytterligere homogeniteten i detonasjonsbetingelse, og medvirker til økt omsetning av kjemisk bundet energi til elastiske P-bølger.

Rettede ladninger

Boring av hull for sprengladninger i fjell er kostbart, og hulldybder på over 2 m ofte praktisk vanskelig å få til ved bruk av lett håndholdt utstyr.

Rettede ladninger ble tidlig i prosjektet foreslått utprøvet med tanke på å unngå noe av arbeidet med boring av hull for sprengladninger. Rettete ladninger har en konusformet utsparring i sprengemnet som kanaliserer sprengvirkningen i en ønsket retning. Prinsippet og anvendelsen er kjent fra bl.a. militære panserbrytende granater. Begrensede forsøk med rettete ladninger ble utført både i Sulitjelma og i Løkkenfeltet. Konklusjonene fra disse forsøkene er at rettete ladninger avsatt i grunne borefull, evt. direkte i overflaten, ikke gir noen økning i signal/støyforholdet. Snarere er det slik at rettete ladninger avsatt i grunne borehull øker den kildegenererte støyen (overflatebølger og luftpulser) og at denne støyøkningen er større enn økningen i vertikalt-gående P-bølger. Konklusjonen er imidlertid gjort på et sparsomt grunnlag, og på en kvalitativ vurdering, og det kan tenkes at ytterligere innsats på dette området vil kunne resultere i positive erfaringer.

Nulltids-definisjon (Time-break)

Ved seismiske undersøkelser måles bølgeutbredelse i tid relativt til tid null. Tid null er ideelt sett tiden for utsending av bølgeenergien. Ved bruk av sprengstoffer tilsvarende dette detonasjonsøyeblikket. I praksis kan det være vanskelig å bestemme dette tidspunktet nøyaktig. Kravet til nulltids-begrepet er at:

- a) Nulltid er stabil; dvs at den alltid er konstant relativt til detonasjonen.
- b) Nulltid har en spredning som er mindre enn samplingsintervallet for registreringsinstrumentet som benyttes.

Figur 5.11 viser spredning av nulltid for seismiske tennere som funksjon av tennstrøm. Det fremgår av figuren at tennstrømstyrken bør være høyere enn ca 20 ampere ved 1 ms samplingsintervall, og helst så høy som 30 ampere eller mer. Alminnelige tennere for sivilt bruk har nulltids-spredning på inntil 4-5 millisekunder, og er derfor ikke egnet for 'high resolution' refleksjonsseismikk.

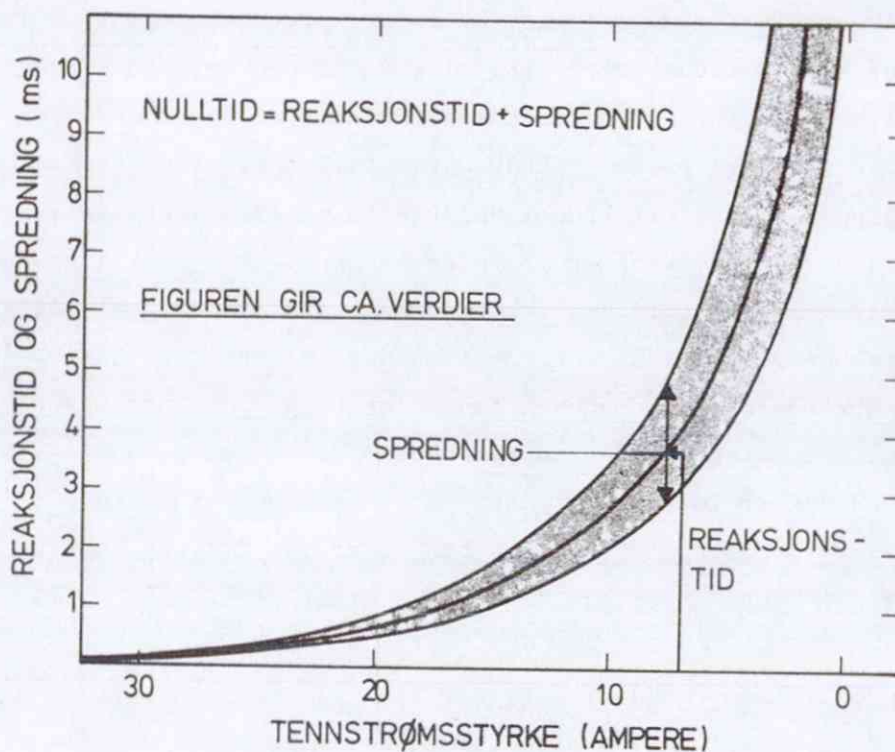


Fig. 5.11 Detonasjonstidspunkt (nulltid) for seismiske tennere.

5.4 Geofoner og montering av geofoner

Geofonrespons

De geofoner som benyttes ved refleksjonsseismiske målinger er elektrodynamiske svingere som måler overflatens vertikale bevegelse. Utslaget som registreres er hastighetsproporsjonalt, dvs at det er svingehastigheten på partiklene i overflaten som måles.

I prosjektets begynnelse i 1973 ble det benyttet geofoner med lav egenfrekvens. Andre geofoner, med høy egenfrekvens, kom på markedet mot slutten av 1970-årene. Figur 5.12 viser responsfunksjoner for en del geofoner.

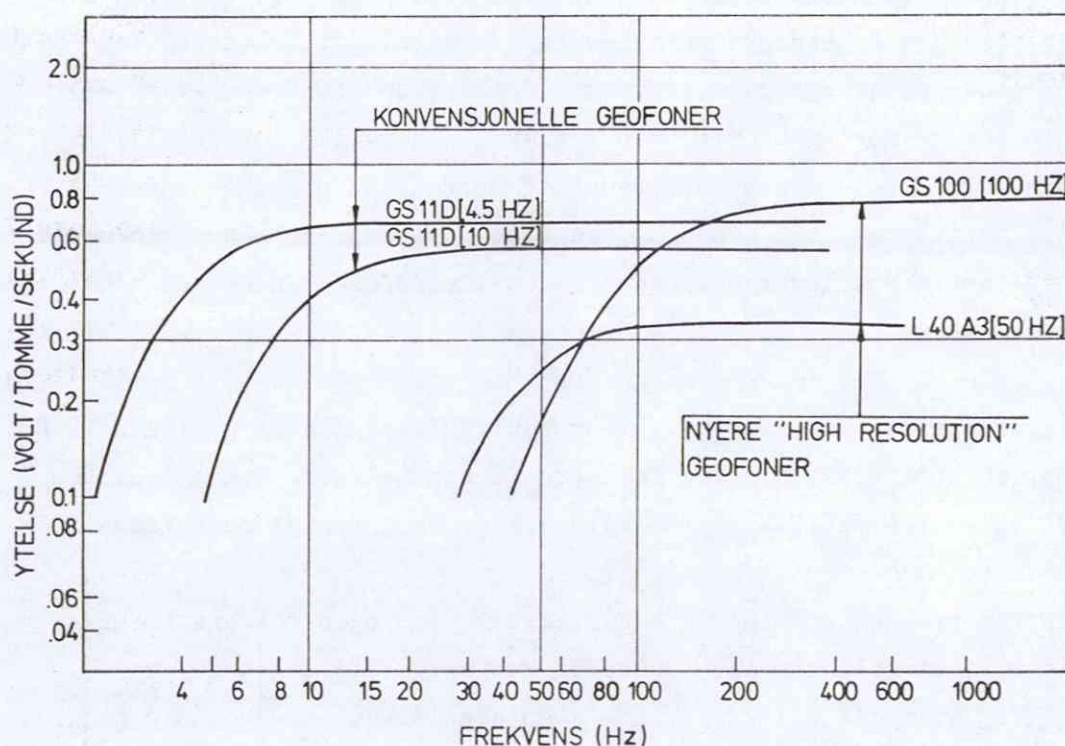


Fig. 5.12 Responsfunksjoner for noen geofontyper benyttet ved refleksjonsmålinger.

I dette prosjektet har det hele tiden vært ønskelig å benytte geofoner med høy egenfrekvens, fordi følsomheten av geofoner avtar sterkt for frekvenser lavere enn egenfrekvensen, og geofonen i seg selv virker som et low-cut filter. Samtidig har det vært nødvendig å vise forsiktighet med henhold til nye produkter på dette området, fordi produsentene har tilkjennegitt visse problemer med dempningen av høyfrekvente geofoner.

Sammenligning av geofontyper

Sammenlignende registreringer ble tatt opp under felteksperimenter i Løkken Grube i 1977. Figur 5.13 viser pulser og amplitudespektra for noen aktuelle geofontyper. Det fremgår av registreringene at pulsformene er ganske forskjellige. Forskjellen i styrke av pulsene reflekterer forskjellen i ytelse for geofonene (jfr figur 5.12).

Registreringen fra geofonen med egenfrekvens 100 Hz viser en pulsform som er typisk for underdempning av geofoner (ringing). Til tross for at denne geofonen er optimalt tilpasset det frekvensbånd som er aktuelt å benytte for malmprospektering med refleksjonsseismikk i krystalline bergarter, ble den ikke anbefalt benyttet nettopp på grunn av underdempning. Dette problemet synes å være løst pr i dag, og denne geofonen eller geofoner med tilsvarende egenfrekvens, må derfor anses som geofysisk sett gunstigste.

Det fremgår også av de viste pulser og amplitudespektra at geofonen L25E med egenfrekvens 50 Hz har gode registreringsegenskaper. Denne geofonen er benyttet av A/S GEOTEAM for malmprospektering i Løkken og Sulitjelma.

NORSAR har i prosjektsammenheng benyttet L25E med egenfrekvens 60 Hz. Vi anser at forskjellen mellom disse to geofonspesifikasjonene er marginal, og at forskjellen vil være uten signifikans med henhold til resultater omtalt i det etterfølgende.

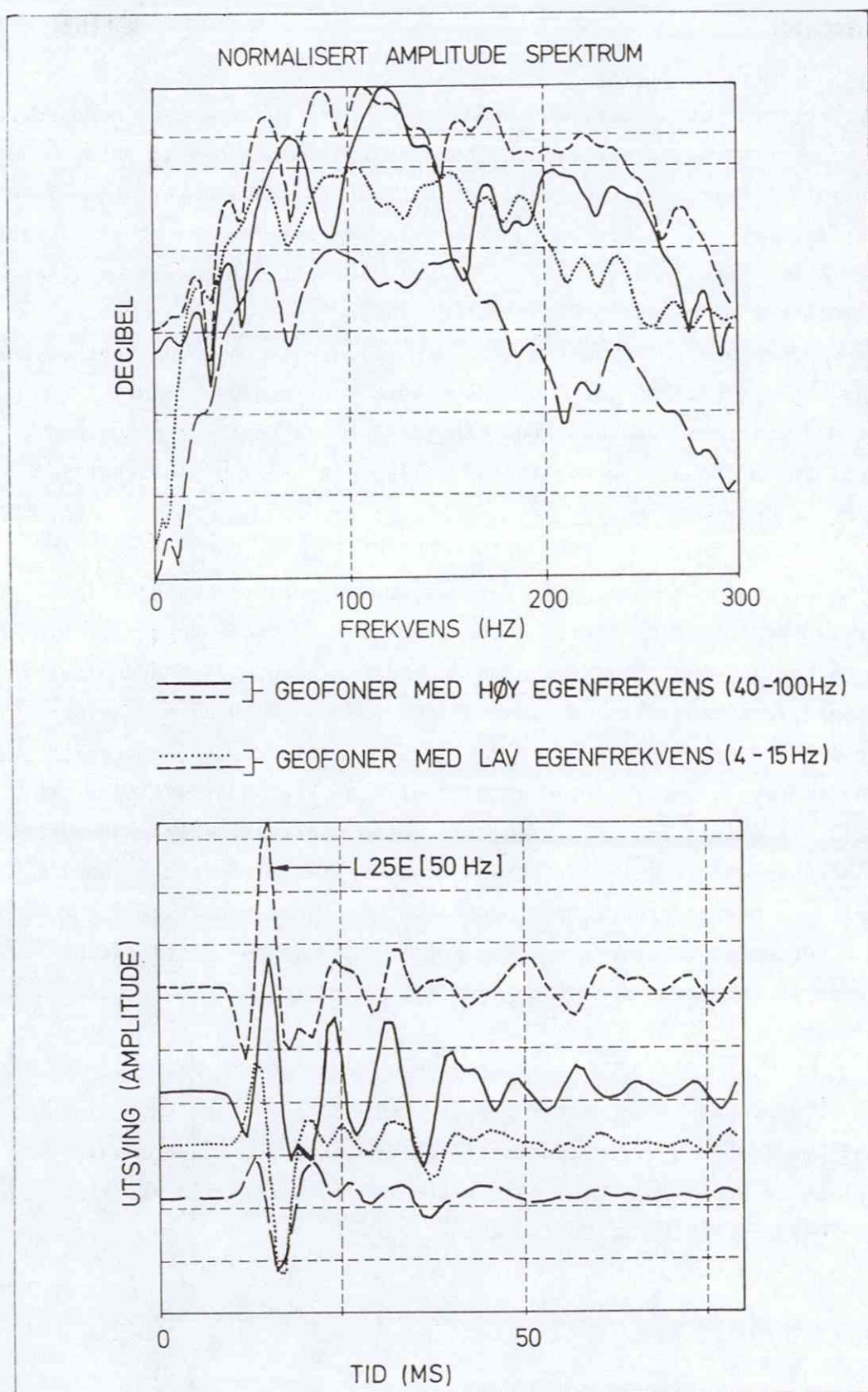


Fig. 5.13 Amplitudespektra og pulsformer for noen geofontyper benyttet ved refleksjonsmålinger. Registreringer fra Løkken Grube, 1977.

Geofoner på fjell og i løsmasser

Under prosesseringen av refleksjonsseismiske data forutsettes 'homogenitet' av det observerte bølgefeltet. Med 'homogenitet' menes her at pulsformen er tilnærmet lik fra observasjonspunkt til observasjonspunkt. Figur 5.14 viser at registrering gjort på fjell kontra registrering gjort på løsmasser kan være svært forskjellige. Ved overgang fra fjell til løsmasser skjer det en pulsendring og en forskyvning mot lavere frekvenser i amplitudespektret. For malmprospektering, der det er ønskelig å oppnå høyfrekvente data, er kobling direkte mot fjell den beste koblingsløsningen. I områder med sparsom løsmasseoverdekning er det å anbefale å grave ned til fjell for å oppnå både kobling av geofon mot fjell og mulighet for boring av skuddhull i fjell.

Montering av geofoner mot fjell er inngående vurdert på forskjellige stadier i prosjektet. De første eksperimentene med geofonkoblinger ble basert på kobling med 'Farex'-ekspansjonsbolter, festet i skuddhullene. Denne monteringsmetodikken var ikke akseptabel på grunn av egensvingningene i 'Farex'-boltene. Senere ble geofonene festet med kort spett slått ned i treplugger i toppen av borehullene. Ved undersøkelsene utført i 1976 i Sulitjelma og Løkken, ble denne koblingsteknikken benyttet. Eksperimentene utført i 1977 i Løkken Grube viste imidlertid at kobling mot fjell med ekspanderende bygningsbolter gir bedre resultat. Figur 5.15 gir anvisning for hvordan denne koblingen utføres. Festebolten kan kjøpes på markedet, mens overgangsstykket mellom bolt og geofon må spesiallages.

Kobling av geofoner på løsmasser gjøres enklest med spett. Eksperimenter utført i Løkken Grube viser imidlertid at montering på liten massiv metallplate nedgravd i løsmassene gir noe bedre registreringer. Figur 5.16 anviser hvordan denne koblingen utføres.

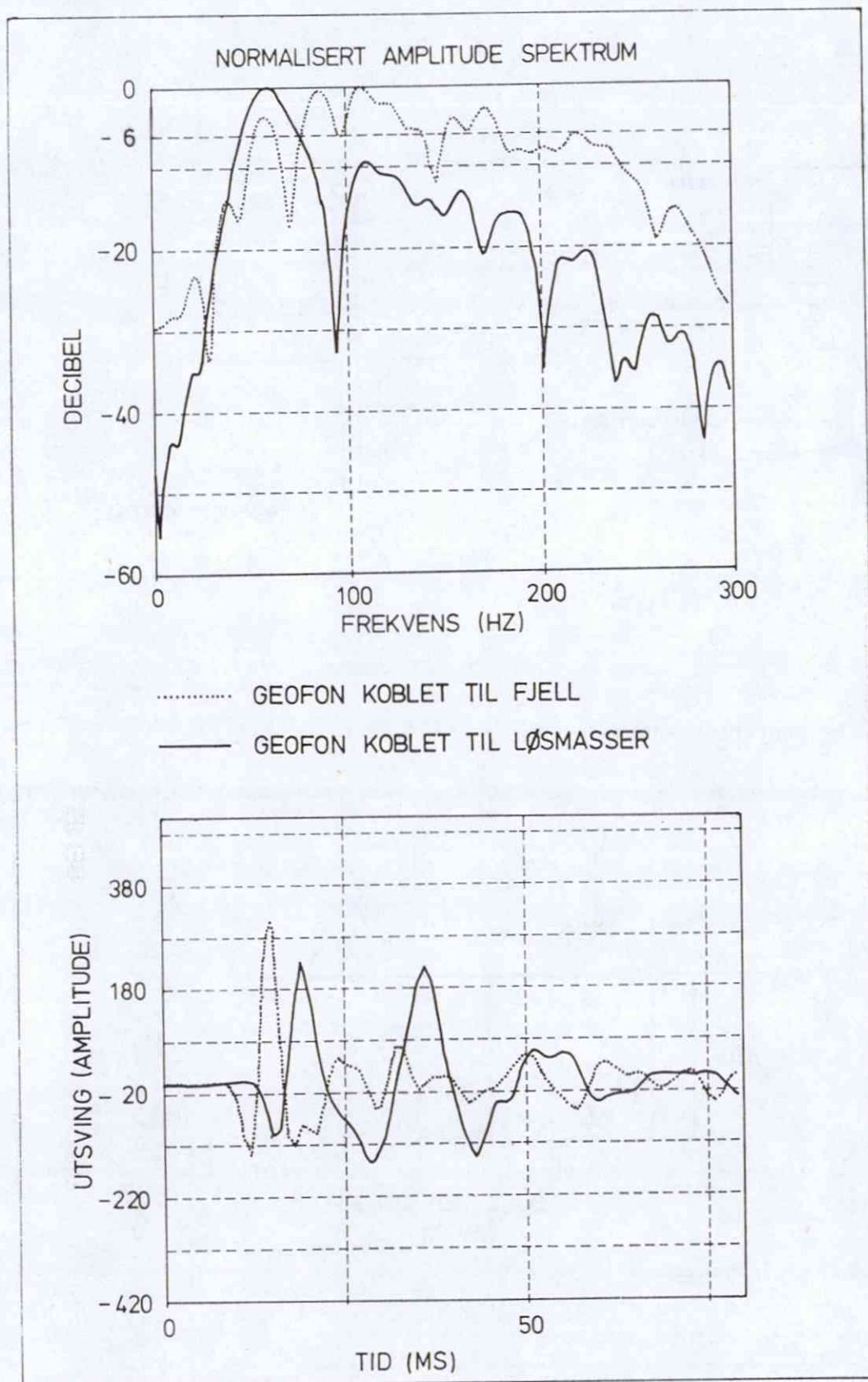


Fig. 5.14 Registrering på fjell sammenlignet med registrering på løsmasse.

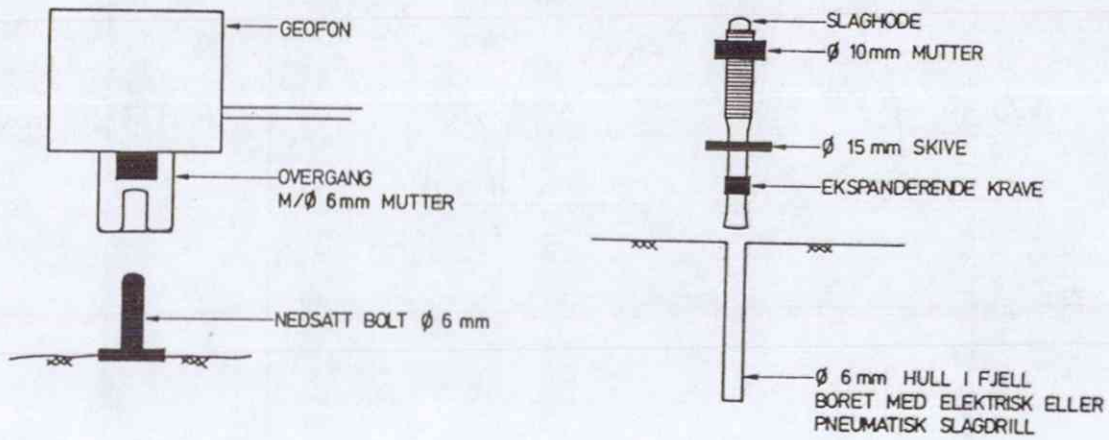


Fig. 5.15 Monteringsanvisning for geofon mot fast fjell.

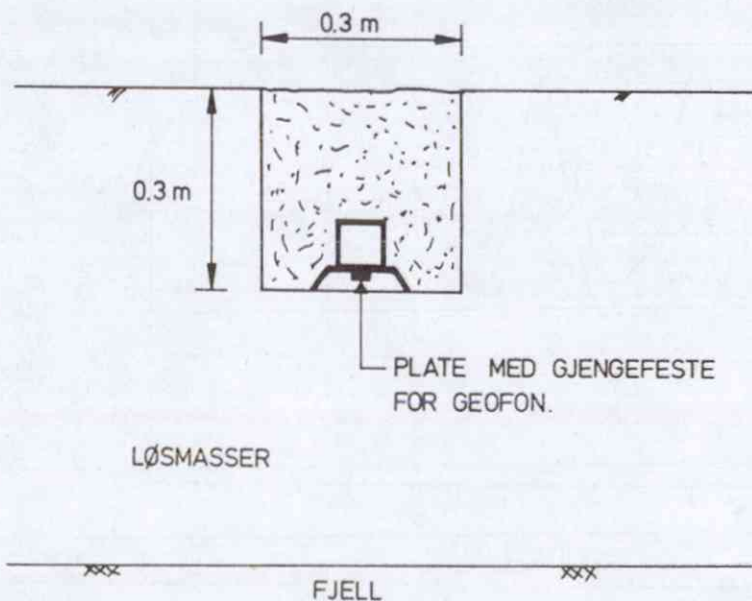


Fig. 5.16 Monteringsanvisning for geofon i løsmasser.

5.5 Grunnleggende krav til registreringsinstrument

Historikk

De første instrumentene til bruk ved refleksjonsseismiske målinger var analoge instrumenter. Fra 1960-årene overtok de digitale instrumentene markedet. Digitale registreringsinstrumenter utvikler seg meget raskt i takt med den teknologiske utvikling og eksisterende muligheter når det gjelder EDB-behandling av seismiske data. Analoge instrumenter blir fremdeles brukt som et element i et seismisk registreringssystem, men nå kun som et middel til å fremskaffe førstehåndsinformasjon (feltmonitor) og sørge for kvalitetskontroll av digitale data. Figur 5.17 viser skjematisk det registreringssystem som for dette prosjektet er benyttet ved de senere års (1979-1982) malmprospektering med seismikk.

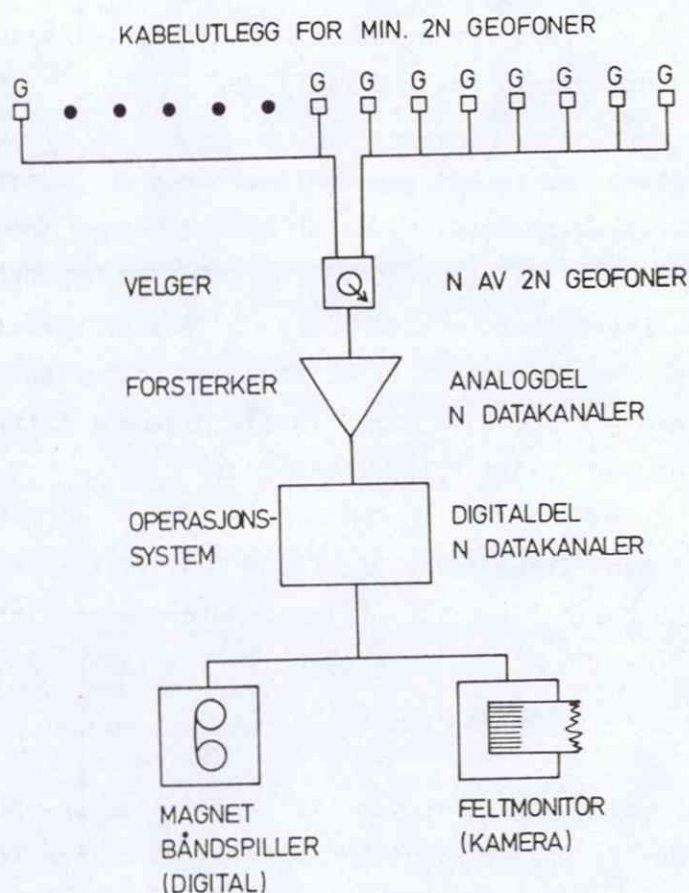


Fig. 5.17 Registreringssystem (skjematisk) benyttet for refleksjonsseismiske målinger i krystalline bergarter. Typisk $N = 24$.

Nødvendig og tilstrekkelig samplingshastighet for digital datainnsamling var et viktig punkt å få avklart ved starten av prosjektet i begynnelsen av 70-årene. Før felteksperimentene i Løkken Grube var fullført i 1977, var ønsket om oppløsning og høyt frekvensinnhold avgjørende for valg og spesifikasjoner av registreringsinstrument. Instrumentet DHR-1632 ble valgt fordi det var markedets første og eneste spesifisert til 2000 Hz samplingsrate. Denne høye samplingsraten har vært nødvendig for å fastlegge den tilstrekkelige samplingsraten for malmprospektering i Sulitjelma og Løkken.

Fra analyse av pulstestene i Løkken Grube i 1977 fremkommer det imidlertid at 1000 Hz samplingsrate er tilstrekkelig for å gjengi det aktuelle frekvensinnhold i krystalline bergarter. Det er videre klart at dynamikken i de seismiske bølgene som dannes ved detonasjon og registrering i krystalline bergarter er stor. Det er nødvendig med et effektivt forsterkersystem for å kunne registrere bølgefeltet.

Binær forsterkning, hvor forsterkningen kan forandres for hvert sample på den seismiske enkeltregistreringen, er en spesifikasjon som i utgangspunktet må anses nødvendig. Ved digital registrering er høyeste mulige high-cut filter samplingsfilteret (anti-aliasing) som motvirker frekvensfolding. Ved 1000 Hz sampling benyttes et high-cut filter på 256 Hz. Dette anses for å være nedre grense for aktuelle high-cut filtere. Ved høyere samplingsrater bør høyere filtere benyttes.

Low-cut filterne bør også ligge høyt, jfr figur 5.4, slik at mest mulig støy er filtrert bort før A-D (analog-digital) omformingen finner sted. Low-cut filtere på over 100 Hz kan være aktuelle med tanke på best mulig signal/støy-forhold i de data som samles inn.

Kvalitetskontroll er et viktig punkt ved all datainnsamling. Denne kontrollen utføres som tidligere nevnt primært vha en feltmonitor. Dette er et analogt skriveinstrument som gir en papirutskrift (film) av data. Feltmonitoren bør ha en tidsoppløsning (tidsskala) som gir mulighet for

kvantitative vurderinger i felten, dvs måling av tidsforskjeller mellom kanaler, amplitudeforskjeller og eventuelle faseforskjeller (polaritetsfeil). Feltmonitorer bør for dette formålet ha en tidsoppløsning som tilsvarende ca 2 millisekunder pr millimeter eller bedre.

Figur 5.18 gir en sammenstilling av aktuelle parametre for instrumentering beregnet for refleksjonsseismikk i krystalline bergarter. De oppgitte parametre må betraktes som 'state of the art' ved rapporteringstidspunktet (1983).

GEOFONER	
EGENFREKVENS	[40-100 HZ]
DEMPNING	[70% KRITISK]
KABLER	
UTTAKSAVSTAND	[20 m ELLER MER]
UTTAK PR. KABEL	[12 (ELLER 24)]
REGISTRERINGSSYSTEM	
DIGITALREGISTRERING	[9 TOMMERS MAGNETBÅND]
ANTALL DATAKANALER	[24 ELLER FLER]
SAMPLINGSINTERVALL	[1-1/2 MILLISEKUND]
FORSTERKER	[BINÆR FORSTERKNING]
FILTER (LOW CUT)	[75 - 115 HZ]
MONITOR	
TØRRPAPIR	
PAPIRHASTIGHET	[OPPLØSNING 1000 - 2000 mm/sek]
ENERGIKILDE	
SPRENGSTOFF:	C 4
LADNINGSSTØRRELSE:	50 - 150 GRAM
TENNER	: SEISMISK

Fig. 5.18 Veiledende spesifikasjoner for registreringssystem for refleksjonsmålinger i krystalline bergarter.

5.6 Forsøksprofil over kjent malmforekomst på Løkken

Historikk

Et refleksjonsseismisk profil ble første gang målt over kjent malm i Løkken Grube, 1976. Figur 5.19 viser en seismisk seksjon fra dette profilet. Målingen ble utført med DHR-1632 utrustningen og multi-pisitet i registreringene på 4x12 fold.

Den seismiske seksjon fra 1976 ble tatt til inntekt for at den refleksjonsseismiske metode virket lovende for prospektering i Løkkenfeltet.

Støyanalyser utført av NORSAR har senere vist at mulighetene for å oppnå refleksjoner med DHR-1632 instrumenteringen teoretisk sett er marginale og at resultatene må ses på med en viss forsiktighet på dette grunnlag.

