



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R10: 1976

**Dynamiska metoder för
in situ-bestämning av
jordars fysikaliska
egenskaper**

Laszlo Gereben

Byggforskningen

Rapport R10:1976

DYNAMISKA METODER FÖR *IN SITU*-BESTÄMNING
AV JORDARS FYSIKALISKA EGENSKAPER

Laszlo Gereben



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 720502-0 från
Statens råd för byggnadsforskning till AB Jacobson & Widmark
Grundkonsult AB, Stockholm.



Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
ISBN 91-540-2538-9

LiberTryck Stockholm 1976

F Ö R O R D

Föreliggande arbete är en sammanställning av resultaten från ett forskningsprojekt, som avsåg att studera och utveckla dynamiska metoder för in-situ bestämning av undergrundens fysikaliska egenskaper. Kostnaderna för detta projekt har till en betydande del täckts genom tilldelat forskningsanslag från Statens Råd för Byggnadsforskning till AB Jacobson & Widmark år 1972.

Projektet har omfattat litteraturstudier angående mätteknik och metodik, utveckling av lämplig fältutrustning, fältexperiment och analys av mätresultat förenat med teoretiska modellstudier. Kostnaderna för instrumentköp och utveckling har till större del täckts genom AB Jacobson & Widmarks försorg.

Forskningsprojektet har bedrivits i intimt samarbete med Statens Vägverks geotekniska kontor. I Vägverkets regi har bl.a. utförts fältmätningar och kvantitativ analys genom Terratest AB samt kompletterande analys vid Försvarets Forskningsanstalt. Dessa undersökningar har tillämpats i föreliggande projekt varför vissa betydande resultat redovisas.

Fältförsöken har huvudsakligen utförts i samarbete med Vägverket på försöksobjekt, där Vägverket utfört geotekniska och produktionstekniska undersökningar i samband med utvecklingsprojekt "Definition av bearbetbarhet för olika jordar".

Författaren framför sitt varma tack till docent H. Thurner, Statens Vägverk (numera Geodynamik AB), som har bidragit med värdefulla synpunkter och lämnat en ovärderlig stor hjälp under forskningsprojektets gång. Civilingenjörerna G. Hallert och B. Svedinger, Statens Vägverk, har även deltagit aktivt vid utredningen om tolkningen av frekvensanalyser och bistått med synpunkter och idéer som var av stor betydelse. Björn Svedinger (numera Geodynamik AB) har dessutom svarat för rapportens tekniska redigering på uppdrag av BFR. Författaren framför därför ett särskilt tack till dem för deras betydande insatser.

Lidingö, oktober 1975

Laszlo Gereben

INNEHÅLL

1	INLEDNING TILL PROBLEMSTÄLLNINGEN	5
2	TEORETISK BAKGRUND	7
2.1	Dynamisk jämvikt. Rörelsevektor	7
2.2	Vågekvationer	8
2.3	Elastiska konstanter	9
2.4	Samband mellan materialkonstanter	12
2.5	Svängningsrörelse	13
2.6	Påtvingad svängning	17
2.7	Vågutbredning i homogena medier	21
2.8	Vågutbredning i inhomogena medier	26
3	EXCITERING OCH REGISTRERING AV ELASTISKA VÅGOR	35
3.1	Olika energikällor	37
3.2	Omvandling av svängningar till mätsignaler	46
3.3	Förstärkning och filtrering	50
3.4	Registreringsinstrument	51
4	ANALYS AV MÄTSIGNALER	57
4.1	Standardseismik (geometrisk seismik)	58
4.2	Frekvensanalys	66
4.3	Seismisk signalanalys. Våganalys	75
4.4	Studier av partikelrörelser. Vektoranalys	92
5	FÄLTMÄTNINGAR OCH RESULTAT	101
5.1	Beskrivning av försöksområden	101
5.2	Beskrivning av använt mätsystem	114
5.3	Redovisning av resultat	118
5.4	Jämförelse med resultat från andra undersökningar	144
6	SLUTSATSER	151
	Litteraturförteckning	153

1 INLEDNING TILL PROBLEMSTÄLLNINGEN

Bestämning av ett jordmaterials egenskaper med in-situ metod innebär att jordmaterialet undersöks i ostört skick under naturliga förhållanden. Behovet av en översiktlig in-situ metod har aktualiserats av ett förslag till klassificering av jordmaterial ur massförflyttningssynpunkt, som presenteras i Vägverkets rapport "Definition av bearbetbarhet för olika jordar." Förslaget innebär att ett jordmaterial klassificeras med avseende på:

- Materialgrupp
- Schaktbarhet
- Bärighet för arbetsmaskiner

I rapporten påpekas de geotekniska metodernas bristande entydighet speciellt i grovkorniga material. Med tanke på de kostnader som redovisas i rapporten anses möjligheten att utveckla en dynamisk grundundersökningsmetod mycket intressant och önskvärd.

Den dynamiska grundundersökningsmetod som för närvarande tillämpas i Sverige är refraktionsseismik. Denna metod har framför allt använts för bestämning av bergytans läge och eventuella krosszoner. Erfarenheter från seismiska undersökningar har påvisat samband mellan "seismisk gånghastighet" och jordmaterials fysikaliska egenskaper. Informationen är emellertid ej tillräcklig då hastigheten, beroende på vattenhalt, kan vara lika i t.ex. lera och sand och inverkan av t.ex. blockhalt ej är entydig.

Beträffande den refraktionsseismiska metodens tillförlitlighet hänvisas till SGI's särtryck nr. 33 "Seismikdag 1969" och Vägverkets utredning angående seismiska undersökningar vid vägprojektering, Rapport TV 113 och TV 127.

En utveckling av dynamiska undersökningsmetoder kräver ökad kunskap angående vågutbredning i mark. Bestämning av endast den primära kompressionsvågens hastighet är ej tillräcklig utan hela det dynamiska svängningsförloppet måste registreras och analyseras. Tidigare undersökningar har t.ex. visat att det finns samband mellan blockhaltsvariationer i jorden och kompressionsvågens frekvens. Vidare kan en identifiering av skjuvvåg och bestämning av dess hastighet möjliggöra en bestämning av elasticitets- och skjuvmoduler. Detta förutsätter en utveckling av energikällor, registreringsutrustning samt analysrutiner, vilket är möjligt tack vare stora framsteg inom modern elektronik.

Studier av tillgänglig facklitteratur visar att även i utlandet (USA, England, Japan, Västtyskland och Ungern) har de dynamiska in situ-metoderna fått hög aktualitet. De metoder som på senare år har utvecklats bygger nästan utan undantag på strävanden att alstra renodlade vågtyper (kompressions- och skjuvvågor) med tämligen komplicerade redskap och att registrera med en förhållandevis enkel utrustning. Dylka metoder kan som regel användas för bestämning av endast en viss parameter och anses ej utgöra den slutliga lösningen. Teoretiskt är det ej möjligt att framställa helt renodlade vågor, varför undertecknad anser det troligast att en tillförlitlig undersökningsmetod kräver avancerade analysmetoder i kombination med enkel men ändamålsenlig fältutrustning.

Förliggande projekt har syftat till att studera de olika möjligheter som finns för utveckling av en dynamisk undersökningsmetod. Inom projektets ram har en utrustning för synkron registrering av 4 st trekomponentgeofoner framtagits och använts för insamling av försöksmaterial. I rapporten presenteras den teoretiska bakgrunden för seismisk vågutbredning, registrering och analys, samt en redovisning av utförda fältförsök med belysande resultat.

2 , TEORETISK BAKGRUND

Ett medium deformeras under inverkan av en yttre kraft varvid deformationen kan vara plastisk och/eller elastisk. Beroende på kraftens storlek samt den varaktighet med vilken denna verkar i angreppspunkten, erhålles i de flesta medier en plastisk deformation. Ett mediums hållfasthetstekniska egenskaper bestäms i regel av denna plastiska deformation. Elastisk deformation innebär att materialpartiklarna hos kroppen intar sina ursprungliga lägen när den deformerande kraften upphör att verka. En elastisk svängningsrörelse i ett medium uppstår när mediet påverkas av en elastisk kraftimpuls. Materialpartiklarnas rörelser hos idealelastiska och isotropa medier är karakteriserade av den fysikaliska strukturen.

2.1 Dynamisk jämnvikt. Rörelsevektor

Om en masspunkt hos ett ideal-elastiskt och isotropt medium bringas i rörelse under inverkan av en yttre kraft, gäller för varje tidsmoment under rörelseförloppet dynamikens grundlag, som säger att det alltid råder en jämnvikt mellan tröghetskraften och den yttre kraften. Den dynamiska jämnviktsekvationen, även kallad rörelseekvationen, kan skrivas i form av en differentialekvation på följande sätt

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{s}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \text{grad div } \vec{s} + \mu \nabla^2 \vec{s} - \mu \text{div grad } \vec{s} \quad (2.1-1)$$

där de använda beteckningarna motsvarar följande

$$\begin{aligned} \rho &= \text{materialets täthet} \\ \vec{s} &= \text{rörelsevektorn} \\ \mu, \lambda &= \text{Lamé's konstanter (varav } \mu = G, \text{ dvs. skjuvmodulen)} \\ \nabla^2 &= \text{Laplace-operatorn } \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

Om man bestämmer rörelsevektorn i varje masspunkt i mediet erhålls ett s.k. vektorfält. Varje vektorfält kan som bekant betraktas såsom summan av två vektorfält - ett potentialfält och ett rotationsfält.

$$\bar{S} = \bar{S}_P + \bar{S}_R \quad (2.1-2)$$

som kan skrivas även på följande sätt

$$\bar{S} = \text{grad } \varphi + \text{rot } \bar{\Psi}$$

där $\varphi = \varphi(x, y, z)$ = den skalära potentialen

och $\bar{\Psi} = \bar{\Psi}(\psi_1, \psi_2, \psi_3)$ = vektorpotentialen

Om rörelsevektorns \bar{S} tre komponenter i det rätvinkliga koordinatsystemet betecknas med u, v, w , gäller följande samband

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi_3}{\partial y} - \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \\ v &= \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \\ w &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} - \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.1-3)$$

2.2 Vågekvationer

Om man i differentialekvationen (2,1-1) inför rörelsevektorns tre komponenter enligt (2, 1-3) erhålls efter diverse förenklingar och omgrupperingar följande form

$$\text{grad} \left[\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi \right] + \text{rot} \left[\rho \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial t^2} - \mu \nabla^2 \bar{\Psi} \right] \quad (2.2-1)$$

Differentialekvationen kan endast bli satisfierad om

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \varphi \quad (2.2-2)$$

och

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\psi} \quad (2.2-3)$$

Om vi inför beteckningarna $c_\alpha^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$ och $c_\beta^2 = \frac{\mu}{\rho}$

erhålls följande form

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c_\alpha^2 \nabla^2 \varphi \quad (2.2-4)$$

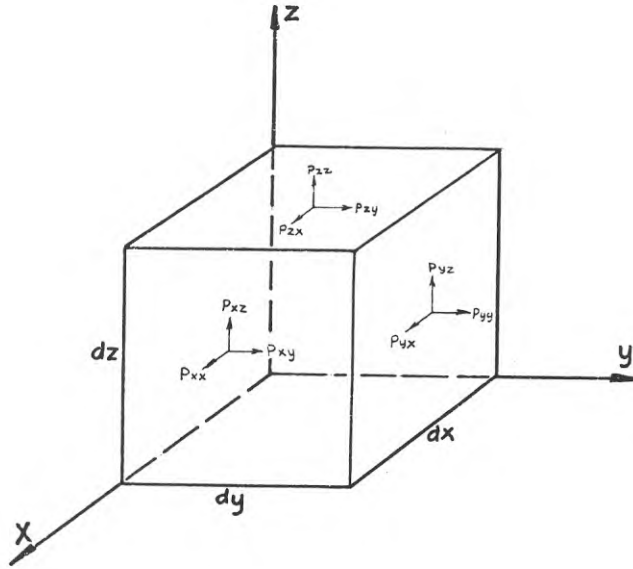
$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = c_\beta^2 \nabla^2 \bar{\psi} \quad (2.2-5)$$

vilka kallas för vågekvationer och visar att under inverkan av en yttre kraft alstras i ett ideal-elastiskt medium alltid två typer av elastiska vågor. Ekvation (2,2-4) beskriver den s.k. longitudinella vågen som fortplantar sig med hastigheten c_α medan ekvationen (2,2-5) beskriver den s.k. transversella vågrörelsen med hastigheten c_β .

2.3 Elastiska konstanter

Under inverkan av en yttre kraft på ett volymselement (se figur 1) uppstår spänningar vilka kan uttryckas på följande sätt.

$$\bar{P} = \begin{vmatrix} P_{xx} & P_{xy} & P_{xz} \\ P_{xy} & P_{yy} & P_{yz} \\ P_{zx} & P_{zy} & P_{zz} \end{vmatrix} \quad (2.3-1)$$



Figur 1 : Spänningskomponenter för ett volymelement under inverkan av en yttre kraft P .

Vektorkomponenterna är inte oberoende av varandra. På grund av volymelementens oändligt små dimensioner gäller symmetrilagen enligt vilken

$$P_{xy} = P_{yx} \text{ , } P_{xz} = P_{zx} \text{ och } P_{zy} = P_{yz}$$

Deformationsegenskaperna blir i matrisform följande

$$\bar{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix} \quad (2.3-2)$$

Även här gäller sambanden

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} \text{ , } \epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} \text{ och } \epsilon_{zy} = \epsilon_{yz}$$

Enligt Hook's lag föreligger hos de flesta medierna alltid ett lineärt samband mellan spänningskomponenter och deformationskomponenter enligt följande

$$\left. \begin{aligned} P_{xx} &= C_{11} \epsilon_{xx} + C_{12} \epsilon_{yy} + C_{13} \epsilon_{zz} + C_{14} \epsilon_{xy} + C_{15} \epsilon_{yz} + C_{16} \epsilon_{zx} \\ P_{yy} &= C_{21} \epsilon_{xx} + C_{22} \epsilon_{yy} + C_{23} \epsilon_{zz} + C_{24} \epsilon_{xy} + C_{25} \epsilon_{yz} + C_{26} \epsilon_{zx} \\ P_{zz} &= C_{31} \epsilon_{xx} + C_{32} \epsilon_{yy} + C_{33} \epsilon_{zz} + C_{34} \epsilon_{xy} + C_{35} \epsilon_{yz} + C_{36} \epsilon_{zx} \\ P_{xy} &= C_{41} \epsilon_{xx} + C_{42} \epsilon_{yy} + C_{43} \epsilon_{zz} + C_{44} \epsilon_{xy} + C_{45} \epsilon_{yz} + C_{46} \epsilon_{zx} \\ P_{yz} &= C_{51} \epsilon_{xx} + C_{52} \epsilon_{yy} + C_{53} \epsilon_{zz} + C_{54} \epsilon_{xy} + C_{55} \epsilon_{yz} + C_{56} \epsilon_{zx} \\ P_{zx} &= C_{61} \epsilon_{xx} + C_{62} \epsilon_{yy} + C_{63} \epsilon_{zz} + C_{64} \epsilon_{xy} + C_{65} \epsilon_{yz} + C_{66} \epsilon_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (2.3-4)$$

där $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{66}$ kallas för elastiska konstanter (fjäderkonstanter). Beroende på den fysikaliska strukturen kan deras antal variera mellan 2 och 21. Symmetrilagen gäller varför $C_{nm} = C_{mn}$ (om $n, m = 1, 2, \dots, 6$).

Hos anisotropa kroppar är antalet elastiska konstanter stort beroende på den kristallina strukturen. Högsta antalet elastiska konstanter, dvs. 21 st. finns hos det triklina systemet (förekommer t.ex. hos fältspat). Hos ett homogent isotropt material blir antalet elastiska konstanter två och sambanden mellan spänningskomponenter och deformationskomponenter tar följande gestalt

$$\left. \begin{aligned} P_{xx} &= 2\mu \epsilon_{xx} + \lambda \Delta \\ P_{yy} &= 2\mu \epsilon_{yy} + \lambda \Delta \\ P_{zz} &= 2\mu \epsilon_{zz} + \lambda \Delta \\ P_{xy} &= 2\mu \epsilon_{xy} \\ P_{yz} &= 2\mu \epsilon_{yz} \\ P_{zx} &= 2\mu \epsilon_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (2.3-5)$$

där μ och λ är två av varandra oberoende elastiska konstanter, som även kallas Lamé's konstanter, och Δ betecknar den relativa volymändringen ($\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$)

2.4 Samband mellan materialkonstanter och våghastigheter

Inom deformationsläran är de vanligaste elastiska konstanterna följande

- μ, λ = Lamé's konstanter
- G = skjuvmodulen
- K = kompressibilitetsmodulen
- E = elasticitetsmodulen
- ν = kontraktionstalet eller Poissons tal.

Mellan dessa råder följande matematiska samband

$$K = \lambda + \frac{2}{3} \mu = \lambda + \frac{2}{3} G = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2,4-1)$$

$$\lambda = K - \frac{2}{3} \mu = K - \frac{2}{3} G = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2,4-2)$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} = \frac{9KG}{3K + G} \quad (2,4-3)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (2,4-4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2,4-5)$$

vilket visar att om minst två av ovannämnda konstanter är givna, kan även de övriga tre beräknas.

Sambanden mellan våghastigheter (fortplantningshastigheten) och de elastiska konstanterna framgår av följande ekvationer

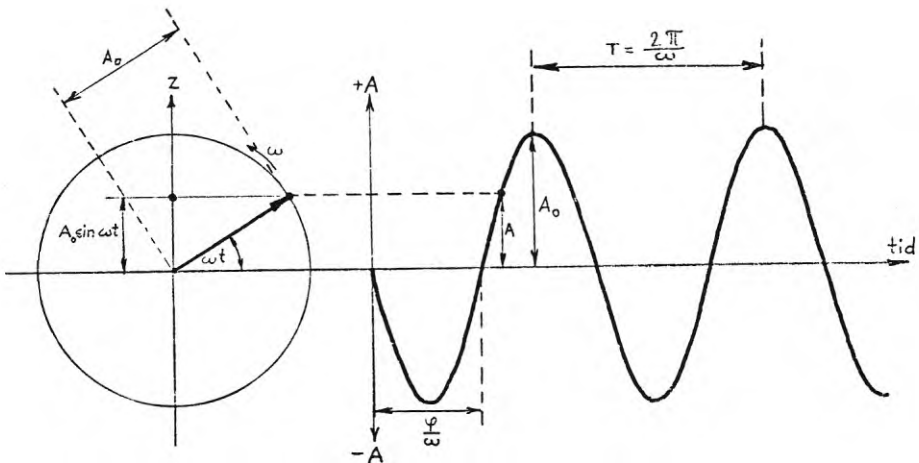
$$c_{\alpha} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2,4-6)$$

och

$$c_{\beta} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2,4-7)$$

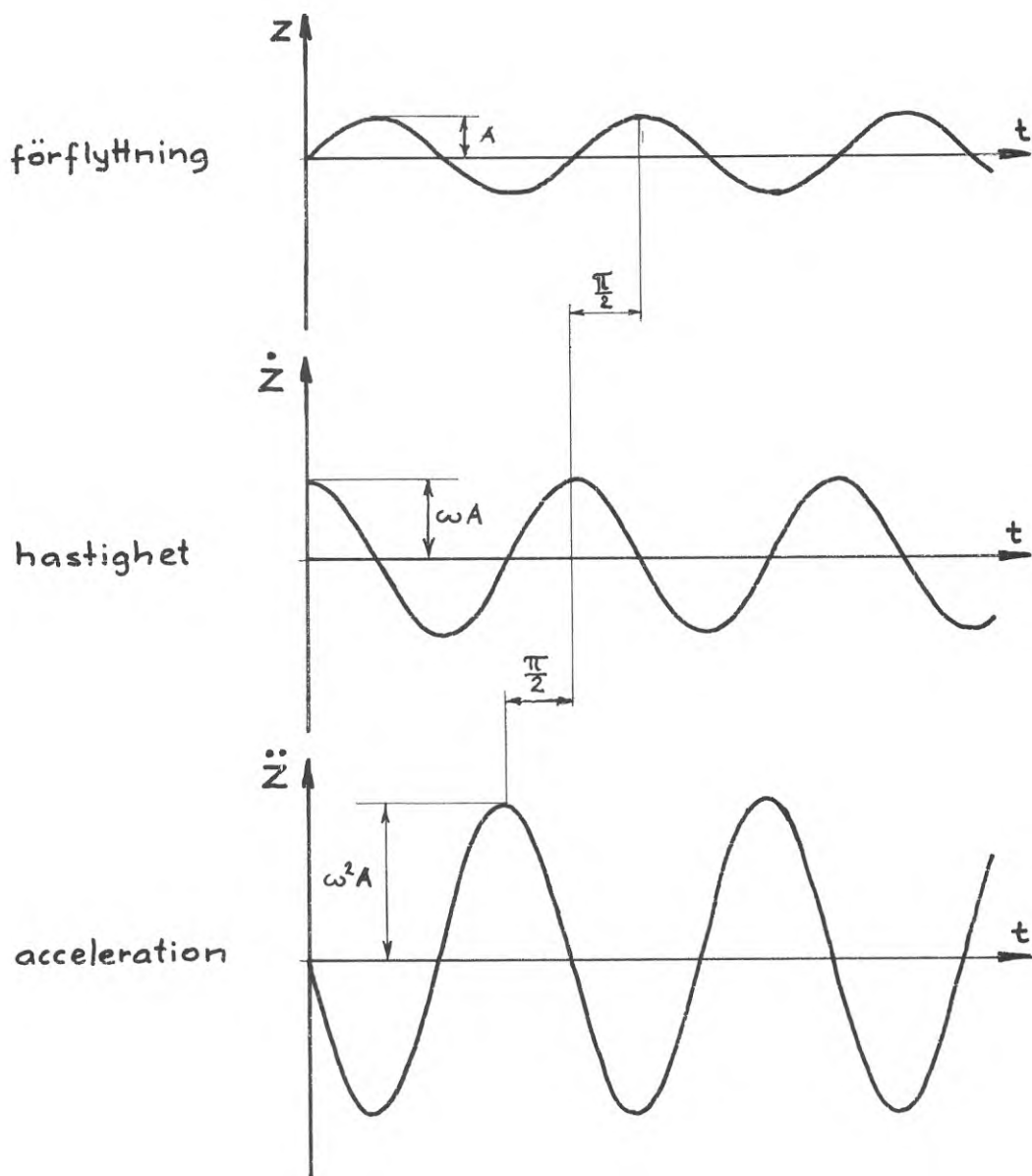
2.5 Svängningsrörelse

När en masspunkt förflyttar sig utmed en cirkelbana med konstant vinkelhastighet, blir förflyttningens projektion på tidsaxeln en sinuskurva (se figur 2.) Masspunktens förflyttning projicerad på den lodräta symmetriaxeln blir en rakt upp och nedgående rörelse. Masspunkten beskriver i det sistnämnda fallen en klassisk svängningsrörelse.



Figur 2: Harmonisk svängningsrörelse representerad i vektor och tidsprojektion.

Är vinkelfrekvensen konstant under hela svängningsförloppet kallas svängningen för en harmonisk rörelse. I övriga fall kallas svängningsrörelsen för icke harmonisk.



Figur 3: Samband mellan förflyttning, hastighet och acceleration för en harmonisk rörelse representerad i tidsprojektion.

Förflyttningens storlek i förhållande till jämviktsläget kallas svängningsamplitud, som för varje tidsögonblick, t , kan bestämmas med hjälp av formeln

$$A = A_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2,5-1)$$

där A_0 betecknar maximiamplituden, medan ω och φ betecknar vinkelfrekvensen (vinkelhastighet) respektive fasvinkeln.

En period av svängningsrörelsen motsvarar ett omlopp på cirkelbanan. Vinkelfrekvensen ω anger periodtalet per tidsenhet uttryckt i radianer. 2π rad motsvarar således en helperiod per tidsenhet. Frekvensen f anger antalet helperioder per tidsenhet

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2,5-2)$$

Frekvensen uttryckes vanligen i Hertz (Hz), 1 Hz motsvarar 1 helperiod (cycle) per sekund.

Masspunktens svängningshastighet (V) erhålls på följande sätt:

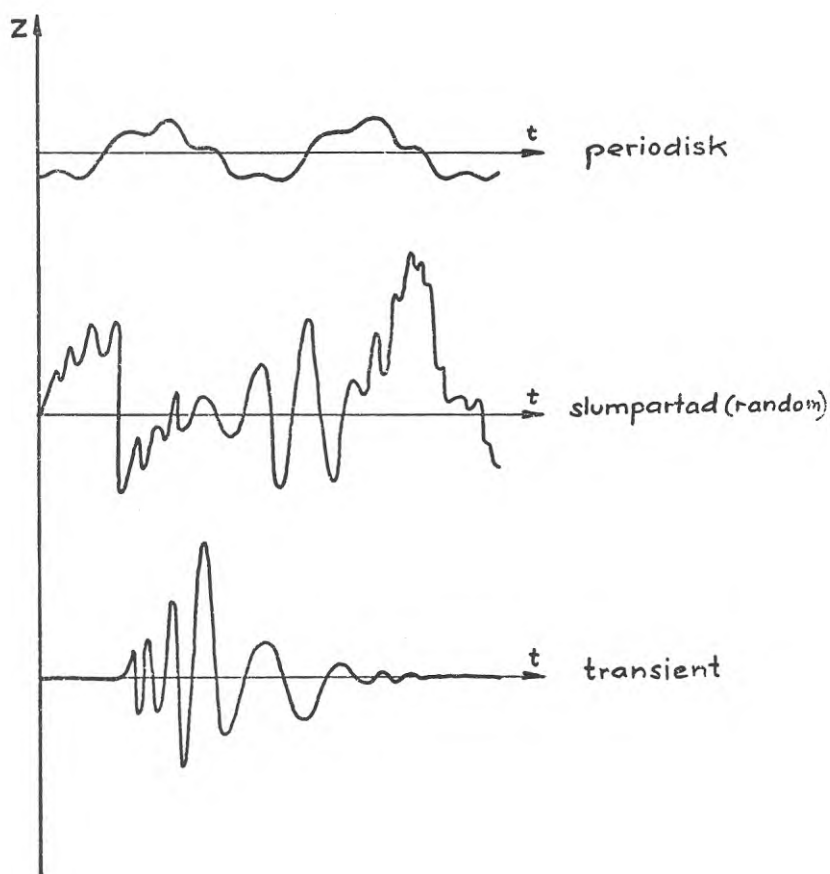
$$V = \frac{dA}{dt} = \omega A_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2,5-3)$$

medan accelerationen (a) erhålls enligt följande

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2A}{dt^2} = -\omega^2 A_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2,5-4)$$

Sambandet mellan förflyttning, svängningshastighet och acceleration för en harmonisk svängningsrörelse framgår av figur 3.

I figur 4 åskådliggörs tre huvudtyper av icke harmoniska svängningsförlopp. Ett s.k. transient förlopp uppstår vid excitering av en enda kraftimpuls (t.ex. slag), medan upprepade kraftimpulser ger upphov till stationära svängningar. En periodisk stationär svängning erhålles vid periodisk excitering, t.ex. en arbetande maskin med konstant varvtal. Om exciteringen är slumpartad eller om svängningen alstras av flera olika energikällor, kan ett icke periodiskt svängningsförlopp (sk. random oscillation) erhållas.



Figur 4 : Tre huvudtyper av icke harmonisk svängningsrörelse.

2.6 Påtvingad svängning. Resonans.

När ett svängningssystem påtvingas en svängningsrörelse av en viss frekvens, erhålles en resulterande svängningsrörelse, som beror av systemets egen frekvens och den påtvingade frekvensen. Detta är av stor betydelse dels vid dimensionering och kontroll av system utsatta för en påtvingad svängning och dels vid tolkning av utförda vibrationsmätningar. Eftersom samtliga masspunkter på jorden befinner sig i rörelse innebär mätning av ett svängningsförlopp alltid en relativ bestämning.

Teorin för påtvingade svängningar åskådliggöres lättast genom att betrakta en vertikal pendels beteende, när den möter underlagets svängningar. (se figur 5).

Är pendelhuset (stativ) i vila, dvs. bara det rörliga systemet är i rörelse, beskrivs rörelseförloppet med följande differentialekvation

$$m\ddot{z} = -kz \quad (2,6-1)$$

där

- m = pendelns massa
- k = fjäderkonstanten
- z = förflyttningen av en masspunkt
- \ddot{z} = $\frac{d^2z}{dt^2}$

Men eftersom förflyttningen i detta fall är lika med amplituden blir enligt (2,5-1)

$$z = z_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2,6-2)$$

och för egenvinkelfrekvensen ω gäller att

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2,6-3)$$

Pendelns egenperiod τ blir

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2,6-4)$$

och egenfrekvensen f_0 fås av sambandet

$$f_0 = \frac{1}{\tau} \quad (2,6-5)$$

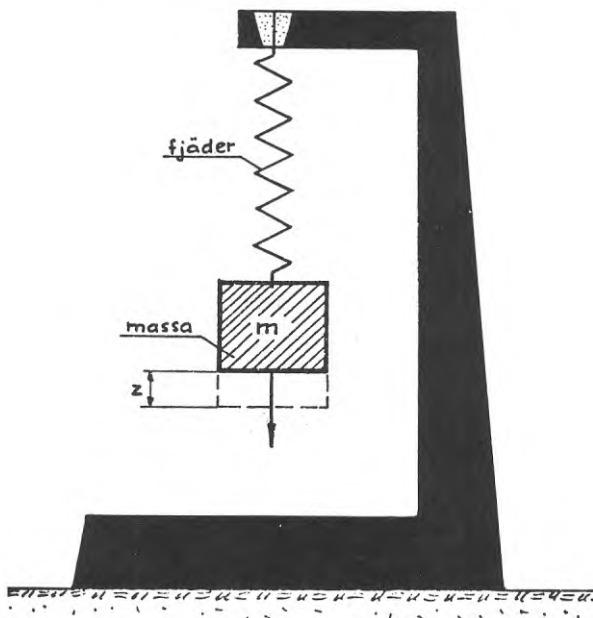
Om även pendelhuset är i rörelse (som är alltid fallet i verkligheten) blir förflyttningen av en masspunkt (z^*)

$$z^* = z_0^* \sin(\Omega t + \Psi) \quad (2,6-6)$$

och ur sambandet

$$U = z - z^* \quad (2,6-7)$$

erhålls den relativa förflyttningen U .



Figur 5: Vertikal pendel, pendelhuset i fast koppling till markytan.

Pendelhusets, d.v.s. underlagets vinkelfrekvens kan uttryckas med hjälp av perioden T på följande sätt

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2,6-8)$$

rörelseekvationen blir enligt D'Alemberts princip för hela systemet

$$m \ddot{z} = -k (z - z^*) \quad (2,6-9)$$

och efter insättning av ovanstående, diverse samband fås

$$\ddot{U} + \frac{d^2(z^*)}{dt^2} = -\omega^2 U \quad (2,6-10)$$

eller

$$\ddot{U} + \omega^2 U = \Omega^2 z_o^* \sin(\Omega t + \psi) \quad (2,6-11)$$

vidare fås för den relativa förflyttningen

$$U = \frac{z_o^* \Omega^2}{\Omega^2 - \omega^2} \sin(\Omega t + \psi) + U_o \sin(\omega t + \psi) \quad (2,6-12)$$

där $\frac{\Omega^2}{\Omega^2 - \omega^2} = \frac{\tau^2}{\tau^2 - T^2}$ och kallas dynamisk förstoring

Om $\tau = T$ blir relationen lika med ∞ vilket medför en s.k. resonanskatastrof hos odämpade svängnings-system.

Om $\tau \gg T$, erhålls för den relativa förflyttningen

$$U = z_o^* \sin(\Omega t + \psi) + U_o \sin(\omega t + \psi) \quad (2,6-13)$$

vilket betyder att pendelsystemet möter underlagets förflyttning.

Om $\tau \ll T$ fås

$$U = \frac{z_0^*}{T} \sin(\Omega t + \psi) + U_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2,6-14)$$

som innebär att pendelsystemet möter underlagets acceleration.

Det rörliga systemet utför emellertid en dämpad rörelse, varvid dämpningskraften d fås av sambandet

$$d = \frac{\gamma k}{\omega} \quad (2,6-15)$$

där γ = den strukturella dämpningsfaktorn. Den svängande massans förflyttning vid ett dämpat system blir

$$z = z_0 e^{-\xi \omega t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2,6-16)$$

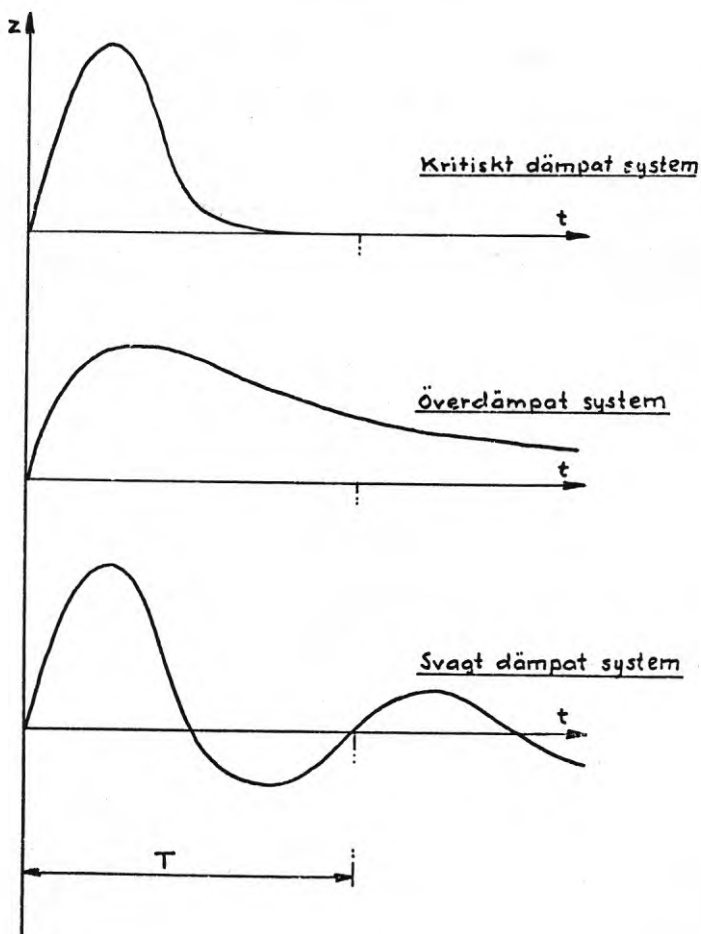
där $\xi = \frac{d}{2} \sqrt{mk}$. Kritisk dämpning uppnås om $\xi = 1$

medan dämpningen blir svag om $\xi < 1$ och stark om $\xi > 1$ (se figur 6).

Rörelseekvationen för hela systemet tar följande gestalt

$$\ddot{U} + 2\xi\omega\dot{U} + \omega^2 U = \Omega^2 z_0^* \sin(\Omega t + \psi) \quad (2,6-17)$$

Därför framgår att pendelns rörelse blir en överlagring av egna svängningar med vinkelfrekvensen ω samt påtvingade svängningar med vinkelfrekvensen Ω .



Figur 6: Svängningssystemets eget förlopp vid olika dämpningar.

2.7 Vågutbredning i homogena medier

I ett homogent medium med oändliga geometriska dimensioner alstras genom en elastisk kraftimpuls i en godtycklig punkt en elastisk vågrörelse, som innehåller i detta fall endast de två huvudtyperna av vågor, dvs. en longitudinell och en transversell våg. Den elastiska vågrörelsen utbreder sig från exciteringspunkten i alla riktningar. Vågfronten blir en sfär. Den longitudinella vågen uppkommer genom den radiellt verkande tryckspänningen σ , medan skjuv-

spänningen τ alstrar den transversella vågen. Materialpartiklarna rör sig sålunda helt annorlunda vid den förstnämnda än vid den sistnämnda vågen. Vågutbredningen i ett homogent medium illustreras av figur 7.

Fortplantningshastigheten (c), erhålls av sambandet

$$c = \frac{dr}{dt} \quad (2,7-1)$$

och definieras även som produkten av frekvensen f och våglängden λ

$$c = f \cdot \lambda \quad (2,7-2)$$

Den elastiska vågens intensitet (I) i en godtycklig punkt blir

$$I = \mathcal{J} \cdot c \quad (2,7-3)$$

där \mathcal{J} = energitätheten, dvs. energiflöde per ytenhet. Energitätheten kan för en enkel harmonisk rörelse uttryckas (kinetisk energi = $\frac{1}{2} m v^2$) på följande sätt

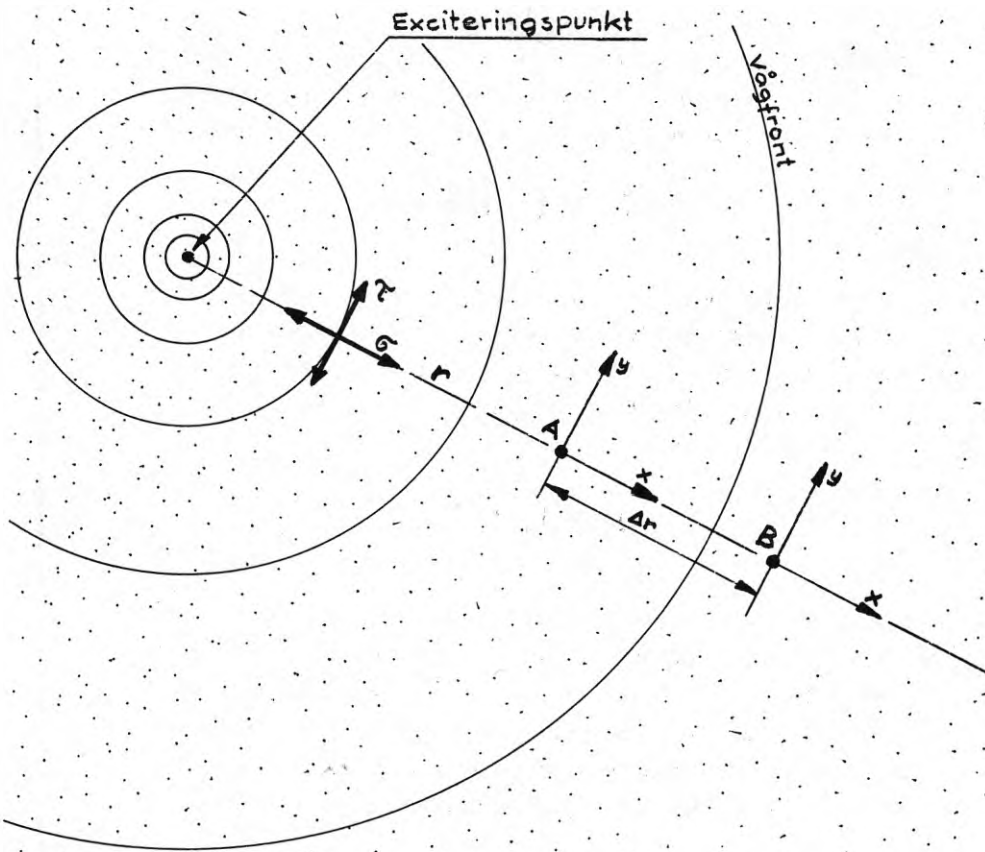
$$\mathcal{J} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2,7-4)$$

där v = svängningshastigheten, och ρ = materialets täthet. Men eftersom svängningshastigheten blir

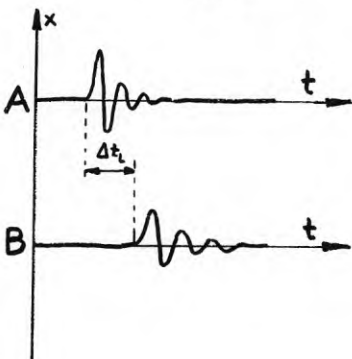
$$v = 2\pi \cdot A_0 \cdot f \quad (2,7-5)$$

enligt (2,5-3) vid $A = A_0$ kan (2,6-3) skrivas på följande sätt

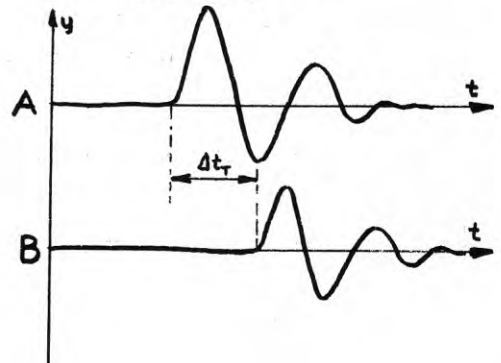
$$I = 2\pi^2 \cdot A_0^2 \cdot f \cdot \rho \cdot v \quad (2,7-6)$$



Longitudinell våg
Mättriiktning X



Transversell våg
Mättriiktning Y



Figur 7: Vågutbredning i homogent medium.

I ett homogent, isotropt medium sker en likformig utbredning av energin med följderna att intensiteten minskar med ökande avstånd från exciteringspunkten

$$I_r = I_0 \cdot r^{-2} \quad (2,7-7)$$

Förutom den geometriska utbredningen (geometrisk dämpning) spelar även materialets energiabsorberande egenskaper en stor roll, varför intensiteten I_r beroende av avståndet måste uttryckas, i stället för (2,6-7) på följande sätt

$$I_r = I_0 \cdot e^{-\alpha r} \quad (2,7-8)$$

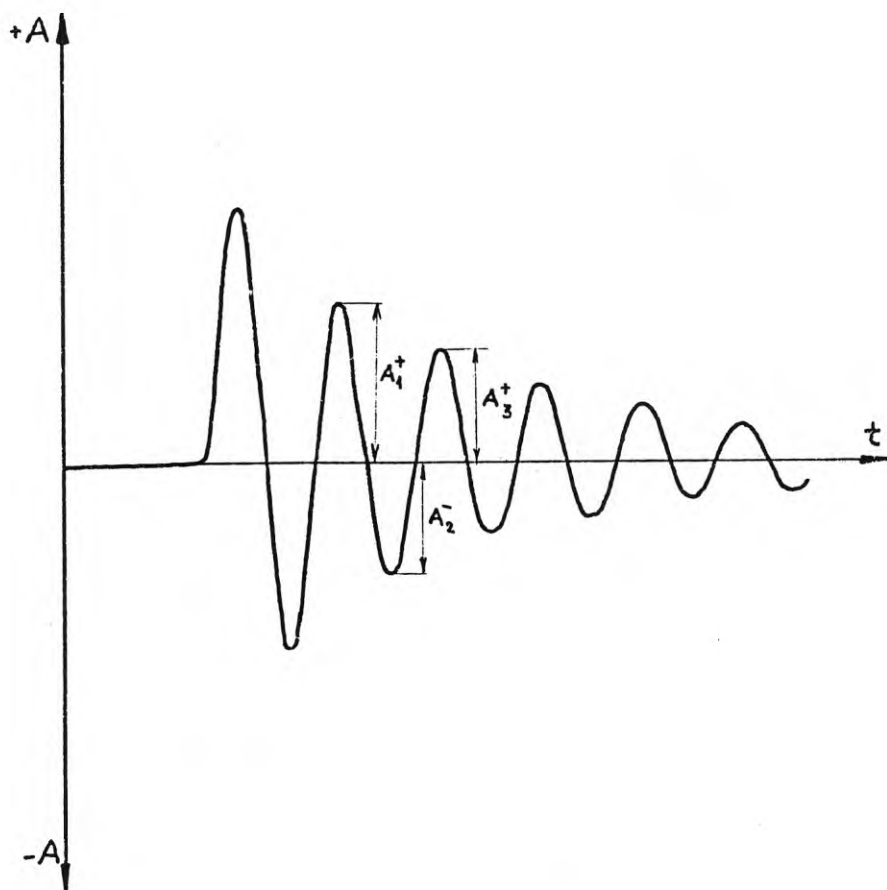
där α = absorptionskoefficienten, som är inversen till det avstånd r , vid vilket intensiteten I reduceras till ett värde av $I_0 \cdot e^{-1}$. Absorptionskoefficienten är dock beroende av våglängden λ . Nedanstående tabell visar några värden på α , som funktion av λ , för några jordmaterial (efter Weiner).

Jordarter	per våglängd uttryckt i m^{-1}
vattenmättad löst lagrad: sand, sandig lera, lera	0,01 - 0,03
Mellan- och grov sand, fuktig sandig lera och lera	0,04 - 0,06
Sandig lera och lera med låg vattenhalt	0,07 - 0,10

Svängningsrörelsen från en elastisk kraftimpuls blir ett dämpat svängningsförlopp vars utseende (form och längd) är beroende på materialets inre dämpningseffekt D , (se figur 8). Dämpningseffekten D kan beräknas med hjälp av det s.k. logaritmiska dekrementet δ , som definieras med följande samband

$$\delta = \ln \frac{A_1^+}{A_2^-} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (2,6-9)$$

där A_1^+ och A_2^- betecknar två efter varandra mätta amplituder.



Figur 8: Dämpad svängningsrörelse i tidsprojektion.

I nedanstående tabell visas några värden för inre dämpningseffekten D , bestämda vid olika laboratorie-försök med hjälp av transversella vågor som var alstrade på ett speciellt sätt (efter Richart).

Type soil	Equivalent D	Reference
Dry sand and gravel	0,03-0,07	Weissmann and Hart (1961)
Dry and saturated sand	0,01-0,03	Hall and Richart (1963)
Dry sand	0,03	Whitman (1963)
Dry and saturated sands and gravels	0,05-0,06	Barkan (1962)
Clay	0,02-0,05	Barkan (1962)
Silty sand	0,03-0,10	Stevens (1966)
Dry sand	0,01-0,03	Hardin (1965)

2.7 Vågutbredning i inhomogena medier

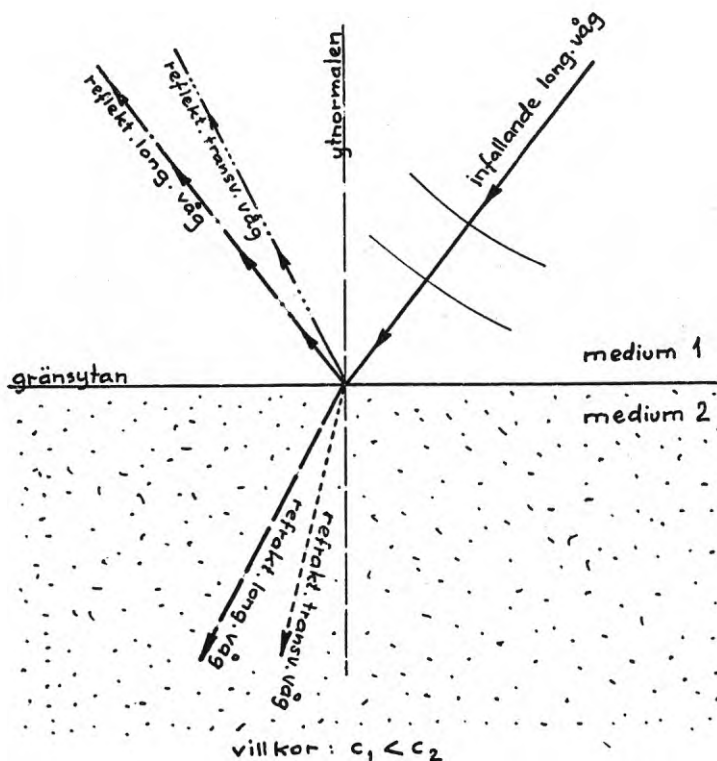
Om mediets geometriska dimensioner begränsas och/eller olika medier lagras ovanpå varandra förhindras vågutbredningen. I gränssytan mellan två olika medier (se figur 9) inträffar s.k. vågbrytningar av olika typer, vilka samtidigt ger upphov till nya, sekundära vågor. För att åskådliggöra ovannämnda väljer vi ut en s.k. vågstråle på en infallande longitudinell våg och följer dennes väg. Vid gränssytan "studsar" en del av energin tillbaka, d.v.s. vågen reflekteras medan resten tränger in i medium 2, dock med ändrad fortplantningsriktning, d.v.s. vågen refrakteras. Beroende på spänningskomponenternas fördelning i angreppspunkten uppstår såväl longitudinella som transversella vågor. Den infallande longitudinella

vågens energi fördelas sålunda mellan fyra sekundära vågor. Analogt med optiska fenomen gäller även här brytningslagen, d.v.s.

$$\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2,7-1)$$

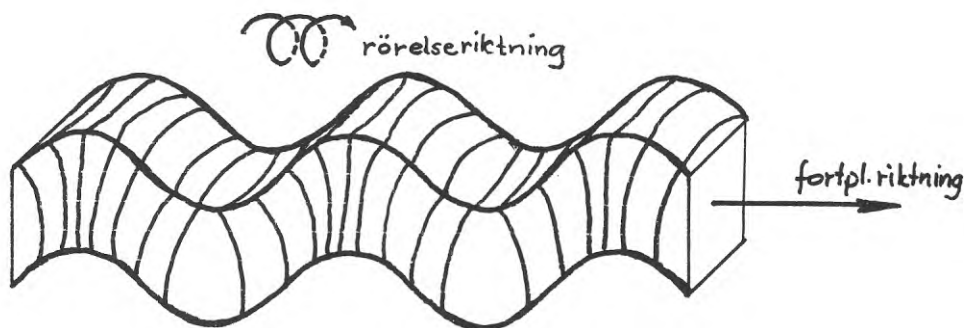
där i = infallsvinkeln för vågstrålen och b = vinkeln mellan den brutna strålen och ytnormalen. Vid en infallsvinkel av $\text{arc sin } \frac{c_1}{c_2}$ blir $b = 90^\circ$, vilket betyder

att den brutna strålens riktning sammanfaller med gränssytan, kallad kritisk vinkel.



