

MASTER

Opbouw van het meetsysteem voor geluid- en trillingsmetingen en geluidafstraling van hydraulische leidingen

de Laat, Jan A.P.M.

Award date:
1979

[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

OPBOUW VAN HET MEETSISTEEM
VOOR GELUID- EN TRILLINGSMETINGEN
en
GELUIDAFSTRALING VAN HYDRAULISCHE LEIDINGEN
afstudeerverslag van
J.A.P.M. de Laat

(student aan de afdeling der technische natuurkunde)

Afstudeerhoogleraar: Prof.dr. P.C. Veenstra

Afstudeercoach: Dr.ir. J.P.A. Berhault

Contactdocenten: Prof.dr. J.A. Poulis

Dr. J.A. Beun

Periode van onderzoek: maart 1978 tot en met februari 1979

Interafdelingswerkgroep "Geluidbestrijding aan hydraulische systemen en componenten" van de afdelingen der werktuigbouwkunde en bouwkunde van de Technische Hogeschool Eindhoven.

DANKWOORD

Met dit verslag sluit ik het afstudeeronderzoek af, dat ik in de interafdelingsgroep "Geluidbestrijding" verricht heb. Het is tevens het laatste onderdeel van mijn natuurkunde studie aan de Technische Hogeschool Eindhoven.

Sinds september 1973 heb ik een enorme hoeveelheid ervaring opgedaan, waar ik bijzonder dankbaar voor ben. De laatste anderhalf jaar heb ik, eerst in een stage, later tijdens het afstuderen, gewerkt onder leiding van Dr.ir. J.P.A. Berhault, die in vele opzichten een grote steun voor mij geweest is. Maar ook de volgende personen wil ik dank betuigen, omdat ze ieder op verschillende wijze ertoe bijgedragen hebben dat ik dit resultaat bereikt heb.

Prof.dr. P.C. Veenstra, afstudeerhoogleraar (afdeling der werktuigbouwkunde);
Prof.dr. J.A. Poulis en Dr. J.A. Beun, contactdocenten (afdeling der technische natuurkunde);

Ing. G. Toet en Dr.ir. M.E.H. van Dongen, leden van de ondervragingscommissie;
Ing. J.C.J. Daniëls, de medewerkers van het laboratorium voor aandrijftechniek, H. Lenders (TH-student) en J. Damen (HTS-student), die behulpzaam geweest zijn bij het verrichten van de metingen tijdens het afstudeeronderzoek;

J. van den Eijnde (TH-student), die gedurende de eerste drie jaren van mijn studie veel met mij heeft samengewerkt;

de medewerkers van de TH, die op een of andere manier bij mijn studie betrokken zijn geweest;

de studenten, vooral van het Eindhovens Studenten Muziek Gezelschap, die van de vrije tijd een gezellige tijd maakten;

en "last but not least" mijn ouders, die mij altijd en overal ter zijde stonden en zonder wie dit alles niet mogelijk zou zijn geweest.

Eindhoven, februari 1979.

Jan de Laat.

SAMENVATTING

In de interafdelingswerkgroep "Geluidbestrijding aan hydraulische systemen en componenten" is ten behoeve van het onderzoek in de loop van 1978 een nieuw meetinstrumentarium opgebouwd, bestaande uit onder meer twee spectrum-analysatoren, een calculator en een plotter.

In het eerste deel van dit verslag komen drie onderwerpen aan de orde. Begonnen wordt met een algemene beschrijving van de analysatoren, daarna wordt verteld op welke manier deze apparaten gebruikt kunnen en moeten worden bij geluidonderzoek en tenslotte wordt uit de doeken gedaan welke mogelijkheden de calculator biedt in combinatie met de analysatoren en welke problemen zich daarbij voordoen. Tevens zijn er twee calculator-programma's opgenomen.

Daar waar hydraulische installaties in werking zijn, wordt hinder ondervonden van het door de machines geproduceerde lawaai. Dat lawaai is niet alleen afkomstig van de actieve onderdelen van het systeem, zoals pompen en motoren, maar ook van de verbindingen tussen die onderdelen, de hydraulische leidingen.

Er bestaat een verband tussen de vloeistofdrukpulsaties in de leidingen, de trillingen in de wand van de leidingen en de geluidafstraling van de leidingen.

In het tweede deel van dit verslag wordt een theorie beschreven van het verband tussen de trillingen in de wand en de geluidafstraling. De theoretische uitkomsten worden vergeleken met de resultaten van de verrichte metingen. Deze blijken redelijk met elkaar overeen te stemmen. Tevens blijkt er nauwelijks verschil te zijn tussen geluidafstraling met en zonder vloeistof in de leidingen. Daaruit wordt geconcludeerd dat de trillingen vooral het gevolg zijn van mechanische geluidtransmissie tussen de hydraulische verbindingen en minder van geluidoverdracht van vloeistof naar wand en lucht.

INHOUD

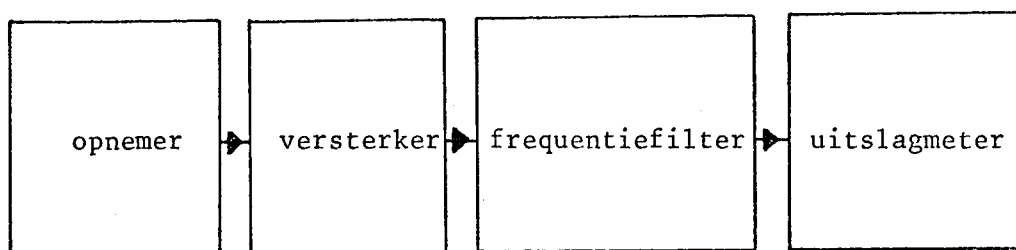
	blz.
1 <u>OPBOUW VAN HET MEETSYSTEEM VOOR GELUID- EN TRILLINGSMETINGEN</u>	5
1.1 ALGEMEEN	5
1.2 DIGITALE FREQUENTIE ANALYSATOR (TYPE 2131) VAN BRÜEL & KJAER	9
1.2.1 Filtering	9
1.2.2 Middeling	12
1.2.3 Output	14
1.3 SMALLE BAND SPECTRUM ANALYSATOR (TYPE 2031) VAN BRÜEL & KJAER	15
1.3.1 Processing	15
1.3.1.1 Triggering	16
1.3.1.2 Filtering	17
1.3.1.3 Fast Fourier Transform (FFT)	18
1.3.1.4 Middeling	20
1.3.2 Output	22
1.4 CALCULATOR (TYPE 9825A) VAN HEWLETT PACKARD	23
1.5 DATA-OVERDRACHT TUSSEN DE ANALYSATOREN VAN BRÜEL & KJAER EN DE CALCULATOR VAN HEWLETT PACKARD	24
1.6 SOFTWARE PROGRAMMA'S VOOR GELUID- EN TRILLINGSMETINGEN EN BEREKENINGEN	30
1.6.1 2131-spectra-transfer	31
1.6.2 2031-third-octave-analysis	36
1.6.2.1 1/3-octaafspectrum uit smalle band spectra	36
1.6.2.2 Discussie	43
1.7 LITERATUURLIJST	46

	blz.
2 <u>GELUIDAFSTRALING VAN HYDRAULISCHE LEIDINGEN</u>	48
2.1 INLEIDING	48
2.2 THEORIE	49
2.3 MEETOPSTELLING	60
2.4 EXPERIMENTEN EN RESULTATEN	65
2.5 DISCUSSIE EN CONCLUSIES	69
2.6 LITERATUURLIJST	73
2.7 APPENDIX	74

1 OPBOUW VAN HET MEETSISTEEM VOOR GELUID- EN TRILLINGSMETINGEN

1.1 ALGEMEEN

Voor het verrichten van metingen in de akoestiek, zoals geluid- en trillingsmetingen, moet men de beschikking hebben over verschillende meetinstrumenten. In figuur 1 is getekend hoe in het algemeen zo'n instrumentarium is opgebouwd.



Figuur 1: instrumentarium - schema voor akoestische metingen

De verschillende onderdelen kunnen bijvoorbeeld zijn:

Opnemer: . . . microfoon; versnellingsopnemer

Versterker: microfoonversterker; ladingsversterker

Frequentiefilter: logaritmisch filter (constant percentage bandbreedte ofwel $\Delta f/f = \text{constant}$), zoals octaaffilter of tertsoctaaffilter; lineair filter (constante bandbreedte ofwel $\Delta f = \text{constant}$), zoals smalle band filter; algemeen filter (frequentie-onafhankelijk)

Uitslagmeter: aanwijsnaald; cijferdisplay; beeldscherm

Aanvullende apparatuur kan bestaan uit:

Voor de opnemer: ijkinstrument of calibrator, zoals een pistonphone voor de microfoon (geeft een bepaald geluidsdrukniveau in een gecalibreerde ruimte) of een triltafel voor de versnellingsopnemer

- Voor de versterker: integrator voor de ladingsversterker, om in plaats van de versnelling, de snelheid of de verplaatsing te kunnen meten
- Voor het frequentiefilter: A, B, C of D filter, om rekening te houden met het feit dat het menselijk gehoororgaan niet gelijkmatig gevoelig is voor geluid over het hele frequentiegebied en over alle geluidniveaus
- Voor de uitslagmeter: instrument om het signaal vast te leggen: schrijver of plotter, printer, tape- of cassetterecorder

In het interafdelingsproject "Geluidbestrijding aan hydraulische systemen" wordt sinds het voorjaar van 1978 gebruik gemaakt van de volgende apparaten:

- a) Digitale frequentie analysator (type 2131) van Brüel & Kjaer
- b) Smalle band spectrum analysator (type 2031) van Brüel & Kjaer
- c) Calculator (type 9825A) van Hewlett Packard
- d) Plotter (type 9872A) van Hewlett Packard

Ad a) De digitale frequentie analysator (B&K 2131) is een combinatie van frequentiefilter en uitslagmeter. Het frequentiefilter is een logaritmisch filter. Het apparaat biedt zowel de mogelijkheid voor octaaf-filtering als voor 1/3-octaaffiltering en bij uitzondering zelfs voor 1/12-octaaffiltering. De filtering geschiedt parallel, dat wil zeggen dat alle filters gelijktijdig het binnenkomende signaal verwerken, zodat real-time analyse mogelijk is.

De 2131 beschikt verder over een analoog-digitaal-omvormer (AD-converter), die het binnenkomende signaal omvormt in een digitaal signaal, geschikt voor digitale uitlezing op het beeldscherm en voor digitale output. Een meer uitgebreide beschrijving van deze analysator volgt in paragraaf 1.2.

Ad b) Ook de smalle band spectrum analysator (B&K 2031) is een combinatie van frequentiefilter en uitslagmeter. Het frequentiefilter is een lineair filter. De breedte (Δf) van de frequentiebanden hangt af van de volle schaal frequentie (f_{FS}) volgens de relatie

$$\Delta f = \frac{f_{FS}}{400}$$

Het apparaat werkt volgens de FFT procedure (Fast Fourier Transform). Deze procedure transformeert een functie in het tijddomein naar een functie in het frequentiedomein. Bij de 2031 is zowel het tijdafhanke-lijke als het frequentieafhankelijke signaal als output beschikbaar. Het is verder mogelijk in real-time te analyseren tot 2 kHz. Evenals de 2131 beschikt de 2031 over een AD-converter. Zie voor meer gede-tailleerde informatie paragraaf 1.3,

Ad c) De calculator (HP 9825A) biedt de volgende mogelijkheden:

- Het besturen van de onder a) en b) genoemde analysatoren,
- Het verwerken van en rekenen met meetgegevens,
- Het in digitale vorm bewaren van meetgegevens op een magneetband-cassette.
- Het besturen van de onder d) genoemde plotter,

Het werkgeheugen van de calculator heeft een capaciteit van ongeveer 16 k bytes (1 byte = 8 bits), en de cassette kan ongeveer 250 k bytes bevatten. De rekensnelheid van de calculator is ongeveer 200 k boud. Overige informatie over de calculator is te vinden in paragraaf 1.4.

Ad d) De plotter (HP 9872A) maakt het mogelijk meetgegevens grafisch weer te geven. Enkele voorbeelden van grafieken zijn:

- Het frequentiespectrum van een signaal, bijvoorbeeld het geluid-drukniveau uitgezet tegen de frequentie (lineair of logaritmisch),
- De tijdfunctie van een signaal.
- De plaatsfunctie van een signaal.

Terugkomend op figuur 1, zij nog vermeld dat hier niet nader ingegaan zal worden op de eerste twee onderdelen van het instrumentarium - schema.

Volstaan wordt met het noemen van enkele voorbeelden:

Opnemer: condensator microfoon (type 4145) van Brüel & Kjaer
versnellingsopnemer (type 4344) van Brüel & Kjaer

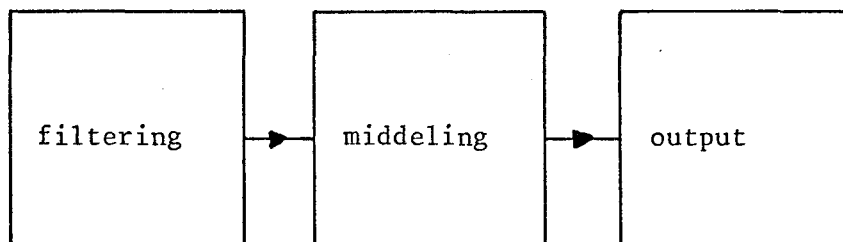
Versterker: microfoonversterker (type 2619) van Brüel & Kjaer
ladingsversterker (type 2635) van Brüel & Kjaer

Het grote voordeel van bovengenoemde combinatie van analysator en calculator is dat de metingen on-line verwerkt worden, zodat vrijwel onmiddellijk resultaten bekend zijn en eventueel wijzigingen in de meetopstelling aangebracht kunnen worden. Zeker in het geval van het verrichten van geluidmetingen aan hydraulische systemen is dat van groot belang, omdat het in bedrijf stellen van een (meet-)opstelling nogal wat tijd in beslag neemt. Dit geldt nog meer in het geval de bedrijfscondities aan bepaalde voorwaarden moeten voldoen. In zo'n geval is het noodzakelijk na iedere in bedrijf stelling een meting te doen voor het testen van de reproduceerbaarheid van de metingen. De onnauwkeurigheid van bovengenoemde meetapparatuur is immers vele malen kleiner dan de onnauwkeurigheid waartoe de wisselende bedrijfscondities aanleiding geven.

In de nu volgende paragrafen 1.2 tot en met 1.4 volgt een beschrijving van en tevens handleiding in het gebruik van de analysatoren van Brüel & Kjaer en de calculator van Hewlett Packard. Het is namelijk gebleken dat het doorwerken van de manuals van B&K en HP nogal wat tijd in beslag neemt. Maar omdat de voor de in het interafdelingsproject te verrichten metingen noodzakelijke meethandelingen grotendeels vastgelegd zijn in beschikbare calculatorprogramma's is het voor het toekomstige gebruik van voornoemde apparaten slechts vereist op de hoogte te zijn van wat daarover in dit verslag geschreven is alsmede van de bijbehorende programmabeschrijvingen en de manuals alleen als naslagwerk te gebruiken.

1.2 DIGITALE FREQUENTIE ANALYSATOR (TYPE 2131) VAN BRÜEL & KJAER

Dit apparaat is geschikt om akoestische signalen te analyseren. De functies van het apparaat zijn te onderscheiden in drie groepen, zoals in figuur 2 weergegeven is.



Figuur 2: functies van 2131

In de volgende drie paragrafen worden de drie groepen functies besproken.

1.2.1 Filtering

Een akoestisch signaal wordt gekarakteriseerd door zijn frequentie- en amplitudeverdeling. Bij lawaaibestrijding is het noodzakelijk te weten hoe die frequentieverdeling er uit ziet. Want pas als dat bekend is zijn er maatregelen te treffen om het lawaai te bestrijden. Als voorbeeld kan genoemd worden, dat men in de passieve lawaai bestrijding de absorptie-eigenschappen van akoestische materialen onderzoekt. Deze eigenschappen variëren in verschillende frequentiegebieden. (Passieve lawaai bestrijding probeert lawaai vermindering tot stand te brengen door afscherming, in tegenstelling tot actieve lawaai bestrijding, die probeert de geluidbron te veranderen.)

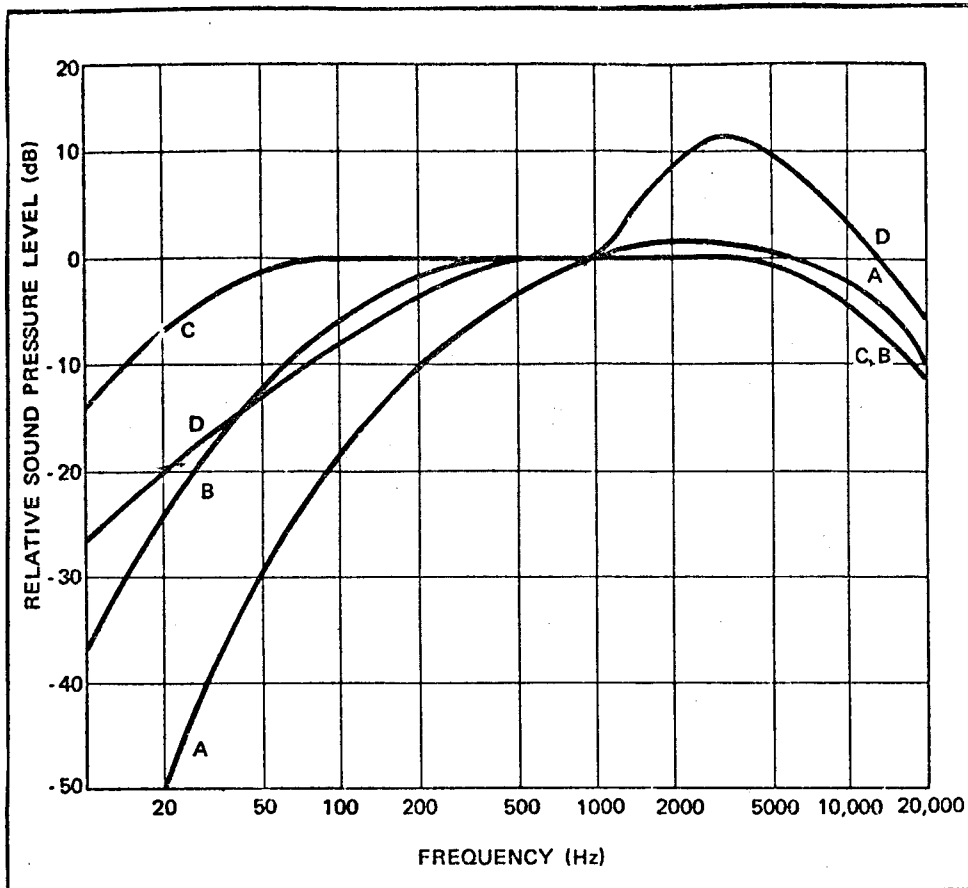
Omdat het verschil in toonhoogte niet bepaald wordt door het verschil van de frequenties maar door de verhouding van de frequenties, vindt de analyse van het geluid plaats in zogenaamde octaaf- en 1/3-octaafbanden.

Rond een bepaalde frequentie f_o is een octaafband het frequentiegebied dat loopt van $f_o/\sqrt{2}$ tot $f_o*\sqrt{2}$. De volgende octaafband ligt op dezelfde wijze rond de frequentie $2*f_o$. Evenzo is een octaafband logaritmisch verdeeld in drie 1/3-octaafbanden. En elke 1/3-octaafband bevat vier 1/12-octaafbanden. De frequenties f_o , $2f_o$, $4f_o$, worden de centrale frequenties van de octaafbanden genoemd. Bij de 2131 worden de volgende centrale frequenties gebruikt:

2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 en 16000 Hz
--

Zonder remote-control (gebruik van een calculator, die via een interface aan de analysator gekoppeld is) is alleen octaaffiltering en 1/3-octaaffiltering mogelijk. Als de HP 9825A aangesloten is, kan 1/12-octaaffiltering verkregen worden. Daarbij moet wel in de gaten gehouden worden dat de 2131 bij octaaf- en 1/3-octaaffiltering in real-time analyseert, maar bij 1/12-octaaffiltering niet. Daar wordt nog op terug gekomen in de paragraaf over de data-overdracht tussen de analysatoren en de calculator.

Als ten behoeve van lawaaibestrijding een bepaald geluidssignaal geanalyseerd wordt, dan wordt dit meestal gedaan omdat de mens het lawaai als te luid ervaart. Maar het menselijk gehoororgaan is bijvoorbeeld voor geluid met een frequentie lager dan 500 Hz en hoger dan 4000 Hz minder gevoelig dan voor geluid met een frequentie daar tussen in. Deze gevoeligheid is verder nog afhankelijk van het geluidsniveau, want als het niveau hoger is, is het voornoemde effect niet zo sterk (vooral in de lage frequenties). In figuur 3 is terug te vinden hoe in een geluidmeter rekening gehouden wordt met deze oorgevoeligheid. Daarbij stellen de lijnen in de grafiek elektronische filternetwerken voor. Als een geluidmeter zo'n elektronische filterschakeling bevat, dan worden de geluidsniveaus bij de verschillende frequenties gecorrigeerd met de waarden van de geluidsniveaus zoals die bij dezelfde frequenties in de figuur voorkomen.



Figuur 3: A, B, C en D filter

De A, B en C filters worden respectievelijk gebruikt bij toenemende geluidniveaus. Het D filter wordt alleen gebruikt bij vliegtuiglawaai. De 2131 beschikt over een uitschakelbaar A filter.

Tevens is er bij de 2131 de mogelijkheid het zogenaamde "OverAll-Level" (OAL) te meten. Dat is het niveau van het signaal, voordat het door de verschillende octaaffilters gegaan is.

Er is echter een filter waar het signaal wel doorheen gaat, Dat is een filter dat het signaal beneden 1 Hz niet doorlaat (karakteristieke helling van het filter: 18 dB/octaaf) en boven 23,4 kHz niet doorlaat (karakteristieke helling: 72 dB/octaaf). Dit filter wordt ook wel lineair filter genoemd. Ook voor het OAL (signaal alleen door lineaire filter) is A-filtering mogelijk.

1.2.2 Middeling

De 2131 analyseert in real-time, Dat wil zeggen, dat de frequentie-analyse en de daarbij behorende output "van moment tot moment" overeenstemt met de erbij behorende input. Enkele opmerkingen zijn hierbij op zijn plaats. Vanzelfsprekend is er een bepaalde minimale tijd voor nodig om een frequentieanalyse tot stand te brengen. Deze tijd zal voornamelijk afhangen van twee dingen. Op de eerste plaats moet voldaan zijn aan de onzekerheidsrelatie van Heisenberg

$$\Delta\nu * \Delta t > 1$$

waarin $\Delta\nu$ de (frequentie-) bandbreedte van het te analyseren signaal voorstelt en waarin Δt de tijd voorstelt, nodig om de analyse tot stand te brengen. Ter vergelijking: als de pulsduur van de hartslag ongeveer 0.85 seconde bedraagt, dan heb je meer dan 1 seconde nodig om dat te constateren.

De analysetijd is verder nog afhankelijk van de looptijd, Dat is de tijd, die verloren gaat in de elektronische circuits van de analysator, zoals in RC-filters.

Bij de 2131 bedraagt de kortste analysetijd 1/32 seconde, De analysetijd (of averaging time) kan verder ingesteld worden op waarden die onderling een factor 2 verschillen te beginnen met 1/32 seconde, Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de laagste analysetijden slechts nauwkeurige uitkomsten opleveren boven bepaalde frequenties, als

$$\Delta\nu * \Delta t > 10$$

Als een niet stationair signaal geanalyseerd moet worden, dan zal een zo kort mogelijke analysetijd gebruikt worden, wanneer het verloop als functie van de tijd belangrijk is.

(Daarbij moet men dan wel de beschikking hebben over een apparaat dat na elke analyse de geanalyseerde spectra op kan slaan, zodat ze beschikbaar zijn voor latere verwerking.) Als het verloop als functie van de tijd niet belangrijk is, dan zal de analysetijd langer moeten zijn naarmate het signaal minder stationair is,

De 2131 heeft als langste analysetijd 128 seconden. Beperkende factoren zijn echter de duur van het signaal (het is vaak zo dat slechts gedurende enkele seconden aan bepaalde bedrijfscondities voldaan kan worden) en de mogelijke aanwezigheid van storingen,

In plaats van het instellen van de analysetijd is het bij de 2131 ook mogelijk de analysetijd te laten afhangen van de mate waarin het signaal stationair is. De analyse houdt pas op als het voldoende zeker is (betrouwbaarheid 68%) dat de gemiddelde waarde niet meer dan 2, 1 of 0.5 dB (instelbaar) afwijkt van de waarde die je zou vinden als je onbeperkt lang zou middelen.

De 2131 heeft twee methodes om te middelen, namelijk exponentiëel en lineair. Als bijvoorbeeld de analysetijd 1 seconde bedraagt, dan berekent het apparaat een gemiddelde over 32 analyses (samples) die telkens 1/32 seconde in beslag nemen. Deze berekening kan op twee verschillende manieren plaats vinden:

exponentiëel volgens

$$A_r = A_{r-1} + \frac{T_r - A_{r-1}}{N}$$

lineair volgens

$$A_r = A_{r-1} + \frac{T_r}{N}$$

waarin A_r = gemiddelde na r-de sample

A_{r-1} = gemiddelde na (r-1)-ste sample

T_r = r-de sample

N = totaal aantal samples

Het verschil tussen exponentiëel middelen en lineair middelen is het niet op dezelfde wijze waarden van de samples gedurende de analysetijd. Bij lineair middelen worden de samples gelijk gewaardeerd terwijl bij exponentiëel middelen de in chronologische volgorde vroeger komende samples minder gewaardeerd worden. Bij de 2131 is er verder nog het verschil dat de exponentiële middeling doorgaat nadat de ingestelde analysetijd voorbij is en de lineaire middeling ophoudt. Voorts bestaat de mogelijkheid het middelen te onderbreken om het even later weer voort te zetten.

1.2.3 Output

In deze paragraaf zal hoofdzakelijk ingegaan worden op de mogelijkheden die het beeldscherm van de digitale frequentie analysator biedt, voor zover deze mogelijkheden met de hand bediend kunnen worden. Als een calculator aangesloten is wordt het aantal gebruiksmogelijkheden groter, maar dat wordt besproken in de paragraaf over de data-overdracht tussen de analysatoren en de calculator.

Als het spectrum van een signaal zichtbaar gemaakt wordt op het beeldscherm, dan zullen de weergegeven niveaus overeen moeten stemmen met de werkelijke niveaus. Voor een eventuele aanpassing zorgen "Reference Adjust" (stappen van 10 dB) en "Gain Control" (continu van 0 tot 10 dB). Tevens is een interne referentie aanwezig.

Het dynamisch bereik van het scherm is 66 dB,

Het volle schaal niveau mag niet overschreden worden. Om dat te bereiken kan de input met behulp van "Input Att. 0 to 100 dB" in stappen van 10 dB verschoven worden, waarbij het aangegeven niveau gelijk blijft.

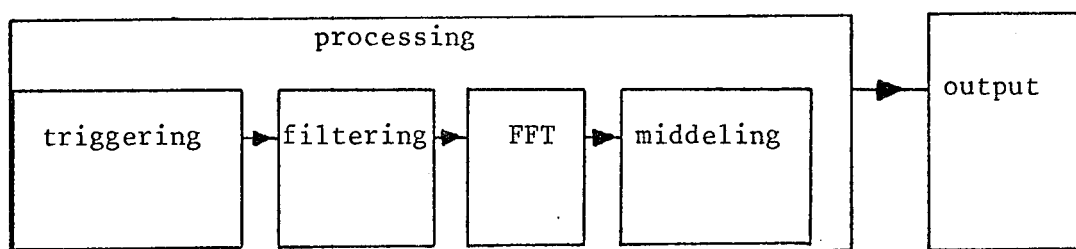
De 2131 is weliswaar geen tweekanaals analysator, toch kunnen twee verschillende spectra met elkaar vergeleken worden door ze achter elkaar op te nemen, waarbij een van beide in het geheugen opgeslagen wordt en later met het input-spectrum vergeleken kan worden. Het verdient daarbij de voorkeur het volle schaal niveau voor beide spectra even hoog te kiezen.