I 1979 ble forsøksprofilet målt på nytt med utrustningen DFS-5. En enkeltregistrering fra disse målingene er vist i figur 5.7. Selv enkeltregistreringer gir i dette tilfellet lesbare signaler (refleksjoner) og representerer den første gode bekreftelse på at refleksjonsseismikk som metode er relevant ved prospektering i krystalline bergarter.

Figur 5.20 viser en seismisk seksjon over forsøksprofilet i 1979.

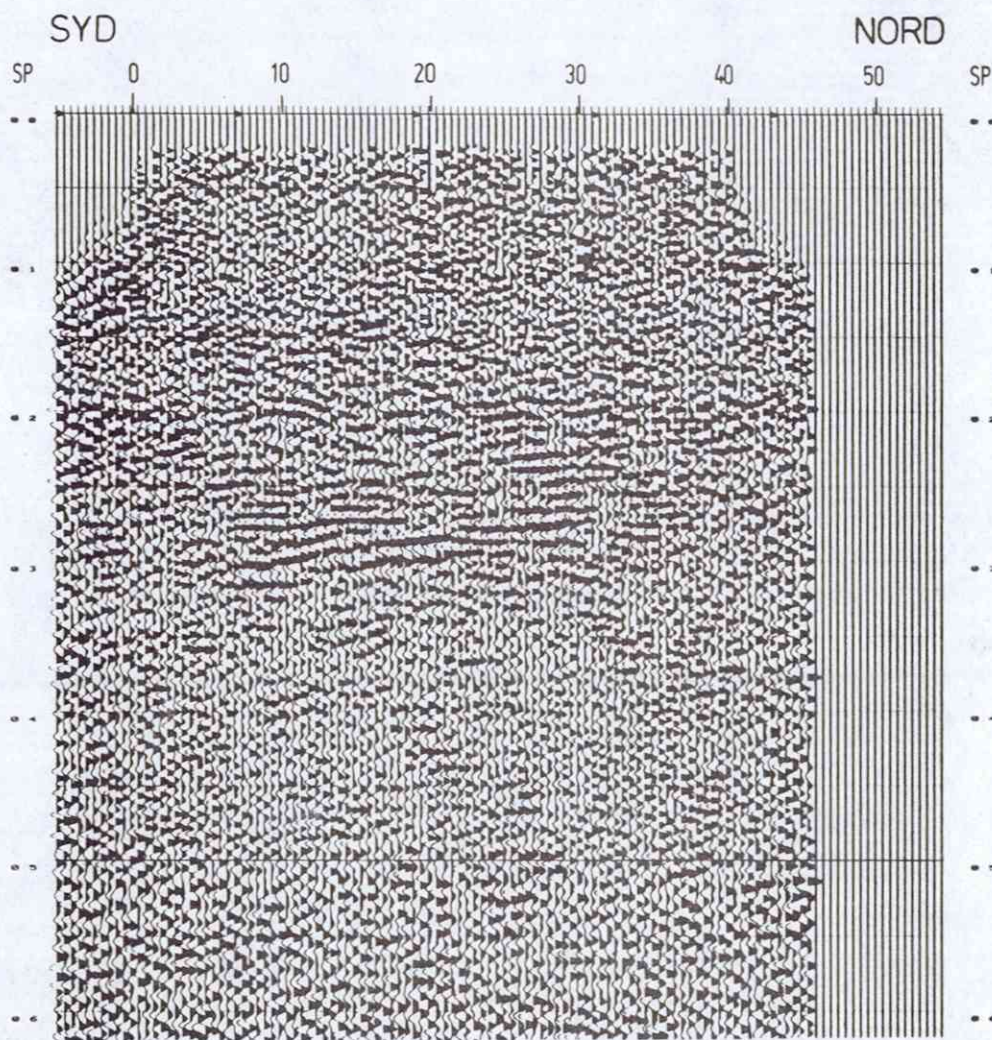


Fig. 5.19 Seismisk seksjon fra testprofil Løkken Grube, 1976.

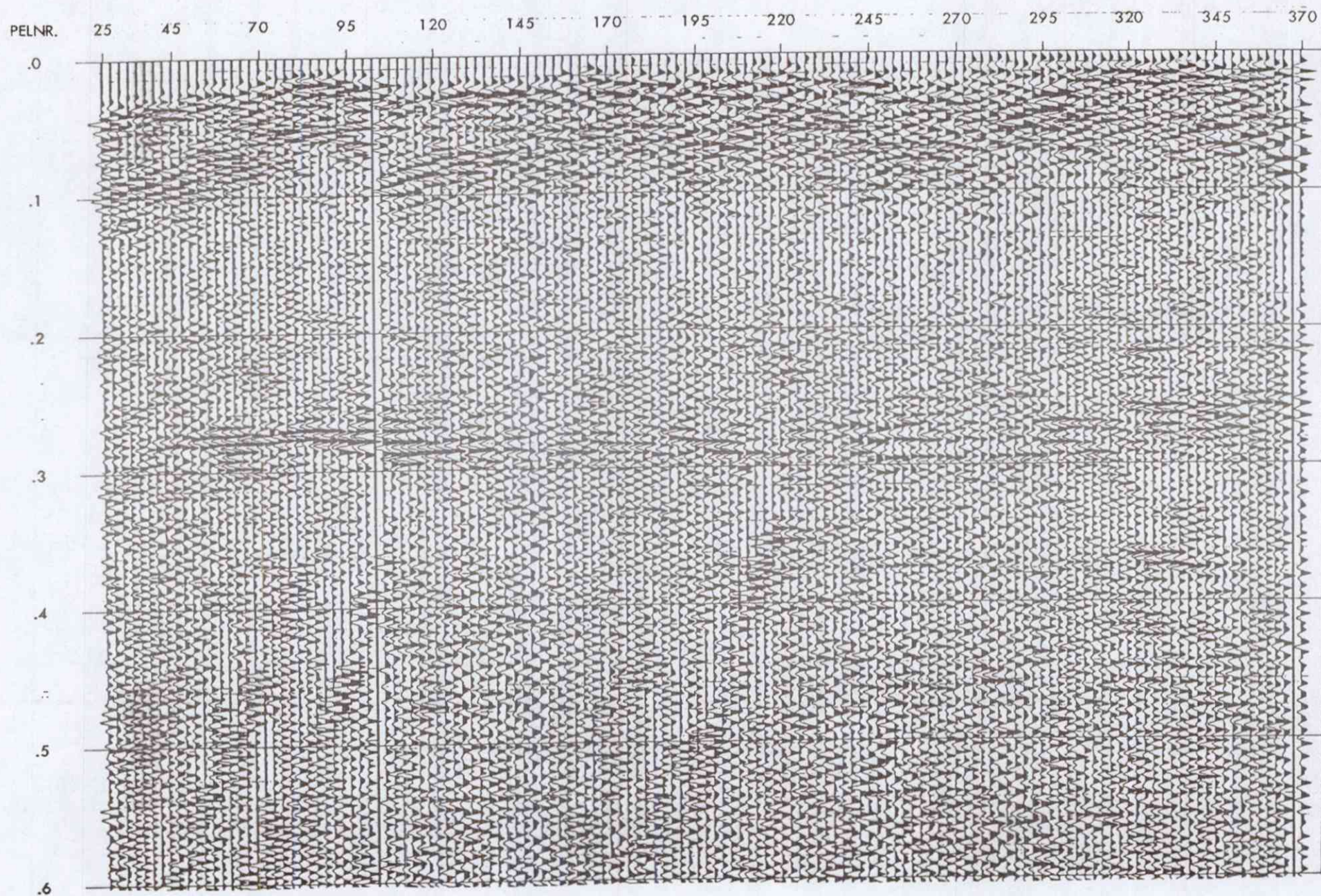


Fig. 5.20 Seismisk seksjon fra testprofil Løkken Grube, 1979.

5.7 Skudd/mottager-geometri

Et meget sentralt punkt i enhver seismisk undersøkelse er fastsettelse av skudd/mottager-geometri. I vanlig 2-dimensjonal profilering (linje-profilering) defineres denne av følgende parametere:

- spread-type
- skuddavstand
- mottageravstand
- offset (dvs. avstand mellom skudd og nærmeste mottager)
- rolling-mønster

M.h.t. spread-type har en vanligvis to muligheter, nemlig 'split spread' og 'offend spread', som vist på figur 5.21.

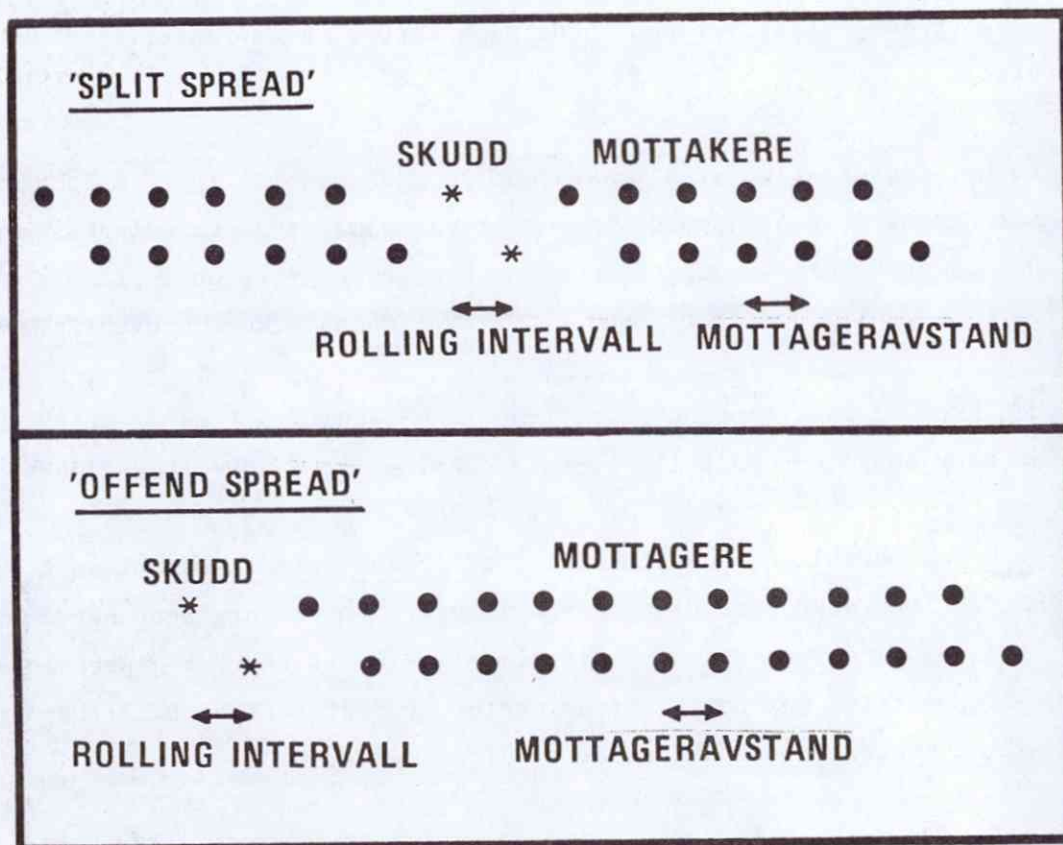


Fig. 5.21 Skudd/mottagergeometri: 'Split spread' og 'Offend spread'.

Når det gjelder skuddavstand, mottageravstand og offset, må disse parametre i malmprospektgeringssammenheng ses på som gjennomsnittsverdier snarere enn konstanter. 'Rolling' er et uttrykk for den forflytning som skjer både av skudd og mottagere under profileringen. Rolling-mønsteret bestemmer mao en slags kjøreplan for skudd og mottagere, dvs. hvilke stasjoner det til enhver tid skal skytes og mottas i.

Bestemmelse av feltgeometri - simuleringseksperimenter

Som tidligere nevnt bør man tilstrebe at både skudd og registrering foretas på fast fjell. Det er derfor naturlig å bruke de samme stasjonene både til skudd og registrering, siden dette oftest gir store arbeidsbesparelser under forberedelsen av profilet. Generelt blir da skuddavstanden lik mottageravstanden, muligens med unntak av visse lokale områder langs profilet der forholdene forbyr skuddplassering (løsmasser, etc.).

En har funnet at en stasjonsavstand på gjennomsnittlig 10 m er passende for den horisontale oppløsning en krever i malmprospekteringssammenheng. Det må presiseres at spredningen omkring denne verdien i praksis kan være betydelig, verdier i området 2-20 m anses ikke som uvanlig.

Med skudd i hver stasjon og rolling i en retning gir denne stasjonsavstand en gjennomsnittlig 12-fold dekning i 5 m CDP-intervaller.

Bl.a. med henblikk på fastsettelse av offset-parameteren ble det gjennomført en rekke simuleringseksperimenter. En tok utgangspunkt i profileringsdata innsamlet i Sulitjelma i 1978 med DFS V registreringsutstyr. Feltgeometrien for dette eksperimentet er vist i figur 5.22. Det er ca 10 m mellom skudd/geofonstasjonene, og offset er 40 m.

Eksperimentet gikk ut på å simulere en "kunstig" reflektor i et gitt dyp ved å summere en "reflektert puls" på de registrerte traser til tidspunkter som svarte til det ønskede dyp. Ved så å prosessere dataene med forskjellig systematisk utvalg av geofoner, var det mulig å trekke

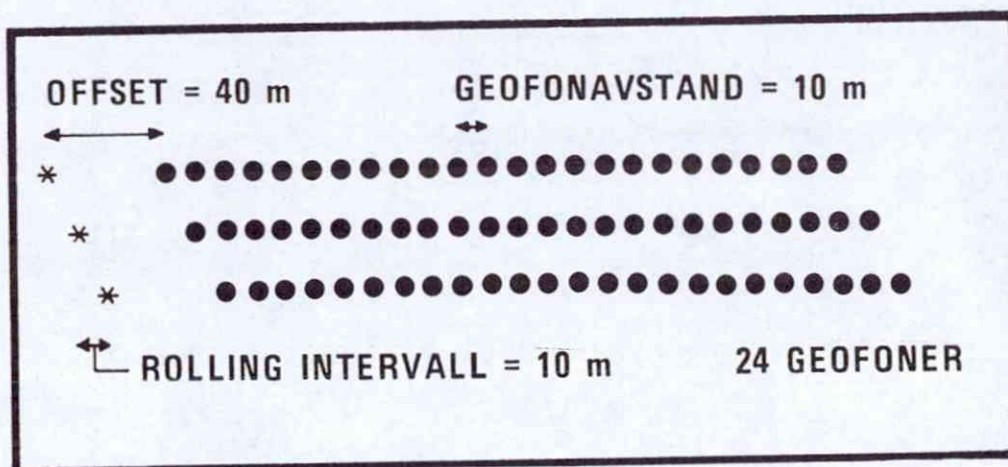
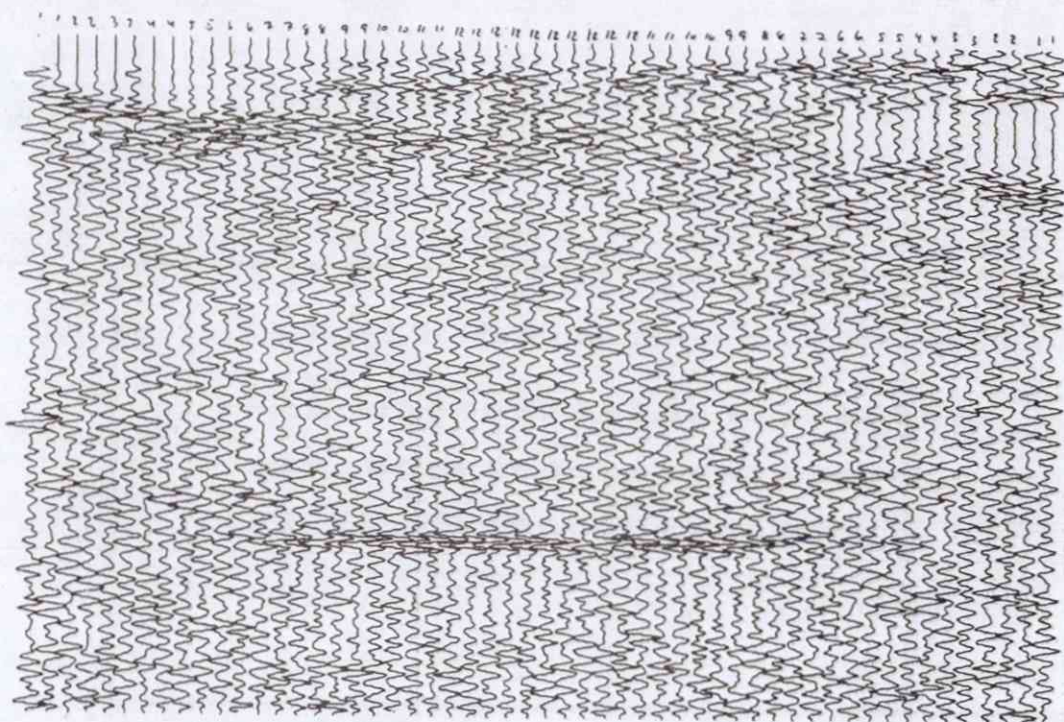


Fig. 5.22 Feltgeometri for simuleringseksperimentene på Sulitjelma-data 1978.

slutninger om hvilke geofoner som ga det beste resultat, og på dette grunnlag fastsette offsetparameteren.

Figurene 5.23-5.25 viser noen utvalgte seksjoner fra nevnte eksperiment som tydelig viser at en seksjon der bare de nærmeste geofonene inngår (G1-12), gir vesentlig dårligere resultat enn en prosessering med de 12 fjerneste geofonene (G13-24).



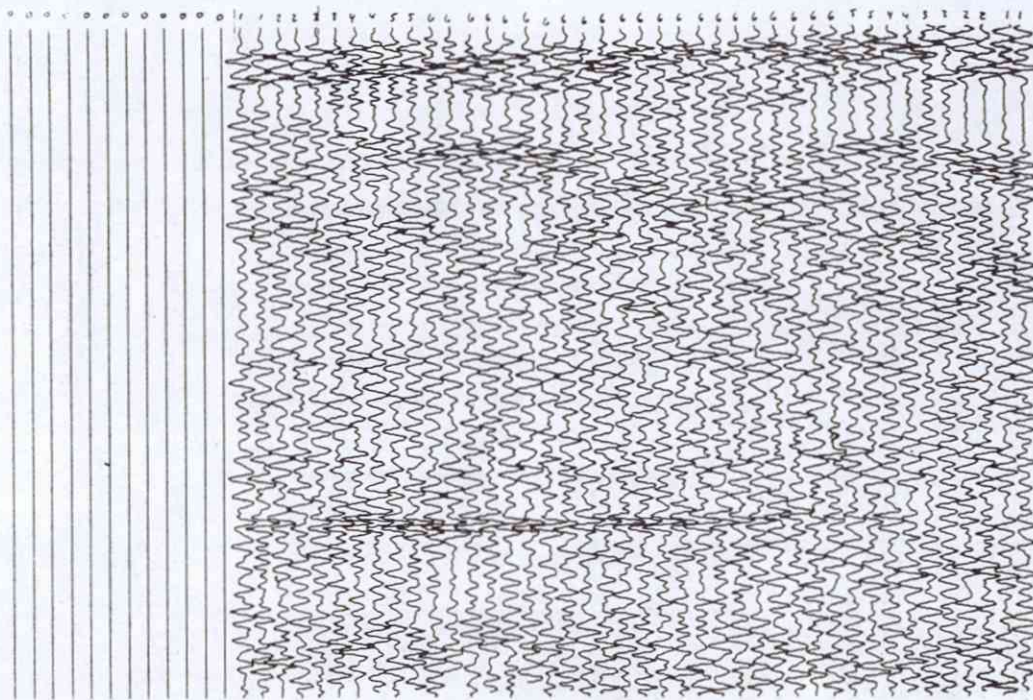


Fig. 5.25 Simulerte refleksjoner prosessert med de 12 ytterste geofoner (G13-G24).

En foretok også en rekke eksperimenter der en suksessivt la inn 'refleksjonene' på grunnere og grunnere nivå i seksjonen. Disse viste at for nivåer grunnere enn ca 150 ms var det ikke lenger mulig å skille refleksjonene fra bakgrunnstøyen. Dette nivå, som tilsvare 3-400 m dyp, antas å representere det grunneste nivå som i praksis vil gi noenlunde tilfredsstillende resultater.

For å prøve å forstå de forskjellige effektene som ble demonstrert under simuleringseksperimentene, kan en betrakte et panel av traser fra ett enkelt skudd. På figur 5.26 er klippenivået (amplitude-nivået hvor hver

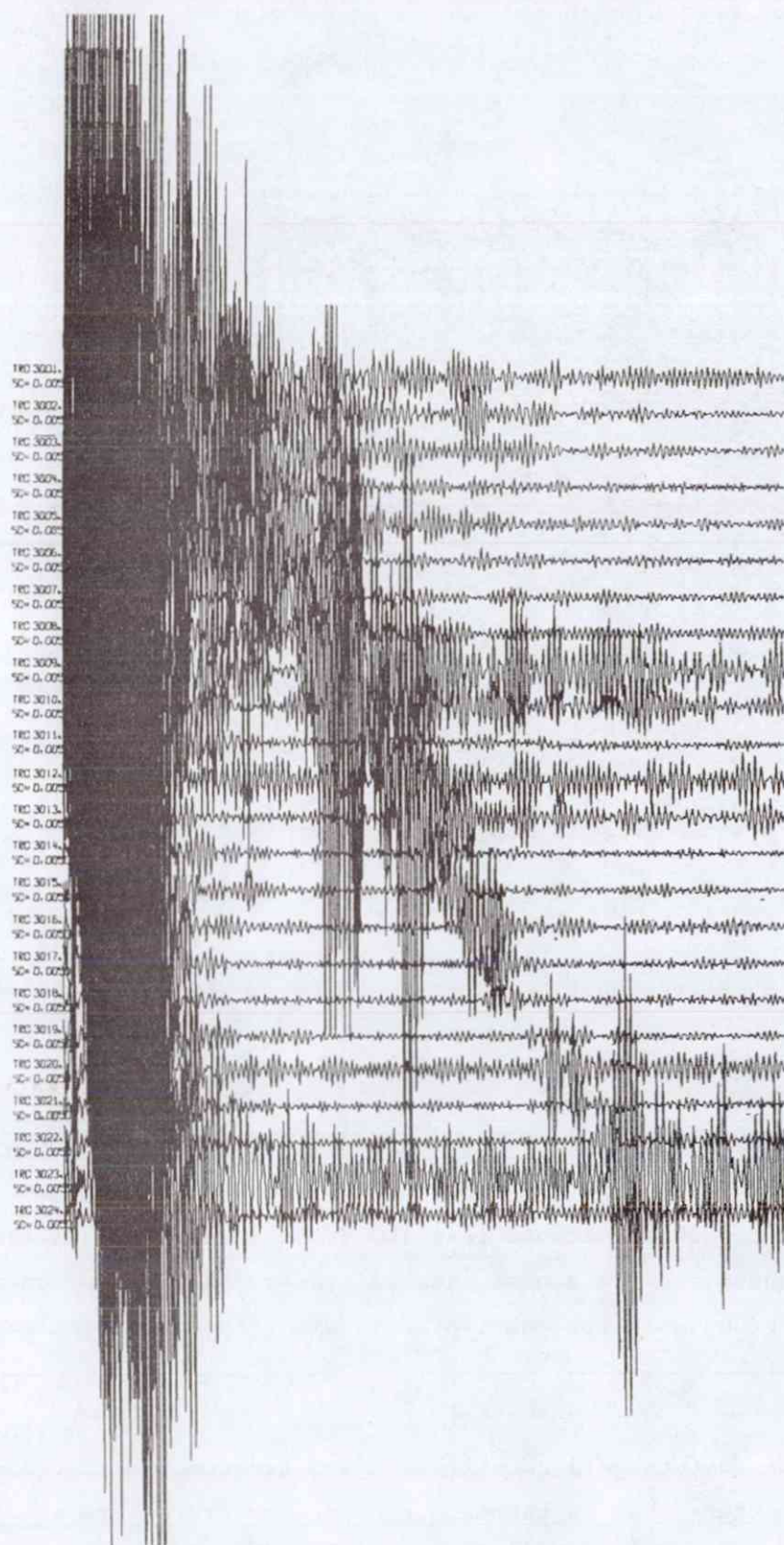


Fig. 5.26 Typiske registreringer fra Sulitjelma 78 profilet, registrert med DFS V. Traselengden er 500 msek. Klippenivået ved display er satt relativt høyt.

enkelt trase klippes under plotteprosessen) satt relativt høyt, for å gi et realistisk inntrykk av dynamikken i trasene. På figur 5.27 er klippe-nivået satt vesentlig lavere.

En skal spesielt legge merke til to effekter: De kraftige skudd-genererte overflatebølgene i begynnelsen av trasene (opp til ca 100-150 ms), og den meget kraftige og kompliserte luftpuls (direktebølgen fra skuddet som brer seg gjennom luften) som har bemerkelsesverdig lang varighet på enkelte av registreringene. Ut fra disse plottene er det relativt enkelt å forstå de forskjellige effektene som simulerings eksperimentene nettopp viste. På nivået 250 ms vil geofoner som ligger for nær skuddet, oppfange refleksjonene samtidig med den meget kraftige støyen fra luft-pulsen, mens fjernere geofoner oppfanger signalene innenfor et stille vindu mellom overflatestøyen og luftpulsen. Kommer en grunnere enn 100-150 ms kommer en inn i overflatestøyen uansett skudd/geofon-avstand.

En kan altså definere et trekantet område (stiplet på figur 5.27) hvor bakgrunnstøyen er lav og hvor sjansen til å detektere refleksjoner er størst. Videre kan det sluttas at dersom en skal lete etter relativt dype reflektorer, må offset økes, slik at luftpulsen ikke når frem til registreringspunktet før refleksjonene fra dypet.

I de aktuelle områder i Løkken og Sulitjelma, med potensielt interessant reflektordyp ned til ca 1000-1200 m (300-400 ms) har en på grunnlag av disse analyser fastsatt offset til ca 120 m.

Parallell-profilering

Høsten 1980 ble det gjort forsøk med en ny type profilering, såkalt 'parallell-profilering'. Prinsippet er vist på figur 5.28. En antar at en har 2 parallelle seismiske profiler, og skudd/ mottager-konfigurasjonen er slik at en skyter langs det ene profilet og registrerer langs det andre. Med dette oppnås en CDP-dekningsgeometri mellom de to profilene, dvs. langs en 'fiktiv' seismisk linje med derpå følgende prosesserte seksjon (se også kap. 6).

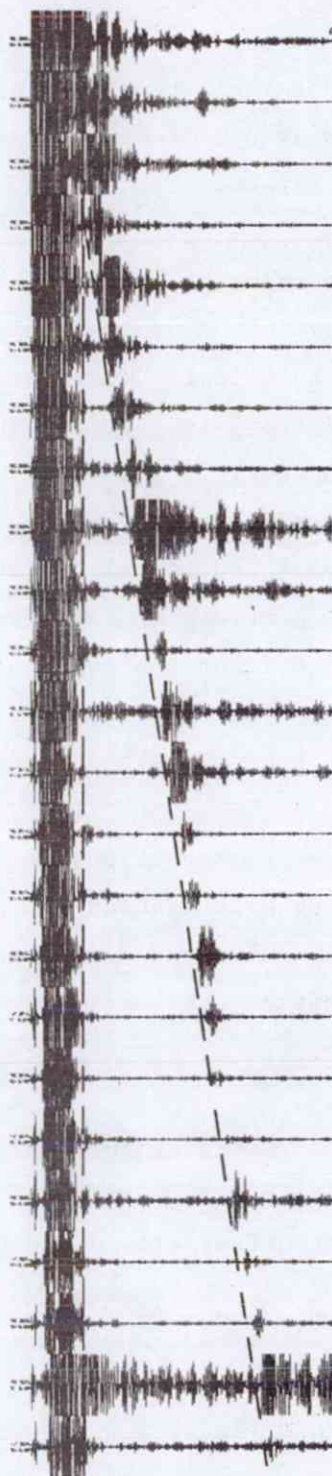


Fig. 5.27 Samme data som i figur 5.26, men kraftig nedskalert og plottet med et lavere klippenivå. Traselengden er som for 500 msek.

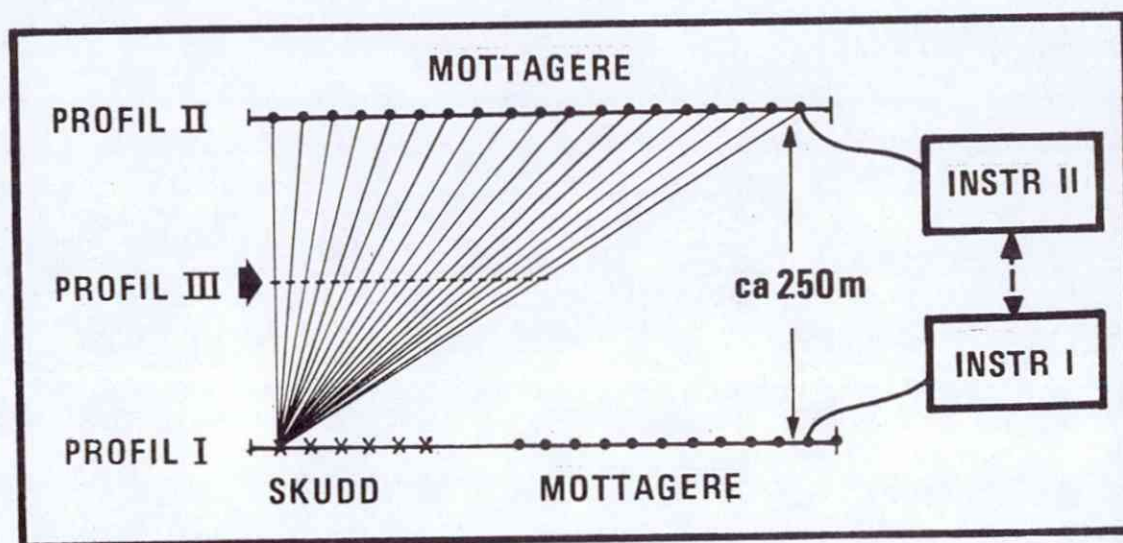


Fig. 5.28 Skjematisk fremstilling av skudd/mottaker-konfigurasjon (i horisontal-planet) anvendt under et felteksperiment i Orkla i oktober 1980. Ved å skyte langs profil I og motta langs profil II, oppnår man refleksjonspunktdekning langs et mellomliggende profil III. Samtidig oppnås konvensjonell dekning langs profil I. Konvensjonell dekning langs profil II er oppnådd tidligere ved å skyte og motta langs dette profilet (ikke inntegnet).

