

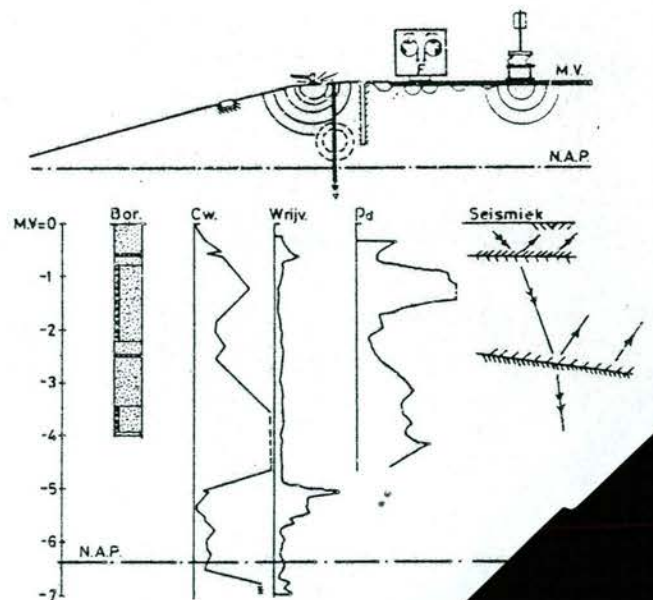
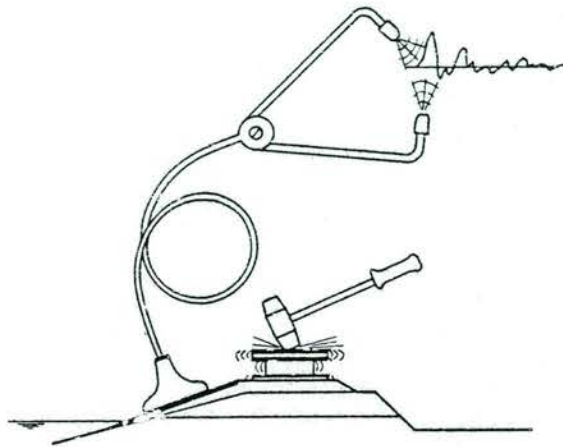
5282



DI : 394764



# laboratorium voor grondmechanica delft delft soil mechanics laboratory



Omtrent een mo  
van een Diagn  
voor de be  
zeedijken

CO - 27

Page: 10



Omtrent een mogelijke opzet van een Diagnose-  
systeem voor de beoordeling van zeedijken met asfaltbekleding

discussiestuk t.b.v. Projectgroep D  
van TAW Werkgroep 4

CO-276071/39

juni 1986

Rr/sch/1/47/dia.1/2/3/4/5/6/7/8

Projectleider LGM : ir. P. Ruygrok

Projectleider RWS : ir. E. Ebbens/ir. L.E.B. Saathof

### Samenvatting

Mede naar aanleiding van vroeger en recent in-situ onderzoek aan "prototype" zeedijken, waarbij oriënterende metingen werden uitgevoerd ter eerste beoordeling van de mogelijkheden van bestaande methoden, ontstond de behoefte naar een toespitsing van criteria voor de opzet van een samenhangend, dat bovendien inzetbaar dient te zijn op tamelijk steile taluds ( 1 : 4).

Daartoe werden de diverse specifieke opmerkingen, o.m. verspreid over diverse paragrafen en Appendices uit de rapportage van het prototype-onderzoek in dit (discussie)rapport gebundeld, en waar mogelijk nader geanalyseerd.

Behandeld worden enkele gevallen van

- survey-verkenningsmethoden (nondestructief)
- locale verkenningstechnieken
- lijnmetingen (beperkt geldigheidsgebied)
- controle methoden (evt. procesbewaking)
- uitbreidingen van specifiek monsteronderzoek.

Waar mogelijk werd aangegeven in hoeverre samenhang van resultaten mogelijk is, in hoeverre (flexibilisering) nodig en haalbaar is, en waar de theoretische achtergronden aangescherpt moeten worden. Het rapport is in de eerste plaats bedoeld als discussie stuk (Projectgroep D) om de problematiek beter in kaart te krijgen en als basis voor prioriteitstelling t.b.v. het gaandeweg opvoeren van het rendement van direct toekomstig prototypeonderzoek.

De samensteller



ir. P.A. Ruygrok

<u>Inhoudsopgave</u>	<u>Blz.:</u>
1. Inleiding	1
2. Aspecten bij de opzet van een diagnosesysteem	4
2.1. Inleidende beschouwing	
2.2. Schematische opzet van het diagnosewerk	
2.3. Nadere analyse van de afzonderlijke aspecten	
3. Rayleigh-golfmethoden	12
3.1. Inleiding	
3.2. Discussie met betrekking tot de beperkingen van het huidige systeem	
3.3. Aanpassingen en alternatieven	
4. Seismische methoden (p & s golfsnelheidsbepaling)	27
5. Grondradar als toegevoegde NDT verkenningmethode	32
5.1. Inleiding	
5.2. Grondradarmetingen op "Het Flauwe Werk"	
5.3. Enkele specificaties van de asfaltdikteprofielmeter	
6. Methoden voor verdichtingscontrole van het zandbed	39
7. Uitbreiding methoden van onderzoek aan monsters	45
7.1. Mechanisch gedrag van zand	
7.2. T.a.v. mechanisch gedrag van asfalt	
8. De valgewicht deflectie methode (op taluds)	50
9. Slotopmerkingen	51

#### Appendices

Appendix A1: Correlatiemethoden en spectraalanalyse  
Appendix A : figuur A.1 t/m A.8

#### Figuren

Hoofdstuk 1: figuur 1.1 en 1.2  
Hoofdstuk 2: geen  
Hoofdstuk 3: figuur 3.1 t/m 3.10  
Hoofdstuk 4: figuur 4.1 t/m 4.5  
Hoofdstuk 5: figuur 5.1 t/m 5.14  
Hoofdstuk 6: figuur 6.1 t/m 6.5  
Hoofdstuk 7: figuur 7.1 t/m 7.8  
Hoofdstuk 8: figuur 8.1 t/m 8.4  
Hoofdstuk 9:

Literatuur

- [1] P. Ruygrok - Onderzoek op een proeflocatie aan de Ommelander Zeedijk  
- LGM CO-210069/3, TAW DB 8424 (juli 84)
- [2] A. Klomp - Onderzoek proefvak Ommelander Zeedijk  
P.M. Tel - Valgewicht en Trillingsmetingen  
J. Voorwinden - P.C.S.-rapp ZDM 83-17/83/1/62/ (feb'84)
- [3] J. Scott Heisey - Determination of in situ shear wave  
KH Stokoe II velocities from spectral analysis of  
et.al surface waves.  
Center for Transp. Research -  
University of Texas (Austin) Research  
Report 256-2 (Nov'82)
- [4] B. Prange - Oberflächenwellerfelder zur Bestimmung  
G. Huber der dynamischen Untergrund Parameter  
- Symp. Messtechnik im Erd- und Grundbau  
München 1983, PP. 73-70
- [5] N. Gruber - Beschleunigungsmessungen an Vibrations-  
J. Obermayer walzen zum Nachweis den Bodenver-  
dichtung.  
- Symp. Messtechnik im Erd- und Grundbau  
München 1983, PP. 71-76
- [6] P. Ruygrok - Literatuuranalyse omtrent de toepassing  
van akoestische metingen tijdens de  
grondmechanische beproeving van  
monsters. LGM SE-701070 (feb'86)
- [7] S.K. Roessler - Anisotropic shear modulus due to stress  
anisotropy Jnl. Geot. Eng. Div. (Proc  
ASCE) Vol 105, PP. 871-880 (July 1979)
- [8] C.R.A. Rao - Surface waves in an elastic semi-space  
with a stable nonhomogeneity  
Pure and Appl. Geophys.; Vol 75, 1969/IV

Literatuur (vervolg)

- [9] H. den Rooyen - Studie grondverkenning B - Seismische Methoden LGM BAGT WG-117-3 (1982)
- [10] P. Ruygrok - Resultaten onderzoek TAW-proefvak op "Het Flauwe Werk"  
LGM CO-276070/17, TAW DB 8604 (Sept'85)
- [11] P. Ruygrok - Literatuur-evaluatie omtrent de toepasbaarheid van grondradar in de geotechniek  
LGM SE-690223/7 (Sept'82)
- [12] L. van der Wal - Het localiseren van kabels en leidingen  
P. Ruygrok in de ondergrond middels grondradar  
TPD 406.225 (Nov'84)
- [13] A. Teferra - Beziehungen zwischen Reibungswinkel, Lagerungsdichte und Sondierwiderstande nichtbindiger Boden  
- Forsch Berichte Bodenmech, und Grundbau, FB 19 I (1975) Aachen
- [14] V. de Mello - Design trends on Large Rockfill Dams and purposeful monitoring needs.  
Ch.4 pp 86-107 (Preprint)  
Uni of Sao Paulo (Brasil)



Symbolenlijst:

eenheid:

Eventueel toegevoegde indices worden in de tekst verklaard

A	amplitude ( $A_o$ , $A_v$ , $A(f)$ )	[variabel]
C	snellheid ( $C_p$ , $C_t$ , $C_r$ → akoestisch, $C_o$ → electro- magnetisch)	[m/s]
G	glijdingsmodulus	[kN/m <sup>2</sup> ]
$g\{z\}$	dieptegewichtsfunctie	[ <sup>1</sup> /m]
$G_j$	gewichtscoefficient	[-]
$k(v)$	'poissonfunctie' t.a.v. de raleigh-golf	[-]
$K_o$	gronddrukcoefficient	[-]
f	frequentie (Hz)	[1/s]
M	modulus (specifiek in tekst verklaard)	[kN/m <sup>2</sup> ]
n	- poriegehalte - aantal (alleen in de Fourieranalyse!)	[-]
P	(geconverteerde) penetratieweerstand	[kN/m <sup>2</sup> ]
r	(radiale) afstand	[-]
s	structuurparameter	[-]
$x(t)$	signaal in tijdsdomein	[variabel]
$X(f)$	amplitude in frequentiedomein	[variabel]
z	diepte	[m]
$\alpha$	dempingscoefficient	[1/m]
$\gamma$	hoekverdraaiing (shear)	[% of rad.]
$\delta$	logarithmisch decrement (dempingsparameter)	[-]
$\epsilon$	deformatie	[%]
$\epsilon_r$	relatieve permittiviteit	[-]
$\nu$	poissonmodulus	[-]
$\lambda$	golflengte	[m]
$\rho$	dichtheid (massa)	[t/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	normaalspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\tau$	schuifspanning (of deviator)	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\theta$	fasehoek	[° of rad.]

## 1. Inleiding

De vaststelling van de mate van bedrijfszekerheid van zeedijken met asfaltbekleding en dus ook de opzet van methoden ter beoordeling daarvan is een complexe zaak met diverse aspecten:

- het beoordelingsmodel is aan ontwikkeling onderhevig, hetgeen zal impliceren dat gaandeweg ook de beoordelingsnormen aangepast worden. Zowel betere rekencodes als daarin te implementeren materiaalmodellen, alsmede nieuwe gegevens omtrent schadegevallen, herziene inzichten qua belastingscondities en visies met betrekking tot (partieel) bezwijkgedrag houden in dat van belang zijnde parameters kunnen veranderen of anders moeten worden "gewogen" (de probleemformulering is minder eenduidig dan vroeger en de mate van genuanceerdheid hierbij zal zowel doorspelen in het ontwerp als in de onderhoud- en beheer-strategie.
- de te beschouwen kritieke belastingskarakteristiek is een mengsel van pseudo-statische en dynamische condities dat van plaats tot plaats langs de kust verschilt en waarbij ook de hoogte van de aangevallen taludsector meespeelt.
- het tijdsverloop speelt een rol (de momentane conditie), bijvoorbeeld tot uiting komend in de differentieerbare zetting van de diepere ondergrond, het teruglopen van de kwaliteit van de bekleding, de onregelmatige aard van de belasting. Tamelijk onbekend is nog de interactie tussen zettingsgradiënten, het effect daarvan op de kwaliteit van het zandlichaam van de dijk en de restinvloed van de zettingsverschillen met betrekking tot het flexibel (moeten) volgen daarvan door de bekleding. Tenslotte speelt de kustmorfologie (zanddepositie of erosie van het voorland van de zeewerking) een rol ten aanzien van zowel de grondwaterbeweging (filterwerking) als de belastingscondities.

Bovenstaande houdt in dat bestaande normen niet op een locale, maar op een overwegend ongunstig geachte hypothetische situatie zijn gebaseerd. Op grond van parametrische modellen en relevant geachte ervaring wordt het basisontwerp (constructie-normen) opgesteld. In de voorbereidende fase wordt vaak veel aandacht besteed aan de haalbaarheid van het ontwerp (bestekseisen). Soms wordt zelfs uitgebreid onderzoek op proefvakken verricht. In de constructiefase zijn vervolgens vakmanschap en integriteit bij de uitvoering aan de orde. In de meeste gevallen zal hierop weinig kritiek te vernemen zijn. Niet zelden blijkt uit steekproeven achteraf dat het "gemiddelde product" ruimschoots aan "de eisen" voldoet. Schade treedt echter niet gemiddeld maar plaatselijk op (mogelijk door plaatselijke cumulatie van incidentele niet visueel constateerbare manco's)

Er zijn vele oorzaken voor het mogelijk optreden van "zwakke plekken" aan te geven

- te plaatselijk onderzoek in de voorbereidingsfase (dijk bij Streefkerk), dat wil zeggen 'blind' sonderen zonder globale voorverkenning
- te beperkte procesbeheersing bij de zandwinning (slibvariatie, veenknollen, kleiballen, schelpenconcentraties) beperken plaatselijk de soms overigens uitstekende kwaliteit van een gespoten zandlichaam
- bij het profileren, verleggen van spuitkaden bij posities van spuitmonden, ter plaatse van aanvoerwegen en werkstroken treden soms forse pakkingsverstoringen op, die bij het "naverdichten" vaak niet volledig worden goedgeemaakt.
- er is geen instrumentele procescontrole bij het construeren van de bekleding (leidend tot plaatselijk dikte- en kwaliteitsvariaties)

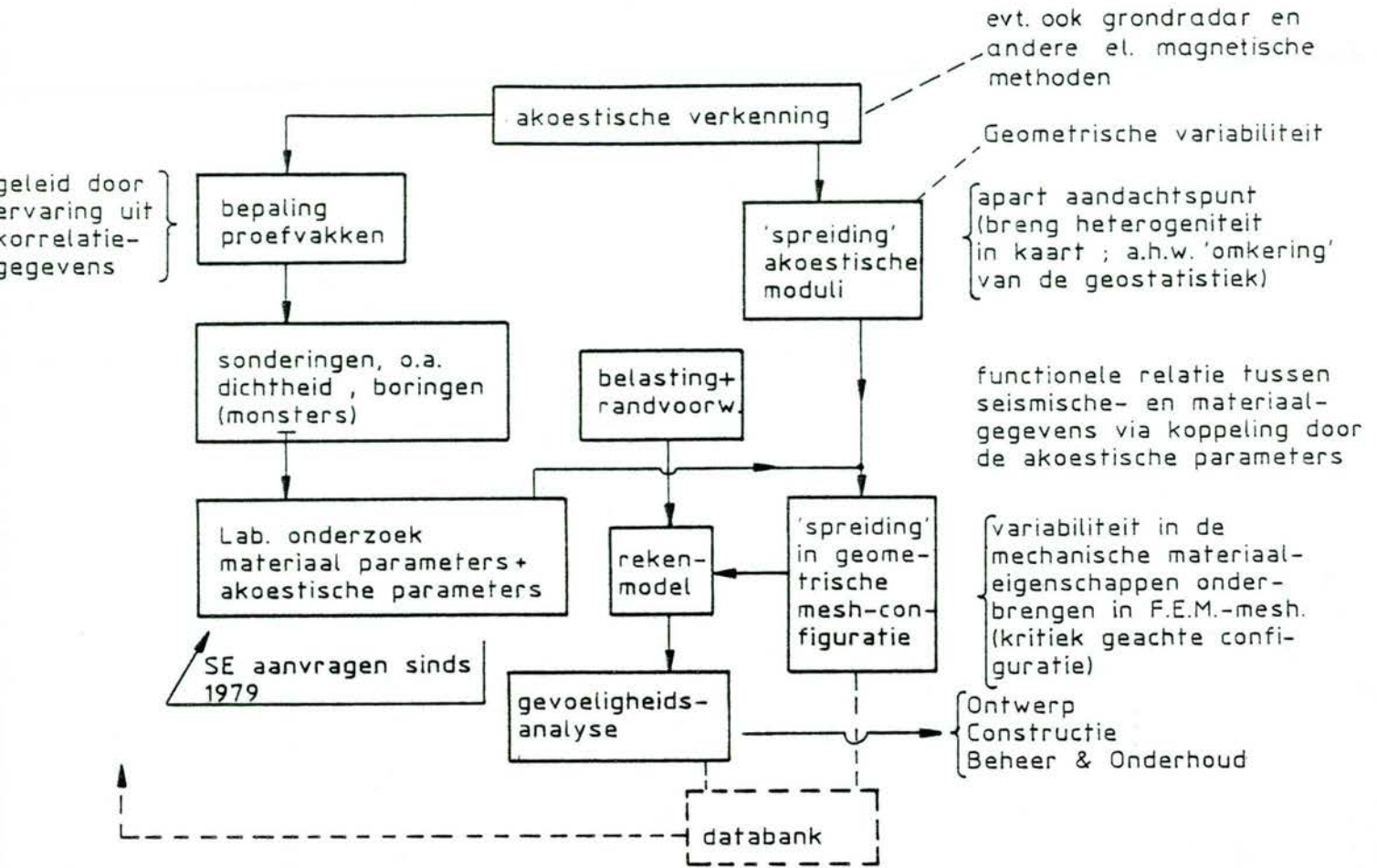


Fig. 1.1 : CONCEPT VOOR EEN DIAGNOSESISTEEM

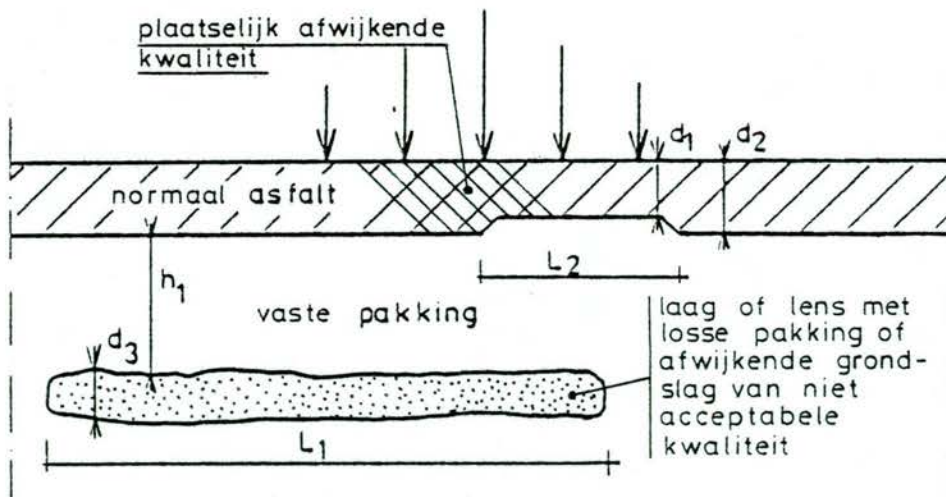


Fig 1.2 : Mogelijke rekenconfiguratie op basis van plaatselijke verkenning (in F.E.M. mesh implementeren)

Het meest bizarre aspect is in feite dat veelal hooguit plaatselijk de vastheid van het zandtalud tot op zeer beperkte diepte wordt beproefd, terwijl bij de opleveringscontrole aan de hand van enkele steekproefsgewijze gekozen kernboringen de asfaltdikte en het volumegewicht worden bepaald (er vindt dus geen controle op locale materiaaleigenschappen plaats). Deze aspecten staan in een (te) schril contrast tot de inspanningen in de ontwerpfase, het vakmanschap en de hoogte van de investering. Kennelijk leiden slechts forse calamiteiten tot betere inzichten.

In figuur 1.1. is getracht in schema te brengen hoe zowel in de voorbereidings- en constructiefase als beheerfase via een surveyverkenning een globaal beeld is te verkrijgen van de variabiliteit. Hieruit zijn indicaties te verkrijgen teneinde gericht plaatselijk onderzoek te verrichten (met name op posities waar dat nodig lijkt). Via laboratoriumonderzoek op selectieve monsters, bij voorkeur gepaard gaande met bepaling van parameters, die een zekere mate van vertaling van de materiaalgrootheden naar de verkenningsgegevens mogelijk maken, is nu een totaalbeeld te vormen in termen van grootheden, die een beoordeling mogelijk maken.

Blijkt hieruit dat plaatselijk onvoorziene twijfel situaties optreden dan is het altijd mogelijk zo'n complexe situatie (schets figuur 1.2.) middels een eindige elementen mesh rekentechnisch in kaart te brengen (t.b.v. een beslis-criterium voor grondverbetering of revisie van een deel van de bekleding, cq. vervroegd onderhoud). Het navolgende beperkt zich tot het onderzoeken van de mogelijkheden om een daartoe benodigd kosteneffectief diagnosesysteem op te stellen. Het betreft dus eisen van geschiktheid, inzetbaarheid, functionele samenhang en flexibiliteit van de diverse mogelijke methoden. De einddoelstelling bij figuur 1.1. omvat impliciet het scherper stellen van normen en procesparameters naast het leveren van beoordelingscriteria. Een aanverwante analyse is onder meer te vinden in een artikel van De Mello (14).

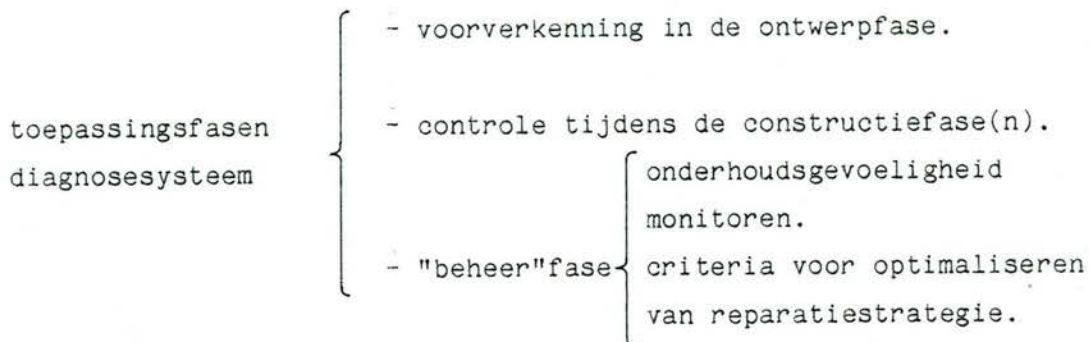
## 2. Aspecten bij de opzet van een diagnose-systeem.

(ten behoeve van het onderzoek aan zeedijken).

In dit hoofdstuk zal een en ander vnl. in schematische vorm worden aangegeven. In volgende paragrafen zal hierop uitgebreid worden teruggekomen.

### 2.1 Inleidende beschouwingen:

-----

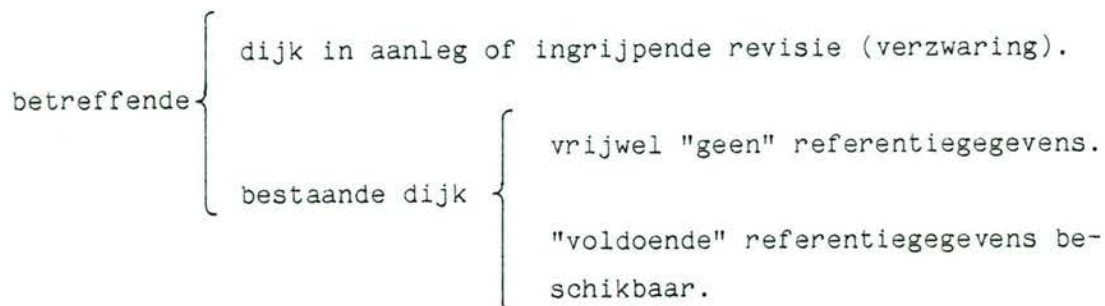


Voor elk der genoemde fasen zal niet het gehele systeem worden ingezet. Bepaalde detailaspecten kunnen zelfs per onderwerp verschillende eisen aan deelcomponenten van het systeem stellen.

Deze eisen kunnen liggen op het gebied van kwaliteit, type van in te zetten apparatuur en software, flexibiliteit (tijdsdrang) en kostenafweging. Bij de opzet van het systeem als totaliteit zal daarom inventarisatie en nadere afweging moeten plaatsvinden op basis van overzicht m.b.t.:

- criteria (prioriteiten).
- methoden (mogelijkheden, knelpunten).
- samenhang (koppeling tussen methoden en vraagstelling, alsmede de samenhang tussen de methoden onderling).
- interpretatie (ontwikkelen van middelen of parameters, die leiden tot zo eenduidig mogelijke besliscriteria).
- maatregelen (strategie - afwegingen op basis van verkregen informatie).

Bij de opzet van deze procesketen dient rekening te worden gehouden met de diversiteit van de toepassingsgebieden, bijvoorbeeld:



(onder referentiegegevens zijn onder meer te verstaan:

- (bijgewerkte) constructieve details.
- meetgegevens verkregen tijdens en/of direct na de constructiefase(n).

Te onderscheiden elementen van onderzoek zijn bijvoorbeeld:

- de bekleding (een of meer "lagen").
- de ophoging {
  - toplaag (directe ondergrond).
  - sublaag.
- de oorspronkelijke ondergrond.
- overgangsconstructies.
- bijzondere constructies (filters, teenschot, ontgrondingsprotectie, damwanden, kleiconstructies etc).

Het zal duidelijk zijn dat de primaire inzet van "niet destructieve" methoden, in elk geval in de fase van verkenning of vooronderzoek, de voorkeur zal hebben (te onderscheiden valt naar methoden die een afbeelding ("image") of een echogram geven en methoden die een of meer "indirecte" parameters leveren).

Een van de functies van niet-destructieve methoden (NDT) is, dat ze op zijn minst significante indicaties dienen te geven omtrent positie en omvang van plaatsen waar (potentieel) destructief onderzoek het meest doelmatig kan worden ingezet.

Het motief hiervoor is niet dat "geheel of gedeeltelijk destructief" onderzoek een zekere mate van "schade" toebrengt, maar dat de informatie van deze bepalingen ("punt"- of lijnmetingen, hetzij in-situ bepaald, hetzij in het laboratorium aan geboorde monsters verricht) slechts een beperkt geldigheidsgebied betreft. De positie van dit type bepalingen dient dan zo adequaat mogelijk vooraf bepaald te worden om de "waarde" van de veel exactere, maar niet flexibele, destructieve methoden optimaal te kunnen benutten.

Ter voorkoming van misverstand:

De meeste niet-destructieve methoden zijn gebaseerd op elektromagnetische golfverschijnselen ("straling") of stationaire metingen (bijvoorbeeld geo-elektrisch) of mechanische golfverschijnselen (akoestische methoden):

De te ontlene informatie is dus altijd uitgedrukt in fysische grootheden van het meetprincipe en zal dus meestal niet in directe relatie staan tot de gegevens, die uit specifiek gericht ("destructief") onderzoek volgen.

Het eventueel vervangen van specifiek onderzoek door NDT-techniek zal vermoedelijk slechts in beperkte mate mogelijk zijn. (Veelal zal ook de "geometrische resolutie" daarvoor te gering zijn). De "gidsfunctie" van de NDT-methoden daarentegen kan de mate van effectiviteit van "destructief" onderzoek opvoeren (beperking van de mate van "blinde" toepassing daarvan).

Het is dus van primair belang dat zoveel mogelijk samenhang wordt gevonden tussen parameters uit (een combinatie van) flexibele NDT-verkenningstechnieken en belangrijke (indicatieve) grootheden uit de gerichte, "plaatselijk" in te zetten methoden. In principe betreft het hier het "wederkerig opwaarderen" van de kwaliteit en (ook economische) inzetbaarheid van beide categorieën van methoden.



In schema gezet kan zo'n perspectief er als volgt uitzien (gezien vanuit de optiek van de NDT-verkenningmethoden).

- De verkenning dient indicatief te zijn met betrekking tot een optimale keuze van het "meet- en bemonsternet" voor de gerichte onderzoeksmethoden.
- Daartoe dienen de gegevens (grootheden) uit het NDT-onderzoek zoveel mogelijk (direct of indirect) zijn te relateren aan parameters (mechanische grootheden of andere informatie) uit het gerichte onderzoek (dit kan dus o.a. het veelal "in-situ destructief" karakter beperken. N.B. of de gerichte methode op zich al of niet destructief is doet niet ter zake! Om een zekere "dieptepositie" materieel te bereiken is al, soms ongewenste, "destructie" nodig).
- In feite impliceert het vorige punt de voorwaarde dat bij dergelijke verkenningen al een minstens globaal beeld omtrent de variatie van materiaal- en andere eigenschappen in de verkende sector is op te maken.

Kortom, door de koppeling (samenhang) van beide typen analyse- en onderzoeksmethoden (door analyse en ervaring "iteratief" te verbeteren) vindt wederzijdse opwaardering van hun "inzetbaarheid" plaats, die uiteindelijk kosten-effectief kan doorwerken; dit als uiteindelijke doelstelling!).

In wat breder verband is het als volgt uit te drukken:

Van belang is gewenste onderlinge samenhang van:

NDT-verkennend onderzoek met:

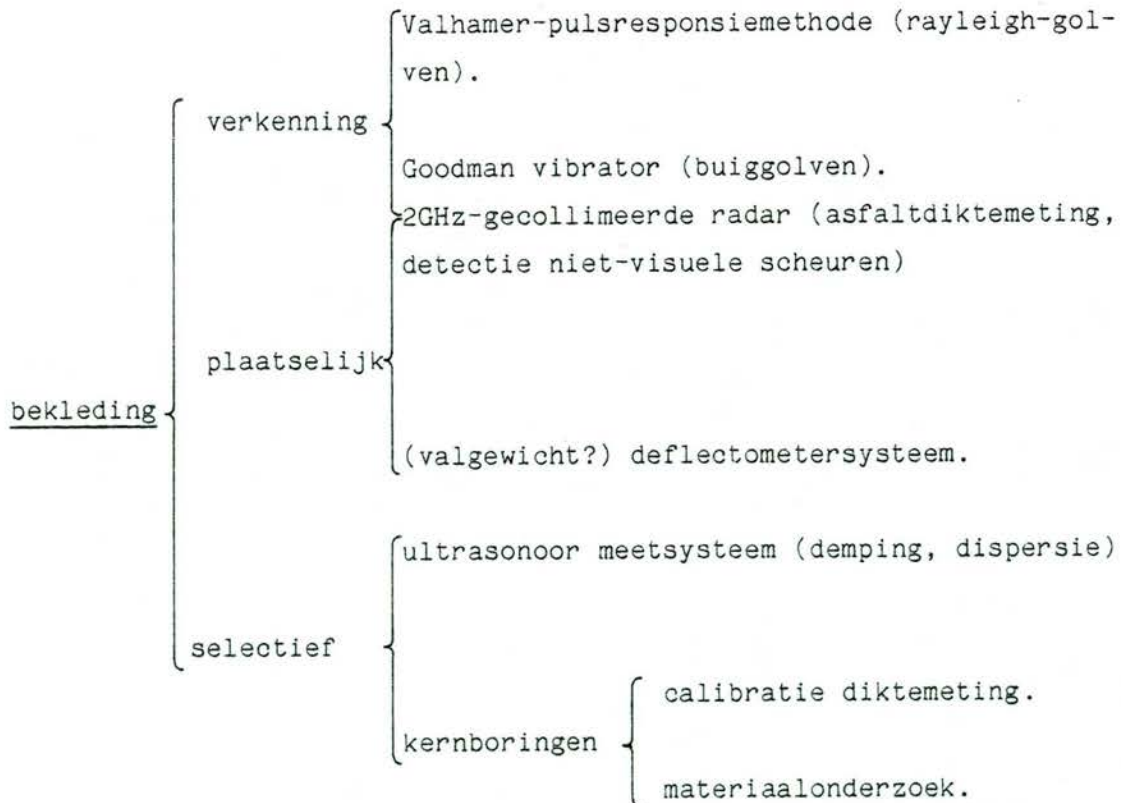
- in-situ "punt"- en diepte-lijnmetingen (partieel destructief).
- laboratoriumgrootheden (onderzoek op monsters uit boringen).