Behalve het middelen van het input spectrum, bestaat ook de mogelijkheid de maximale waarde van elke 1/3-octaf- of octaafband vast te houden en op de display te laten verschijnen.

Het gebruik van de overige met de hand te bedienen toetsen of functies, zoals "Scale Brightness", "Intensity", "Channel Selector" en "Frequency Range" spreken voor zich.

1.3 SMALLE BAND SPECTRUM ANALYSATOR (TYPE 2031) VAN BRÜEL & KJAER

Evenals de 2131 is de 2031 een apparaat waarmee je akoestische signalen kunt analyseren. De functies van dit instrument kunnen worden verdeeld in twee groepen, zoals aangegeven is in figuur 4, waarin de eerste groep onderverdeeld is weergegeven.



Figuur 4: functies van 2031

Behalve een beschrijving van de verschillende functies van deze analysator, volgt ook een vergelijking met de 2131, voorzover dat mogelijk is.

1.3.1 Processing

Zoals in figuur 4 al aangegeven is, valt de groep "processing" uiteen in enkele onderdelen, waarvan de vier voornaamste reeds vermeld zijn. Daarbij kan opgemerkt worden dat de filtering zoals die bij de 2131 plaats vindt, hier totaal anders verloopt.

Wat bij de 2131 filtering heet, is bij de 2031 ondergebracht bij de FFT. Triggering vindt bij de 2131 niet plaats en middeling gaat bij de 2131 bijna op dezelfde manier als bij de 2031.

1.3.1.1 Triggering

Het moment waarop de analyse start kan op vier verschillende manieren bepaald worden. Als de 2031 op "Free Run" staat, kan door handbediening gestart worden of door "afstandbediening" (remote control, bijvoorbeeld met de HP 9825A), in beide gevallen door gebruik te maken van "Record Single" of "Record Cont." in combinatie met "Record Stop". Tevens kan gebruik gemaakt worden van triggering. Dit kan gebeuren zowel door middel van een externe triggerpuls, zodat de analyse start op het moment dat de puls de 2031 binnenkomt, als door middel van een interne triggerpuls, waarbij de puls in het op te nemen signaal aanwezig is. In het laatste geval is het mogelijk om het niveau waarbij triggering plaats vindt op een bepaalde waarde in te stellen, zodat zelfs een deel van het op te nemen signaal (bijvoorbeeld een pick) als triggerpuls kan dienen.

De tijdsduur van een analyse is afhankelijk van de ingestelde volle schaal frequentie. Als het te analyseren gedeelte van het signaal echter niet meteen volgt op de triggerpuls, kan met behulp van "Records after Trig." toch op het goede moment gestart worden met de analyse. "Records after Trig." is ook van toepassing als de triggerpuls wel bij het te analyseren gedeelte van het signaal hoort, De 2031 beschikt namelijk over een buffer waarvan de capaciteit even groot is als de inhoud van de input, zodat tijdens een continue analyse de inhoud van de input telkens verhuist naar de buffer, en afhankelijk van de instelling van "Records after Trig." (tussen 0.0 en 1.0) verschijnt een gedeelte van de buffer en een gedeelte van de input samen op het beeldscherm. Hoewel bij de 2031 real-time analyse slechts plaats kan vinden tot 2000 Hz is het vanaf die frequentie toch mogelijk gedurende korte tijd in real-time te analyseren. Deze mogelijkheid doet zich alleen voor als het signaal perfect reproduceerbaar is, bijvoorbeeld als het op band opgenomen is. Eerst wordt "Records after Trig." ingesteld op 0.9, zodat bij interne triggering nog juist de triggerpuls geanalyseerd wordt. Als die analyse klaar is, wordt vervolgens "Records after Trig." ingesteld op 1.9 en zo verder totdat "Records after Trig." ingesteld is op 9.9. Op deze manier zijn er tien analyses geweest, waarvan de tijdfuncties precies achter elkaar passen (real-time).

Als er gebruik gemaakt wordt van een calculator, kan zich hierbij nog een leuke bijkomstigheid voordoen. Als de data van de tien analyses in het geheugen van de calculator opgeslagen zijn is het eenvoudig om de bijbehorende tien frequentiespectra op het beeldscherm van de 2031 te zetten. Maar het is tevens niet zo moeilijk om van een willekeurig gedeelte uit de reeks van tien tijdfuncties achter elkaar door middel van FFT een nieuw frequentiespectrum te genereren en op het beeldscherm van de 2031 te zetten.

Als bijvoorbeeld de volle schaal frequentie 2 kHz is, dan bedraagt de analysetijd 200 ms, zodat over een periode van 2 seconde in real-time geanalyseerd kan worden.

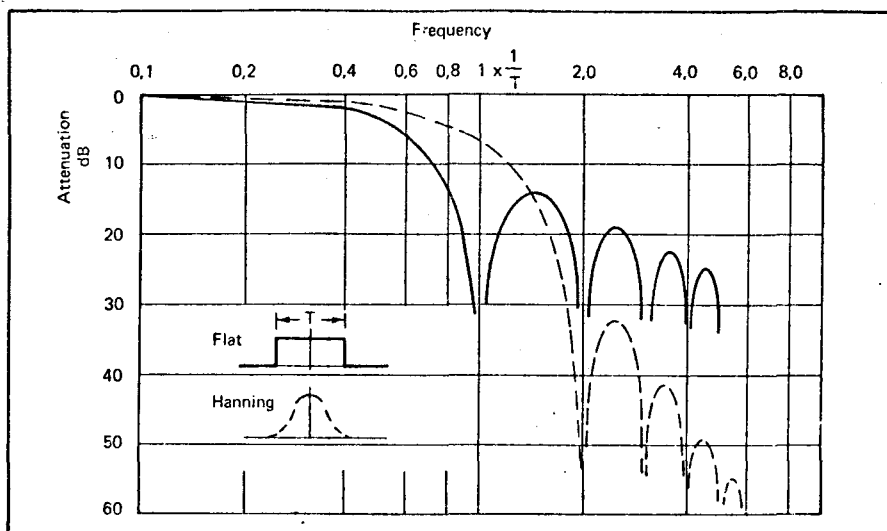
1.3.1.2 Filtering

Zoals reeds opgemerkt is vindt de filtering, zoals die bij de 2131 plaats vindt met banden die een constant frequentiepercentage breed zijn, bij de 2031 plaats door middel van de Fast Fourier Transform (FFT) zodat banden ontstaan, die een constante frequentieafstand breed zijn. De bespreking van de FFT is te vinden in de volgende paragraaf.

Er zijn echter nog enkele andere filters aanwezig in de analysator. Op de eerste plaats zijn dat de filters (overigens ook in de 2131), die mogelijke storing boven de ingestelde volle schaal frequentie uit het signaal filteren. Omdat de volle schaal frequentie elf mogelijke waarden kan aannemen zijn er ook elf van dergelijke filters (zogenaamde antialiasing filters) aanwezig, die het binnenkomende signaal boven de volle schaal frequentie niet doorlaten (karakteristieke helling: 113 dB/octaaf).

Alvorens het tijdsignaal getransformeerd wordt in een frequentiespectrum kan het verder nog "gefilterd" worden door het zogenaamde "Hanning" weighting. "Hanning" weighting is eigenlijk geen filtering (je spreekt alleen in het frequentiedomein over filtering), maar het is een tijdvenster dat op ongeveer dezelfde manier als dat in het frequentiedomein gebeurt de samples in het tijddomein "filtert".

In onderstaande figuur is duidelijk gemaakt wat het verschil is tussen wel en niet gebruik maken van "Hanning" weighting. De zogenaamde 3 dB bandbreedte is zonder "Hanning" weighting ("Flat") gelijk aan 0.88β en met "Hanning" weighting gelijk aan 1.44β , waarin β de resolutie voorstelt (breedte van één frequentieband).



Figuur 5: "filtering" met en zonder "Hanning" weighting

Het effect van het gebruik van "Hanning" weighting komt hoofdzakelijk neer op het isoleren van frequentiepieken. Daarom is "Hanning" weighting niet geschikt voor de analyse van pulsvormige of discontinue signalen, maar beter geschikt voor de analyse van continue signalen.

1.3.1.3 Fast Fourier Transform (FFT)

Bij de 2131 vindt de analyse plaats door Fourier transformatie van 1024 tijdafhankelijke samples van het inputsignaal. De volgende twee vergelijkingen geven in principe de Fourier transformatie weer.

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \exp(+j\omega t) d\omega$$

Aangezien de 2031 over discrete samples van het inputsignaal beschikt, zijn de volgende twee vergelijkingen meer van toepassing.

$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \exp(-j\frac{2\pi nk}{N})$
$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \exp(j\frac{2\pi nk}{N})$

Deze discrete Fourier transformatie kan door een slimme opbouw van de berekening op een snelle wijze uitgevoerd worden en wordt daarom ook wel Fast Fourier Transform (FFT) genoemd. De 1024 tijdafhankelijke samples van het inputsignaal worden getransformeerd in 1024 punten in het frequentiedomein, die verdeeld zijn over een frequentiegebied dat loopt van 0 Hz tot de zogenaamde sampling frequency. Omdat dit frequentiegebied opgedeeld kan worden in twee even grote deelgebieden, waarvan het tweede deel, dat loopt van de Nyquist frequentie (gelijk aan de halve sampling frequency) tot aan de sampling frequency, hetzij symmetrisch of antisymmetrisch is ten opzichte van het eerste deel hetzij negatieve frequentiecomponenten bevat, is de nuttige informatie volledig terug te vinden in het eerste deel, dat loopt van 0 Hz tot de Nyquist frequentie. Bij de 2031 is de sampling frequency gelijk aan 2.56 maal de volle schaal frequentie, zodat niet alle informatie tot de Nyquist frequentie op het beeldscherm verschijnt. Deze informatie is echter wel door middel van het gebruik van remote control (aansluiting van een calculator bijvoorbeeld) beschikbaar. Er kunnen elf verschillende frequentiegebieden ingesteld worden, die telkens beginnen bij 0 Hz en lopen tot respectievelijk 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 en 20000 Hz. In het tijddomein is de analysetijd t afhankelijk van de ingestelde volle schaal frequentie f_{FS} volgens de relatie

$t = \frac{400}{f_{FS}}$

Omdat voor de Fourier transformatie een bepaalde minimum rekentijd (ongeveer 200 ms) vereist is, is slechts real-time analyse mogelijk als deze rekentijd minder bedraagt dan de analysetijd. Dat is het geval bij een volle schaal frequentie ≤ 2000 Hz.

De 2031 beschikt slechts over één geheugen voor het opslaan van data, zodat voor real-time analyse een calculator vereist is, waar de data opgeslagen kunnen worden. De ervaring leert nu, dat bijvoorbeeld bij het gebruik van de HP 9825A, de data-overdracht tussen de 2031 en de calculator nog enkele milliseconden in beslag neemt, zodat bij deze combinatie real-time analyse mogelijk is als de volle schaal frequentie niet meer dan 1000 Hz is.

Behalve een interne sampling frequency, die elf vaste waarden kan aannemen, is het verder nog mogelijk een externe sampling aan te sluiten.

1.3.1.4 Middeling

In tegenstelling tot de 2131, waar de middeling plaats vindt door het instellen van een bepaalde averaging time, is de middeling bij de 2031 uit te voeren door het instellen van het aantal spectra, dat aan de middeling moet bijdragen. Dit komt in feite op hetzelfde neer, omdat de totstandkoming van een spectrum een bepaalde vaste tijd in beslag neemt, zoals in de vorige paragraaf uiteengezet is. Het enige verschil is dat deze tijd afhangt van de gekozen volle schaal frequentie, zodat bijvoorbeeld middeling van 4 spectra bij $f_{FS} = 200$ Hz langer duurt dan bij $f_{FS} = 2000$ Hz. Omdat boven 2000 Hz de rekentijd, nodig voor de Fourier transformatie, bepalend is voor de analysetijd, duurt de middeling van een even groot aantal spectra bij volle schaal frequenties tussen 2 kHz en 20 kHz even lang.

Aan de relatie van Heisenberg is zonder middeling juist voldaan ($\Delta v * \Delta t = 1$), terwijl de resultaten nauwkeuriger zullen zijn als het aantal spectra (N) dat tot de middeling bijdraagt groter is, wat af te leiden is uit de relatie $\Delta v * \Delta t = N$.

Zoals bij de 2131 het geval is zijn er ook nu twee methodes om te middelen, namelijk exponentieel en lineair.

exponentiëel volgens

$$A_r = \frac{(N/2 - 1) A_{r-1} + T_r}{N/2}$$

lineair volgens

$$A_r = \frac{(r - 1) A_{r-1} + T_r}{r}$$

waarin A_r = gemiddelde na r-de spectrum
 A_{r-1} = gemiddelde na (r-1)-ste spectrum
 T_r = r-de spectrum
N = totaal aantal spectra

Het verschil tussen beide vormen van middelen komt overeen met wat daarover bij de 2131 verteld is. Overeenkomst is er ook wat betreft het verschillend eindigen van de middeling, Wat niet overeenkomt is het volgende. Tijdens een middeling zijn de tussenuitkomsten bij de 2031 correct. Als bijvoorbeeld ingesteld is op het middelen van 8 spectra en gestopt wordt na het middelen van 4 spectra, dan hebben de niveaus dezelfde waarde als de waarde die ze zouden hebben als er ingesteld was op het middelen van 4 spectra. Dit is bij de 2131 niet het geval, daar moet doorgedaan worden met middelen totdat de ingestelde averaging time voorbij is, want de tussenuitkomsten zijn niet correct.

Dan is er nog de mogelijkheid om de maximale waarde van elke smalle band vast te houden en op de display te laten verschijnen. De functies "Start", "Proceed" en "Stop", die op het middelen betrekking hebben, moeten ook bij deze "Hold Max." gebruikt worden, dit in tegenstelling tot wat bij de 2131 het geval is (zie overigens de beschrijving van de output van de 2131). Een belangrijk gevolg daarvan is dat bij de 2131 eerst de ingestelde averaging time (en de daarbij behorende methode van middelen) voorbij moet zijn, voordat de niveaus kunnen stijgen ten gevolge van "Max. Hold" en als er exponentiëel gemiddeld wordt gaat dit proces door. Bij de 2031 echter kan er bij het gebruik van "Hold Max." op geen enkele andere manier nog sprake zijn van middelen.

1.3.2 Output

Opnieuw zal in deze paragraaf, evenals bij de 2131, hoofdzakelijk ingegaan worden op de mogelijkheden, die het beeldscherm van de 2031 biedt, voor zover deze mogelijkheden met de hand bediend kunnen worden. Daarbij zullen de functies, die niet verschillen met overeenkomende functies van de 2131, slechts vermeld worden, zonder er verder op in te gaan.

Overeenkomende functies zijn "Reference Adjust" en "Gain Control" voor het calibreren van het input signaal, Ook hier is een interne referentie aanwezig.

Het dynamisch bereik van het scherm is instelbaar op 20 dB, 40 dB of 80 dB. Om het niveau van het input signaal overeen te laten komen met het bereik van het scherm, daarvoor dient weer "Input Att. 0 - 100 dB", Ook nu kan een spectrum in het geheugen opgeslagen worden, "Scale Brightness", "Intensity", "Line Selector" en enkele andere voor zich sprekende functies en toetsen behoeven verder geen betoog.

Als er een spectrum in het geheugen opgeslagen is en er ook een spectrum op de ingang aanwezig is, is met "Display Selector I - M" de overdrachtsfunctie van deze beide spectra op het scherm te zetten.

Met "Spectrum Gain" kan onafhankelijk van wat er verder ingesteld is, het spectrum op het beeldscherm in stappen van 10 dB verschoven worden, dit in tegenstelling tot "Input Att. 0 - 100 dB", dat alleen betrekking heeft op het binnenkomende signaal.

De 1024 samples van de tijdfunctie kunnen niet tegelijkertijd op het 400 lijnen tellende beeldscherm verschijnen, Met ("Time Function") "Expand" en "Move" kan de tijdfunctie over het scherm heen en weer bewogen worden. Als "Expand" niet gebruikt wordt, dan komt slechts elk derde sample, te beginnen bij sample 1, op het beeldscherm.

Tenslotte is het mogelijk om hetzij bij een tijdfunctie het tijdstip van een bepaald sample hetzij bij een spectrum het niveau van een bepaalde smalle band als referentie te kiezen met behulp van "Reference Time or Level".

1.4 CALCULATOR (TYPE 9825A) VAN HEWLETT PACKARD

Dit apparaat is een tafelrekenautomaat waarmee rekenprogramma's uitgevoerd kunnen worden. Het beschikt daartoe over een alphanumeriek toetsenbord, een 1-dimensionale display met een breedte van 32 karakters, een printrol met een breedte van 16 karakters en een magneetbandcassette voor het digitaal opslaan van programma's en gegevens.

Het direct toegankelijke werkgeheugen heeft een capaciteit van ongeveer 16 k bytes (1 byte = 8 bits) en de cassette kan maximaal 250 k bytes bevatten. De gemiddelde rekensnelheid is 200 k boud. De programma's moeten worden geschreven in HPL, een door Hewlett Packard ontworpen programmeertaal. Het is mogelijk de loop van een programma te onderbreken voor het wijzigen van parameters of het doen van tussenberekeningen. Het aantal gebruiksmogelijkheden kan uitgebreid worden door het toepassen van ROM's (Read Only Memories) en van randapparatuur.

De ROM's, die in de interafdelingsgroep gebruikt worden, zijn:

- string variables ROM
- advanced programming ROM
- 9872A plotter ROM
- general input/output ROM
- extended input/output ROM

Als randapparaat is alleen de plotter (type 9872A) aanwezig.

Als de calculator gebruikt wordt in combinatie met de analysatoren van B&K, is het niet nodig uitgebreid de handleiding van de 9825A te bestuderen, omdat de vereiste programma's meestal ongewijzigd overgenomen kunnen worden van de aanwezige en in dit verslag besproken programma's (zie paragraaf 1.6).

1.5 DATA-OVERDRACHT TUSSEN DE ANALYSATOREN VAN BRÜEL & KJAER
EN DE CALCULATOR VAN HEWLETT PACKARD

De digitale data-overdracht vindt plaats via een volgens IEC-normen functionerende interface, aanwezig in de analysatoren. Een B&K-kabel verbindt deze interface met de interface-bus van de calculator, die volgens IEEE-normen functioneert. Door deze verbinding zijn de volgende vijf functies werkzaam:

- gelijkmatige overdracht van gegevens van analysator naar calculator, zodat geen gegevens verloren gaan (analysator fungeert als talker)
- gelijkmatige overdracht van gegevens van calculator naar analysator (analysator fungeert als listener)
- bepaling van begin en einde en de juiste volgorde van gegevens van analysator naar calculator
- bepaling van begin en einde en de juiste volgorde van gegevens van calculator naar analysator
- terugbrengen in de zogenaamde reset-toestand van calculator, interface en analysator, zodat nieuwe data-overdracht mogelijk is.

Het gebruik van de calculator voor de bediening van de analysatoren kan men in verschillende punten onderscheiden:

- a) "setting of buttons" (2031 en 2131)
- b) "sensing of buttons" (2031 en 2131)
- c) frequentiespectrum van analysator naar calculator (2031 en 2131)
- d) frequentiespectrum van calculator naar analysator (2031 en 2131)
- e) tijdfunctie van analysator naar calculator en omgekeerd (2031)
complex spectrum van analysator naar calculator en omgekeerd (2031)
- f.1) overall-level (OAL) bij 1/3-octaaf spectrum (2131)
- f.2) synchronisatiepuls (2131)
- f.3) 1/12-octaafanalyse (2131)
- f.4) real-time analyse (2031)
- f.5) 1/3-octaaf spectrum uit smalle band spectra (2031)
- f.6) A-weighting bij smalle band spectrum (2031)
- g) 3^e -graads regressie (voor het "plotten" van krommen)
het bepalen van verschillende niveaus (zoals L_{eq} , L_{NP} , L_{10} , L_{50} , L_{90})

- ad a) De zogenaamde afstandbediening: de calculator geeft in bepaalde coderingen opdracht aan de analysatoren om in een bepaalde toestand te geraken of om bepaalde taken uit te voeren. Dit heet "setting of buttons". Een voordeel van deze afstandbediening ten opzichte van handbediening is bijvoorbeeld dat het moment van starten en stoppen van een analyse nauwkeuriger bepaald kan worden: de reactietijd van de mens is ongeveer 200 ms, terwijl de "reactietijd" van de calculator ten opzichte van de analysatoren ongeveer 20 ms is.
- ad b) Het omgekeerde van afstandbediening: de calculator "vraagt" aan de analysatoren naar de toestand van bepaalde functies. Deze toestand wordt in bepaalde coderingen doorgegeven. Dit heet "sensing of buttons". Deze handeling wordt vooral verricht als de analysatoren met de hand ingesteld zijn, want in dat geval is in het geheugen van de calculator nog niets aanwezig omtrent de toestand van de analysatoren zodat er in de meeste gevallen pas gerekend kan worden als gegevens over die toestand doorgegeven zijn.
- Het is vaak verstandig bij het opslaan van data op een cassette tegelijkertijd ook gegevens over de omstandigheden waaronder gemeten is te bewaren; daartoe behoort ook de instelling van de analysatoren; deze instelling kan door middel van "sensing of buttons" ook opgeslagen worden op de cassette.
- ad c) Bij beide analysatoren kan het gemeten frequentiespectrum doorgegeven worden aan de calculator. Bij de 2131 is dit het octaafspectrum (16 frequentiebanden), het 1/3-octaafspectrum (43 frequentiebanden) of het 1/12-octaafspectrum (172 frequentiebanden). Dit laatste is mogelijk doordat de calculator opdracht geeft aan de 2131 nog eens extra te filteren. Bij de 2031 is dit het smalle band spectrum (400 frequentiebanden met een variabele volle schaal frequentie). Per frequentieband wordt een getal doorgegeven, dat het gemeten niveau (in dB) in die band weergeeft. Het oplossend vermogen is 0.1 dB. De vorm kan variëren van 12 karakters per band tot 2 karakters per band. In het ene geval zijn het bandnummer en de letters "dB" opgenomen, in het andere geval is het niveau gecodeerd weergegeven.

Dit laatste kan er bijvoorbeeld als volgt uitzien:

$$A\$[501,516] = i > i \quad i > i \sqrt{\bar{N} + \bar{N} h \bar{N} + i >}$$

Hierbij stellen telkens twee karakters de code van het niveau voor. Daarbij is uitgegaan van het feit dat elk karakter volgens de ASCII-code voorgesteld wordt door 8 bits, zodat twee karakters 16 bits bevatten. Deze 16 bits kunnen $2^{16} = 65536$ getallen voorstellen. Met de functie "fti" (volgens HPL) worden twee karakters op deze manier gecodeerd en met "itf" gedecodeerd, waarbij de getallen gehele getallen zijn tussen -32768 en +32768. De 9825A beschikt over 128 verschillende karakters; er zijn er echter 256 (8 bits dus 2^8) nodig; de overige 128 worden samengesteld uit de eerste 128 en een "aan-uit-signaal", zodat het onderscheid alleen op de display zichtbaar is.

Uit bovenstaande reeks karakters bijvoorbeeld hebben het negende, elfde en dertiende karakter een "aan-uit-signaal".

De decodering gaat dan als volgt:

$$\text{itf}(A\$[509,510])/10 = 93.9$$

waarbij 93.9 het niveau van de 255^e (510/2) frequentieband is, in dB. Bij de 2031 is het bovendien nog mogelijk onafhankelijk van wat er op het beeldscherm staat zowel het "instantaneous spectrum" als het "averaged spectrum" als het "memory spectrum" door te geven.

ad d) Ook het omgekeerde van het voorafgaande is mogelijk:

een frequentiespectrum wordt doorgegeven van de calculator aan de de analysatoren. Zo'n frequentiespectrum kan identiek zijn aan een spectrum, dat al eerder van dezelfde analysator aan de calculator is doorgegeven of het kan door de calculator zelf samengesteld zijn. Bij dit laatste moet er wel op gelet worden dat de vorm gelijk blijft aan de vorm waarover

onder c) gesproken is. Een voorbeeld van zo'n door de calculator geproduceerd spectrum is een 1/3-octaafspectrum dat samengesteld is uit enkele smalle band spectra.

- ad e) Bij de 2031 zijn nog vier andere mogelijkheden van data-overdracht:
- doorgeven van de tijdfunctie van de analysator aan de calculator
 - doorgeven van de tijdfunctie van de calculator aan de analysator
 - doorgeven van het complexe spectrum van de analysator aan de calculator
 - doorgeven van het complexe spectrum van de calculator aan de analysator

Het doorgeven van de tijdfunctie vindt plaats door middel van het overseinen van twee karakters per sample, die eerst gedecodeerd moeten worden om er een getal (spanningsamplitude) van te maken. Volstaan wordt met het geven van een voorbeeld van hoe die decodering er uit ziet:

$$A\$[1126,1136] = \theta m \theta \Gamma P \delta p \gamma \theta 1 p$$

waarbij de eerste twee en de laatste vijf karakters een "aan-uit-sigitaal" hebben.

Decodering:

$$10^{(A/20-6)} * \text{itf}(A\$[1135,1136]) * 2^{-15} = -0,13 \text{ [Volt]}$$

waarbij A het volle schaal niveau voorstelt (119 dB).

Het doorgeven van het complexe spectrum geschiedt op een tot dusverre onverklaarbare manier; contact met mensen van Brüel & Kjaer in Denemarken bracht tot nu toe geen duidelijkheid daarover.

- ad f) Tenslotte worden nog enkele faciliteiten genoemd, die de 2131 en de 2031 in combinatie met de 9825A bieden, maar die zonder calculator niet gebruikt kunnen worden. De meeste van deze punten zullen overigens nogmaals ter sprake komen in de volgende paragraaf, als de software programma's behandeld worden.
- ad f.1) De 2131 geeft op het beeldscherm alleen het overall-level als de octaafmeting ingeschakeld is. Als echter de niveaus van de 1/3-octaafmeting bekend zijn en overgeseind worden naar de calculator, kan daaruit het overall-level (OAL) berekend worden en samen met het oorspronkelijke 1/3-octaafspectrum teruggeseind worden naar de 2131 en daar op het beeldscherm gezet worden.

