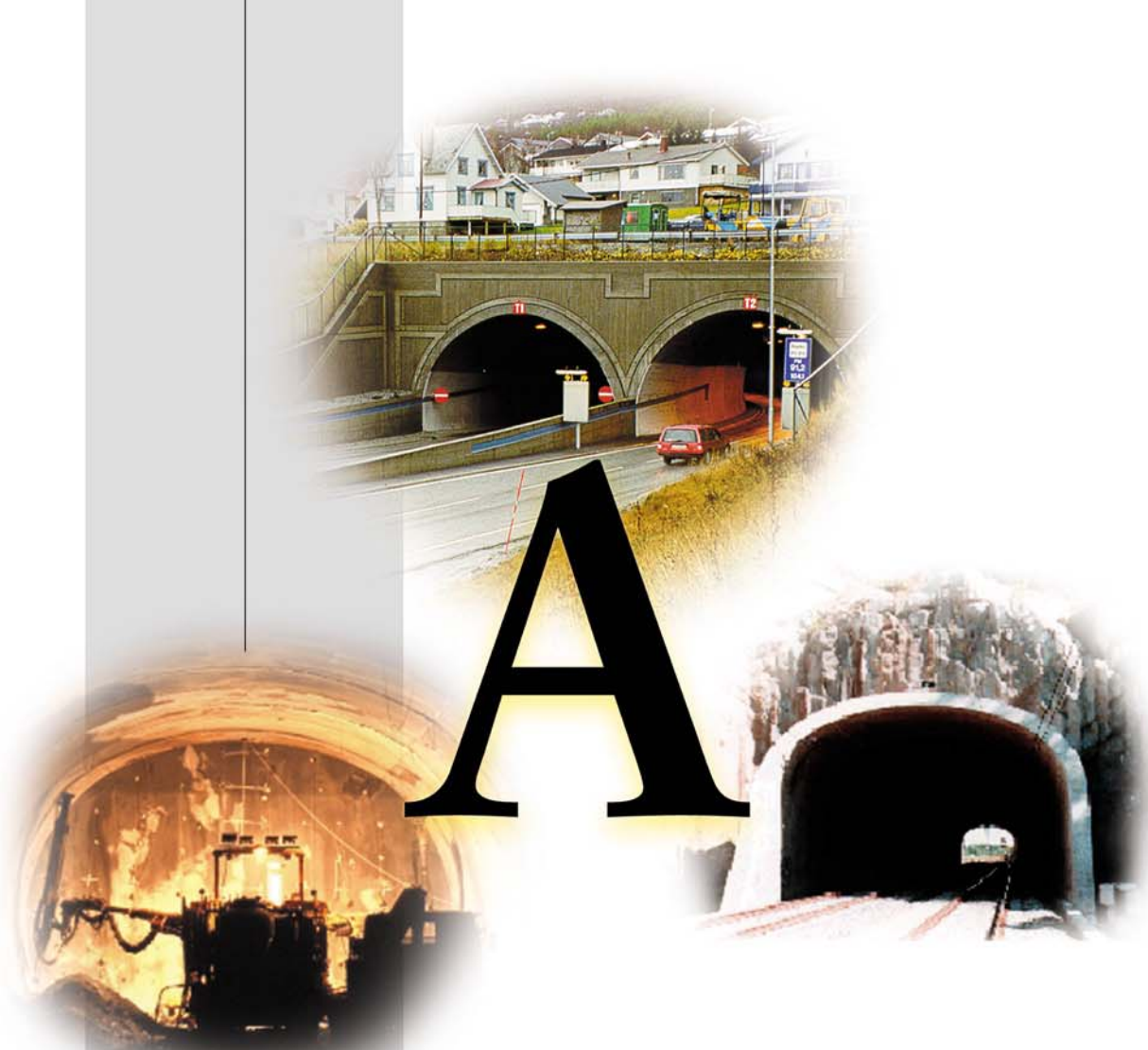


## Seismisk modellering.

Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng



Intern rapport nr. 2328



**Statens vegvesen**

# Miljø- og samfunnstjenlige tunneler

**Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng**

20001042-3

7 juli 2003

**Oppdragsgiver:** **Prosjektet Miljø- og samfunnstjenlige tunneler**

**Kontaktperson:** Alf Kveen, Statens vegvesen,  
Vegteknisk kontor

**Kontraktreferanse:**

## **For Norges Geotekniske Institutt**

**Prosjektleder:** Vidar Kveldsvik

**Rapport utarbeidet av:** Harald Westerdahl

**Kontrollert av:** Fredrik Løset

**Arbeid også utført av:** Ole Chr. Pedersen

## Sammendrag

Seismisk modellering av ulike situasjoner med skarpe depresjoner og dydbegrensede vertikale svakhetssoner viser at man ikke kan forvente å oppnå et entydig tolket bilde av den geologiske situasjonen dersom man benytter en forenklet tolkningsteknikk og har et begrenset datagrunnlag.

Resultatene som presenteres i denne rapporten viser at bl.a. at det er vanskelig å avgjøre entydig ut fra refrasjonsseismiske data om man har en svakhetsone under en skarp depresjon i fjellet. Syntetiske data fra to ulike modeller, begge uten svakhetsone under en depresjon, ble overlevert til en seismisk kontaktør for tolkning uten at tolkeren kjenner modellen på forhånd. Resultatene fra denne blindtesten viser at tolkeren legger inn en svakhetsone under depresjonen. Selv om tolkningsresultatet er i uoverensstemmelse med modellen, er ikke tolkningen feil. Mangel på entydighet i dataene gir rom for tolkninger. Blindtesten viser at tolkningen som presenteres er konservativ.

Presentasjon av flere tolkningsalternativer ville vært å foretrekke der situasjonen tilsier at dette kan være viktig. I forbindelse med skarpe depresjoner i fjell, kunne man for eksempel presentere to forskjellige tolkninger, de to ytterpunktene: En der man forsøker å forklare dataene ut fra variasjon i fjelltopografien (dyp og helning i depresjonen) og en der man antar et minimumsdyp og forklarer dataene fra hastighetsendringer. Forutsetningen for å gjøre dette er naturligvis at oppdragsgiver er villig til å betale for den ekstra tolkningsinnsatsen.

Det er ulike tilleggsmålinger man kan gjøre for å redusere usikkerheten / redusere tolkningrommet, i ulike situasjoner. I tilfelle dype skarpe depresjoner, kan man forsøke å finne bunnen av løsmassene ut fra refleksjoner fra skudd sentralt over depresjonen, og deretter finne hastighetene fra modellering. Man kan også, dersom man har liten avstand mellom skudd og mottakere (tett innsamling), analysere refraksjoner fra ulike innerskudd i tolkningen av fjellhastighetene.

Vi er imidlertid usikre på om seismiske data fra overflaten alene vil være tilstrekkelig, selv om man samler inn tett, for å oppnå ønsket nøyaktighet i dyp og hastigheter i forbindelse med skarpe depresjoner og svakhetssoner. Reelle måledata vil av ulike årsaker være betydelig vanskeligere å tolke enn syntetiske data. Vi vil derfor anbefale at man gjør fullskala eksperimentelle studier, dersom man ønsker å avklare hvilken nøyaktighet og presisjon man kan forvente å oppnå med overflateseismiske målinger som tett refraksjon og refleksjon.

Den enkle modelleringsøvelsen med kabelheng viser at en forenklet tolkning vil resultere i ”falske” sedimenter oppover brattkanten. I dette tilfellet, der man



har betydelig kabelheng og sterk fjelltopografi vil man også kunne få ”falske” lavhastighetssoner i skrenten. Løsningen på kabelhengproblematikken er imidlertid enkel: Sørg for at bunntopografi er riktig kartlagt før seismikken tolkes, og påse at den seismiske kabelen er korrekt posisjonert.

Modelleringsøvelsene med svakhetssoner med ulike vertikal utstrekning viser at refraksjonsdata i praksis vil være relativt ufølsomme for variasjoner når den vertikal utstrekningen er større enn bredden av sonen. Forholdet er avhengig av kontrasten i hastighet mellom svakhetssonen og omliggende fjell. Dersom kontrasten i hastighet øker, så øker også dette forholdet. Vi tror at forhold som er mindre enn 1, kanskje ned mot en halv, i mange tilfeller også vil kunne tolkes som en uendelig dyp svakhetszone, men med økte hastigheter i fjellet til siden for svakhetssonen, dersom man ikke er spesielt oppmerksom på denne problemstillingen.

Dersom man ønsker høyeste grad av sikkerhet i bestemmelsen av en svakhetszone utstrekning mot dypet, bør man imidlertid utføre tomografi mellom to vertikale hull eller et skråhull og overflaten.



## Innhold

1	INNLEDNING .....	5
1.1	Problemstilling og rapportens innhold.....	5
1.2	Seismiske bølger og seismiske hastigheter .....	7
2	GENERELT OM SEISMISK MODELLERING.....	8
3	STERKE DEPRESJONER I FJELLOVERFLATE N.....	10
3.1	Ofte liten seismisk dekning nær bunnen av fjelloverflaten .....	10
3.2	Hvordan finne bunnen?.....	11
3.3	Forenklet tolkningsteknikk gir reduserte hastigheter under depresjoner .....	12
4	SVAKHETSSONER MED ENDELIG VERTIKAL UTSTREKNING... ..	15
4.1	Automatisk forenklet tolkning av vertikale svakhetssoner med dybdebegrensning. ....	17
5	EFFEKTER AV KABELHENG .....	20
6	BLINDTEST- LØSMASSEFYLT DEPRESJON.....	22
7	KONKLUSJON .....	24

## Kontroll- og referanseside



## 1 INNLEDNING

### 1.1 Problemstilling og rapportens innhold

I dette arbeidet ser vi nærmere på tolkning av refraksjonsseismikk for spesielle problemstillinger som kan være relevante i forbindelse med forundersøkelser for tunneller og undergrunnsanlegg i fjell. Vi har forsøkt å presentere arbeidet på en slik måte at det ikke stilles store krav til forkunnskaper i geofysikk og av den grunn har tatt med noen grunnleggende geofysiske betraktninger underveis.