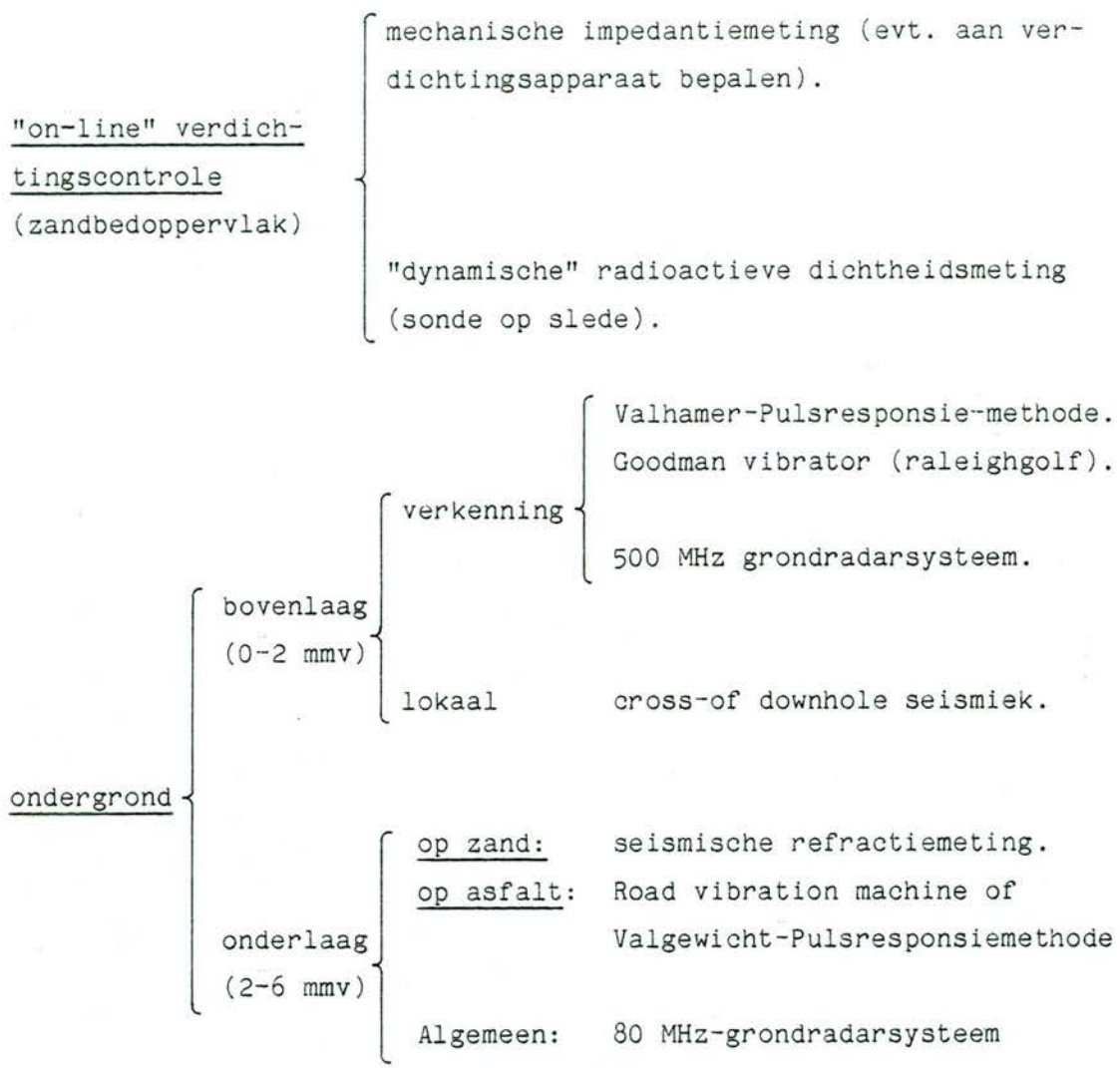
Hierbij zijn de volgende algemene aspecten van belang:

- gevoeligheid voor en (diepte)bereik t.a.v. de variatie van een grootheid of de detecteerbaarheid van een "object".
- de ruimtelijke (geometrische) resolutie.
- de specifieke gevoeligheid voor een materiaal-kwaliteitsparameter.
- bij voldoende "resolutie" is ten slotte de "calibratie" op, of functionele relatie met, een of meer "materiaalgrootheden" of "object"-kenmerken maatgevend voor de bruikbaarheid.

## 2.2. Schematische opzet van een diagnose-netwerk

Voorbeeld van een beperkt diagnosesysteem t.b.v. in-situ dijkonderzoek (gebaseerd op huidige apparatuur en na de nodige aanpassingen).





Hieruit volgt informatie voor de selectie van posities ten behoeve van lokaal gericht onderzoek:



Nadere analyse van de afzonderlijke aspecten.

Bij deze analyse worden de volgende criteria in acht genomen:

- 1) wat levert de meting "sec" op als resultaat, welke betekenis heeft de gemeten parameter in relatie tot het doel en welke aanvullende informatie is nodig om er een werkbare, doelgerichte, diagnose-methode van te maken?

- 2) welke modificaties zijn nodig om de hanteerbaarheid en flexibiliteit van apparatuur en methode aan te passen aan diverse in-situ condities (terreingesteldheid, taluds tot 1 : 4, andere "restricties"), mede in het licht van optimalisatie van onderzoekskosten bij "routinematige" inzet.

### 3. De rayleighgolfmethoden

#### 3.1 Inleiding

Aangezien het merendeel van de zeedijken met asfaltbekleding reeds aan de huidige Deltanormen is aangepast, en door de aanwezigheid van harde bekleding de toepassing van niet-destructieve "seismische methoden" (reflectie- en refractiemethode) twijfelachtig is, terwijl bij taluds steiler dan 1 : 8 de bestaande valgewichtdeflectometer ook niet goed inzetbaar bleek, lijkt enige prioriteit voor de rayleighgolfverkenningmethode thans opportuun. De mogelijkheden hiervan zijn niet alleen in het verre verleden, maar ook op het TAW-proefvak Ommelander zeedijk aangetoond. Uit vrij recente literatuurbronnen is bovendien hernieuwde interesse voor en verdere ontwikkeling van de rayleighgolfmethode te signaleren.

Bij de in ons land aanwezige uitvoeringsvorm (1 buiten gebruik gesteld exemplaar bij de Dienst Weg- en Waterbouwkunde en bij H.W.Z.) wordt per ingestelde frequentie (langs een radiaal vanaf de trillingsbron middels een verplaatsbare taster) de golflengte vastgesteld (fig. 3.1.a en 3.1.b.). De voortplantingssnelheid volgt dan uit de bekende relatie  $C_r = f \lambda_r$

( $f$  = frequentie,  $\lambda_r$  = golflengte rayleighgolf); zie figuur 3.2. ontleend aan [1, 2]).

#### Huidige procedure:

Voor frequenties tot ca 80 Hz wordt de Road Vibration Machine (RVM) toegepast. Voor hogere frequenties (60 - 3000 Hz) wordt een electro-mechanische Goodman's Vibrator (GV) toegepast.

Aangezien de dieptewerking van de Rayleighgolf (fig. 3.3.) omstreeks  $1,5 \lambda$  (golflengte) bedraagt, is het voor het inzicht in de snelheidsafhankelijkheid met de diepte noodzakelijk een vrij groot aantal frequenties toe te passen.

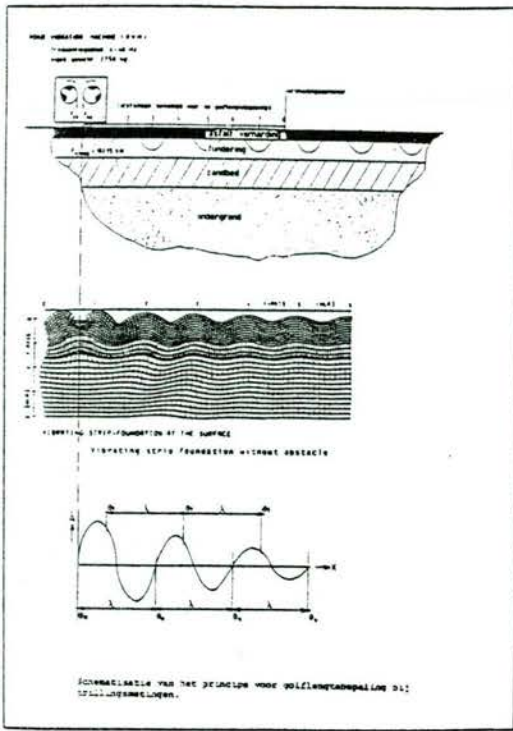
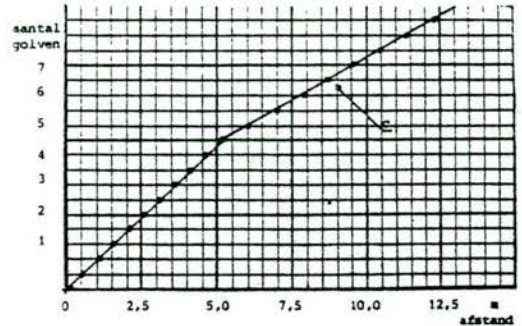
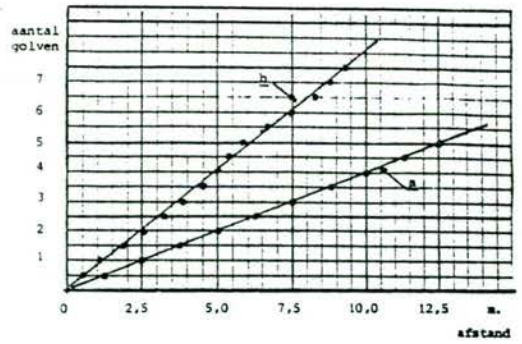


Fig. 3.1.a



Voorbeelden van fase-afstand grafieken

Fig. 3.1.b

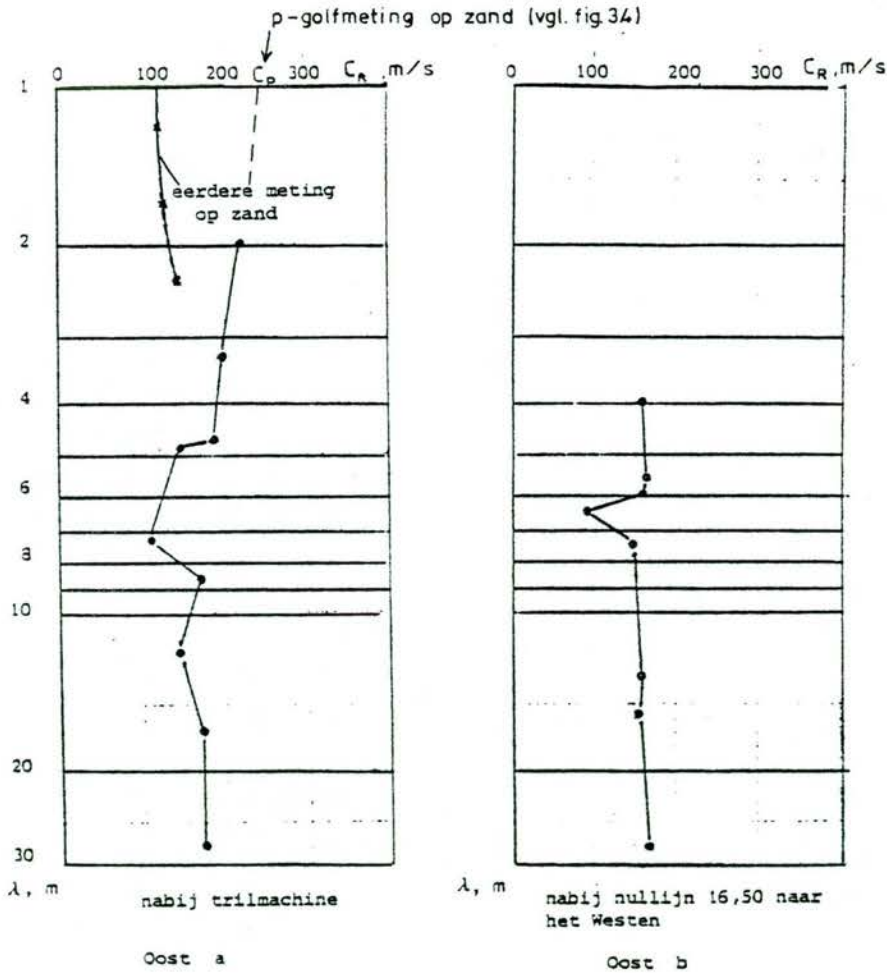


Fig. 3.2: Golfvoortplantingssnelheden als functie van golfengete (zie lit. [1,2])

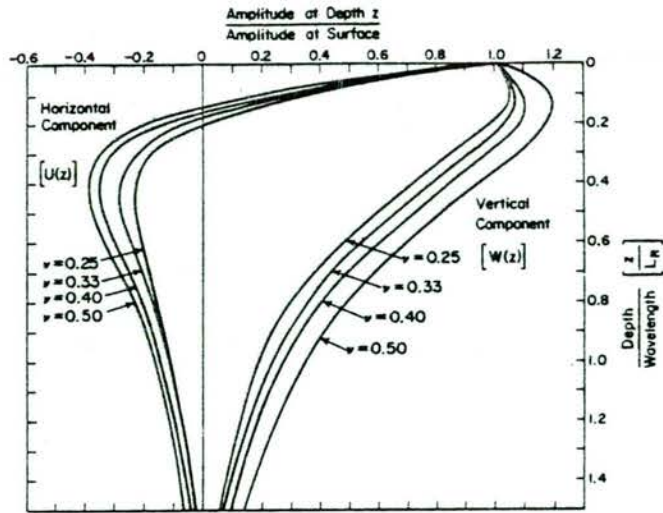


Fig. 3.3: Variation of Rayleigh-wave amplitude as a function of depth normalized to wavelength

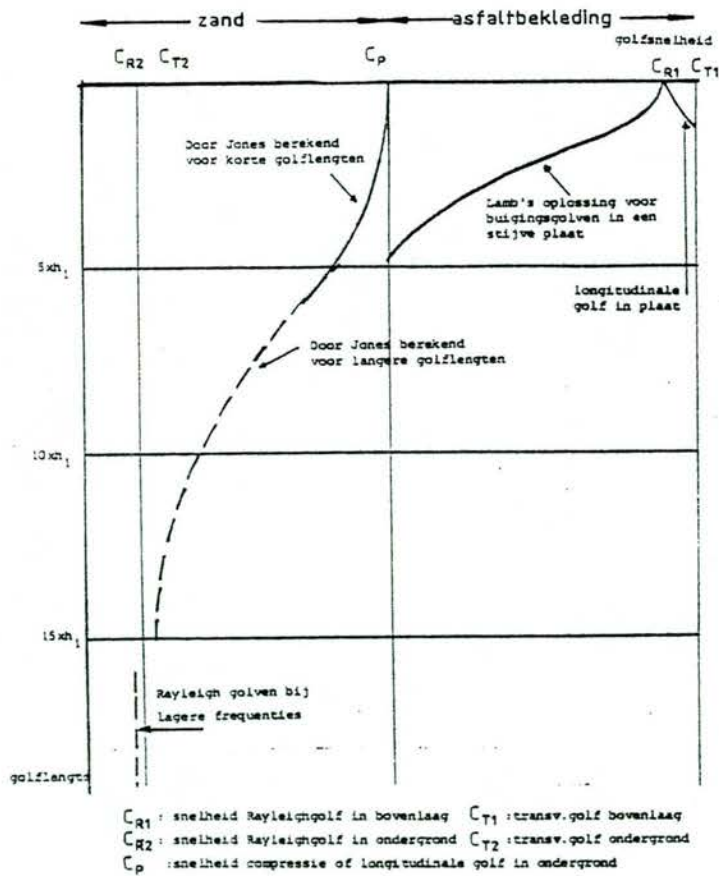


Fig. 3.4: Theoretische relaties tussen golfsnelheid en golflengte bij een plaat op ondergrond (ontleend aan (9)).



Het uiteindelijk resultaat van de meting is dus een geometrisch overzicht van het verloop de rayleighgolfsnelheid (een indirecte maat voor de G-modulus) met de golflengte (een indirecte maat voor de dieptewerking) over de gescande sector.

Als bijzonder geval voor de bekleding geldt bij hogere frequentie de overgang naar buiggolven, waaruit via een bekende dikte en poisson-modulus de akoestische E-modulus voor het asfaltbeton is te herleiden.

### 3.2. Discussie m.b.t. de beperkingen van het huidige systeem.

- 1) de huidige werkwijze is zeer tijdrovend, hetgeen ten dele samenhangt met veroudering (systeem dateert uit ~ 1962).
- 2) alleen de Goodman's Vibrator is onder alle omstandigheden (op grond, asfalt, steile taluds) inzetbaar, de RVM alleen op asfalt-taluds met helling  $< 1 : 8$  (tenzij allerlei ingrijpende voorzieningen getroffen worden)).

Dit beperkt dus het huidig mogelijke dieptebereik (tot circa 1.4 m m.v.).

- 3) de diepte-parameter is niet scherp bepaald.

Hierbij zijn twee afzonderlijke aspecten te onderscheiden:

- a) als bij dezelfde frequentie in het fase-afstandsdiagram (aantal golflengtes versus radiale afstand tot de trillingsbron) een afwijking van de lineaire relatie (dus de effectieve raleighgolfsnelheid) geconstateerd wordt.
- b) als op een vergelijkbare (taster) positie (op tenminste 1 golflengte afstand van de trillingsbron) bij verlaging van de frequentie (dus verhoging van de dieptewerking, die evenredig is met de golflengte) een wijziging van de raleighgolfsnelheid optreedt.

In geval (b) is de oorzaak te zoeken in een dieper gelegen laag met afwijkende elastische eigenschappen en/of dichtheid.

In geval (a) kan de oorzaak liggen aan horizontale inhomogeniteit.

Nu is de gebleken gevoeligheid voor deze materiaalinhomogeniteiten juist zeer welkom in het kader van een niet-destructieve verkenningmethode, mits enige nadere kwantificering in termen van diepte en omvang mogelijk is.

Deze kwantificering is langs twee wegen te verkrijgen:

- theoretische modelvorming,
- empirische methoden.

Bij de theoretische benadering is te denken aan een analytisch of numeriek rekenmodel voor lagensystemen resp. horizontale inhomogeniteit. Ook desbetreffend fysisch modelonderzoek hoort tot deze categorie.

Uit dergelijke benaderingen dienen een aantal praktische richtlijnen ("vuistregels" of vereenvoudigde rekenregels) voort te komen voor een eerste interpretatie in-situ. Dat wil zeggen, zodra zich een bepaald type afwijking manifesteert moet de meetprocedure ter plaatse optimaal aangepast kunnen worden, opdat deze afwijkingen zo effectief mogelijk qua diepte en omvang in kaart gebracht kunnen worden.

Deze modificatie in meetprocedure kan (mede afhankelijk van eventuele tijdsdrang) behalve aanpassing van de werkprocedure met de rayleighgolven ook impliceren dat (terstond) andere methoden worden ingezet (te denken valt aan bijvoorbeeld cross- of down-hole seismiek, penetratiesondering). Dit voorkomt de welbekende interpretatieproblemen (c.q. incomplete meetgegevens) "achteraf" en verhoogt de effectiviteit van de verkenningmeting (het "beeld" blijft reeds tijdens de verkenningmeting overzichtelijk). Hiertoe is uiteraard vereist, dat de primaire verwerking en bewerking van de meetgegevens simultaan met de metingen plaatsvindt (een PC met een beperkt software-pakket lijkt hiertoe ruim voldoende).

Bij de empirische benadering gaat het primair om "herkenning uit ervaring" (analoog aan de in de voorgaande passage genoemde "fysische modelmetingen"), hetgeen (echter) vooronderstelt dat een met voldoende varianten geverifieerde korrelatie bestaat tussen variaties als onder (a) en (b) genoemd met de terreingesteldheid. Het valt te betwijfelen of deze informatie thans reeds in voldoende mate bestaat. Daar het opzetten van een dergelijke databank veel tijd en inzet vergt en vooralsnog (dus) leidt tot een minder optimale werkwijze lijkt de primair theoretische benadering in de huidige oriënterende fase nuttig en zal wenselijk en uiteindelijk in alle opzichten effectiever uitwerken.

- 4) Het effect van het spanningsniveau en de Jones-overgangscurve (fig. 3.4) dient nader gespecificeerd te worden. Zoals in (1) vermeld is betreft dit laatste een overgangsverschijnsel m.b.t. de invloed van een relatief harde bovenlaag (i.c. bekleding) t.a.v. een relatief minder "stijve" onderlaag. Beide aspecten zijn in feite onder te brengen onder de bij het vorig punt genoemde theoretische en/of empirische modelvorming.

### 3.3. Aanpassingen of alternatieven?

Afgezien van de aparte problematiek die een talud  $> 1 : 8$  met zich meebrengt gaat het om drie belangrijke elementen:

- versnelling van de werkprocedure,
- de methode dient zo ongevoelig mogelijk te zijn voor externe storingsbronnen,
- alloceren van een relevante dieptemaat aan gemeten variaties.

De twee eerstgenoemde aspecten hebben met elkaar gemeen dat een groot deel van de problematiek door toepassing van zogeheten korrelatietechnieken bij de signaalbewerking kan worden aangepakt. Het derde punt, aangeroerd onder 3.2. (3) en (4), is wat moeilijker te schetsen.

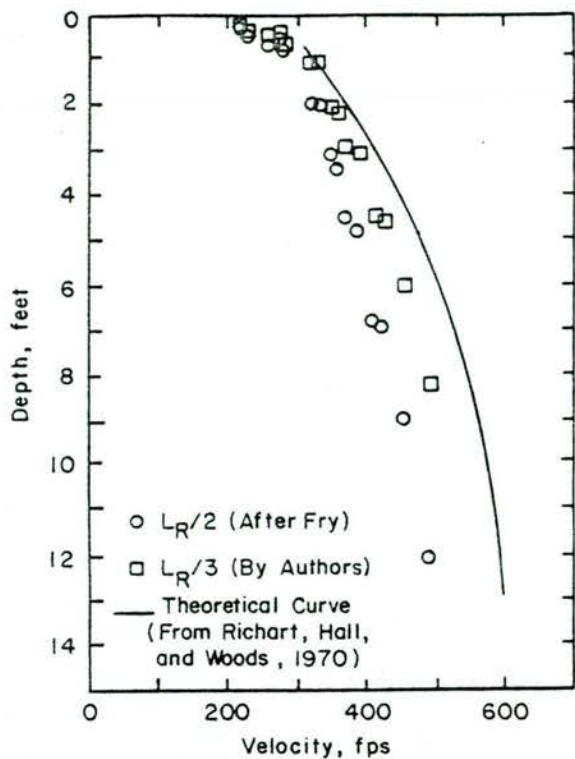
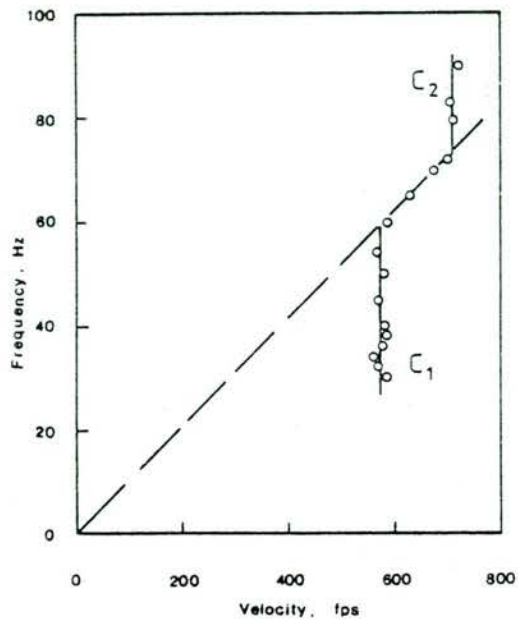


Fig. 3.5. Comparison of depth criteria using data from Eglin Field site



(b) Typical results.

Fig. 3.6 : Steady-state, Rayleigh-wave testing in layered systems.

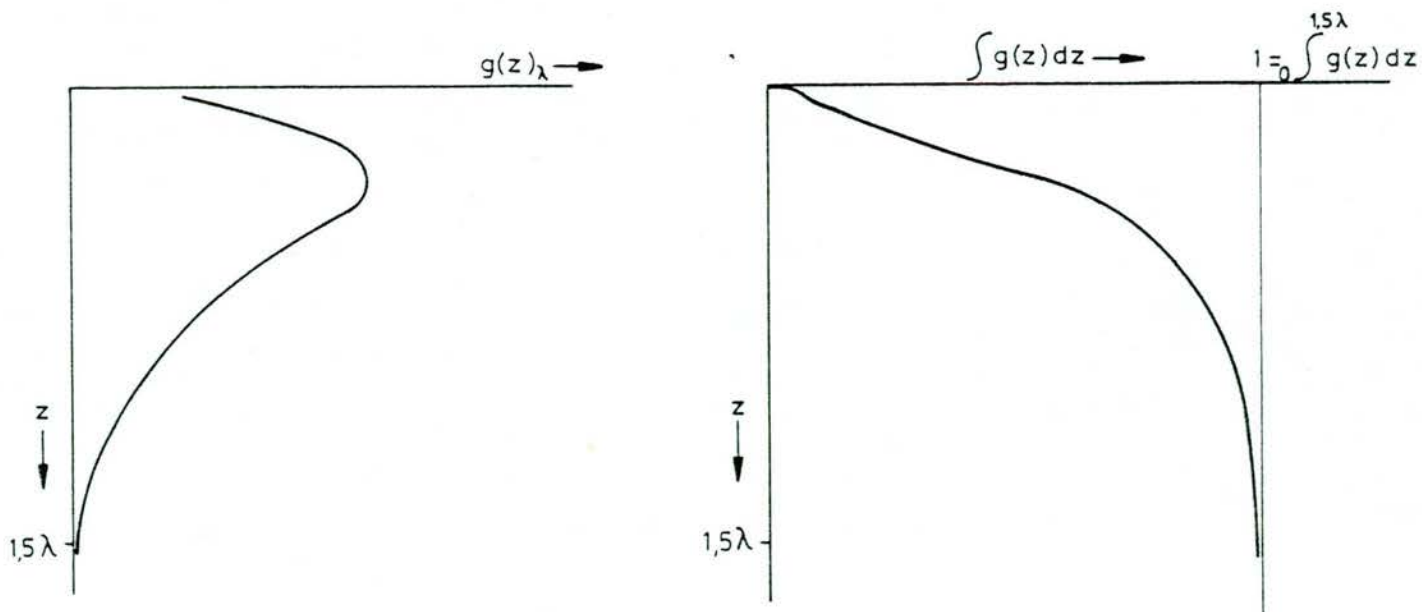


Fig 3.7: (Hypothetisch) verloop van de gewichtsfunctie

In het PCS-rapport [2] wordt voor de effectieve diepte met enige slagen om de arm  $z_{\text{eff}} = \lambda/2$  aangehouden. Ook in een rapport van Austin University (Texas), [3] wordt dit probleem gesignaleerd. Uit korrelatie met cross-hole metingen neigden de auteurs naar een effectieve diepte  $z_{\text{eff}} = \lambda/3$  (zie figuur 3.5). Deze "zwaartepunts"-opvatting laat m.i. echter geen ruimte voor echte differentiatie van  $C_R$  met de diepte (zie figuur 3.6). Daartoe wordt een vereenvoudigde hypothese ingelast.

Stel, dat uit bijvoorbeeld een energieverdelingscriterium (zie fig. 3.7) volgt hoe bij een homogeen medium de bijdrage van elke diepte tot de voortplantingssnelheid ( $C_R$ ) is. Laat  $C_R$  afhangen van een materiaalparameter  $M$ .

Als de bijdrage of gewichtsfunctie  $g\{z\}_\lambda$  niet-signifikant verandert bij een "storing"  $\Delta M$  (van beperkte omvang), dan kan, onder restricties (!), de volgende methode voorgesteld worden:

- a) stel er is een relatief hoogfrequente meting aanwezig (waarbij  $1,5\lambda_1 = 0,3$  m bijvoorbeeld) als basisgegeven ( $C_{R,1}$  samenhangend met materiaalparameter  $M_1$  over die diepte).
- b) stel bij wat lager frequentie  $C_{R,2} \neq C_{R,1}$ , dan betekent dit dat over (tenminste) diepte  $\lambda_2 = \lambda_1$  een significant effect in  $M$  is opgetreden ( $M^{(2)}$ ), horend bij  $C_{R,2}$ . Die is nu opgebouwd (mits grootheid  $M$  frequentie-onafhankelijk is) te denken als:

$$M^{(2)} = \int_0^{1,5\lambda_1} g(z)_{\lambda_2} M(z) dz + \int_{1,5\lambda_1}^{1,5\lambda_2} g(z)_{\lambda_2} M(z) dz \quad (1)$$

Met deze uitdrukking is helaas niets aan te vangen, daar uiteraard de lokale waarden  $M_{\{z\}}$  onbekend zijn.

