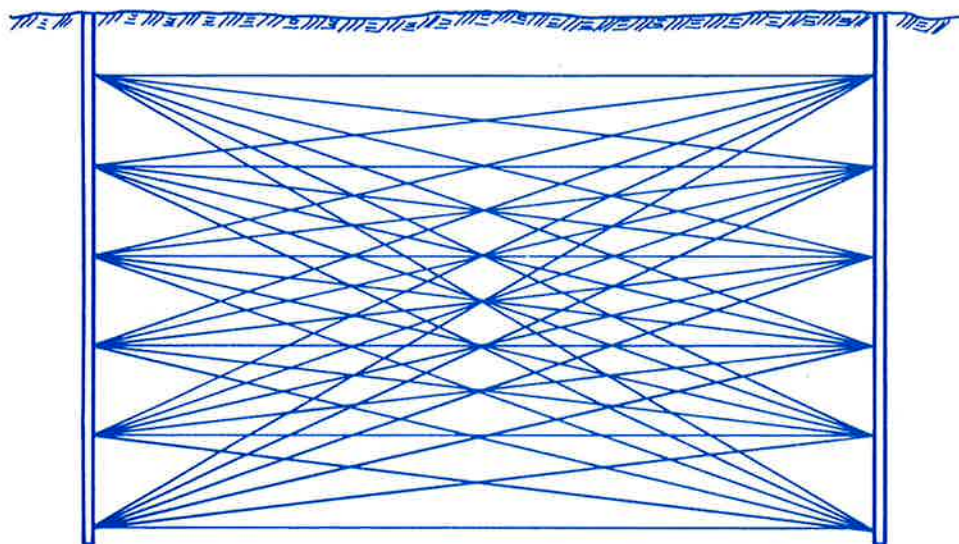


BeFo



Mellanhålsseismik

Användning och nytta vid projektering av berganläggningar

Ola Claesson

Stiftelsen Bergteknisk Forskning — BeFo
Swedish Rock Engineering Research Foundation

Mellanhålsseismik

Användning och nytta vid projektering av berganläggningar

Cross hole seismics

Applications in Rock engineering

Ola Claesson, Skanska AB

FÖRORD

Att bygga i berg innebär att bygga med ett mer eller mindre okänt "byggnadsmaterial". För att göra sig mera oberoende av överraskande avvikelser från de bergförhållanden man väntat sig, kan man i princip välja två vägar:

att bygga med en metod som är mer eller mindre okänslig för variationer i berget, dvs en universalteknik, som effektivt klarar av det mesta, eller

att skaffa sig avancerade undersökningsinstrument som avslöjar bergets inneboende hemligheter i sådan grad att drivningsarbetet kan planeras i detalj med hänsyn till de faktiska förhållandena.

Båda alternativen kan anses smått utopiska, men senare tiders utveckling på elektronik- och datorområdet har inneburit stora framsteg i konsten att "se genom berget" och vi kan vänta oss en fortsatt snabb utveckling i den riktningen.

För att utvärdera vad metoder som mellanhålsseismik och borrhålsradar kan betyda praktiskt för projektören och byggaren har föreliggande rapport tagits fram på BeFos uppdrag av Ola Claesson, Skanska, med stöd av experter på de olika teknikerna. Rapporten pekar utan tvekan fram emot en fortsatt intressant utveckling av stor betydelse för bergbyggandet i en nära framtid.

Stockholm i september 1988

Tomas Franzén

SUMMARY

The use of seismics has always played an important part in the design of underground installations. These methods continuously become more developed and sophisticated with which follows a possible, wider utilization of e.g. cross hole seismics.

A comparison between cross hole seismics and other advanced geophysical investigation methods, mainly bore hole radar, shows that both methods are very suitable for detection and to a certain degree also for characterization of anomalies of particular interest with regard to the construction technique. It is also evident that the two methods in important parts are complementary. Which method to use should therefore be decided from case to case.

Cross hole seismics is not aimed at preliminary investigations over larger areas where the primary intention is to identify critical regions that will need more detailed investigation. The reason for this is the method's capacity with regard to range and resolution.

The optimal application field for cross hole seismics is, on the contrary, for more detailed mapping of the elastic properties in a limited rock mass, which properties in turn may be translated and interpreted into structural-geological terms. In this context, more information about the rock mass can be acquired by the use of cross hole seismics than by other more traditional investigation methods.

The following are examples where investigation by cross hole seismics may be recommended:

- for mapping of the existence/exposure of anomalies or crushed zones in a tunnel and determine the optimal passage of such zones
- for determining the rock mass quality and the optimal site and orientation of a rock cavern
- for mapping karst structures especially at dam sites

At present, the cross hole seismics method is developing rapidly and its capacity and application fields are expected to increase in the near future.

Innehållsförteckning

Sid

1. Sammanfattning	1
2. Inledning	2
3. Teoretisk bakgrund	3
4. Tillämpningar	8
5. Felkällor och upplösning	13
6. Andra geofysiska metoder	15
7. Användning	18
8. Slutsats	22
9. Appendix; Exempel på användning av mellanhåls- seismik i Norge och Finland	23
10. Referenser	30

Sammanfattning

Användning av seismik har alltid spelat en viktig roll vid projektering för större undermarkskonstruktioner i berg. De seismiska undersökningsmetoderna förfinas och vidareutvecklas kontinuerligt vilket bland annat inneburit en alltmer utbredd användning av mellanhålsseismik.

En jämförelse mellan mellanhålsseismik och andra avancerade geofysiska undersökningsmetoder, främst georadar, ger vid handen att båda metoderna lämpar sig väl för detektering och i viss mån karakterisering av byggnadstekniskt intressanta anomalier i berg samt att de i viktiga delar kompletterar varandra. Vilken metod som skall användas avgörs följaktligen från fall till fall.

Mellanhålsseismik bör inte användas vid översiktliga undersökningar av större områden med avsikten att identifiera kritiska partier där ytterligare undersökningar måste genomföras. Orsaken till detta står främst att finna i metodens kapacitet med avseende på räckvidd och upplösning.

Det optimala användningsområdet för mellanhålsseismik är istället vid **mer detaljerade** kartläggningar av **begränsade** bergmassors elastiska egenskaper. I de här sammanhangen kan metoden ge mer information om bergets egenskaper jämfört med de mer traditionella undersökningsmetoderna.

Som exempel på konkreta situationer där användning av mellanhålsseismik kan vara aktuellt är vid undersökningar av;

- störningszoner för att kartlägga exponeringen i en tunnel och bestämma bästa läge för passage,
- bergplintar för att bestämma bergkvalitet och för att optimera läge och orientering av bergrum,
- dammlägen för att kartlägga karststrukturer och bestämma injekteringsbehov etc.

I dagsläget går utvecklingen av metoden snabbt varför kapaciteten och användningsområdet kan väntas öka ytterligare under de närmaste åren.

Inledning

Den mycket snabba datorutveckling vi har kunnat iaktta under 70- och 80-talet, med avseende på både hård- och mjukvara, har inneburit helt nya utvecklingsmöjligheter på många vetenskapliga områden.

Ett exempel är inom geofysiken. Möjligheten att snabbt samla in och bearbeta stora datamängder har berett vägen för bland annat mellanhålsseismik.

Mellanhålsseismik innebär såsom namnet anger att man studerar elastiska vågors utbredning mellan två närliggande borrhål, vilket ger möjlighet att undersöka den mellanliggande bergmassans egenskaper.

Speciellt intressant är möjligheten att använda mellanhålsseismik för att kartlägga en bergmassa med avseende på avvikelser och språng i de byggnadstekniska egenskaperna. Visserligen myntade greken Maximos redan långt före Kristi födelse uttrycket "Natura non facit saltum", fritt översatt "Naturen gör inga språng", men det får väl anses yttrat utifrån ett mer filosofiskt synsätt än ingenjörsgéologens.

För att värdera behov och möjlig nytta av mellanhålsseismik vid större och känsliga anläggningsprojekt har BeFo tillsatt en mindre utredning, vilken resulterat i denna rapport.

Ambitionen med rapportens teoretiska och tekniska delar är att översiktligt spegla de fysikaliska samband och den teknik som styr användningen av metoden.

I appendix beskrivs kortfattat två fall där mellanhålsseismik har använts som förundersökningsmetod.

Utredningen har finansierats av Skanska och BeFo.

Teoretisk bakgrund

Grundläggande för all seismik är de ur den allmänna vågekvationen härledda sambanden mellan seismiska vågors utbredningshastighet och bergmassans elastiska parametrar.