Refraksjonsseismikk er den geofysiske metoden som tradisjonelt er mest bruk under forundersøkelser for tunneller og undergrunnsanlegg. Tolkningene av denne type data, og for øvrig også alle andre geofysiske data, baserer seg på gitte forutsetninger (geologiske modeller). Dersom de geologiske forholdene ikke stemmer med forutsetningen vil tolkningen ikke gi riktig bilde av undergrunnen. Årsaken til at man trenger å introdusere forutsetninger, er fordi de geofysiske dataene ikke inneholder nok informasjon til at de geologiske forholdene kan bestemmes entydig. Dette betyr at dataene gir rom for tolkninger og at ulike tolkninger i utgangspunkt kan være like "riktige". Med andre ord, det finnes mange tolkninger som alle tilfredsstillir måledataene. Det er derfor nødvendig å introdusere forutsetninger for å komme frem til kun en tolkning.

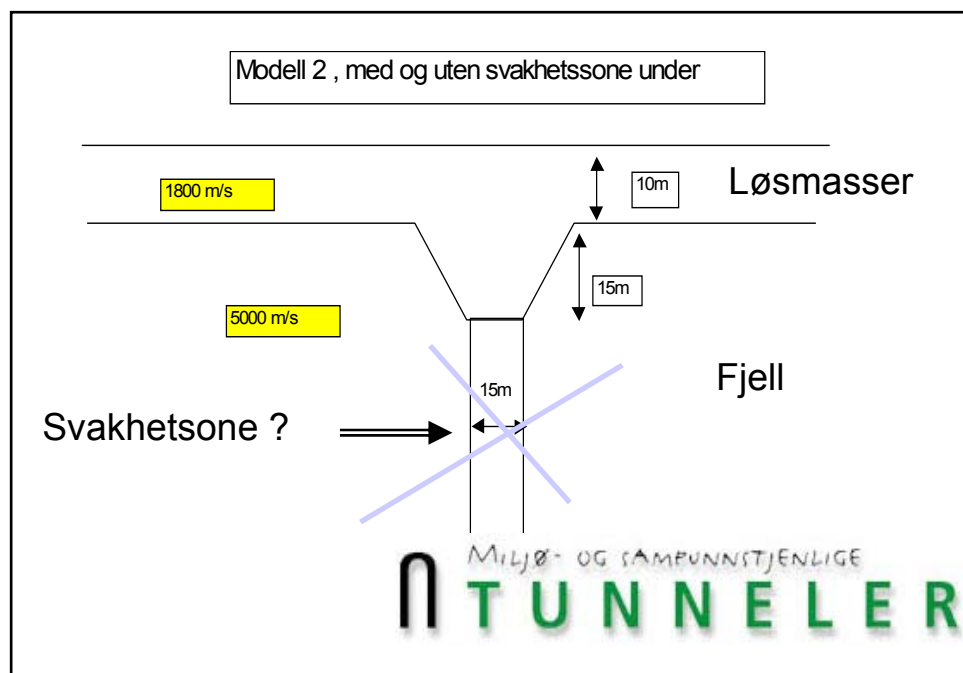
De grunnleggende fysiske forutsetningene for å kunne gjøre en riktig refraksjonsseismisk tolkning er at den seismiske hastigheten må øke, i skritt eller kontinuerlig, med dypet. Videre, at de enkelte lag må være over en viss tykkelse for å kunne oppdages. Ellers er det også mest vanlige at dataene tolkes for å gi lagdelt modell med klart definerte grenser. Videre, må ikke topografien i laggrensene være for ujevn, og dette skal vi se nærmere på i denne rapporten.

Grunnen til at man i praksis ser at tolkningen av refraksjonsseismiske data ofte gir god overensstemmelse med eksisterende forhold, er nettopp fordi metoden brukes der de geologiske forholdene tilfredsstillir forutsetningene. Det er ikke uten grunn at refraksjonsseismikk har en lang tradisjon spesielt i Norge, der man oftest har relativt løse løsmasser som ligger oppå fjell. Her er det mest vanlige at hastigheten øker mot dypet gjennom løsmassepakken og har en skarp og stor hastighetsøkning mot fjell. Dersom fjelltopografien ikke er ekstremt ujevn, en problemstilling vi skal se nærmere på i dette arbeidet, blir nøyaktigheten i tolkningen av dyp til fjell ofte bedre enn 10 prosent av dypet. Dvs. dersom for eksempel tolkningen viser 15 m til fjell kan man være rimelig sikker på at fjelloverflaten ligger mellom 13.5 og 16.5 meter under overflaten.

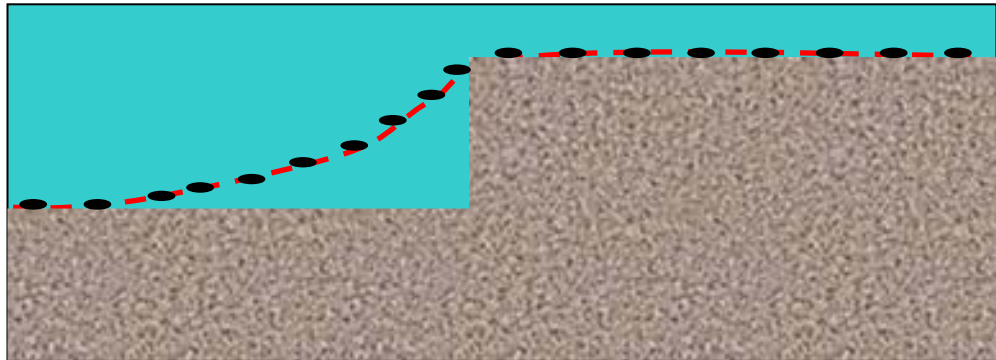
I denne rapporten vil vi ta for oss spesielle problemstillinger der vi bruker seismisk modellering for å lage syntetiske seismiske data og analyserer dataene med hensyn på ulike problemstillinger for å undersøke følsomhet og tolkningsrom. Data fra ett par utvalgte modeller er tolket etter tradisjonelle

metoder av erfaren geofysiker, utenfor NGI, som ikke kjenner modellen. Tolkningen er deretter sammenlignet med fasiten og forskjellige analysert.

Hovedproblemstillingen som det fokuseres på i dette arbeidet, er om løsmassefylte skarpe depresjoner i fjelloverflaten vil kunne tolkes som en svakhetsone, selv om fjellkvaliteten i virkeligheten er god, figur 1. Videre gis det en kort vurdering av tolkingen av seismiske data der bunntopografien er sterkt varierende (ujevn) og hvor den seismiske målekabelen delvis henger i vannsøylen og ikke er i kontakt med sjøbunnen ("kabelheng"), figur 2. Vi vil vise grafisk og ved såkalt raytracing at en slik situasjon kan være analog til problemstilling med løsmassefylte depresjoner, dersom skrenten er tilstrekkelig bratt og høy og man har betydelig kabelheng. Vi gir også noen kommentarer knyttet til tolkning av seismiske hastigheter i fjell og følsomhet mot dyp.



Figur1: Illustrasjon av en av problemstillingene: Kan refraksjonsseismikk se svakhetssoner under skarpe depresjoner.



*Figur2: Skisse av hvordan en seismisk målekabel kan henge over en skrent på sjøbunnen.*

## 1.2 Seismiske bølger og seismiske hastigheter

Seismiske bølger brer seg ut i undergrunnen fra en seismisk kilde, vanligvis eksplosiver, etter fysiske lover som er bestemt av de elastiske egenskapene, stivhet og tetthet, til jordmaterialene. Bølgene følger "bølgeligningen" som er bestemt av likevektslover om masse, akselerasjon og forflytning. Desto stivere og lettere massene er, jo forttere går bølgene. Under "normale geologiske forhold" er variasjon i stivhet betydelig større enn variasjon i tetthet. Det betyr i praksis at det er stivheten til de geologiske enhetene som vil avgjøre hvor fort bølgene går. Sedimenter er relativt sett mye mykere enn fjell, og hastighetene i fjell er derfor betydelig høyere enn i sedimenter. Stivheten til fjell avhenger bl.a. om det er sprekker tilstede, hvor tett de ligger (sprekkes tetthet) og stivheten til hver enkelt sprekk (om for eksempel de er fylt med leirmineraller, eller at kontaktarealet mellom sprekkeflatene er lite).

Når seismiske bølger beveger seg nedover i jorden gjennom myke masser (sedimenter) der seismisk hastighet er lav, over til fjell der hastigheten høy, vil bølgene forandre retning, dvs de brytes i henhold til "Snells lov" (det er det samme som skjer med lys, for eksempel mellom luft og vann). Konsekvensen er at noe av energien vil forplante seg langs fjelloverflaten og "lekke ut" oppover langs veien, tilbake til mottakerne etter hvert som bølgene brer seg langs fjelloverflaten. Denne energien kalles refraktert energi og den avspeiler hastigheten i fjellet (refraktoren). Dersom fjelloverflaten er flat, kan hastigheten leses ut direkte fra mottakene på overflaten med kun ett skudd på overflaten i stor nok avstand (ytterskudd). Dersom fjellflaten heller den ene eller andre veien, er man tvunget å bruke minst to skudd (skudd og motskudd), ett fra hver side, for å bestemme hastigheter. Dersom fjelloverflaten er ujevn, blir det mer komplisert, noe vi skal studere nærmere gjennom seismisk modellering.





For å finne dypet ned til de ulike lag, baserer refraksjonsseismisk tolkninger seg på en ulike former for "kle av" (stripping) teknikk. Det vil si at man starter med laget øverst, nærmest overflaten, og beregner hastigheten i dette (og laget rett under) og tykkelse. Deretter trekker man fra effekten av dette laget når man beregner dypet til neste, osv

