

MASTER

Akoestische detectie van slibdichtheden feasibility study

Janssen, H.C.

Award date:
1981

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain



adres Stieltjesweg 1
postadres Postbus 155
2600 AD Delft
telefoon (015) 56 93 00
telex 31614

No.: 910.281
Afd.: Instrumentatie Oceanologie
Behandeld:

AKOESTISCHE DETECTIE VAN
SLIBDICHTHEDEN
FEASIBILITY STUDY.

diechtheid van bodem
22 okt.

AFSTUDEERVERSLAG
H.C. JANSSEN

Verslag afstudeerwerk, verricht in het kader van de studie electrotechnisch ingenieur aan de Technische Hogeschool Eindhoven.
Het afstudeerwerk is uitgevoerd op de afdeling der Technische Natuurkunde van de Technische Hogeschool Delft bij de onderzoeksgroep Akoestiek onder leiding van prof.dr.ir. A.J. Berkhout. Begeleidend hoogleraar namens de Technische Hogeschool Eindhoven was prof.dr. H. Groendijk.

Voorwoord

In het kader van het afstudeeronderzoek voor de studie van electrotechnisch ingenieur aan de Technische Hogeschool Eindhoven is een onderzoek verricht naar de mogelijkheid om akoestisch slibdichtheden te detecteren.

Dit onderzoek is uitgevoerd bij de afdeling Instrumentatie Oceanologie van de Technisch Fysische Dienst TNO-TH in nauwe samenwerking met ir. D.Ph. Schmidt van deze afdeling en de onderzoeksgroep Akoestiek van de Afdeling der Technische Natuurkunde van de Technische Hogeschool Delft onder leiding van Prof.dr.ir. A.J. Berkhout.

De opdrachtgever van het project was Rijkswaterstaat, dit rapport is dan ook de eindrapportage voor deze opdrachtgever.

De bij dit onderzoek gebruikte computerprogramma's zijn in een intern rapport beschreven.

Delft, September 1980

DS/AP

H.C. Janssen



<u>INHOUD</u>	<u>pagina:</u>
1. Inleiding	2
2. Definities en symbolen	4
3. Slibsamenstelling en eigenschappen	5
4. Akoestische transmissie eigenschappen	10
4.1. Geluidsnelheid	10
4.2. Verzwakking en absorptie	17
5. Akoestische reflectie eigenschappen	20
5.1. Berekening akoestische responsie uit het dichtheidsverloop	20
5.2. Berekening dichtheidsverloop uit een akoestisch signaal	27
6. Computer programmatuur	34
7. Benodigd akoestisch vermogen echoloodstelsel	39
8. Metingen en simulaties	44
8.1. Geluidsnelheid en absorptiemeting	44
8.2. Parallelopnames van de dichtheids- meters en de echoloden	44
8.2.1. Backscattersonde en echolood parallel in het Calandkanaal	44
8.2.2. Backscattersonde, transmissiesonde en echolood parallel in de Mississippihaven	57
8.2.3. Transmissiesonde en echolood parallel in het Calandkanaal	61
8.2.4. Backscattersonde, transmissiesonde en echolood parallel in de Achtste Petro- leumhaven	66
9. Conclusie	70
10. Literatuuropgave.	73

BIJLAGEN:

- A. Radioactieve dichtheidsmeters
- B. Contrôle berekeningen benodigd akoestisch ver-
mogen
- C. Meetrapport "Geluidsnelheidsmeting in de Rotter-
damse havens", d.d. 26 februari 1980.

1. Inleiding

Opdrachtgever [1]

In 1973 is door Rijkswaterstaat en de Gemeente Rotterdam een onderzoekproject gestart, dat als taak heeft de mogelijkheden te onderzoeken om tot kostenverlaging van het onderhoud van de scheepvaartgeulen en havens in het Rijnmondgebied te komen. Dit onderzoekproject kreeg als naam: "Minimalisering Kosten Onderhoudsbaggerwerk". De werkzaamheden zijn onderverdeeld in een groot aantal projectgroepen en in opdracht van de projectgroep "Opnametechniek" is, in nauwe samenwerking met Prof.Dr.Ir. A.J. Berkhout van de T.H.-Delft, het in dit rapport beschreven onderzoek uitgevoerd.

Doelstelling [1]

Onderzoekingen naar het vaargedrag van diepstekende schepen in slibrijke gebieden hebben aangetoond dat de sliblaag met een soortelijke massa van 1200 kg/m^3 uit nautisch oogpunt als bodem kan worden beschouwd. Om de diepte, waarop de 1200 kg/m^3 laag zich bevindt, te bepalen, zijn twee typen radioactieve dichtheidsmeters ontwikkeld; een backscatter sonde en een transmissie sonde. Door een sonde in het slib af te vieren kan de dichtheidsopbouw van de sliblaag bepaald worden. Een bezwaar is echter dat het een puntmeting betreft. Het doel van dit onderzoek is dan ook om de mogelijkheden te onderzoeken om het dichtheidsverloop af te leiden uit de echo-akoestische responsies van de bodem. Hieruit zou de ontwikkeling van een slibecholood kunnen volgen waarmee een doorlopend profiel gemeten kan worden.

Opzet van het onderzoek

De in een rivier of haven van de bodem opgenomen echo-akoestische responsie als functie van de tijd is gerelateerd aan het verloop van de akoestische impedantie als functie van de diepte. De specifieke akoestische impedantie van een stof is voor een vlakke lopende golf gelijk aan het produkt van soortelijke massa en geluidssnelheid. De geluidssnelheid kan berekend worden uit de kompressiemodulus en de soortelijke massa.

Hieruit volgt dat, wanneer de mechanische eigenschappen van het slib bekend zijn, uit een gemeten slibdichtheidsverloop het bijbehorende impedantieverloop berekend kan worden. Deze impedantiecurve kan vervolgens gebruikt worden om op een computer een te verwachten echo-akoestische responsie te genereren. Vergelijking van de gegenereerde met een gemeten responsie geeft informatie over de geldigheid van het model. Door de parameters in het model te variëren kan nagegaan worden welke eisen aan meet- en verwerkings apparatuur moeten worden gesteld om echo-akoestische responsies om te zetten in dichtheidsinformatie.

In dit rapport wordt allereerst ingegaan op de samenstelling en de akoestische eigenschappen van het slib. Vervolgens komt het fysisch model aan de orde met de daar bijbehorende randvoorwaarden. Besloten wordt met de uitgevoerde metingen ter verificatie van de in het model gemaakte veronderstellingen.

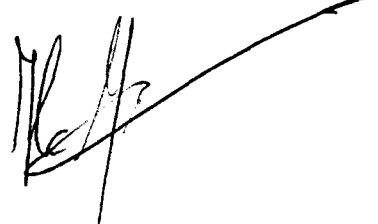
Delft, juli 1980

DS/AP

ir. D.Ph. Schmidt



H.C. Janssen



2. Definities en symbolen

ρ	= soortelijke massa of dichtheid	kg.m^{-3}
ρ_n	= natte dichtheid = massa slibmonster/volume slibmonster	kg.m^{-3}
ρ_k	= korreldichtheid = massa korrel/volume korrels	kg.m^{-3}
ρ_w	= waterdichtheid = massa water /volume water	kg.m^{-3}
ρ_g	= gasdichtheid = massa gas /volume gas	kg.m^{-3}
ϕ_k	= volume fraktie korrels = volume korrels/volume slibmonster	-
ϕ_w	= volume fraktie water = volume water/volume slibmonster	-
ϕ_g	= volume fraktie gas = volume gas/volume slibmonster	-
K	= kompressiemodulus of bulkmodulus	N.m^{-2}
K_n	= kompressiemodulus slib (n=nat)	N.m^{-2}
K_k	= kompressiemodulus korrels	N.m^{-2}
K_w	= kompressiemodulus water	N.m^{-2}
K_g	= kompressiemodulus gas	N.m^{-2}
K_f	= kompressiemodulus korrelskelet (f=frame)	N.m^{-2}
G	= gleidingsmodulus of shearmodulus	N.m^{-2}
c	= geluidsnelheid	m.s^{-1}
c_o	= geluidsnelheid in belvrij water	m.s^{-1}
Z	= $\rho.c$ = specifieke akoestische impedantie	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
R	= reflektiecoefficient	-
T	= transmissiecoefficient	-
d	= diameter of dikte	m
h	= hoogte waterkolom	m
r	= afstand wateroppervlak - reflektielaag in het slib	m
f	= frequentie	Hz
g	= versnelling zwaartekracht	m.s^{-2}
γ	= verhouding soortelijke warmtes (= C_p/C_v)	-
P_o	= statische druk	N.m^{-2}
n	= aantal bellen/volume eenheid	m^{-3}
α	= absorptie in water	dB.m^{-1}
k	= absorptiefactor in slib	$\text{dB.m}^{-1}.\text{kHz}^{-1}$
t	= tijd	s
τ	= looptijd	s
F	= fourier transformatie	-
I	= integraal	-

I_o	= intensiteit bij de bron op referentie afstand r_o	$W.m^{-2}$
I_r	= intensiteit op afstand r	$W.m^{-2}$
TL	= transmissie verlies	
P_{el}	= elektrisch vermogen	
P_{ak}	= akoestisch vermogen	
SL	= bronniveau	
NL_{ak}	= ruisniveau (akoestisch)	
NL_{el}	= ruisniveau (elektrisch)	
EL	= echolevel	
M	= ontvangevoeligheid	
SPL	= spectrumlevel van de ruis	
B	= bandbreedte	
DI	= richtingsindex	

3. Slibsamenstelling en eigenschappen.

Samenstelling [2], [3]

Slib wordt veelal gedefinieerd als de fractie sediment met korreldiameters kleiner dan 50 à 65 μm . Deze fractie is opgebouwd uit een groot aantal mineralen en variërende hoeveelheden organisch stof en carbonaten. Naar korrelgrootte kan de volgende onderverdeling worden gemaakt.

diameter	naam	voornaamste bestanddelen
$d < 2 \mu\text{m}$	klei	kleimineralen, organisch stof
$2 \mu\text{m} \leq d < 50-63 \mu\text{m}$	slib, silt	veldspaten, carbonaten (kalk)
$d \geq 50-63 \mu\text{m}$	zand	kwarts

Behalve de hier genoemde bestanddelen kunnen in slib ook nog sporenelementen, zoals zware metalen, voorkomen en kan er gasontwikkeling plaatsvinden.

Tijdens een serie consolidatieproeven uitgevoerd met slib afkomstig uit de Merwede, de Botlek en de Europoort is ondermeer de samenstelling van het slib onderzocht [3]. In de volgende tabel worden de hierbij bepaalde samenstellingen en eigenschappen gegeven.

Slibsoort afkomstig uit:	Botlek	Europoort	Merwede	eenheid
korreldichtheid ρ_k	2450	2470	2420	kg/m^3
waterdichtheid ρ_w	1008-1009	1016-1017	1000	kg/m^3
zoutgehalte poriënwater	16	32	0,3	g/liter
organisch stofgehalte ($\rho < 1400 \text{ kg/m}^3$)	11,6	16,7	7,9	gew. %
kalkgehalte ($\rho \approx 2711 \text{ kg/m}^3$)	24,6	25,3	23,6	gew. %
deeltjesgrootte verdeling				
$d < 2 \mu\text{m}$	27	31	18	%
$2 \mu\text{m} \leq d < 63 \mu\text{m}$	72,5	65	80,5	%
$d \geq 63 \mu\text{m}$	0,5	4	1,5	%
totale gasontwikking na 8 mnd. in niet steriel slib.	119	24,5	142	cm^3

Vlokvorming [2], [4]

Kleine slibdeeltjes (klei mineralen) zullen krachten op elkaar uitoefenen veroorzaakt door de negatieve en positieve ladingen op het oppervlak en aan de randen van de deeltjes, de Londen- van der Waals intermoleculaire krachten, de in het poriënwater voorkomende ionen en de door de slibdeeltjes geadsorbeerde ionen. Als gevolg van deze krachten kan een zgn. kaartenhuis-structuur gevormd worden (vlokvorming), die de mechanische eigenschappen van het slib beïnvloedt. Deze vlokvorming kan ook nog beïnvloed worden door microbiologische afbraakprocessen van het organisch stof.

In figuur 3.1 zijn een aantal voorkomende sediment structuren gegeven.

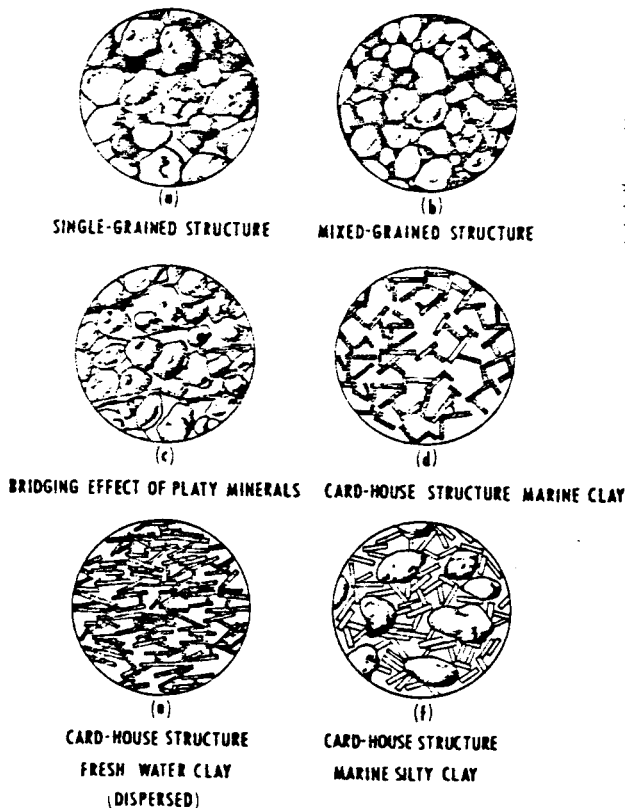
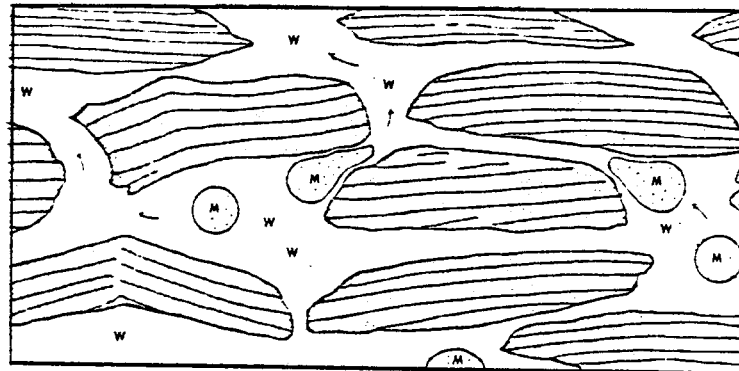


Fig. 3.1. Enkele voorkomende sediment structuren (ref. [5])

Methane bubbles



Matrix of a compacting shale consisting of platy grains of clay-minerals and organic matter:



Interstitial water W is saturated with methane being generated from the organic matter so that continued generation produces bubbles of free methane:



Methane bubbles are trapped in pores and block outlets thus impeding outward flow of both water and gas until sufficient internal pressure is built up to overcome surface forces resisting distortion and escape of bubbles, or to create microfractures.

Fig. 3.2. Methaangasbelletjes in bodemsediment (ref. [6])

Gasontwikkeling [2], [6]

Na de afzetting van slib kan hierin alsgevolg van een aantal opeenvolgende biochemische bodemprocessen gas ontwikkeld worden. De volgorde, waarin deze processen plaatsvinden, hangt samen met de beschikbaarheid van bepaalde opgeloste stoffen, zoals zuurstof, nitraat en sulfaat, in het poriënwater. Achtereenvolgens zal als functie van de tijd (en dus ook van de diepte) door aerobe bacteriële werking kooldioxide en door anaerobe bacteriële werking stikstof, ammonia, zwavelwaterstof en tenslotte methaan gevormd worden. In zeewater is aanzienlijk meer sulfaat aanwezig dan in zoetwater, waardoor de sulfaat reducerende fase, waarbij zwavelwaterstof wordt gevormd, in marien slib zeer lang duurt en niet of pas na lange tijd overgaat in de laatste fase waarbij methaan gevormd wordt. Dit blijkt ook uit de in de eerder gegeven tabel vermelde gasontwikking, die in een zoetwater milieu maximaal was.

Aangezien methaan slecht oplosbaar is in water geeft het laatste bodemproces aanleiding tot de vorming van gasbelletjes in de poriën. Deze gasbelletjes zullen naarmate het slib meer geconsolideerd is en dus de structuur sterker is, steeds moeilijker uit het slib kunnen ontsnappen. Wanneer door de gasbelletjes voldoende druk is opgebouwd om de structuur (plaatselijk) te verbreken dan zullen ze zich kunnen verplaatsen en verzamelen tot grotere bellen om nog weer sterkere structuren te verbreken (zie figuur 3.2). Door externe verstoringen, veroorzaakt door bijvoorbeeld de scheepvaart, kan de structuur ook verbroken worden, waardoor de gasbellen kunnen ontsnappen.

Mechanische eigenschappen [4], [5], [7]

De akoestische eigenschappen van een medium zijn direkt gekoppeld aan de mechanische eigenschappen, zoals blijkt uit de basisvergelijking voor de geluidssnelheid van een compressiegolf in een medium

$$c^2 = (K + \frac{4}{3} G) / \rho \quad (3.1)$$

waarin K = kompressiemodulus of ook wel bulkmodulus (N/m^2)

G = gleidingsmodulus of ook wel shear modulus (N/m^2)

ρ = soortelijke massa of ook wel dichtheid (kg/m^3)

Voor de kompressiemodulus van poreuze media, zoals slib, heeft Gassmann afgeleid dat, wanneer het korrelskelet en het poriënwater tesamen bewegen, voor de effectieve kompressiemodulus K_n geldt (slib zonder gasfase).

$$K_n = K_k \frac{K_f + Q}{K_k + Q}, \quad Q = \frac{K_w (K_k - K_f)}{\phi_w (K_k - K_w)} \quad (3.2)$$

- waarin ϕ_w = porositeit (= volume fractie water)
- K_n = kompressiemodulus slib (n = nat)
- K_k = kompressiemodulus korrels
- K_w = kompressiemodulus water
- K_f = kompressiemodulus korrelskelet (f = frame)

Formule (3.2) kan ook geschreven worden als:

$$K_n = \frac{K_w \cdot K_k}{\phi_w K_k + (1 - \phi_w - (K_f/K_k)) K_w} + \frac{\phi_w (K_k - K_w) - K_w}{\phi_w K_k + (1 - \phi_w - (K_f/K_k)) K_w} \cdot K_f \quad (3.3)$$

'Woodterm'
'Frameterm'

De grootte van de shear modulus in (3.1.) en van de korrelskelet kompressiemodulus in (3.2.) en (3.3.) wordt bepaald door de mate waarin de slibdeeltjes elkaar beïnvloeden (vlokvorming).

De dichtheden waarin we bij dit onderzoek geïnteresseerd zijn verlopen van 1000 kg/m³ tot 1400 kg/m³, hetgeen overeenkomt met porositeiten van ca. 70% - 100%. Op grond van een groot aantal laboratorium en in-situ metingen worden in de literatuur voor de in de formules voorkomende grootheden de volgende waarden gegeven.

mechanische grootheid (N/m ²)	opmerkingen
$K_w = 2,18 \cdot 10^9$	zoet water
$2,28 \cdot 10^9$	zout water
$K_k = 3,6 \cdot 10^{10}$	voor zowel zand ($\rho=2650 \text{ kg/m}^3$) als
$3,3 \cdot 10^{10}$	'mud' ($\rho=2260 \text{ kg/m}^3$) (Stoll)
	ter vergelijking de waarde voor kwarts.
$K_f = 1,21 \cdot 10^7$	'mud' (Stoll)
$= 4,36 \cdot 10^7 - 1,38 \cdot 10^9$	zand (Stoll)
$< 6 \cdot 10^7$	voor porositeiten >70% (Hamilton)
$G < 10^8$	'silty-clay' en 'clay', $\phi_w > 75\%$ (Hamilton)

Uit de bovenstaande tabel blijkt dat voor grote porositeiten de invloed van het korrelskelet gering is ($K_f \ll K_w, K_k$) en dat (3.3) vereenvoudigd kan worden tot alleen de Woodterm

$$K_n = \frac{K_w \cdot K_k}{\phi_w K_k + (1 - \phi_w) K_w} \tag{3.4}$$

en dat eveneens de invloed van de shear modulus verwaarloosd kan worden zodat (3.1) vereenvoudigd kan worden tot (3.5)

$$c^2 = K_n / \rho_n \tag{3.5}$$

4. Akoestische transmissie eigenschappen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de akoestische transmissie door het slib. Allereerst zal de geluidsnelheid met de daarop van invloed zijde parameters behandeld worden. Vervolgens komt de te verwachten verzwakking van een uitgezonden akoestisch signaal aan de orde.

4.1. Geluidsnelheid

Slib zonder gas [8], [9]

Bij de berekening van de geluidsnelheid maken we gebruik van de vergelijking van Wood [8]. Hierbij worden de dichtheid en de kompressiemodulus van het slib door middeling berekend uit de dichtheden en kompressiemoduli van de afzonderlijke stoffen.

$$\rho_n = \phi_k \rho_k + \phi_w \rho_w \quad (4.1a)$$

$$\frac{1}{K_n} = \frac{\phi_k}{K_k} + \frac{\phi_w}{K_w} \quad (4.1b) = (3.4)$$

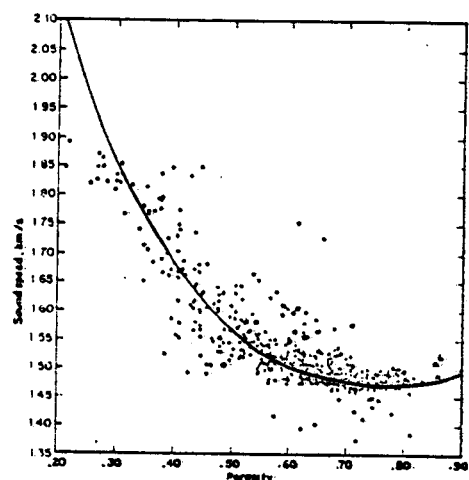
opm. voor de definities van de grootheden zie hoofdstuk 2.

Aangezien geldt, dat $\phi_k + \phi_w = 1$ kunnen we (4.1a) ook schrijven als

$$\phi_k = (\rho_n - \rho_w) / (\rho_k - \rho_w) \quad \text{en} \quad \phi_w = (\rho_k - \rho_n) / (\rho_k - \rho_w) \quad (4.2)$$

Met (4.1a), (4.1b), (4.2) en (3.5) kunnen we de geluidsnelheid uitdrukken in de vaste materiaal constanten en de (gemeten) natte dichtheid.

$$c^2 = K_w \cdot K_k \left[\frac{\rho_n - \rho_w}{\rho_k - \rho_w} \cdot \rho_n \cdot K_w + \frac{\rho_k - \rho_n}{\rho_k - \rho_w} \cdot \rho_n \cdot K_k \right]^{-1} \quad (4.3)$$



Sound speed versus porosity from measurements made on core samples. The curve shows Wood's equation (Ref. 16) for a mixture of noninteracting solid particles in water. (Ref. 72.)

Deze benadering is juist wanneer de slibdeeltjes klein zijn ten opzichte van de akoestische golflengte en homogeen verdeeld in het water en wanneer de invloed van de interactie tussen de deeltjes verwaarloosd mag worden. Aan de eerste voorwaarde wordt voldaan aangezien de te gebruiken frequentie <math>< 100\text{kHz}</math> is en dus een golflengte >math>> 15\text{mm}</math> heeft terwijl 95% van de slibdeeltjes <math>< 63\ \mu\text{m}</math> is. Op de tweede voorwaarde is in hoofdstuk 3. ingegaan. Ter illustratie wordt in figuur 4.1. een vergelijking gegeven van een groot aantal in-situ metingen aan 'deep-sea' sediment met de vergelijking van Wood. Let vooral op het kleiner worden van de geluidsnelheid bij een afnemende porositeit van 0.9 tot 0.75.

Fig. 4.1. Geluidsnelheid vs. porositeit (ref. [9])

Met een computer simulatie is de invloed van de korreldichtheid nagegaan op de geluidsnelheid. Hiertoe zijn drie lineaire slibdichtheidscurves (ρ_n als functie van de diepte) gegenereerd. De fraktie slibdeeltjes loopt hierbij van ca. 0 - 60%. Met (4.3) zijn de hierbij behorende geluidsnelheidscurves (c als functie van de diepte) berekend. In figuur 4.2 zijn de curves weergegeven. Te zien is dat de invloed van de korreldichtheid klein is. Tevens blijkt dat de geluidsnelheid slechts weinig verandert, zodat wanneer de akoestische impedantie als functie van de diepte bekend is (bijvoorbeeld uit een echo-akoestische responsie) de dichtheid als functie van de diepte op een constante faktor na bekend is.

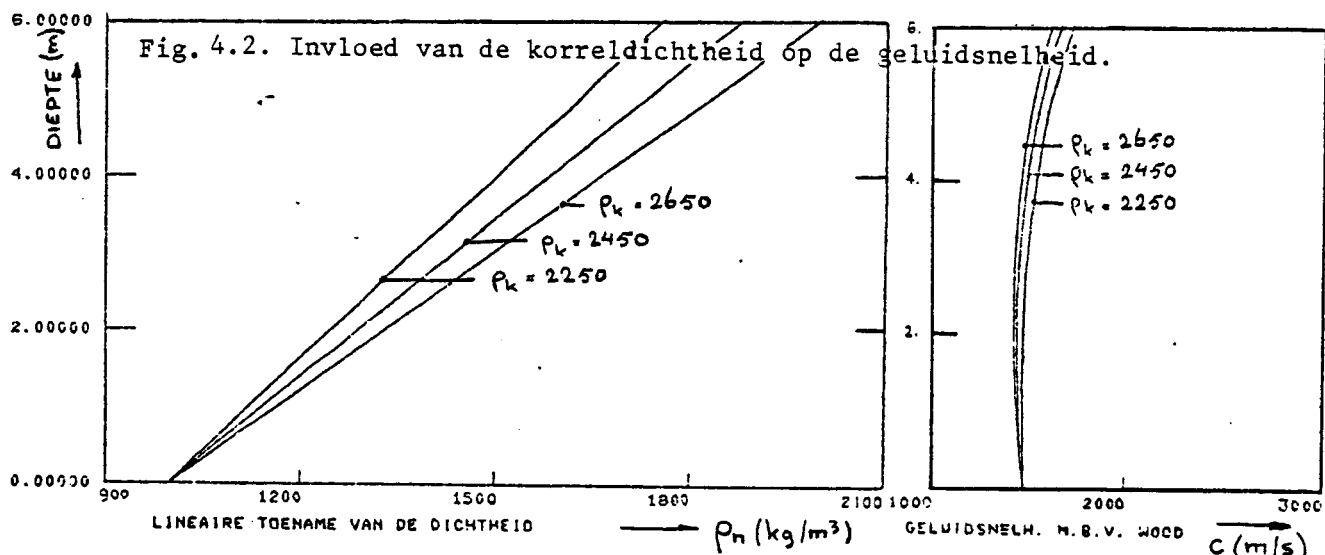


Fig. 4.2. Invloed van de korreldichtheid op de geluidsnelheid.

Water-gas mengsel [5][8][9]

Alvorens in te gaan op de invloed van gas in slib op de geluidsnelheid, zal eerst de geluidsnelheid in een water-gas mengsel behandeld worden.

Opgelost in water heeft gas een verwaarloosbaar effect op de geluidsnelheid. Gas in de vorm van kleine belletjes kan een zeer groot effect hebben. Dit hangt af van de frequentie van het akoestisch signaal t.o.v. de resonantie frequentie van de belletjes.

Voor de resonantie frequentie van een gasbelletje geldt

$$f_{res} = \frac{1}{\pi d} \left(\frac{3 \cdot \gamma P_o}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ kHz} \quad (4.4)$$

waarin

d = diameter gasbel (mm)

γ = verhouding soortelijke warmtes (= 1,4 voor lucht)

P_o = statische druk.

ρ_w = dichtheid water

De statische druk is een functie van de atmosferische druk en de hoogte van de waterkolom (h). Wanneer we deze functie en de numerieke waarden van de grootheden in (4.4) invullen, dan vinden we voor lucht

$$f_{res} \approx \frac{6,52}{d} (1 + 0,1 h)^{\frac{1}{2}} \text{ kHz} \quad (4.5)$$

waarin d in mm en h in meters ingevuld moeten worden.

In de nu volgende tabel worden enkele waarden gegeven

d	h (m)	f_{res} (kHz)	d	h (m)	f_{res} (kHz)
1 mm	0	7	10 μ m	0	652
	10	9		10	923
	20	11		20	$1,1 \cdot 10^3$
100 μ m	0	65	1 μ m	0	$6,5 \cdot 10^3$
	10	92		10	$9,2 \cdot 10^3$
	20	113		20	$11,3 \cdot 10^3$

Het effect van gas bellen op de geluidsnelheid kan nu als volgt beschreven worden

a. resonantie frequentie \gg akoestische frequentie (kleine belletjes).

In dit gebied geldt de vergelijking van Wood en zal een zeer geringe volume fractie gas de geluidsnelheid al zeer sterk beïnvloeden. Deze grote beïnvloeding wordt veroorzaakt door het grote verschil in kompressiemoduli van water en gas.

De kompressiemodulus van een gas is gelijk aan het produkt van de statische druk en de verhouding van de soortelijke warmtes. Het geluidverschijnsel wordt verondersteld een adiabatisch karakter te hebben. De statische druk is een diepte afhankelijke grootte, omdat deze gelijk is aan de som van de druk aan het wateroppervlak (P_0) en de druk van de waterkolom ($\rho \cdot g \cdot h$). Dit heeft tot gevolg dat ook de kompressiemodulus diepte afhankelijk is. Voor lucht wordt dit

$$K_g = \gamma (P_0 + \rho \cdot g \cdot h) = 1,4 (1 + 0,1h) 10^5 \text{ N/m}^2$$

zodat voor de moduli van water en lucht (10 meter diep) geldt

$$K_w \approx 2,2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 \quad K_g \approx 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

In figuur 4.3 is het verloop van de geluidsnelheid als functie van de volume fractie lucht weergegeven. Merk op dat bij 10% lucht de geluidsnelheid zelfs 10x lager is dan die in 100% lucht.

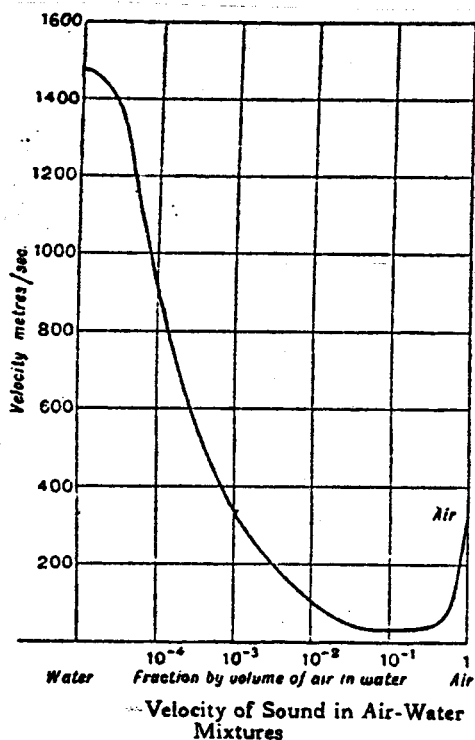
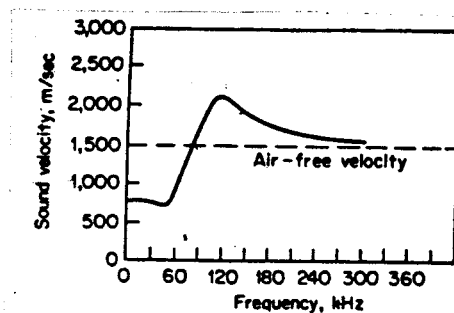


Fig. 4.3 ref [8]



Curve showing the measured sound velocity in a cloud of bubbles of uniform size (diameter 0.011 cm) over a wide range of frequency.

Fig. 4.4 ref. [9]

b. resonantie frequentie \approx akoestische frequentie

In dit gebied treden grote variaties in de geluidsnelheid op als functie van de frequentie. In figuur 4.4 is een gemeten geluidsnelheidscurve als functie van de frequentie weergegeven. Gemeten is in water met 0,2 ‰ lucht, waarbij de belletjes een diameter van 100 μm hadden. De drie gebieden zijn duidelijk te onderscheiden.

c. resonantie frequentie \ll akoestische frequentie (grote bellen).

In dit gebied geldt

$$c^{-2} = c_0^{-2} - \frac{2\pi nd}{(2\pi f)^2} \quad , \quad n = \text{aantal bellen/volume eenheid} \quad (4.6)$$

Voor kleine belconcentraties is de tweede term verwaarloosbaar klein. Wel zal het gas in grote bellen een aanzienlijke verzwakking geven van het akoestisch signaal.

In de praktijk komen in zeewater gasbellen voor met diameters variërend van 1 tot 100 μm . Grotere bellen hebben de neiging om op te stijgen en zo te verdwijnen, bij kleinere bellen speelt de oppervlakte spanning van de bel een steeds grotere rol, waardoor de bellen in elkaar gedrukt worden.

Slib met gas [12]

Voor de invloed van gas in slib geldt een analoog verhaal als voor het water-gas mengsel. Ook hier kunnen de gasbellen resoneren, waarbij nu de resonantie frequentie bepaald wordt door de eigenschappen van het slib.

Voor de resonantie frequentie geldt

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{\pi d} \left(\frac{3\gamma P_0}{\rho_n} + \frac{G}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ kHz} \quad (4.4a)$$

waarin ρ_n = dichtheid slib

G = shearmodulus slib

Voor geringe slibdichtheden, $\rho_n \approx \rho_w$, en geringe onderlinge beïnvloeding van de slibdeeltjes, $G=0$, is (4.4a) identiek aan (4.4). Vlokvorming zal een verhoging van de resonantie frequentie inhouden. In de nu volgende tabel wordt $f_{res} \cdot d$ gegeven als functie van G voor 20m diep water.

G (N/m^2)	ρ_n (kg/m^3)	$f_{res} \cdot d$ (kHz.mm)
0	1000	11,3
0	1200	10,3
10^6	1200	13,8
10^7	1200	30,8
10^8	1200	92,5

De beldiameters van het in het slib voorkomend gas zullen, als gevolg van het korrelskelet, groter kunnen zijn dan de in zeewater voorkomende bellen. In de hierover bekende literatuur worden als grootste diameters vermeld 0,5 tot 5 mm.

De volume percentages waarin bepaalde gasbellen voorkomen zijn voor het Rotterdamse havengebied niet bekend. De wel bekende totaal percentages zijn voor de geluidsnelheidsberekening ongeschikt. Dit is aanleiding geweest om in dit gebied bij een aantal frequenties geluidsnelheidsmetingen uit te voeren. De resultaten hiervan worden in een volgend hoofdstuk beschreven.

Tevens zijn een aantal computersimulaties uitgevoerd, waarin bij een lineaire dichtheidscurve (fig. 4.5) de geluidsnelheid als functie van de diepte is berekend, waarbij zowel een diepte onafhankelijk gaspercentage als een diepte afhankelijk gaspercentage is ingevoerd. De berekende geluidsnelheidscurves zijn in figuur 4.6 en 4.7 weergegeven. Verondersteld is, dat de belafmetingen zodanig zijn, dat de Wood vergelijking mag worden toegepast. Uit de figuren blijkt dat wanneer het gaspercentage constant is met de diepte de geluidsnelheidscurve vrijwel evenwijdig verschoven wordt, zodat de akoestische impedantie nog steeds op \sim constante na gelijk is aan de dichtheid. Varieert het gasgehalte met de diepte, dan zal dit een niet constante bijdrage geven aan de impedantie zodat om de dichtheid te kunnen berekenen uit de impedantie het gasgehalte verloop (of beter: het geluidsnelheidsverloop) bekend zal moeten zijn.

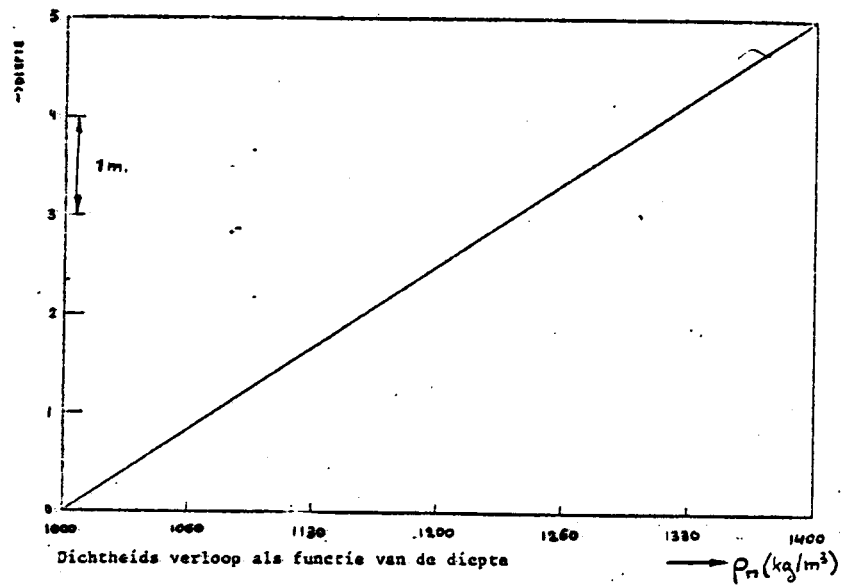


Fig. 4.5 Dichtheidsverloop, gesimuleerd.

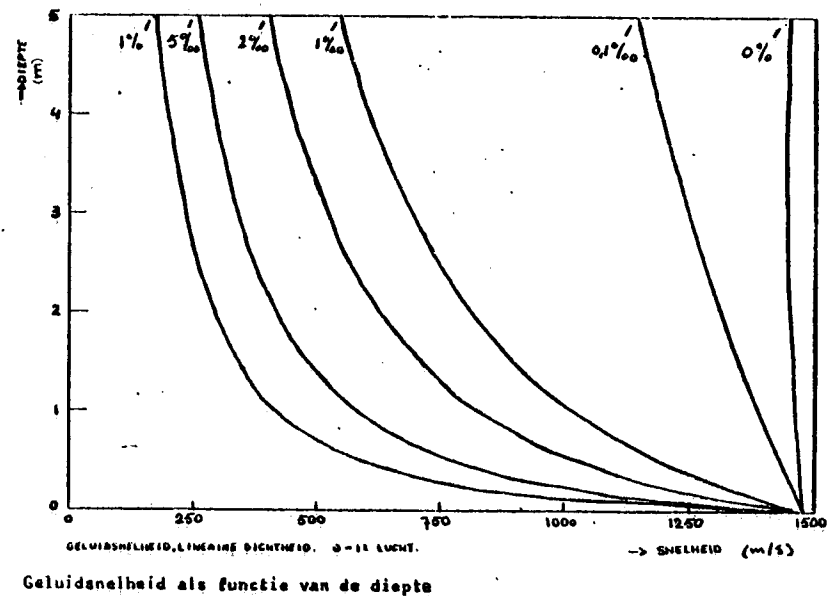
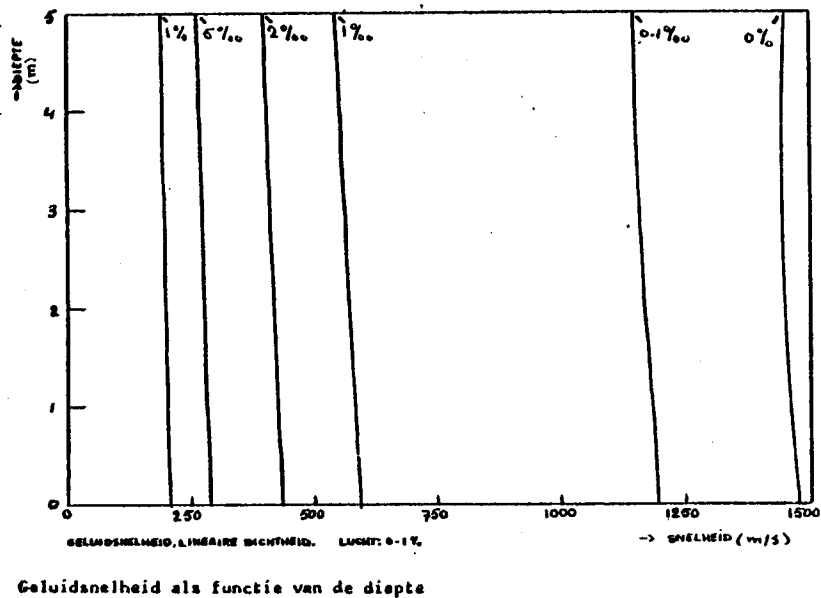
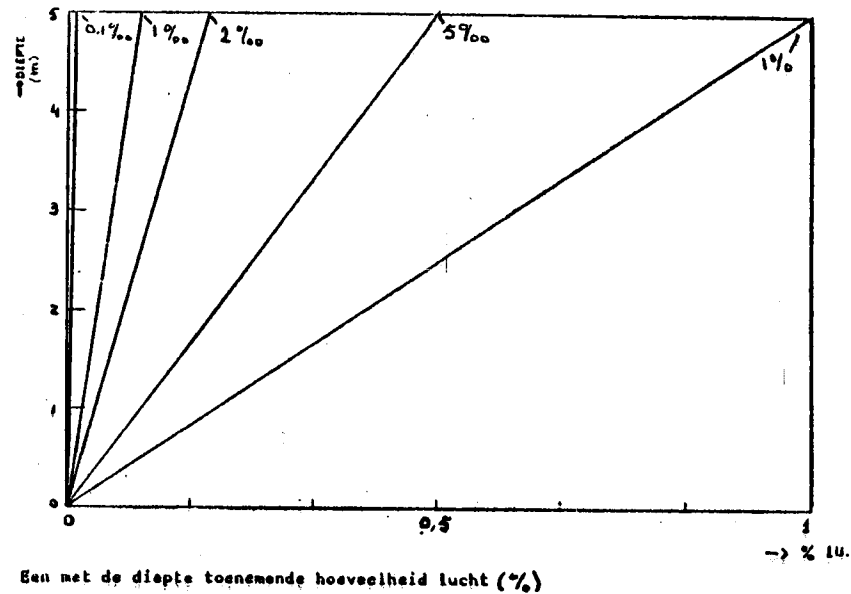
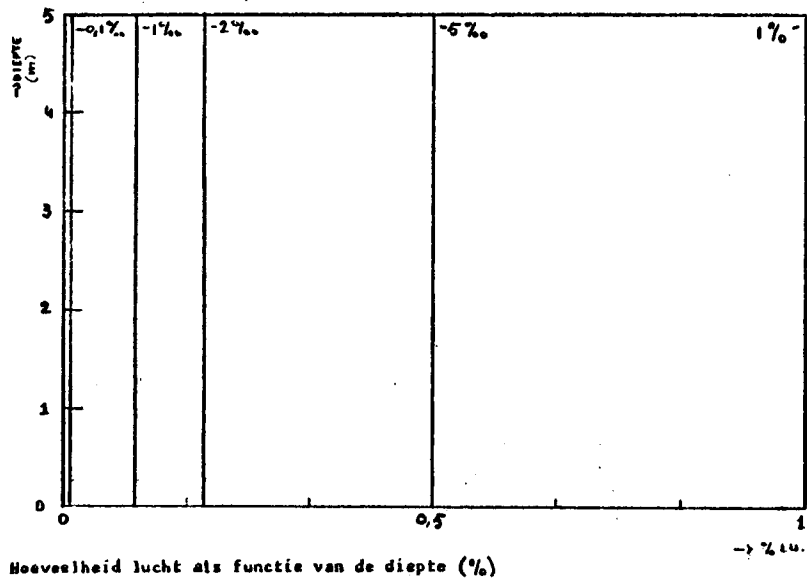


Fig. 4.6 Constant gasgehalte.

Fig. 4.7 Diepte afhankelijk gasgehalte.

4.2. Verzwakking en absorptie

In deze paragraaf worden de formules gegeven voor het te verwachten transmissie verlies (TL) van een akoestisch signaal dat vanaf het wateroppervlak naar de (slib-) bodem wordt gezonden en na reflectie door deze bodem weer aan het wateroppervlak wordt ontvangen. Het transmissie verlies wordt uitgedrukt in dB's en is gedefinieerd als

$$TL = 10 \log (I_r / I_o) \quad \text{dB} \quad (4.7)$$

waarin I_o = intensiteit bij de bron (op referentie afstand r_o)
 I_r = intensiteit op afstand r
 r = afstand wateroppervlak - reflectielaag in het slib

Er spelen 3 factoren een rol : a. bolvormige uitbreiding
 b. absorptie in het water
 c. absorptie in het slib.

a. bolvormige uitbreiding [9]

Voor de verzwakking door de bolvormige uitbreiding van de akoestische golf geldt (de akoestische golf volgt de weg $2x$)

$$TL_1 = -40 \log r \quad \text{dB} \quad (4.8)$$

b. absorptie in het water [9]

De absorptie in de waterkolom is een frequentie afhankelijke grootheid waarvoor geldt (de akoestische golf doorloopt de waterkolom $2x$)

$$TL_2 = \alpha \cdot 2h \quad \text{dB} \quad (4.9)$$

waarin: h = hoogte waterkolom (m)

$$\alpha = 10^{-3} \text{ (bij 10kHz) tot } 3 \cdot 10^{-3} \text{ (bij 30kHz) (dB/m)}$$

Uit de gegeven waarden voor α blijkt dat bij de in het havengebied voorkomende dieptes de bijdrage van TL_2 aan de verzwakking zeer klein zal zijn.