P-vågor, vilka även kallas kompressionsvågor, kännetecknas av partikelrörelse som är parallell med vågens utbredningsriktning, medan S-vågor även kallade skjuvvågor, kännetecknas av en partikelrörelse vinkelrätt mot vågens utbredningsriktning. För P- och S-vågor gäller följande;

$$V_p = \left(\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

$$V_s = \left(\frac{E}{2(1+\nu)\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

E = Youngs modul	(Pa)
G = Skjuv modul	(Pa)
ν = Poissons tal	
ρ = Densitet	(kg/m ³)

(1) och (2) kan omformas till;

$$E = 3 V_s^2 \rho \frac{V_p^2 - 4/3 V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (\text{Pa}) \quad (3)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{Pa}) \quad (4)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p - V_s)} \quad (5)$$

En viktig egenskap hos S-vågorna är att de inte utbreder sig genom medier i flytande fas vars skjuvmodul G är försumbar. P och S står även för primär respektive sekundär då V_p alltid är större än V_s .

Förutom P- och S-vågor vilka fortplantar sig genom kroppar (s k body waves) utbildas även vågor längs fria ytor kallade Rayleigh vågor, eller längs gränssytan mellan två olika medier kallade Love vågor. Dessa två vågtyper benämns ofta ytvågor och är dispersiva till sin karaktär, det vill säga utbredningshastigheten varierar med frekvensen.

I ett homogent elastiskt medium utbreder sig vågorna från en punktkälla som expanderande sfärer. Främre delen av vågen kallas vågfront och linjer vinkelrätt mot vågfronten kallas vågstrålar (se fig 1).

En viktig princip vid vågutbredningen är att varje punkt i en vågfront skall betraktas som en källa till en ny sfärisk våg, vilket brukar kallas Huygens princip.

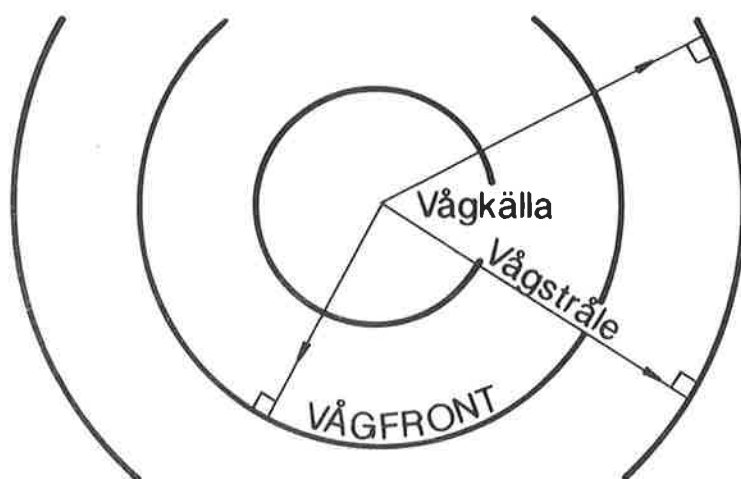


Fig 1.

En elastisk våg som infaller mot en gränssyta mellan två elastiska medier ger upphov till såväl P- som S-vågor vilka sprids i bägge medierna. Vågor som sprids i det övre mediet kallas reflektionsvågor och de som sprids i det undre mediet refraktionsvågor (se fig 2).

Utbredningsriktningen för en reflekterad eller refrakterad våg styrs av Snell's brytningslag som lyder;

$$\frac{\sin i_0}{v_0} = \frac{\sin i_1}{v_1} = \dots = \frac{\sin i_n}{v_n} = \text{konstant} \quad (6)$$

i = vinkeln mellan infallande våg och normalen till gränssytan

v = våghastigheten i respektive medie.

Den så kallade kritiska vinkeln i_c är den vinkel för vilken den brutna vågen utbreder sig parallellt med gränssytan mellan medierna (se fig 2).

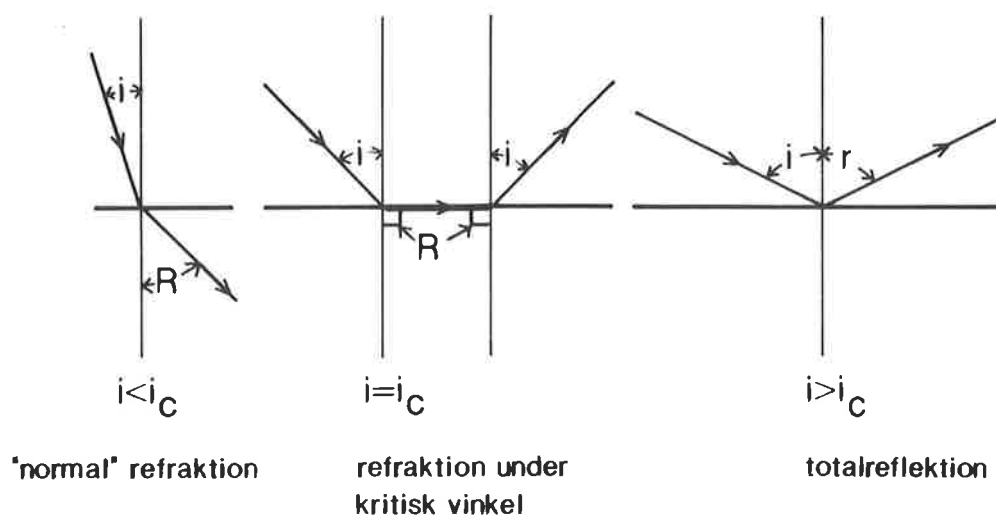


Fig 2.

I de fall bergmassan kan betraktas som ett homogent elastiskt medium gäller att de seismiska vågorna endast dämpas genom geometrisk divergens (spridning) enligt följande samband;

$$A(r) = A^0/r^n \quad (7)$$

A^0 = amplitud vid källan

r = avstånd till källan

n = 0, 1/2, 1 beroende på vågtypen

Amplituden $A(r)$ på avståndet r från källan är följaktligen omvänt proportionellt mot r^n .

Naturligtvis är det en grov approximation att betrakta en bergmassa som ett homogent elastiskt medium. Tvärtom innehåller ju en bergmassa diskontinuiteter och inhomogeniteter i form av exempelvis spricksystem, svaghetszoner och vittrade partier. Detta får till följd att de elastiska vågorna dämpas snabbare än vad sambandet (7) förutsäger, vilket främst förklaras av;

- Reflektions- och transmissionsförluster vid gränssytor.
- Energi absorption genom omvandling av elastisk vågenergi till värme.

Om hänsyn tas till denna energiomvandling erhålles följande uttryck för dämpningen vid inelastiska förhållanden.

$$A(r) = \frac{A_0 e^{-\alpha r}}{r^n} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\pi f}{VQ}$$

f = frekvensen (Hz)
 V = utbredningshastigheten (m/s)
 Q = kvalitetsfaktor (inre friktionskoefficient)

Av ovanstående framgår att amplituden avtar snabbare vid högre frekvenser och låga Q -värden.

Q faktorn kan sägas vara ett mått på bergets kvalitet men är också direkt kopplat till bergartstypen. En kompetent intakt bergmassa har ett högt Q värde medan en uppsprucken, vittrad inkompetent bergmassa har ett lågt Q värde. Vidare är Q nära nog oberoende av frekvensen för icke porvattenmättade "torra" bergmassor men beror starkt av frekvensen i porvattenmättat berg.

Förutom de ovan nämnda mekanismerna så påverkas vågens utbredning av flera andra parametrar som mediets temperatur och spänningstillstånd.

Ett ofta använt begrepp vid beskrivning av en seismisk vågs passage genom en gränsyta är akustisk impedans, Z , vilken definieras som produkten av våghastigheten och densiteten hos mediet.

$$Z = \rho V \quad (9)$$

Vid vågens infall mot en gränsyta med avvikande akustisk impedans, reduceras som tidigare nämnts den transmitterade vågens energi på grund av reflektioner i gränsytan.

Förhållandet mellan reflekterad och transmitterad energi beror på vågens infallsvinkel mot gränsytan och skillnaden i akustisk impedans ΔZ . Då vågen infaller vinkelrätt mot en gränsyta mellan två medier 1 och 2, kan förhållandet mellan reflektionskoefficienten R och transmissions-

koefficienten T beskrivas med hjälp av impedanserna hos medie 1 och 2.
För en P-våg gäller;

$$R = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (10)$$

$$T = 4 Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (11)$$

$$T + R = 1 \quad (12)$$

Vågamplituden för transmitterade respektive reflekterade vågor är proportionell mot kvadratroten ur R och T.

Av (9) framgår att då Z_1 och Z_2 närmar sig varandra transmitteras stora delar av den infallande vågens energi vilket brukar kallas god akustisk koppling. Omvänt gäller att stora delar av energin reflekteras då en klar skillnad finns mellan Z_1 och Z_2 .

Tillämpningar

Idén att utnyttja elastiska vågor som informationsbärare vid undermarksundersökningar har utnyttjats under lång tid vid refraktions- och reflektionsseismiska mätningar från markytan.