Het overall-level wordt als volgt uit de niveaus (L_i) van de afzonderlijke frequentiebanden berekend:

$$OAL = 10 \log \left(\sum_i (10^{(L_i/10)}) \right)$$

- ad f.2) Bij de 2131 is het niet mogelijk om te triggeren. Maar de triggering kan wel nagebootst worden. Neem bijvoorbeeld een pulsvormig signaal van 60 ms op aan het begin van de originele input (samen op een bandrecorder); dit signaal moet een frequentie hebben die hoger is dan 5 kHz en meer dan 20 dB hoger liggen dan de originele input. Stel een middelingstijd in van 1/32 seconde, start de band enkele seconden voor de puls en geef na elke korte analyse het spectrum door aan de calculator. Deze controleert de aanwezigheid van de puls en zodra de puls gearriveerd is, kan de 2131 ingesteld worden voor de analyse van de originele input, die onmiddellijk daarna kan starten, De vertraging bij deze handelwijze is hooguit 100 ms.
- ad f.3) Bij gebruik van de 9825A kan men bij de 2131 1/12-octaaf analyses verrichten. Men kan dan echter niet meer spreken van real-time analyses, omdat het genereren van een 1/12-octaaf spectrum vier keer zo lang duurt als het genereren van een 1/3-octaaf spectrum. Het inputsignaal wordt immers vier keer gefilterd, waar bij 1/3-octaaffiltering slechts een keer filteren nodig is.
- ad f.4) Over real-time analyse bij de 2031 is al gesproken in paragraaf 1.3.1.1 (Triggering). Ook toen is gebleken dat het nuttig kan zijn de calculator aan te sluiten. Maar ook nog om twee andere redenen is het nuttig in verband met de real-time analyse. Op de eerste plaats is er bij een keuze van 100 Hz of lager van de volle schaal frequentie voldoende tijd om de achtereenvolgens door te geven spectra een voor een op de magneetbandcassette op te nemen, zodat men continu kan analyseren. Daarnaast is het bij een keuze van 1000 Hz of lager van de volle schaal frequentie ook nog mogelijk om een klein aantal achter elkaar door te geven spectra in het werkgeheugen van de calculator op te slaan (meestal niet meer dan

zes spectra vanwege de beperkte geheugencapaciteit), zodat men gedurende de duur van de analyse van deze zes spectra continu kan analyseren. De grensfrequentie, die in het eerste geval 100 Hz en in het tweede geval 1000 Hz bedraagt, wordt bepaald door het feit dat de analysetijd, die afhangt van de ingestelde volle schaal frequentie, meer moet zijn dan de tijd, die nodig is om de spectra buiten de 2031 verder te verwerken, zoals bijvoorbeeld op de magneetbandcassette op te nemen.

ad f.5) Omdat de 2131 slechts voor beperkte tijdsduur beschikbaar is in de interafdelingsgroep, is het interessant om te bekijken of het zinvol is om met de combinatie van 2031 en 9825A een octaaf- of $1/3$ -octaafspectrum te genereren. Het is immers in principe mogelijk om uit één of meerdere frequentie-intervallen, die per interval 400 meetpunten bevatten, enkele punten, die bij één octaafband horen, te gebruiken om het niveau van de octaafband te bepalen. Het zal blijken dat het het beste is om daarvoor drie intervallen te gebruiken, één dat loopt tot 200 Hz, één van 200 Hz tot 2 kHz en één dat loopt van 2 kHz tot 20 kHz. Deze drie worden na elkaar geanalyseerd door de 2031 en doorgegeven aan de calculator, die er een octaaf- of $1/3$ -octaafspectrum uit samenstelt. Dit wordt op het beeldscherm van de 2031 gezet. Hoe dit alles in z'n werk gaat en welke nadelen eraan verbonden zijn komt ter sprake in de volgende paragraaf.

ad f.6) Bij de 2131 is een uitschakelbaar A filter aanwezig, maar bij de 2031 niet. Nu is het in sommige gevallen zinvol om A-weighting toe te passen, zodat ook hier de calculator te hulp moet komen. De A lijn in figuur 3 (paragraaf 1.2.1) geeft aan in hoeverre de niet A-gefilterde niveaus gecorrigeerd moeten worden over het hele frequentiegebied. Deze correctiewaarden worden in een calculatorprogramma toegepast op de niet A-gefilterde niveaus van een smalle band spectrum of een door de calculator gegenereerd octaaf- of $1/3$ -octaafspectrum. Het nieuwe spectrum kan op het beeldscherm van de 2031 gebracht worden,

1.6 SOFTWARE PROGRAMMA'S VOOR GELUID- EN TRILLINGSMETINGEN EN BEREKENINGEN

In deze paragraaf zullen twee calculatorprogramma's besproken worden, waarbij verschillende onderdelen van de vorige paragraaf aan de orde komen.

De 3^e-graads regressie voor het tekenen van het verloop in de tijd van geluidniveaus en berekeningen van het equivalente geluidniveau (L_{eq}) of het niveau L_N , dat gedurende N% van de tijd overschreden wordt, waarin N de waarden 10, 50, 90 of 99 kan aannemen, worden achterwegen gelaten omdat het standaardberekeningen zijn.

Ze zijn wel beschikbaar (in de interafdelingsgroep), dat wil zeggen dat de "listings" ervan gecatalogiseerd zijn en ze voor onmiddellijk gebruik op de calculator terstond van magneetbandcassettes gehaald kunnen worden.

Het eerste programma dat besproken wordt ("2131-spectra-transfer") bevat de onderdelen "setting of buttons", het doorgeven van frequentiespectra van analysator aan calculator en omgekeerd (bij de 2131), het berekenen van het overall-level bij een 1/3-octaafspectrum en het gebruik maken van een synchronisatiepuls.

Het tweede programma ("2031-third-octave-analysis") bevat de onderdelen "setting of buttons", het doorgeven van frequentiespectra van analysator aan calculator en omgekeerd (bij de 2031) en het berekenen van een 1/3-octaafspectrum uit drie smalle band spectra.

1.6.1 2131-spectra-transfer

Het programma, dat op de volgende bladzijden behandeld wordt, is als volgt tot stand gekomen. De gegevens bestaan uit geluidmetingen opgenomen op een bandrecorder. Aangezien het geproduceerde lawaai gedurende een tijd van ongeveer 5 seconden aanzienlijke niveauverschillen vertoont is gekozen voor een totale analysetijd van 5,1 seconden, opgebouwd uit 30 analyses met een middelingstijd van 125 ms (per korte analyse komt er 55 ms aan rekentijd en overdrachtstijd bij). Zodoende is het mogelijk het verloop van het geluidniveau als functie van de tijd te bepalen. Om de nauwkeurigheid van de resultaten te verhogen en eventuele storingen te vermijden zijn er bij elke meetsituatie vijf metingen op de band opgenomen. Bij de totstandkoming van de resultaten kan dan het gemiddelde van vijf metingen genomen worden of kunnen metingen, waar storingen in voorkomen, weggelaten worden.

Het moment waarop de 2131 met de analyse moet beginnen wordt bepaald door een op de band opgenomen puls met de eigenschappen:

tijdsduur: 60 ms

frequentie: 6300 Hz

bandbreedte: kleiner dan 50 Hz

niveau: meer dan 90 dB, dat wil zeggen meer dan 20 dB boven het originele signaal in dezelfde frequentieband (1/3-octaf)

De verwerking bestaat uit het verrichten van een 1/3-octafanalyse met de 2131, het berekenen van het overall-level (OAL), eventuele listing van de resultaten, het op het beeldscherm van de 2131 verschijnen van een willekeurig spectrum samen met het OAL en het opslaan van de resultaten op een magneetbandcassette voor latere middeling en verwerking door de plotter.

"Setting of buttons" komt onder andere voor in de regels 29, 30, 34, 36, 40, 43, 48 en 51. Het doorgeven van de frequentiespectra van analyser aan calculator geschiedt in het blok tussen de regels 32 en 52, het omgekeerde staat in de regels 76 tot en met 92, het OAL wordt berekend in de regels 54 tot en met 65 en de synchronisatiepuls wordt afgewacht in de regels 34 tot en met 42.

```
0: dsp "2131-  
SPECTRA-TRANSFE  
R-131178";stp  
1: "DAF/2131/01;  
trk0;file0";  
2: dim M#[80]  
3: 0→A;ent "Spec  
tra from 2131?  
(Y=1)",A  
4: if A#1;eto  
"Measurenumber"  
5: ent "Enter  
number of spect  
ra (1-40)",N  
6: if N<1 or  
N>40;jmp -1  
7: dim A#[58N],  
B#[302N+16]  
8: dsp "Button  
A Weighting  
and CONTINUE.";  
stp  
9: "Measurenumbe  
r":  
10: " "→M#  
11: ent "Enter  
measurenumber  
(like 2L).",M#  
12: if num(M#[1;  
1])<48 or num(M  
#[1,1])>57;jmp  
-1  
13: if len(M#)#2  
;jmp -2  
14: eto -3;if  
(val(M#[1,1])→V  
)>0 and V<6;  
jmp 1  
15: eto -4;if  
cap(M#[2,2])="L  
" or cap(M#[2,  
2])="R";jmp 1  
16: 0→R;if cap(M  
#[2,2])="R";1→R  
17: if A=1;eto  
"Measure"  
18: trk 1  
19: fdf V+5R  
20: idf L,L,L  
21: (L-8)/58→N  
22: if Q=0;dim  
A#[L-8];1→Q  
23: ldf V+5R,A#  
24: trk 0  
25: eto "Display  
"
```

Titel en plaats op cassette

M\$ zie regel 11

Als A = 1 dan meting, anders oude meting
op beeldscherm

De metingen worden in verkorte vorm (A\$)
op de cassette opgeslagen, de lange vorm (B\$)
dient voor de overdracht van de 2131 naar de
de 9825A

Nummer van de meting kan alleen
1L, 2L, 3L, 4L, 5L, 1R, 2R, 3R, 4R, 5R zijn
L en R slaan op metingen links en rechts

Variabelen R en V dienen voor plaatsbepaling
op de cassette

Als oude meting op het beeldscherm moet verschij-
nen, dan moeten de gegevens (A\$) eerst van de
cassette gehaald worden, L geeft de lengte van de
file op de cassette weer (in bytes)

Het programma op de regels 26 tot en met 53 regelt het verloop van de meting en de overdracht van de gegevens naar de calculator

```
26: "Measure":
27: on err "2131
   ";time 1000
28: cli 7;clr 7;
   cmd 7;"?"
29: wtb 717;"K>"
   ;wait 1000
30: wtb 717;"G?N
   :M?F?D=I?M>M=";
   wait 100
31: 21.96int(150
   /21.96+.5)+T
32: dsp "Press
   CONTINUE for
   transfer.";stp
33: if F=0;buf
   "in";B$,3;1+F
34: wtb 717;"03"
35: "Puls":
36: wtb 717;"E?"
37: buf "in"
38: tfr 716;"in"
   ,302
39: jmp rds("in"
   )#-1
40: wtb 717;"E=M
   ="
41: wait 6
42: if val(B$[26
   0,266])<85;sto
   "Puls"
43: wtb 717;"05"
44: dsp "START
   OF TRANSFER"
45: buf "in"
46: for I=1 to N
47: wait T-38
48: wtb 717;"E?"
49: tfr 716;"in"
   ,302
50: jmp rds("in"
   )#-1
51: wtb 717;"E=M
   ="
52: next I
53: cli 7;clr 7;
   cmd 7;"?"
```

Interface vrijmaken

Coderingen voor het instellen van de 2131, bijvoorbeeld K> betekent filterbandbreedte (K) op 1/3-octaafiltering (>)

Spectra worden gemiddeld over 125 ms, de wachttijd is ongeveer 150 ms

Als de spectra doorgegeven worden, neemt de calculator ze op in B\$

03 betekent middeling van 1/32 seconde (voor synchronisatiepuls)

Overdracht spectrum met (of zonder) synchronisatiepuls

Niveau van de puls wordt gemeten

Overdracht van de spectra van de originele input

Interface vrijmaken

```
54: dsp "Press
    CONTINUE for
    OALevel.";istp
55: fxd 0
56: for I=1 to N
57: dsp I
58: 0+Z
59: for J=16 to
    43
60: val(B#[(I-
    1)*302+7J-6+K;
    K+4])>S
61: fti (10S)+A$
    [58(I-1)+2(J-
    15)-1+K;K+1]
62: tnf(S/10)+
    Z+Z
63: next J
64: fti (10prnd(
    10log(Z),-1))+A
    $[58I-1;58I]
65: next I
66: 0+B!ent "Spe
    ctra on 2131-
    display? (Y=1)"
    ,B
67: if B#1;sto
    "Record"
68: "Display":
69: 0+C!ent "Eac
    h spectrum?
    (Y=1)";C
70: if C#1;sto
    "SoD1"
71: 0+D
72: ent "Enter
    waittime in
    ms.";W
73: 0+E!ent "Lis
    ting of OALevel
    ? (Y=1)";E
74: if E=1;spc
    3!prt "Measure
    "&M#[1,1]&cap(M
    #[2,2])&"; OAL"
    ;spc
75: if E=1;fmt
    1;c3;f2.0;c3;
    f5.1;c3
76: for I=1 to N
77: "SoD2":
78: if D#0;D+I
79: cli 7
80: fmt 2;fz5.1
81: wtb 717;"N>F
    >"
```

In de N spectra wordt het OAL berekend

Vanaf frequentieband 16 (40 Hz) tellen de niveaus mee, lager dan 40 Hz is niet zinvol omdat daarvoor de middeling te kort duurt, maar heeft ook niet veel nut omdat de niveaus veel lager zijn (tenminste 30 dB) dan bijvoorbeeld tussen 100 Hz en 1000 Hz

De waarde van het niveau in elke $\sqrt{3}$ -octaafband wordt in verkorte vorm opgeslagen in A\$ (met fti) $L = 10 \times \log(I/I_0)$ wordt hier $S = 10 \times \log Z$ dus $Z = 10^{(S/10)}$

Ook het OAL komt in A\$ terecht

In dit blok vindt de voorbereiding plaats om de spectra terug op het beeldscherm te zetten inclusief het berekende OAL

Voor de betekenis van SoD1, SoD2 en SoD3 zie regel 93

Na de display van elk spectrum blijft het spectrum enige tijd staan, deze tijd is W

Formatering voor printing van het OAL (zie regel 89)

Formatering voor data-overdracht naar 2131 (regel 83 en 84)

```
82: for J=1 to
  43
83: if J<16:wrte
  716.2,40
84: if J>15:wrte
  716.2,if(A#[58
  (I-1)+2(J-15)-
  1+2(J=43)*K,K+
  1])/10
85: if J>2:wtb
  717,"D>"
86: next J
87: wtb 717,"F?"
88: if D#0:eto
  "SoD3"
89: if E=1:wrte
  16.1,"sp ",I,"
  ",if(A#[58I-
  1,58I])/10,"
  dB"
90: if EI=N:spc
  3
91: wait W
92: next I
93: eto "SoD3"
94: "SoD1":
95: ent "Which
  spectrum?";D
96: if D<1 or
  D>N:jmp -1
97: eto "SoD2"
98: "SoD3":
99: 0+G:ent "New
  spectrum? (Y=1
  )";G
100: if G=1:eto
  "SoD1"
101: "Record":
102: 0+H:ent
  "Record data?
  (Y=1)";H
103: if H#1:eto
  +2
104: trk 1:rcf
  V+5R,A#:trk 0
105: 0+M:ent
  "New measure?
  (Y=1)";M
106: eto "Measur
  enumber":if
  M#1:eto "End"
107: "2131":
108: dsp "2131-
  or interface-
  error":stp
109: "End":
110: cli 7:clr
  7:cmd 7,"?"
111: dsp "End
  of program"
112: end
*5372
```

Elk spectrum wordt van band 1 tot en met band 43, iedere band apart, op het scherm gezet; omdat het niveau van de banden 1 tot en met 15 niet gemeten is, wordt hier 40 dB doorgegeven (laagste zichtbare niveau op het scherm)

Overdracht van calculator naar 2131

D> betekent dat de "channel selector" (of cursor) als het ware meeloopt met elk nieuw op het beeldscherm verschenen niveau van een frequentieband

Printing van OAL

SoD1: als slechts of nogmaals één enkel spectrum op het beeldscherm moet verschijnen
SoD2: overdracht van dat ene spectrum begint (SoD2 staat binnen for-(I)-loop)
SoD3: vraag naar nieuwe display van spectrum

Opname van N spectra op cassette

Als er nogmaals een meting geanalyseerd moet worden, vindt een terugkeer in het programma plaats naar regel 9

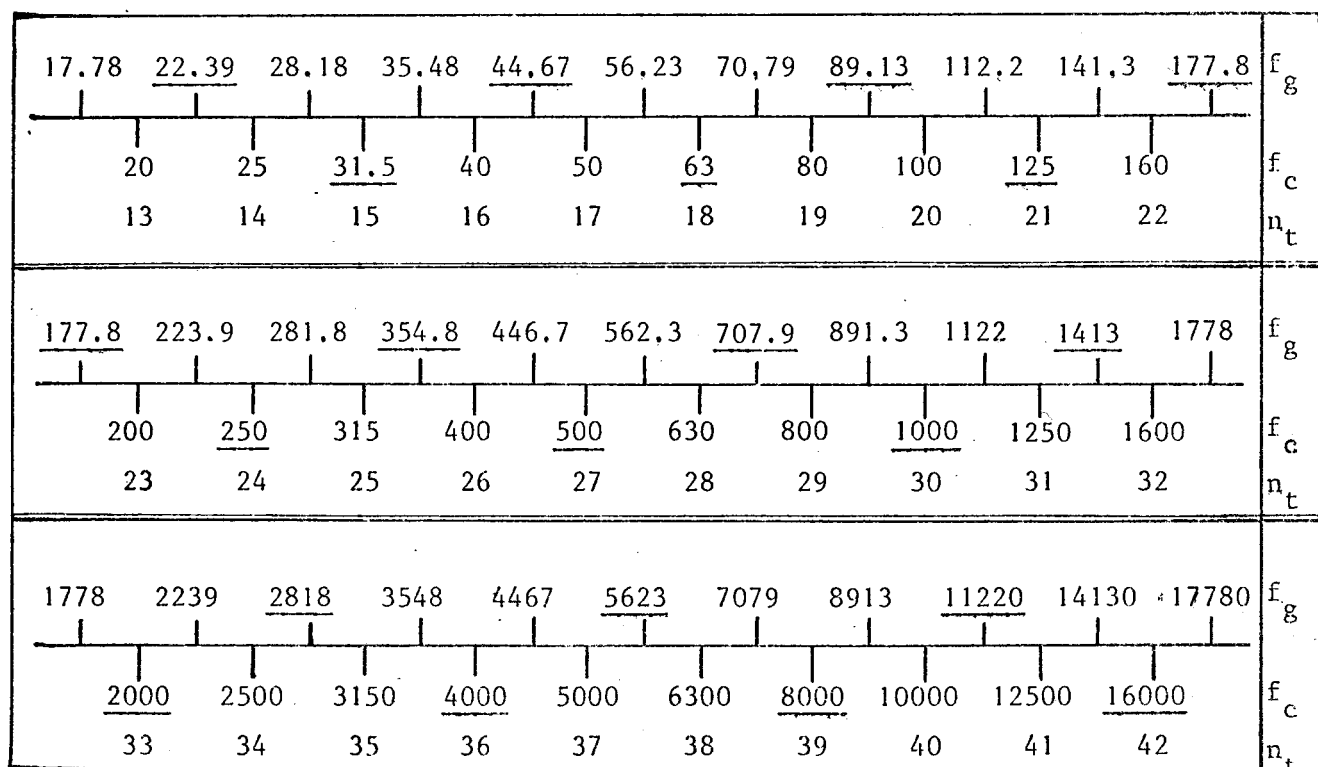
Interface vrijmaken

1.6.2 2031-third-octave-analysis

Hoewel dit programma op dezelfde manier behandeld zal worden als "2131-spectra-transfer" in de vorige paragraaf, is het nodig eerst enkele opmerkingen vooraf te maken. Deze opmerkingen slaan voornamelijk op de wijze waarop een 1/3-octaafspectrum gegenereerd wordt uit een aantal smalle band spectra. Na de bespreking van het programma volgt dan nog een discussie, waarin onder meer de nadelen ervan ten opzichte van de analyse met de 2131 aan de orde komen.

1.6.2.1 1/3-octaafspectrum uit smalle band spectra

Over het algemeen (vooral in het geval van geluidmetingen bij lawaai-bestrijding) maakt men gebruik van een 1/3-octaafspectrum, dat loopt van 20 Hz tot 20 kHz. In dat frequentiegebied liggen 30 1/3-octaaftanden. In figuur 6 zijn de centrale frequenties (f_c) en de grensfrequenties (f_g) van de 1/3-octaaftanden tussen 20 Hz en 20 kHz vermeld. De onderstreepte waarden zijn de waarden die behoren bij de octaafbanden. De getallen onder de centrale frequenties zijn de tertsbandsnummers (n_t).

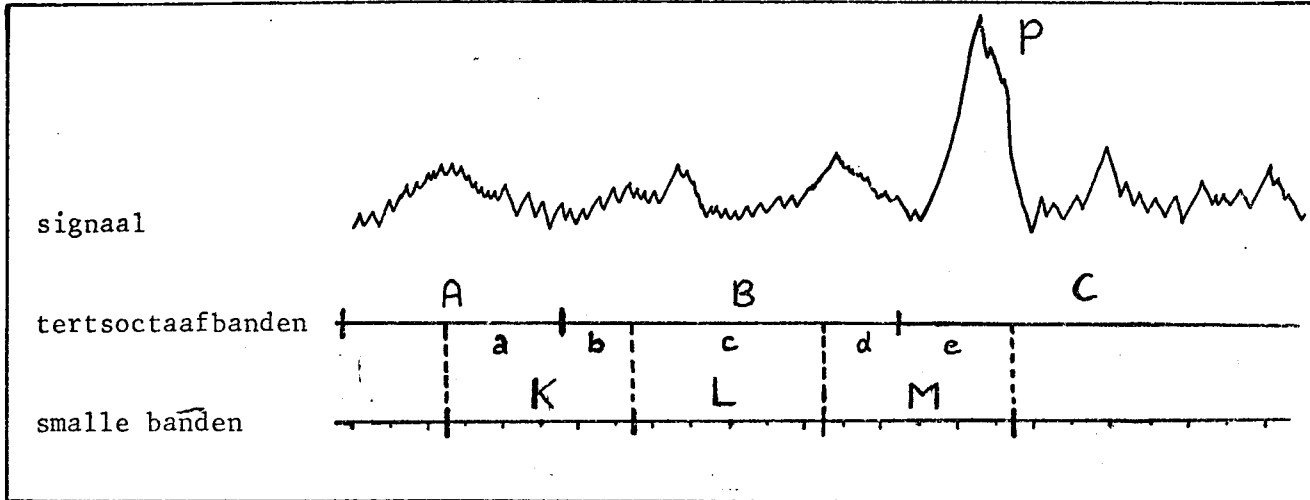


Figuur 6: grensfrequenties en centrale frequenties van (1/3-)octaafbanden

Ook bij de 2131 worden de in figuur 6 vermelde frequenties gebruikt, zij het dat de afrondingen in de centrale frequenties en de daarop gebaseerde berekening van de grensfrequenties op een andere manier plaats vinden.

Omdat een analyse met de 2131 het hele frequentiegebied in beslag neemt (tot 20 kHz), zal de volle schaal frequentie van de 2031 ook minstens één keer 20 kHz moeten bedragen. Als het $1/3$ -octaafspectrum gegenereerd wordt uit slechts één analyse van de 2031, dan zal de oorspronkelijke (smalle) bandbreedte 50 Hz bedragen, zodat het niveau in de $1/3$ -octaafband rond 50 Hz (lopend van 44.67 Hz tot 56.23 Hz) bepaald zal moeten worden door het niveau in de smalle band rond 50 Hz (lopend van 25 Hz tot 75 Hz). Dat is natuurlijk onzin. Het is daarom beter dat het $1/3$ -octaafspectrum gegenereerd wordt uit twee of drie analyses achter elkaar, waarbij de volle schaal frequenties telkens lager gekozen worden.

Als de keuze valt op twee analyses dan moet de eerste analyse plaats vinden bij een volle schaal frequentie van 20 kHz (tijdsduur per analyse, zonder averaging, 200 ms, waarvan slechts 20 ms gebruikt worden voor de input van het signaal, de overige 180 ms zijn nodig voor de Fourier transformatie), de tweede analyse onmiddellijk daarna bij een volle schaal frequentie van 1 kHz (tijdsduur 400 ms). Het niveau in de (laagste) $1/3$ -octaafband rond 20 Hz (lopend van 17.78 Hz tot 22.39 Hz) zal nu bepaald moeten worden door het niveau in de smalle band rond 20 Hz (lopend van 18.75 Hz tot 21.25 Hz) en gedeeltelijk door het niveau in de smalle banden rond 17.5 Hz (van 16.25 Hz tot 18.75 Hz) en rond 22.5 Hz (van 21.25 Hz tot 23.75 Hz). Deze beide banden op de rand van de $1/3$ -octaafband moeten meegeteld worden, maar de wijze waarop dat gebeurt kan slechts een benadering zijn van de werkelijkheid. Het meest voor de hand liggend is een proportionele verdeling van het vermogen van het signaal over de beide $1/3$ -octaafbanden, op welks rand de smalle band ligt. Deze verdeling is echter fout als bijvoorbeeld een piek (P) voorkomt in $1/3$ -octaafband (C), juist daar waar ook smalle band (M) ligt (zie figuur 7).



Figuur 7: voorbeeld van een gedeeltelijke 1/3-octaafanalyse

Het niveau L_B in 1/3-octaaftand B wordt nu als volgt bepaald:

$$L_B = 10 \log \left\{ \frac{b}{a+b} \exp(L_K/10) + \exp(L_L/10) + \frac{d}{d+e} \exp(L_M/10) \right\}$$

Hierin en in figuur 7 stellen a, b, c, d en e frequentie-afstanden voor. Het niveau in band B wordt hierdoor te hoog berekend, omdat piek P, die alleen in band C ligt, toch mee gaat tellen bij de bepaling van het niveau in band B.

Het is daarom beter als de niveaus van tenminste drie smalle banden volledig mee kunnen tellen bij de bepaling van het niveau in de bijbehorende 1/3-octaaftand. De invloed van randeffecten wordt dan kleiner en de nauwkeurigheid van het resultaat groter.

Als de keuze valt op drie analyses, is hieraan voldaan,

Begonnen moet worden met een analyse bij 20 kHz (tijdsduur 20 ms), daarna eentje bij 2 kHz (tijdsduur 200 ms), tenslotte eentje bij 200 Hz (tijdsduur 2 seconden). Het niveau in de 1/3-octaaftand rond 20 Hz (van 17,78 Hz tot 22,39 Hz) wordt nu bepaald door de smalle banden rond 18 Hz (gedeeltelijk), 18,5, 19, 19,5, 20, 20,5, 21, 21,5, 22 en 22,5 Hz (opnieuw gedeeltelijk). In dit geval tellen dus acht smalle banden volledig mee,

De 1/3-octaafanalyse gaat nu als volgt in zijn werk. Begonnen wordt met een analyse bij 20 kHz (tijdsduur 200 ms, waarvan 20 ms voor de signaalinput); het smalle band spectrum hiervan wordt onmiddellijk doorgegeven aan de calculator. Daarna een analyse bij 2 kHz (tijdsduur 200 ms); dit spectrum wordt opgeslagen in de "memory-buffer" van de 2031. Tenslotte een analyse bij 200 Hz (tijdsduur 2 seconden)- dit spectrum blijft in de "input-buffer" van de analysator. Vervolgens wordt het spectrum uit de "memory-buffer" doorgegeven aan de calculator en daarna ook het spectrum uit de "input-buffer".

Op de manier zoals hierboven omschreven is worden nu uit het smalle band spectrum van 200 Hz (bandbreedte 0,5 Hz) de niveaus berekend van tien 1/3-octaaftanden (met bandnummers 13 tot en met 22) (zie figuur 6). Daarbij worden dus de smalle banden rond 18 Hz tot en met 178 Hz gebruikt. Zo ook worden uit het spectrum van 2 kHz (bandbreedte 5 Hz, gebruik makend van de smalle banden rond 180 Hz tot en met rond 1780 Hz) tien 1/3-octaaftanden, genummerd 23 tot en met 32 gevuld. Op dezelfde wijze bij 20 kHz (bandbreedte 50 Hz, banden rond 1800 Hz tot en met rond 17800 Hz) de 1/3-octaaftanden 33 tot en met 42.

Tijdens de 1/3-octaaftand-berekening wordt eveneens het overall-level berekend.