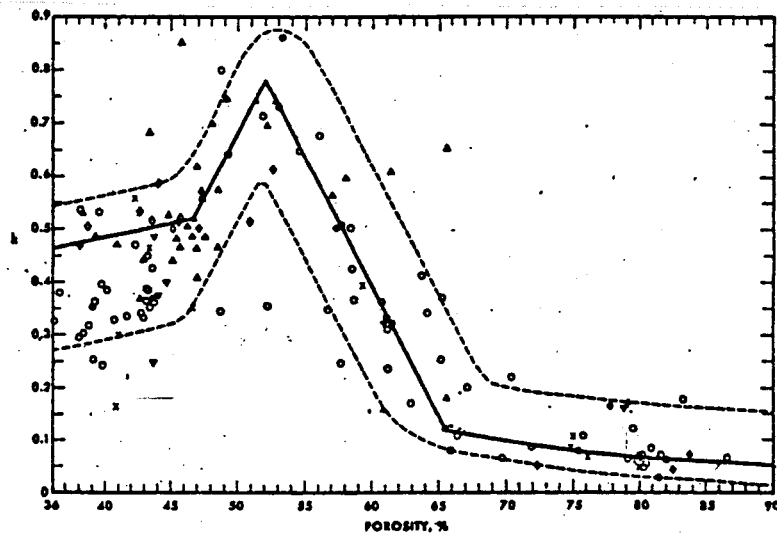
c. absorptie in het slib [10]

Hamilton geeft voor de absorptie in slib de volgende formule (de slib-laag wordt $2x$ doorlopen)

$$TL_3 = k.f. 2(r-h) \quad \text{dB} \quad (4.10)$$

waarin: f = frequentie (kHz)
 $(r-h)$ = afgelegde afstand in het slib tot aan de re-
 flektielaag (m)
 k = faktor afhankelijk van de porositeit

Het verband tussen de faktor k en de porositeit is door Hamilton op grond van een groot aantal metingen bepaald en in een grafiek vastgelegd. Deze grafiek wordt in figuur 4.8 gegeven. Voor een uitgebreide behandeling van dit onderwerp wordt verwezen naar de literatuur [10].



Porosity n , percent, versus k (in $\alpha = k^2$). Data, symbols, and remarks same as in caption for Figure 3. Regression equations for solid lines: Coarse, medium, and fine sand (36 to 46.7 percent): $k = 0.2747 + 0.00327 (n)$. Very fine sand and lower-porosity mixed sizes (46.7 to 52 percent): $k = 0.04903 (n) - 1.7688$. Mixed sizes (52 to 65 percent): $k = 3.3232 - 0.0489 (n)$. Silt-clays (65 to 90 percent): $k = 0.7602 - 0.01487 (n) + 0.000078 (n)^2$.

Fig. 4.8 Faktor k als functie van de porositeit (ref. [10])

Formule (4.10) geeft de frequentieafhankelijke amplitude correctie van het akoestisch signaal. Fysisch gezien zal echter ook de fase van het signaal (in geringe mate) beïnvloed moeten worden. Een goede benadering voor deze fase beïnvloeding kan gevonden worden door te veronderstellen dat het slib zich gedraagt als een minimum fase systeem. Van een dergelijk systeem kan de fasebeïnvloeding berekend worden uit de amplitudebeïnvloeding met behulp van de zgn. Hilberttransformatie. Het rekening houden met de fasebeïnvloeding kan van belang zijn bij het toepassen van signaalverwerkingstechnieken, waarmee uitgaande van een ontvangen akoestisch signaal een schatting gemaakt wordt van de impulsresponsie van het slib.

Invullen van (4.8), (4.9) en (4.10) in (4.7) geeft het totale transmissieverlies in het slib.

$$TL = 40 \log r + \alpha \cdot 2h + k \cdot f \cdot 2(r-h) \quad \text{dB} \quad (4.11)$$

5. Akoestische reflectie eigenschappen

In dit hoofdstuk wordt het model van de slibbodem besproken, dat bij de simulaties is gebruikt om uitgaande van een bekend dichtheidsverloop in de bodem (gemeten of gesimuleerd) een te verwachten, gereflekteerd, akoestisch signaal te genereren. Tevens wordt ingegaan op de wijze waarop uit een ontvangen akoestisch signaal het dichtheidsverloop in de bodem berekend zou kunnen worden.

5.1. Berekening akoestische responsie uit het dichtheidsverloop

De akoestische responsie van de bodem wordt in een aantal stappen berekend. Uitgegaan wordt van een bekend verloop van de dichtheid als functie van de diepte.

1. Met de vergelijking van Wood, formule (4.3), wordt bij de dichtheidscurve het bijbehorende verloop van de geluidsnelheid als functie van de diepte berekend.
2. Met behulp van de geluidsnelheidscurve wordt de sliblaag in de diepte opgedeeld in laagjes, waarvan de dikte steeds zó gekozen wordt, dat ieder laagje overeenkomt met een voor een akoestische golf gelijke looptijd τ . Bij een constante geluidsnelheid als functie van de diepte geeft dit een equidistante bemonstering (= sliblaagjes van gelijke dikte), bij een niet constante geluidsnelheid zal het deel met de hoogste geluidsnelheid het dichtst bemonsterd zijn (= de dunste sliblaagjes).
3. Per laagje wordt door vermenigvuldiging van de gemiddelde dichtheid en de gemiddelde geluidsnelheid in een laagje de akoestische impedantie (Z) uitgerekend.
4. Per overgang van het ene laagje (i) naar het volgende ($i + 1$) wordt de reflectiecoëfficiënt (R_i) en de transmissiecoëfficiënt (T_i) berekend met

$$R_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i}, \quad T_i = 1 + R_i = \frac{2 Z_{i+1}}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (5.1)$$

5. Met de bij 4. berekende coëfficiënten wordt de impulsresponsie $R(t)$ (= de totale, tijdafhankelijke reflectiecoëfficiënt) van de totale sliblaag berekend met

$$R(t) = R_0 \delta(t-t_0) + R_1(1-R_0^2) \delta(t-t_0-2\tau) + R_2(1-R_1^2)(1-R_0^2) \delta(t-t_0-4\tau) + R_3(1-R_2^2)(1-R_1^2)(1-R_0^2) \delta(t-t_0-6\tau) + \dots \quad (5.2)$$

6. Convolutie van de berekende impulsresponsie met een gedigitaliseerde akoestische zendpuls geeft de te verwachten echo-akoestische responsie van de sliblaag zonder demping.

In figuur 5.1 is het laagjes model van de bodem schematisch weergegeven.

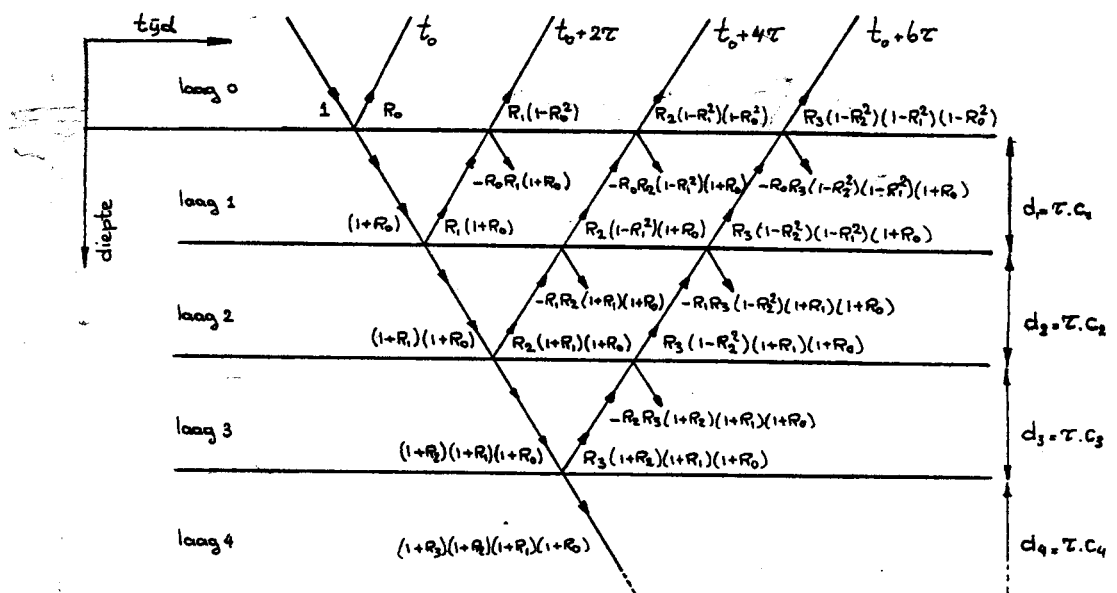


Fig. 5.1 Laagjes model slibbodem.

Zoals in formule (5.2) te zien is bestaat de impulsresponsie $R(t)$ uit een reeks deltapulsen van variërende hoogte. Door de onder punt 2 gemaakte verdeling van de diepte in laagjes met gelijke looptijd zijn de afstanden tussen de deltapulsen gelijk aan elkaar ($=2\tau$).

De keuze van de looptijd wordt bepaald door de bemonsterfrequentie van de gedigitaliseerde akoestische zendpuls. Voor dit signaal moet voldaan zijn aan het Nyquist criterium, zodat geldt

$$\frac{1}{2\tau} \geq 2f_h, \text{ waarin } f_h = \text{de hoogste in het zendsignaal nog voorkomende frequentie (Hz)} \quad (5.3)$$

Met (5.3) kan een schatting gemaakt worden van de gemiddelde dikte van de laagjes wanneer we invullen : $\tau = d/c$, $c \approx 1500 \text{ m/s}$, $f_h = 25\text{kHz}$; (5.3) wordt dan

$$d \leq \frac{c}{4f_h} \approx 15\text{mm}.$$

Multiple reflecties

In de formule voor de impulsresponsie, (5.2), is geen rekening gehouden met multiple reflecties in de lagen. Afhankelijk van het aantal doorlopen lagen neemt het aantal mogelijke multiples toe. We onderscheiden multiples met twee extra reflecties, met vier, met zes, enz. De bijdrage aan de impulsresponsie van de multiples neemt snel af met een toenemend aantal extra reflecties. Een voorbeeld van een multiple met twee extra reflecties wordt gegeven in figuur 5.2.

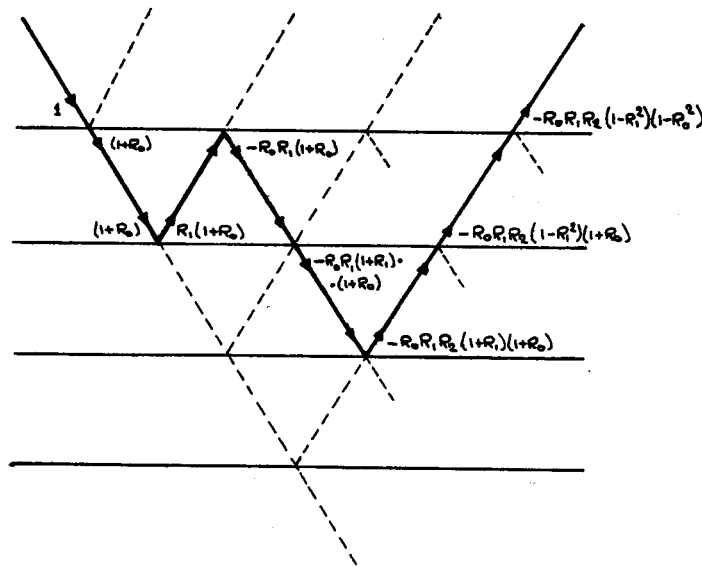


Fig. 5.2 Multiple reflectie in het laagjesmodel van figuur 5.1.

De bijdrage van deze multiple aan de impulsresponsie (R_M) is

$$R_M = - R_0 R_1 R_2 (1-R_1^2)(1-R_0^2) \delta(t-t_0-6\tau) \quad (5.4)$$

De grootte van de impulsresponsie op tijdstip $t=t_0+6\tau$ is (zie (5.2))

$$R(t_0+6\tau) = R_3(1-R_2^2)(1-R_1^2)(1-R_0^2) \quad (5.5)$$

zodat de relatieve bijdrage gelijk is aan

$$\frac{R_M}{R(t_0+6\tau)} = - \frac{R_0 R_1 R_2}{R_3(1-R_2^2)} \quad (5.6)$$

of met $R_0 \approx R_1 \approx R_2 \approx R_3 = R \ll 1$ wordt dit

$$\frac{R_M}{R(t_0+6\tau)} \approx - R^2 \quad (5.7)$$

Het aantal multiples met twee extra reflecties dat een bijdrage kan geven aan de impulsresponsie op een bepaald tijdstip hangt af van het aantal doorlopen lagen (n) door de directe golf. Op $t=t_0+n2\tau$ zijn er $(2n-3)$ multiples met twee extra reflecties mogelijk.

Als worst-case schatting voor de bijdrage van de multiples gaan we uit van een gelaagde bodemopbouw, ontstaan door bijv. het afwisselend deponeren van zeeslib (zoutporiënwater) en rivierslib (zoet poriënwater) tijdens de beide fasen van het getij. De reflectiecoëfficiënten, veroorzaakt door de zoet-zout overgangen, stellen we $R \approx 10^{-2}$. De bijdrage aan de impulsresponsie zal dan na 3 meter slib, met laagjes van 3 cm, ongeveer 2% zijn. Hierbij is geen rekening met de fase van de multiples gehouden, zodat in de praktijk de bijdrage kleiner zal zijn. Tijdens de simulaties zijn de multiples dan ook verwaarloosd.

Opmerking: Alsgevolg van gasontwikkeling kan er wel een dermate grote impedantie mismatch tussen de verschillende bodemlagen ontstaan, dat de multiples niet verwaarloosd mogen worden. In het voor dit onderzoek interessante dichtheidsgebied gaan we ervan uit dat deze situatie niet voorkomt.

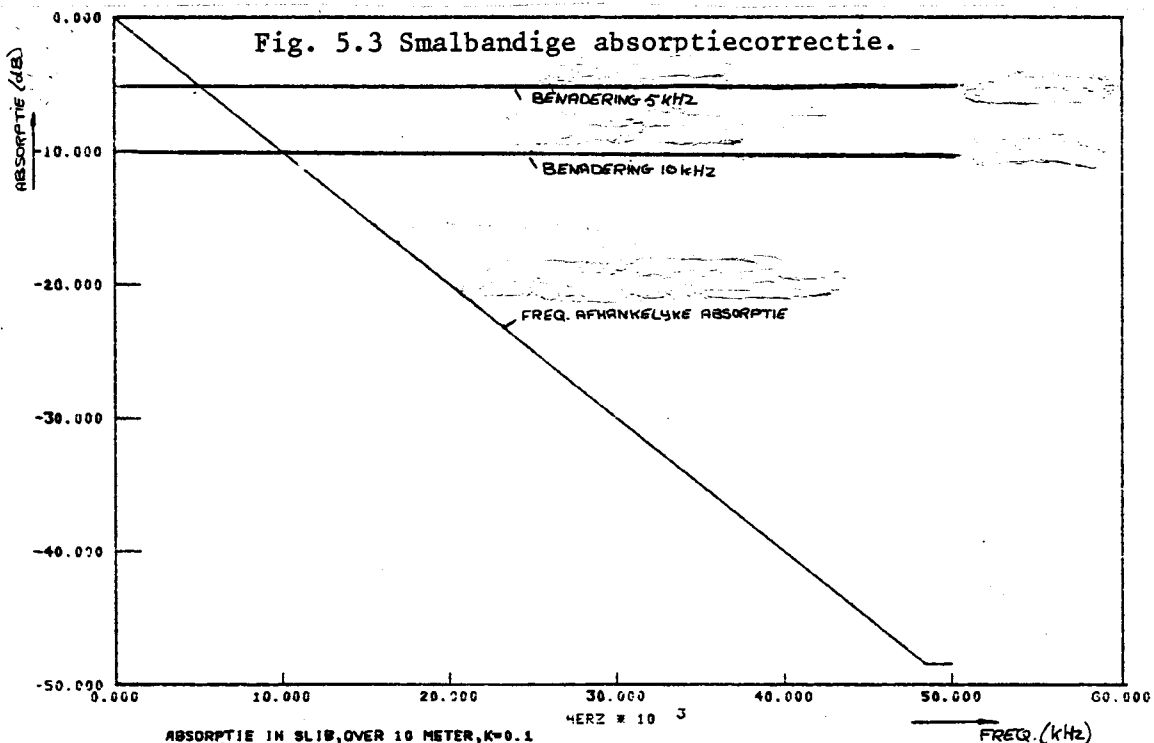
Absorptie correctie

In de met de punten 1t/m 6 berekende akoestische responsie is geen rekening gehouden met de verzwakking en de absorptie. De demping ten gevolge van de sferische uitbreiding kan eenvoudig in rekening worden gebracht door de impulsresponsie hier als functie van de diepte voor te corrigeren.

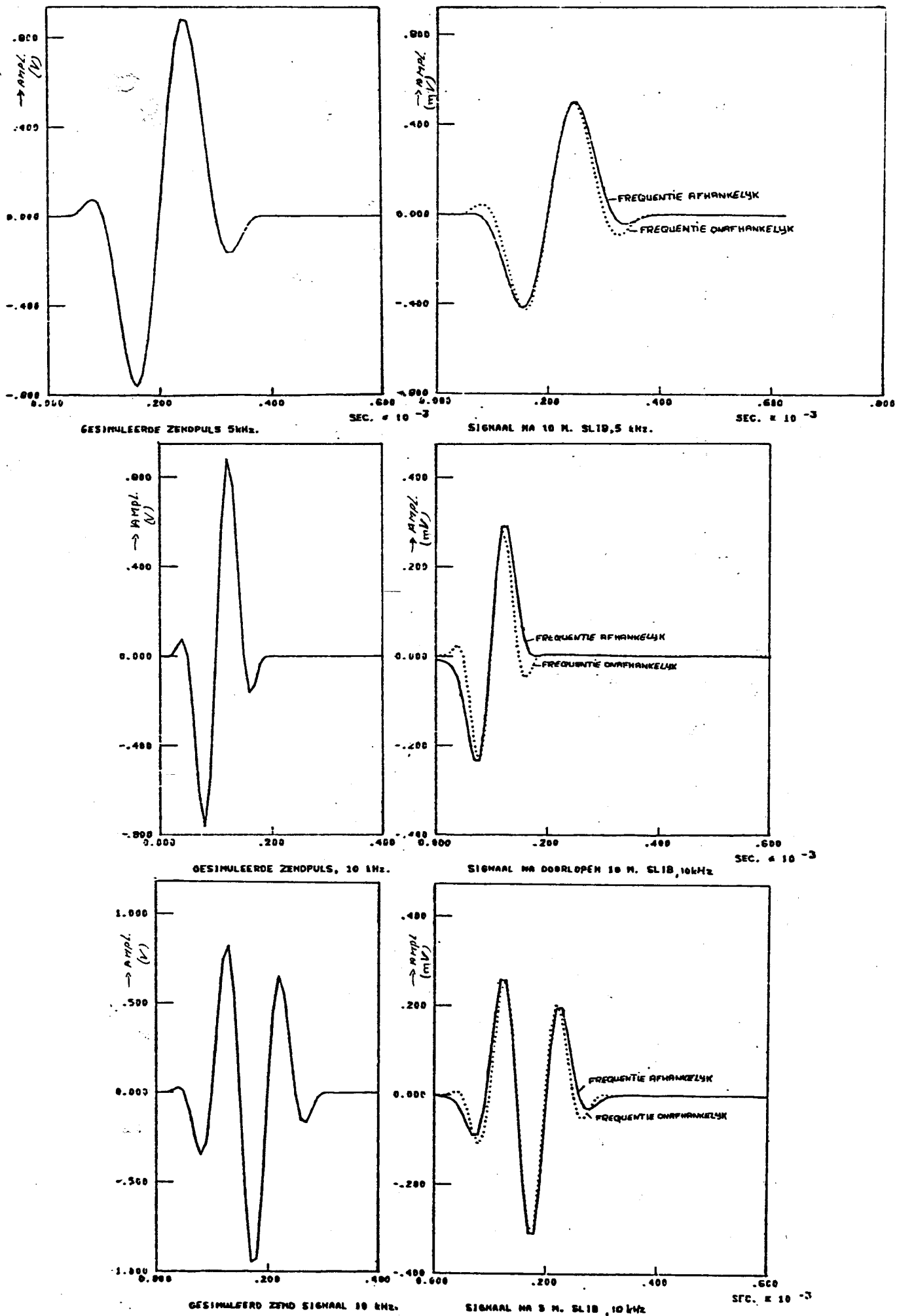
De absorptie in slib kan afhankelijk van de bandbreedte van het zend-sig-naal op 2 manieren ingevoerd worden:

- a. Bij breedbandige zendsignalen moet de absorptie frequentie afhankelijk worden ingevoerd. Dit kan gedaan worden door het signaal, bestaande uit de convolutie van het zendsignaal met de impulsresponsie, in gedeelten, overeenkomend met een bepaalde laagdikte (bijv. 0,1m) te convolueren met de bij die gemiddelde diepte behorende frequentie afhankelijke absorptie.
- b. Bij smalbandige zendsignalen kan volstaan worden met een frequentie onafhankelijke absorptie. Hierbij wordt de impulsresponsie gecorrigeerd voor de verzwakking van de middenfrequentie van het zendsignaal

In figuur 5.3 is voor één geval (10mslib, $k = 0,1$) de frequentie afhankelijke absorptie en de benadering bij twee zendsignalen (5kHz, 10kHz) weergegeven.



Om een indruk te krijgen van de gemaakte fout bij benadering b. is bij drie gesimuleerde signalen zowel frequentie afhankelijk als frequentie onafhankelijk voor de absorptie in slib gecorrigeerd. In figuur 5.4 zijn de resultaten van deze simulaties weergegeven. Hierin is te zien dat de frequentie onafhankelijke benadering bij deze signalen een redelijk resultaat geeft. Gezien de bandbreedte van de in de praktijk voorkomende signalen en mede gezien de vereenvoudiging in software is bij de uitgevoerde simulaties gewerkt met benadering b.



Figuur 5.4 Vergelijking absorptie correctie volgens benadering a en b.

Randvoorwaarden model

Samenvattend moet aan de volgende voorwaarden voldaan zijn:

- a. De korrels zijn klein t.o.v. de golflengte en de skeletvorming is verwaarloosbaar zodat de vergelijking van Wood gebruikt mag worden.
- b. De looptijd τ in het laagjesmodel moet voldoen aan het Nyquist-criterium toegepast op het akoestisch zendsignaal.
- c. De absorptiecorrectie kan smalbandig worden toegepast.

Opmerking: Het model kan verder uitgebreid worden, zodat deze voorwaarden geen absolute beperking vormen.

5.2. Berekening dichtheidsverloop uit een akoestisch signaal

Voor kleine impedantiestapjes geldt de volgende benadering voor (5.1)

$$R_i \approx \frac{\Delta Z_i}{2 Z_i}, T_i \approx 1 \quad (5.8)$$

zodat de impulsresponsie wordt

$$R_t = R_0 \delta(t-t_0) + R_1 \delta(t-t_0-2\tau) + R_2 \delta(t-t_0-4\tau) + R_3 \delta(t-t_0-6\tau) \dots \dots (5.9)$$

Voor de integraal van de impulsresponsie op tijdstip $t = t_n$ geldt

$$I(t_n) = \int_0^{t_n} R(t) dt = \sum_{i=0}^n R_i = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta Z_i}{2Z_i} \quad (5.10)$$

of als continue functie geschreven

$$I(t) = \int_0^t \frac{dZ}{2Z} = \frac{1}{2} \ln Z(t) \quad (5.11)$$

Voor het impedantieverloop met de tijd geldt dus

$$Z(t) = \exp(2I(t)) \quad (5.12)$$

zodat het dichtheidsverloop gevonden kan worden uit

$$\rho(t) = \frac{\exp(2I(t))}{c(t)} \quad (5.13)$$

Met de geluidsnelheid kan vervolgens de tijd omgezet worden in de diepte.

In de praktijk ontvangen we echter niet de impulsresponsie maar de convolutie van de impulsresponsie met een zendsignaal. De impulsresponsie kan hieruit gevonden worden door deconvolutie. De deconvolutie wordt echter beperkt door de ruis, alsgevolg van de beperkte bandbreedte van het zendsignaal. Alleen die frequenties van de impulsresponsie, die door het zendsignaal voldoende ver boven de ruis worden aangestoten worden in het ontvangen signaal teruggevonden en alleen in dat frequentiegebied kan de impulsresponsie met behulp van deconvolutie gereconstrueerd worden. In figuur 5.5 wordt een voorbeeld gegeven van een situatie waarbij een lang durende lineaire gradiënt te hoog frequent is aangestoten zodat alleen van het "in- en uitschakelen" (→ hierin zitten de hogere frequenties) van de gradiënt iets terugkomt.

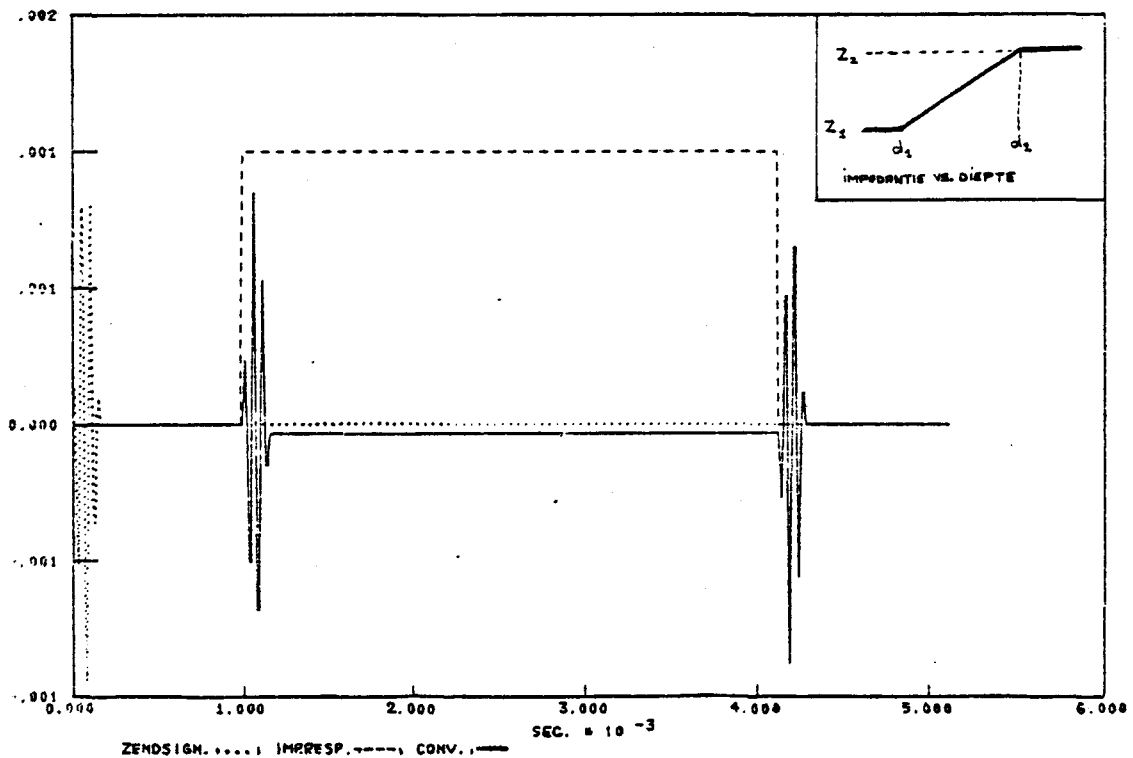


Fig. 5.5 Responsie lineaire gradiënt.

Om het verband tussen de gradient in de impedantie en de eigenschappen van het uitgezonden signaal, zoals frequentie, bandbreedte en signaallengte, nader te bestuderen zijn een aantal simulaties gedaan. De resultaten van deze simulaties worden in de figuren 5.6 t/m 5.10 gegeven. In figuur 5.6 wordt de invloed bekeken van de steilheid van een impedantiestap van Z_1 naar Z_2 op het ontvangen signaal. Als zendsignaal is een enkele 10kHz sinus genomen. In de figuur is te zien dat, naarmate de steilheid minder groot wordt en er dus minder hoge frequenties in de impulsresponsie zitten, het ontvangen signaal kleiner wordt. Vergelijking van de amplitudespectra in figuur 5.7 en 5.8 laat zeer duidelijk de filterende werking van het zendsignaal op de impulsresponsie zien. In figuur 5.9 is de invloed te zien van de lengte en in figuur 5.10 de invloed van de frequentie van het zendsignaal op het van een impedantiestap met een bepaalde steilheid terug te verwachten signaal. In figuur 5.6 en 5.7 is te zien dat de grootte van de impedantiestap, nadat deze geheel is doorlopen, gerelateerd is aan de DC-component in de impulsresponsie. Tevens geldt, dat de steilheid waarmee de impedantiestap wordt doorlopen gerelateerd is aan de lengte en de hoogte van de impulsresponsie en dus aan de breedte van het frequentiespectrum.

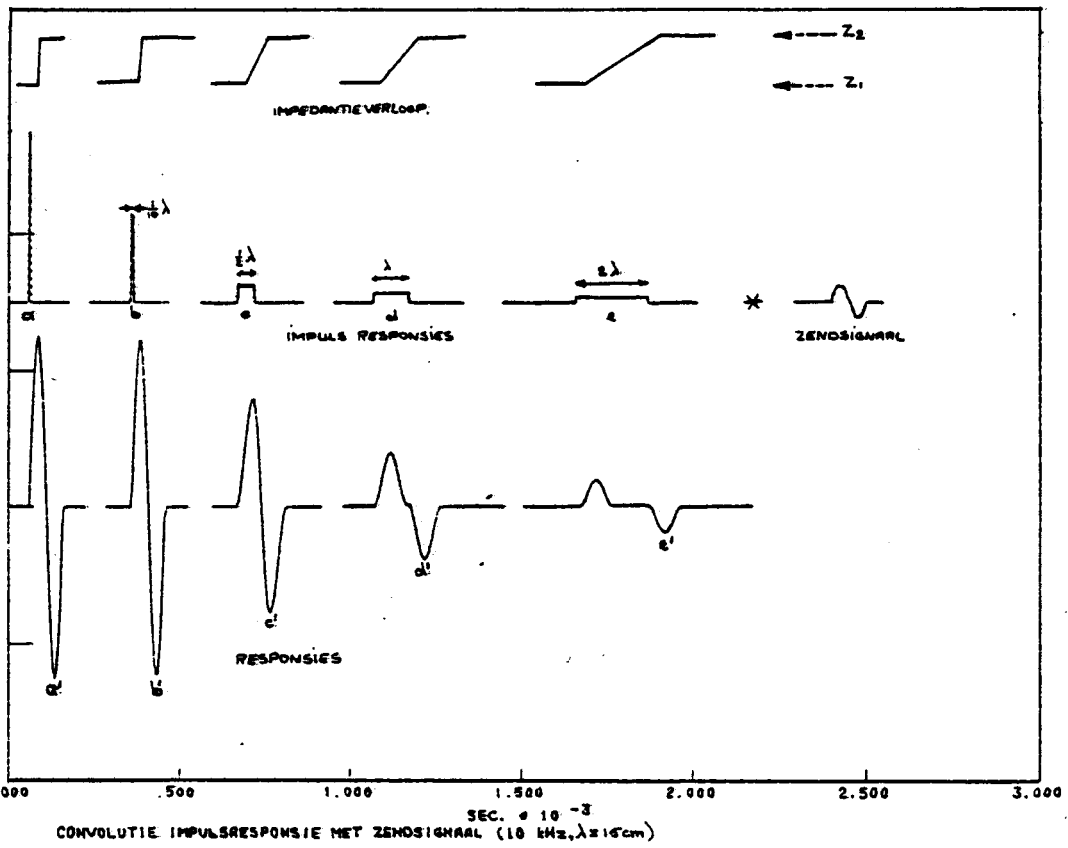


Fig. 5.6. Invloed steilheid impedantiestap

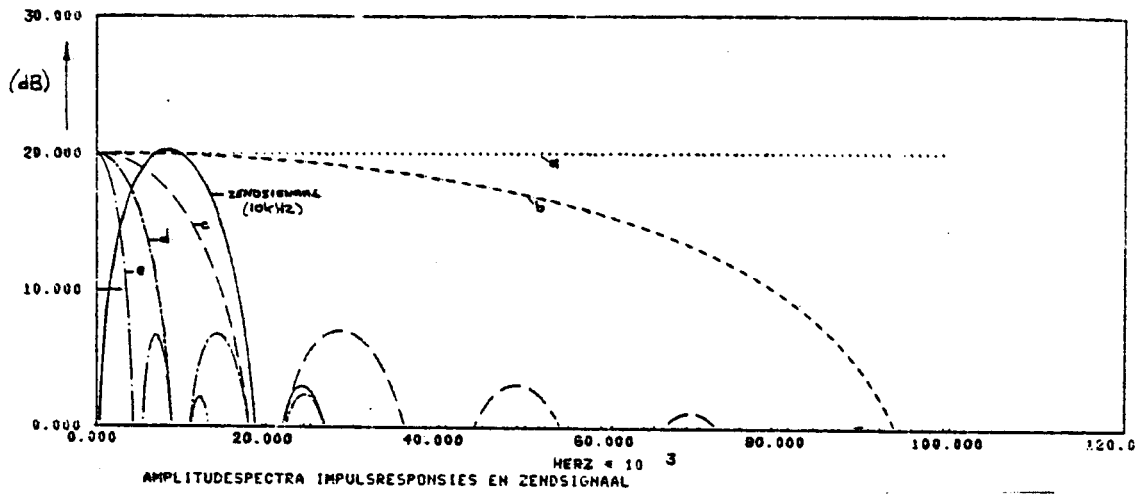


Fig. 5.7. Invloed steilheid impedantiestap

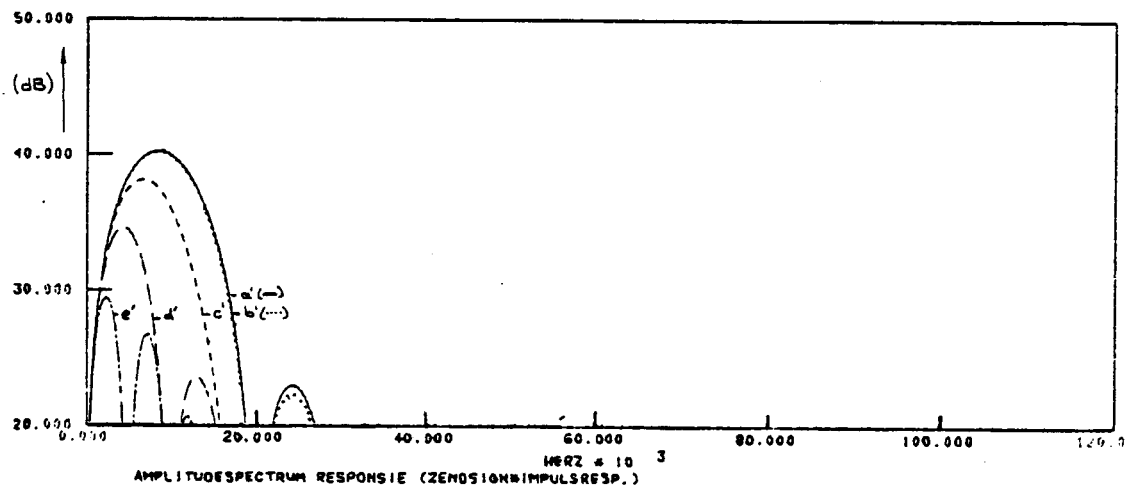


Fig. 5.8. Invloed steilheid impedantiestap

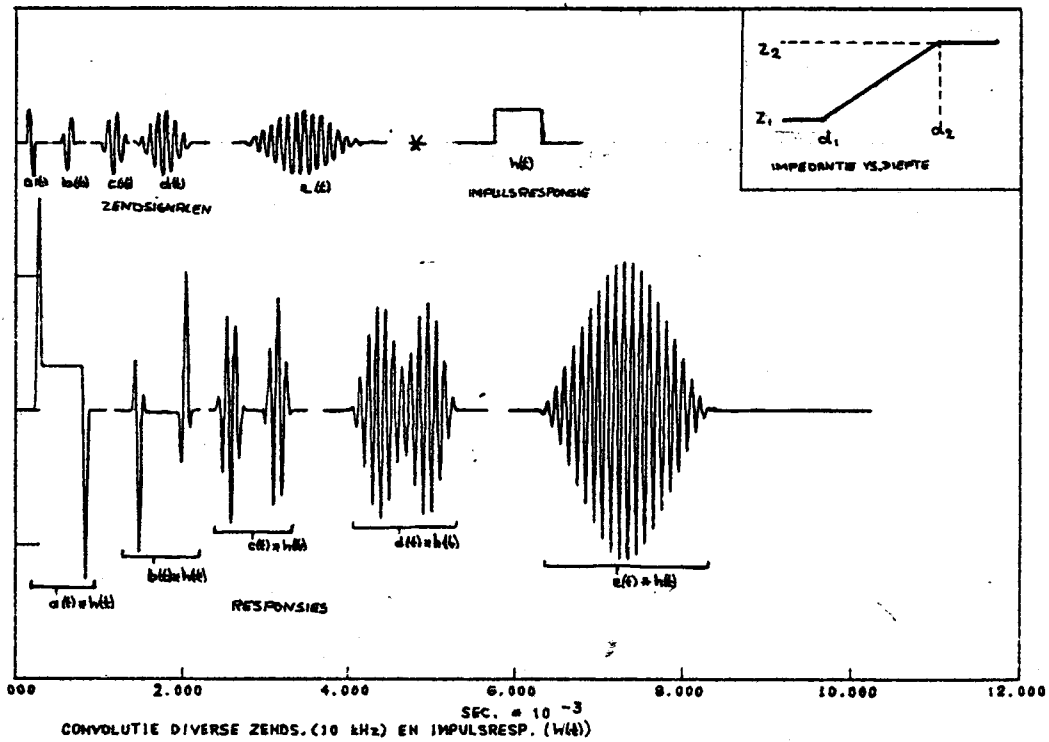


Fig. 5.9. Invloed lengte van het zendsignaal

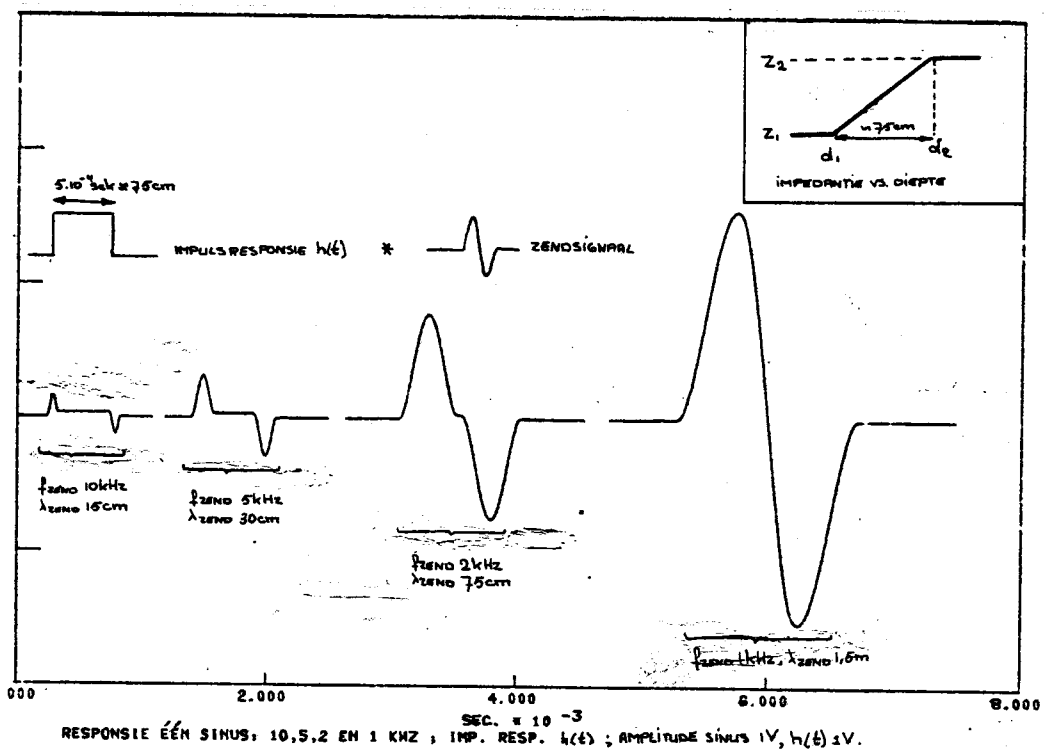


Fig. 5.10. Invloed frequentie van het zendsignaal

De koppeling tussen de DC-component en de grootte van de impedantie-
 stap volgt uit een vergelijking van de fouriertransformatie, waarmee
 het amplitudespectrum berekend wordt, met formule (5.10). Voor de
 fouriertransformatie van een willekeurig signaal $X(t)$ geldt

$$F [X(t)] = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (5.14)$$

Voor frequentie $f=0$ Hz wordt dit

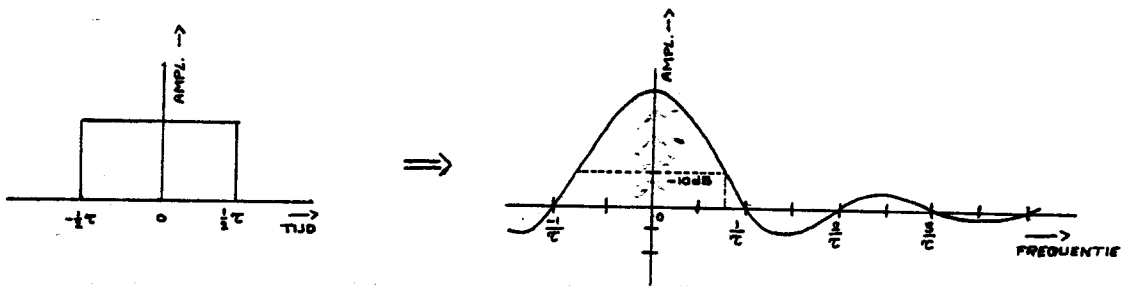
$$X(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) dt \quad (5.15)$$

Vergelijking met (5.10) geeft, dat (5.10) en (5.15) identiek zijn
 als geldt

$$X(t) = w(t) \cdot R(t) \quad (5.16)$$

waarin $w(t) = \text{window} = 1$ als $0 \leq t \leq t_n$
 $= 0$ als $t < 0, t > t_n$

Om de relatie van de impedantiestap met de breedte van het frequentie-
 spectrum nader te quantificeren, gaan we uit van een rechthoekig signaal,
 zoals de impulsresponsies in de figuren, en geven daarvan de fourier
 transformatie



$$g(t) = 1 \quad -\frac{1}{2}\tau < t < \frac{1}{2}\tau$$

$$= 0 \quad \text{elders} \quad \Rightarrow \quad G(f) = \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f} \quad (5.17)$$

Uit (5.17) volgt dat het eerste nulpunt in $G(f)$ bij $f_0 = \tau^{-1}$ ligt. Met $d = c \cdot \tau$, waarin d = diepte waarover de impedantiestap zich uitstrekt, kunnen we de volgende tabel samenstellen.

d (cm)	τ (μ s)	f_0 (kHz)
1,5	10	100
3	20	50
6	40	25
15	100	10
30	200	5
75	500	2
$1,5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	1
$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	0,5

(5.18)

Tabel (5.18) geeft een indicatie met welke frequenties de bodem aangesloten moet worden om langlopende lineaire gradienten nog te kunnen detekteren.

6. Computer programmatuur

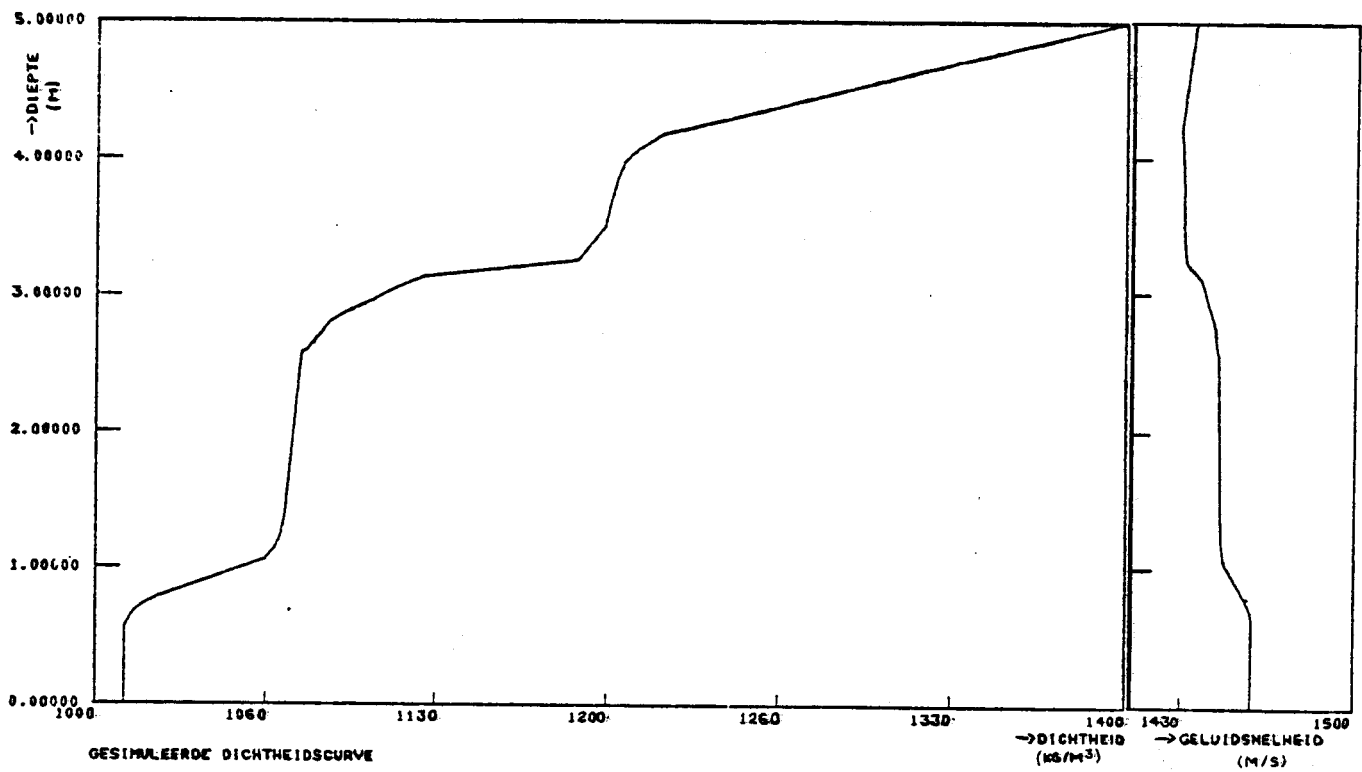
Om op de in hoofdstuk 5. beschreven wijze akoestische responsies te kunnen genereren en om uit gemeten responsies de dichtheid te kunnen reconstrueren zijn een aantal computerprogramma's geschreven. Behalve van deze programma's is ook veelvuldig gebruik gemaakt van de bij de vakgroep Akoestiek van de Afdeling Technische Natuurkunde aan de T.H.-Delft aanwezige subroutines, vooral van die op het gebied van de signaalverwerking. De programmatuur zal verder niet behandeld worden. Volstaan zal worden met het schematisch aangeven van de programma's.