Figur 9: Vågbrytning i gränssytan mellan två medier.

När vågrörelsen exciteras i gränsytan mellan två elastiskt olika medier (t.ex. luft och jord) uppstår s.k. ytvågor, vilka har speciella egenskaper. En transversell rymdvåg kännetecknas av att materialpartiklarnas förflyttning sker likformigt i alla riktningar i det mot fortplaningsriktningen vinkelräta planet. Detta karakteristiska drag rubbas hos en våg som fortplantar sig i gränsytan mellan två medier. L. Rayleigh (1885) var den första som har dragit uppmärksamheten till ytvågor, vilka uppträder i samband med jordbävningar i jordskorpanns översta del (ground roll). Enligt Rayleigh är uppkomsten av ytvågor endast möjlig i en fri yta hos en isotrop, elastisk kropp.



Figur 10: Masspunkternas rörelse hos Rayleigh-våg.

Figur 10 visar schematiskt materialpartiklarnas förflyttning hos Rayleighvågen i ett godtyckligt tidsögonblick. Vågrörelsen har som synes en spiralform. Spiralvågens symmetriaxel sammanfaller med fortplantningsriktningen.

A.E.H. Love (1914) har kunnat påvisa även en annan typ av ytvåg som uppträder i gränsytan mellan två isotropa, elastiska medier. Materialpartiklarnas förflyttning hos Love-vågen sker parallellt med gränsytan och vinkelrätt mot fortplantningsriktningen.

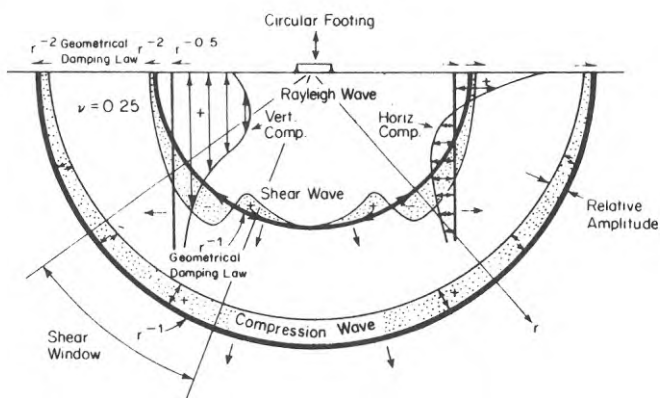
Ytvågens härkomst och fortplantning är alltid förbundna med en gränsyta mellan två elastiskt olika medier. Vågenergin, som är förhållandevis stor i ytan, avtar exponentiellt med djupet. Vidare är det synnerligen betydelsefullt att ytvågen ej kan frigöra sig ifrån ytan, dvs. ytvågen kan aldrig omvandlas till en transversell rymdvåg. Därav följer att ytvågen endast kan bli direkt observerad i den aktuella ytan eller i dess omedelbara närhet. Ytvågen kan emellertid bli observerad indirekt via en sekundär våg i likhet med den refrakterade vågen, även på ett längre avstånd från den aktuella gränsytan.

Rayleigh har påvisat att ytvågen fortplantar sig något långsammare (vid $\nu = 0,25$ är $c_R = 0,9194 c_s$) än den transversella rymdvågen, men att amplituden är avsevärt större hos ytvågen än hos den sistnämnda. Love-vågens fortplantningshastighet är något större än Rayleigh-vågen, dock fortfarande mindre än den transversella rymdvågens fortplantningshastighet.

När en fri yta hos ett idealelastiskt medium utsätts för en elastisk kraftimpuls genom en cylindrisk fallvikt med cirkelarean mot angreppspunkten, fortplantas den påförda energin i form av elastiska vågor, såsom kompensionsvåg (longitudinell våg) P, skjuvvåg (transversell våg) S och Rayleigh-våg (ytvåg) R. P och S vågen utbreder sig i form av hemisfäriska vågronter, medan R vågen bildar en vertikalcylindrisk vågfront.

Relationen mellan dessa tre elastiska vågor åskådliggörs i figur 11 (Richart 1970). Figuren visar våg-

utbredningen för ett visst tidsmoment då för utbredningshastigheternas inbördes relation antagits ett medium med kontraktionstalet $\nu = 0,25$. I figuren har även hänsyn tagits till den s.k. geometriska dämpningen, vilket innebär att energitätheten (se formel 2,6-7) minskar successivt under vågens utbredning. Den geometriska dämpningsfaktorn för rymdvågen är lika med r^{-2} , medan för Rayleigh vågen gäller en geometrisk dämpningsfaktor av $r^{-1/2}$, där r betecknar det radiella avståndet från exciteringspunkten. Den skuggade zonen längs vågfronterna anger de relativa amplituderna som funktion av vinkeln.



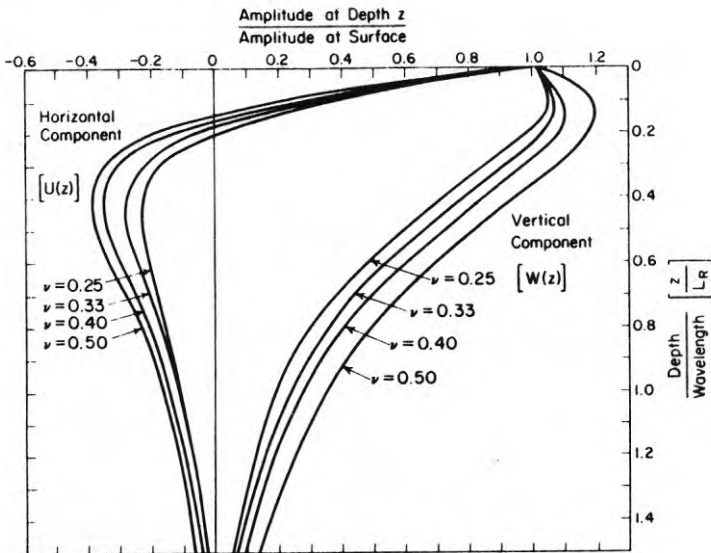
Figur 11: Utbredning av olika vågor i ett homogent halvrum. (efter Richart).

Segmentet i figur 11 med de största amplituderna för skjuvvågen kallas för "shear window". Den exciterande kraftens energi fördelas mellan ovannämnda vågor på följande sätt (enligt Miller och Pursey 1955)

<u>Vågtyp</u>	<u>Andel av den totala energin</u>
Rayleigh våg R	67 %
Skjuvvåg S	26 %
Kompressionsvåg P	7 %

Av tabellen på föregående sida framgår att 2/3 av den totala energin fortplantar sig i form av Rayleigh våg. Eftersom aktuella geotekniska problem koncentreras huvudsakligen till jordytan eller dess närhet måste ytvågen tillmätas en mycket stor betydelse vid dynamiska grundundersökningar. Som exempel kan nämnas att de gängse konstruktionsmetoderna för maskinfundament tar vid dynamisk balansering endast hänsyn till ytvågor på grund av dess stora amplituder.

Hos kompressionsvågen P sker materialpartiklarnas förflyttning parallellt med vågfrontsnormalen, medan hos skjuvvågen sker svängningen i det mot vågnormalen vinkelräta planet. Under idealiska förhållanden blir rymdvågen observerbar endast i en enda mätriktning. Rayleigh vågen har både horisontella och vertikala komponenter, vilkas inbördes relationer framgår av framställning på figur 12.

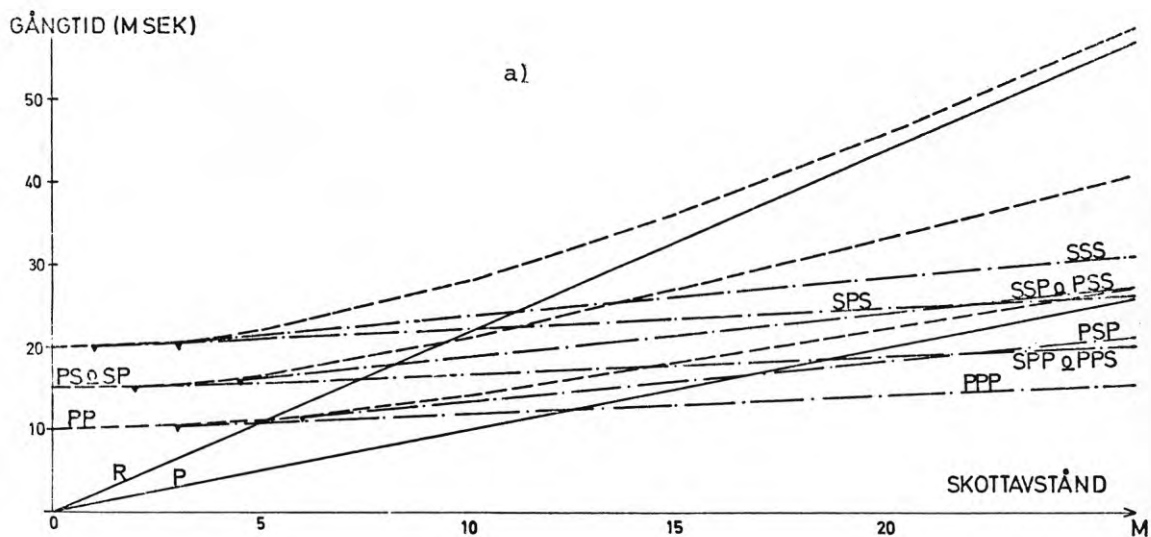


Figur 12: Relationen mellan Rayleigh-vågens horisontella och vertikala komponenter och dimensionslöst djup. (efter Richart).

Det enklaste fallet för inhomogenitet är, då halvrummet består av två parallella skikt med olika elastiska egenskaper. Fortplantningshastigheterna för rymdvågor antas vara större i medium 2 än i medium 1. Om observationspunkterna är belägna på den fria ytan hos medium 1 kommer dessa punkter att nås av följande vågor (se figur 13 a).

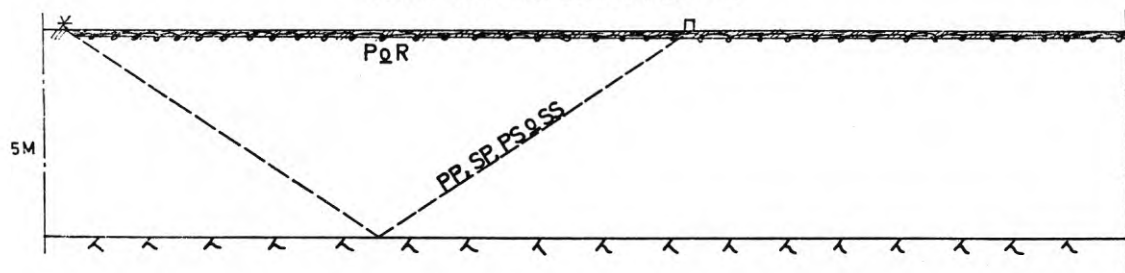
P_1	kompressionsvåg i medium 1, direkt våg
S_1	skjuvvåg i medium 1, direkt våg
R_1	Rayleigh våg i medium 1 längs ytan, direkt våg
P_1P_1	reflekterad kompressionsvåg
S_1S_1	reflekterad skjuvvåg
P_1S_1	reflekterad kompressionsvåg omvandlad till skjuvvåg
S_1P_1	reflekterad skjuvvåg omvandlad till kompressionsvåg
$P_1P_2P_1$	reflekterad kompressionsvåg
$S_1S_2S_1$	reflekterad skjuvvåg
$P_1S_2S_1$	} olika kombinationer av refrakterade vågor
$P_1S_2P_1$	
$S_1P_2S_1$	
$S_1P_2P_1$	
$P_1P_2S_1$	
$S_1S_2P_1$	

I figur 13 b åskådliggörs ovanstående vågors inbördes relation beträffande gångtiden t som funktion av avståndet S mellan exciteringspunkt och observationspunkt. Gångtiden i figuren motsvarar det tidsintervall som förlöper mellan exciteringsögonblicket och den första vågfrontens ankomsttid i observationspunkten.

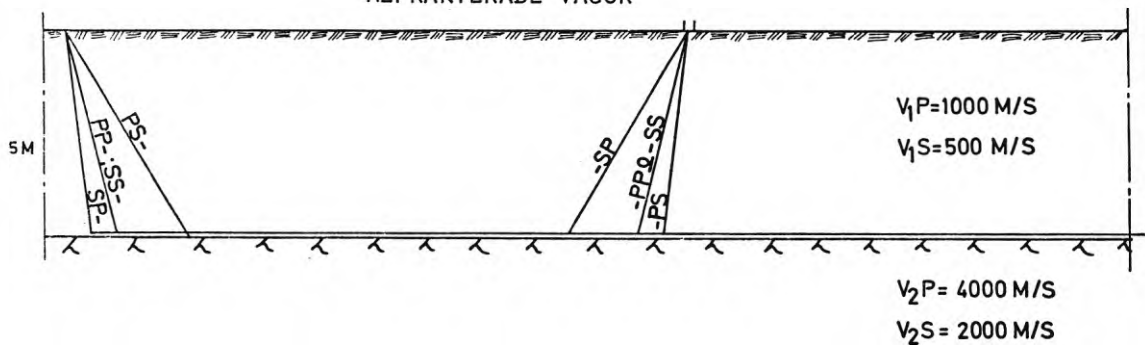


b)

YTVÅG OCH REFLEKTERAD VÅG



REFRAKTERADE VÅGOR



Figur 13: Seismisk modell.

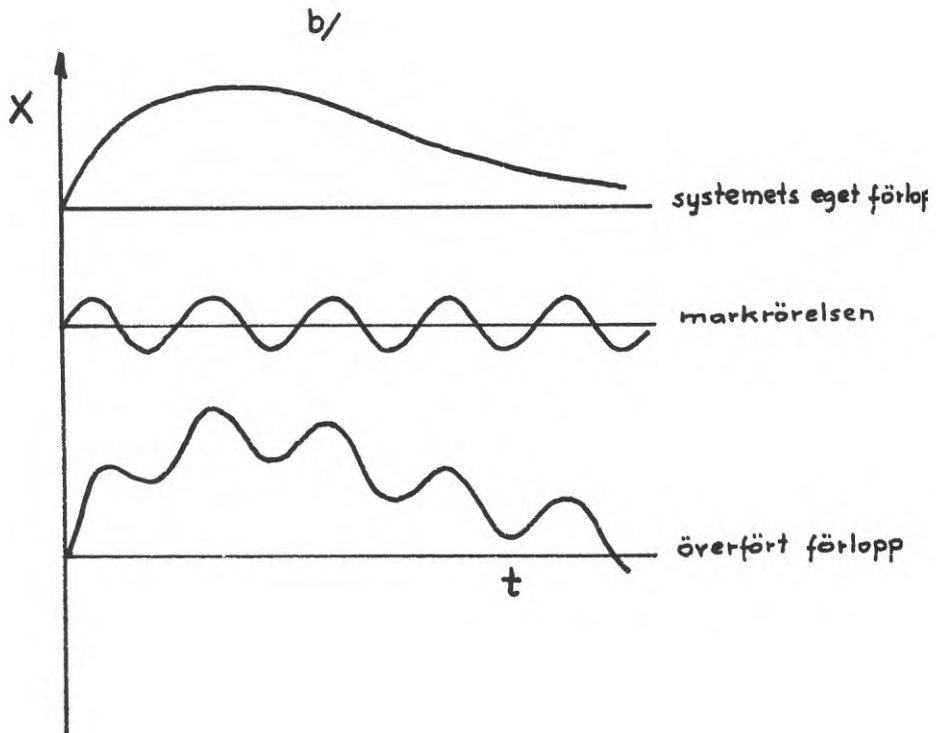
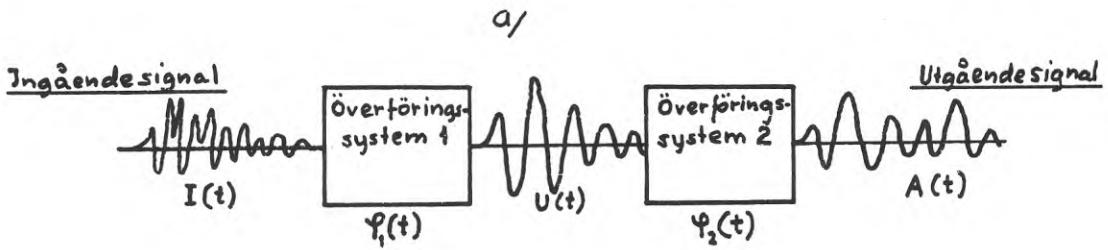
3 EXCITERING OCH REGISTRERING AV ELASTISKA VÅGOR

I problemställningen om elastiska vågors utnyttjande för bestämning av materialets fysikaliska egenskaper utgör exciteringen och registreringen av en svängningsrörelse den viktigaste grundstenen. Vissa generellt förekommande elastiska vågrörelser från t ex jordbävning, sprängning eller vibrerande och stående maskiner, kan utnyttjas vid en dynamisk grundundersökning, men i allmänhet erfordras en speciell och för ändamålet lämplig energikälla. De mänskliga sinnesorganen kan på olika sätt förnimma en svängningsrörelse, men för registrering (observation där ett tidsförlopp avbildas bestående) erfordras speciella mätinstrument.

På grund av att den exciterade svängningsrörelsen påverkar samtliga masspunkter i sin omgivning, kan ingen av dessa användas som referenspunkt för en absolut mätning. Samtliga vibrationsomvandlare (mekaniska, elektrodynamiska, piezoelektriska) representerar i sig själva ett svängningssystem som har ett eget svängningsförlopp beroende på konstruktionen, (se kapitel 2.6). Omvandlaren utgör sålunda ett överföringssystem med en viss överföringsfunktion $\Psi(t)$ (se figur 14a) som medför att

$$I(t) \neq U(t) \quad (3,0-1)$$

där $I(t)$ betecknar det ingående förloppet, medan $U(t)$ är beteckningen för det utgående förloppet. Överföringsfunktionens inverkan åskådliggöres på figur 14b. Det omvandlade förloppet $U(t)$ måste återigen passera ett eller flera överföringssystem (förstärkare, oscillograf eller bandspelare) tills en avbildning $A(t)$ av rörelseförloppet $I(t)$ kan komma till stånd. Registreringen av en svängningsrörelse (se figur 14a) innebär således att



Figur 14a.: Registreringsenheternas funktion vid överföring.

Figur 14b.: Markvibrationernas förvanskning vid överföring.

$$I(t) \neq A(t)$$

(3,0-2)

För hela registreringssystem brukar överföringsfunktionen anges i form av responskurvor.

3.1 Olika energikällor

Energikällornas olikheter beror på kraftimpulsgivningens karaktär. De flesta av de vid dynamiska grundundersökningar använda energikällorna ger en mycket kortvarig impulsgivning. På senare år används även stationära impulser för bestämning av undergrundens överföringsfunktioner. De vanligaste energikällorna är sprängladdning, fallvikt, seisraket, elektrisk chockimpuls och vibrerande maskin. Dessa beskrivs kortfattat nedan.

a) Sprängladdning

Detonationshastigheten hos de vanligaste sprängämnena (dynamex 6200 m/s, nabit 4000 m/s) ligger i samma storleksordning som kompressionsvågans fortplantningshastighet i våra vanligaste bergarter. Beroende på den höga detonationshastigheten blir frekvensen för kraftimpulsen mycket hög. En klotformig sprängladdning (detonationshastighet = 6000 m/s) med en radie av 0,05 m avger en spänningsimpuls med frekvensen 30 kHz, under förutsättning att inicieringen sker i mittpunkten. För att uppnå en kraftimpuls med frekvensen 1 Hz behövs en sprängladdning med en radie av 1,5 km.

Vid energitransmissionen fungerar undergrunden såsom ett filter. Den fysikaliska strukturen begränsar rörelseförloppet för materialpartiklarna. Den påtvingade, högfrekventa svängningen dämpas snabbt och energifortplantningen bestäms av mediets geodynamiska egenskaper. Beträffande karakteristiska frekvensband i jord och i berg hänvisas till kap. 5.

Beroende på sprängladdningens utformning erhålls olika riktverkan av tryckvågen. Största tryckspänningen uppnås där den geometriska arean är störst. Därav följer att den geometriska formen har en viktig roll beträffande energifördelningen mellan P och S våg, eftersom vinkelrätt mot största tryckspänningen erhålls den kraftigaste S-vågen.

Sprängladdningarna placeras i regel på olika djup under markytan beroende på tillåten skadeverkan och önskad fördämning (mottryck vid sprängning). Mestadels används stavformiga dynamexpatroner med en vikt av ca 0,1 kg. Sprängladdningarnas storlek varierar i regel mellan 0,03 - 0,2 kg. Om laddningsstorleken är liten kan denna anses vara punktformig och energiutbredningen blir likformig i alla riktningar.

Med sprängämne kan således på ett relativt enkelt sätt en kortvarig och effektiv kraftimpuls exciteras. Nackdelarna är emellertid tämligen tungt vägande. Handhavande av sprängämnen kräver speciell utbildning och särskilt tillstånd. Skadeverkan vid sprängningar blir ofta ganska omfattande även med små laddningar. Det största problemet utgör det faktum att man aldrig kan repetera en sprängning så att kraftimpulsgivningen blir identiskt lik med den föregående, småt att exciteringskraften blir tämligen oidentifierad och varierande från punkt till punkt. Om energikällan är oidentifierad måste observationspunkternas antal bli större, och relativa bestämningsmetoder tillämpas.

b) Slag

Denna typ av energikälla utgöres av en riktad slagkraft antingen direkt på markytan eller på en metallplatta. Slagkraften kan bestå av ett

helt okontrollerat släggslag eller av en kontrollerad fallvikt. Kraftimpulsen är svag i förhållande till sprängning. Energitransmissionen sker inte likformigt i alla riktningar utan förhållandevis kraftiga ytvågor exciteras.

Kraftimpulsens frekvens blir vid slag tämligen låg (ca 1-5 Hz). Materialpartiklarna övertar inte denna låga svängningsfrekvens utan påbörjar direkt det "egna" svängningsförloppet som är beroende av den fysikaliska strukturen.

Fallvikt används ofta som energikälla vid dynamiska grundundersökningar. Slagkraften är därvid mycket väl definierad och impulsgivningen är repeterbar. Den största nackdelen med denna metod är att utrustningen är tämligen tung och oftast krävs även motorfordon för att uppnå önskad rörlighet (se figur 15).



Figur 15: VTI-s fallviktsutrustning i mätläge.
(Efter O. Tholén.)

c) Seisraket

Denna typ av energikälla har utvecklats i Ungern. Principen består däri att en raket med fast bränsle (som i detta fall utgöres huvudsakligen av vanligt krut) vänds upp och ned, dvs den rik-
tas mot jorden i lodrät riktning. Raketmotorn
tänds elektriskt, varefter raketten stötes mot
markytan. (Se figur 16). Slagkraften är hos den-
na energikälla mycket väl definierad och uppgår
till max 600 kg/cm^2 . Kraftimpulsens tidsförlopp
(varaktigheten är ca 0,015 sek) kan varieras ge-
nom att ändra på bränslesammansättningen. För
att demonstrera storleken på rakethylsan place-
rades en vanlig kulspetspenna bredvid raketten
vid fotograferingen. Rakethylsan är gjord av
smidat stål och väger ca 20 kg, inklusive spe-
cialgjort stativ.



Figur 16: Seisraket SR-1 färdig för avfyrning.

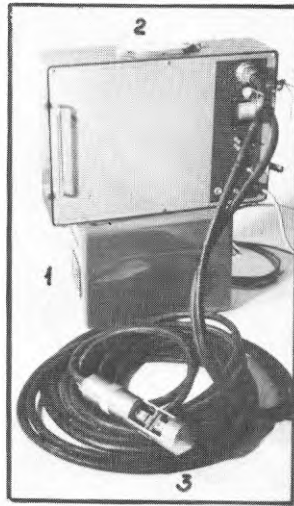
I samband med en studieresa (BFR anslag R 10:62) i Ungern sommaren 1973 fick undertecknad tillfälle att närvara vid en demonstration med en av prototyperna SR-01 i fält. Seisraketen har visat sig vara lätthanterlig, men ljudeffekten vid avfyrningen var både besvärande för örat och synnerligen störande vid registreringen. Ljudeffekten uppträder med förhållandevis mycket höga frekvenser och kan därför filtreras bort. Konstruktorerna har uppgivit att experiment med effektiva ljuddämpare kommer att genomföras i den närmaste framtiden. Fördelen hos seisraketen, förutom den förhållandevis låga vikten, är att den kan riktas åt alla håll, dvs även i horisontell riktning och att impulsgivningen är repeterbart. Om ljudeffekten kan elimineras kommer denna typ av energikälla att bli mycket användbar vid dynamiska grundundersökningar.

d) Elektrisk chockimpuls, Sparker

Vid maringeologiska undersökningar används denna typ av energikälla i stor utsträckning. Samma forskarteam i Ungern, som utvecklade seisraketen har konstruerat en för landmätningar användbar version av "Sparkerprincipen", som kallas för "elektrisk kanon" (EK). EK var i första hand avsedd för mätningar i borrhål, men visade sig snart även vara användbar vid andra typer av dynamiska undersökningar, bl. a. vid standardseismik.

"Sparker-principen" består däri att vid elektrostatisk urladdning (blixtnfenomen) exciteras en stötimpuls som fortplantar sig i form av en rymdvåg likformigt i alla riktningar. En urladdning av önskad effekt kan som bekant endast uppnås i medier med vissa dielektriska konstanter (gaser och vätskor). I vatten exciterar urladdningen mycket kraftigare stötvåg än i luften.

Den ungerska EK (figur 17) består av följande 3 enheter:

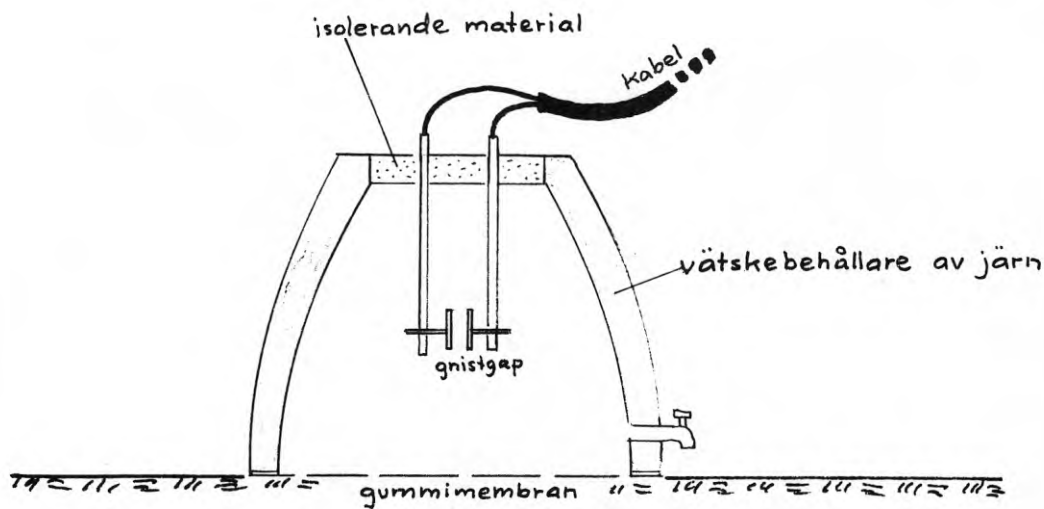


Figur 17: "Elektrisk kanon" (foto ELGI)

1. Kraftkälla, som utgörs av ett 12 volts bilbatteri med tillhörande kopplingsladdar.
2. Centralenheten - inbyggd i ett med bärhandtag försedd plåtchassi, vars dimensioner är 55 x 45 x 15 cm - med följande funktion:

Med hjälp av ett konvertersystem framställs en så hög laddningsspänning som 2500 V, varmed ett kondensatorpaket med en sammanlagd kapacitet av 320 F uppladdas. Uppladdningen tar ca 40-50 sekunder i anspråk. Urladdningskretsens huvudelement utgörs av en Volvo-PL 5551 A ignition, som möjliggör en påkoppling med minsta möjliga ohmiskt motstånd.
3. Sändarhuvud - med ca 10 m lång speciell anslutningskabel - bestående av själva gnistgapet (elektroder) och en specialkonstruerad skyddsram. Skyddsramens utformning gör att denna del av utrustningen ser ut som någon sorts sondspets. Gnistgapet består av 2 parallella runda stålstavar på reglerbart stativ.

Vid urladdningen av kondensatorpaketet slår en kraftig gnista över gnistgapet, varvid en relativ högfrekvent kraftimpuls exciteras i det omgivande mediet. Vid demonstrationen i fält borrades ett ca 1,5 m djupt hål i marken med hjälp av spadborr, vilket sedan fylldes med vatten före varje urladdning. Konstruktörerna har nyligen uppgivit att för vissa speciella ändamål finns även en annan utformning på sändarenheten, där elektroderna är placerade i ett vattenfyllt kärl av metall vars botten består av gummimembran (se figur 18). Den uttöjbara botten möjliggör excitering av kraftimpulser i en yta utan förborrade hål. Av demonstrationen att döma blir energin med detta förfarande mycket liten i förhållande till fallvikt eller seisraket.



Figur 18: Principen för en sparker-sändare för mätning i land.

En specialkonstruerad maskin för excitering av svängningar brukar även vara försedd med utbytbara excenterhjul eller utbyggbart fundament (geometrisk dimension, vikt) så att svängningsamplituden kan varieras. Genom att variera den dynamiska lasten kan materialkonstanternas beroende av laststorlek bestämmas. Mätdata från dynamiska grundundersökningar med stationära svängningar är ofta svårhanterliga. Med hjälp av avancerad datateknik kan analyserna förbättras avsevärt och leder i regel till mycket tillförlitligare resultat, än vad som kan uppnås vid manuell bearbetning.

Energikällans stora betydelse vid dynamiska grundundersökningsmetoder motiverar stora forskningsinsatser inom detta område. I detta projekt genomfördes alla fältexperiment med små sprängladdningar som exciteringskälla. De andra, ovan beskrivna energikällorna har dock vid olika tillfällen studerats och jämförts med varandra. Denna utredning har resulterat i följande slutsatser:

1. Vid dynamiska grundundersökningar bör energikällan vara väldefinierad (riktning, energi, frekvens) och välanpassad till undergrundens dynamiska egenskaper.
2. Impulsgivningen bör vara repeterbar helst under identiskt lika förhållanden.
3. Energikällan bör vara rörlig och lätthanterlig.
4. Impulsgivningen bör väljas med tanke på bearbetningsmetod (manuell teknik, datateknik).
5. Energikällan bör vara standardiserad.

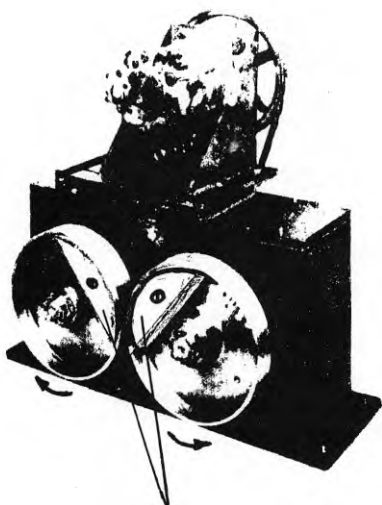
Det förefaller lämpligt att använda fallvikt eller en modifierad seisraket för excitering av korta stötimpulser.

Användningen av stationära svängningar (vibrator) för bestämning av undergrundens fysikaliska egen-

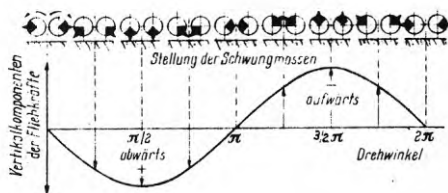
e) Vibrerande maskin

Vibrerande maskiners förmåga att excitera svängningsrörelser är ett allmänt känt faktum. Vibrationer uppträder hos maskiner där svängningssystemet är obalanserat. Vissa maskiner är direkt så konstruerade att vibrationerna skall kunna tillgodogöras vid utförandet av olika funktioner (vibrator, slagborr m.fl.).

Specialkonstruerade maskiner (se figur 19) används som energikällor vid dynamiska grundundersökningar. Impulsgivningen hos denna typ av energikälla blir en kontinuerlig upprepning av den spänningsförändring, som uppstår när excenterhjulen roterar ett varv. Vid dylika stationära svängningar är den resulterande svängningsrörelsen en funktion av mediets egen frekvens och den påtvingade frekvensen enligt kapitel 2.6. Om man varierar varvtalet hos den svängande maskinen kan vågor med olika våglängder alstras i samma medium. Med det sistnämnda förfarandet kan egenfrekvensen hos byggnaden, byggnadsdelar och undergrunden bestämmas.



excentriskt belägna vikter



Exciteringskällans princip för framställning av vertikala svängningar. (Efter Lorenz).

Figur 19: Exciteringskälla för stationära svängningar med varierbart varvtal.

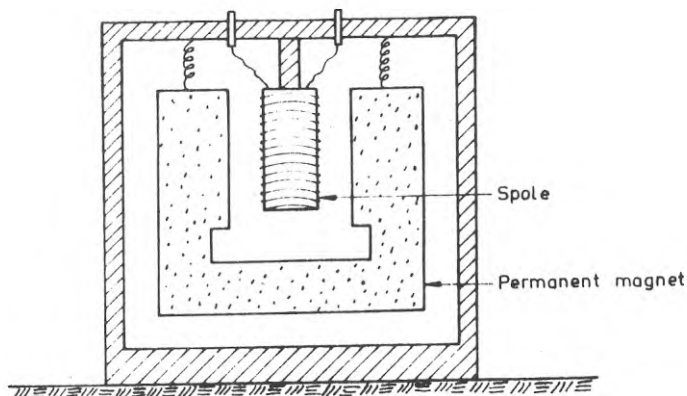
skaper i förening med en avancerad signalanalytisk-datateknik, bör kunna skapa ett gemensamt språk för byggnadsdynamik och jorddynamik. En och samma energikälla bör kunna användas både vid jorddynamiska undersökningar och vid byggnadsdynamiska mätningar. Förutsättningarna för att utveckla en sådan metodik bedöms vara goda.

3.2 Omvandling av svängningar till mätsignaler

För registrering av ett svängningsförlopp erfordras en omvandling av mekanisk rörelse till elektriska signaler. För registrering av aktuella dynamiska förlopp användes vanligen hastighets- eller accelerationsgivare.

a) Elektrodynamisk omvandlare (Velocimeter)

En elektrodynamisk omvandlare består av en permanent magnet i vars magnetfält en induktions-spole kan röra sig.



Figur 20: Principskiss över en elektromagnetisk geofon (velocimeter).

Betecknas flödet med Φ , den inducerade spänningen med S och förflyttningen med U erhålles

$$S = A \frac{d\Phi}{dt} \quad (3,2-1)$$

men eftersom

$$\frac{d\Phi}{dt} = B \cdot \frac{dU}{dt} \quad (3,2-19)$$

blir
$$S = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (3,2-20)$$

där A , B och C är konstanter. Därav framgår att en elektrodynamisk (kallad även elektromagnetisk) omvandlare avger en elektrisk spänning som är direkt proportionell mot masspunktens svängningshastighet. För denna typ av instrument används inom fysiken benämningen velocimeter.

b) Piezoelektrisk omvandlare (Accelerometer)

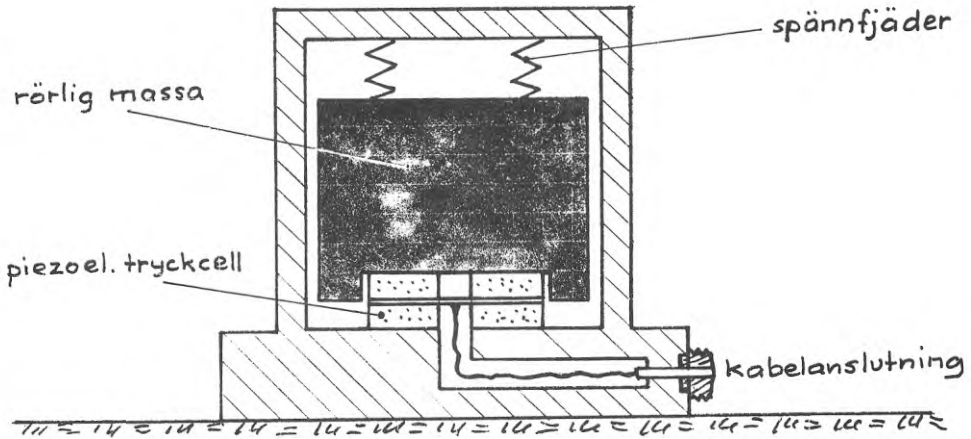
Om en cell med piezoelektriska egenskaper utsätts för tryckförändring avger denna en elektrisk spänning som är direkt proportionell mot tryckkraften. Tryckkraften hos en accelerometer (se figur 21) blir

$$G = m \cdot a \quad (3,2-21)$$

dvs. produkten av massan och accelerationen. Eftersom den rörliga massan alltid är konstant blir den hos den piezoelektriska cellen alstrade elektriska signalen direkt proportionell mot masspunktens acceleration.

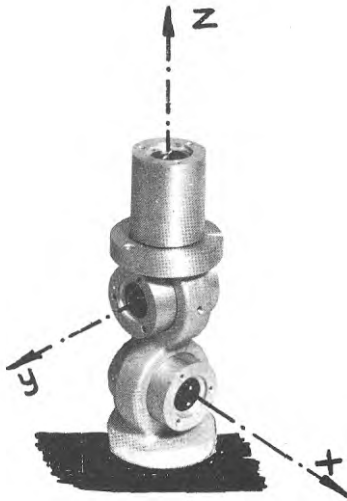
$$S = C \cdot a \quad (3,2-22)$$

där C är en konstant storhet, kallas även för accelerometers känslighet.



Figur 21: Principskiss över en piezoelektrisk accelerometer.

De ovan beskrivna omvandlarnas rörlighet är dock begränsad till en enda riktning. Vill man bestämma svängningsrörelsen i rymden behövs därtill 3 st omvandlare, vilka noggrant måste inställas i x, y och z riktningarna. Inställningen kan ske lämpligen med hjälp av ett specialtillverkat stativ (se figur 22) vartill omvandlarna fästes genom skruv- eller bajonettfattning.



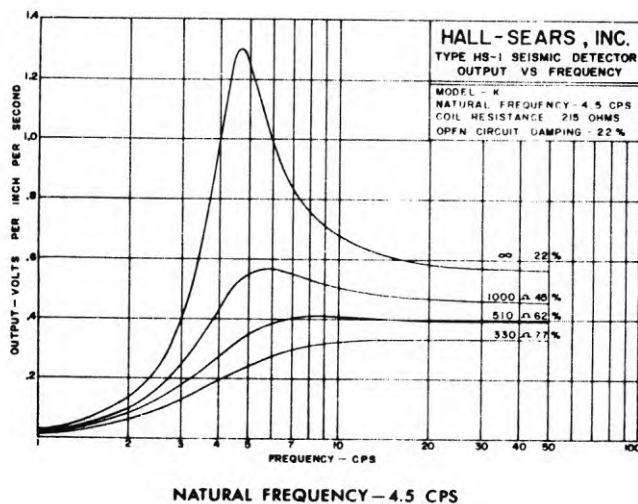
Figur 22: Trekomponentsgivare bestående av tre enkomponents-element monterade på stativ.

Figur 23a och b visar den typen av elektrodynamiska omvandlare som användes i föreliggande projekt samt tillhörande responskurvor vid olika dämpningsmotstånd inom frekvensområdet 1 - 100 Hz. Procenttalen på de olika responskurvorna anger graden av uppnådd kritisk dämpning. Ett dämpningsmotstånd av 330 ohm har använts för att undvika resonanstopp vid egenfrekvensen 4,5 Hz.



a/

FREQUENCY RESPONSE CURVES FOR HS-1 GEOPHONE



b/

Figur 23: a) Bild över den trekomponentsgeofon (HS-1-LP3D) som användes vid fältförsöken.
b) Geofonens responskurvor.

3.3 Förstärkning. Filtrering

Vid detonation av en sprängladdning på 0,03 kg erhålles på ett avstånd av 10 m en maximalamplitud av ca 0,005 mm. Storleksordningen av svängningsamplituderna vid dynamiska grundundersökningar är vanligen mellan $2 \cdot 10^{-8}$ och $2000 \cdot 10^{-8}$ meter. Det framgår av responskurvan på figur 23b att den inducerade spänningen i omvandlaren, vid en dämpningsgrad av 77%, vid det sistnämnda maximivärdet ej uppnår högre spänning än ca 0,05 volt. Det ligger således nära till hands att signalerna måste genomgå en förstärkning innan dessa kan tas emot av ett registreringsinstrument. Förstärkarens dynamik fås av följande samband

$$\text{dB} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (3,3-1)$$

och uttrycks alltid i decibel (dB), där V_1 och V_2 betecknar den ingående respektive utgående spänningen. En förstärkare med en dynamik av 60 dB motsvarar således en förstärkning av 1000 ggr, dvs. 0,001 volt förstärks till 1 volt.

De seismiska signalerna ställer på grund av det låga spännings- och frekvensområdet mycket höga krav på förstärkarens prestationer. Eftersom svängningarnas tidsförlopp är bestämmande för analyserna erfordras bästa möjliga frekvens och fasriktighet i förhållande till den ingående signalen. Använder man flera omvandlare samtidigt (synkronmätning) måste förstärkarna vara identiskt lika med varandra, vilket kräver elektroniska komponenter av särskilt hög kvalitet.

Filtrering tillämpas om man vill limitera frekvensområdet vid mottagandet av signalerna. Ett elektriskt filter (resonansfilter, bandpassfilter) innebär i regel en avsiktlig preparering av den ursprungliga signalen. Man eftersträvar således inte en förbättrad

återgivning av den ursprungliga signalen med ett filter, utan i stället vill man optimalt utnyttja filtersystemets överföringsfunktion för att förändra (preparera) signalen.

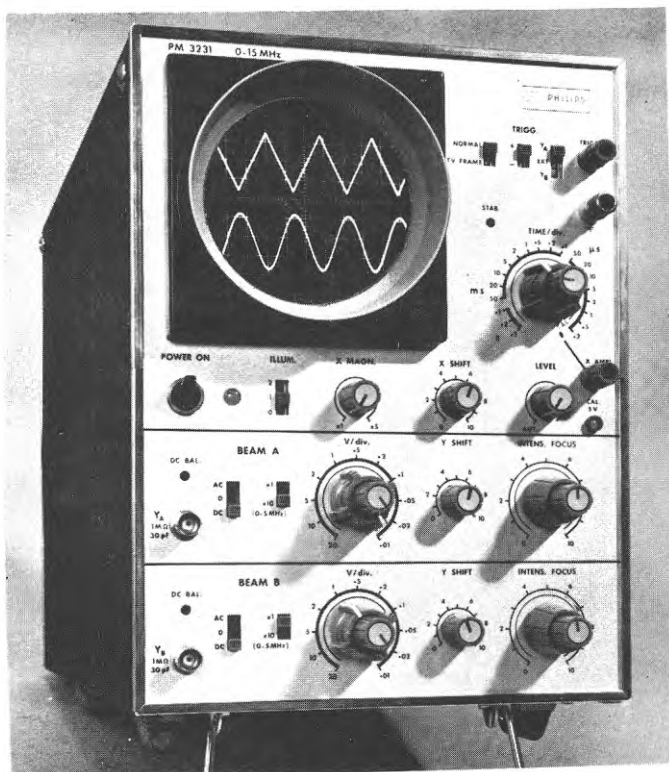
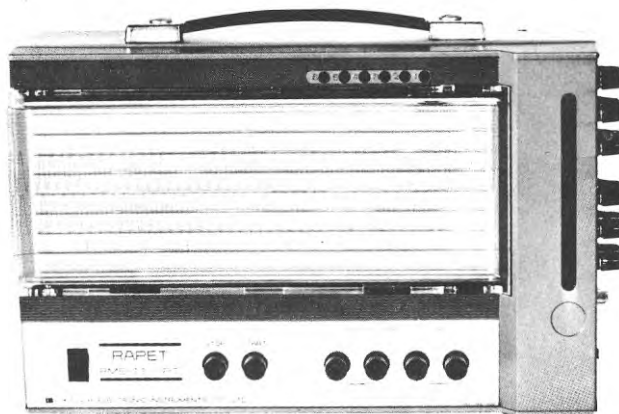
Vid fältundersökningarna inom detta projekt har vi använt en DC förförstärkare med en dynamik av 40 dB, utan någon som helst filtrering. Vår avsikt var just att infånga opreparerade signaler, lagra dem på magnetband, samt att kunna vid bearbetningen och analyserna alltid återgå till den ursprungliga signalen.

3.4 Registreringsinstrument.

För att lagra den avbildade mätsignalen erfordras ett registreringsinstrument. I princip kan tre olika typer särskiljas, nämligen oscilloskop, oscillograf och bandspelare.

a) Oscilloskop

Uppnår den omvandlade signalen en viss erforderlig styrka kan denna göras synlig med hjälp av ett katodstrålerör, oscilloskop. Om oscilloskopet även förses med en anordning för fotografering (t ex polaroid kamera) kan signalen registreras på film eller ljuskänsligt papper. Moderna digitala oscilloskop kan direkt kopplas till snabba och behändiga X Y skrivare (plotter) varmed fotograferingen blir helt onödig. Med oscilloskop har man dock begränsningar beträffande möjligheterna att registrera ett större antal förlopp samtidigt. De mest vanliga oscilloskopen har högst 2 kanaler (se figur 24).



Figur 24: Oscillograf med 6 + 1 kanaler och UV system av märket KYOWA.

Figur 25: Dubbelstråle-oscilloskop med signalfördröjning av märket PHILIPS.

b) Oscillograf

En oscillograf möjliggör en samtidig registrering för ett stort antal förlopp. Instrumentet består av en magnetbänk (galvanometerbänk) i vilken ett visst antal galvanometrarna är placerade (se figur 25). När galvanometrarnas spolar får elektriska signaler från repsektive omvandlare vrids spolaren i förhållande till det statiska magnetfältet direkt proportionellt mot signalens styrkegrad och tidsförlopp.