Op de volgende drie bladzijden bevindt zich een listing van het programma (2031-third-octave-analysis), waarbij tevens in het kort beschreven wordt wat er in de verschillende onderdelen van het programma plaats vindt.

```
0: dsp "2031-  
octave-analysis  
, 150978." ;stp  
1: "B#02, trk0,  
file20":  
2: dim A#[4841],  
B#[3,800],E[45]  
,F#[24],G#[4],  
H#[6]  
3: cli 7;clr 7;  
cmd 7,"?"  
4: ent "Enter  
number of spect  
ra.",N  
5: buf "A",A#,3  
6: fxd 0  
7: wrt 725,"#1,  
@10;B"&str(loa(  
N)/loa(2))&";  
K0;L1;X0;Y0;Z1;  
"  
8: dsp "Press  
CONTINUE (read  
in).";stp  
9: wrt 725,"#1,  
[0];"  
10: wait 200N  
11: wrt 725,"#1,  
X1;"  
12: wrt 725,"#0;  
"  
13: tfr 725,"A",  
4825  
14: wait 200  
15: wrt 725,"#1,  
@7;X0;"  
16: wait 50  
17: wrt 725,"#1,  
[0];"  
18: wait 240N  
19: wrt 725,"#1,  
M1;X1;"  
20: wrt 725,"#1,  
B4;M0;X0;"  
21: wait 100  
22: wrt 725,"#1,  
[0];"  
23: for I=1 to  
220;wait 10N;  
next I  
24: wrt 725,"#1,  
X1;"  
25: "A":  
26: J+1+J  
27: for I=1 to  
400  
28: fti (10val(A  
#[29+12(I-1),  
34+12(I-1)]))+B  
#[4-J,2I-1,2I]  
29: next I
```

Titel en plaats op de cassette

A\$ voor overdracht van spectra
B\$ voor het in verkorte vorm opnemen van spectra
array E voor niveaus van 1/3-octaaftanden
F\$, G\$ en H\$ zijn hulpstrings

Interface vrijmaken

Coderingen voor het instellen van de 2031,
bijvoorbeeld als N=16 dan "B4" betekent middeling
(B) van 16 spectra

Start middeling bij 20 kHz

Stop analyse bij 20 kHz

Data-overdracht naar calculator

Gereedmaken voor analyse bij 2 kHz

Start middeling bij 2 kHz

Stop analyse bij 2 kHz en opslaan van data in
"memory-buffer"

Gereedmaken voor analyse bij 200 Hz

Start middeling bij 200 Hz

Stop analyse bij 200 Hz

De smalle band spectra worden in verkorte vorm
(B\$) opgenomen

```
30: if J=3;0+J;
   ato "B"
31: if J=2;wrt
   725,"#1,K0;"
32: if J=1;A#[1,
   24]÷F#;wrt 725,
   "#1,K1;"
33: buf "A"
34: wrt 725,"#0;
   "
35: tfr 725,"A",
   4825
36: ato "A"
37: "B":
38: J+1+J
39: if J=1;15.62
   5*2↑(1/6)÷A;
   125*2↑(1/2)÷D;
   .5÷S;18÷L
40: if J=2;D÷A;
   1000*2↑(5/6)÷D;
   5÷S;180÷L
41: if J=3;D÷A;
   16000*2↑(1/6)÷D
   ;50÷S;1800÷L
42: L/S÷I
43: 13+10(J-1)÷K
44: A÷B
45: "C":
46: B*2↑(1/3)÷C
47: 10↑((L+S/2-
   B)/S*itf(B#[J,
   2I-1,2I])/100)+
   E[K]÷E[K]
48: L+S÷L
49: I+1÷I
50: if L+S/2<C;
   10↑(itf(B#[J,
   2I-1,2I])/100)+
   E[K]÷E[K];sto -
   2
51: 10↑((C-(L-S/
   2))/S*itf(B#[J,
   2I-1,2I])/100)+
   E[K]÷E[K]
52: E[K]+Z÷2
53: 10log(E[K])+
   E[K]
54: K+1÷K
55: C÷B
56: ato "C";if
   K=23 or K=33
   or K=43;sto
   "B";if K=43;
   sto +1
57: -200÷E[43]÷E
   [44]
58: 10log(Z)+E[4
   5]
```

Als J = 1 dan is zojuist het spectrum bij 20 kHz behandeld (regel 28) en moet het spectrum bij 2 kHz uit de "memory-buffer" van de 2031 gehaald worden om behandeld te worden; als dat gedaan is (J = 2) dan moet het spectrum bij 200 Hz uit de "input-buffer" gehaald worden om behandeld te worden en daarna (J = 3) kan verder gegaan worden met regel 37

In dit blok vindt de berekening van de niveaus van de $\sqrt[3]{}$ -octaafbanden uit de smalle band spectra plaats

J = 1 dan $f_{FS} = 200$ Hz
J = 2 dan $f_{FS} = 2$ kHz
J = 3 dan $f_{FS} = 20$ kHz

A bevat achtereenvolgens de linker grens van de drie decades (18-180 Hz, 180-1800 Hz, 1.8-18 kHz)
B bevat achtereenvolgens de linker grens van een $\sqrt[3]{}$ - octaafband
C bevat achtereenvolgens de rechter grens van een $\sqrt[3]{}$ - octaafband
D bevat achtereenvolgens de rechter grens van de drie decades
S bevat de bandbreedte van de smalle banden
L bevat de laagste nog mee te tellen smalle band
I houdt het aantal smalle banden bij
K houdt het aantal $\sqrt[3]{}$ -octaafbanden bij

De eerste smalle band in een $\sqrt[3]{}$ -octaafband telt slechts gedeeltelijk mee

Zolang de laatste smalle band in dezelfde $\sqrt[3]{}$ -octaafband niet bereikt is tellen de smalle banden volledig mee

De laatste smalle band telt weer gedeeltelijk mee

Z dient voor het OAL

E[43] en E[44] zijn voor het plotten van belang

E[45] bevat het OAL

```
59: for K=13 to
    45
60: for I=1 to
    12
61: fxd 0
62: str(I+12(K-
    13))>G#[1,4]
63: G#[2,4]+G#[5
    -len(str(I+12(K
    -13))),3]
64: if K=13 and
    I<10;" ">G#[2,
    2]
65: " ">G#[4,4]
66: fxd 1
67: str(prnd(EIK
    ],-1))>H#[1,6]
68: H#[1,6]>H#[7
    -len(str(prnd(E
    [K],-1))),6]
69: " ">H#[1,6-
    len(str(prnd(E[
    K],-1)))]
70: G#&H#&char(1
    3)&char(10)+A#[
    25+144(K-13)+
    12(I-1)+P,P+11]
71: next I
72: next K
73: for I=397
    to 400
74: str(I)>G#[1,
    4]
75: G#[2,4]+G#[1
    ,3]
76: " ">G#[4,4]
77: G#&" 0.0"&
    char(13)&char(1
    0)+A#[25+12(I-
    1),36+12(I-1)]
78: next I
79: wrt 725,"#1,
    K1,L1,X1,Y0,Z1,
    I]"
80: wrt 725,"#0,
    "&A#
81: stop
82: for I=13 to
    45
83: fmt 1,c4,
    f3.0,f9.2
84: wrt 16.1,"
    ch ",I,E[I]
85: next I
86: dsp "End of
    program."
87: end
*18675
```

Om het 1/3-octaafspectrum over te seinen moet A\$ weer gevuld worden met de getallen van de berekende niveaus; de 2031 verwacht in A\$ 400 lijnen gevuld met getallen van 12 karakters per lijn; de eerste 24 karakters van A\$ dienen voor enkele functies van de 2031 (zoals f_{FS}); er worden 33 frequentiebanden doorgegeven (van 20 Hz tot en met 16 kHz plus het OAL) die per band 12 lijnen in beslag nemen

De overblijvende lijnen 397 tot en met 400 (want $33 \times 12 = 396$) worden gevuld met het niveau 0 d

De 2031 wordt ingesteld

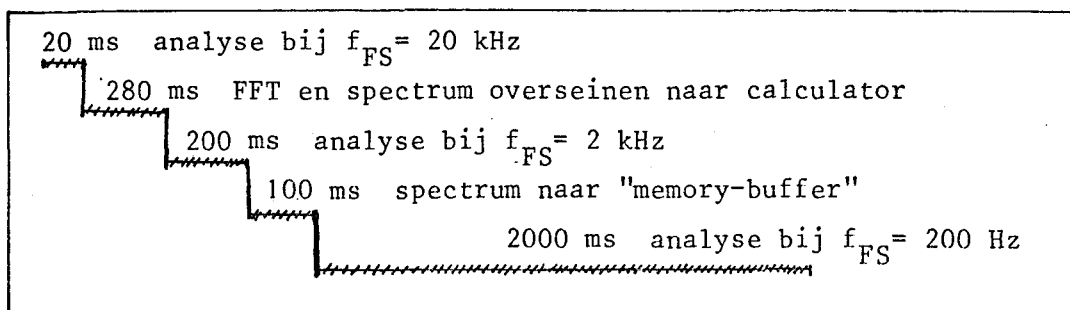
Het 1/3-octaafspectrum wordt overgeseind

De niveaus van de tertsbanden worden geprint

1.6.2.2 Discussie

Het is de vraag of een dergelijke 1/3-octaafanalyse correct is. Er zijn enkele verschilpunten ten opzichte van een spectrum, dat door de 2131 gegenereerd wordt.

- a) Er kan niet meer in real-time geanalyseerd worden (wat bij de 2131 wel kan), omdat de smalle band spectra na elkaar opgenomen worden. In figuur 8 is geschetst hoe het tijdverloop is bij zo'n 2031-1/3-octAAF analyse.



Figuur 8: tijdverloop 2031- 1/3-octAAF-analyse

De totale tijdsduur van de analyse bedraagt dus tenminste 2600 ms, pas daarna kan een volgende analyse plaatsvinden. De 2131 heeft echter een minimum averaging-time van 1/32 seconde. In het geval van de 2031 is dus van real-time analyse geen sprake. Hierbij is nog niet vermeld hoelang de 1/3-octAAF-berekening duurt in de calculator, maar dat is in dit verband niet van belang, omdat die berekening onafhankelijk van de analyse plaatsvindt.

- b) Omdat de totale tijdsduur 2600 ms is en de analyse tot 20 kHz slechts 20 ms duurt (nog geen 1%) kunnen er grote fouten optreden als het te analyseren signaal niet stationair is of fluctuerend. Als bijvoorbeeld de frequentie van de pulsen kleiner is dan 50 Hz, liggen ze meer dan 20 ms uit elkaar en kan het gebeuren dat de pulsen wel meegeteld worden in de analyse bij $f_{FS} = 200$ Hz en bij $f_{FS} = 2$ kHz, maar dat er geen enkele puls in de analyse bij $f_{FS} = 20$ kHz wordt meegeteld.

Dat levert grote afwijkingen in de resultaten op.

Ook als de frequentie van de pulsen groter is dan 50 Hz kunnen er nog afwijkingen optreden omdat er dan in de analyse bij $f_{FS} = 20$ kHz niet evenveel pulsen meetellen als in de twee andere analyses.

Om dit te controleren zijn drie metingen verricht:

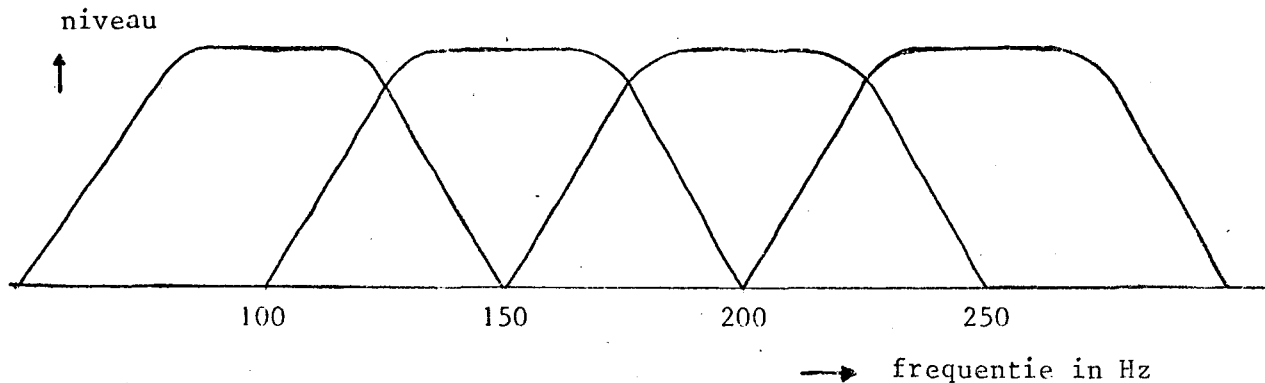
- Een niet stationair signaal dat wel iedere seconde hetzelfde patroon vertoont, levert bij onderlinge vergelijking van 1/3-octaafanalyse met de 2131 en de 2031 in sommige 1/3-octaaftanden verschillen op van 9 dB.
- Een quasi-stationair signaal (draaiende motor met een toerental van 60 omw./min.) levert dezelfde resultaten.
- Een quasi-stationair signaal (draaiende motor met een toerental van 1000 omw./min.) levert verschillen op van hooguit 3 dB.

De analyse met de 2031 geeft steeds lagere resultaten dan de analyse met de 2131.

- c) Om het voorgaande enigszins te verbeteren kan er bij de 2031 gemiddeld worden over een aantal analyses. Dan moet het signaal gedurende die middeling wel een constante vorm houden.

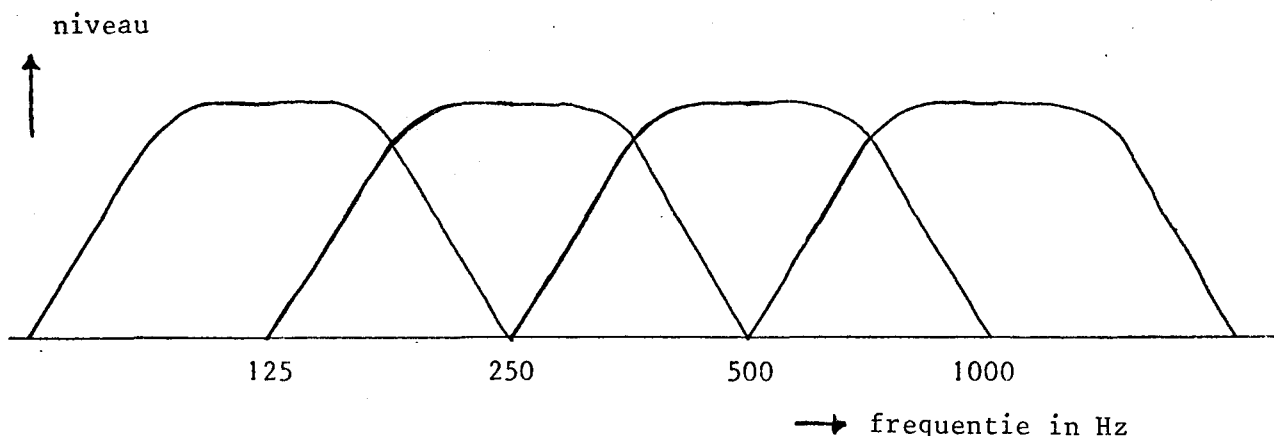
Ook hiervoor zijn controlemetingen verricht, die aantonen dat de verschillen van 9 dB teruglopen tot 5 dB.

- d) Een ander verschil en tevens nadeel van de analyse met de 2031 ten opzichte van de analyse met de 2131 is de vorm van de filters. De smalle band filters van de 2031 hebben een helling van een constant aantal dB's per frequentie-afstand; deze frequentie-afstand is over het hele frequentiegebied constant, zie figuur 9.



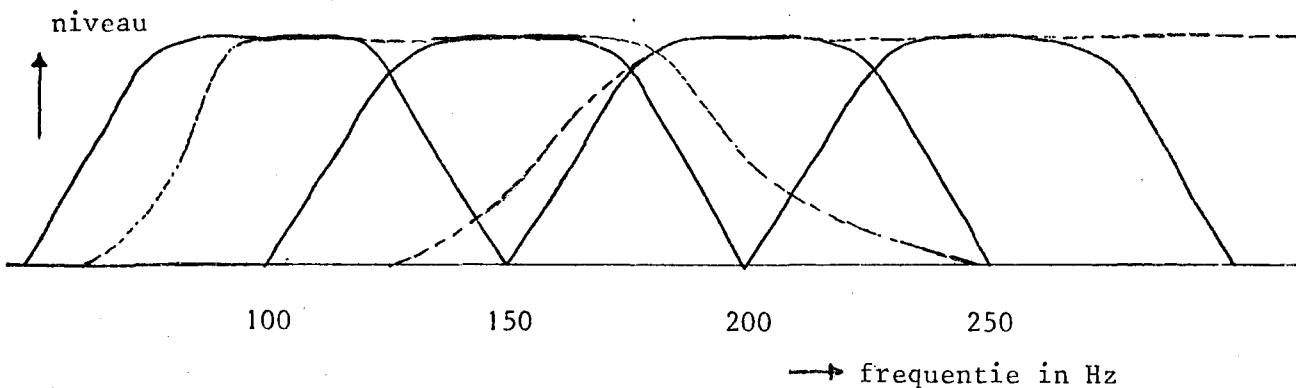
Figuur 9: vorm van de filters bij de 2031

De (1/3-)octaaffilters van de 2131 hebben echter een helling van een constant aantal dB's per octaaf, zie figuur 10.



Figuur 10: vorm van de filters bij de 2131

Als figuur 10 over figuur 9 gelegd wordt, dan is duidelijk te zien dat bij de samenstelling van een 1/3-octaafspectrum uit een aantal smalle banden de verschillende vorm van de filters ook verschillen in de resultaten veroorzaken, zie figuur 11.



Figuur 11: vorm van de filters bij de 2031 en de 2131

Uit de analyse zowel met de 2131 als met de 2031 van eenzelfde stationair signaal blijken er verschillen voor te kunnen komen van hooguit 0.5 dB, gemiddeld echter niet meer dan 0.2 dB. De verschillen lopen op naarmate in de analyse met de 2031 bij 200 Hz dichter bij 18 Hz, bij 2 kHz dichter bij 180 Hz en bij 20 kHz dichter bij 1800 Hz gekeken wordt.

1.7 LITERATUURLIJST

- 1) L.L. Beranek
Noise and vibration control
Mc Graw-Hill, New York, 1971
- 2) R.D. Ford
Introduction to acoustics
Elsevier, Amsterdam, 1970
- 3) Hewlett Packard
Acoustics handbook
Hewlett Packard, Palo Alto, 1968
- 4) R.B. Randall
Frequency analysis
Brüel & Kjaer, Naerum, 1977
- 5) R.B. Randall and R. Upton
Digital filters and FFT Technique
Technical review, Brüel & Kjaer, nr. 1, 1978
- 6) R. Upton
Digital generation of 1/3-octave data
Sound and vibration, nr. 2, 1978



Meetapparatuur opgesteld bij de meetkamer met v.l.n.r.
plotter (HP 9872A), calculator (HP 9825A),
smalle band spectrum analysator (B&K 2031),
digitale frequentie analysator (B&K 2131)

2 GELUIDAFSTRALING VAN HYDRAULISCHE LEIDINGEN

2.1 INLEIDING

In een hydraulisch systeem veroorzaken leidingen, zoals pijpen en slangen, lawaaihinder. In de stage die voorafging aan dit onderzoek (zie De Laat) is geëxperimenteerd met het aanbrengen van isolatie om de leidingen. In dit onderzoek wordt bekeken hoe een leiding geluid produceert.

Er wordt een hydraulische pijp gebruikt, ter lengte van 1 meter, gevuld met olie. Aan één uiteinde van de pijp bevindt zich een zuiger in een cilinder. Deze zuiger, die harmonisch geëxciteerd wordt door een triltafel, brengt de olie in trilling. De vloeistof staat in direct contact met de pijpwand. Deze pijpwand wordt in trilling gebracht door trillingsoverdracht van de vloeistof en van metalen onderdelen van het systeem. De trillende pijp veroorzaakt geluid.

In de hierna volgende theorie wordt een verband gelegd tussen de trilling van de wand van de pijp en het geluiddrukkniveau buiten de pijp.

In het hoofdstuk over experimenten en resultaten, dat overigens voorafgegaan wordt door een beschrijving van de meetopstelling, wordt verslag gedaan van metingen, die verricht zijn om de theoretische uitkomsten te vergelijken. Daarbij is gebruik gemaakt van twee verschillende pijpen, één van staal en één van aluminium. Tevens is de afsluitimpedantie (voor de trilling in de wand van de pijp) gevarieerd. Bovendien zijn er metingen verricht zonder vloeistof in de pijp.

In het hoofdstuk daarna worden deze resultaten bediscussieerd en worden er enkele opmerkingen geplaatst, die te maken hebben met de geluidafstaling van hydraulische leidingen.

Tot slot volgt dan nog een literatuurlijst.

2.2 THEORIE

Geluidgolven zijn periodieke drukvariatiën in de omringende materie, zoals lucht. Deze drukverschillen worden geproduceerd door trillende voorwerpen of delen van voorwerpen, zoals membranen, snaren, stembanden. De drukverschillen worden waargenomen door het menselijk gehoororgaan, doordat in het oor het trommelvlies en de gehoorbeentjes in trilling gebracht worden, die zorgen voor het transport van het geluidsignaal naar de zenuwcellen.

We gaan in dit onderzoek uit van de volgende drie vergelijkingen (eendimensionaal).

Op de eerste plaats is dat de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.2.1)$$

Op de tweede plaats de bewegingsvergelijking

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2.2.2)$$

Om de derde vergelijking te krijgen moet de adiabatische gaswet worden toegepast

$$\frac{p_t}{p_o} = \left(\frac{\rho_t}{\rho_o} \right)^{c_p/c_v} \quad (2.2.3)$$

Hierin is $p_t = p_o + p$ en $\rho_t = \rho_o + \rho$.

Voor kleine verstoringen in druk en dichtheid geldt bij benadering

$$\frac{p}{p_o} = \frac{c_p}{c_v} \frac{\rho}{\rho_o} \quad (2.2.4)$$

Op de derde plaats krijgen we nu de vergelijking

$$\boxed{p = \rho c^2} \quad (2.2.5)$$

$$\text{Hierin is } c^2 = \frac{c_p p_o}{c_v \rho_o} \quad (2.2.6)$$

In bovenstaande vergelijkingen zijn

ρ_o = gemiddelde dichtheid (of soortelijke massa, van lucht bijvoorbeeld)
ρ = variatie in dichtheid
p_o = gemiddelde druk
p = variatie in druk
u = variatie in (lucht-)deeltjessnelheid
c = voortplantingsnelheid van de (druk-)golf = geluidsnelheid
c_p = soortelijke warmte bij constante druk
c_v = soortelijke warmte bij constant volume

Uit de vergelijkingen 2.2.1, 2.2.2 en 2.2.5 valt af te leiden.

$$\boxed{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}} \quad (2.2.7)$$

Deze vergelijking wordt de (druk-)golfvergelijking genoemd,

Hij geldt als de omringende materie (het medium) homogeen is en isotroop en als de wet van Hooke geldt.

Voor het driedimensionale geval is (2.2.7) te schrijven als

$$\boxed{\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}} \quad (2.2.8)$$

Hierin staat ∇^2 (of Δ = de operator van Laplace) in de cartesische coördinaten x , y en z voor

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.2.9)$$

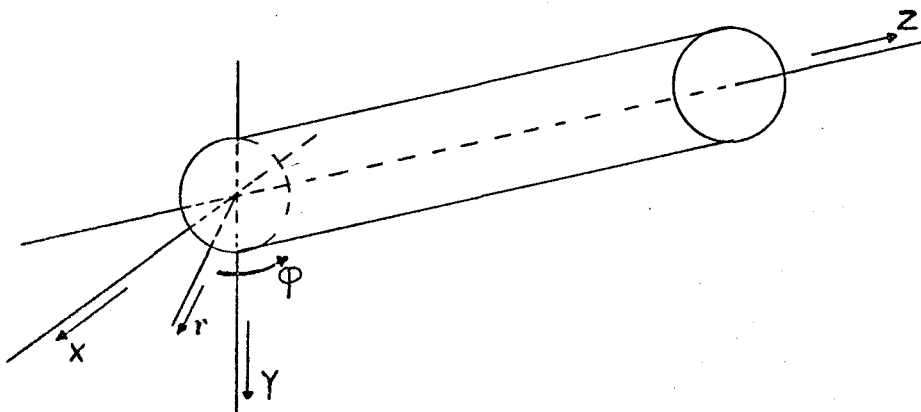
De oplossing van vergelijking 2.2.8 is te schrijven als
 $p = p(x,y,z,t) = P(x,y,z) \cdot f(t)$ met $f(t) = \exp(-i\omega t)$ zodat
we uiteindelijk krijgen

$$\boxed{\nabla^2 P + k^2 P = 0} \quad (2,2,10)$$

waarin $k = \frac{\omega}{c}$

In bovenstaande vergelijkingen is ω de cirkelfrequentie en
 k het golfgetal ($\omega = 2\pi\nu$ waarin ν de frequentie is en $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
waarin λ de golflente is).

Omdat we oplossingen zoeken, die te maken hebben met cilindervormige voorwerpen, zoals pijpen, en omdat die oplossingen moeten voldoen aan randvoorwaarden, die het eenvoudigst in cilindercoördinaten geformuleerd kunnen worden, kunnen we het best deze coördinaten ook in vergelijking 2.2.10 toepassen. Dus $x = r \cdot \cos\phi$, $y = r \cdot \sin\phi$ en $z = z$. (Zie overigens figuur 12).



Figuur 12: cartesische en cilindercoördinaten

Daartoe schrijven we (2.2.9) als volgt

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.2.11)$$

zodat vergelijking 2.2.10 overgaat in

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + k^2 P = 0 \quad (2.2.12)$$

De methode om deze vergelijking op te lossen is het scheiden van variabelen:

$$P(r, \phi, z) = R(r) \phi(\phi) Z(z)$$

Daarmee gaat vergelijking 2.2.12 over in

$$\phi Z \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{\phi Z}{r} \frac{dR}{dr} + \frac{RZ}{r^2} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} + R\phi \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 R\phi Z = 0 \quad (2.2.13)$$

Delen door $R\phi Z$ levert

$$\frac{1}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{\phi} \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 = 0 \quad (2.2.14)$$

Als we nu invoeren

$$F(r, \phi) = \frac{1}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{\phi} \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} \quad (2.2.15)$$

$$\text{en } G(z) = - \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} - k^2 \quad (2.2.16)$$

dan moet gelden $F(r, \phi) = G(z) = \text{constant}$, omdat F en G functies zijn van verschillende variabelen, die willekeurige waarden kunnen aannemen.

Stel constante is $-k^2$, dan gaat (2.2.16) over in

$$- \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} - k^2 = - \frac{k^2}{r} \quad (2.2.17)$$

En als we definiëren

$$\boxed{k^2 = k_r^2 + k_z^2} \quad (2.2.18)$$

dan krijgen we

$$\boxed{\frac{d^2 Z}{dz^2} + k_z^2 Z = 0} \quad (2.2.19)$$

Met als constante $-k_r^2$ gaat (2.2.15) over in

$$\frac{1}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{\phi} \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} = -k_r^2 \quad (2.2.20)$$

Vermenigvuldigen we nu deze vergelijking met r^2 , dan krijgen we

$$\frac{r^2}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + k_r^2 r^2 + \frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} = 0 \quad (2.2.21)$$

Als we nu invoeren

$$f(r) = \frac{r^2}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + k_r^2 r^2 \quad (2.2.22)$$

$$\text{en } g(\phi) = -\frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} \quad (2.2.23)$$

dan moet gelden $f(r) = g(\phi) = \text{constant}$.

Stel constante is m^2 , dan gaat (2.2.23) over in

$$\boxed{\frac{d^2 \phi}{d\phi^2} + m^2 \phi = 0} \quad (2.2.24)$$

Met als constante m^2 gaat (2.2.22) over in

$$\frac{r}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + k_r^2 r^2 = m^2 \quad (2.2.25)$$

Vermenigvuldigen we (2.2.25) met R dan levert dit

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + (k^2 r^2 - m^2) R = 0 \quad (2.2.26)$$

Brengen we nu de vergelijkingen (2.2.18), (2.2.19), (2.2.24) en (2.2.26) bij elkaar, dan krijgen we het volgende overzicht

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 Z = 0 \quad (2.2.19)$$

$$\frac{d^2 \phi}{d\phi^2} + m^2 \phi = 0 \quad (2.2.24)$$

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + (k^2 r^2 - m^2) R = 0 \quad (2.2.26)$$

$$\text{met } k^2 = k_r^2 + k_z^2 \quad (2.2.18)$$

De complexe oplossing van vergelijking 2.2.19 is een lineaire combinatie van de functies $\exp(+ik_z z)$ en $\exp(-ik_z z)$.