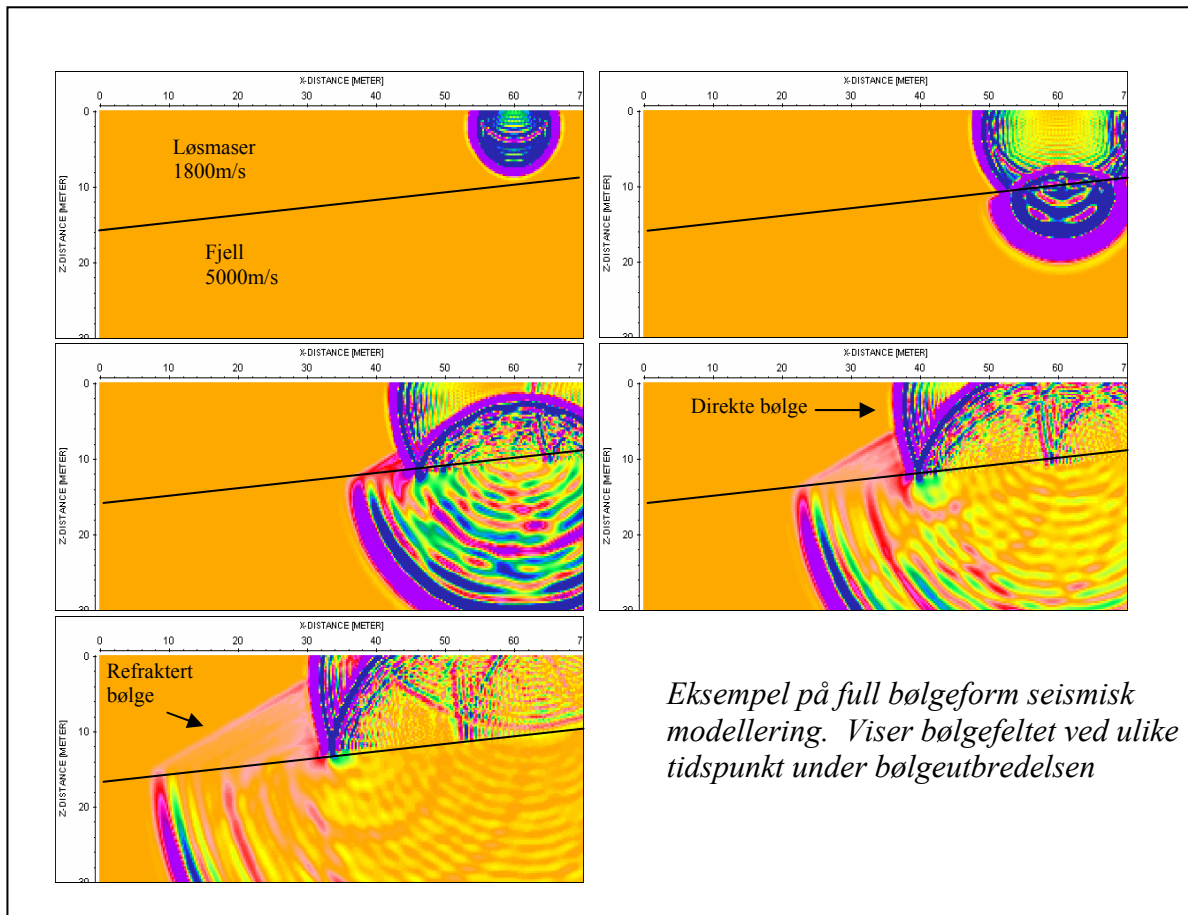
## 2 GENERELT OM SEISMISK MODELLERING

Den teknologiske utviklingen har etter hvert gjort det mulig å simulere seismisk bølgeforplantning i komplekse modeller på en effektiv måte. Dette gjør det mulig å beregne syntetiske seismiske data fra realistiske kompliserte geologiske modeller. Ved seismisk modellering løser man bølgeligningen i realistiske jordmodeller numerisk i en computer, og man kan visualisere hvor og hvordan bølgene brer seg ut i materialet og hvilke deler av bølgefeltet som treffer mottakerne. Det kan også legges til syntetisk støy i dataene og på denne måten kan man lage syntetiske seismiske data som virkelig ligner på det man måler i felt.

Seismisk modellering er en regnekrevende operasjon. Til tross for den raske utviklingen i coputerteknologi, tar det fortsatt flere timer, kanskje dager, å beregne bølgeutbredelsen i en realistisk refraksjonsseismisk modell, selv for todimensjonale modeller (dvs. ingen variasjon på tvers) som er brukt i dette prosjektet. Regnetiden er avhengig av modellstørrelsen, og dersom denne kan begrenses (i størrelse og tid), vil modellering kunne være et nyttig verktøy i tolkningsarbeidet og ikke kun ved spesialstudier som dette.

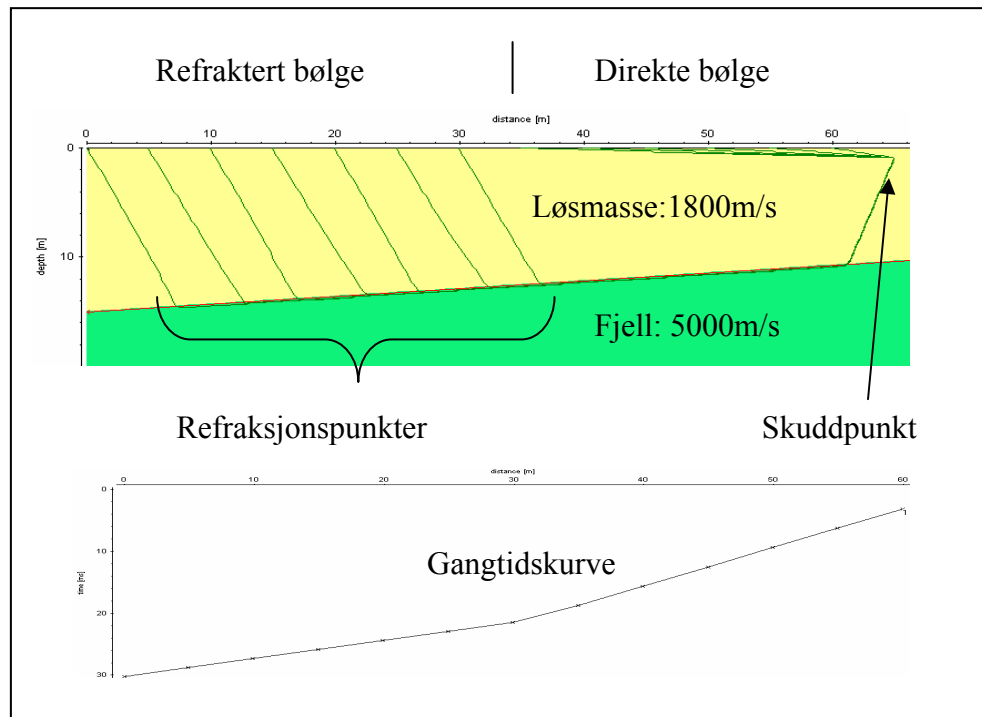
Modellen som legges til grunn for beregningen i computeren, er et tett rutenett (grid) der materialegenskapene (stivhet og tetthet) er fast innenfor hver rute. Hvert rute tilordnes materialverdier i overensstemmelse med den geologiske modellen man ønsker å studere. Størrelsen av hver enkelt rute, og antall ruter velges i henhold til ønsket romlig oppløsning, modellens størrelse og hvor nøyaktig man ønsker beregningen gjennomført. Rutestørrelsen valgt i dette prosjektet er en halv meter eller mindre. Modellene som analyseres i dette prosjektet varierer noe i størrelse, mellom 100-200m i lengderetning og 20-50 meter vertikalt.

Det finnes ulike typer simuleringsprogramvare. Det som er benyttet her, er såkalte "finite difference time domain" metoder for løsning av den elastiske bølgeligningen. Denne beregningsmetoden er relativt "visuell" da bølgefeltet regnes ut i diskrete tidssteg, figur 3. Etter at beregningene er fullført, kan man lage en animasjonsfilm, der man kan se hvordan bølgene brer seg utover i jordmodellen og brytes og endrer hastighet i de ulike lagene. Man kan også se hvordan energien finner den letteste og raskeste veien fra skuddpunktet og frem til mottakerne.



*Figur 3: Seismisk modellering med "Finite difference time domain".*

En type forenklet modellering, hvor man løser kun deler av bølgeligningen ("Eikonal-ligningen") er såkalt "raytracing" (type "FD Vidal" brukt her), figure 4. Med kinematisk raytracing kan man regne ut den raskeste gangveien mellom skudd-mottakerposisjonene for ulike modeller. En stråle ("ray") som brytes og refrakteres fra ulike lag, viser hvilken vei ("trace") bølgen har tatt på veien mellom kilde og mottaker og programmet summerer opp hvor lang tid energien har brukt på hele distansen. Dermed får man gangtidskurven til første-ankomstene, hvilket er grunnlaget for all refraksjonsseismisk tolkning. Denne formen for raytracing er imidlertid en forenkling av virkeligheten, da det ikke er bare en enkelt stråle som bidrar til et seismisk signal, men en sum av flere. Størrelsen (amplituden) på signalet inngår heller ikke i beregningene. Likevel kan metoden være et nyttig verktøy i en tolkningsprosess, den er illustrerende og viser hvilken vei som er raskest mellom kilde og mottaker, og tar liten regnetid (noen få sekunder).



Figur 4: Illustrasjon "raytracing". Strålene viser den raskeste veien fra skudd til mottaker. Tilhørende beregnet gangtidskurve under.

### 3 STERKE DEPRESJONER I FJELLOVERFLATE N

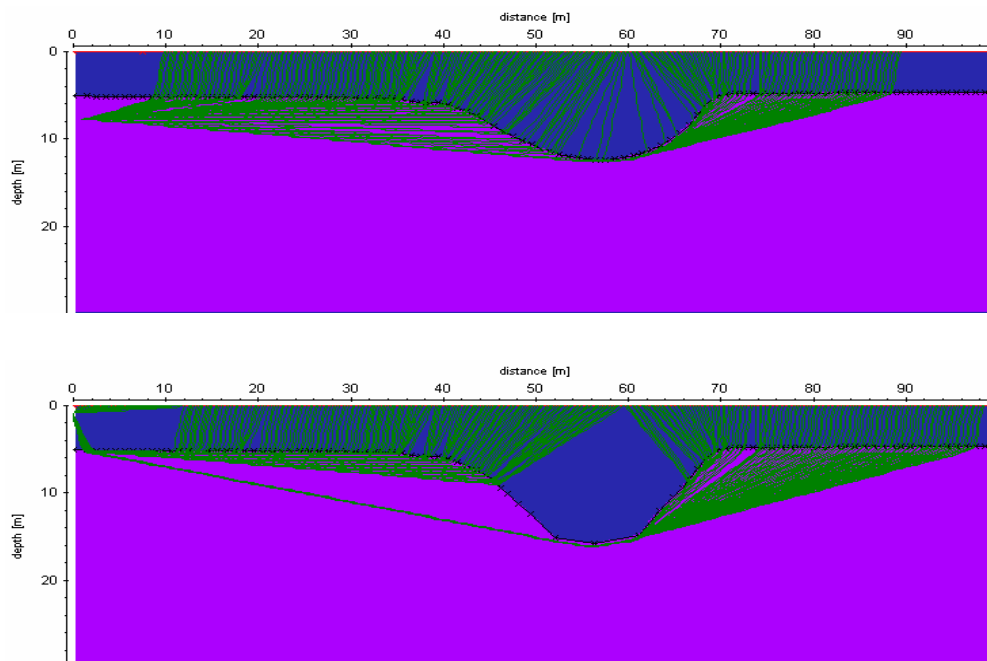
#### 3.1 Ofte liten seismisk dekning nær bunnen av fjelloverflaten

I dette kapitlet skal vi presentere enkle modelleringsøvelser der vi benytter raytracing på modeller der fjelloverflaten er ujevn og dekket med sedimenter. Formålet er å vise grafisk hvordan man mister informasjon om fjelloverflaten der helningen blir for sterk.