Galvanometrarna finns såväl för optisk som för mekanisk registrering. I det förstnämnda fallet förses det rörliga systemet med en spegel som kastar ljusstrålen tillbaka mot en ljuskänslig pappersremsa, på vilken signalerna blir avbildade. Tidsupplösningen för svängningsförloppet beror endast av pappersframmatningens hastighet. Mekaniska galvanometrarna är i regel så konstruerade, att det rörliga systemet är försett med en svängarm på vilken en penna eller nål monterats. Beroende på armens rörelsemöjligheter blir avbildningen behäftad med en tämligen störande förvrängning. Mekaniska galvanometrarna förekommer tämligen sällan hos de transportabla instrumenten.

Svängningarnas avbildning med oscilloskop eller oscillograf är mer lämpad för en manuell bearbetning. Databearbetning blir endast möjlig med hjälp av specialtillverkade linjeföljare, som omvandlar det analoga förloppet till koordinater, vilka sedan kan omredigeras till kompatibla indata. Proceduren är dock mycket tidskrävande och tämligen omständlig.

Databandspelare

Modern bearbetningsteknik fordrar ett sådant datainsamlingsystem som underlättar hanteringen och samtidigt ökar tillförlitligheten. Det är till stor fördel om informationerna vid bearbetningen ej är behäftade med sådana fel som oftast är oundvikliga vid manuella insatser. Genom att använda en databandspelare såsom datainsamlingsystem i fält, kan ovannämnt villkor uppfyllas i hög grad. Inspelade informationer bevaras orörda på bandet och flera av varandra oberoende analyser kan utföras.

En databandspelare skiljer sig inte i princip från en vanlig bandspelare, men desto större är skillnaden i detaljer och i prestation mellan dessa. En vanlig bandspelares frekvensöverföring är starkt begränsad och hela inspelnings- och avspelningssystemet använder sig av max. 2 kanaler samtidigt (stereoinspelning).

Databandspelaren har en mycket hög noggrannhet i frekvensöverföringen inom frekvensområdet 0-10000 Hz resp 0-30000 Hz, beroende på märke. Mätkanalernas antal hos den vanligaste typen varierar mellan 4-14 st. Varje kanal arbetar oberoende av varandra och magnetiseringen sker med en relativ högperiodisk bärfrekvens vilken moduleras med mätsignalen. Vid avspelningen sker en demodulering varefter mätsignalen återgivs vid utgången i original form. Under pågående inspelning kan samtidigt signalerna avspelas och studeras utan att inverka något på inspelningsproceduren. Det sistnämnda innebär att bearbetning och analys kan, om det önskas, hålla steg med inspelningen (exempelvis vid laboratorieförsök). Figur 26 visar en 4-kanalig databandspelare av märket Philips resp. en 14-kanalig databandspelare av märket Philips (figur 27).

Som ett komplement till databandspelaren kan något av de andra registreringsinstrumenten användas såsom ett kontrollsystem, med vilket mätsignalernas kvalitet direkt vid inspelningen kan kontrolleras.

Vid vårt forskningsarbete utnyttjades databandspelaren i stor utsträckning och den nya tekniken tycks ha fyllt en synnerligen viktig roll såväl vid fältförsöken som vid analysen.



Figur 26: Databandspelare med 4 kanaler och 2 bandhastigheter av typ PHILIPS Minilog 4.

Figur 27: Databandspelare med 14 kanaler och 4 bandhastigheter av typ PHILIPS Analog 14.

De flesta typer av databandspelare är även försedda med en s.k. talkanal, på vilken varje viktigt moment under inspelningen kan intalas. Vid återspelning lyssnar man sedan på de intalade kommentarerna, varigenom arbetet avsevärt underlättas.

De inspelade banden kan på grund av deras lämpliga mått och form lätt förvaras. Mätdata från ett mycket omfattande mätuppdrag kan arkiveras tillsammans med andra handlingar, exempelvis i en hängmapp. De förvarade banden får icke utsättas för kraftiga magnetiska störningar förorsakade t.ex. av elektriska maskiner, röntgenstrålning etc., varför vanliga arkivskåp av plåt är synnerligen lämpliga.

4 ANALYS AV MÄTSIGNALER

Avsikten med analys av mätsignaler är att reducera antalet data och bestämma vissa intressanta parametrar. Dynamiska grundundersökningar kan åsyfta bestämning av följande parametrar i undergrunden:

- a. Geometriska parametrar som t.ex. djup till berg, skiktning i jordtäcket m.m.
- b. Undergrundens geologiska uppbyggnad innebärande en identifikation av förekommande jordarter. Den geometriska bilden kompletterad med detta ger en fullständigare bild av undergrunden.
- c. Undergrundens beskaffenhet ur geoteknisk synpunkt, där man eftersträvar vissa bestämda hållfasthetstekniska parametrar, som t.ex. bergets sprickighet, E och G moduler.
- d. Inhomogenitet i naturliga jordlager (relativ blockhaltsförändring eller relativ blockfrekvens) och lagringstäthet i fyllnadsmassor (packningsgrad).
- e. Undergrundens dynamiska egenskaper med avseende på elastisk ledningsförmåga och frekvensförhållanden, t.ex. i samband med maskinfundamentering.

Analysen förutsätter att mätsignalen har registrerats med lämplig utrustning. Vid standardseismiska undersökningar registreras endast tidpunkten för först ankommande vågfront. Den analys som kan utföras blir mycket enkel och metoden är avsedd endast för bestämning av geometriska parametrar. Är hela sväningsförloppet registrerat t.ex. med bandspelare kan en avancerad analys utföras i syfte att erhålla även övriga parametrar. Den vanligaste analysmetoden är frekvensanalys. Genom filtrering av mätsignalen kan efter tolkning av frekvensfördelningen en seismisk våganalys utföras. Har synkron registrering i trekomponen-

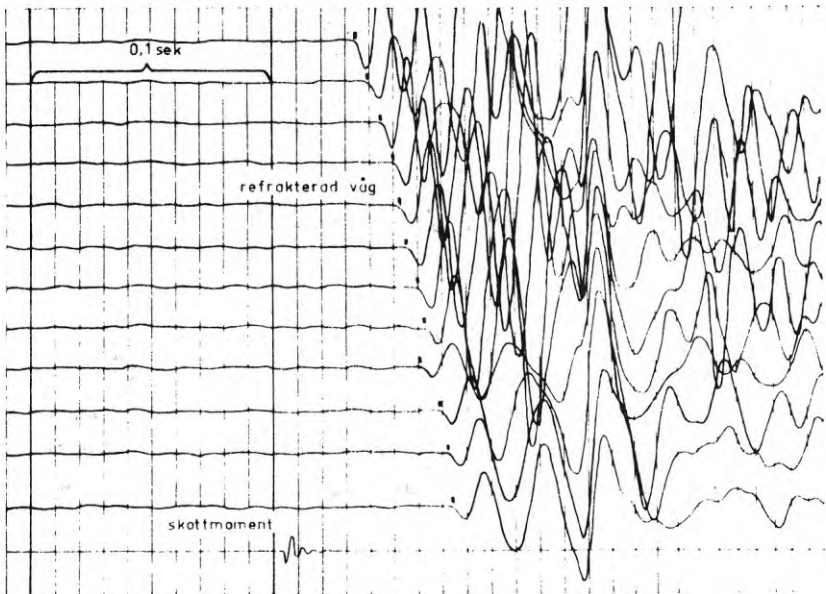
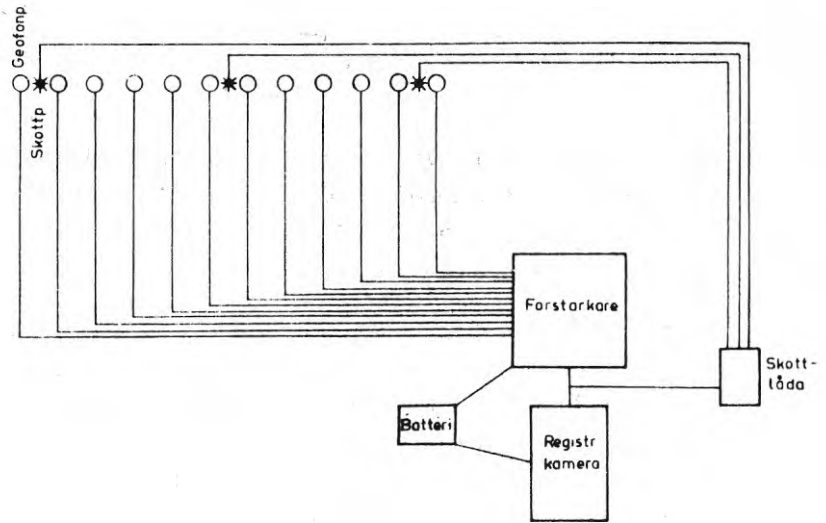
ter utförts kan analysen utföras i vektorform genom bland annat så kallad partikelrörelse. Dessa fyra analysmetoder beskrivs kortfattat nedan.

4.1 Standardseismik (geometrisk seismik)

Teorin bakom standardseismiken bygger på följande antaganden, som tidigare behandlats i kapitel 2.8.

1. Den första (primära) vågfronten måste alltid vara en longitudinell våg, eftersom dess fortplantningshastighet alltid är högre än den transversella vågens hastighet.
2. Den longitudinella vågens fortplantningshastighet antas öka successivt med djupet, men dock vara konstant i ett och samma skikt.
3. Eftersom såväl exciterings- som observationspunkterna är belägna i samma vertikalplan kan vågutbredningen hanteras som ett tvådimensionellt problem.
4. Vågutbredningen för den longitudinella vågen kan matematiskt behandlas analogt med optiken.

Figur 28 visar ett kopplingsschema över en 12 kanals standardseismisk utrustning. Figur 29 visar exempel på ett seismogram. Bearbetning av seismogrammet omfattar en tidmätning mellan skottmoment och första insatserna på respektive kanal. De markerade tiderna avläses och plottas sedan på ett millimeterpapper. De plottade punkternas sammanbindning ger gångtidskurvan ur vilken fortplantningshastigheterna bestäms. De geometriska parametrarna kan sedan beräknas ur brytpunkter i gångtidsdiagrammet.



Figur 28: Kopplingschema över en 12 kanals seismiska utrustning.

Figur 29: Seismogram registrerat med en 12 kanals seismisk oscillograf.

I tvåskikt-fallet bestäms djupet h ur formeln:

$$h = \frac{\bar{x}_B}{2} \sqrt{\frac{c_2 - c_1}{c_2 + c_1}} \quad (4,1-1)$$

där \bar{x}_B betecknar avståndet mellan exciteringspunkt och brytpunktens projektion på X-axeln i koordinat-systemet samt c_1 och c_2 är fortplantningshastigheten i resp. skikt.

Vid praktisk tillämpning förekommer sällan en idealist tvåskikt-lagring utan tolkning av gångtidsdiagram kräver stor erfarenhet. Vid t.ex. lutande gränsvyta (se figur 30) erhålls olika värden för c_2 beroende på om utbredningen sker i motlut eller medlut. De respektive kritiska vinklarna blir följande:

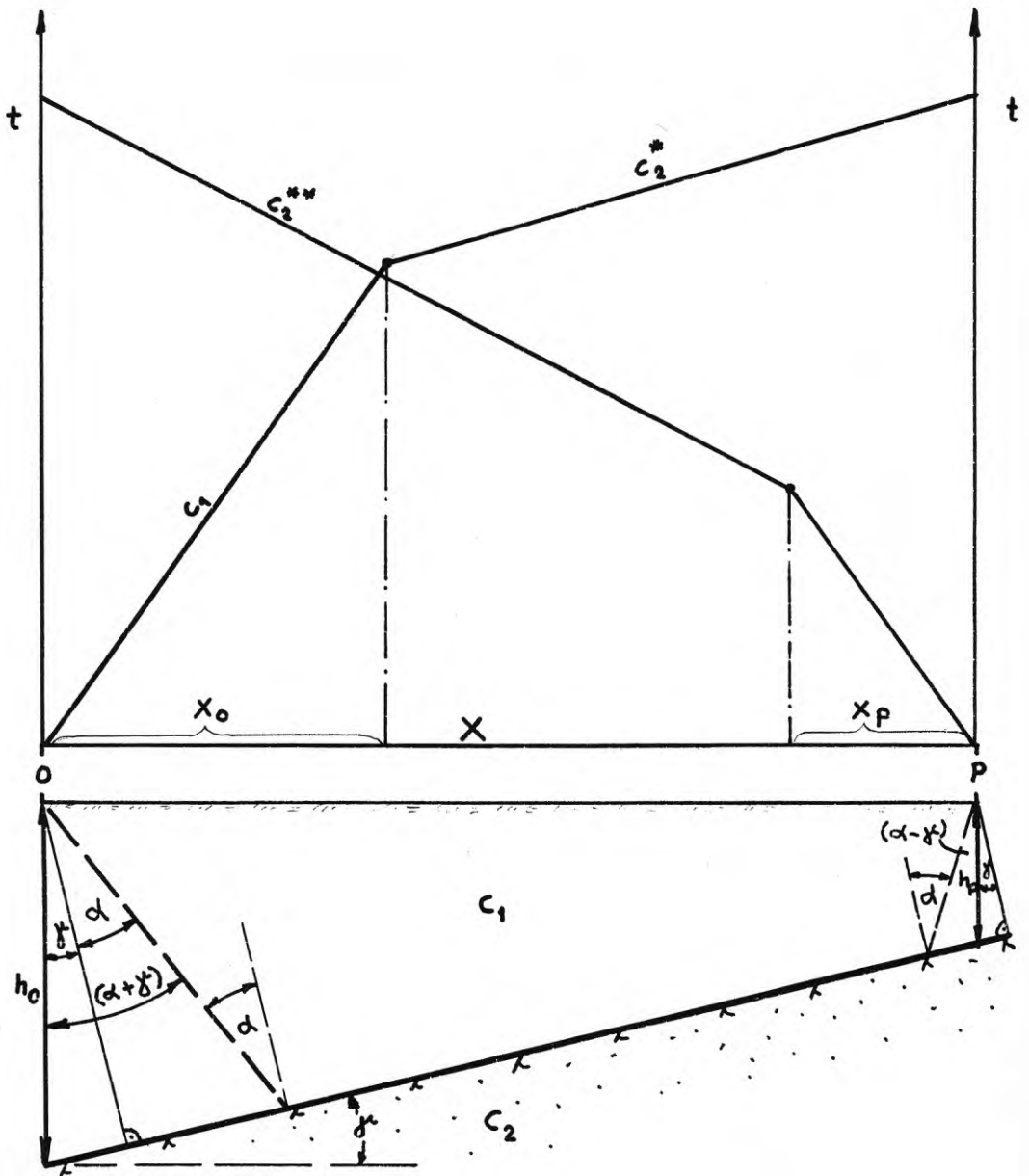
$$\alpha - \gamma^* = \arcsin \frac{c_1}{c_2^*} \quad (4,1-2)$$

och

$$\alpha + \gamma^* = \arcsin \frac{c_1}{c_2^{**}} \quad (4,1-3)$$

där γ^* betecknar gränsvytans lutningsvinkel i förhållande till horisontalplanet medan c_2^* och c_2^{**} betecknar de på gångtidskurvan erhållna skenbara hastigheterna kan såväl den kritiska vinkeln α som lutningsvinkeln γ^* beräknas. Det riktiga värdet för c_2 erhålls sedan ur sambandet

$$c_2 = \frac{c_1}{\sin \alpha} \quad (4,1-4)$$



Figur 30: Refrekerade vågor vid lutande gränsyta.

Djupet till gränsytan i exciteringspunkterna O och P kan bestämmas enligt följande formler

$$h_0 = x_0 \frac{1 - \sin(\alpha - \gamma)}{2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma} \quad (4,1-5)$$

och

$$h_p = x_p \frac{1 - \sin(\alpha + \gamma)}{2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma} \quad (4,1-6)$$

där x_0 och x_p betecknar avstånden mellan exciteringspunkt och brytningspunktens projektion på X-axeln.

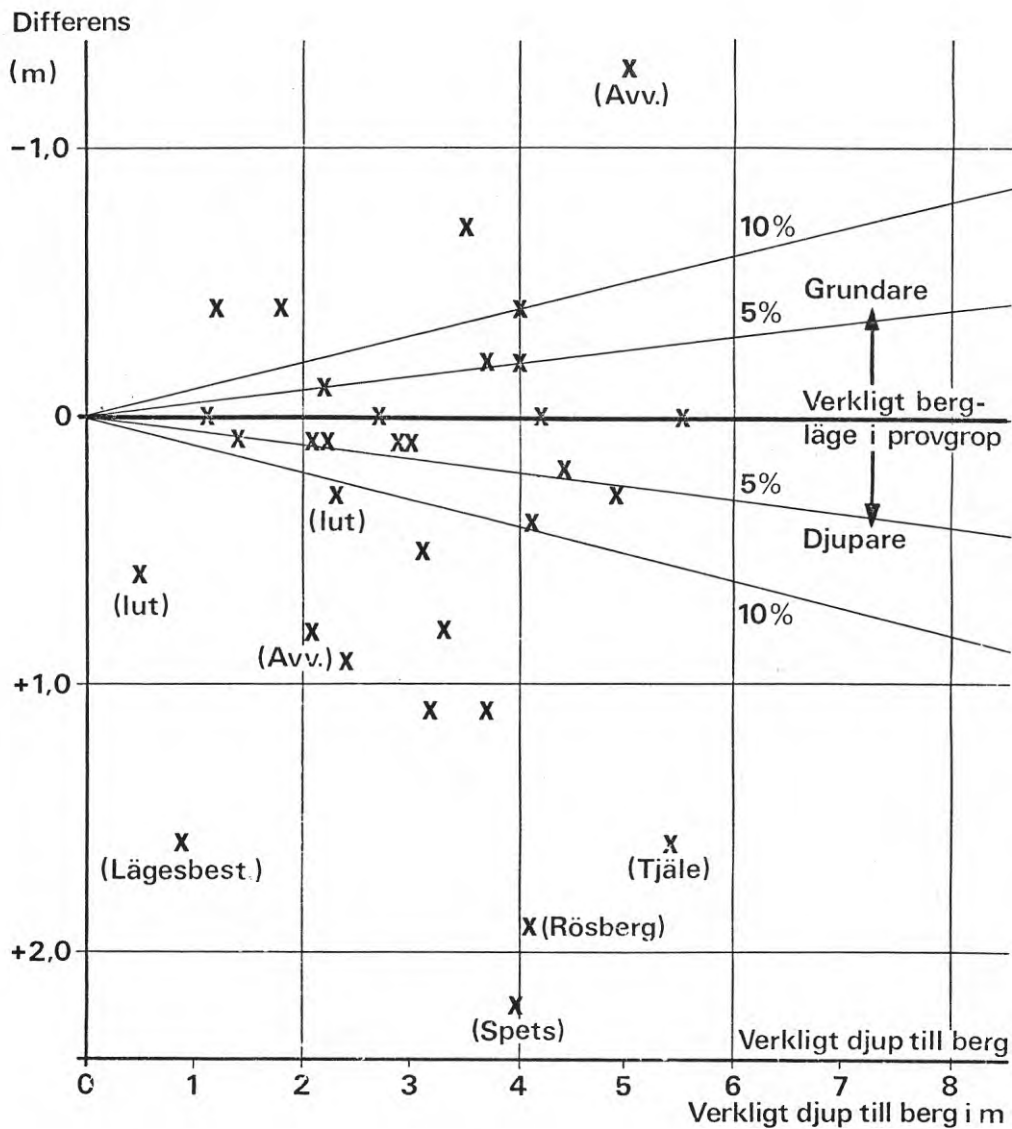
Genom att tillämpa den optiska brytningslagen kan problemet lösas även för ett godtyckligt antal skiktgränser, fast formlerna blir mer och mer invecklade. Upprättande av lämpliga dataprogram är tämligen enkelt så länge gränsytorna kan antas vara raka linjer, men det blir desto svårare vid böjda gränslinjer.

De ur gångtidsdiagrammen erhållna fortplantningshastigheterna kan tämligen ofta ligga till grund för en bedömning angående det undersökta mediets geologiska beskaffenhet och vid speciella omständigheter även angående vissa lokala förändringar hos mediet ur hållfasthetssynpunkt. Den sistnämnda bedömningen görs t. ex. för berggrunden i vilken fortplantningshastigheten minskar avsevärt i sådana avsnitt, där berget är sprucket eller krossat.

Beträffande standardseismikens tillförlitlighet vid bestämning av bergläge och samband mellan fortplantningshastighet hänvisas till Vägverkets "utredning angående seismiska undersökningar vid vägprojektering" (Rapport TV 113 och TV 127) där undertecknad aktivt deltagit.

I figur 31 visas tillförlitligheten i berglägesbestämning enligt nämnda rapport. Av figuren framgår att bergläget vid grunda djup (6m) normalt bestäms med minst 10% noggrannhet, men att större avvikelser kan förekomma.

SEISMISKT REDOVISAT BERGLÄGE (jämförd med bergläge i provgrop)



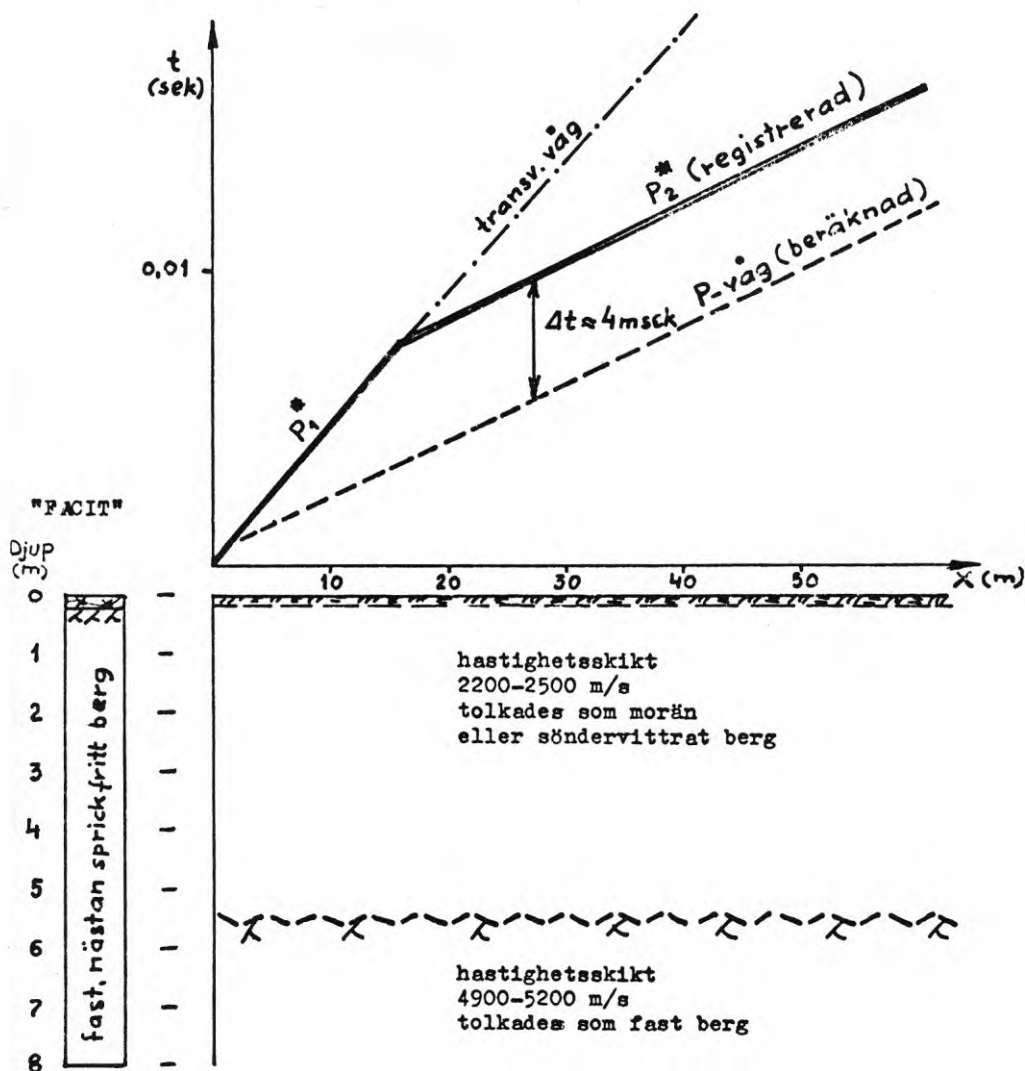
Figur 31: Standardseismikens tillförlitlighet
(utdrag ur VV-rapport TV 127)

I figur 32 visas ett exempel på standardseismikens "fallgropar" under vissa speciella omständigheter. Den aktuella seismiska mätningen har ägt rum i Stockholmstrakten. Med den vedertagna analysen har erhållits det resultat som redovisas under gångtidsdiagrammet. Kontrollborrningen visade emellertid exceptionellt dålig överensstämmelse mellan seismik och facit. Den mest sannolika förklaringen för detta fall är följande:

Mätningen vid standardseismik utförs med geofoner som registrerar endast den vertikala komponenten. Den longitudinella vågen registrerades ej i de närmast liggande geofonerna och med en förlust av den första halva perioden i övriga geofoner. Hastigheten 2200-2500 m/s kan således inte tillhöra en longitudinell våg, utan måste representera en ytvåg i berget, som har huvudkaraktären av en transversell våg. Frekvensen för den longitudinella vågen i bergytan har beräknats till 120 Hz. Halva perioden uppgår till omkring 0.0004 sek. En korrigering med denna tidsintervall ger en seismisk bild som överensstämmer helt med facit.

Standardseismikens ovan beskrivna svårigheter beror till större del av att de villkor som teorin grundar sig på bara delvis uppfylls i verkligheten. Vid svenska geologiska förhållanden kan avvikelser från idealiska förhållanden ibland vara så stora att en övergång till tredimensionella system, både vid mätning och analys, tycks bli nödvändig. Beträffande mätsystemet kan exempelvis en del andra geometriska system än den vedertagna seismiska linjen ge bättre underlag för beräkning av de geometriska parametrarna vid lutande och/eller böjda gränssytor. I och med att mätsystemet förändras måste naturligtvis även analyser och beräkningsmetoder få en annan utformning.

GÅNGTIDSDIAGRAM



Förklaring: Enligt "facit" är berget överlagrat endast av ett tunnt lager bestående av torvmossa. Kopplingen mellan geofon och jord kan ha varit så dålig, att P-vågens första $\frac{1}{2}$ eller $\frac{3}{4}$ period har ej uppmärksamats på registreringen i Z-komponent. Genom att tillämpa tredimensionell registrering och våganalyser, kan en feltolkning av ovanstående typ inte förekomma.

Figur 32: Felaktig seismisk tolkning (exempel)

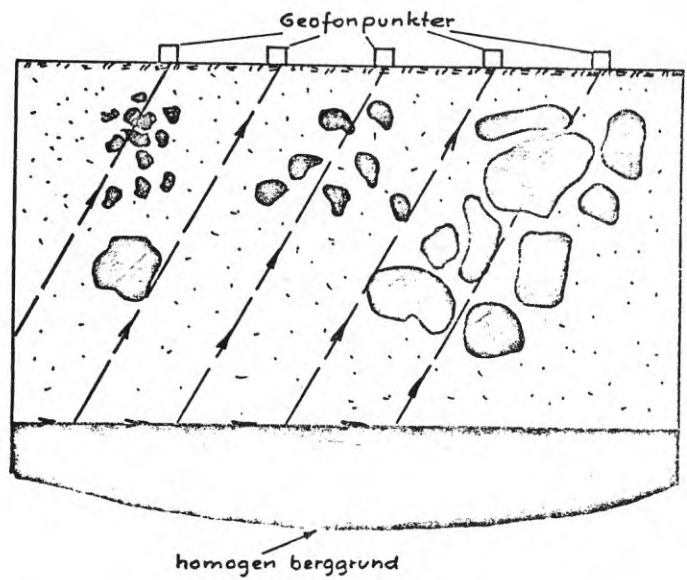
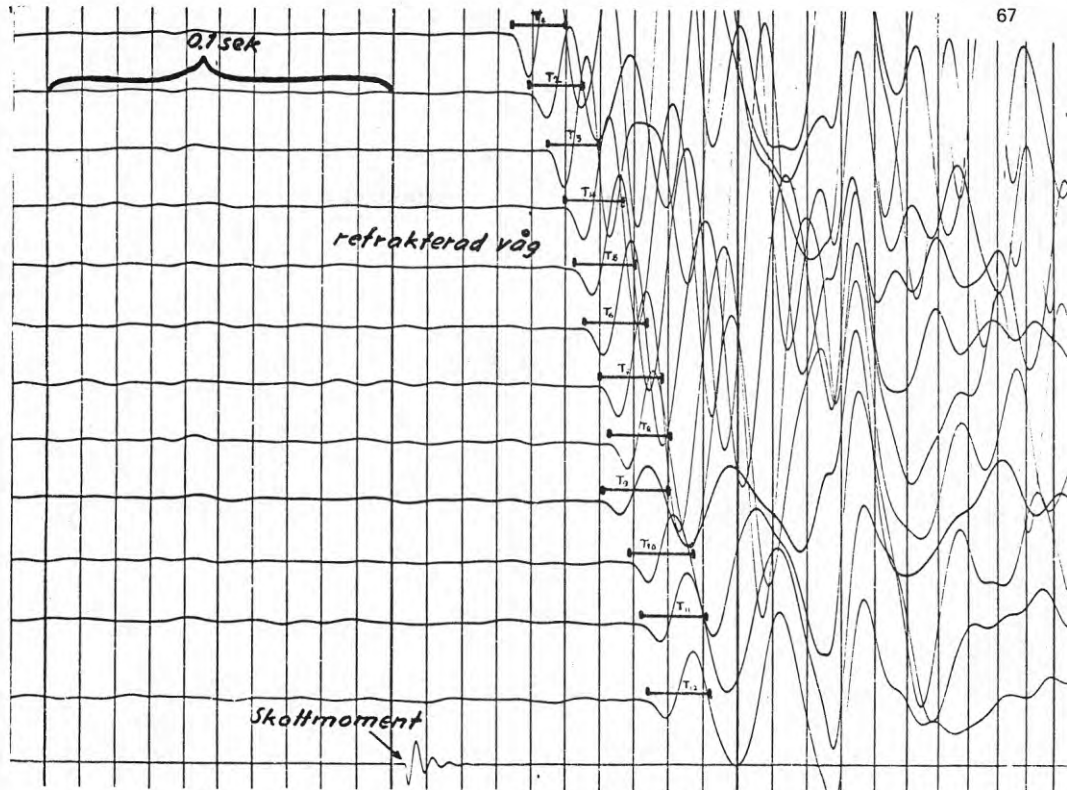
4.2 Frekvensanalys

Denna analysmetod innebär att svängningsförloppet, antingen det hela eller delar därav, blir föremål för en undersökning beträffande dess frekvensinnehåll. För en enkel harmonisk svängning blir bestämningen av frekvensen relativt enkel (se kapitel 2.5). Vibrationerna i undergrunden innehåller dock ett större antal frekvenser som är lagrade över varandra. Ibland kan frekvensen för en kraftig våg bestämmas med en enkel manuell metod. Manuell frekvensanalys kan exempelvis tillämpas för svängningar som följer de första insatserna på seismogrammet, eftersom dessa i regel består av en väldefinierad våg. På figur 33 visas ett seismogram på vilket P-vågens första period är markerad på samtliga 12 kanaler.

Är den studerade vågen en refrakterad våg och gränssytan uppfyller de villkor som gäller för idealiska förhållanden måste varje relativ frekvensförändring mellan mätpunkter härröra från lokala inhomogeniteter i skiktet ovanför gränssytan (se figur 34). Denna metod har blivit föremål för en omfattande undersökning vars slutsatser presenteras i kapitel 5.3.

Vid ett större antal överlagrade frekvenser kan en manuell utvärdering ej ge tillfredsställande resultat. Bestämningen av frekvensinnehållet måste för sådana invecklade svängningsförlopp ske med hjälp av en s.k. harmonisk analys, även kallad Fourier-analys.

Ett tidsförlopp med funktionen $F(t)$ är periodisk om den repeterar sig själv med en fundamental period ω . Funktionen kan matematiskt beskrivas i intervallet från $-\infty$ till $+\infty$ genom en serie av harmoniska funktioner. Perioderna hos dessa funktioner är multiplar av den fundamentala perioden ω .



Figur 33: Manuell frekvensanalys. Bestämning av P-vågens 1:a periodlängd (T) på seismogram.

Figur 34: Principen hur lokal inhomogenitet i jorden kan inverka på den refrakt. P-vågens frekvens.

Fourierserien kan skrivas på följande sätt:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4,2-1)$$

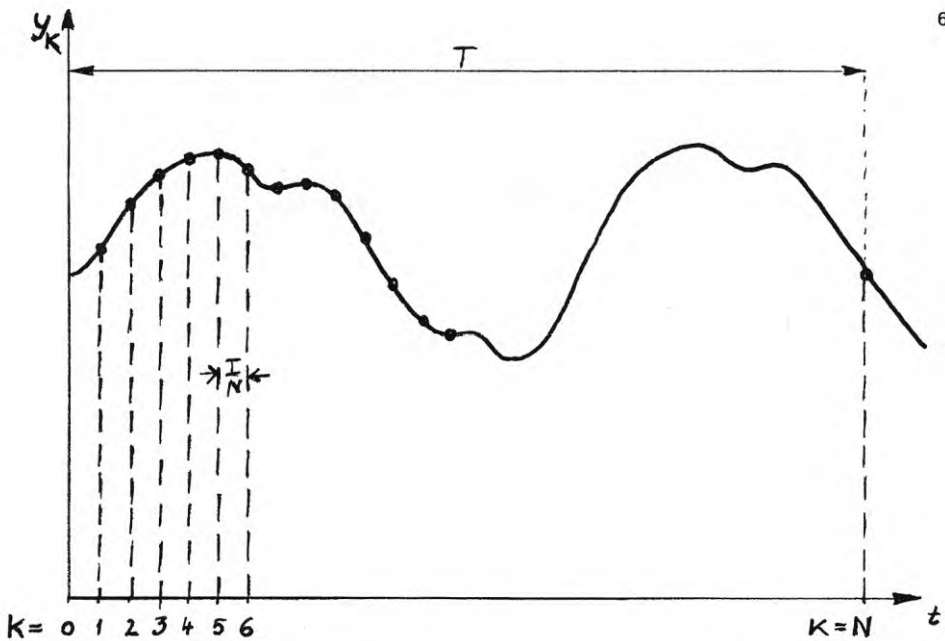
där a_0 , a_n och b_n betecknar de s.k. Fourier koefficienterna.

Serien kallas även harmonisk analyskvation och gäller enbart för infinita funktioner, dvs. för stationära svängningar. Vibrationer med längre varaktighet kan oftast betraktas vara infinita funktioner. Harmonisk analys sker enbart på utvalda delar vid sådana svängningar och frekvensområdet kontra det utvalda tidsintervallet (T) avgör hur funktionen bör hanteras.

Om $F(t)$ är okänd måste man först bestämma Fourier koefficienterna och sedan approximera $F(t)$ med hjälp av minsta kvadratmetoden. Fourier koefficienterna a_0 , a_n och b_n kan erhållas ur Bessels formel på följande sätt

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= F(t) \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k \cdot \cos K_n \frac{2\pi}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k \cdot \sin K_n \frac{2\pi}{N} \end{aligned} \right\} \quad (4,2-2)$$

där $n = 1, 2, 3, \dots, N$, medan beträffande definition av N , K och Y_K hänvisas till fig. 35



Figur 35: Fourieranalys. Parametrar som användes för beräkning av Fourier koefficienterna a_n och b_n .

Med hjälp av dator kan bestämning av Fourier koefficienterna ske mycket snabbt. Beräkningsprocedurerna sker tämligen smidigt med de s.k. FFT (Fast Fourier Transform) programmen. Indata för dessa databeräkningar kan vara lagrade på hållremsa, hållkort, skivminne eller magnetband. Om mätsignalerna är registrerade i analogform (vibrogram, seismogram) måste förloppen först omvandlas till xy koordinater (digitalisering) med hjälp av en linjeföljare (pencil follower). Koordinaterna kan sedan omredigeras med hjälp av ett särskilt dataprogram till kompatibla indata. Mätdata som är inspelade på bandspelare kan på de modernaste datorerna matas in direkt i datamaskinen, på grund av att dessa är utrustade med "hard ware" program för digitalisering och omredigering.

Svängningsförlopp med mycket kort varaktighet (t.ex. stötimpuls i jorden) är emellertid en finit funktion vilket innebär att den ej repeterar sig själv utan har bara ett bestämt värde inom ett visst tidsinter-

vall. Fourierserien för transienta svängningsförlopp måste därför ersättas med en Fourier integral som har följande form:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \cdot e^{i\omega t} \cdot d\omega \quad (4.2-3)$$

där

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt \quad (4.2-4)$$

och

$$e^{\pm i\omega t} = \cos \omega t \pm i \sin \omega t \quad (4.2-5)$$

Proceduren blir egentligen en transformation från tidsdomänen till frekvensdomänen. Ekvationerna (4 · 2 - 3) och (4 · 2 - 4) kallas därför Fourier-transformation.

Vid Fourier-analysen erhålls spektralamplituden A och spektralfasen φ i funktion av frekvensen. Redovisningen sker lämpligen i form av uppritade spektraldiagram, som även kallas Fourier-spektrum. Spektralamplituden fås ur följande samband:

$$A(n\omega) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.2-6)$$

medan spektralfasen erhålls ur sambandet

$$\varphi(n\omega) = \arctg \frac{b_n}{a_n} \quad (4.2-7)$$

där a_n och b_n betecknar de ovan definierade Fourierkoefficienterna.

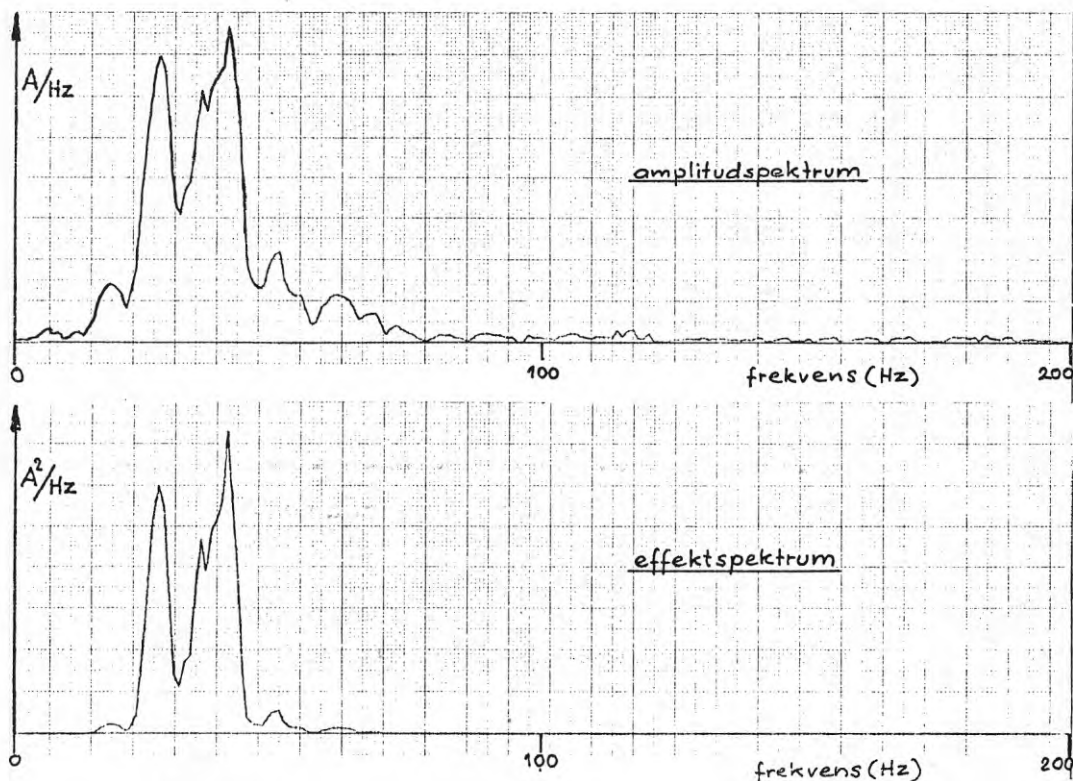
Amplituden kan anges på olika sätt, dels enligt (4.2-6) och dels i kvadratisk form (Power spectrum)

enligt:

$$A^2(n\omega) = a_n^2 + b_n^2 \quad (4.2-8)$$

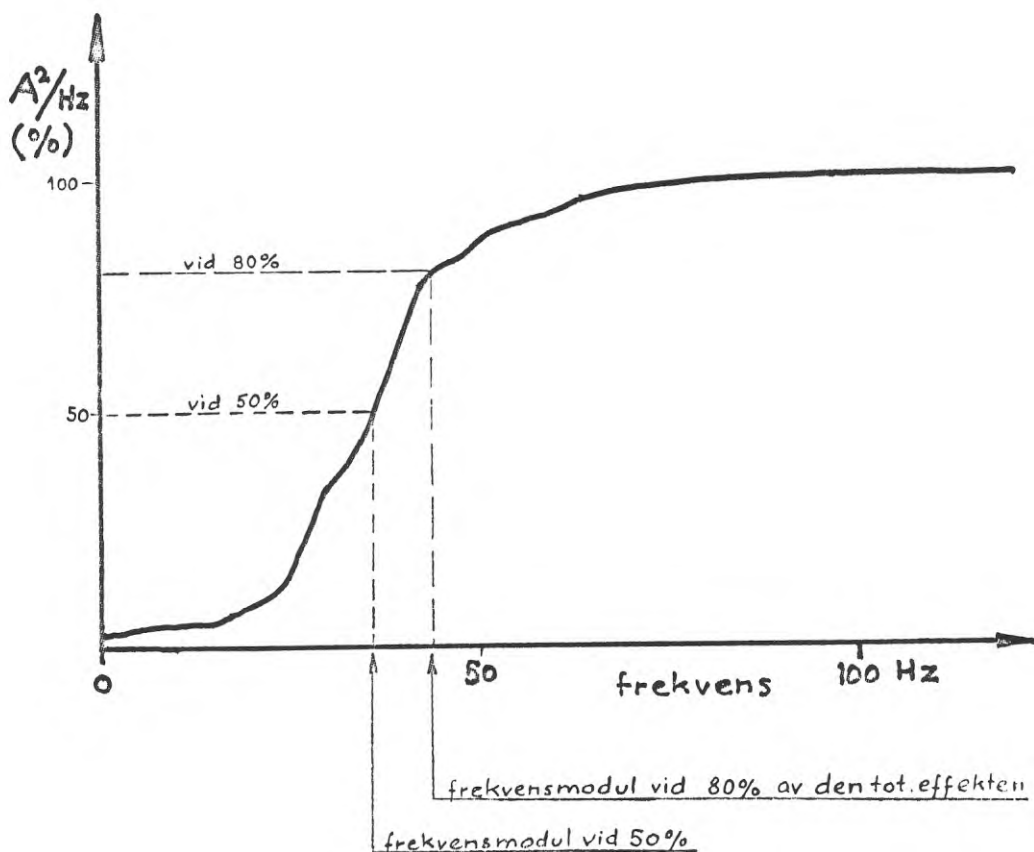
Figur 36 visas spektralbilden för ett stötförlopp i morän med olika presentation för amplituden som kallas amplitudspektrum (A) respektive effektspektrum (A²). Som framgår av figuren förändras spektralbilden i effektspektrumet till de dominerande amplitudernas fördel.

Spektralbilderna utgör ett utmärkt underlag för att kunna ställa säkra "diagnoser" beträffande undergrundens dynamiska beteende. Varje diagnostisk bedömning kräver emellertid mycket gedigna kunskaper och erfarenheter inom detta område.



Figur 36: Fourieranalys. Redovisning.

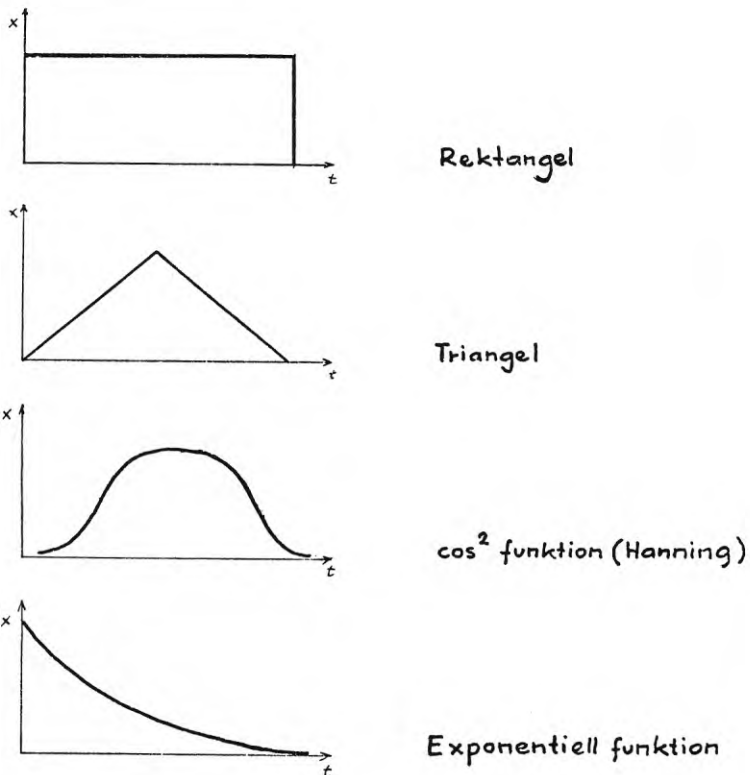
Genom att integrera spektralamplituderna kan s.k. summadiagram enligt figur 37 erhållas. Summadiagrammets utseende är helt beroende av spektralbilden, d.v.s. om spektralbilderna i två olika mätpunkter visar avvikande frekvensinnehåll, förändras även summadiagrammets form. Om den totala summan för amplituden sätt lik med 100% kan vid olika procentnivåer s.k. frekvensmoduler erhållas som kan vara karakteriserande för materialets sammansättning och inhomogenitet.



Figur 37: Fourieranalys. Effektspektrum efter integrering.

En av grundförutsättningarna för att spektralbilden skall kunna återge de verkliga förhållandena är att tidsfönstrets (time window) längd och form anpassas till svängningsförloppets utseende. Vid stationära svängningar, då endast ett visst tidsintervall blir föremål för harmonisk analys, bör tidsfönstret anpassas till den ovannämnda fundamentala perioden

Tidsfönstrets form för stationära svängningar brukar i regel vara rektangulär. Om det utvalda avsnittets utseende motiverar kan emellertid andra typer av tidsfönster komma i fråga. Vid transienta svängningsförlopp ger ett rektangulärt tidsfönster sällan tillfredsställande resultat. I figur 38 visas några aktuella former för tidsfönster vid Fourier analys.



Figur 38: Fourieranalys. Olika tidsfönster.

Det andra viktiga momentet vid val av tidsfönster är samplingstätheten vid digitaliseringen. Samplingsintervall Δt bestämmer den maximala frekvensen vid analysen

$$F_{\max} = \frac{1}{2 \Delta t} \quad (4.2-9)$$

Frekvensupplösningen (Δf) i spektrabilden blir

$$\Delta f = \frac{2 \cdot F_{\max}}{N} \quad (4.2-10)$$

där $N = \frac{T}{\Delta t}$ och T betecknar tidsfönstrets längd i tidsdomänen uttryckt i sekunder. Därav följer att

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (4.2-11)$$

vilket utgör den fundamentala lagen vid harmoniska analyser.