De oplossing van vergelijking 2.2.24 is een lineaire combinatie van $\cos(m\phi)$ en $\sin(m\phi)$, waarin m een geheel getal moet zijn omdat de oplossing continu moet zijn als $\phi = 0 = 2\pi$.

De oplossing van vergelijking 2.2.26 is een combinatie van de Bessel-functie $J_m(k_r r)$ en de Neumann-functie $N_m(k_r r)$, zoals

$$H_m^1(k_r r) = J_m(k_r r) + iN_m(k_r r) \quad (2.2.27)$$

waarin H_m^1 genoemd wordt de (eerste) Hankel-functie van de m^e -orde (zie vergelijking 9.1.1 in Abramowitz).

De algemene oplossing voor de geluidsdruk luidt nu

$$p(r, \phi, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_m H_m^1(k_r r) \cos(m\phi) e^{ik_z z} e^{-i\omega t} dk_z \quad (2.2.28)$$

waarin A_m de Fourier-Bessel coëfficiënten zijn.

Enkele eigenschappen van de Hankel-functie, die we in het vervolg nodig blijken te hebben, zijn

$$\text{(voor } k_r r \ll 1) \quad H_m^1(k_r r) = \frac{-i(m-1)!}{\pi} \left(\frac{2}{k_r r}\right)^m \quad (2.2.29)$$

(Dit volgt uit vergelijking 9.1.9 in Abramowitz)

$$\text{en (voor } k_r r \gg 1) \quad H_m^1(k_r r) = \sqrt{\frac{2}{\pi k_r r}} e^{i(k_r r - \pi m/2 - \pi/4)} \quad (2.2.30)$$

(Dit volgt uit vergelijking 9.2,3 in Abramowitz)

We gaan nu kijken naar het speciale geval van een cilinder (pijp) met straal a , die een trillende beweging uitvoert, loodrecht op de as van de cilinder. Veronderstel dat de snelheid van de trillende beweging voorgesteld wordt door $u_s(t) = u_0 \exp(-i\omega t)$. Als we de hoekafhankelijkheid in beschouwing nemen dan zal de snelheid van het oppervlak van de cilinder voorgesteld kunnen worden door

$$u_s(\phi, t) = u_0 \cos\phi e^{-i\omega t} \quad (2.2.31)$$

Deze snelheid staat loodrecht op het oppervlak.

De geluiddruk (p) en de snelheid van de luchtdeeltjes ($u(r, \phi, t)$) zijn van elkaar afhankelijk volgens

$$\frac{\partial p}{\partial r} = - \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.2.32)$$

De relatie tussen de geluiddruk in de omgeving van de trillende cilinder en de snelheid van de trillende wand van de cilinder wordt gelegd door vergelijking 2.2.32) en door de randvoorwaarde

$$u(a, \phi, t) = u_s(\phi, t) \quad (2.2.33)$$

Ten gevolge van de hoekafhankelijkheid in u_s zoals in vergelijking 2.2.31 tot uiting komt, zullen ook u en p op dezelfde manier van ϕ afhangen, zodat we in het vervolg voor m (zie vergelijking 2.2.24) als waarde 1 zullen nemen.

Als $m = 1$ en $k_z = 0$ (geen lopende golven) dan gaat vergelijking (2.2.28) over in

$$p(r, \phi, t) = A * H_1^1(k_r r) * \cos \phi * e^{-i\omega t}$$

(2.2.34)

Met behulp van de randvoorwaarde (2.2.33) moeten we nu proberen A op te lossen.

Stellen we, evenals we dat bij de druk gedaan hebben, $u(r, \phi, t) = U(r, \phi) * \exp(-i\omega t)$ dan gaat (2.2.32) over in

$$\frac{\partial p}{\partial r} = i\omega \rho_0 * U(r, \phi) * e^{-i\omega t} \quad (2.2.35)$$

zodat (2.2.36)

$$U(r, \phi, t) = \frac{1}{i\omega \rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2.2.36)$$

Als we willen weten wat $u(a, \phi, t)$ is, om daarmee vergelijking 2.2.33 te kunnen oplossen, moeten we voor de druk (in (2.2.36)) vergelijking 2.2.34 invullen, en dan kunnen we voor $H_1^1(k_r r)$ de benadering (2.2.30) nemen (met $m = 1$), zodat (2.2.36) nu overgaat in

$$\text{(voor } k_r r \ll 1) \quad u(r, \phi, t) = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{-iA}{\pi} \frac{2}{k_r r} \cos\phi e^{-i\omega t} \right\} \quad (2.2.37)$$

Vullen we (2.2.31) en (2.2.37) nu in in (2.2.33), dan krijgen we

$$u_0 \cos\phi e^{-i\omega t} = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{iA}{\pi} \frac{2}{k_r a^2} \cos\phi e^{-i\omega t} \quad (2.2.38)$$

zodat we voor A vinden

$$A = \frac{1}{2} \pi \rho_0 a^2 \omega k_r u_0 \quad (2.2.39)$$

ofwel als we voor k_r gewoon k invullen, omdat $k_z = 0$ (zie vergelijking 2.2.18) en dan ook $k = \omega/c$ dan krijgen we voor A

$$A = \frac{1}{2} \pi \rho_0 a^2 \omega^2 u_0 / c \quad (2.2.40)$$

In het geval $k_r r \gg 1$ kunnen we nu (2.2.30) en (2.2.40) invullen in (2.2.34), die dan overgaat in

$$p(r, \phi, t) = \frac{1}{2} \pi \rho_0 a^2 \omega k_r u_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k_r r}} \cos\phi e^{i(k_r r - 3\pi/4)} e^{-i\omega t} \quad (2.2.41)$$

zodat met $k_r = k = \omega/c$

$$\text{(voor } \frac{\omega r}{c} \gg 1) \quad |p| = \sqrt{\frac{\pi}{2cr}} \rho_0 a^2 \omega^{3/2} u_0 \cos\phi \quad (2.2.42)$$

Met (2.2.36) vinden we voor de luchtdeeltjessnelheid (voor $k_r r \gg 1$)

$$u(r, \phi, t) = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{1}{2} \pi \rho_0 a^2 \omega k_r u_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k_r}} \left\{ -\frac{1}{r^{3/2}} + \frac{ik_r}{r^{1/2}} \right\} \cos\phi * e^{i(k_r r - \frac{3}{2}\pi - \omega t)} \quad (2.2.43)$$

en voor grote r kunnen we $1/(r^{3/2})$ verwaarlozen ten opzichte van $1/(r^{1/2})$, zodat met $k_r = k = \omega/c$

$$\left(\text{voor } \frac{\omega r}{c} \gg 1 \right) \quad |u| = \sqrt{\frac{\pi}{2r}} a^2 \left\{ \frac{\omega}{c} \right\}^{3/2} * u_0 * \cos\phi \quad (2.2.44)$$

De akoestische intensiteit (I) van een geluidsdruk golf is te schrijven als de gemiddelde waarde van het reële product van de geluidsdruk en de deeltjessnelheid, dus

$$I = |p| * |u| \quad (2.2.45)$$

zodat we met (2.2.42) en (2.2.44) voor I krijgen

$$\left(\text{voor } \frac{\omega r}{c} \gg 1 \right) \quad I = \frac{\pi}{2} \frac{\rho_0 a^4}{r} \omega^3 \frac{u_0^2}{c^2} \cos^2\phi \quad (2.2.46)$$

Het akoestisch vermogen per lengte-eenheid is af te leiden uit de akoestische intensiteit volgens

$$W_1 = \int_0^{2\pi} I r d\phi \quad (2.2.47)$$

Met (2.2.46) volgt hieruit voor W_1

$$\left(\text{voor } \frac{\omega r}{c} \gg 1 \right) \quad W_1 = \frac{\pi^2}{2} \rho_0 a^4 \omega^3 \frac{u_0^2}{c^2} \quad (2.2.48)$$

Voor praktische doeleinden wordt de geluiddruk als geluiddrukniveau weergegeven volgens

$$\boxed{\text{SPL} = 20 \log\left(\frac{|p|}{p_0}\right)} \quad (2.2.49)$$

waarin $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$

zodat (2.2.42) en (2.2.49) samen leiden tot

$$\left(\text{voor } \frac{\omega r}{c} \gg 1\right) \boxed{\text{SPL} = 20 \log\left\{\sqrt{\frac{\pi}{2cr}} \frac{\rho_0}{p_0} \cdot a^2 \omega^{3/2} u_0 \cos\phi\right\}} \quad (2.2.50)$$

2.3 MEETOPSTELLING

De interafdelingswerkgroep "Geluidbestrijding aan hydraulische systemen en componenten" beschikt voor het onderzoek over een echovrije ruimte in het laboratorium voor aandrijftechniek van de afdeling der werktuigbouwkunde. Deze echovrije ruimte (met reflecterende vloer) heeft de volgende (afgeronde) afmetingen: lengte 7.5 meter, breedte 4.5 meter en hoogte 3.5 meter. Het is een zogenaamde doos-in-doos constructie.

Figuur 13 geeft een schets van de meetkamer en de meetopstelling.

Deze meetopstelling is gebouwd rond een meetpijp, die 1 meter lang is. In het onderzoek is een pijp gebruikt van staal (wanddikte 3 mm en buitendiameter 3 cm) en een pijp van aluminium (wanddikte 2 mm en buitendiameter 2 cm).

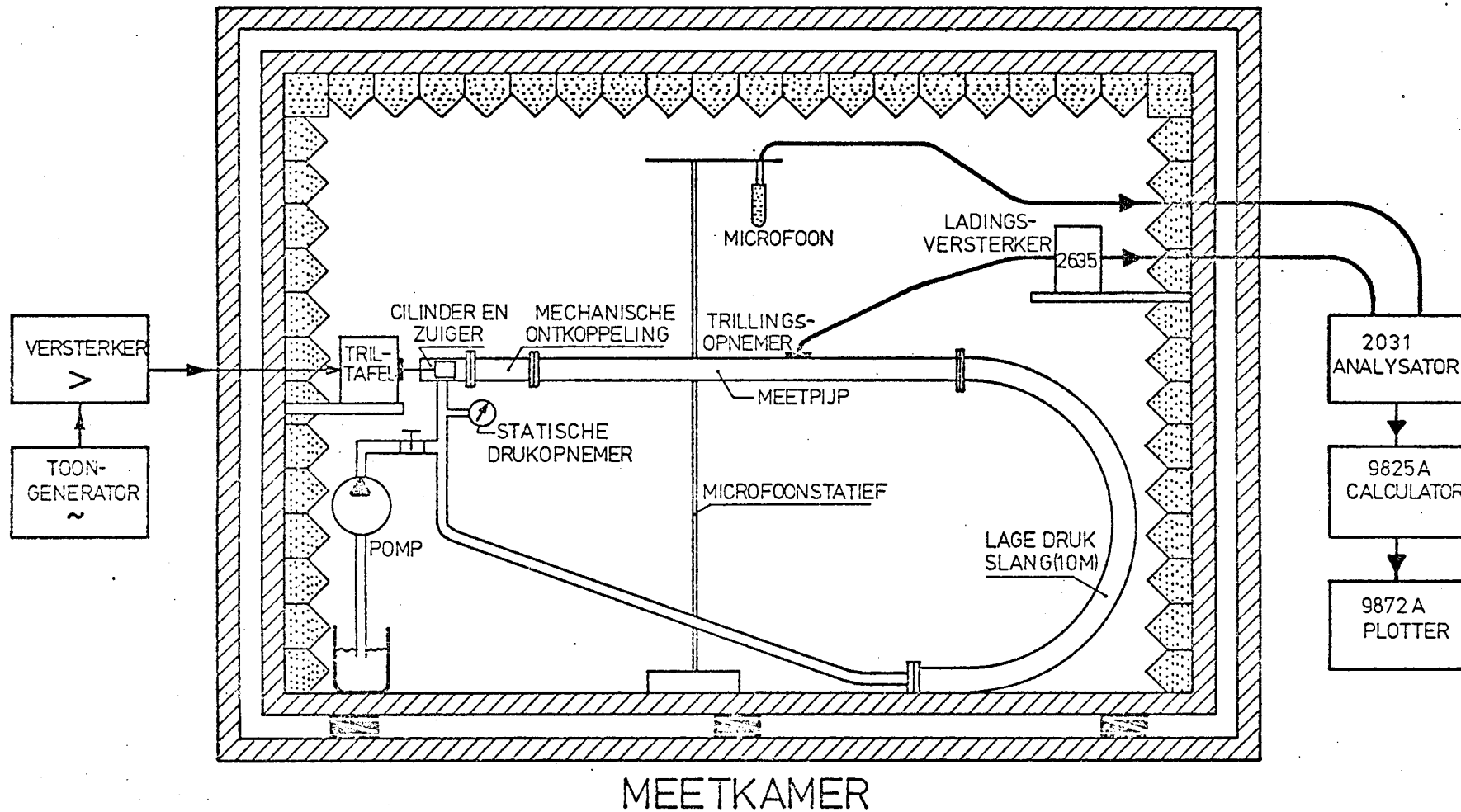
Tussen trilbron en meetpijp zit een rubber slang van ongeveer 30 cm, die dient als mechanische ontkoppeling. Deze trilbron bestaat uit een zuiger in een cilinder. (Overigens zijn achter figuur 13 2 foto's opgenomen, waarop de meetopstelling en de trilbron zichtbaar zijn.) De zuiger wordt in beweging gebracht door een triltafel (MB electronics, type PM 25), die gevoed wordt door een toongenerator (Philips, type PM 5100) en een versterker (MB electronics, type 2125 MB), beide buiten de meetkamer. De vloeistof, die zich in de leiding (kan) bevinden, wordt niet rondgepompt maar wordt alleen in beweging gebracht door de zuiger. Daarom is het andere uiteinde van de meetpijp rechtstreeks verbonden met de cilinder en de zuiger via een lagedrukslang van ongeveer 10 meter.

Waar de zuigerstaaf uit de cilinder komt lekt de vloeistof langzaam naar buiten (een vloeistofdruk van 3 bar valt door deze lek in ongeveer een half uur terug tot 2,5 bar). Daarom is het nodig olie bij te vullen met een handpomp die met een slang gekoppeld is aan de lagedrukslang. De triltafel en de cilinder met zuiger zijn zelf storende bronnen van lawaai. Het is immers de meetpijp, waarvan men het geluid wil meten. Daarom zijn de triltafel en de cilinder met zuiger afgeschermd met blokken van poly-urethaanschuim (40 kg/m^3), bekleed met synthetisch rubber (zogenaamd kunstrubber) en is aan het plafond van de meetkamer een drie meter lang "gordijn" gehangen, ook van synthetisch rubber ("Trelleborg"), ter hoogte van de mechanische ontkoppeling. Dit "gordijn" scheidt de meetpijp van de opstelling met de triltafel, de cilinder met zuiger en de pomp,

Metingen van het geluid van triltafel en cilinder met zuiger (dus zonder koppeling van de meetpijp), die verricht zijn vóór het aanbrengen van deze isolatie en metingen die daarna verricht zijn, geven verschillen in geluiddrukkniveaus aan van ongeveer 30 dB in de van belang zijnde frequentiebanden (bijvoorbeeld resp. 70 dB en 40 dB). Met gekoppelde meetpijp en met isolatie bedragen de niveaus 60 dB, zodat deze isolatie voldoende is. Om reflecties van geluid tegen de vloer te vermijden, zijn op de vloer ook blokken van poly-urethaan-schuim geplaatst. Verder bevinden er zich ter ondersteuning twee statieven buiten de uiteinden van de meetpijp, aan de kant van de mechanische ontkoppeling en aan de kant van de lagedrukslang. De statieven, de isolatieblokken en het "gordijn" zijn niet in figuur 13 weergegeven.

Het meten gebeurt met de volgende apparatuur. Op de wand van de meetpijp kan een trillingsopnemer (Brüel & Kjaer, type 4339) (eigenlijk versnellingsopnemer) geplaatst worden. Deze trillingsopnemer is verbonden met een ladingsversterker (Brüel & Kjaer, type 2635) (die tevens de versnelling kan integreren tot snelheid), die weer verbonden is met een spectrum-analysator (Brüel & Kjaer, type 2031), gekoppeld aan een calculator en een plotter (beiden Hewlett Packard, respectievelijk type 9825A en type 9872A).

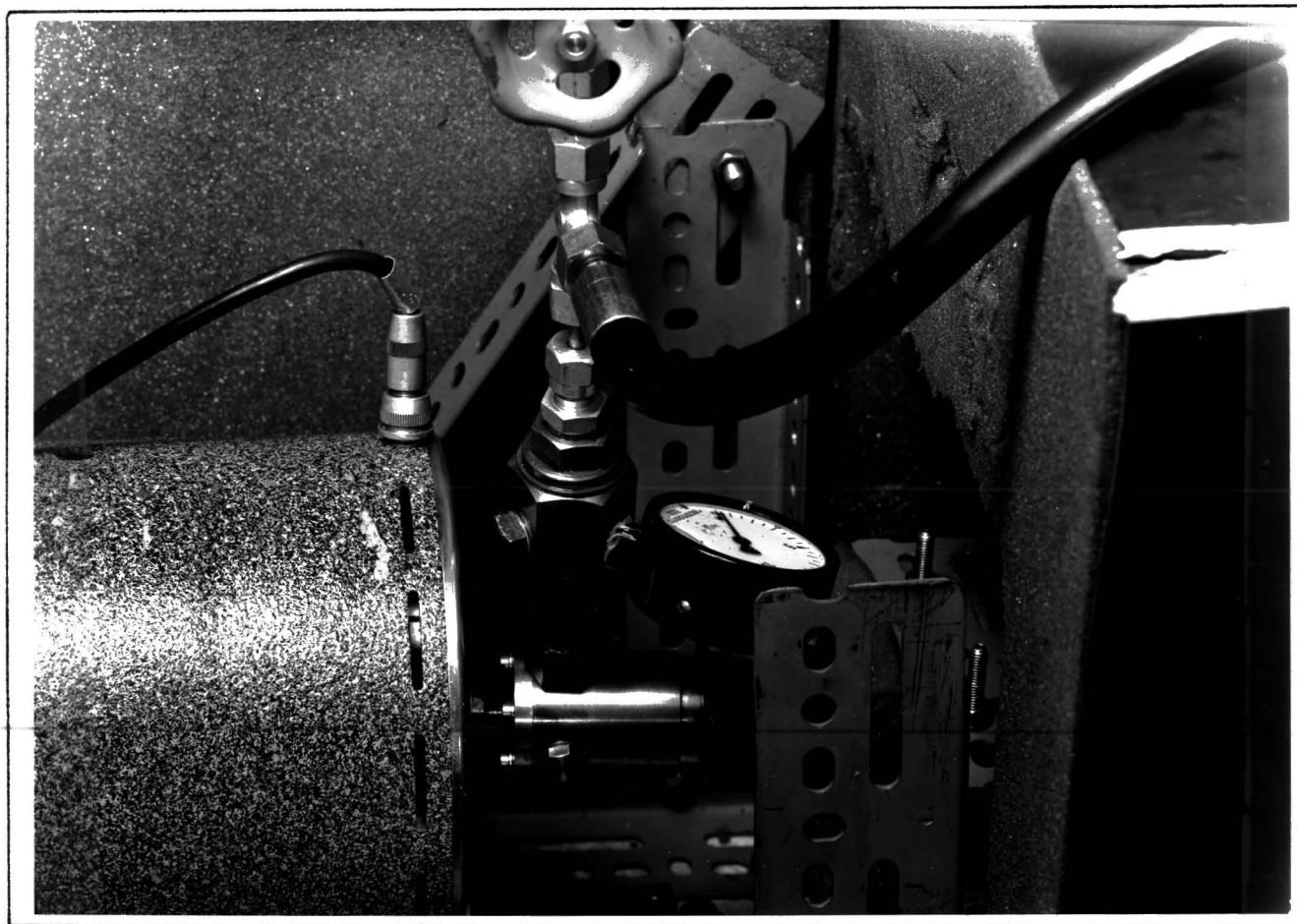
Het geluid wordt opgenomen met een microfoon (Brüel & Kjaer, type 4145), die gecalibreerd kan worden door een pistonphone (Brüel & Kjaer, type 4220) en die verbonden is met een microfoonvoorversterker (Brüel & Kjaer, type 2619), waarna het geluidsignaal dezelfde weg gaat als het trillingsignaal, namelijk naar spectrum-analysator en eventueel calculator en plotter.



Figuur 13: schets van de meetkamer en de meetopstelling (niet op schaal)



Meetopstelling in de meetkamer met v.l.n.r.
statief met triltafel (afgeschermd), "gordijn",
meetpijp, lagedrukslang



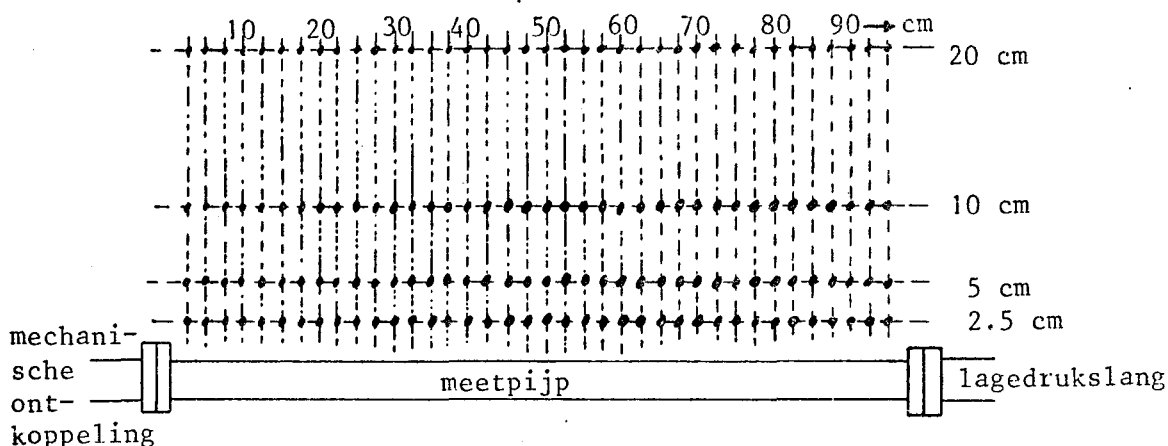
Detail van meetopstelling: links triltafel verbonden aan cilinder met zuiger, daarboven statische drukopnemer en aansluiting van lagedrukslang, rechts gedeelte van statief en afscherming

2.4 EXPERIMENTEN EN RESULTATEN

De resultaten van de metingen zullen besproken worden onder verwijzing naar de figuren 15 tot en met 24, die in de appendix opgenomen zijn. Bij alle metingen blijven echter enkele condities ongewijzigd en worden hier vermeld. Zo wordt de triltafel harmonisch geëxciteerd met een frequentie van 250 Hz en constante amplitude.

Het circuit (pijp, lagedrukslang en cilinder met zuiger) is gevuld met olie (Mobil Oil DTE 25) en wordt vóór de metingen ontlucht terwijl de druk door bediening van de handpomp op 3 bar gehouden wordt (maximale afwijking is 0.2 bar), met uitzondering van de metingen zonder olie in de leidingen (figuren 23 en 24).

De meetplaatsen van de trilling op de wand van de meetpijp en het geluid loodrecht daarboven zijn getekend in figuur 14,



Figuur 14: meetplaatsen ten opzichte van de meetpijp

De lengte van de pijp is 1 meter, het gedeelte van de pijp tussen de koppeling is 97.5 cm. De meetplaatsen liggen op een onderlinge afstand van 2.5 cm, te beginnen op 2.5 cm afstand van de linker koppeling van de pijp. Zo zijn er op een afstand van 97.5 cm 38 meetplaatsen (de laatste is op 2.5 cm afstand van de rechter koppeling). Terwijl de omstandigheden gelijk blijven wordt op alle 38 meetplaatsen het trillingsniveau (eigenlijk het snelheidsniveau) van de wand van de pijp gemeten en op

drie plaatsen loodrecht boven de pijp het geluidniveau (ook op alle 38 meetplaatsen), namelijk op 2.5 cm, op 5 cm en op 10 cm afstand van de pijp (maximale afwijking in horizontale richting 3 mm en in verticale richting 2 mm).

De analysator (B&K 2031) is ingesteld op een volle schaal frequentie van 2000 Hz en op het lineair middelen van 32 spectra, die een analyse-tijd hebben van 200 ms per spectrum. Tevens is "Hanning-weighting" in-geschakeld.

Alleen bij de metingen, waar figuur 22 bij hoort, is een aluminium pijp gebruikt, bij alle andere metingen een stalen pijp.

In bijna alle figuren (op de figuren 15 en 23 na) zijn telkens 38 meet-punten met elkaar verbonden door een ononderbroken lijn. Deze lijn is een 3^e graads regressie-kromme.

Figuur 15: Van onder naar boven: spectrum van het trillingsniveau (snelheidsniveau) van de wand van de pijp, spectrum van het geluid-drukniveau op 2.5 cm afstand van de pijp en spectrum van het geluid-drukniveau op 5 cm afstand van de pijp. Deze metingen zijn verricht op 82,5 cm van het begin van de pijp (zie figuur 14).

Het geluid-drukniveau (SPL = Sound Pressure Level) staat in relatie tot de geluid-druk (p) volgens

$$\text{SPL} = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

waarin $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ de referentiedruk is.

Het snelheidsniveau (VL = Velocity Level) staat in relatie tot de snelheid (v) volgens

$$\text{VL} = 20 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right)$$

waarin $v_0 = 10^{-6} \text{ m/s}$ (in de figuren 16, 17 en 18 heeft v_0 echter andere waarden).

De grondfrequentie (250 Hz) vertoont de hoogste piek, de harmonischen liggen lager, maar zijn desalniettemin vrij hoog.

Figuur 16: Als functie van de meetplaats ten opzichte van de meetpijp (zie figuur 14) zijn de niveaus van geluiddruk en trilling uitgezet, het geluiddrukkniveau evenals in figuur 15 op 2,5 cm en op 5 cm afstand van de pijp. Als frequentie is in dit geval de grondfrequentie (250 Hz) gekozen.

Uit vergelijking 2.2.50 volgt, dat als r tweemaal zo groot is, dan is het geluiddrukkniveau 3 dB lager. Dit is in deze figuur te zien.

Overigens heeft v_0 een andere waarde: $v_0 = 10^{-5}$ m/s.

Figuur 17: Voor deze figuur geldt hetzelfde als voor figuur 16, behalve het feit dat als frequentie in dit geval 750 Hz is gekozen (3^e harmonische). Ook hier geldt: $v_0 = 10^{-5}$ m/s.

Figuur 18: Ook voor deze figuur geldt hetzelfde als voor figuur 16. De frequentie is 1000 Hz. In dit geval is $v_0 = 10^{-8}$ m/s.

Figuur 19: Metingen van het geluiddrukkniveau op 5 cm afstand van de pijp bij een frequentie van 750 Hz. Het zijn dezelfde meetpunten als in figuur 17. De ononderbroken lijn stelt het berekende geluiddrukkniveau voor (als functie van de plaats ten opzichte van de meetpijp). De berekening is uitgevoerd m.b.v. vergelijking 2.2.50 waarin voor de 38 waarden van de snelheid de resultaten van de trillingsmetingen in figuur 17 genomen zijn. Voor de verschillende parameters zijn de volgende waarden gebruikt:

dichtheid van lucht	ρ_0	1,21 kg/m ³
straal van de meetpijp	a	0.015 m
cirkelfrequentie van de excitatie	ω	$2\pi \cdot 750$ s ⁻¹
snelheid van de trillende wand	u_0	volgt uit figuur 17
hoek van meting t.o.v. vlak van trilling	ϕ	0
snelheid van het geluid in lucht	c	341 m/s
afstand van meetplaats tot as van pijp	r	0,065 m
referentie geluiddruk	p_0	$2 \cdot 10^{-5}$ N/m ²

Figuur 20: Voor deze figuur geldt hetzelfde als voor figuur

19; op het volgende na. De frequentie is nu 1000 Hz, zodat de meetpunten van het geluiddrukkniveau dezelfde zijn als die van figuur 18 en de berekende punten van het geluiddrukkniveau (verbonden door de ononderbroken lijn) gevonden worden door vergelijking 2.2.50 toe te passen op de resultaten van de trillingsmetingen in figuur 18.