Denne metoden er spesielt gunstig dersom en har tilstrekkelig antall registreringskanaler til å registrere langs begge profilene samtidig. I dette tilfelle kan en skyte den ene linjen 'konvensjonelt' og i tillegg registrere de samme skuddene langs den andre. En oppnår altså et ekstra seismisk profil med det samme antall skudd som tidligere.

Denne metoden er med hell brukt gjentatte ganger i Løkken; da med to separate DFS V registreringssystemer som ble koplet sammen.

6. DATAPROSESSERING

6.1 Generelt om dataproessering

Formålet med seismisk dataproessering er dels å trekke ut av dataene basisinformasjon om de geologiske lag, dels å tilrettelegge den relativt store datamengde for en hensiktsmessig presentasjonsform gjennom forskjellige former for datareduksjon. En slik "konsentrering" av dataene har også som formål å forsterke de geofysiske signifikante bølgeformene i forhold til bakgrunnstøyen og dermed gi et "renere" og mer informativt bilde av undergrunnen.

Grovt kan en si at dataproesseringsmetodene kan deles i følgende typer:

- sortering av data i henhold til spesifiserte sorteringskriterier
- reduksjon av data i henhold til spesifiserte kvalitetskriterier
- summering av data (stackingteknikker)
- filtrering av data
- presentasjon av data (display-teknikker)
- bølgefelt-/migrasjons-teknikker
- modellering/estimering av geofysiske parametere.

Standardproessering innenfor marinseismikk inneholder de fleste av disse elementene. Datasorteringen består av en CDP-sortering (CDP = Common Datum Point) der en samler seismiske traser i grupper (CDP-familier) etter hvor midtpunktet mellom skudd og mottager er plassert. En CDP-familie refererer til et fast punkt i overflaten (CDP) og består således av traser som har skudd og mottager plassert symmetrisk rundt dette punktet.

Trasene innenfor hver CDP-familie blir korrigert for den forskjellen som skyldes varierende gangtid mellom skudd og mottager, og de blir deretter summert til en "stacked trace". De summerte trasene (en for hvert CDP) kan så plottes i en "seismisk seksjon" som gir et slags

bilde av de seismiske refleksjoners utbredelse i rommet. På forskjellige nivåer i prosesseringen kan en la dataene gjennomløpe filtreringsprosedyrer, hvor en kan filtrere bort uønskede bølgefrequenser eller f.eks. fremheve signaler med visse gitte karakteristika. Videre eksisterer en rekke plotteteknikker hvorved en kan balansere trasene til gitte nivåer slik at en oppnår en best mulig gjengivelse av den ønskede informasjon.

Bølgefelt/migrasjonsteknikkene benytter seg av matematiske metoder for å simulere bølgeforplantningen i et geologisk medium. Metodene, som nesten uten unntak er 2-dimensjonale, benyttes bl.a. til å gjenvinne den sanne geometri for reflektorene i undergrunnen, dvs. kompensere for den forvrengning som forårsakes av mediet mellom reflektor og overflate. De er tidkrevende og dermed relativt kostbare.

3-dimensjonal seismisk modellering benyttes i større og større utstrekning i dag. I videste forstand tar metodene sikte på å integrere all seismisk informasjon en sitter inne med i et område, og vha matematiske teknikker gjenskape det sanne geofysiske bilde, både mht geometri og fysiske parametere.

6.2 Standard prosessering

Skudd/mottager-geometri

Vi skal her gjennomgå et eksempel som viser en standard prosesseringsrekkefølge for regulært innsamlede seismiske data. Figur 6.1 viser en typisk datainnsamlingsgeometri der skudd/mottagere flyttes suksessivt langs en rett linje. Skuddavstanden og avstanden mellom mottagerne (geofonene) er konstant lik 10 m. For enkelhets skyld benytter vi i dette eksemplet kun 6 mottagere, det vanlige er 24 eller flere.

Skudd nr. 1 avfyres i en posisjon med linjekoordinat 0; mottagerne er plassert fra posisjon $x = 50$ m til $x = 100$ m. En opererer her med en "offset" (avstand mellom skudd og nærmeste mottager) på

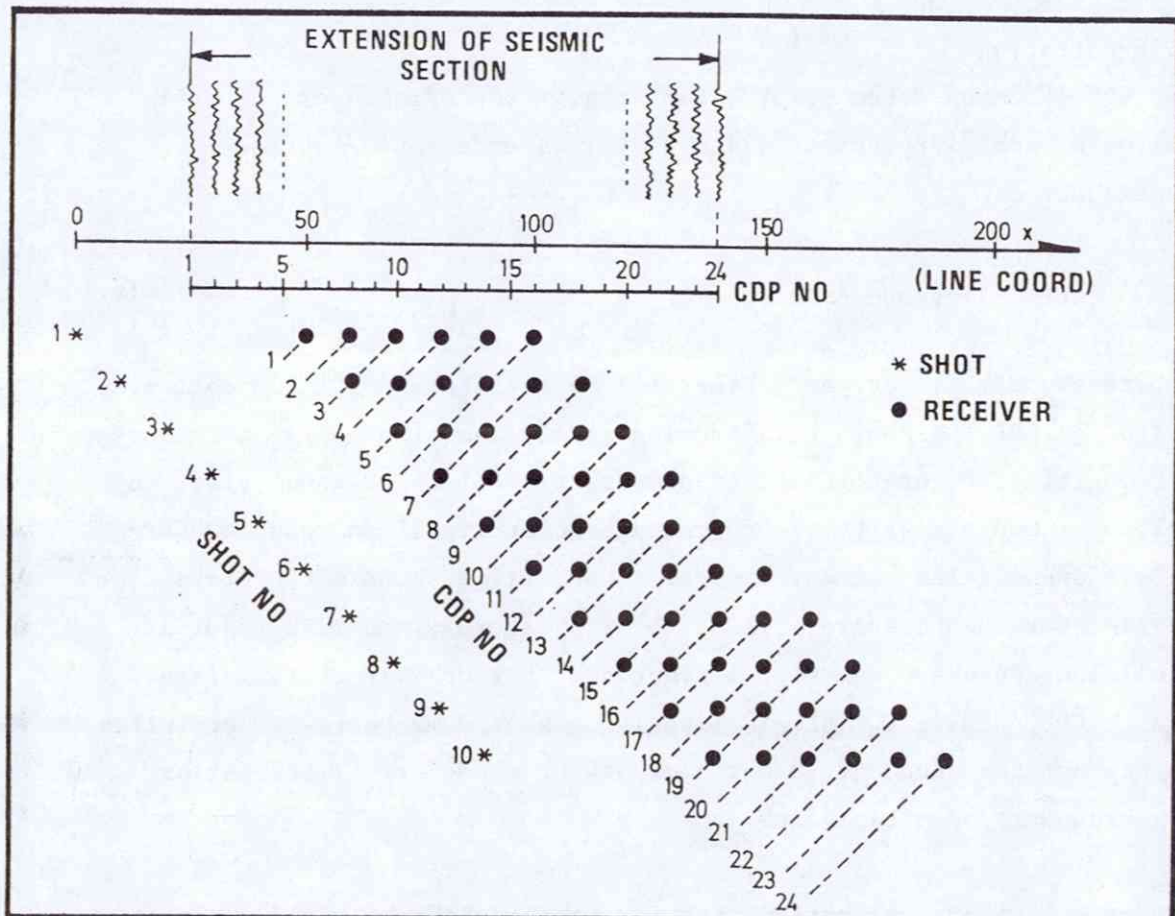


Fig. 6.1 Skjematisk illustrasjon av innsamlingsgeometri og CDP-sortering av seismiske data. Samtlige skudd/mottagere er i virkeligheten plassert langs samme rette linje, men skuddsekvensen er på figuren separert vertikalt for å unngå overlapping.

50 m. Skudd nr. 2 avfyres i posisjon $x = 10$ m og mottagerne flyttes tilsvarende ($x = 60$ m til $x = 110$ m). Vi antar videre at vår seismiske linje består av totalt 10 skudd, hvis posisjoner er angitt på figuren (0-90 m).

CDP-sortering

Et CDP ("Common datum point") for et gitt skudd/mottager-par defineres nå som midtpunktet mellom de tilsvarende skudd/mottager-posisjonene:

$$x_{\text{CDP}} = \frac{1}{2}(x_{\text{skudd}} + x_{\text{mottager}}) \quad (6.1)$$

Hvert skudd/mottager-par (i vårt tilfelle tilsammen 10 x 6) definerer altså et CDP i henhold til formelen (6.1). Samtlige mulige CDP-posisjoner er angitt på figuren; disse er nummerert fra 1 til 24. Det viser seg altså at med vår valgte skudd/mottagergeometri vil en rekke av CDP-posisjonene falle sammen, dvs. at forskjellige skudd/mottager-par har felles CDP. Dette svarer til at de er plassert symmetrisk rundt et felles midtpunkt, som vist i figur 6.2. Her er vist et tilfeldig valgt CDP, nemlig CDP nr. 10 i posisjon $x = 70$ m. Dette CDP er felles midtpunkt for skudd nr. 3/mottager nr. 6, skudd nr. 4/mottager nr. 4 og skudd nr. 5/mottager nr. 2.

Figur 6.2 viser også strålebanen for de seismiske bølger for nevnte skudd/mottager par, forutsatt en plan reflektor i undergrunnen. I dette tilfelle vil bølgene mellom skudd/mottager-par i samme CDP-familie også ha samme refleksjonspunkt i undergrunnen. Derfor kalles også et CDP for et "common depth point".

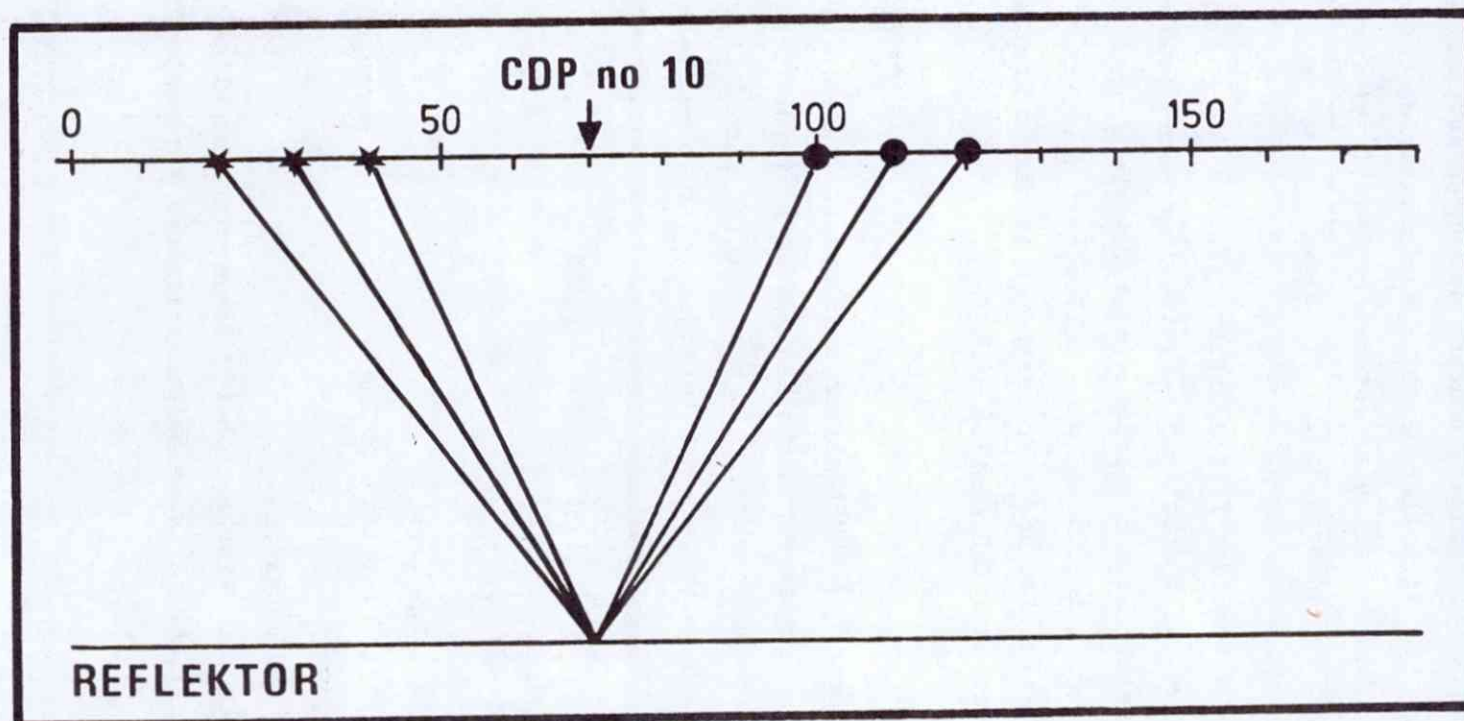


Fig. 6.2 Illustrasjon av strålegangen mellom skudd/mottagere med felles CDP-posisjon (CDP nr. 10).

Figur 6.1 viser vha stiplede linjer hvilke registreringer som tilhører de forskjellige CDP-posisjoner. Vi ser at for vår valgte geometri får vi 3 registreringer pr. CDP familie, unntatt mot enden av profilet, der vi kun får 1 eller 2. Vi kaller derfor denne geometrien for en 3-fold CDP-geometri. Med 24 mottagere istedenfor 6 ville vi fått en 12-fold geometri, som er ganske vanlig i praksis.

På magnetbåndene som inneholder feltregistreringene er dataene ordnet skudd-sekvensielt, dvs. slik at alle 6 registreringer fra skudd nr. 1 er lagret først, deretter alle 6 registreringer fra skudd nr. 2 osv. En CDP-sortering består i å ordne dataene sekvensielt i CDP-familier, slik at trasene i CDP-familie nr. 1 kommer først (i vårt tilfelle kun 1 trase) deretter trasene i CDP-familie nr. 2 osv.

NMO-korreksjon

Etterat dataene er sortert i CDP-familier blir trasene innenfor hver familie summert til en trase. Før dette kan gjøres må imidlertid trasene korrigeres for den forskjellen som eksisterer i refleksjonstid som følge av at skudd og mottagere har forskjellige avstand. Denne korreksjonen er gitt ved formelen

$$\Delta t = t - \left[t_0^2 + \frac{y^2}{v_s^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

der t er løpende tid langs trasen

t_0 er to-veis gangtid for normalt innfall (skudd og mottager i samme posisjon)

y er avstand skudd-mottager

v_s er den såkalte "stackinghastighet" (for en-lags modeller med konst. hastighet er v_s = bølgehastigheten i laget)

Denne korreksjonen kalles i prosesseringsterminologien for "normal move-out" (NMO). Korreksjonen utføres for hvert eneste samplepunkt (tidspunkt) på trasen, og avhenger som en ser av registreringstiden. NMO-prosedyren resulterer derfor i en "strekking" av trasen, som øker med økende skudd/mottager-avstand og avtar med økende registrerings-tid. Prosedyren er skjematisk illustrert i figur 6.3

CDP-stacking

Etter NMO-korreksjonen vil samtlige traser i hver CDP-familie inneholde refleksjonspulser som ideelt sett skal være i fase. Ved summasjon (stacking) vil signal/støy-forholdet generelt forbedres, samtidig som energi som kommer fra uønskede retninger vil svekkes ("stacke ut av fase"). I tillegg har en oppnådd en betydelig data-reduksjon; samtlige data innenfor hver CDP-familie er nå redusert til en enkelt trase. Denne trase tilsvarende pga NMO-prosedyren "null offset" dvs. skudd og mottager i samme posisjon.

CDP-seksjon

En kan nå plote hver summert trase side om side i sine respektive CDP-posisjoner, som antydnet på figur 6.1. En slik fremstilling av dataene kalles en CDP-seksjon eller en "stacked section". Geometrisk sett fremstiller en "stacked section" de registreringer en ville fått dersom en lot et sammenfallende skudd/mottager-par flytte seg langs profilet. Stackede data kalles også ofte for "normal incidence data" siden hver registrering tilsvarende en strålebane som reflekteres normalt på reflektoren og tilbake til samme punkt i overflaten.

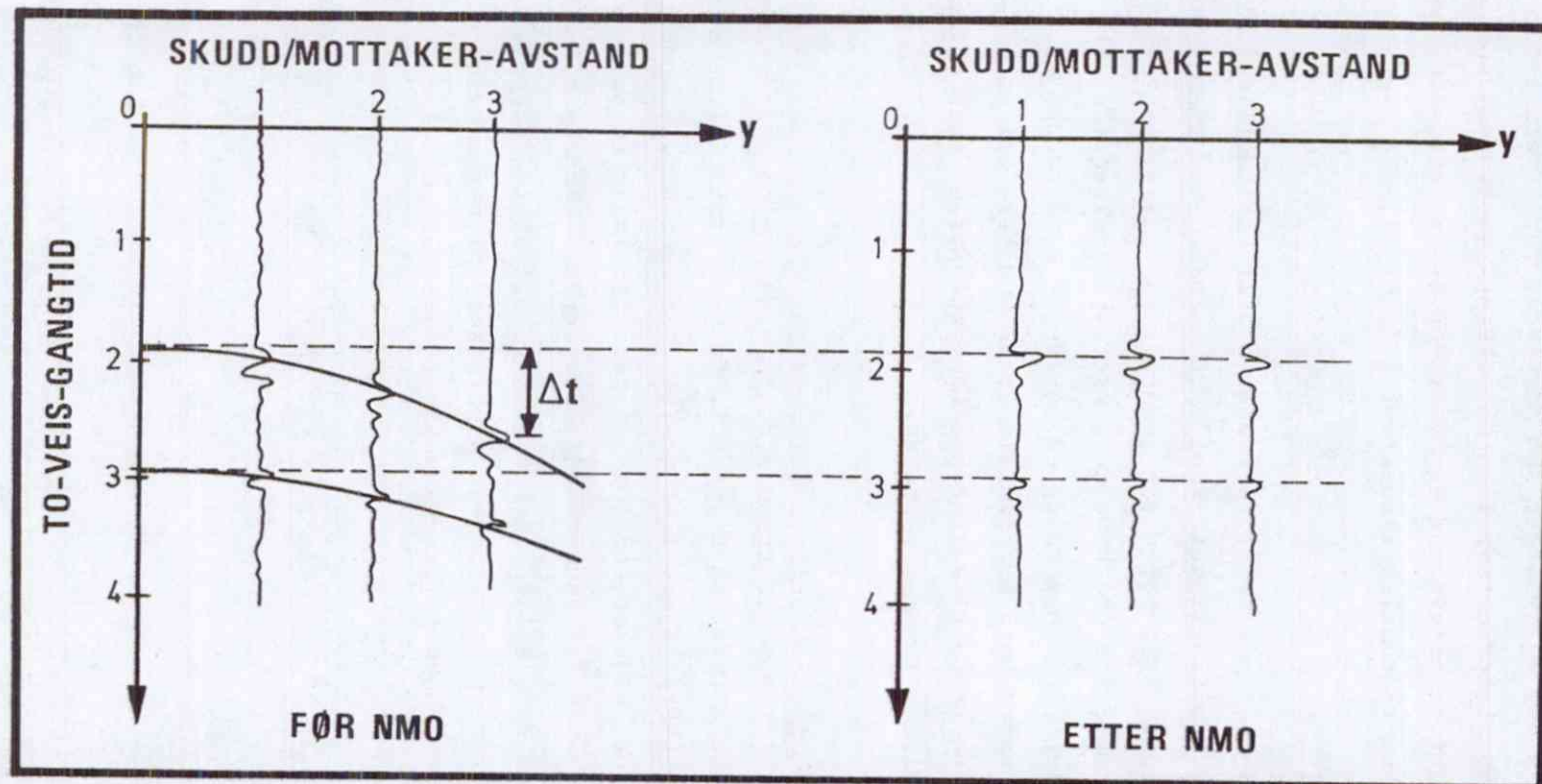


Fig. 6.3 Skjematisk illustrasjon av NMO-korreksjon.

Frekvens-filtrering

Siden refleksjonene i en "stacked section" har maksimalt signal/støyforhold innenfor visse frekvensbånd, utfører man under prosesseringen frekvensfiltrering av dataene. Figur 6.4 viser effekten av forskjellige båndpassfiltere på en seismisk seksjon. Frekvensfiltrene kan spesifiseres slik at frekvensbåndet varierer med registreringstiden (Time Variable eller TV-filtre). Dermed kan en tilpasse filtrene til frekvensinnholdet i dataene som oftest er slik at høye frekvenser pga absorpsjon avtar raskest med økende tid.

Skalerings-teknikker

En har forskjellige metoder til å skalere dataene med før plotting slik at de gir et visuelt akseptabelt bilde av refleksjonene på de forskjellige nivåer i seksjonen. En vanlig teknikk er såkalt RMS-skalering; effekten er visualisert i figur 6.5.

Display-teknikker

Når det gjelder plotting (display) av seismiske seksjoner, har en til disposisjon en rekke teknikker. Hvilken teknikk som velges kan bero på smak og behag eller på hvilke effekter som spesielt ønskes fremhevet.

De vanligste plottemetodene er:

- Wiggle (W)
- Variable Area (VA)
- Wiggle + Variable Area (WVA).

Figur 6.6 viser samme seksjon plottet med de tre ovenstående teknikker.

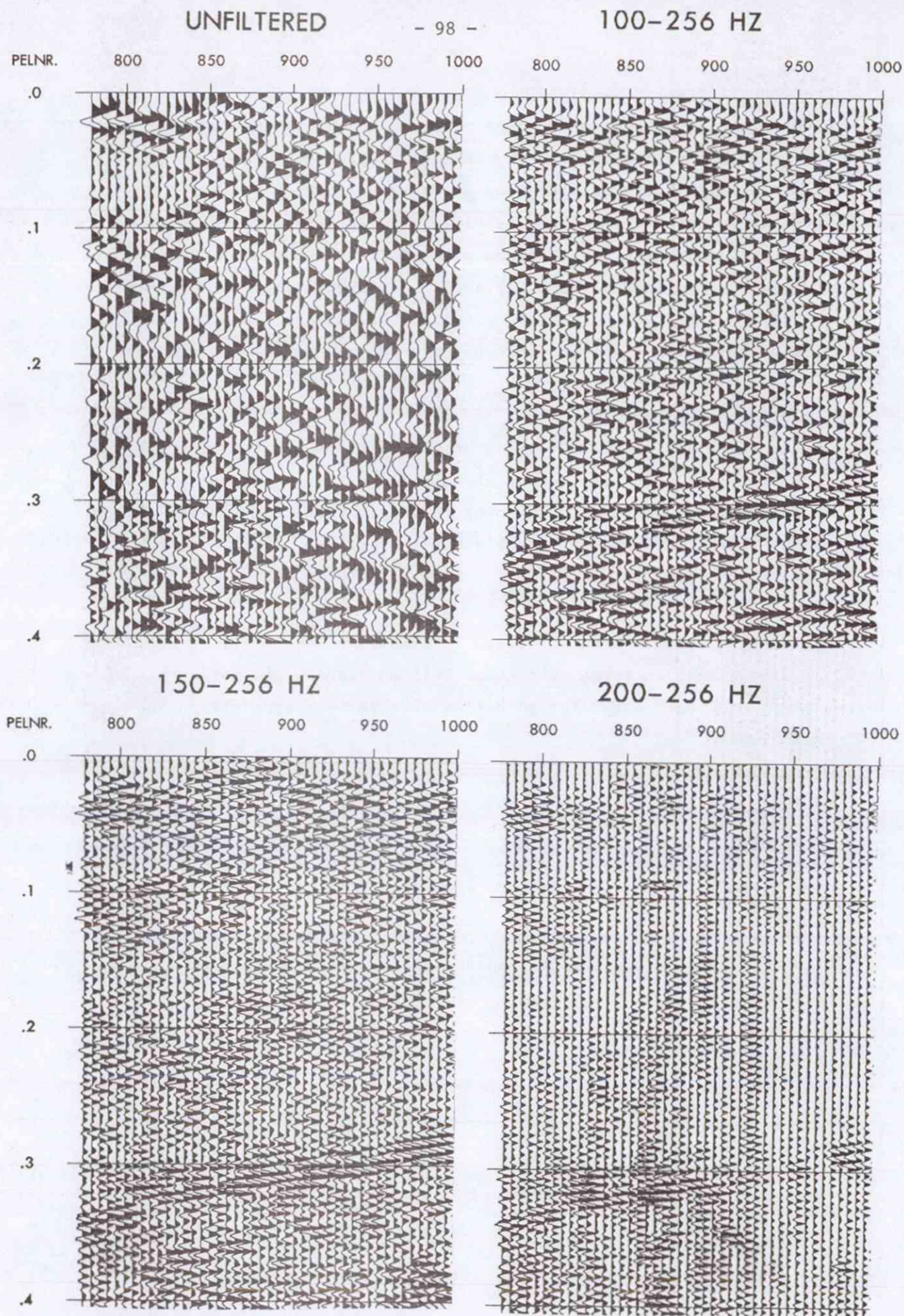


Fig. 6.4 Effekt av forskjellige båndpassfiltere på en seismisk seksjon.