En forutsetning for å kunne få informasjon om en geologisk enhet fra refraksjonsseismiske data, er at den seismiske bølgen må ha beveget seg i eller gjennom den aktuelle enheten og at energien av denne bølgen fanges opp av mottakere på overflaten som første-ankomst. Dersom dette ikke er tilfelle, inneholder ikke dataene informasjon om enheten. En geofysiker som tolker refraksjonsseismiske data etter klassiske metoder, vil kun beregne riktig dyp hvis det finnes refraksjonspunkter fra bunnen av depresjonen i dataene.

Dersom dette ikke er tilfelle, må man anta en annen modell som utgangspunkt for tolkningen og presentere alternative tolkninger, gitt ulike antagelser.

Det som bestemmer om man får refraksjoner fra bunnen av en løsmassefylt depresjon fra et skudd langt ute, er formen (helningen) på depresjonen, løsmasseoverdekningen og hastighetskontrasten mellom løsmassene og fjellet. Figur 5 viser raytracing-resultater fra to situasjoner, en med og en uten refraksjonspunkter fra bunnen. Vi ser at for denne typen modell må depresjonen være mindre enn ca. 5 meter dyp før man får refraksjoner fra bunnen. Er depresjonen dypere enn dette, er ikke bunnen representert i de refraksjonsseismiske dataene i klassisk forstand. Resultatene fra en tradisjonell tolkning for dette tilfellet vil sannsynligvis gi en depresjon med en vertikal svakhetszone (med uendelig dyp) under, se senere modelleringsøvelser og blindtest.



Figur 5: Raytracing av to ulike modeller der kun den ene (5m dyp, øverst) gir refraksjonspunkter fra bunnen og sidene.

### 3.2 Hvordan finne bunnen?

Som vi ser fra figur 5, nederst, vil noe av energien gå under depresjonen og fanges opp på mottakere lengre ut i profilet. Vinkelen som disse stråene treffer mottakerene med, er gitt av posisjonen til et av punktene nær bunnen av depresjonen. Dersom man kjenner hastigheten i fjellet på flankene av depresjonen (fra for eksempel innerskudd) kan man i teorien, ved å studere



gangtidene bestemme vinkelen på innkommende bølgene i de ulike mottakerpunktene, anslå dypet til depresjonen. Når man kjenner dypet kan man deretter anslå en gjennomsnittshastighet i fjellet under depresjonen, i partiet mellom depresjonens flanker ("skudre").

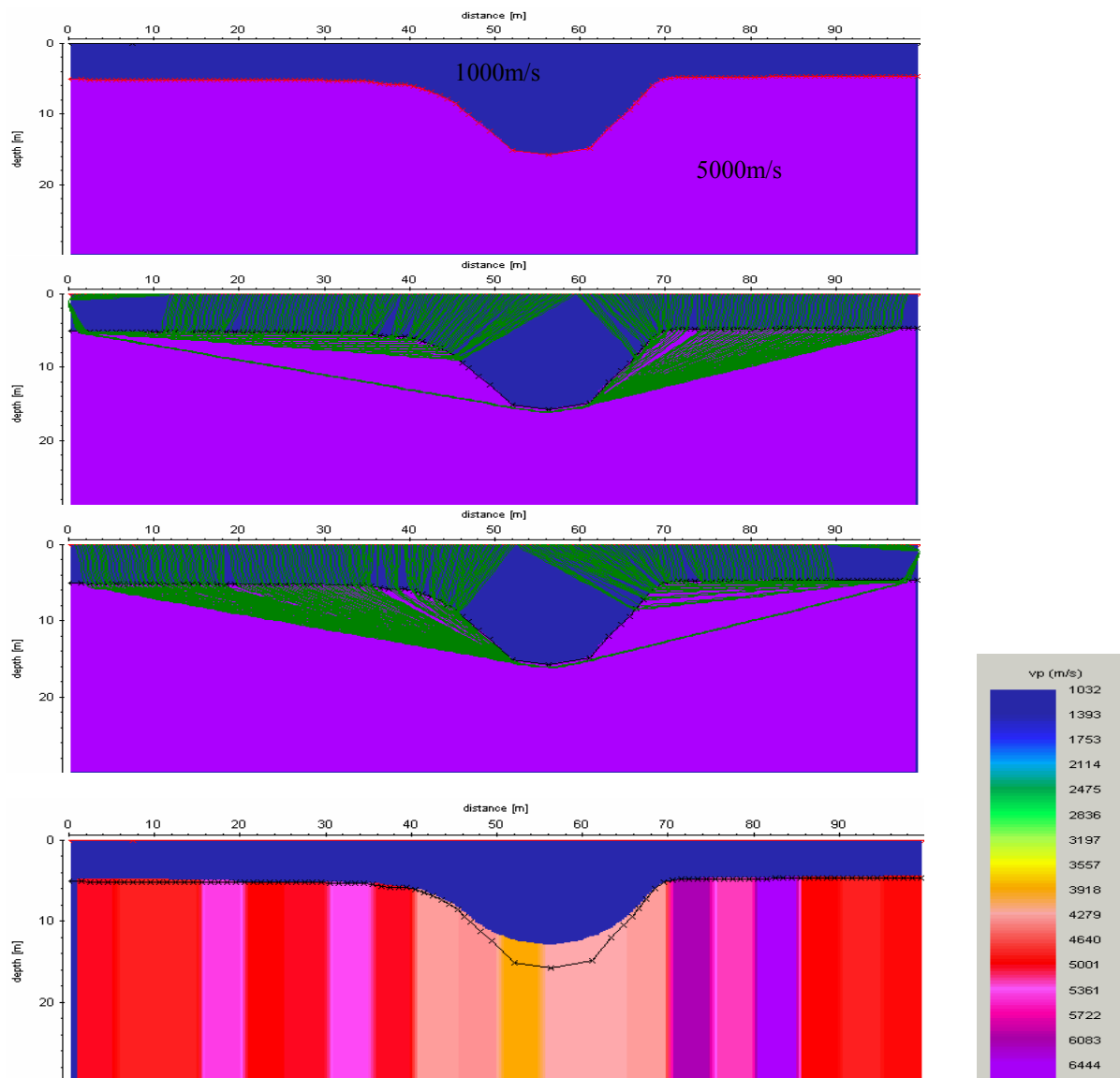
Denne metoden synes nærliggende når man ser på syntetiske data som er generert med raytracing, der styrken på signalet i de ulike gangveiene ikke er beregnet, men kan trolig bli vanskeligere å implementere i praksis. Styrken av signalet som går under og rundt, kan i enkelte tilfeller vise seg å være liten og kan derfor lett overses dersom datakvaliteten ikke er god. Dette illustreres nærmere i kapittel 4. Her illustreres også hvordan bunnen av en depresjon / svakhetszone, kanskje også kan finnes ved refleksjonsmålinger.

### 3.3 Forenklet tolkningsteknikk gir reduserte hastigheter under depresjoner

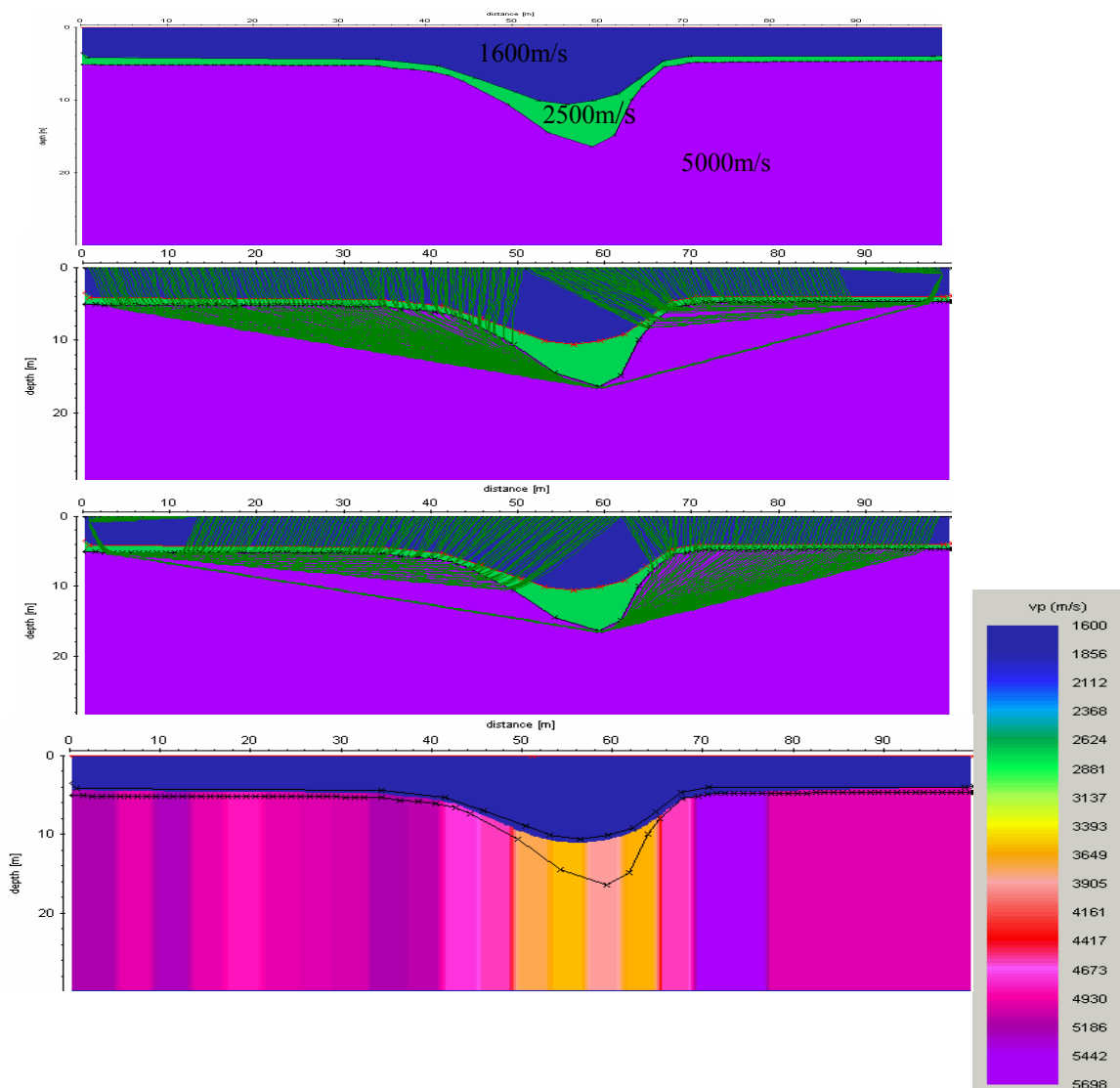
Nedenfor viser vi resultater fra to ulike modeller av depresjoner uten svakhetsone. Syntetiske data er generert med raytracing og deretter automatisk tolket. Tolkningverktøyet som er brukt her, er kommersielt tilgjengelig og baserer seg på "wavefront inversion" av skudd og motskudd. Hastighetene beregnes kun fra gjennomsnittlig helning til gangtidskurvene av ytterskudd på det beregnede refraktorpunktet. Vi har gitt programmet frihet til å dele inn hastighetene i fjellet i 20 soner.