Inom detta forskningsprojekt har frekvensanalysen utgjort det värdefullaste grundmaterialet för studium av undergrundens dynamiska beteenden. En detaljerad redovisning av resultaten presenteras i kapitel 5.3. Här sammanfattas de viktigaste funktioner som frekvensanalysen fyller vid dynamiska problem i undergrunden.

1. En dynamisk kraft (last) definieras med maximiamplitud och frekvens, dvs. storlek och tidsförlopp. Dessa två parametrar erhålles ur ett frekvensspektrum.
2. Varje skikt i undergrunden representerar ett svängningssystem med en viss överföringsfunktion. Inom ett visst frekvensområde (jfr t.ex. med ett enkelt resonansfilter) uppträder en s.k. aktiv zon, där energitransmissionen sker med minsta relativa förluster. En dynamisk last vars frekvens ligger inom den aktiva zonen medför att

jordskiktet bringas i svängning. Denna effekt eftersträvas exempelvis vid packning, medan den vid maskinfundamentering kan innebära i det närmaste en katastrof. Vid båda ovannämnda fall har en framtagen frekvensspektrumbild i undergrunden en mycket stor betydelse.

3. En stötimpuls, t. ex. i markytan, ger upphov till en spänningsfördelning varvid olika vågtyper alstras och utbreder sig i undergrunden. Det registrerade svängningsförloppet, som är ett transient förlopp, innehåller de olika vågorna överlagrade på varandra. De olika vågtyperna har olika frekvensinnehåll och ett frekvensspektra kan användas som underlag för fortsatt analys avseende vågidentifikation.

4.3 Seismisk signalanalys. Våganalys

Vågutbredningen är väsentlig för förståelsen av undergrundens dynamiska beteende. Som framgår av kapitel 2.2 och 2.4 sker utbredningen av rymdvågor (kompressionsvåg och skjuvvåg) med en hastighet som är direkt proportionell mot elasticitetsmodulen E respektive skjuvmodulen G.

Dynamisk G-modul bestäms ur formeln

$$G_{dyn} = c_s^2 \frac{\gamma^*}{g} \quad (4,3-1)$$

där γ^* betecknar volymvikten och c_s skjuvvågens fortplantningshastighet, medan g = tyngdpunktens acceleration. Med hjälp av den longitudinella vågens hastighet c_p erhålles kontraktionstalet ν enligt följande samband

$$\nu = \frac{c_p^2 - 2 \cdot c_s^2}{2(c_p^2 - c_s^2)} \quad (4,3-2)$$

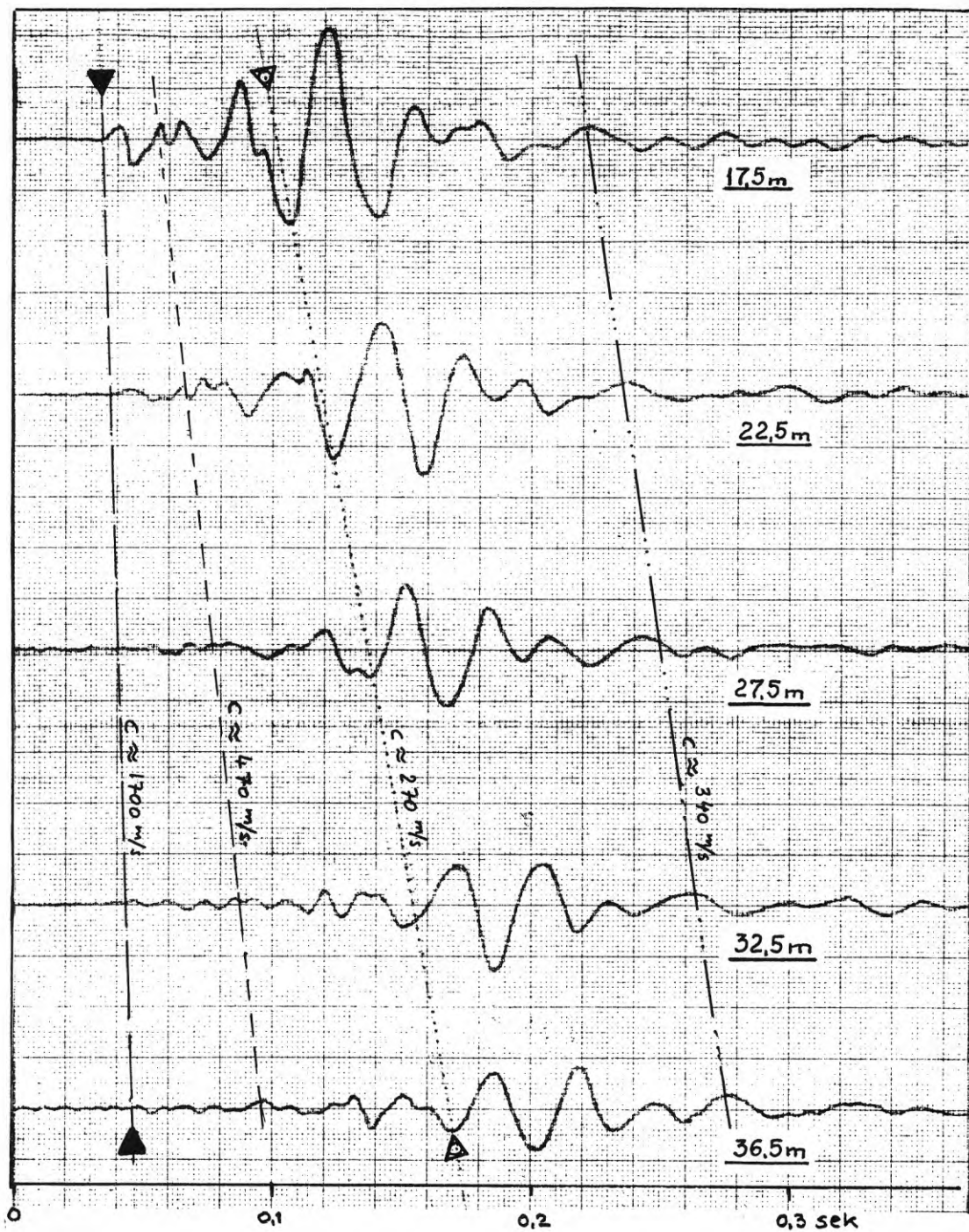
och den dynamiska E modulen fås ur sambandet

$$E_{dyn} = 2 \cdot G_{dyn} (1 + \nu) \quad (4,3-3)$$

Bestämning av fortplantningshastigheterna för de olika vågorna är således av största intresse. I den av olika vågor sammansatta seismiska signalen uppträder ett fåtal vågor som direkt, vid första anblicken, kan identifieras och utan preparering hanteras. I fig. 39 visas ett exempel på fem seismiska signaler, härrörande från en och samma excitering, på olika avstånd från exciteringspunkten. De indragna linjerna representerar en preliminär tolkning gällande för de avsnitt där svängningsförloppet innehåller signifikanta förändringar som kan spåras på de samtliga fem kanalerna. Med hjälp av den preliminära tolkningen kan fortplantningshastigheterna uppskattas. Vid detta framtagna exempel kan två av de tolkade linjerna anses vara väldefinierbara vågor (markerade med kraftiga pilar). Den första markerade linjen ($C \approx 1700$ m/s) motsvarar en refrakterad p-våg medan den andra linjen ($C \approx 270$ m/s) representerar en karakteristisk ytvåg som fortplantar sig längs markytan.

Beroende på målsättningen med undersökningar kan den preliminära tolkningen antingen accepteras som slutgiltigt delresultat eller ligga till grund för vidare analys. Varje form av därefter följande analys blir mer eller mindre en preparering av de ursprungliga signalerna.

Den mest vanliga metoden för vidare analys av signalerna består i regel av ett begränsat antal filtreringar med olika bandpassinställningar. Filtringen kan ske såväl i analog form som i digital form med hjälp av dator. Ju bättre filtren är (stor branshet) desto lättare får man oönskade sidoeffekter vid filtreringen. För att belysa detta problem har vi låtit



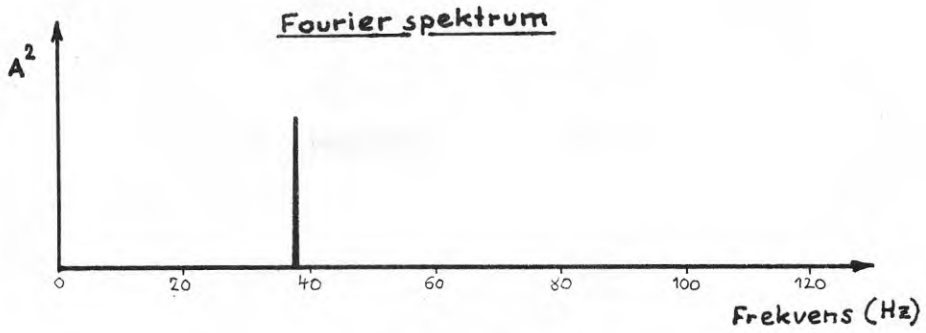
Figur 39: Exempel på några dominerande vågor.

en sinus signal passera ett antal bandpassinställningar. Signalens Fourier-spektrum samt de med olika bandpassinställningarna erhållna resultaten redovisas på fig. 40.

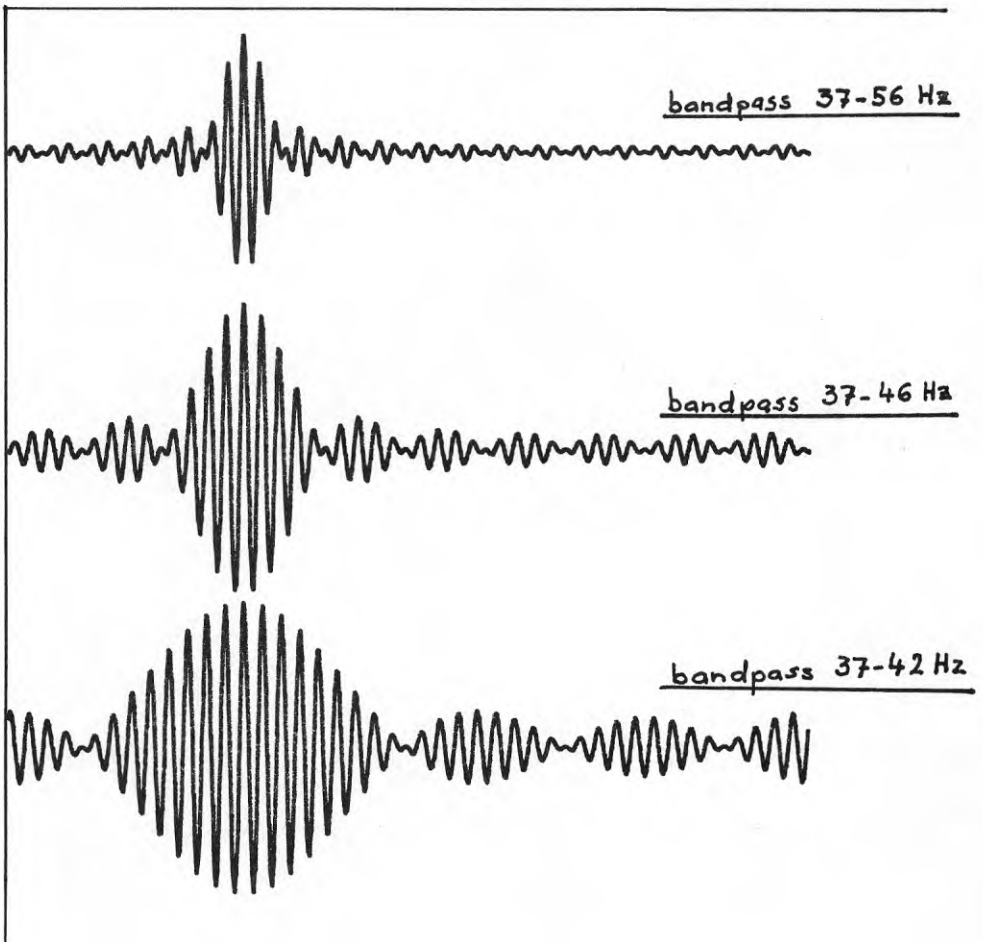
Som framgår av figuren är det synnerligen viktigt att välja bandpassinställningen med omsorg och att helst använda frekvensspektrumbilder som underlag vid programmeringen. Även tolkningen av de preparerade förloppen fordrar kunskaper och erfarenheter inom detta område.

I figurerna 41-46 visas filtreringsproceduren med riktiga signaler, som spelades in på en Philips Analog 14 databandspelare i samband med fältförsök på riksväg 48 vid Skövde. Signalerna, som redovisas på fig. 41 hör rör från en trekomponents geofon. Komponent X betecknar den horisontella mätriktningen parallellt med väglinjen och komponent Y motsvarar en horisontell mätriktning vinkelrätt mot väglinjen och komponent Z betecknar den vertikala mätriktningen. Signalerna är som synes sammansatta av ett större antal olika vågor representerade med olika amplituder och frekvenser. Analys av dylika komplicerade signaler kräver naturligtvis en mera avancerad signalanalys än vad som erhålls med en manuell metod.

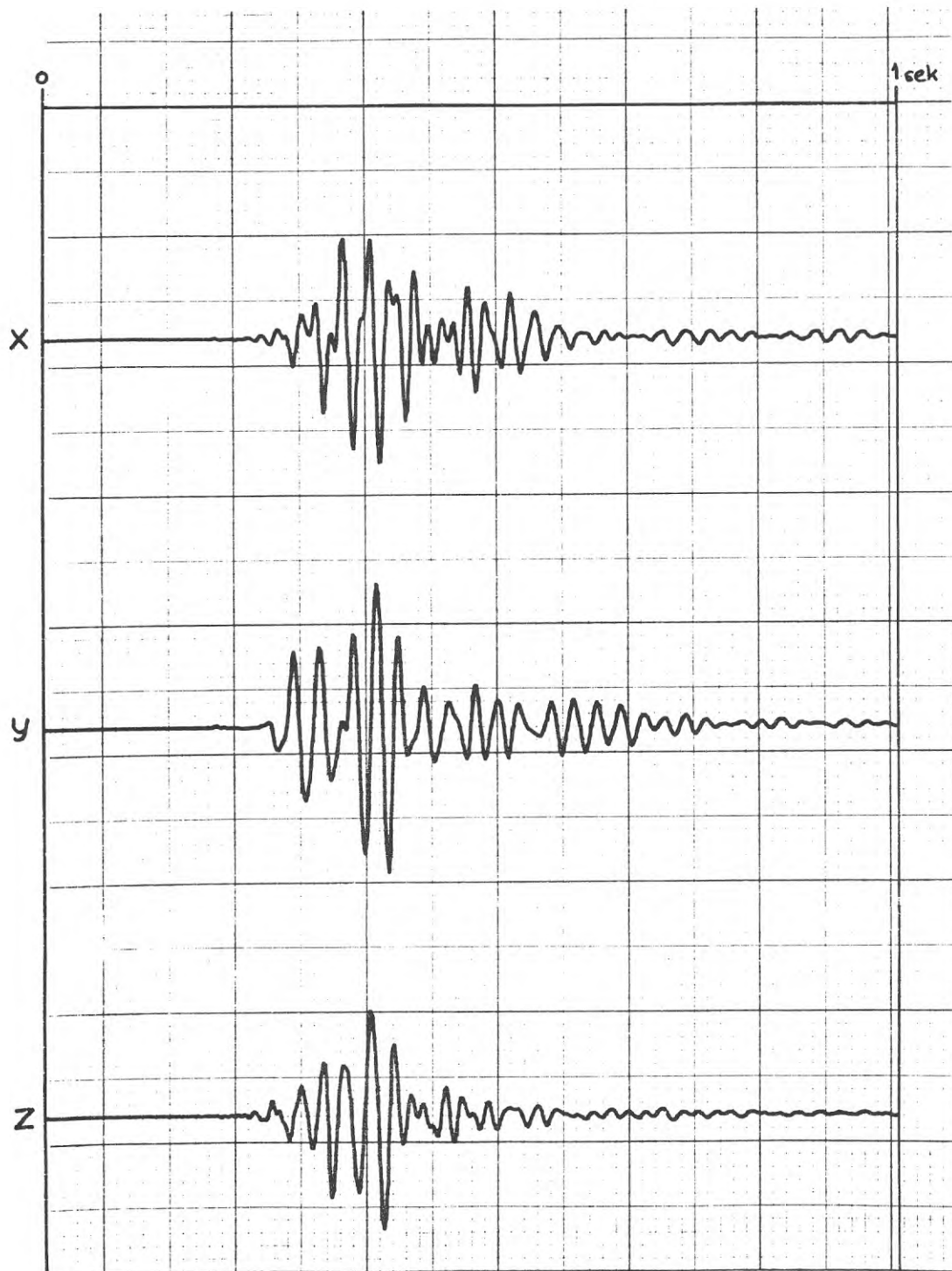
Signalerna underkastades först en FFT-analys på en datoranläggning av typ HP 21 00 A som även var försedd med en Fourier-analysator av typ HP 5451 A/5466 A. Frekvensspektrumbilderna redovisas på fig. 42. I figurerna 43-46 visas de preparerade förloppen med bandpassinställningar 28 - 38 Hz, 45 - 53 Hz, 68 - 90 Hz samt även med bandpassinställningen 90 - 120 Hz. Resultaten talar för sig själv och ger ett överskådligt exempel på denna teknikens stora betydelse vid avancerad seismisk signalanalys. Samma teknik bör komma till användning även vid bullerproblem, vibrationsproblem samt vid byggnadstekniska analyser.



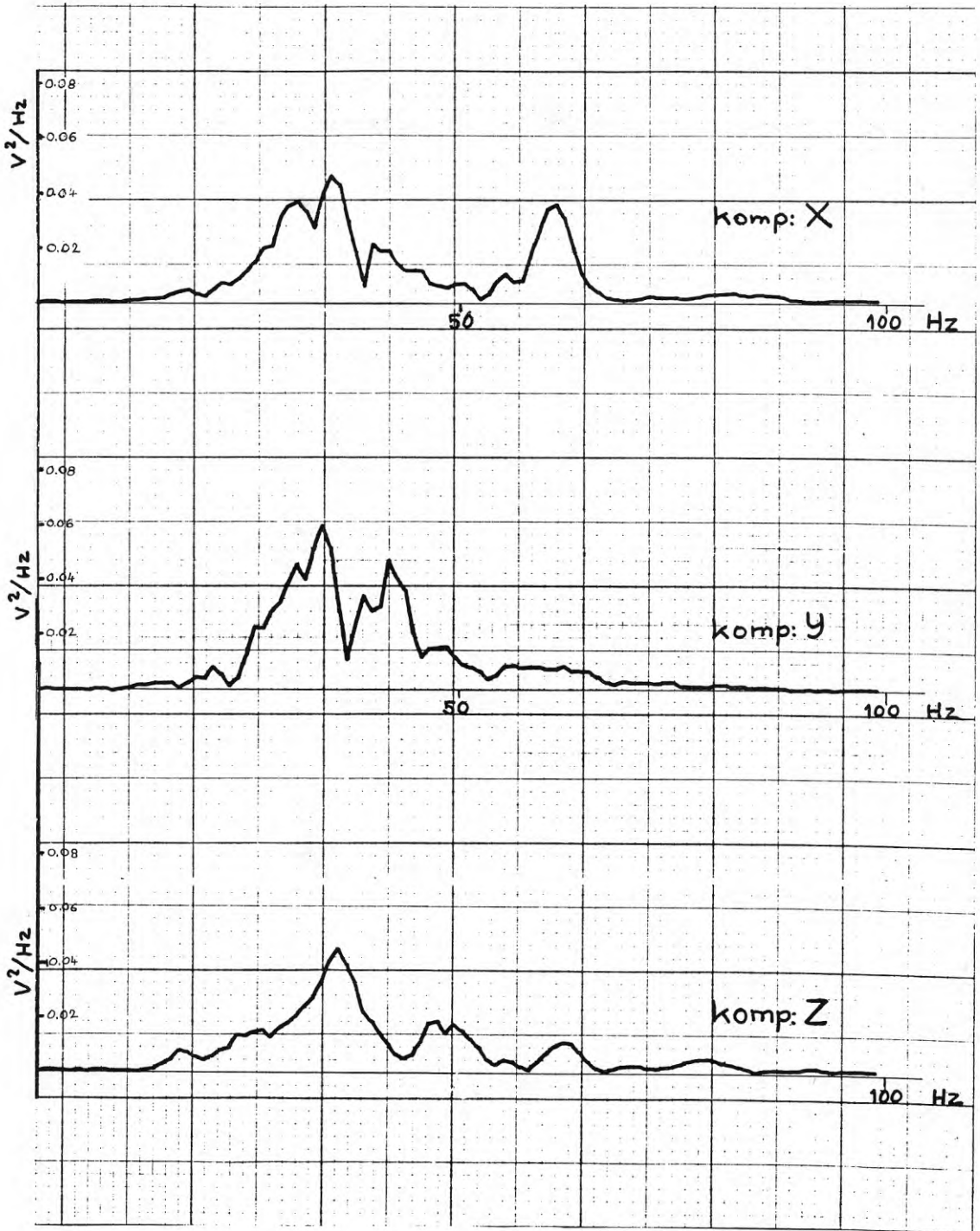
Tidsförlopp vid olika digit. bandpass.



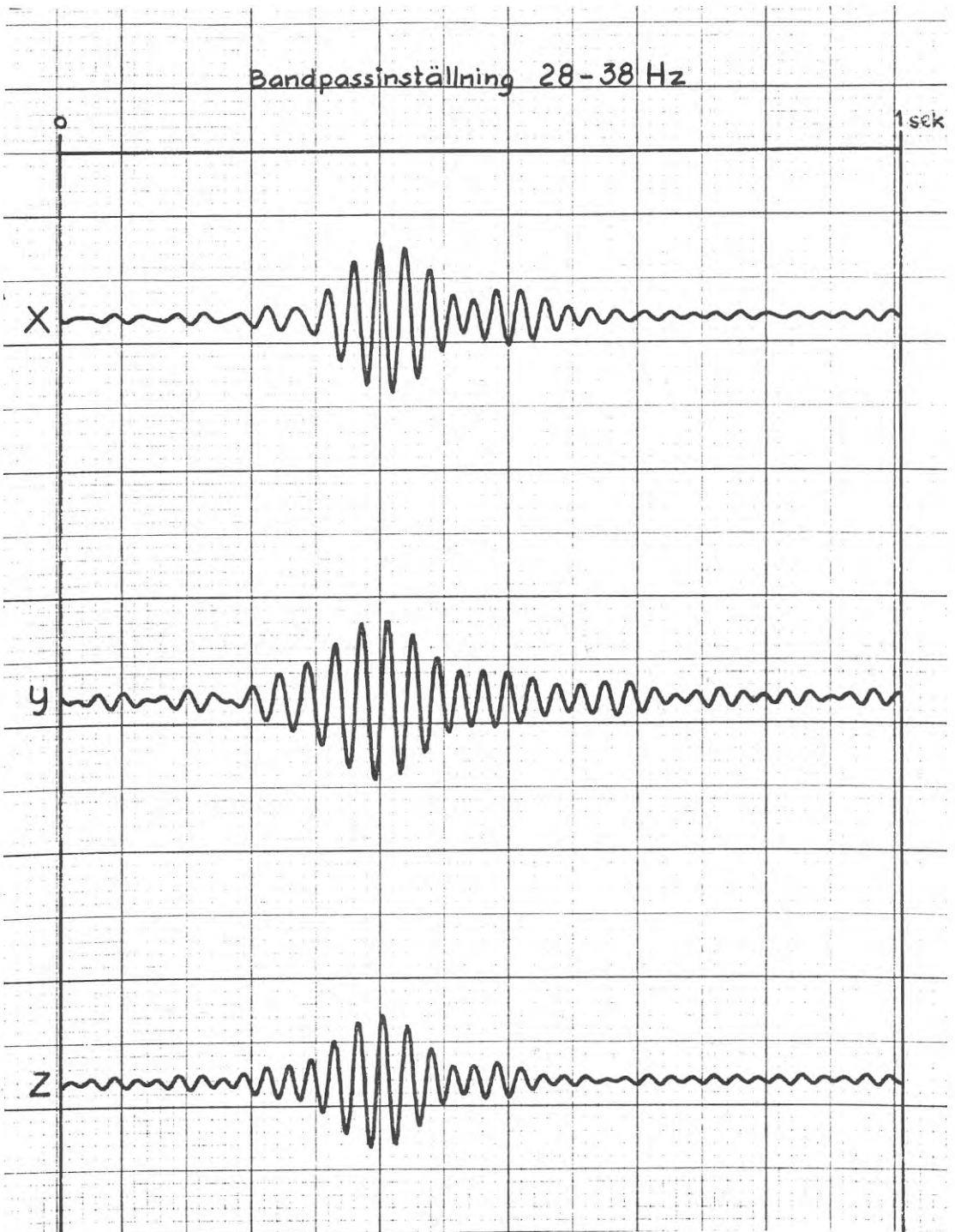
Figur 40: Exempel på vad som händer med en kort signalpuls vid olika bandpassfiltreringar.



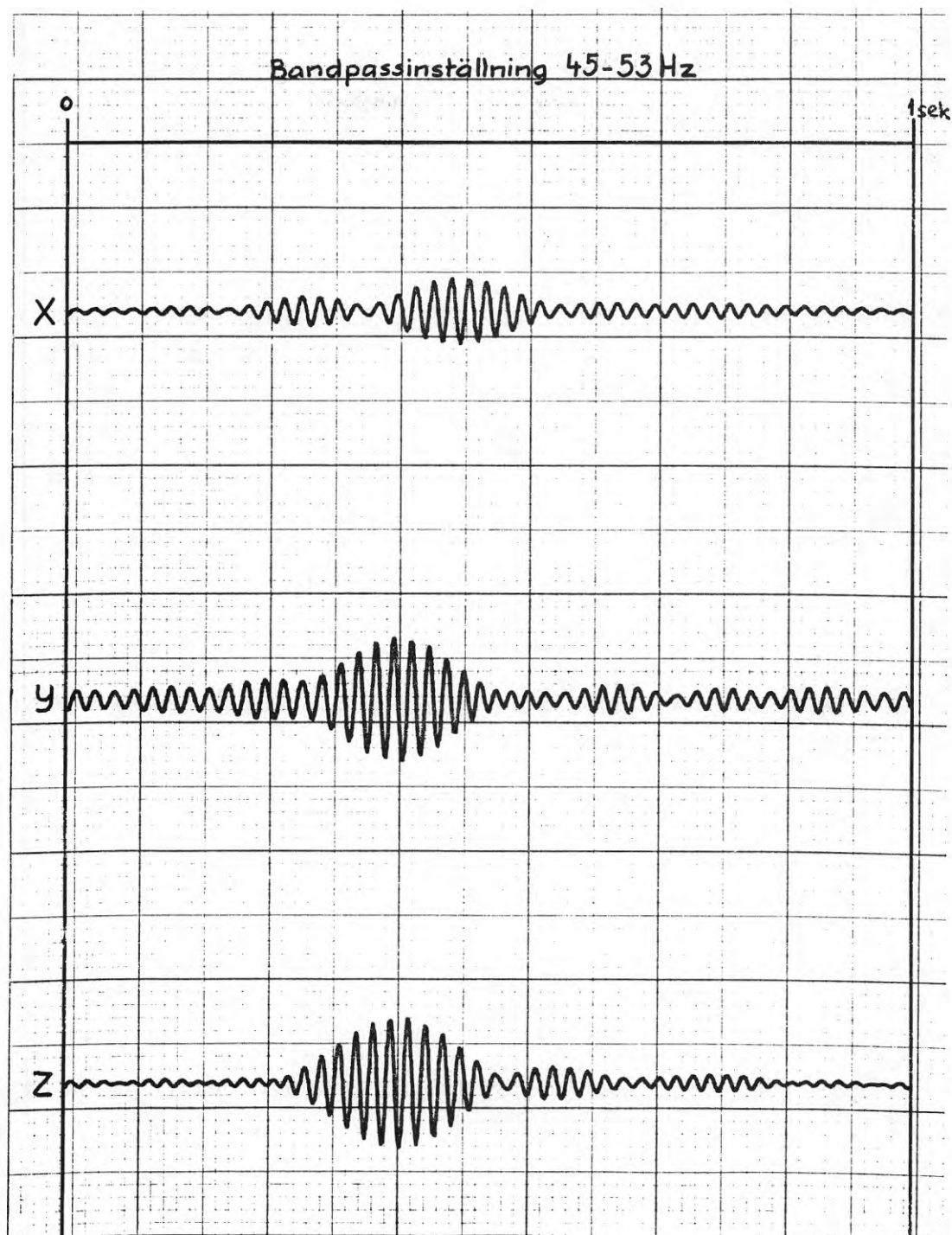
Figur 41: Mät signaler från en trekomponents geofon.



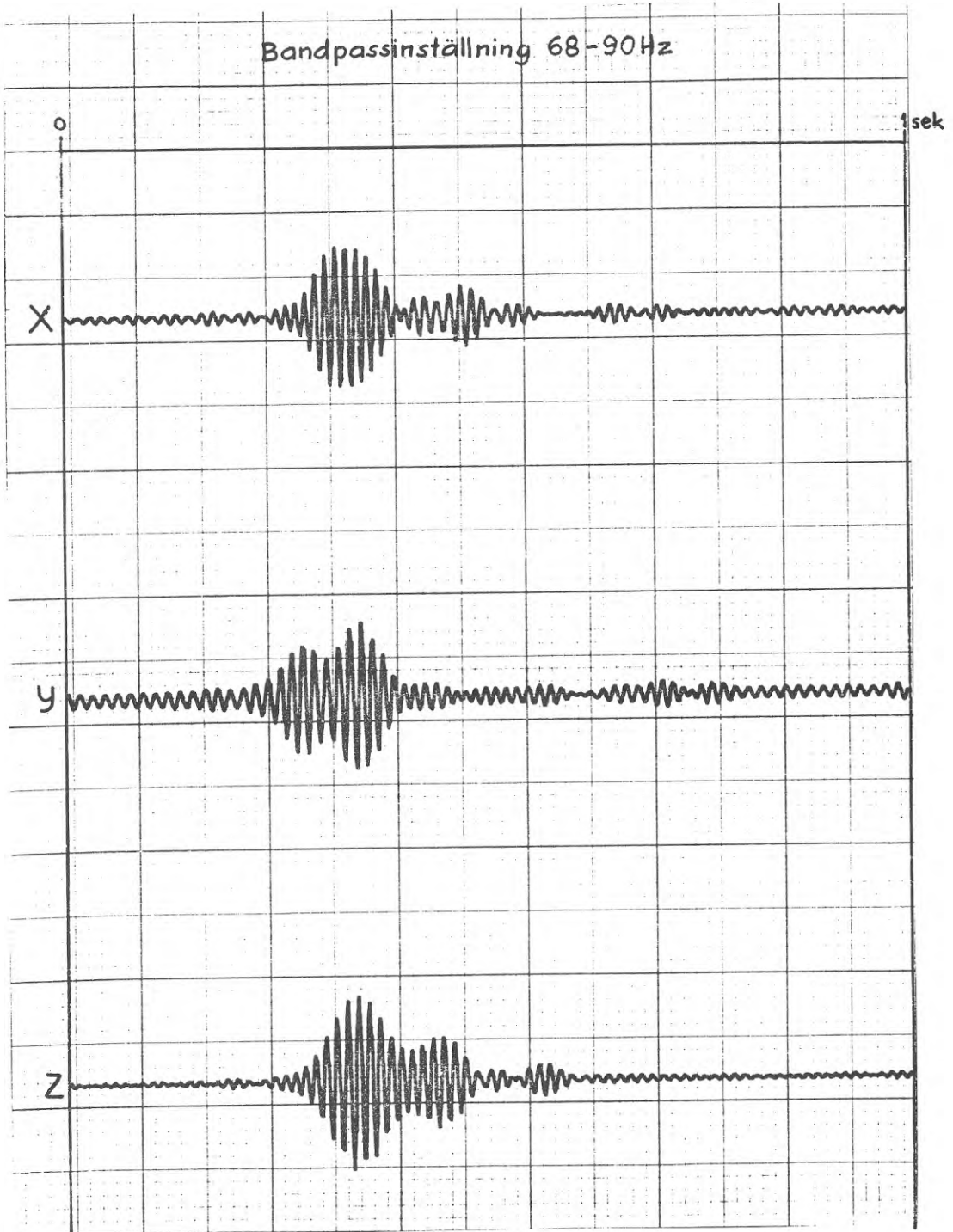
Figur 42: Spektrumbilder för signaler från en 3 komp. geofon.



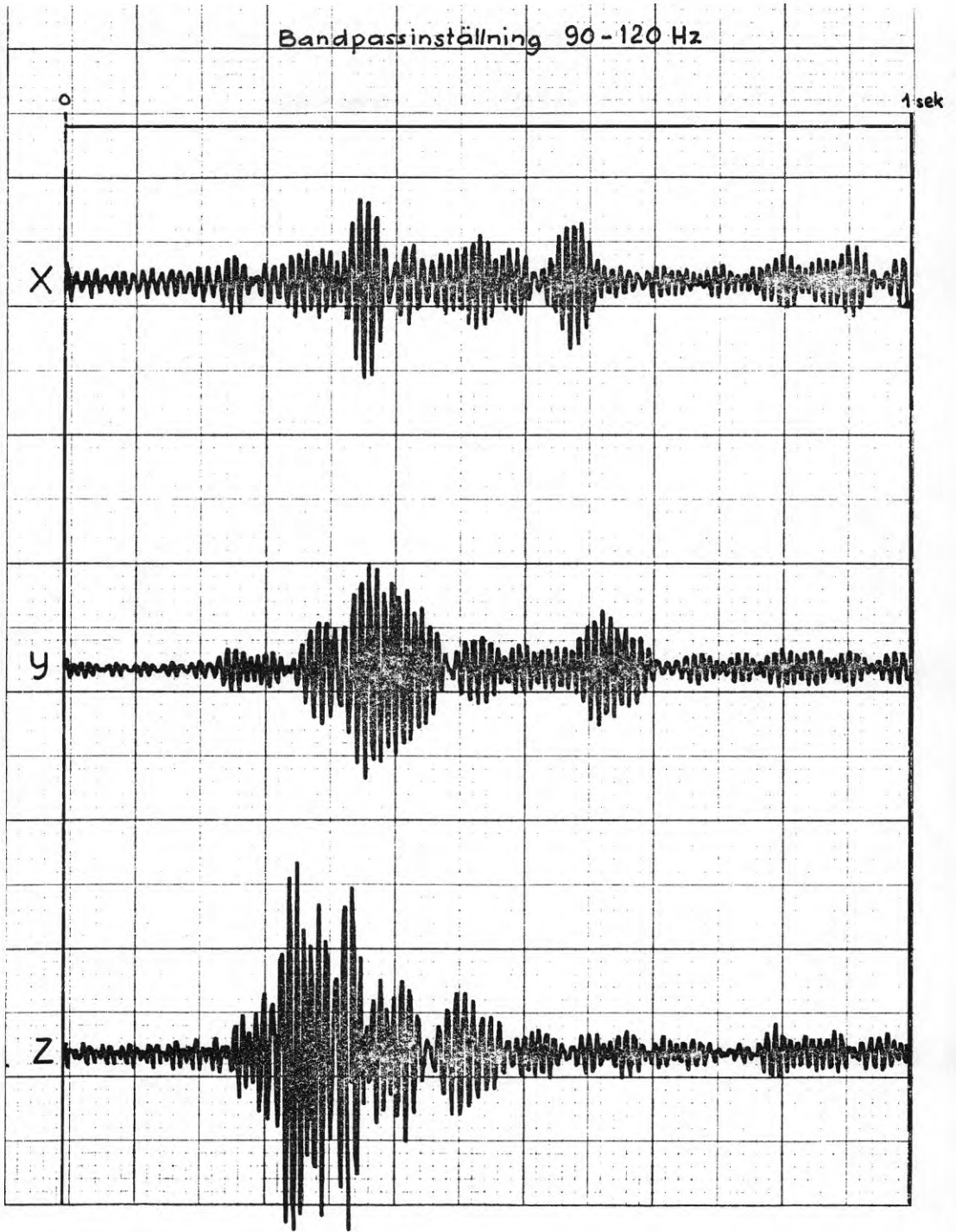
Figur 43: Seismisk signalanalys med digit. filtrering.



Figur 44: Seismisk signalanalys med digit. filtrering.



Figur 45: Seismisk signalanalys med digit. filtrering.

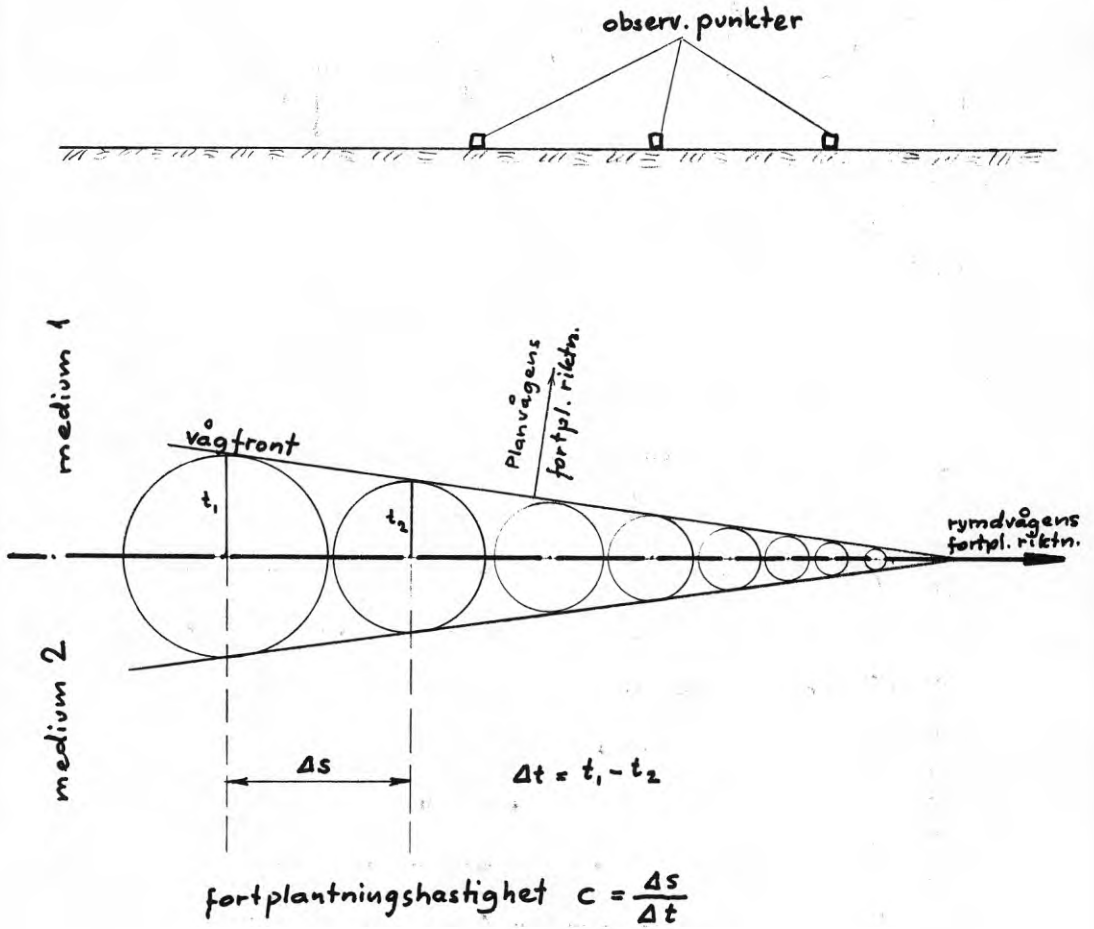


Figur 46: Seismisk signalanalys med digit. filtrering.

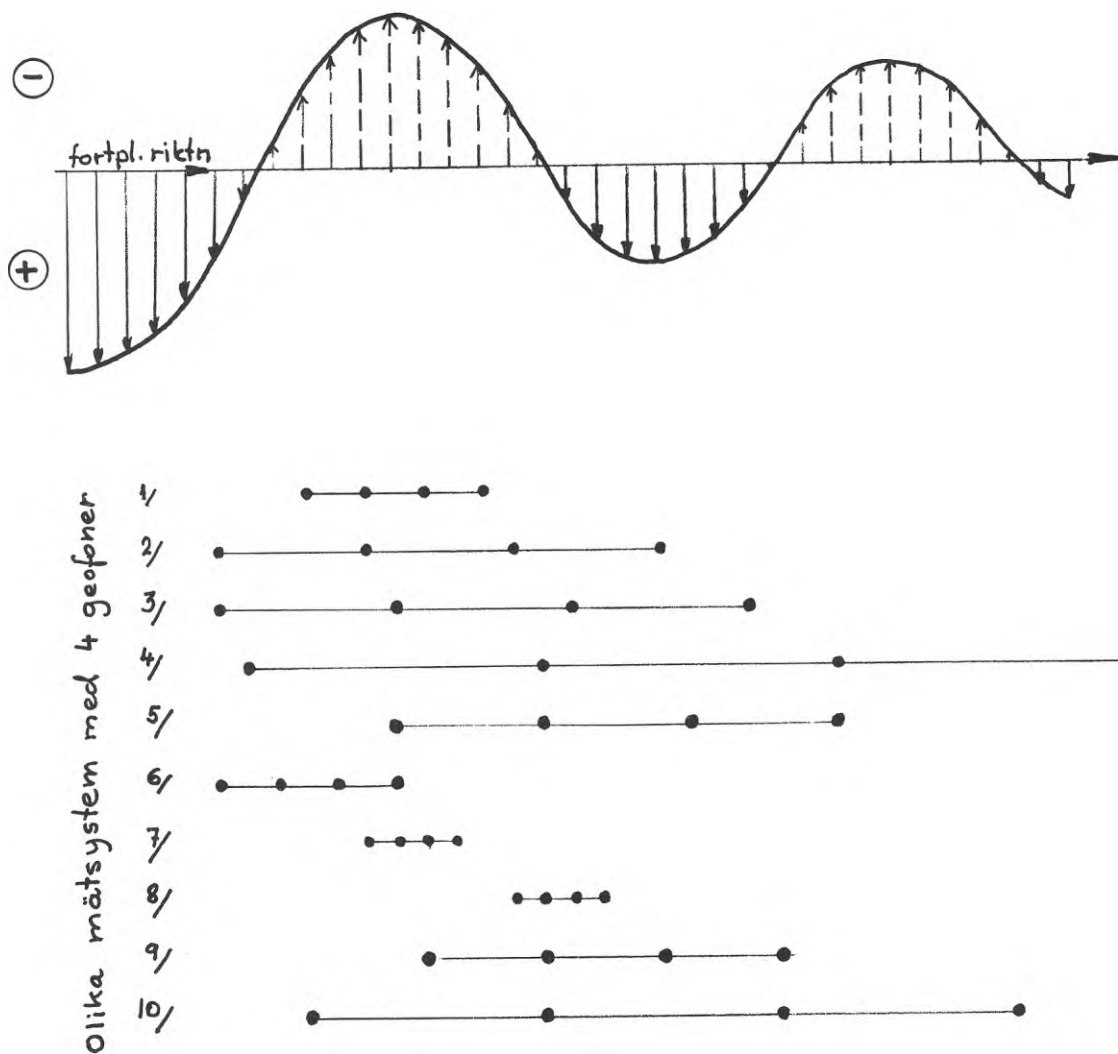
De preparerade signalerna från olika mätpunkter, dock under förutsättningen att dessa har gjorts med identiskt lika bandpassinställningar, kan underkastas bearbetning och tolkning på samma sätt som har beskrivits ovan. Signalernas fasförskjutning mellan olika mätpunkter ger ofta tillräckligt underlag för bestämning av fortplantningshastigheterna för de olika vågtyperna.

Vid bedömning av de olika vågtypernas fortplantningshastigheter måste hänsyn tagas till den elastiska vågrörelsens fundamentala egenskaper. Beträffande det sistnämnda måste vid analysen rymdvågor och planvågor (t ex refrakterad våg) särskiljas, på grund av den fundamentala skillnaden i egenskap och karaktär mellan dessa två huvudtyper. En planvåg uppstår sekundärt i samband med en rymdvågs utbredning (rörlig dynamisk last) under vissa speciella omständigheter. Vågfronterna utgör tangenter till första spänningsmaxima, andra spänningssminima osv i de olika punkterna i rymdvågens fortplantningsriktning. Bestämning av fortplantningshastigheten sker sålunda enklast genom att mäta fasförskjutningen mellan maximi resp minimifaserna i de olika punkterna. Den erhållna fortplantningshastigheten återger emellertid inte planvågens hastighet, utan motsvarar den dynamiska lastens rörelsehastighet, dvs rymdvågens fortplantningshastighet i detta fall (Se figur 47).

Problemställningen för en rymdvåg som utbreder sig omkring en dynamisk punktlast åskådliggörs i figur 48 genom att visa den schematiska bilden av en skjuvvåg i relation till 10 godtyckligt valda mätsystem (geofonuppställning). Som framgår av figuren har den för planvågen generellt gällande faskorrelationsmetoden bara i vissa fall tillämpas för rymdvågen. Om geofonavståndet betecknas med ΔS_g och våglängden med λ kan faskorrelationsförfarandet användas under följande villkor.



Figur 47: Schematisk bild över en planvåg.



Figur 48: Schematisk bild över skjuvvågsutbredning och olika geofonuppställningar.

1. $\Delta S_g \ll \lambda$
2. $\Delta S_g = \lambda$
3. $\Delta S_g = n \cdot \lambda$, där $n = 2, 3, 4, \dots$

Figuren visar också att för andra relationer mellan ΔS_g och λ än ovannämnda blir bestämning av fortplantningshastigheten betydligt svårare. Detta problem är tyvärr inte tillräckligt uppmärksammat i facklitteraturen. Seismologerna möter dessa svårigheter på ett annat sätt och framför allt i en global skala. Vid bestämning av "ground roll" vågpaketets hastighet tillämpar de metoden med grupp-hastigheter istället för fashastigheter. Grupp-hastigheterna för ett väldefinierat vågpaket bestäms i enlighet med figur 49.