De belangrijkste programma's zijn:

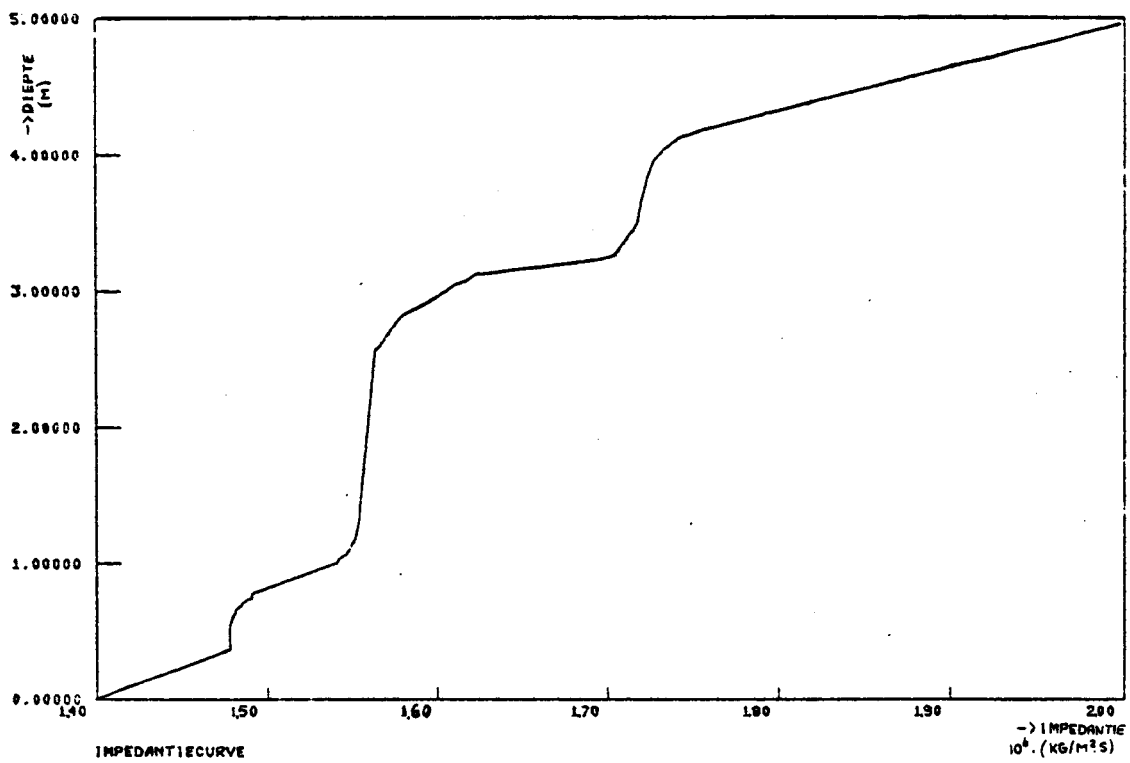
Opmerkingen:

- | | |
|--|--|
| a. Inlezen dichtheidscurve. | Invoer via de x-y tafel of via de graphics terminal, waarna de gegevens als tweedimensionaal array (ρ_n, d') in het geheugen worden opgeslagen. |
| b. Berekening geluidsnelheid. | Met de formule van Wood wordt bij (ρ_n, d') de geluidsnelheid (c, d') berekend. Ingevoerd moet worden ρ_w, ρ_k, K_w, K_k en eventueel ook nog een gasgehalte. |
| c. Verdeling in lagen met gelijke looptijd en berekening van de impedantie per laag. | Na invoer van de looptijd wordt uitgaande van (ρ_n, d') en (c, d') het impedantieverloop (Z, d) berekend. |
| d. Berekening impulsresponsie. | Uit (Z, d) wordt $R(t)$ berekend. |
| e. Berekening demping. | Correctie impulsresponsie voor de diepte afhankelijke demping bij de middenfrequentie van het zendsignaal. |
| f. Convolutie impulsresponsie met het zendsignaal. | Het zendsignaal kan gemeten of gesimuleerd zijn. |
| g. Berekening dichtheid. | Uit de integraal van de <u>modulus</u> van het signaal. |

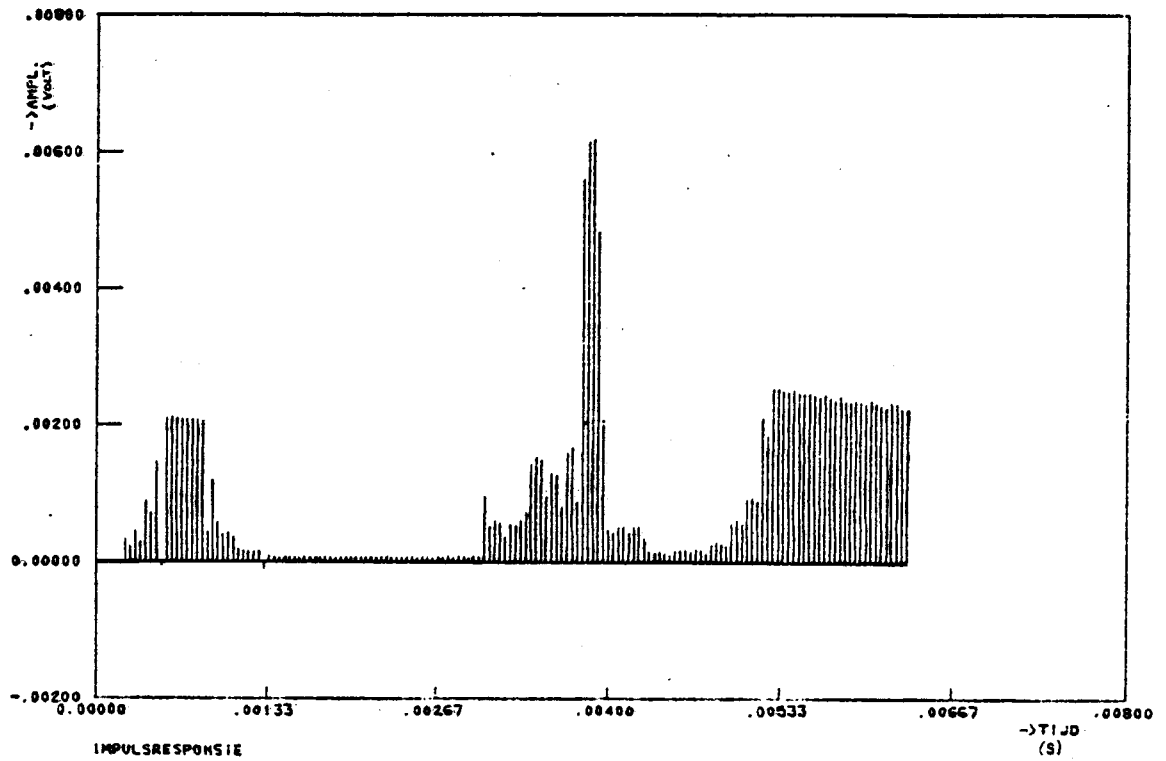
In de figuren 6.1 t/m 6.8 zijn de opeenvolgende stappen aangegeven. Hierbij is een gesimuleerde dichtheidscurve ingevoerd en is verondersteld dat er 20m zoutwater boven het slib staat. De impulsresponsie is geconvolveerd met een 5kHz signaal, na éérst voor de bij deze frequentie behorende demping en absorptie gecorrigeerd te zijn. In figuur 6.7 en 6.8 wordt de berekende dichtheidscurve vergeleken met het bekende verloop. De overeenkomstige delen zijn door pijlen aangegeven. Een langzaam verloop in de dichtheid valt buiten de frequentie band van het zendsignaal en wordt niet gedetekteerd (zie hfdst. 5.2).



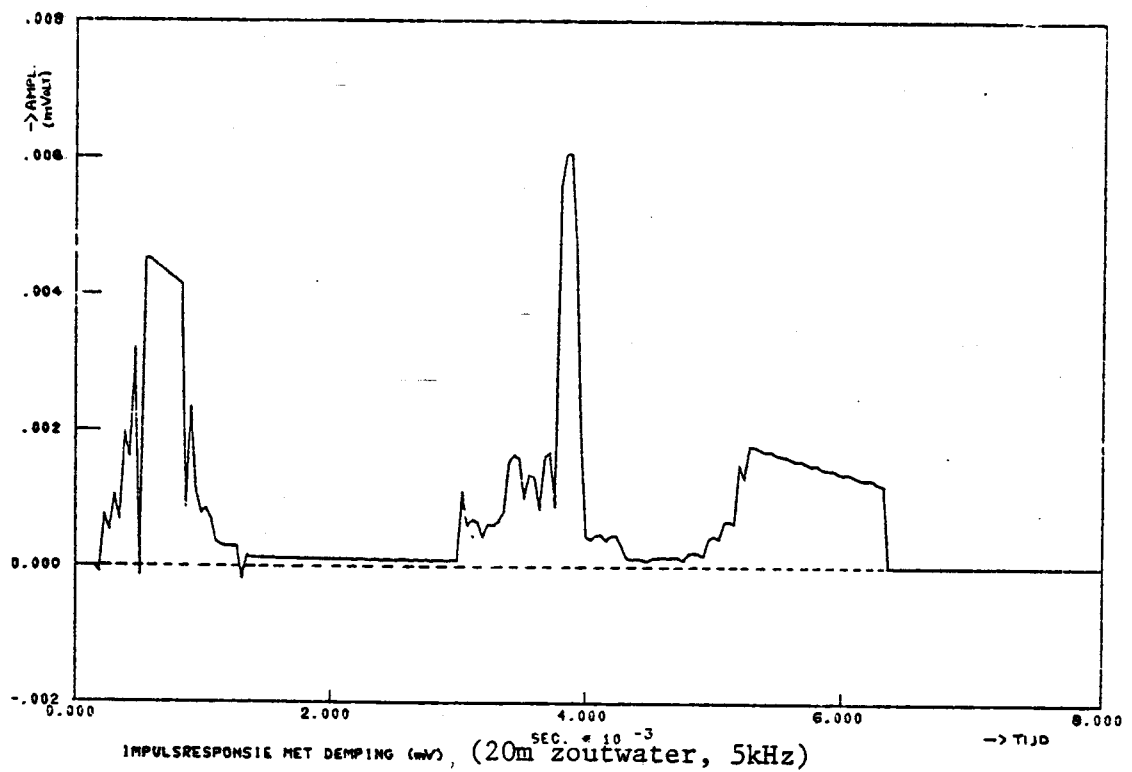
Figuur 6.1. Computersimulatie



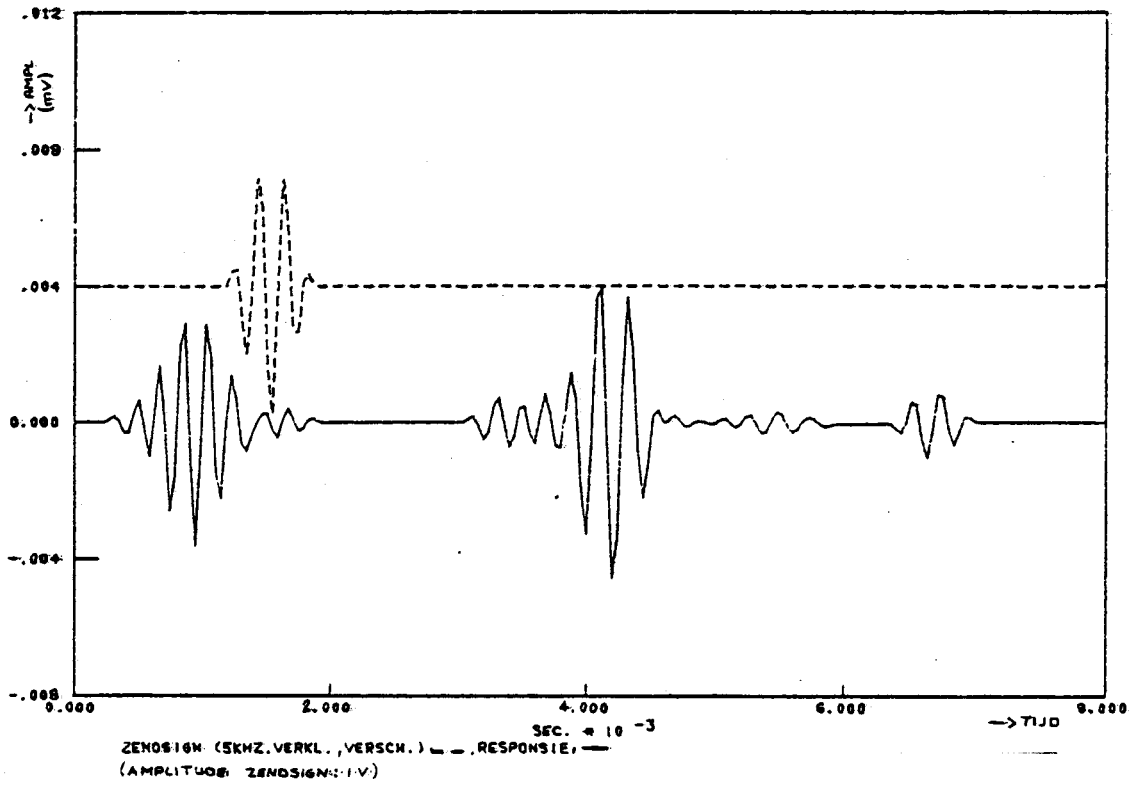
Figuur 6.2. Computersimulatie



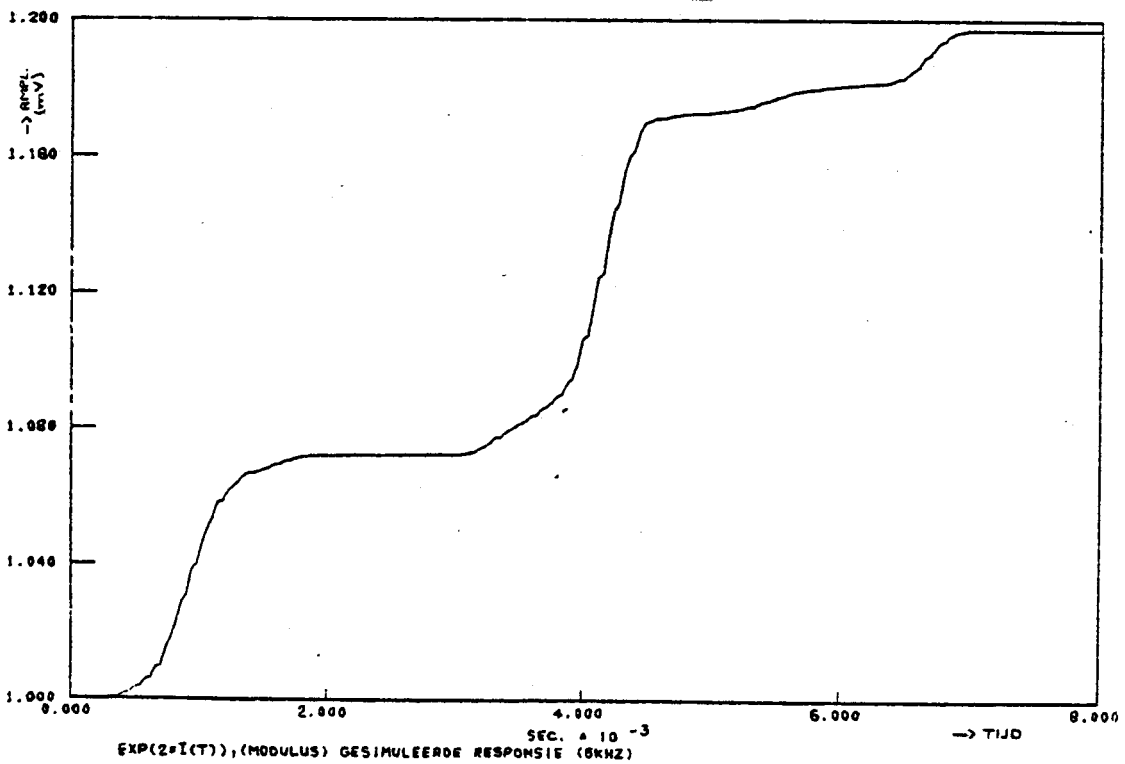
Figuur 6.3. Computersimulatie



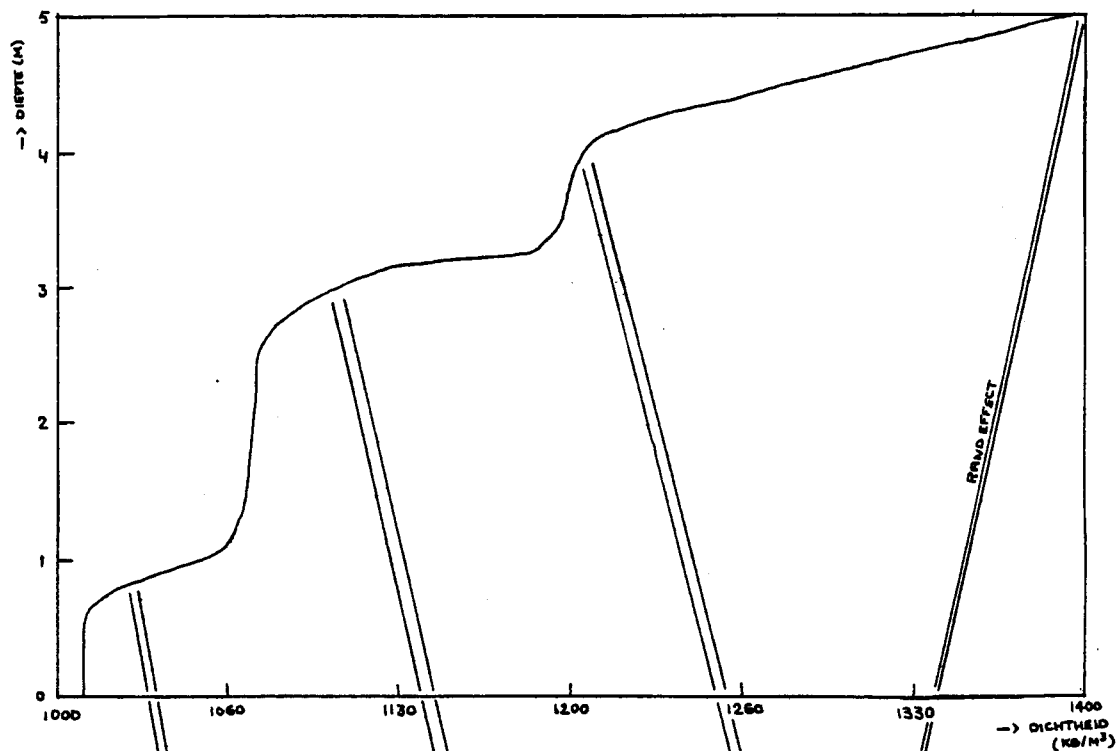
Figuur 6.4. Computersimulatie



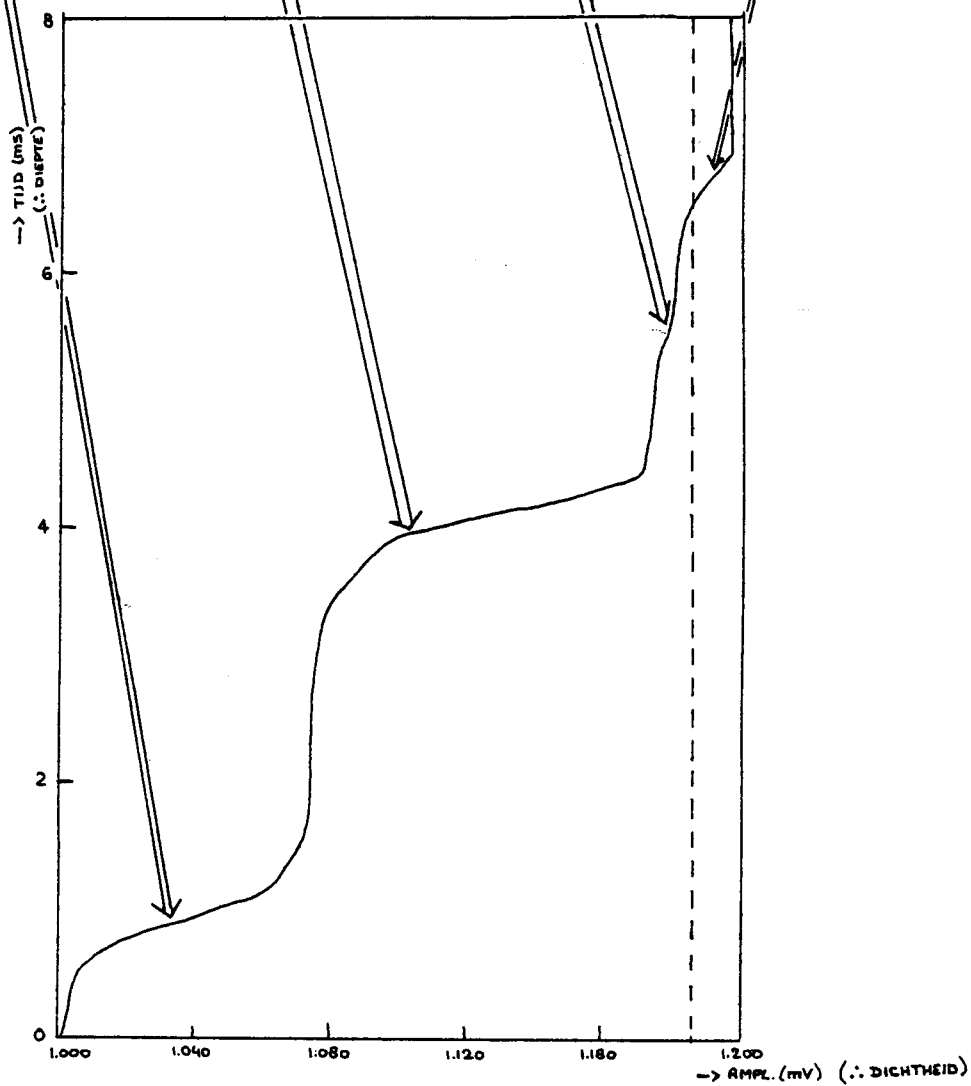
Figuur 6.5. Computersimulatie



Figuur 6.6. Computersimulatie



-Figuur 6.7 Gesimuleerde dichtheidscurve(identiek fig. 6.1)



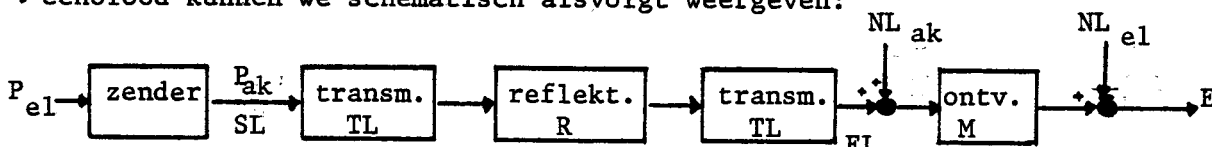
Figuur 6.8 Exp(2x integraal modulus) gesimuleerde
5 kHz responsie(Fig. 6.6 gespiegeld)

7. Benodigd akoestisch vermogen echolood systeem

De toepasbaarheid van een echolood systeem voor het meten van het slib-dichtheidsverloop wordt bepaald door een aantal systeemeigenschappen zoals frequentie, bandbreedte, bundelhoek en akoestisch vermogen.

In hoofdstuk 5. is aandacht besteed aan frequentie en de bandbreedte van het zendsignaal en in dit hoofdstuk wordt ingegaan op het benodigd akoestisch vermogen.

De overdracht door het gehele systeem, echolood → water → slib → water → echolood kunnen we schematisch als volgt weergeven:



figuur 7.1.

- P_{el} = elektrisch vermogen
- P_{ak} = akoestisch vermogen
- SL = bronniveau
- TL = transmissieverlies
- R = reflectiecoëfficiënt
- NL_{ak} = ruis (akoestisch)
- M = ontvangevoeligheid
- NL_{el} = ruis (elektrisch)
- EL = echolevel = $20 \log P$ dB re 1 Pa

transmissieverlies

Hierop is ingegaan in hoofdstuk 4.2. Voor het totale transmissieverlies geldt (4.11)

$$TL = 40 \log r + \alpha \cdot 2h + k \cdot f \cdot 2 (r-h) \quad \text{dB} \quad (7.1)=(4.11)$$

reflectiecoëfficiënt

Deze wordt o.a. bepaald door de grootte van de gradient in de dichtheid, de frequentie van het uitgezonden signaal en de lengte van dit signaal. (zie hoofdstuk 5.2., figuur 5.6 t/m 5.10.).

Voor de in dit hoofdstuk te maken berekening gaan we uit van een gradient van $0,5 \text{ kg/m}^3/\text{cm}$ met een impedantieverloop als in figuur 5.6, impulsresponsie d , waarbij de impedantiestap zich over 15 cm uitstrekt. Voor de reflectiecoëfficiënt van een dergelijk impedantieverloop geldt (bij een zendsignaal van 10 kHz, zie figuur 5.6)

$$R = R_1 \cdot R_2 \approx 1/3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 10^{-3} = -60 \text{ dB} \quad (7.2)$$

waarin R_1 = de verzwakking alsgevolg van de eindige steilheid van de impedantie stap.

R_2 = de reflectie van een oneindig steile impedantie-stap.

akoestische ruis [9]

Volgens Urick geldt voor het akoestisch ruisniveau:

$$NL_{ak} = SPL + 10 \log B - DI \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa} \quad (7.3)$$

waarin NL_{ak} = intensiteit in dB van de akoestische ruis met als referentie de intensiteit van een vlakke golf met een rms-druk van $1 \mu\text{Pa}$

SPL = intensiteit van de ruis in een 1 Hz - bandje, gemeten met een rondom gevoelige hydrofoon

B = bandbreedte in Hz

DI = richtingsindex van de transducent

Voor het spectrumlevel (SPL) geeft Knudsen (seastate 3/ondiep water)

frequentie (kHz)	SPL (dB)
1	+ 72
5	+ 60
10	+ 55
20	+ 50
50	+ 45

(7.4)

Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze waarden gemiddelden zijn. De werkelijke waarden zijn afhankelijk van plaatselijke omstandigheden.

De bandbreedteterm verloopt als volgt

B (kHz)	10 log B (dB)
2	33
5	37
10	40
20	43

(7.5)

Voor de richtingsindex (DI) geldt

$$DI = 45,5 - 20 \log \theta \tag{7.6}$$

waarin θ = hoek tussen de -3dB punten in de richtingskarakteristiek

θ (graden)	DI (dB)
6	30
10	25,5
15	22
30	16

(7.7)

Met (7.4) t/m (7.7) ingevuld in (7.3) kan een schatting van de intensiteit van het te verwachten ruisniveau ten opzichte van een referentie niveau gemaakt worden. Voor de referentie intensiteit geldt

$$I_R = (\frac{1}{2}A_R^2) / \rho c = (10^{-6})^2 / 1,5 \cdot 10^6 = 6,67 \cdot 10^{-19} \text{ W/m}^2 \tag{7.8}$$

waarin A_R = piekamplitude van de referentiegolf

Hiermee kunnen we de absolute intensiteit van de ruis (I_n) schrijven als

$$10 \log I_n = NL_{ak} + 10 \log I_R = NL_{ak} - 182 \text{ dB re } 1\text{W/m}^2 \tag{7.9}$$

bronniveau [9]

Het bronniveau (SL) van de zendtransducent wordt gegeven door

$$SL = 10 \log P_{ak} + DI + 51 \quad \text{dB re 1 Pa.m} \quad (7.10)$$

Het totaal akoestisch vermogen P_{ak} in het water wordt bepaald door het aangeboden elektrisch vermogen en het omzettingsrendement van de zendtransducent. Voor de richtingsindex (DI) geldt formule (7.6) en tabel(7.7).

echolevel

Voor het te verwachten echolevel geldt nu, uitgaande van figuur 7.1.,

$$EL = SL - TL + R \quad \text{dB re 1 Pa} \quad (7.11)$$

ingevuld wordt dit

$$EL = 51 + 10 \log P_{ak} + DI + R - 40 \log r - 2\alpha h - 2(r-h) k_f \quad \text{dB re 1 Pa} \quad (7.12)$$

Het echolevel wordt tevens bepaald door de gewenste signaal/ruis verhouding (SN) en het ruisniveau (NL_{ak})

$$EL = NL_{ak} + 120 + 20 \log SN \quad \text{dB re 1 Pa} \quad (7.13)$$

ingevuld wordt dit

$$EL = SPL + 10 \log B - DI - 120 + 20 \log SN \quad \text{dB re 1 Pa} \quad (7.14)$$

Met (7.12) en (7.14) zijn alle van belang zijnde grootheden aan elkaar gerelateerd.

Ter illustratie zullen we nu het benodigde akoestisch vermogen voor een drietal situaties berekenen:

- a. 2 meter slib boven de te detekteren gradient
- b. 5 meter slib boven de te detekteren gradient
- c. 8 meter slib boven de te detekteren gradient

De volgende gegevens worden bekend verondersteld:

$$f = 20 \text{ kHz}, B = 5 \text{ kHz}, \theta = 6^\circ, h = 22 \text{ m}, k = 0,1, \alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m}, \\ \text{SN} = 2, R = -60 \text{ dB}$$

Met deze gegevens wordt (7.13)

$$EL = +50 + 37 - 30 - 120 + 6 = -57 \text{ dB re 1 Pa} \quad (7.15)$$

en kunnen we (7.12) schrijven als

$$10 \log P_{ak} = -57 - 51 - 30 + 60 + 40 \log r + 0,13 + 2(r-22) \cdot 2 \quad (7.16) \\ = -165,9 + 40 \log r + 4r$$

(7.16) ingevuld voor de drie situaties wordt:

$$10 \log P_{ak} = -14,7 \text{ dB re 1 W} = 0,03 \text{ W (situatie a.)} \\ = -0,65 \text{ dB re 1 W} = 0,86 \text{ W (situatie b.)} \\ = +13,2 \text{ dB re 1 W} = 21 \text{ W (situatie c.)}$$

Wanneer het conversierendement bekend is, dan kan het benodigd elektrisch vermogen berekend worden.

In bijlage B. zijn nog enkele contrôle berekeningen gemaakt voor twee conventionele echoloden en een parametrisch echolood.

8. Metingen en simulaties

Om de theorie en de praktijk met elkaar te vergelijken zijn er een aantal metingen verricht in de Rotterdamse havens. Gemeten is de geluidsnelheid, de absorptie, de dichtheid en de akoestische responsie. De opgenomen signalen zijn m.b.v. de beschreven computer programma's verwerkt en vergeleken met de theoretisch te verwachten signalen. In de volgende paragrafen komen de metingen in chronologische volgorde aan de orde.

In bijlage A. worden de gebruikte radio actieve dichtheidsmeters behandeld.

8.1. Geluidsnelheid en absorptie meting

Deze metingen zijn beschreven in een TPD meetrapport d.d. 26 februari 1980, dat integraal in dit rapport is opgenomen als bijlage C.

Conclusies uit de metingen zijn:

1. Op geen van beide meetplaatsen zijn bij de drie gebruikte frequenties geluidsnelheidsvariatiës groter dan 10% geconstateerd, zodat geconcludeerd is, dat op de meetplaatsen geen gas in een zodanige vorm voorkwam dat het akoestische metingen zou beïnvloeden.
2. De gemeten k-faktor van de absorptie varieert van 0.13 tot 0.15, hetgeen overeenkomt met de door Hamilton [10] gegeven waarden.
3. De fasespectra lijken de veronderstelling te bevestigen, dat het slib als een minimumfase systeem beschouwd mag worden.

Ter controle van de laatste conclusie zijn met behulp van de computer bij de 66 kHz en 200 kHz metingen uit de amplitude spectra de bijbehorende minimumfase spectra berekend. De berekende en gemeten fasespectra bleken bij deze simulaties een goede overeenkomst te vertonen.

8.2. Paralleloptnames van de dichtheidsmeters en de echoloden.

8.2.1 Backscattersonde en echolood parallel in het Calandkanaal.

Op 28 februari 1980 zijn aan boord van de Indus metingen gedaan op een aantal plaatsen in het Calandkanaal. De door het Elac (18 kHz) en het Navitronics (30 kHz) echolood ontvangen akoestische signalen zijn, zowel varend als stilliggend, op tape opgenomen.

Ter hoogte van het "hoge licht" en van het "lage licht" zijn backscatter opnames gemaakt. Tevens zijn opnames gemaakt van de gereflekteerde akoestische signalen door een "tareer plaat" en door een vrij vlakke zandbodem. Het bleek evenwel niet mogelijk met deze signalen de pulsresponsie van het echolood systeem te bepalen.

Variaties als functie van de plaats

Van een groot aantal opgenomen akoestische signalen is met een diode plus RC-netwerk, analoog de omhullende bepaald en op een recorder uitgeschreven. In figuur 8.1. is een gedeelte van een gemaakte registratie te zien. Foto 1. laat een ontvangen 30 kHz signaal zien met de daarbij behorende omhullende. Op foto 2. is een ontvangen 18 kHz signaal te zien en op foto 3. 20 over elkaar opgenomen signalen. In de gemaakte registraties zijn duidelijk de eerste slibaanslag en de overgang naar de vastere bodem te onderscheiden. De afstand tussen deze beide overgangen verandert slechts langzaam tijdens het varen en is constant tijdens het stilliggen. De omhullende van het van de eerste slibaanslag ontvangen akoestisch signaal varieert weinig, terwijl de omhullende van het akoestisch signaal, dat van de overgang naar de vastere bodem wordt ontvangen sterk in amplitude varieert. Deze laatste variaties kunnen veroorzaakt worden doordat, alsgevolg van baggerwerkzaamheden, de vastere bodem is verstoord. De geringe variaties in het ontvangen signaal van de eerste slibaanslag wijzen op een vrij goed vlak uitlopen van het dunne slib. Om bij een akoestische puntmeting ook de tweede overgang goed te kunnen weergeven is een echolood met een kleine openingshoek nodig.

Vergelijking model met in-situ metingen

In de figuren 8.2 en 8.3 zijn een 18 kHz en een 30 kHz ontvangen signaal weergegeven met de bijbehorende backscatter opnames. Door pijlen is de relatie tussen de parallel opnames aangegeven. De akoestische opnames suggereren een eerste, snelle dichtheidsovergang, vervolgens een geringe overgang en daarna één of meerdere snelle dichtheidsovergangen (groter dan de eerste overgang!).

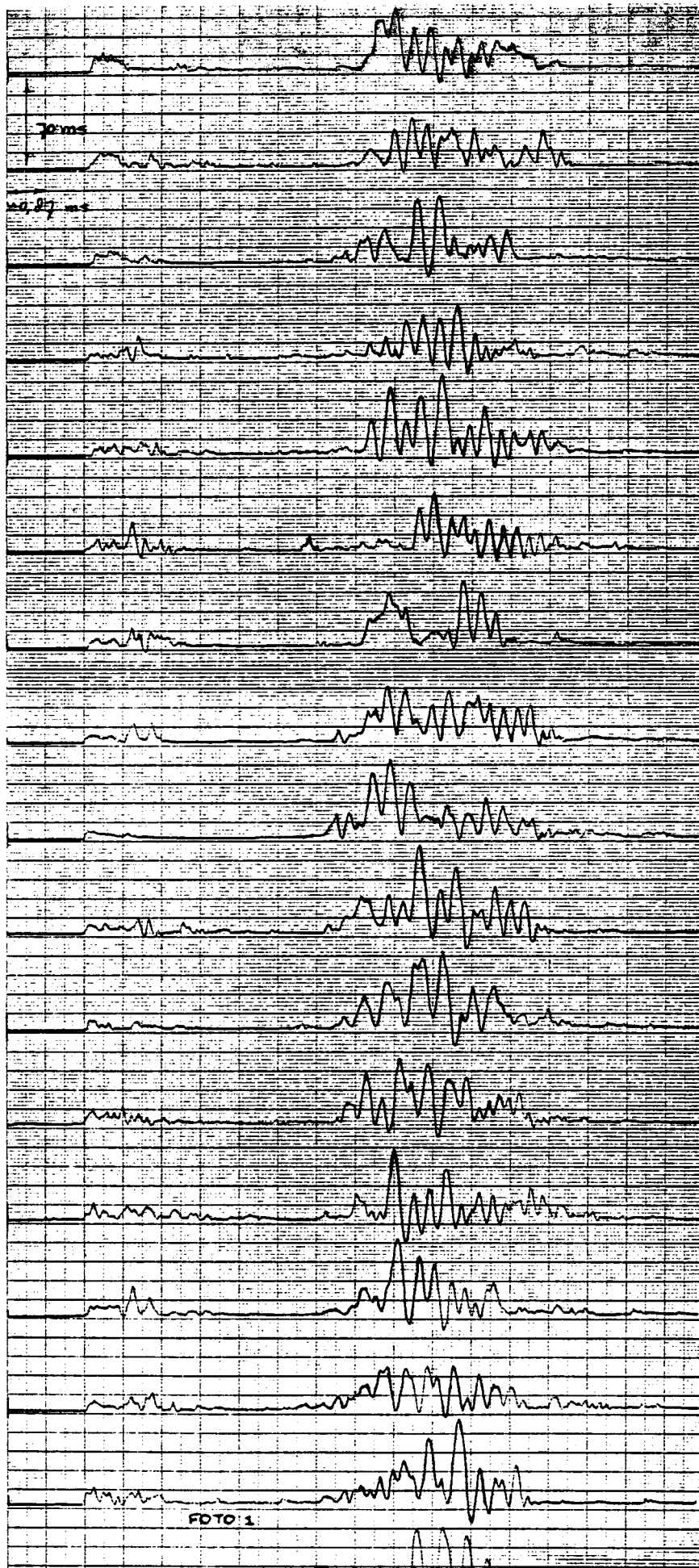
In de backscatter opnames zijn deze laatste dichtheidsovergangen gelijk of kleiner dan de eerste. (rekening houdend met de niet lineaire schaal van de backscatter opname). Dit betekent dat er impedantie overgangen zijn, die niet uit de backscatter opnames volgen. Het is niet te verwachten dat deze impedantie overgangen door veranderingen in de geluidsnelheid veroorzaakt worden, tenzij er gas in de dichtere lagen zit.

Om de dichtheids veranderingen, die door de akoestische signalen worden gesuggereerd, te bepalen is bij vier 30 kHz signalen, op de in hoofdstuk 5. aangegeven wijze de integraal (van het niet gedeconvolueerde) gelijkgerichte signaal berekend. Het resultaat is weergegeven in figuur 8.4 en hierin is te zien dat de tweede overgang veel groter is dan de eerste. Bij deze berekening is niet gecorrigeerd voor demping, zodat de overgangen in werkelijkheid nog groter moeten zijn. Ter controle van het computermodel is bij integraal 12 de verwachte responsie berekend. Het zendsignaal is een onnauwkeurige schatting, maar het verloop van de responsie komt toch vrij goed met het gemeten signaal overeen (figuur 8.5).

Vervolgens is een gemaakte backscatteropname tweemaal in de computer ingelezen. De eerste maal als een vloeiend verlopende curve en de tweede maal met een sterk benadrukken van de in de curve voorkomende fluctuaties. Beide curves zouden de werkelijkheid kunnen benaderen, aangezien de backscatter sonde snelle overgangen niet goed weergeeft (middeling over ca. 20 cm). In figuur 8.6 en 8.7 zijn de bij deze curves behorende responsies weergegeven. Tevens zijn de beide ingelezen curves zowel op de originele schaal als op een lineaire schaal weergegeven. De tweede akoestische responsie (figuur 8.7) komt duidelijk beter met de metingen overeen dan de eerste.

Uit het bovenstaande volgt, dat het dichtheidsverloop te onnauwkeurig bekend is. Metingen met een beter oplossend vermogen zijn voor een goede vergelijking van het model met de werkelijkheid nodig. Mogelijk dat de transmissie sonde hiervoor geschikt is.

Indien de dichtheid inderdaad verloopt zoals in figuur 8.7 is aangegeven, dan zal de integraal van de modulus van de signalen de dichtheid niet correct weergeven. Bij integratie van de modulus worden alle negatieve gradienten als zijnde positief geïnterpreteerd en zal de berekende dichtheid te steil verlopen. Dit effect is weergegeven in figuur 8.8, waarbij uitgaande van een dichtheidscurve met en zonder negatieve gradienten de akoestische responsies zijn berekend. De uit deze responsies berekende integralen geven juist een omgekeerd beeld van de maximale dichtheid. Signaalverwerkings technieken waarmee ook de richting van de gradient wordt gereconstrueerd zijn wel mogelijk, maar stellen wel hoge eisen aan de bandbreedte en de signaal-ruis verhouding van de akoestische signalen. (zie hoofdstuk 5.2).



Figuur 8.1 Omhullende aantal 30 kHz registraties.