Formålet med denne øvelsen er å vise hvilke resultater som komme ut av en kommersiell tilgjengelig tolkningssoftware ved ulike former for depresjoner i fjelloverflaten, uten svakhetsone, når denne brukes ukritisk. Forutsetningene for "vanlig refraksjonsseismisk tolkning" er, som geofysikerne er klar over, ikke oppfylt når helningen på overflaten som kartlegges er mer enn ca. 30 grader.

Figur 6 og 7 viser resultatene fra de to modelleringene, som har litt forskjellige modeller. Den nederste illustrasjonen på hver figur er resultatet fra den automatiske tolkningen. Laggrensene fra den opprinnelige modellen er tegnet inn på tolkningen for lettere å kunne sammenligne. Vi ser fra figurene at dypet estimeres for grunt i depresjonen for begge modellene. Videre at fjellhastigheten reduseres under sonen, selv om det ikke er noen sone her, og at fjellhastighetene overestimeres i nærområdet rundt kantene av depresjonen (skuldrene).



Figur 6: Modell (øverst), raytracing fra begge sider og automatisk invertering/tolkning (nederst) med wavefront inversion



Figur 7: Modell (øverst), raytracing fra begge sider og automatisk invertering/tolkning (nederst) med wavefront inversion

#### 4 SVAKHETSSONER MED ENDELIG VERTIKAL UTSTREKNING

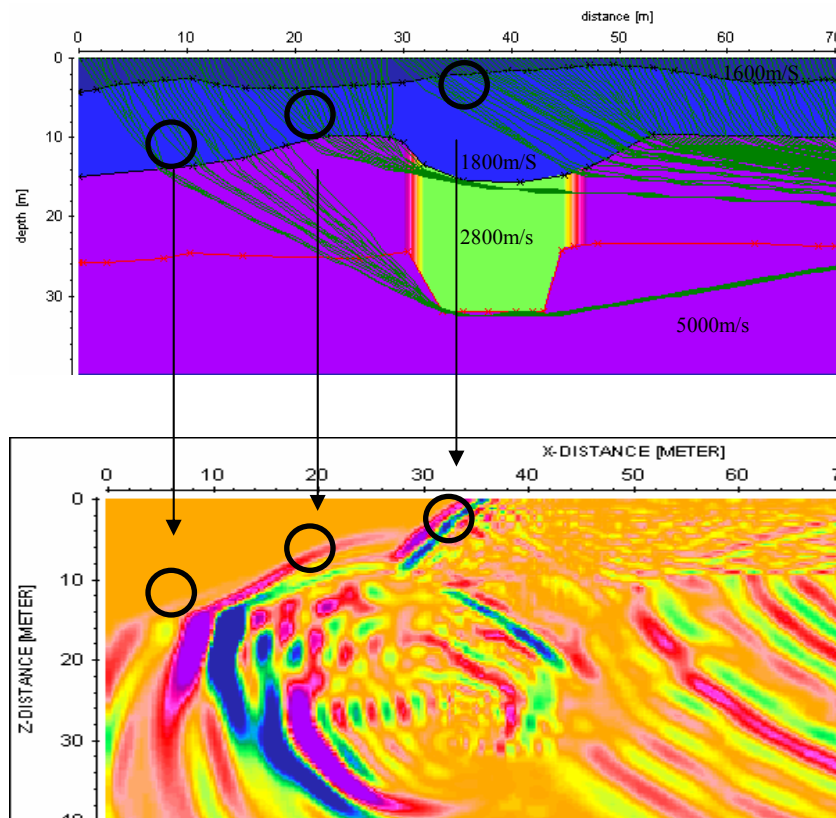
Figur 8 viser resultater fra raytracing og full bølgeform (finite difference) modellering med en modell med to løsmasselag (1600 m/s og 1800m/s) og en ca. 15 m bred svakhetsone (2800m/s) med endelig vertikal utstrekning (15-20m), omgitt av godt fjell (5000m/s). Fra raytracingen, figur 8 øverst, ser vi at noen av strålebanene går gjennom og noen går rundt svakhetssonen. Det betyr at for rene klare gangtidsdata, slik som de generert fra raytracing, kunne det vært mulig å beregne bunnen i svakhetssonen ut fra samme resonnement som i kapittel 3. Problemet kan imidlertid være at styrken på signalet som går rundt svakhetssonen og opp igjen, kan bli for liten. Spesielt gjelder dette når depresjonene er dype. Dette forholdet er illustrert i figur 8 nederst, som viser bølgefeltet på et gitt tidspunkt rundt en depresjon. Pilene og sirklene indikerer hvilke deler av bølgefeltet som tilsvarer de ulike partiene av strålebildet. Som vi ser av figuren, vil energien i bølgefeltet som har rundet under svakhetssonen og er på vei opp igjen, være mye svakere enn bølgen som går tvers igjennom svakhetssonen. Dette illustrerer at man bør ha lite støy og/eller sterk kilde dersom man ønsker å dra nytte av bølgen som går rundt sonen. Videre vil det være nødvendig å skyte tett på flankene for å få god bestemmelse av fjelloverflaten og hastighetene på hver side av svakhetssonen, da dette vil danne grunnlaget for posisjonsbestemmelsen av bunnen fra energien som har gått rundt.

En annen mulig måte å bestemme bunnen av en depresjon eller svakhetsone (med klar grense) er gjennom refleksjonsseismikk. Man forsøker her å identifisere refleksjoner (ekko) i de seismiske registreringene. Refleksjoner kommer etter direktebølgene og refraksjonene og det er derfor ikke alltid like lett å identifisere disse i et komplisert bølgefelt. Refleksjonsseismikk i denne sammenhengen vil også kreve en høyfrekvens kilde (tenner eller bedre) som ligger sentralt over svakhetssonen og tett avstand mellom mottakerene. Eksempler på syntetiske refleksjonsdata (beregnet med finite difference modellering) er vist i figur 9. Figuren viser data der refleksjonene fra bunnen er synlige. I praksis kan det imidlertid være vanskeligere, spesielt på land der man ofte har store "forstyrrelser" i bølgeutbredelsen nær overflaten.

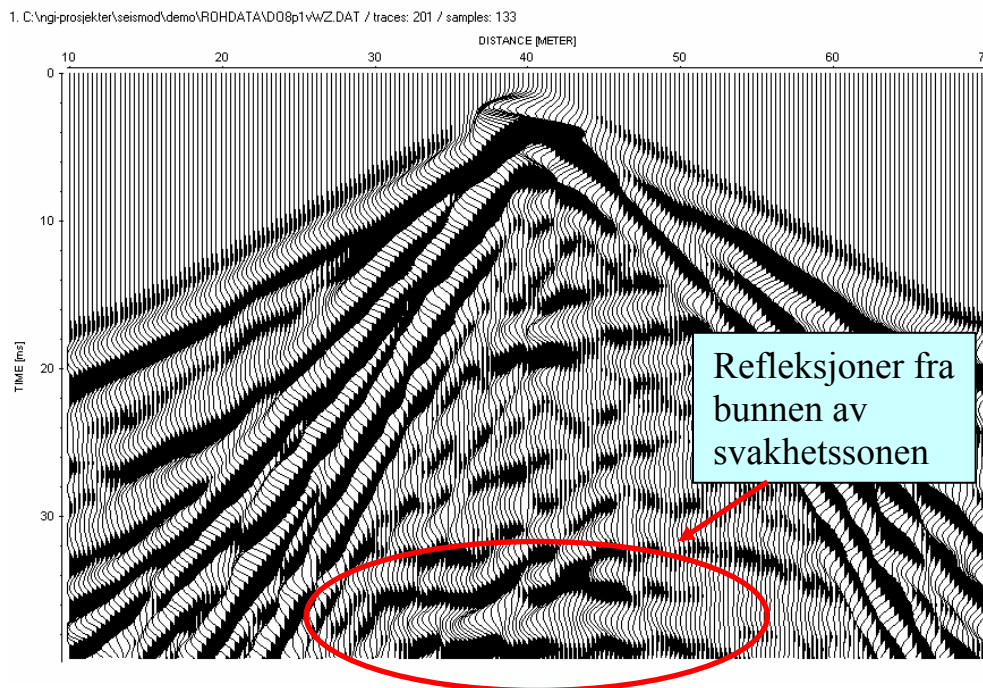
Ett annet problem når det gjelder vertikale svakhetssoner med endelig utstrekning, er at man sannsynligvis i praksis ikke vil ha en skarp og veldefinert grense. Dette vanskeliggjør, eller umuliggjør, de ovenfor nevnte teknikker. I slike tilfeller vil eneste metode for sikker kartlegging av formen til svakhetssonen være med bruk av seismisk tomografi mellom to vertikal hull på hver side av sonen, eller tomografi mellom skråhull og overflaten.

Den foreslåtte metoden for å beregne dyp og gjennomsnittshastigheter som nevnt over, bør imidlertid undersøkes nærmere på reelle data for å estimere følsomhet og nøyaktighet.





Figur 8: Raytracing og full bølgeform modellering av en modell med svakhetszone med begrenset utstrekning



Figur 9: Syntetisk seismisk seksjon fra elastisk modell (fig. 6) med p-kilde 200Hz og registrering på vertikale geofoner.