Definieer daarom:

$$G_1(\lambda_2) = \int_0^{1,5\lambda_1} g(z)_{\lambda_2} dz \text{ en } G_2(\lambda_2) = \int_{1,5\lambda_1}^{1,5\lambda_2} g(z)_{\lambda_2} dz \quad (2)$$

$$G_2 = 1 - G_1, \text{ immers } \int_0^{1,5\lambda_2} g(z)_{\lambda_2} dz \hat{=} 1.$$

Derhalve globaal (!):

$$M^{(2)} = G_1(\lambda_2)M_1 + G_2(\lambda_2)M_2 \rightarrow M_2 = \frac{M^{(2)} - G_1M_1}{G_2} \quad (3)$$

Immers  $M_1$  geldt als "effectief" gemiddelde over  $0 \leq z \leq 1,5\lambda_1$ .

c) bij een 3e meting wordt  $C_{R,3} \neq C_{R,2}$  vastgesteld. Bijbehorende effectieve  $M^{(3)}$  en  $\lambda_3$  leiden nu tot:

$$\begin{aligned} M^{(3)} = & \int_0^{1,5\lambda_1} g(z)_{\lambda_3} M(z) dz + \int_{1,5\lambda_1}^{1,5\lambda_2} g(z)_{\lambda_3} M(z) dz + \\ & + \int_{1,5\lambda_2}^{1,5\lambda_3} g(z)_{\lambda_3} M(z) dz \end{aligned} \quad (4)$$

Op dezelfde wijze als onder (3) worden gedefinieerd:

$G_1(\lambda_3)$ ,  $G_2(\lambda_3)$  en  $G_3(\lambda_3)$ , leidend tot:

$$M_3 = \frac{M^{(3)} - G_1(\lambda_3)M_1 - G_2(\lambda_3)M_2}{G_3(\lambda_3)} \quad (5)$$

d) dit "voorwaarts" differentieproces is voort te zetten tot de plaatselijk laagste frequentie (dieptste penetratie van de Rayleighgolf) en levert dan een globaal beeld van  $M\{z\}$  op.

Bezwaar tegen de procedure:

$$\int_{1,5\lambda_n}^{1,5\lambda_{n+1}} g(z)_{\lambda_{n+j}} M(z) dz \neq \frac{\int M(z) dz * \int g(z) dz}{1,5(\lambda_{n+1} - \lambda_n)} = \bar{M}_{n+1} * \bar{G}_{n+1}(\lambda_{n+j}) \quad (6)$$

Het lokale verloop van  $g(z)$  en  $M(z)$  over een interval  $\Delta z$  bepaalt de bijdrage tot de integraal, en deze bijdragen kunnen in totaal zowel groter als kleiner zijn dan het product van de gemiddelden over het interval.

Om deze fout acceptabel klein te houden mogen de intervallen  $\lambda_{n+1} - \lambda_n$  dus niet te groot worden gekozen (met name niet omdat de lokale weegfunctie per opvolgende diepte-stap verandert!).

Te klein mogen ze ook niet zijn, omdat anders geen significante verandering in  $C_R$  (dus  $M$ ) kan worden vastgesteld en dit kan eveneens forse afwijkingen tot gevolg hebben.

Nadere analyse is nodig om tot een optimum-formulering te komen. Hoe dan ook, deze procedure lijkt beter dan die, voorgesteld door Heisey en Stokoe II [3], waarbij de "effectieve" diepte voor de bepaalde waarde van rayleighgolfsnelheid toegewezen wordt als  $z = \frac{\lambda}{3}$  (bedenk  $0,3 \lambda < z_{\text{eff}} < 0,5\lambda$  is het interval van effectieve dieptes, genoemd door diverse publicisten tot 1981). Immers, niet aangetoond wordt dat de weegfunctie (die men misschien evenredig mag stellen aan het verloop van het kwadraat van de amplitude (zie fig. 3.3):

$$a^2 = a_v^2 + a_h^2$$

met de diepte (tot  $1,5\lambda$ ) omstreeks  $z = 0,3$  à  $0,4\lambda$  dermate overheerst dat de bijdrage van de laag  $0 \rightarrow 0,3\lambda$  alsmede  $0,5 \rightarrow 1,5\lambda$  te verwaarlozen zou zijn in het totstandkomen van een "effectieve" waarde van de raleighgolfsnelheid  $C_R$ . Merk ten slotte op dat in de voorgestelde procedure (1)  $\rightarrow$  (6) vermeden is om de snelheden zelf te wegen. Met opzet is gekozen voor de indirecte, theoretisch of modelmatig te bepalen, relatie:

$$C_R = f(M) \quad (7)$$

waarbij M de "mixture"-grootte is van het inhomogeen gelaagde materiaal (waarvan aangenomen wordt, dat die lineair is te wegen, als gesuggereerd in (4)).

Het andere probleem betreft de uitvoeringswijze van de meting. Gesteld dat bij 15 frequenties (tussen 20 en 500 Hz) langs een radiaal ca. 8 golflengtebepalingen verricht worden, dan zal hiermee tenminste 2 uur gemoeid zijn. Voor het in kaart brengen van lokale, relatief ondiepe, grondslagvariabiliteit zou zelfs bij arbeidsintensieve inzet van meerdere "tasters" (vertikale snelheids- of versnellingsopnemers) een extra uur gevergd worden om (zeg)  $400 \text{ m}^2$  proefvak in kaart te brengen. De mobiliteit (en dus de personele kostenfactor) en het rendement (te scannen  $\text{m}^2/\text{uur}$ ) liggen dus met de huidige mogelijkheden niet hoog. Zelfs met automatisering (tasters aan rails met verticale en horizontale servo-gestuurde verplaatsing en softwarematige "on line" gegevensbewerking) lijkt de te behalen tijdswinst mogelijk niet voldoende om van een efficiënte ( $\text{m}^2/\text{dag}$ ) verkenningsmethode te mogen spreken (gezien tegen de achtergrond van vele km dijktracé en een te verkennen dwarsafmeting van bijvoorbeeld 40 m, of voor het geval werkstagnatie als gevolg van de verkenning beperkt dient te zijn).



In de instrumentele meet- en regeltechniek speelde in de jaren 60 een analoge problematiek. Daarbij werden methoden voor stroomkarakterisering m.b.v. stochastische signalen en pulsresponsie onderzocht om o.a. de efficiency te verhogen.

Een dergelijke trend is ook (sinds ca. 1970) te bespeuren in de techniek voor de in-situ verkennings- en controle-metingen (zie o.a. [3, 4, 5] alsook reeds bij enkele akoestische laboratoriummethoden [6, 7], waarop in een ander, aanverwant, verband wordt teruggekomen. Voor wat betreft de rayleighgolfmethode wordt o.a. Rao (1969 [8]) als een der pioniers met betrekking tot de toepassing van signaalbewerkingstechnieken genoemd.

#### Intermezzo.

Een belangrijk aspect is ook de dispersie-gevoeligheid van de Rayleigh-golf. In het algemeen wordt ervan uitgegaan, dat bij een homogeen-isotroop elastisch (halfruimte) medium geen "frequentie-dispersie" optreedt (dit is zelfs de bruikbaarheidsbasis van de rayleighgolfmethoden).

Stel:

$$C_R = k(v) \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

$$(k(v) \sim 0,85 - 0,95)$$

Nu blijkt (globaal) bij granulaire grondslag een spanningsniveau-afhankelijkheid:

$$G_0 = F(\rho, s) \sigma_0'^m \quad (m \sim 0,3 \text{ à } 0,4) \quad (9)$$

$F(\rho, s)$  - is een pakkingsfunctie (effect van dichtheid en structuur),

waarbij:

$$\sigma'_0 = \left(\frac{1 + 2K_0}{3}\right) \rho g z \quad (10)$$

(homogene "droge" grond ondersteld).

$$(K_0 \rightarrow \text{gronddrukcoëfficiënt} = \frac{\sigma_{\text{horizontaal}}}{\sigma'_{\text{vertikaal}}} \sim 0,4 \text{ à } 0,9).$$

$$\text{Daar } z_{\text{eff}} = \beta \cdot \lambda_R \quad (\beta < 1, \text{ zeg } 0,3 < \beta < 0,5) \quad (11)$$

( $\lambda_R$  - golflengte van de rayleighgolf).

volgt dus uit de substitutie (18)  $\rightarrow$  (10  $\rightarrow$  (9)  $\rightarrow$  (8):

$$C_R = \frac{k(v)}{\sqrt{\rho}} \left[ \left(\frac{1 + 2K_0}{3}\right) \rho g \beta \lambda_R^m \right]^{0,5} = \left\{ \left(\frac{1 + 2K_0}{3}\right) g \beta \right\}^{0,5} k(v) \lambda_R^{m/2} \quad (12)$$

In [4] wordt dus gesteld, dat reeds onder "ideale" homogene grondcondities geldt:  $C_R \propto \lambda_R^{m/2} \sim \lambda_R^{1/6}$  en dat "dus" dispersief gedrag optreedt (fig. 3.8).

Geheel korrekt is dit niet daar  $G = f\{z\}$  omdat toenemende  $\sigma'_0\{z\}$  met de diepte nu eenmaal een feit is (zie ook opmerkingen in [1]). Het (globaal) lineair met de diepte toenemen is op te vatten als een continu verloopende elastische inhomogeniteit (en dient als zodanig dan ook in de eerder in deze paragraaf genoemde M-parameter te zijn verwerkt).

Een ander aspect, dat ook voor dynamicproblemen van belang is, is eveneens in fig. 3.8 (ontleend aan [4]) aangegeven, nl. de demping (hier is bedoeld: "hysteresedemping" en niet "visceuse demping", die ook kan optreden (!)).

Voor deze hysteresedemping werd in [4] een globale afhankelijkheid  $D + \lambda_R^{-2/3}$  (waarbij eveneens het spanningsniveau  $\sigma'_0$  een rol speelt) afgeleid en min of meer bevestigd in de resultaten van fig. 3.5. Waarom dit intermezzo?

Ter illustratie van het feit dat met signaalbewerking meer informatie uit de meting is te halen dan doorgaans gebeurt. Om de lijn van de gedachtengang niet te interrumperen zal een samenvatting van de daartoe benodigde signaalbewerkingstheorie in de appendix worden gegeven). Alvorens naar de pulsresponsie (spectraalanalyse)-methode over te gaan nog het navolgende:

Voor de verticale component van de amplitude van de deeltjesbeweging van de rayleighgolf geldt:

$$A_v = A_{o,v} \left[ \frac{\exp\{-\alpha r\}}{\sqrt{r}} \right] \quad (14)$$

- r - afstand tot de excitatiebron (niet te dicht erbij!)
- $\alpha$  - verzwakkingscoëfficiënt (samenhangend met voornoemd type "materiaal"demping).
- $A_{o,v}$  - initiële amplitude ( $r \rightarrow 0$ , bij puntbrontheorie)

$\sqrt{\frac{1}{r}}$  - de functie voor de geometrische of radiatie-demping.

Voor 2 punten (n en n + 1) die ver genoeg uiteen liggen geldt dus:

$$\frac{A_{v,n+1}}{A_{v,n}} = \left( \frac{r_n}{r_{n+1}} \right)^{0,5} \exp \{-\alpha(r_{n+1} - r_n)\} \quad (15)$$

In de exponentiële term zit dus de "materiaal-demping". Bij de bepaling van het "logaritmisch decrement" moet de voor geometrische demping gecorrigeerde amplitudeafname beschouwd worden over een lengte  $(r_{n+1} - r_n) = \lambda_R$ , d.w.z.:

$$\delta = \ln \left[ \left( \frac{r_{n+1}}{r_n} \right)^{0,5} \frac{A_{v,n+1}}{A_{v,n}} \right] = \alpha \lambda_R = \alpha \left( \frac{C_R}{f} \right) \quad (16)$$

Als nu ondersteld wordt (volgens [3] vrij algemeen) dat  $\delta$  onafhankelijk van de frequentie is, dan zijn er twee mogelijkheden. Ofwel  $C_R$  is lineair evenredig met de frequentie ( $f$ ), ofwel (vrij algemeen aangenomen (3))  $C_R$  is vrijwel onafhankelijk van  $f$ , implicerende:

$$\alpha = \left( \frac{\delta}{C_R} \right) f.$$

dat verzwakkingscoëfficiënt  $\alpha$  lineair met de frequentie toeneemt.

Opmerking: Dit verdraagt zich dus niet geheel met hetgeen eerder werd gesteld [4], nl.  $D_t + \lambda_R^{-2/3}$ , maar ook  $C_R + \lambda_R^{1/6}$ .

Een tweetal voorbeelden, ontleend aan [3] (zie fig. 3.9.a. en b) laat de relatie tussen  $\alpha$  en  $f$  zien (bepaald uit veldmetingen). Een toenemende tendens is onmiskenbaar, de lineariteit lijkt gezien de spreiding niet onomstotelijk aantoonbaar (Let wel, behalve andere typen demping speelt ook de "submacro-inhomogeniteit" een rol en leidt o.a. tot "verstrooiings-demping" en/of lokale interferenties, die uiteraard ook tot spreiding in de amplitudemetingen, dus de daaruit berekende "dempingscoëfficiënt" leidt).

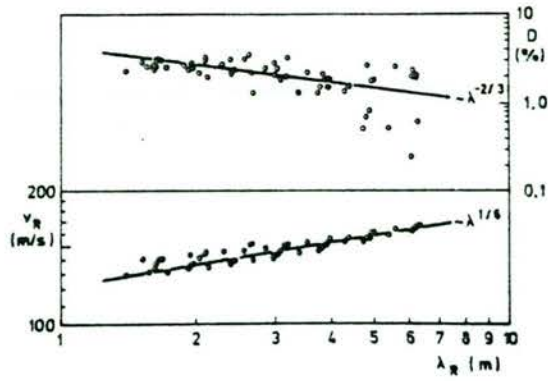


Fig. 3.8: Dispersionskurven  $v(\lambda)$  und  $D(\lambda)$  für 6 Meßachsen

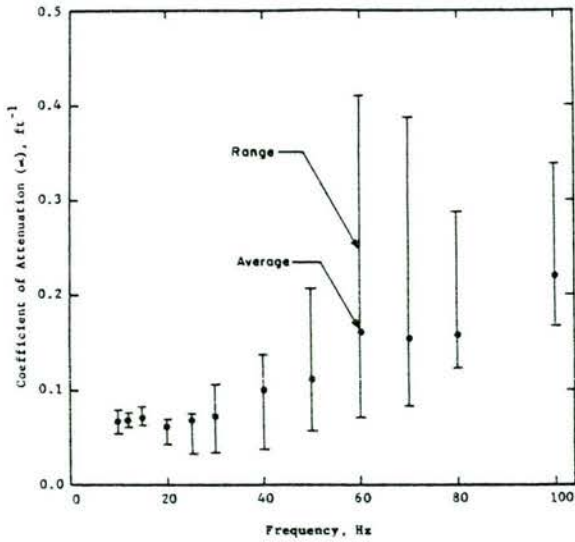


Fig. 3.9 a: Variation of coefficient of attenuation with frequency at Walnut Creek site.

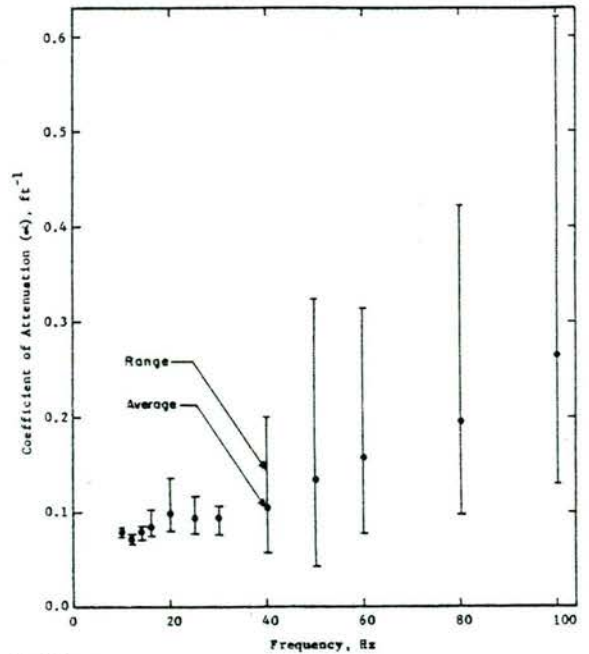


Fig. 3.9 b: Variation of coefficient of attenuation with frequency at the Crossing Site.

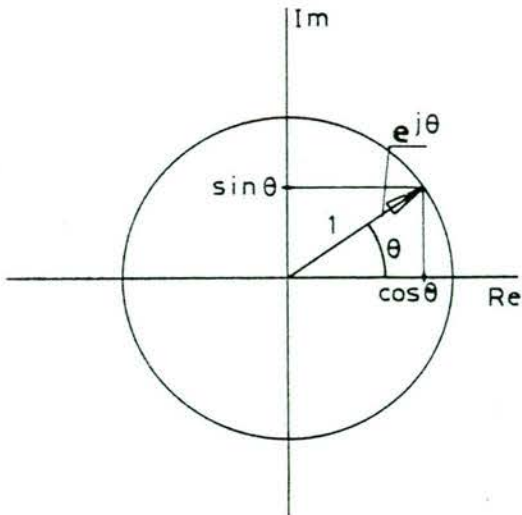


Fig. 3.10 a: Euler diagram

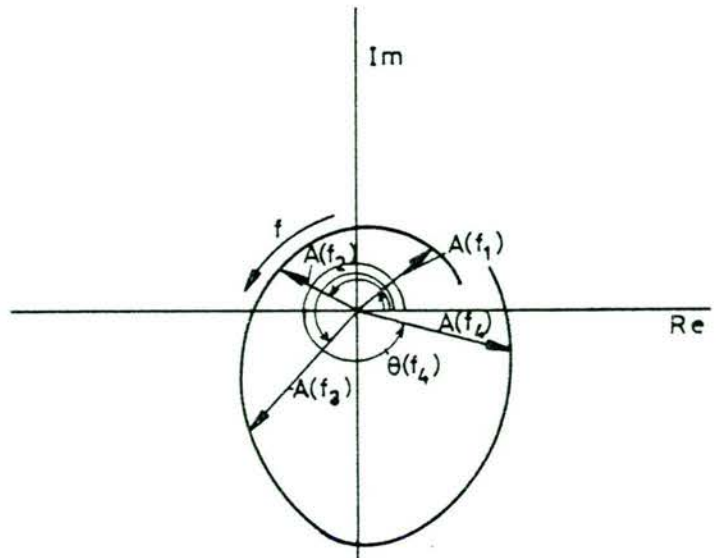


Fig 3.10 b: Amplitude-fase diagram met frequentieparameter.

Na dit achtergrondintermezzo over naar de pulsresponsie-methode [3].  
Waarom werd hiertoe besloten?

1. de methode is snel en kosteneffectief (een belangrijk criterium voor een verkennings"instrument").
2. de methode is non-destructief en levert meer informatie op.
3. de excitatie(puls) is eenvoudig via een valhamer of simpel valgewicht-systeem op te wekken.
4. door de noodzakelijke toepassing van korrelatie- en (signaal)-filtertechnieken wordt de invloed van storende trillingsvelden gereduceerd.

Een pulsvorming signaal is mathematisch opgebouwd te denken uit een (in bandbreedte) begrensd continuspectrum van fasen en amplituden. Zie hiertoe Appendix A voor een zeer beknopt overzicht. Een signaal  $x(t)$  is dan weer te geven als

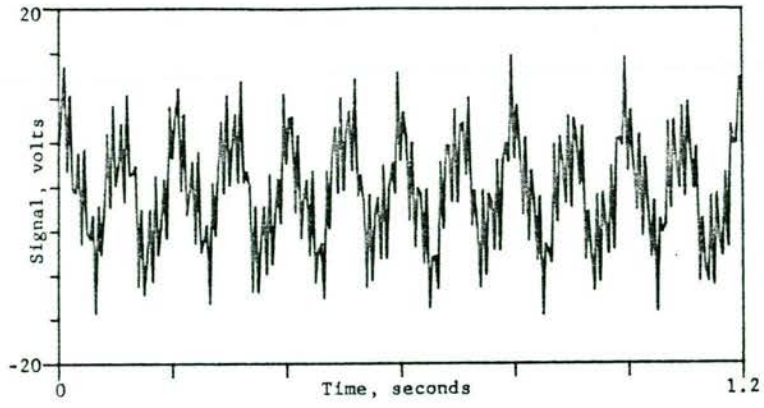
$$x(t) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \int_0^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \right\} \quad (17)$$

waarbij  $\operatorname{Re}$   $\rightarrow$  reële deel van de functie,  $j = \sqrt{-1}$  en  $X(f)$   $\rightarrow$  het (continu) frequentiespectrum behorend by signaal  $x(t)$

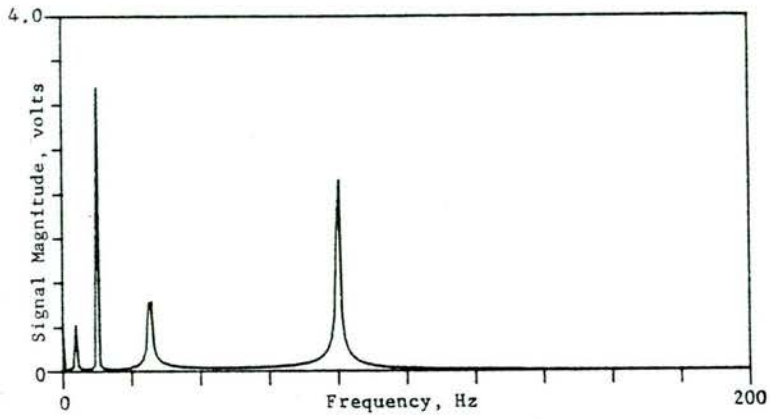
Een complex getal ( $\bar{A} = p + jq$ ) is te noteren als

$$\bar{A} = A e^{j\theta} \quad (18)$$

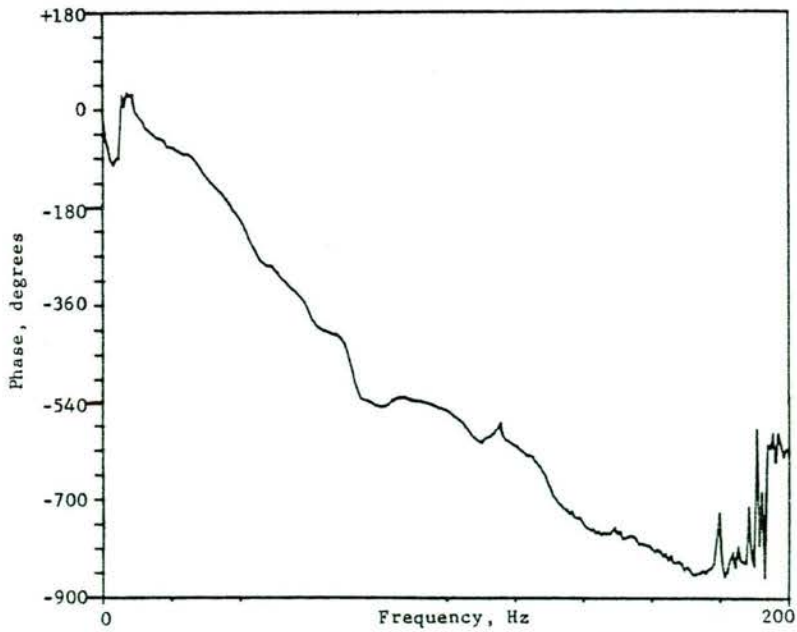
met  $A = \sqrt{p^2 + q^2}$  en  $\theta = -\operatorname{arctg}(q/p)$



(a) Signal in the time domain.



(b) Signal in the frequency domain.



(b) True ("Unraveled") phase plot.

Fig. 3.10 c

Met een relatie van Euler:

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$$

is dit figuratief in het complex vlak weer te geven (figuur 3.10.a.).  $\bar{A}$  is dus een vector ("phasor"), met amplitude A in fasehoek  $\theta$ . In de integrand van (17) zijn zowel amplitude als fase frequentie afhankelijk (ahw. A(f) en  $\theta(f)$  in figuur 3.10.b.). Daarenboven kan de fasehoek tijdafhankelijk verlopen ( $\theta(f,t)$ ), hetgeen impliceert dat  $\bar{A} = \bar{A}(f,t) \rightarrow$  roterende vector in complex vlak. De verandering A(f) van  $f = f_{\min}$  tot  $f = f_{\max}$  heet het amplitudespectrum. Evenzo heet  $\theta(f)$  het fase-spectrum (figuur 3.10.c.). Met de ultra-beknopt in Appendix A omschreven technieken kan hiermee spektraalanalyse bedreven worden. Een concreet resultaat is bijvoorbeeld, dat als een specifiek pulsvormige golfstoot (Rayleighgolf) langs 2 geofoons loopt (die  $\Delta x$  uiteen liggen), met behulp van spektraal-korrelatietechnieken voor elke frequentie (f) de voortplantings-snelheid ( $C_r$ ) volgt uit het fasespectrum van de gecorrigeerde geofoonsignalen. Namelijk uit de faseverschillen  $\Delta\theta$  volgt:

$$\Delta\theta(f) = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda_r(f)} \rightarrow C_r(f) = f \lambda_r = 2\pi f \left[ \frac{\Delta x}{\Delta\theta(f)} \right] \quad (19)$$

Dit betekent dus, dat met een enkele meting het gehele "spektrum"  $C_r(f)$  van Rayleighgolfsnelheden bij elke frequentie bekend is. Impliciet is dus ook  $C_r(\lambda)$  bekend (immers  $\lambda_r = C_r/f$ ), dat wil zeggen de "indirecte" diepte afhankelijkheid is ook gegeven (zie toelichting onder formules (1)  $\rightarrow$  (6)).



Het zal duidelijk zijn dat uit het amplitude-spektrum  $A(f)$  en (15)

$$\frac{A_{v,n+1}}{A_{v,n}(f)} = \left(\frac{r_n}{r_n + 1}\right)^{0,5} \exp \{-(r_n + 1 - r_n) \alpha(f)\} \quad (15^*)$$

en, naar aanleiding van (16):

$$\delta = \ln \left[ \left(\frac{r_n + 1}{r_n}\right)^{0,5} \frac{A_{v,n+1}(f)}{A_{v,n}(f)} \right] = \lambda_p \alpha(f) = \frac{C_r(t)}{f} \alpha(f)$$

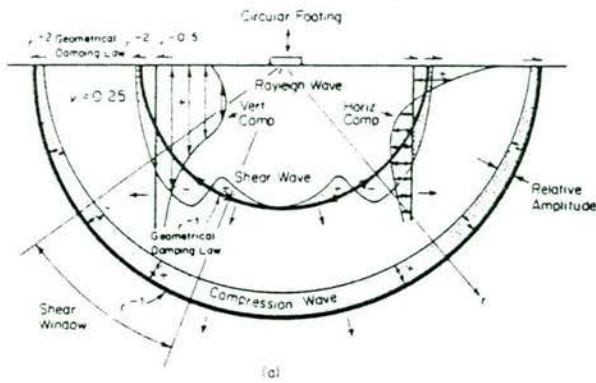
het "spektrum" van verzwakkingscoëfficiënten ( $\alpha(f)$ ) volgt, die maatgevend zijn voor de demping

$$\alpha(f) = \left\{ \frac{\delta}{C_r(f)} \right\} f \quad (20)$$

#### Opmerking

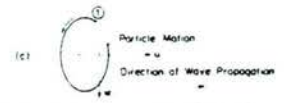
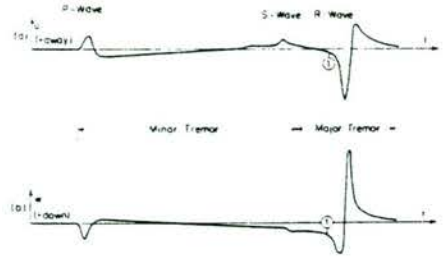
Het is wellicht niet overbodig op te merken dat een meting vanuit het voorgaande betoog in de praktijk inhoudt dat het signaal (de "drukstoot" met valhamer of valgewicht etc.) enkele (5 à 8 maal) herhaald dient te worden om de signalen te kunnen "opschonen" van storingen en (stochastische) ruis. Dit behoeft bij voldoende up to date apparatuur van de primaire signaalverwerking echter nauwelijks significante extra tijd te kosten (in verhouding tot het uitzetten van het meetnet bijvoorbeeld)

Het zal echter duidelijk zijn dat een dergelijke investering in (commercieel verkrijgbare) signaalbewerkingsapparatuur het mogelijk maakt om rigoureuze tijdwinst te boeken, terwijl extra informatie (zie ook Appendix A) en kwaliteitsparameters van de meting ook uit de signaalanalyse volgen. Ook stelt de inzetbaarheid van de apparatuur op taluds steiler dan 1 : 8 aanzienlijk minder hoge eisen dan bijvoorbeeld met de Road Vibration Machine het geval zou zijn.



Wave Type	Per Cent of Total Energy
Rayleigh	67
Shear	26
Compression	7

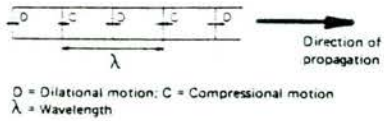
(a)



(c)

**A. Body waves**

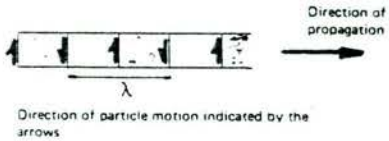
1. Compressional



Infinite medium  
 $V_p^2 = E(1-\nu)/\rho(1-2\nu)(1+\nu)$   
 Very thin rod  
 $V_p^2 = E/\rho$

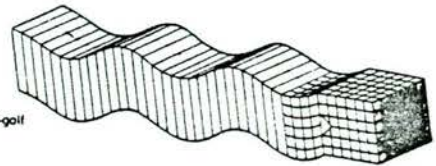


2. Shear  
 SH (Horizon Polarization)  
 SV (Vertical Polarization)



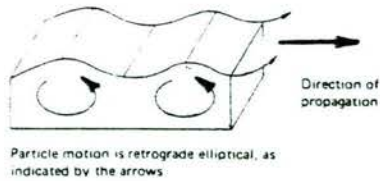
$V_s^2 = G/\rho$

E = Young's Modulus  
 G = Shear Modulus  
 nu = Poisson's Ratio  
 rho = Mass Density (Unit weight divided by gravity)



**B. Surface waves**

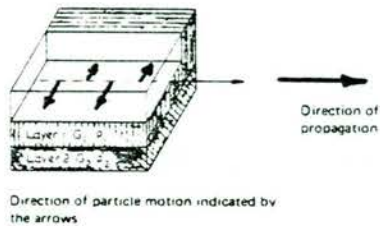
1. Rayleigh



$V_R^2 = G/\rho$



2. Love



Short wavelengths  
 $V_L = (G_1/\rho_1)^{1/2}$

Long wavelengths  
 $V_L = (G_2/\rho_2)^{1/2}$

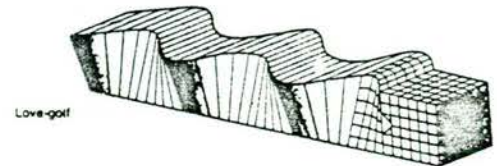


Fig. 4.1: Golftypen bij excitatie aan een vrij oppervlak.