Periodlängderna blir följande:

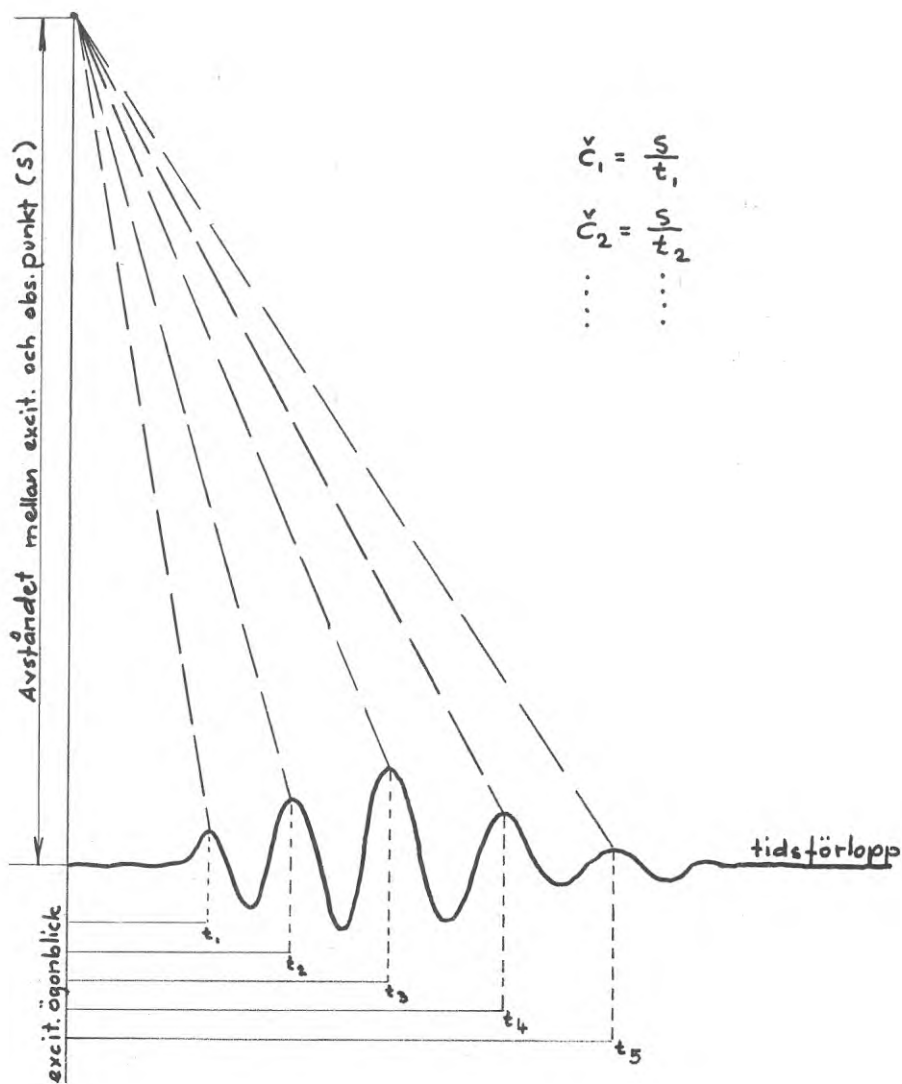
$$T_1 = t_2 - t_1$$

$$T_2 = t_3 - t_2$$

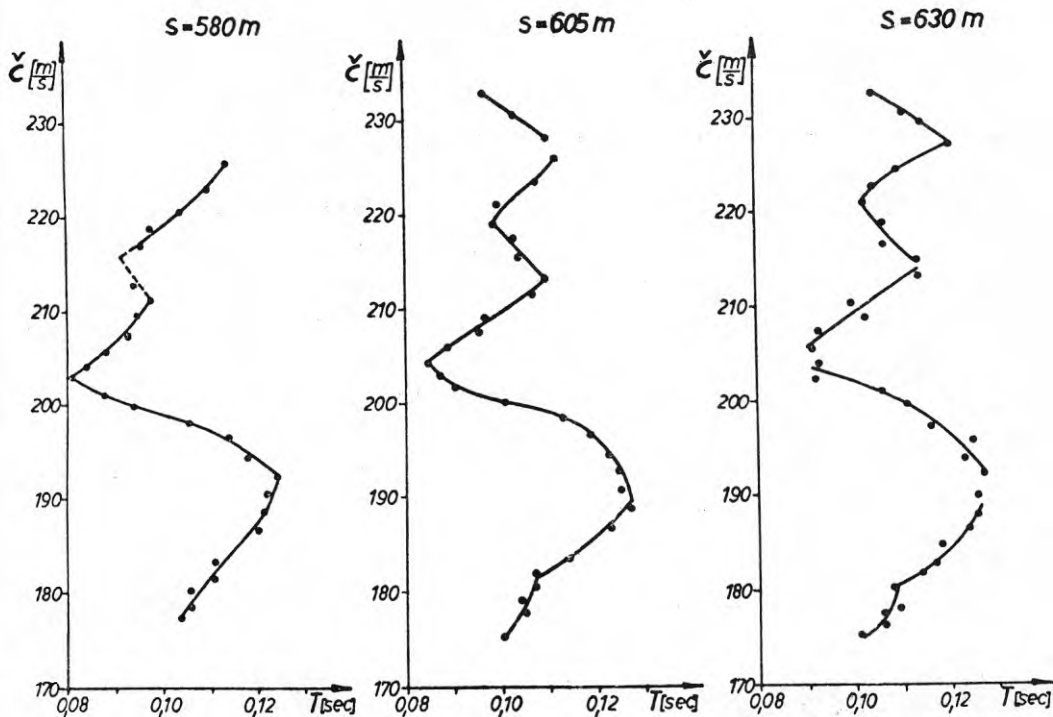
$$T_3 = t_4 - t_3$$

$$T_4 = t_5 - t_4$$

Varje bestämt värde för grupp-hastigheten \check{C} gäller endast för respektive periodlängd. De erhållna hastighetsvärdena redovisas sedan som funktion av periodlängden på ett diagram i enlighet med figur 50. Genom att jämföra de i olika avstånd erhållna grupp-hastighetskurvorna med varandra kan för vissa periodlängder karakteristiska hastighetsvärden bestämmas. Metoden är emellertid mera lämpad för studium av ett vågpakets karaktär än som ett praktiskt användbart förfarande för bestämning av de verkliga fortplantningshastigheterna. Svårigheten ligger däri att metoden förutsätter att fasen t_1 alltid tillhör den första vågfronten, vilket tyvärr inte uppfylls så ofta i verkligheten.



Figur 49: Princip för bestämning av gruppastigheter.

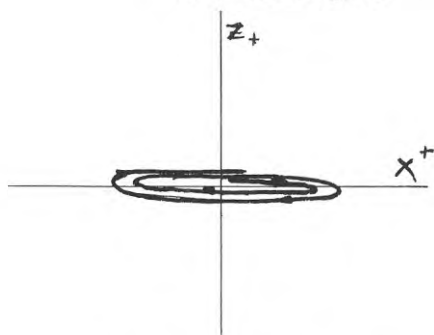


Figur 50: Exempel på gruppastighetskurvor bestämda för "ground roll" efter en sprängning på olika avstånd från exciteringspunkten. (Enligt Z. Kiss, 1967).

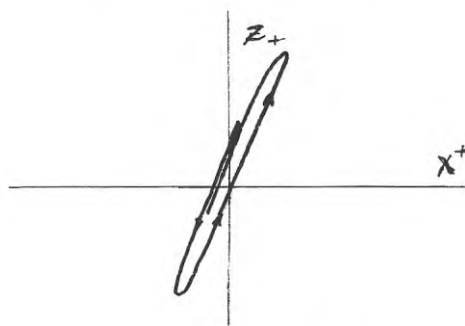
Den elastiska vågrörelsens egenskaper är väsentlig inom samtliga dynamiska problemställningar i byggnadstekniska sammanhang. Om geofonuppställningarna på figur 48 skulle ersättas med motsvarande längder representerande byggnadskroppars längdmått i vågens fortplantningsriktning, kan problemets stora betydelse enkelt förstås. Det är lätt att inse att bestämning (mätning) av vibrationernas storlek blir helt beroende av var mätpunkten ligger, och att vid olyckliga omständigheter kan vibrationsmätningen resultera i en från verkligheten helt avvikande bild.

4.4 Studier av partikelrörelse. Vektoranalys

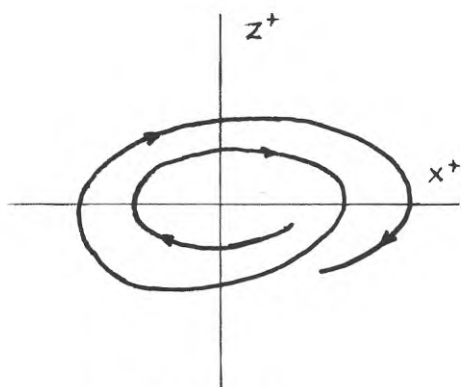
En materialpartikel (masspunkt) förflyttas i förhållande till jämviktsläget, på ett karakteristiskt sätt beroende av vågtypen. Genom att studera partikelrörelsen kan olika vågtyper i ett svängningsförlopp identifieras och/eller selekteras från varandra. Studium av en partikelrörelse är endast möjligt om svängningsförloppet registreras i rymden, dvs i ett tredimensionellt system. Presentationen av partikelrörelsen sker i form av diagram (se fig 51). Diagrammen omfattar i regel tre projektionsplan såsom $Z - X$, $Z - Y$ och $X - Y$. Koordinataxel X är alltid parallell med mätlinjen.



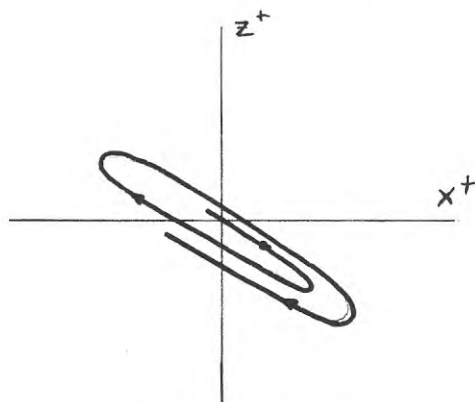
P-våg i markytan



Refrakterad P-våg

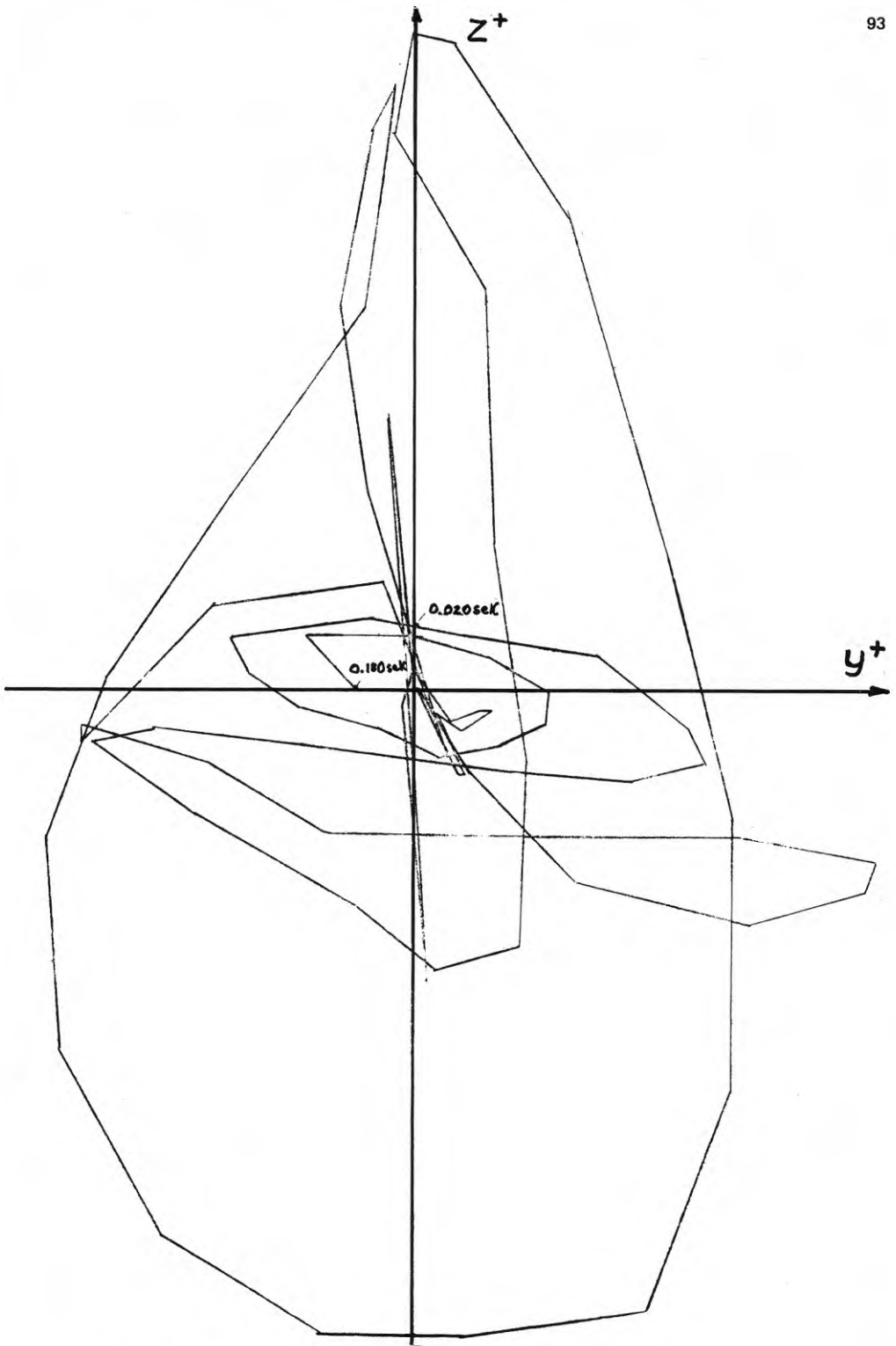


Rayleigh-våg



Refrakterad S-våg

Figur 51: Schematisk presentation av partikelrörelser vid några typiska vågtyper.



Figur 52: Partikelrörelse för ett stötförlopp i morän i Z-Y planet.

I fig. 52 visar vi partikelrörelsen av en punkt i Z - Y-planet konstruerad med hjälp av opreparerade svängningsförlopp. Som framgår av figuren synes det vara mycket svårt att tolka ett sådant diagram. Prepareringen för några vågtyper kan i vissa fall ske även manuellt, innebärande en utjämning av svängningsförloppets utseende så att överlagrade vågor helt enkelt tas bort (se fig 53)



Figur 53: Principskiss över hur överlagrade svängningar kan borttagas med hjälp av den manuella metoden.

Det lämpligaste sättet för preparering av mätsignaler är självfallet filtrering helst på grundval av föreliggande spektrumbilder, (Fourier analys).

Med fig 54-58 vill vi åskådliggöra det sistnämnda förfaringssättets stora möjligheter vid analysen. För ett och samma avsnitt av ett stötförlopp i morän presenteras partikelrörelse-diagram vid olika bandpassfiltreringar. Filtringen utfördes med hjälp av dator gå grundval av ett Fourier-spektrum.

Figur 54 visar partikelrörelsen vid filterband 0 - 28 Hz. Utseendet av rörelsekurvan talar om att det är frågan om en ytvåg som uppstod direkt under det uppluckrade ytskiktet i närheten av markytan. Masspunktens rörelse har, som synes, skett medsols.

Figur 55 visar vid filterbandet 28 - 38 Hz det karak-

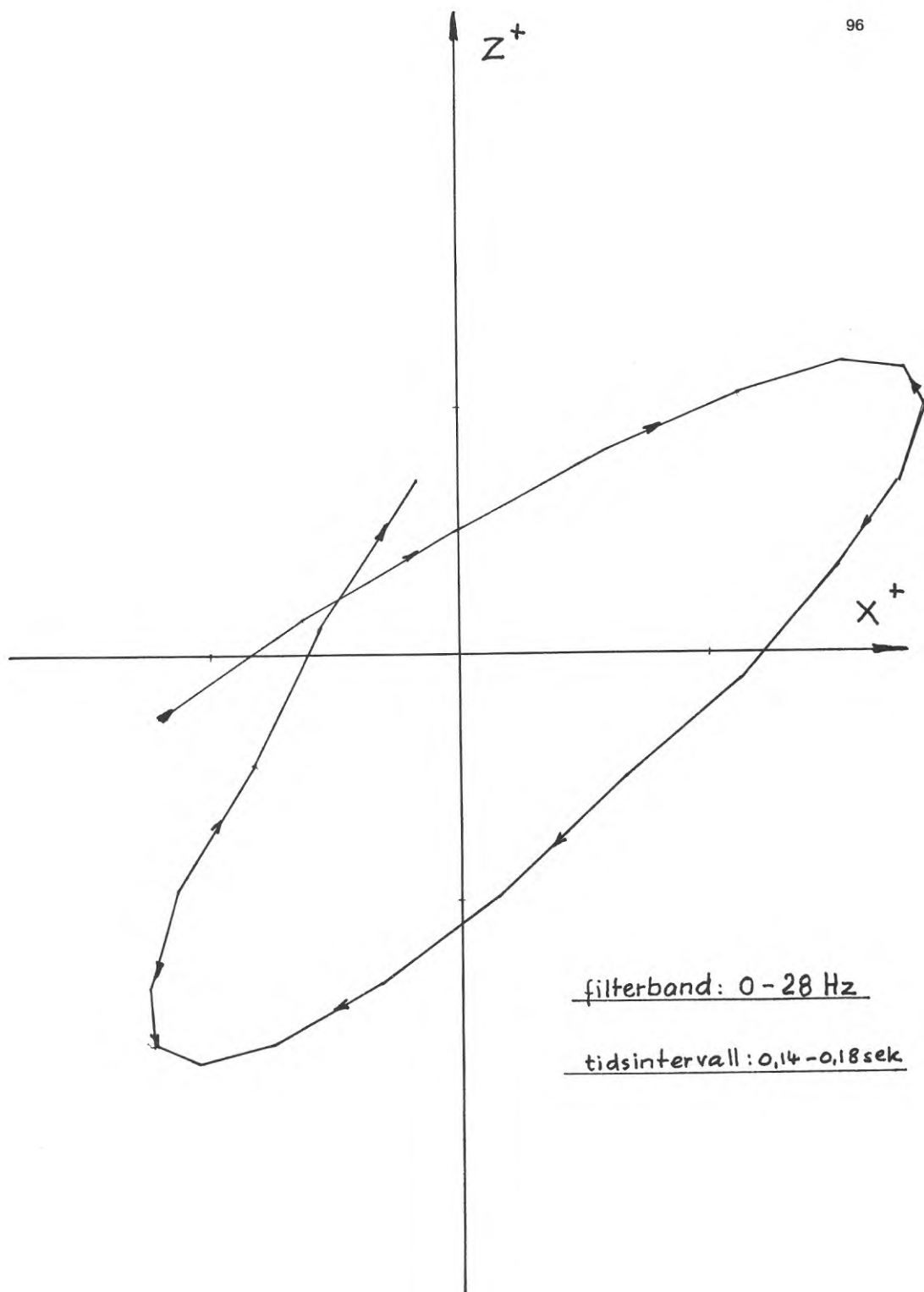
teristiska utseendet för en ytvåg vilken dock härrör från en djupare liggande elastisk gränsyta i moränen. Beviset för att det är frågan om en helt annan våg än ovannämnda utgörs av motsatta rörelseriktningar.

Figur 56 visar vid filterbandet 38-45 Hz partikelrörelsen för en reflekterad kompressionsvåg (rörelseriktning medsols) samt delar av en refrakterad kompressionsvåg (rörelseriktning motsols). Det framgår även av figuren att rörelsernas symmetriaxlar synbarligen har olika lutningar i Z - X koordinatsystemet.

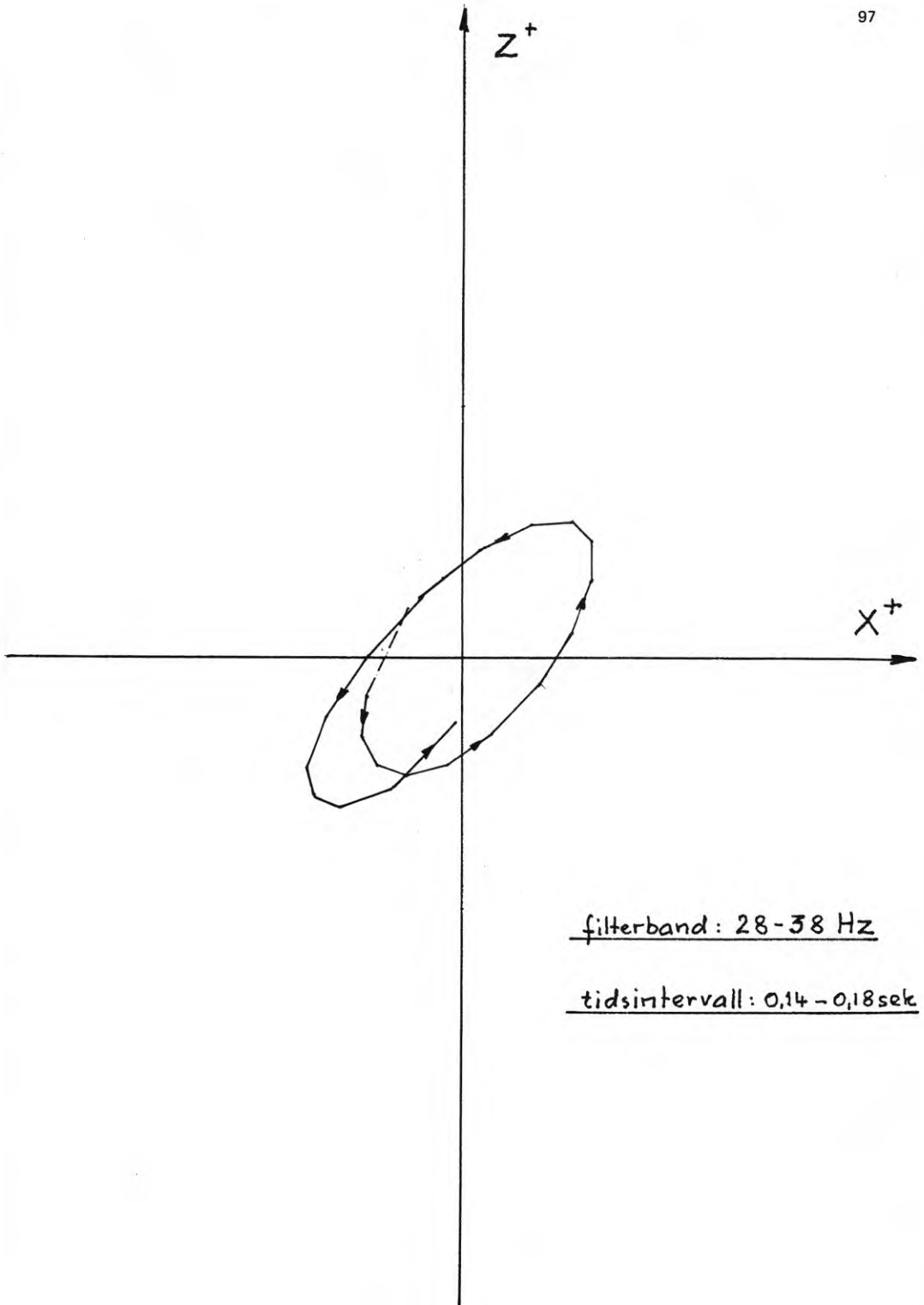
Figur 57 vid filterbandet 68-90 Hz visar av allt att döma den mest intressanta partikelrörelsen. Symmetriaxelns lutning, rörelsekurvan och frekvensen talar om att det är frågan om en speciell skjuvvåg, som alstras i gränsytan mellan moränen och berget av en kompressionsvåg (typbeteckning PPS eller SPS).

Figur 58 visar partikelrörelsens utseende vid filterbandet 90-120 Hz. Utseendet är som synes mycket komplicerat, dock kan ett flertal olika karakteristiska rörelser skönjas. Genom att dela upp filterbandet i fyra deletapper vid filtreringen kommer bilden att upplösas och tillfredsställande resultat kan erhållas.

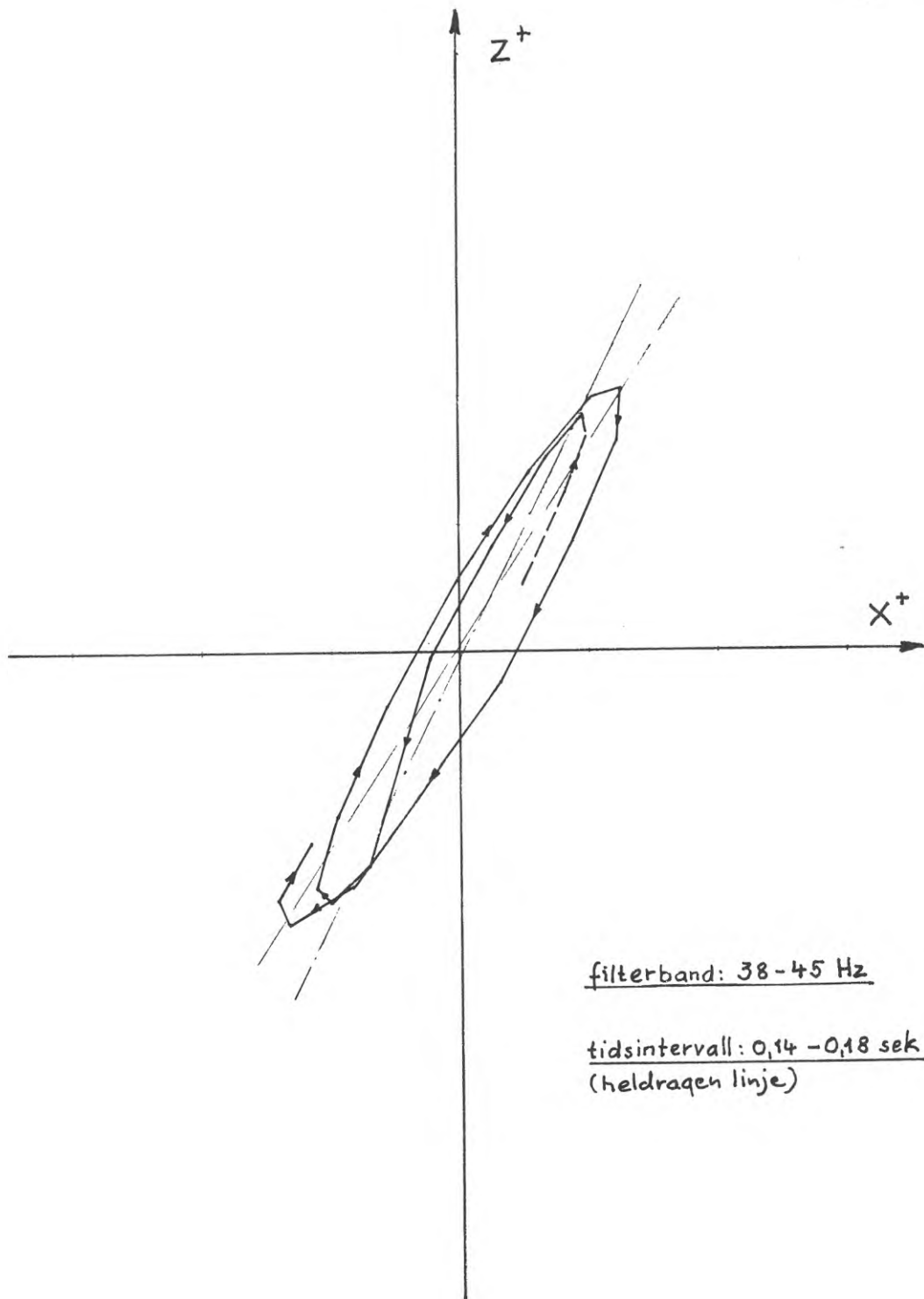
Den analysmetod som berörs i detta kapitel fungerar således som ett hjälpmedel för att bestämma de parametrar vilka sedan ligger till grund för bestämning av undergrundens fysikaliska egenskaper. Vid stationära vibrationer (byggnadsdynamiska problem) kan man oftast nöja sig med en enklare form av vektorframställningar. Om vibrationerna registreras samtidigt exempelvis i flera punkter på ett fundament, kan man bestämma rörelsevektorns storlek och riktning i ett och samma tidsögonblick för samtliga mätpunkter. Vektorbilden kan sedan ligga till grund för konstruktören vid val av lämpliga åtgärder för att uppnå en dynamisk balans i fundamentet.



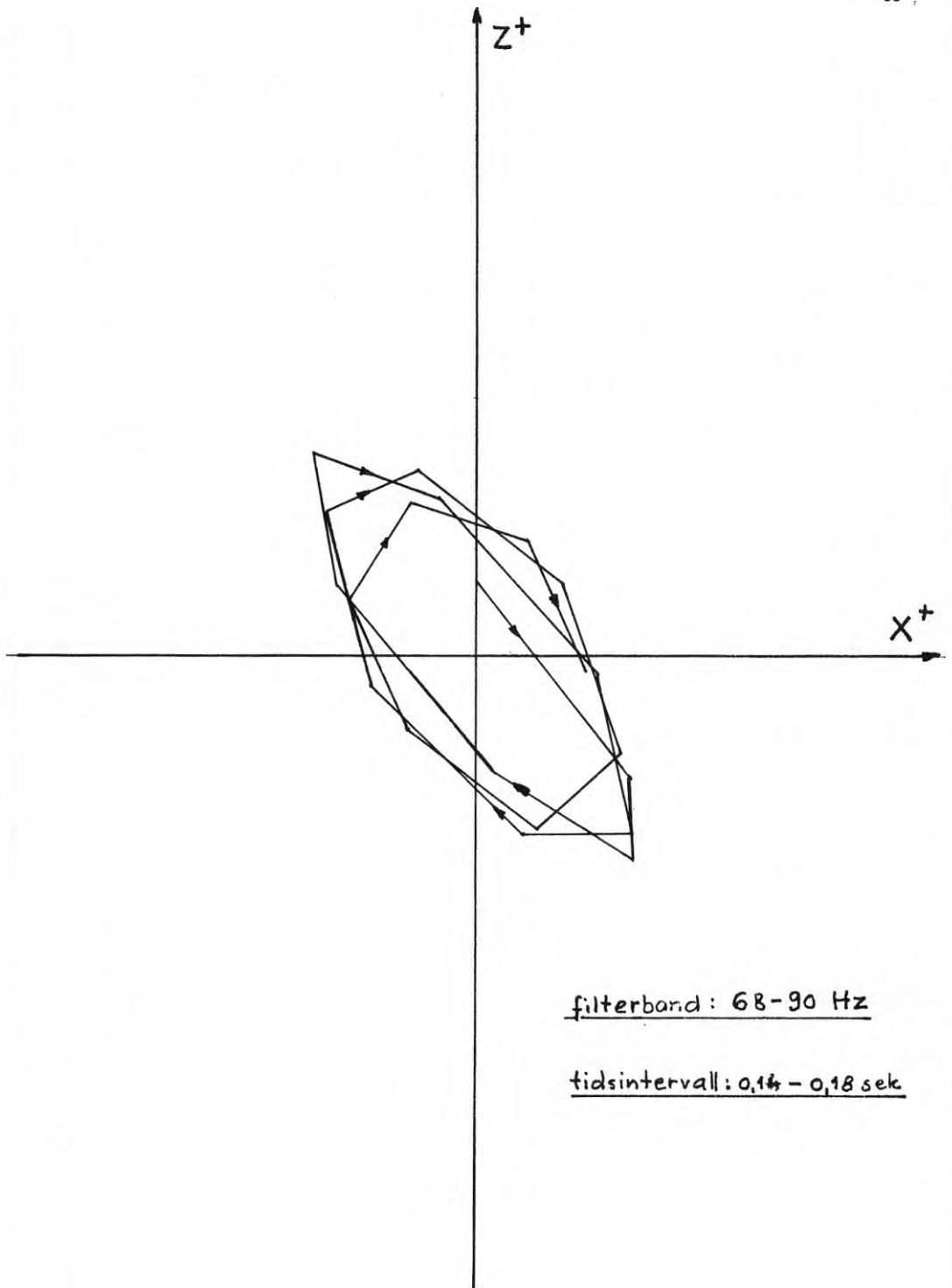
Figur 54: Partikelrörelse i ett utvalt avsnitt av ett stötförlopp i morän efter filtrering.



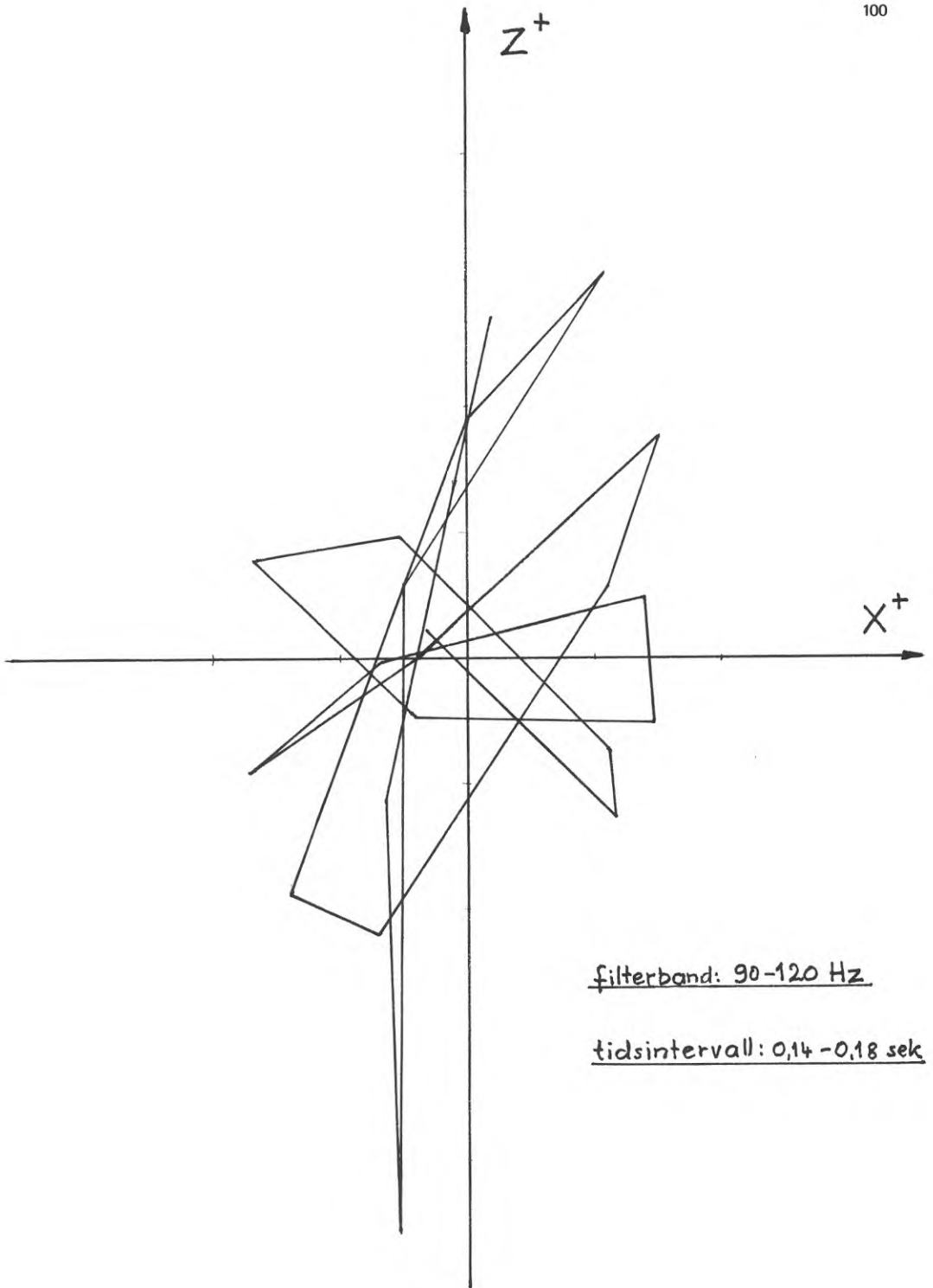
Figur 55: Partikelrörelse i ett utvalt avsnitt av ett stötförlopp i morän efter filtrering.



Figur 56: Partikelhørelse i ett utvalt avsnitt av ett stötförlopp i morän efter filtrering.



Figur 95: Partikelrörelse i ett utvalt avsnitt av ett stötförlopp i morän efter filtrering.



Figur 58: Partikelhörelse i ett utvalt avsnitt av ett stötförlopp i morän efter filtrering.

5 FÄLTMÄTNINGAR OCH RESULTAT

Fältmätningar har utförts i syfte att insamla material för studium av samband mellan dynamiska parametrar och jordmaterials fysikaliska egenskaper. Vid fältförsöken har hela det svängningsförlopp, som erhålls vid excitering med sprängladdning registrets med databandspelare via trekomponentgeofoner. Försök har utförts dels i morän vid de objekt där Vägverket gjort undersökningar avseende "jordarters bearbetbarhet" och dels i lera och berg för jämförelse. Signalerna har analyserats med avseende på frekvensinnehåll och vågidentifikation enligt de principer som redovisas i kapitel 4. De resultat som redovisas utgör endast en belysande sammanfattning av utförda analyser. Vid jämförelse med resultat från andra undersökningar har främst studerats de faktorer som inverkar på bearbetbarhet d.v.s. schaktbarhet och bärighet. Övriga samband är endast översiktligt omnämnda.

1. Beskrivning av försöksområden.

Fältförsök har utförts på följande platser:

a) Örebro, Europaväg E3, delen Ansta-Norrplan

Försöksföretaget är beläget vid Hjärstaparken i Örebro. Jordtäcket består i huvudsak av sandig moig morän med låg blockhalt. Moränen täcks av ett tunnt lager glacial varvig lera. Mellan morän och berg fanns lokala zoner av skiktade sediment av antagligen subglacialt ursprung. Berggrunden består av en grov ojämnkornig granit s.k. "Örebrogranit" med lokala gångar av diabas och grönsten. Det påträffade rösberget består av vittrad grönsten. På grund av den ojämna bergytan fanns lokala grundvattensjöar som försvårade schaktarbetet.

b) Skövde, Riksväg 48, delen Skövde-Haggården.

Försöksföretaget är beläget strax norr om Billing-
en intill Skövde. Undersökningsområdet ligger
strax norr om det stråk, där tappningen av Bal-
tiska insjön anses ha ägt rum.

Ena delsträckan (11/150-11/400) utgörs av en moränhöjd vilken är tämligen komplext uppbyggd av flera mindre ryggar med mellanliggande sänkor. Yttagret (0,5-1,0 m) är kraftigt påverkat av svallning. Den underliggande osvallade moränen är relativt hårt packad med låg blockhalt och måttlig stenhalt. Enstaka stora (ca 4-5 m³) block förekommer. Bildningen är av ändmoräntyp. Grundvatten påträffades 3-4 m under markytan.

Den andra delsträckan (12/200-12/500) utgörs av ett flackt och enhetligt moränområde. Yttagret är måttligt påverkat av svallning. Den underliggande osvallade, brunfärgade moränen är måttligt packad. Moränen har låg blockhalt och måttlig stenhalt. Under den bruna moränen följer en gråfärgad morän som är mycket hårt packad. Denna uppbyggnad med hårt packade lager av enhetlig morän bekräftar att bildningen är av bottenmoräntyp. Grundvatten påträffades 2-3 m under markytan.

c) Stöde, Europaväg E75, delen Stöde-Tirsta

Schaktområdet är beläget i Ljungans dalgång på sydvästslutningen av Kolarmyrberget. Berget går idagen endast på ett fåtal ställen och är på sydsidan täckt med sandig morän, vilken är mer eller mindre stenig. Blockhalterna i ytan varierar mellan normalblockig, rikblockig och storblockig. På nedre delen av sydslutningen och i en del svackor överlagras moränen av skiktad mo. Några typiska moränformer förekommer ej i området.

I ena delsträckan (4/950-5/050) är moränen mycket inhomogen och har lokalt mycket hög blockhalt. Den höga blockhalten liksom rösberget medförde losstagningsproblem under urschaktningen.

I den andra delsträckan (6/250-6/400) är moränen företrädesvis blockig sandig-grusig sandig. Rikligt med sand och grovmoliner förekommer. Moränen var mycket hårt packad och problem med losstagning uppstod under urschaktning.

Område a, b och c ingår i Vägverkets försöksverksamhet och är beskrivna i Vägverkets rapport "Resultat från försöksverksamhet angående jordarters bearbarhet". Ur nämnda rapport redovisas i figur 59 - 68 för respektive delsträcka

- utförda undersökningar
- sammanställningsprofil

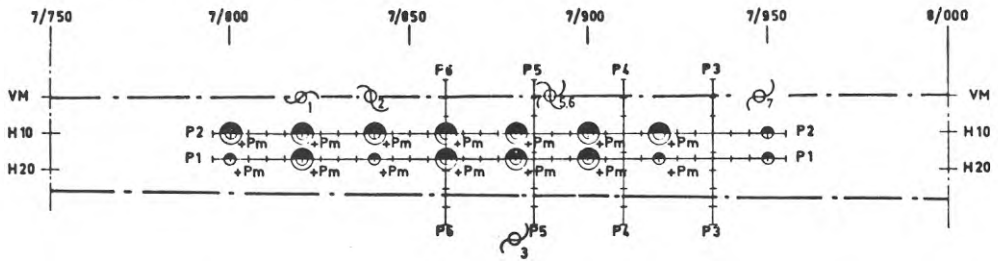
Sammanställningsprofilen är en redovisning av bearbetbarhet i enlighet med förslag i "Definition av bearbetbarhet för olika jordar."

d) Skå Edeby, Statens Geotekniska Institutets testområde. Jordart: Lera

e) Vinterviken, Nitro Nobels testområde. Berg

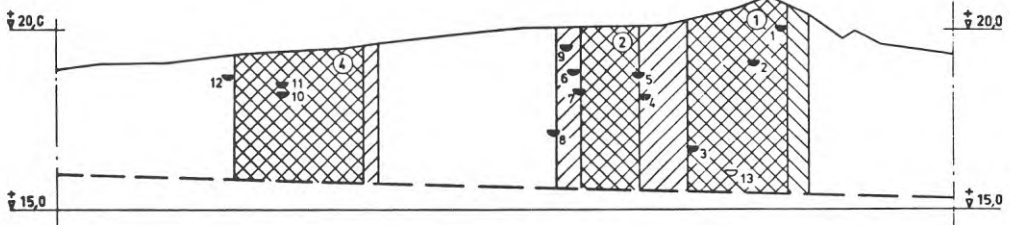
Vid område d och e har endast jämförande försök utförts i lera och berg. På grund av den sekundära betydelsen av dessa försök beskrivs försöksområdena ej i denna rapport.

PLAN ÖVER FÖRUNDERSÖKNINGAR

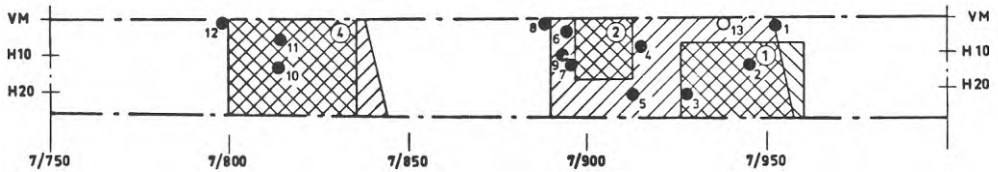


STUDIER OCH PROVTAGNING I SAMBAND MED UTSCHAKTNING

PROFIL



PLAN



TECKENFÖRKLARING:

- VÄGOMRÅDE
- TERRASSYTA
- SEISMIKLINJE
- SONDERING ENLIGT STANDARDBETECKNING
- Pm PRESSIOMETER
- ⊥ resp. // VÄGLINJEN GEOTELEKTRISK SONDERING
- VOLYMIKTSPROV
- MATERIALPROV

- BLOCKRÄKNING**
- ①-② : 5760 vfm³
 - ④ : 2980 vfm³
 - ∅ = 20-60 CM ANTAL + LÄGE
 - ∅ = > 60CM STORLEK + LÄGE
- KAPACITETSSTUDIE**
- ① 1340 vfm³
 - ② 835 vfm³
 - ④ 1995 vfm³
- GRÄVMASKIN 1200l (H 21)

UNDERSÖKTA MASSOR C:A 13000 fm³

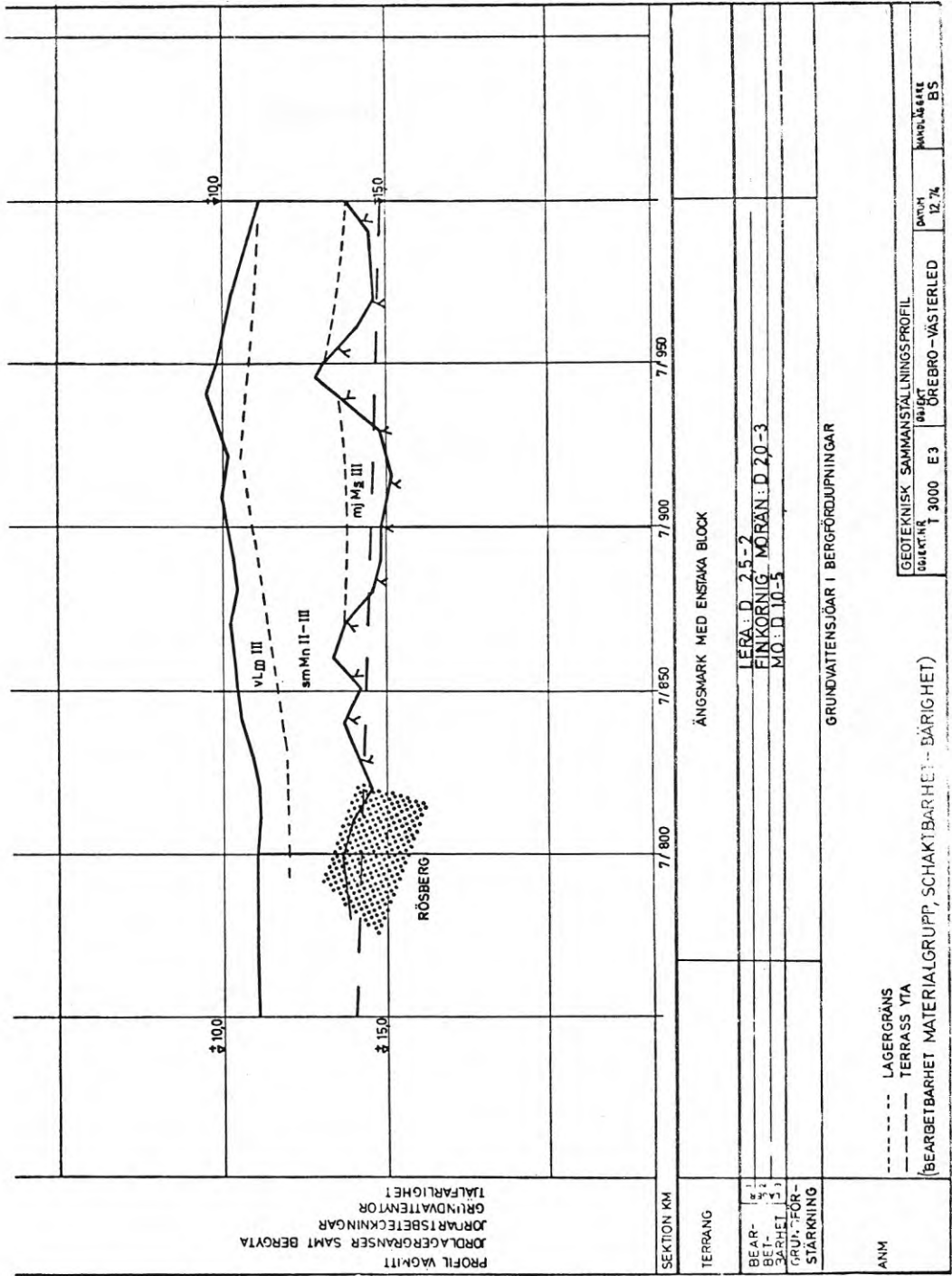
STATENS VÄGVERK

Figur 59.

JORDARTERS BEARBETBARHET

FÖRSÖKSVERKSAMHET ÖREBRO

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR



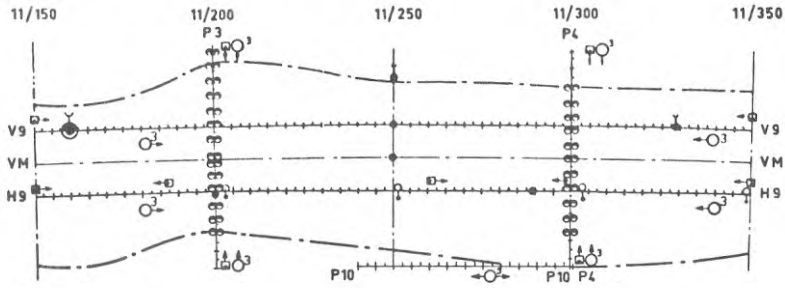
STATENS VÄGVERK

Figur 60.