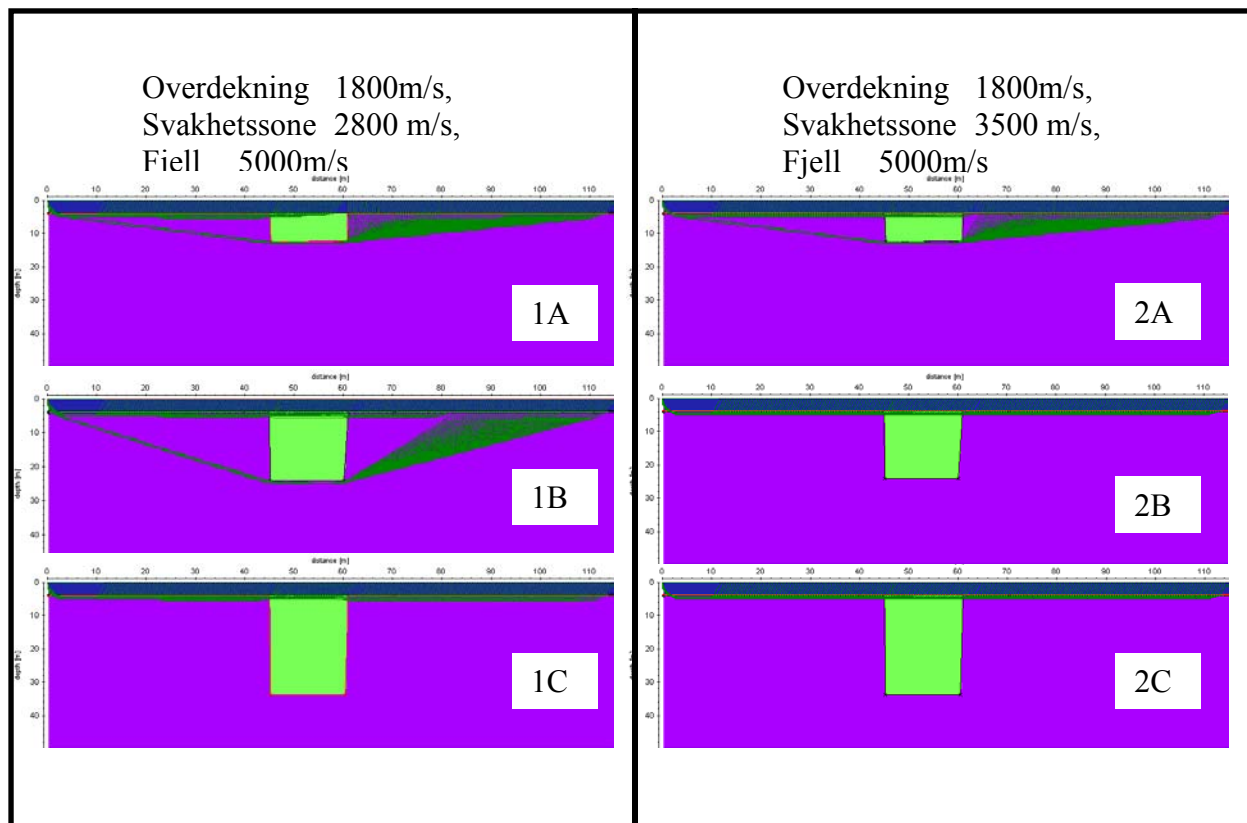


#### 4.1 Automatisk forenklet tolkning av vertikale svakhetssoner med dybdebegrensning.

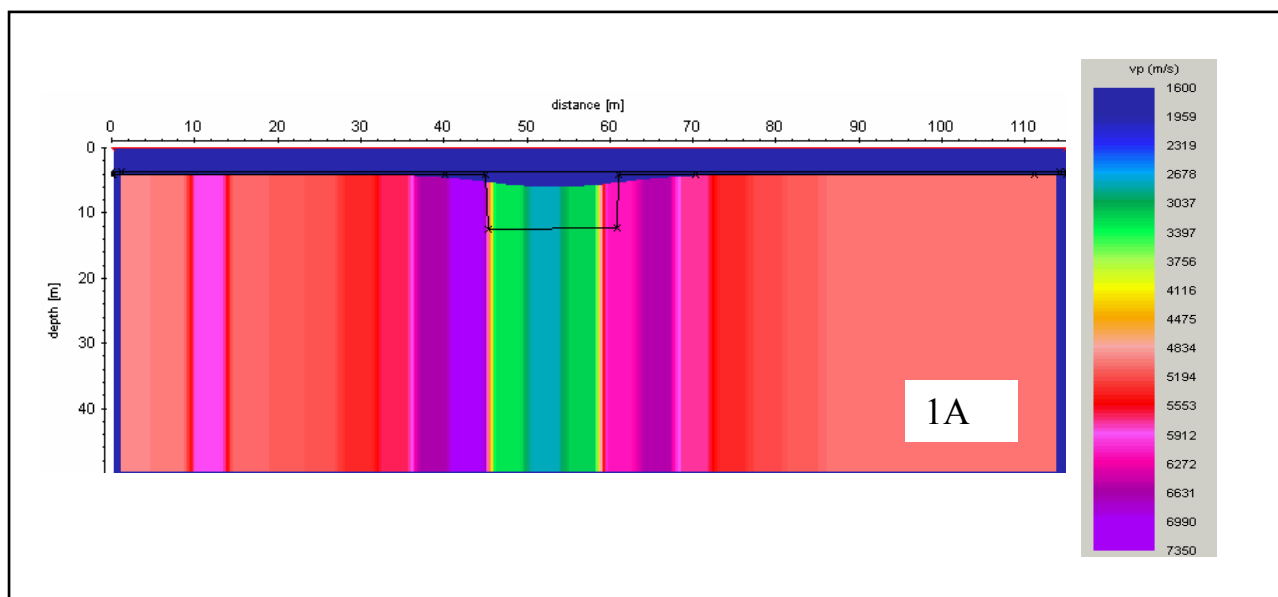
I dette kapitlet vil vi gjøre den samme øvelsen som i kapittel 3.4, men nå med vertikale svakhetssoner med dybdebegrensning i en ellers flat fjelloverflate. Formålet er igjen å vise hvilke resultater som kan komme ut av en kommersiell tilgjengelig tolkningssoftware, basert på hastighetsanalyser kun fra ytterskudd.

Raytracing fra to ulike modeller med ulik hastighet i 15 m bred svakhetszone (2800m/s og 3500m/s) med varierende dybde (7m, 15m og 30 m) er vist i figur 10. Som vi ser fra figuren, går alle strålene gjennom sonen og ikke rundt, når dypet på sonen er større enn ca. to ganger bredden. I modellen med høyest hastighet i svakhetssonen, går alle strålene gjennom sonen også når dybdebreddeforholdet er lik 1 (dyp og bredde lik 15 m). Når alle strålene går igjennom sonen, og ingen rundt, vil en automatisk tolkning gi en eksakt løsning som tilsvarende utgangsmodellen. I de tilfeller stråler også går under svakhetssonen, som i modell 1A, 2A og 1B, vil en automatisk tolkning (av samme type som beskrevet tidligere) gi et noe fordreid hastighetsbilde, vist i figur 11, 12 og 13 (NB fargeskalaen er forskjellig i de ulike figurene). Vi ser bl.a. en tendens til hastighetsøkning nær kantene, spesielt for de modellene der svakhetssonen er grunn. Hastigheten i svakhetssonen er også noe endret i forhold til modellen, men ikke vesentlig.

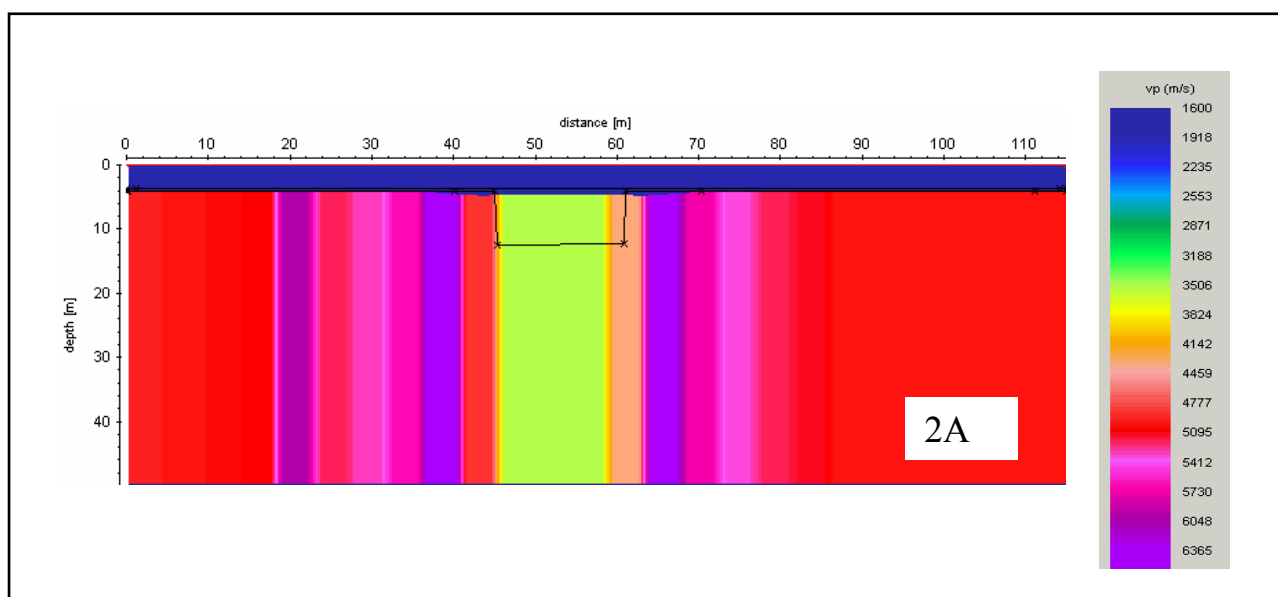
Denne øvelsen indikerer at smale grunne soner, med dybde/bredde-forhold ned mot en halv, vil kunne resultere i et hastighetsbilde som forsvarende en tolkning som en uendelig dyp sone, dersom man benytter tilsvarende forenklet tolkning som er brukt her ("wavefront-inversion" og der kun ytterskudd brukes i hastighetsbestemmelsen).