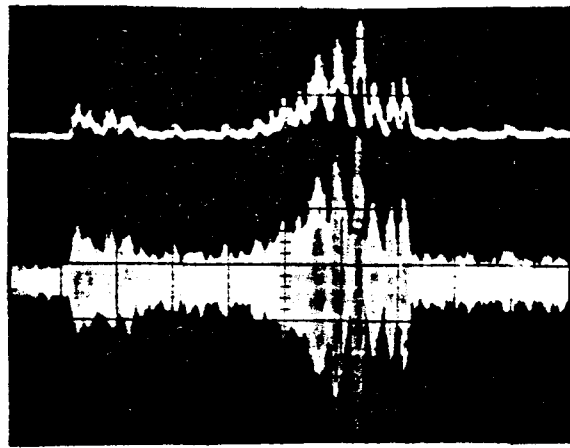


Foto 1. Navitronics 30 kHz varend; met omhullende
(0,5 m s/div)

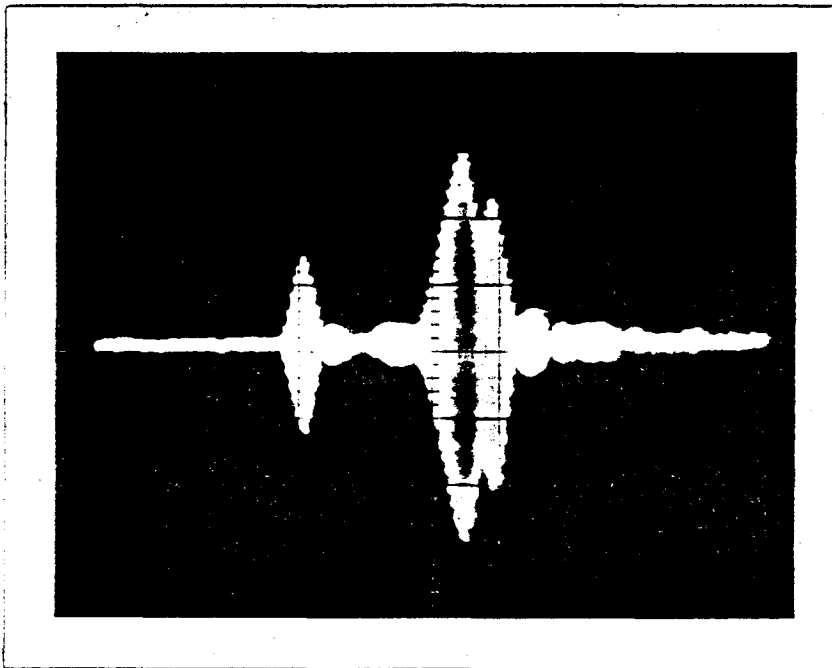


Foto 2. Elac 18 kHz (1ms/div)

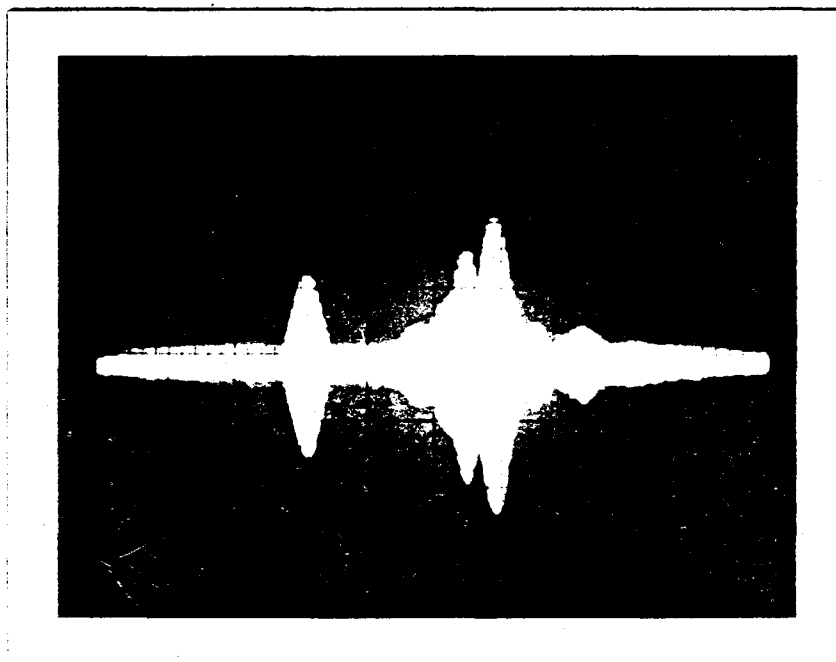
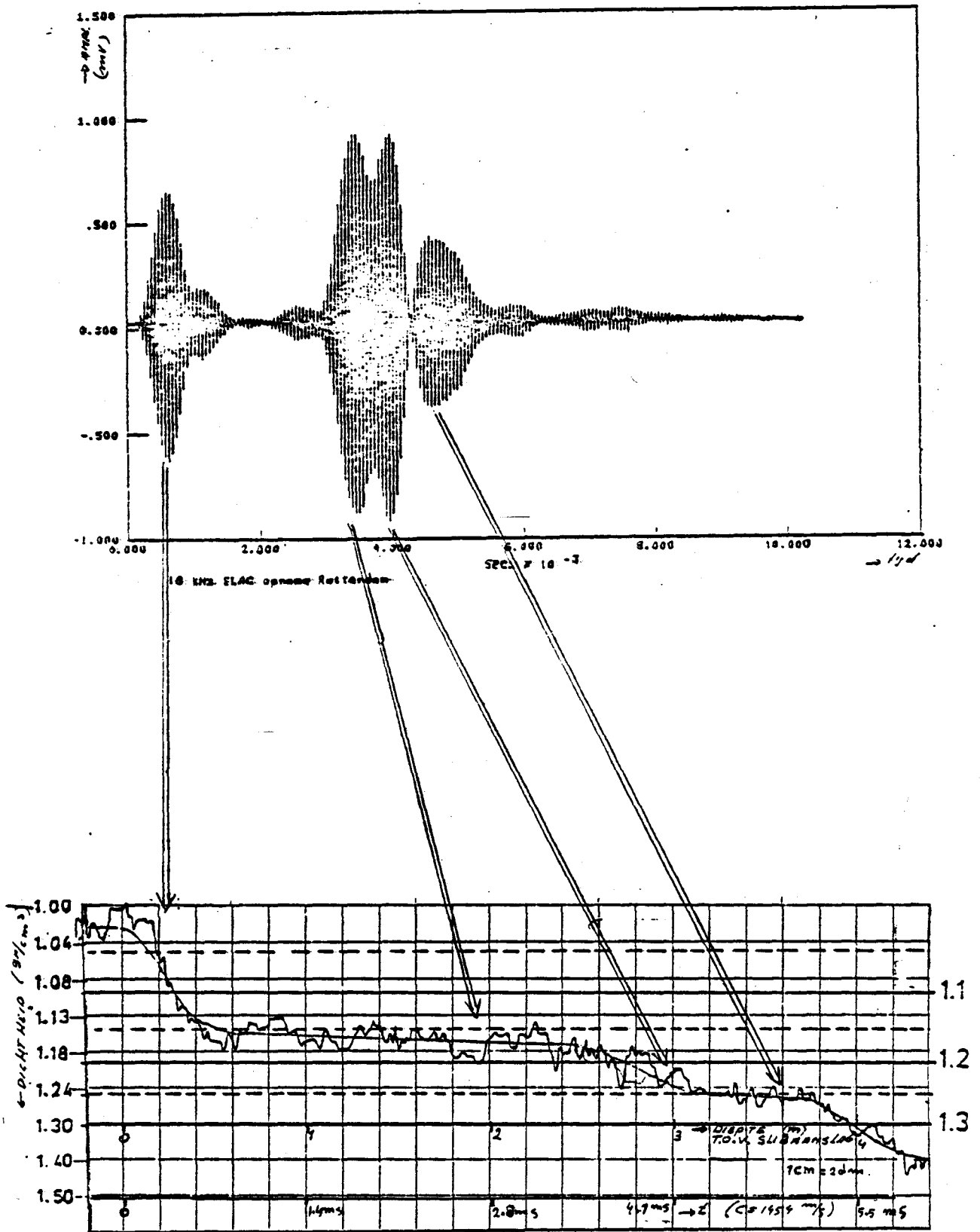
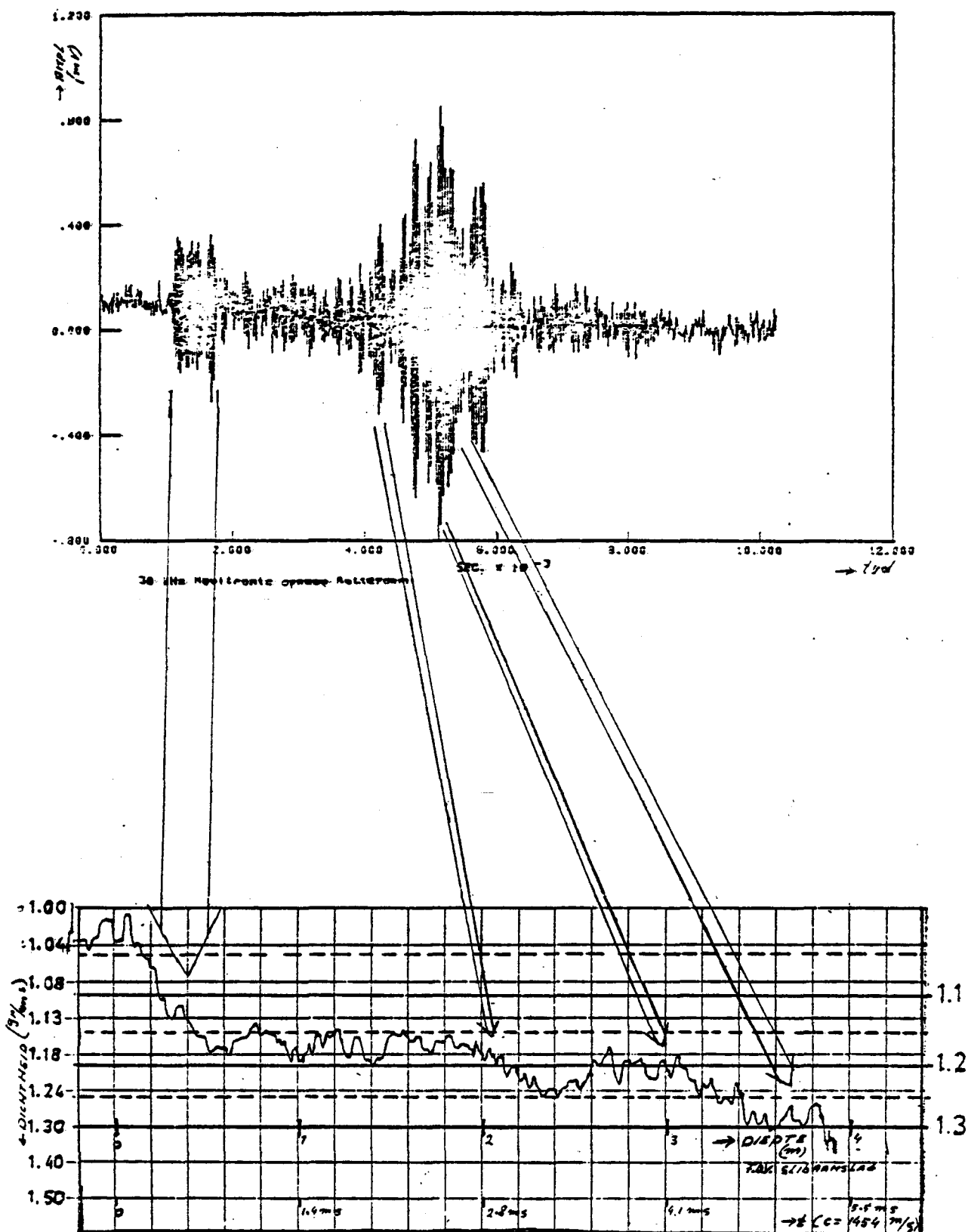


Foto 3. Elac 18 kHz 20 signalen over elkaar (1 ms/div)



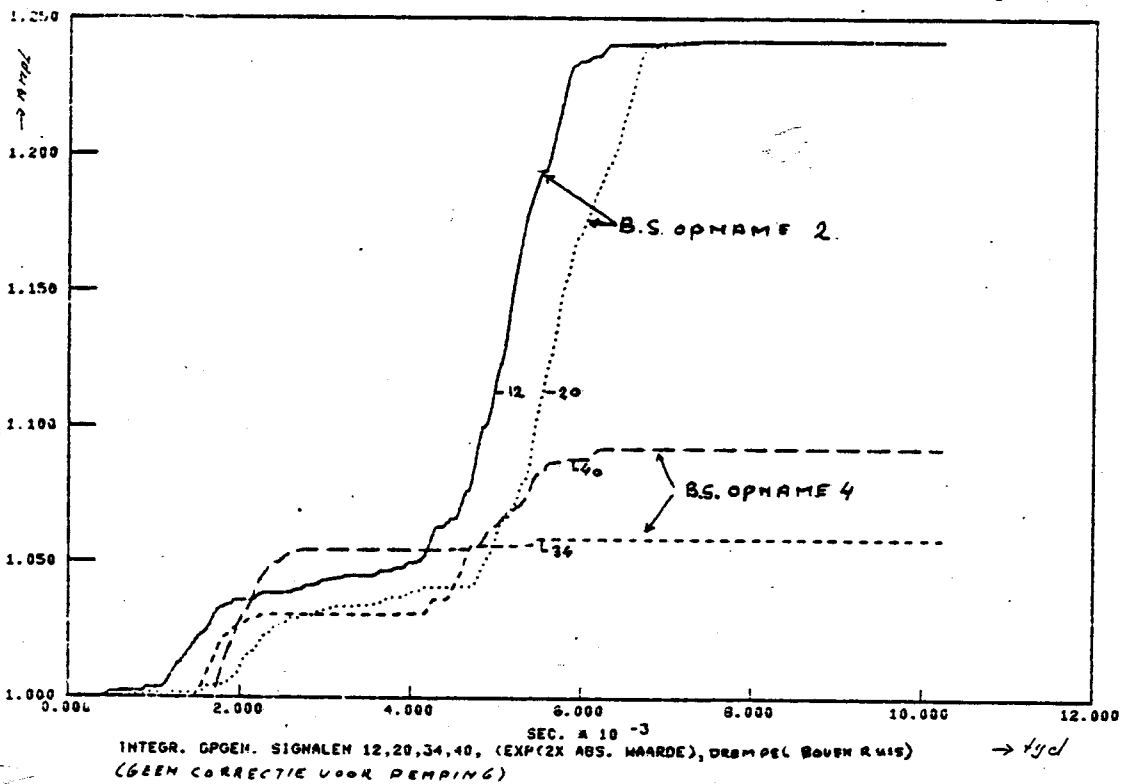
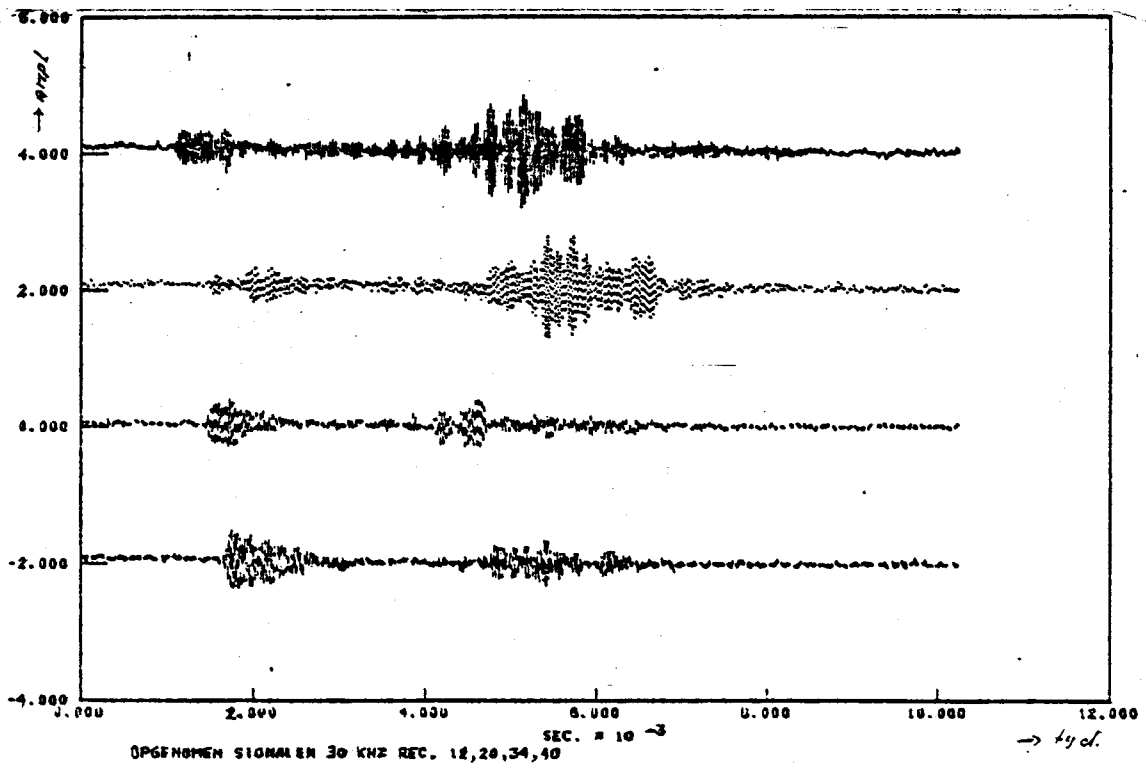
BACK SCATTERING

Figuur 8.2 18 kHz echolood signaal met bijbehorende back scatter opname.

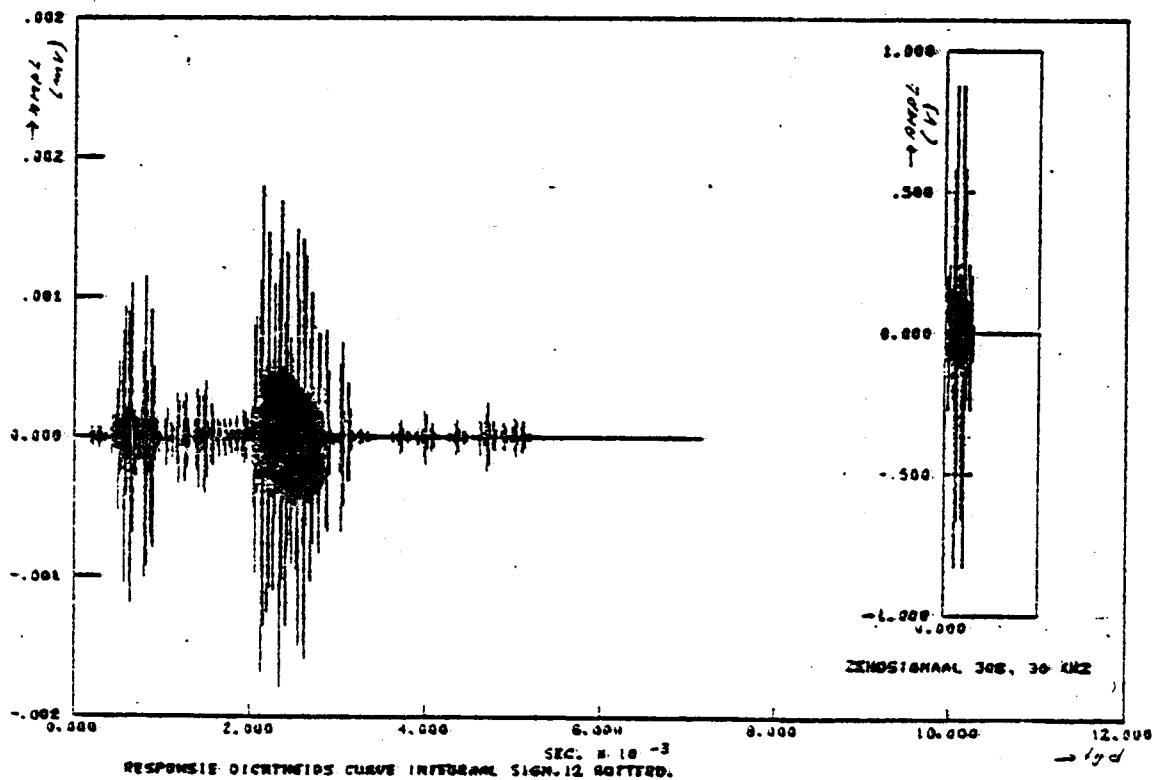


BACK SCATTERING

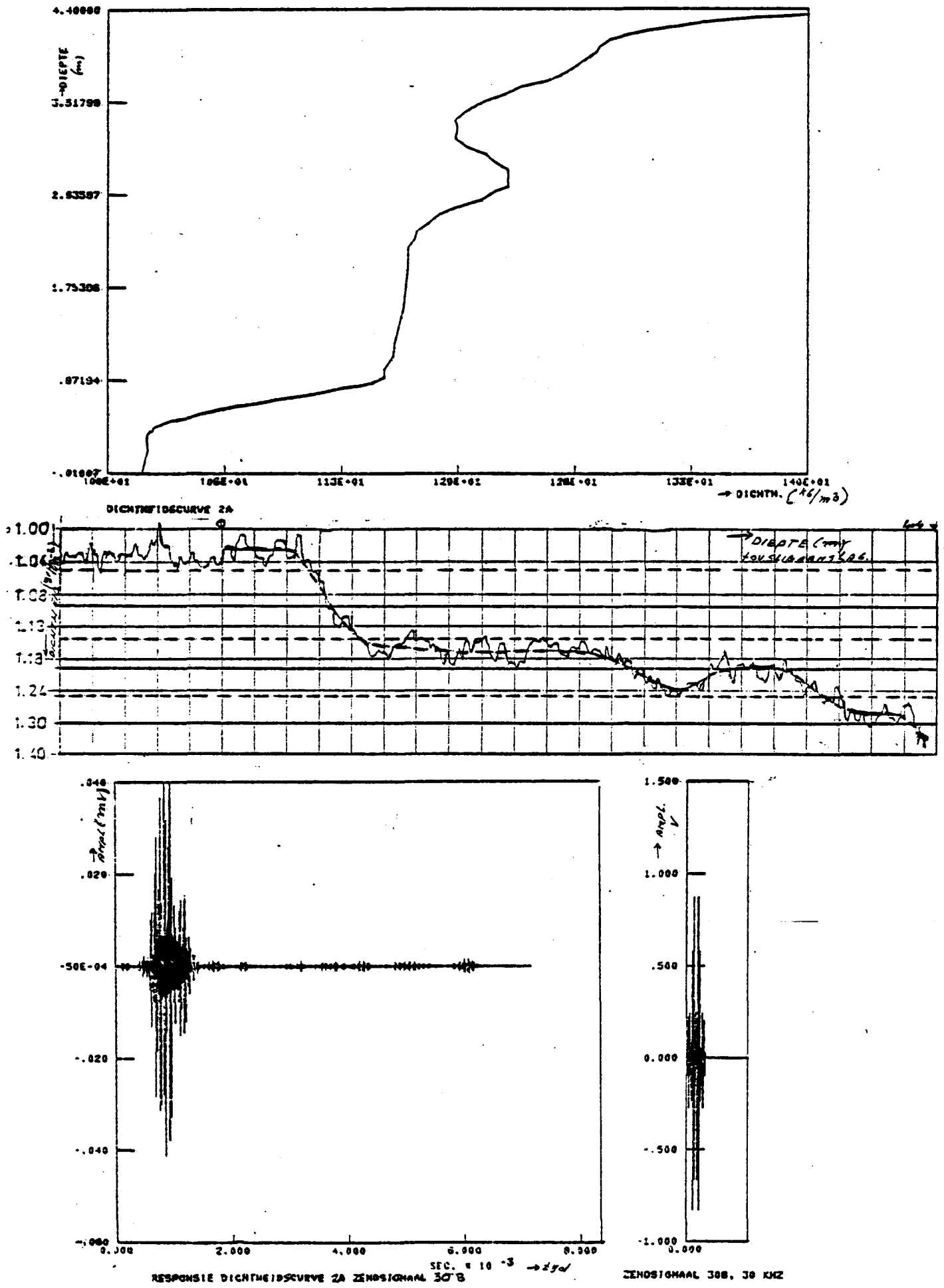
Figuur 8.3 30 kHz echolood opname met bijbehorende back scatter opname.



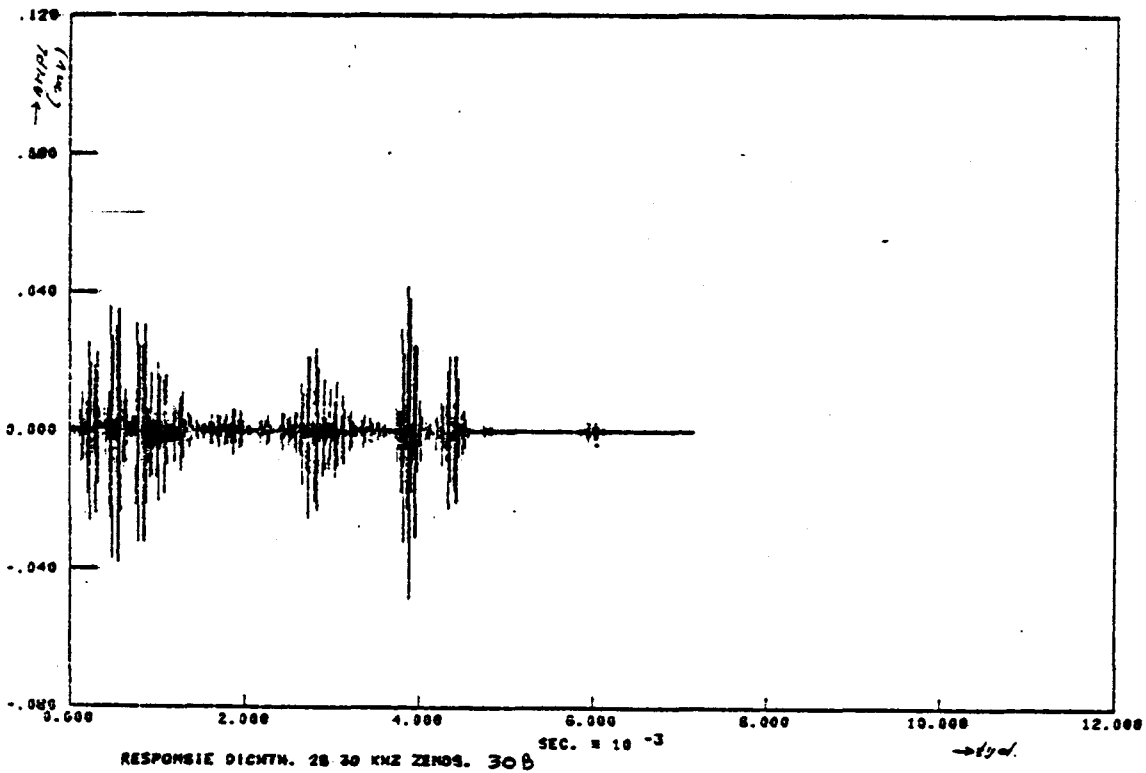
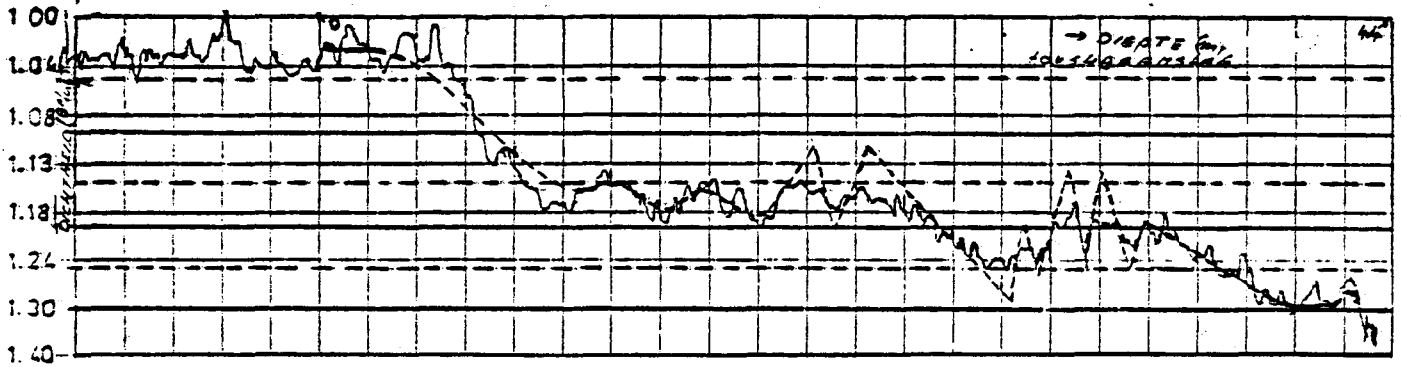
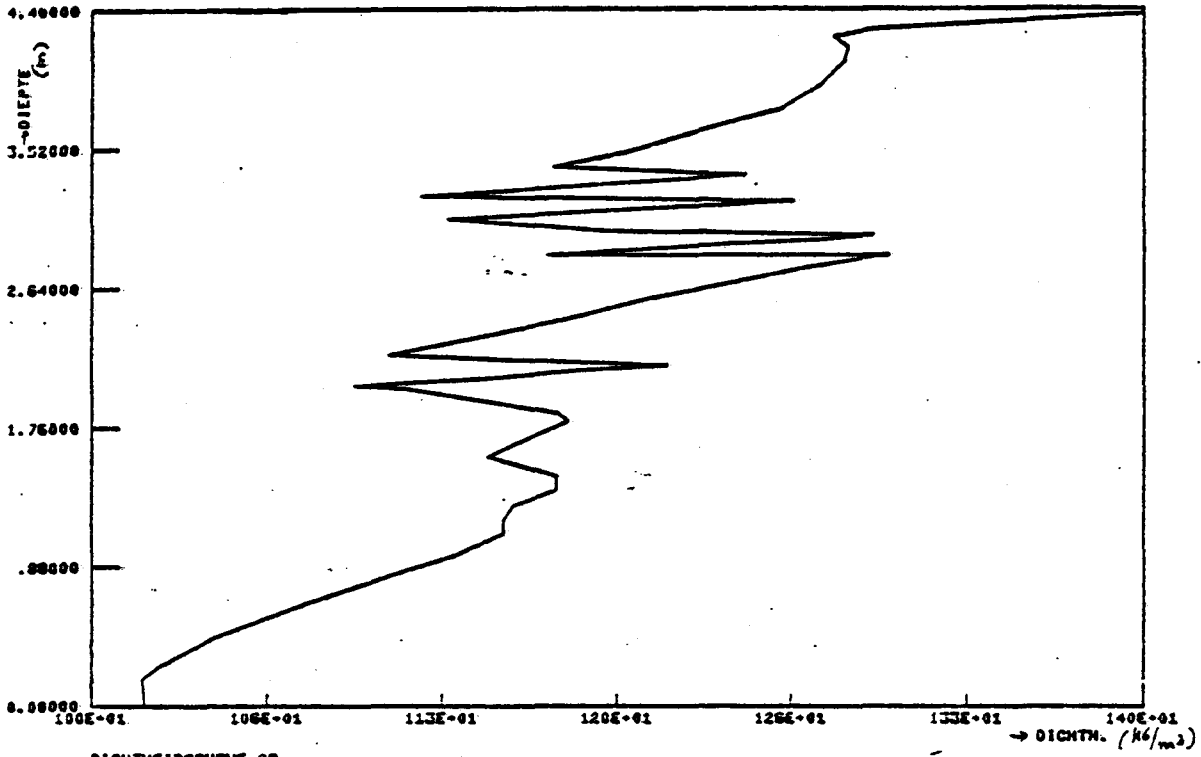
Figuur 8.4 4 gemeten signalen en de integralen hiervan.



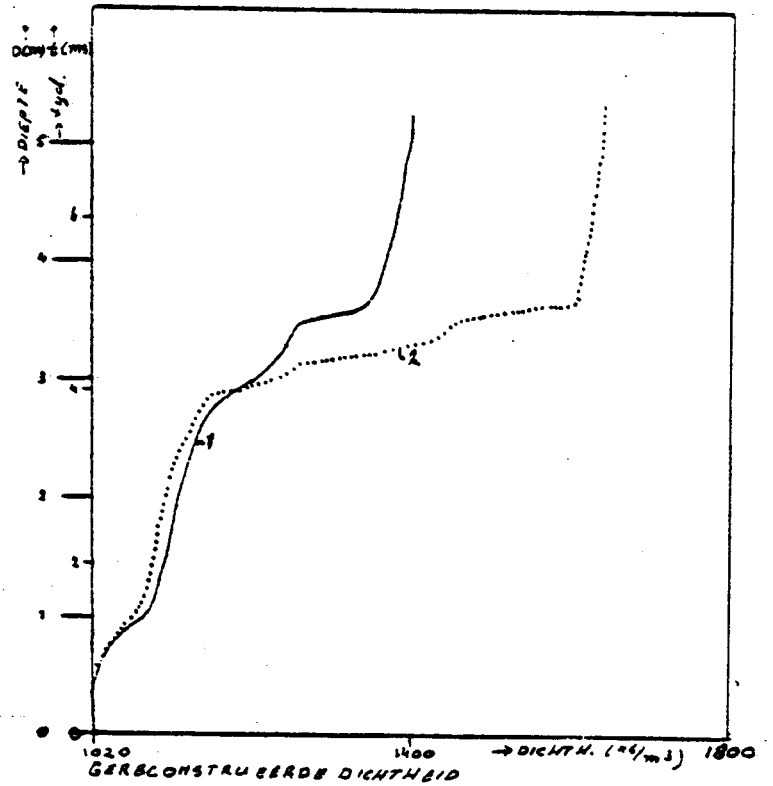
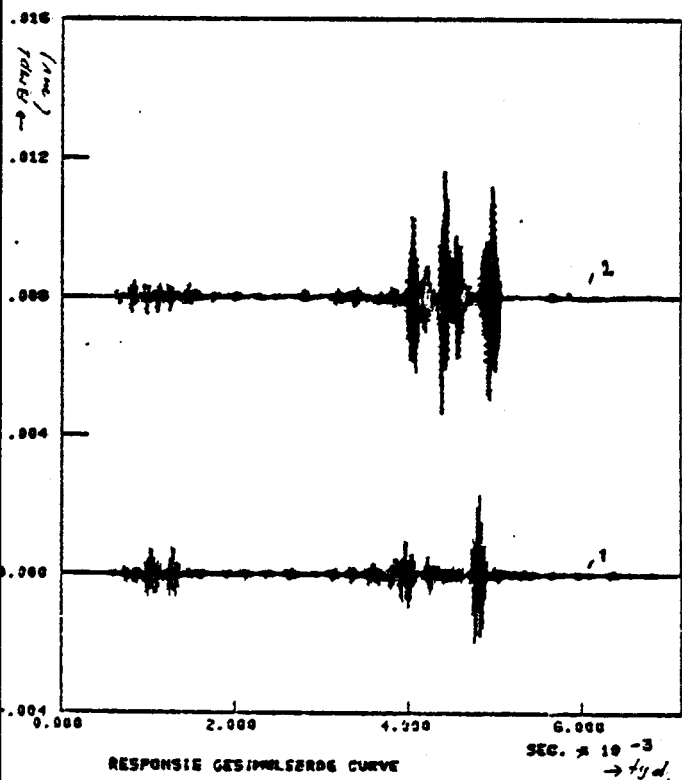
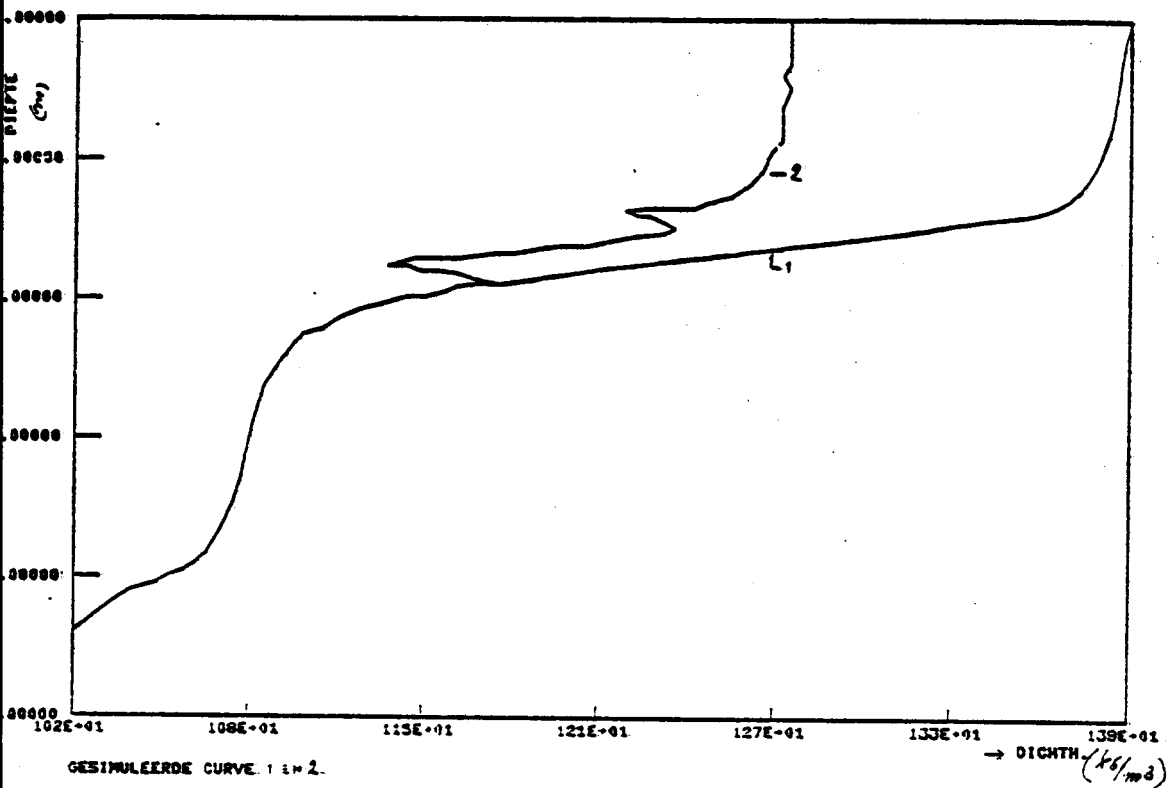
Figuur 8.5 Bij integraal 12 berekende responsie.



Figuur 8.6 Ingelezen dichtheids curve en responsie.



Figuur 8.7 Ingelezen dichtheids curve en responsie.



Figuur 8.8

Negatieve gradienten.

8.2.2. Backscattersonde, transmissiesonde en echolood parallel in de Mississippihaven.

Om te onderzoeken waarom de backscatter en de echoloodopnames een verschillend dichtheidsverloop aangeven zijn er naast backscatter en echoloodopnames ook opnames gemaakt met een transmissiesonde (zie voor een beschrijving van de radioactieve sondes bijlage A.). Om een zo goed mogelijke opname te verkrijgen zijn de radioactieve sondes met een lagere snelheid dan gebruikelijk afgevierd (3 cm/sec. i.p.v. 15 cm/sec.). Aangezien het belangrijk is om bij deze lage afviersnelheden op rustig water te meten is in eerste instantie gekozen voor de Mississippihaven. Het nadeel van deze meetplaats is, dat de sliblaag ongeveer 10 meter dik is zodat er alleen de eerste overgang water-slib gemeten kan worden.

In figuur 8.9 is een backscatter opname weergegeven en in figuur 8.10 een transmissieopname. De transmissiemeting geeft duidelijk scherpere overgangen te zien dan de backscattersonde, zodat de voor de akoestische metingen van belang zijnde scherpe overgangen in de backscatter opname niet tot uiting komen. Hiermee zou het verschil dan ook voor een groot deel verklaard worden.

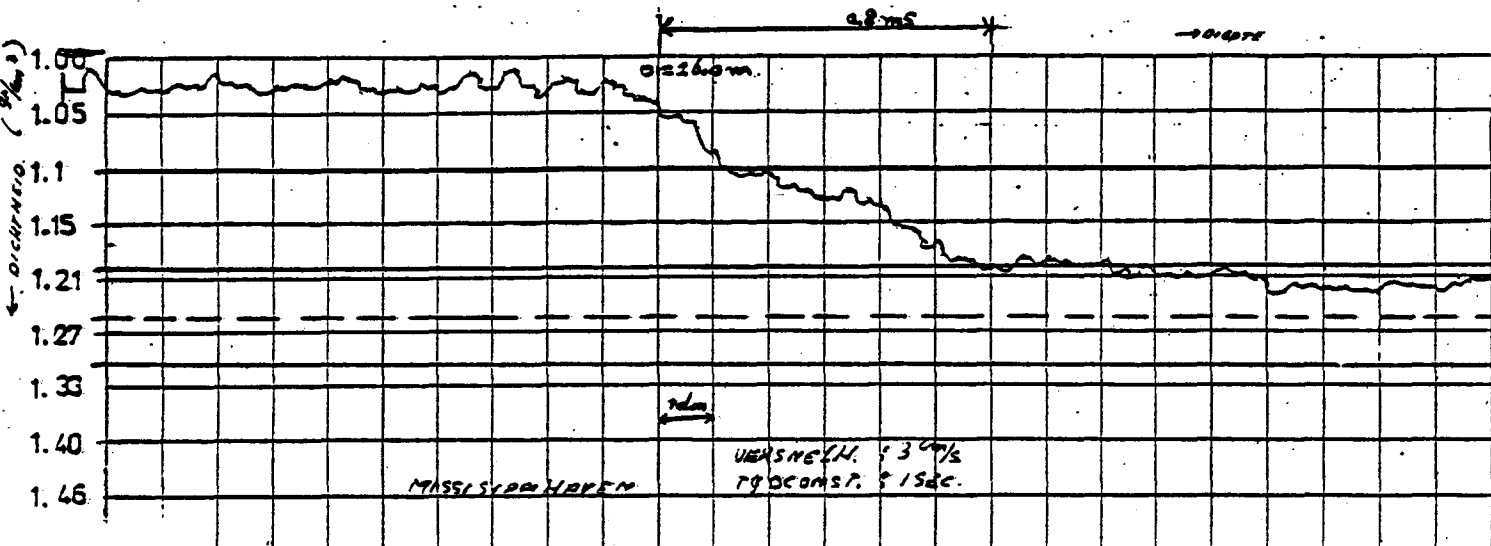
Tijdens deze meting zijn ook akoestische opnames gemaakt met behulp van het Elac echolood. Eén van de hierbij geregistreerde signalen, de omhullende hiervan en de omhullende van een viertal andere opgenomen signalen zijn weergegeven in figuur 8.11. Van de modulus van deze signalen is de integraal berekend. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 8.12. De twee door de transmissieopname aangegeven overgangen zijn hierin duidelijk te zien.

Om een akoestische responsie te kunnen simuleren is de met de transmissiesonde gemeten dichtheidscurve ingelezen in de computer. Deze curve is weergegeven in figuur 8.13.

Het resultaat van deze simulatie (zie figuur 8.14) toont goede overeenkomst aan met de gemeten signalen.

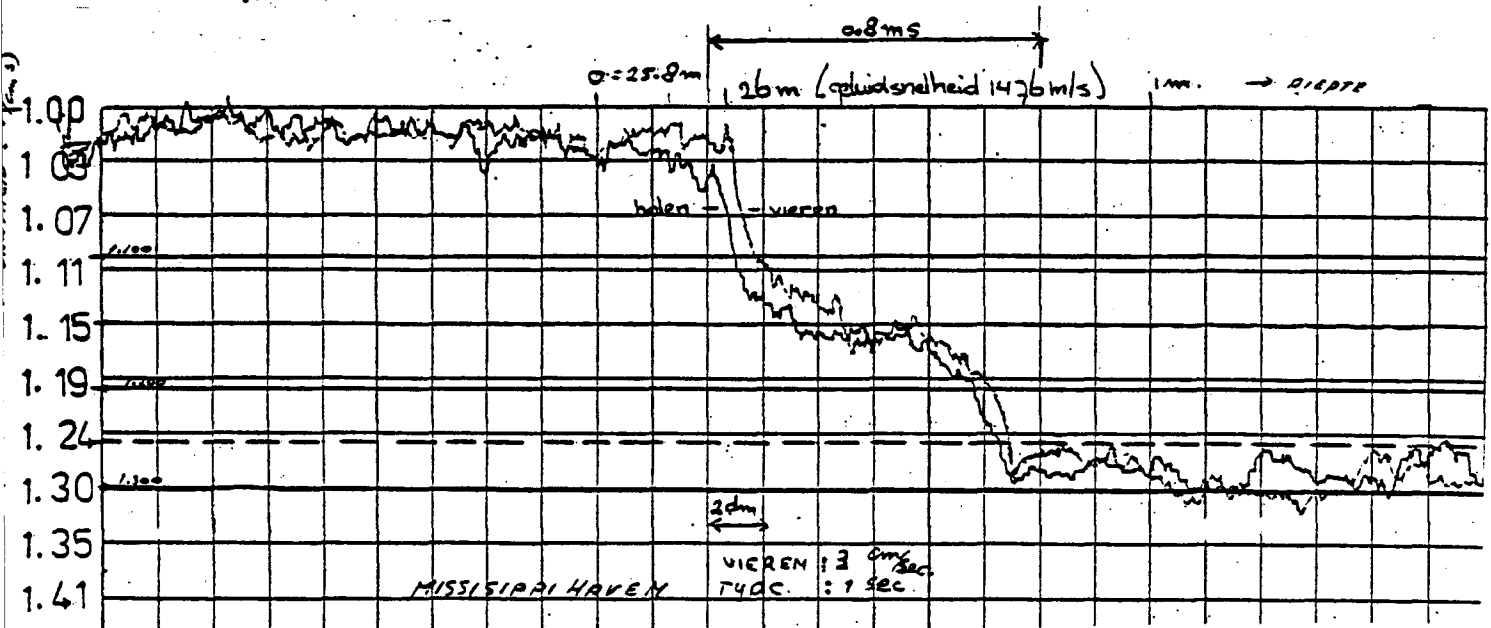
* (volgens formule 5.13)

BACK SCATTERING

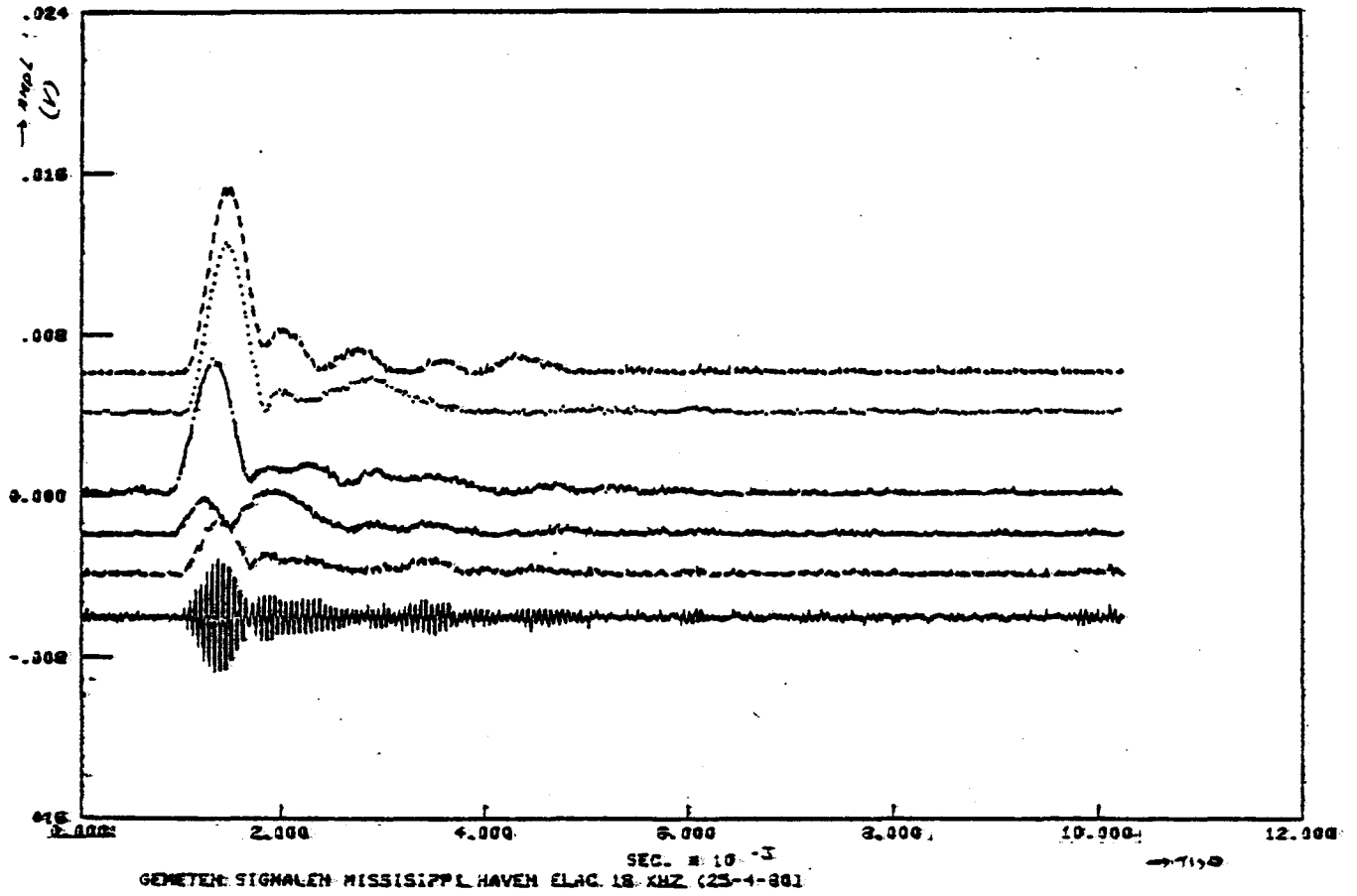


Figuur 8.9 Back scatter opname.