Dessa metoder ger framför allt möjlighet till detektering av större subhorisontella strukturer i undergrunden som lagerföljder, berggrundsreliefer etc.

Vid refraktionsseismiska mätningar från markytan utnyttjar man vågor som infaller mot ett gränsskikt under den kritiska vinkeln i_c , vilket innebär att vågen följer gränsskiktet och refrakteras tillbaka till markytan under samma vinkel.

Ett villkor för att metoden skall fungera är att de seismiska gånghastigheterna ökar med djupet. Detta villkor kan uppfyllas i de flesta geologier då densiteten vanligen ökar med djupet.

Reflektionsseismiska mätningar används oftast för att kartlägga geologiska strukturer på stora djup, exempelvis vid gas- och oljeprospektering. Metoden ställer inga krav på hastighetsfördelningen i undergrunden men är i de flesta fall mer komplicerad att utföra än refraktionsseismik.

Den vanligaste metoden att analysera reflektions- och refraktionsseismiska mätningar är genom s k löptidsdiagram (se fig 3 nästa sida).

Grunden för löptidsanalys är Fermat's princip som säger att en vågstråle alltid tillryggalägger vägsträckan på minimitid.

Naturligtvis inskränker sig inte informationsvärdet hos en propagerande elastisk våg endast till gånghastigheten/löptiden, utan som framgår av tidigare förda resonemang så avspeglas bergmassans elastiska egenskaper också av vågform, amplituder, frekvensinnehåll, dämpning etc.

Generellt kan sägas att utvecklingen går mot att fler komponenter utnyttjas i vågens karaktäristika vid utvärdering och tolkning av seismiska mätningar.

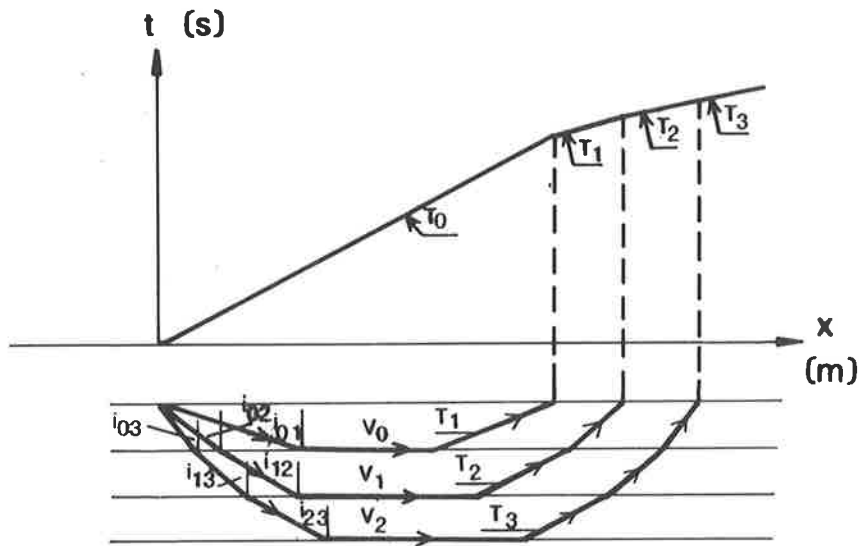


Fig 3. Exempel på löptidsdiagram vid horisontell skiktning.

Detta gäller inte minst vid mellanhålsmätningar. I jämförelse med reflektions- och refraktionsseismik ger mellanhålsseismik helt andra möjligheter att detaljerat studera strukturer och elastiska egenskaper i en bergmassa.

En del av förklaringen till detta är att det vid mellanhålsmätningar är möjligt att genomkorsa en profil mellan två borrhål med ett stort antal vågstrålar i olika riktningar (se fig 4).

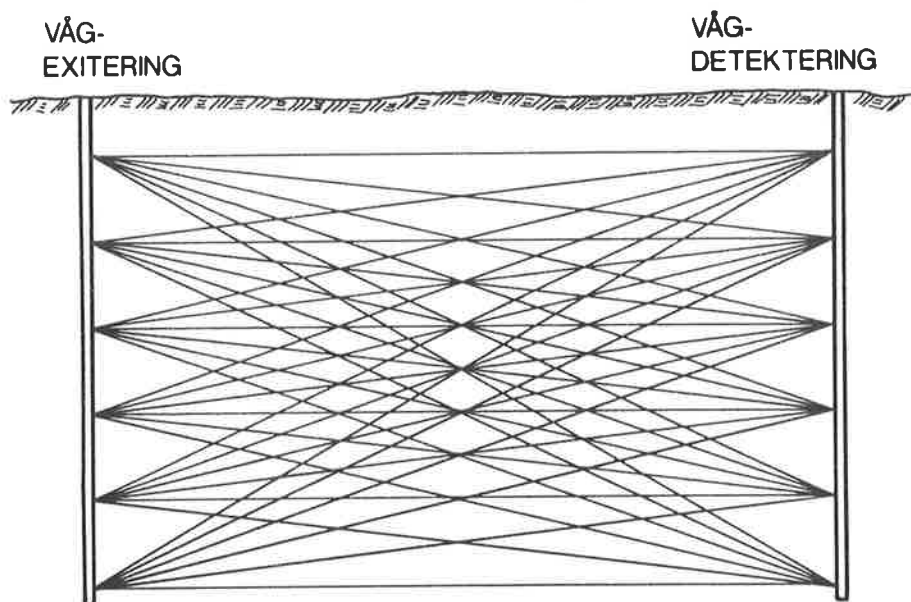


Fig 4.

En annan bidragande faktor är att man vanligtvis använder sig av mer högfrekventa vågor vid mellanhålsseismik, storleksordning kHz, vilket ger en bättre geometrisk upplösning.

Orsaken till detta är att upplösningen är ungefär lika med våglängden som i sin tur är omvänt proportionell mot frekvensen enligt sambandet(13).

$$\lambda = V/f \quad (m) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{våglängd} & (m) \\ V &= \text{vågens utbredningshastighet} & (m/s) \\ f &= \text{frekvens} & (Hz) \end{aligned}$$

I granitiska bergarter varierar vanligen utbredningshastigheten för en P-våg mellan 4000-6000 m/s. Vid en frekvens på 2 kHz innebär detta att våglängden varierar mellan 2-3 m.

Räckvidden dvs maximiaavståndet mellan borrhålen är som framgår sambandet (8) starkt beroende av bergets kvalitet, men även av vågens frekvens, effekten hos vågexitatorn, detektortyp mm.

I en Svensk "normal granit" kan man i dagsläget räkna med en praktisk räckvidd på 150 å 200 m.

Fältutrustningen för en mellanhålsmätning kan i princip indelas i;

- ☐ Enheter för vågexitering och detektering.
- ☐ Enheter för registrering och primär bearbetning av mätdata.

Generering och detektering av elastiska vågor vid mellanhålsmätningar är en balansgång mellan önskemål om räckvidd och upplösning. Exempel på detta är att en högfrekvent vågkälla ger fördelar i form av hög upplösning och hög sändningseffekt men också nackdelar då högfrekventa komponenter dämpas snabbare än lågfrekventa.

Flera olika typer av vågexitatorer finns idag, vilka arbetar efter olika fysikaliska principer.

Exitatorerna brukar delas in efter förmåga att generera P- respektive S-vågor i en bergmassa men det är *inte* så att en P-vågs exitator endast

ger upphov till P-vågor utan naturligtvis genereras även S-vågor till viss del och vice versa för S-vågsexitatorer.

Vid generering av P-vågor används exitatorer av impuls eller vibrator typ. Skillnaden mellan de båda typerna består främst i att impulsexitatorer arbetar med frekvenser i storleksordning 1 kHz och vibratorer med frekvenser i storleksordning 10-tal kHz.

Exempel på impulsexitatorer är sparkers (elektriska urladdningar i en stor "kondensator"), sprängmedel, air guns och mekaniska hammare. Piezoelektriska och magnetostriktiva exitatorer är exempel på vibrator-typen.

För S-vågs generering utnyttjas oftast vibrator och impulsexitatorer med kontrollerbar rörelseriktning, vilka genererar skjuvvågor med ett radiellt utbredningsmönster.

Viktiga kriterier vid val av exitator är;

- ☐ Repeterbarhet/hanterbarhet.
- ☐ Riktbarhet.
- ☐ Effekt/frekvens.

Som detektorer används geofoner (hastighetsgivare) eller accelerometrar där den senare typen är att föredra på grund av bättre noggrannhet och större känslighet vid högre frekvenser.

Detektorn bör vara av 3-D typ dvs registrera vågorna i 3 dimensioner med sensorerna monterade i en triaxial ortogonal konfiguration.

Viktiga kriterier vid val av detektor är;

- ☐ Känslighet/signal-brusförhållande.
- ☐ Hanterbarhet.
- ☐ Frekvensband.