Figuur 21: Ter plaatse van de koppeling bij het rechter uiteinde van de pijp (rechts in figuur 13 en 14) is een extra massa (enkele lagen lood) aangebracht om zoveel mogelijk te verhinderen dat de trillingen zich voortplanten langs de wand van de slang. Hierdoor is het effect van de staande golven groter en dat van de lopende golven kleiner. De metingen zijn verder onder dezelfde omstandigheden verricht als de metingen in figuur 20. De bekeken frequentie is 1000 Hz en de afstand tot de pijp is 5 cm. De getrokken lijn is berekend uit de resultaten van trillingsmetingen die niet weergegeven zijn.

Figuur 22: In plaats van een stalen pijp is nu een aluminium pijp gebruikt. Voor deze figuur geldt hetzelfde als voor figuur 20. Echter $a = 0,01$ m en $r = 0,06$ m. Ook nu is de getrokken lijn berekend uit de resultaten van trillingsmetingen die niet weergegeven zijn. De frequentie is 1000 Hz.

Figuur 23: Tot nu toe zijn alleen metingen vermeld, die gedaan zijn met olie in het circuit. Bij deze en bij de volgende figuur zijn de metingen echter verricht zonder olie in het circuit, met de stalen pijp. Ter vergelijking kan voor deze figuur het beste figuur 15 dienen. Van onder naar boven zijn het spectrum van het snelheidsniveau, het spectrum van het geluiddrukkniveau op 2.5 cm en het spectrum van het geluiddrukkniveau op 5 cm weergegeven. Deze metingen zijn verricht op 65 cm afstand van het begin van de pijp.

Figuur 24: Circuit zonder olie en met stalen pijp. Ter vergelijking kan het beste figuur 19 dienen. De meetpunten van het geluiddrukkniveau zijn uitgezet als functie van de meetplaats ten opzichte van de meetpijp. De getrokken lijn is berekend uit de resultaten van trillingsmetingen, die niet weergegeven zijn. De frequentie is 750 Hz en de afstand tot de pijp 5 cm.

2.5 DISCUSSIE EN CONCLUSIES

- a) In de figuren 15 tot en met 24 zijn de resultaten weergegeven, die volgen uit de metingen. De metingen zijn verschillende keren onder nagenoeg dezelfde omstandigheden herhaald om te zien of de uitkomsten reproduceerbaar zijn. Over het geheel genomen vertonen de grafieken dezelfde vorm en hebben de niveaus een spreiding van 2 dB.
- b) Bij verschillende meetinstrumenten kunnen fouten optreden bij het aflezen en het instellen en soms geven de apparaten zelf niet exacte aanwijzingen. Tevens kan het gebeuren dat in de meetkamer onwillekeurig reflecties van het geluidssignaal optreden, die niet altijd op dezelfde manier plaatsvinden, zodat vergelijking van de resultaten niet helemaal correct is. Al deze beperkingen in ogenschouw genomen, kan er in de meeste gevallen een maximale afwijking ten opzichte van de weergegeven resultaten optreden van ongeveer 2 dB.
- c) De spectra in figuur 15 laten zien dat de geluidhinder vooral veroorzaakt wordt door de pieken bij de grondfrequentie en de eerste vijf tot acht boventonen. Metingen bij een volle schaal frequentie hoger dan 2000 Hz geven hetzelfde beeld. De hoge niveaus beneden 100 Hz worden veroorzaakt door resonanties in de opgestelde apparatuur en ondersteuning, maar bij A-weighting verdwijnen deze hoge niveaus. Het heeft dus alleen zin om bij 250 Hz en gehele veelvoud daarvan te kijken.
- In de figuren 16 tot en met 18 komen alleen resultaten voor van geluidmetingen op 2.5 cm en 5 cm afstand van de pijp. Ook op 10 cm en op 20 cm afstand van de pijp zijn metingen verricht, maar daar is de vorm van de grafieken niet zo geprononceerd, omdat het niveau lager wordt en er dus minder verschil is met de achtergrondruis en omdat daar te veel interferentie optreedt met geluid afkomstig van andere geluidbronnen of ten gevolge van reflecties. Ook andere frequenties dan 250 Hz, 750 Hz en 1000 Hz zijn bekeken, zoals 500 Hz en 1250 Hz, maar dat levert geen andere resultaten op, behalve dat ze niet zo duidelijk zijn, omdat de niveaus bij deze frequenties over het algemeen lager zijn.

- d) Op enkele uitzonderingen na vertonen de resultaten van de berekeningen van het geluiddrukkniveau en de metingen goede overeenkomsten (in de figuren 19 en 20). De gemiddelde afwijking bedraagt niet meer dan 2 dB, wat gezien de onnauwkeurigheden, vermeld bij b), aanvaardbaar is. Er zijn geen resultaten vermeld van berekeningen bij 250 Hz en op 2.5 cm afstand van de pijp, omdat in deze gevallen geldt dat $\omega r/c$ kleiner is dan 1. In de andere gevallen ligt $\omega r/c$ in de buurt van 1. Om vergelijking 2.2.50 te kunnen toepassen moet eigenlijk gelden $\omega r/c \gg 1$, maar de Hankelfunctie veroorzaakt geen grotere afwijking dan ongeveer 1.5 dB in het eindresultaat als $\omega r/c = 1$.
- e) De verhoging van de impedantie aan het eind van de pijp (rechts in figuur 14) heeft weinig invloed op de meetresultaten. Dat kan geconcludeerd worden als men de figuren 20 en 21 met elkaar vergelijkt. De trillingsniveaus komen goed met elkaar overeen. De geluidsniveaus in figuur 21 volgen de trillingsniveaus in de buurt van de verhoogde impedantie beter dan die in figuur 20. De afwijking van de geluiddrukkniveaus aan de linkerkant van de pijp is veroorzaakt door het feit dat het "gordijn" verschoven is nadat de impedantie verhoogd is.
- f) De metingen met de aluminium pijp vertonen resultaten (zie figuur 22) die overeenkomen met de metingen met de stalen pijp. De afwijkingen van de berekende geluiddrukkniveaus ten opzichte van de gemeten niveaus zijn gemiddeld even groot. Het enige verschil is dat de niveaus over het algemeen iets hoger liggen dan de niveaus bij het gebruik van de stalen pijp. (Rekening houdend met de elasticiteitsmodulus, de verhouding van de diameter van de pijp en de dikte van de wand van de pijp en de soortelijke massa, komt dit overeen met wat daarover in Beranek staat.)
- g) Als men de figuren 23 en 15 met elkaar vergelijkt en vooral de figuren 24 en 19 dan ziet men dat er weinig wezenlijke verschillen te ontdekken zijn tussen de metingen en de berekeningen met vloeisof en die zonder vloeistof in het circuit. De grafieken in de figuren 19 en 24 wijken wat de vorm betreft nauwelijks van elkaar af. Zonder olie zijn de niveaus slechts zo'n 3 dB lager (gemiddeld). Geprobeerd is dit te verklaren door de gemeten mechanische energie (in de trilling) en de akoestische energie te vergelijken met de door de triltafel afgegeven energie. Maar als die energie getransporteerd moet worden in lucht in plaats van in olie, dan zou die verklaring alleen plausibel zijn als de geluidsnelheid in beide media ongeveer gelijk is. De geluidsnelheid is lager wanneer een vloeistof zich in een nauwe buis bevindt dan wanneer die zich in een wijd vat bevindt.

Maar er zijn publicaties (o.a. Lighthill), waaruit blijkt dat de geluidsnelheid in de olie in ons meetcircuit zeker niet lager kan zijn dan 1000 m/s, dat wil zeggen nog bijna drie keer zo groot als de geluidsnelheid in lucht.

Een verklaring kan gevonden worden in het feit dat niet de vloeistof het belangrijkste transportmiddel van de akoestische energie is, maar de metalen onderdelen van het circuit. Men kan dus beter zeggen dat er sprake is van mechanische geluidtransmissie (geluidvoortplanting in de wand van de leidingen) dan van hydraulische geluidtransmissie (geluidvoortplanting in de vloeistof).

- h) Als we uitgaan van $u_o \sin(n\pi z/\ell)$, in plaats van u_o , voor de snelheid van de wand van de pijp (waarin n geheel, z volgens figuur 12 gedefinieerd en ℓ de lengte van de pijp is) kunnen we, uitgaande van vergelijking 2.2.48, het volgende vinden voor het akoestisch vermogen uitgestraald door de pijp:

$$W = \int_0^{\ell} W_1 dz$$

Bij uitwerking van deze formule is er alleen onderscheid wat betreft de term u_o . Dit levert een factor

$$\int_0^{\ell} \sin^2(n\pi z/\ell) dz = \frac{\ell}{2}$$

verschil op.

Dit uit zich als volgt in het niveau van het geluidvermogen (SWL = Sound Power Level)

$$\text{SWL} = 10 \log\left(\frac{W}{W_o}\right)$$

waarin $W_o = 10^{-12}$ watt.

Omdat de lengte van de pijp (ℓ) 1 meter is, wordt SWL, en ook SPL (geluiddrukkniveau) $10 \log(\frac{1}{2}) = -3$ dB hoger. Hiermee is in de berekening van de geluiddrukkniveaus rekening gehouden.

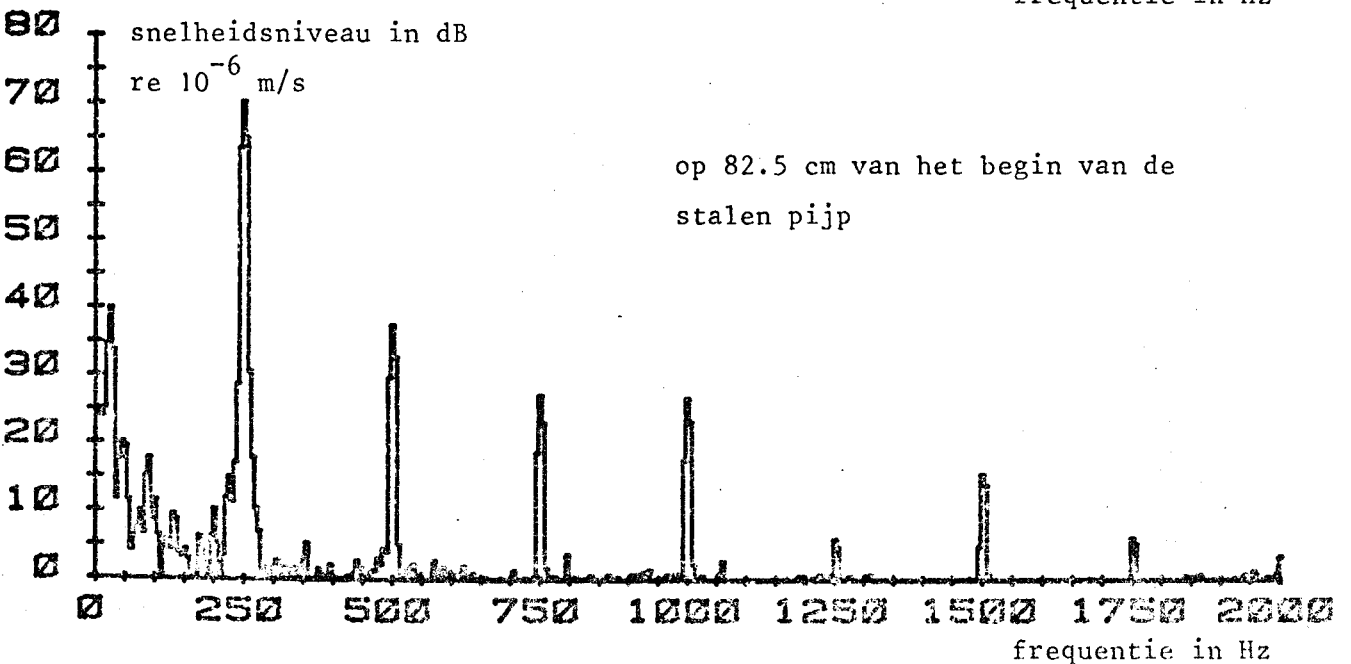
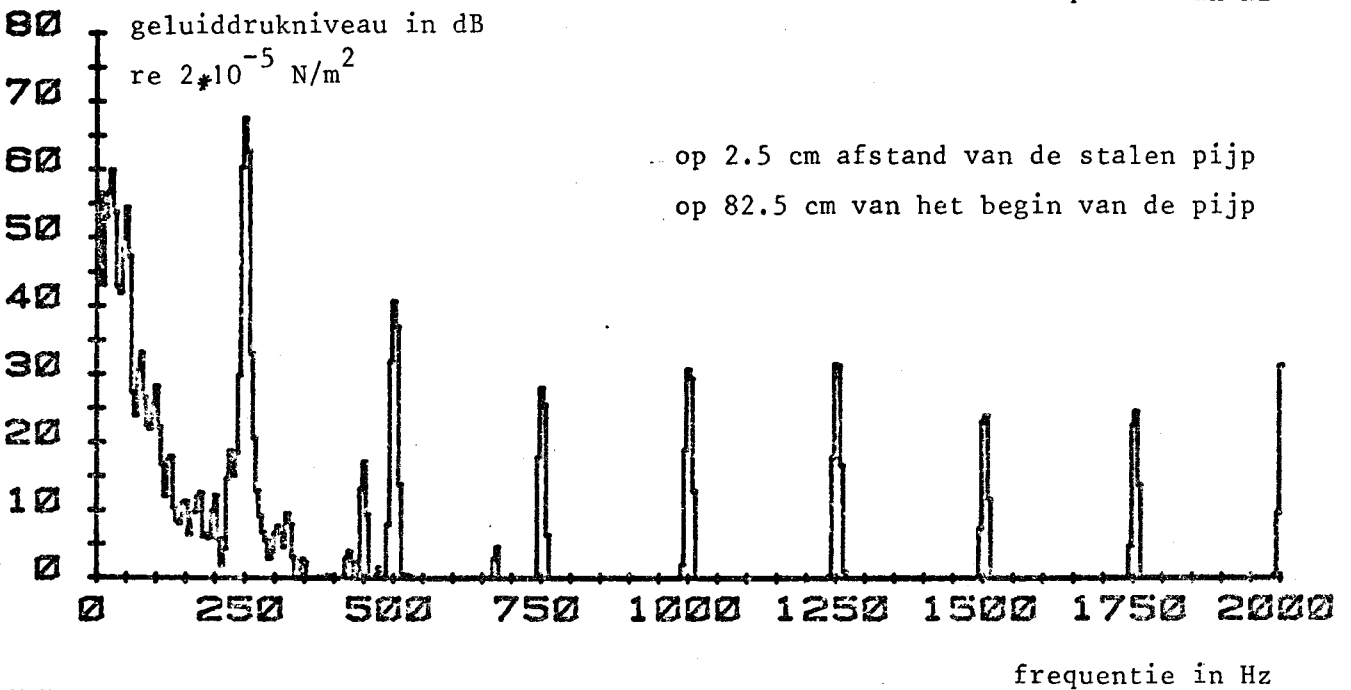
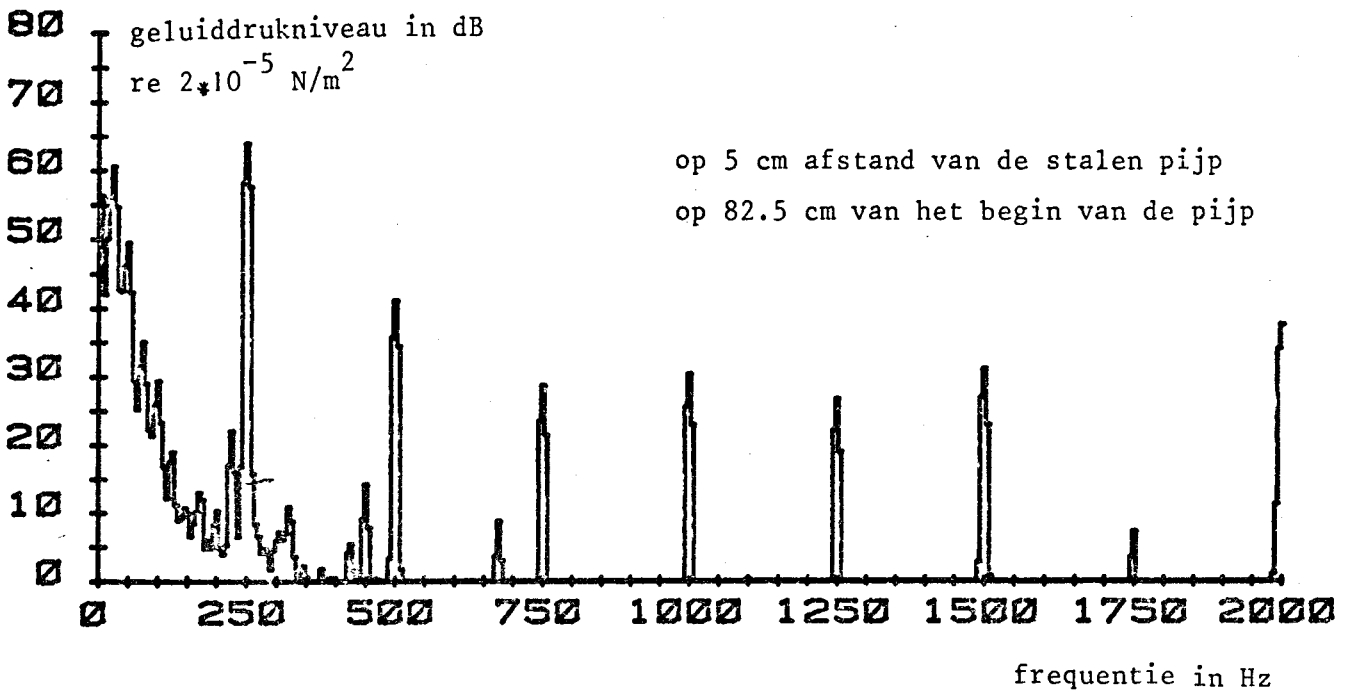
- i) Tot slot volgen nog enkele opmerkingen, die te maken hebben met de geluidafstraling van hydraulische leidingen en de bestrijding van de lawaaihinder ervan (niet uit eigen metingen).
- i.1) Als in een hydraulisch systeem machine en leidingen apart ieder evenveel geluid produceren, dan zal het (denkbeeldig) wegnemen van de machine slechts tot gevolg hebben dat het geluidniveau met globaal 3 dB afneemt. Het heeft dus wel degelijk zin te pogen het lawaai van leidingen te bestrijden.
- i.2) Zoals reeds gezegd is, kan geluidvoortplanting in leidingen plaatsvinden in de wand van de leidingen en in de vloeistof. In het eerste geval spreekt men van mechanische geluidtransmissie, in het tweede geval van hydraulische geluidtransmissie. Mechanische geluidtransmissie kan beperkt worden door de trilling te dempen, maar ook door isolatie. Hydraulische geluidtransmissie kan alleen door isolatie beperkt worden.
- i.3) Als de vloeistof sneller stroomt zal het geluidniveau hoger zijn. Vergroting van de diameter van leidingen maakt een kleinere vloeistofsnelheid mogelijk waardoor het geluidniveau daalt. Het uitstralend oppervlak wordt dan echter groter, zodat hierdoor het geluidniveau stijgt. Uit publicaties (o.a. Diehl) blijkt dat het eerste effect groter is dan het tweede.
- i.4) Van belang is ook of de vloeistof laminair of turbulent stroomt. Turbulente stroming zal meer lawaai produceren dan laminaire stroming. Ter bepaling van de stromingswijze dient het Reynolds getal: $Re = \rho v d / \eta$ waarin ρ = dichtheid van de vloeistof, v = snelheid van de vloeistof, d = binnendiameter van de leiding en η = viscositeit van de vloeistof. Als $Re < 1000$ dan is de vloeistof laminair, als $Re > 2200$ dan is de vloeistof turbulent. Als $1000 < Re < 2200$ dan zijn beide gevallen mogelijk. In ons geval is $Re < 1000$, omdat de vloeistof bijna geen snelheid heeft.
- i.5) Verandering van pijpdiameter in een leiding heeft twee gevolgen. Op de eerste plaats verandert daardoor de akoestische impedantie, de breedband ruis wordt voor een deel gereflecteerd. Op de tweede plaats ontstaat door een plotselinge verandering van pijpdiameter turbulentie, die onmiddellijk een verhoging van het geluidniveau met zich meebrengt.

2.6 LITERATUURLIJST

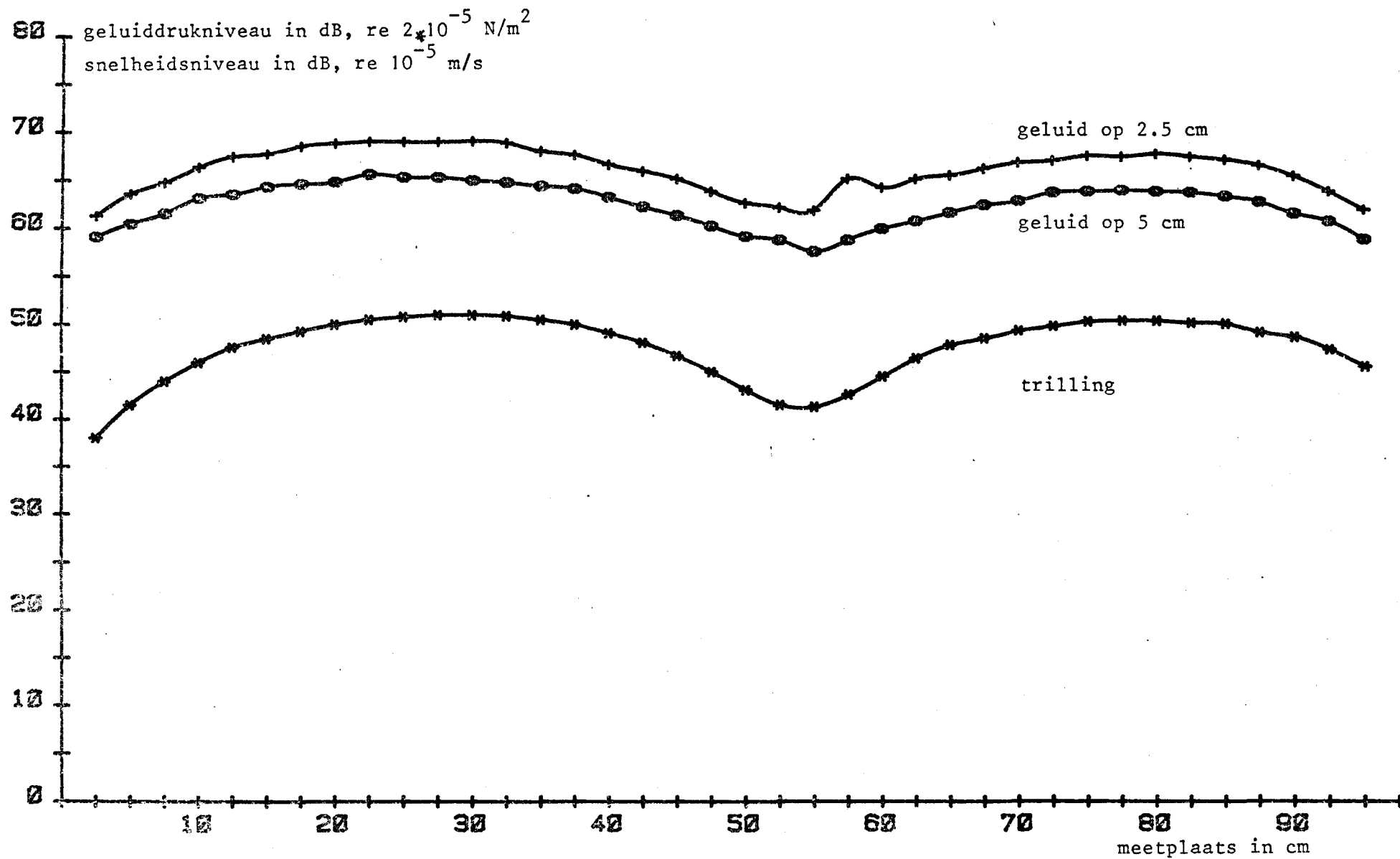
- 1) M. Abramowitz and I.A. Stegun
Handbook of mathematical functions
Dover publications, New York, 1972
- 2) J.P.A. Berhault, J.C.J. Daniëls en H.J. Martin
Echovrije ruimte voor geluidmetingen aan hydraulische systemen
Technische Hogeschool Eindhoven, 1977
- 3) G.M. Diehl
Machinery acoustics
Wiley, New York, 1973
- 4) L.E. Kinsler and A.R. Frey
Fundamentals of acoustics
Wiley, New York, 1962
- 5) J.A.P.M. de Laat
Geluidisolatie van een hydraulische slang
Stageverslag Technische Hogeschool Eindhoven, 1978
- 6) J. Lighthill
Waves in fluids
Cambridge University Press, 1978
- 7) P.M. Morse and K.U. Ingard
Theoretical acoustics
Mc Graw-Hill, New York, 1968
- 8) S.A. Petruszewicz and C.W. Stammers
The prediction of the noise radiated by hydraulic piping
Proc. 5th International Fluid Power Symposium
BHRA Fluid Engineering, Bedford, 1978