#### 4. Seismische methoden (P&S-golfsnelheidsbepaling)

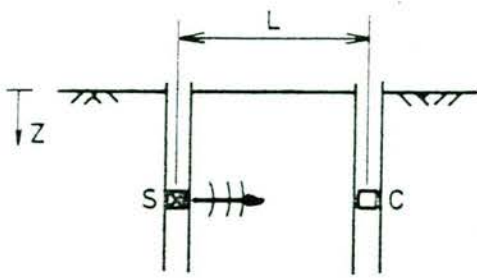
In dit diagnose-schema komen deze methoden (figuur 4.1) in diverse uitvoeringsvormen terug

1. als NDT oppervlakteverkenningmethode (in de off-shore is de p-golf reflectie-methode bekend als subbottom-profilering, op het land vindt meestal de p- en s-golf refractiemethode plaats (zie figuur 4.2).
2. als locale (partieel destructieve) methode die één (downhole survey) of twee (crosshole survey) boorgaten vergt. In beide gevallen wordt dus een vorm van p- en s-golftransmissie toegepast (figuur 4.2).

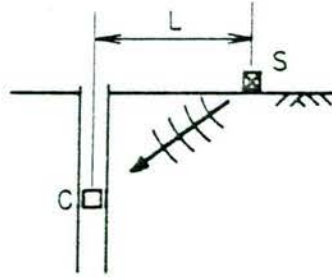
Veelal bedraagt de seismische puls-frequentieband 20-500 Hz. De amplitudes zijn zeer gering ( $10^{-3}$  à  $10^{-4}$ % deformatie) zodat vrijwel puur elastische verschijnselen optreden met zeer beperkte materiaaldemping. Ondanks de geometrische spreiding (radiatiedemping) zijn hierdoor zowel in diepte als afstand forse bereiken mogelijk. Mede in samenhang met de effectieve golflengte wordt de meet-resolutie bepaald door de strategische plaatsing van het gefoon-netwerk (bedekking), althans bij de refractiemethode. [9]. Aspecten hierbij zijn ondermeer:

- het gewenste dieptebereik
- de diepte van de eerste akoestische laagovergang
- het niet-ideaal vlak lopen van akoestische laagovergangen
- het effect van (relatief) dunne lagen
- een laag met lagere snelheid tussen 2 lagen met hogere snelheid (impliceert dat aan de bovenste laagscheiding geen refractie optreedt, figuur 4.3)
- het effect van grotere lenzen

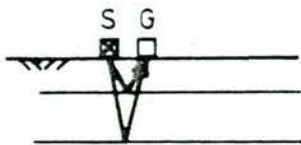
Er bestaan diverse modellen om dit type situaties te analyseren. Ook de ontwikkeling van desbetreffend interpretatie-software is in volle gang. Neven-informatie uit boringen of sonderingen kan nodig zijn



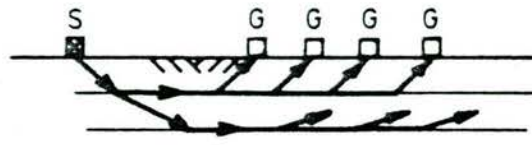
cross hole  
("directe" transmissie)



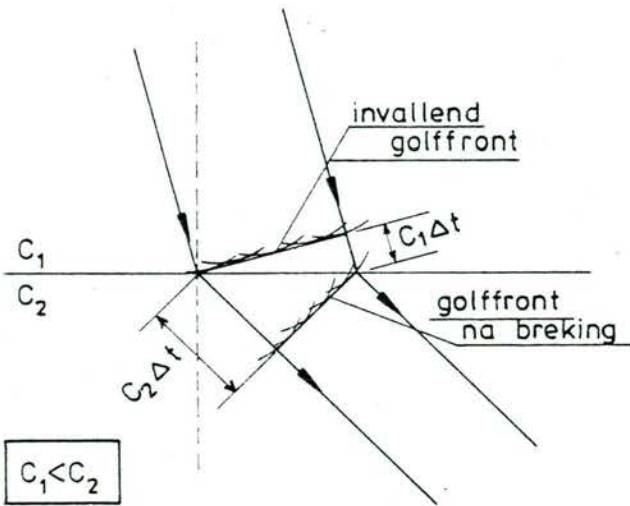
down hole  
(variabele transmissie)



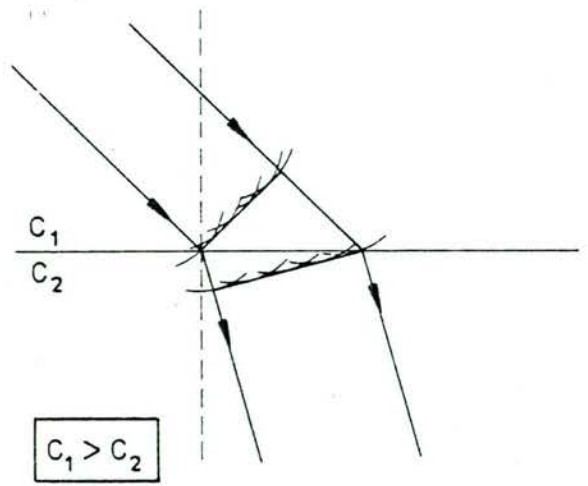
reflectie methode



refractie methode

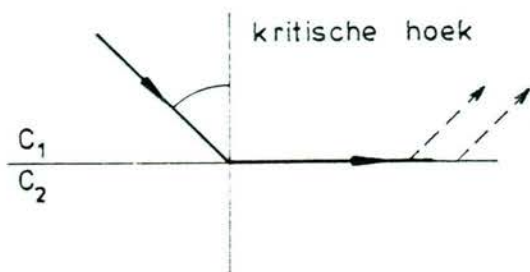


$C_1 < C_2$



$C_1 > C_2$

PRINCIPE VAN GOLFFRONTBREKING (REFRACTIE)  
N.B. KAN OOK BIJ DOWNHOLE TECHNIK EEN ROL SPELEN.  
(REFLECTIE TREEDT OOK OP, MAAR IS HIER NIET INGETEKEND)



KRITISCHE REFRACTIE (BASIS VAN REFRACTIEMETHODE)  
VEREIST IS:  $C_2 > C_1$

Fig.4.2: Principe seismische methoden

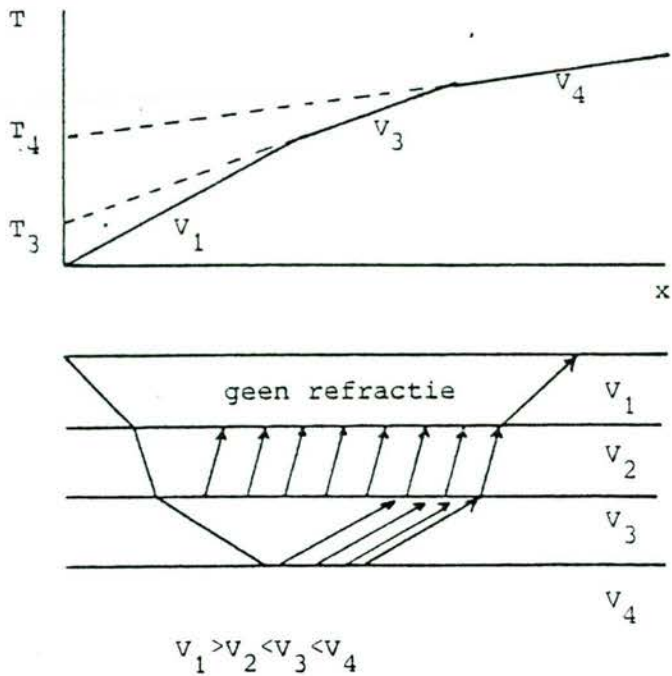
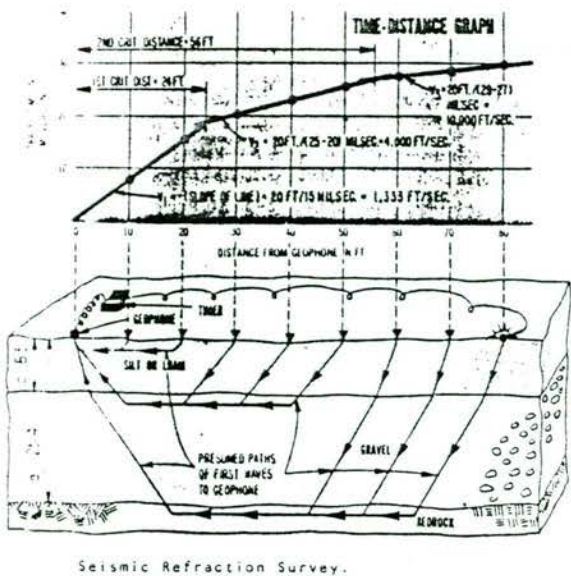


Fig. 4.3

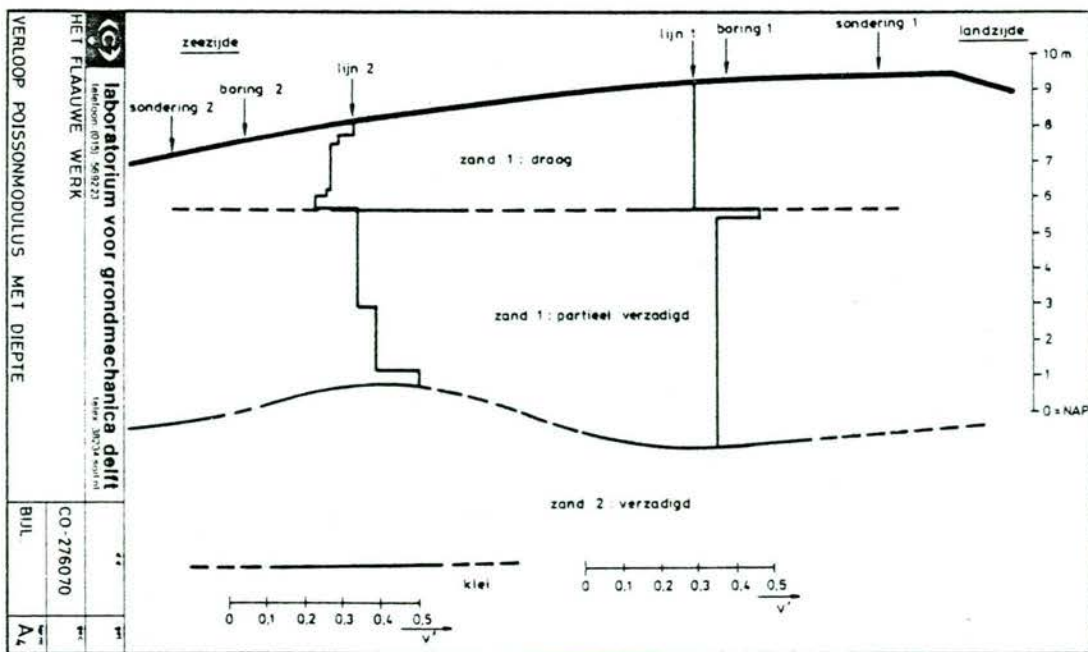
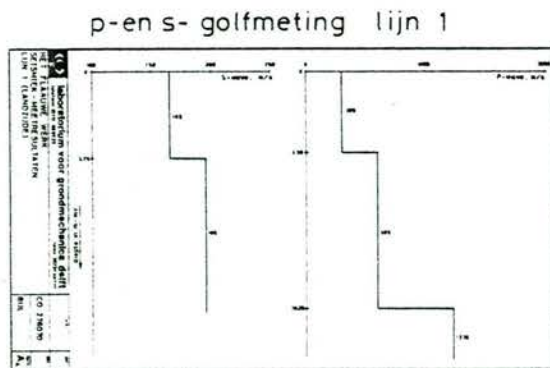
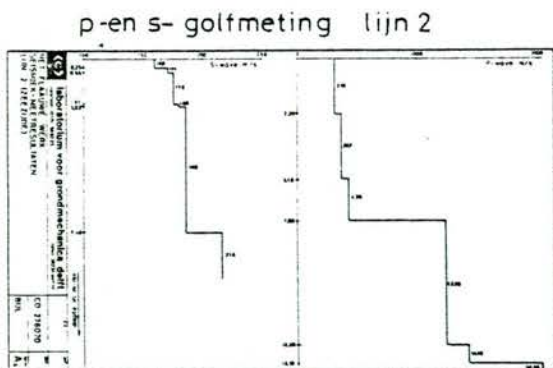


Fig.4.4: Verloop van p-en s- golfsnelheid en daaruit afgeleide Poisson modulus met de diepte (lokatie Flauwe Werk)

voor het aanscherpen van de interpretatie. Gezien de tamelijk gunstige perspectieven op interpretatief en instrumenteel gebied kunnen we ons beperken tot enkele randproblemen met betrekking tot de inzetbaarheid.

- hoe gevoelig is de methode voor storingen van externe bronnen (bijvoorbeeld bulldozers op het werk) die significante stagnatie tot gevolg kunnen hebben?
- in hoeverre werkt een harde toplaag of bekleding belemmerend?
- welke efficiency-verhogende maatregelen zijn mogelijk (met name positioneren en aanpassen van het geofoonnetwerk, gebruik van multidirectionele opnemers)?

Beperkingen van de refractiemethode zijn dat:

- tamelijk reguliere akoestische laagovergangen een voorwaarde zijn voor zinvolle inzetbaarheid
- het snelheidsbeeld discontinu met de diepte is. Dit dient te worden afgewogen tegen de kenmerken:
  - . de inzetbaarheid op taluds vormt geen probleem
  - . bij optimale efficiency kan in relatief beperkte tijd een vrij grote sector bemeten worden.

Blijkt het daarentegen wenselijk plaatselijk een gedetailleerder inzicht te krijgen, dan is het nodig om met 1 of meer boorgaten te werken en een transmissietechniek toe te passen (figuur 4.2 en 4.5). Het zal duidelijk zijn, dat bij de downhole-methode (schuine transmissie) ook straalbrekings-effecten aan laagovergangen optreden. Bij de crossholemethode kan, afhankelijk van de geometrie van lagen en snelheden een storend refractie-effect optreden (zie o.a. (9)). Afgezien van enkele technische beperkingen leveren de transmissiemethoden in principe een gedetailleerd (maar wel plaatselijk) beeld van het snelheidsverloop met diepte, die bij deze methode uiteraard expliciet gemeten wordt.

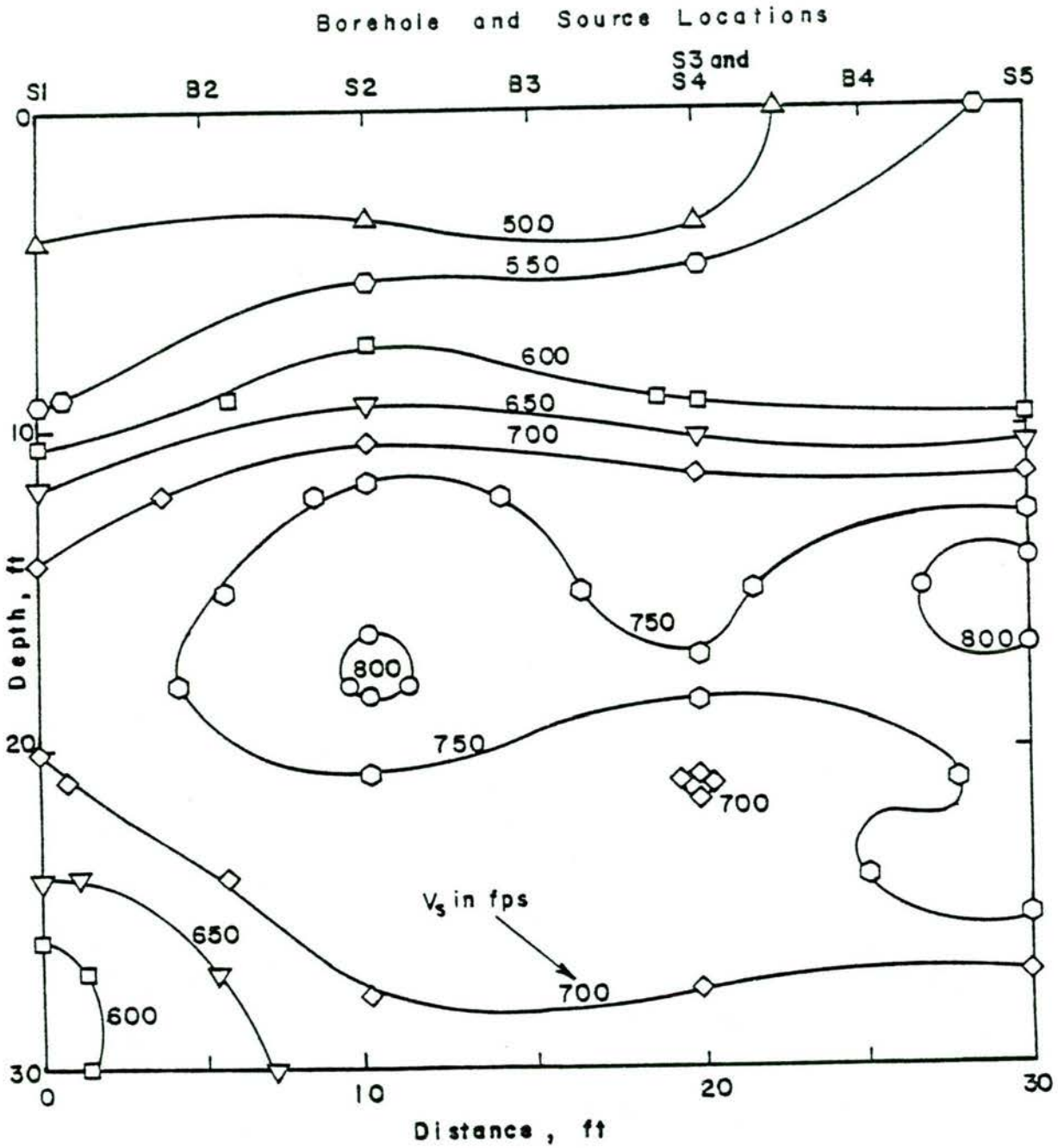


Fig. 4.5: Crosshole shear wave velocity profile at Walnut Creek site

Het in figuur 4.4. en 4.5 gevisualiseerde resultaat geeft eigenlijk het beste het verschil weer tussen de informatiegraad van een refractiemeting, en een serie verwerkte crosshole metingen (in dit laatste geval betreft het een dwarsdoorsnede waarin lijnen van gelijke snelheid (isotachen) zijn weergegeven, door inzicht in plaatselijke "akoestische" inhomogeniteit ontstaat). Uiteraard hangt de relevantie van dergelijke informatie af van de mate waarin die in (grond) mechanische karakteristieken is te vertalen (zie verder hoofdstuk 7). Gezien de bewerkelijkheid van de opstelling (het maken van verbuisde boorgaten, of, in het gunstigste geval, het werken met wegdrukkare bron en/of opnemer) dient nadere afweging te komen voor een toepasbaarheids criterium.

Aspecten:

- hoe belangrijk is de informatie (noodzakelijkheids criterium, calibratie, storende artefakten)
- afweging alternatieven qua informatiegraad, kostenaspect, mobiliteit, stagnatie etc.
- eventueel permanentheid van de opstelling (peilbuisfunctie).

Gezien bij dit type nogal veel details van uiteenlopende aard zijn te signaleren en de nadere ontwikkeling van de transmissiemethoden nog in volle gang is, lijkt het zinvoller hier nog enige tijd mee te wachten en te constateren dat de mogelijkheden er in elk geval positief uitzien.

In eenfasige isotrope media gelden de relaties

$$G_a = \rho_n C_t^2 \quad (21)$$

$$M_a = \rho_n C_p^2 \quad (22)$$

waarbij  $M_a = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-\nu)}$   $E_a$  (modulus voor zijwaartsopgesloten materiaal) en  $\rho_n$  de (onverzadigd natte) volumieke massa voorstellen.



Af te leiden is dat de poisson-modulus volgt uit:

$$\nu_A = 0,5 \left[ 1 - \frac{1}{(C_p/C_t)^2 - 1} \right] \quad (23)$$

En dus direct uit de seismische p- en s-golf snelheidsmetingen te herleiden is. Ondersteld wordt een reguliere opgebouwde spanningstoestand, zodat van de laterale gronddrukcoefficient volgt ( $A_{\text{index}}$  voor akoestisch, dat wil zeggen zuiver elastische component)

$$K_{O,A} = \frac{\sigma_{\text{horizontaal}}}{\sigma_{\text{vertikaal}}} \rightarrow \frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} = \frac{\nu_a}{1 - \nu_a} \quad (24)$$

Hieruit volgt een mogelijkheid tot schatting van twee parameters, die van belang zijn voor de initiele spanningstoestand bij het monsteronderzoek (i.c. sferisch deviatorische triaxiaal of plane strain proef). Immers: (10) als we uit de bepaling van dichtheid (volumegewicht) en vochtgehalte met de diepte (NEA-sonde) inzicht hebben in de natte dichtheid ( $\rho_n$ , die ook nodig is ter bepaling van de seismische moduli) dan is een goede schatting te maken voor het verloop van de (effectieve) verticale gronddruk met de diepte.

$$\sigma_v' \{z\} = \int_0^z \rho_n \{z\} g dz + u_{\text{cap}} \quad (25)$$

(waarbij de capillaire onderdruk  $u_{\text{cap}}$  alleen significant bijdraagt bij (vrij) fijne grondslag met significant watergehalte (verzadigingsgraad 10 à 35%) [6])

De twee voornoemde grondparameters zijn nu  
- het isotrope spanningsniveau (zie ook (24)):

$$\sigma_o' = \frac{(\sigma_v' + 2\sigma_h')}{3} = \frac{(1 + 2K_o)}{3} \sigma_v' \quad (26)$$

- het relatieve deviatorische niveau

$$\frac{\tau}{\sigma'_0} = \frac{(\sigma'_v - \sigma'_h)/2}{\sigma'_0} = \frac{(1 - K_0) \sigma'_v/2}{(1 + 2K_0) \sigma'_v/3} = \frac{3}{2} \left( \frac{1 - K_0}{1 + 2K_0} \right) \quad (27)$$

Merk op dat deze laatste parameter eveneens direct uit de seismische meting volgt (immers  $K_0 \{v(C_p/C_t)\}$  impliciet).

Daar de resultaten van het mechanische onderzoek (stress-strain), dat wil zeggen de volume-veranderingseigenschappen en de schuifvervorming, zich ook in de termen van  $\sigma'_0$  en  $\tau/\sigma'_0$  laten uitdrukken is in principe ook de omgekeerde weg te bewandelen indien bij het mechanisch onderzoek (aan relevante monsters) ook de akoestische snelheden ( $C_p$  en  $C_t$ ) worden bepaald. Deze snelheden zijn dan op te vatten als het "indirecte adres" door middel waarvan seismische snelheden (in-situ) min of meer globaal zijn te vertalen in termen van grondmechanische kwaliteit ter plaatse (of wijzigingen daarvan t.a.v. eerdere referentiemetingen).

Zie hiertoe hoofdstuk 7.

## 5. Grondradar als toegevoegde NDT verkenningsmethode [11]

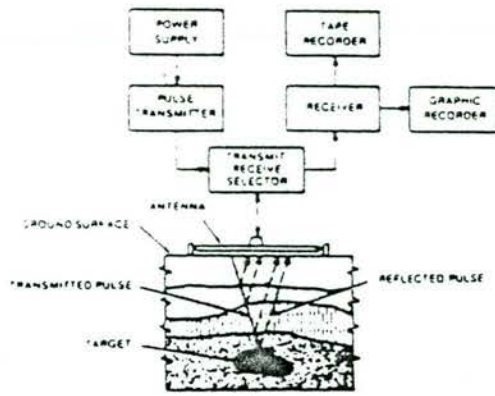
### 5.1. Inleiding (zie [10], Appendix A)

Grondradar is een vrij recente niet destructieve verkenningsmethode, die dienstbaar kan zijn bij het opsporen van ondergrondse objecten of het vaststellen van lithologische opbouw op basis van dielectrische\*) grondslagvariatiës (figuur 5.1). Het principe berust op de reflectie van meestal in pulsen uitgezonden microgolven (60 - 1000 MHz radiogolven), die door een zendantenne in een min of meer kegelvormige bundel worden uitgezonden. Na reflectie aan elk voldoende sterk dielectrisch gradient (contrast) in de bundelkegel kan een relatief geringe intensiteitsfractie de werkzame doorsnede van de ontvangstantenne bereiken (retoursignaal), figuur 5.2. Met de huidige apparatuur zijn zelfs intensiteiten tot  $\sim 10^{-5}$  à  $10^{-6}$  \* de uitgezonden sterkte te detecteren mede doordat tijd (= diepte)-afhankelijk signaalversterking toepasbaar is.

Men verkrijgt na detectie, en eventueel primaire signaalbewerking, een amplitude-tijd diagram. De tijdas is in principe een snelheids-gemoduleerde diepte-as omdat de voortplantingssnelheid van de straling van de locale dielectrische constante afhangt.

( $C \sim C_0 / \sqrt{\epsilon_r}$  met  $C_0 \sim 3 \cdot 10^8$  km/s en  $\epsilon_r = 3$  à 25).

Wordt nu het antennesysteem als geheel bewogen dan wijzigt zich het amplitude-tijdsignaal in relatie tot de wijziging van de electrische eigenschappen van de ondergrond in de kegelbundel. Bij een verwerkingsmethode waarbij deze signalen qua amplitude in een zwartingsgraad of in kleurgradaties worden omgezet en op synchroon met de beweging lopend "papier" worden geregistreerd spreekt men van een echogram (subbottom profiling), zie figuur 5.3, 5.4 en 5.5.



Block Diagram of a Ground Penetrating Radar System

Fig.5.1.a : Schematisch diagram van het pulsecno-grondradarsysteem.

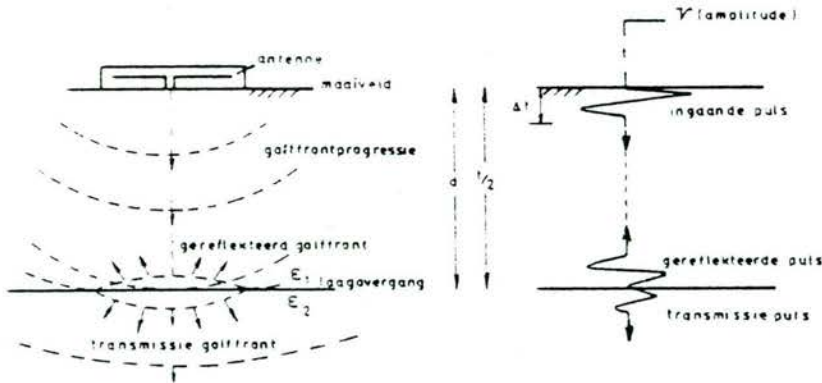


Fig.5.1.b : Pulsreflectie aan een diëlektrische laagovergang ( $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ ). De afstand  $d$  wordt tweemaal doorlopen, zodat de reflectie na  $\frac{d}{2}$  sec. weer het maai veld bij de antenne bereikt. Ten gevolge van de bundelspreiding komt slechts een gering deel van de gereflekteerde straling op de antenne (hoofdzakelijk afkomstig van een beperkt oppervlak van de laagovergang).



Fig.5.2 : Schematisch verloop van penetratie, reflectie en demping.

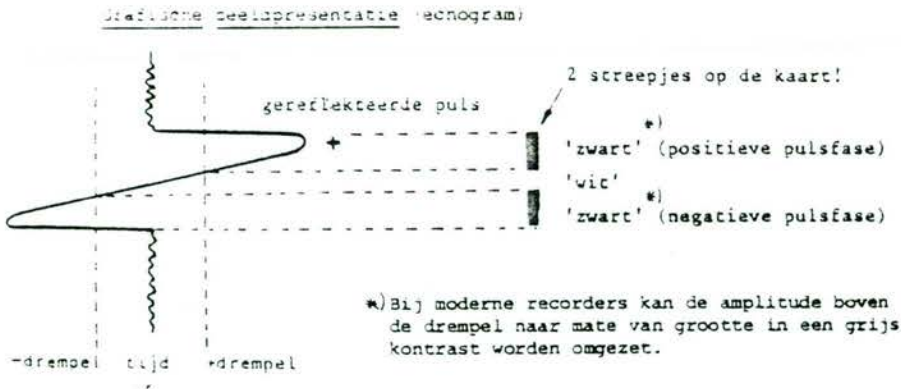


Fig 5.3 : Samenhang tussen pulsamplitude, drempelinstelling en zwart-wit (of grijscontrast) signaal op het echogram.  
 N.B. De overamplitude (boven de drempel) is bij daartoe geschikte recorders ook in grijswaarde weer te geven.

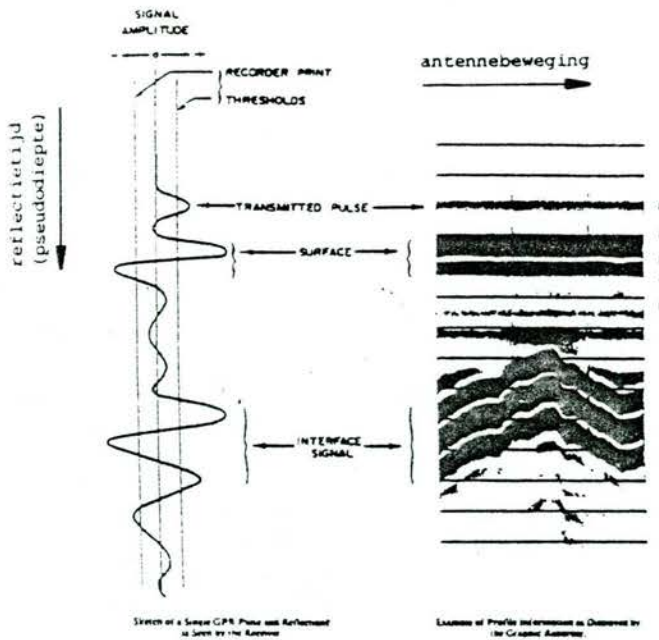


Fig 5.4 : Schematische samenhang tussen amplitude (rijd) signaal en continu echogram.

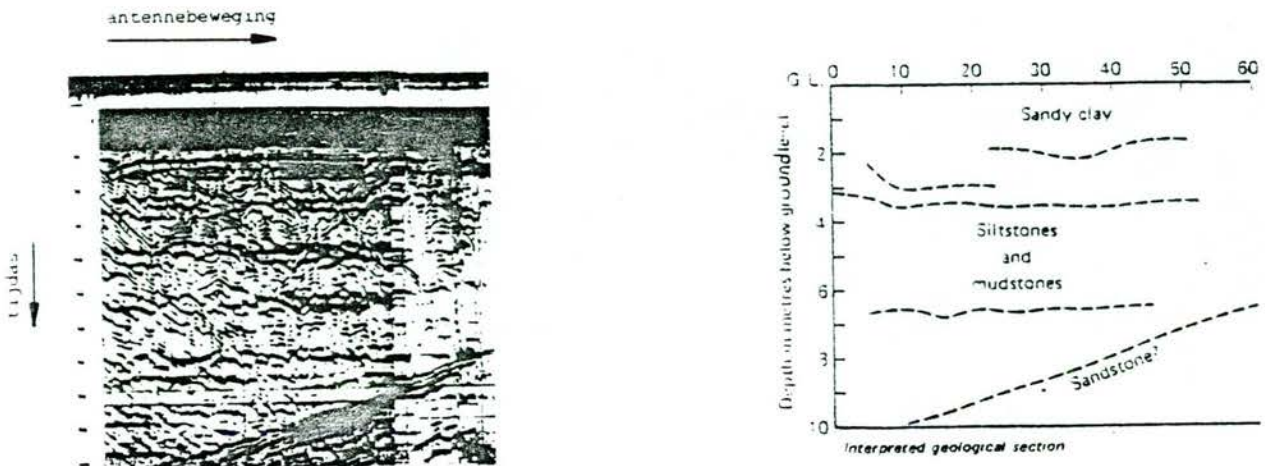


Fig 5.5 : Lithologische toepassing van het SIR-systeem in Schotland.