Ofta använda detektorer är piezoelektriska accelerometrar eller geofoner som bygger på moving coil principen.

Registrering av mätdata görs på massminnen med kapacitet att lagra stora datamängder under kort tid. Med hjälp av bland annat stacking och crosscorrelation teknik, vilket närmast kan beskrivas som en typ av "mjukvarufiltrering", kan signal-brusförhållandet förbättras avsevärt.

Möjligheterna att bearbeta och analysera stora mängder seismiska mätdata med iterativa metoder har ökat kraftigt under senare år. Om ett stort antal mätningar/vågstrålar har utförts i en bergmassa kan 2-D bilder eller snitt tas fram över hur de elastiska egenskaperna varierar.

Detta kan göras på flera sätt men speciellt har s.k. geotomografi börjat användas alltmer. En stor fördel med att använda tomografiteknik vid tolkning och transformering av seismiska mätdata till geologiska strukturer är att inga a priori antaganden behöver ansättas beträffande strukturernas geometri. Här kan jämföras med de antaganden som måste ansättas vid undersökningar med refraktionsseismik.

Geotomografi är följaktligen ett effektivt verktyg för beskrivning av komplexa geologiska miljöer. Metoden kan med fördel även användas i samband med reflektionsseismik.

Felkällor och upplösning

En mellanhålsseismisk undersökning består av ett stort antal mättekniska och beräkningsmässiga steg vilket innebär att det är viktigt att identifiera möjliga felkällor och deras storlek för att undvika en omfattande felfortplantning under "resans gång".

Bland de felkällor som måste beaktas vid användande av mellanhålsseismik tillsammans med geotomografi kan nämnas;

- ☐ Fel i borrhålskoordinater och borrhålsgeometrier. Mycket sällan är borrhålen helt raka och för att erhålla korrekta koordinater på våg-exitatorer och vågdetektorer utmed borrhålens hela längd är det i en del fall nödvändigt att hålens geometri mäts upp.
- ☐ 3-dimensionell böjning av vågstrålar. Tomografimodellen kan endast ta hänsyn till böjning i 2-dimensioner.
- ☐ Antalet vågstrålar som med skilda vinklar genomkorsar vissa delar av sektionen är otillräckligt. Detta förekommer ofta vid sektionens topp och botten samt i direkt anslutning till borrhålet
- ☐ Brusnivån distorderar eller överlagrar mätsignalen så att korrekta mätdata ej erhålls.

Förutom de här felkällorna vilka är av mätteknisk art, kan fel uppkomma vid den geologiska tolkningen av mätningarna. Exempelvis kan inte seismiska hastighetsfördelningar "direkt översättas" till geologiska strukturer utan att "platsspecifik geologisk information" tillförs.

Den geometriska upplösningen i en tomografisk bild styrs av storleken på den minsta cell i ett bergsnitt för vilket medelvärdet av de elastiska storheterna kan mätas. Dimensionen på denna cell är som tidigare nämnts i samma storleksordning som våglängden hos den elastiska vågen.

Praktiska försök, genomförda i granitisk bergartsmiljö av Geoseismo i Finland, visar att vid en exitatorfrekvens på 1 kHz och ett avstånd på 100 m mellan borrhålen bör en detekterbar anomali ha en minsta utsträckning av 3-4 m. Dimensionen på cellerna som bygger upp tomografimodellen bör i det här fallet följaktligen också vara 3-4 m eller större.

Detta innebär dock **inte** att anomalier med mindre utsträckning än celldimensionen i tomografimodellen är omöjliga att upptäcka, utan istället att kontrasten minskar pga att anomalins elastiska egenskaper fördelas ut över hela cellen.

Minsta urskiljbara kontrast i gånghastigheten varierar i de flesta fall mellan 2-5 % av normalvärdet, dvs mellan 100-250 m/s vid ett normalvärde av 5000 m/s. Erfarenheter från Finland pekar på att byggnadstekniskt intressanta anomalier uppvisar kontraster i gånghastigheten på minst 10 % av normalvärdet.

Andra geofysiska metoder

Att detektera diskontinuiteter och anomalier i en bergmassa genom att studera elastiska vågors utbredning i berget är bara en framkomlig väg bland flera andra.

Sprickzoner, vittrade partier etc uppvisar inte bara avvikelser i de elastiska egenskaperna utan även i de elektriska och magnetiska egenskaperna samt i porositet/densitet.

Speciellt används ofta de elektriska egenskaperna för att detektera diskontinuiteter och störningszoner i berget. De s.k. EM-metoderna (elektromagnetiska) bygger på att ett elektromagnetiskt primärfält genereras, vilket ger upphov till sekundära inducerade strömmar då fältet träffar på en "god ledare".

De inducerade strömmarna ger i sin tur upphov till ett sekundärt elektromagnetiskt fält, vilket kan detekteras. En god elektrisk ledare kan exempelvis vara en krosszon med ett ökat vatteninnehåll.

Primärfältet genereras antingen med stationära lågfrekventa sändare eller med mer högfrekventa mobila sändare.

Från början utfördes EM-undersökningar endast från markytan, men under senare år har även utrustningar tagits fram för mätningar från borrhål.

En metod som utvecklats mycket snabbt under de senare åren i Sverige är borrhålsradar. Metoden kan användas både för singelhåls- och mellanhåls-mätningar och bygger på högfrekventa (MHz) EM-vågors utbredning och reflektion i en bergmassa.

Vid mellanhålsmätningar med borrhålsradar placeras sändare och mottagare i skilda borrhål, varefter man registrerar den transmitterade elektromagnetiska vågens gångtid (utbredningshastighet) och dämpning.

Singelhålsmätningar genomförs med sändare och mottagare i samma borrhål på fixt avstånd från varandra, varefter radarvågornas reflektioner mot olika gränssytor registreras med avseende på gångtid, dämpning och riktning.

Utbredningen av radarvågorna beror av mediets dielektricitetskonstant, elektriska ledningsförmåga samt vågens frekvens (storleksordning MHz).

Något summariskt kan sägas att räckvidden avtar med ökande vattenhalt (elektrisk ledningsförmåga) och frekvens.

Förutsatt att ett större antal mätningar genomförts mellan två borrhål, kan med fördel tomografiteknik användas för att analysera mätresultaten.

Vid en teknisk jämförelse mellan borrhålsradar och mellanhålsseismik finner man att;

- ☐ Båda metoderna kan med en upplösning i meterskala detektera byggnadstekniskt intressanta diskontinuiteter och störningszoner i en bergmassa.
- ☐ Mellanhålsseismik och borrhålsradar utnyttjar två olika fysikaliska egenskaper hos berget, de elastiska respektive elektriska, vilket styr deras tillämpbarhet i olika geologiska miljöer.
- ☐ Radarmetoden är mer känslig för bergets vatteninnehåll (radarvågorna dämpas snabbare).
- ☐ Mellanhålsseismik ger en mer "direkt koppling" till bergets elastiska egenskaper.
- ☐ Radarmetoden har i de flesta fall kortare räckvidd, men bättre närseende.
- ☐ Båda metoderna är mättekniskt ungefär lika komplicerade.
- ☐ Vid båda metoderna kan med fördel tomografiteknik användas för tolkning och utvärdering.
- ☐ I Sverige har utvecklingen av radarmetoden kommit längre än mellanhålsseismiken.

Som framgår av de första punkterna i jämförelsen kompletterar metoderna i delar varandra.

Vilken metod som skall användas avgörs från fall till fall och baseras på vilken av de fysikaliska egenskaperna (elastiska eller elektriska) som bäst karakteriserar den aktuella bergmassan med hänsyn till det aktuella informationsbehovet (dvs är man ute efter exempelvis bergets hållfasthet i allmänhet eller enstaka störningar och i så fall vilken typ av störning, sprickzoner, lerslag, större vattenförande sprickor etc).

Användning

Vid projektering och byggande av undermarkskonstruktioner i berg är det alltid en stor fördel att väl känna bergets geologiska och bergmekaniska egenskaper. Inte minst i anbudsskedet är geologisk och bergmekanisk information en förutsättning för att entreprenören skall kunna;

- ☐ Identifiera kritiska skeden i byggprocessen.
- ☐ Kvantifiera riskerna.
- ☐ Optimera produktionsmetoder och produktionsresurser.

Även relativt små störningszoner som inte identifierats vid förundersökningarna eller vars byggnadstekniska konsekvenser felbedömts kan orsaka ett undermarksprojekt stora förseningar och ekonomiska förluster. Förundersökningar av hög kvalitet är det viktigaste instrumentet vi har för att "obehagliga överraskningar" i form av icke identifierat dåligt berg skall kunna undvikas under byggskedet.

Undermarkskonstruktioner i berg kan principiellt indelas i två typer. Dels stora konstruktioner som byggs i en begränsad bergmassa, typ större bergrum, och dels relativt små konstruktioner som byggs i en utsträckt bergmassa, typ längre tunnlar.