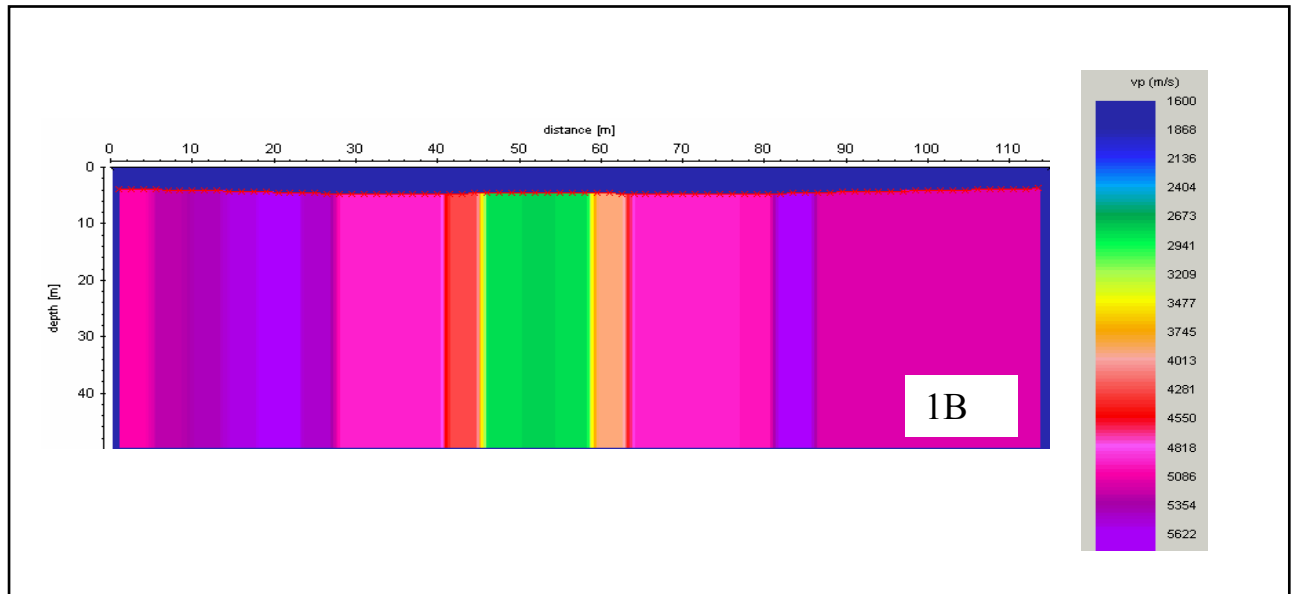
Figur 10: Raytracing av to modeller med ulik hastighet (2800m/s og 3500 m/s) i svakhetszone med variabel vertikal utstrekning



Figur 11: Automatisk tolkning av modell 1A i figur 10



Figur 12: Automatisk tolkning av modell 2A i figur 10



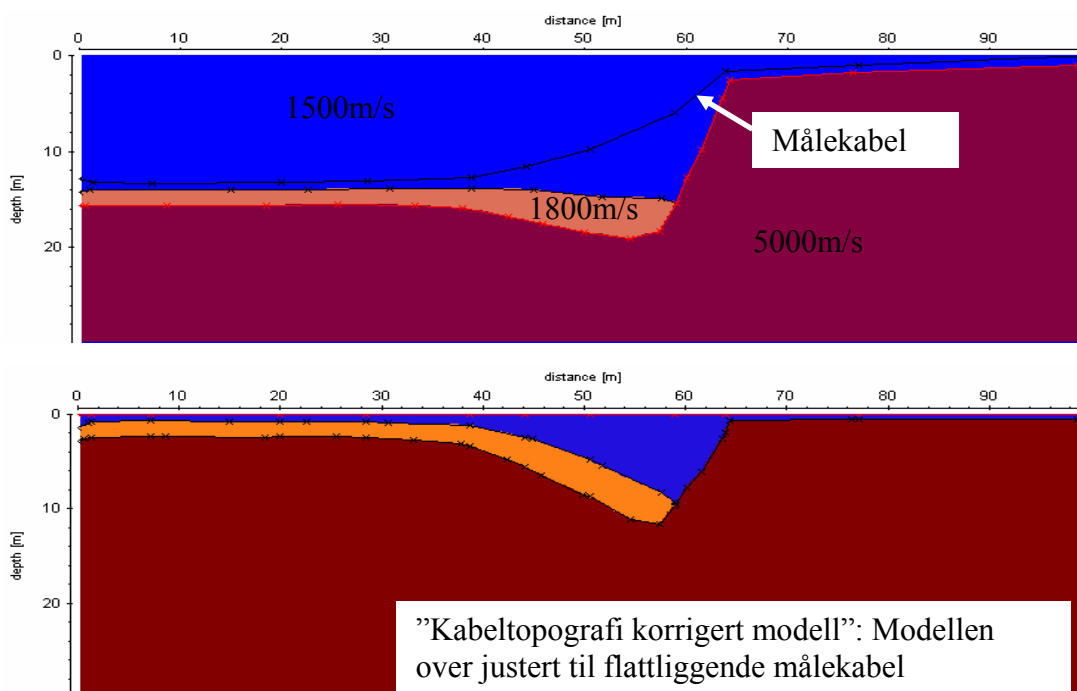
Figur 13: Automatisk tolkning av modell 1B i figur 10

## 5 EFFEKTER AV KABELHENG

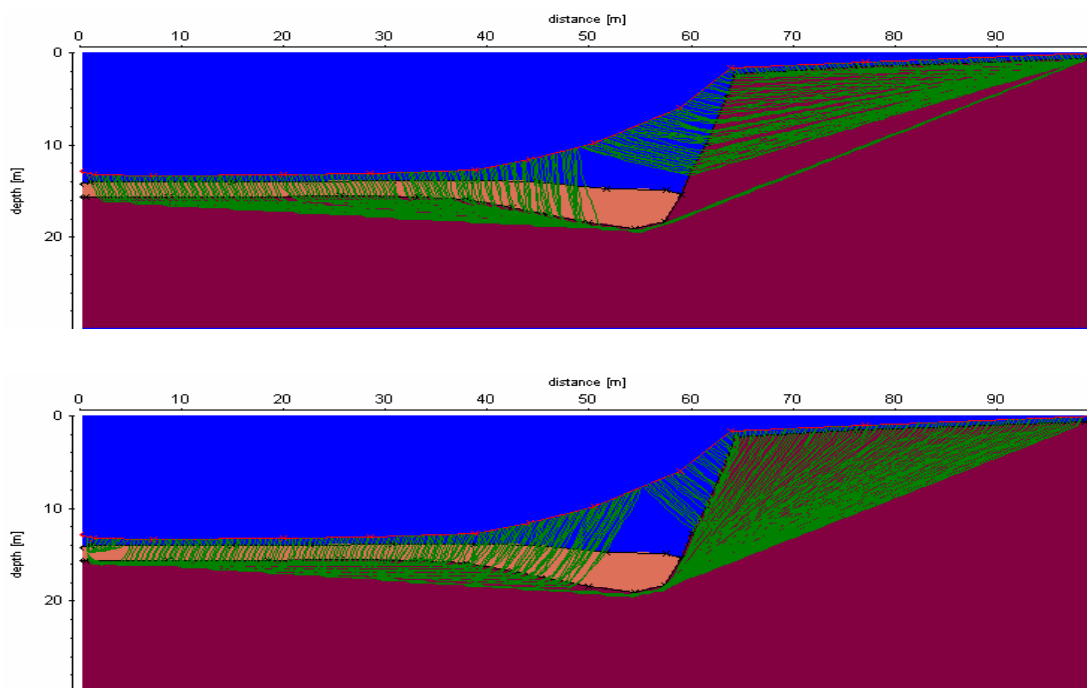
Vi har gjort en enkelt modellering av kabelheng. Modellen er vist i figur 14, øverst. Den nederste illustrasjonen viser ”kabeltopografikorrigert modell” og fremkommer ved å justere modellen slik at kabelen ligger horisontalt. Som vi ser, ligner da situasjonen på noe vi har sett på tidligere i denne rapporten, sterke depresjoner i fjelloverflaten med løsmasselag.

Som det går frem av figur 14, betrakter vi her en situasjon med betydelig kabelheng, dvs store deler av kabelen henger fritt i vannet utenfor en bratt skrent. Modellen representerer en ekstrem situasjon som sannsynligvis ikke forekommer ofte i praksis. Grunnen til at vi har valgt en slik modell, er for å få bedre frem effektene som kan gi mulige forstyrrelser i tolkninger med kabelhengproblematikk. Det er viktig å være klar over at kabelheng under seismisk innsamling og tolkning ikke er noe problem, dersom tolkeren av dataene vet at kabelen henger og har tilgang til korrekte data over sjøbunnstopografien. Problemet oppstår kun når sjøbunnstopografien ikke er kartlagt med tilstrekkelig nøyaktighet på forhånd, eller mangler, og den seismiske operatøren da tror at den seismiske målekabelen ligger på bunnen. Det ville heller ikke vært noe problem dersom målekabelen hadde tett med mottakere og man benyttet tett skuddavstand. Da ville den seismiske operatøren kunne se fra dataene på innskuddene hvor kabelen henger i vannet (man ser vannhastighet over flere mottakere).

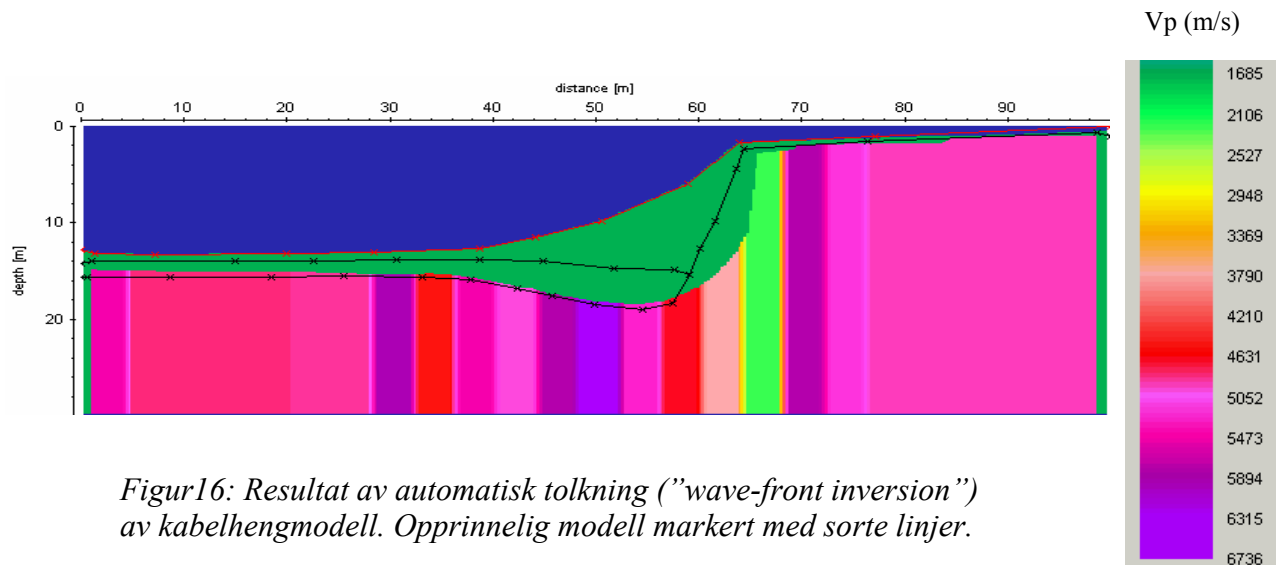
Strålebanene for ytterskuddene fra begge sider er vist i figur 15 og den automatiske tolkningen i figur 16.