- \*) Diëlectriciteit slaat op polarisatie van elektrische lading (+/- dipool). Gelieve dit niet te verwarren met elektrische geleidbaarheid. In een wisselend electromagnetisch veld volgt de dipoolorientatie de veldsterktefluctuaties en is  $\epsilon$  een maat voor de dipoolsterkte. Bij geleiding gaat het om stromen van "vrije" lading, een totaal ander verschijnsel dus, dat veel meer energie absorbeert (wordt warmte).

Hierbij ontstaan karakteristieke verschillen in echosporen tussen bijvoorbeeld een relatief klein object als een ingegraven pijp of een steen en een (diëlectrische) laagovergang. Bij een zogenaamde continuscan dwars over een relatief klein object varieert de afstand tot het object en ontstaat een hyperbolisch spoor (figuur 5.6), waarvan de top dus representatief is voor de locatie van het object (figuur 5.7). De diepteligging kan vaak uit het verloop van de hyperbool geschat worden. Bij een laagreflectie (figuur 5.4) daarentegen draagt slechts een klein oppervlakte (~1e Fresnelzone) bij tot het signaal, en bij verplaatsing van de antennes verplaatst ook het deelhebbend reflectie-oppervlak mee. Worden nu zend- en ontvangstantenne gescheiden en beweegt men een of beide antennes van elkaar af dan neemt uiteraard de weglengte van de straling tussen zender, reflecterende laag, en ontvanger toe (het reflectiesignaal ligt verder op de tijdas), figuur 5.8. Met dit type echogram en bekend verloop van de antenne-afstand is het mogelijk het snelheidsverloop met de diepte in de diepteligging vast te stellen. Uiteraard komen complexer objecten, objectgroeperingen, laagsystemen, lenzen e.d. voor, waarbij de echogram interpretatie veel meer inzicht, ervaring en bovenal een geavanceerde signaalbewerking vereist.

Als elke methode heeft ook deze zijn beperkingen.

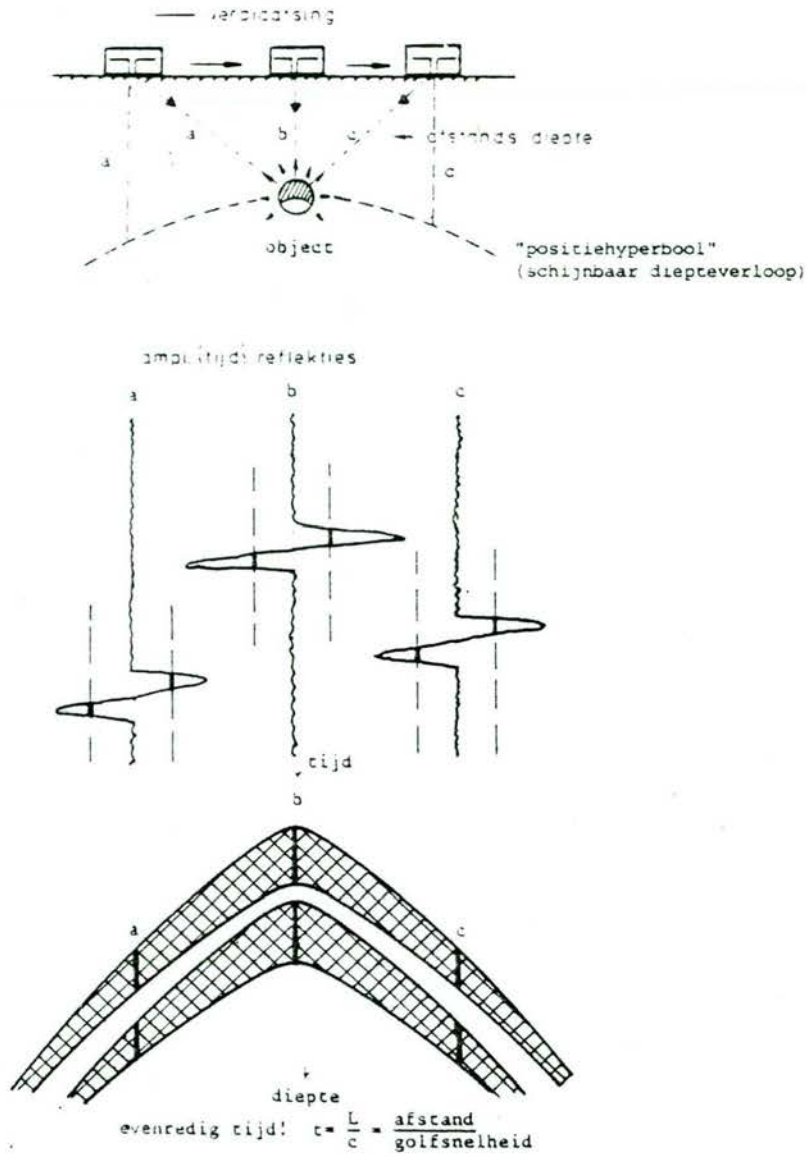


Fig 5.6 : hyperbolische spoorvorming bij een klein reflecterend object (object diameter klein t.a.v. diepte, maar niet te klein t.a.v. de effectieve golflengte!) op een continu echogram.  
 N.B. De asymptoten aan de hyperbool komen overeen met de grenzen van de stralingsbundelhoek!

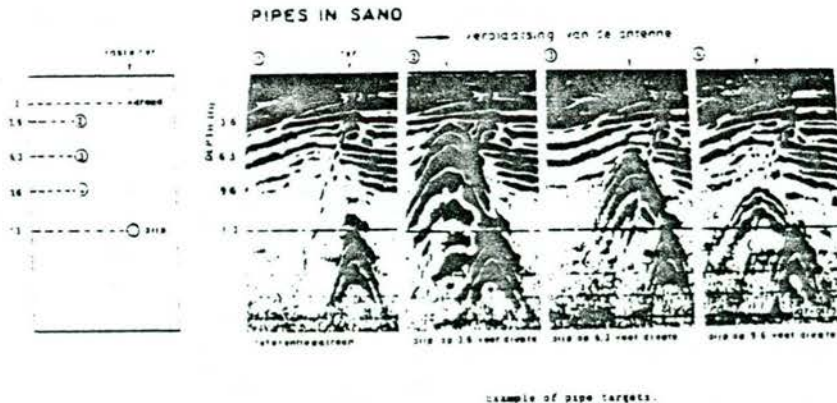


Fig 5.7 : Hyperbolische echosporen van ingegraven pijpen t.a.v. 2 referentie-beelden (te weten een metalen draad op 3,6 voet diepte en een pijp op ca. 12 voet diepte). Let op het vervormde patroon van de draad (diameter << golflengte).

De ruimtelijke spreiding van de bundel impliceert intensiteitsverlaging (geometrische "damping"). Dit geldt dus ook door de gereflecteerde straling. Simultaan treedt amplitudeverzwakking op door stralingsabsorptie, die een functie is van de (hoogfrequent) elektrische grondgeleidbaarheid en de frequentie (band).

Verder hangt de detecteerbaarheid uiteraard af van het dielectrisch contrast en de objectafmetingen (die tesamen de mate van reflectie bepalen), en de detectiegevoeligheid van het systeem. Deze factoren laten zich globaal beschrijven met behulp van de zogeheten radarvergelijking [11].

Als "storend" effect kunnen grondinhomogeniteit (locale variaties van elektrische geleidbaarheid en de dielectrische constante) en ook maaiveldoneffenheden genoemd worden. Dit uit zich ondermeer door nogal vlekkelig uitziende echogrammen.

Het zal duidelijk zijn dat men, voor het inschatten van de toepasbaarheid ter plaatse, inzicht moet hebben in deze factoren en eventueel in-situ een relevante dieptebereik - calibratie dient uit te voeren. Ten aanzien van de voornoemde invloedsparameters, de meest geeigende apparatuur en de benodigde signaalbewerking dient nog gedegen onderzoek te worden verricht alvorens in gecompliceerde gevallen redelijke betrouwbaarheid een meetbaarheidsadvies kan worden gegeven. Het potentiële toepassingsgebied is in principe zeer breed, mits men zich tevens realiseert dat specifieke toepassingen een specifieke frequentieband (kunnen) vergen, en dat in sommige gevallen databewerking (figuur 5.9) de echogram interpretatie aanzienlijk bevordert. Te noemen zijn onder meer (bij globale frequentieband):

- . geologie, watervoerende lagen, mijnbouw,  
diepliggende grotere "leidingen" en fundaties, ( 60 - 100 MHz)
- . dumps, leidingen, kabels, aanvullingen, (150 - 500 MHz)
- . ondiepe gaten scheuren, wapening, toplagen e.d., (400 - 900 MHz)
- . topplagdiktemetingen (wegen), ( 1 - 4 GHz)



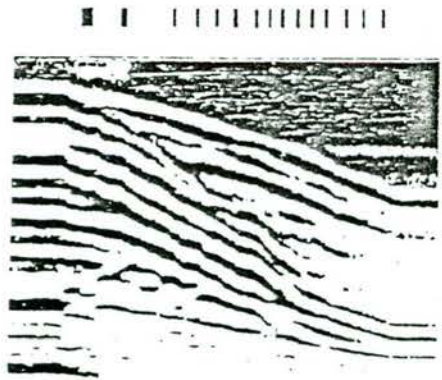
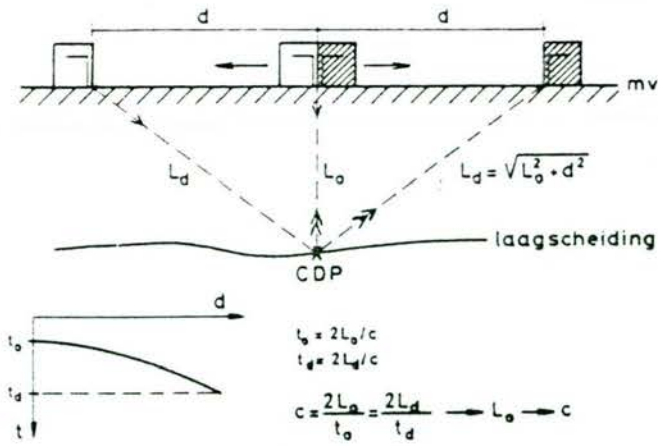


Fig. 5.8 : Bepaling voortplantingssnelheid via reflectie aan een laagscheiding d.m.v. symmetrische verplaatsing van zender en ontvanger. (Common Depth Point-methode).

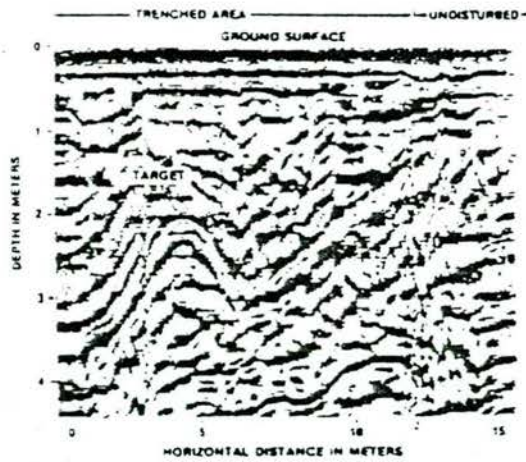


Fig. 5.9 : Digitaal geoptimaliseerde scan over een dump.

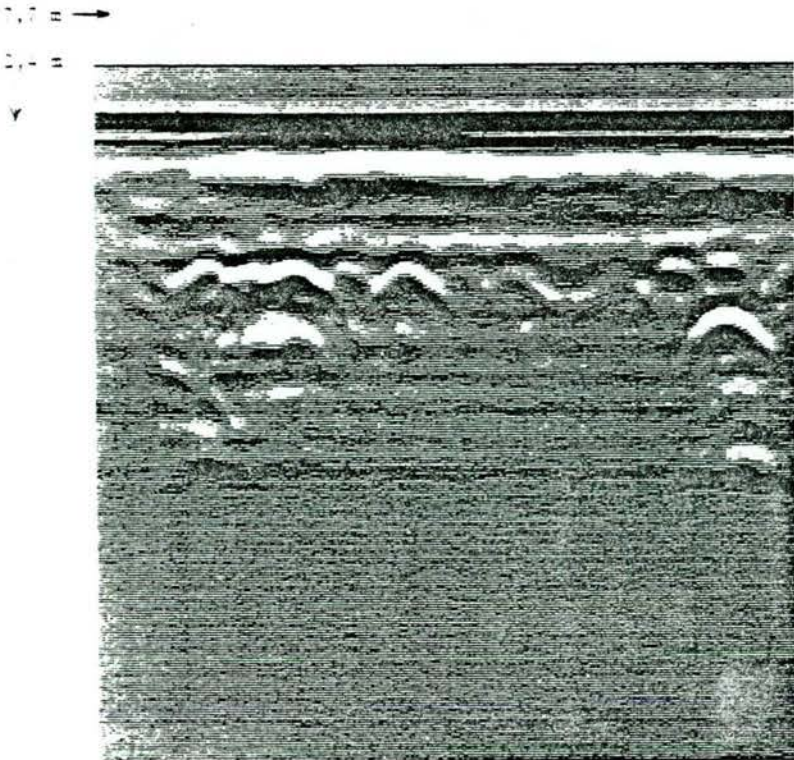


Fig. 5.10.a : Opname met 100 MHz antenne, zwevend over een verzadigd zandvak met ingegraven leidingen.

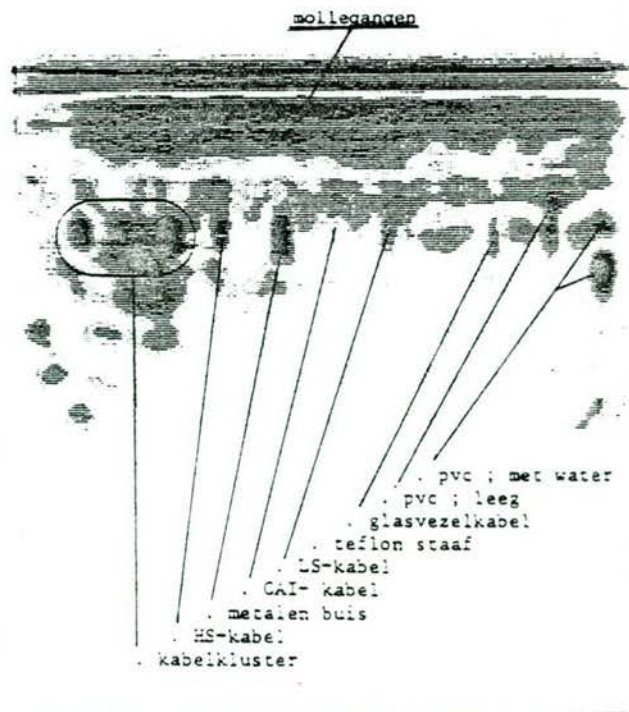


Fig. 5.10.b : Data uit figuur 10.a, na migratie;  $\Delta x = 15,0 \text{ mm}$  en  $c = 0,6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Een belangrijke verbetering van het onderscheidend vermogen (resolutie) en contrast is te bereiken met de in de seismiek en medische akoestische diagnostiek ontwikkelde migratie-signaalbewerkingstechniek [12]. Een recent voorbeeld is gegeven in figuur 5.10. Een andere mogelijkheid is het werken met "transducer-arrays" (een rij transducers op vaste afstanden).

#### Toepasbaarheid ten aanzien van het in-situ onderzoek aan dijken

Ten aanzien van het in-situ onderzoek aan zeedijken liggen er sinds 1981 de volgende mogelijkheden (met de reeds door het COW aangekochte apparatuur).

300 MHz - inhomogeniteitscontrole (slib- en schelplenzen, vochtgehaltevariaties) tot op maximaal 5 m diepte onder maaiveld.

900 MHz - asfaltdiktemetingen en holten onder bekledingen, met een maximale resolutie van circa 2 cm (migratietechniek vereist!)

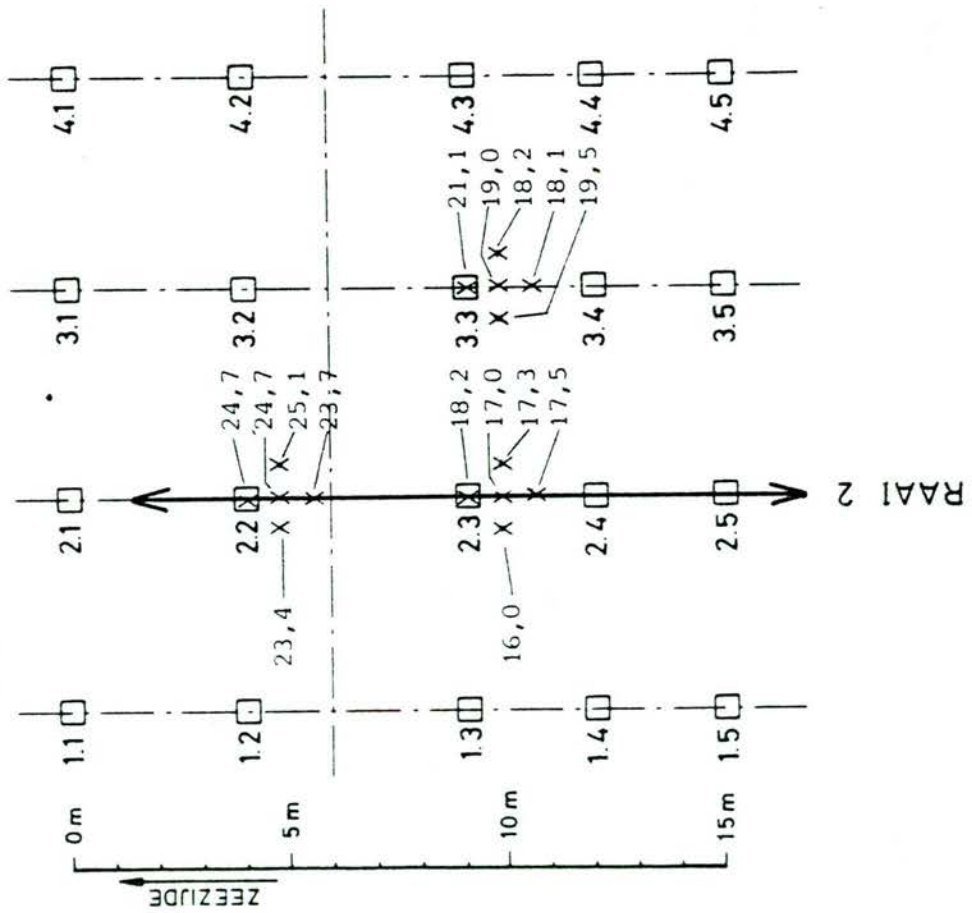
Voor specifieke toepassingen, in casu meer dieptebereik enerzijds of hogere resolutie anderzijds bij ondiepe metingen zullen te zijner tijd aangepaste ontwerpen in de respectievelijke frequentiebereiken 60 - 100 MHz en 1 - 3 GHz gewenst kunnen blijken.

#### 5.2. Grondradarmetingen op "Het Flauwe Werk"

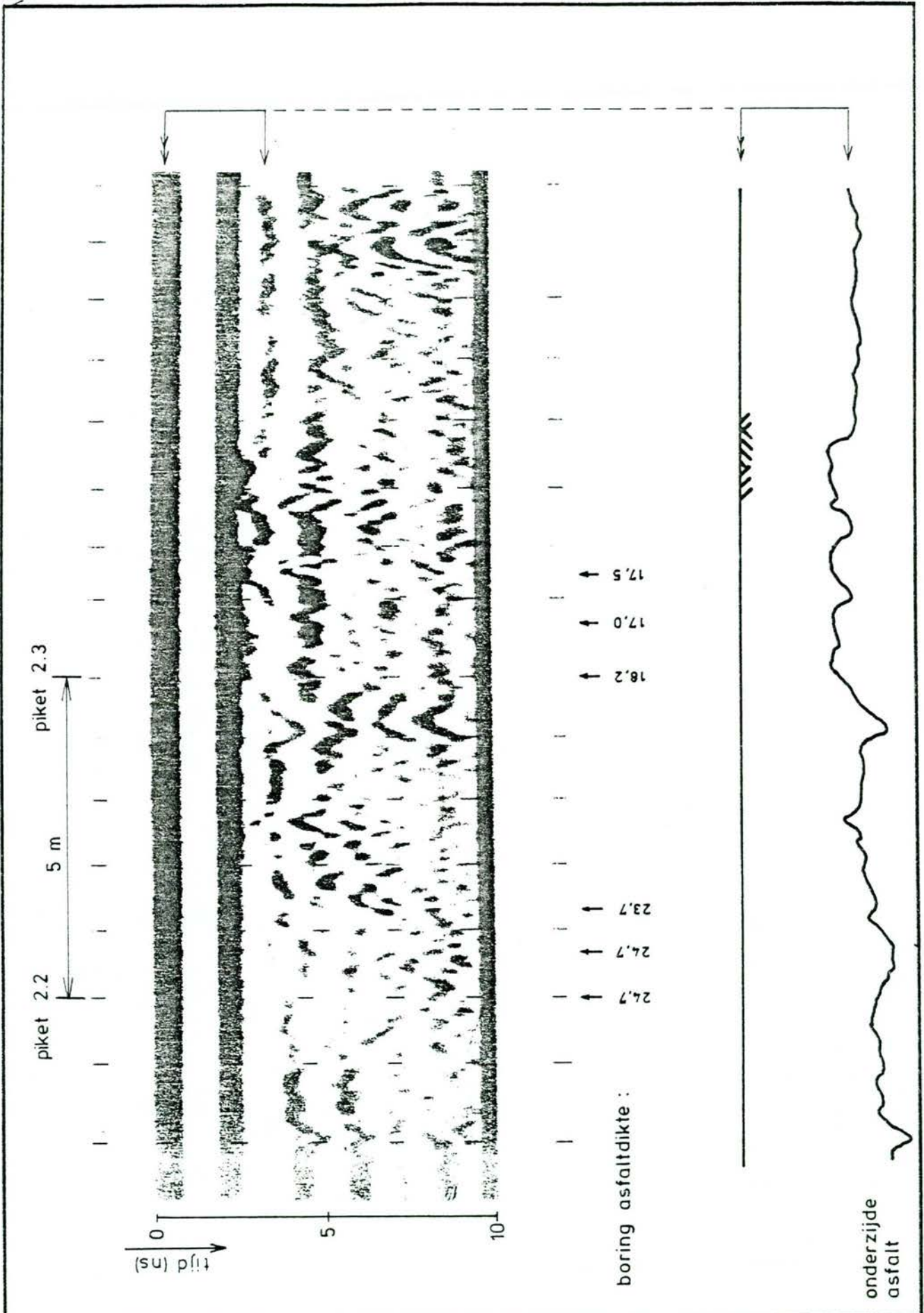
In het kader van onderzoek voor TAW-werkgroep 6 (PL ing. P. Belgraver) zijn door ir. J.W. de Feijter (LGM) mede op ons verzoek, metingen verricht op het proefvak Flauwe Werk. Dit werk zal te zijner tijd, na grondige interpretatie, aan WG 6 gerapporteerd worden. Ons verzoek betrof met name de mogelijkheid om met de 900 MHz antenne iets te kunnen waarnemen van de plaatselijk nogal forse asfaltdiktefluctuaties (met betrekking tot de interpretatie van de FWD-metingen) alsmede sterke ondergrondinhomogeniteiten (kleilenzen, stenen, holten onder de bekleding e.d.).


# ASFALTDIKTEN (cm)

(bepaald via asfaltkernen)



GRONDRADAR	CO-276070	BH
	SITUATIE RAAI 2	FIG. 5.11

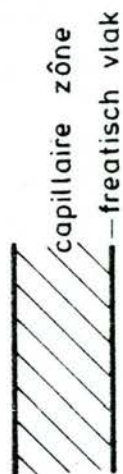
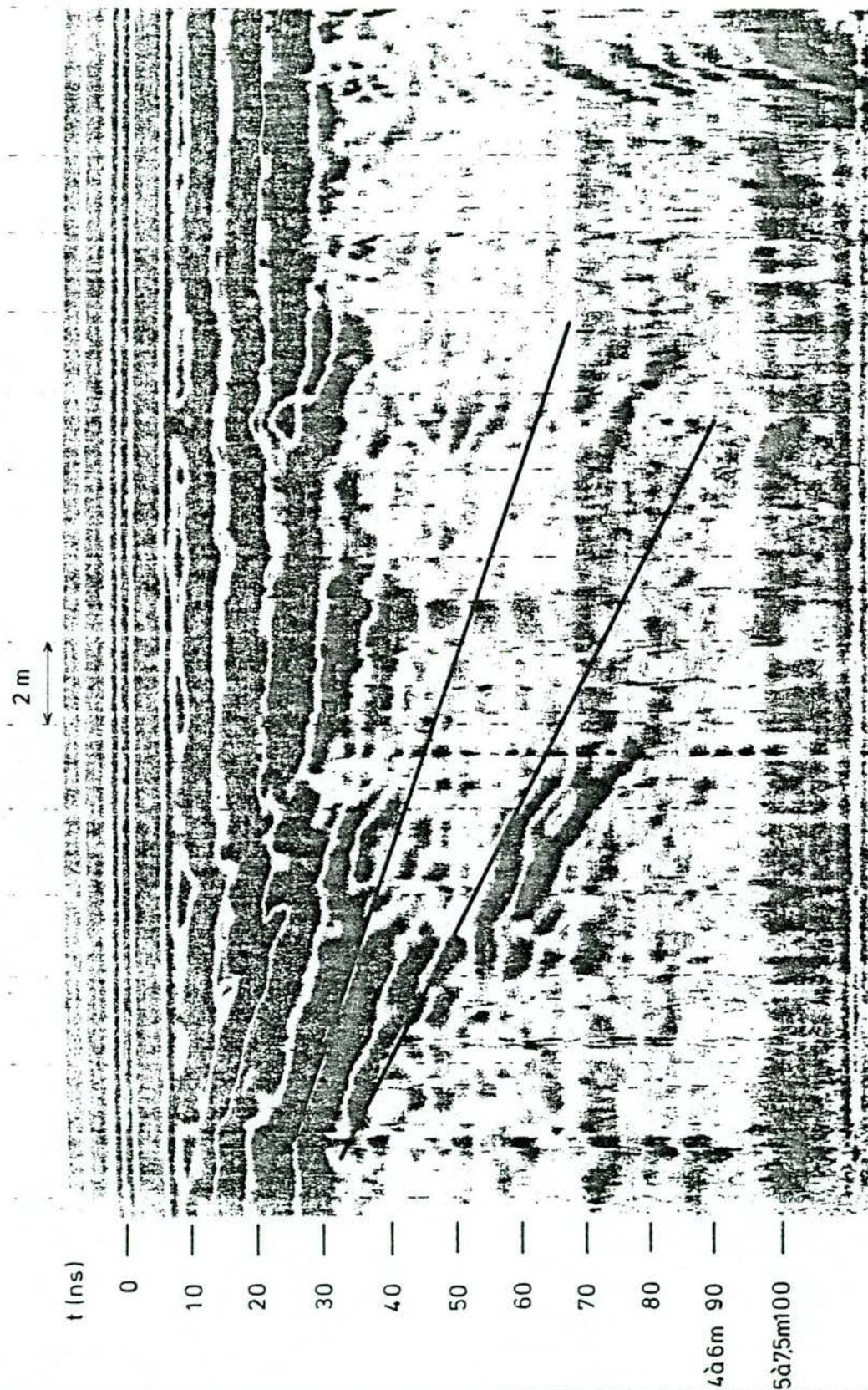


 <b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon: (015) - 569223 telex: 38234 soil nl	p d	get.
	CO-276070	gec.
	FIG. 5.12	form. A <sub>4</sub>
<b>GRONDRADAR</b> <b>FREQUENTIE 900 MHz</b> <b>DWARSPROFIEL RAAI 2</b>		

Een voorproefje van de resultaten is te zien in figuur 5.12. en 5.13. In figuur 5.12 valt op dat er inderdaad indicaties zijn op een vrij forse asfaltdiktevariatie in de richting van het trace. Ook zijn hyperbolische sporen van insluitels (vermoedelijk brokken mijnsteen of grindzandasfalt) of zand-gevulde "sporen" aan de onderzijde van de bekleding zichtbaar (900 MHz antenne).

Bij figuur 5.13 is op te merken dat met de laagfrequent antenne (80 MHz) een dieptebereik tot circa 6 m werk gerealiseerd (goed geleidend zout water verhindert diepere reflectie). Toplaag-details zijn ten gevolge van de veel grotere golflengte (11\* zo lang als bij 900 MHz) niet duidelijk. De schuine lijnenband is de reflectie aan de capillaire zone (freatisch vlak). Deze band ligt schuin, omdat de afstand tot het talud toeneemt. Ten gevolge van snelheidsvariatiës kan een wat gebogen vorm optreden.

N.B. Ten aanzien van zowel de dikte-resolutie bij asfaltbekledingen (zowel ten behoeve van controle bij aanleg als voor berekeningen bij dynamische belasting) als de mogelijke detectie van grotere scheuren, ofwel met vocht gebulde hoge concentratie van haarscheuren (signaaldemping ten aanzien van intact asfalt) is het in feite wenselijk om met een relatief smalle bundel (doorsnede-resolutie  $< 200 \text{ cm}^2$ ) en bij hogere frequentie te opereren. Een laagdikte-resolutie van 1 à 2 cm voor lagen vanaf 10 cm dikte vergt (ter vermindering van de noodzaak tot kostbare signaalbewerkingstechnieken) een bij voorkeur enkelvoudige puls met lengte 0,5 à 1 nano-sec. (er bestaat reeds apparatuur die een 0,25 nano sec puls benut).



**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon: (015) - 569223  
 telex: 38234 soil nl

d.d

get  
 BH

GRONDRADAR

FREQUENTIE 80 MHz

CO-276070

DWARSPROFIEL VANAF ONDER(ZEE-)ZIJDE TALUD

FIG. 5.13

gec

form  
 A<sub>4</sub>

Globaal bedraagt de maximale resolutie circa  $1/4$  golflengte: met migratie-techniek kan soms nog een factor 2 à 3 gewonnen worden. Het probleem betreft dus een compromis tussen een hogere resolutie en dwarsoplossend (middelend) oppervlak enerzijds en anderzijds een afname in dielectrisch contrast tussen zand en asfalt bij hogere frequenties. Het opereren met een gecollimeerde bundel betekent voorts dat de zendintensiteit relatief lager kan zijn (beduidend minder intensiteitsverlies door spreidingsdemping) Het betreft dus wel een specifieke toepassing voor ondiepe metingen aan bekledingen (denk ook aan wegen en landingsbanen).