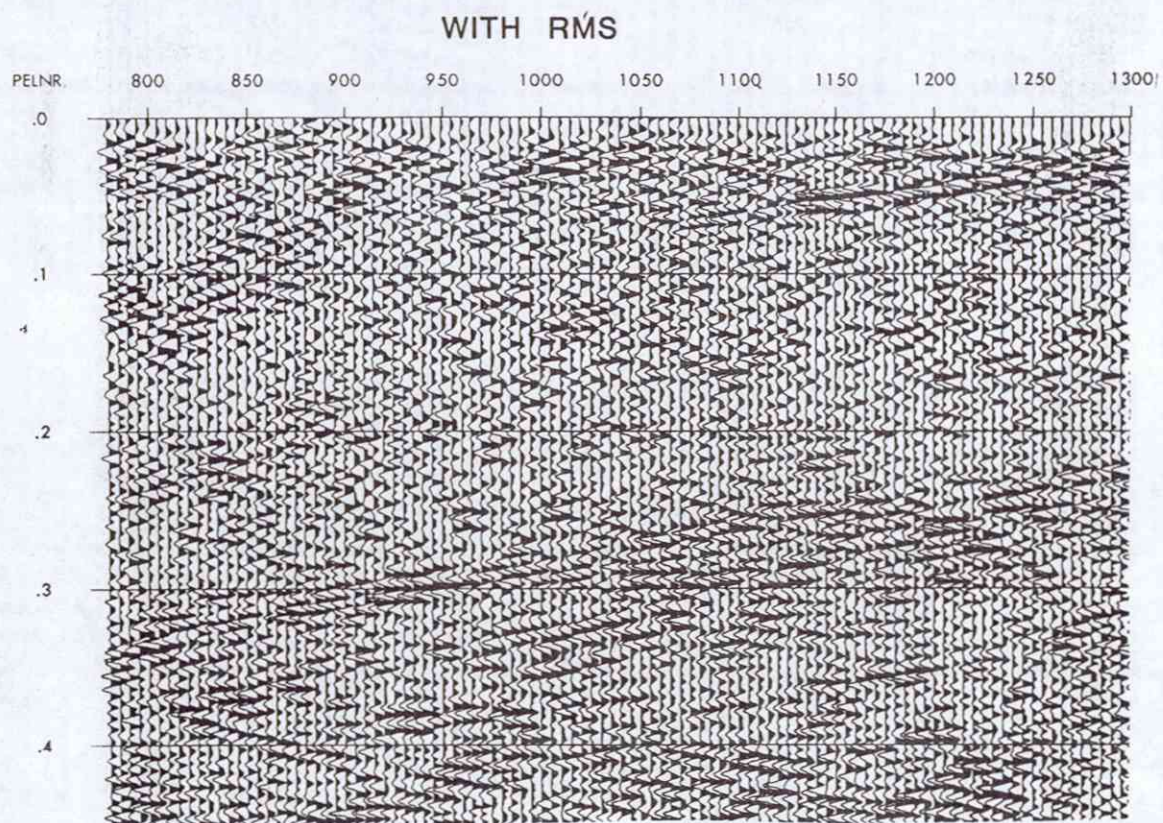
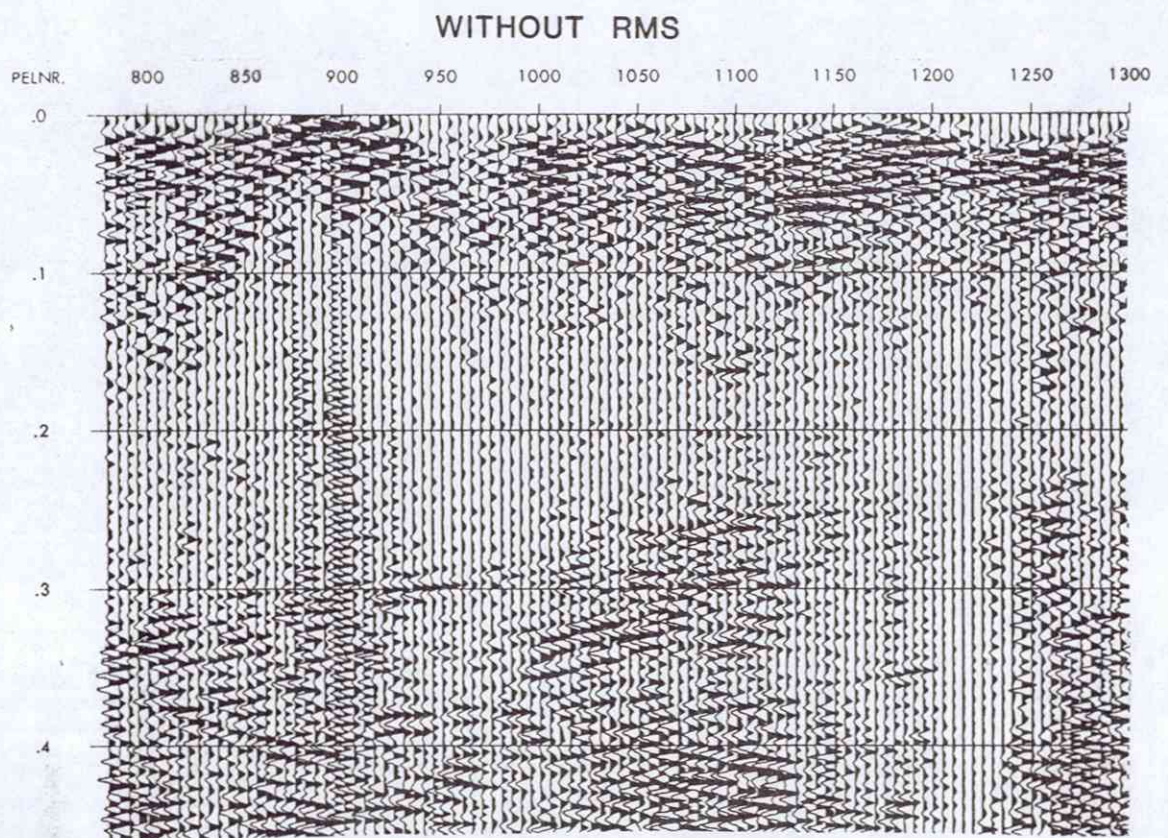
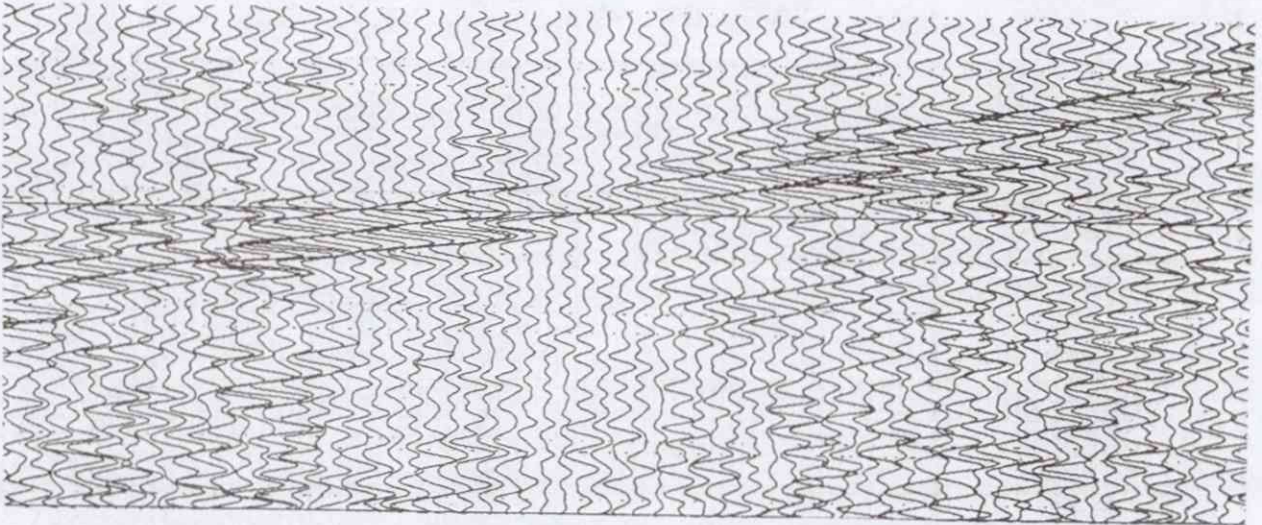
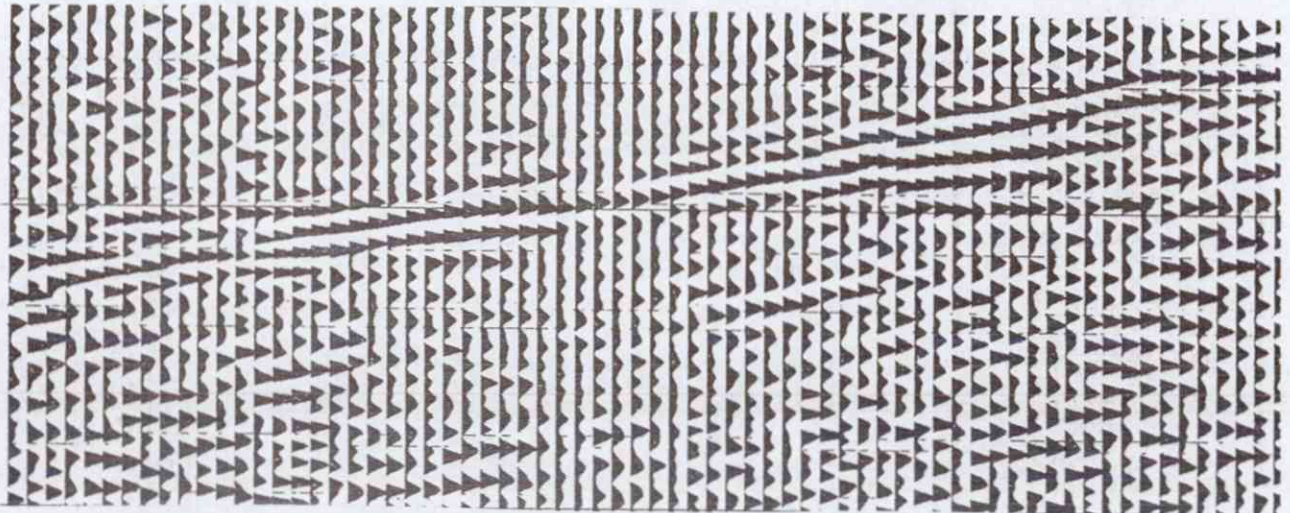


Fig. 6.5 Effekten av RMS-skalerting

a



b



c

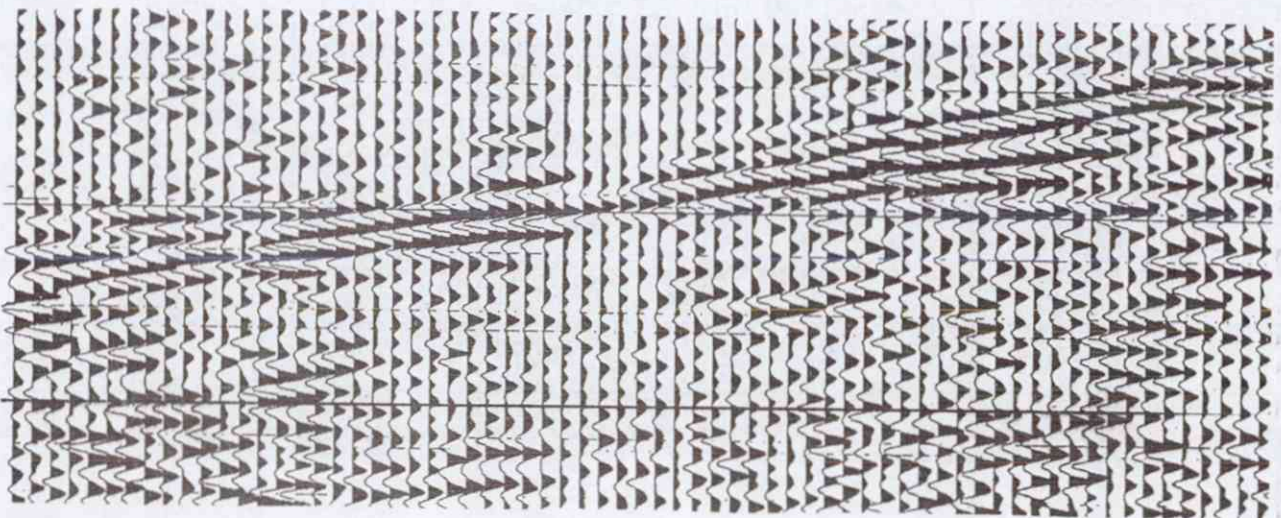


Fig. 6.6 Illustrasjon av forskjellige plotteteknikker.

6.3 Krav til prosessering for malmprospektering med seismikk

Muligheter for fleksibel feltgeometri

Et av de første problemer en støter på under datainnsamling på land, er at det er vanskelig, for ikke å si umulig, å oppnå regulære innsamlingsmønstre. Spesielt gjør kravene om fast fjell i skudd- og registreringspunkter at innsamlingsmønstrene til enhver tid må legges opp etter forholdene på stedet, og at avstandene mellom skudd/mottager-stasjonene ofte kan variere tildels meget kraftig. Dette gjør at prosesseringsmetodene som anvendes må være tilsvarende fleksible. For eksempel vil en CDP-sortering som skissert i kap. 6.2 (se fig. 6.1), generelt ikke gi noe tilfredsstillende resultat, da den er basert på ekvidistante stasjoner langs profilet, som igjen fører til at alle CDP-punktene innenfor hver CDP-familie blir eksakt ett og samme punkt.

For irregulære stasjonsmønstre må CDP-sorteringen foregå etter litt andre kriterier. Figur 6.7 viser et typisk eksempel på stasjonskonfigurasjon i Løkken. To effekter gjør seg særlig gjeldende, nemlig stor forskjell i avstanden mellom to nabostasjoner og relativt store avvik fra et rettlinjett profil. Dessuten er det slik at en ofte må definere tilleggsstasjoner for geofonene mellom skuddstasjonene pga for liten avstand mellom uttakene på geofonkabelen. Disse stasjonene må hoppes over under "rolling" av skuddene.

Resultatet av forholdene i felt blir et krav om fullstendig fleksibilitet mht skudd/mottagergeometri under prosesseringen. Generelt kan en si at geometriprosessoren må være så generell at stasjonene kan gis som en hvilken som helst samling med punkter $(x,y,z)_i$, $i = 1, \dots, N$, og at skudd og mottagere kan knyttes til et hvilket som helst utvalg av disse punktene. På figur 6.7 er skuddpunkter og geofonpunkter angitt med forskjellig symbol.

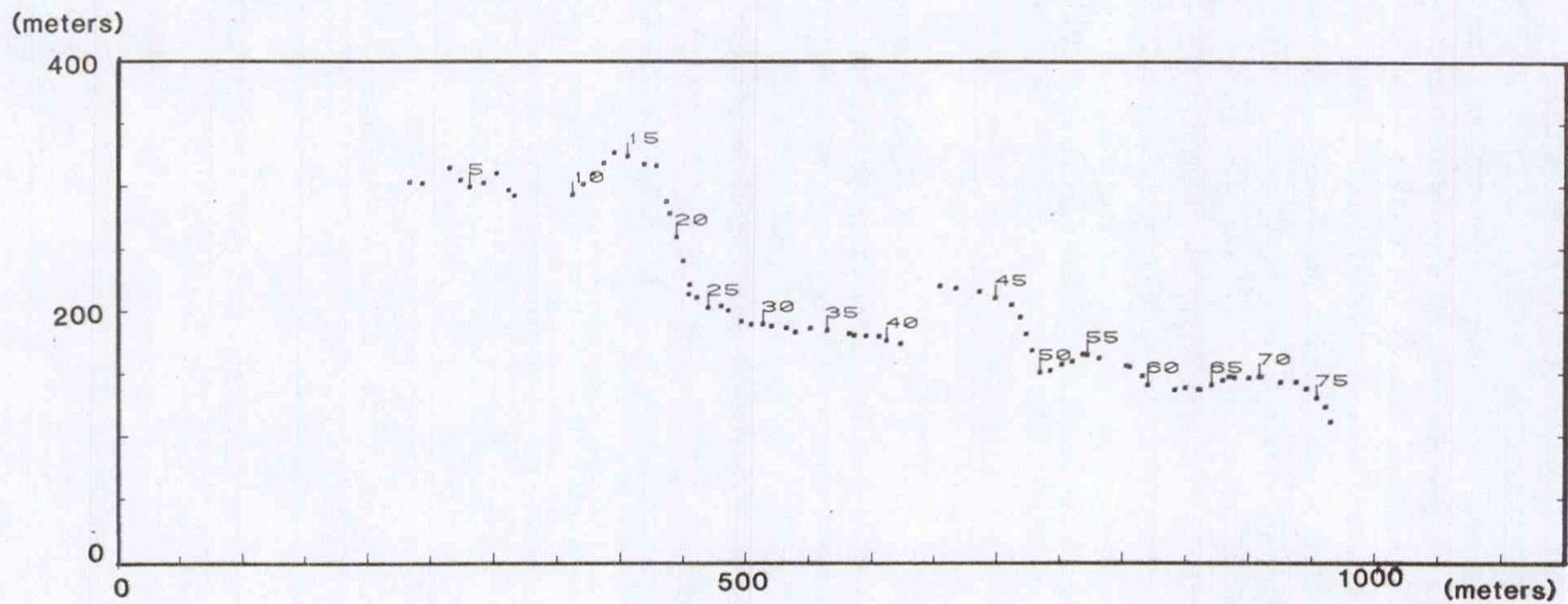


Fig. 6.7 Eksempel på stasjonskonfigurasjon i Løkken. De fylte punktene markerer skuddstasjoner, samtlige er mottagerstasjoner.

CDP-sortering

Så snart samtlige skudd og mottagere er knyttet til en eller annen av de N stasjonene, kan en for hvert eneste skudd/mottager-par beregne et CDP. I motsetning til tidligere vil CDP'ene nå ligge spredt omkring i horisontalplanet istedenfor å gruppere seg sammen i en rekke ekvidistante punkter. Strengt tatt kan en derfor ikke lenger snakke om "common datum point", siden ingen av punktene trenger å falle eksakt sammen.

Figur 6.8 viser CDP'ene for skudd/mottager-konfigurasjonen vist i figur 6.7. Som en ser danner punktene en relativt irregulær "CDP-sky". Hvert punkt i denne skyen tilsvarer ett bestemt skudd/mottager-par, dvs. en trase på registrerings-tapen.

CDP-sorteringen kan nå foretas på følgende måte: Man definerer en "profillinje" som på best mulig måte går gjennom CDP-skyen. Profillinjen kan være en rett linje, eller den kan være en brutt linje bestående av rette linjestykker. Langs denne profillinjen defineres så de såkalte CDP-intervaller, dvs. linjen deles opp i et antall like lange intervaller med en på forhånd spesifisert lengde, f.eks. 5 m.

Hvert CDP projiseres normalt inn på profillinjen og vil havne i et eller annet intervall. Etterat denne prosessen er utført, vil hvert intervall inneholde et visst antall CDP'er, som sies å utgjøre en CDP-familie. CDP-sorteringen består altså i å gruppere traser som tilhører samme intervall og som senere skal stackes sammen til en trase. En har også muligheten til å spesifisere en maksimumsavstand fra profillinjen, slik at alle CDP'er utenfor denne avstand ikke blir tatt med under sorteringen. Dette kan være særlig aktuelt dersom skudd/mottagerkonfigurasjonen er så irregulær at CDP-skyen får for stor spredning på tvers av profilretningen. I dette tilfelle kan en definere flere parallelle profillinjer og prosessere dataene hver for seg i flere parallelle seksjoner, som vist i figur 6.9.

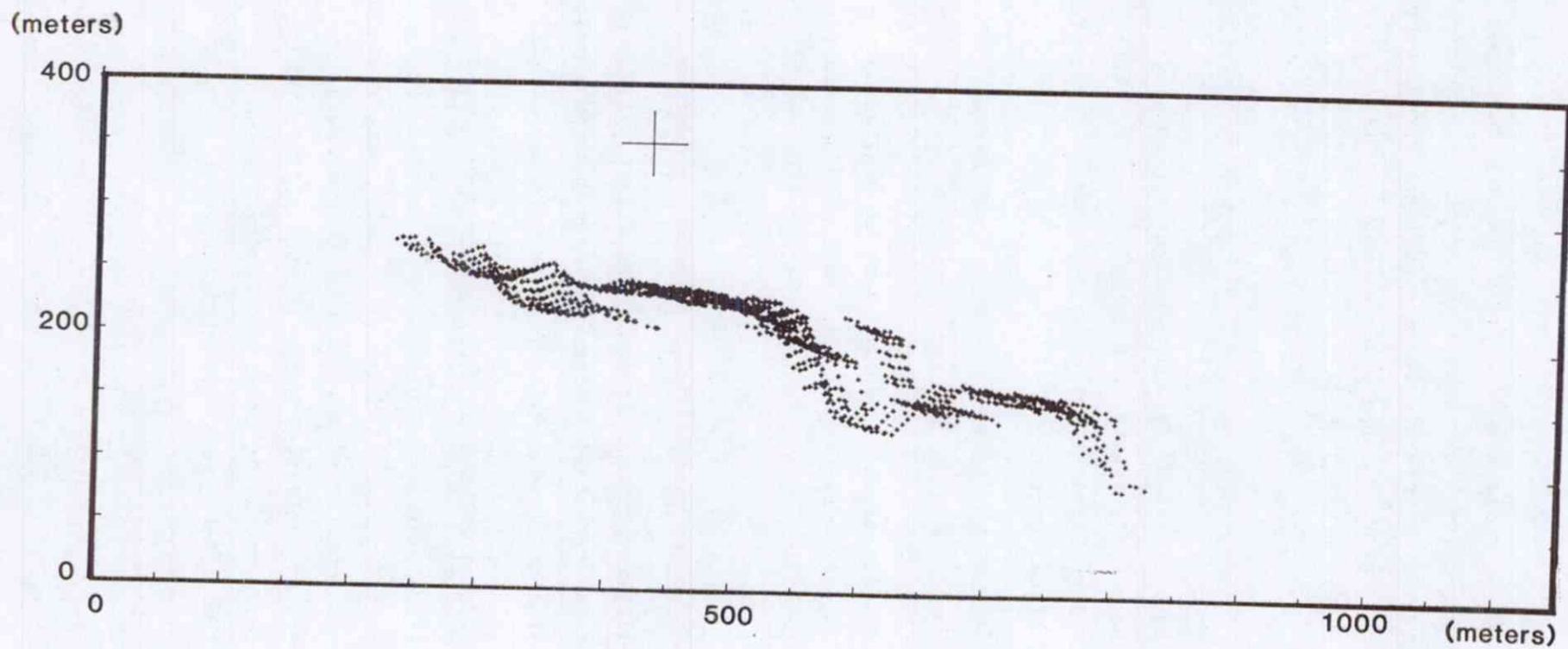


Fig. 6.8 CDP-posisjoner svarende til skudd/mottakerkonfigurasjonen vist på figur 6.7. Kryssene markerer altså midtpunktet mellom samtlige skudd/mottaker-kombinasjoner.

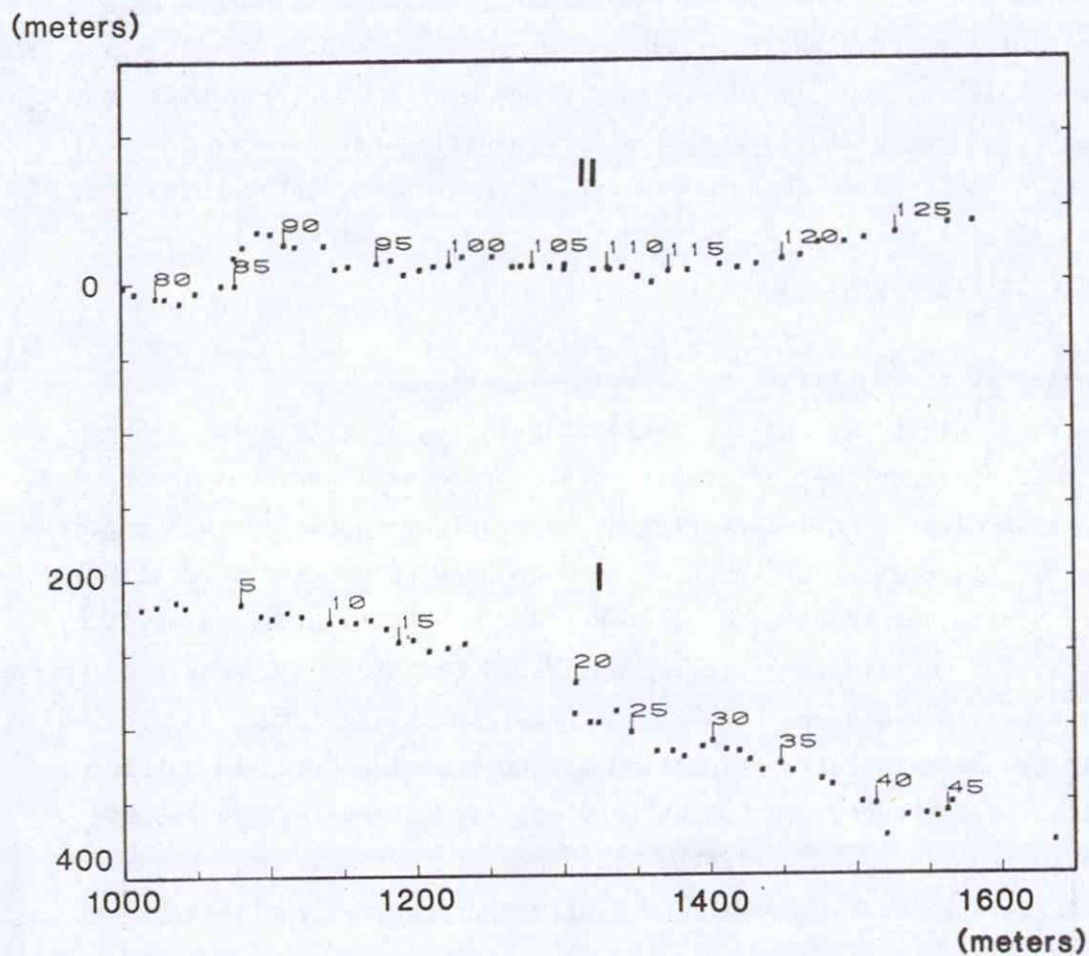


Fig. 6.9 Stasjonskonfigurasjon for to linjer i Løkken som ble brukt i et eksperiment med parallellprofilering. Ved siden av at hver linje ble skutt konvensjonelt, ble det foretatt målinger med skudd på linje I og mottagere på linje II.

Prosessering av "parallell-profiler"

Som nevnt i kap. 5.6 kan en få CDP-dekning mellom to tilnærmet parallele profiler ved å skyte på den ene og motta på den andre linjen. Denne teknikken, som ble første gang prøvd høsten 1980, har vist seg å kunne brukes med hell, forutsatt at prosesseringsmetodene er generelle nok. Figur 6.10 viser skudd/mottagerkonfigurasjon og CDP-dekning i et slikt tilfelle (Orkla, 1980). Den tilhørende seismiske seksjon er gjengitt i figur 6.11.

Utprøving av forskjellige prosesseringsalgoritmer

Et svært viktig punkt når det gjelder utvikling og tilpasning av nye prosesseringsalgoritmer er at det totale prosesseringssystem er oppbygd på en slik måte at implementering av nye rutiner enkelt lar seg gjøre. Dette vil igjen si at systemet må være oppbygd på modular form slik at en kan "gripe tak i" dataene på et hvilket som helst nivå i prosessen, og utføre de ønskede tester eller analyser. Brukeren må kjenne programmene så godt at han/hun på et hvilket som helst punkt kan foreta de nødvendige endringer. Dette er ofte et problem med de seismiske programsystemene som fins på markedet, idet de er bygd opp tildels av "svarte bokser" der bare input/output er direkte tilgjengelig; det skal ofte ganske gjennomgripende endringer til for å utføre prosedyrer som ikke er en standard opsjon i programpakken.

6.4 Programsystem for seismisk malmprospektering

I løpet av 1980 ble det ved NORSAR utviklet en ny programpakke for prosessering av land-data. Dette arbeid ble utført dels for å imøtekomme de krav en stilte til fleksibilitet i innsamlingsmønstrene med dertil hørende CDP-sortering, og dels for å ha større muligheter enn før til å utvikle og teste ut nye prosesseringsalgoritmer. Ved bruk av kommersielle prosesseringsselskaper er det nemlig svært begrenset hva en i praksis kan få gjort av ikke-standard prosedyrer, samtidig som en ikke har muligheten til å utøve den "prøve og feile"-metodikk som slikt arbeid alltid består i.

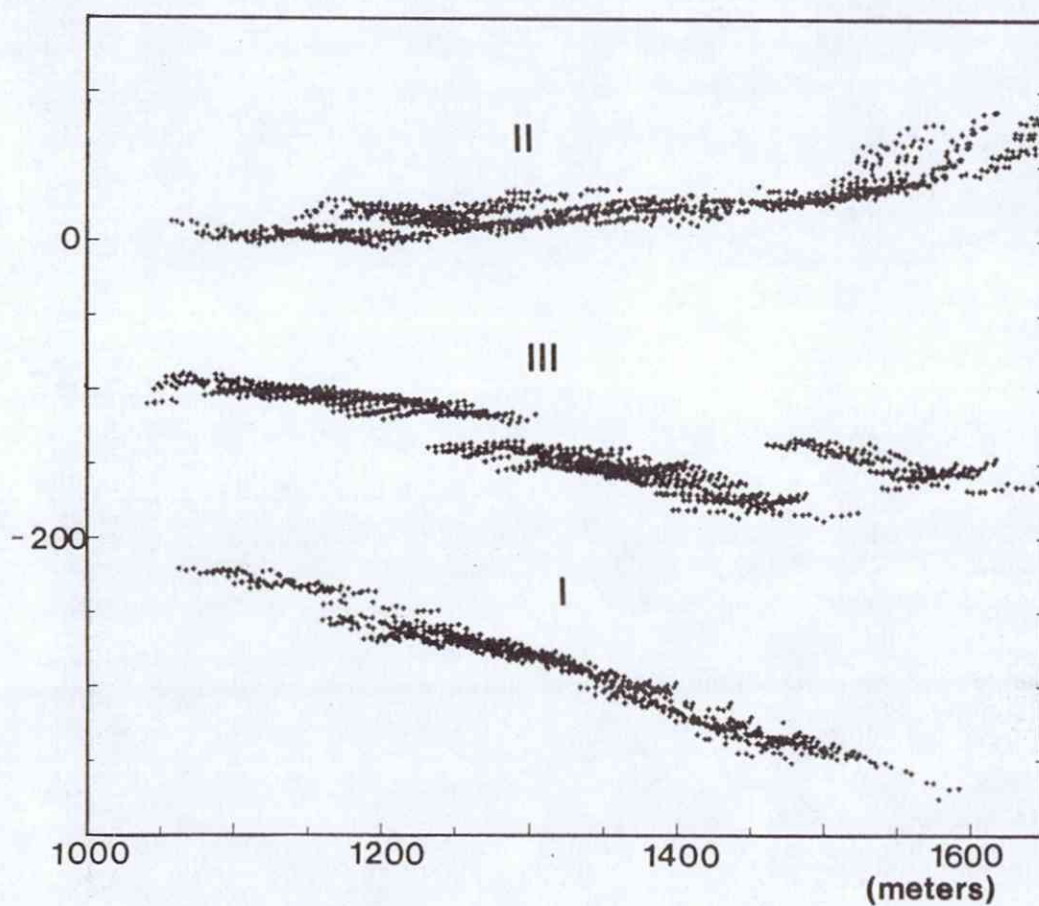


Fig. 6.10 CDP-konfigurasjoner svarende til stasjonskonfigurasjonene vist på figur 6.9.