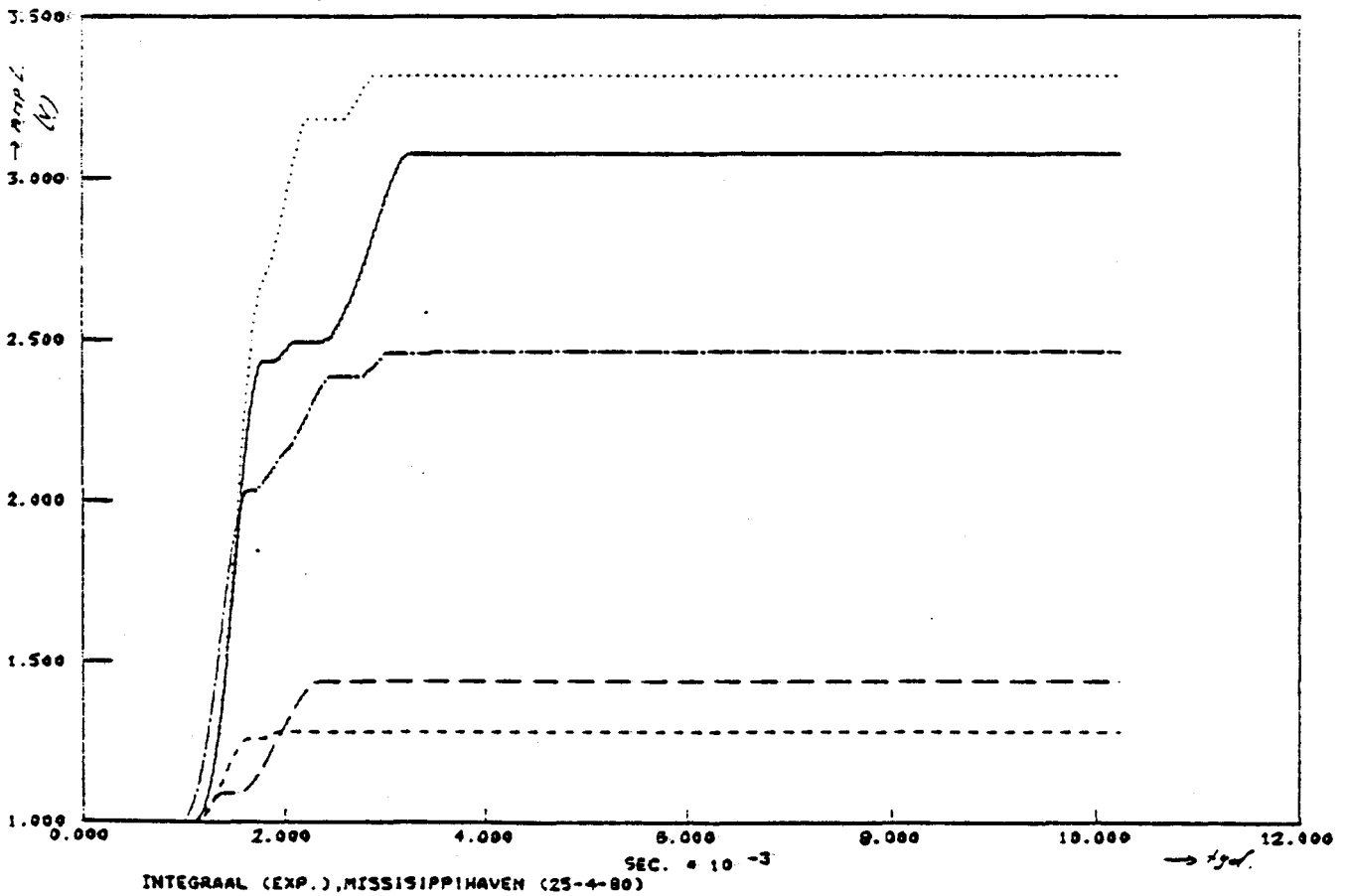
TRANSMISSIE



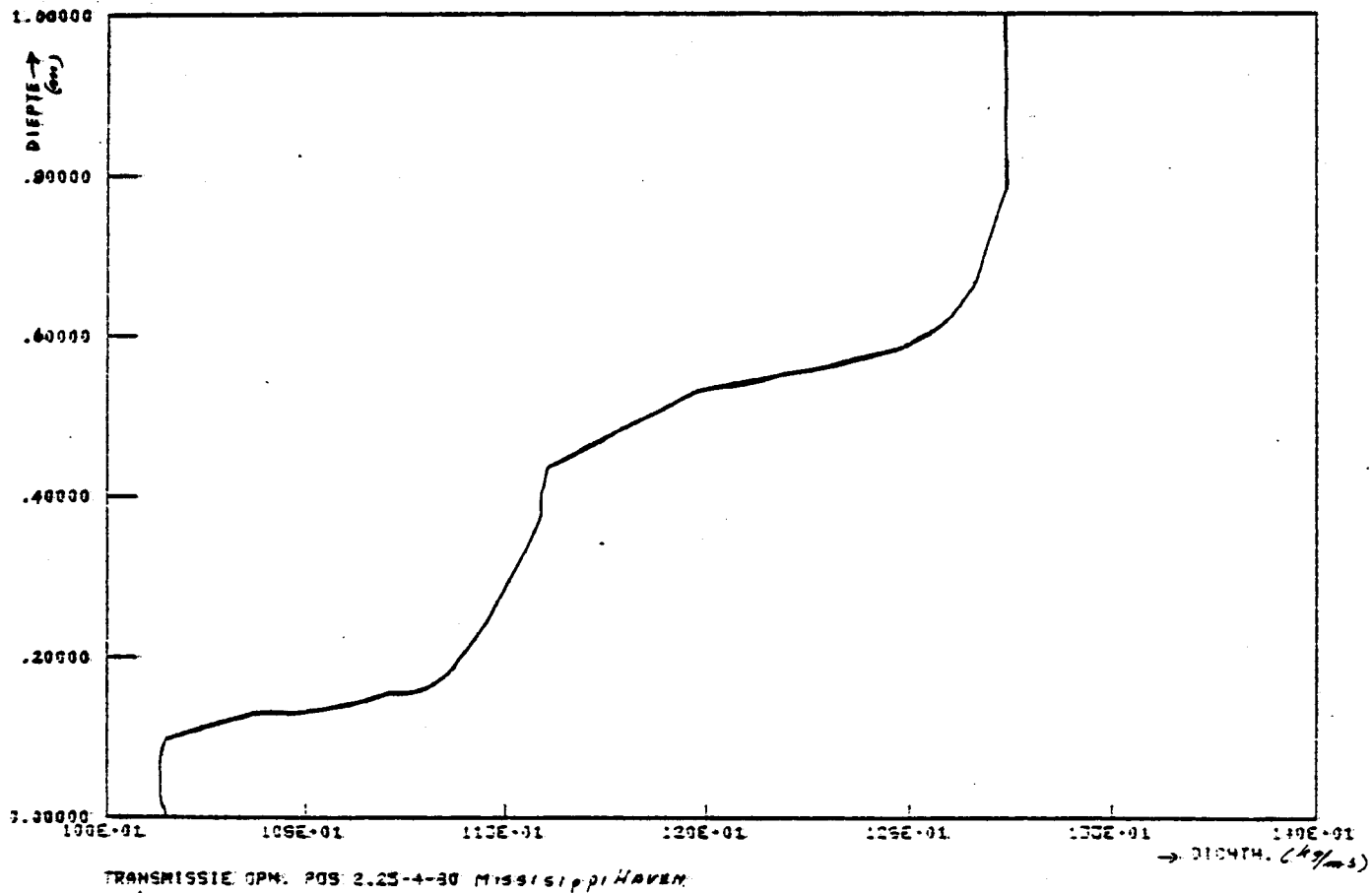
Figuur 8.10 Transmissie opname.



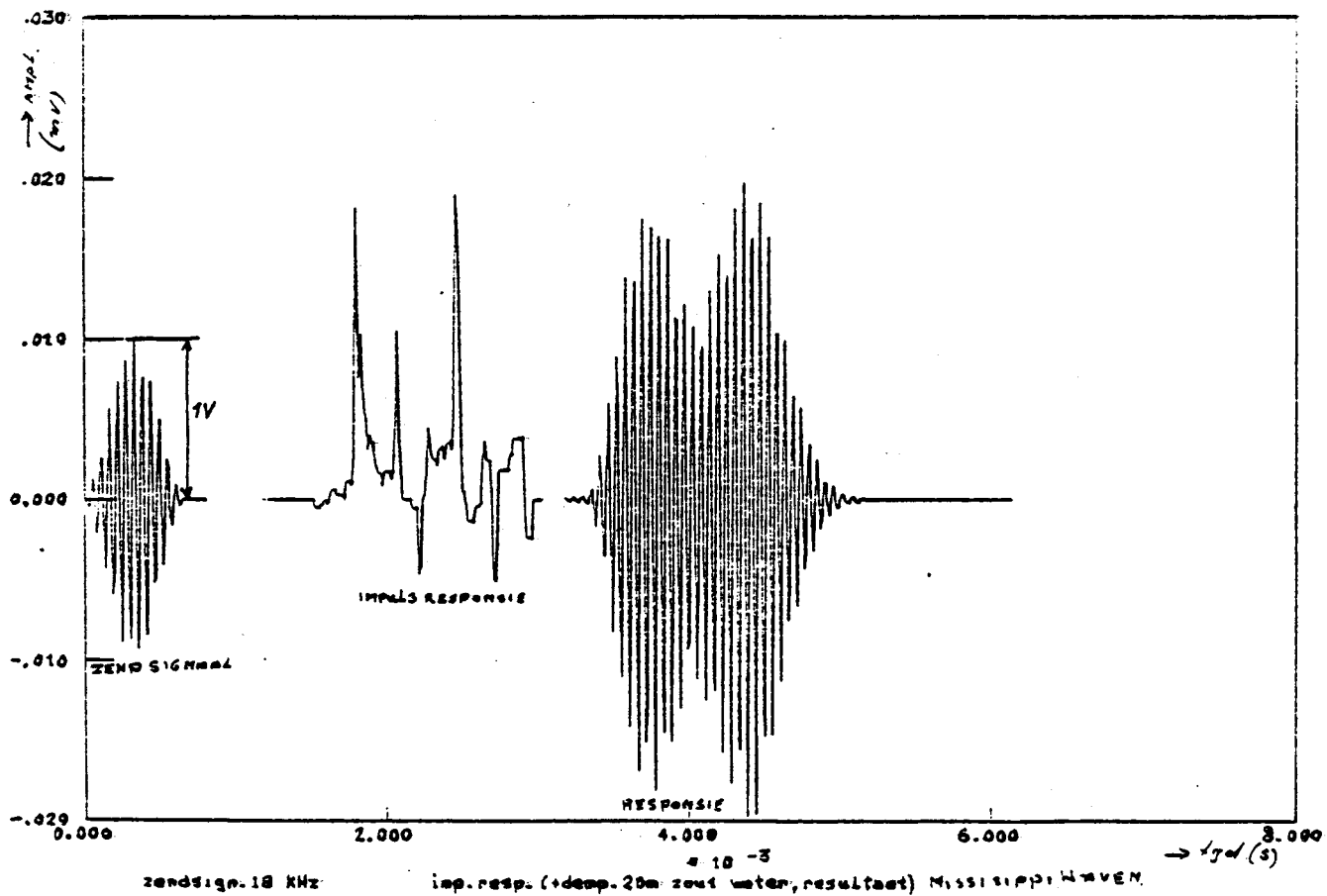
Figuur 8.11 Opgenomen signalen.



Figuur 8.12 Integraal modulus bovenstaande signalen.



Figuur 8.13 Ingelezen dichtheidscurve.



Figuur 8.14 Computersimulatie.

8.2.3. Transmissiesonde en echolood parallel in het Calandkanaal.

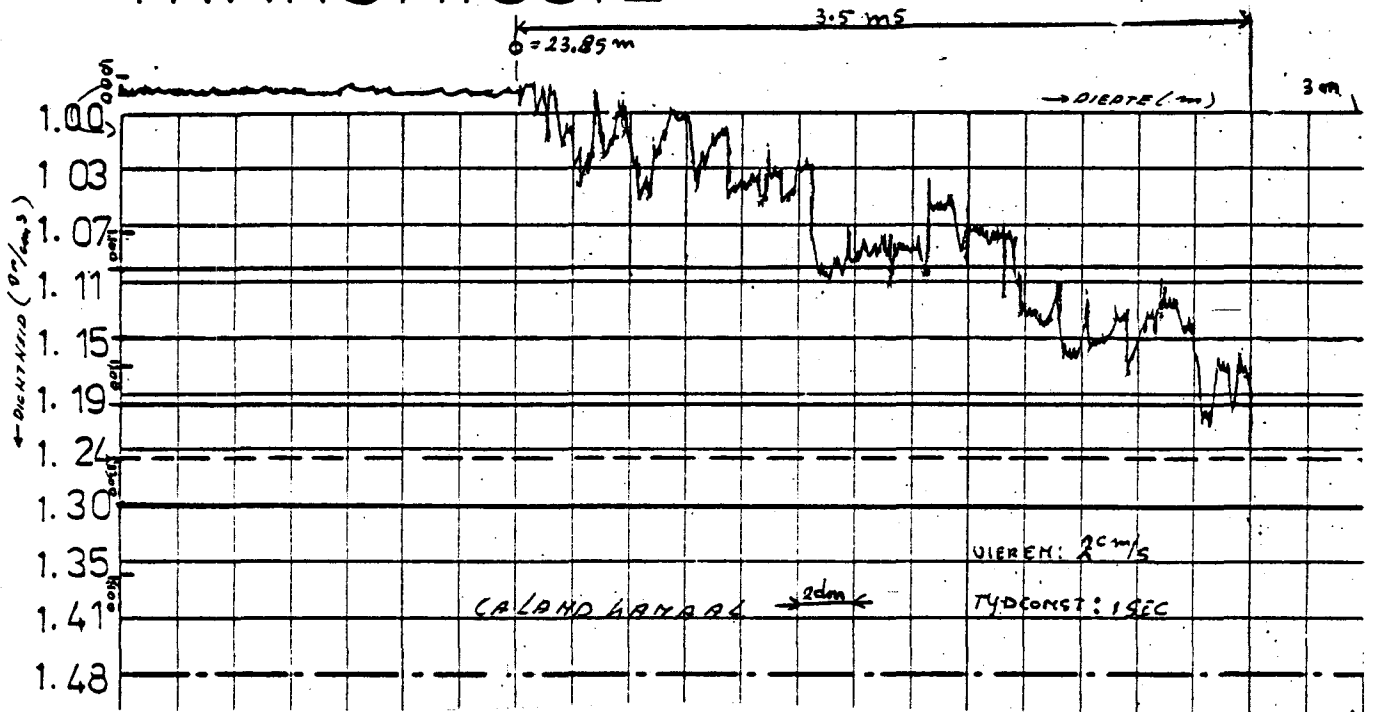
Aangezien bij de vorige meting in het Calandkanaal (zie 8.2.1) gebleken was dat juist bij de overgang naar de vastere bodem het verschil tussen de backscatter en de echolood opname groot was, is opnieuw gemeten in het Calandkanaal maar nu met de transmissiesonde.

Een transmissieopname is weergegeven in figuur 8.15 en hieruit blijkt dat er een gelaagdheid optreedt die uit eerdere backscatteropnames niet naar voren is gekomen. Helaas is als gevolg van de minder gestroomlijnde vorm van deze sonde een meting in lagen met een grotere dichtheid dan 1300 kg/m^3 niet mogelijk.

Ook bij deze meting zijn weer echoloodopnames gemaakt (ATLAS echolood) en is een deel van de opgenomen signalen weer in de computer ingevoerd. De verwerking is analoog aan hetgeen in 8.2.1. beschreven is.

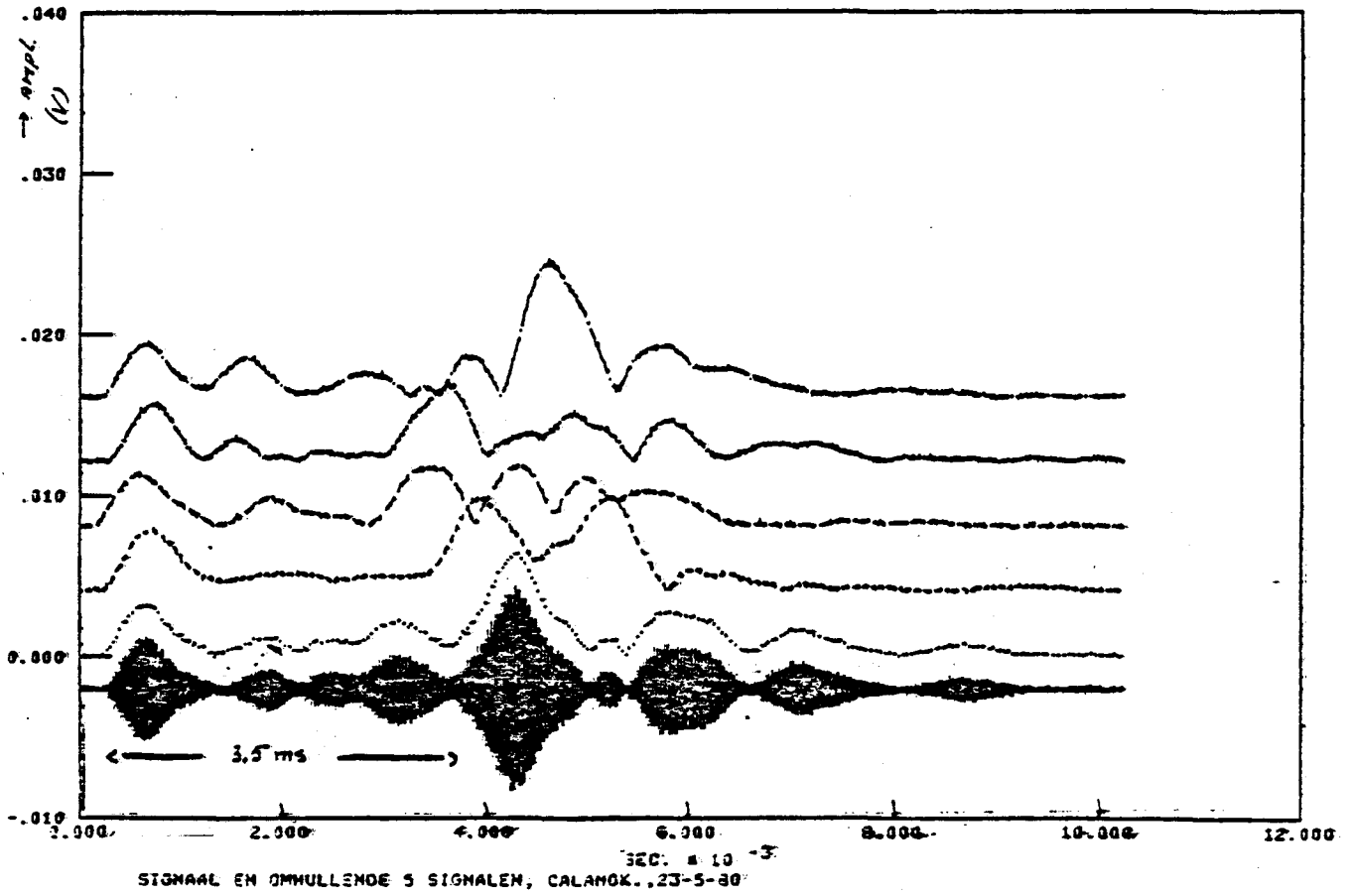
Zie voor de resultaten de figuren 8.16 t/m 8.20. Uit de figuren blijkt dat er een redelijke overeenstemming bestaat tussen het gemeten en het gesimuleerde signaal (de simulatie is slechts berekend tot een dichtheid van 1300 kg/m^3).

TRANSMISSIE

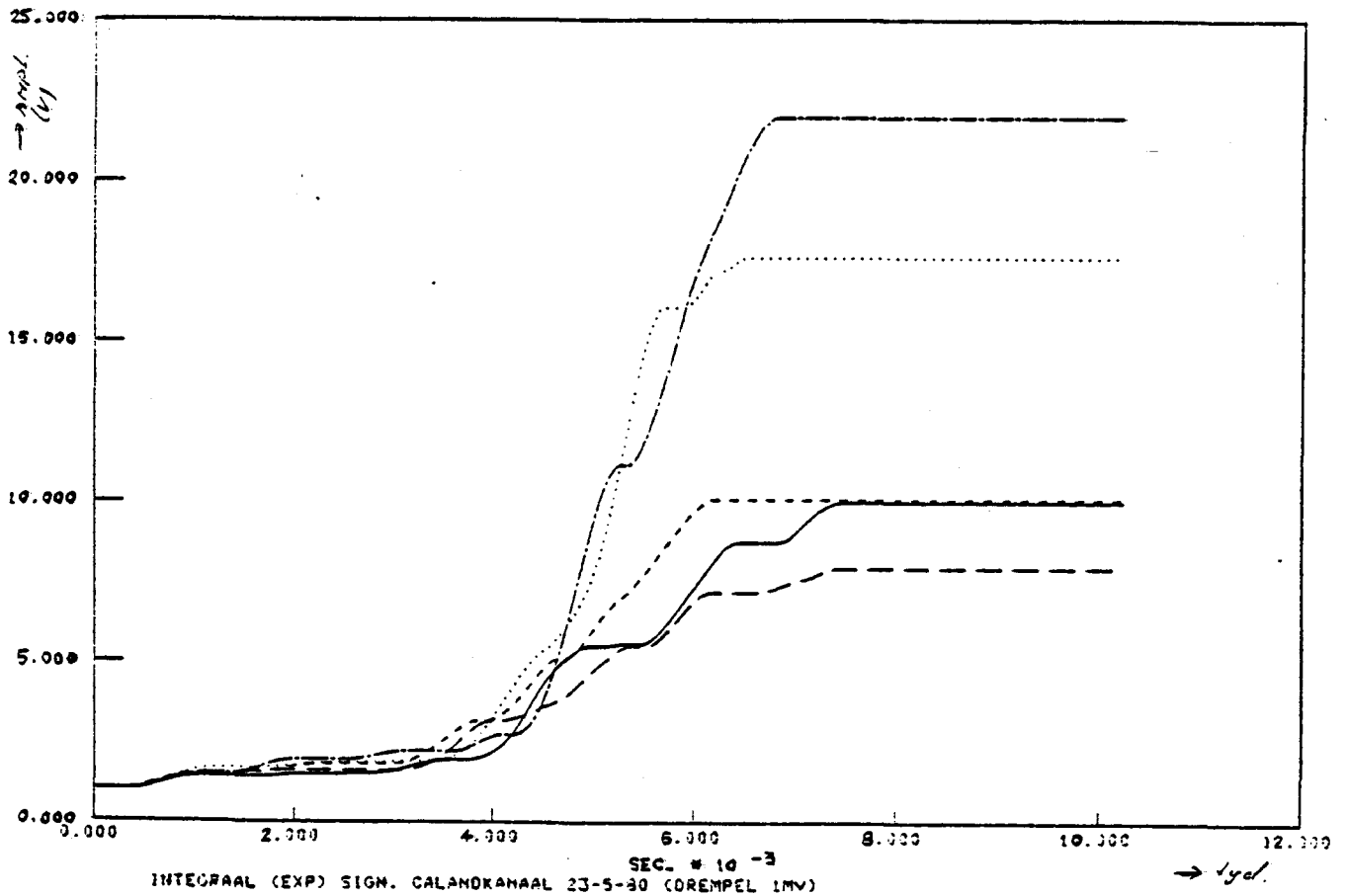


Figuur 8.15

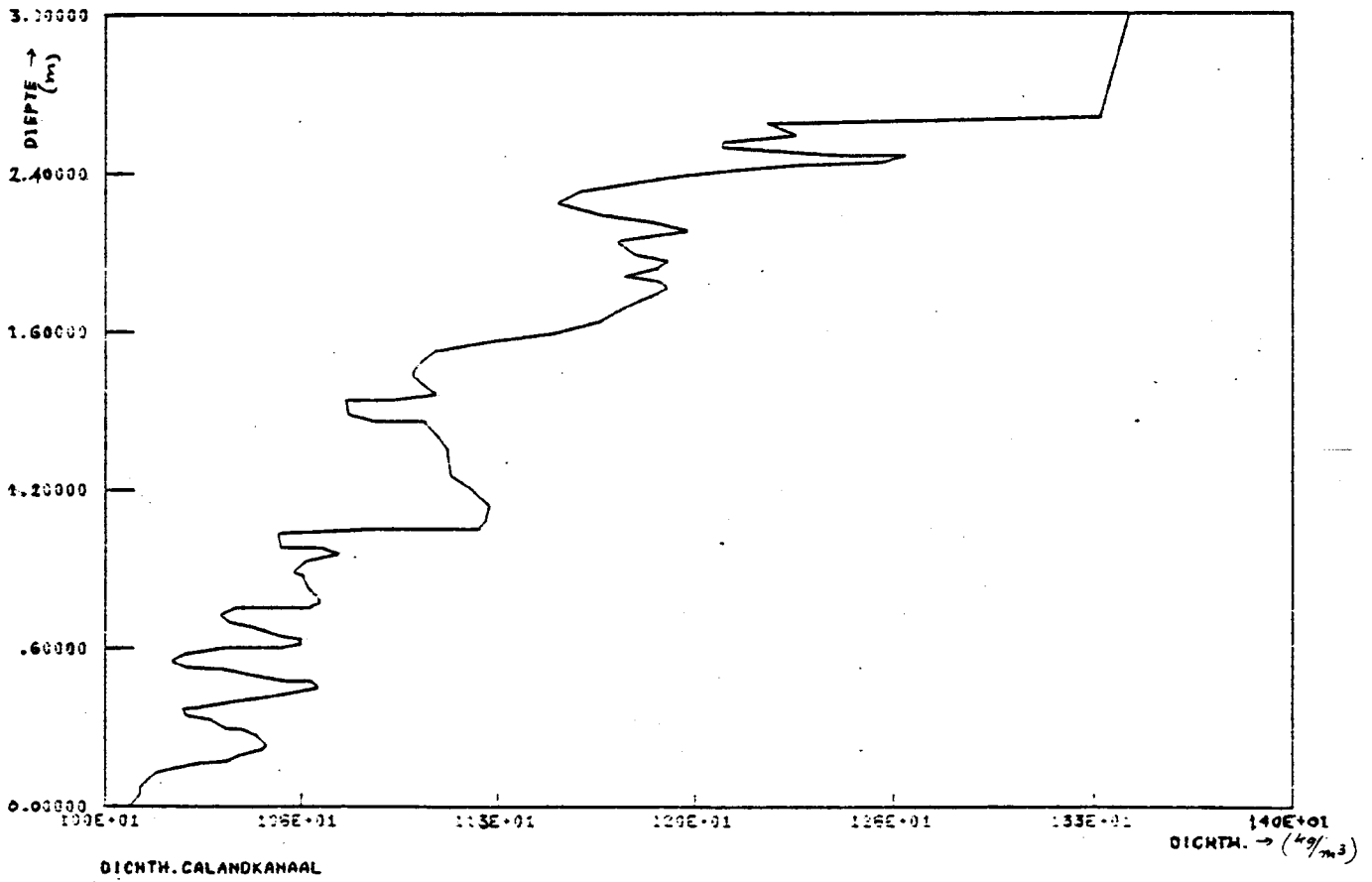
Transmissieopname.



Figuur 8.16 Opgenomen signalen.

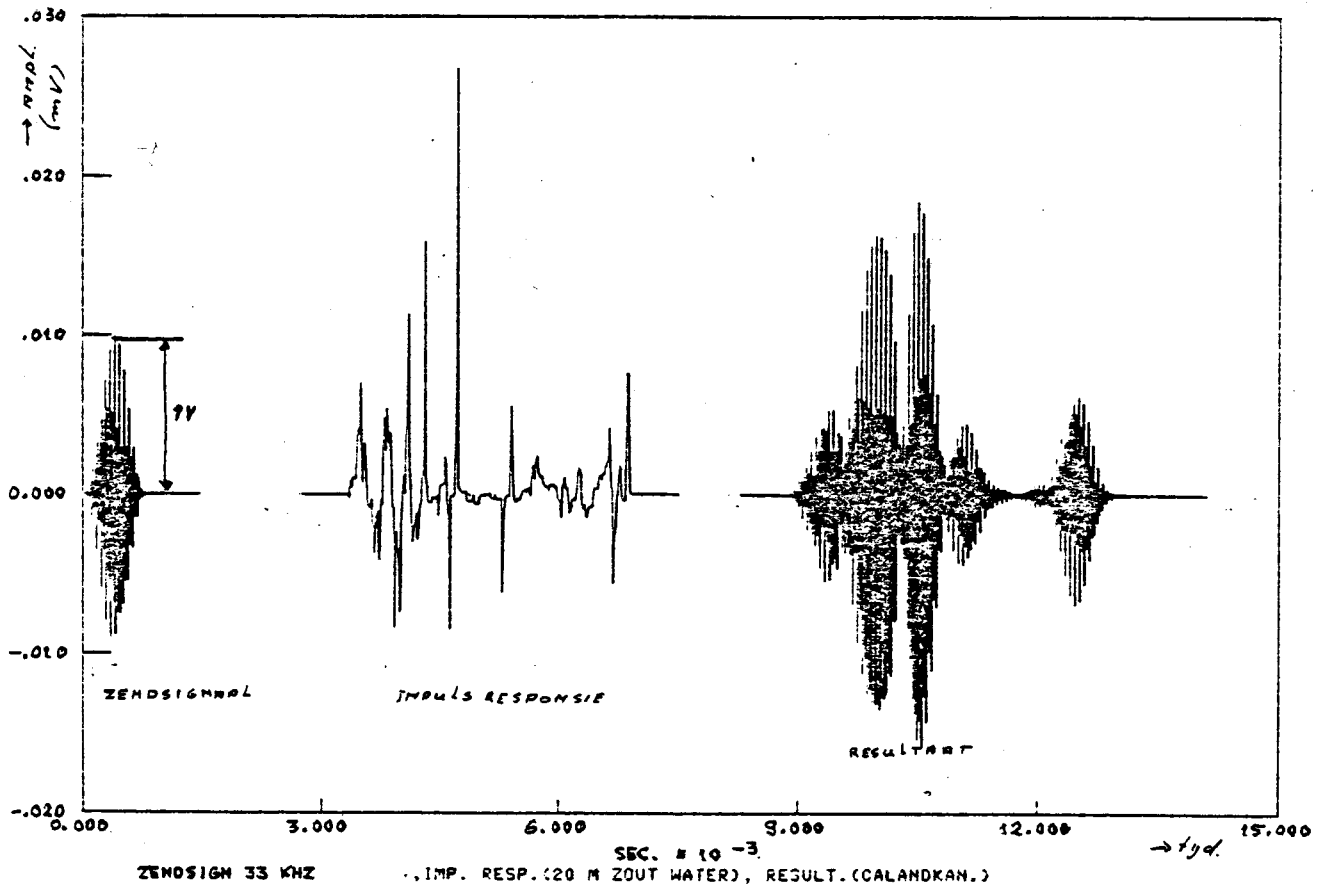


Figuur 8.17 Integraal modulus boyenstaande signalen.



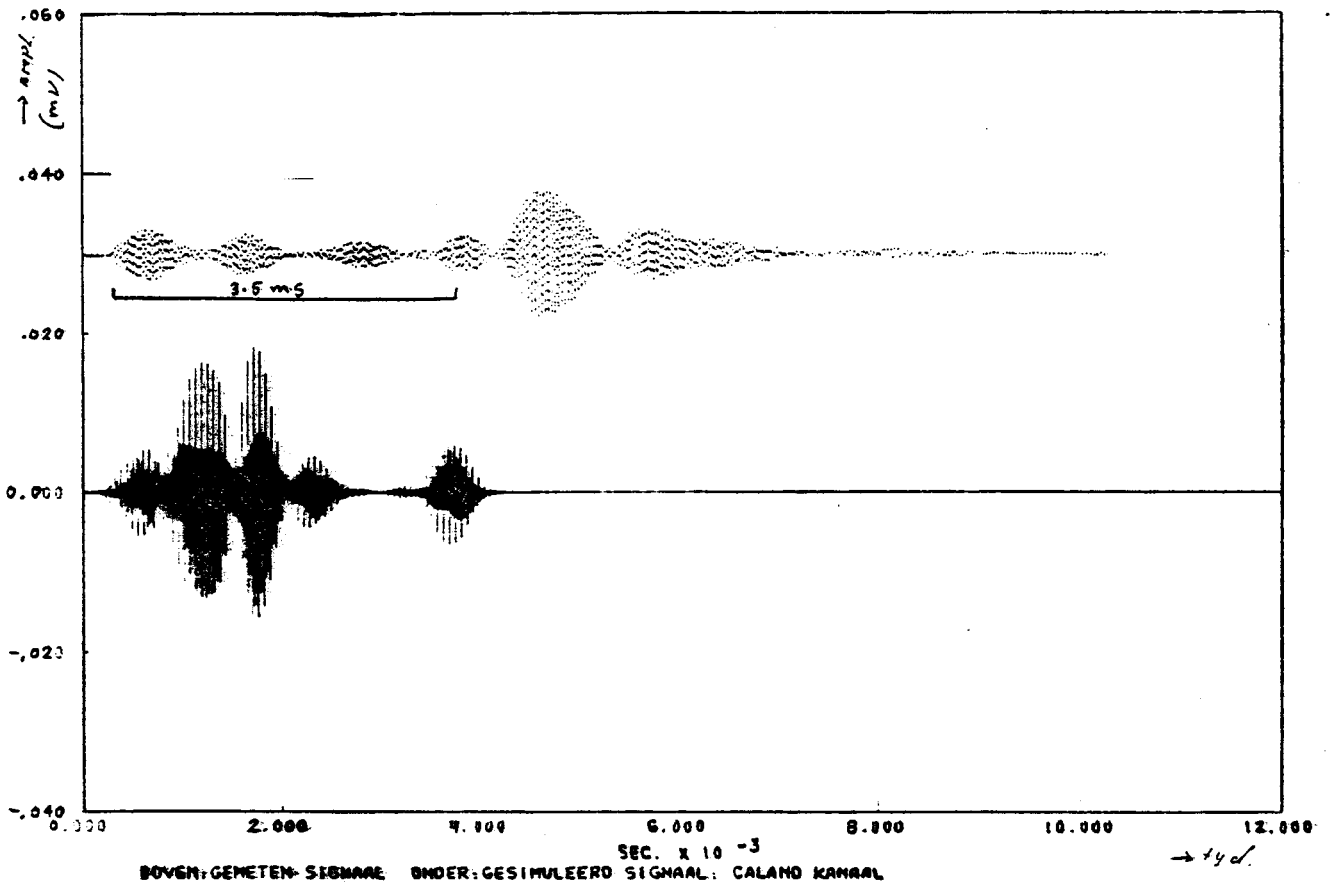
Figuur 8.18

Ingelezen dichtheidscurve.



Figuur 8.19

Computersimulatie.



Figuur 8.20

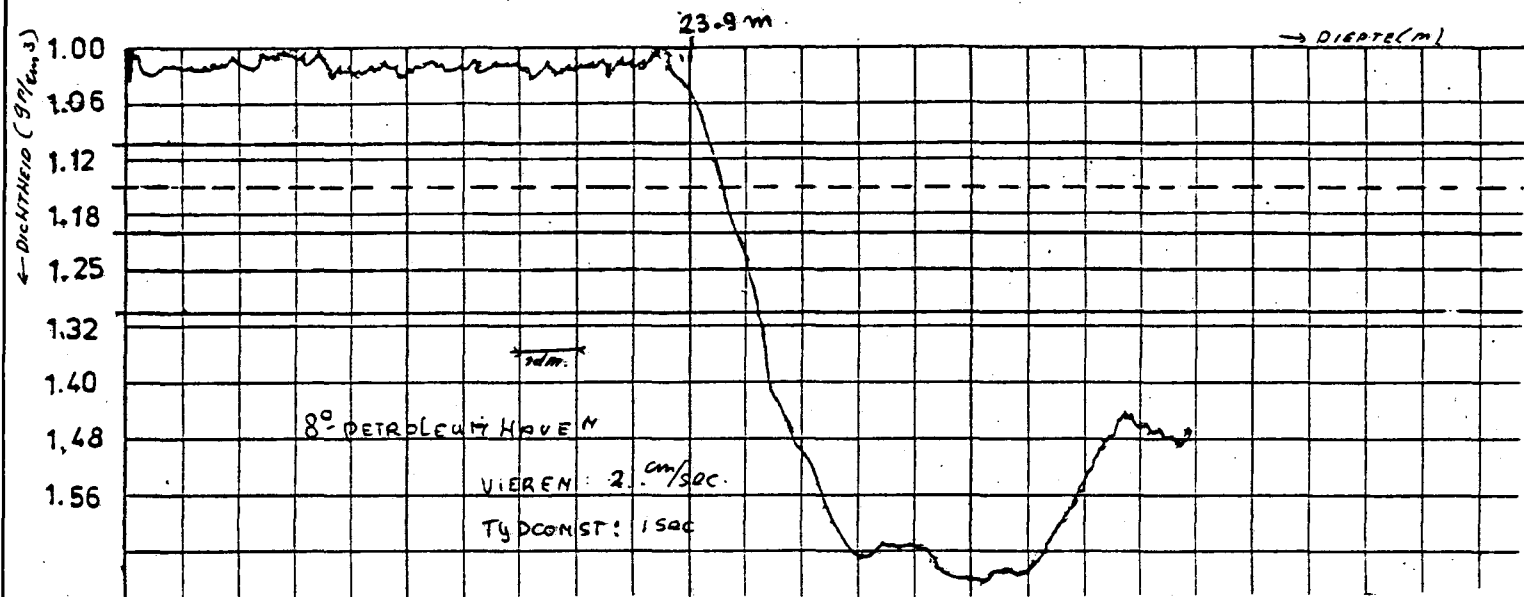
Gemeten en gesimuleerd signaal.

8.2.4. Backscattersonde, transmissiesonde en echolood parallel in de Achtste Petroleumhaven

Omdat voor nauwkeurige vergelijkende metingen met de radio actieve sondes (lage afviersnelheid) een stabiele verankering van het meetvoertuig wenselijk is en de hopperzuiger Geopotes verankerd lag in de Achtste Petroleumhaven, zijn langs zij deze zuiger radioactieve dichtheidsmetingen en echometingen verricht. Een backscatter en een transmissiemeting zijn aangegeven in de figuren 8.21 en 8.22. Ook hier blijkt weer dat de door de transmissiesonde geregistreeerde dichtheidscurve een gelaagdheid vertoont die uit de backscatter registratie niet naar voren komt. Van de opgenomen echolood signalen (ATLAS echolood) zijn er een vijftal weergegeven in fig. 8.23 (een signaal met omhullende en de omhullende van vier andere signalen).

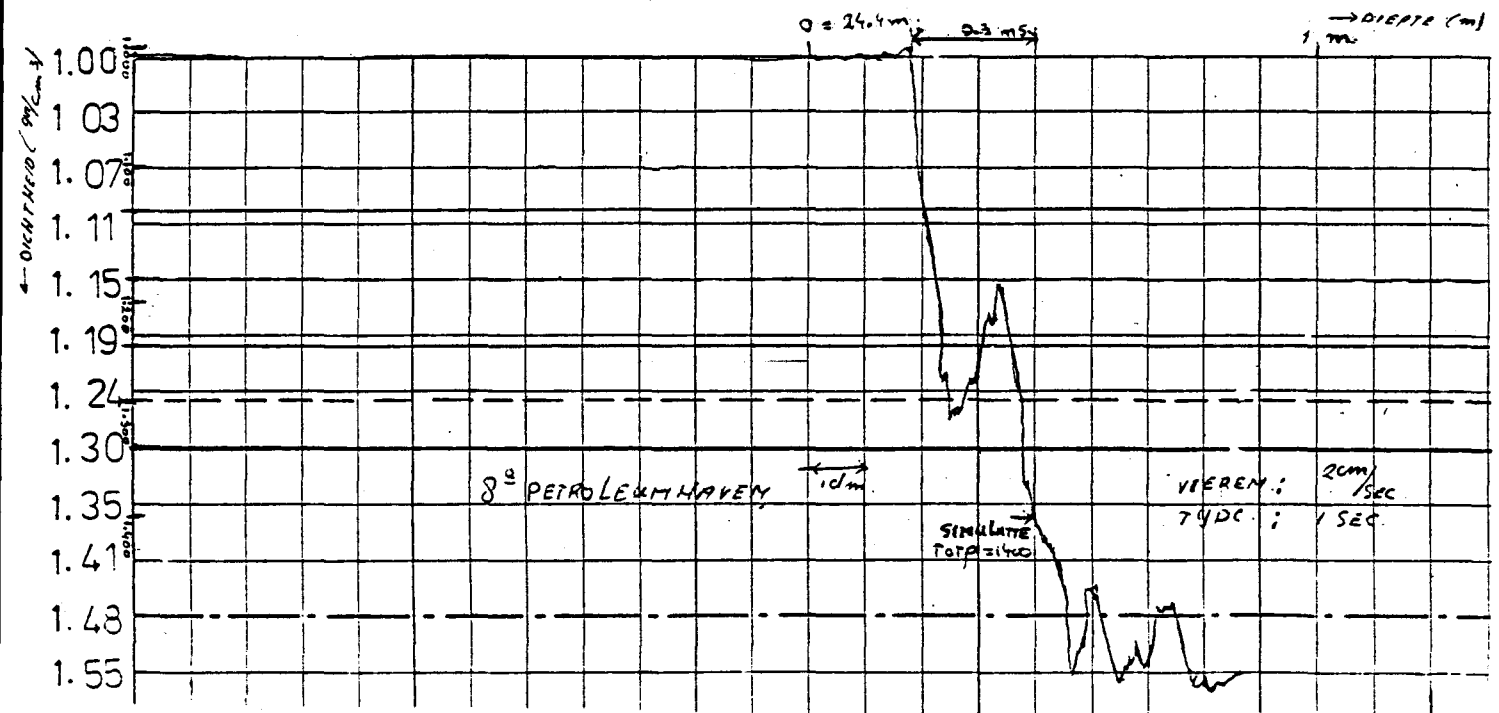
De integraal van deze signalen is weergegeven in figuur 8.24, waarbij de curves onderling verschoven zijn uit presentatie overwegingen. Doordat bij het integreren uitgegaan wordt van de modulus van het signaal, komen bij deze reconstructies van de dichtheid uit de echolood opnames de negatieve dichtheidsgradienten niet tot uiting.

De met behulp van de transmissiesonde gemeten dichtheid is ingelezen in de computer (zie figuur 8.25) en hieruit is het in figuur 8.26 weergegeven signaal gegenereerd.



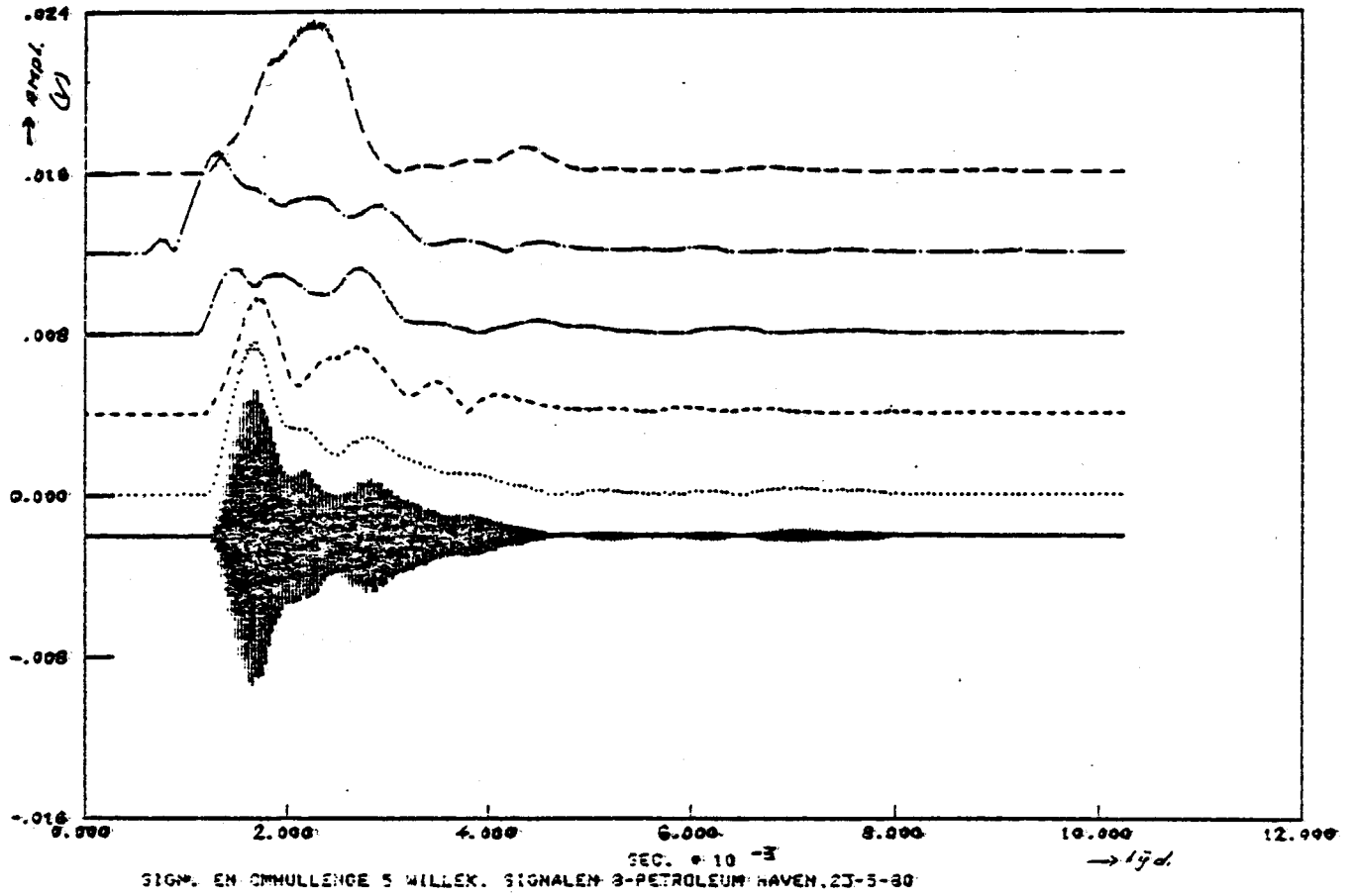
Figuur 8.21

Backscatter opname.