2.7 APPENDIX

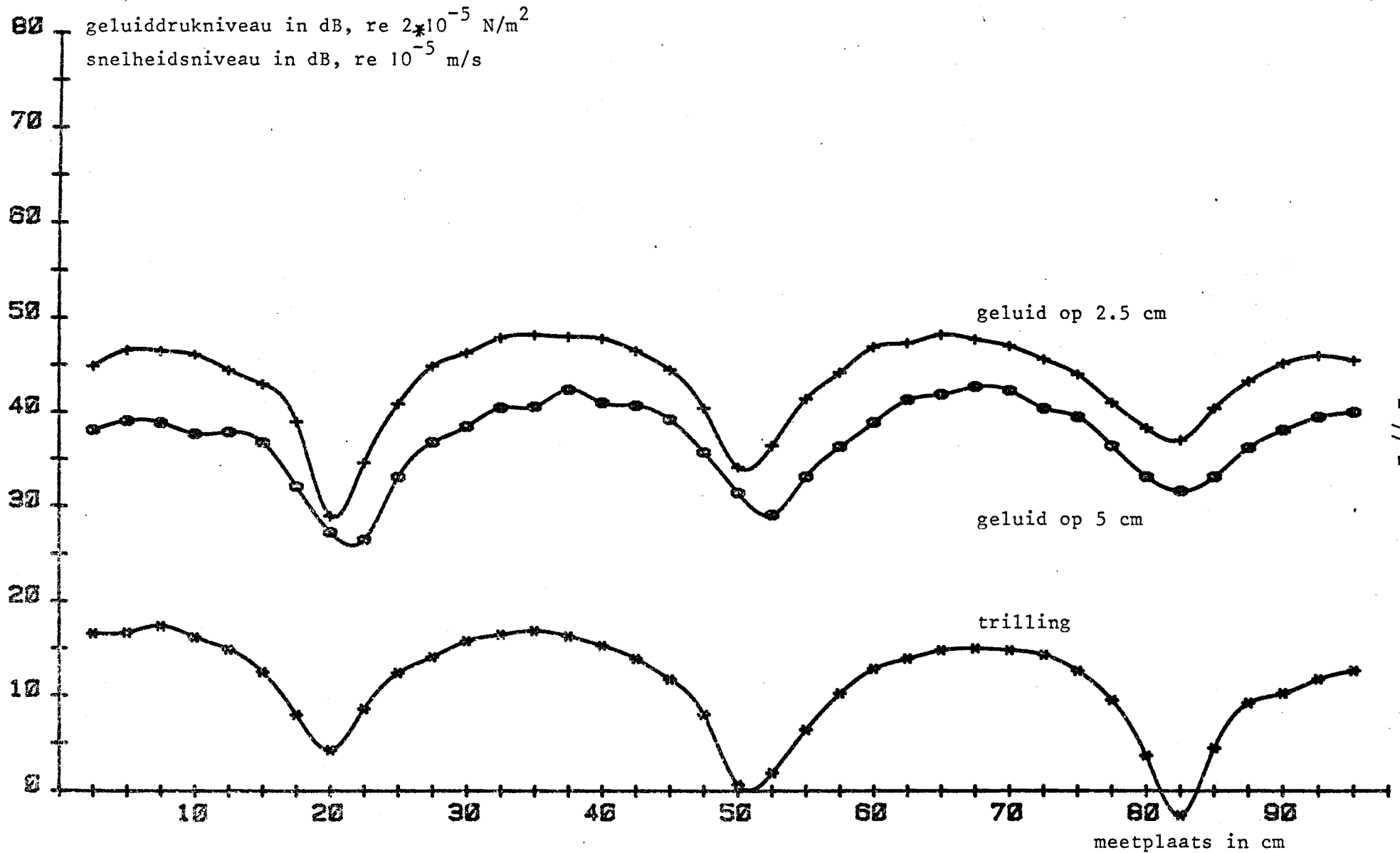
	blz.
Figuur 15: spectra van snelheids- en geluiddruk niveaus van stalen pijp	75
Figuur 16: niveaus bij 250 Hz (gemeten)	76
Figuur 17: niveaus bij 750 Hz (gemeten)	77
Figuur 18: niveaus bij 1000 Hz (gemeten)	78
Figuur 19: niveaus bij 750 Hz (gemeten en berekend)	79
Figuur 20: niveaus bij 1000 Hz (gemeten en berekend)	80
Figuur 21: niveaus bij 1000 Hz (stalen pijp met verhoogde impedantie aan rechter uiteinde)	81
Figuur 22: niveaus bij 1000 Hz (aluminium pijp)	82
Figuur 23: spectra behorende bij stalen pijp zonder vloeistof	83
Figuur 24: niveaus bij 750 Hz (stalen pijp zonder vloeistof)	84



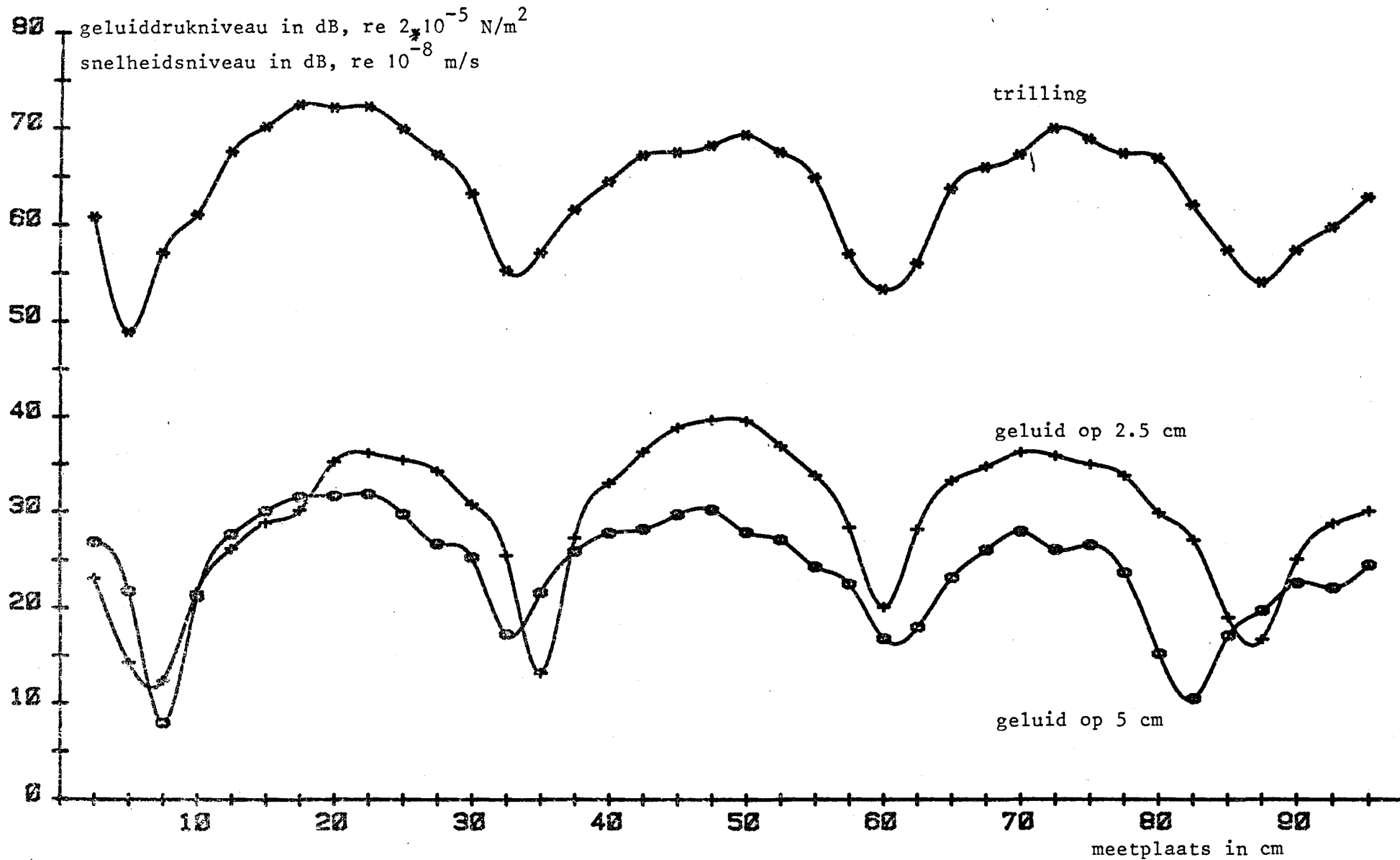
Figuur 15: spectra van snelheids- en geluiddruk niveaus van stalen pijp



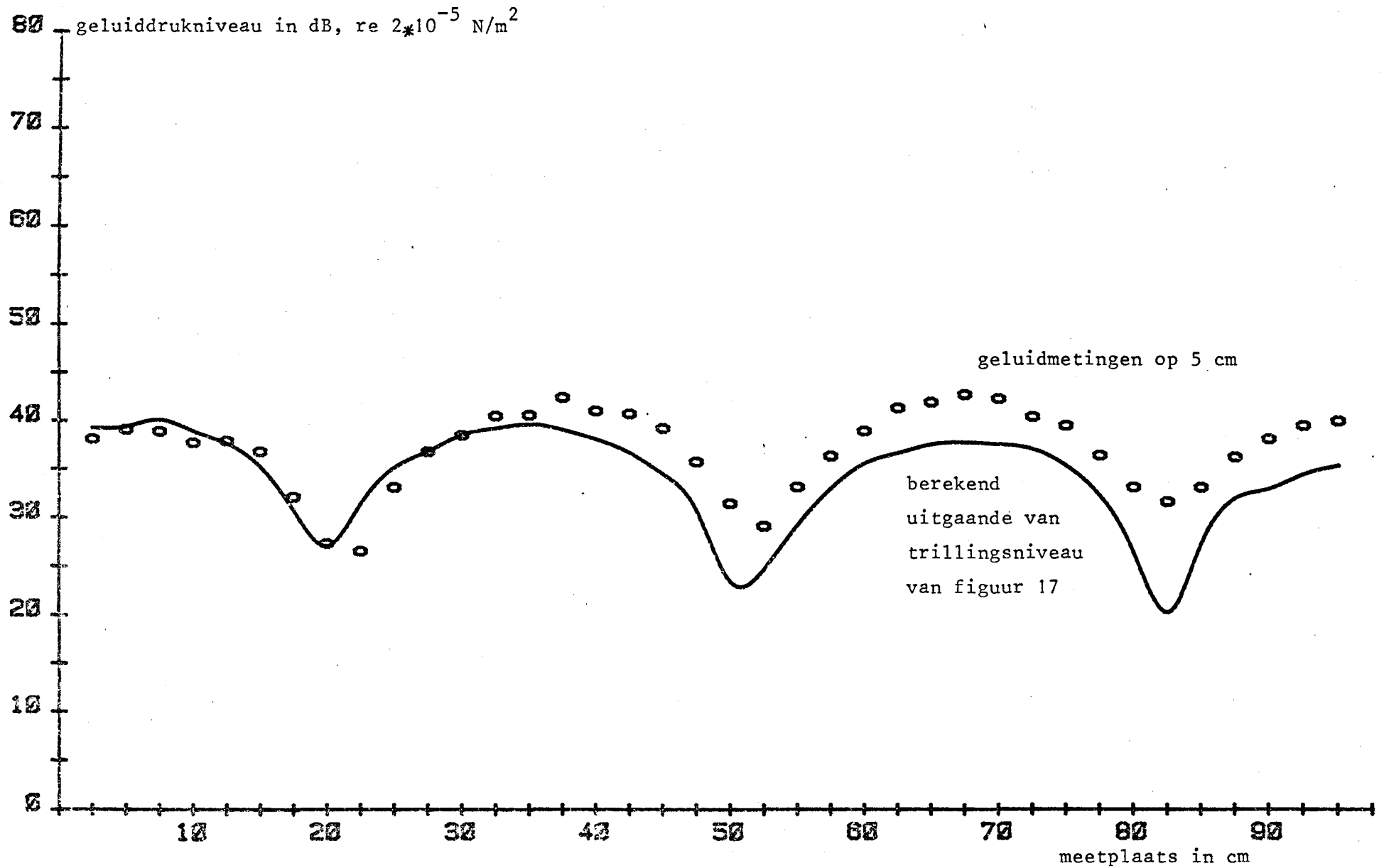
Figuur 16: niveaus bij 250 Hz



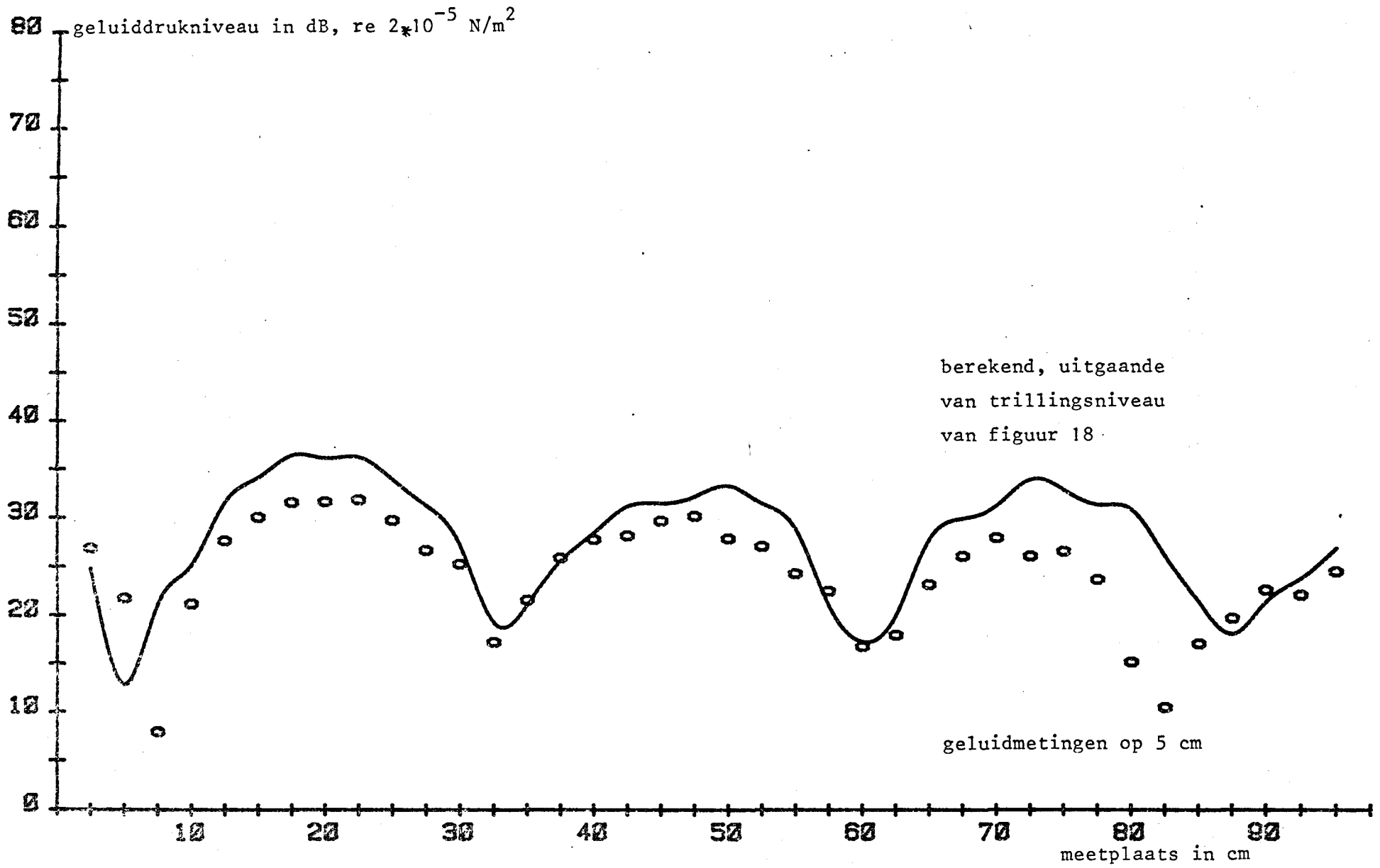
Figuur 17: niveaus bij 750 Hz



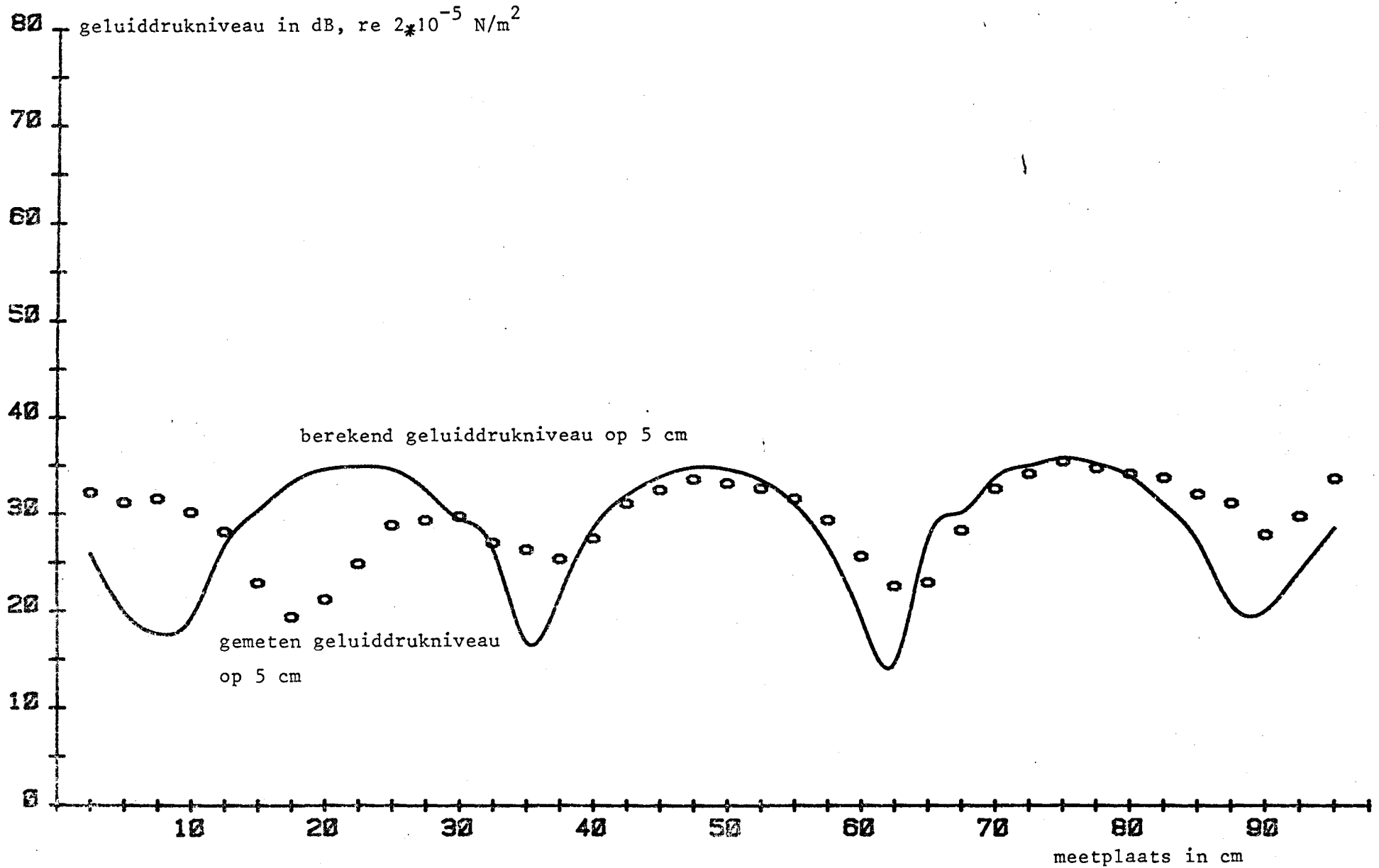
Figuur 18: niveaus bij 1000 Hz



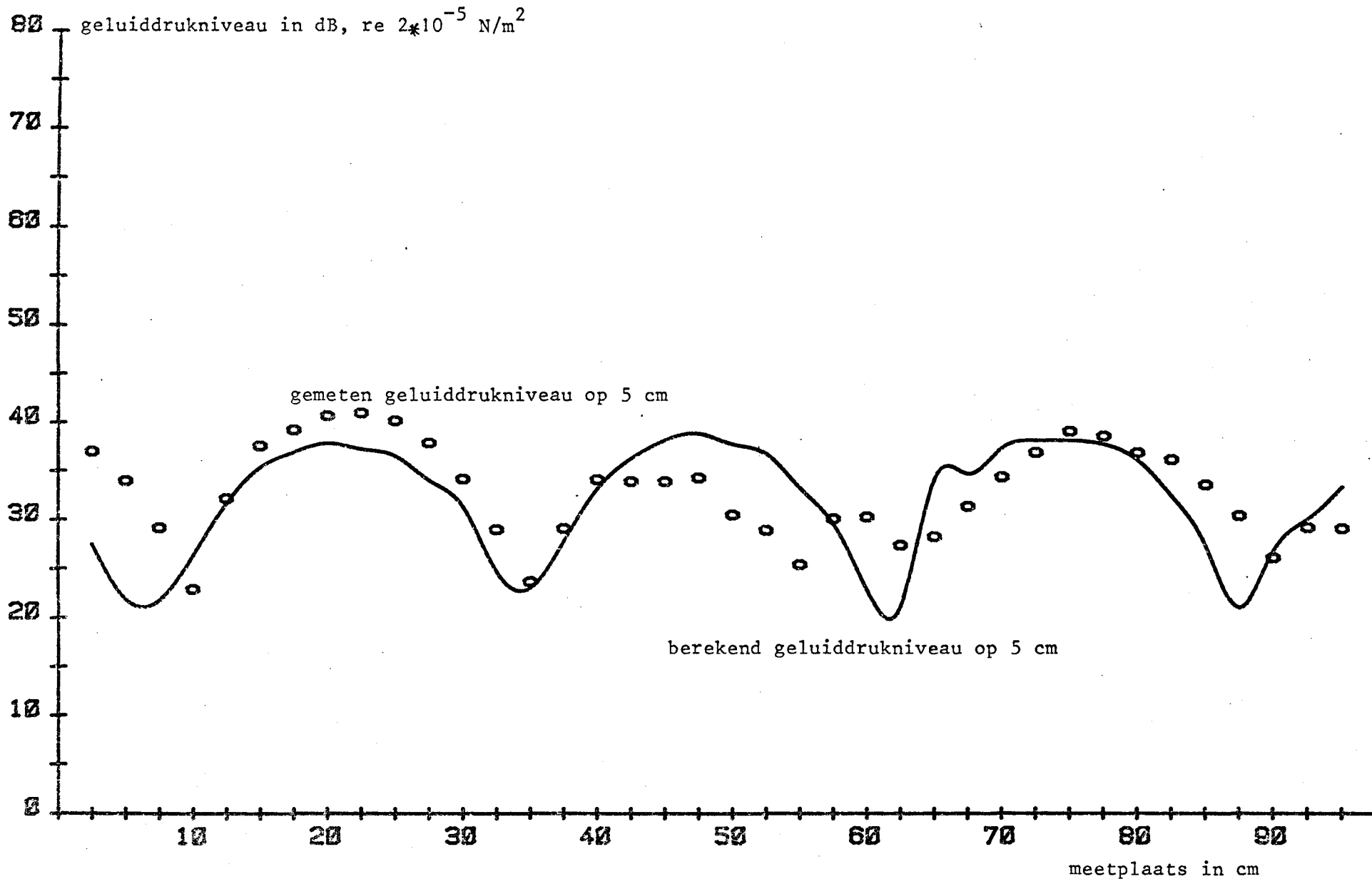
Figuur 19: niveaus bij 750 Hz



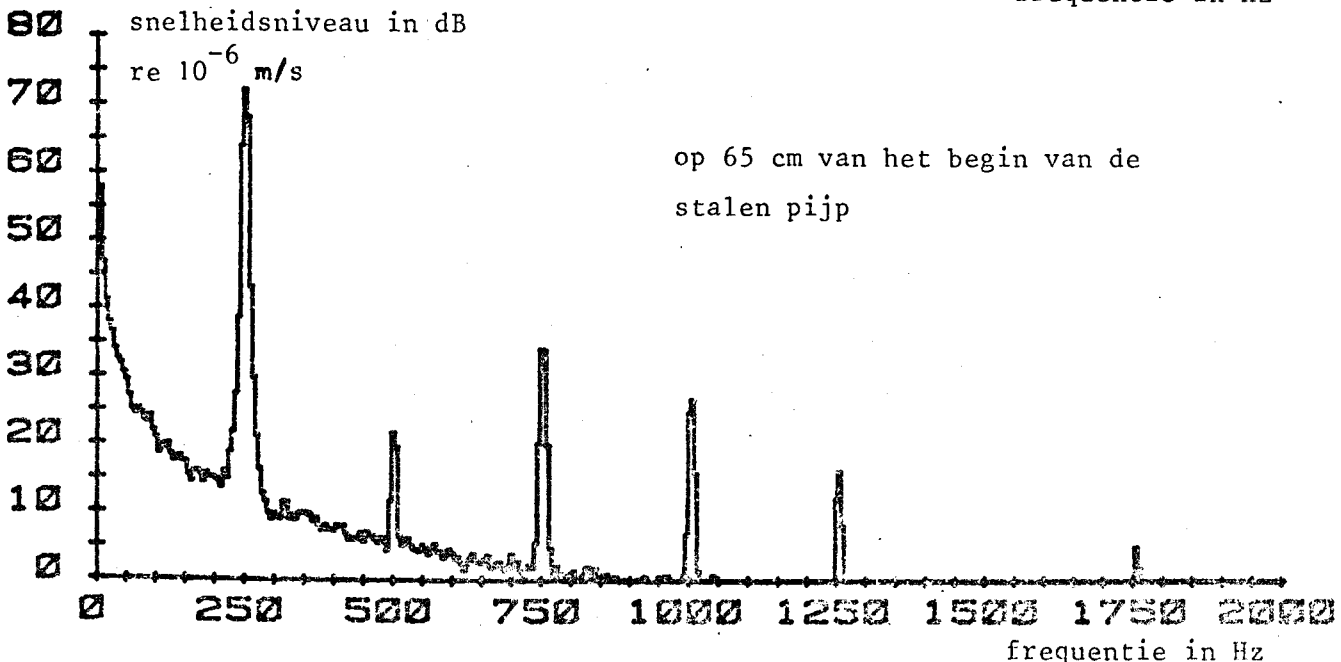
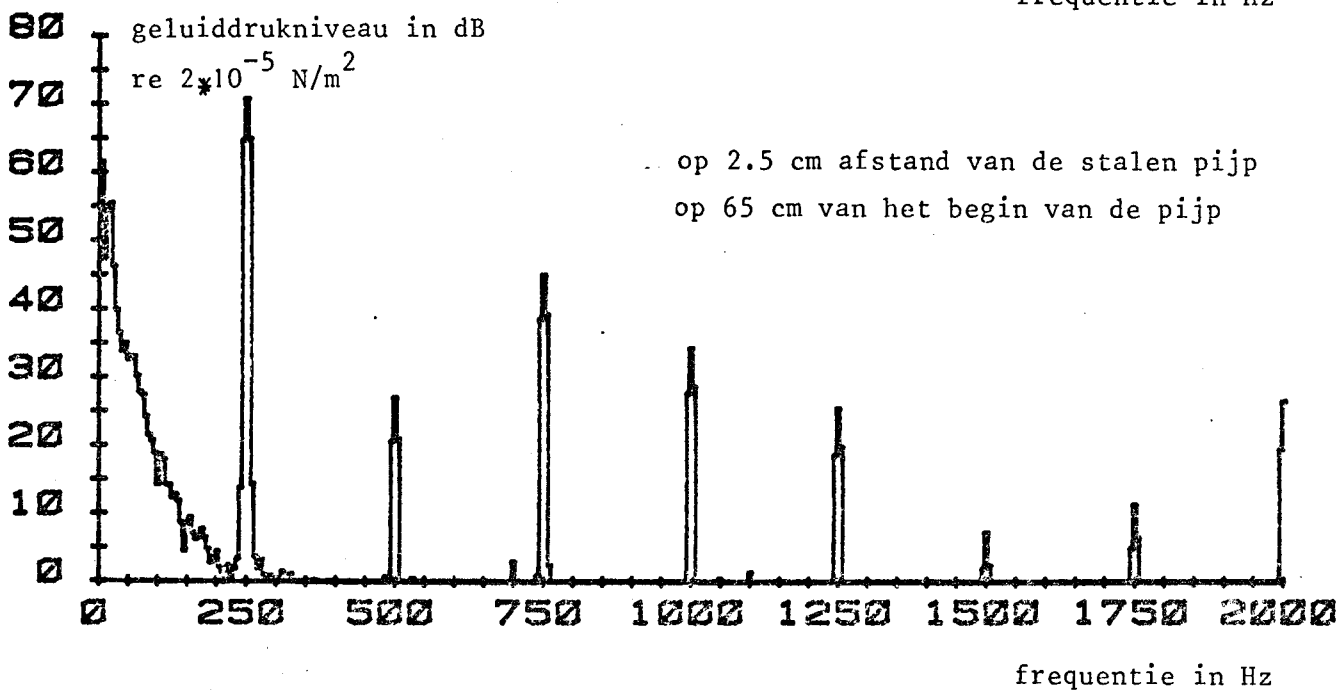
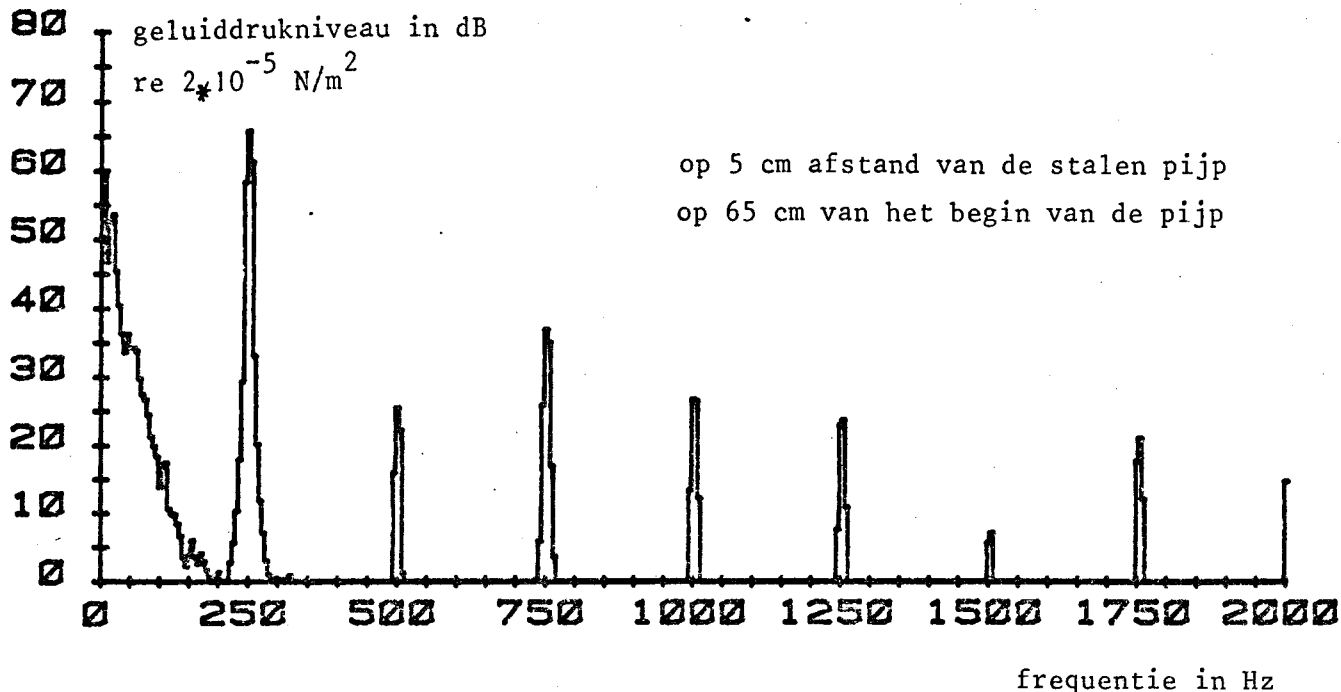
Figuur 20: niveaus bij 1000 Hz