- I. Konvensjonell profilering på linje I
- II. Konvensjonell profilering på linje II
- III. Parallellprofilering med skudd på linje I og mottakere på linje II

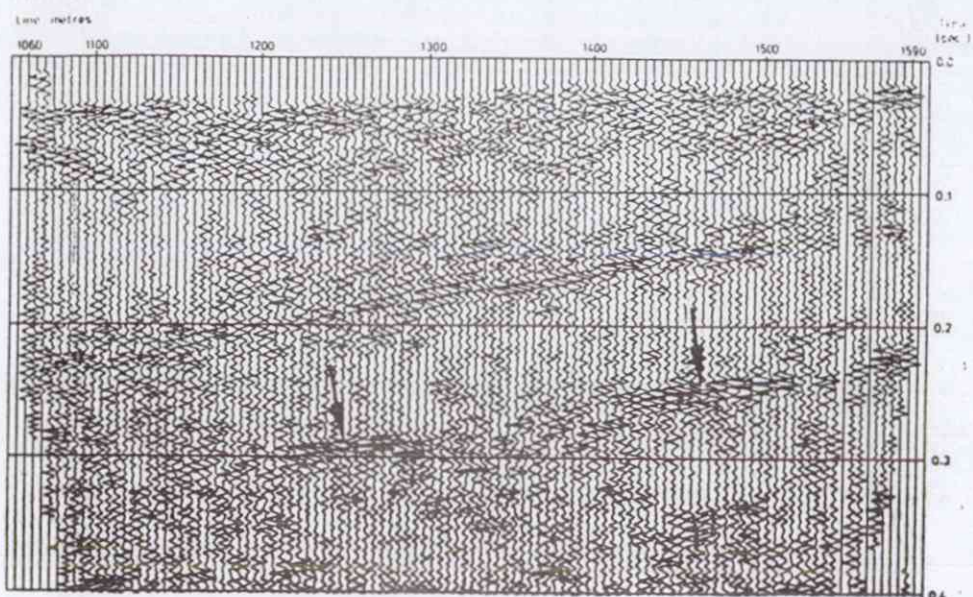
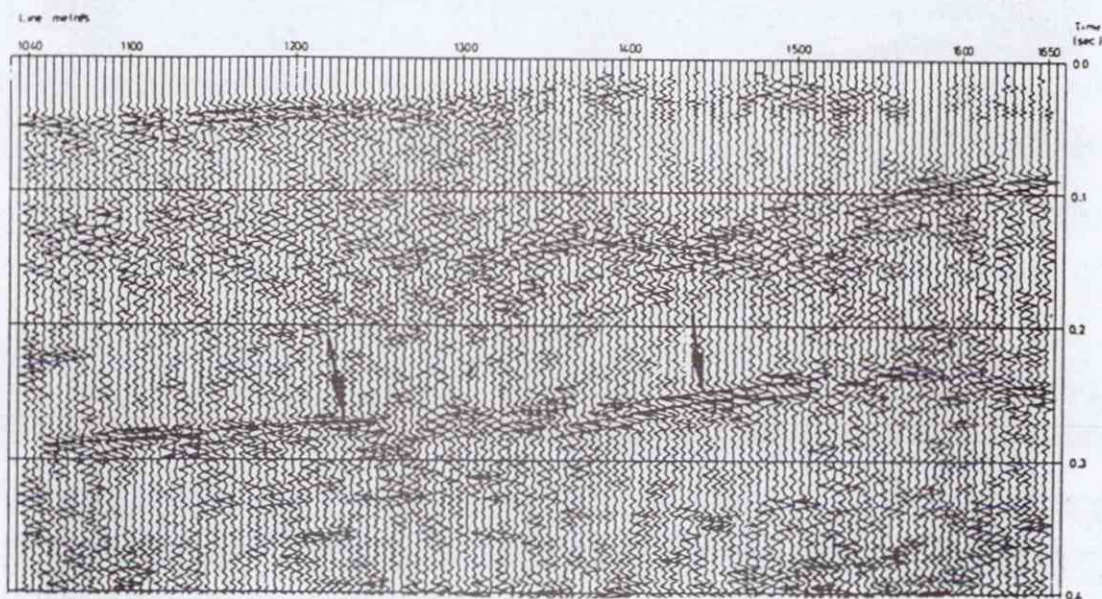
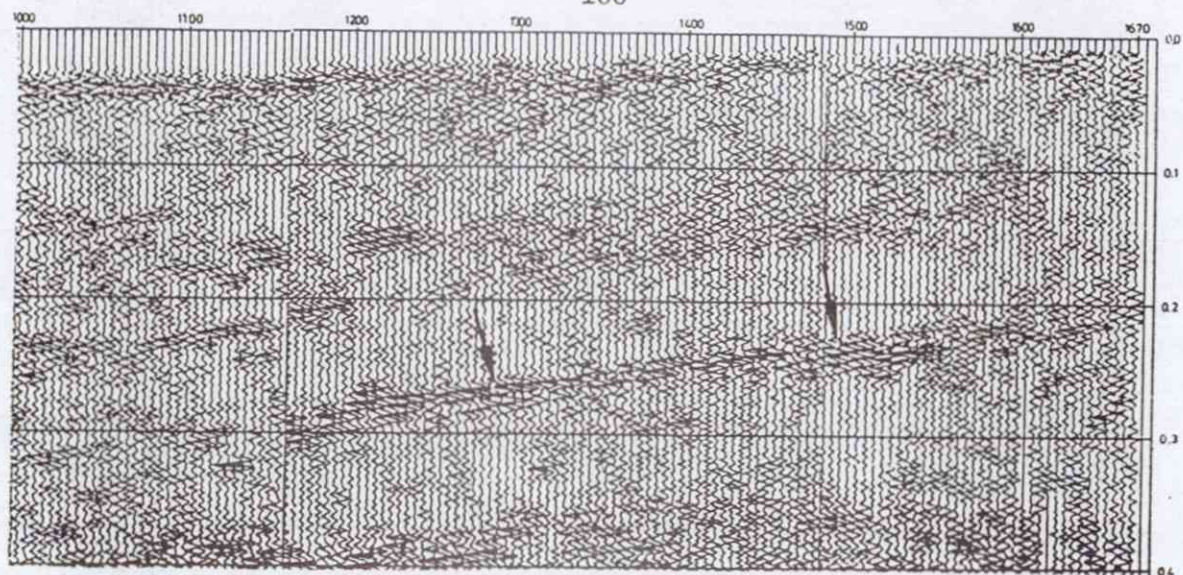


Fig. 6.11 Seismiske seksjoner for de 3 profilene vist i figur 6.10.

Arbeidet med NORSAR-pakken var i grove trekk fullført pr. 1. jan 1981, og elementene i systemet er angitt i figur 6.12 og 6.13.

DEMULTIPLEX-prosessor

Prosessoren leser data fra en eller flere felttapes, utfører demultipleksing, og legger dataene ut på disk ("multifile") i den rekkefølge de forekommer på tapen(e). Hver trase gis et identifikasjonsnr. og kan derfor senere meget hurtig kalles opp fra disken.

EDIT-prosessor

Denne prosessoren leser traser fra "multifile-disken" i henhold til spesifikasjoner som gis via en skjermtterminal. Her gis også inn nødvendig skudd/mottager-informasjon og stasjonskoordinater, dvs. samtlige parametere som definerer nødvendige feltvariable i innsamlingssystemet. Hver registrering (trase) blir merket med skudd- og mottager-indeks og lagt ut på en "edit file" sammen med samtlige feltparametere. Siden prosessoren leser traser fra disk (og ikke fra tape), er input-rekkefølgen fullstendig valgfri. Dette har store fordeler, idet feltdataene i visse tilfelle kan ligge temmelig usystematisk på tapen, spesielt dersom en rekke forskjellige felteksperimenter er foretatt parallelt.

"Edit-filen" inneholder nå samtlige data som skal prosesseres samtidig sortert i skudd-sekvensiell form, sammen med all nødvendig informasjon om innsamlingsgeometrien.

CDP-SORT prosessor

Denne prosessoren foretar profillinjedefinisjon og sorterer dataene i CDP-intervaller i henhold til de retningslinjer som er angitt i kap. 6.3 ("Crooked line processing"). Dataene legges ut på en CDP-file" i CDP-sekvensiell form. Profillinje-koordinater, CDP-intervall, sorteringsbredde, etc. defineres fritt av brukeren.

PROCESSING ELEMENTS

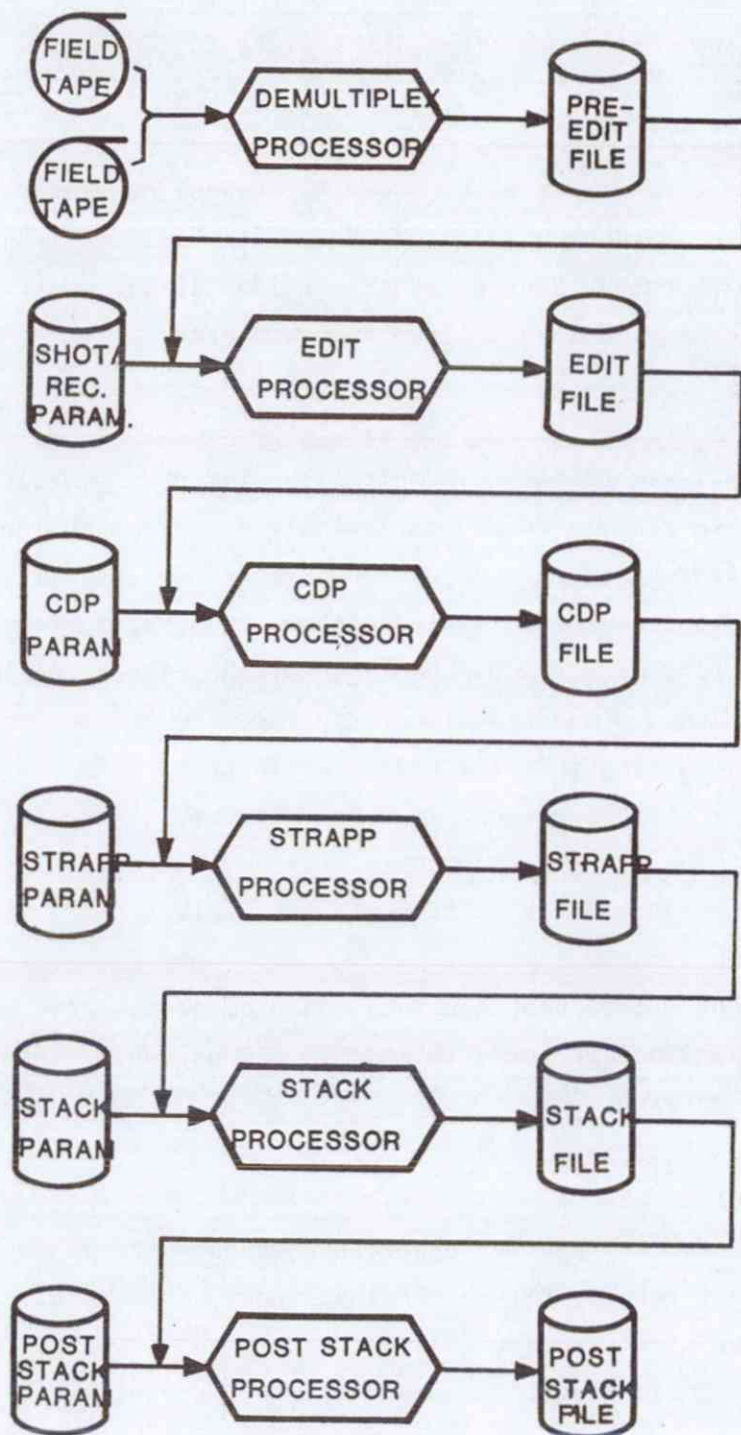


Fig. 6.12 Skjematisk fremstilling av hovedelementene i prosesseringspakken.

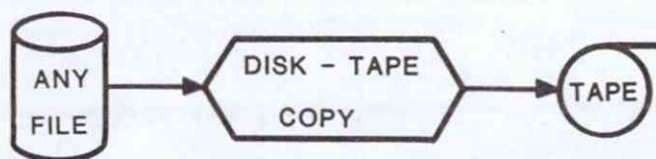
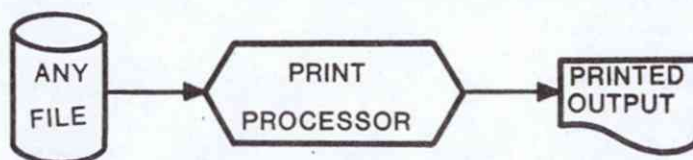
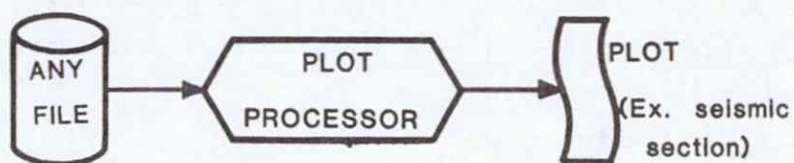


Fig. 6.13 Skjematisk fremstilling av hovedelementene i prosesseringspakken (forts.).

SINGLE_TRACE_processor (STRAPP)

Denne prosessoren foretar en eller flere operasjoner på hver enkelt trase som blir spesifisert av brukeren. Dataene kan leses fra forskjellige typer files (Edit-file, CDP-file, etc.), og et sett med på forhånd angitte operasjoner foretas på hver enkelt trase i den rekkefølge de ligger på input-filen. Brukeren kan spesifisere en eller flere av de følgende operasjoner:

- båndpassfiltrering
- NMO-korreksjon
- muting (f.eks. eliminasjon av luftpuls)
- nulling av trasen
- RMS-skalerting
- statiske korreksjoner
- ..

De ferdig prosesserte trasene legges ut på en ny disk file ("STRAPP-file"), klar til videre prosessering, evt. plotting.

STACK_processor

Denne prosessoren foretar summering av traser (stack) ut fra på forhånd gitte kriterier. Vanligvis foretas en CDP-stacking, dvs. prosessoren leser fra en CDP-sekvensiell file og summerer traser innenfor hver CDP-familie. Man har imidlertid også opsjoner for summering av skudd-sekvensielle data ("shot stack", se kap. 5).

Stack-prosessoren har også brukeropsjoner for å foreta bestemte data-reduksjoner før stack. F.eks. kan en kreve at traser som ikke oppfyller visse gitte kriterier ikke skal være med i stacken. Dette kan være traser med spesielt høyt støynivå, eller det kan være traser som har spesielt dårlig korrelasjon med andre traser innen CDP-familien. Videre kan brukeren manuelt forkaste traser på grunnlag av visuell inspeksjon av tidligere plot. Endelig kan det være spesielle forhold ved felt-betingelsene som gjør at brukeren vil forkaste data, f.eks. at visse registreringer er foretatt på løsmasser, eller at en kun ønsker at

traser med visse spesifiserte skudd/mottager avstander skal telle med i stacken.

I det hele har brukeren her meget stor fleksibilitet i bestemmelsen av sine utvalgskriterier, noe som er svært viktig når det gjelder å avgjøre hvilke registreringer som er av størst betydning for det endelige resultat.

Stack-prosessoren genererer en "stack-file" som inneholder de summerte traser - en for hvert CDP-intervall langs profilet.

POST-STACK_processor

Denne prosessoren er bygget med henblikk på videreprosessering av stackede seksjoner. Den inneholder bl.a.

- multitrace balance
- trace mixing
- dip enhancement filter.

Prosessoren benyttes kun i de tilfeller at flere traser fra stakken inngår samtidig i prosessen. Prosesser som arbeider suksessivt på enkelttraser (så som båndpassfiltere, rms-skalering, etc.) er lagt inn i prosessoren STRAPP (single trace processor) som beskrevet tidligere. Denne prosessoren kan selvsagt også operere på stakkede data.

I tillegg til de nevnte prosessorer, som kan ses på som ledd i en kontinuerlig prosesseringsrekkefølge, eksisterer i tillegg en rekke "utility-prosessorer", som illustrert på figur 6.13.

PLOT_processor

Plotteprosessoren kan lese data fra en hvilken som helst av data-filene beskrevet ovenfor og plotte traser på en grafisk skjerm eller på papir. Brukeren har full frihet til bestemmelse av plotte-skala, plottetekst, plotte-teknikk, etc., som gis interaktivt.

PLOT-prosessoren har også opsjon for plotting av skudd/mottager-konfigurasjoner, CDP-konfigurasjoner, horisontal- og vertikal-snitt gjennom profilet etc.

PRINT-prosessor

Print-prosessoren kan i likhet med plot-prosessoren lese data fra en hvilken som helst datafile og liste ut all nødvendig informasjon om profilet/dataene. Dette kan være koordinat-lister for skudd/mottager-stasjonene, CDP-posisjoner, offset, etc., eller det kan være rene tallverdier for amplitudeutslagene på trasene.

COPY-prosessor

Denne prosessoren kan kopiere datafiles fra disk til tape og omvendt. Etter endt prosessering er man selvsagt interessert i permanent lagring av en rekke datafiles, og omvendt vil man ofte gå tilbake for å reprocessere/videreprocessere på et senere tidspunkt.

Generelt om programsystemet

Programsystemet er tilpasset en IBM 4341 med 2 Mbyte memory, Tektronix grafisk skjermterminal og Versatec elektrostatisk plotter. All bruker-definert input gis interaktivt via dataskjerm, og de forskjellige prosessorer initieres interaktivt i den rekkefølge som brukeren ønsker. Dataene kan inspiseres og kontrolleres på et hvilket som helst nivå i prosessen. Dessuten er systemet fullstendig disk-orientert, og magnetbånd benyttes overhodet ikke i selve prosesseringen, men kun som endelig lagringsmedium. Dette gir en meget fleksibel prosesserings-metodikk hvor man ikke på forhånd er knyttet til faste prosedyrer.

En har også tatt sikte på å utvikle en modulær programstruktur hvor nye prosesseringsalgoritmer enkelt lar seg implementere på et senere tidspunkt. På denne måten har en lagt opp til et system som ivaretar såvel rutinemessige prosesseringsfunksjoner som mer spesielle forsknings- og utviklingsfunksjoner.

7. ANVENDELSE AV METODEN I LØKKEN OG SULITJELMA

I det etterfølgende er det trukket fram noen eksempler fra forsøksstadiet på metodeanvendelse i Sulitjelma, og noen eksempler fra bruken av metoden i både Løkken og Sulitjelma etter at man kunne anse metoden som anvendbar. Anvendelsen av metoden i Sulitjelma i 1980-81 med påfølgende boring i 1982, tilsvarende for Orkla Vest, Løkken, i perioden 1980-82, er ikke finansiert som en del av dette NTN-prosjektet.

7.1 Gjertrudfjell, Sulitjelma 1976

Hensikten med målingene i 1976 var å undersøke hvilke refleksjoner metoden på daværende tidspunkt kunne gi mellom Sagmo og Jakobsbakken og særlig hvordan refleksjonene fra Jakobsbakkens tomme gruve kunne registreres. Profilene ble i 1977 utvidet til å dekke andre deler av Sagmo og videre imot nord, men med et annet registreringsopplegg enn for 1976. Figur 7.1 viser profilene for de enkelte år, samt plasseringen av aktuelle borehull.

Måleresultater

Seksjonen Sagmo-Jakobsbakken 1976 (figur 7.2), viser en rekke signaturer under et dyp av ca 0.5 sek (ca 1.2 km). Forventede malmsoner ligger høyere mot dagoverflaten.

Nevneverdig er anomali 1 og anomali 2 på henholdsvis 400 og 450 meters dyp, henholdsvis ved 2700-2970 m og 3320-3500 m i profilet. Førstnevnte viser i den migrerte seksjonen en ganske god stratigrafisk kontinuitet. Anomalien synes å opphøre brått imot syd, men avtar gradvis mot nord. Anomali 2 antas å korrespondere med gamle Jakobsbakken gruve.

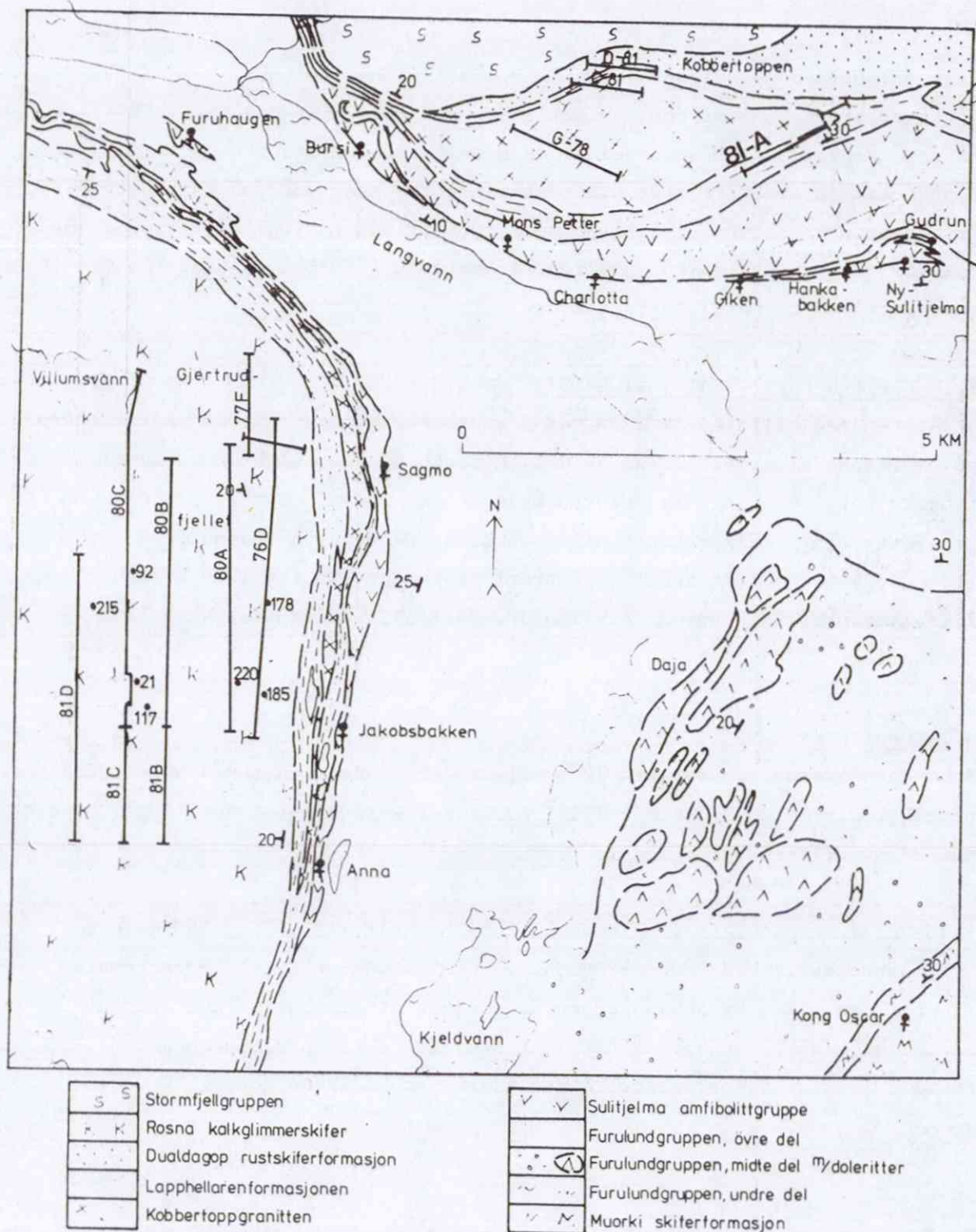


Fig. 7.1 Sulitjelma malmfelt med angivelse av refleksjonsseismiske testlinjer (76D, 77F og G-78) og prospekteringslinjer i 1980 og 1981. Viktige diamantborehull er angitt med lokalisering i overflaten og hullnummer.

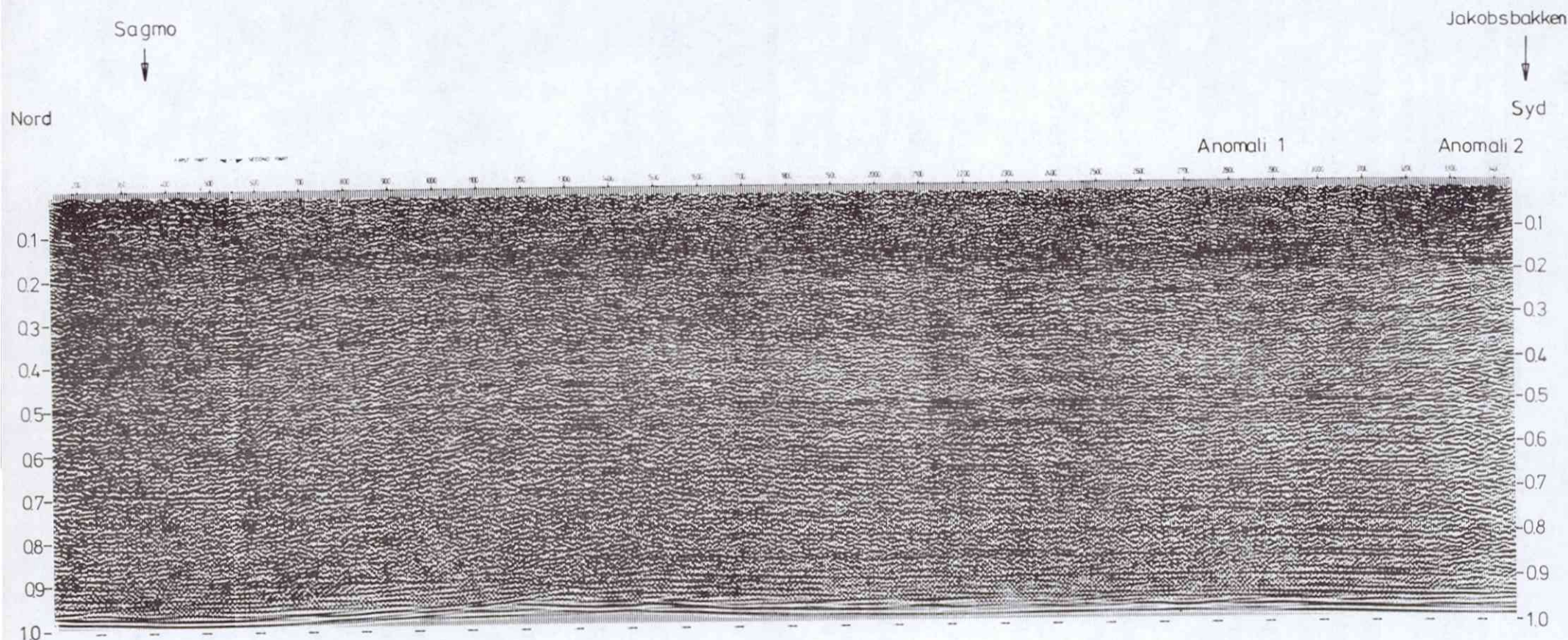


Fig. 7.2 Seismisk seksjon (fra målingene på Gjertrudfjellet, Sulitjelma 1976). Seksjonens øvre kant er merket med referanse til profilet, fra 150 til 3450 m, og det vannrette plan skyldes en standard referanse høyde over havet. Nedover i seksjonen (y-aksen) refereres til refleksjonsdyp i sekunder; dvs tiden lyd pulsen bruker på å gå ned til en reflektor og tilbake til geofonen i overflaten. Seksjonen kan således betraktes som et to-dimensjonalt snitt vinkelrett på bergartslagene nedover i dypet. Målestokken er henholdsvis 1:12500 (x-aksen) og ca 1:30000 (y-aksen). 0,1 sek tilsvarer ca 250 m i dypet (seismisk hastighet = 5000 m/sek).

I intervallet 0.15 til 0.2 sekunder, dvs. ca 375 til 500 meters dyp, er det i hele seksjonens lengde foruten de to nevnte anomalier svakere antydning til kortere og små refleksjoner. Støybildet er imidlertid for sterkt til å kunne betegne noen av disse som egne markerte anomalier. Den nordligste delen av seksjonen viser et noe annet støybilde, forårsaket av et annet måleopplegg i denne del. Her finnes det en markert dypanomali på ca 1750 meters dyp med et svakt fall mot syd.

Geologisk tolkning

Dypanomaliene faller mot syd langs profilet, noe som stemmer overens med det økende dyp for de tilsvarende stratigrafiske enheter i Baldoaiivve-synklinalen. Selve refleksjonsflaten kan skyldes flatliggende amfibolittlinser på dette dyp i Furulund-skiferen.

Anomali 2 ligger der man ville forvente en refleksjon fra den vannfylte Jakobsbakken gruve. Vannfylte gruverom vil forårsake en tilnærmet totalrefleksjon, noe som karakteriserer denne anomalien. Dette sees ut fra det signalfattige området under refleksjonen.

Anomali 1 opptrer i en lengde på ca 300 meter i den seismiske seksjonen, (figur 7.2). Anomaliens dyp stemmer overens med Sulitjelma amfibolittgruppe og følgende refleksjonsmuligheter er til stede:

- a) Malmineralisering/sidebergart (klorittbresje eller glimmerskifer)
- b) Massiv amfibolitt/klorittbreskje
- c) Massiv amfibolitt/glimmerskifer
- d) Glimmerskifer/klorittbreskje.

Av disse gir mulighet a) den høyeste refleksjonskoeffisienten. De andre mulighetene burde egentlig gitt en lang rekke og markerte anomalier over hele seksjonen, hvorav mulighet d) er den mest vanlige i dagoverflaten av feltet. 500 m nord for Jakobsbakken-forekomstens nordlige begrensning i utgående ligger en linseaktig og mer massiv amfibolitt

innenfor Sulitjelma-amfibolittgruppe. Akseforløpet på denne er usikker. Det er derfor en mulighet for at anomalien kan representere undersiden av denne linsen, men linsen har en utstrekning mot nord på over en kilometer i utgående, mens anomalien representerer kun 300 meter. Bare boring kan avklare denne anomalien.

Boring og hull-logging

DBH 185 skjærer anomalien og viser en svak sulfidmineralisering over ca 8 meters mektighet, hvorav ca 4 m holder ca 10-15% sulfid. En rekke borekjerne-prøver mellom 201-484 m ble undersøkt i laboratorium mhp lyd hastighet og spesifikk vekt, og ut fra dette er det beregnet impedans for de ulike geologiske enheter og herav refleksjonskoeffisient for grenseflatene (se figur 7.3). Hull-loggingen indikerer at anomalien skyldes det sulfidførende laget.

Hvorvidt dette ene hullet representerer en middels skjæring i en fattig mineralisering eller en skjæring fra et fattigt parti innen en brytbar forekomst er ikke avklart (se figurene 3.4 og 3.5).

7.2 Gjertrudfjell, Sulitjelma 1977

Måleresultater

Figur 7.4 viser en av seksjonene fra måleforsøkene i 1977. I intervallet 0.15-0.20 sek, dvs 375-500 meters dyp, kan det skimtes to anomalier hver på lengde av 50 m - 100 m. Anomali 1 i området 820-870 m ved ca 0.160 sekunder (400 m) og anomali 2 i området 960-1030 ved ca 450 meters dyp.

Geologisk tolkning

Anomali 2 faller sammen med de mektigste partier for Sagmo-forekomsten. Anomali 1 er trolig en kisanrikt del av malmsonen i nordkant av forekomsten.