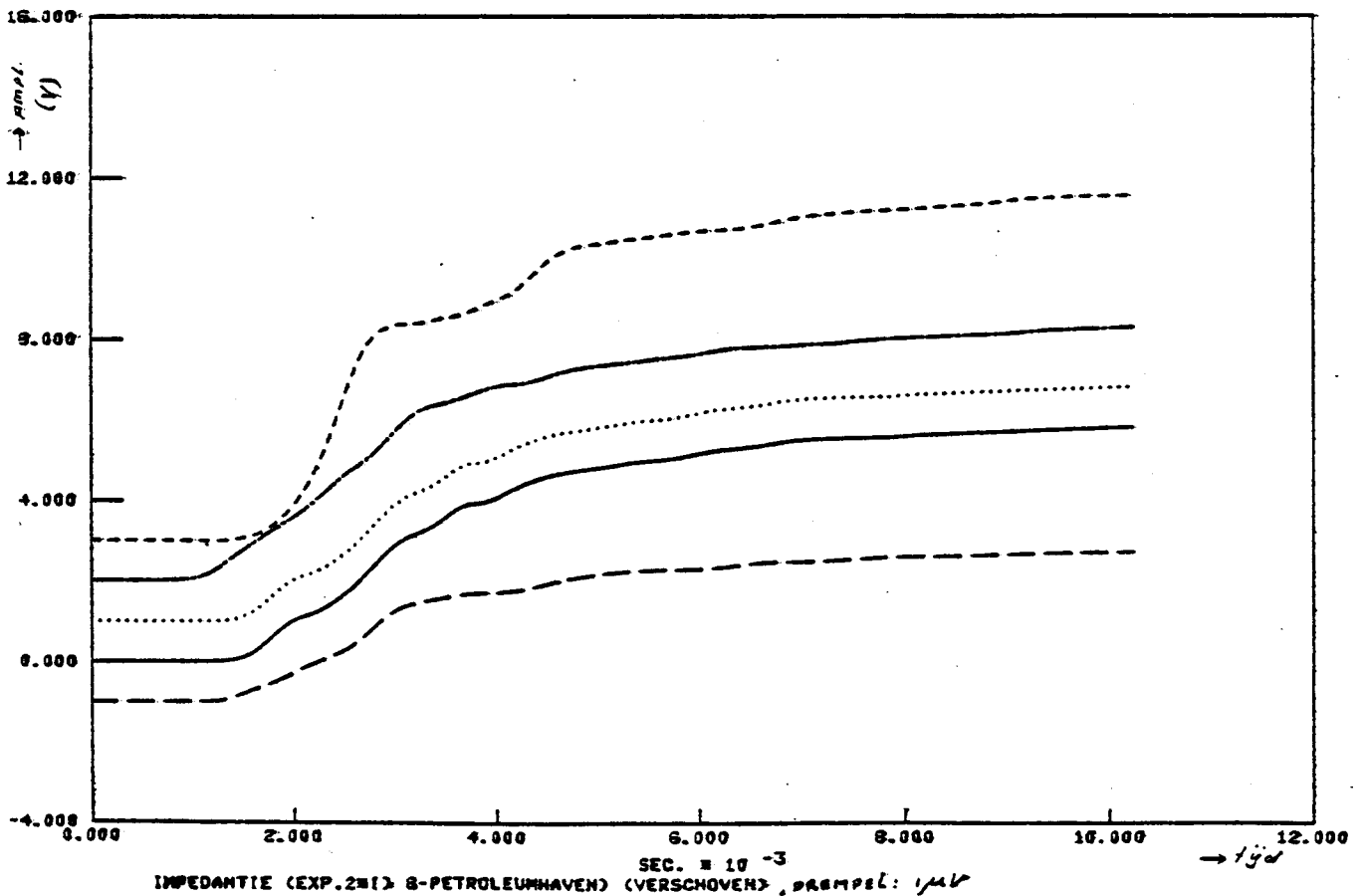
Figuur 8.22

Transmissie opname.



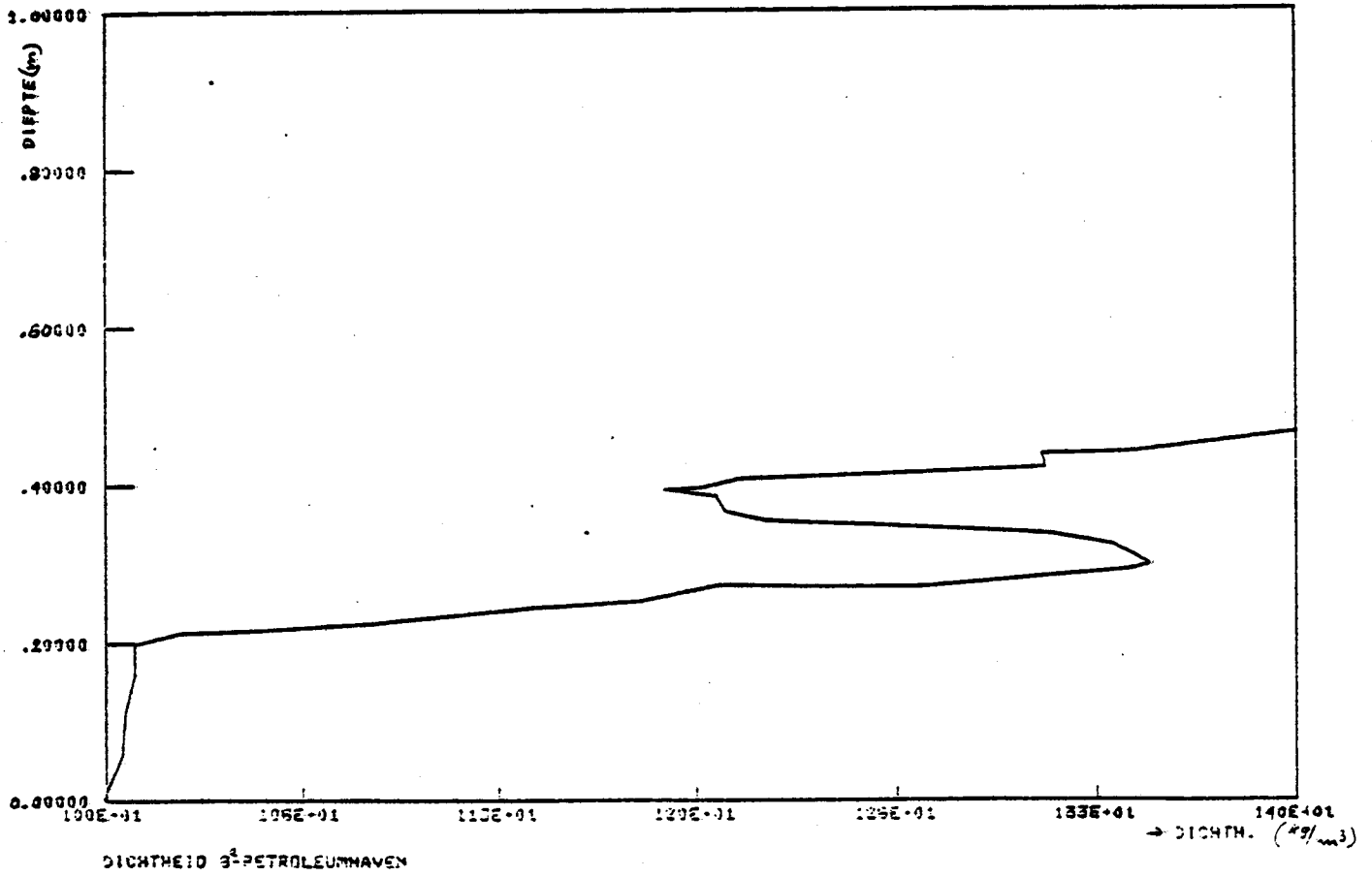
Figuur 8.23

Gemeten signalen.



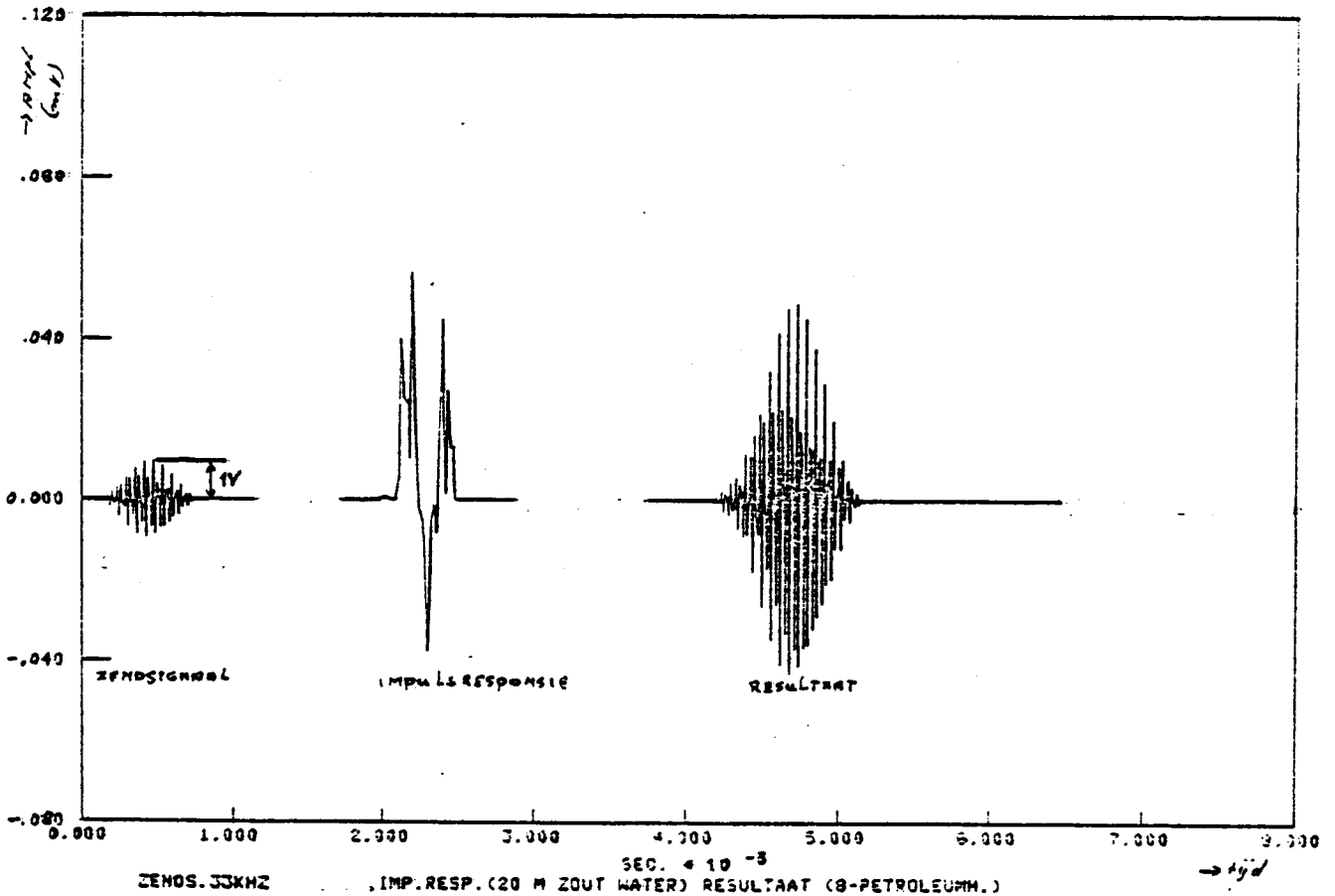
Figuur 8.24

Integralen bovenstaande signalen.



Figuur 8.25

Ingelezen dichtheid.



Figuur 8.26

Computer simulatie.

9. Conclusie

Uit de verrichte literatuurstudie, computersimulaties en metingen kan het volgende worden geconcludeerd:

7.1. Transmissie eigenschappen

Voor dichtheden van 1000-1400 kg/cm³ kan verwacht worden dat met de middellingsformule van Wood de geluidsnelheid in goede benadering berekend kan worden.

Wanneer er geen gasbellen in het slib aanwezig zijn of wanneer de hoeveelheid gas niet van de diepte afhangt dan zal de geluidsnelheid in het bovengenoemde dichtheidsgebied weinig veranderen, zodat de akoestische impedantie en de dichtheid op een schaalfactor na gelijk zijn.

De aanwezigheid van gasbellen in het slib zal een grote invloed op de geluidsnelheid hebben, gezien de te verwachten gasbeldiameters in verhouding tot de te gebruiken akoestische golflengte. Het zal bij de aanwezigheid van gas voor de berekening van het akoestisch impedantie verloop nodig zijn om of de geluidsnelheid parallel met de dichtheid mee te meten of om het verband tussen het gasgehalte en de dichtheid te kennen.

Het aanwezige gas bestaat vooral uit het slecht oplosbare methaan. Aangezien dit gas als laatste schakel in een aantal opeenvolgende biochemische bodemprocessen wordt gevormd, kan verwacht worden dat het zich vooral in het dichtere slib zal ontwikkelen.

Hieruit zal het ook moeilijker ontsnappen. In een zoutwater milieu zal geen of pas na lange tijd methaan gevormd worden. Hieruit wordt geconcludeerd dat in het voor het onderzoek interessante dichtheidsgebied (= dun slib tot 1200 à 1300 kg/m³) weinig storing door gas te verwachten is. Dit volgt ook uit de uitgevoerde metingen in een slibput, waarbij tot in de 1200 kg/m³ laag geen geluidsnelheidsvariaties groter dan 10% zijn geconstateerd.

Wel blijft het van groot belang bij metingen alert op de aanwezigheid van gas te zijn !

Voor de absorptie van het geluid in slib kan gebruik gemaakt worden van de formule van Hamilton. De in het havengebied gemeten absorpties stemmen goed met de berekende waarden overeen.

7.2. Reflectie eigenschappen.

Een reflectie model van de slibbodem is opgesteld waarmee een bij een gegeven dichtheidsverloop behorende akoestische responsie kan worden gegenereerd. In dit model wordt de invloed van multiple reflecties verwaarloosd, wordt de vergelijking van Wood toegepast voor de geluidsnelheid berekening en is voor de (smalbandige) simulaties de absorptie correctie smalbandig uitgevoerd.

De filterende werking van een zendsignaal op de impulsresponsie van de slibbodem is met een aantal voorbeelden toegelicht. Informatie over de trend van het verloop van de dichtheid vinden we in het zeer laagfrequente gedeelte van de impulsresponsie. Als gevolg van de filterende werking van een zendsignaal zal in een werkelijk ontvangen signaal geen trend informatie aangetroffen worden en zal hiervan een schatting gemaakt moeten worden door extrapolatie van het spectrum vanuit de gemeten frequentieband naar DC en door combinatie met puntmetingen (backscatter of transmissiesonde). Om een zo goed mogelijke schatting te kunnen maken dient een lage zendfrequentie gekozen te worden. Voor de informatie over de steilheid van de impedantiestappen dient het hoogfrequente deel van het spectrum gemeten te worden. Een afleiding is gegeven welke gebruikt kan worden bij de bepaling van het benodigde zendvermogen bij de verschillende zendfrequenties.

7.3 Metingen en simulaties.

Uit de metingen met standaard echolood apparatuur (18 kHz en 30 kHz) volgt dat het dunne slib vrij goed vlak uitloopt terwijl de overgang naar de vastere bodem veel meer varieert als functie van de horizontale coördinaten. Hieruit volgt dat om de tweede overgang goed te kunnen weergeven een echolood met een kleine openingshoek nodig is.

Vergelijking van de gegenereerde akoestische signalen waarbij uitgegaan is van de backscatter opnames, met de ontvangen signalen (18 kHz en 30 kHz) geeft een slecht resultaat vanwege het te ver uit elkaar liggen van de frequentiebanden van de gegenereerde impulsresponsie en het zendsignaal.

De transmissie sonde heeft een beter oplossend vermogen en zal daarom de hogere frequenties van de impulsresponsie beter weergeven. Vergelijking met de standaard echolood ontvangen signalen gaf danook een beter resultaat.

Een nadeel is de geringere penetratie van de transmissie sonde (tot ca. 1300 kg/m^3).

7.4. Eind conclusie

Resumerend kan gesteld worden dat met een echolood een schatting gemaakt kan worden van het dichtheidsverloop in een slibbodem. Hierbij dient opgemerkt te worden dat detektie van de trend van het dichtheidsverloop niet mogelijk is, aangezien niet voldoende laag frequent gemeten kan worden. In feite worden alleen veranderingen in de akoestische impedantie gemeten. Door nu met een zeer laagfrequent echolood te werken kunnen zeer langzame impedantieveranderingen gemeten worden en zal de schatting van het werkelijke dichtheidsverloop steeds beter worden.

De informatie van de werkelijk voorkomende trend zal aan het akoestisch gemeten dichtheidsverloop moeten worden toegevoegd door vergelijking met een (punt) meting, waarbij wel het trendverloop wordt gemeten: de "calibratie" van het "slibecholood". Uit het voorgaande blijkt het belang van de (calibratie) puntmeting voor wat betreft zijn juiste weergave van het dichtheidsverloop.

De frequentie bandbreedte van een dergelijk echolood naar de hoge frequenties is van belang om snelle overgangen in de dichtheid met voldoende nauwkeurigheid te kunnen weergeven en om de vergelijking met de puntmetingen over een voldoende grote bandbreedte mogelijk te maken.

10. Literatuur opgave

- 1 — "Minimalisering Kosten Onderhoudsbaggerwerk"
Een kort overzicht over de activiteiten van de
verschillende projectgroepen.
Gezamenlijke uitgave van RWS en Gem. Rott. (dec.1979)
- 2 — "Onderzoek Eigenschappen van slib" verslag litera-
tuuronderzoek Waterloopkundig Laboratorium, R988
(november 1976)
- 3 — "Evaluatie Consolidatie-Onderzoek van Slib onder
Water", Interim-rapport MKO-project B 103 (sept.1979)
- 4 Hamilton, E. "Elastic Properties of Marine Sediments"
Jour. of Geophysical Res., Vol 76, nr. 2 (jan.1971)
- 5 Clay, C en "Acoustical Oceanography, principles and applications"
Medwin, H. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons,
New York (1977)
- 6 Hedberg, H. en "Methane Generation"
Princeton, N.J. The Oil and Gas Journal (mei 1979)
- 7 Stoll, R. "Acoustic Waves in Ocean Sediments"
Geophysics, Vol 42, nr. 4 (juni 1977)
- 8 Wood, A.B. "A Textbook of Sound"
G. Bells and Sons LTD, London (1970)
- 9 Urlick, R.J. "Principles of Underwater Sound, Second Edition"
Mc Graw-Hill Book Company (1975)
- 10 Hamilton, E. "Compressional-Wave Attenuation in Marine Sediments"
Geophysics, Vol. 37, nr. 4 (aug. 1972)
- 11 — "Dichtheidsmetingen In-Situ"
RWS-dir. Benedenrivieren.
- 12 Anderson, L. en "Acoustics of Gas-Bearing Sediments"
Hampton, L. J.A.S.A., Vol. 67, nr.6, (juni 1980)
- 13 — "Non Lineair Echolood" verslag proefnemingen.
februari 1978, RWS-Dir. Benedenrivieren.

B I J L A G E N

Bijlage A.A. Radioactieve dichtheidsmeters.

De werking en toepassing van de radioactieve dichtheidsmeters is uitvoerig beschreven in [11], in deze bijlage komen hoofdzakelijk de voor de vergelijking van de akoestisch en radioactief bepaalde dichtheidscurves van belang zijnde gegevens aan de orde.

Bij de metingen is gebruik gemaakt van een transmissie- en een backscattersonde (zie fig. A.1).

Bij een transmissiesonde neemt de ontvangen directe straling af bij toenemende dichtheid van het tussenliggend medium, terwijl bij een backscattersonde bij lage dichtheden de ontvangen stralingsintensiteit toeneemt bij toenemende dichtheid en bij grotere dichtheden afneemt bij toenemende dichtheid als gevolg van verstrooiing en absorptie. Bij de slibdichtheidsmeter is dit laatste het geval.

Met de beide sondes kan dynamisch gemeten worden, sondeertechisch is de backscattersonde echter gunstiger.

Aangezien bij de akoestische metingen met name de harde overgangen in de dichtheid geregistreerd worden, spelen de middelingshoogte en de hysteresiseffecten van de radioactieve sondes een belangrijke rol. Bij de backscattersonde is de afstand tussen de bron en de detector 20 cm zodat ook het scheidend vermogen hiertoe beperkt is. (zie fig. A.2). De transmissiesonde is in dit opzicht met een oplossend vermogen van 1 cm veel gunstiger.

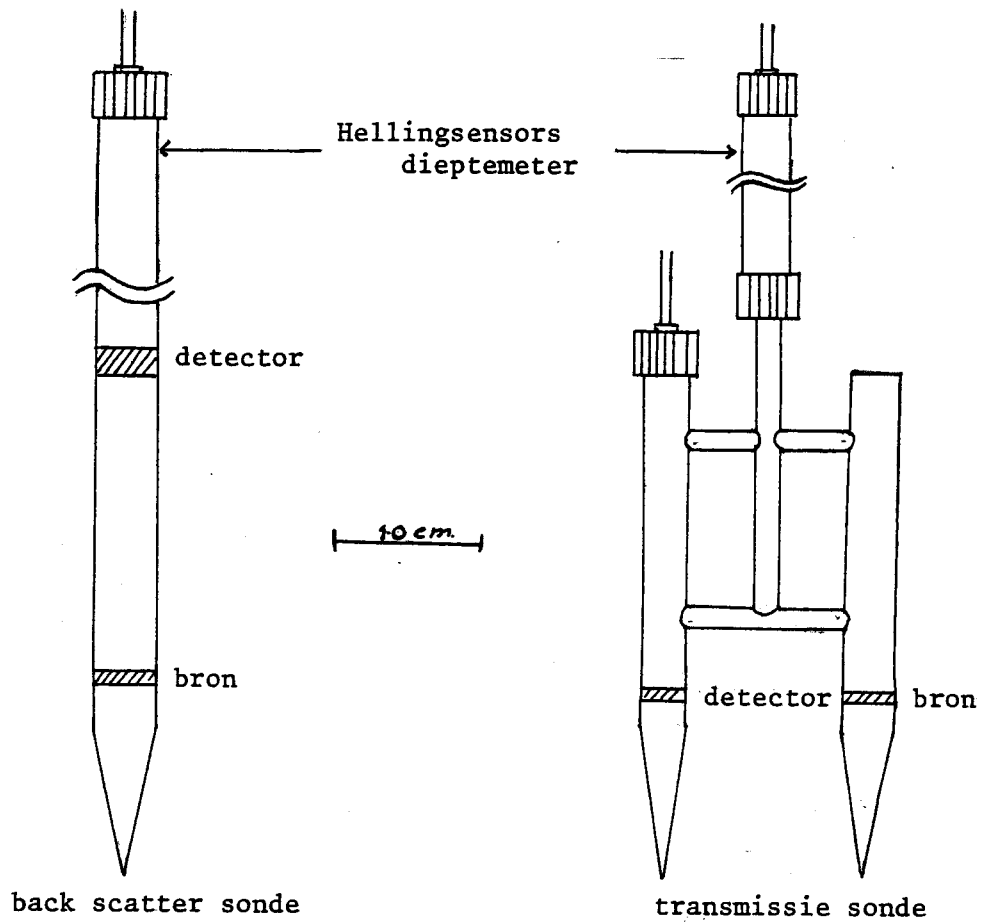
De hysteresiseffecten worden veroorzaakt door de in het systeem noodzakelijkerwijs opgenomen tijdconstante; de ontvangen straling is namelijk een statistisch proces (zie figuur A.3).

Om een nauwkeurige registratie te maken zou een grote tijdconstante en een lage viersnelheid nodig zijn, dit is echter als gevolg van de onstabielheid van het meetvaartuig onmogelijk. De gebruikelijke tijdconstante is een compromis tussen sondeersnelheid en nauwkeurigheid en heeft tot gevolg dat er nog statistische fluktuaties optreden en dat ook de hysteresis een rol blijft spelen.

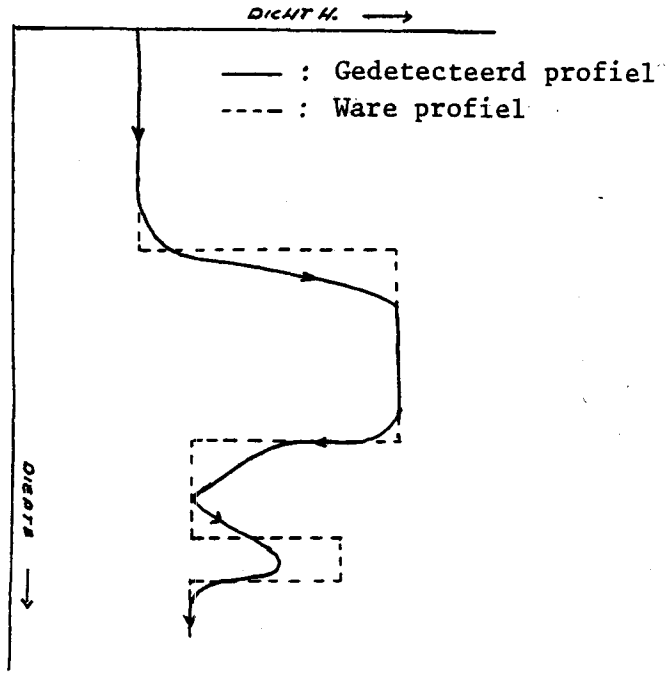
Bij de metingen in de Mississippihaven (zie hoofdstuk 8.2.2.) zijn vergelijkende metingen gedaan met de transmissiesonde en de backscattersonde; tevens is de invloed van de tijdconstante en de sondesnelheid onderzocht. Het meetvaartuig lag hierbij verankerd. De resultaten zijn weergegeven in de figuren A.4 t/m A.17 (Ook de hellingshoek van de sensor is in de figuren aangegeven).

Bij de figuren kan het volgende opgemerkt worden:

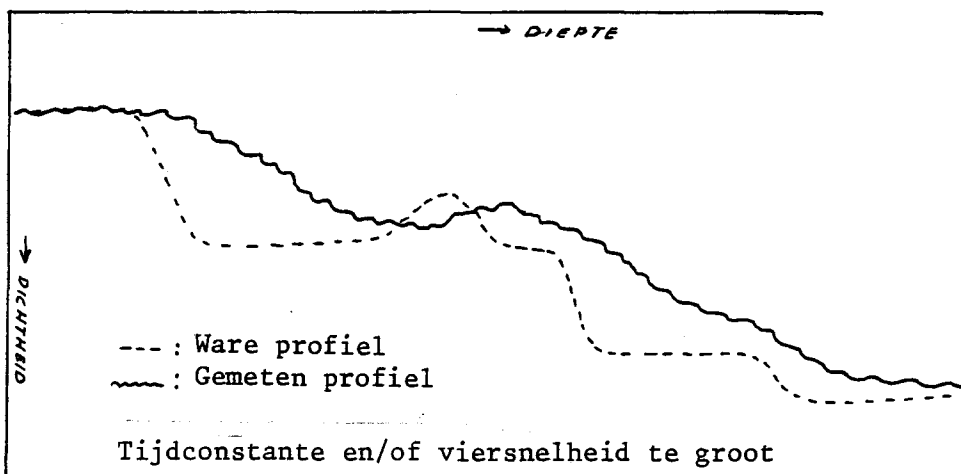
- De reproduceerbaarheid van de metingen is vrij goed (zie fig. A.4 t/m A.8)
- Een kleine tijdconstante geeft een sterk fluctuerend signaal (verge-lijk fig. A.8 en A.9).
- Bij de gebruikelijke tijdconstante en viersnelheid (zie fig. A.10) gaat informatie verloren en fluctueert het signaal vrij sterk (vergelijk fig. A.10 met A.4). Hieruit volgt dat de fluctuaties die optreden bij de standaard dichtheidsmetingen niet geïnterpreteerd mogen worden als een gelaagdheid in het slib.
- Uit een transmissieopname komt veel meer detail naar voren dan uit een backscatteropname (vergelijk fig. A.11 en fig. A.17).
- Bij lage viersnelheden kunnen de scheepsbewegingen de meting nadelig beïnvloeden (zie bijvoorbeeld fig. A.13).
- "Vierend" of "halend" meten geeft een verschil te zien als gevolg van hysteresis; mede veroorzaakt doordat er slib aan de transducent blijft kleven (zie fig. A.4, A.11, A.14 en A.16).



Figuur A.1 Radio actieve dichtheidsmeters.



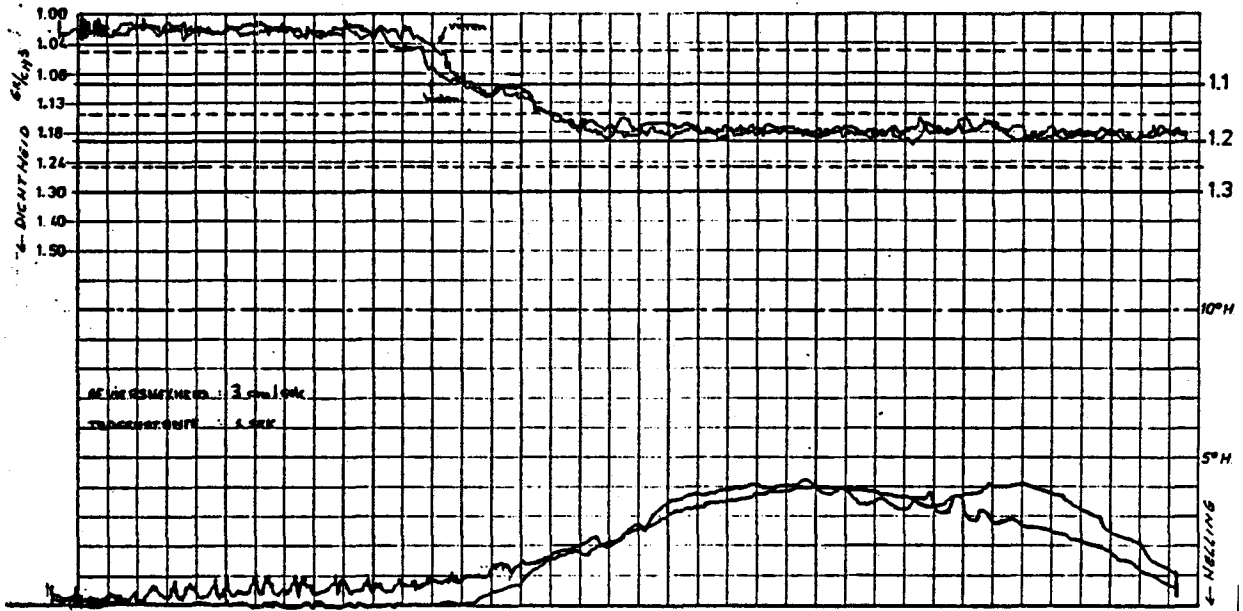
Figuur A.2 Invloed middelingshoogte back scattersonde.



Figuur A.3 Invloed tijdconstante en viersnelheid.

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 6-12-1979
 Ratemeterbox Serie N° NH 84+85
 702



Bij Back Scattering Sonde gebruik
 volgende waarden instellen:

Hoeveelheid	1029 Volt	Gain	150
Range	0.4 Lin	Fine Gain	Midden pos
Modus	1	Schakelaars	op
Zero span	1.0 Volt		
ΔE	1.50 Volt		
		Tijdbasis	0.2 sec.

N° 1 Tijd: 12.00 0= dm. Positie: x I
 corr.= dm. y

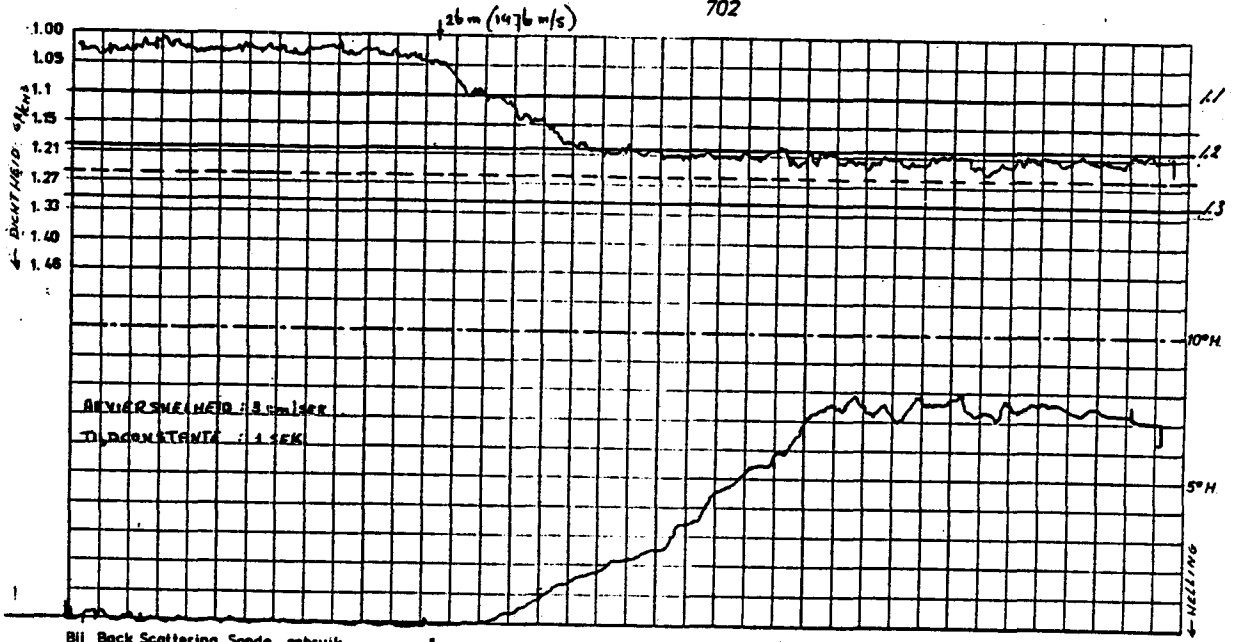
1cm. = 1 / 2 dm.

Opn. d.d.: 25-4-'80

Figuur A.4

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N° NH 84+85
 702



Bij Back Scattering Sonde gebruik
 volgende waarden instellen:

Hoeveelheid	1029 Volt	Gain	150
Range	0.4 Lin	Fine Gain	Midden pos
Modus	1	Schakelaars	op
Zero span	1.0 Volt		
ΔE	1.50 Volt		
		Tijdbasis	0.2 sec.

N° 2 Tijd: 12.04 0= dm. Positie: x I
 corr.= dm. y

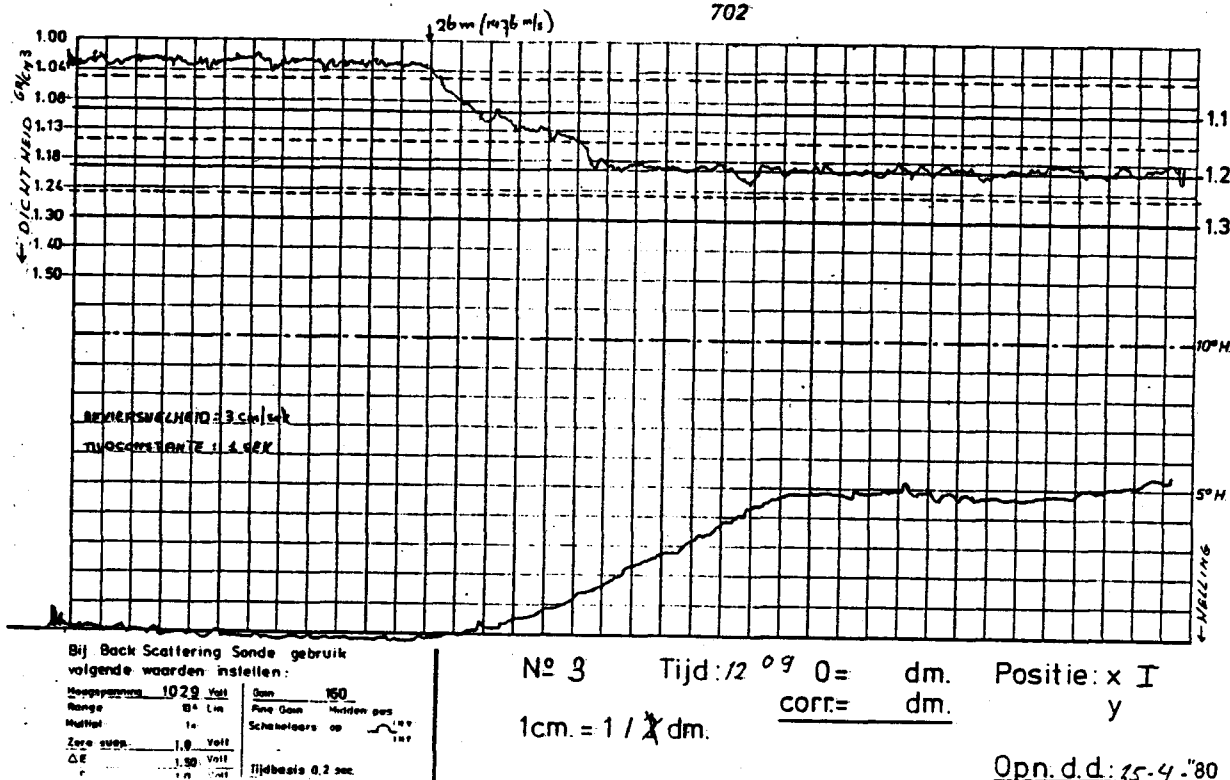
1cm. = 1 / 2 dm.

Opn. d.d.: 25-4-'80

Figuur A.5

BACK SCATTERING

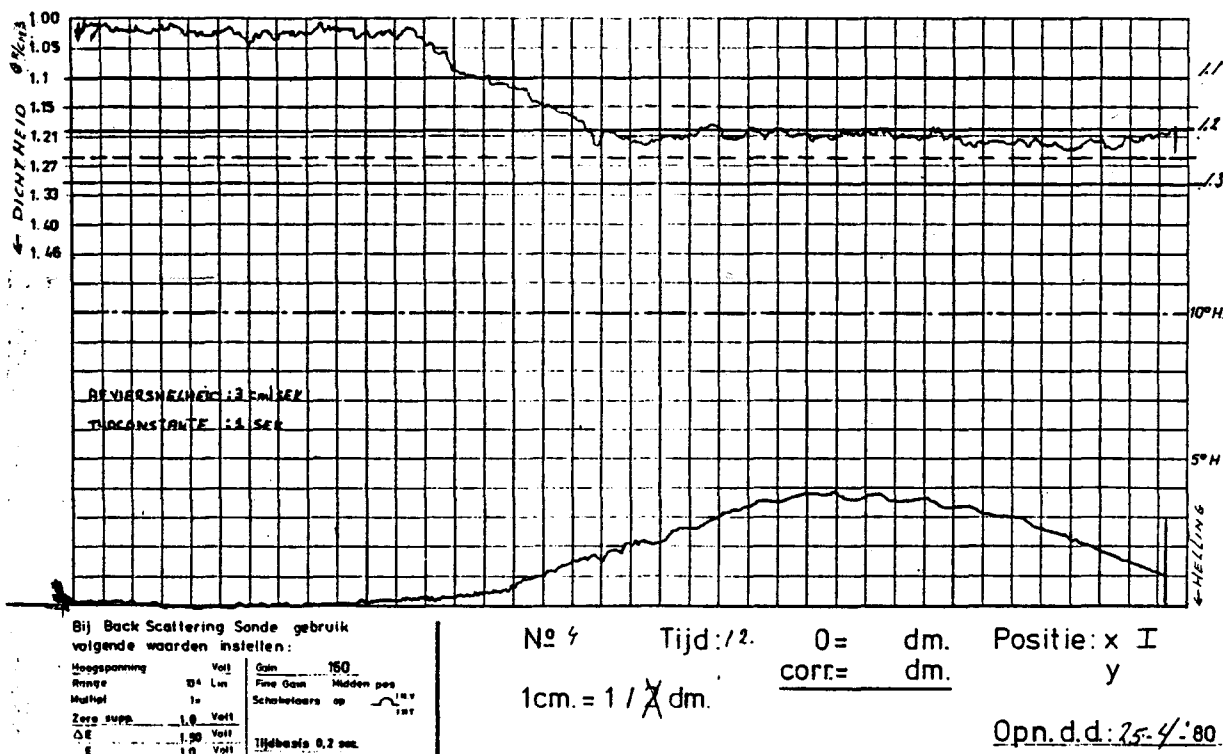
Dichtheidscalibratie d.d.: 6-12-1979
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



Figuur A.6

BACK SCATTERING

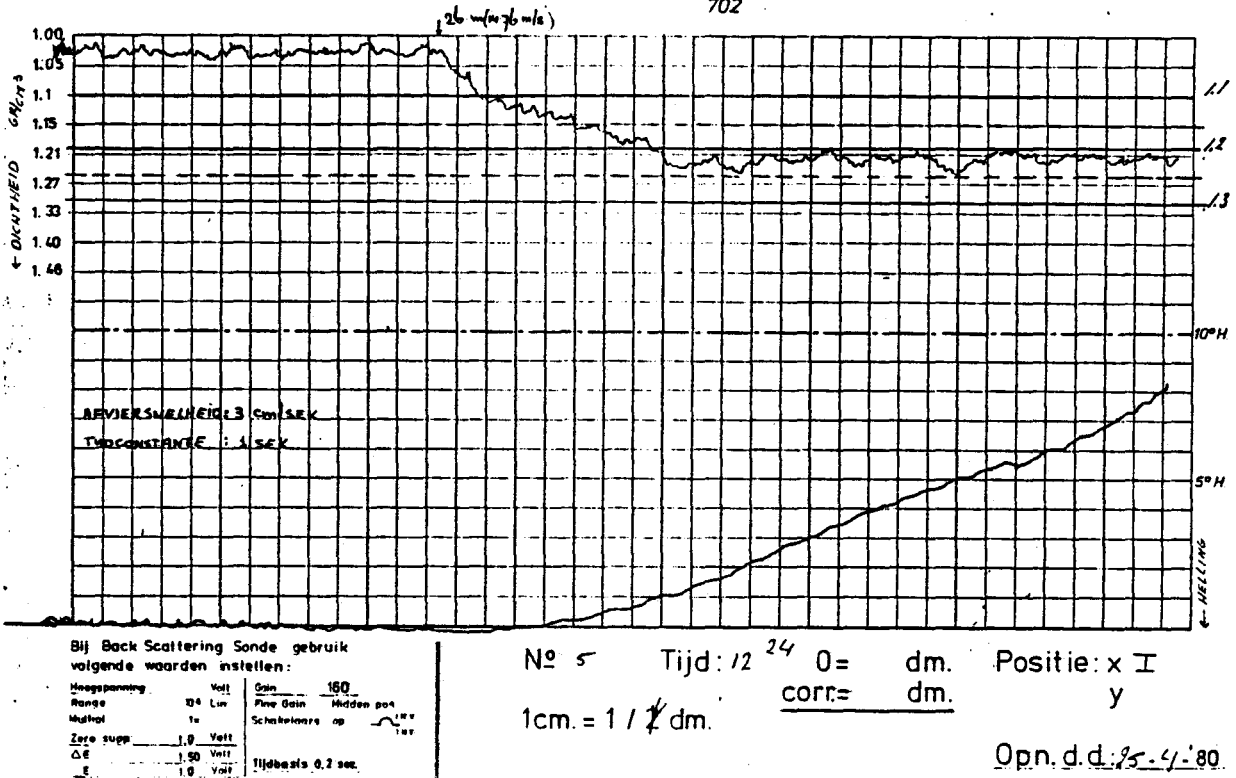
Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



Figuur A.7

BACK SCATTERING

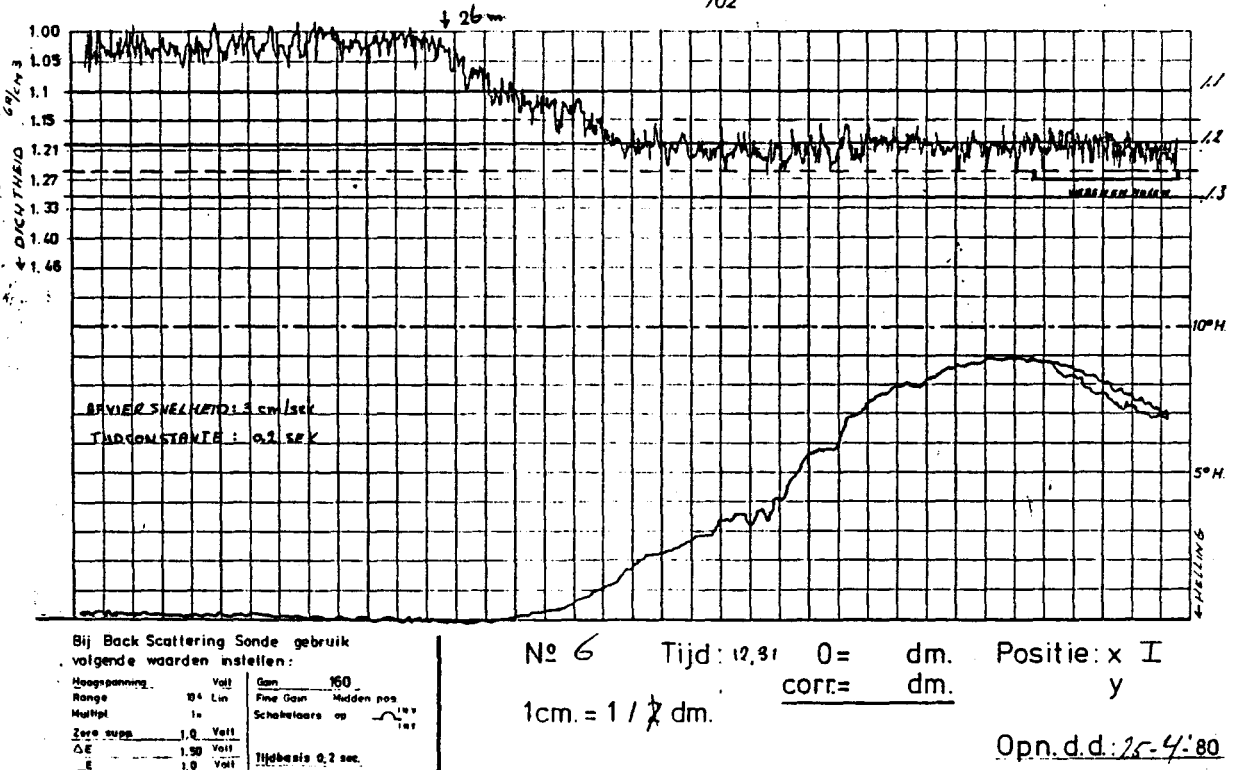
Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



Figuur A.8

BACK SCATTERING

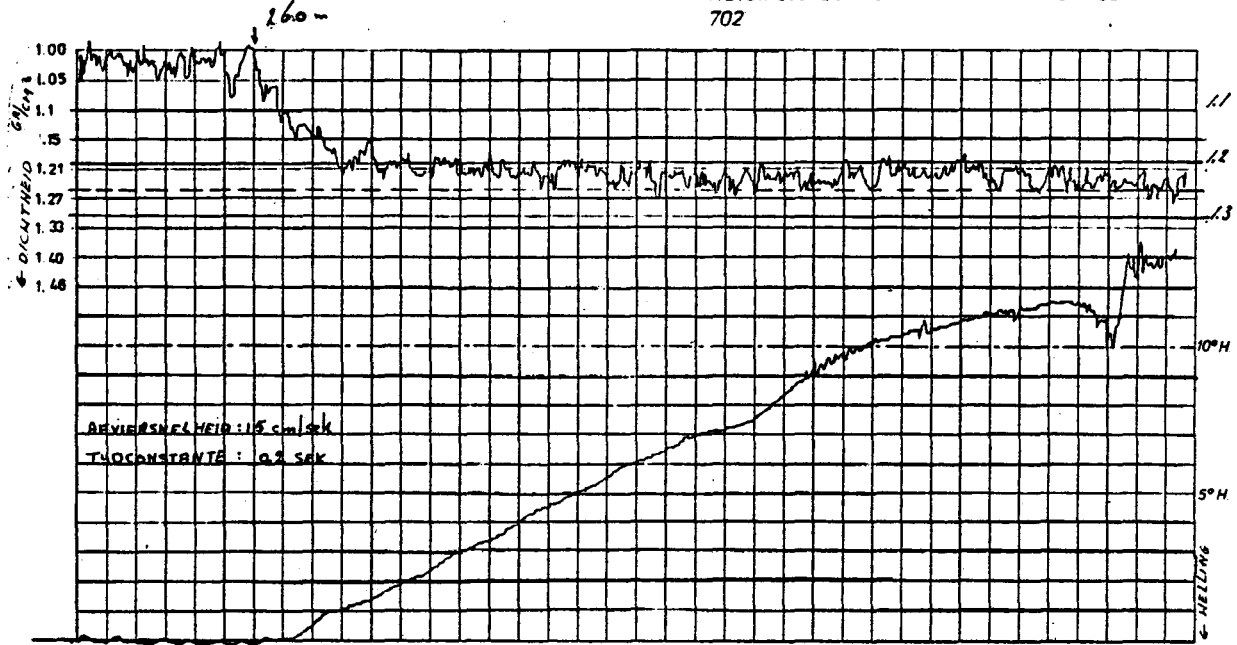
Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



Figuur A.9

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N° NH 84+85
 702



Bij Back Scattering Sonde gebruik volgende waarden instellen:

Hoogspanning	Volt	150
Range	10 ² Lin	Fine Gain
Multipl	1x	Schakelaars op
Zero supp	1.0 Volt	
ΔE	1.50 Volt	
E	1.0 Volt	Tijdbasis 0.2 sec

N° 7 Tijd: 12³³ 0 = dm. Positie: x I
 corr = dm. y

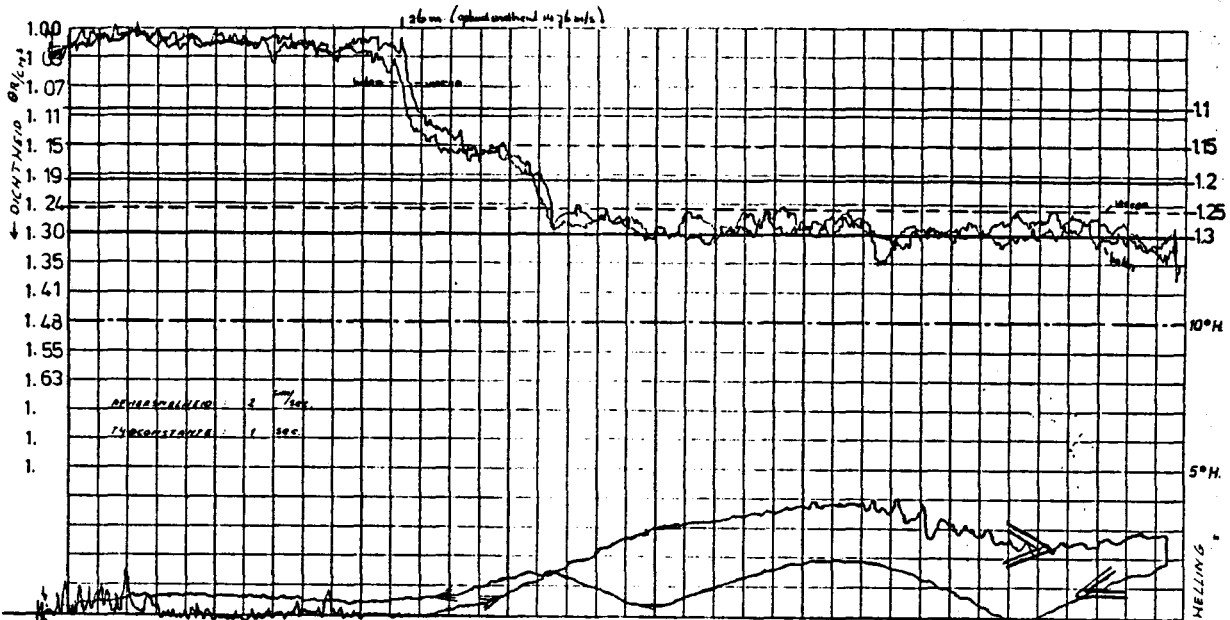
1cm. = 1/2 dm.