För konstruktioner av den första typen är det i de flesta fall möjligt att genomföra mer detaljerade förundersökningar av bergmassan i hela den aktuella byggvolymen, dvs undersökningarna kan koncentreras på en relativt liten yta.

Så är inte fallet vid utsträckta tunneldrivningsprojekt. Här kan av tekniska och ekonomiska skäl mer detaljerade förundersökningar endast genomföras i partier vilka identifierats som kritiska genom översiktliga undersökningar. Sådana partier utmed tunnelsträckningen kan exempelvis vara lägen för tunnelportaler och schakt, sträckor med låg bergtäckning eller där tunnelsträckningen skärs av förmodade störningszoner.

Mellanhålsseismikens roll och användning vid förundersökningar i berg styrs av metodens kapacitet vad avser upplösning och räckvidd. Det är knappast meningsfullt att använda metoden vid större avstånd

mellan borrhålen än ca 200 m. Orsaken till detta är att mättekniska problem lätt uppstår (generering och detektering av de elastiska vågorna) och att upplösningen sjunker till nivåer där den minsta detekterbara anomalien är så stor att den skulle upptäckas även utan användning av mellanhålsseismik.

Följaktligen är metoden inte lämplig för översiktliga undersökningar av större områden med avsikt att identifiera kritiska partier där ytterligare undersökningar måste genomföras.

Metoden bör istället användas för **mer detaljerade** kartläggningar av **begränsade** bergmassors elastiska egenskaper, vilka i sin tur kan översättas och tolkas i geologiska strukturer. Det senare innebär att strukturgeologiska anomalier, exempelvis i form av en krosszon, kan detekteras och bestämmas med avseende på läge och utsträckning.

Det är dock minst lika viktigt att känna till de byggnadstekniska konsekvenser som en anomali kan medföra. Kommer vi att träffa på running ground, squeezing ground, swelling ground, vilken stand-up time kan vi förvänta oss ?

Vid den här typen av frågor måste vi komma ihåg att mellanhålsseismik liksom all geofysik är indirekta undersökningsmetoder där man i geologisk och bergmekanisk mening studerar sekundära parametrar som elektrisk ledningsförmåga, elastisk vågutbredningshastighet etc.

Kopplingen mellan dessa parametrar och specifika byggnadstekniska konsekvenser typ swelling ground är inte entydig utan snarare ett starkt indicium. Mellanhålsseismik måste i det här sammanhanget betraktas som ytterligare en viktig informationskälla bland flera andra, vilka kan utnyttjas för att beskriva en anomali byggnadstekniskt.

Relaterat till tidigare nämnda typer av undermarkskonstruktioner kan mellanhålsseismik med fördel användas vid undersökningar för:

- Större konstruktioner i begränsade bergmassor med komplex geologi, typ bergrum med stora spännvidder. Här kan mellanhålsseismik användas i hela eller delar av byggvolymen.

- ☐ Relativt små konstruktioner som skär genom utsträckta bergmassor, typ längre tunnlar. Här kan metoden användas i kritiska partier som identifierats med hjälp av översiktliga undersökningar.

Exempel på konkreta situationer där mellanhålsseismik kan vara intressant att använda är vid undersökningar av:

- ☐ Störningszoner (krosszoner, förkastningar, överskjutningar etc), för att kartlägga en störningszons exponering i en tunnel och bestämma bästa läge för passage.
- ☐ Bergtäckning och vittringsprofil (vittringsrötter) vid lågpunkter eller ytnära tunnelsträckningar.
- ☐ Bergkvalitén vid lägen för schakt och tunnelpåslag.
- ☐ Bergplintar, för att bedöma total bergkvalité och för att optimera läge och orientering av bergrum i förhållande till diskontinuiteter och störningszoner
- ☐ Dammlägen, för att bestämma bergkvalité och injekteringsbehov.
- ☐ Karstbildningar, med avseende på geometrier och eventuellt fyllnadsmaterial.

I appendix beskrivs kortfattat två verkliga fall där mellanhålsseismik har använts.

Det är svårt och knappast meningsfullt att försöka uttrycka generella ekonomiska villkor för att utnyttja mellanhålsseismik vid olika undermarksprojekt. Orsaken till detta är att varje projekt i princip är unikt i teknisk och ekonomisk mening samt att metoden fortfarande befinner sig i en utvecklingsfas. För en entreprenör är dessutom ofta kontraktsformerna styrande för om och i vilken omfattning olika undersökningsmetoder skall användas.

Frågan huruvida mellanhålsseismik skall användas eller ej kan därför endast besvaras genom att kostnaden och nyttan bryts mot varandra i varje enskilt projekt. Allmänt kan sägas att kostnaden för en

mellanhålsseismisk undersökning ligger i paritet med andra mer avancerade geofysiska metoder, exempelvis borrhålsradar.

Erfarenheter från Finland pekar på att kostnaden för en undersökning av en "normalprofil" med 150 m längd och 150 m djup (utgående från två borrhål) i dagsläget kan uppskattas till ca 75 000 kr. Detta inkluderar kostnader för bearbetning och tolkning av mätningarna men ej kostnader för borrhning (hålen behöver ej kärnborras). Tidsåtgången kan uppskattas till 4-5 dagar fördelade på 2 dagar i fält och 2-3 dagar för bearbetning och tolkning.

Det kan inte nog betonas att ingen geofysisk metod kan användas framgångsrikt utan att den relateras och koordineras med övrig geologisk information. Detta faktum gäller för övrigt även de mer traditionella geologiska undersökningsmetoderna.

I vissa fall kan det även vara nödvändigt att komplettera mellanhålsmätningar med reflektionsmätningar från markytan för att "täcka in" hela profilen med ett tillräckligt antal vågstrålar i olika riktningar.

Vid undersökning av kritiska partier utmed en tunnelsträckning där man exempelvis misstänker att en störningszon skär tunnelsträckningen borras det i många fall av ekonomiska skäl bara ett kärnborrhål med avsikten att övertvära den eventuella zonen. Resultatet blir ofta att zonen inte kan kartläggas fullt ut med detta enda borrhål.

I dessa fall kan s.k. singelhålsseismik utnyttjas för att erhålla kompletterande information. Singelhålsseismik innebär att den elastiska vågen genereras längs en profil på markytan och detekteras i borrhålet. Man använder sig alltså även här av transmitterade vågor som informationsbärare.

Geometrin vid den här typen av mätning begränsar dock antalet möjliga riktningar som en vågstråle kan genomstråla profilen med och följaktligen blir informationsvärdet lägre vid singelhålsseismik än vid mellanhålsseismik.

Slutsats

I jämförelse med andra seismiska metoder ger användning av mellanhålsseismik möjlighet till betydligt mer detaljerade kartläggningar av begränsade bergmassors elastiska egenskaper. Metoden lämpar sig väl för detektering och i viss mån karaktärisering av byggnadstekniskt intressanta anomalier i samband med känsliga anläggningsprojekt.

Följaktligen har mellanhålsseismik en viktig roll att fylla vid undersökningar av bergpartier där krav ställs på en hög informationsnivå beträffande bergets egenskaper och eventuella anomalier.

För att en kunskapsuppbyggnad och satsning på tekniken i Sverige skall kunna genomföras effektivt är det viktigt att arbetet bedrivs tillsammans med nyttjarna av informationen dvs entreprenörer, bergmekaniker, ingenjörsgéologer etc och att den kunskap och erfarenhet som finns från utveckling och användning av metoden i andra länder, främst Finland och Norge, tas till vara.

Som tidigare konstaterats så kompletterar mellanhålsseismik och borrhålsradar i stort varandra som undersökningsmetoder. Utvecklingspotentialen hos båda metoderna är fortfarande betydande och inom de närmaste åren kan man räkna med att deras kapacitet ökar ytterligare.

Utvecklingen av mellanhålsseismik och borrhålsradar har också givit spin-off effekter i form av nya tänkbara applikationer. En sådan applikation, vilken är mycket intressant för en entreprenör, är att använda metoderna vid tunneldrivning för att kontinuerligt undersöka kvaliteten hos berget närmast framför tunnelfronten. Inte minst vid tunneldrivning med TBM i mer komplexa geologier så är den här typen av information mycket värdefull.

Appendix

Loviisa Finland

1979 startade man i Finland ett undersökningsprogram för att hitta ett lämpligt område där ett lager för låg- och medelaktivt avfall kunde förläggas. Målet var att hitta ett sådant område i anslutning till kärnkraftverket i Loviisa.

Inom ramen för undersökningsprogrammet har mellanhålsseismik utnyttjats för att kartlägga områdets strukturgeologi och då främst förekomsten av sprickzoner. Undersökningen genomfördes av Geoseismo OY Finland, på uppdrag av Imatran Voima OY.