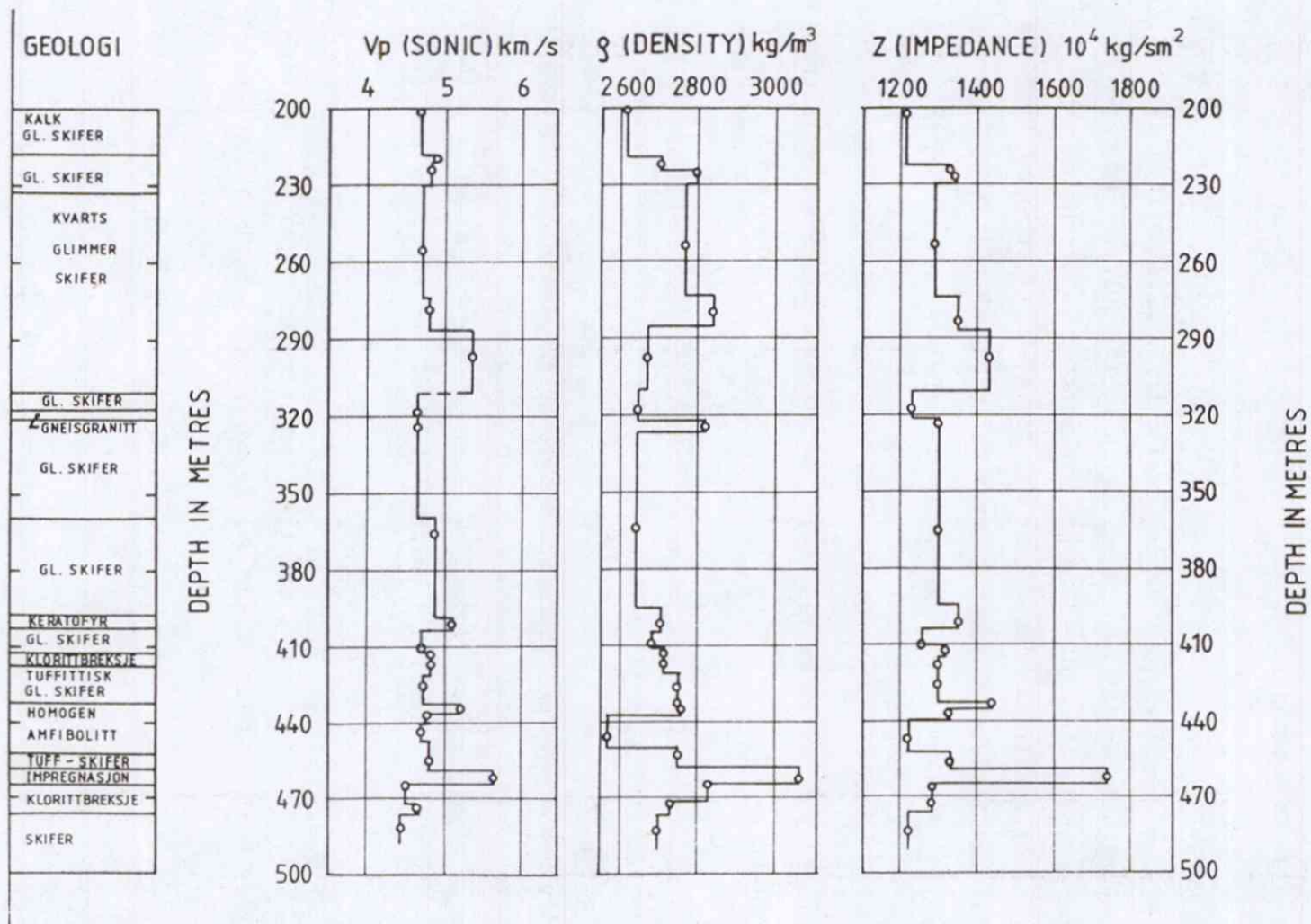


Fig. 7.3 Borekjerneundersøkelser mhp hastighet, tetthet og beregnet impedanse plottet med referanse til geologiske enheter. DBH 185, Gjertrudfjell, Sulitjelma.

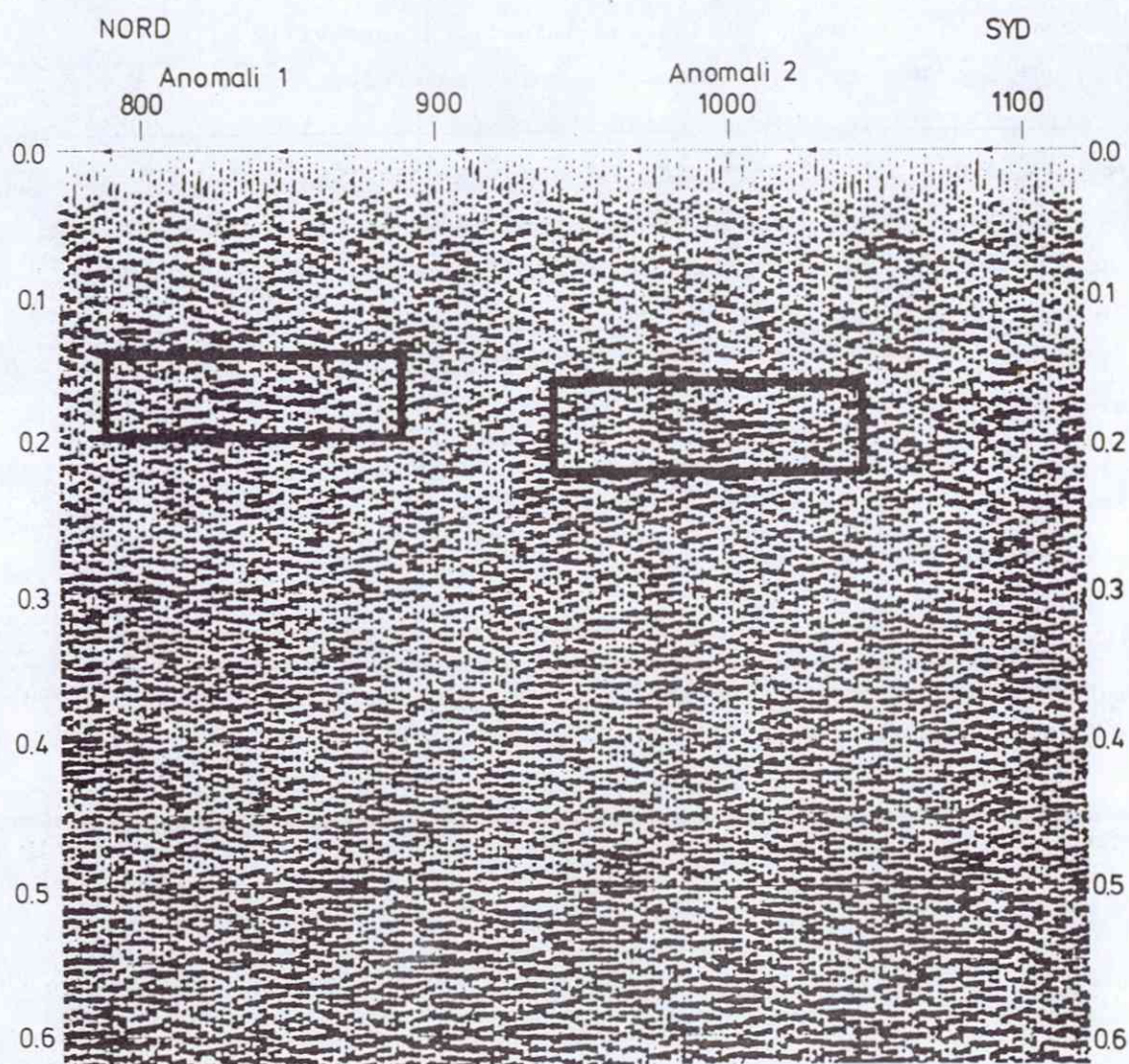


Fig. 7.4 Fra måleforsøkene over Sagmo-forekomsten i 1977.

7.3 Kobbertoppen, Sulitjelma 1978

Hensikten med forsøket i 1978 var i første rekke å vurdere hvorvidt de heterogene lagene innen Sulitjelma-amfoblittgruppe ville gi refleksjoner ved anvendelse av metoden i Nord-gruvefeltet. Profilet ble lagt slik at det krysset Mons Petter-aksen, for dermed å kunne oppdage malmsoneens eventuelle videreføring mot nordøst. Samtidig dekket profilet utdrevne deler av Charlotta-II i vest. Ved vurdering av måleresultatene må det tas i betraktning at større endringer av metodeopplegg og data-behandling først kom etter 1978.

Måleresultater

Figur 7.5 viser en seismisk seksjon fra det omtalte profil. Det er merket av 3 områder med mulige refleksjoner som er gjort gjenstand for geologisk tolkning.

Geologisk tolkning

Geologien i feltet er relativt godt kjent og kan denne beskrives som angitt i figur 7.6.

Anomali 1 på ca 750 m dyp tolkes til å representere de utdrevne deler av Charlotta-II, lokalt betegnet som driftsområdet Wagner-vest. Refleksjonen fra det utdrevne gruveområdet var først ventet å ligge i området 550 til 650 m langs seksjonen, men da strøket og fall for de geologiske lag endres fra topp til bunn, er det ikke urimelig at refleksjonen har havnet i området rundt 700-750 m.

Anomali 2 tolkes til å representere underste del av Sulitjelma-amfibolitten, her representert med klorittbreskje omgitt av skifer på begge sider (se figur 7.6). Det bør bemerkes at det er påvist betydelig malmføring i Giken-malmsone i dette området, hvilket også kan forklare denne anomalien.

Anomali 3 har en beliggenhet og størrelse som skulle representere forlengelsen mot nordøst av nåværende kjente Mons Petter.

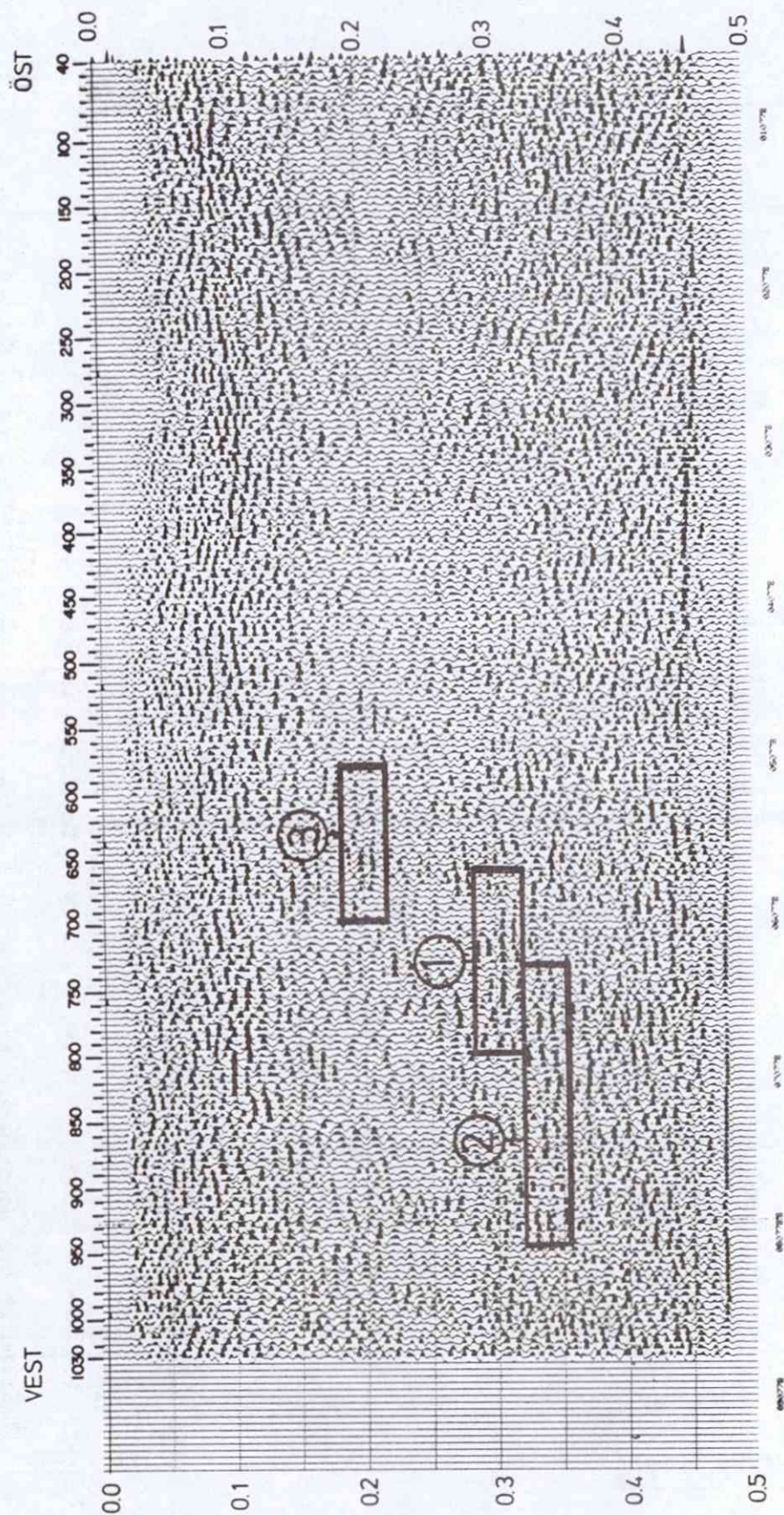


Fig. 7.5 Seismisk seksjon fra Nordgruvefeltet, Sulitjelma 1978.

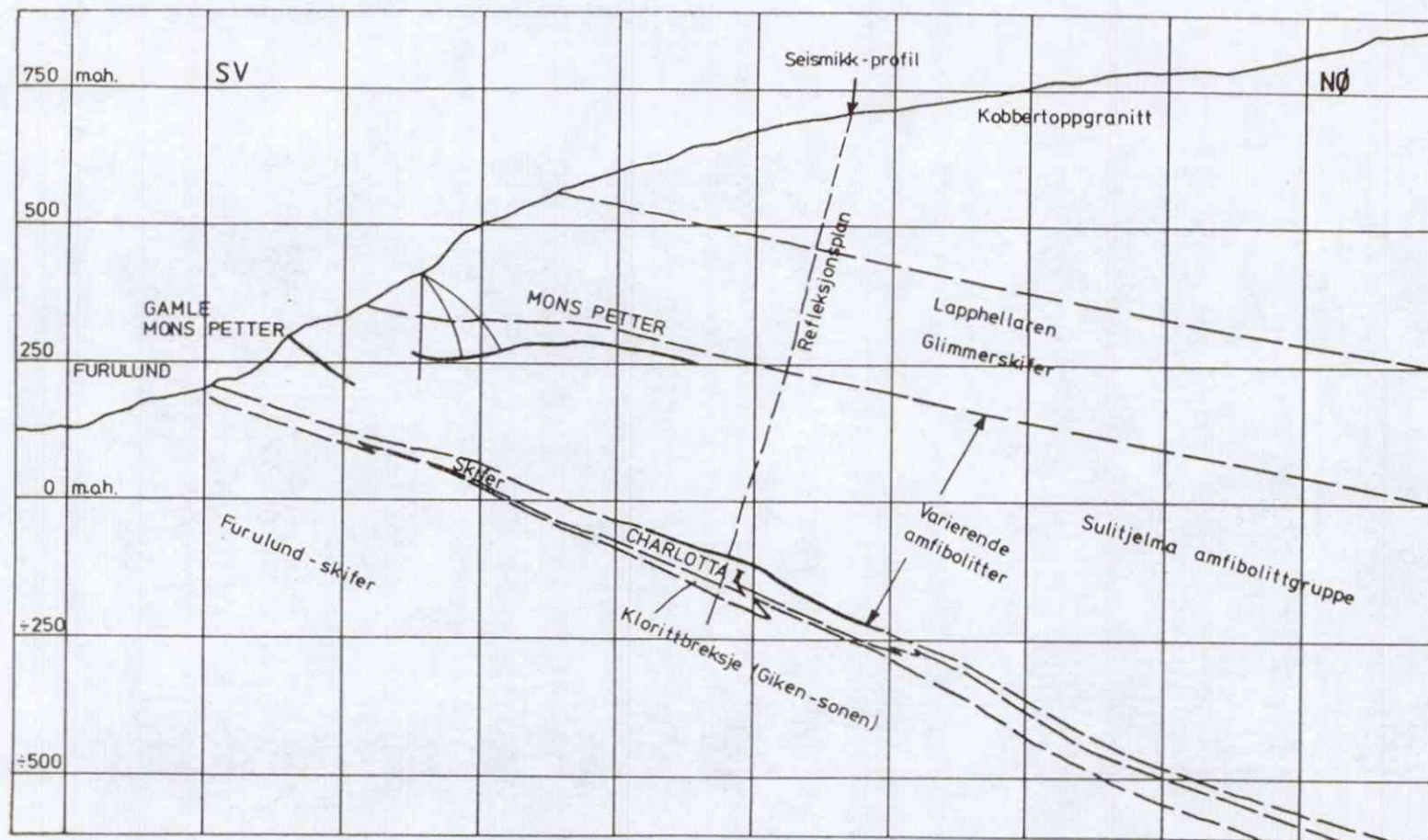


Fig. 7.6 Snitt fra Nordgruvefeltet, Sulitjelma. Med pil er det angitt hvor seismikkprofilet krysset snittet. Tykkere heltrukken strek angir malm, evt. brutt malm.

Profilen dekker også de mer sentrale deler av Charlotta-II, og skulle eventuelt vise refleksjon i profilen mellom 100-300 m, og ved et dyp av ca 0,3 sek. Disse områdene var imidlertid i 1978 på god vei til å bli avbygget slik at refleksjon fra malmareal og gruveromsareal har opphevet hverandre (destruktiv interferens).

Sammenligning med AMT-målinger

Parallelt med de seismiske målinger i 1978 ble det foretatt AMT-registrering. Foruten en svak indikasjon der Mons Petter lå, ble det påvist flere elektriske ledere på forskjellig dyp i østre halvdel av seksjonen. Senere boring har ikke påvist malm, men det er derimot verifisert soner med sulfidholdig klorittbreskje, men ikke av en slik rikhet at sulfidmengden representerer en vesentlig egenvekstsøkning av bergarten.

De foregående eksempler var alle fra forsøksmålingene under metode-tilpassningen. De etterfølgende eksempler må betraktes som anvendelse av prosjekteringsresultatene.

7.4 Gjertrudfjell, Sulitjelma 1980-81

Målsetningen ved disse prospekteringsarbeidene var å dekke områdene syd for Sagmo, og særlig rundt Jakobsbakken gruve med sikte på å kartlegge reflektorer i interessante dyp og forløpet av disse med tanke på malm-lignende strukturer. Området er også forsøkt dekket med AMT-målinger for å kunne evaluere feltet med begge metodene, og derved sitte igjen med de mest aktuelle boreobjekter.

Måleresultater

Seksjonene for de fire profilene i Sydfeltet viser en lang rekke refleksjoner og det vil føre for langt å beskrive alle i denne rapporten.

Derimot kan seksjonene i figur 7.7a og b og 7.9 a og b tjene som eksempler fra arbeidene.

Som seksjonen i figur 7.7 viser, finnes det ved 0.35 sekunders dyp et bånd av refleksjoner. Videre opptrer det også en rekke andre refleksjoner i den

sentrale og undre del av seksjonen. Ut fra geologiske kriterier er det refleksjonene på 0.35 sek dyp som er av interesse for den videre tolkning.

Ved tolkningen trekkes sammenligninger fra seksjon til seksjon (80-A, 80-B, 80-C og 81-D); se figur 7.8. Følgende parametre er da av interesse:

- 1) beregnet anomalidyp,
- 2) horisontal migrasjon pga fallet i de geologiske lag, evt kjente foldestrukturer,
- 3) signaturens signal/støy-forhold og signaturens kontinuitet i seksjonen,

Figur 7.8 viser en tolkning presentert i et horisontalkart.

Figur 7.9 er hentet fra et område syd for Jakobsbakken gruve og viser en av områdets markerte og veldefinerte refleksjon. Figur 7.10 viser feltplotterers utskrift for et skudd med en rekke på 24 geofoner fra dette området.

Geologisk tolkning

Ved konturering av dypet for de evaluerte anomalier, gir disse et kotemønster som harmonerer med fallet i Baldoaivvesyklinalen. Derimot synes det å være en viss uoverensstemmelse med undersøkelsene på dypet av Jakobsbakken og tidligere tolket geologisk nivå fra undersøkelsene i DBH 119 og DBH 121. De sistnevnte er trolig boret for kort.

Som figur 7.8 illustrerer, viser anomaliområdene et vestlig akseforløp og ligner mye på et malmareal.

Sammenligning med AMT-data

Området med de to markerte anomalier i figur 7.8 er også målt med AMT. Resultatet fra disse målingene ga en anomali som korresponderte godt med seismikken.

Boreresultater

Boring mot det nordligste anomaliområdet ble ikke fullført i 1982 pga store problemer med fjellet (svelleleire).

a)

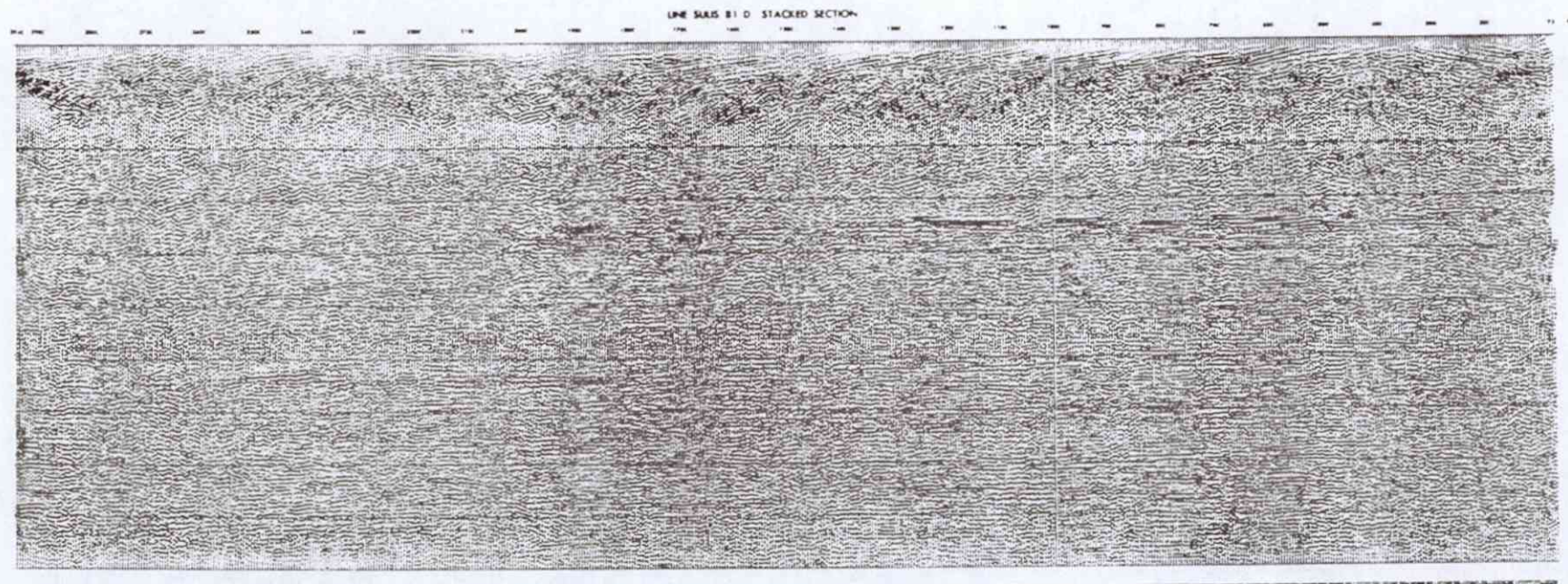


Fig. 7.7 a "Stacked" seksjon fra profil 81-D i Sydgruvefeltet i Sulitjelma. Refleksjonene ved 0,35 sekunder ligger i samme dyp som forventede malmer kan finnes og kan således oppfattes som malm-indikasjoner.

b)

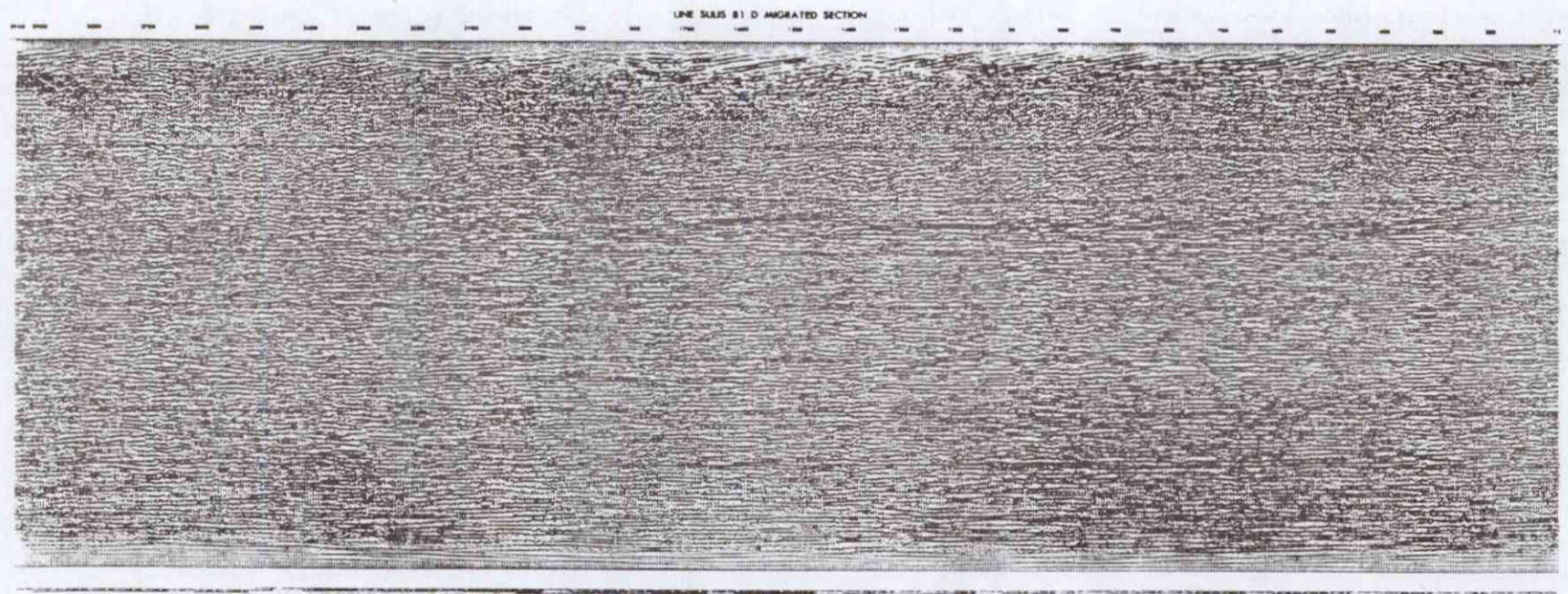
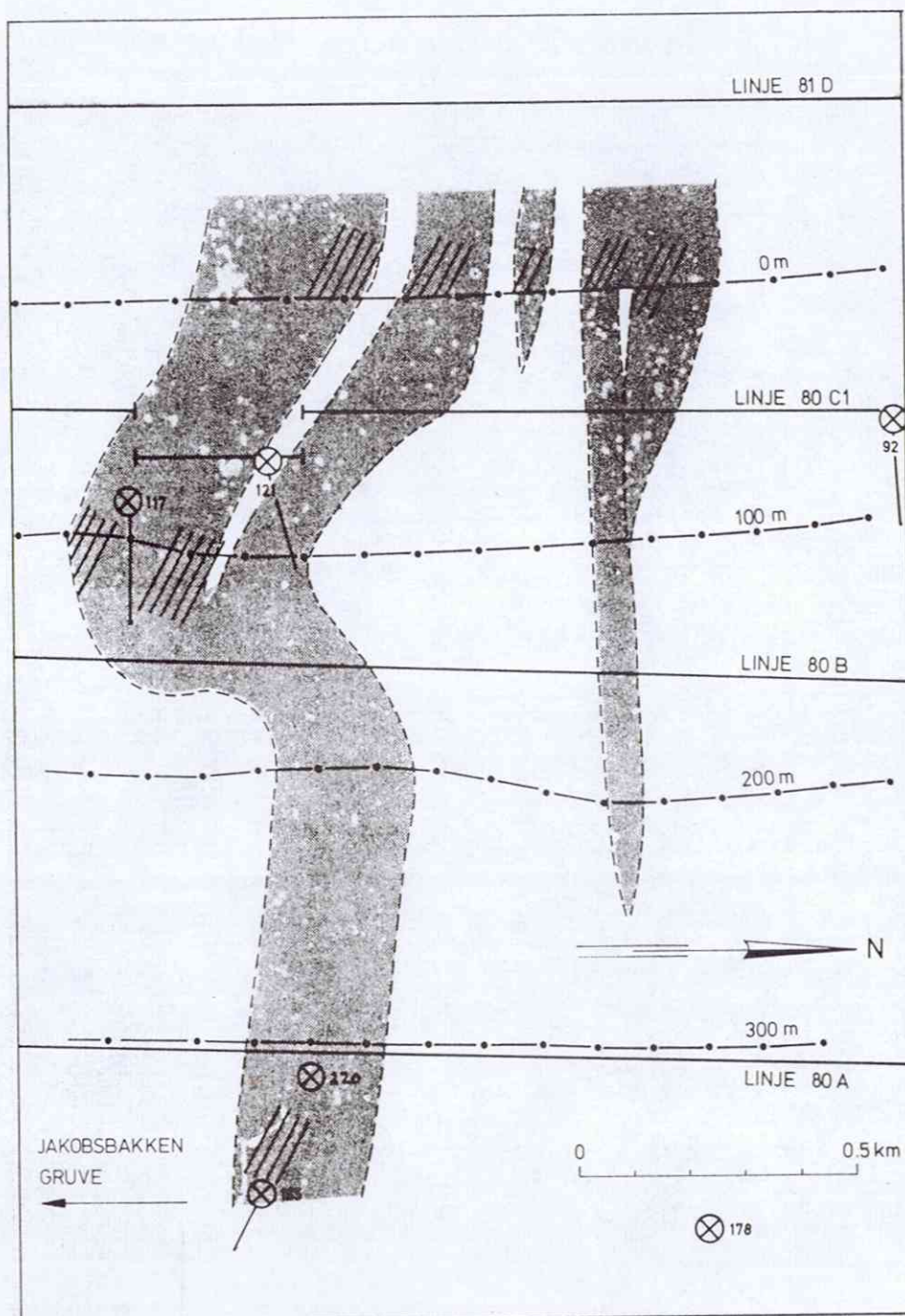


Fig. 7.7 b Migrert seksjon fra profil 81-D i Sydgruvefeltet i Sulitjelma.