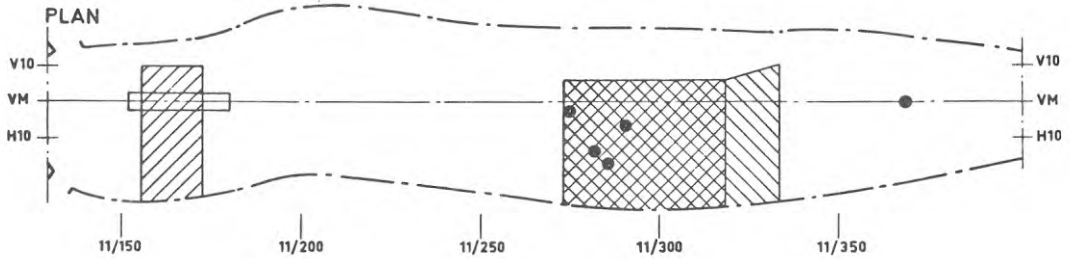
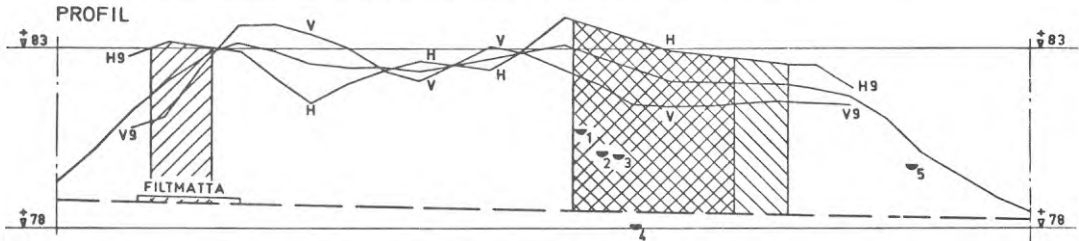
JORDARTERS BEARBETBARHET
 FÖRSÖKSVERKSAMHET ÖREBRO
 SAMMANSTÄLLNINGSPROFIL

PLAN ÖVER FÖRUNDERSÖKNINGAR

SCHAKT 1



STUDIER OCH PROVTAGNING I SAMBAND MED UTSCHAKTNING



TECKENFÖRKLARINGAR:

- VÄGOMRÅDE
- TERRASSYTA
- ++++ SEISMIKLINJE
- BORRHÅLSLOGGNING I ROTATIONS-BORRHÅL
- SONDERING ENLIGT STANDARD-BETECKNING

SEISMIKMARKERINGAR:

- □ GEOFONER PÅ TRÄPÅLAR, c/c 2,5 M
- □ " " " " SPETT " " " "
- □ DJUPSPRÄNGSSEISMIK, c/c 5,0 M
- □ REPETITIONSSSEISMIK
- □ TREKOMPONENTSSEISMIK

● VOLYMKVITSPROV

UNDER FÖRSÖKET MED FILTMATTA UTFÖRDES MÄTNINGAR MED ISOTOP-SOND

□ BLOCKRÄKNING: 3 840 vfm³
 ∅ = 20-60 CM ANTAL+ LÄGE
 ∅ = > 60 CM STORLEK+ LÄGE

□ KAPACITETSSTUDIE: 1 260 vfm³
 GRÄVMASKIN 1750 l (H 25)

□ KAPACITETSSTUDIE: 605 vfm³
 GRÄVMASKIN 1200 l (H 21)

UNDERSÖKTA MASSOR C A 25 000 fm³

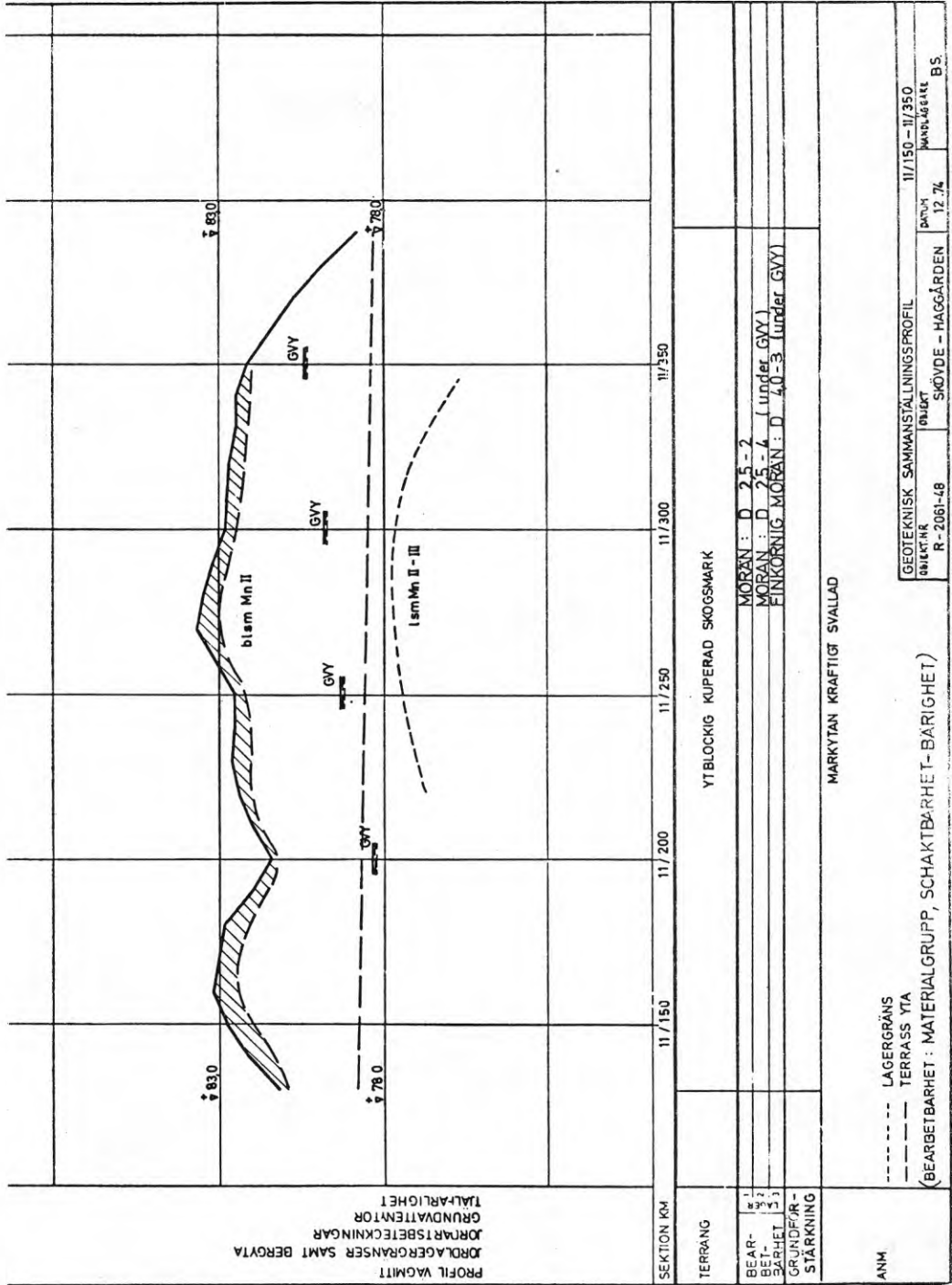
STATENS VÄGVERK

Figur 61.

JORDARTERS BEARBETBARHET

FÖRSÖKSVERKSAMHET SKÖVDE 1

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR



STATENS VÄGVERK

Figur 62.

JORDARTERS BEARBETBARHET

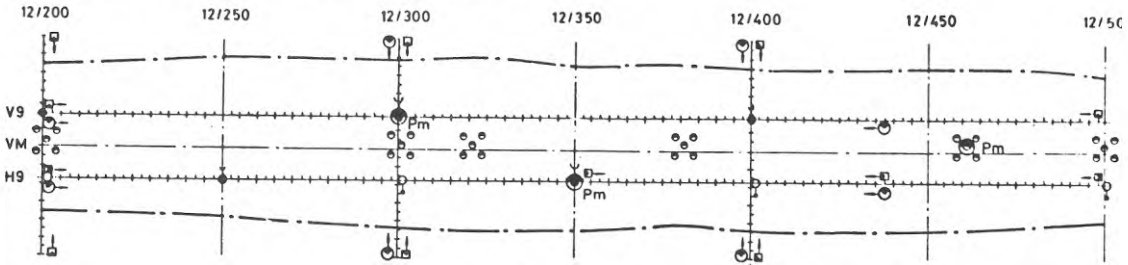
FÖRSÖKSVERKSAMHET SKÖVDE 1

SAMMANSTÄLLNINGSPROFIL

SKÖVDE SCHAKT 2

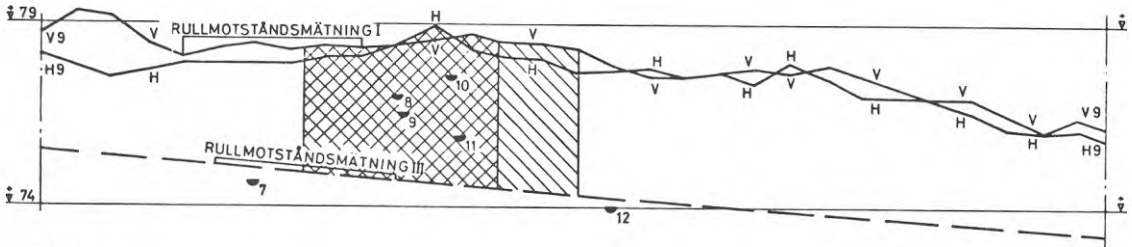
PLAN ÖVER FÖRUNDERSÖKNINGAR

108

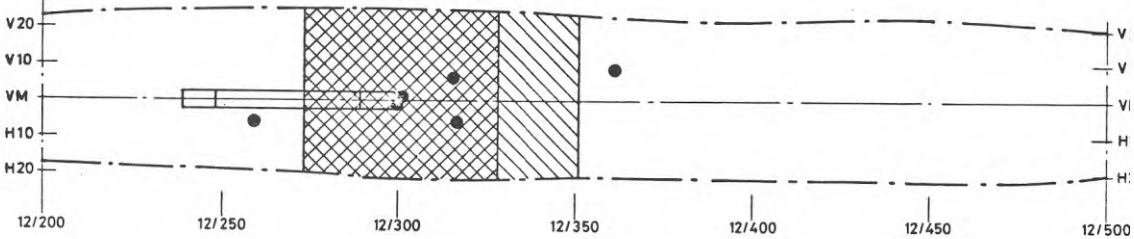


STUDIER OCH PROVTAGNING I SAMBAND MED UTSCHAKTNING

PROFIL



PLAN



TECKENFÖRKLARINGAR:

- — — — — VÄGOMRÅDE
- - - - - TERRASSYTA
- + + + + + SEISMIKLINJE
- BORRHÅLSLOGGNING I ROTATIONS-BORRHÅL
- SONDERING ENLIGT STANDARD-BETECKNING
- Pm PRESSIOMETER

● VOLYMWIKTSPROV

UNDER RULLMOTSTÅNDSMÄTNINGARNA UTFÖRDES PROVTAGNING MED VATTEN-VOLYMETER, PROCTORNÅL OCH ISOTOP-SOND

▨ BLOCKRÄKNING: 5 300 vfm³
 Ø = 20 - 60 CM ANTAL • LÄGE
 Ø = > 60 CM STORLEK • LÄGE

▨ KAPACITETSSTUDIE: 2 475 vfm³
 GRÄVMASKIN 1750 I (H 25)

SEISMIKMARKERINGAR:

- ⊗ GEOFONER PÅ TRÄPÅLAR, c/c 2,5 M
- ⊗ SPETT
- ⊗ DJUPSPRANGSSEISMIK, c/c 5,0 M
- ⊗ REPETITIONSSSEISMIK

UNDERSÖKTA MASSOR c A 35000 fm³

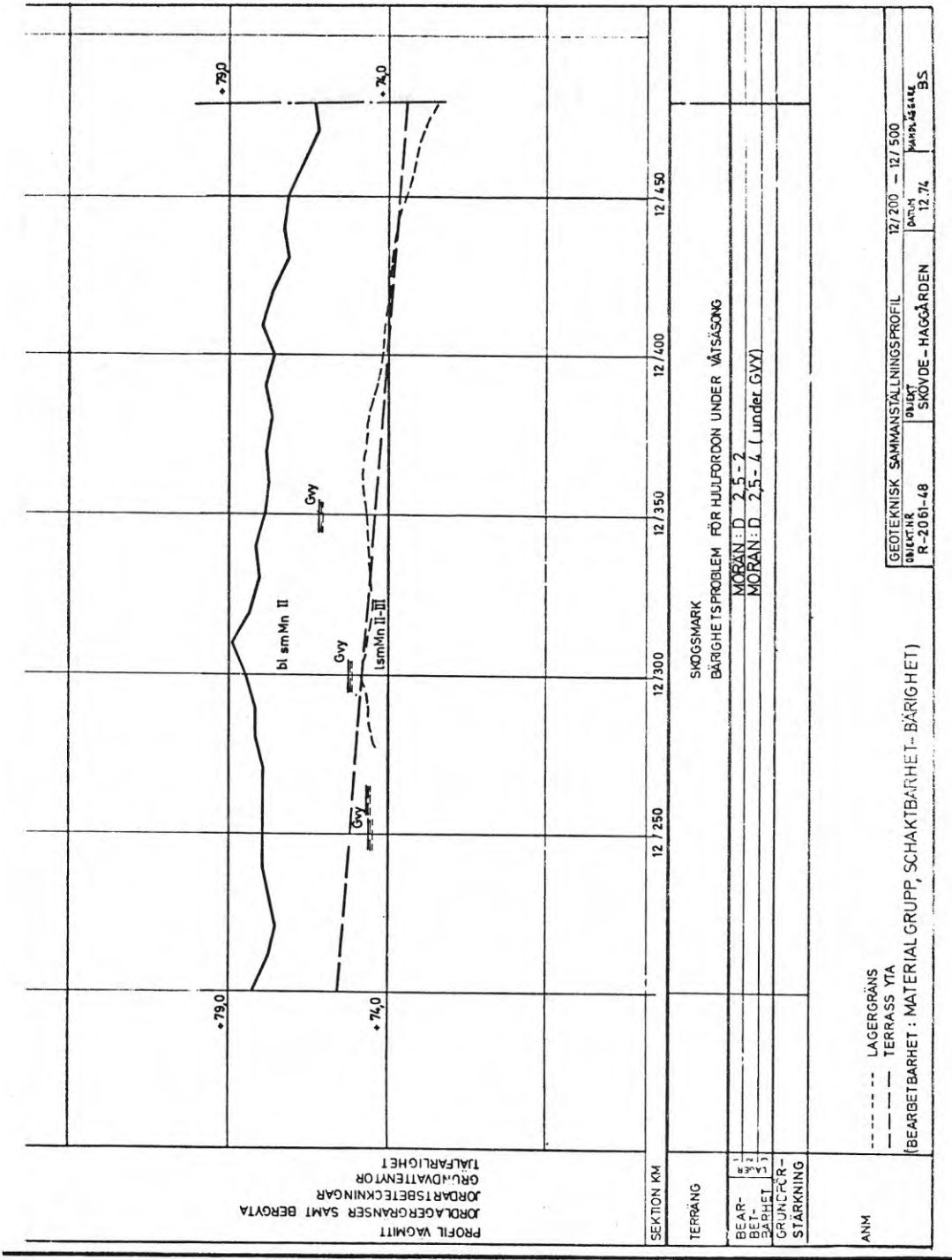
STATENS VÄGVERK

Figur 63.

JORDARTERS BEARBETBARHET

FÖRSÖKSVERKSAMHET SKÖVDE 2

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR



STATENS VÄGVERK

Figur 64.

JORDARTERS BEARBETBARHET

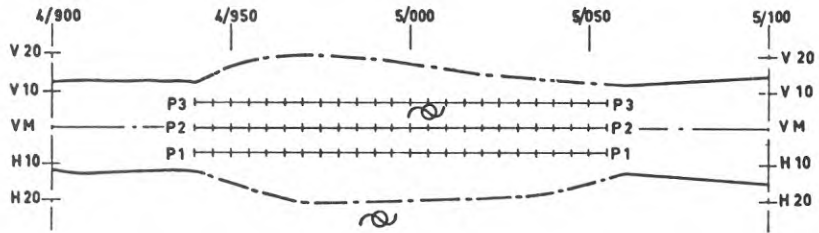
FÖRSÖKSVERSAMHET SKÖVDE 2

SAMMANSTÄLLNINGSPROFIL

GEOTEKNISK SAMMANSTÄLLNINGSPROFIL
 OBLIKT
 R-2061-48
 12/200 - 12/500
 DATUM 12.74
 MARKSÄTTARE BS

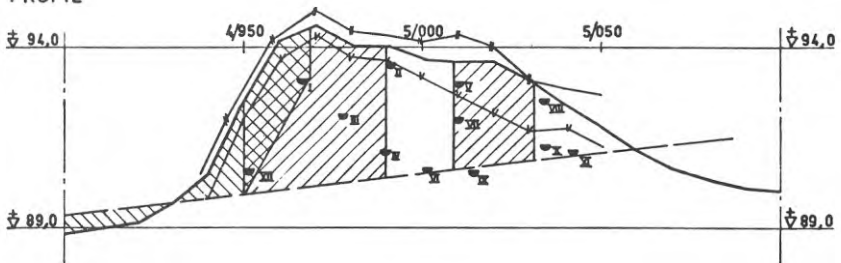
STÖDE SCHAKT 1

PLAN ÖVER FÖRUNDERSÖKNINGAR

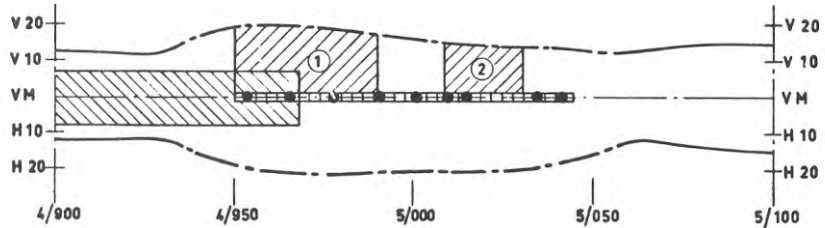


STUDIER OCH PROVTAGNING I SAMBAND MED UTSCHAKTNING

PROFIL



PLAN



TECKENFÖRKLARING:

- VÄGOMRÅDE
- - - - - TERRASSYTA
- + + + + + SEISMIKLINJE
- ⊙ GEOELEKTRISK SONDERING
- VOLYMWIKTSPROV
- ▬▬▬▬▬▬▬ PROVDIKE VÄGMITT 700 vfm³

- KAPACITETSSTUDIER:
- ① : 1260 vfm³
 - ② : 270 vfm³
 - GRÄVMASKIN 1200 l (H 21)
 - ▨ : 550 vfm³
 - BANDTRAKTOR 30 ton (D8 H)

PROVDIKET GRÄVDES MED GRÄVMASKIN H 21 UNDER UTGRÄVNINGEN UTFÖRDES BLOCKRÄKNING SAMT PROVTAGNING FÖR VOLYMWIKTSBESTÄMMNING

UNDERSÖKTA MASSOR C:a 8000 fm³

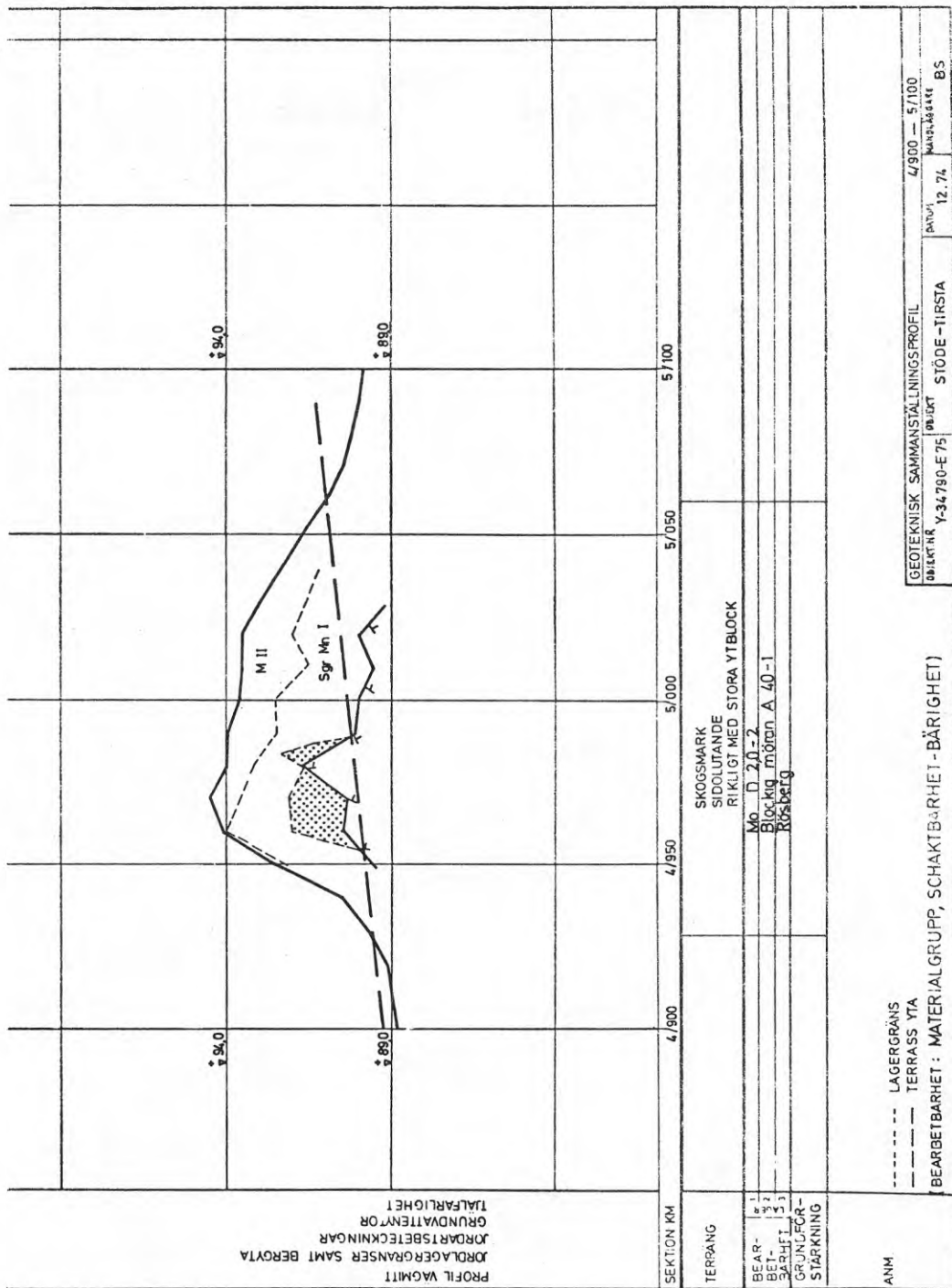
STATENS VÄGVERK

Figur 65.

JORDARTERS BEARBETBARHET

FÖRSÖKSVERKSAMHET STÖDE 1

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR



STATENS VÄGVERK

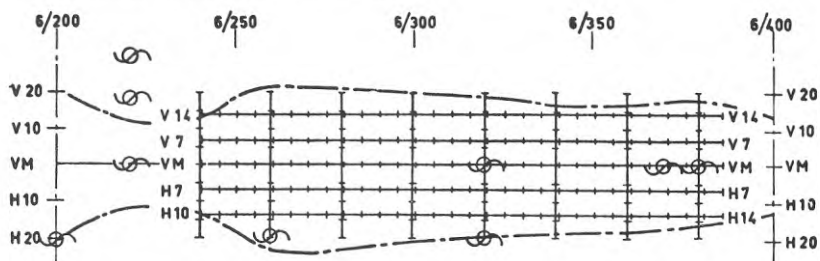
Figur 66.

JORDARTERS BEARBETBARHET

FÖRSÖKSVERKSAMHET STÖDE 1

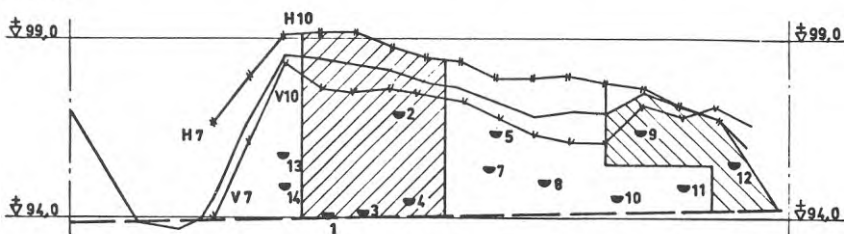
SAMMANSTÄLLNINGSPROFIL

PLAN ÖVER FÖRUNDERSÖKNINGAR

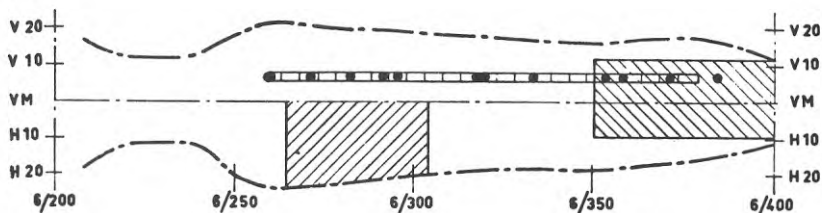


STUDIER OCH PROVTAGNING I SAMBAND MED UTSCHAFTNING

PROFIL



PLAN



TECKENFÖRKLARING:

----- VÄGOMRÅDE

----- TERRASSYTA

+++++ SEISMIKLINJE

○ GEODELEKTRISK SONDERING

● VÖLUMVIKTSPROV

□ PROVDIKET VÄNSTER 7 M. 935 vfm³

PROVDIKET GRÄVDES MED GRÄVMASKIN H 21
UNDER GRÄVNINGEN UTFÖRDES BLOCKRÄKNING

KAPACITETSSTUDIER:

▨ 1640 vfm³
GRÄVMASKIN 1200 l (H 21)

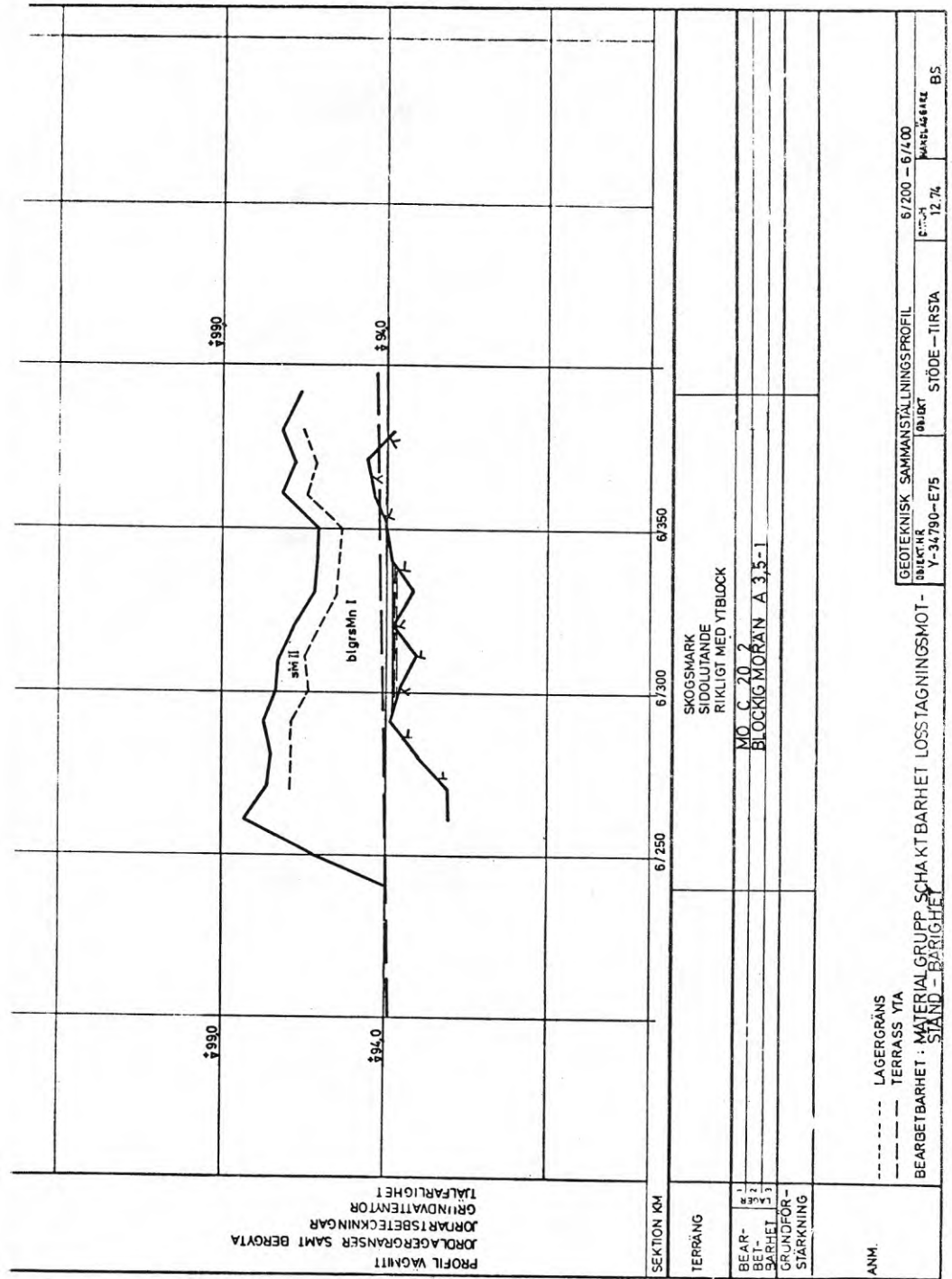
▨ 1440 vfm³
BANDTRAKTOR 30 ton (DB H)

UNDERSÖKTA MASSOR C:A 12 000 fm³

STATENS VÄGVERK

Figur 67.

JORDARTERS BEARBETBARHET
FÖRSÖKSVERKSAMHET STÖDE 2
UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR



STATENS VÄGVERK

Figur 68.

JORDARTERS BEARBETBARHET

FÖRSÖKSVERKSAMHET STÖDE 2

SAMMANSTÄLLNINGSPROFIL

5.2 Beskrivning av använt mätsystem.

Fältundersökningarna åsyftade i första hand insamling av ett stort antal mätdata som sedan kunde användas för modellstudier ur vågutbredningssynpunkt samt för utförande av olika analyser på dator. Upprättande av verklighetsenliga seismiska modeller ansågs att kunna ske på ett tämligen enkelt sätt genom att undersöka de aktuella mätsträckorna även medelst refraktionsseismik (standardseismik). Beträffande vid standardseismik vedertagna mätsystem hänvisas till SGI's särtryck och handlingar nr. 33. En väsentlig förändring i förhållande till den standardseismiska utrustningen utgjordes av databandspelarens användning vid fältförsöken i kombination med trekomponentsgeofoner (triaxal registrering).

Vid Örebro och Stöde-Tirsta har använts 2 st sammankopplade 7 kanals-bandspelare av typ Philips Analog 7 (Terratest AB). Vid Skövde har fältförsöken utförts med en 14 kanals bandspelare av typ Philips Analog 14. Den sistnämnda typens dimensioner beträffande yttermått och vikt är så gott som identiska med den förstnämnda typen. Övergången till 14 kanals bandspelare har således inneburit en kraftig nedbantning av fältutrustningen. Vid samtliga fältförsök med triaxala geofoner användes den i USA tillverkade geofontypen HS-1-LP3D, som omnämns även i kapitel 3, med egenfrekvensen 4,5 Hz.

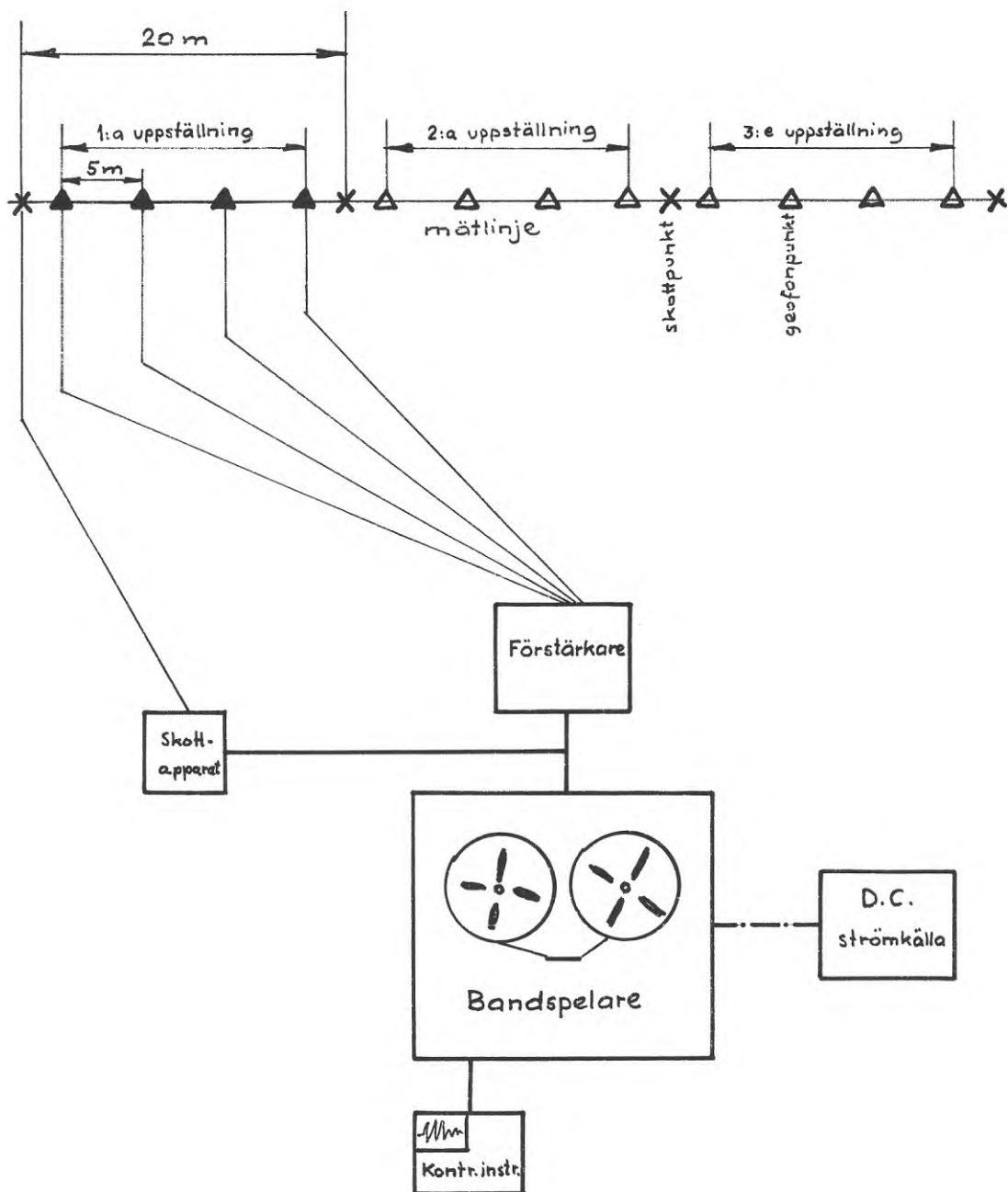
Mätningen med bandspelare sker så att till varje kanal anslutes en vibrationsomvandlare, vilket innebär att 4 st trekomponentsgeofoner upptar 12 st av bandspelarens 14 kanaler. En kanal upptas i regel av triggersignalen eller signalen som markerar exciteringsögonblicket. Till den återstående kanalen, d.v.s. den 14:e kan tidkod eller testsignal från en kvartsoscillator införas.

Philips Analog 14 är en FM (frekvensmodulering) bandspelare med varierbar inställning för bandhastigheten

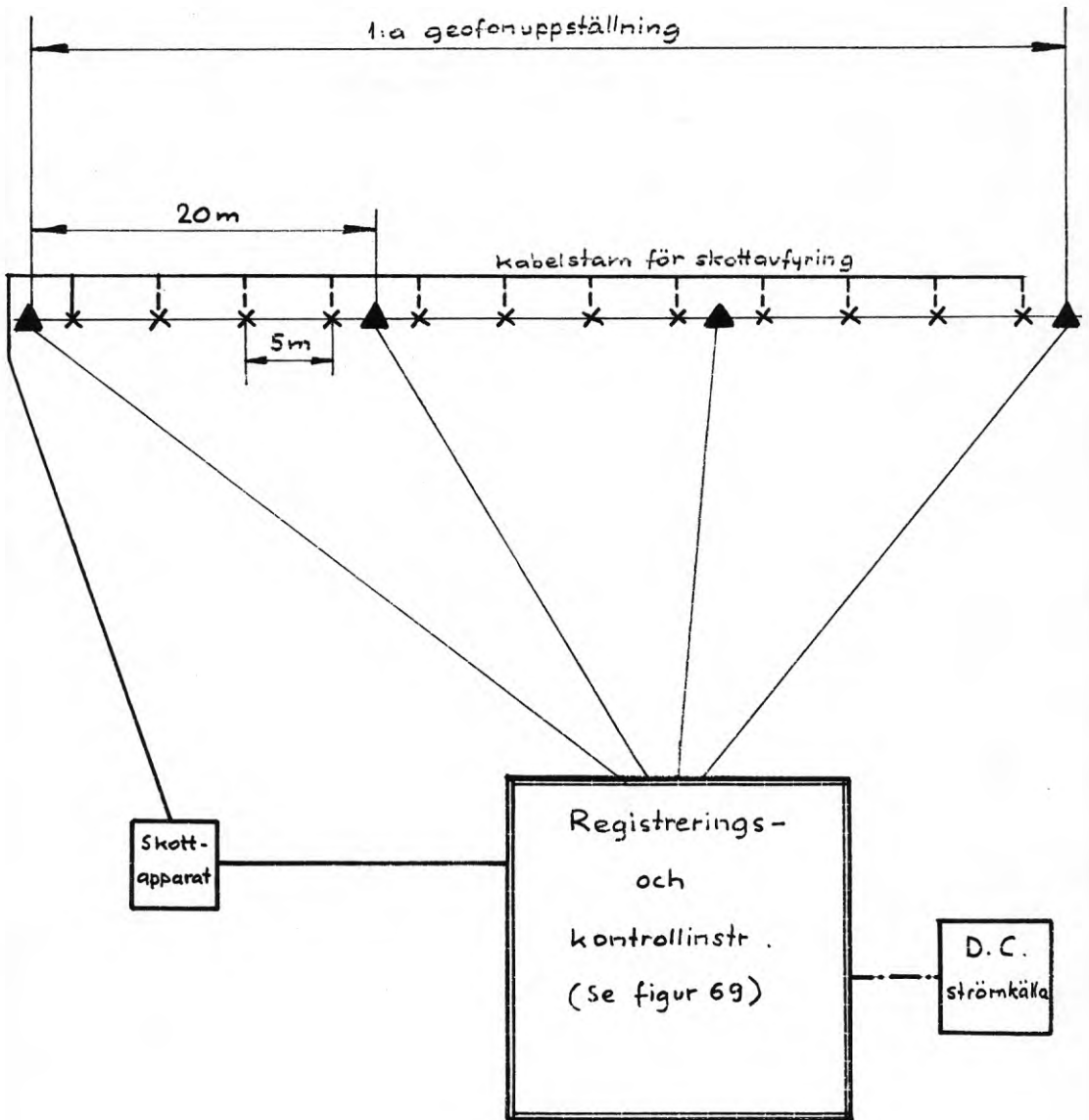
(4 lägen) samt för ingångsspänningen (5 lägen mellan 0,1 och 10 Volt). Under pågående inspelning kan de bandade signalerna samtidigt tas ut via avspelnings-systemet och studeras på oscilloskop eller oscillograf. Vid varje hastighetsomställning sker en automatisk anpassning, genom inbyggda filtersystem, till optimalt frekvensband, vilket är synnerligen viktigt vid FM inspelningar. Den lägsta bandhastigheten 15/16" per sekund innebär en korrekt frekvens- och amplitudöverföring inom frekvensbandet 0-300 Hz, medan vid högsta bandhastighet 30" per sekund sker en korrekt överföring i frekvensbandet 0-10000 Hz.

Mellan geofonen och bandspelaren måste de elektriska signalerna förstärkas genom en förförstärkare. Förförstärkaren för 12 kanaler med 2 lägen för en dynamik av 20 resp. 40 dB. och med inbyggd testsignal, utvecklades vid projektets begynnelse och tillverkades för anslagsmedel. Vid ett något senare skede anskaffades, även detta för anslagsmedel, en 6 kanals UV oscillograf av typ Rapet RMS-11 (se kap. 3) såsom ett kontrollinstrument. Kontrollinstrumentets funktion bestod däri, att undersöka de uppfångade signalernas kvalitet. Databandspelarens elektroniska konstruktion medför nämligen en viss begränsning beträffande de registrerade signalernas maximiamplitud. Genom denna begränsning är det tämligen lätt att åstadkomma en överstyrning av signalen med följden att signalernas höga amplitudtoppar blir avklippta.

Vid fältförsöken användes mätsystem med såväl flyttande observationspunkter, då excitering sker alltid i samma punkt medan geofonerna flyttas, som system med flyttande exciteringspunkter, då geofonen står i samma punkt medan exciteringspunkterna flyttas. Tillämpningen av sistnämnda mätsystem innebär med trekomponentsgeofoner ett mera rationellt system. Mät-systemens schematiska bild framgår av figurerna 69 och 70.



Figur 69: Kopplingschema över använt mätsystem med flyttande observationspunkter.



Figur 70: Kopplingssystem över använt mätsystem med flyttande exciteringspunkter.

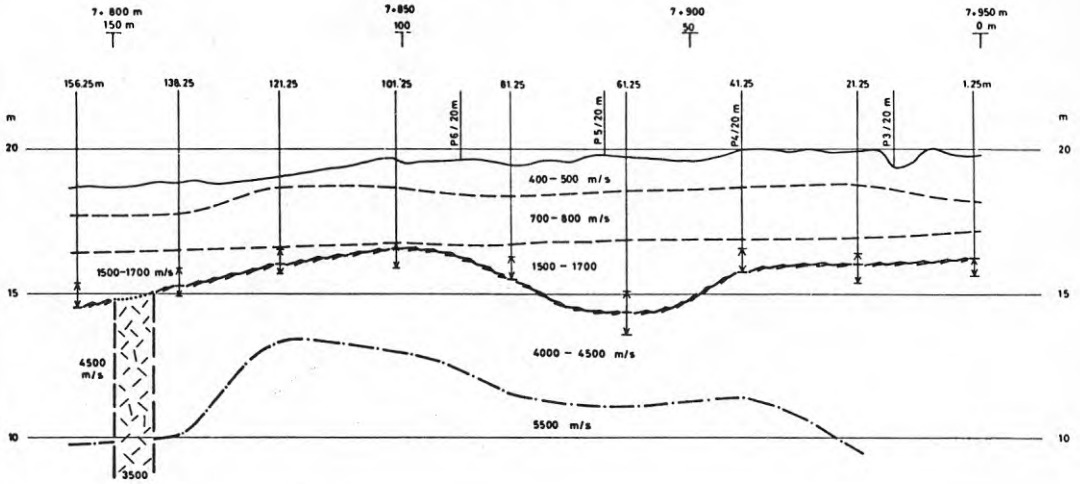
5.3 Redovisning av resultat.

5.3.1 Standardseismik

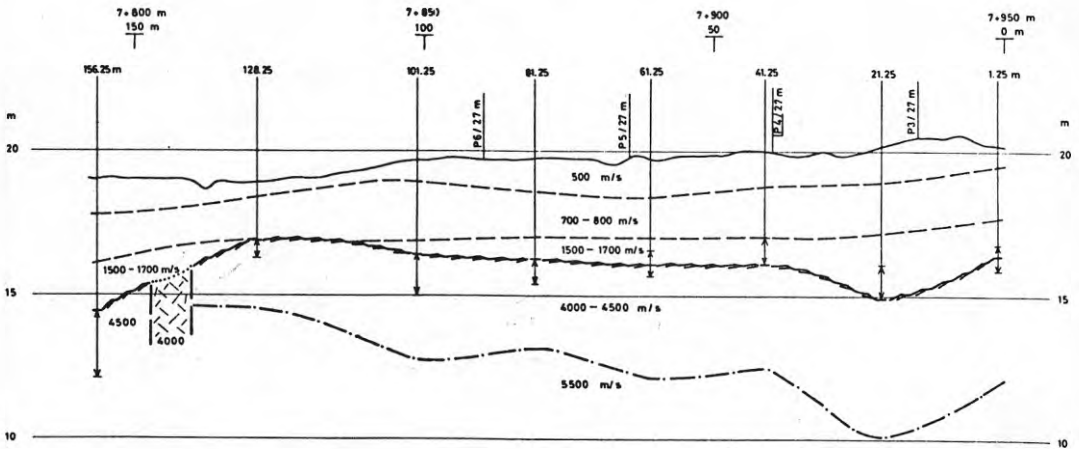
Standardseismiska undersökningar har utförts som rutin vid Vägverkets försöksverksamhet. Undersökningarna har utförts dels av Terratest AB och dels av Jacobson & Widmark AB. Enligt vedertaget redovisningssystem redovisas i en seismisk profil s.k. hastighetsskikt, med bedömd fortplantningshastighet för kompressionsvågen och beräknad tjocklek. Förmodad gränsyta till berg redovisas med bergbeteckning.

I figur 71-75 redovisas en belysande profil per delsträcka. Vid Stöde, delsträcka 4/900-5/100, medförde block, rösberg och grundvatten tolkningssvårigheter, varför resultatet reviderats. Den reviderade profilen redovisas i figur 76. (Figur 71-76 är utdrag ur Vägverkets ovannämnda rapport).