Berggrunden i området utgörs av Rapakivigraniter vilka är mycket likartade varandra vad avser fysikaliska egenskaper. Sprickkartering av området visade på det för graniter typiska sprickmönstret med tre huvudspricksystem. Två stupande nästan vertikalt, strykning NW-SE och NE-SW, samt ett subhorizontalt spricksystem.

Fem olika sektioner undersöktes varav två presenteras här, Y4-Y1 och Y4-Y5. Borrhålen är ca 200 m djupa och nästan vertikala.

Vid tolkningen har s k tomografiteknik använts och sektionerna presenteras här som tomografibilder där gråskalan i 8 steg representerar bergmassans hastighetsfördelning i m/s. Mörka områden har relativt lägre hastighet jämfört med ljusa.

Resultaten från de mellanhålsseismiska mätningarna har jämförts med andra oberoende geologiska och geofysiska data för att kontrollera tillförlitligheten i mätningarna. Generellt sett kan överensstämmelsen sägas vara god.

Den tomografiska bilden över sektion Y1-Y4 (se fig 1) uppvisar två större sammanhängande zoner med lägre seismisk hastighet. Båda korrelerar väl med resultat från s k VSP-mätningar. Vid VSP-mätningar, (Vertical Seismic Profiling), exiteras vågen på markytan nära borrhålet och detekteras stegvis på olika nivåer i borrhålet. Vidare finns en mindre anomali kring Y4 samt en anomali kring Y1 nivå ca -115 m med lägre kontrast vilket tyder på en lägre sprickfrekvens än i det första fallet.

Även dessa anomalier har verifierats med hjälp av andra undersökningsmetoder. Avståndet mellan borrhålen är ca 95 m.

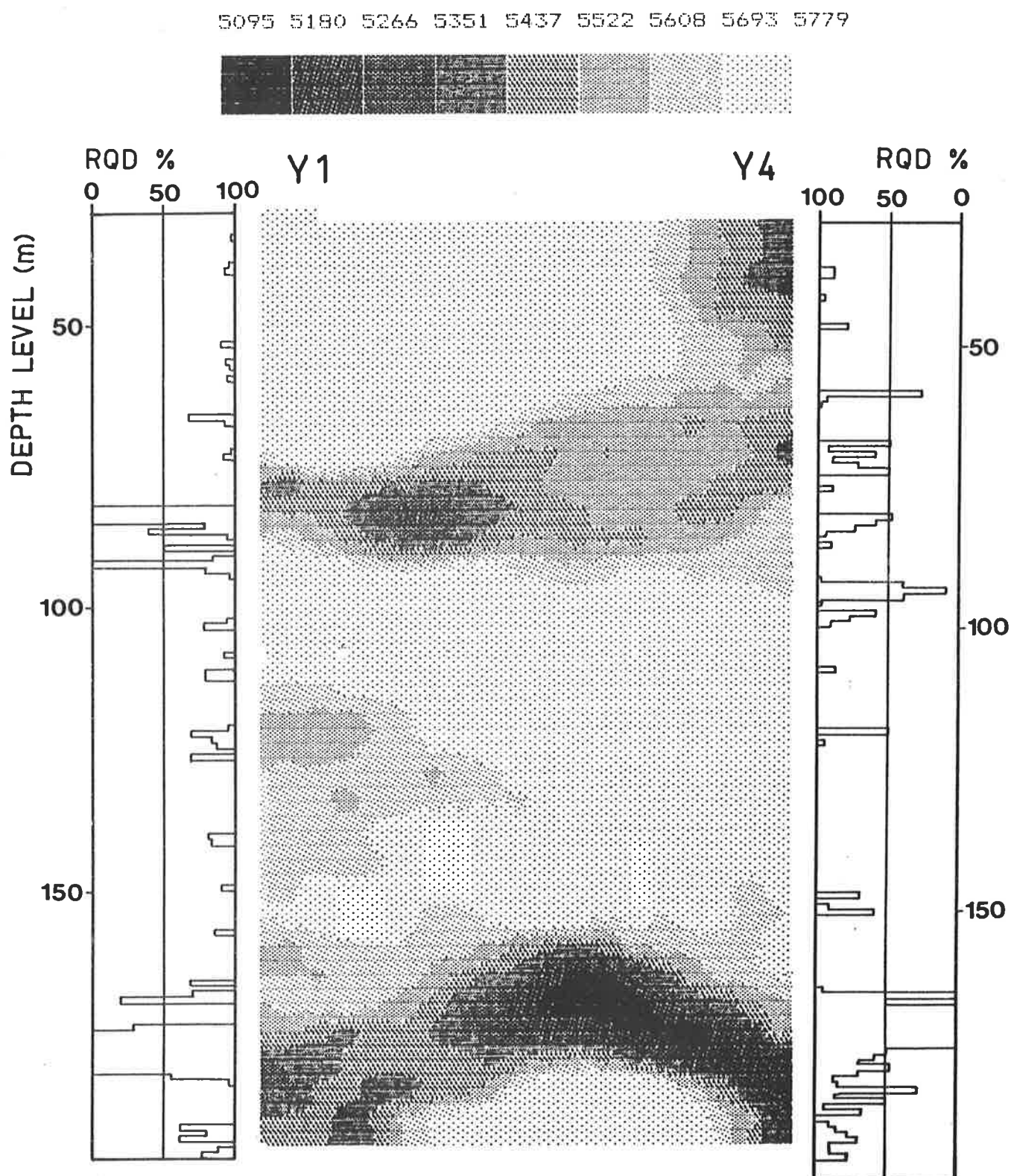


Fig 1. Tomografisk plot, sektion Y1-Y4.

Den seismiska hastighetsfördelning som visas i tomografibilden över sektion Y4-Y5 (se fig 2) stämmer också överens med resultat från VSP-mätningar och matchar RQD-värdena väl. Även här indikeras de två större anomalierna som återfinns i sektion Y1-Y4. Avståndet mellan borrhålen är ca 140 m.

I dagsläget uppgår kostnaden för en motsvarande undersökning (5 sektioner) till ca 300 000 kr exklusive borrhning.

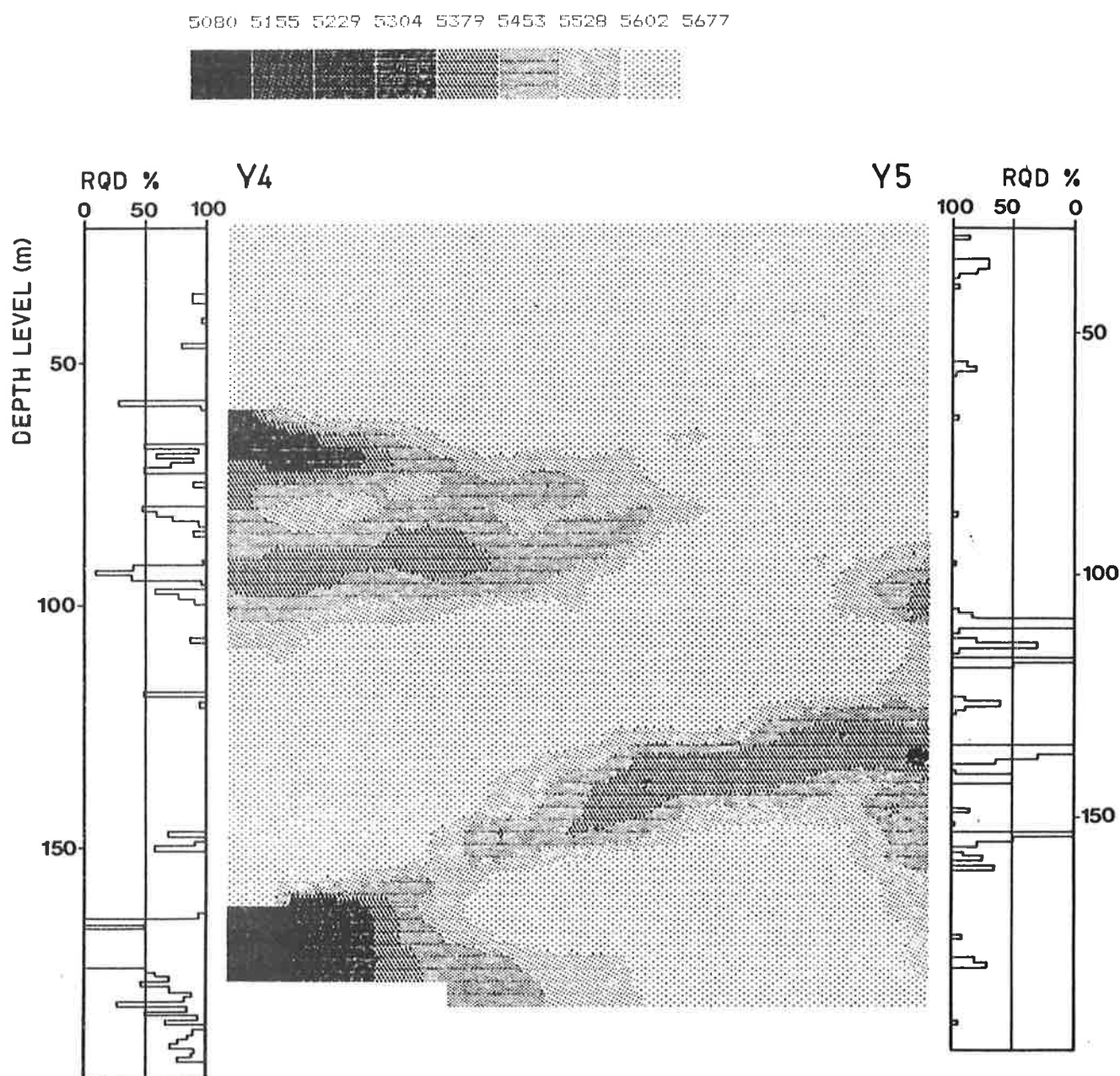


Fig 2. Tomografisk plot, sektion Y4-Y5.