Figur 14: Modell av situasjon med kabelheng



Figur 15: Strålebaner for ytterskudd i kabel-hengmodell



Figur16: Resultat av automatisk tolkning ("wave-front inversion") av kabelhengmodell. Opprinnelig modell markert med sorte linjer.

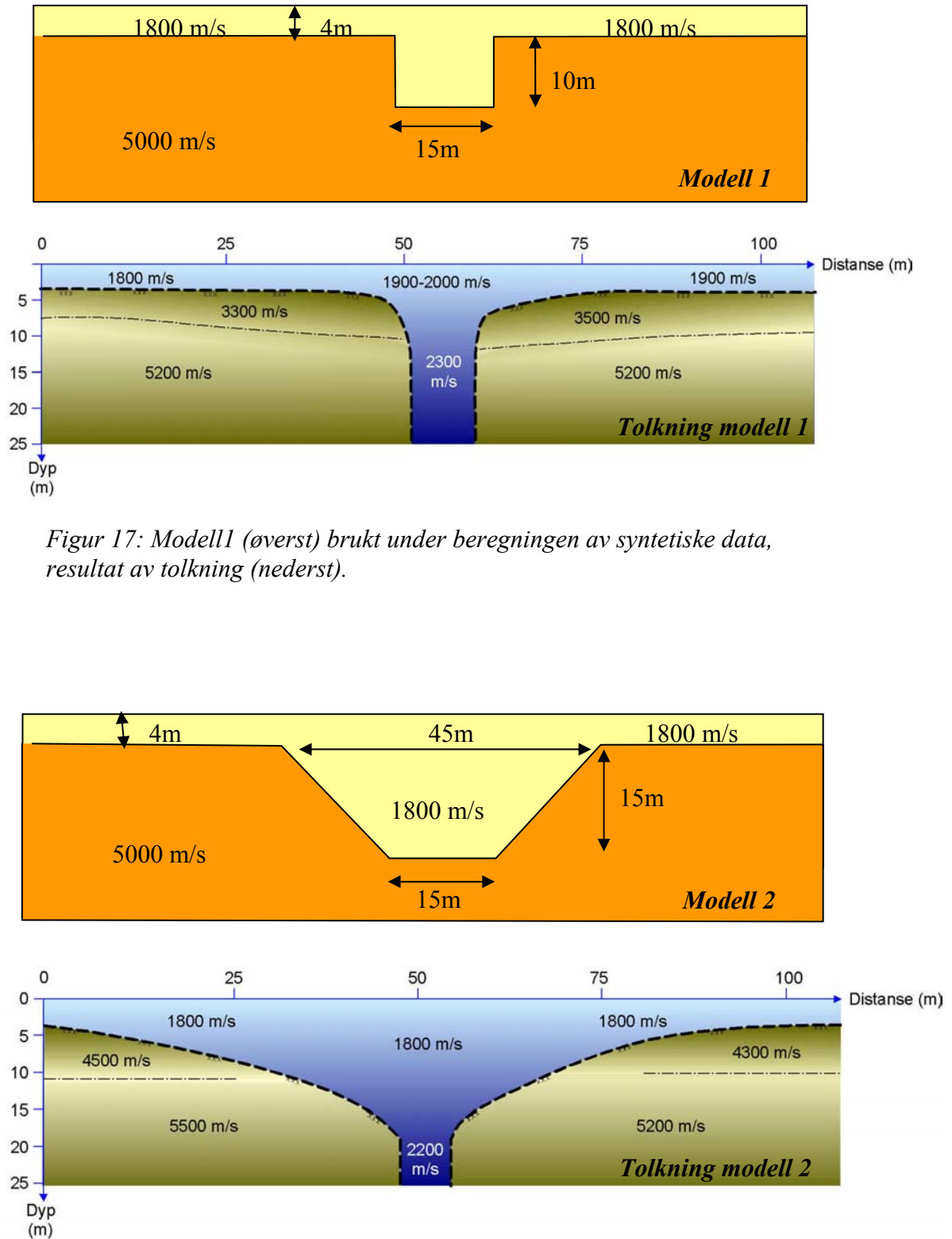
Som vi ser av figur 16, resulterer den automatiske tolkningen i en modell med løsmasser (grønn farge) oppover fjellsiden. Vi ser også at fjellhastighetene blir påvirket. Vi ser lave hastigheter i brattsiden og høye hastigheter på sidene.

Resultatene viser at i ekstreme situasjoner, og ved en forenklet tolkning, kan kabelheng gi opphav til en modell som ikke stemmer helt med virkeligheten. I vårt tilfelle indikerer resultatene en ingeniørgeologisk situasjon som er verre enn den opprinnelige modellen.

## 6 BLINDTEST- LØSMASSEFYLT DEPRESJON

Vi har tidligere i denne rapporten sett på den manglende seismiske dekningen som oppstår i ulike situasjoner med sterk fjelltopografi. For å undersøke hva slags resultat en erfaren seismisk tolker ville velge å presentere i en slik sammenheng, er det gjennomført en blindtest. Vi har valgt to modeller, begge med løsmassefylt skarp depresjon i fjelloverflaten, uten svakhetsone, figur 17 og 18. Fra disse modellene har vi beregnet syntetiske seismiske data med "finite difference modellering" i tidsdomenet. Vi har brukt samme skudd og mottakergeometri som det man har i dagens refraksjonsseismiske målinger, dvs. geofonavstand 5m og skuddavstand 25 m. De syntetiske dataene ble konvertert til et vanlig seismisk dataformat (SEG2) og overlevert tolkeren. Tolkeren plukket selv ut første ankomsttider og laget gangtidskurver som han deretter tolket.

Resultatene fra blindtesten for de to modellene er vist nederste i figur 17 og 18. Den øverste illustrasjonen på hver av figurene er modellen ("fasiten"), mens tolkningsresultatene er vist nederst.



Figur 17: Modell1 (øverst) brukt under beregningen av syntetiske data, resultat av tolkning (nederst).

Figur 18: Modell2 (øverst) brukt under beregningen av syntetiske data, resultat av tolkning (nederst).





Hovedkonklusjonen fra denne øvelsen er at tolkningen som presenteres er konservativ, i det den angir en vertikal svakhetszone i bunnen av depresjonen selv om den ikke finnes i den opprinnelige modellen.

## 7 KONKLUSJON

Seismisk modellering av ulike situasjoner med skarpe depresjoner, dybdebegrensede vertikale svakhetssoner og kabelheng, viser at man ikke kan forvente å oppnå et entydig tolket bilde av den geologiske situasjonen dersom man benytter en forenklet tolkningsteknikk og har et begrenset eller feilaktig datagrunnlag. En mer grundig tolkning (gjærne basert på gjentatt modellering, eller annet), der man også bruker data fra tett posisjonerte innerskudd og eventuelle refleksjonsskudd, vil sannsynligvis i mange tilfeller kunne gi et noe bedre resultat. Vi er imidlertid usikre på om seismiske data fra overflaten alene vil være tilstrekkelig for å oppnå ønsket nøyaktighet i dyp og hastigheter i forbindelse med skarpe depresjoner og svakhetssoner. Reelle måledata vil av ulike årsaker være betydelig vanskeligere å tolke enn syntetiske data. Vi vil derfor anbefale at man gjør fullskala eksperimentelle studier, dersom man ønsker å avklare hvilken nøyaktighet og presisjon man kan forvente å oppnå med overflateseismiske målinger som tett refraksjon og refleksjon.

Man skal ikke se bort fra at ønsket oppløsning og nøyaktighet i hastighetsbildet mot dypet kun kan oppnås med metoder som er avhengig av borehull, for eksempel mellomhullseismikk eller tomografi mellom skrå borehull og overflaten.

# Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



<b>Oppdragsgiver/Client</b> Prosjektet Miljø- og samfunnstjenlige tunneler	<b>Dokument nr/Document No.</b> 20001042-3
<b>Kontraksreferanse/ Contract reference</b>	<b>Dato/Date</b> 7 juli 2003
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Seismisk modellering. Modellering av seismiske data over løsmassefylte depresjoner, svakhetssoner og ved kabelheng <b>Prosjektleder/Project Manager</b> Vidar Kveldsvik <b>Utarbeidet av/Prepared by</b> Harald Westerdahl	<b>Distribusjon/Distribution</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Fri/Unlimited</b>  <b>Begrenset/Limited</b> <input type="checkbox"/> <b>Ingen/None</b>
<b>Emneord/Keywords</b> Seismisk modellering, seismikk, geofysikk, refraksjonseismikk	
<b>Land, fylke/Country, County</b>  <b>Kommune/Municipality</b>  <b>Sted/Location</b>  <b>Kartblad/Map</b>  <b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>  <b>Feltnavn/Field name</b>  <b>Sted/Location</b>  <b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>

Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001							
Kon- trollert av/ Reviewed by	Kontrolltype/ Type of review	Dokument/Document		Revisjon 1/Revision 1		Revisjon 2/Revision 2	
		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed	
		Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.
FL	Helhetsvurdering/ General Evaluation *	2003.06.17					
	<b>Språk/Style</b>						
OCP	<b>Teknisk/Technical</b> - Skjønn/Intelligence - Total/Extensive - Tverrfaglig/ Interdisciplinary	2003.06.24					
	<b>Utforming/Layout</b>						
VK	<b>Slutt/Final</b>	2003.07.07					
JS	<b>Kopiering/Copy quality</b>						
* Gjennomlesning av hele rapporten og skjønnsmessig vurdering av innhold og presentasjonsform/ On the basis of an overall evaluation of the report, its technical content and form of presentation							
<b>Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release</b>		<b>Dato/Date</b>		<b>Sign.</b>			