### 5.3. Enkele specificaties voor de asfaltdikte-profielmeter

Asfalt heeft een globale dielectrische constante  $\epsilon_r \sim 5$ . Dit impliceert een golfsnelheid:

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{5}} \text{ (m/s)}$$

De minimum dikte van dijkbekledingen bedraagt circa 0,15 m. Om te voorkomen dat de uitgezonden elektromagnetische puls "interfereert" met de eerste reflectie van asfalt-zand laagovergang moet de pulsduur  $t_p$  voldoen aan:

$$t_p < \frac{d}{c} = \frac{0,15 \text{ m}}{\sqrt{\frac{3}{5}} \cdot 10^8 \text{ (m/s)}} = 1,12 \cdot 10^{-9} \text{ s} \sim 1 \text{ ns (nanoseconde)}$$

Daarnaast bestaat een resolutie-eis ten aanzien van meetbare diktefluctuatie ( $\Delta d$ ). Globaal kan worden gesteld:

$$\frac{\lambda}{2} < \Delta d \sim 2 \text{ cm} \rightarrow \lambda < 4 \text{ cm}$$

Dit betekent dat de puls qua frequentiespectrum een significante bijdrage moet hebben voor frequenties groter dan

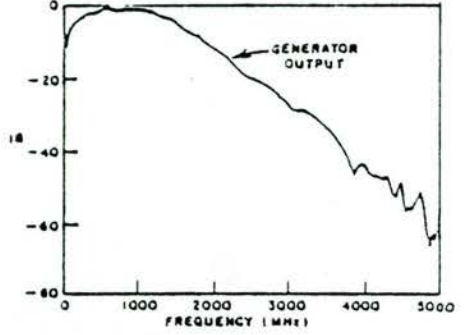
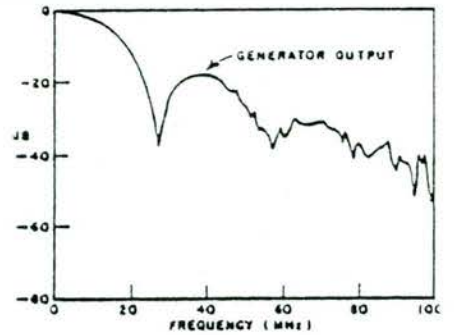
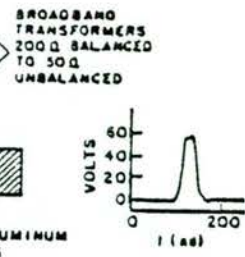
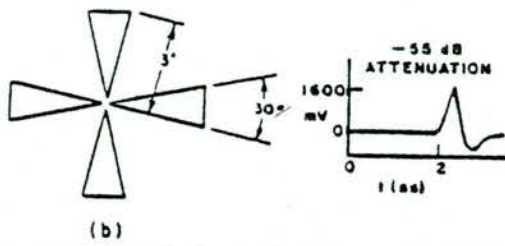
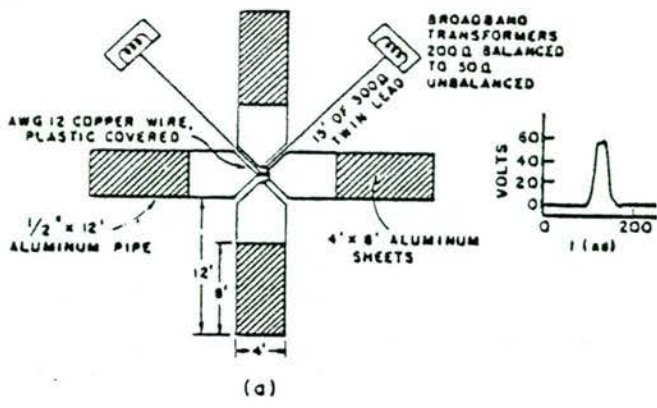
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,04\sqrt{5}} \sim 3 \cdot 10^9 \text{ (Hz)} = 3 \text{ GHz}$$

Vooralsnog kan bestaande apparatuur met een centrumfrequentie van  $f_c \sim 2 \text{ GHz}$  worden toegepast, mits de bundelspreiding beperkt is. Het geschat "effectief bemeten" oppervlak (werkzame doorsnede) bedraagt globaal

$$A_r \sim \frac{\pi d \lambda}{2} > \frac{\pi \cdot 0,15 \cdot 0,06}{2} \sim 135 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (135 cm}^2\text{)}$$

Ter illustratie van pulsvorm en bijbehorend spectrum is figuur 5.14 opgenomen (met betrekking tot een reeds sinds 1970 bestaand ontwerp).





(a) Large electromagnetic probe and pulse. (b) Small electromagnetic probe and pulse. (c) Amplitude spectra of the 50-volt (top) and 1000-volt pulses (bottom).

Fig. 5.14: Het "gekruste-antenne" systeem van de Ohio State Universiteit. System (a) is voor geologische toepassing, systeem (b) voor "ondiepe" object-detectie.

## 6. Methoden voor de verdichtingscontrole van het zandbed

Bij de gangbare verdichtingsmethoden zal (per laag) doorgaans geen grotere verdichtingsdiepte dan 0,6 - 0,8 m worden bereikt. Bij zeedijken is, met name op de meer golfbelastingsgevoelige sectoren van het voortaluud, een goede verdichting tot op 1,5 à 2 m onder de bekleding geboden. Een beperkte controle vindt meestal (ruim) achteraf plaats en betreft vaak de toplaag (0,1 - 0,25 mmv)

Het betreft hier plaatselijke methoden als:

- steekring en monsternamen ten behoeve van proefonderzoek
- radio-actieve oppervlakte sonde (o.a. Troxler, Nuclotronics)
- hand-penetratiesonde (aflezing penetratie weerstand op 0,2 mmv)

Het lijkt het overwegen waard om na te gaan of ook tijdens het verdichten een optimale procesgang is te waarborgen. Hiertoe lijken twee varianten toepasbaar.

1. Bepaal een indicatieve grootte uit de interactie van het verdichtingsapparaat met de directe ondergrond. Mogelijkerwijze is hieraan bovendien een parameter te ontleen waarmee de verdichtingsactie kan worden bijgestuurd (met name interessant bij niet al te homogene grondslag). Te denken valt bijvoorbeeld aan eventueel bijregelen van amplitude en/of trilfrequentie, of bijspoeien van vocht.
2. Construeer een mobiel controle-trilapparaat met instelbare amplitude en frequentie en tracht uit de responsie van de interactie met de ondergrond (amplitude en fasekarakteristiek van de mechanische impedantie) af te leiden of het verdichtingsproces acceptabel verloopt (men is dan niet gebonden aan een bepaald verdichtingsapparaat).

Deze "on-line" verdichtingscontrole heeft het grote voordeel dat continue bewaking (terugkoppeling) mogelijk is. Immers, controle achteraf blijft mosterd na de maaltijd.

Bij "droog" gespoten, nageprofileerde lichamen (vergelijk damaanzet Westerschouwen en de Ommelander Zeedijk) kan hiermee echter alleen de mate van toplaagverdichting worden vastgesteld (0,6 - 0,8 mmv) en lijken vooralsnog de seismische methoden in combinatie met wat dieperstekende penetratie- en dichtheissonderingen voor het diepte-interval 0,4 - 2 mmv geboden.

#### De "directe" verdichtingscontrole

In een vrij recent artikel van Gruber, Obermayer en Floss [5] werd een historisch overzicht gegeven met betrekking tot verdichtingscontrole door middel van versnellingsmetingen aan trillwalsen (1924-1978). Ter illustratie van vornoemde varianten (1) en (2) wordt hier het voorbeeld van een Zweedse "compactometer" aangehaald. Zoals in figuur 6.1 geschematiseerd wordt gebruik gemaakt van de niet-lineaire responsie van de ophanging van het trilllichaam. Het (fourier-amplitude) spectrum van het signaal van de daaraan bevestigde versnellingsopnemer bevat uiteraard de basisfrequentie (grondtoon) van de triller als mede hogere harmonischen (boventonen).

Het is gebleken dat de 1e harmonische het meest geschikt voldoet als een vrij dominante grootheid in de responsie (met betrekking tot de beïnvloeding van de "basistrilling") en derhalve een geschikte maat voor de verdichtingstoestand kan zijn (het wordt dan ook niet nodig geacht de faseverschuiving tussen basis frequentie en 1e boventoon mede in beschouwing te nemen). Zeer in het kort werkt de methode als volgt.

Het (versterkte) signaal uit de versnellingsopnemer passeert een zich automatisch instellend bandfilter-systeem, waarbij de effectieve responsie-amplitude van de basis frequentie en 1e harmonische uit het spectrum worden "gezeefd". Lang elektronische weg wordt vervolgens het quotient van deze amplituden bepaald (in feite het gemiddeld quotient over 0,2 sec als middelingstijdconstante), waarmee in principe een maar voor de locale, momentane, verdichtingstoestand is verkregen. Met uit ervaring of door calibratie te verkrijgen interval-criteria voor deze amplitude-quotient parameter is dan een sturings- cq. beoordelingsparameter te bepalen.

Gezien echter zowel amplitude- als basisfrequentievariatie ongetwijfeld procesparameters zullen zijn lijkt dit bij uitstek het te benadrukken onderzoeksaspect. Een ander aspect lijkt te zijn, dat ook het verloop van het verschil-fasekarakteristiek wel degelijk mogelijkheden biedt voor "sturing" of nadere interpretatie.

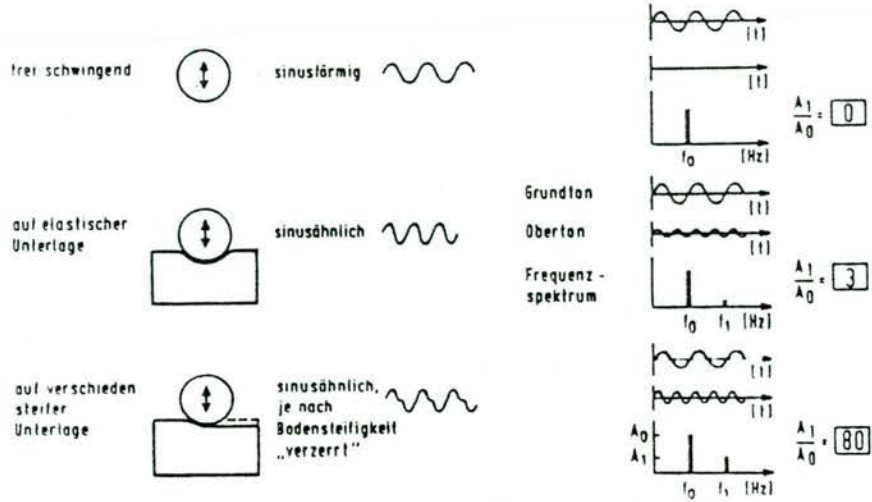
#### Discontinue verdichtingscontrole (0,4 - 2 mm V)

Voor het bemonsteren van grotere sectoren kan ten eerste gedacht worden aan de mogelijkheden van.

- de rayleigh-golf pulsresponsie methode } zie hoofdstuk 3 en 4
- cross-hole seismiek

De 1e methode is de meest "flexibel" en nondestructief, de tweede geeft vermoedelijk exacter informatie, ook qua diepte. Nagegaan moet worden hoe groot de "storingsgevoeligheid" van locale bronnen (verdichtings en transportapparatuur) is, alsmede de mogelijkheid deze effecten door signaalbewerking (stacking, selectief filteren) te beperken.

Vibrierende Masse → Beschleunigungssignale → Meßwertbildung und Anzeige  
 (harmonisch erregt) (Vertikalkomponente) (Fourier Analyse, Quotientenbildung)



Prinzip des Compactometers (10)

Fig. 6.1

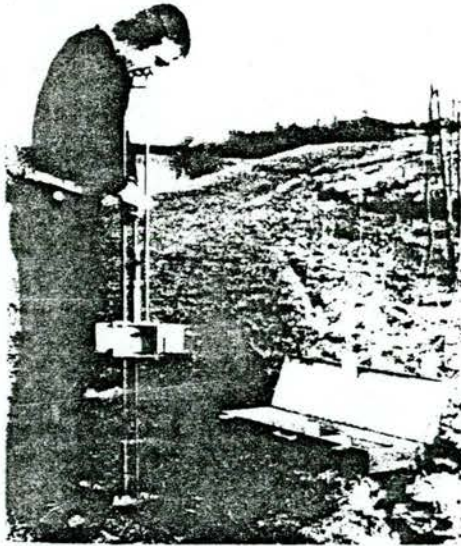
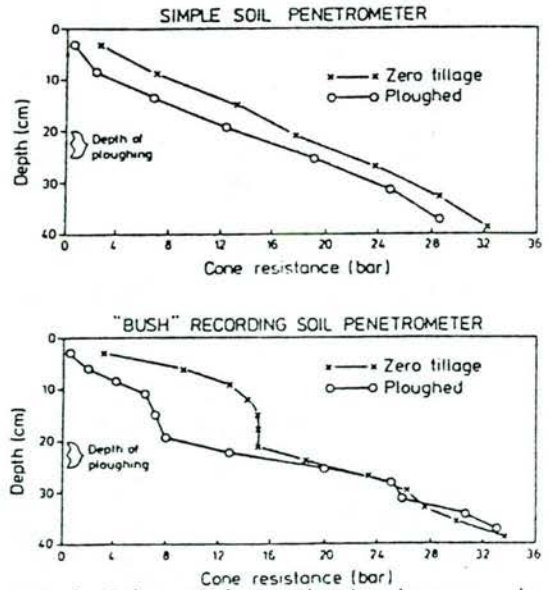


Fig. 6.2



Bij de 'simpele' methode komen de nuances in de grondvastheid t.g.v. het ploegen onjuist tot gelding

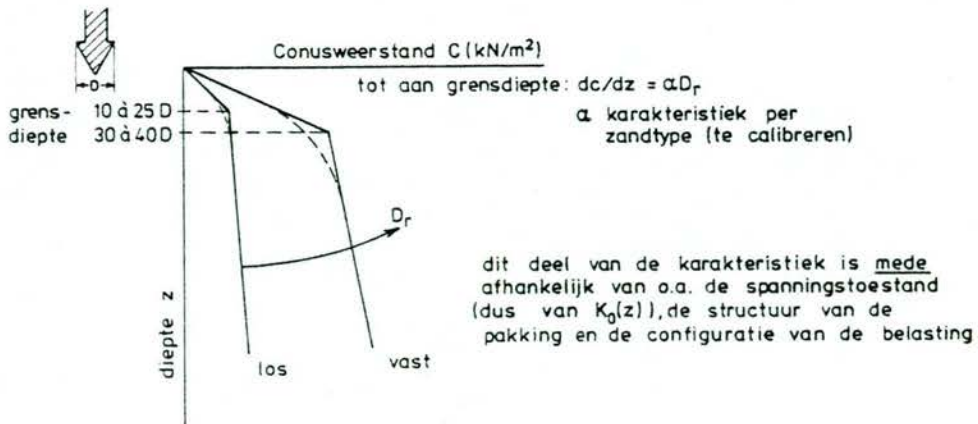


Fig. 6.3: Geschematiseerde relatie tussen conusweerstand en relatieve dichtheid  $D_r$  met de penetratiediepte (zie ook beschouwing van Teferra, vermeld in (1))

Voor beide methoden geldt dat "calibratie" vooraf (specifiek proefvak) en een incidenteel plaatselijke calibratie (selektieve beperkte diepte-dichtheidsmeting, bijvoorbeeld de NEA-sonde) gekoppeld aan bij voorkeur "ter plaatse" te bepalen verdichtingsgraad in feite noodzakelijk zijn, wil een directe momentane in-situ beoordeling (bewaking) zin hebben (Zoals ook bij de industriële procesgang is gebleken is toetsing achteraf minder efficiënt en soms minder effectief (stagnatie, kapitaalverlies) en vindt steeds meer kwaliteitsbewaking gedurende de procesgang plaats).

Ten aanzien van de ondiepe penetratie-dichtheidssondering zijn een tweetal opmerkingen te plaatsen

- een draagbaar penetratierame (stier), eventueel gemonteerd op een licht terreinvoertuig (tevens reactie) is af te wegen versus het inheien van de meetverbuizing.
- cruciaal is hierbij de mate van teweeggebrachte dichtheidsverstoring. Het is te overwegen de meetmantel als een soort monstersteek-apparaat in te brengen (vermindert significant de verstoring) en de grond tijdens of na volledige penetratie te verwijderen (tevens als grondmonster te beschouwen).

Als snelwerkende locale directe verdichtingscontrole (0 - 1mmv) zijn de hand- en slag- (penetratie) sonderingen in te zetten. Met betrekking tot beide methodes zijn opmerkingen met betrekking tot zowel praktische uitvoering als interpretatief protocol te maken. Bij de slagsonde dient de automatisering van de bediening op een efficiënt peil gebracht te worden.

Bij de handsonde wordt gedacht aan een apparaat met mechanische registratie (vergelijk de STIBOKA-penetrograaf figuur 6.2). In beide gevallen is het echter wenselijk het protocol voor de penetratie-procedure aan te passen.

Met enige modifikatie op de door Teferra [13] opgestelde relaties is de relatie tussen relatieve dichtheid of verdichtingsgraad met een penetratiekental te geven als:

$$\log P = \alpha D_r + \beta \log (\rho g z) + \text{constante} \quad [27]$$

P = aantal slagen of (geconverteerde) penetratie weerstand (MPa).

De trendmatige karakteristiek is gegeven in figuur 6.3. Voor een homogeen medium is de karakteristiek te schematiseren tot een "bi-lineaire" karakteristiek, met het snijpunt op de zogenaamde grensdiepte ( $z_0$ ).

Voor deze karakterisering geldt  $\beta = 1$

boven de grensdiepte  $\log\left\{\frac{P}{\rho g z}\right\} = \alpha_1 D_r \quad (28)$

onder de grensdiepte  $\log\left\{\frac{P - p_0}{\rho g (z - z_0)}\right\} = \alpha_2 D_r \quad (29)$

De grootheden  $\alpha$  en  $z_0$  zijn zowel afhankelijk van zandtype, pakking, spanningstoestand en geometrie van het penetratielichaam. In beide gevallen is de theoretische interpretatie nogal beperkt qua diepgang en is relevante calibratie derhalve een onmisbaar vereiste. Praktisch gezien is het sondeergradient ( $\Delta P/\Delta z$ ) boven de grensdiepte een tamelijk gevoelige maat voor de verdichtingsgraad. De huidige "een-punts-methode" bij de handsonde is daartoe onvoldoende. Een korrekte continu-sondeerkarakteristiek vereist (naast automatische registratie) bovendien een tamelijk eenduidige penetratiesnelheid. Gedacht wordt aan een draagbaar frame, belast door 2 volwassenen, en penetratie aandrijving middels een handbediende wartel (figuur 6.4)

LICHT DRAAGBAAR HANDSONDEERAPPARAAT

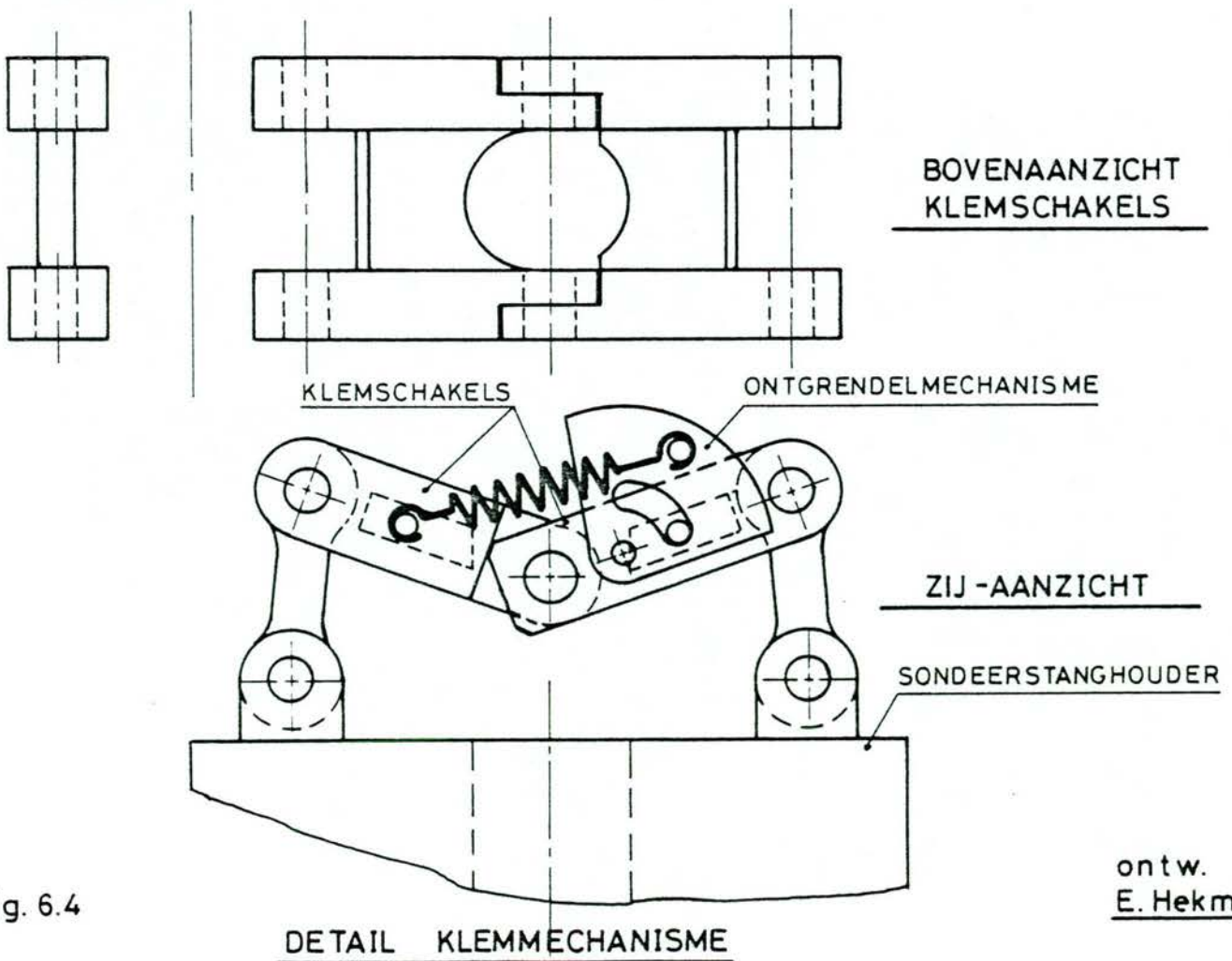
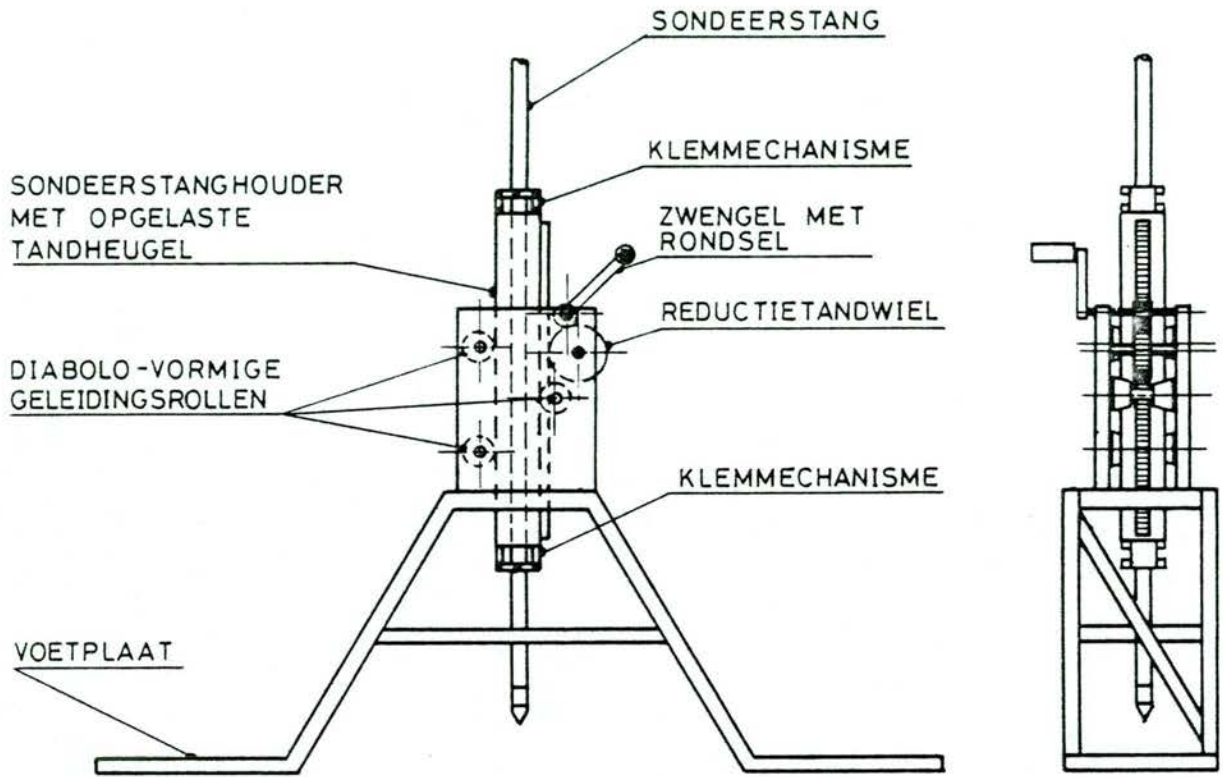


Fig. 6.4

ontw.  
E. Hekman



Hiermee moet het mogelijk zijn om met een 2 - 2,5 cm<sup>2</sup> conus (dwarsoppervlak) tenminste 1 à 2 m sondeerdiepte te bereiken. Een andere voorwaarde is, dat de sonde zo mogelijk de zuivere puntweerstand meet (zie o.a. nevenschets ontwerp van E. Hekman THD, fig 6.5).

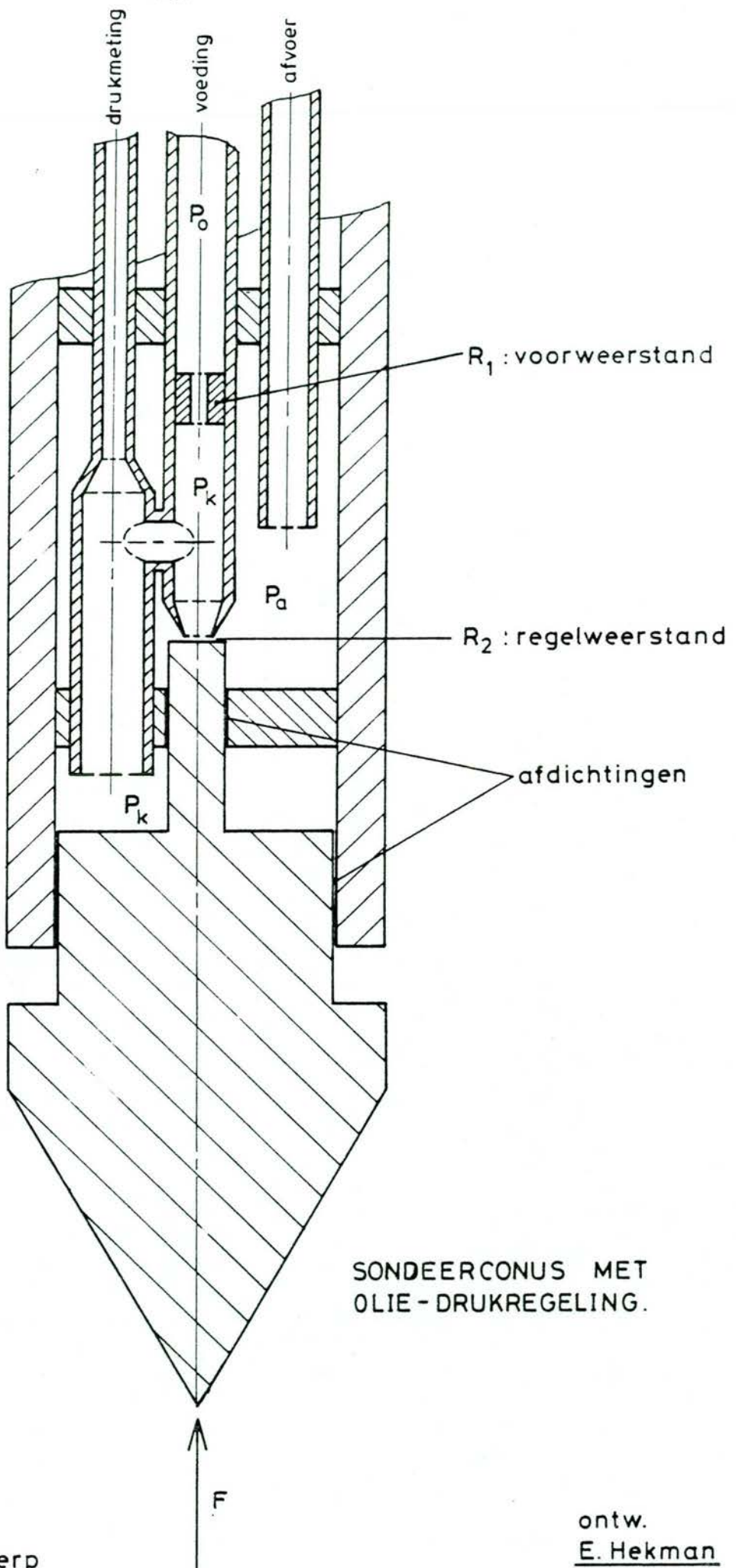
Bij de slagsonde dient de procedure bijgesteld te worden om het top-laaggradient over tenminste 0,3 m exacter te kunnen bepalen. Het meest geeigend hiertoe lijkt bijvoorbeeld een criterium voor een significante penetratiestap [3 à 5 cm].

Naast de gangbare procedure noteert men daartoe per significante verschil stap (bijvoorbeeld 3,2 of 4,6 cm) het bijbehorend aantal slagen (dit leidt tot een nauwkeuriger initiële gradientbepaling, terwijl het effect van plaatselijke variaties in weerstand doorzichtiger wordt.

Ten aanzien van de gradient overgang onder de grensdiepte moet door o.a. calibratie-metingen "eigen ervaring" worden verzameld, uitgaande van de huidige "theoretisch" te verwachten invloedsgrootheden.

Een moeilijkheid bij de slagsonde is het bepalen van het aandeel conusweerstand (dit zou o.m. een langdurig stootbestendige kracht-opnemer vergen).

Zolang echter de vorm van het penetratielichaam leidt tot een significante bijdrage aan mantelfrictie wordt een directe correlatie "pseudo-statische" versus "dynamische" penetratie weerstand twijfelachtig. Het kan nuttig zijn na te gaan of de correlatie bij tamelijk losse tot matige vaste pakking of vochtige slibhoudend zand (in verband met de overdracht van stootvormige impuls bij de slagsonde) afwijkt van die bij vastgepakt "schoon" zand.



SONDEERCONUS MET  
OLIE - DRUKREGELING.