Storglomvassdammen Norge

Strax NO om Glomfjord i anslutning till Storglomvatn planeras en stor fyllnadsdamm, Storglomvassdammen.

Berggrunden vid dammläget består av kalksten (marmor) och kalkglimmerskiffrar. I området har en hög förekomst av karster konstaterats vilka gestaltar sig i både öppna sprickor och hålrum.

För att kunna välja ett optimalt dammläge och säkerställa en effektiv tätning av dammfundamentet beslöt man att använda mellanhålsseismik för att kartlägga omfattningen och läget av karststrukturerna.

Sommaren 1987 undersöktes i NGI's regi totalt 15 sektioner fördelade på dammlägen. Vid utvärderingen av mätningarna har tomografiteknik använts. Mjukvaran som användes var Vibrovision från Geoseismo, Finland. I figur 3 ges exempel på en typisk mätsektion.

Resultatet av undersökningen visar att bergarterna i området har en relativt homogen hastighetsfördelning. Typiska gånghastigheter är 5500-6000 m/s. Avvikelser härifrån längs kontakt- och sprickzoner har tolkats som karststrukturer.

Figur 4 visar en tomografibild över en sammansatt sektion längs det slutgiltiga läget för dammaxeln. Den strukturgeologiska tolkningen av sektionen visas i figur 5.

Resultaten från undersökningen med mellanhålsseismik korrelerar väl med observationer som gjorts vid geologisk ytkartering och kärnbörning.

Kartläggningen av karststrukturerna kommer att spela en viktig roll vid injekteringen av dammfundamentet.

Totalkostnaden för undersökningen uppgick till 1 miljon NOK (15 sektioner) exklusive kostnader för borrning.

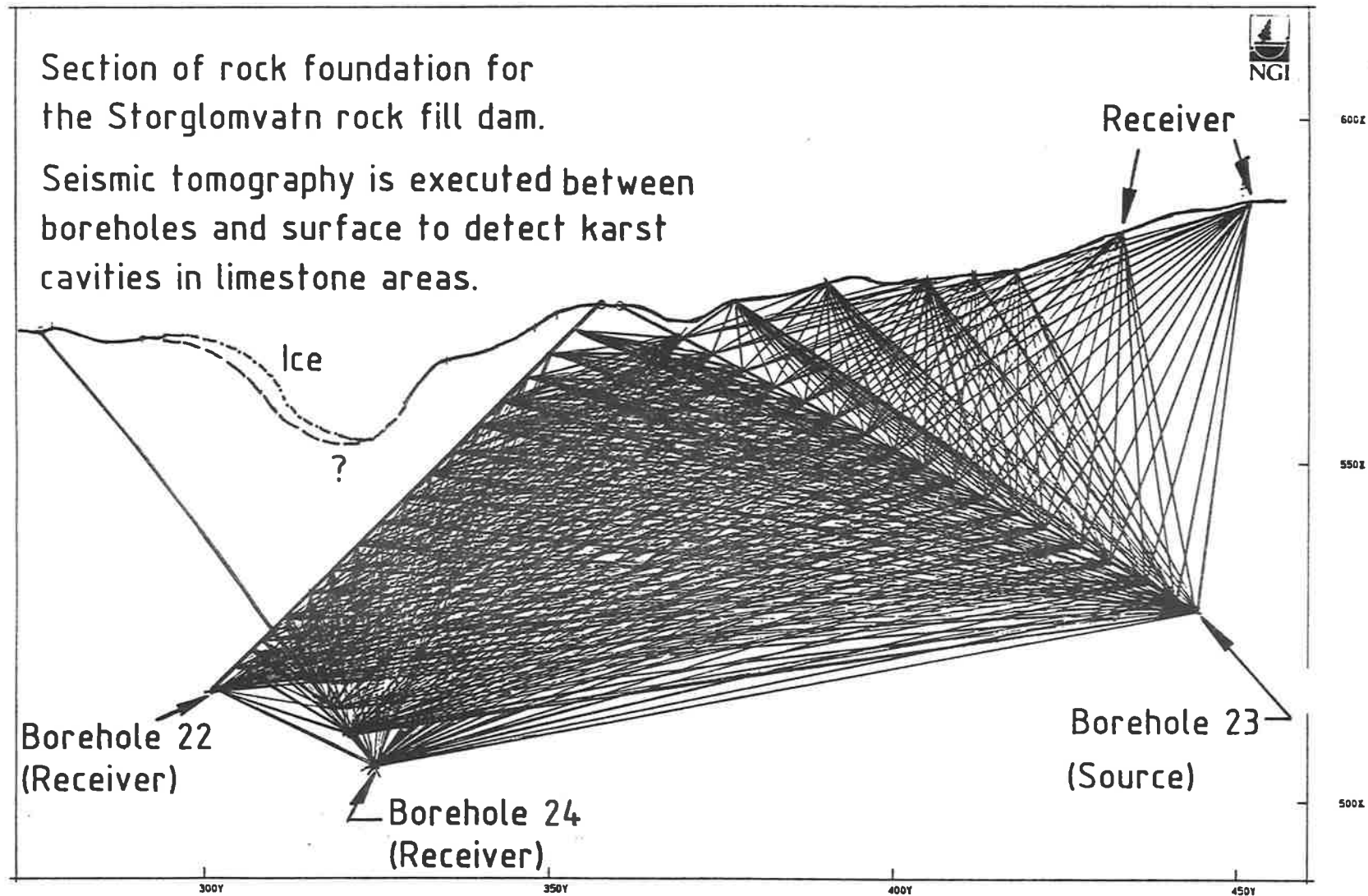


Fig. 3.