TEGNFORKLARING:

- | | |
|-------------------|---|
| <u>LINJE 80 B</u> | REFLEKSJONSSEISMISK PROFIL |
| | DIAMANTKJERNEBORING M/ HULLBANEPROJEKSJON |
| | NIVÅKURVER (moh) FOR SEISMISKE REFLEKSJONER ("ANOMALIER") |
| | ANTATT BEGRENSNING AV SEISMISKE "ANOMALIER" |
| | MARKERT REFLEKSJON (PRIORITERT MÅL) |

Fig. 7.8 Eksempel på tolkningskart for deler av målingene i Sydgruvefeltet, Sulitjelma.

a)

- 130 -

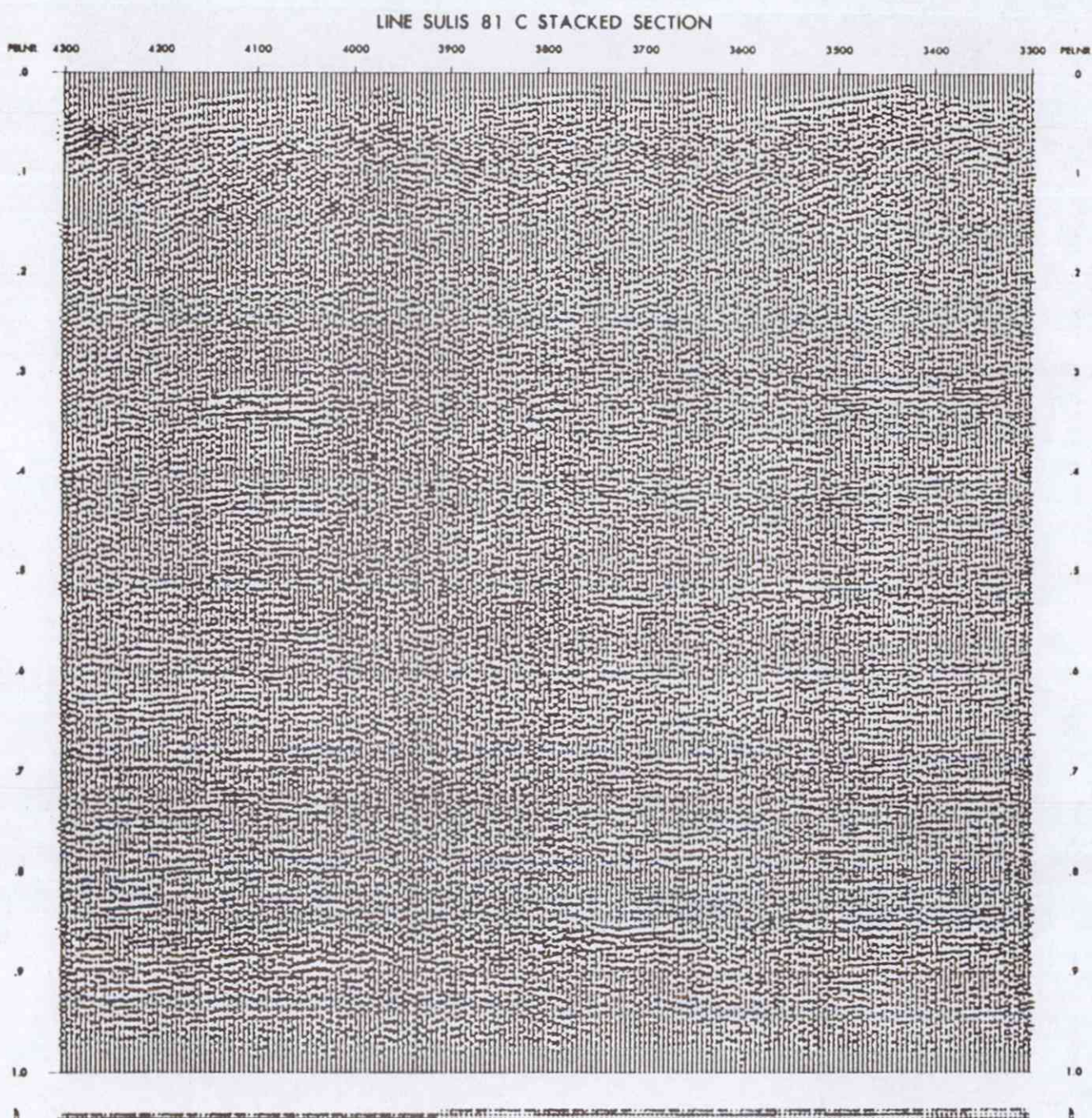


Fig. 7.9 a Utsnitt fra profil 81-C i Sydgruvefeltet i Sulitjelma. Foruten å illustrere en relativt god reflektor ved 0.34 sekunders dyp, ser man samtidig hvorledes refleksjonen forflyttes ved migrasjonsteknikker, se fig. 7.9 b.

b)

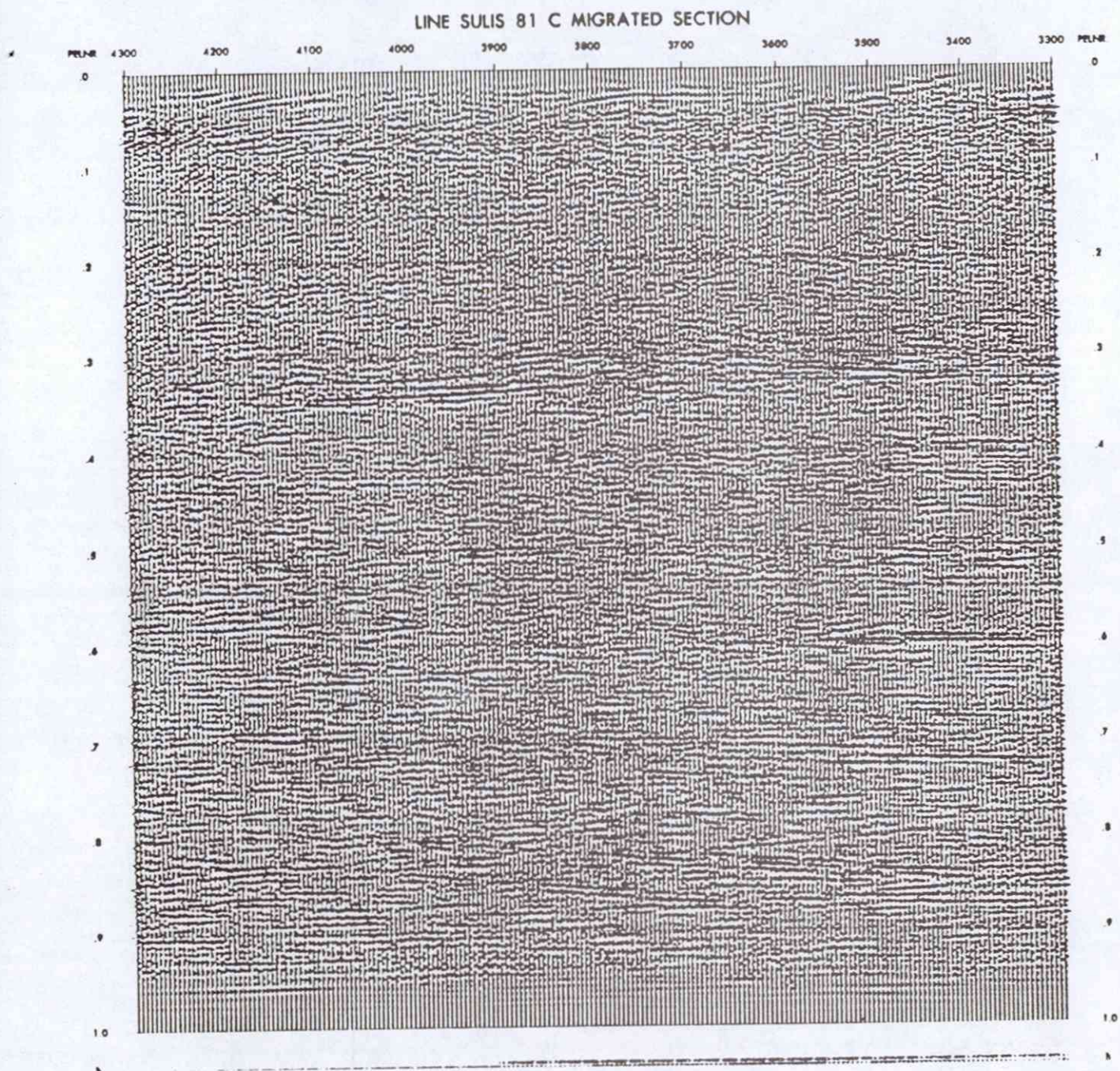


Fig. 7.9 b Utsnitt fra profil 81-C i Sydgruvefeltet i Sulitjelma.

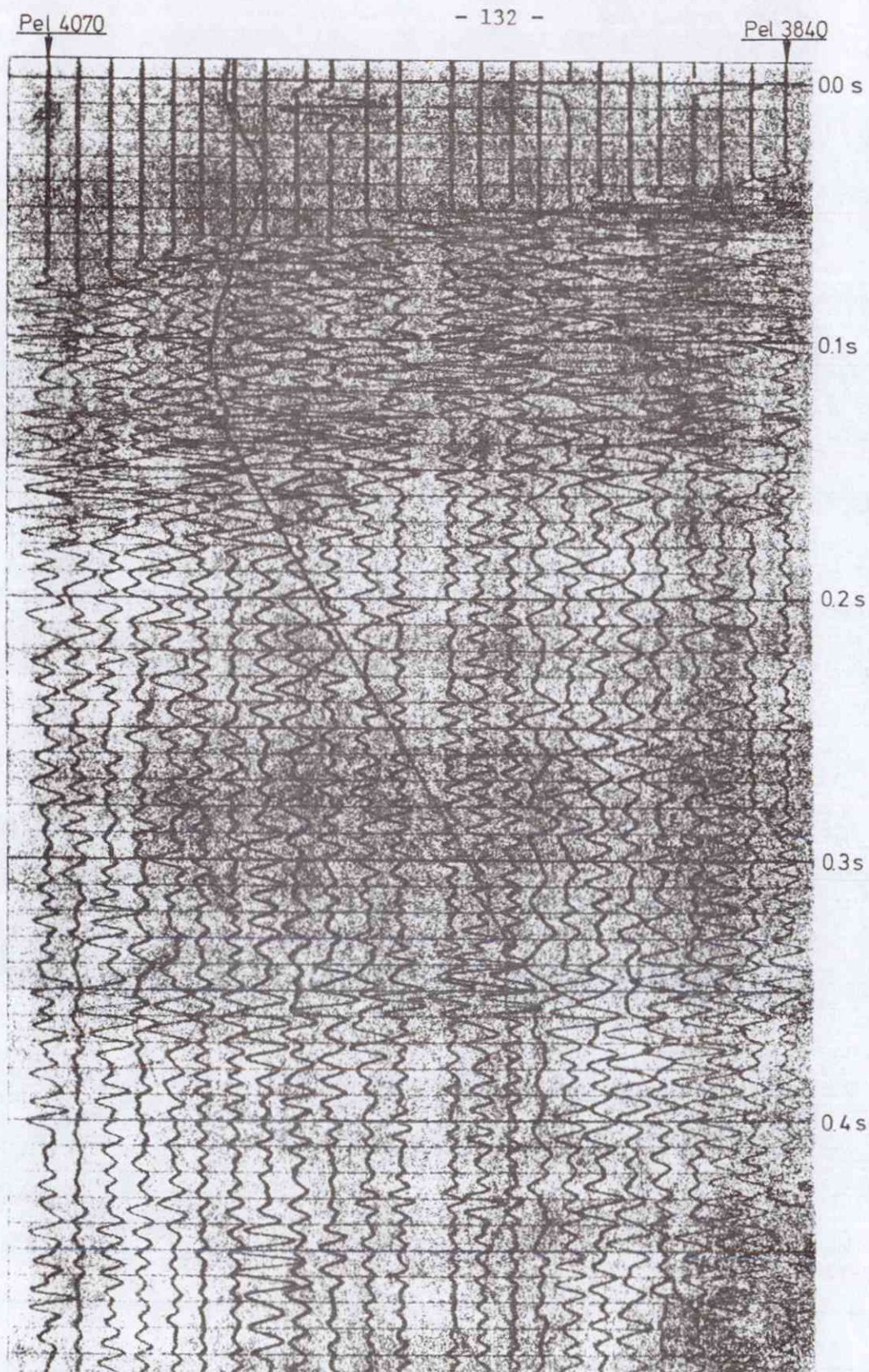


Fig. 7.10 Feltplottutskrift fra 81-C, Sulitjelma, viser geofonregistreringer i profilintervallet 3840-4070. Den kraftige refleksjonen ved 0.35 sek i fig. 7.9 framkommer ved sammenstilling av mange slike enkeltregistreringer.

Et borehull mot det sydligste anomaliområdet viste ca 1 m med kis-impregnasjon rundt både 518 m og 527 m nede i hullet, sistnevnte også med 10 cm massiv magnetkis. Det ble ikke funnet andre geologiske enheter hvor en egenvektskontrast skulle tilsi en refleksjon. Hullet er ikke hastighetslogget med seismikk, og en har foreløpig ikke målt lydhastighet på kjernene.

7.5 Orkla Vest, Løkken 1979-82

Hensikten med målingene var å undersøke Løkkenmalmens eventuelle fortsettelese mot vest. Programmet er gjennomført etappevis og revidert flere ganger underveis.

Figur 7.11 viser målelinjene, registreringslinjene og plasseringen av to diamantborehull.

Måleresultater

Det ble registrert en tydelig reflektor i den nordlige del av området (R_1). Reflektoren viser et fall mot syd og dybden ble beregnet til 650-900 meter. Midt i feltet ble det registrert en reflektor på 800-900 meters dyp (R_2) i 2 profiler. Den hadde ikke sammenheng med R_1 . Flere mindre reflektorer ble ikke ansett som interessante mht malm da de var av begrenset utstrekning. Både R_1 og R_2 var mulige refleksjoner fra malmhorisonter. Figur 7.12 viser en seksjon av R_1 og figur 7.13 en seksjon av R_2 .

Figur 7.14 viser den seismiske seksjonen i linje VIII. Reflektoren som strekker seg over hele profilet antas å ha samme årsak som den i linje V (figur 7.13). Det vil si grensen mellom gabbro og grønnstein. Reflektoren ligger ved ca 200 ms i nord og faller mot syd til ca 300 ms.

Den geologiske kartleggingen i dagen viser stor variasjon i bergartene med vekslning mellom sure felsitter og grønnsteiner. I området mellom 20-50 ms kan enkelte reflektorer skyldes bergartsgrenser og ikke bare ha sin årsak i støyforhold.

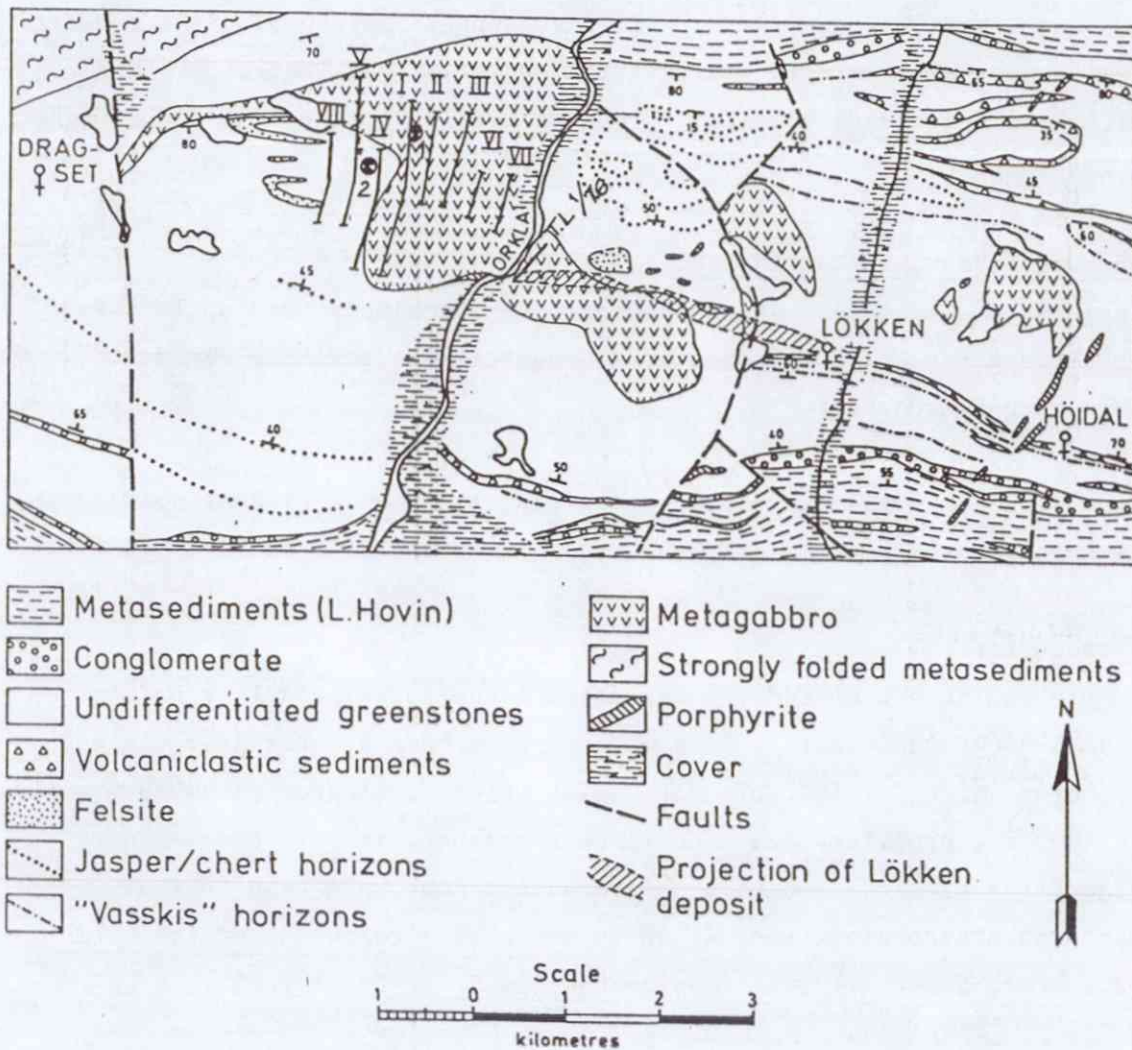


Fig. 7.11 Kart over Løkken-området som viser de seismiske profiler og diamantborehull. TL 1/76 er testlinjen over kjent malm. Linjene I - VIII er målt i perioden 1979 - 1982.

— I Seismisk linje ● Diamantborehull

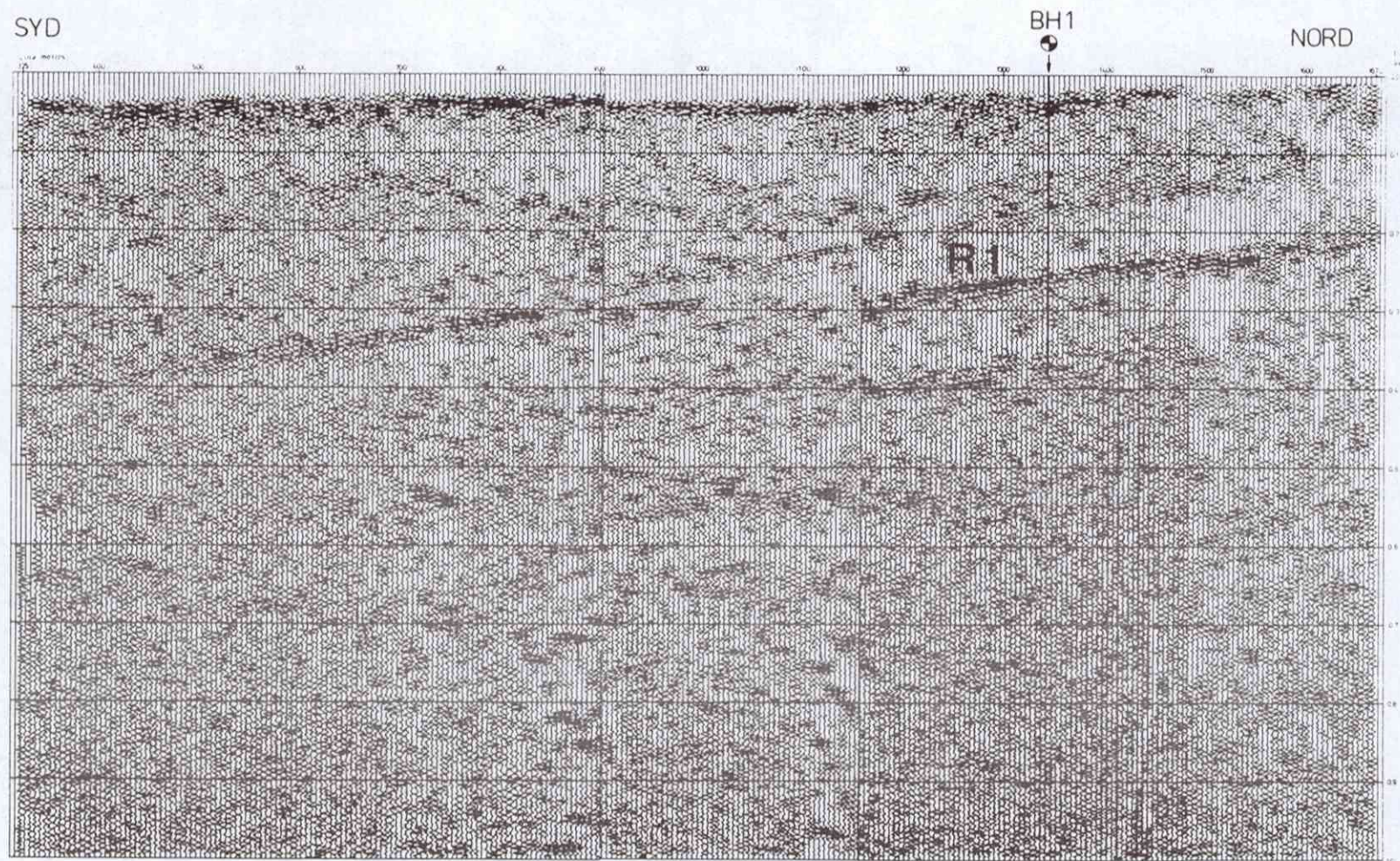


Fig. 7.12 Seismisk seksjon, linje I, som viser reflektor R_1 og borehull 1.

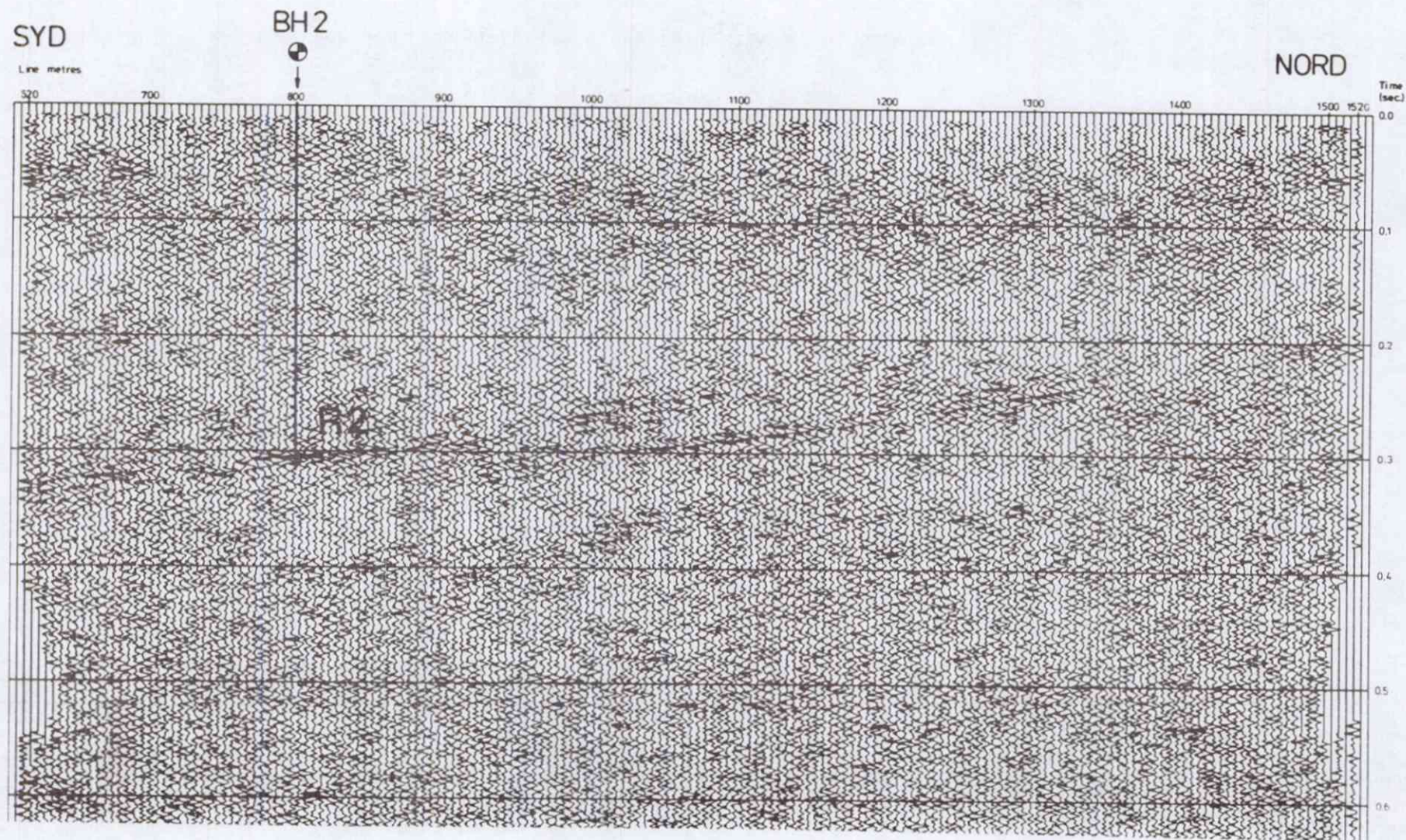


Fig. 7.13 Seismisk seksjon, linje V, som viser reflektor R₂ og borehull 2.

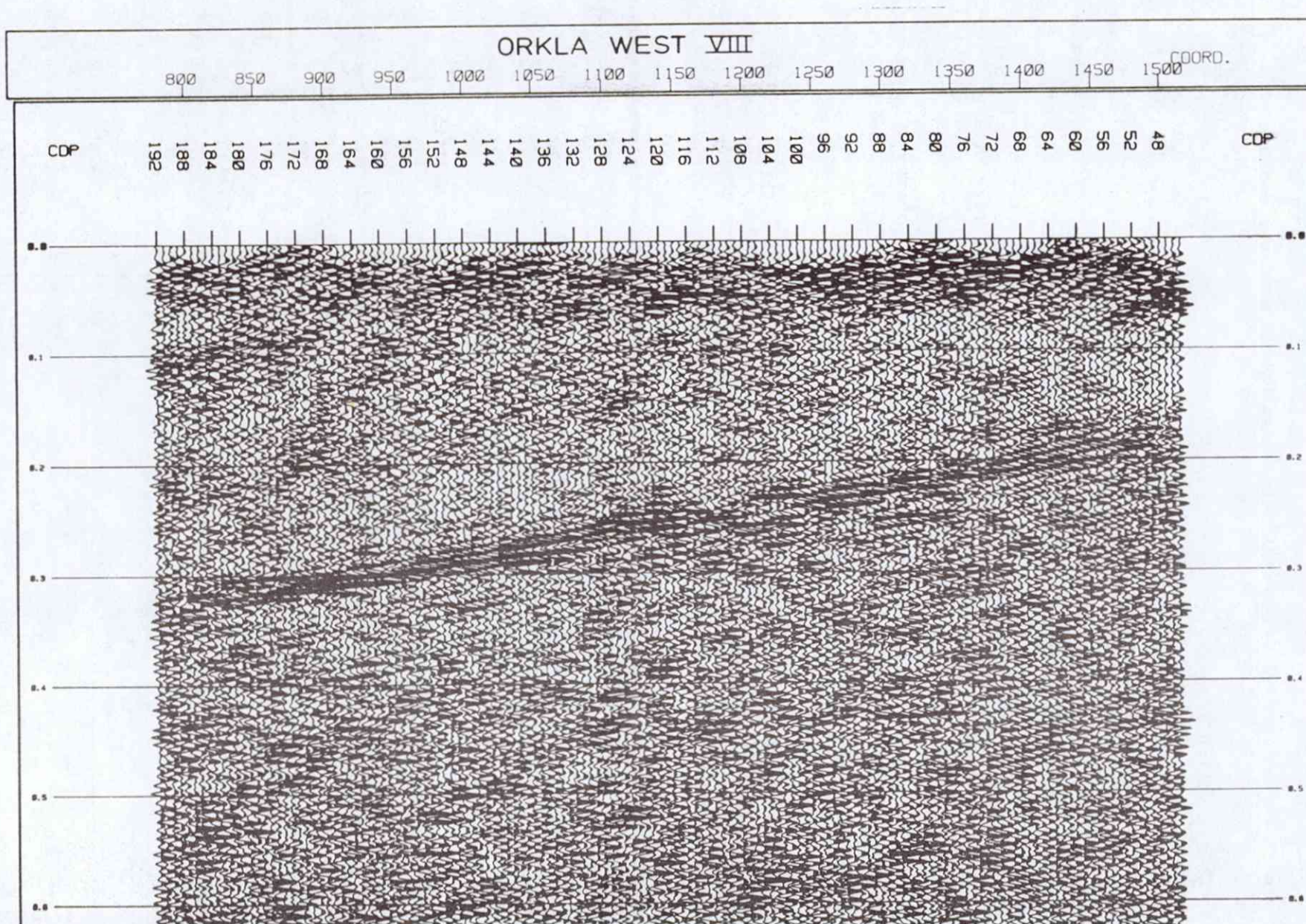


Fig. 7.14 Seismisk seksjon, linje VIII.