Fig. 6.5: Principe-ontwerp  
hydraulische conusweerstandsmeter

ontw.  
E. Hekman

## 7. Uitbreiding van methoden van onderzoek aan monsters

### 7.1. T.a.v. mechanisch gedrag van zand

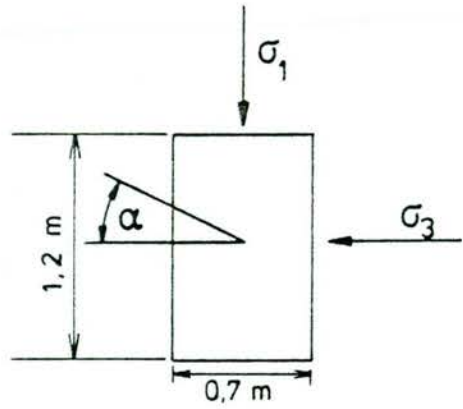
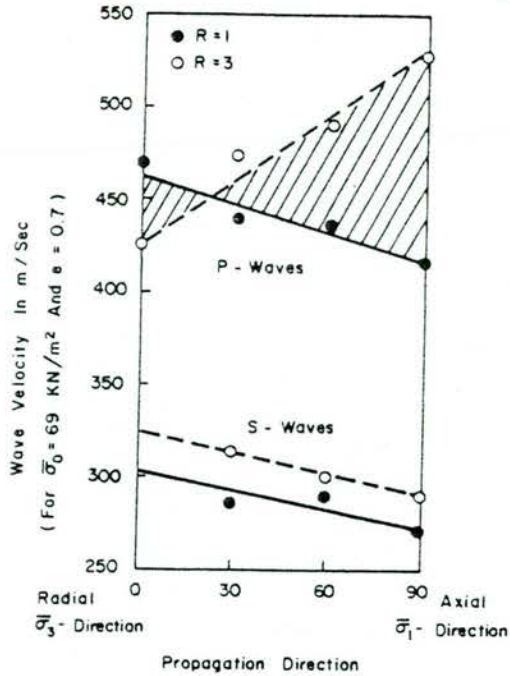
Als uiteengezet in hoofdstuk 2 dient het verkennend onderzoek te leiden tot een geometrisch inzicht in de mechanische kwaliteit van het dijklichaam. De seismische parameters leveren indirect informatie over de kwaliteit en de spanningstoestand van het materiaal. Deze spanningstoestand dient bij onderzoek aan representatieve monsters de begintoestand van de beproeving te vormen. Indien nu aan het monster op representatieve wijze akoestische snelheden (p- en s-golven) worden bepaald is te verwachten dat waarden worden gevonden, die in vrij directe relatie staan tot de seismische in-situ snelheden (mits de in-situ variabiliteit niet al te hoog is ten aanzien van de seismische resolutie). Tijdens de beproeving (belasting) van het monster treden als gevolg van verandering in spanningsniveau, deviatorische spanningsconfiguratie en plastische vervorming (structuur modifikatie) specifieke wijziging op in akoestische snelheden (elasto dynamische moduli behorende bij gesuperponeerde akoestische deformatie-amplituden  $< 10^{-6}$ , die het spannings-vervormingsproces zeker niet zullen beïnvloeden).

Gebleken is, dat de snelheden (moduli) toenemen bij verhoogd spanningsniveau ( $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ ).

In figuur 7.1 is te zien, dat bij deviatorische belasting complicaties optreden, die met structuurverandering (geïnduceerde anisotropie) samenhangen (met name in de p-golf). Ter illustratie is in figuur 7.2 een voorbeeld gegeven van het effect van enkelzijdig wisselende deviatorische belasting bij constant spanningsniveau ( $\sigma_0$ )

(ter verduidelijking zijn figuur 7.3 en 7.4 bijgevoegd).

Het betreft hier modificaties in waargenomen s-golfsnelheid (i.c. G-modulus).

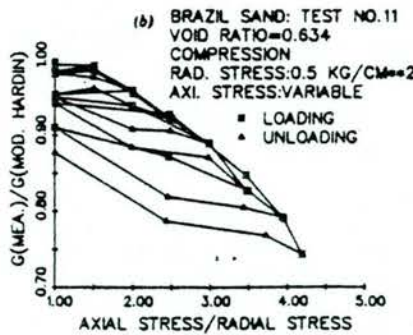
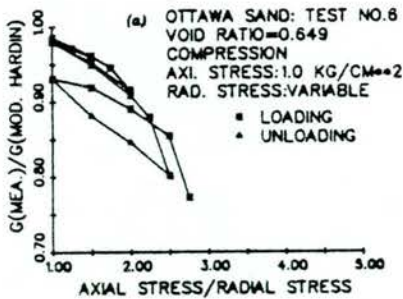


$$R = \sigma_1 / \sigma_3$$

$$\sigma_0 = \sigma_3 (2 + R) / 3 (= \text{constant})$$

Effects of Inherent and Stress-Induced Anisotropy on S-Wave and P-Wave Velocities Measured by Schmertmann

Fig.7.1 : elastische anisotropie bij onderzoek op grote zandmonsters.  
inherent: natuurlijke anisotropie tengevolge van de structuur van de korrelstapeling.  
geïnduceerd: deformatie-anisotropie t.g.v. structuurverandering



Effect of Stress History

Fig.7.2: De invloed van de belastingsgeschiedenis (hier betreft het het opvoeren, afbouwen en tot hoger deviatorspanning herbelasten (etc.) van een traxiaalmonster) op de G-modulus

Weergegeven is de genormeerde G-modulus ( $G/G_h$ ), waarbij geldt

$$G_h = A\{n,s\} \sigma_0^m \quad [33]$$

$n$  - poriegehalte (HR%),  $s$ -structuurparameter.

dat wil zeggen  $G/G_h$  is "geschoond" voor eventuele effecten van spanningsniveau of dichtheidsverandering tijdens de (plastische) deformatie.

Te zien is dat  $G/G_h$  progressief afneemt bij monotoon toenemende deviatorische belasting.

In ontlaste toestand is een niet-reversibele verlaging in  $G/G_h$  als gevolg van de plastische structuurwijziging merkbaar.

Bij herbelasten en (her)ontlasten wordt min of meer een hystereselus doorlopen. Gezien de (reversibele) structuur aanpassing hierbij beperkt is, kan dit gedrag gezien worden als een specifieke gevoeligheid voor deviatorische spanningstoestands-wijziging (soms "spanningsanisotropie" genoemd).

In eerste instantie kan dit als volgt geformuleerd worden [6]

$$G = A\{n\} H\{s, \gamma_p\} f\left\{\frac{\tau}{\sigma_0}\right\} \sigma_0^m * F\{\sigma_a, \sigma_p\} \quad (34)$$

$A\{n\}$  - dichtheidsfunctie

$H$  - (plastische structuur (modificatie) functie

$f$  - functie met betrekking tot de deviatorische spanningsgevoeligheid (deviator  $\tau$ , genormeerd op  $\sigma_0$ ).

$\sigma_0$  - spanningsniveau (coefficient  $m \sim 0,4$ )

F - polarisatiefunctie, te noteren als  $\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_o}\right)^j \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_o}\right)^l$  met  $j \sim 1$ .

(het blijkt namelijk dat de spanning in de voortplantingsrichting ( $\sigma_a$ ) en in de polarisatierichting (deeltjesbeweging)  $\sigma_p$  ook een beperkte invloed hebben). Ten aanzien van de in-situ seismiek zal  $F \sim 1$  echter op weinig significant bezwaar stuiten.

Door dergelijke relaties min of meer vooraf te kennen is de seismische in-situ meting ook als monitor-instrument tijdens uitvoering van grondconstructies (ontgraving, ophoging, constructiebelasting) toe te passen. Denk ook aan de situatie voor en na een verdichting of voor en na een serie van forse belastingen, waarbij de teweeggebrachte deformaties zich mogelijk significant weer spiegelen in de akoestische snelheden (moduli). Ook is te denken aan situaties als sedimentatie, consolidatie, opbarsten of verweking, waarbij met name in de s-golfsnelheid (akoestische G-modulus) forse veranderingen zijn te verwachten (zie de literatuur-analyse (6)). In bovenstaande zitten dus 2 aspecten verwerkt.

- de relatie met de mechanische parameters (stress-strain relatie); hoe zit het in de seismische gescande sector met de mechanische kwaliteit (af te schatten via de seismische parameters).
- de verandering ten opzichte van een referentie (beheer-aspect), "hoe is die kwaliteit in de loop der tijd gewijzigd?"

NB Recente literatuur leert dat het type vervorming (met name bij wisselbelasting) en zelfs bij geringe grootte orde ( $10^{-5}$  à  $10^{-4}$ ) de kwaliteit kan wijzigen (zowel in gunstige als ongunstige zin). Hierbij zijn zowel de structuur van het korrelskelet (Yoshimi, 1984) als de mate van rotatie van de hoofdspanningsconfiguratie (Arthur, 1981) belangrijk.

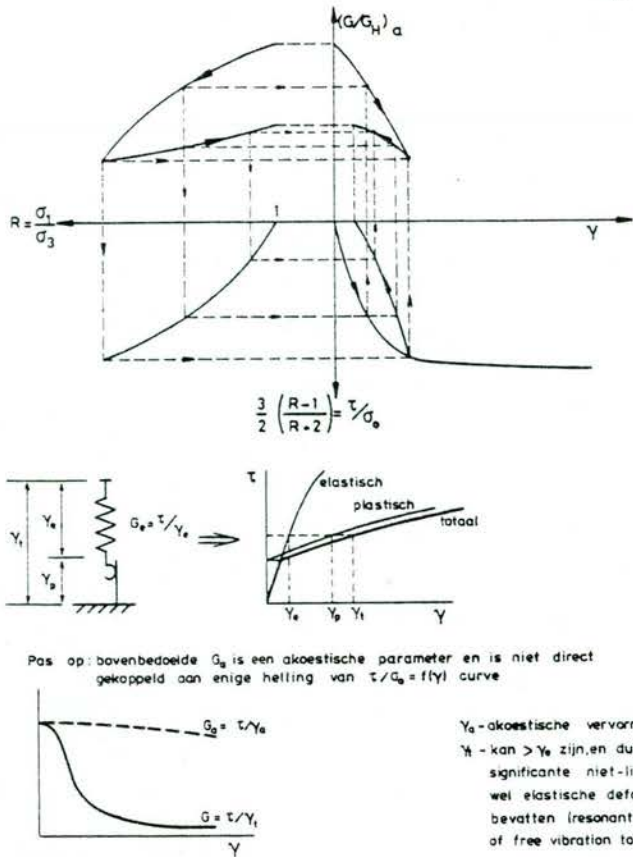


Fig. 7.3 : EXTREEM GESCHEMATISEERD BEGRIPS-MODEL

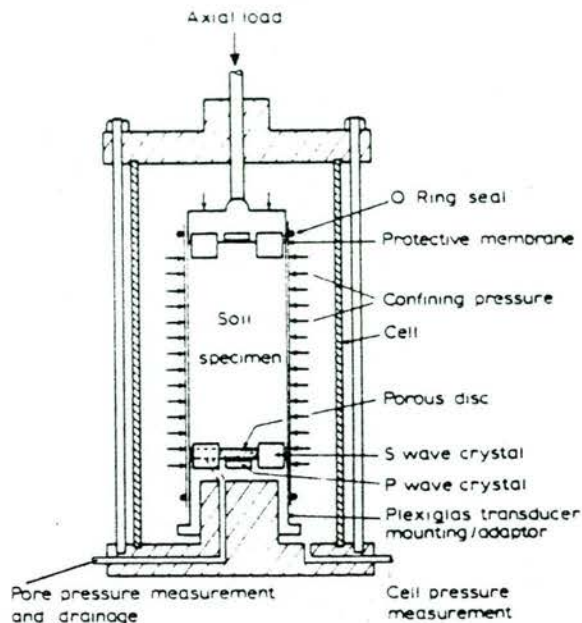
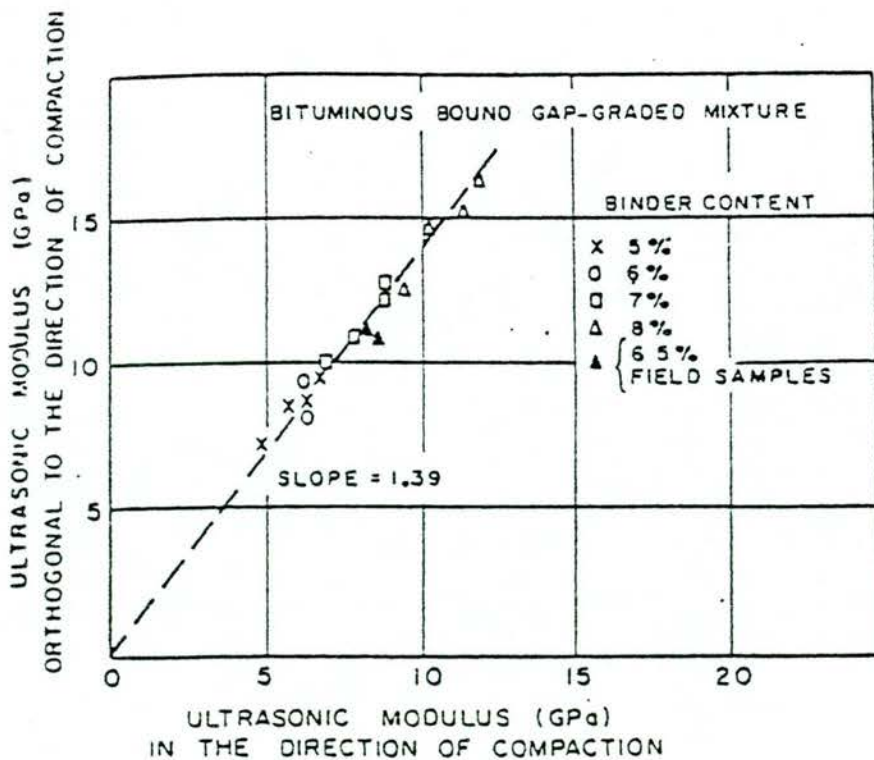


Fig. 7.4 : Standard triaxial cell with modified end caps incorporating P- and S-wave



Comparison of ultrasonic moduli in and orthogonal to the direction of compaction.

Fig. 7.5: Illustratie van elastische anisotropie bij asfaltmengsels

## 7.2. Mechanische gedrag van asfalt

Asfaltbeton is op te vatten als een zeer vastgepakt korrelskelet, "aaneengelijmd" met bitumen. Mede afhankelijk van de soort belasting, temperatuur en vervorming zullen de mechanische eigenschappen dus een vrij complexe resultante zijn van het gedrag van beide componenten en hun interactie (hechtingslaag). Bijvoorbeeld tonen zowel korrelpakking als bitumen op zich drukafhankelijke eigenschappen van uiteenlopende aard (bijvoorbeeld bij deviatorische vervorming treedt dilatantie van de korrelpakking, maar contractie van de bitumen op). Door het walsen van de mix, ontstaat een zekere textuur, die leidt tot anisotropie in de elastische eigenschappen (figuur 7.5). In figuur 7.6 is aangegeven dat dan ook het frequentie-effect op mechanische eigenschappen mede door het drukniveau en de grootte van de deviatorische belasting bepaald wordt. Er zal bij een (dynamisch) belast talud zowel een gradient in drukspanningsniveau als deviatorische belasting optreden. Toch wordt bij de huidige gangbare onderzoeksmethoden noch met anisotropie noch met het drukniveau of de amplitude van de deviatorische belasting tegelijk rekening gehouden (waarom niet?).

Gezien het karakter van de praktijk-belasting ligt het voor de hand [1] een vorm van dynamische buigproef te kiezen waarbij het monster onder een effectief drukniveau stootdynamisch wordt belast. Het is verder onjuist te onderstellen dat snelle belasting vrijwel elastisch is (fig 7.7 toont een soort "impuls-kruip" kromme), zodat het tijd wordt dat het reologische model wordt herzien (figuur 7.8 geeft een schematische presentatie, die o.m. met impuls-plasticiteit rekening houdt).



Een geheel ander punt is, dat de mogelijkheid bestaat dat in de tijd teruggelopen kwaliteit (bijvoorbeeld de beginfase van scheurvorming) mogelijk kenbaar is aan karakteristieken als demping en dispersie bij de golfvoortplanting. Mocht deze gevoeligheid door middel van relatief eenvoudige akoestische metingen aan monsters blijken, dan kan bijvoorbeeld door middel van in-situ akoestische metingen gescand worden. Zo is dan te geraken tot een locale, in-situ toepasbare, verkenningsmethode, die het mogelijk maakt tot een meer gerichte keuze van posities voor boormonsters ten behoeve van nadere analyse te komen. Bij gebleken voldoende gevoeligheid is zodoende een relatief eenvoudige methode ten behoeve van het vaststellen van onderhoudsgevoeligheid op te stellen.

Tezamen met de valgewichtdeflectometer en Goodmanvibrator, of de in hoofdstuk 3 behandelde rayleighgolf-pulsresponsiemethode en de h.f. radar-asfaltdikte meter ontstaat dan een samenhangend niet-destructief pakket van verkenningsmethoden (zie kader hoofdstuk 2).

Einfluss des deviatorischen Spannungsanteils  $q$  und des Zelldruckes  $\sigma_r$  sowie der Frequenz auf den komplexen Modul  $|E^*|$ . Temperatur 20°C, Mischung P6

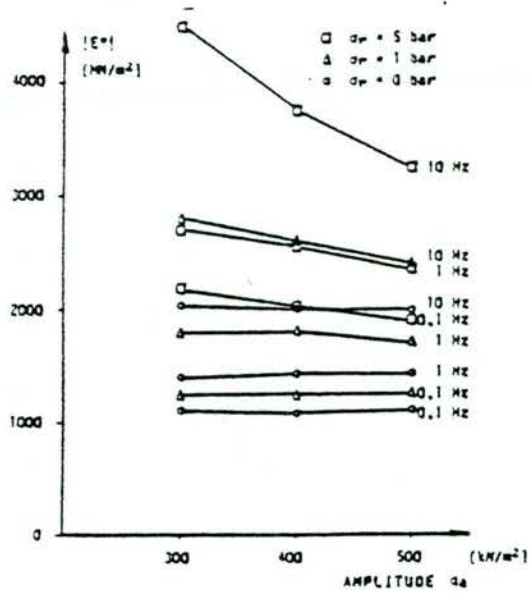
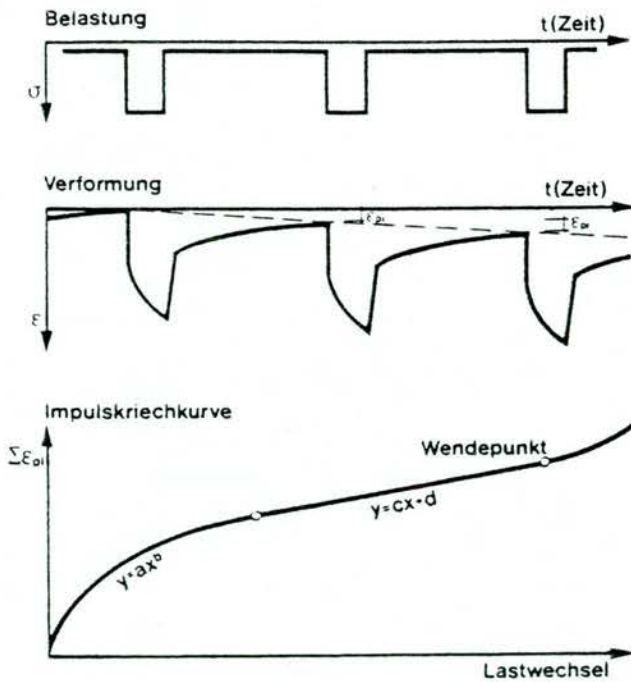
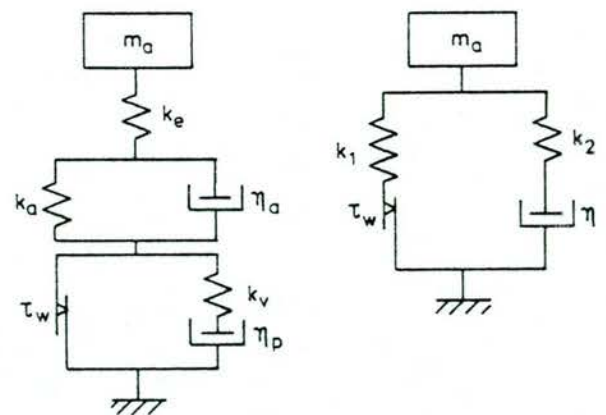


Fig.7.6: Illustratie van de invloed van het drukk niveau, deviatorische spanningscomponent en temperatuur op de 'complexe' asfalt-modulus (naar Huschek (17) ).



Schematische Darstellung der Belastung, Verformung und der Impulskriechkurve

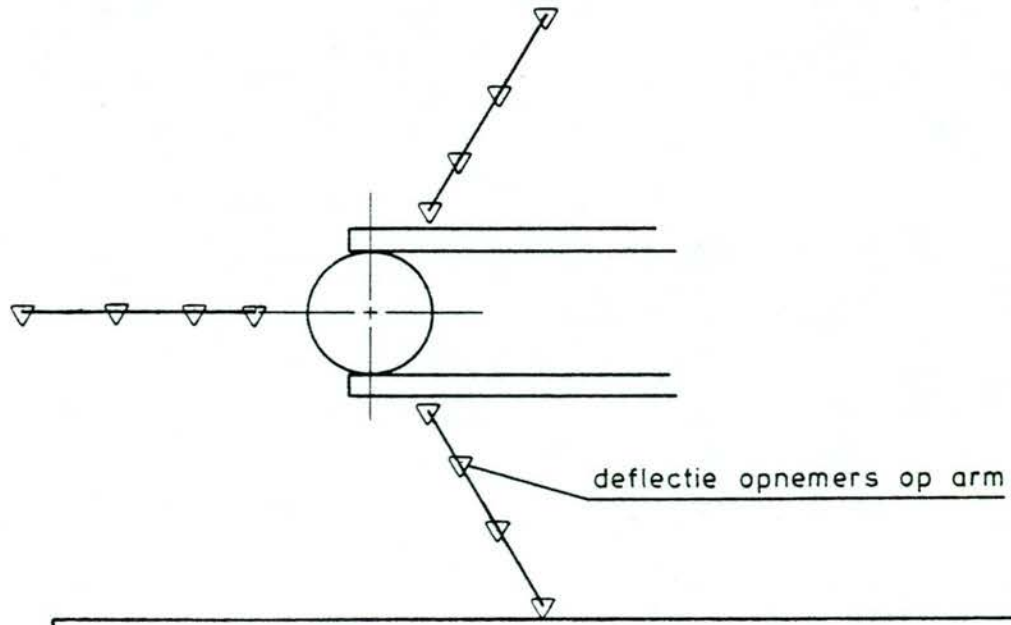
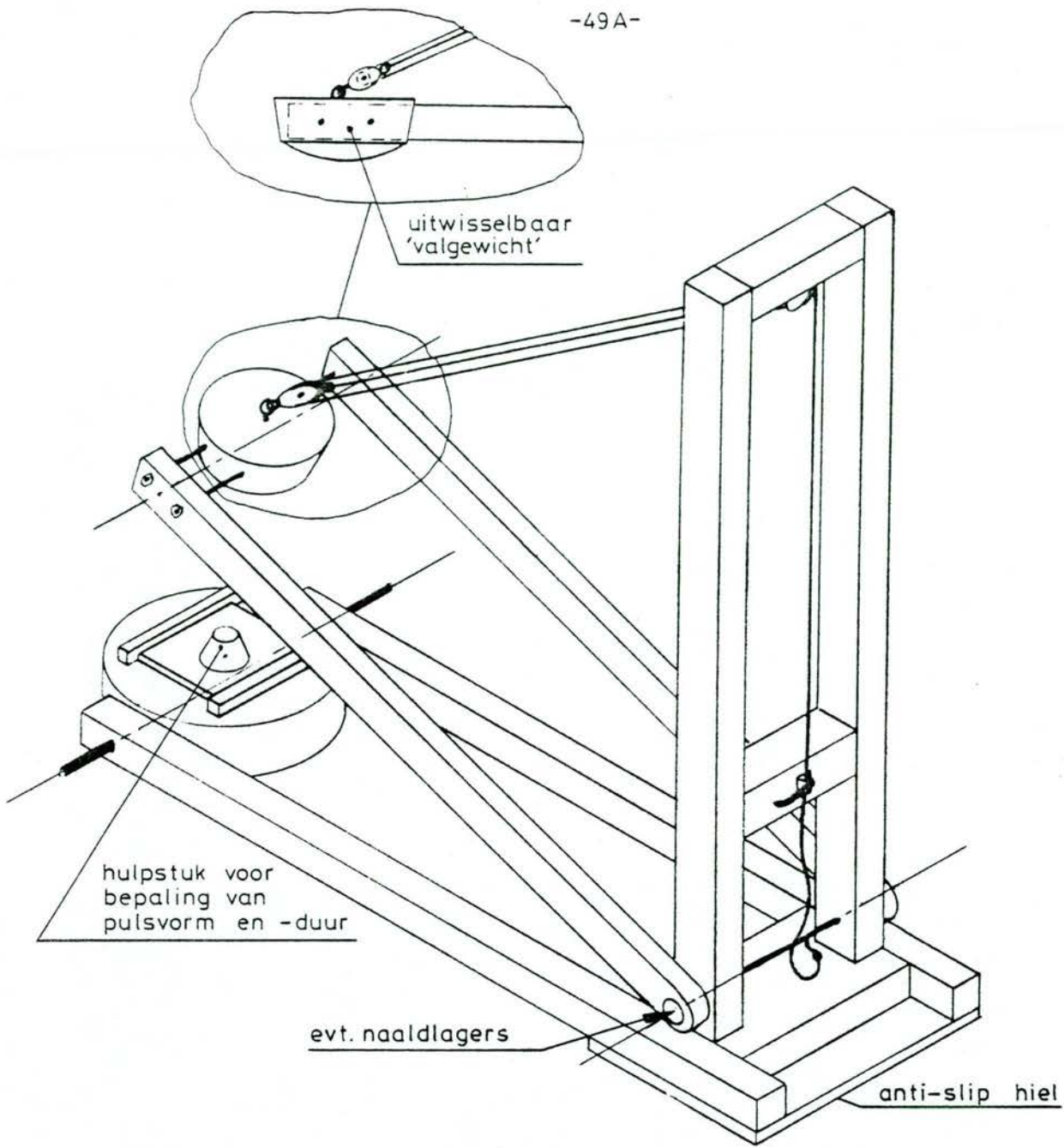
Fig.7.7



visco-elastoplastische rheologische Basismodellen für asphalt

Fig. 7.8

-49A-



ontw.  
E.Hekman

VALDEFLECTIE-APPARAAT (VALHAMER)		ger
	Fig. 8.1	form A <sub>L</sub>

## 8. De valgewicht deflectie-methode

Deze in feite "integrale" impedantie-meting voor de bekleding blijkt met de huidige apparatuur, (die overigens aangetoond een hoge flexibiliteit en productiviteit bezit), niet toepasbaar op relatief steile taluds ( $> 1 : 6$ ). Hieraan is mogelijk tegemoet te komen door een vrij eenvoudig te contrueren scharnierend valhamer-systeem (fig. 8.1) uit te proberen. Voor het aanpassen van de belastingskarakteristieken zijn enkele trucs denkbaar.

- In verband met de op de proefvakken geconstateerde vrij aanmerkelijke dikte variatie (zie de radarmetingen en kernboringen op Flaauwe Werk en Ommelander Zeedijk) is het misschien wenselijk het deflectie-meetsysteem enigermate uit te breiden.
- Tenslotte verdient het aanbeveling om na te gaan of met een uitgebreid gefoonsysteem tevens een ondergrondverkenning is uit te voeren (zie het hoofdstuk met betrekking tot de puls-responsiemethode).

Ook is de nadere theoretische interpretatie gewenst. In de tabellen 8.2 en 8.3, ontleend aan (3), betrekking hebbend op een weglichaam van zeer goede, respectievelijk matige (craquelé) kwaliteit zien we een nogal extreem verschil in moduli ontleend aan een "pseudo-statische" rekenmodel (ELSYM) en uit akoestische metingen. Bij het goede weglichaam blijken de FWD-moduli (met name voor asfalt in top laag) significant hoger te liggen, bij het matige ligt het juist andersom. Een toegevoegd probleem is de mate van demping. Bij het dijkonderzoek leek die kritisch tot overkritisch, bij het geciteerde onderzoek (figuur 8.4) echter overwegend subkritisch (ligt dit aan de relatieve hardheid van de onderlaag of (mede) aan een "losgepakt" overgangslaagje tussen asfalt en vast zandbed?).

COMPARISON BETWEEN ELASTIC MODULI CALCULATED FROM WAVE VELOCITIES VERSUS DEFLECTION MEASUREMENTS (ELSYM5)

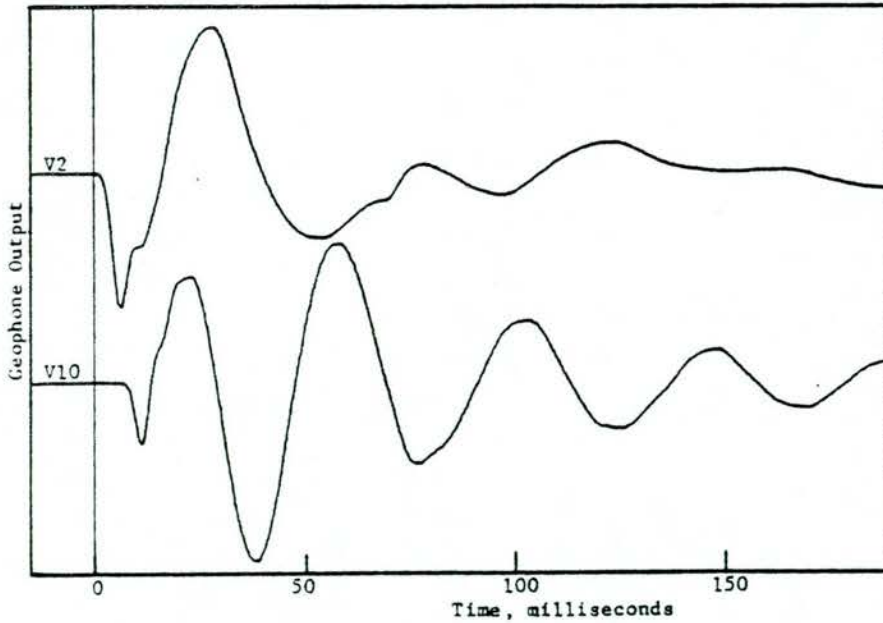
Material	Shear Modulus (psi)	Young's Modulus, E (psi)	
		Wave Propagation	Deflection Method*
Asphalt	70,000	190,000	250,000
Base	26,000	72,000	108,000
Subbase	16,000	45,000	40,000
Subgrade	9,000	25,000	17,000

\*Moduli were backcalculated from fitted deflection basin using elastic theory (ELSYM5).

Fig. 8.2

Material	Shear Modulus (psi)	Young's Modulus, E (psi)	
		Wave Propagation	Deflection Method*
Surface	35,000	91,000	50,000
Base	15,700	42,000	13,000
Stabilized Subgrade	8,100	23,000	12,500
Subgrade	5,500	16,000	12,000

Fig. 8.3



(b) Measurements with vertical geophones.