PROFIL 1
(17.5 m H VÄGMITT)



PROFIL 2
(10.5 m H VÄGMITT)

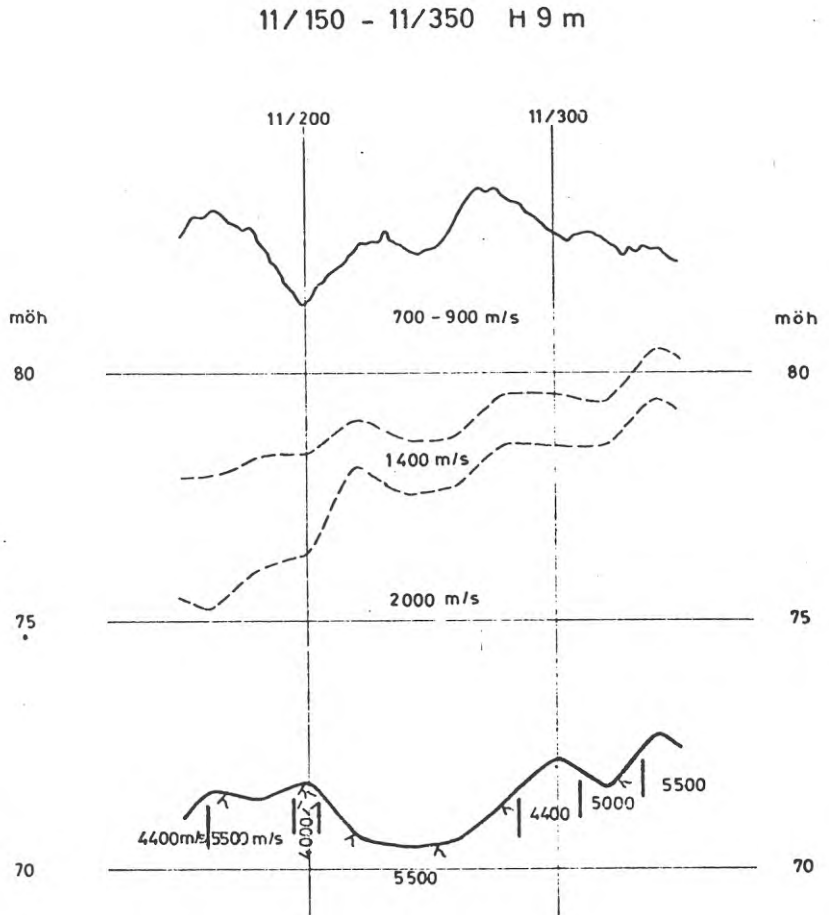


Teckenförklaring:

- BERGLÄGE BERÄKNAT MED SKIKTHASTIGHETER 500, 700-800 m/s
- 500, 700-800 m/s OCH MAXIMAL MÄRTIGHET PÅ SKIKT MED HASTIGHETER 1500-1700 m/s
- INTERPRETERAT BERGLÄGE

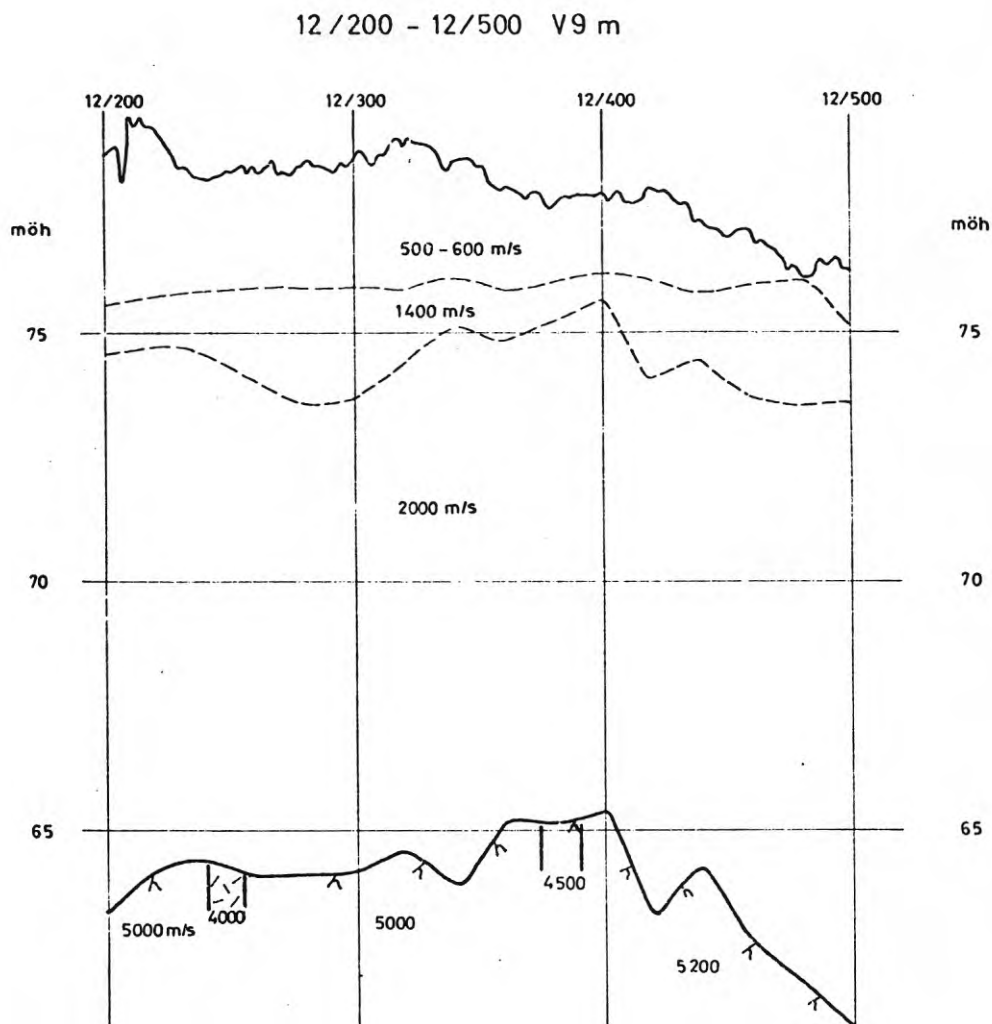
Figur 71.

SEP 1971	TERRATEST AB
BH/HV <i>OH</i>	
SEISMISKA GRUNDUNDERSÖKNINGAR	
VÄG E3, ÅNSTA - NORRPLAN, ÖREBRO	
PROFILERNA 1 OCH 2	



Figur 72.

TEKNIKTEST AB	
DEC. 1972	SEISMISKA GRUNDUNDERSÖKNINGAR
POB/MBJ <i>3</i>	Rv 48 SKÖVDE - HAGGÅRDEN
	DELSTRÄCKA 11/150 - 11/350 V9m och H9m
	Seisnometrar på träpålar (längd = 0.4 m), avstånd 2.5m
	PILAGA 6



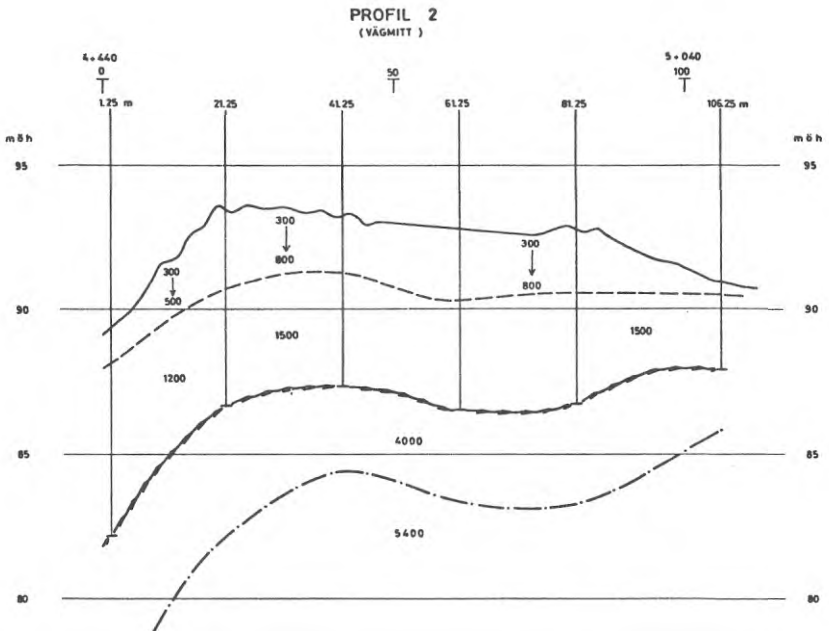
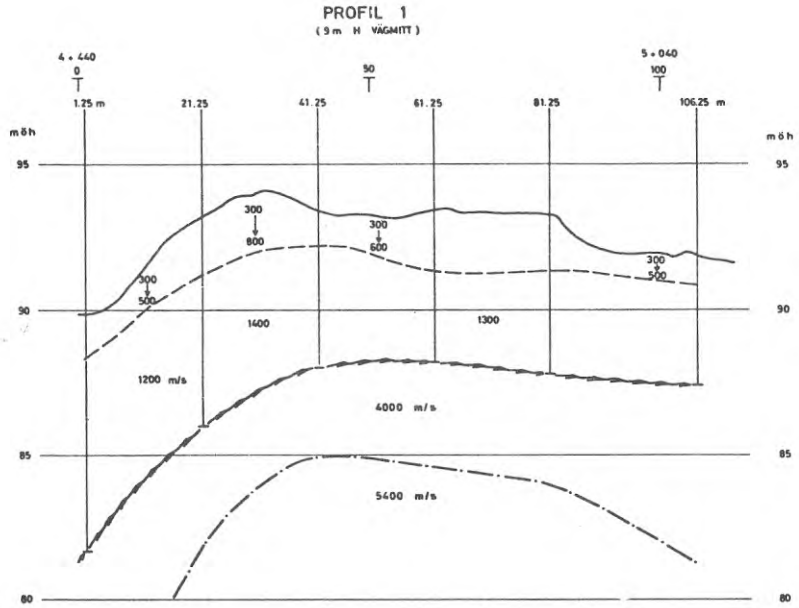
Figur 73.

DEC. 1972	
POB/MBJ	3;

TERRATEST AB

SEISMISKA GRUNDUNDERSÖKNINGAR
 Rv 48 SKÖVDE - HAGGÅRDEN
 DELSTRÄCKA 12/200 - 12/500, V9m och H9m
 Seismometrar på tråpnålar (längd=0.4 m) avstånd= 2.5m

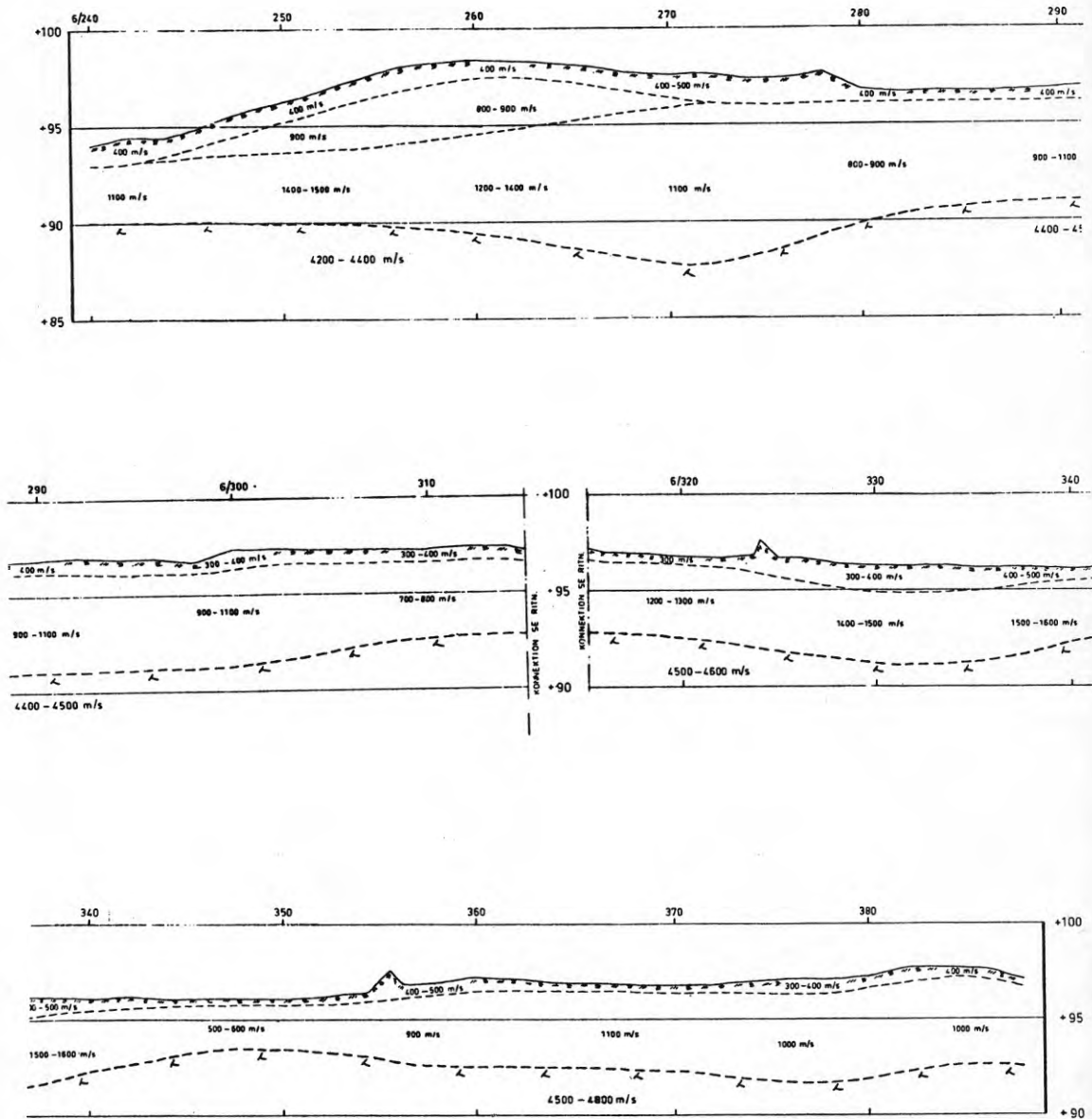
BRAGA 11



Figur 74.

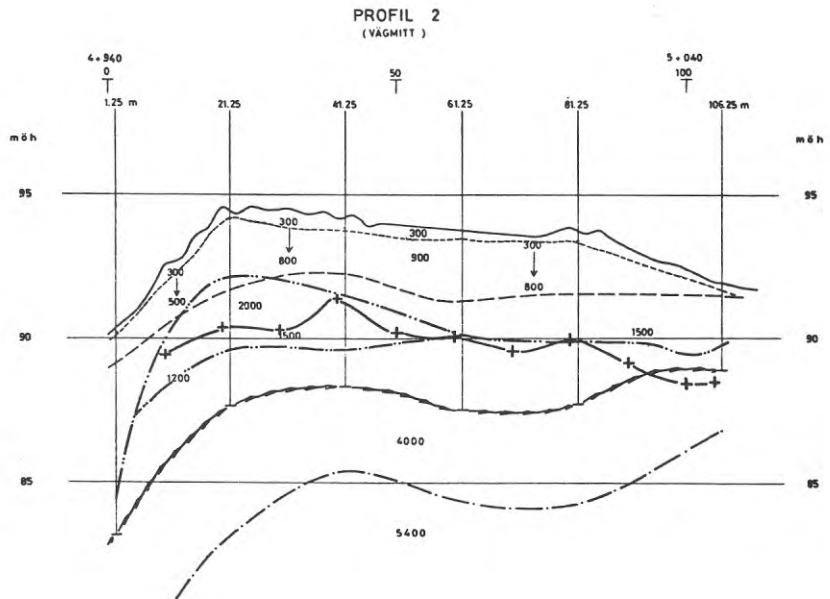
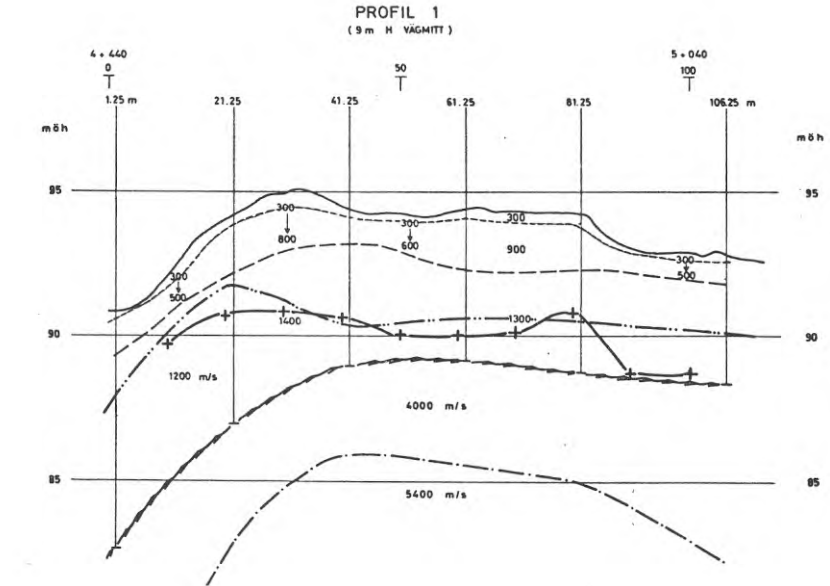
SEP. 1971		TERRATEST AB	
BH/HV	<i>OH</i>	SEISMISKA GRUNDUNDERSÖKNINGAR	
		R-VÄG E 75, STÖDE - TIRSTA	
		PROFILERNA 1 - 4	
		BILAGA 4	

VÄNSTER 70 M



Figur 75.

J&W AB JACOBSON & WILHELMSSON, S-707 80 BODEN Företag 181 06 Lönnelöv 1 Bildat och kommersiellt ansvarigt av: STREBEV Grafiskt ansvarigt: <i>[Signature]</i>	VAG E 75 DELEN STÖDE-TIRSTA SEISMISK UNDERSÖKNING	
	Anordningsnummer: 71 73 15	Måstingsdatum:



+ + — BERGYTA ENLIGT SCHAFTNING
 — BERGYTAN ENLIGT SEISMIKEN IFALL
 HASTIGHETEN 1200-1600 m/s EJ MEDTAGES

SEP. 1971		TERRATEST AB	
BH/HV	<i>OH</i>	SEISMISKA GRUNDUNDERSÖKNINGAR, KOMPLETTERINGSRAPPORT	
R-VÄG E 75, STÖDE - TIRSTA			
PROFILERNA 1 - 4			
			BILAGA 2

Figur 76: Reviderad redovisning.

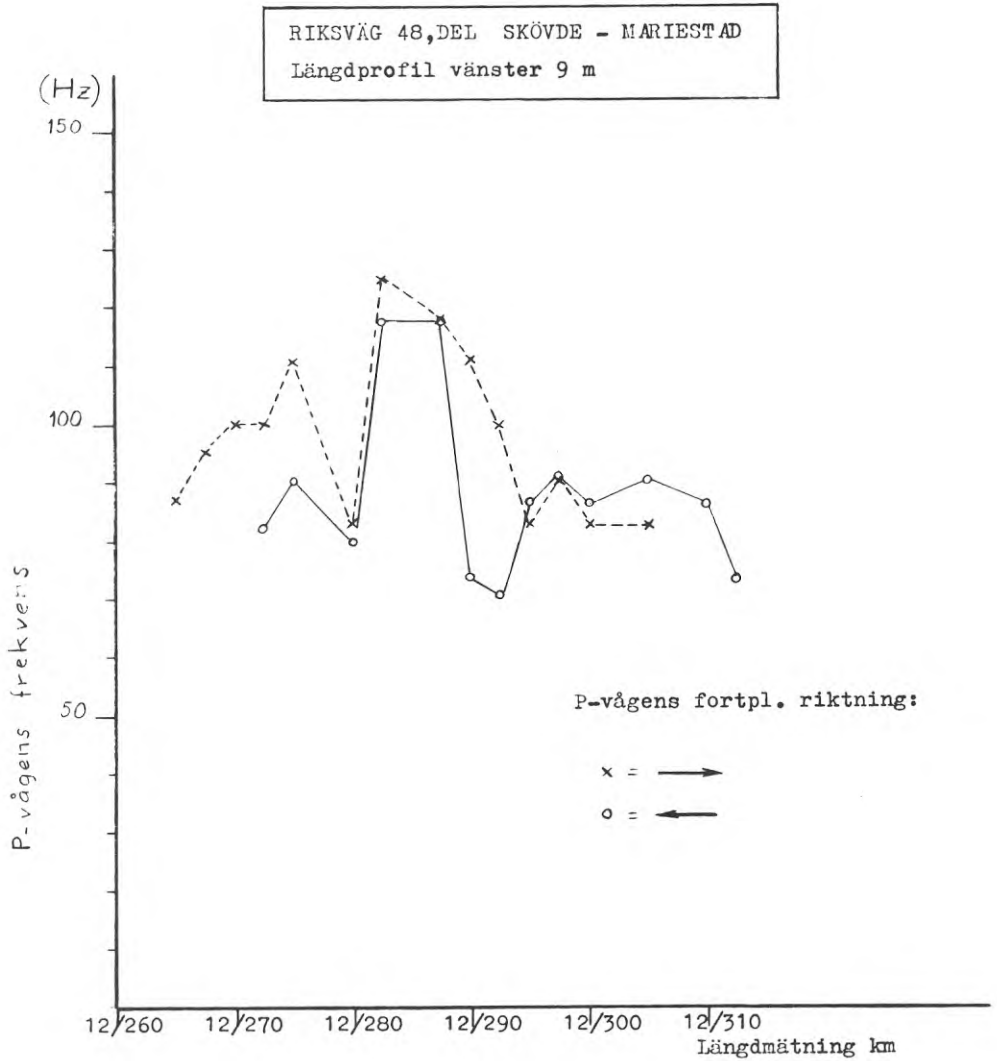
5.3.2 Frekvensanalys

Manuell utvärdering

De med standardseismisk utrustning erhållna mätresultaten har behandlats direkt på seismogrammen enligt den analysmetod som beskrives i kapitel 4.2. Denna typ av frekvensanalys har tämligen entydigt visat att den primära longitudinella (P) vågens frekvens påverkas av lokala inhomogeniteter i jorden.

I figur 77 redovisas ett avsnitt från Skövde där P-vågens frekvens visar en markant ökning där blockhalten blir lokalt lägre än normalt i schakten. Samma erfarenheter har erhållits även vid Stöde. I de avsnitt där "facit" visar en högre blockhalt än normalt uppträder en frekvensminskning hos P-vågen. Denna minskning vid hög blockhalt förefaller dock mindre markant än motsvarande ökning vid lägre blockhalt.

Förklaringen av ovannämnda fenomen tycks finnas hos vågpaketets karaktär, som utgör ett tämligen välutforskat kapitel inom seismologin. Vid lokala inhomogeniteter i ett medium rubbas vågfronterna och vågpaketet, som innehåller flera faser av en vågrörelse, blir till karaktären av ett dispersivt svängningsförlopp. Detta innebär att vågpaketet innehåller antingen succesivt tilltagande eller succesivt avtagande periodlängder, dvs. vågrörelsen representerar ett bredare frekvensband och inte bara en enda frekvens. Om P-vågen, som är en refrakterad våg, från början hade en dispersiv karaktär exempelvis med succesivt avtagande periodlängder, kan denna karaktär vid mediets plötsliga förändring kastas om, dvs. vågpaketets dispersiva karaktär omvandlas till successivt tilltagande periodlängder. I figur 78 visas den schematiska bilden av ett dispersivt vågpaket med succesivt avtagande respektive successivt tilltagande periodlängder.

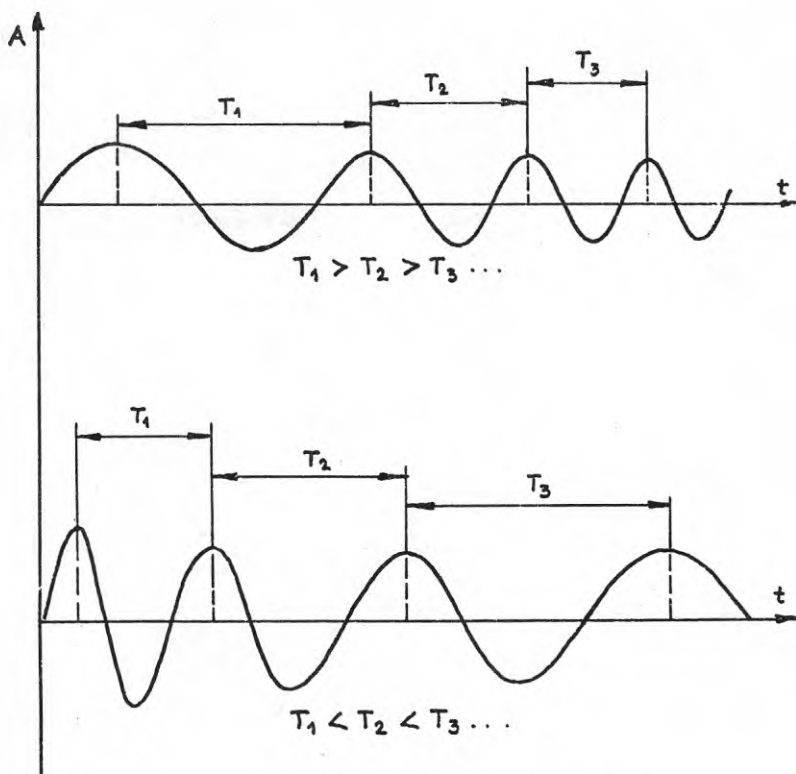


"FACIT"

N	L	H
---	---	---

N= blockhalten \leq normal
 L= blockhalten \ll normal
 H= blockhalten $>$ normal

Figur 77: Manuell frekvensanalys.



Figur 78: Schematisk bild över den s.k. dispersiva vågrörelsen representerad i tidsprojektion.

Vid den manuella frekvensanalysen uppmärksammades första gången att den i bergytan refrakterade P-vågen, trots en längre gångväg, uppträder vid markytan med avsevärt högre frekvens än den P-våg som refrakteras i gränsytan mellan en lösare och hårdare packad morän. Detta innebär att vid energitransmissionen i bergytan förändras frekvensen enligt följande:

$$f \text{ infallande våg (morän)} < f \text{ refrakterad våg (berg)}$$

Detta konstaterade faktum ligger till bevis för den teorin att de olika medierna i undergrunden representerar genom sina geometriska dimensioner och elastiska egenskaper olika svängningssystem med vissa bestämda elastiska identiteter, som gör sig gällande vid dynamisk belastning.

Fourieranalys

Registrering av hela svängningsförloppet på databandspelare har möjliggjort bearbetning med dator. Med hjälp av Fourieranalys har frekvensinnehållet i hela svängningsförloppet undersökts. Tidsfönstret begränsades till 0,5 sekunder, vilket endast i några enskilda fall visat sig vara för kort. Vid analysen användes en datamaskin av typ MP 5200 A, kombinerad med en HP fourieranalyzer, vilken ställts till förfogande genom Hewlet & Pachard, Stockholm. Vid digitaliseringen användes en samplingstäthet av 1K, dvs. en sampling per 0,001 sek.

Terratest AB, som utfört registreringar och analys vid Örebro och Stöde, har utfört analyser med dator PDP 11. Tidsfönstret begränsades där till 0,1 sekunder, vilket dock givit tillämpbara resultat.

Vägverket har dessutom engagerat FOA för kompletterande fourieranalyser med varierande tidsfönster.

I enlighet med beskrivningen i kapitel 4.2 redovisas resultatet i form av energi- eller effektspektra. Ur summa energikurvan är en "frekvensmodul" bestämd vid 75 resp. 80% av totala energiinnehållet.

I figur 79-81 redovisas resultat från Örebro. Frekvensmodulen för vertikalkomponenten är i de redovisade exemplen 70, 65 resp. 57 Hz vid 75%.

I figur 82-84 redovisas resultat från Stöde. Frekvensmodulen för vertikalkomponenten är i de redovisade exemplen 140, 80 resp. 150 Hz vid 75%.

I figur 85-89 redovisas resultat från Skövde.

I figur 89 visas frekvensmodulen vid 80% längs mätsträckan i höger 9 m, delsträcka 11/200-11/300 för de tre (X, Y och Z) komponenterna. Frekvensmodulen i vertikalled varierar mellan 45 och 70 Hz.

I figur 90 visas resultat från Vinterviken (berg). Frekvensinnehållet för vertikalkomponenten ligger mellan 500 och 2000 Hz.

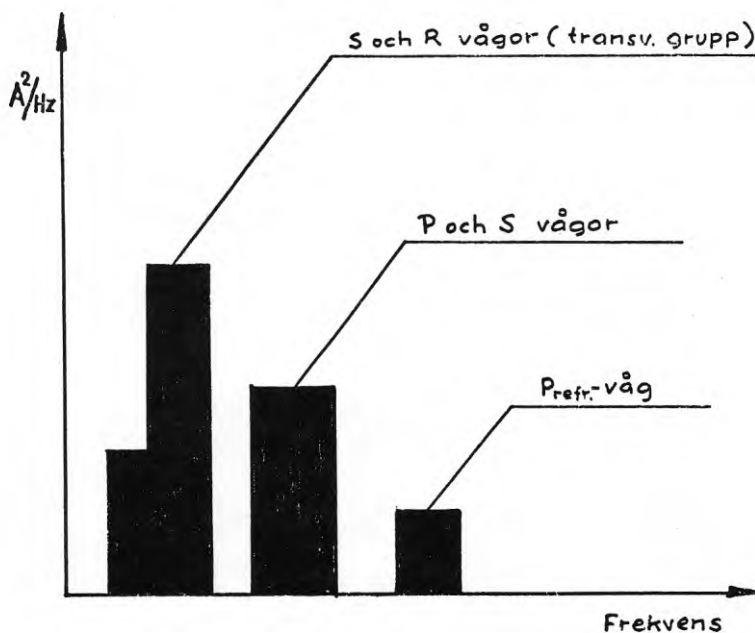
I figur 91 visas resultat från Skå Edeby (lera). Frekvensinnehållet för vertikalkomponenten domineras av frekvenser omkring 10 Hz.

En undersökning av lokala förhållandens inverkan på stötförloppets spektralbild, genom studium av frekvensspektra från olika skott, skottavstånd och riktningar visar, att frekvensinnehållet beror på undergrundens egenskaper:

- i första hand kring exciteringspunkten
- i andra hand mellan exciterings och observationspunkt
- i tredje hand kring observationspunkten.

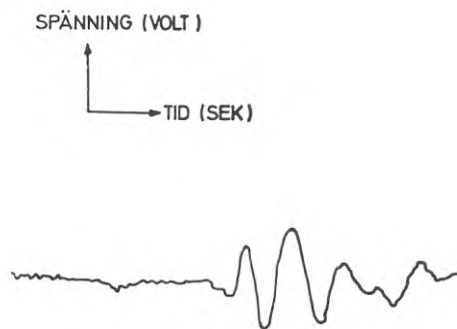
Detta är dock endast verifierat för frekvensmodulen, dvs. spektralbilden behandlas i sin helhet och ingen hänsyn tages till enskilda vågor.

Uppbyggnaden av en spektralbild beror dels på olika ingående vågors frekvensinnehåll och dels på interferensfenomen. Om man bortser från interferensfenomen förefaller uppbyggnaden följa ett vissa bestämt mönster som åskaådliggöres i figur 92 nedan.



Figur 92: Schematisk bild över stötförloppets karakteristiska mönster (Z-komponent) vid Fourieranalys.

ANALOG REGISTRERING

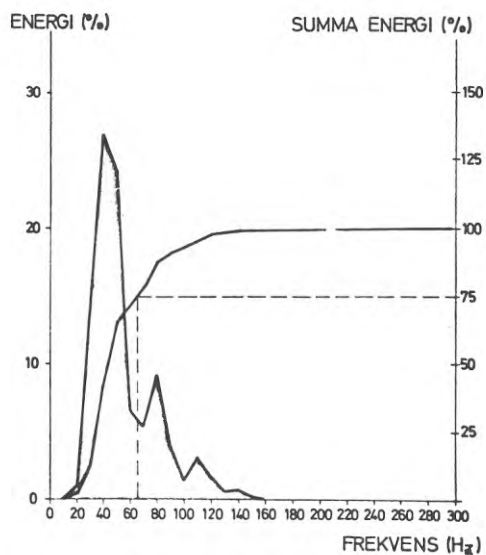
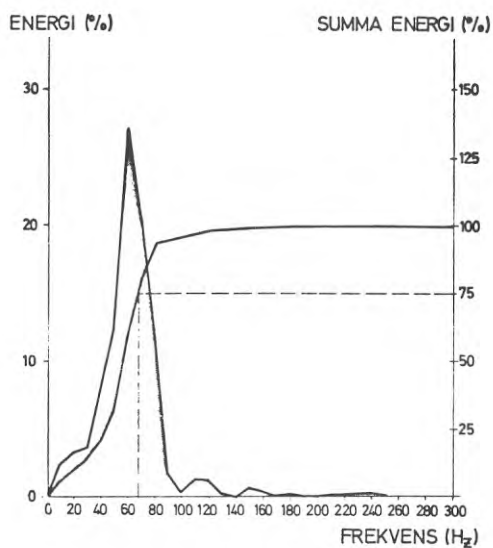


Y-KOMPONENT



Z-KOMPONENT

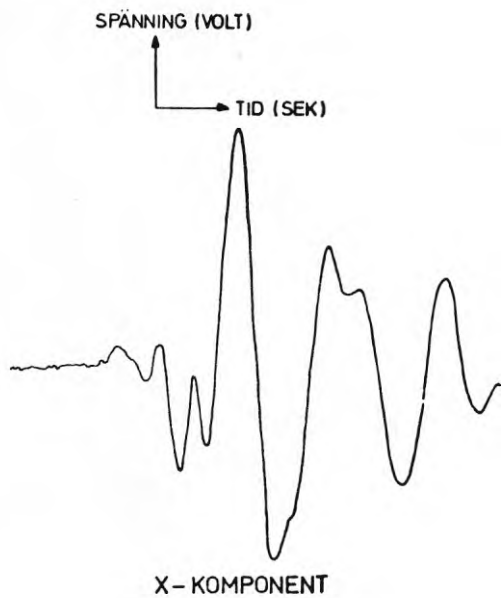
FREKVENSVÄRDERING



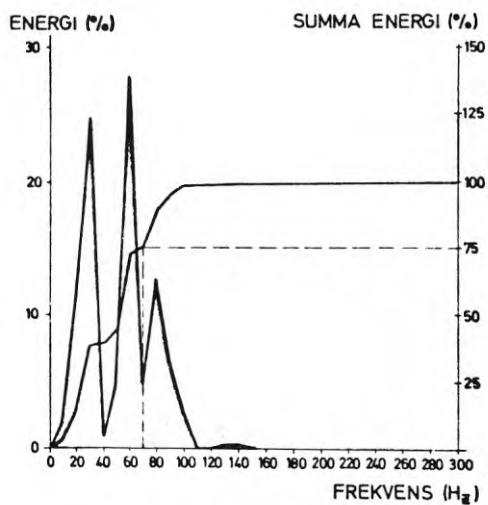
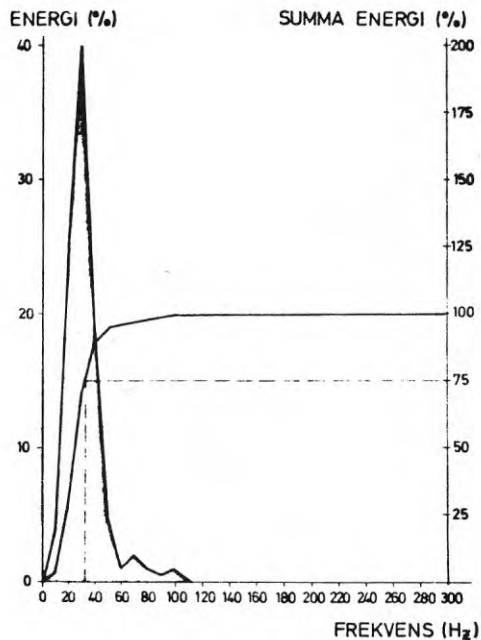
Figur 79: Resultat Örebro. Profil H 17,5. Skottavstånd
2,5 m.

(Registreringen är utförd av Terratest AB på uppdrag av SVV)

ANALOG REGISTRERING



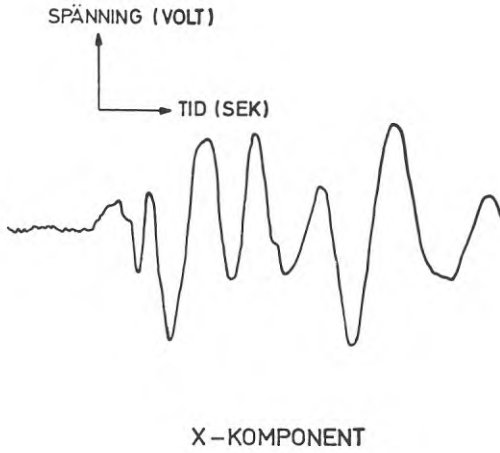
FREKVENSVÄRDERING



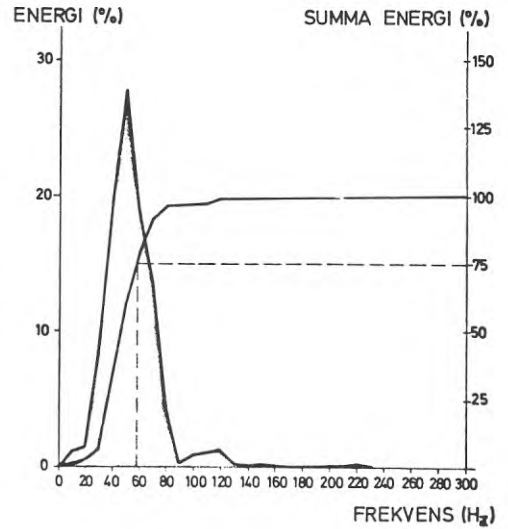
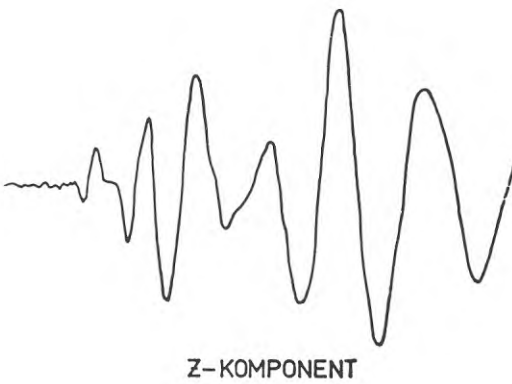
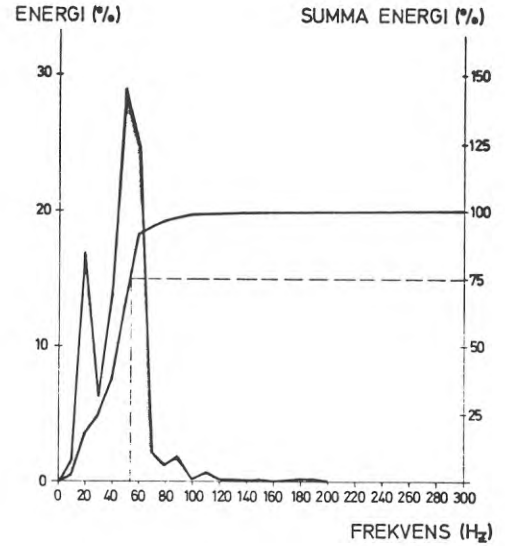
Figur 80: Resultat Örebro. Profil T 7/910, Skottavstånd 13,7 m.

(Registreringen är utförd av Terratest AB på uppdrag av SVV)

ANALOG REGISTRERING



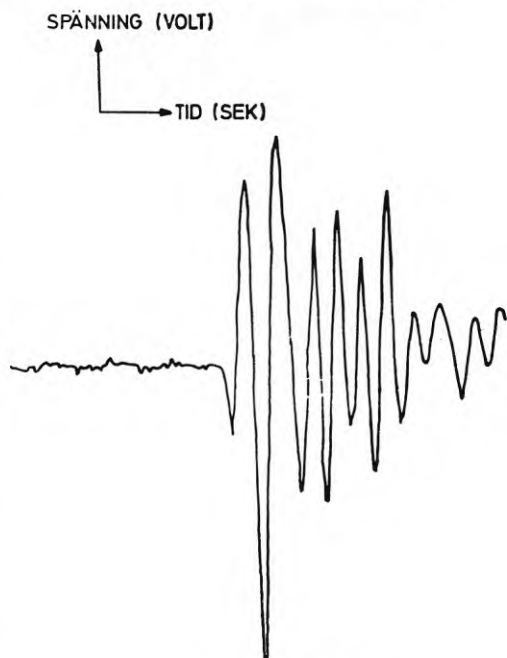
FREKVENSVÄRDERING



Figur 81: Resultat Örebro. Profil T 7/935, skottavstånd 13,7 m.

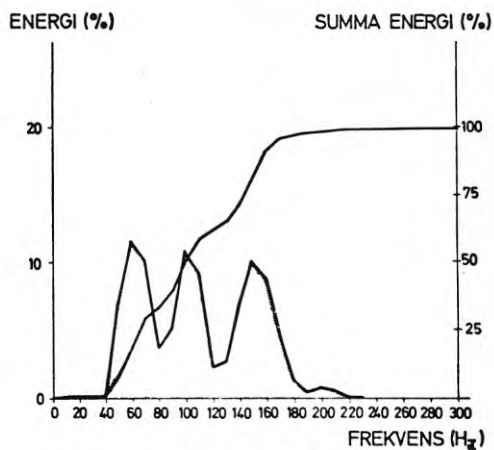
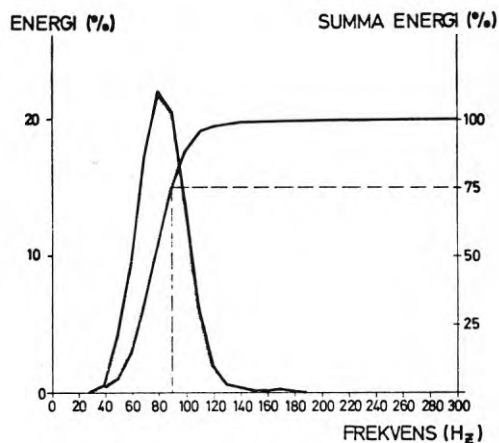
(Registreringen är utförd av Terratest AB på uppdrag av SVV)

ANALOG REGISTRERING



Y-KOMPONENT

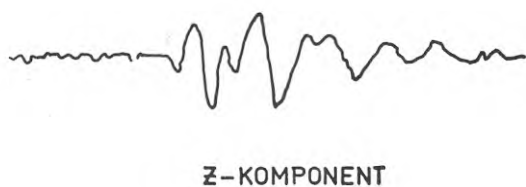
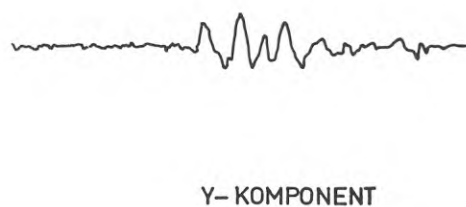
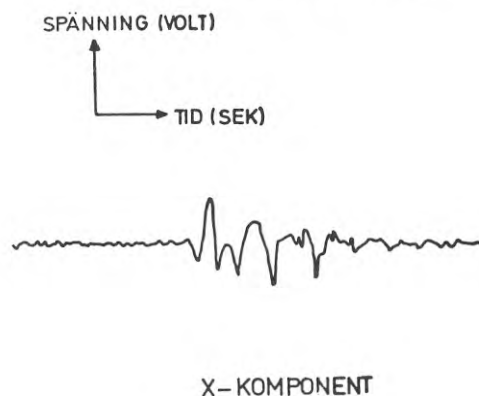
FREKVENSVÄRDERING



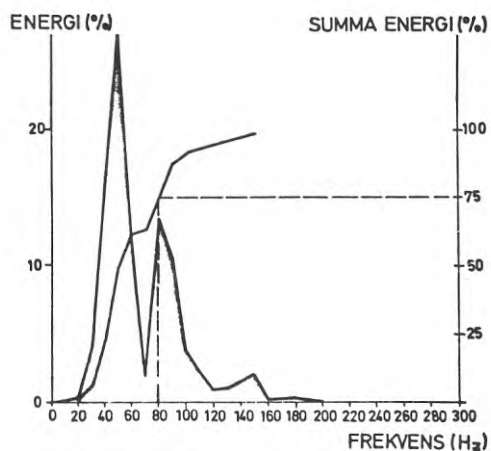
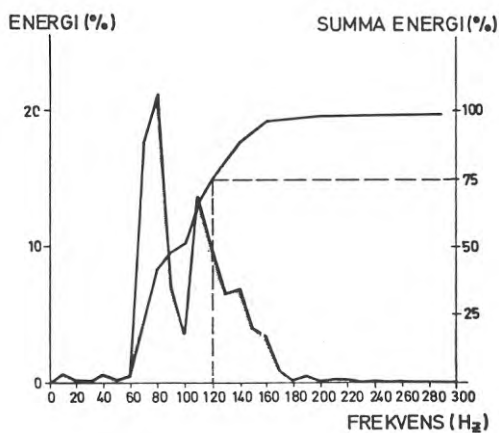
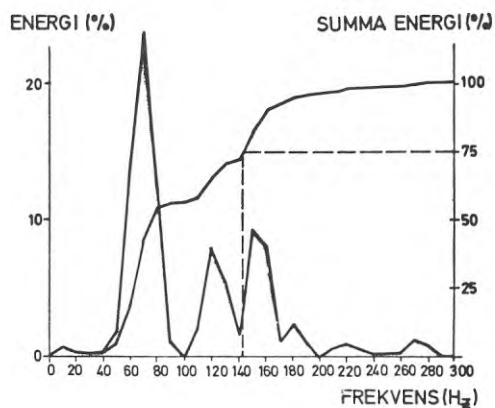
Figur 82: Resultat Stöde 1. Profil V 9, skottavstånd
11,5 m.

(Registreringen är utförd av Terratest AB på uppdrag av SVV)

ANALOG REGISTRERING



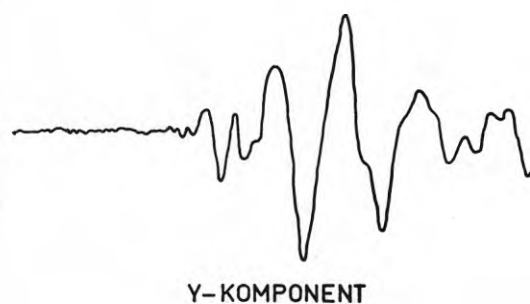
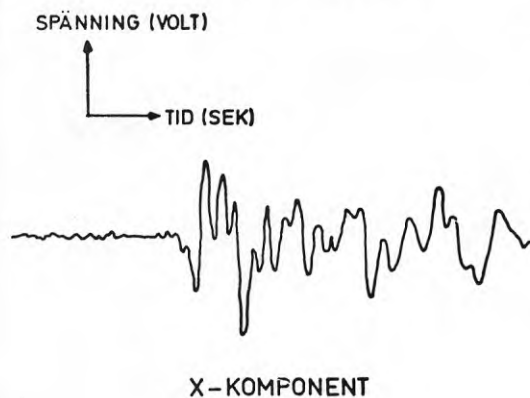
FREKVENSVÄRDERING



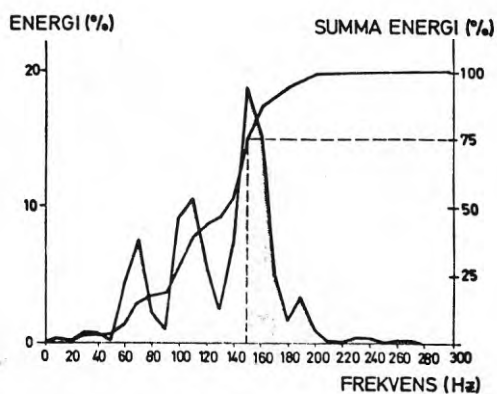
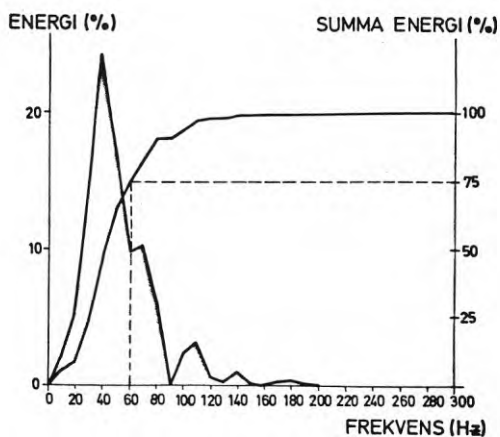
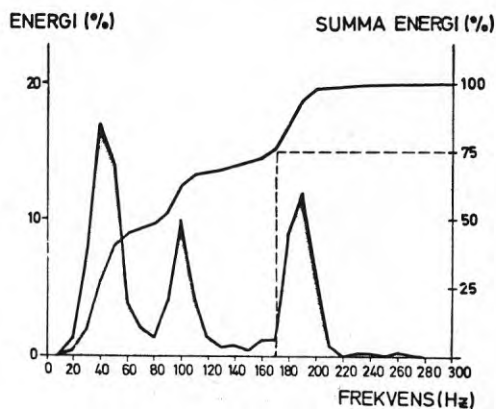
Figur 83: Resultat Stöde 1. Profil H9, skottavstånd
4,5 m.