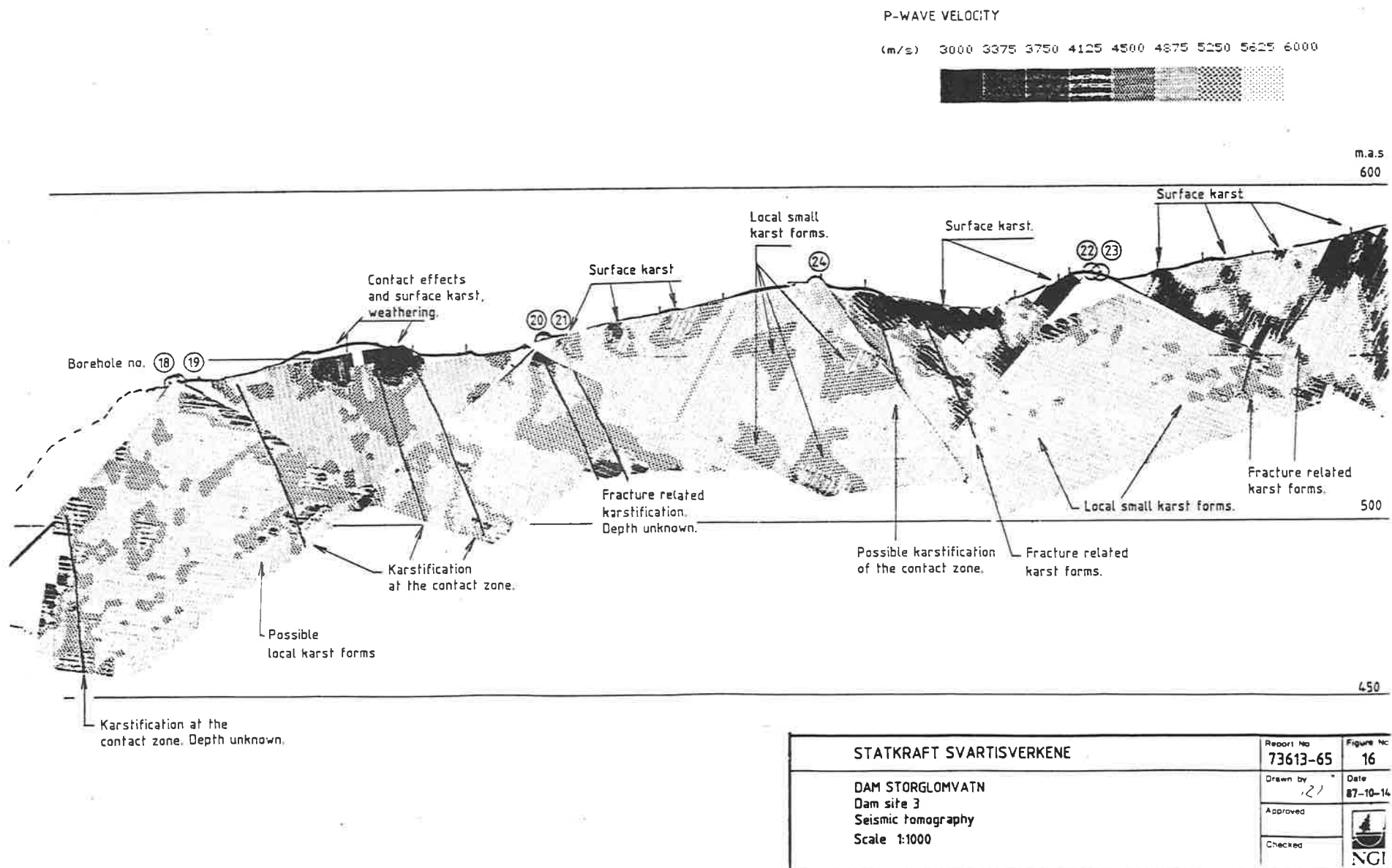


Fig. 4.

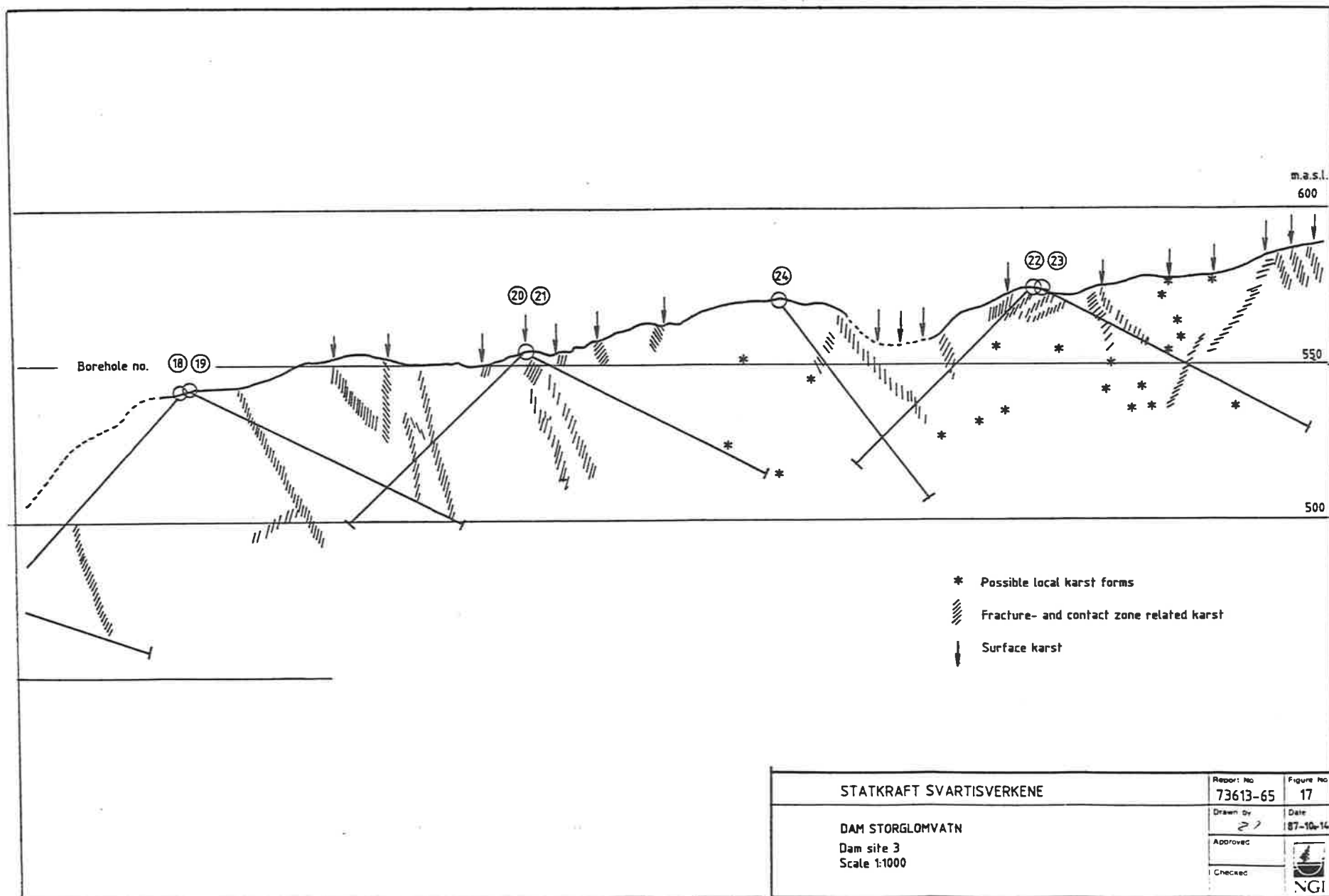


Fig. 5.

Referenser

Ballard, R F, Stokoe, K H and McLemore, R.: Proposed Standard Test Methods for Cross-Hole Seismic Testing. Geotechnical Testing Journal GTJODJ, Vol. 6 No. 4 Dec. 1983.

Bergman, S G A och Carlsson, A.: Förundersökningar i berg. BeFo 86.1/86 1986.

Butler, D K and Curro, J R.: Crosshole Seismic Testing-Procedures and Pitfalls. Geophysics, Vol. 46, No. 1, P.23-29, 1981.

By, T L.: Ingeniörsgeofysiske undersökelsemetoder. NGI, Intern rapport, NTNF-Projekt BA. 5002.16773, 54103-12, 1987.

Carlsten, S, Olsson, S, Sehlstedt, S och Stenberg, S.: Radar measurements performed at the Klipperås Study Site. SKB, TR 87-01, 1987.

Cosma, C.: Cross-Hole Investigations-Short and Medium Range Seismic Tomography. SKB, Stripa Project, TR 87-08, 1987.

Cosma, C.: Determination of Rockmass Quality by the Cross-Hole Seismic Metod. Bullentine of the Internationell Association of Engineering Geology, No. 26-27, P. 219-225, 1983.

Cosma, C, Heikkinen, P and Komminaho, K.: Overview of Borehole Seismic Methods and their Application to the Characterization of Fractures. Rock Mechanics Symposium, 1986.

Cosma, C, Ihalainen, M and Korhonen, R.: The Cross-Hole Seismic Method. The Finnish Association of Mining and Metallurgical Engineers, Serie A, No. 73, 1984.

Fehler, M and Pearson, C.: Cross-Hole Seismic Surveys: Application for Studying Subsurface Fracture Systems at a Hot Dry Rock Geothermal Site. Geophysics Vol. 49, No. 1, P.37-45, 1984.

Helfrich, H m fl.: Förundersökningarnas omfattning och värde. BeFo 18:2/79 1979.

Nordqvist, A. : Application of Ultrasonic Cross-Hole Seismics to Hard Rock Conditions. Höskolan i Luleå, 1986:06 L, 1986.

Olsson, O and Sandberg, E. : Cross-Hole Investigations-Preliminary Design of a New Borehole Radar System. SKB, Stripa Project, IR 84-04, 1984.

Olsson, O, Forslund, O, Lundmark, L, Sandberg, E and Falk, L. : Borehole Radar-A New Technique for Investigation of Large Rock Volumes. SGAB, IRAP 86292, 1986.

Olsson, O Forslund, F, Falk, L, Lundmark, L and Sandberg, E. : Investigation of Fracture Zones in Crystalline Rock by Borehole Radar. SGAB, 1986.

Sundin, N-O. Tillämpning av geofysiska mätningar vid förundersökning för fullborrning. STU D:nr 83-3736-Rapport 1, 1984:75 T, 1984.

Pihl, J, Hammarström, M, Ivansson, S, Moren, S. : Cross-Hole Investigations-Results from Seismic Borehole Tomography. SKB, Stripa Project, TR 87-06, 1987.

Wong, J, Hurley, P and West, G F. : Crosshole Audiofrequency Seismology in Granitic Rocks using Piezoelectric Transducers as Sources and Detectors. Gasexploration, No. 22, P. 261-279, 1984.