Opn. d.d. 28-4-80

Figuur A.10

TRANSMISSIE

Dichtheidscalibratie d.d.: 25-4-80
 Ratemeterbox Serie N° 687



Bij Transmissie Sonde gebruik volgende waarden instellen:

Hoogspanning	Volt	Gain	320
Range	10 ² Lin	Fine Gain	
Multipl	1x	Schakelaars op	
Zero supp	Volt		
ΔE	1 Volt		
E	2.5 Volt		

N° 8 Tijd: 13²⁹ 0 = dm. Positie: x II
 corr = dm. y

1cm. = 1/2 dm.

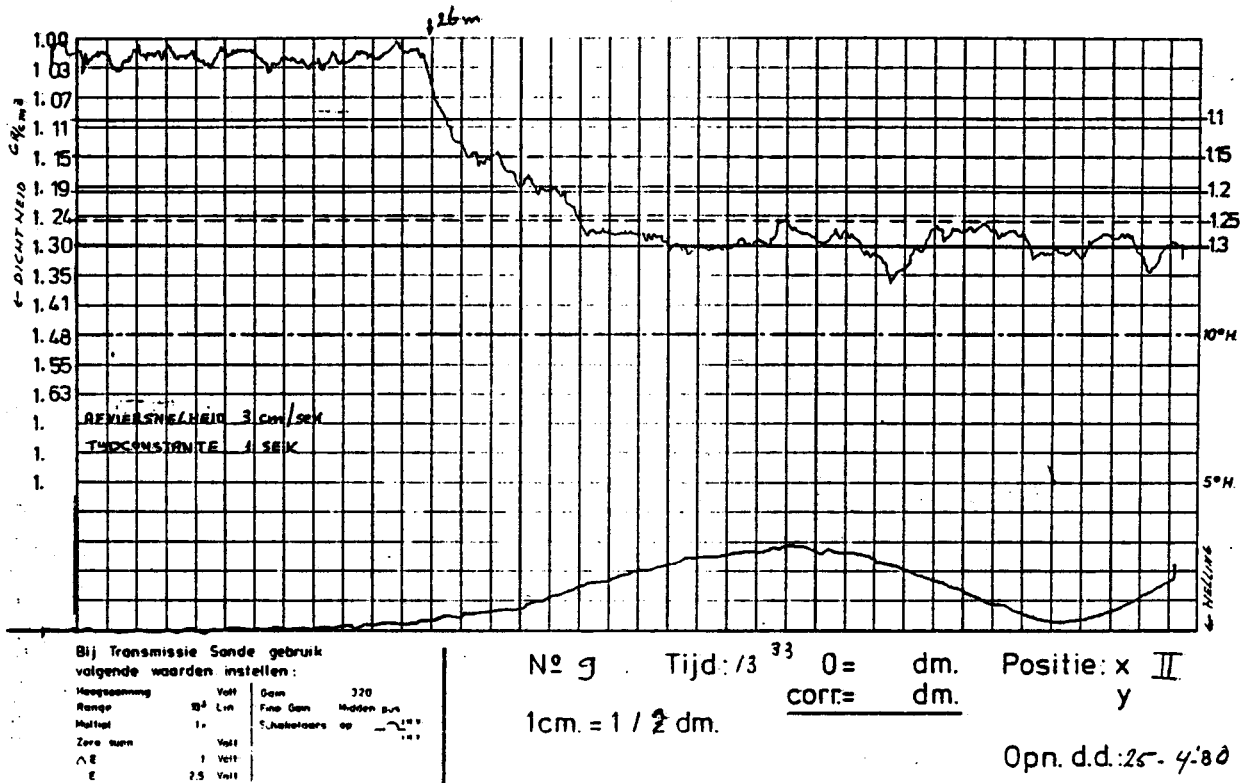
BEWEGINGSVELOCITY: 3 cm/sek
 TIJDCONSTANTE: 1 sek

Opn. d.d. 25-4-80

Figuur A.11

TRANSMISSIE

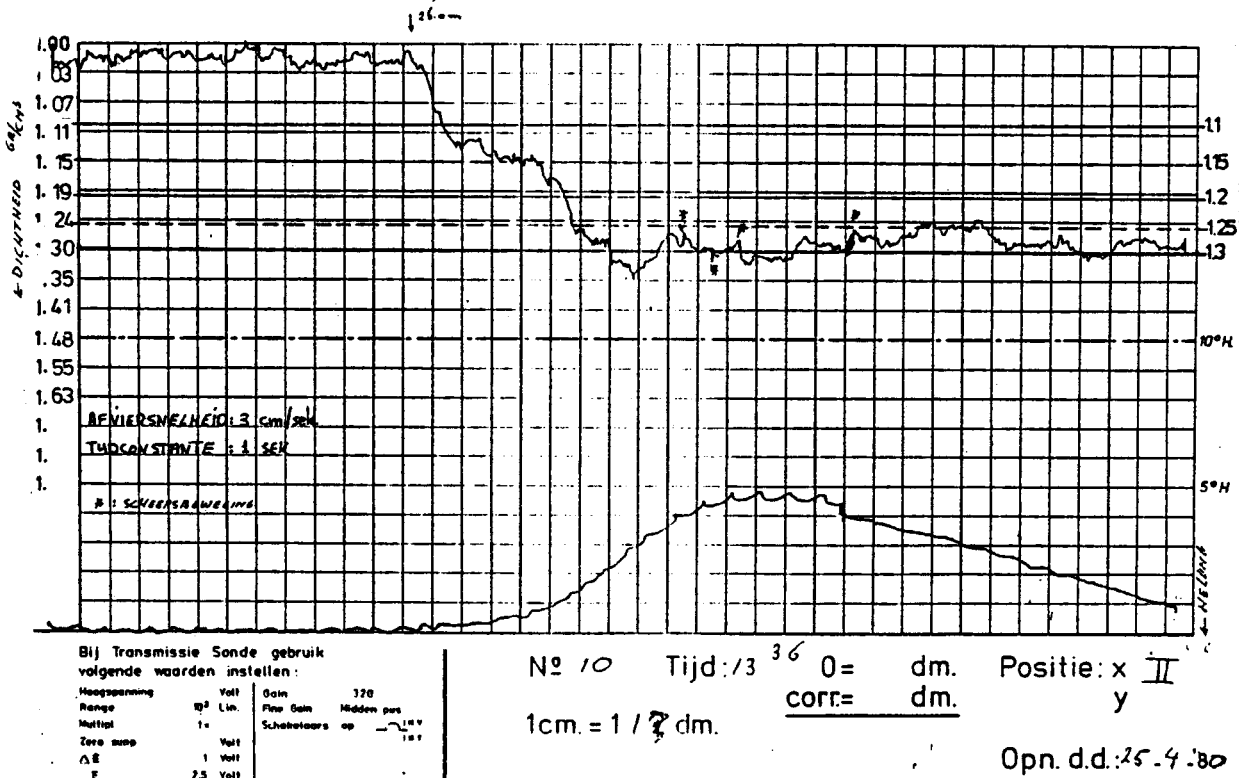
Dichtheidscalibratie d.d.: 25-4-80
 Ratemeterbox Serie N^o 687



Figuur A.12

TRANSMISSIE

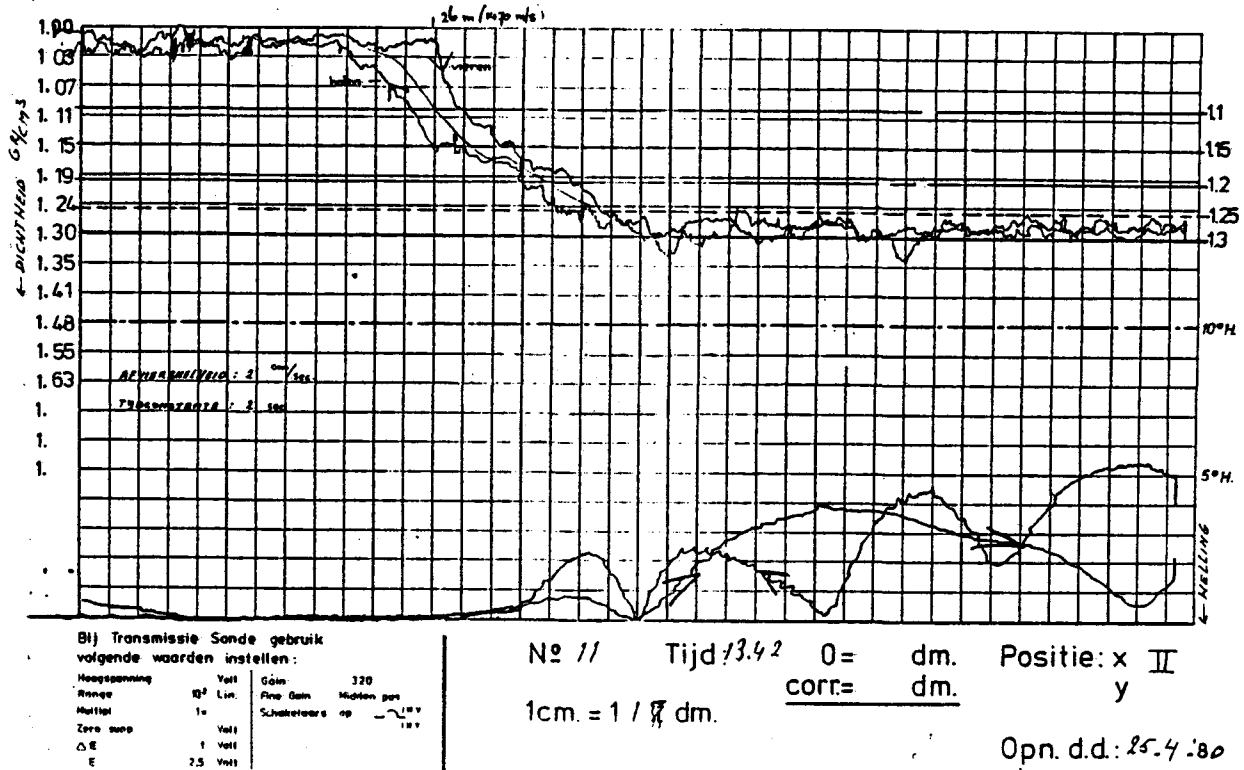
Dichtheidscalibratie d.d.: 25-4-80
 Ratemeterbox Serie N^o 687



Figuur A.13

TRANSMISSIE

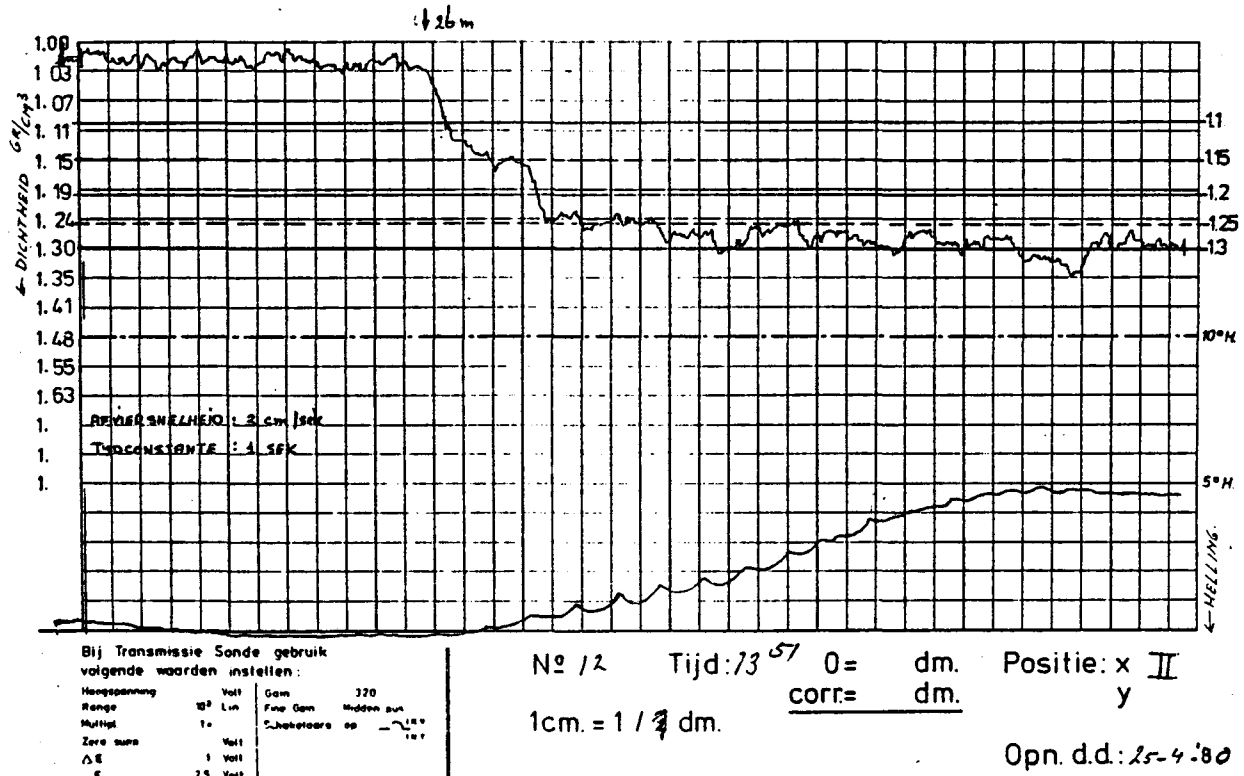
Dichtheidscalibratie d.d.: 25-4-80
 Ratemeterbox Serie N° 687



Figuur A.14

TRANSMISSIE

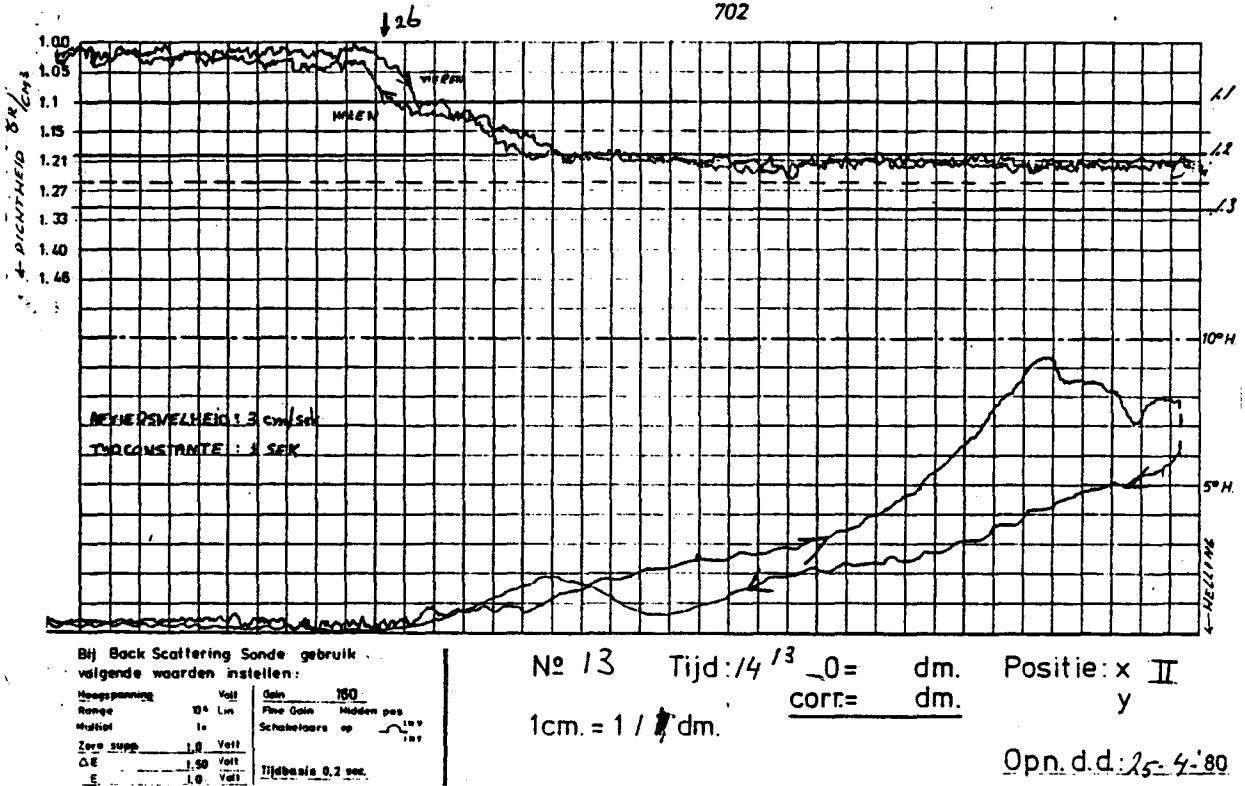
Dichtheidscalibratie d.d.: 25-4-80
 Ratemeterbox Serie N° 687



Figuur A.15

BACK SCATTERING

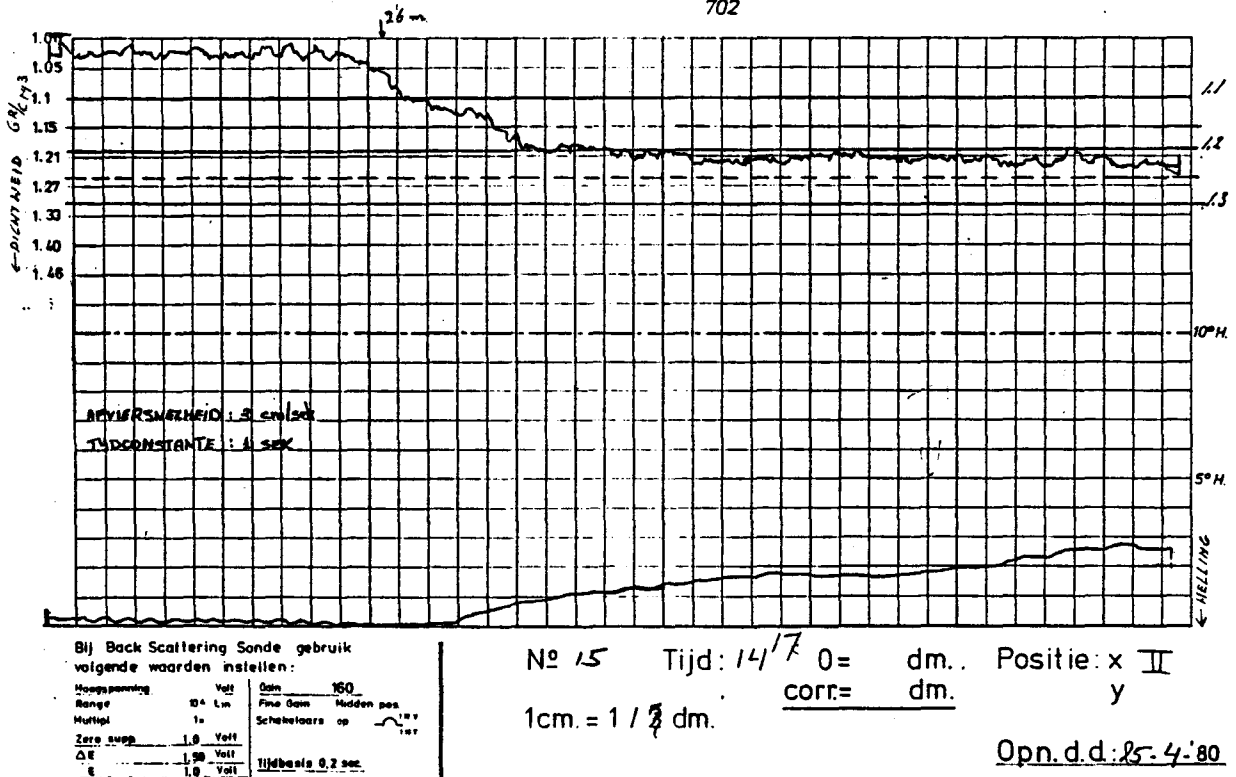
Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



Figuur A.16

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 28-3-80
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



Figuur A.17

BIJLAGE BB. Contrôle berekeningen benodigd akoestisch vermogen.

In deze bijlage passen we de in hoofdstuk 7. afgeleide formules toe op de twee bij de metingen gebruikte echoloden en een parametrisch echolood zoals gebruikt door Rijkswaterstaat bij vroegere experimenten [13].

De formules waar we bij de berekeningen gebruik van maken zijn:

$$NL_{ak} = SPL + 10 \log B-DI \quad \text{dB re } 1 \mu\text{Pa} \quad (B.1) = (7.3)$$

Hydrofoon gevoeligheid M (op grond van metingen en theorie)

$$M = -78 - 20 \log f \quad \text{dB re } 1 \text{ V/Pa} \quad (B.3)$$

f = frequentie in MHz

$$EL = 51 + 10 \log P_{ak} + DI + R - 40 \log r - 2\alpha h - 2(r-h) k f \quad \text{dB re } 1 \text{ Pa} \\ (B.4) = (7.12)$$

Elac echolood

$$SPL = +50 \text{ dB}$$

$$\theta = 12^\circ \Rightarrow DI \approx 23 \text{ dB}$$

$$B \approx 1000\text{Hz} \Rightarrow 10 \log B = 30 \text{ dB}$$

$$P_{ak} = 320 \text{ W (zendvermogen } 400 \text{ W, aangenomen rendement } 80\%)$$

$$r = 24,5 \text{ m}$$

$$h = 24 \text{ m}$$

$$k \approx 0,1$$

$$R \approx -60\text{dB}$$

} situatie Calandkanaal

$$f = 18\text{kHz}$$

$$\alpha \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m}$$

Hieruit volgt met (B.1) voor het ruislevel:

$$NL_{ak} = 57 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$$

$$R = -63 \text{ dB re } 1 \text{ Pa}$$

met (B.4) voor het echo level:

$$EL \approx -19 \text{ dB re } 1 \text{ Pa}$$

en voor de hydrofoongevoeligheid: (B.3)

$$M = -43 \text{ dB re } 1 \text{ V/Pa}$$

Dit betekent voor de elektrische spanning over de transducent:

signaal: 0,8 mV

ruis : 5 μ V

Dit geeft een signaal-ruis verhouding van 160; ook bij de metingen is de signaal-ruis verhouding groot gebleken. (De ook nog aanwezige elektrische ruis wordt bij deze berekeningen niet in rekening gebracht.)

Navitronic echolood

$$\theta = 30^\circ \Rightarrow DI = 16 \text{ dB}$$

$$B = 8 \text{ kHz} \Rightarrow 10 \log B = 39 \text{ dB}$$

$$P_{ak} = 480 \text{ W (zendvermogen } 600 \text{ W, aangenomen rendement } 80\%)$$

$$f = 30 \text{ kHz}$$

$$R = -60 \text{ dB}$$

Overige gegevens als bij Elac berekening

Hieruit volgt:

$$NL_{ak} = 73 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$$

$$R = -47 \text{ dB re } 1 \text{ Pa}$$

$$EL \approx -31 \text{ dB re } 1 \text{ Pa}$$

$$M \approx -47,5 \text{ dB re } 1 \text{ V/Pa}$$

electrische spanningen:

signaal: 0,12 mV

ruis : 18 μ V

Ook deze signaal-ruisverhouding van 7 komt in orde grootte overeen met de gemeten waarde.

Parametrisch echolood:

Uitgaande van gegevens van Rijkswaterstaat [13] en de gegevens van het hierin vermelde echolood, berekenen we het laagfrequent akoestisch vermogen van het parametrisch echolood.

Uit experimenten [13] is gebleken dat een echo opgevangen kan worden van een voorwerp dat zich bevindt onder 5 meter zand en 20 meter water.

gegevens:

$R \approx -6\text{dB}$ (harde overgang bijv. zand-staal)

$h = 20\text{ m}$

$r = 25\text{ m}$

$\text{SPL} = 55\text{dB}$

$\theta = 6^\circ \Rightarrow \text{DI} = 30\text{dB}$

$B = 20\text{ kHz} \Rightarrow 10 \log B = 43\text{dB}$

$k \approx 0,3$ (medium zand, zie [10])

$f = 10\text{kHz}$

$\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m.}$

elektrisch zendvermogen: 6KW

Hieruit volgt:

$\text{EL} \approx 10 \log P_{\text{ak}} - 62\text{dB re } 1\text{Pa}$

$\text{NL}_{\text{ak}} = 68\text{dB re } 1\mu\text{Pa}$

$\text{RN} = -52\text{dB re } 1\text{Pa}$

Voor de akoestische druk geldt nu:

signaal: $p = \sqrt{P_{\text{ak}}} \cdot 0,8 \text{ mPa}$

ruis : $P_{\text{n}} = 2,5 \text{ mPa.}$

Als nu de signaal-ruisverhouding 2 is bedraagt het akoestisch vermogen

$P_{\text{ak}} = 40\text{W}$. Hetgeen overeenkomt met een conversierendement elektrisch \rightarrow

akoestisch van 0,7%. Een conversierendement $< 1\%$ is een voor een parametrisch echolood reële waarde.

Bijlage C. Meetrapport "Geluidsnelheidsmetingen
in de Rotterdamse havens"
d.d. 26 februari 1980.

N.B. De in paragraaf 1. behandelde geluidsnelheid
in een water-gas mengsel is niet in de Bijlage
opgenomen, aangezien dit onderwerp in hoofd-
stuk 4. uitgebreid aan de orde is geweest.
Toegevoegd zijn twee foto's van de transducent
opstelling(blz. 11a).



		Classificatie			
Systeem/bouweenheid	Toestand				
Geluidsnelheidsmeter	Experimenteel, opgebouwd uit standaard apparatuur				
Aard en doel meting		Identificatie onderdelen/subsam			
Geluidsnelheids meting in sliblagen in de Rotterdamse havens.					

INLEIDING

Bij het onderzoek naar de mogelijkheid om het dichtheidsverloop in een sliblaag uit een echo-akoestische responsie af te leiden, is gebleken dat in het slib voorkomend gas van zeer grote invloed kan zijn op de geluidsnelheid en dus op de akoestische responsie. Het gas moet hiervoor in kleine belletjes, homogeen verdeeld in het slib voorkomen. Het in-situ meten van het gasgehalte en de wijze van voorkomen is vooralsnog onmogelijk. Daarom is besloten om op twee plaatsen in de Rotterdamse havens de geluidsnelheid in het slib te meten. In dit meetrapport worden deze metingen beschreven.

INHOUD:

- ~~1. Geluidsnelheid in een water gas mengsel~~
2. Damping van een akoestisch signaal in slib
3. Geluidsnelheidsmeter
4. Metingen
 - 4.1. Geluidsnelheid
 - 4.2. Absorptie
 - 4.3. Overdrachtsfunctie
5. Literatuur

Conclusie

1. Bij de metingen zijn bij geen van de drie gebruikte frequenties geluidsnelheids variaties groter dan 10% geconstateerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat op de meetplaatsen het gas niet in een zodanige vorm voorkwam dat het de geluidsnelheid belangrijk beïnvloedde.
2. De gemeten damping van de ontvangen signalen komt overeen met wat op grond van de literatuur bij deze frequenties verwacht wordt.



meetresultaten

2. DEMPING VAN EEN AKOESTISCH SIGNAAL IN SLIB

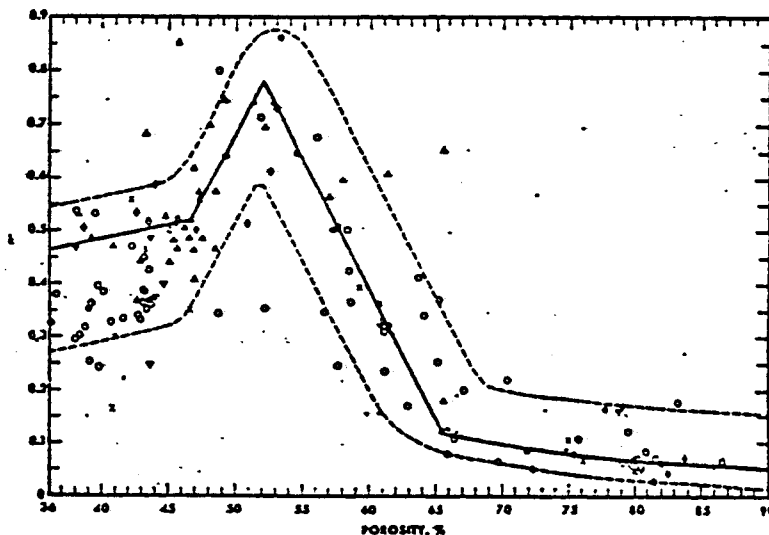
Een in een sliblaag lopende akoestische golf zal zowel door sferische uitbreiding als door absorptie verzwakt worden. Hamilton([3]) geeft voor de absorptie in slib(α) de volgende formule.

$$\alpha = k.f \quad \text{dB/m} \quad (2.1)$$

waarin f = frequentie (kHz)

k = factor, afhankelijk van de porositeit

Uit een groot aantal in-situ en laboratorium metingen is voor de factor k de in figuur 2 weergegeven grafiek samengesteld.



figuur 2

ontleend aan Hamilton [3]

Porosity n , percent, versus k ($n = k^2$). Data, symbols, and remarks same as in caption for Figure 3. Regression equations for solid lines: Coarse, medium, and fine sand (36 to 44.7 percent): $k = 0.2747 + 0.00327 (n)$. Very fine sand and lower-porosity mixed sizes (44.7 to 52 percent): $k = 0.04933 (n) - 1.7658$. Mixed sizes (52 to 65 percent): $k = 3.3232 - 0.0459 (n)$. Silt-clays (65 to 90 percent): $k = 0.7602 - 0.01457 (n) + 0.000078 (n)^2$.

In de nu volgende tabel zijn op grond van figuur 2 verwachte absorpties voor de drie bij de metingen gebruikte frequenties weergegeven. De porositeit is berekend uit de dichtheid (water: 1000 kg/m^3 , korrels: 2450 kg/m^3) en is gelijk aan de volume fractie water.



meetresultaten

dichtheid (kg/m ³)	porositeit (%)	k-factor	absorptie (dB/m)		
			30 kHz	66 kHz	200 kHz
1100	93	0,05	1,5	3,3	10
1200	86	0,06	1,8	4,0	12
1300	79	0,07	2,1	4,6	14
1400	72	0,09	2,7	6,0	18
1500	66	0,10	3	6,6	20
1600	59	0,45	13,5	29,7	90

3. GELUIDSNELHEIDSMETER.

Om de invloed van het in het slib aanwezige gas op de geluidsnelheid te onderzoeken is een geluidsnelheidsmeter gebouwd, waarmee bij drie frequenties de akoestische looptijd over een vaste afstand gemeten kan worden. De geluidsnelheid is dan gelijk aan het quotient van de afstand en de gemeten looptijd. Gekozen is voor een flexibele meetopstelling opgebouwd uit standaard meetapparatuur, met een overall meetnauwkeurigheid van ca. 10%. Deze keuze is gebaseerd op de uit paragraaf 1 volgende geluidsnelheidsvariaties en frequentie afhankelijkheid en op de noodzaak om de metingen op korte termijn te kunnen uitvoeren. Het meten bij drie frequenties maakt het tevens mogelijk een indruk te krijgen van de absorptie in het slib.

De transducenten zijn geplaatst in een frame, waarbij gezorgd is voor een zo gering mogelijke verstoring van het slib tijdens het meten. De volgende transducenten zijn gebruikt: ATLAS SW6019, 30 kHz; ITC 5106, 66 kHz; TPD, 200 kHz.

De afstand tussen de transducenten is voor de 30 kHz transducent 142,4 cm, voor de 66 kHz 143,5 cm en voor de 200 kHz 148,9 cm. In figuur 3 is de meetopstelling weergegeven. Pulsgenerator 1 geeft een startpuls aan de timer en aan de zender. In de zender kan de aan te sturen transducent gekozen worden. De 66 kHz en de 200 kHz.



meetresultaten

transducenten worden met een korte puls aangestuurd ("AKWA"), de 30 kHz transducent wordt met een binnen een venster gegenereerd sinusvormig signaal aangestuurd. Aan de ontvangkant wordt van een te kiezen transducent het ontvangen signaal versterkt en eventueel gefilterd. Vervolgens wordt dit signaal zichtbaar gemaakt op een oscilloscoop en toegevoerd aan de trigger ingang van pulsgenerator 3. Deze pulsgenerator genereert een stoppulsje voor de timer. Door dit pulsje parallel met het ontvangen signaal op de oscilloscoop zichtbaar te maken kan nagegaan worden waar in het ontvangen signaal generator 3 getriggerd wordt en door het trigger-niveau te wijzigen kan ervoor gezorgd worden dat steeds op dezelfde flank getriggerd wordt. Om overspraak van het zendsignaal te onderdrukken wordt generator 3 met behulp van een van het startpulsje afgeleid venster gedurende het zendsignaal buiten werking gesteld. De door de timer gemeten looptijd kan zowel op een schrijver als op een printer geregistreerd worden. Met een polaroid camera kunnen de op de oscilloscoop zichtbaar gemaakte signalen worden vastgelegd.

De geluidsnelheidsmeter is in het laboratorium getest in een bak gevuld met leidingwater. Hierbij zijn tevens de systeemlooptijden bepaald door de zend-en ontvang-transducenten tegen elkaar te plaatsen. De volgende waarden zijn gevonden: 164 μ s voor de 30 kHz metingen, 100 μ s voor de 66 kHz en 3 μ s voor de 200 kHz. Met deze systeemlooptijden moeten de gemeten waarden gecorrigeerd worden. Van de mogelijke fouten bij de meting spelen de volgende twee de grootste rol:

1. triggerfouten : een sprong van één periode in het 30 kHz signaal (periodetijd = 33 μ s) geeft een fout van 3,3%.
2. speling in het frame: gebleken is dat de speling in het frame maximaal 6 cm bedraagt en dus een fout geeft van ca . 4%.

De in de testopstelling gemeten geluidsnelheid was binnen de meetnauwkeurigheid gelijk aan de theoretisch verwachte geluidsnelheid.



meetresultaten

4. METINGEN

Op 6 en 7 februari 1980 zijn op twee plaatsen in het havengebied Rotterdam metingen gedaan. De weersomstandigheden waren op beide dagen zeer goed en daarom de scheepsbewegingen tijdens de metingen gering. De watertemperatuur bedroeg ca. 3°C. Het transducenten frame kon tot in de 1.2 laag worden afgezonden, zodat de metingen betrekking hebben op het (voor het project interessante) gebied van 1.0 tot en met 1.2. Per meetplaats kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden:

Meetplaats 1, positie: Calandkanaal nabij het Hoge licht.

De eerste dag is op deze meetplaats gemeten. Het gasgehalte was hier niet bekend. Parallel met de geluidsnelheidsmetingen zijn drie backscatter opnames gemaakt. Deze zijn weergegeven in de figuren 4 t/m 6. In figuur 5 en 6 is de vermoedelijke transducent diepte aangegeven.

Meetplaats 2, positie: Slibput in de Botlekhaven.

De tweede dag is op deze meetplaats gemeten. Het gasgehalte bedroeg hier volgens Gemeentewerken Rotterdam ca. 6%. Het voorkomen van gasbellen kon met het aan boord aanwezige echolood (Elac, 18 kHz) geconstateerd worden. Ook uit de gemaakte backscatter opnames (figuren 7 en 8) volgt dit, aangezien de logische opbouw van geringe naar steeds grotere dichtheid verstoord is (zie vooral fig. 7). In figuur 9 is een door Gemeentewerken Rotterdam gemaakte tekening van het dichtheidsverloop in de slibput weergegeven.

4.1. Geluidsnelheid

Op beide meetplaatsen zijn bij de drie meetfrequenties geen significante geluidsnelheidsvariaties gevonden, die veroorzaakt zouden kunnen zijn door het aanwezige gas. Op meetplaats 1 is het frame enige tijd over de bodem gesleept zodat er zich veel slib voor de transducenten verzamelde. Metingen met de 200 kHz en de 66 kHz transducent werden toen onmogelijk, met de 30 kHz transducent werd een geringe toename van de geluidsnelheid geconstateerd (<10%).



meetresultaten

4.2. Absorptie.

In figuur 10 zijn per frequentie de ontvangen signalen in water en slib weergegeven. Uit de verhouding van de amplitudes kan een schatting gemaakt worden van de absorptie bij de drie frequenties. De sferische uitbreiding is in water en slib gelijk en speelt dus in de bepaalde verhouding geen rol.

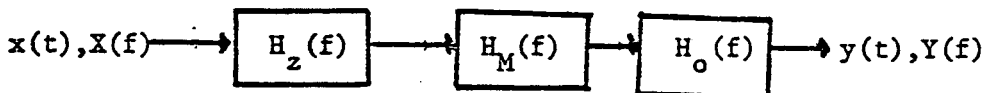
frequentie (kHz)	amplitude verhouding	absorptie		k-factor ^x
		(dB)	(dB/m)	
30	2	6	4,2	0,14
66	5	14	9,8	0,15
200	100	40	26,9	0,13

* deze k-factor is uit de metingen berekend.

De metingen geven een wat hogere absorptie en k-factor in vergelijking met de van de regressie curve in figuur 2 afgeleide waarden. De gevonden waarden liggen wel in het in de figuur aangegeven gebied van meest voorkomende waarden.

4.3. Overdrachtsfunctie

Het in figuur 3 weergegeven systeem kan als volgt beschreven worden



$$Y(f) = H_o(f) \cdot H_M(f) \cdot H_z(f) \cdot X(f) \quad (4.1.)$$

waarin $x(t)$ = ingangssignaal (startpulsje)

$X(f)$ = fouriertransformatie van $x(t)$

$H_z(f)$ = overdrachtsfunctie zender (zendelektronica + transducent)

$H_M(f)$ = overdrachtsfunctie medium (water of slib)

$H_o(f)$ = overdrachtsfunctie ontvanger (transducent + ontvangelektronica)

$y(t)$ = uitgangssignaal (op foto vastgelegd signaal)

$Y(f)$ = fouriertransformatie van $y(t)$.



meetresultaten

Deling van de fourier getransformeerde, ontvangen signalen in water en slib geeft, bij verder gelijk blijvende omstandigheden, de overdrachtsfunctie van slib.

$$Y_s(f)/Y_w(f) = H_s(f)/H_w(f) = H_s(f) = A_s(f) \exp(i\phi_s(f)) \quad (4.2)$$

waarin $A_s(f)$ = amplitude s = slib

$\phi_s(f)$ = fase w = water

De in figuur 10 weergegeven foto's aangevuld met nog een tweede opname van een ontvangen 200 kHz signaal in slib, zijn vergroot, gedigitaliseerd en in de computer ingelezen. Vervolgens is met formule(4.2) in het significante frequentiegebied voor elk signalenpaar de overdrachtsfunctie van het slib berekend. In figuur 11 zijn de resultaten weergegeven.

In 11.1 en 11.2 zijn de 30 kHz signalen in water en slib weergegeven, in 11.3 de amplitude spectra van de signalen in water en slib en van de berekende overdracht, en in 11.4 het fase spectrum van de overdracht. In 11.5 t/m 11.8 zijn dezelfde karakteristieken voor de 66 kHz signalen weergegeven. De in 11.7 weergegeven overdracht verloopt evenredig met de frequentie overeenkomstig formule 2.1. De uit 11.7 gevonden k-factor bedraagt: $k = 0,14$.

De ontvangen 200 kHz signalen zijn weergegeven in 11.9, 11.11 en 11.14 en de amplitude spectra in 11.10. Opvallend is hoe goed de amplitude spectra van de twee in slib opgenomen signalen gelijk zijn. Dit terwijl het signaal van 11.11 op meetplaats 1 is opgenomen en het signaal van 11.14 op meetplaats 2. In 11.12, 11.13, 11.15 en 11.16 zijn de amplitude-en fase spectra weergegeven. Ook hier is weer een vrij goed lineair verloop van het amplitude spectrum van de overdracht te zien.

Uit de computerberekeningen volgt dat door het slib de amplitude van het akoestische signaal evenredig met de frequentie verzwakt wordt. Dit is geheel in overeenstemming met formule 2.1 van paragraaf 2. Uit de berekende overdrachtsfuncties volgt een k-factor van: $k = 0,14$. In de amplitude spectra van de overdracht in slib zijn tot 100 kHz geen scherpe dippen te zien. Dergelijke dippen ontstaan wanneer een populatie luchtballen resoneert en daardoor veel meer absorbeert. Dit is een tweede aanwijzing dat het gas niet in een zodanige vorm voorkomt dat het de akoestische metingen verstoort.