(Registreringen är utförd av Terratest AB på uppdrag av SVV)

ANALOG REGISTRERING



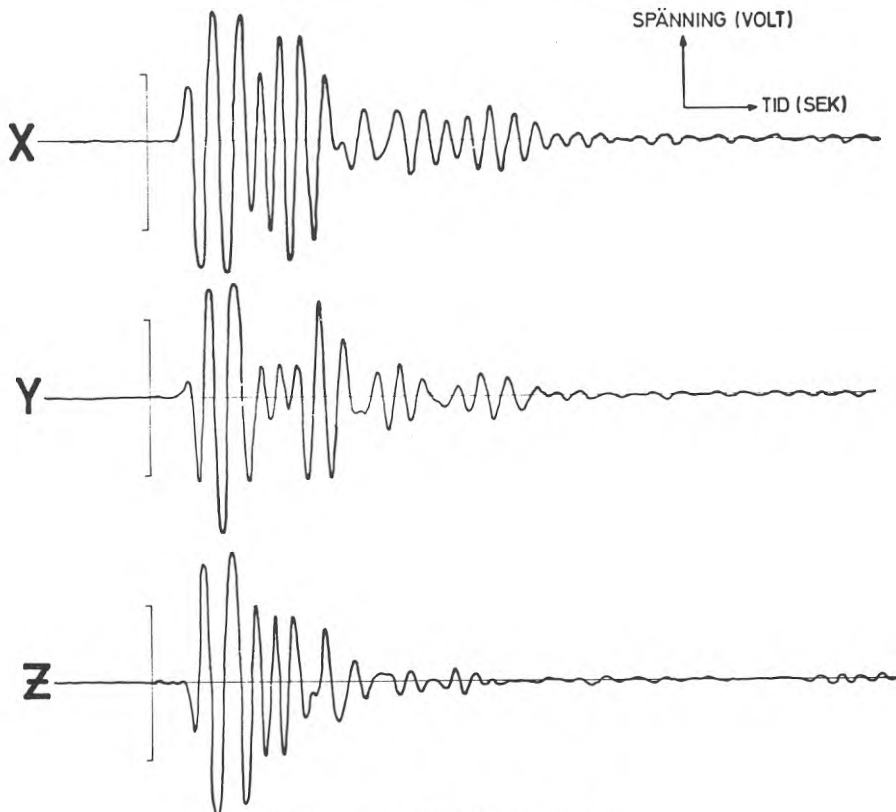
FREKVENSVÄRDERING



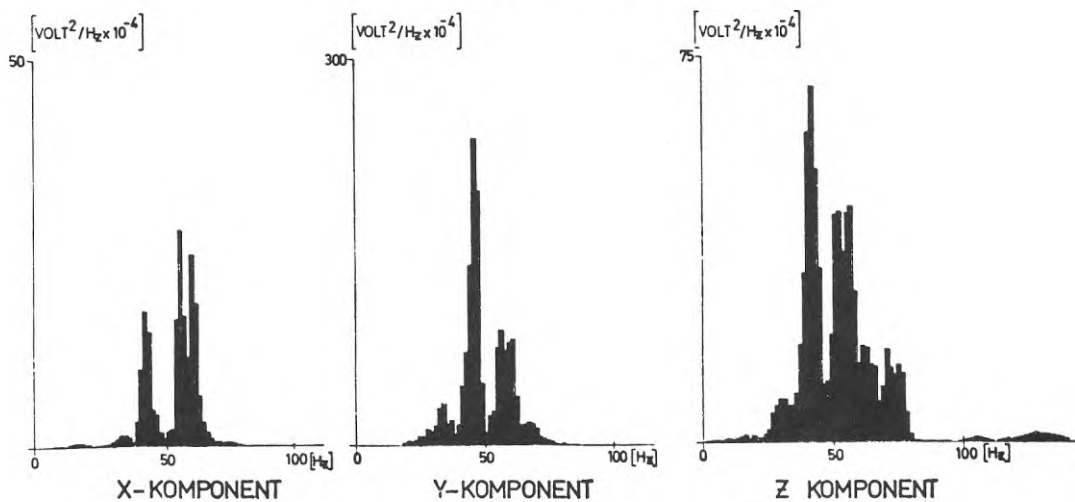
Figur 84: Resultat Stöde 2. Profil V7, skottavstånd
6,5 m.

(Registreringen är utförd av Terratest AB på uppdrag av SVV)

ANALOG REGISTRERING

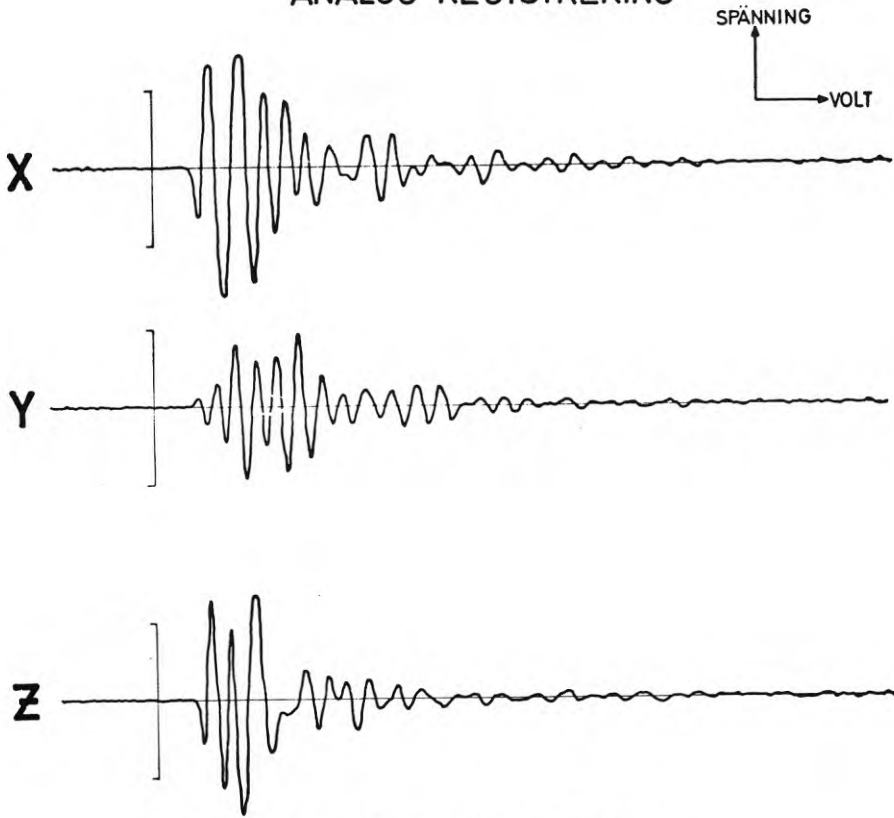


FREKVENNS UTVÄRDERING

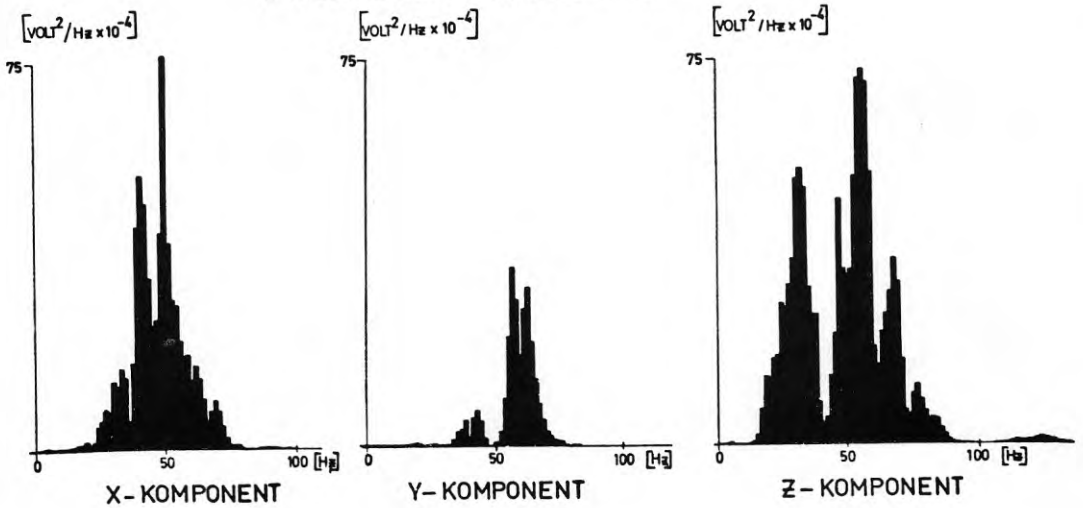


Figur 85: Resultat Skövde 1. Profil H9, skottavstånd 7.5 m.

ANALOG REGISTRERING

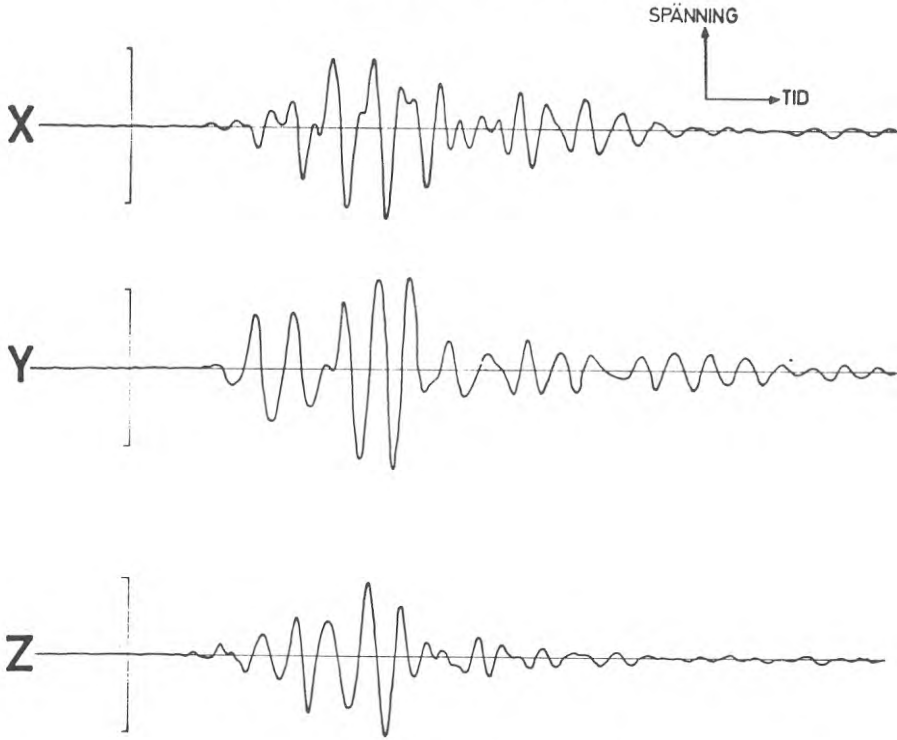


FREKVENNS UTVÄRDERING

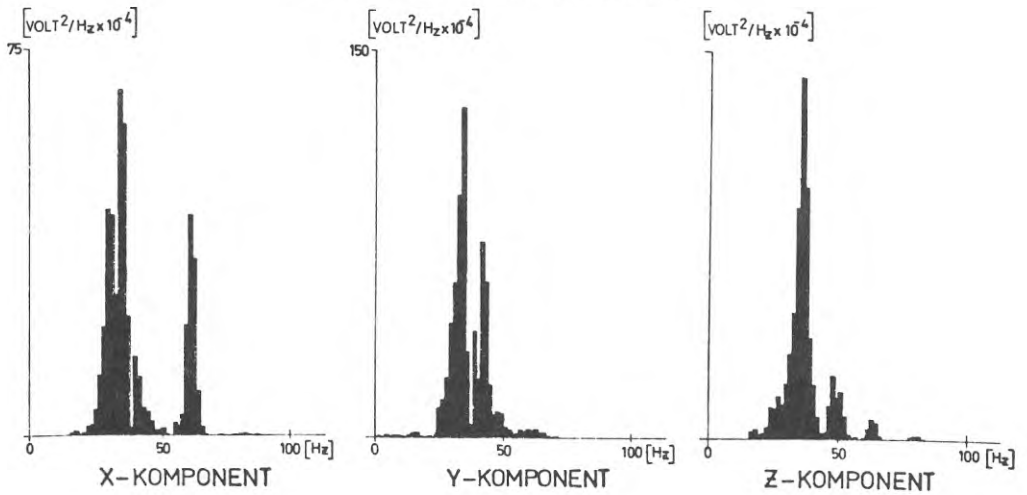


Figur 86: Resultat Skövde 1. Profil H9, skott-
avstånd 12,5 m.

ANALOG REGISTRERING

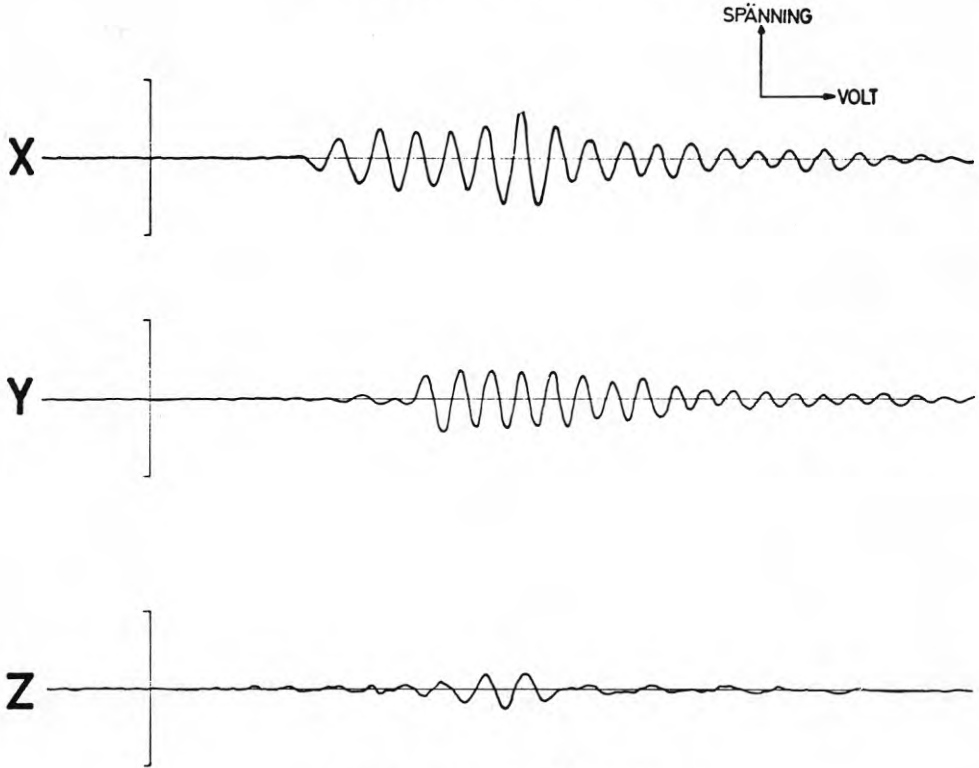


FREKVENNS UTVÄRDERING

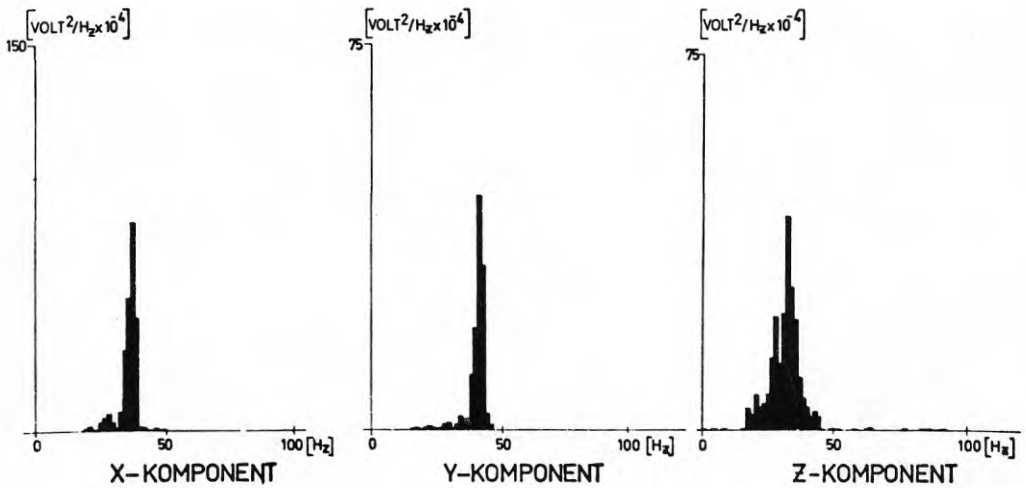


Figur 87: Resultat Skövde 1. Profil H9, skottavstånd 32,5 m.

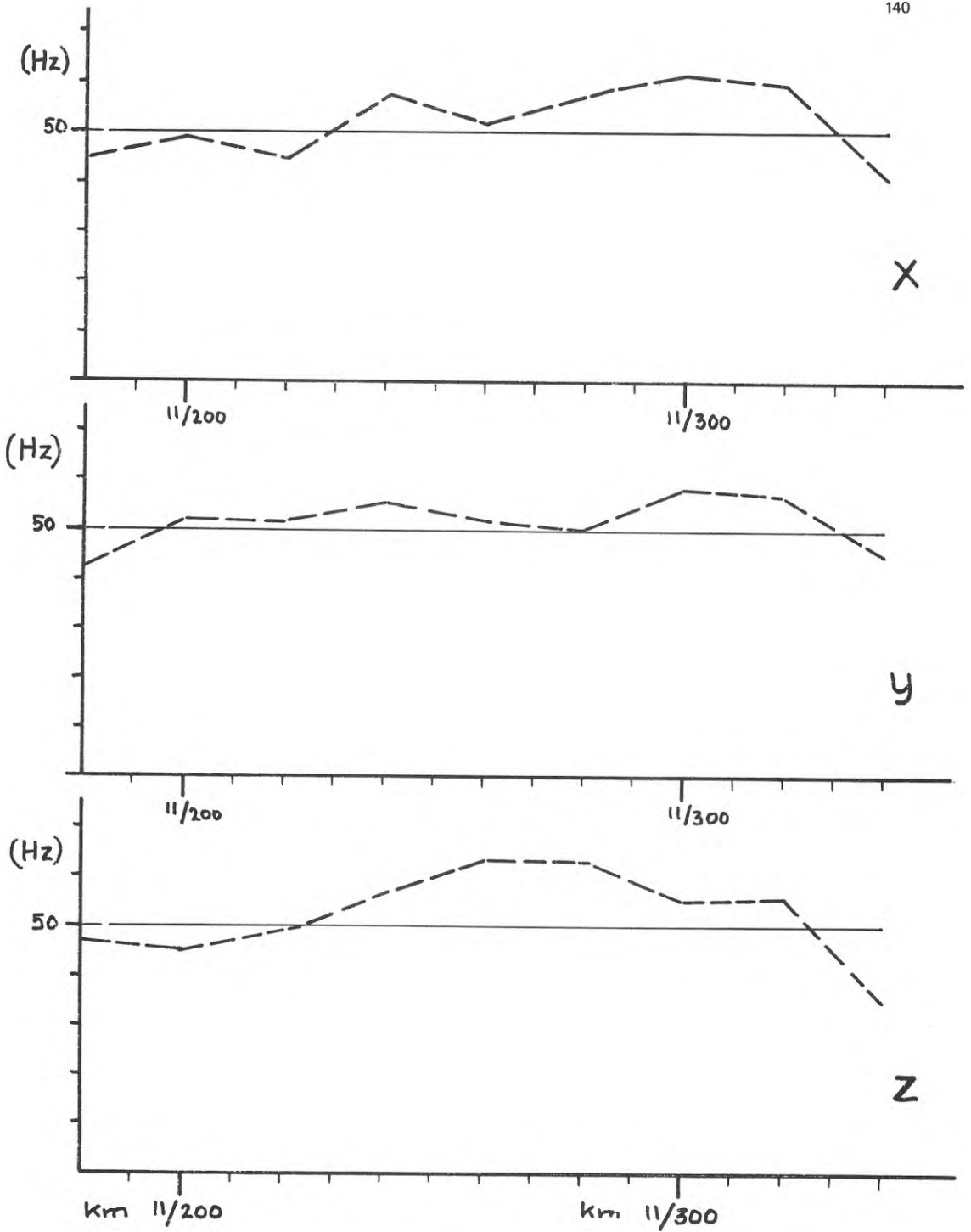
ANALOG REGISTRERING



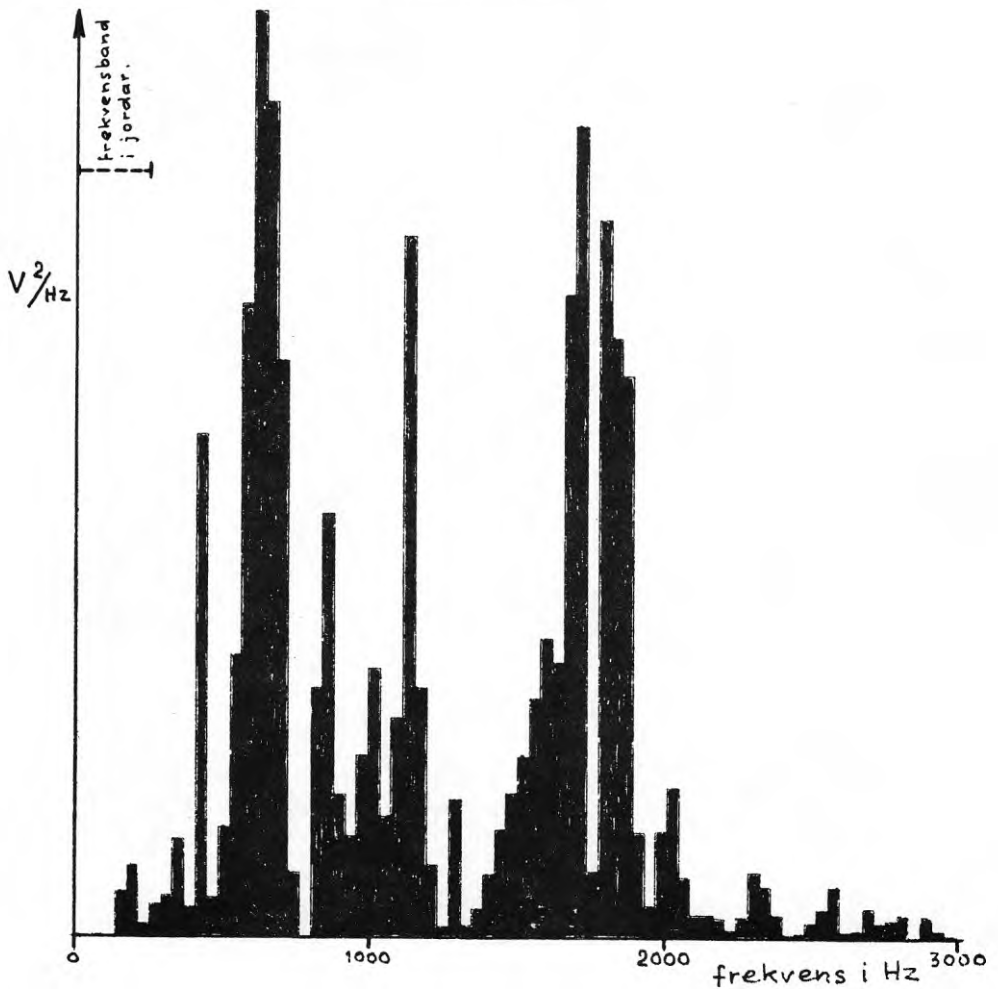
FREKVENNS UTVÄRDERING



Figur 88: Resultat Skövde 1. Profil H9, skott-
avstånd 52,5 m.

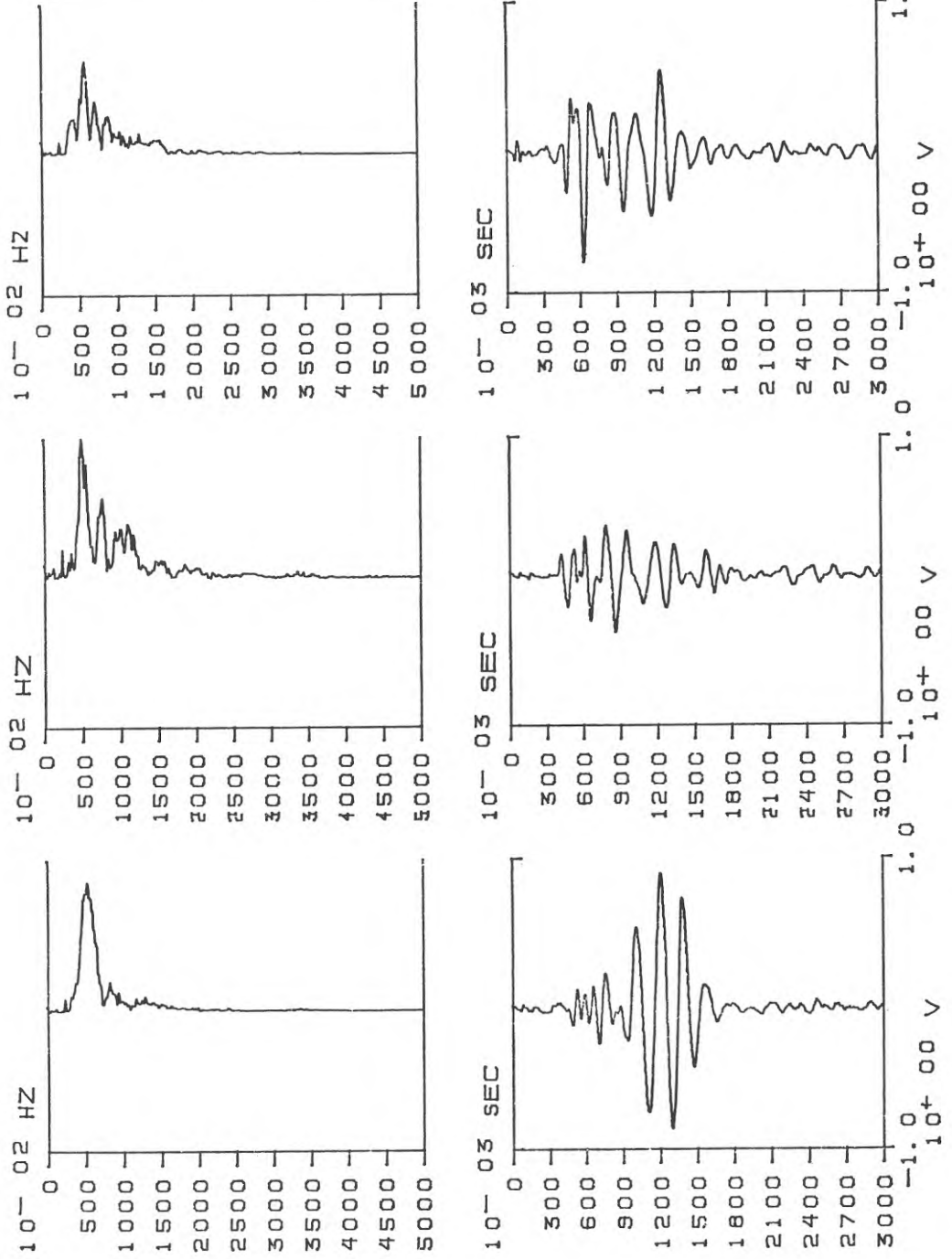


Figur 89: Resultat Skövde 1. Frekvensmodul vid 80% av effektsumman.

Z - komp.

Figur 90: Spektralbilden för ett stötförlopp i berggrunden. Såväl exciteringspunkten som observationspunkten är belägna i Dbh. Mätssystem: accelerometer med laddningsförstärkare av märket B&K i kombination med databandspelare av märket Philips Analog 14.

FREKVENSUTVÄRDERING ANALOG REGISTRERING



Figur 91: Resultat Skå-Edeby (lera). Skottavstånd 12,5 m.

5.3.3 Vågidentifikation

Med hjälp av den i kapitel 4.3 beskrivna analysmetoden omfattande digitala bandpassfiltreringar i kombination med studier av partikelrörelse kan vissa karakteristiska vågor identifieras. I tabell nedan redovisas erhållna hastigheter och frekvenser för skjuvvåg och longitudinell våg samt beräknade E- och G moduler.

Material	P-våg		S-våg		G-modul MPa	E-modul MPa
	hastighet m/s	frekvens Hz	hastighet m/s	frekvens Hz		
Lera (Skå Edeby)	1400	40 - 60	40	6 - 8	2	6
Morän (Örebro)	750	30 - 50	--	--	--	--
Ändmorän (Skövde)	700	50 - 70	310	30	195	510
Ändmorän under gw	1400	50 - 80	300	30	190	500
Bottenmorän under gw (Skövde)	2000	60 - 90	770	30 - 40	1300	3400
Morän (Stöde)	1000	80 -100	--	--	--	--

Sprängsten ^{x)} (Uddevalla)	600-900	-	260	15 - 20	120	320
Packad sprängsten (Uddevalla) ^{x)}	900-1300	-	540	15 - 20	560	1500
Grusig sand (Budapest)	400	-	220	30 - 40	80	220
Sandigt grus under gw (Budapest)	1500	-	330	40	170	460
Berg (Uddevalla) ^{xx)}	5100	-	2200	25	14000	34000

x) Exciteringskälla var fallvikt, ca. 300 kg.

xx) Uppmätt vid dynamisk djuppackning varvid extremt låga frekvenser brukar förekomma.

5.4 Jämförelse med resultat från andra undersökningar.

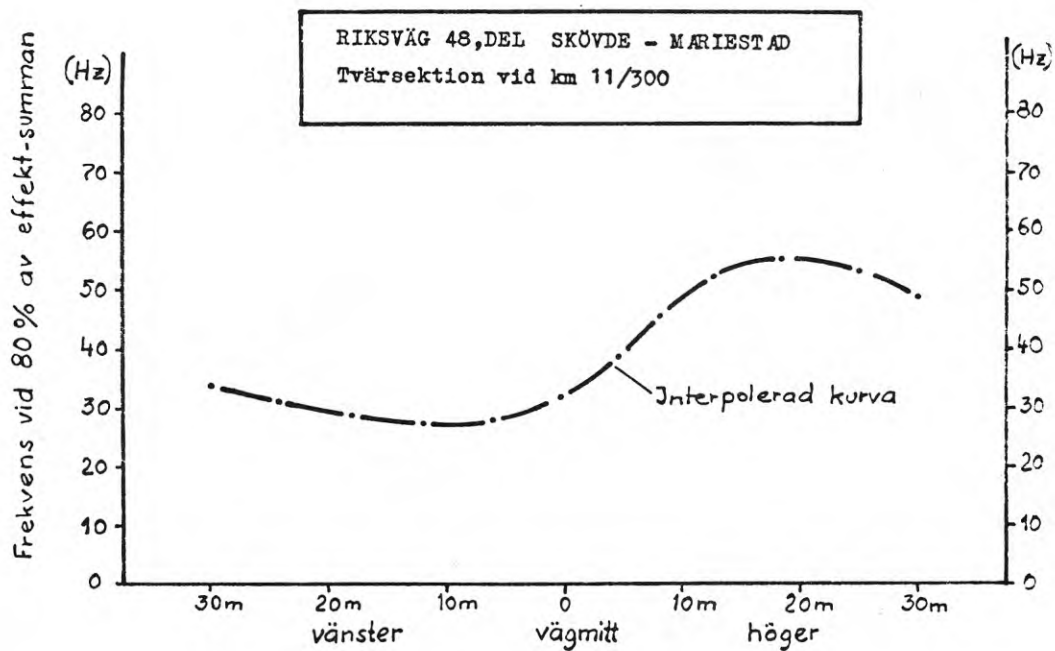
Vägverkets undersökningar har främst syftat till att finna metoder och samband som möjliggör en klassificering av bearbetbarhet. Genom en produktionsteknisk uppföljning har schaktbarhet och bärighet bedömts för de olika delsträckorna. Sammanställning av resultaten från dynamiska undersökningar har främst syftat till att söka samband med bearbetbarhetsklassificeringen.

Materialgrupp

Materialgrupp bestäms ur materialets kornfördelning enligt "Byggnadstekniska anvisningar." Identifiering av jordarter kan ske med hjälp av frekvensspektra, vilken ger en tämligen säker diagnos beträffande materialets sammansättning. Vid utvärdering bör speciell hänsyn tagas till de transversella vågornas frekvenser. Dessutom kan relationen mellan longitudinell och transversell fortplantningshastighet användas för identifiering.

- Lera medför mycket låga frekvenser och den longitudinella hastigheten är mycket stor i förhållande till den transversella.
- Ensartade friktionsmaterial (mjäla, mo, sand och grus) är ej studerade i detta forskningsobjekt. Parallella undersökningar har emellertid visat att frekvenserna ökar med ökad grovkornhalt och att frekvensbanden för respektive våg är relativt smala.
- Morän karakteriseras av breda frekvensband och relativt höga frekvenser. Samband mellan frekvens och blockhalt redovisas i figur 93 och 94, som entydigt visar att ökad blockhalt i moränen ger högre frekvenser.

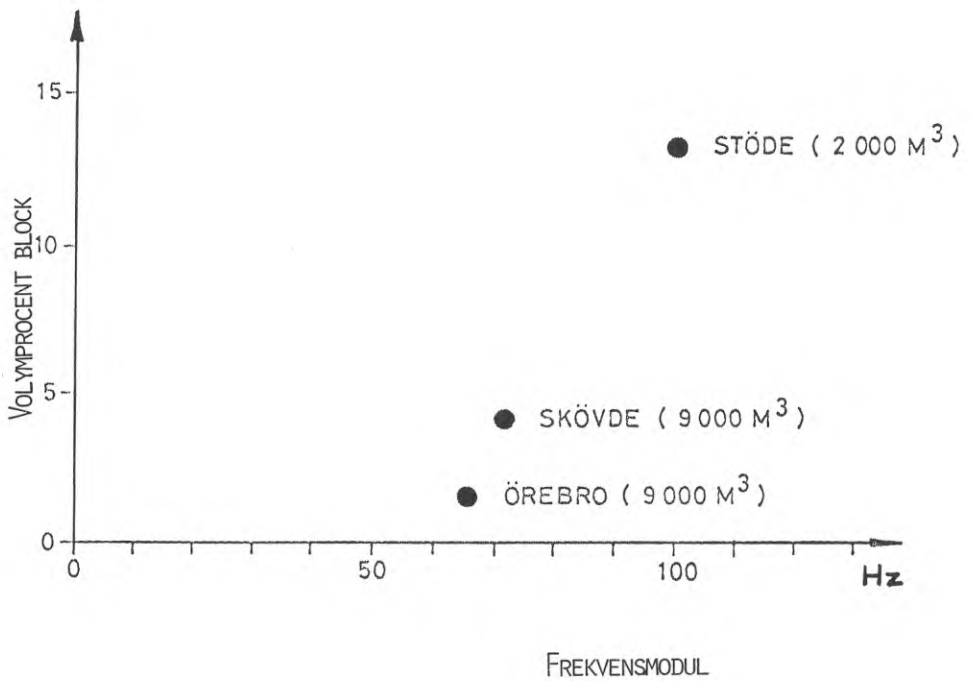
Hastigheten för den longitudinella vågen över grundvattenytan är ungefär dubbelt så stor som den transversella. Under grundvattenytan ökar den longitudinella vågens hastighet men ej den transversella.



"FACIT"

normal blockhalt	låg blockhalt	hög blockhalt
---------------------	------------------	------------------

Figur 93: Samband mellan frekvensmodul och blockhalt i Skövde.



Figur 94: Samband mellan blockhalt och frekvensmodul vid 80% av tot. effekt-summan i olika försöksområden.

(Meddelvärden enligt Vägverkets sammanställning).

Schaktbarhet

Undersökningar har visat att vid normala vattenhalter kan schaktbarheten med tillräcklig noggrannhet klassificeras utgående från jordmaterialets lagringstäthet och kornfördelning, speciellt blockhalt.

I figur 95 visas samband mellan kompressionsvägens hastighet (standardseismik) och schaktbarhet. Figuren är hämtad ur Vägverkets rapport TV127. Spridningen av mätvärden beror främst på grundvatten och varierande blockhalt. Om hänsys tages även till frekvensen bör ett entydigare samband erhållas eftersom frekvensen avspeglar blockhalten. Schaktbarheten bör också kunna bestämmas ur de dynamiska konstanterna E- och G modul. I tabell nedan redovisas erhållna värden från försöksområdena.

Material	Schaktbarhet 1-5	P-våg		G-modul MPa	E-modul MPa
		hastighet m/s	frekvens Hz		
Lera	1	1400	40 - 60	2	6
Morän (Örebro)	2.0	750	30 - 50	-	-
Morän (Skövde)	2.5	700	50 - 70	195	510
Morän under GW	2.5	1400	50 - 80	190	500
Morän under GW	4.0	2000	60 - 90	1300	3400
Morän (Stöde)	3.5	1000	80 -100	-	-

Bärighet för arbetsmaskiner

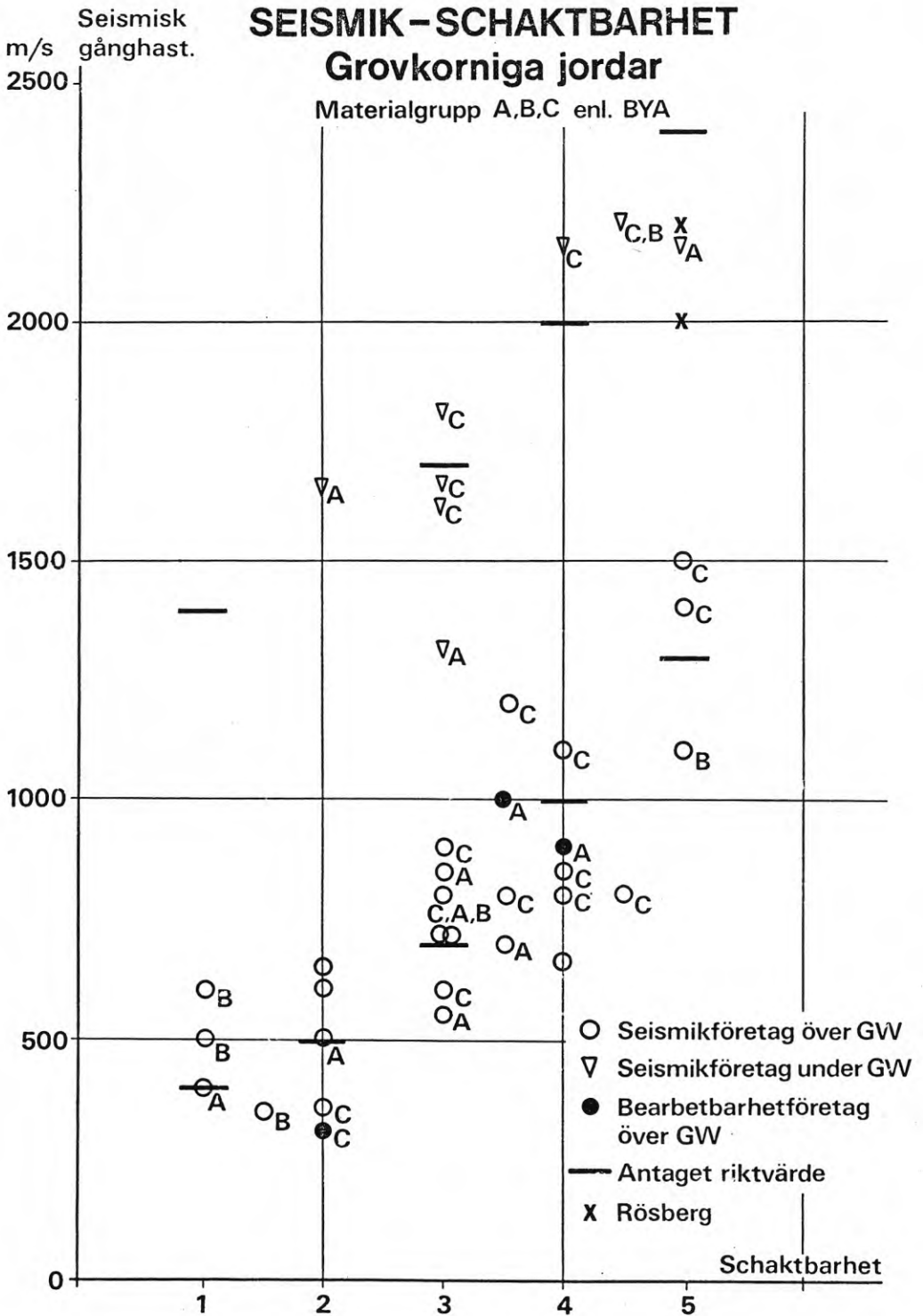
Avgörande för ett jordmaterials bärighet är finkornhalt och vattenhalt. Dessutom inverkar lagringstäthet samt sten och blockhalt. Ur dynamisk synpunkt förefaller det tänkbart att E- och G modulerna kan användas som parametrar i ett klassificeringssystem. I ett något förenklat system kan eventuellt förhållandet mellan den transversella och den longitudinella vågens hastighet användas som någon sorts modul. I

nedan redovias erhållna värden från försöksområden.

Material	Bärighet 1-5	S-våg Cs m/s	P-våg Cp m/s	Cs/Cp	G-modul MPa	E-modul MPa
Morän	2	310	700	0,43	195	510
Morän under GW	4	300	1400	0,21	190	500
Morän under GW	3	770	2000	0,40	1300	3400
Lera	5	40	1400	0,03	2	6

Som framgår av redovisade exempel finns tydliga samband mellan dynamiska parametrar och de jordmaterial-egenskaper som man önskar klassificera ur bearbetbarhetssynpunkt. Ytterligare försök är dock nödvändiga för insamling av ett statistiskt användbart material.

Beträffande den longitudinella vågens hastighet påpekas grundvattnets betydelse. I vattenmättat material är det därför olämpligt att använda denna hastighet för bestämning av E-modul enligt formel 4.3-3. Ett av erfarenhet antaget värde på kontraktionstalet i kombination med den transversella vågens hastighet bör emellertid ge tillfredsställande resultat.



Figur 95: Samband mellan kompressionsvågens hastighet och schaktbarhet
(Utdrag ur VV-rapport TV 127)

Resultaten av föreliggande forskningsprojekt har överträffat förväntningarna vad gäller dels studerade samband mellan dynamiska och jordfysikaliska parametrar och dels möjligheten att bestämma de dynamiska parametrarna med hjälp av modern utrustning och analysteknik. Erfarenheter från fältförsök och utvärdering har emellertid visat att mätteknik, analys och redovisning måste systematiseras och gärna standardiseras för rationellt arbete vid praktiska tillämpningar.

Energikällan är synnerligen väsentlig vid dynamisk grundundersökning. Vid utförda fältmätningar har sprängämne använts för excitering av stöt. För att kunna använda en systematiserad metod vid utvärdering och beräkning måste exciteringskällan vara väldefinierad med avseende på stötimpuls och riktverkan.

Undergrundens dynamiska beteende är inte detsamma när den utsättes för stöt som när den påtvingas en stationär svängning, exempelvis via ett maskinfundament. Det finns ett stort behov av en energikälla som möjliggör excitering av varierande, dock väldefinierade, svängningar både vad gäller frekvens och riktning.

Utrustning för registrering bör systematiseras vad gäller givare, förstärkare, registreringsinstrument och geometrisk form (givarplacering). Den vid redovisade försök använda utrustningen bestående av databandspelare och geofoner har fungerat bra men alternativa möjligheter kan vara lämpligare vid andra former av dynamiska undersökningar.

Undergrundens dynamiska egenskaper utgör viktiga i praktiken använda storheter, som skall hanteras av projektörer och byggare. Undersökningsresultat kan delges beställare i olika form. En form kan vara att publicera teorier och resultat utan kommentarer, med följderna att beställaren tar emot dessa och utvecklar

metoder för praktisk användning efter eget behov. De dynamiska problemen inom byggnadsindustrin är så pass komplexa och aktuella att forskningen inom detta område bör leda till systematiserade (allrahelst standardiserade) utvärderingsmetoder, som är direkt användbara vid praktisk tillämpning.

Forskningsprojektets inriktning att speciellt studera möjligheter för klassificering av bearbetbarhet har föranletts av Vägverkets intresse för dynamiska undersökningar i detta sammanhang. Det måste emellertid påpekas att dynamiska grundundersökningsmetoder kan tillämpas inom en avsevärt bredare sektor. De tillämpningsområden som för närvarande synes aktuella är främst:

- a) Bestämning av lagerföljd och bergkontur.
- b) Geoteknisk identifikation av jordmaterial.
- c) Bedömning av schakbarhet.
- d) Bedömning av packningsgrad
- e) Bedömning av bärighet
- f) Bedömning av moränens blockhalt.
- g) Bestämning av undergrundens dynamiska egenskaper med avseende på egenfrekvens och elastisk ledningsförmåga.

Den stora expansionen i användningen av dynamiska krafter i vårt moderna samhälle kräver fördjupade kunskaper i dynamiska problemställningar. Undergrund, byggnad och maskin, vilka i sig själva representerar olika svängningssystem, samverkar till ett komplicerat sammansatt svängningssystem. Undergrundens roll är i detta system av stor betydelse, varför strävan att erhålla ytterligare informationer beträffande undergrundens dynamiska beteende bör fortsätta.

Med denna rapport avslutas föreliggande forskningsprojekt med förhoppning att redovisade resultat skall bidra till en accelererande utveckling inom det jord-dynamiska området. Förhoppningen är framför allt att de aktiva grupperna inom olika ämnesområden skall verka dithän att en standardisering av mätteknik, analys och redovisning snarast kan genomföras.

LITTERATURFÖRTECKNING

Böcker och tidskrifter:

- | | |
|------------------------------|---|
| Ahlin, K m.fl | Kompendium i tillämpad signalanalys (Vaxholm 1973) |
| Brown, P.O och Robertshaw, J | The in-situ measurement of Youngs Modulus for rock by a dynamic method. (Geotechnique Vol. 3, 1953) |
| Forssblad, L. | Dynamiska markundersökningar med hjälp av fallvikt (Väg- och vattenbyggaren nr 6, 1966) |
| Gálfi, J. m.fl. | Szeizmika (Budapest 1967) |
| Gálfi, J. m.fl. | Development of pressure wave by air shooting. (Geophysical Bulletins, Budapest, 1956) |
| Gamburzev | Grundlagen seismischer Erkundung (Leipzig 1964) |
| Gereben, L. | Teori för seismiska mätmetoder. Seismikdag 1969. (SGI:s särtryck och preliminärrapporter nr 33, Stockholm 1970) |
| Grässl, S. m.fl. | Zur digitalen Bearbeitung seismischer Daten. (Zeitschrift für angew. Geologi, 1970 Heft 4). |
| Gurwitsch | Seismische Erkundung (Leipzig 1970). |
| Heiland, C.A. | Geophysical Exploration (New York, 1951). |
| Kiss, Z. | Study of shortperiodic surface waves generated by blasting (Doktorsavhandling, Budapest 1967). |
| Lorenz, H. | Grundbau-Dynamik (Berlin 1960) |
| Richart, F.E. m.fl. | Vibrations of soils and foundations (New Jersey 1970). |

- Swain, R.J. Recent techniques for determination of "in-situ" elastic properties and measurement of motion amplification in layered media (Geophysics Vol. 27, 1962).
- Weiner, D. Handbok om maskinfundament (BFR proj., opublicerad).

Rapporter:

- Statens Vägverk,
TV 113 & 127. Rapport om utredning beträffande seismiska undersökningar vid vägprojektering (H. Thurner, Stockholm 1971).
- Statens Väg- och Trafik-
inst. nr 107 Provning och utveckling av apparatur för stötbelastning med fjädrad fallvikt. (O. Thulén, Stockholm 1973).
- Terratest AB Rapport över frekvensanalys av magnetbandregistreringar vid seismiska försöksmätningar i Örebro och Stödertirsta (H. Helfrich, Stockholm 1972-09-27).
- Statens Vägverk Resultat från försöksverksamhet angående jordarters bearbetbarhet. (H. Thurner, Stockholm 1975).
- Statens Vägverk Utvecklingsprojekt "Definition av bearbetbarhet för olika jordar". (Stockholm 1975).

R10: 1976

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 720502-0 från
Statens råd för byggnadsforskning till AB Jacobson & Widmark
Grundkonsult AB, Stockholm.**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Grupp: konstruktion**

Pris: 38 kronor + moms