Fig. 8.4: Deflectiemetingen op een weglichaam in Austin, Texas

## 9. Slotopmerkingen

Gezien de vele detailopmerkingen enerzijds en diverse algemene conclusies in de rapporten met betrekking tot de proefvakken anderzijds lijkt het weinig zinvol om dit rapport met herhalingen of onrijpe conclusies te besluiten (het betreft immers in wezen een aanzet tot nadere probleemanalyse). Het gaat erom mede aan de hand hiervan een nadere taakanalyse en prioriteitstelling te formuleren, teneinde:

1. het volgende in-situ onderzoek met meer mogelijkheden te kunnen verrichten (diverse metingen op talud > 1 : 6)
2. een functionele samenhang tussen de methoden te vinden op dat aan een zo eenduidig mogelijk beoordelingsmodel gestalte is te geven.
3. na gebleken haalbaarheid van het systeem "sec" de algehele flexibiliteit zo op te voeren dat op den duur van een kosten-effectief systeem sprake kan zijn.

Een mogelijke complicatie hierbij is, of we alleen de nationale situatie beschouwen (voornamelijk beheer en onderhoud naast een enkele revisie) of ook iets verder kijken (expertise voor de export van het nederlandse waterbouwproduct naar de buitenlandse markt). Als mogelijke grove leidraad voor afweging kan mogelijk onderstaand (incomplete) schema dienen (elke aanvulling is welkom).

### - Fase van ontwerp of ingrijpende revisie (voorbereidende fase)

- \* ontwerp parameters → laboratorium studie (monsters, eventueel (hydraulische) modellen) mogelijk een enkel proefvak (als t.b.v p.r.asfalt bijvoorbeeld)
- \* kwaliteit van de diepere ondergrond (differentiële zettingen)

Hierbij is te denken aan verkenningsmetingen op grote schaal t/m selectieve laboratorium proeven (mede t.b.v. pre-calibratie t.a.v. verkenning en controle in de constructiefase.

- Constructiefase -aspecten

- eventueel grondverbetering
- aanbrengen zandlichaam (via opspuiten of zandauto's)  
Dit kan verkenningsmetingen op vrij grote schaal gevolgd door incidentele locale controle vergen.
- verdichting (o.m. "on-line" procesbewaking)
- leggen van de bekleding ("on-line" dikte controle, referentie-  
verkenning, selectief locale bepalingen).

- Beheerfase (in de huidige betekenis)

(a) Nieuwe constructies

Aan de hand van bovengenoemde referentiegegevens volgen van de situaties op reguliere tijdsintervallen, met name op reeds gelocaliseerde posities van wat minder kwaliteit.

(b) Bestaande, niet gescande, dijken

- volledige verkenning (dus vanaf de bekleding als toegevoegde complicatie)
- lokaal nadere specificatie

Nadere bijzonderheden werden reeds gegeven in hoofdstuk 2.

Bij elk van de fasen dienen de aspecten:

- voorverkenning
- procesbewaking
- controlemeting achteraf.

zo optimaal mogelijk in kaart te worden gebracht.

Hieruit volgen de basis-elementen voor een basis-diagnosesysteem (procedures, apparatuur, software, randvoorwaarden) waaruit voor elke aparte situatie een daarop aangepast diagnose-systeem is te selecteren.

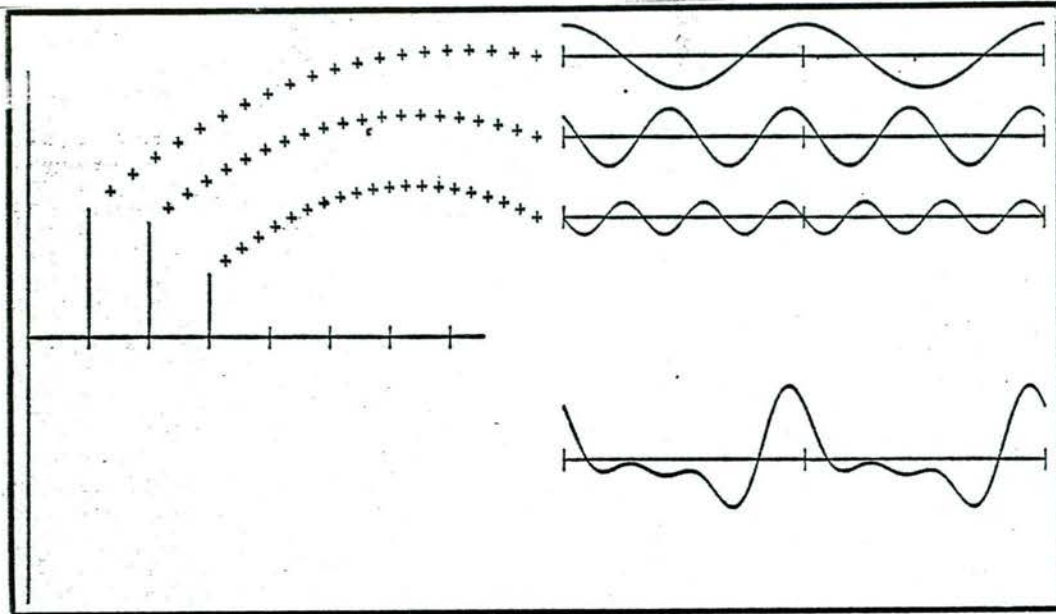


Fig. 4. Fourier synthese.

Links: spectrum van een (periodiek) signaal.

Horizontale as stelt de frequentie voor.

Rechts: de golfvormen die met elk van de spectrale componenten corresponderen en de som van deze 3 golfvormen.

Horizontale as stelt hier de tijd voor en is zo bemeaten dat twee volledige perioden van de somgolfvorm worden getoond.



Appendix A:

Correlatie methoden en spectraalanalyse

Voor de bepaling van de looptijd van signalen (met tijd lengte T) tussen 2 punten wordt gebruik gemaakt van de kruiskorrelatiefunctie.

$$R_{xy} \{\tau\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (A.1)$$

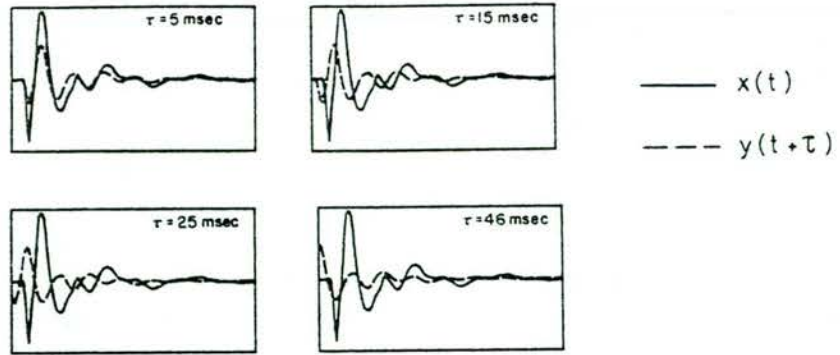
hierin is  $x(t)$  het signaal dat ten tijde  $t$  de 1e opnemer (geofoon) passeert en  $y(t + \tau)$  het "verwerkte" signaal op geofoon 2, een tijdstip  $\tau$  later.

Door deze integraal (uiteraard per computer) over "alle"  $\tau$  te berekenen ontstaat uiteraard een maximum in de correlatie naarmate  $x(t)$  en  $y(t + \tau)$  op elkaar lijken (zie fig. A.1). Zo wordt een maat gevonden voor de looptijd  $\tau$ , waaruit met bekende opnemer-afstand een looptijd valt te bepalen ( $\tau$  is dan de verschuiving, waarbij  $R_{xy}$  maximaal is).

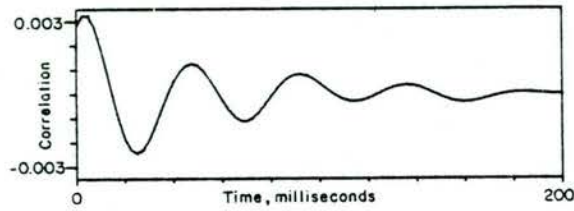
Een aspect dat eigenlijk voordien een rol speelt is het opschonen van het signaal door het uitmiddelen van "stochastische" storingen (averaging, stacking, signal-enhancement), inhoudende het optellen en normeren van "gelijkwaardige" signalen (voorbeeld zie fig. A.2).

De spectraalanalysemethode (sterk bekort en incompleet!).

Voor lineaire systemen (zoals zuiver elastische media) is de methode van de Fourieranalyse toepasbaar. In principe geldt dit voor periodieke signalen, maar met enkele theoretische kunstgrepen blijkt ze ook voor pulsvormige signalen toepasbaar.



(a) Relative similarities in waveforms for various time shifts.



(b) Resultant cross-correlation function having a peak at  $\tau = 5 \text{ msec}$ .

Illustration of how a cross-correlation function is generated.

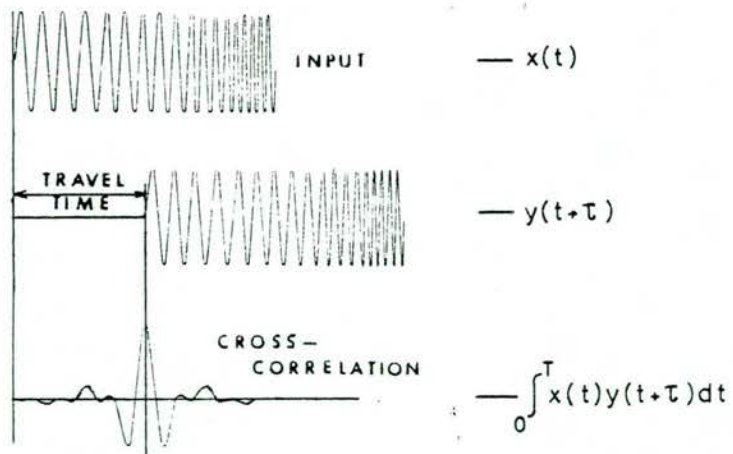
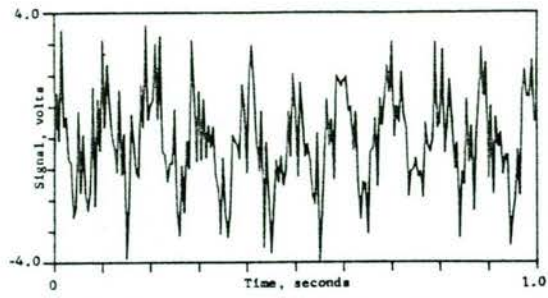
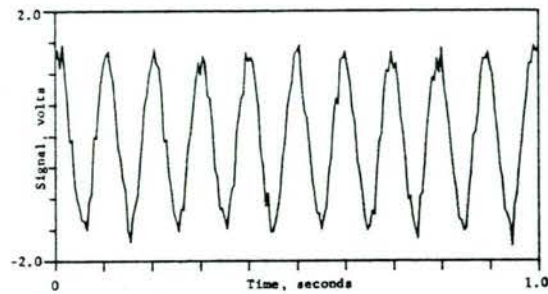


Fig.A1: Illustratie van de kruiskorrelatie ter bepaling van de looptijd (gegeven door het maximum in de korrelatiefunctie)



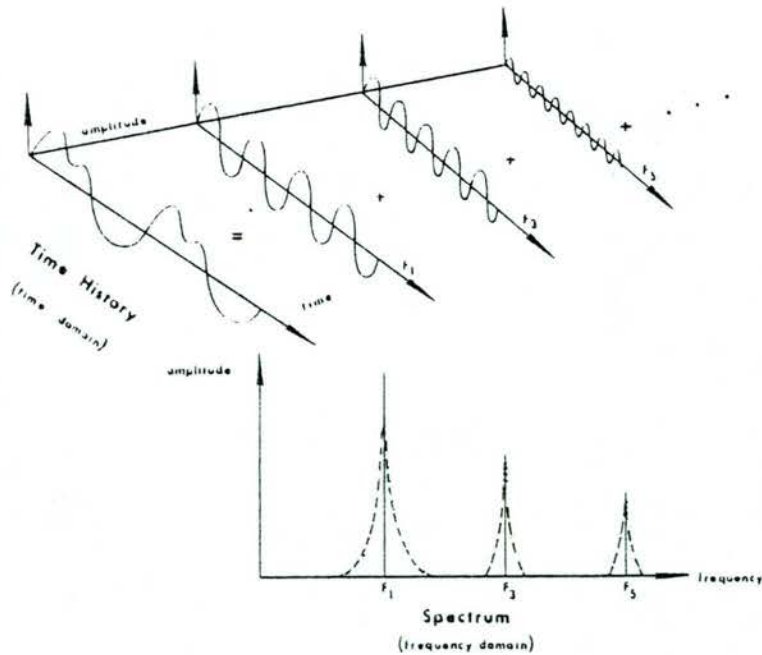
(a) Single time record with signal buried in noise.



(b) 10-Hz signal after 100 averages.

Extraction of a periodic signal from noise by averaging.

Fig.A2: Voorbeeld van signaalverbetering door middeling over meerdere signalen ('stacking')



Spectrum Analysis

Fig.A3: Voorbeeld van 'ontbinden' van een periodiek signaal in spectraalvorm (alleen amplitudespectrum is aangegeven)

Een periodiek signaal  $x(t)$  is naar Fourier te noteren als

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (\text{A.2})$$

$a_j$  en  $b_j$  = amplitude coëfficiënt,  $T$  = periodeduur, basisfrequentie  
 $f = 1/T$ .

Door toepassing van een bekende regel van Euler:

$$\exp\{j2\pi n f t\} = \cos\{2\pi n f t\} + j \sin\{2\pi n f t\} \quad (\text{A.3})$$

zijn (cos) en (sin) in "complexe" notatie ( $j = \sqrt{-1}$ ) om te zetten.  
Dit levert bij substitutie in (A.2)

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{a_n - j b_n}{2} \right) e^{j2\pi n f t} + \left( \frac{a_n + j b_n}{2} \right) e^{-j2\pi n f t} \right] \quad (\text{A.4})$$

De representatie van de amplitude termen is te geven als een vector ("phasor") in het "complexe vlak" (fig. A.4); gekarakteriseerd door

$$\begin{aligned} \text{amplitude } A_n &= (a_n^2 + b_n^2)^{0,5} \\ \text{fase } \theta_n &= -\text{bgtg} (b_n/a_n). \end{aligned}$$

(NB:  $(a_n - j b_n)$  en  $(a_n + j b_n)$  heten complex geconjugueerd (zeg  $\bar{A}_n^*$  en  $\bar{A}_n$ ) Een eigenschap is o.a.:

$$\bar{A}_n \cdot \bar{A}_n^* = (a_n + j b_n)(a_n - j b_n) = a_n^2 + b_n^2 \rightarrow \text{vgl. } A_n e^{j\theta} \cdot A_n e^{-j\theta} = A_n^2 \quad (\text{reëel}).$$

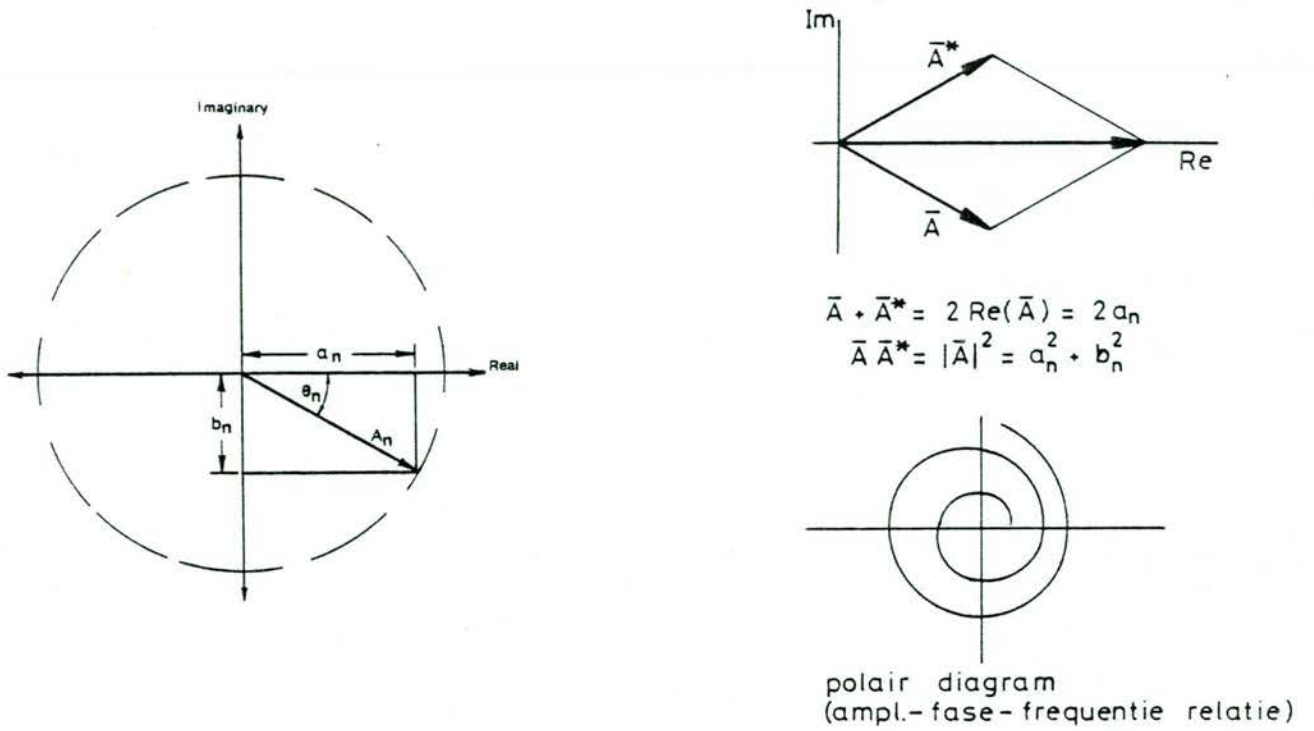


Fig.A4: Vector -representatie van het signaalspectrum

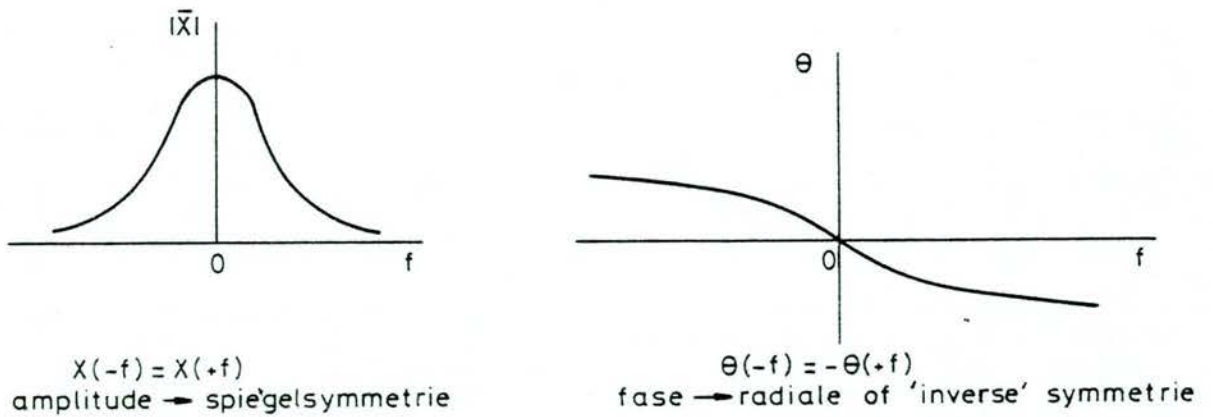


Fig.A5: Algemene voorwaarden m.b.t. het 'mathematische' continuspektrum (niet-periodiek signaal)

Het rotatiekarakter van deze "vectoren" volgt uit de vorm  $A_n^{\pm j(\theta + 2\pi nft)}$  → representatie voor het fasehoek-verloop met de tijd. Merk op dat (nf) staat voor een serie discrete frequenties. Voor niet-periodieke signalen  $x(t)$  volgt een analoge vorm als (A.4), maar dan in de vorm van een integraal over een continue functie van de frequentie.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(f) e^{j2\pi ft} df$$

"invers" geldt:

(A.5)

$$\chi(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

(NB. de "negatieve" tijden en frequenties hebben slechts een mathematische "betekenis").

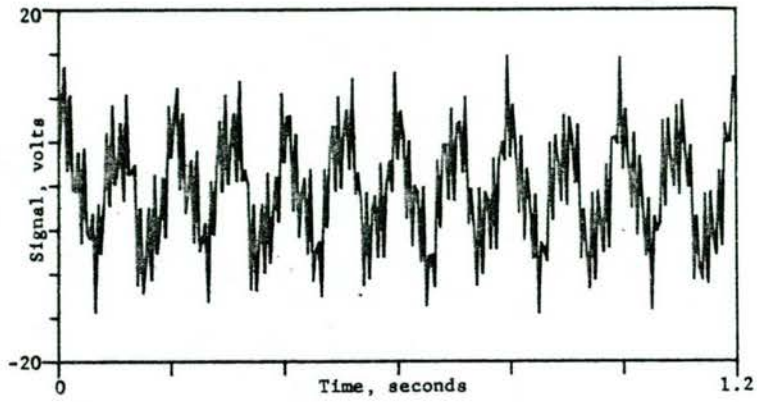
$\chi(f)$  representeert een continu spectrum (zie fig. A.5), met eigenschappen  $\chi(f) = \chi^*(-f)$ , (NB \* staat voor geconjugueerd) en impliceert

- spiegelsymmetrie voor de amplitude  $\chi(f) = \chi(-f)$
- inverse of radiale symmetrie voor de fase  $\phi(f) = -\phi(-f)$ .

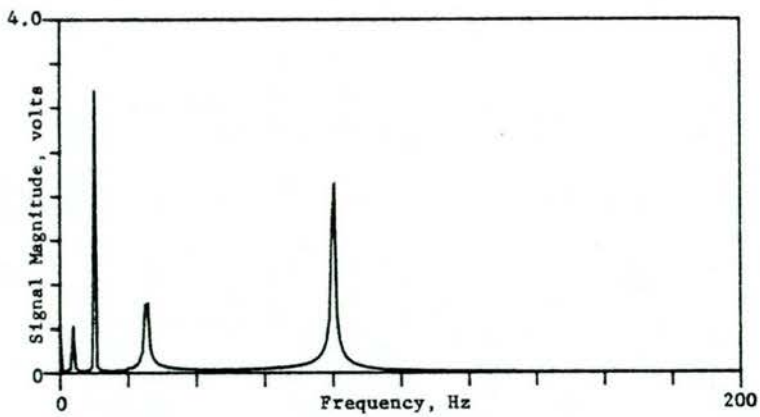
Na te gaan is:

$$x(t) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \int_0^{\infty} \chi(f) e^{j2\pi ft} df \right\} \quad (\text{A5.B})$$

Er wordt dus onderscheiden naar het "tijdsdomein" (vorm  $x(t)$ ) en het "frequentie-domein" (vorm  $\chi(f)$ , zie fig. A.6).



(a) Signal in the time domain.



(b) Signal in the frequency domain.

Fig. A 6 : Representation of a complex time signal by its frequency spectrum.

(N.B. Het fase-spektrum is hier niet weergegeven maar is wel essentieel voor de representatie in het frequentiedomein)

(A.5) wordt ook wel het "lineair spectrum" genoemd (symbool  $S_x(f)$ )

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j(2\pi ft)} dt \quad (A.6)$$

en bevat (vgl. fig. A.5) zowel amplitude als fase-informatie.

NB. Als  $S_x(f)$  en geconjugeerde  $S_x^*(f)$  worden genoteerd als

$$S_x(f) = |S_x(f)|e^{j\phi} \text{ resp. } S_x^*(f) = |S_x(f)|e^{-j\phi}, \text{ volgt}$$

$$G_{xx}(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) = S_x(f)^2 \rightarrow \text{de spectrale energiedichtheid (A.7)}$$

Evanzo is een spectrale kruis-energiedichtheid te formuleren ("analoog" (A.1)).

$$G_{yx}(f) = S_y(f) \cdot S_x^*(f) \quad (A.8)$$

Deze functie is op te vatten als de getransformeerde van

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt$$

en bevat dus onder meer informatie over de relatieve fase (faseverschillen) bij elke frequentie.

In concreto: voor elke vastgesteld faseverschil  $\Delta\theta$ , bepaald over een vaste afstand  $\Delta x$  tussen 2 gefoons geldt (bij elke frequentie  $f$ ).

$$\Delta\theta(f) = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda_R} \rightarrow \lambda_R = 2\pi \frac{\Delta x}{\Delta\theta(f)} \rightarrow C_R(f) = f\lambda_R \quad (A.9)$$



Dit betekent, dat bij een pulsvormig signaal (met voldoende frequentiebandbreedte) middels een signaalbewerkingstechniek uit het verschilfasespectrum  $\Delta\theta(f)$  het gehele scala rayleighgolfsnelheden  $C_R(f)$  als functie van de frequentie (lees golflengte) in een keer is te herleiden (tijdsparing bij verkenningsmeting!).

De overdrachtsfunctie in het frequentiedomein is gedefinieerd als:

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (\text{A.10})$$

voorbeelden van overdrachtsfuncties zijn bijvoorbeeld een gramfoonversterker, maar in principe ook een systeem dat deflectie ( $y$ ) ondervindt ten gevolge van opgelegde kracht ( $x$ ). De functie  $H$  karakteriseert de werking van het systeem (bijvoorbeeld de frequentieafhankelijke stijfheid (impedantie) voor asfalt e.d.). Voor dempingsmetingen (in de context van formules (14) - (16) is het nodig een goed beeld van de "overdrachtsfunctie" (15) van het medium te hebben. Hiertoe moeten de beide gefoons "gecalibreerd" worden, opdat de verticale amplitudes ( $A_{v,n}$  en  $A_{v,n+1}$ ) correct worden weergegeven. Dus dienen over het frequentiespectrum de overdrachtsfuncties  $H(f)$  van de gefoons bekend te zijn (figuur A.7).

Uit nauwkeurigheidsoverwegingen blijkt dat (zie ook (A.7) en (A.8)):

$$H(f) = \frac{S_y(f) \cdot S_x^*(f)}{S_x(f) \cdot S_x^*(f)} = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (\text{A.11})$$

een geschikter (energiegenormeerde) vorm is.

Tenslotte de "coherentie-functie", gedefinieerd [3] als:

$$\gamma^2(f) = \frac{G_{yx}(f) \cdot G_{yx}^*(f)}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}^*(f)} = \frac{S_x S_x^* \cdot S_y^* S_y}{S_x^* S_x \cdot S_y S_y^*} \quad (\text{A.12})$$

De "productfuncties" in teller en noemer zijn geconjugeerd, hetgeen betekent dat  $\gamma^2(f)$  een reële functie is (figuur A.8).

De functie duidt een kwaliteitsmaat voor de meting aan (bij elke frequentie)

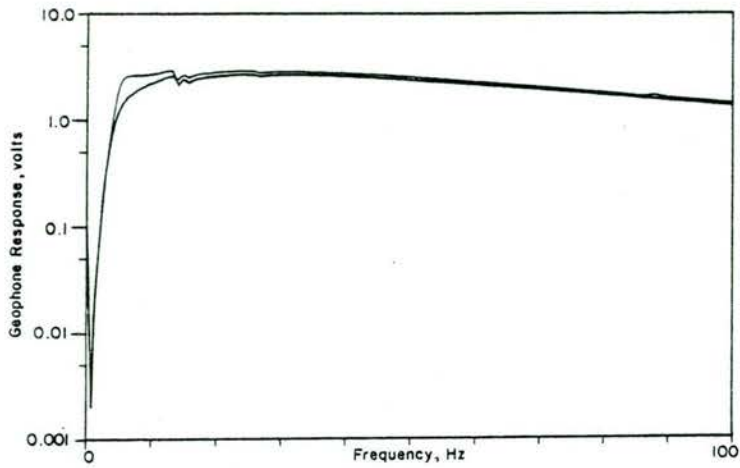
$$\gamma^2(f) = \frac{\text{responsie (kruis)-vermogen}}{\text{totaal gemeten responsievermogen}} \quad (\text{bij elke frequentie})$$

Als  $\gamma^2(f) = 1$  is bij de frequentie (f) al het uitgangsvermogen te relateren aan het ingangsvermogen (volledige "correspondentie"). Bij  $\gamma^2$  significant  $< 1$  is er indicatie van serieuze "mankementen" (bijvoorbeeld: het signaal moet door meerdere herhalingen beter boven het niveau van storingen worden gebracht).

Tot slot de opmerking dat realistische signalen geen oneindige bandbreedte hebben (als in de integralen (A5), (A6), etc. gesuggereerd. Dit heeft een aantal meettechnische consequenties, die buiten het directe kader van dit rapport vallen.

### Samenvatting

Een pulsvormig signaal is opgebouwd te denken uit een continu-frequentiespectrum van fasen en amplitudes. Door bewerkingen in het "frequentiedomein" zijn bij een enkele responsiemeting (uiteeraard met meerdere geofoons) op een stoot bij elke frequentie (golflengte, dieptemaat) de (rayleigh) golfsnelheid en de demping te bepalen. Er is bovendien een kwaliteitsmaat (per frequentie) voor de meting te bepalen (de zogeheten coherentiefunctie).



Response curves of the two vertical geophones used for test series WC-2.

Fig. A7: Een deel van de overdrachtsfuncties van twee gelijkwaardige opnemers (in interval 0 - 100 Hz)

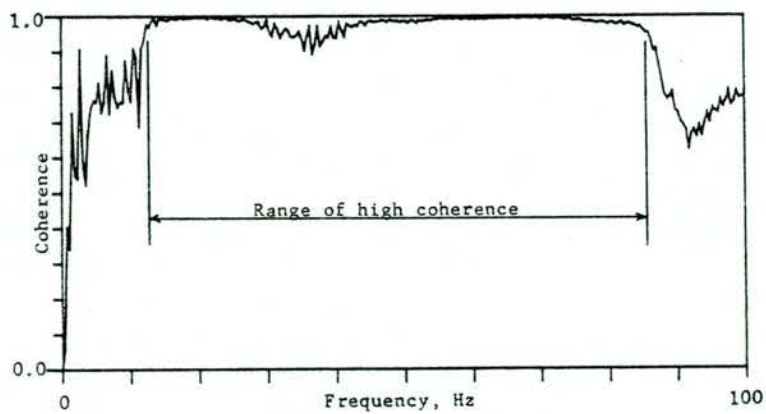


Fig. A8: Voorbeeld van een coherentiefunctie

Bij periodieke (zich in de tijd herhalende) signalen is ontbinding in discrete spectra (Fourier reeksontwikkeling) mogelijk. Bij niet periodieke signalen wordt soms met Laplace transformatie maar veelal ook met continue spectra (Fourier integralen) gewerkt.

In de praktijk zijn 'oneindige' frequentiespectra uiteraard niet werkbaar; en wordt dan gewerkt met in (frequentie) bandbreedte 'begrenste' signalen (filterprocedures bij de signaalbewerking).