Uit de fase spectra volgt dat het slib in goede benadering opgevat mag worden als een minimum-fase systeem.



meetresultaten

5. LITERATUUR

- (1) Urick, R.J. Principles of Underwater Sound for Engineers
Mc Graw -Hill Book Company
- (2) Medwin, H Acoustic Fluctuations Due to Microbubbles in
the Near-Surface Ocean
J. Acoust. Soc. Am., Vol 56, No. 4, Oktober 1974
- (3) Hamilton, E Compressional - Wave Attenuation in Marine
Sediments
Geophysics, Vol 37, No. 4, Augustus 1972
- (-) Schmidt, D en Akoestische Detektie van Slibdichtheden,
Janssen, H Interim verslag, December 1979

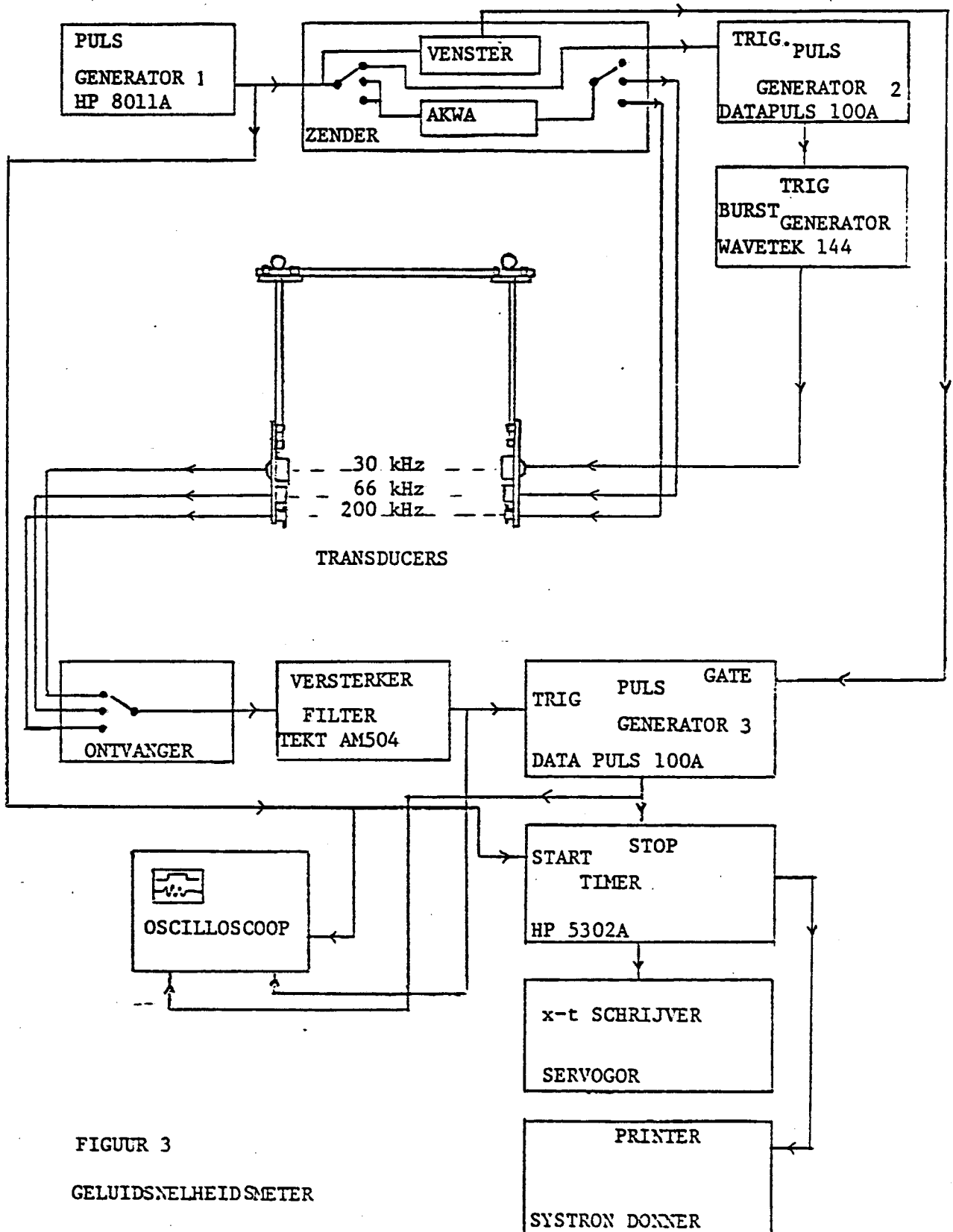
Delft, 7 maart 1980
DS/SZ

ir. D.Ph. Schmidt

H.C. Janssen



meetresultaten



FIGUUR 3

GELUIDSNELHEIDSMETER



afd.:

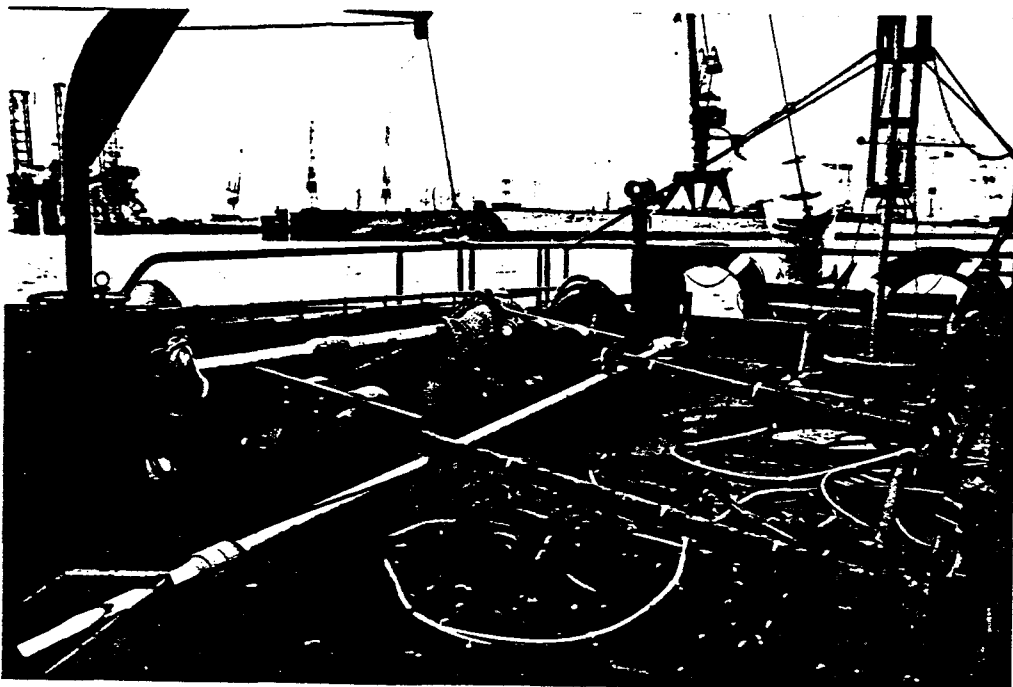
meetrapport

blad van

project: _____ proj.nr.: _____ volgnr.: _____

steller: _____ par.: _____ datum: _____

meetresultaten

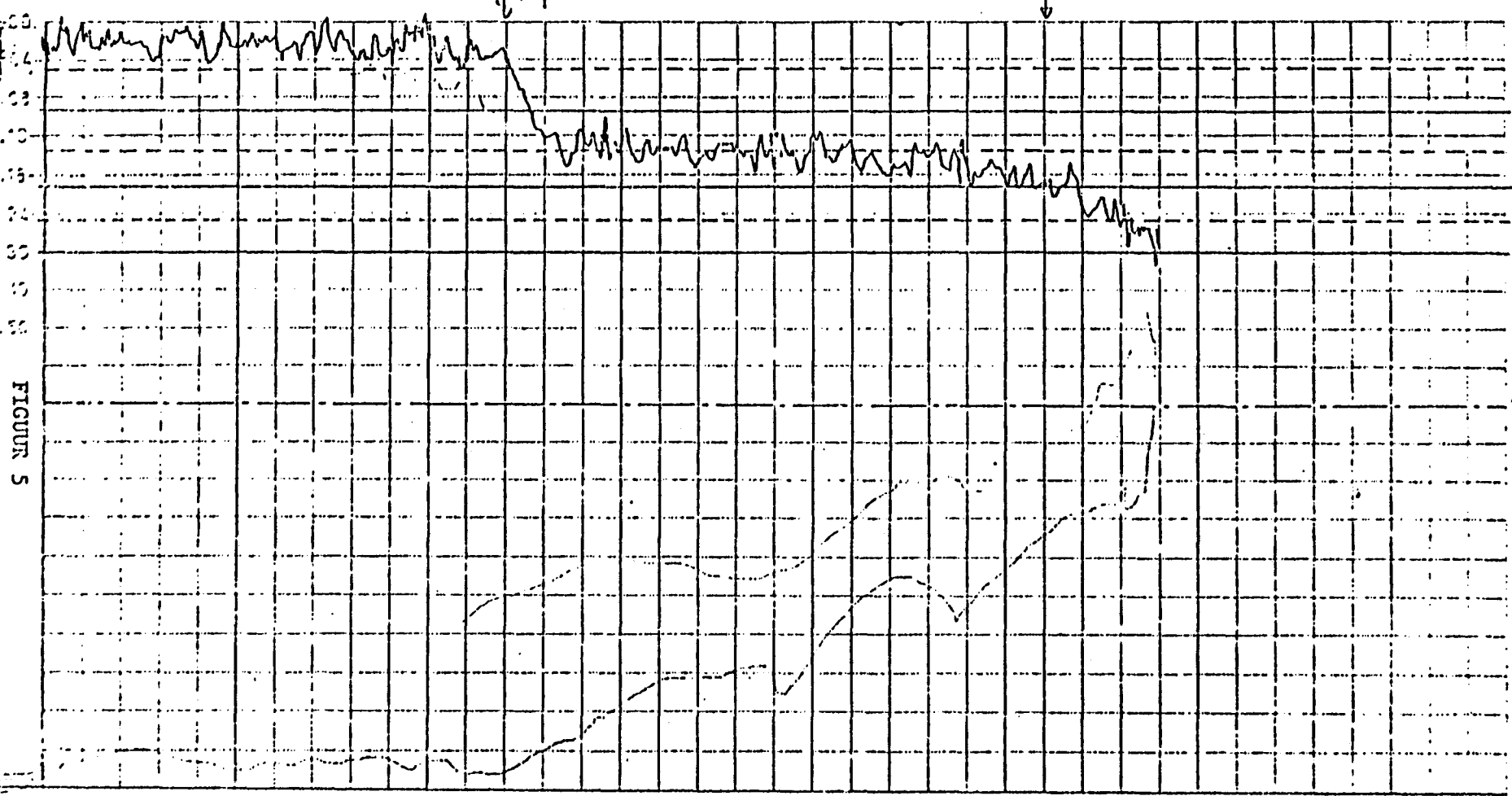


BACK SCATTERING

hand op 24.5

Dichtheidscaibratie d.d.: 6-12-1979
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702

70450



By Back Scattering Conde gebruik
 volgende woorden instellen:

or 1024 160
 Range 104
 Mode 1
 Connexions op
 9
 C.F. 1.50
 1.0
 Tijdenbasis 0,2 sec.

N^o 2 Tijd: 13,39 0 = dm. Positie: x 1433
 1cm. = ~~1~~ 2 dm. corr = dm. y 995

Opn. d.d.: 6.2.

meetresultaten



afd.: IO metrapport
 blad 13 van 20
 project: AKOEST. DET. VAN SLIB proj.nr.: 910-281
 steller: D.Schmidt/H.C.Janssen par.:
 volg.nr.: 1
 datum: 26 februari 1988

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 6-12-1979
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702



meeresultaten

ald.: 10

meetrapport

blad 14 van 20

project: AROEST, DET. VAN SLIB

pol.nr.: 910-281

volgnr.: 1

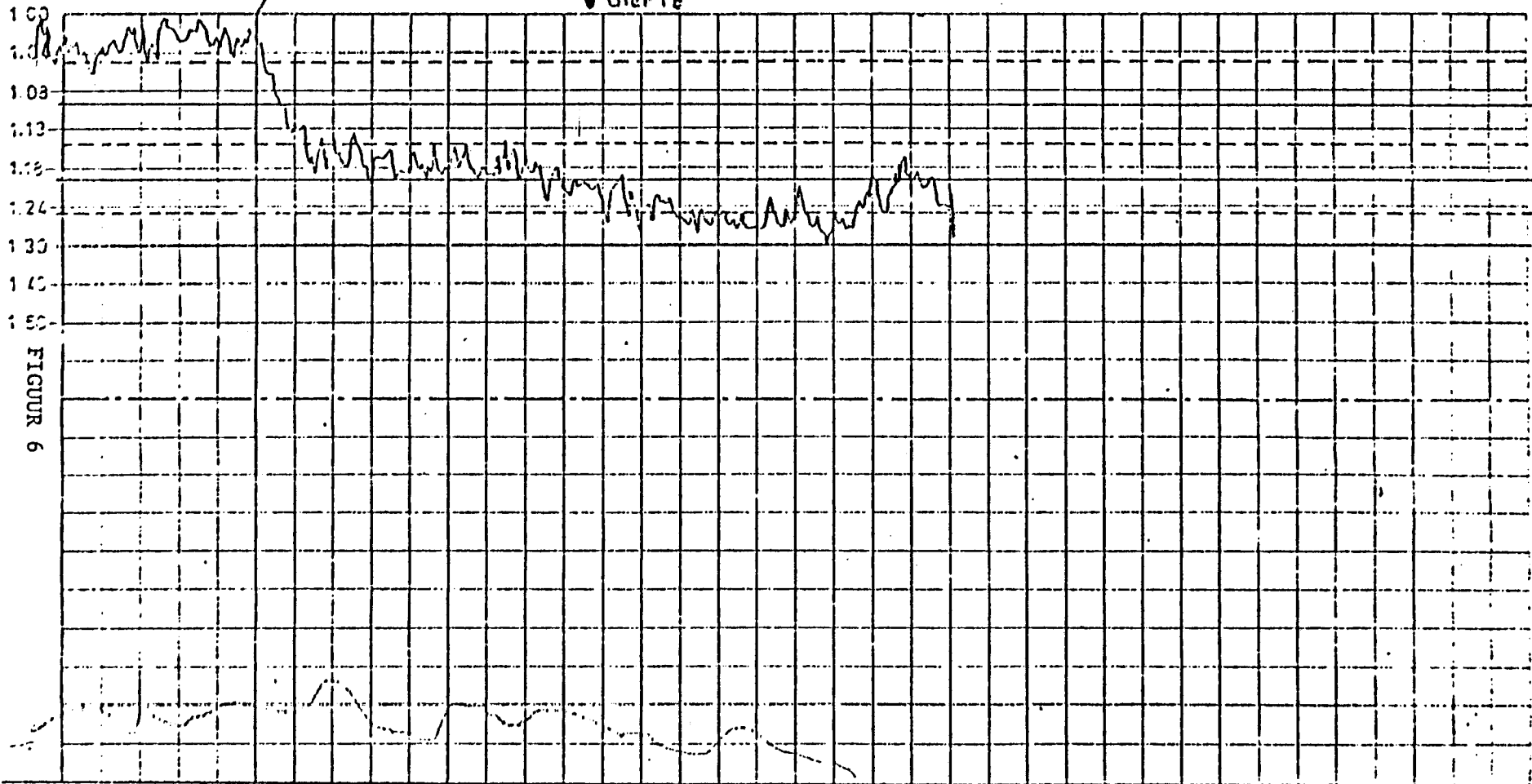
steller: D. Schmidt/H.C. Janssen

par. :

datum: 26 Februari 198

VERHOEDDELYKE
 TRANSDUCENT
 DIEPTE

217



By Back Scattering Sonde gebruik
 volgende waarden instellen:

... 1020	... 150
... 1.0	... 1.0
... 1.0	... 1.0
... 1.0	... 1.0
... 1.0	... 1.0

Tijdbasis 0.2 sec.

N^o 3. Tijd: 1400 0 = dm.
 corr = dm.
 1cm. = 1/2 dm.

Positie: x 1905
 y 995
 Opn. d.d.: 6.2.

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 6-12-1979
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702

meetresultaten



afd.: IO

meetrapport

blad 15 van 20

project: AKOEST. DET. VAN SLIB

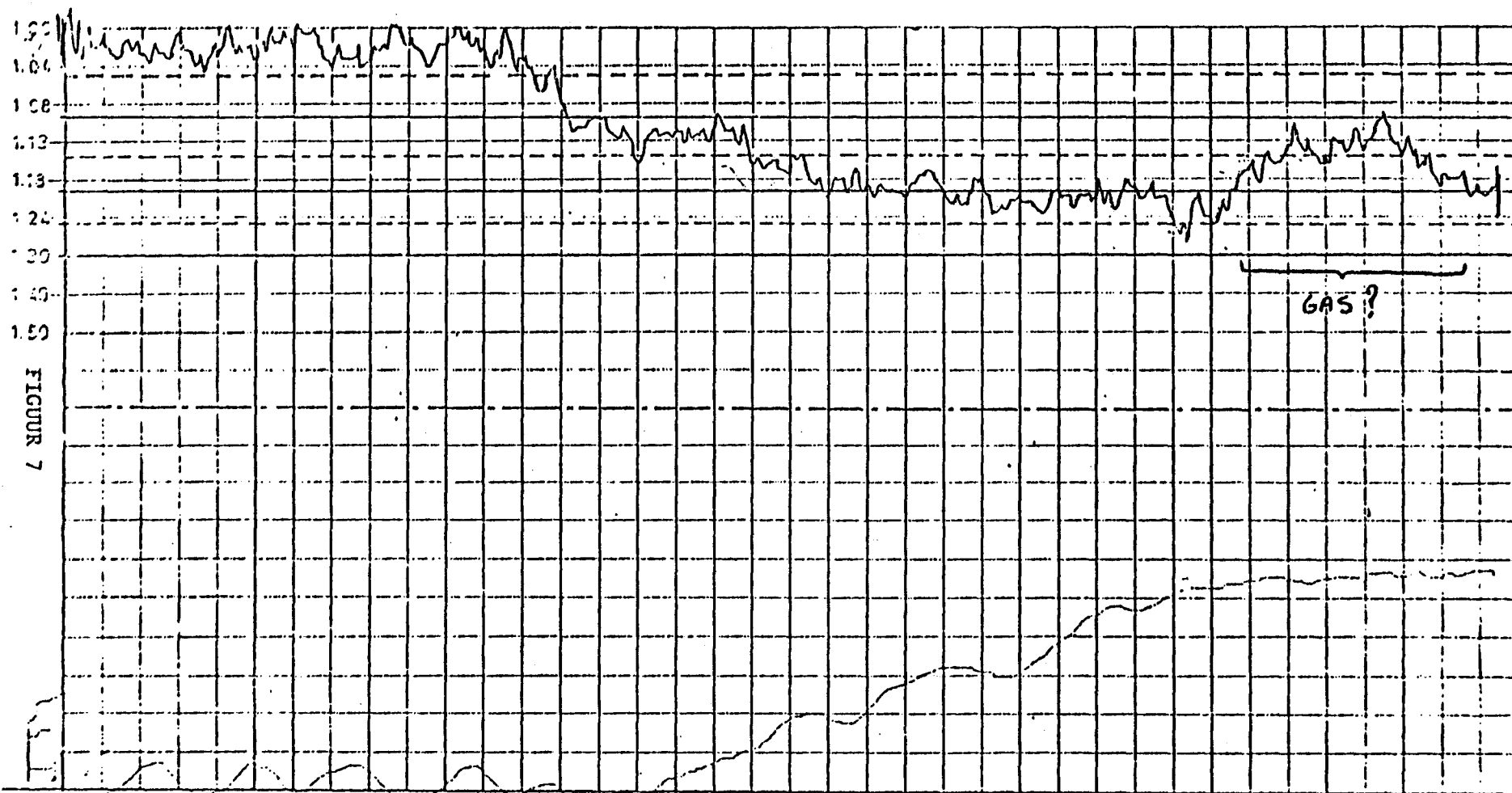
proj.n^o.: 910-281

volgnr.: 1

steller: D. Schmidt/H. C. Janssen

par.:

datum: 26 februari 1988



Bij Back Scattering Sonde gebruik
 volgende waarden instellen:

... 1029	... 160
... 1.0	... 1.0
... 1.0	... 1.0
... 1.0	... 1.0

Tijdbasis 0.2 sec.

N^o 4

Tijd: 12³⁵ 0 = dm.
 corr = dm.

Positie: x 14

Positi 705

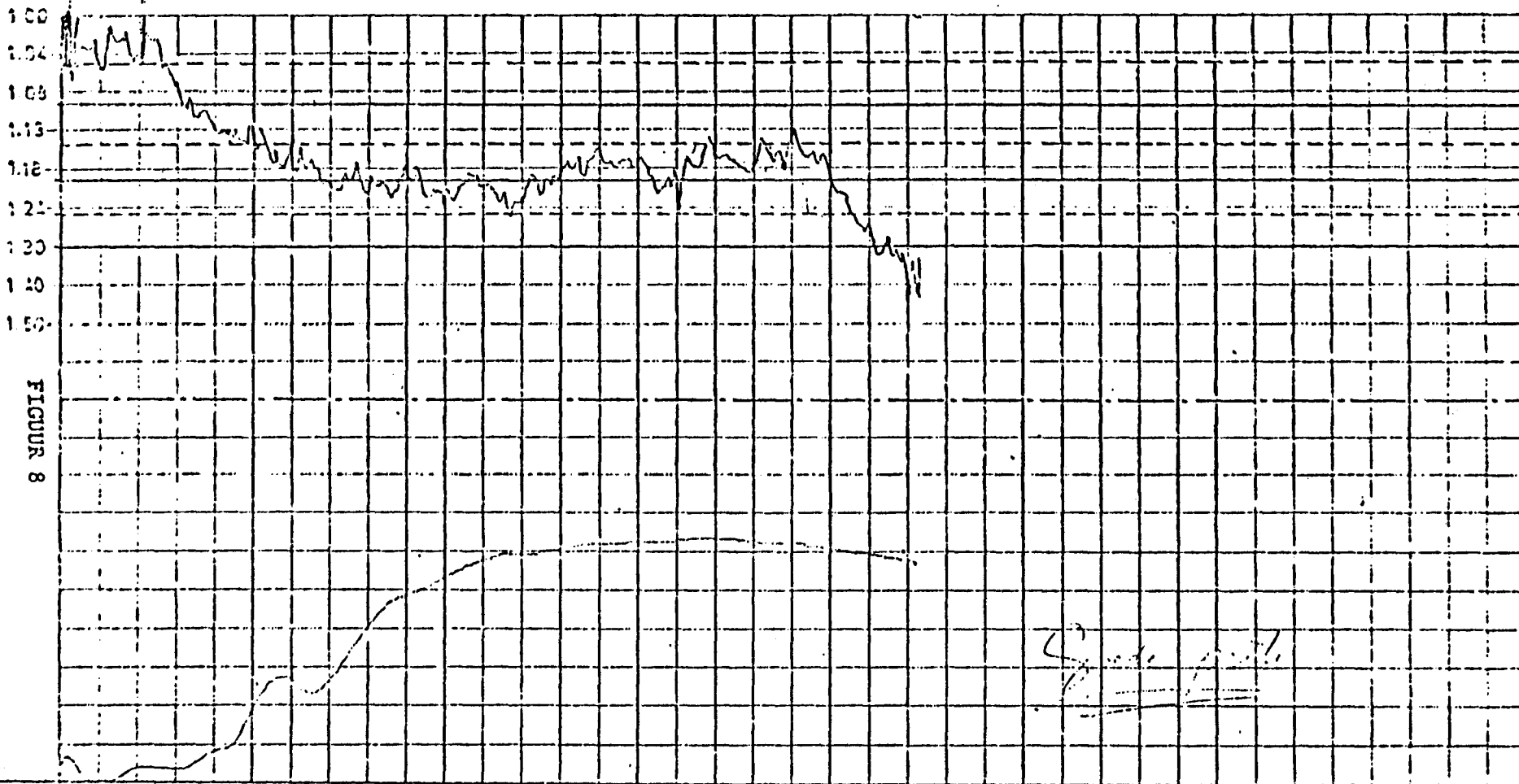
1cm. = 1 1/2 dm.

Opn. d.d.: 7-7

BACK SCATTERING

Dichtheidscalibratie d.d.: 6-12-1979
 Ratemeterbox Serie N^o NH 84+85
 702

← 14,50 dmTR



Back Scattering Sonde gebruik
 volgende woorden instellen:

102.0	150
104.0	150
106.0	150
108.0	150
110.0	150
112.0	150
114.0	150
116.0	150
118.0	150
120.0	150
122.0	150
124.0	150
126.0	150
128.0	150
130.0	150
132.0	150
134.0	150
136.0	150
138.0	150
140.0	150
142.0	150
144.0	150
146.0	150
148.0	150
150.0	150

Tijdbasis 0,2 sec.

N^o 5 Tijd: 1238 0 = dm.
 corr = dm.
 1cm. = 1/2 dm.

Positie: x 14 m
 y 14 m

Opn. d.d.: 7-1-79

meetresultaten



afd.: 10 meetrapport blad 16 van 20

project: AKOEST. DET. VAN SLIB proj.n^o: 910-281

steller: D. Schmidt/H. C. Janssen par.:

volgnr.: 1 datum: 26 februari 1979



afd.: IO

meetrapport

blad 17 van 20

project: AKOEST. DET. VAN SLIB

proj.nr.: 910-281

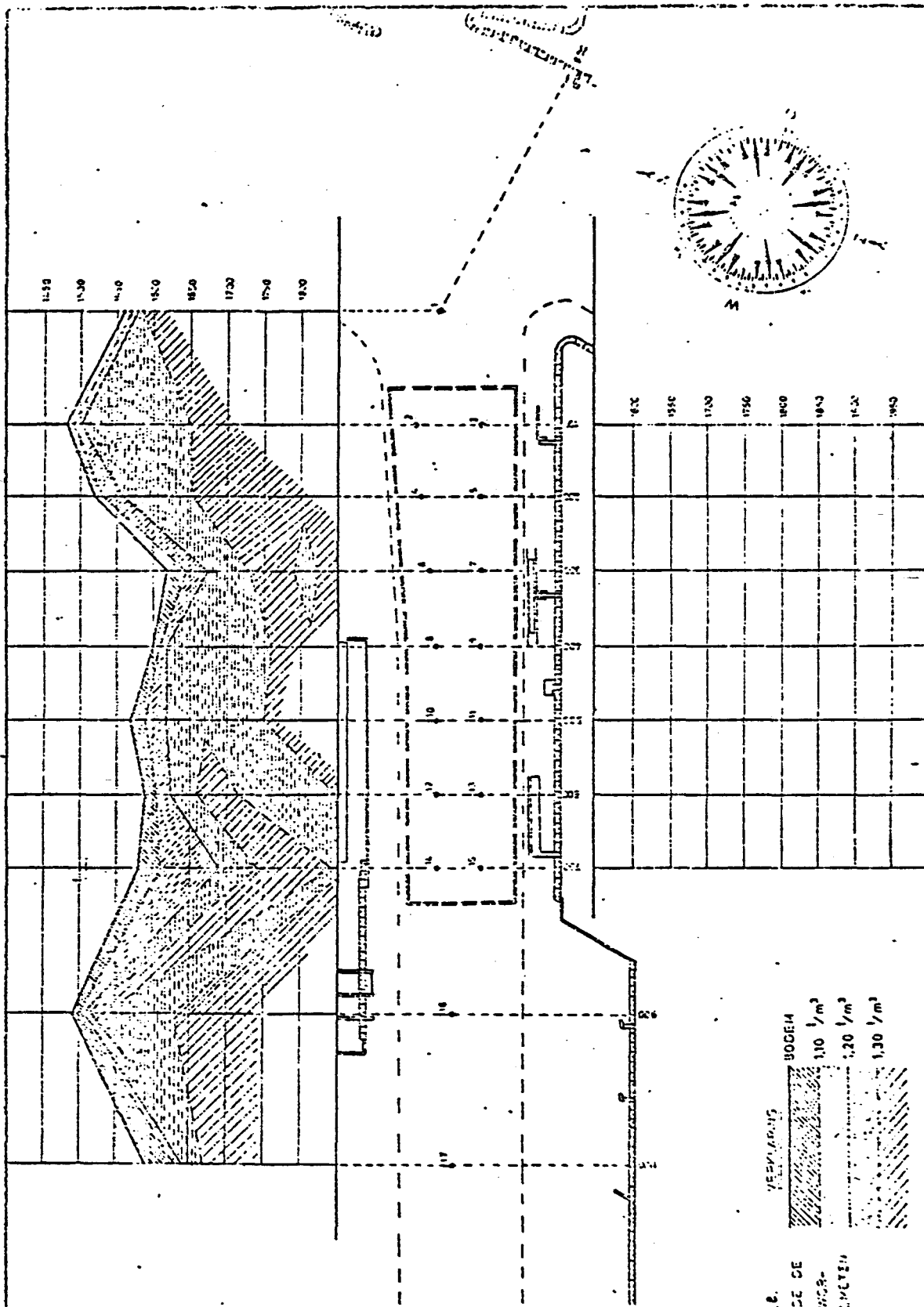
volgnr.: 1

steller: D. Schmidt/H.C. Janssen

par.:

datum: 26 februari 19

meetresultaten **FIGUUR 9 - Slibput Botlek**



DE PUNTEN 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

SITUATIE 31-444
1:5000
68 3-1-52

CONSOLIDATIE VERLOOP SLIBPUT BOTLEK
TEK. NR. 10

GEMEENTEWERKEN ROTTERDAM
BEHEER HAVENS MEETDIENST

68 3-1-52
68 3-1-52



afd.: IO

meetrapport

blad 18 van 20

project: AKOEST.DET.VAN SLIB

proj.nr.: 910-281

volgnr.: 1

steller: D.Schmidt/H.C.Janssen

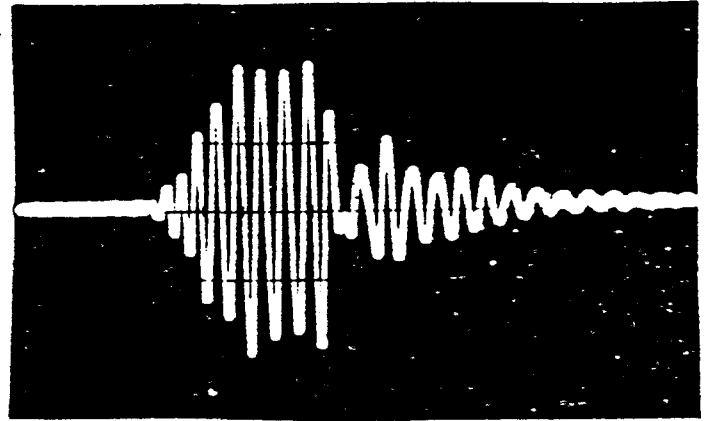
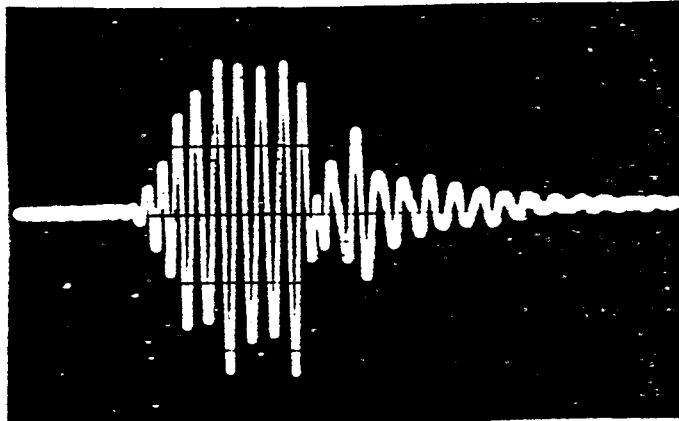
par. : _____

datum: 26 februari 1980

meetresultaten: **FIGUUR 10 - Signaalvormen in water(links) en in slib(rechts)**

WATER

SLIB



30 kHz transducent

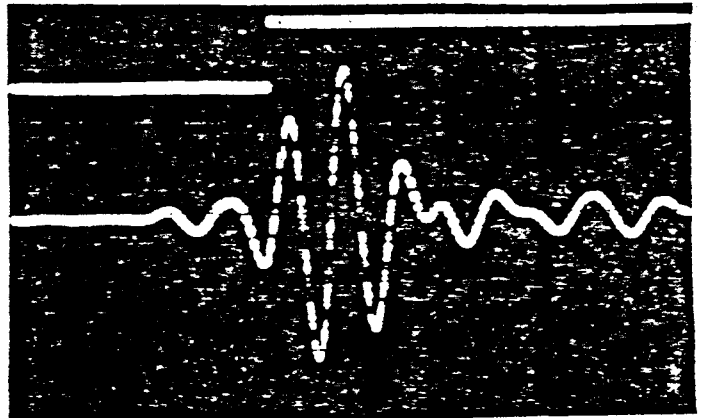
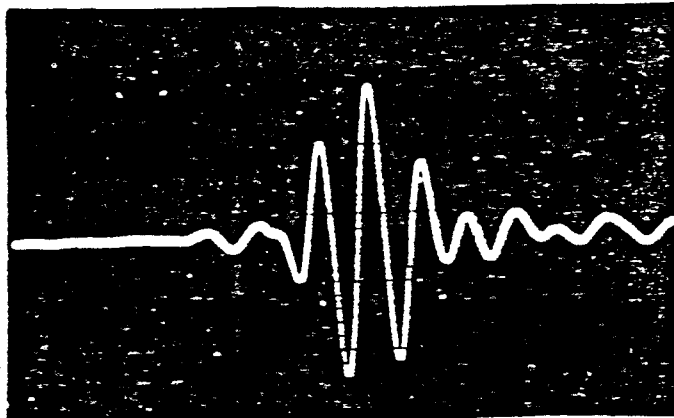
30 kHz transducent

Horz. 100µs/SD, Vert. 2V/SD

Horz. 100µs/SD, Vert. 2V/SD

10x versterkt

20x versterkt



66 kHz transducent

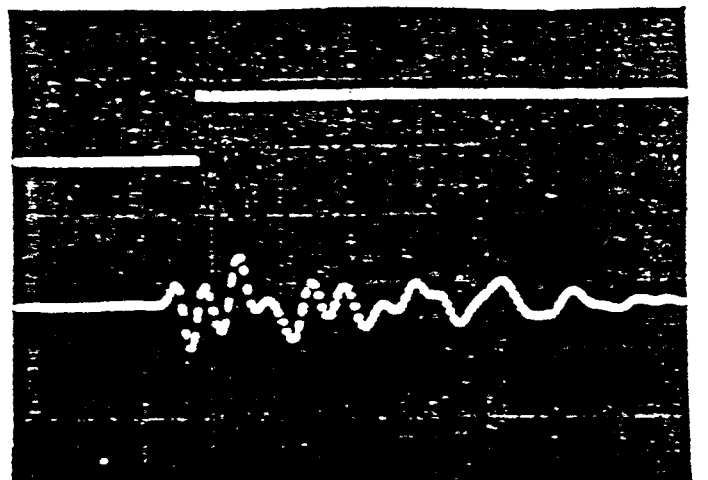
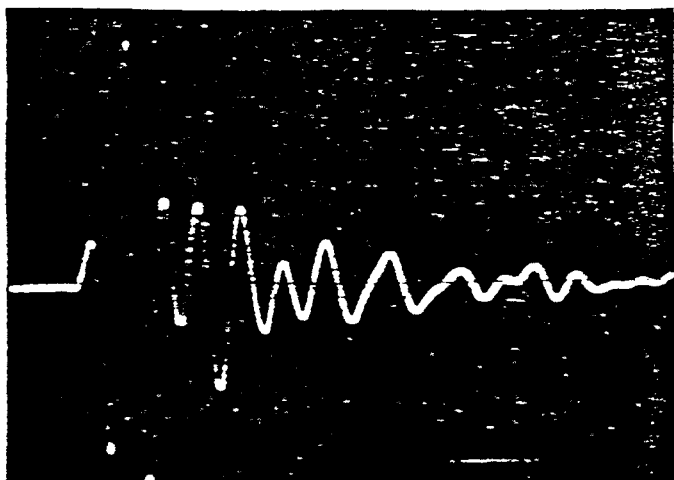
66 kHz transducent

Horz. 20µs/SD, Vert. 2V/SD

Horz. 20µs, Vert. 2V/SD

2x versterkt

10x versterkt



200 kHz

200 kHz

Horz. 10µs/SD, Vert. 2V/SD

Horz. 10µs/SD, Vert. 2V/SD

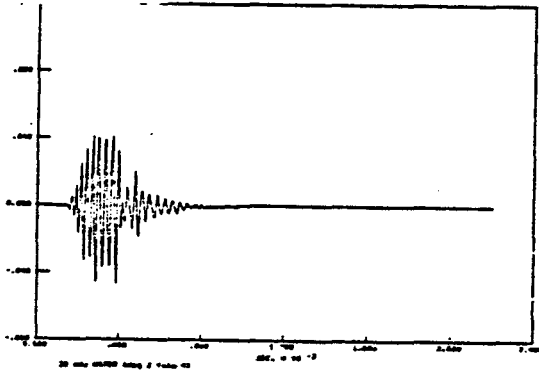
20x versterkt

500x versterkt

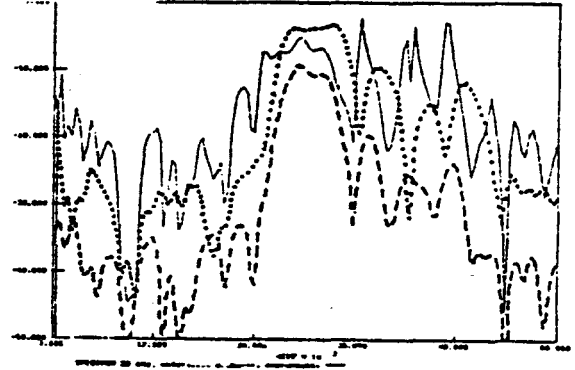


meetresultaten

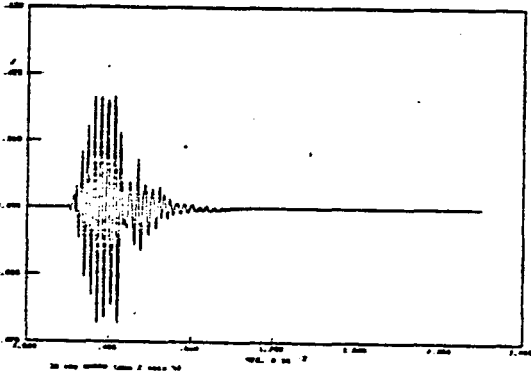
FIGUUR 11 Absorptie in slib; computerberekeningen



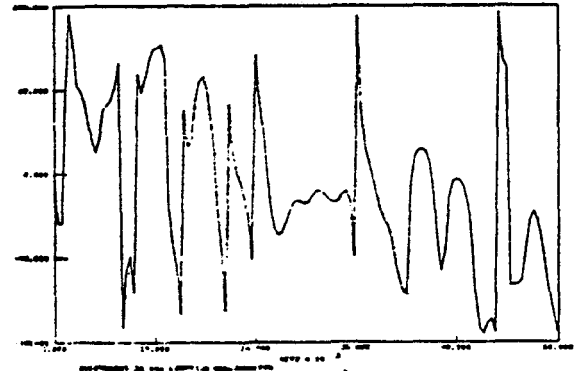
11.1 30 kHz in water



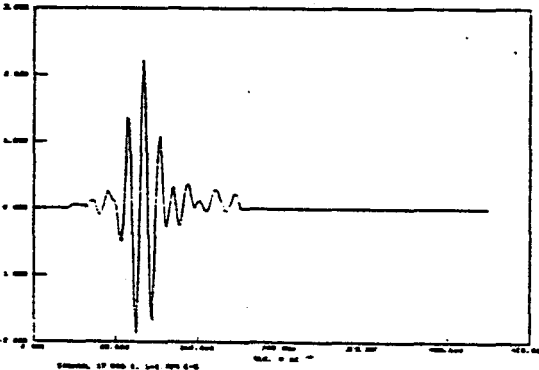
11.3 amplitude spectra 30 kHz
water.....,slib---,overdracht—



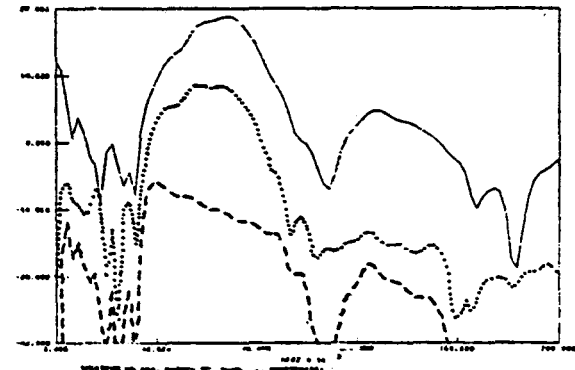
11.2 30 kHz in slib



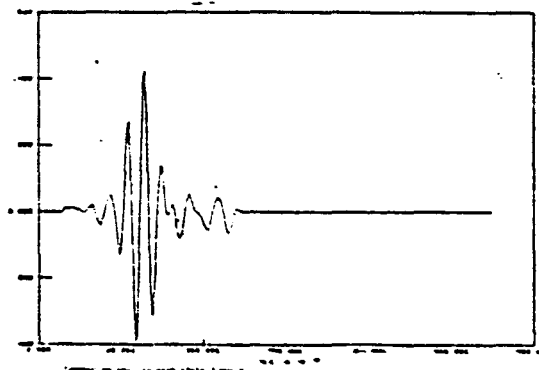
11.4 fase spectrum 30 kHz overdracht



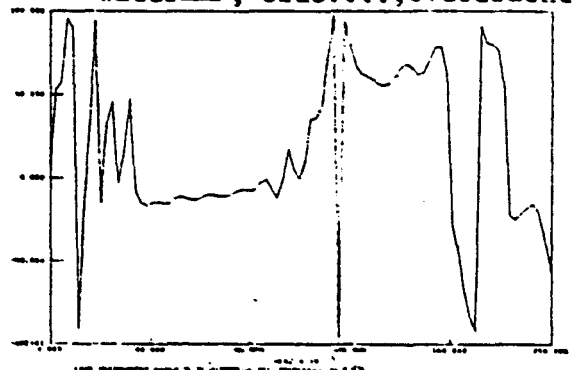
11.5 66 kHz in water



11.7 amplitude spectra 66 kHz
water—, slib....,overdracht—



11.6 66 kHz in slib

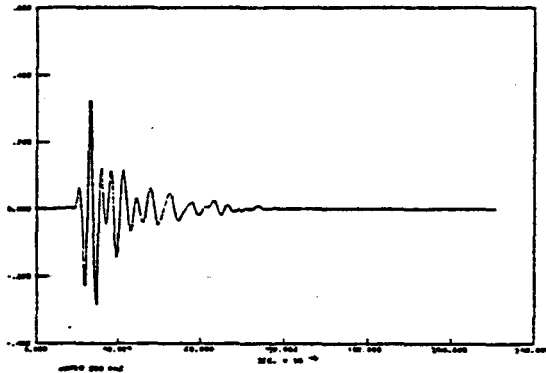


11.8

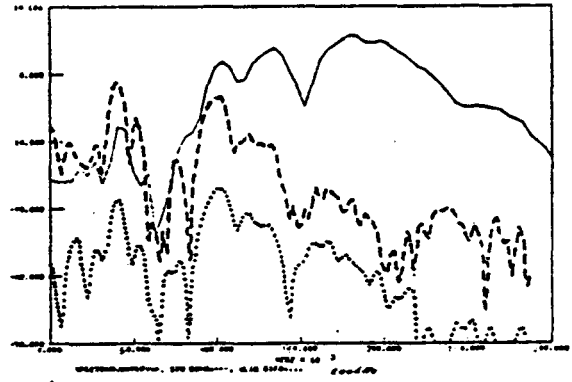


meetresultaten

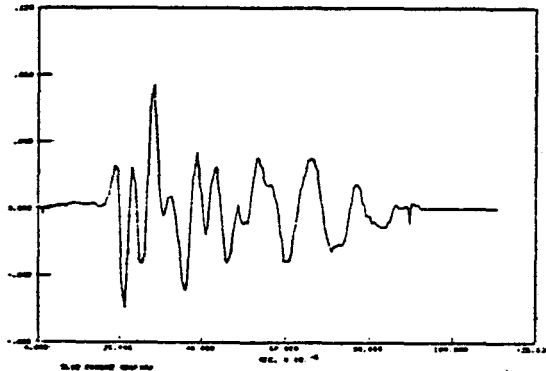
FIGUUR 11 Absorptie in slib; computerberekeningen



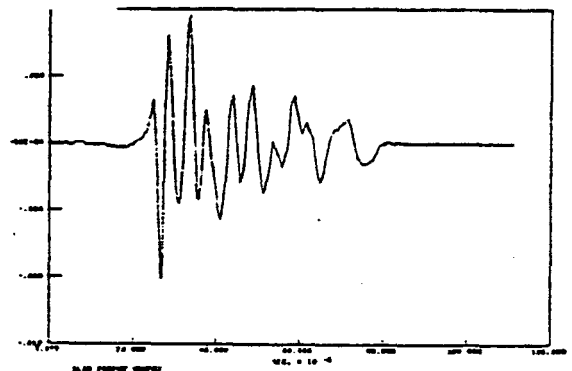
11.9 200 kHz in water



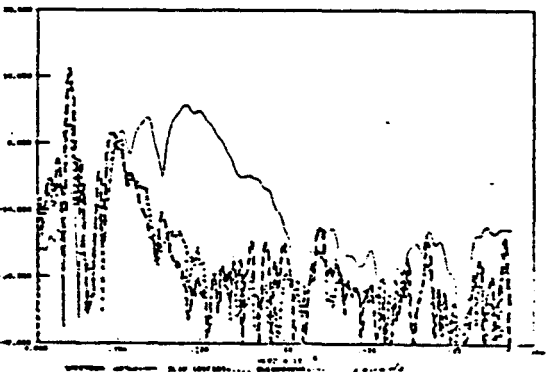
11.10 amplitude spectra 200 kHz
water—, slib1,slib2 - - -



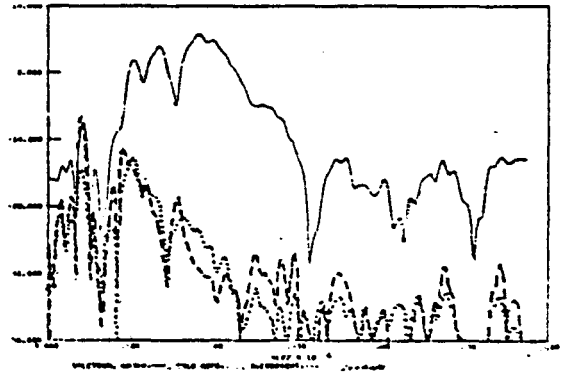
11.11 200 kHz in slib, dag 1



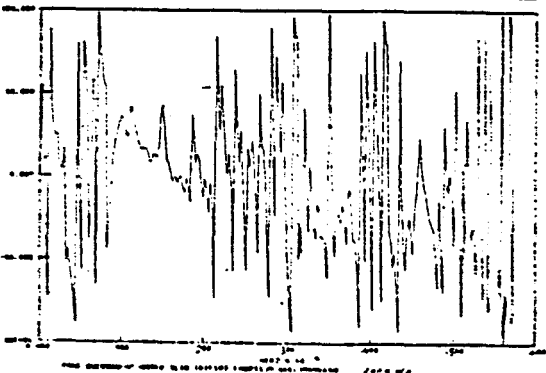
11.14 200 kHz in slib, dag 2



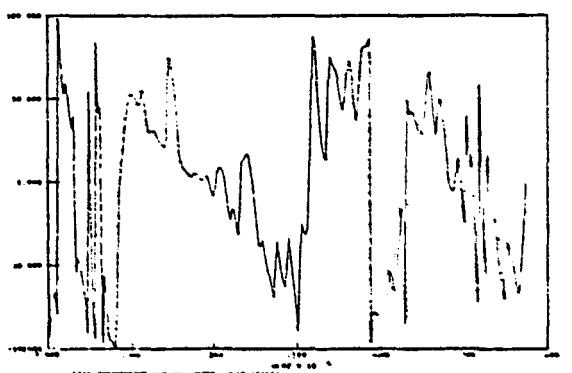
11.12 amplitude spectra 200 kHz
water—,slib1, overdracht - - -



11.15 amplitude spectra 200 kHz
water—, slib2,overdracht - - -



11.13 fase spectrum 200 kHz
overdracht slib 1



11.16 fase spectrum 200 kHz
overdracht slib 2