Geologisk tolkning

Den geologiske tolkning av reflektorene R_1 og R_2 ble satt opp med tre alternativer:

- 1) Grense gabbro/grønnstein
- 2) Sulfidforekomst
- 3) Sedimentlag i grønnstein

Sammenligninger med testprofilene over kjent malm på Løkken ga prosjektet betinget optimisme. Mulighetene for feiltolkning var imidlertid store. Gabbroen inneholder en rekke opptil 10 meter mektige diabasganger. Disse syntes imidlertid ikke å gi seismiske refleksjoner da egenvekt og hastighet er temmelig lik i begge bergarter. Større svakhetssoner, skyvesoner var også et usikkerhetsmoment.

Sammenligning med AMT-målinger

Audiomagnetotelluriske målinger (AMT) ble utført i de samme profiler som de seismiske målinger. Disse målinger ville registrere eventuelle ledere på større dyp. Målingene har en svakhet i at det er vanskelig å tolke anomaliene og dybdeangivelsen er usikker.

AMT-målingene ga en klar anomali i samme område som reflektor R_1 og en noe usikker anomali i området ved reflektor R_2 .

Kjerneboring

Borehull 1 ble boret mot reflektor R_1 . Det var inhomogen gabbro ned til 674 meter. Mellom 674 og 680 meter ble det registrert kleberstein, og deretter gabbro. Dette er første gang at kleberstein er observert i Løkkenfeltet. Klebersteinen var meget skifrig mot den øvre gabbrokontakten.

Laboratoriemålinger utført på NTH viser en klar kontrast mellom gabbro og kleberstein mht hastighet og egenvekt. Resultatene av disse målingene sammen med beregnet impedans er vist i figur 7.15. Beregning av refleksjonskoeffisienten på gabbro/klebersteinskontakten er -0.07.

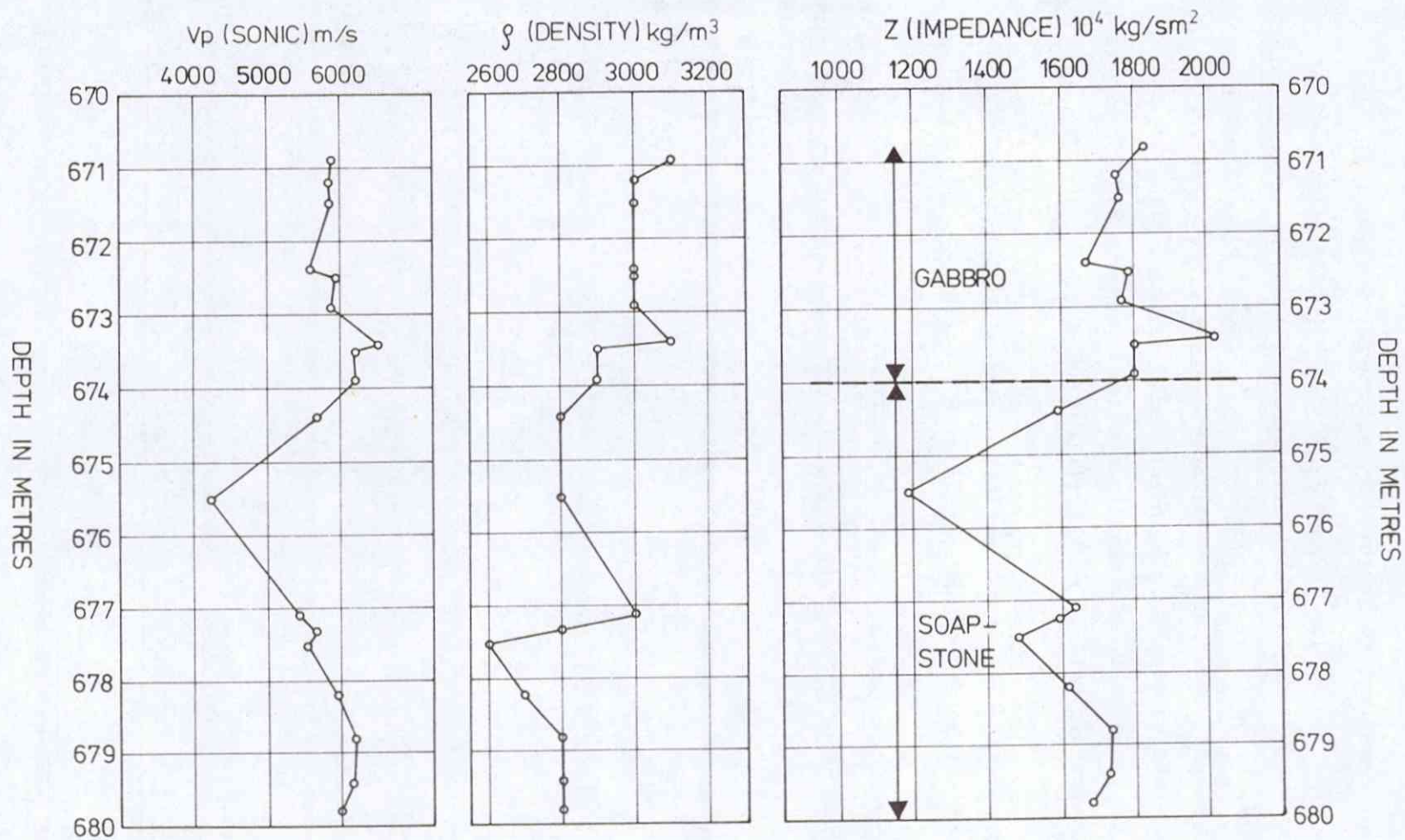


Fig. 7.15 Laboratoriemålinger av hastighet, tetthet og impedans over reflektor R₁, borehull 1.

Borehullet viser en gradvis overgang mellom gabbro og grønnstein omkring 900 meter.

Borehull 2 ble boret mot reflektor R₂. Det startet i grønnstein, men etter ca 60 meter ble det gabbro. Gabbroen er inhomogen og inneholder en rekke ganger. Overgangen gabbro/grønnstein er gradvis, men under 890 meter er grønnstein så å si enerådende. Ved 890 meter ble det boret gjennom en oppknust sone. Laboratorieundersøkelser viser en markert forskjell både mht hastighet og egenvekt ved 890 meter. Figur 7.16 viser hastighet, egenvekt og beregnet impedans i området 840-930 meter. Dette gir en beregnet refleksjonskoeffisient på -0.13.

Diamantboringene har vist at den refleksjonsseismiske metode kan registrere grenser mellom geologiske formasjoner langt bedre enn på forhånd antatt.

De arbeider som nå er gjennomført i området gir grunnlag for nye geologiske tolkninger.

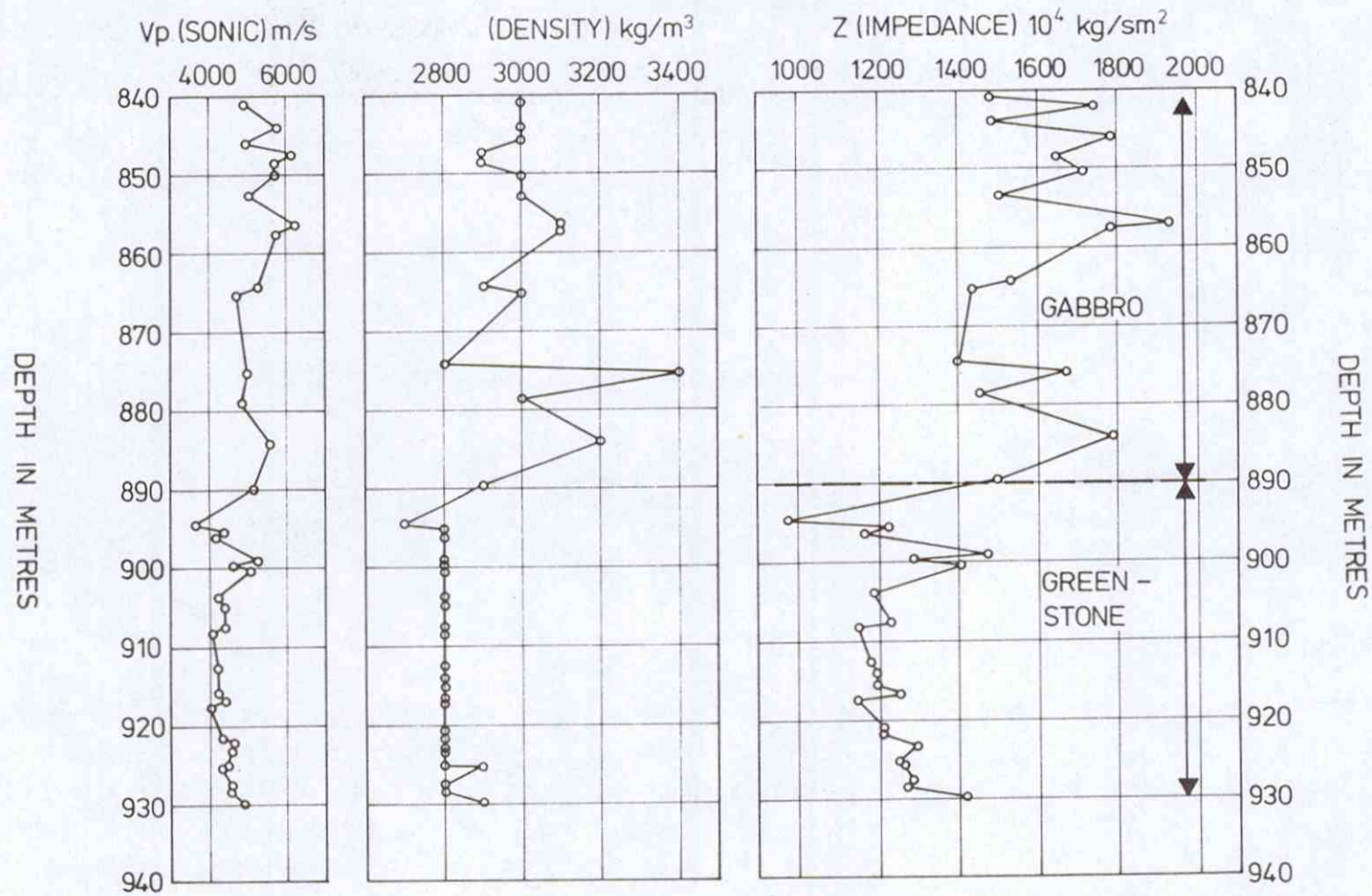


Fig. 7.16 Laboratoriemålinger av hastighet, tetthet og impedans over reflektor R₂, borehull 2.

8. PLANLEGGING OG FELTBETINGELSER

8.1 Planlegging

Ved planlegging av refleksjonsseismiske målinger er det viktig å innhente og gå igjennom alle tilgjengelige geologiske og geofysiske data for det aktuelle området, slik at strøk, fall, bergartstyper, oppsprekning etc er kjent. Flybilder er et utmerket hjelpemiddel for oversiktsplanlegging før befaring. Spesielt viktig er det å vurdere de geometriske forhold for refleksjon. Et malmkropp med form som vist i Figur 4.4 er ideelt i refleksjonsseismisk forstand. Når malmkroppen dreies slik at det ikke lenger er nær plant med overflaten, vil refleksjoner oppnås i posisjoner som tilsvarende skjæring med overflaten og malmkroppens normalplan. Når malmkroppen dreies slik at den nærmer seg et vertikalt eller steiltstående objekt vil det fremdeles gi en seismisk respons. Den seismiske responsen er i dette tilfelle satt sammen av diffrakterte bølger heller enn plane bølger fra reflekterende flater.

Slik metoden hittil er utviklet, er det avgjørende at målingene utføres over blottet eller nær blottet fjell. En bør også merke seg at god måleeffekt oppnås ved detonasjon av ladninger i vannfylte borehull og at derfor tilgang på vann i måleområdet er en betingelse for effektiv gjennomføring av selve måleoperasjonen.

Befaring og grovrekognosering av fjellblotninger og mulige profiltraseer danner hovedelement i en god planleggingsfase. Herunder må også base/bøforhold for feltarbeidet samt inn/uttransport av utstyr og personell vurderes.

8.2 Stikking, hullboring, geofonmontasje

Stikking omfatter detaljfastsetting av skudd/registreringspunkter (stasjoner) og koordinatbestemmelse av disse (X,Y,Z). Hver stasjon består av et stasjonsmerke (pel med nummer eller meterangivelse), en festebolt for geofon, samt et skuddhull. Ved tilstrekkelig regularitet i punktsekvensen kan (X,Z)-koordinater benyttes.

Avviket mellom de reelle stasjoner og et regulært stasjonsmønster bør ikke overstige 20% av den regulære stasjonsavstand (± 2 m ved stasjonsavstand 10 m).

Figur 8.1 anviser grenseverdier for utformingen av stasjoner i et måleopplegg med gjennomsnittlig stasjonsavstand 10 m.

Koordinatbestemmelse kan f.eks. utføres ved tachymetrering eller ved bruk av avstandsmåler.

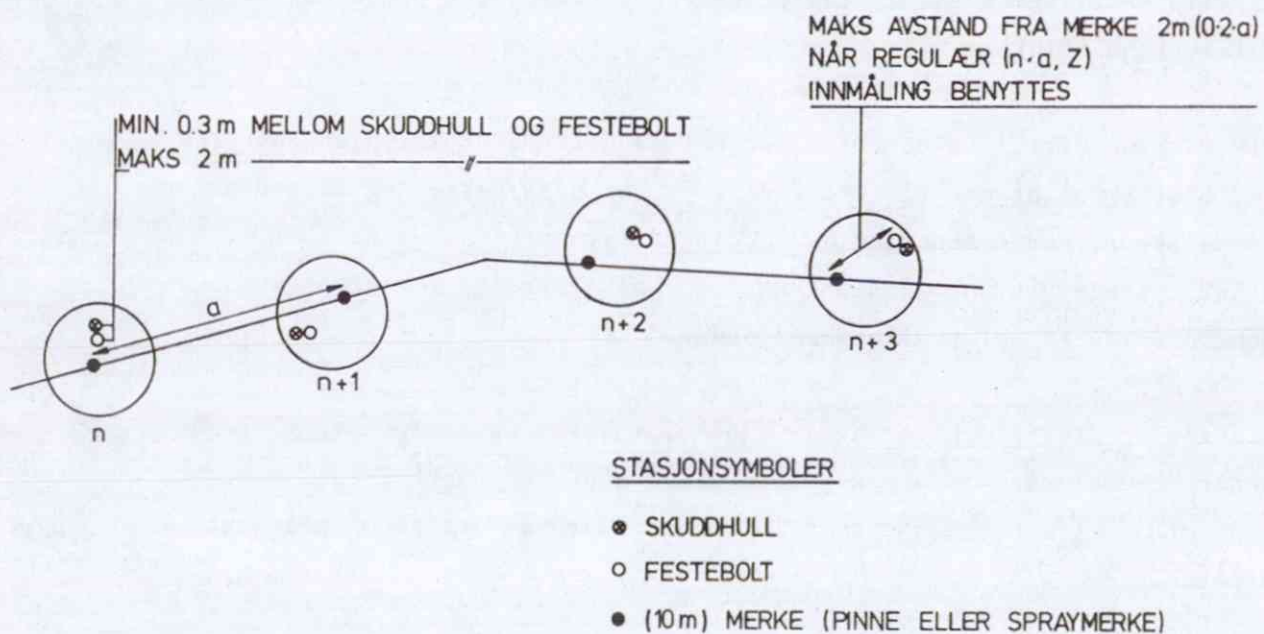


Fig. 8.1 Anvisning og grenseverdier for utforming av stasjoner i refleksjonsseismisk profil med gjennomsnittlig stasjonsavstand 10 m.

Nedsetting av festebolt for geofonmontasje kan med fordel gjøres samtidig med boring av skuddhull. For festebolten må det drillles et Ø 6 mm hull i fast fjell. Dette kan gjøres ved:

- a) Elektrisk slagdrill drevet med bensingenerator (min. 1200 W)
- b) Trykkluftdrevet slagdrill koblet til kompressor.

Boring av skuddhull kan utføres med håndholdt boremaskin (bensindrevne boremaskiner) eller med kompressordrevne bor. Kompressorer montert på 4-hjulsdrevet traktor anses velegnet i de fleste typer terreng. Beltegående bore-rigger er også aktuell redskap for dette formålet.

Stikking, hullboring og isetting av festebolter for geofoner er arbeidsoperasjoner av største viktighet for sluttproduktet. Erfaringsmessig kreves det kontinuerlig oppfølging og kontroll av utførelsen for å unngå feil.

8.3 Feltregistreringer

Innsamling av refleksjonsseismiske data kan deles i følgende hovedarbeidsoperasjoner:

- a) Armering av sprengstoff, nedsetting av ladninger, fordemming med vann, kobling av avfyringskrets og varsel om avfyring. Varsling om avfyring skjer enklest over radio (VHF).
- b) Operasjon av målesystemet, kvalitetskontroll av data, samt skriving av feltprotokoller (logger).
- c) Flytting av geofoner og kabler fra oppmålte deler av profilene til nye posisjoner i linjen (roll-along).

8.4 Prosessering

Prosessering av refleksjonsseismiske data kan deles i:

- Testing og rutineprosessering
- Spesialprosessering.

Testing utføres for og under rutineprosesseringen (standard-prosessering) for bestemmelse av de gunstigste parametre for dette. Sluttproduktet er minimum:

1. Kart som viser profilets beliggenhet, og med referansekoordinat til posisjoner i den seismiske seksjon
2. Seismisk seksjon med referansekoordinat til kart som viser profilets beliggenhet.

Spesialprosessering defineres som operasjoner ikke inkludert i pakken for rutineprosessering. Herunder kan nevnes:

- F-k filtrering
- Migrasjon.

8.5 Tolkning og rapportering

En seismisk rapport består av tre hovedelementer:

1. Kart
2. Seismiske seksjoner
3. Tekst og vedlegg.

Teksten kan inneholde en tolkning av de seismiske seksjoner, eller den kan være en rent beskrivende tekst uten tolkning. Det siste er den mest vanlige rapport.

8.6 Effekter

Ved utførelse av refleksjonsseismiske målinger i krystalline bergarter, slik det anvises i denne rapporten, er det nødvendig med følgende forbruksvarer under punktene 8.2-8.3:

Pkt 8.2

1. Merkepinner for stasjonsdefinisjon
2. Spraymaling for stasjonsdefinisjon
3. Plugger for tetting av ferdige hull
4. Festebolter for geofoner.

Pkt 8.3

1. Sprengstoff, herunder plastrør for ladninger
2. Seismiske tennere

3. Drivstoff for generatorer (bensin eller diesel)
4. Magnetbånd
5. Registreringspapir (film)
6. Elektrotape.

8.7 Kostnader

Kostnadene (K) kan deles i faste kostnader (F), produksjonskostnader (P), transportkostnader (T) og uberegnelige kostnader (U). De faste kostnadene omfatter planlegging (8.1), kontroll av forberedelser (8.2), tilrettelegging for prosessering (8.4), faste rapportkostnader (8.5), samt generell oppfølging og bestilling av effekter (8.2, 8.3). De faste kostnadene avhenger i stor grad av hvorvidt måleområdet er kjent fra tidligere målinger eller ikke. Produksjonskostnadene P kan uttrykkes som en pr. skudd kostnad. Transportkostnadene T omfatter mobiliserings- og demobiliseringskostnader og er i stor grad avhengig av målestedets tilgjengelighet. Uberegnelige kostnader utgjøres i hovedsak av produksjonsstans pga værhindring.

De totale kostnadene kan dermed uttrykkes slik:

$$K = F + P \cdot X + U + T \quad (8.1)$$

hvor X er antall skudd (registreringer). Faktoren P vil avhenge av hvor stor produksjon totalt er, dvs, en mengde-avhengig faktor.

Figur 8.2 gir ca verdier for F og P basert på at arbeidene utføres i Norge.

Kostnadene er i det følgende basert på:

- a) Ingeniørnormen 1982 for kvalifisert ingeniørarbeid
- b) Registreringen utføres med 24-kanalers registreringssystem av typen DFS-V (Texas Instruments)
- c) Erfaringstall for entreprenørarbeider under 8.2
- d) Markedspriser for standardprosessering
- e) Alle kostnader uttrykt i 1981-kroner.

FASTE KOSTNADER F (kr)	TOTALT ANTALL REGISTRERINGER Σx	PRODUKSJONS – KOSTNADSAKTOR P (kr)	BEREGNET PRIS PR. KM (10 m STASJONS – INTERVALL)
40 000	250	925	115 000
↓	500	800	92 000
↓	1000	700	76 000
↓	2000	650	68 000
80 000			

Figur 8.2 Veiledende verdier for faste kostnader (F) og produksjonskostnader (P) ved refleksjonsmålinger i krystalline bergarter.

Kilometerprisen er beregnet ut fra 10 m mellom registreringene (skuddavstand).

I produksjonskostandsfaktoren er det ikke innberegnet værhindringsdager.

De oppgitte tall kan betraktes som veiledende. Enkeltoppdrag vil kunne vise kostnader med inntil 50% avvik fra ovenstående som et resultat av naturgitte forutsetninger og/eller værforhold under utførelsesfasen (variasjoner i størrelsene T og U).

9. VIDEREUTVIKLING OG FRAMTIDIG FORSKNING

9.1 Ny teknologi

Utviklingen innenfor fagområdet refleksjonsseismikk skjer raskt. Spesielt når det gjelder registrering og prosessering, er det grunn til å anta en kontinuerlig kapasitetsøkning for systemene (flere datakanaler). Dette gjør det mulig å øke datamengden for hvert opptak (skudd), hvilket betyr en kvalitativ såvel som kvantitativ forbedring under tid.

Det er også grunn til å forvente en utvikling mot radiooverføring av data (telemetri). Denne teknikken vil rasjonalisere feltarbeidet vesentlig. Bruk av optiske fibre både ved signaloverføring og i registreringssystemene vil kvalitativt forbedre de innsamlede data.

Som konklusjon, hevder vi at få områder innenfor geofysikk har de samme utviklingsmulighetene som refleksjonsseismikk. Grunnen til dette er selvsagt de økonomiske ressurser og viljen til satsning i tilknytning til oljeindustrien.

I de etterfølgende punktene 9.2-9.5, nevner vi noen emner som dette prosjektet anser som interessante å arbeide videre med.

9.2 Geofoner i borehull

Ved bruk av eksplosive energikilder, der sprengstoffet detoneres i borehull i fjell, vil de samme hullene kunne benyttes i registreringssammenheng. Ved registrering i borehull oppnås en mere homogen bølgregistrering ved at geofonene i mindre grad er influert av vekslingen i overflatens beskaffenhet.

I tillegg til den betydning geofoner i borehull kan forventes å ha for konvensjonell linjeprofilering, er det grunn til å anta at en videreutvikling her vil ha verdi for seismikk i dype borehull, så som vertikal seismisk profilering (VSP) og ordinære seismiske hullmålinger.

9.3 Anvendelse på områder med løsmasseoverdekning

Slik metoden er utviklet og beskrevet i det foregående, har det vært en forutsetning at anslagsvis 90% av skudd/mottager-posisjonene lar seg etablere i fast fjell. Dette legger begrensninger på anvendelsen av metoden. Figur 5.12 illustrerer den problemstilling som oppstår ved registrering på løsmasser, sammenlignet med registrering på fast fjell. Det forekommer faseforskyvninger (delays), formforandring og dempning av høyfrekvent bølgeenergi når bølgen går gjennom løsmassene. Denne forandringen i bølgeformen er det nødvendig å korrigere før dataene summeres sammen.

Et studium her vil måtte omfatte løsmassenes innvirkning på bølger i fast fjell, samt anvisning for korreksjoner.

9.4 Ikke-impulsive energikilder

De ikke-impulsive energikilder er nevnt i kapittel 5. Typisk for disse energikildene er at de genererer seismiske bølger ved en eller annen form for vibrasjon koblet mot bakken (Vibroseis). Vibrasjonen foregår kontinuerlig over tid som er lengre enn den tid bølgene bruker på å gå fra kilden til dype reflektorer og tilbake til overflaten. Registreringen av fysiske refleksjoner er derfor forstyrret av 'støy' fra vibrasjonene. Informasjon trekkes ut ved at det utsendte signal korreleres mot mottatt signal.

Et studium av vibrasjonsenergikilder ved refleksjonsseismiske målinger på krystalline bergarter vil være interessant ut fra en rekke betraktninger, og spesielt ut fra ønskeligheten om anvendelse av høyfrekvent energiutsending for derved å øke oppløsningen i de seismiske seksjoner.

9.5 Tredimensjonale teknikker

I de senere år er det oppstått en sterkt økende interesse for tredimensjonal (3D) seismisk datainnsamling og en dertil hørende 3D prosessering. Spesielt er det (bl.a. ved NORSAR) blitt arbeidet med metoder for 3D seismisk modellering. Disse metoder tar sikte på å

modellere de geologiske grenseflater 3-dimensjonalt ut fra de seismiske registreringer i området. Ved NORSAR har metoden hittil vært mest brukt på off-shore problemstillinger og har i hovedsak gjort bruk av informasjon om de seismiske gangtider. NORSAR er imidlertid i gang med en videreutvikling av metoden som muliggjør bruk av både tids- og amplitudeinformasjon i bølgefeltet. Disse metoder burde med hell kunne tilpasses 'malmletings-seismikk' for på den måten å kunne øke mulighetene for klassifikasjon av de forskjellige 'typer' reflektorer.

9.6 Rekognoserende opplegg

Som figur 7.10 viste er det i visse tilfelle mulig å registrere lesbare refleksjoner med en feltplotter basert på et enkelt utlegg. En kan derfor tenke seg muligheten av å foreta signalregistrering med enklere, mer mobilt og billigere feltutstyr, dersom formålet kun er å rekognosere et større område, dvs finne ut hvor det i det hele tatt finnes gode refleksjoner. De endelige seismiske undersøkelser som skal danne grunnlag for geometrisk tolkning av undergrunnen, må imidlertid utføres med avansert digitalt multikanalsutstyr som muliggjør etterfølgende dataprosessering og oppbygging av seismiske seksjoner.

10. KONKLUSJON

Prosjektet 'Malmløting med refleksjonsseismikk' og tilknyttede prosjekter har hatt som primær målsetting å videreutvikle og tilpasse den refleksjonsseismiske metode slik at den kan anvendes ved løting etter dyptliggende sulfidmalmer i krystalline bergarter.

Prosjektarbeidets framdrift og endelige utforming har i stor grad vært influert av den situasjon som har eksistert i gruvesamfunnene Sulitjelma og Løkken i prosjektperioden. Prosjektet har benyttet seg av teoretiske betraktninger, felteksperimenter, analyser av felteksperimenter, prospekteringsmålinger og prosessering dels med egenutviklede programmer i sitt arbeide.

Prosjektresultatene har gitt anvisninger for hvordan refleksjonsseismikk kan benyttes ved prospektering i krystalline bergarter i dybdeområdet 400-1500 m fra overflaten.

Prosjektet kan vise til følgende sentrale resultater:

- 1) Registrering av kjent malm i Løkken
- 2) Registrering av gabbro/grønnstens- og gabbro/kleberstens-grenser i Løkkenfeltet, etterprøvet med dype kjerneboringer og laboratorieanalyser av bergartsprøver.
- 3) Registrering av flere interessante refleksjoner i aktuelle nivåer/kontakter i Sulitjelma, spesielt i Sydgruvefeltet. To borehull er hittil satt ned, ett innenfor og ett i utkanten av en seismisk respons, og begge viser en svak mineralisering.

Prosjektet kan videre konkludere med at den refleksjonsseismiske metode har større potensiale enn tidligere antatt når det gjelder mer generell modellering av krystalline bergarter. Metoden bør derfor ses på som anvendelig for strukturell geologisk kartlegging i sin alminnelighet.

Spesielt er det godtgjort at metoden er anvendelig på malmførende strukturer. Ytterligere boringer direkte mot seismisk bestemte mål i Sulitjelma er ønskelig for å øke etterprøvingen på dette punktet.

Prosjektet har gitt positivt svar på de spørsmål og forventninger som ble stilt opp ved prosjektstart, og har naturlig nok medført økt innsikt og stilt nye spørsmål som det er ønskelig å arbeide videre med.

Volumet av de feltmålinger som er utført i tilknytning til prosjektet er beskjedent sammenliknet med tilsvarende erfaringsmateriale innenfor f.eks. seismisk oljeleting. Når den refleksjonsseismiske metode gjennom dette prosjektet er etablert som malmleringsmetode, er det derfor av avgjørende betydning at den blir videreutviklet gjennom utstrakt rutinemessig praktisering, fortrinnsvis i kombinasjon med mer spesielle felteksperimenter og analyser.

Det er imidlertid viktig å presisere at refleksjonsseismikk som alle andre geofysiske metoder ikke er noen frittstående malmindikator, men at den utvilsomt er egnet til å øke sannsynligheten for funn ved boring der malm finnes.