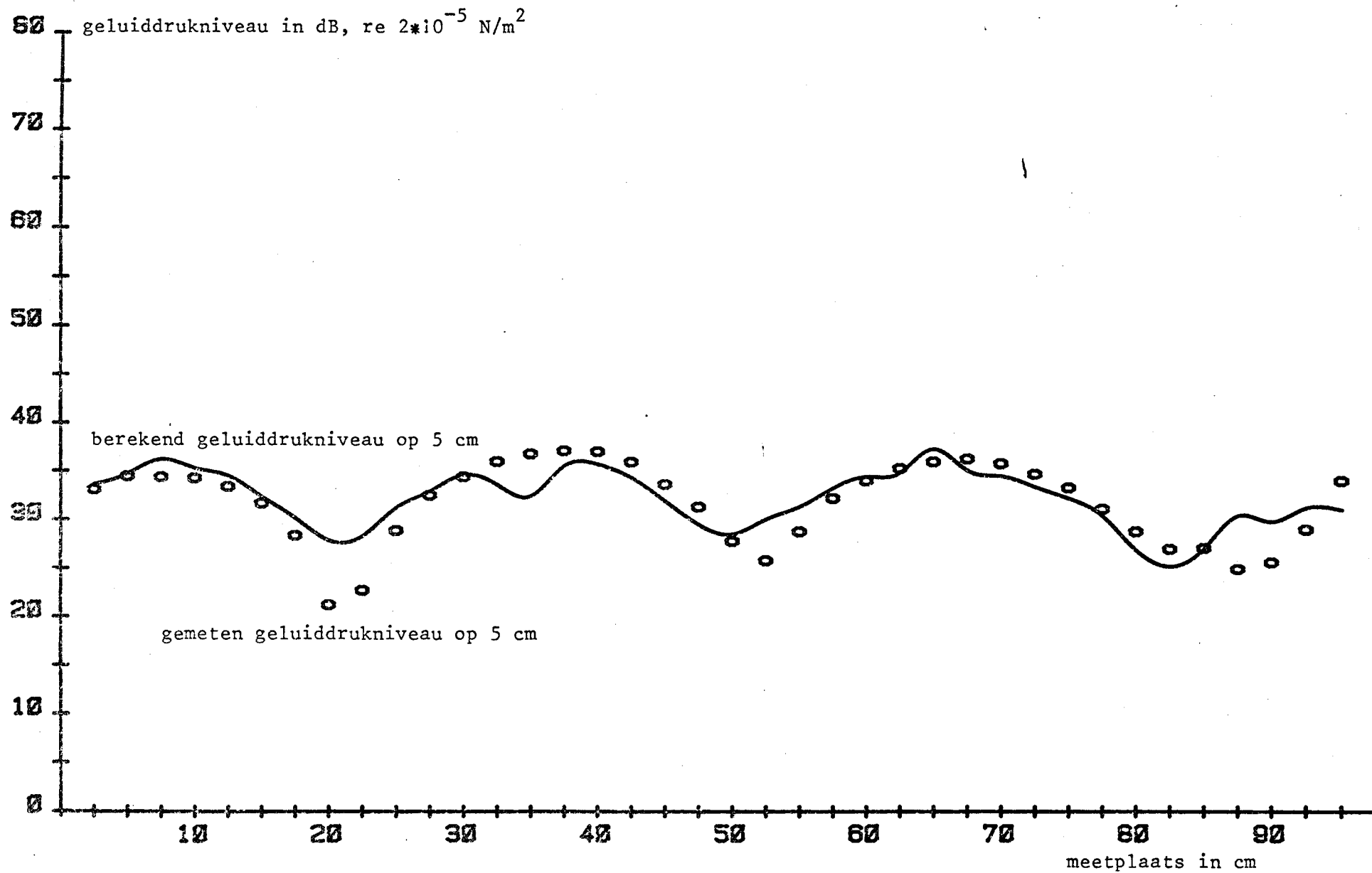
Figuur 21: niveaus bij 1000 Hz (stalen pijp met verhoogde impedantie aan rechter uiteinde)



Figuur 22: niveaus bij 1000 Hz (aluminium pijp)



Figuur 23: spectra behorende bij stalen pijp zonder vloeistof



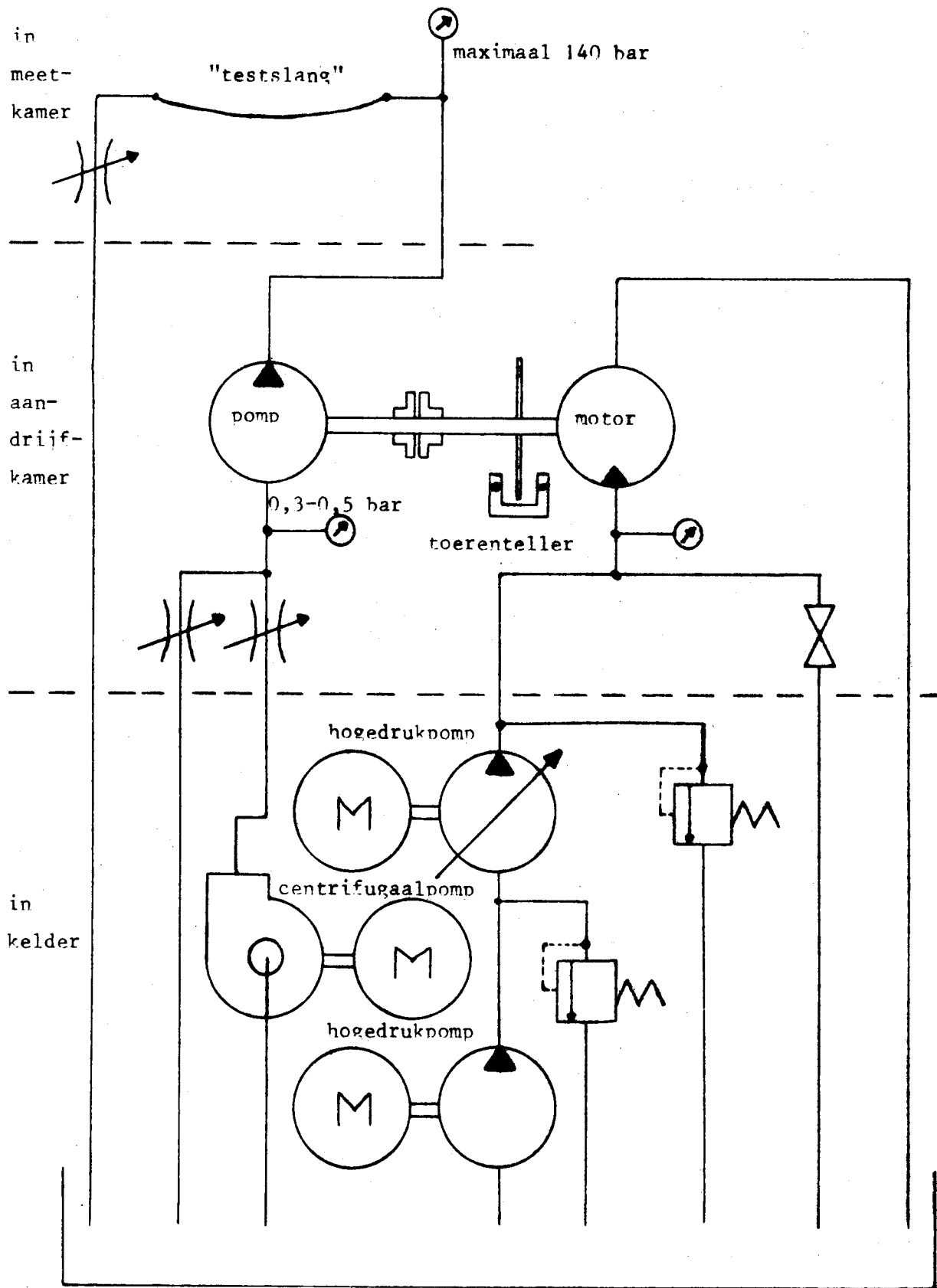
Figuur 24: niveaus bij 750 Hz (stalen pijp zonder vloeistof)

APPENDIX

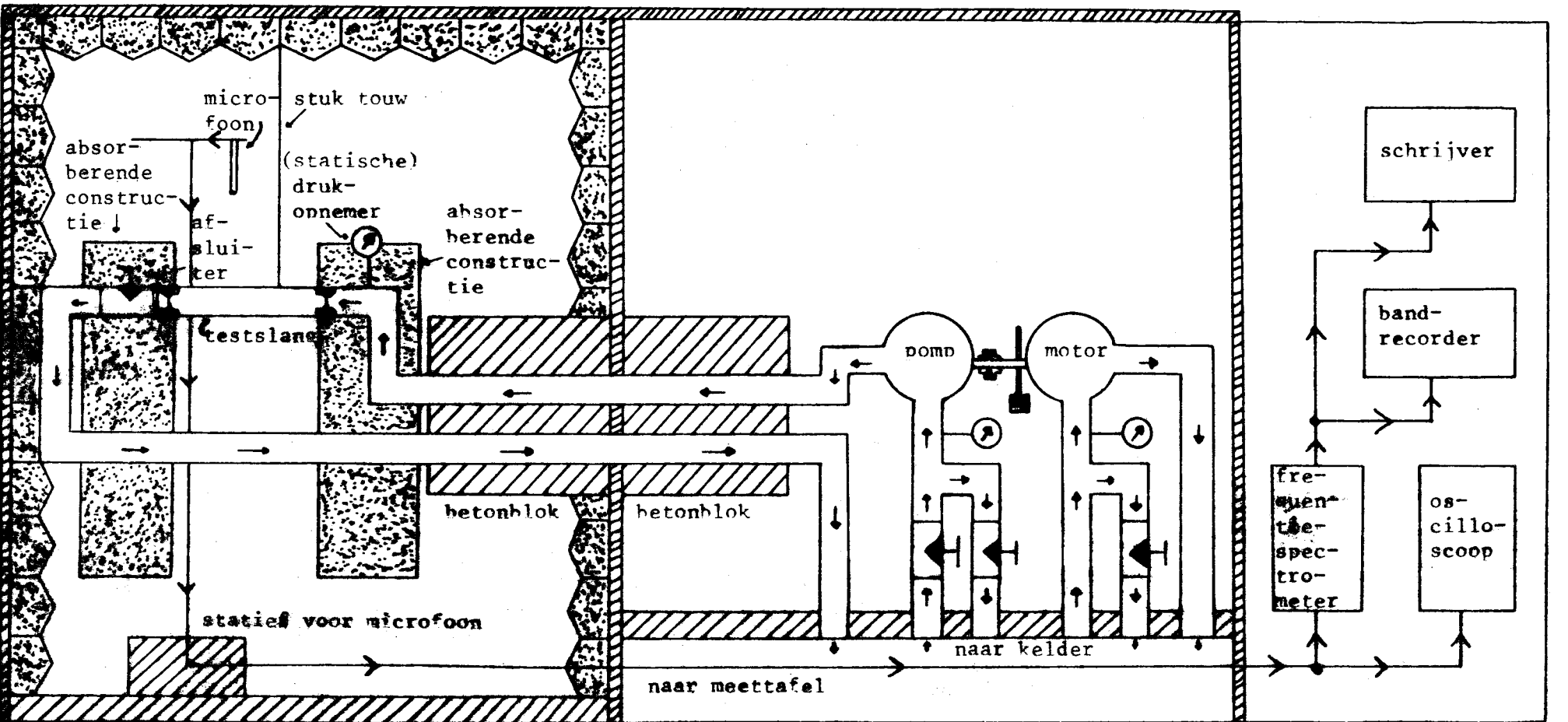
Onderzoek naar de geluidisolatie
van een hydraulische slang

J.A.P.M. de Laat

	blz.	eerste verwijzing in verslag op blz.
figuur 2	A2	6
figuur 3	A3	6
figuur 4	A4	6
figuur 8	A5	11
figuur 9	A6	11
figuur 10	A7	11
figuur 11	A8	11
figuur 12	A9	12
figuur 13	A10	12
figuur 14	A11	12
figuur 15	A11	12
figuur 16	A12	12
figuur 17	A12	12
figuur 19	A13	16
figuur 20	A14	17
figuur 21	A15	18
figuur 22	A16	19



Figuur 2: schema van het hydraulische systeem.



- A3 -

meetkamer

aandrieffkamer

meettafel in laboratorium

afmetingen: 7,270 x 4,245 x 3,400 m³ (lxbxh)

Figuur 3: schets van de meetopstelling.

Enkele gegevens van de motor en de pomp in de aandrieffkamer:

Motor: Denison M 1D - 117 - 21N (schottenmotor).

$n_{\max} = 2400$ omw./min.

$p_{\max} = 140$ bar.

$W_{th} = 120$ cm³/omw.

Een gunstige eigenschap van deze motor is de geringe gevoeligheid voor fluctuaties in de hoge-druk-toevoer.

Pomp: Gotec ZP 86 - 1 (tandwielpomp met uitwendige vertanding).

$n_{\max} = 2100$ omw./min.

$p_{\max} = 140$ bar.

Deze tandwielpomp levert een sinusvormige drukgolf met een grote amplitude (ongeveer 5 bar).

Deze combinatie van motor en pomp kan dus beschouwd worden als harmonische "ruis"-generator.

Een inleiding in de hydrauliek, met onder andere een beschrijving van een tandwielpomp met uitwendige vertanding is te vinden in Van de Velde (lit.3).

Enkele gegevens over de elektronische apparatuur:

Microfoon: Brüel & Kjaer 4145.

Microfoonvoorversterker: Brüel & Kjaer 2619.

Pistonphone: Brüel & Kjaer 4220.

Over deze drie apparaten vindt men veel terug in Brüel & Kjaer (lit.4).

Frequentiespectrometer: Brüel & Kjaer 2112 (met tertsbandfilter).

Schrijver: Brüel & Kjaer 2305.

Trillingopnemer: Brüel & Kjaer 4339.

Ladingversterker: Brüel & Kjaer 2635.

Drukopnemer (dynamisch): Krag Swiss 6411 sp.

Enkele gegevens over de "testslang":

De "testslang" is een hogedrukslang van synthetisch rubber met twee staaldraad-inlagen (Aeroquip hi impulse, HD 2781-12);

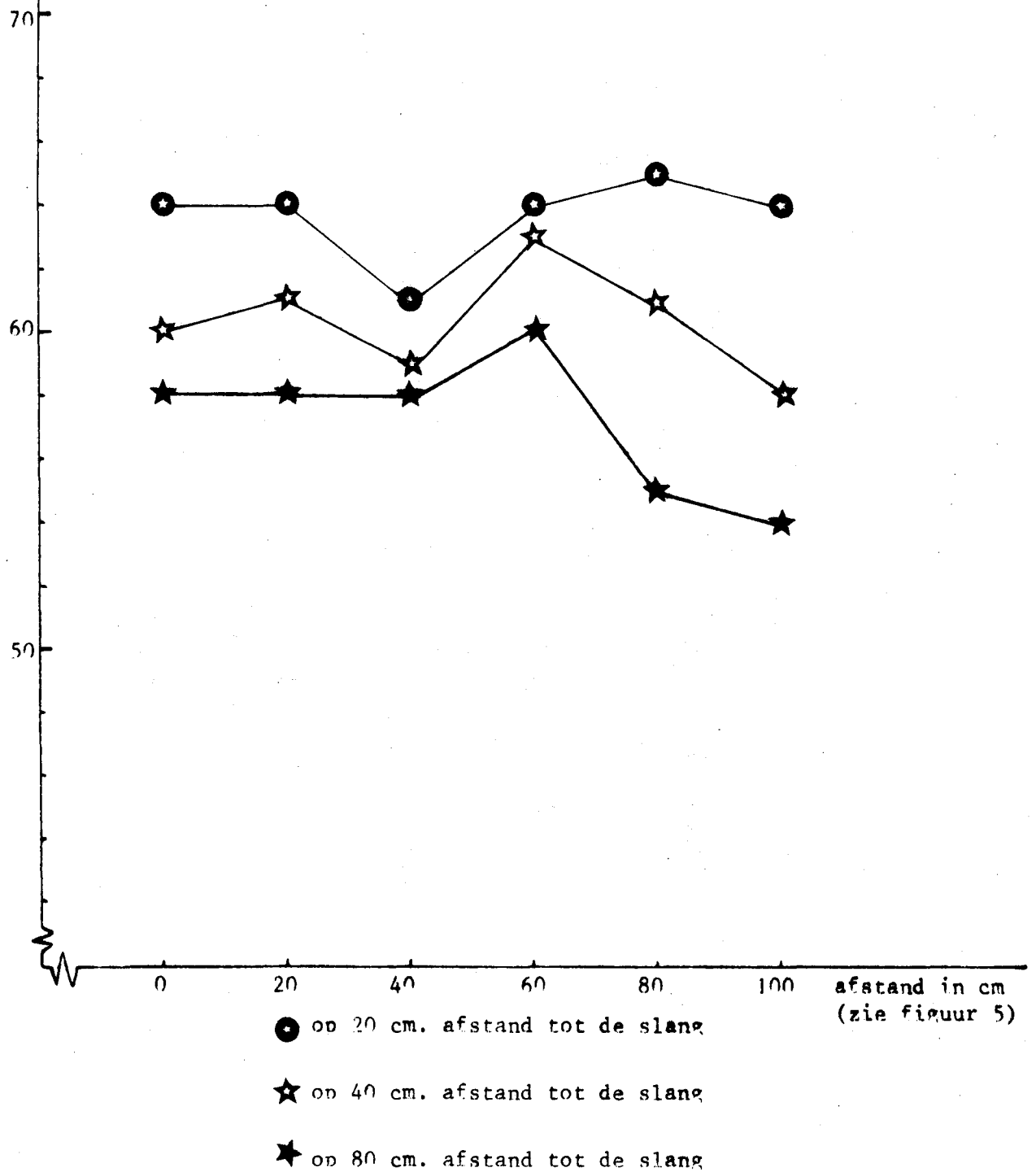
binnendiameter: 19 mm.; buitendiameter: 31,8 mm.;

bedrijfsdruk: 225 bar; basisdruk: 895 bar.

Figuur 4: enkele gegevens van de motor en de pomp in de aandrieffkamer, de gebruikte elektronische apparatuur en de "testslang".

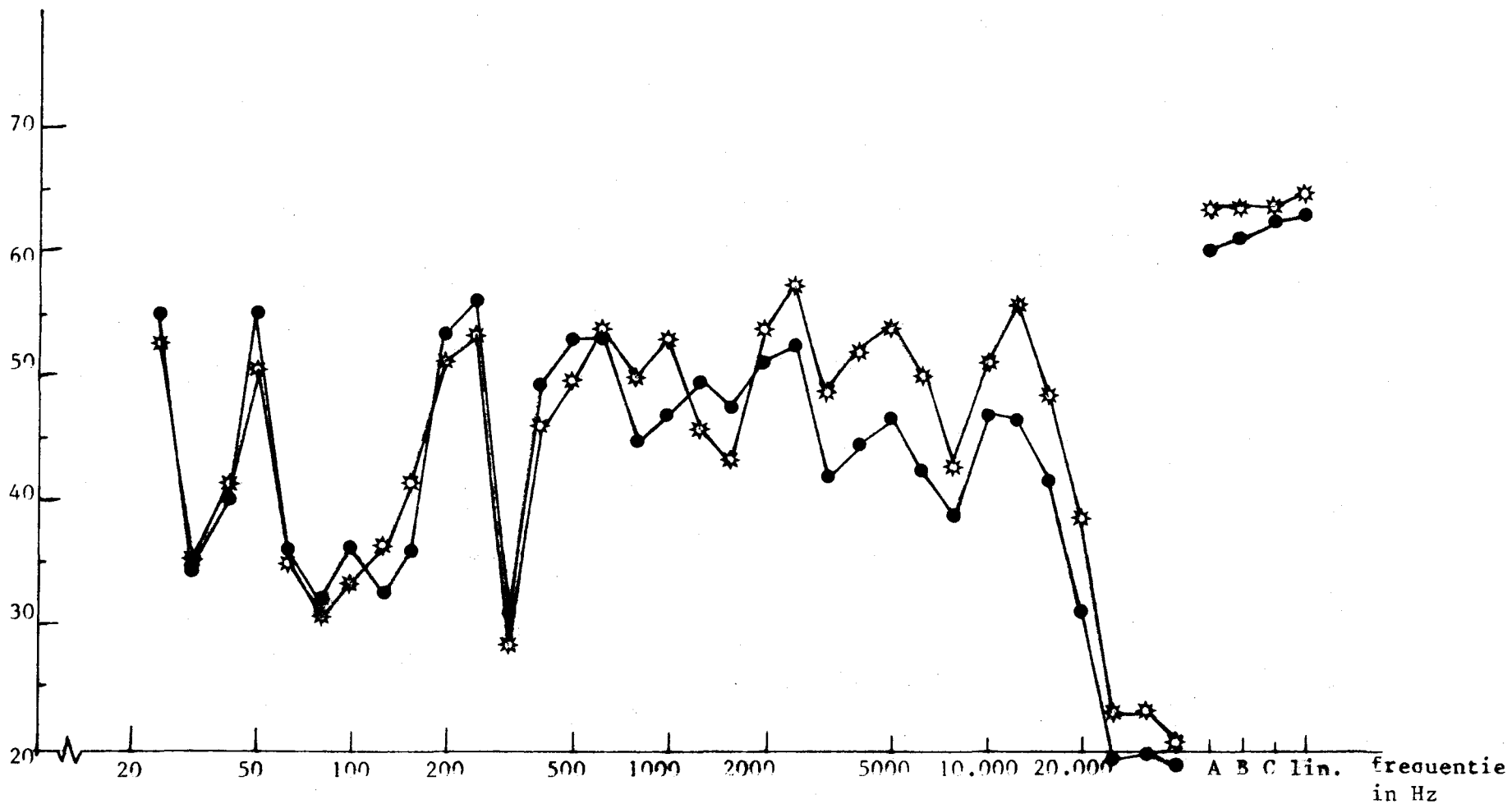
geluidsterkte
in dB(A)

- A5 -



Figuur 8: geluidsterkte als functie van de plaats van meting.

geluidsterkte in dB

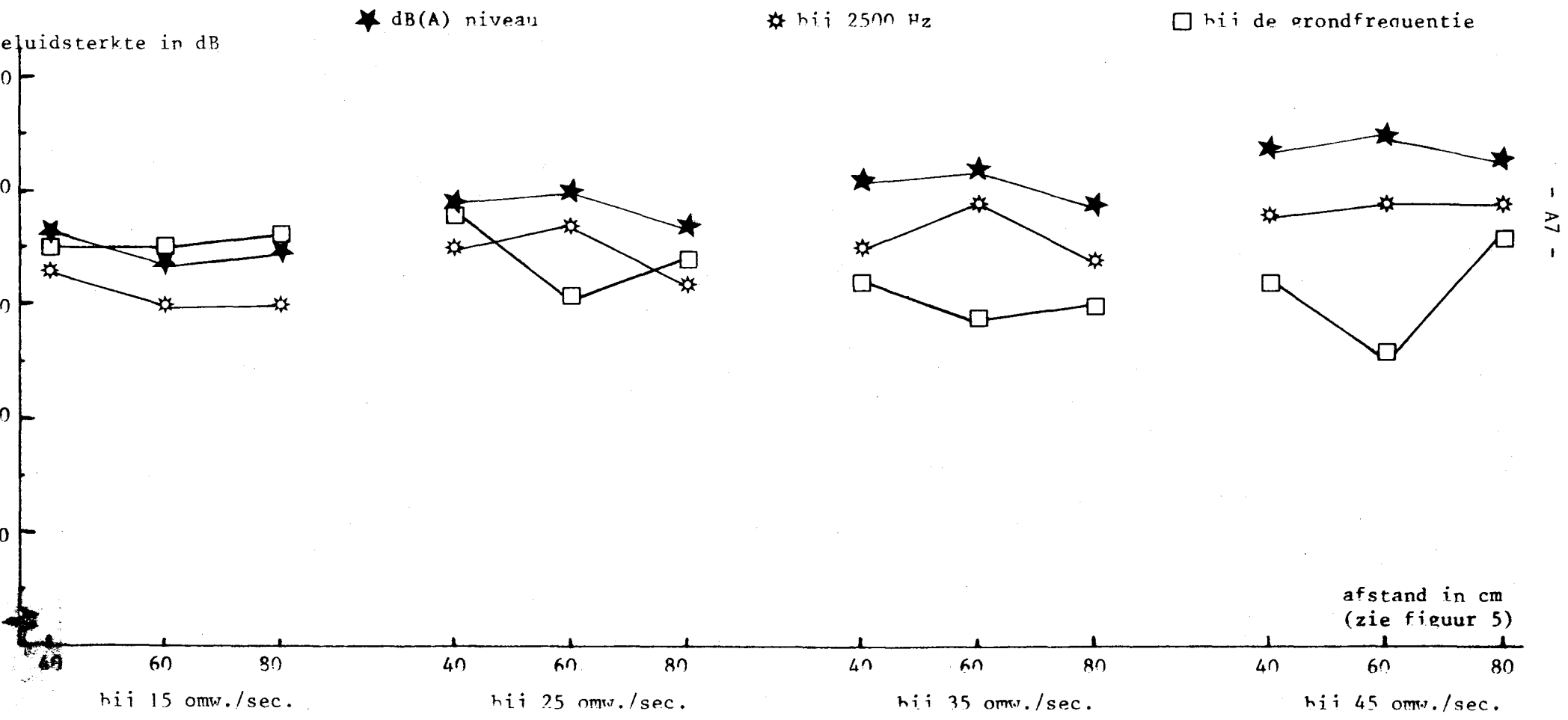


- A6 -

Figuur 9: frequentiekaracteristieken van de geluidsterkte bij respectievelijk

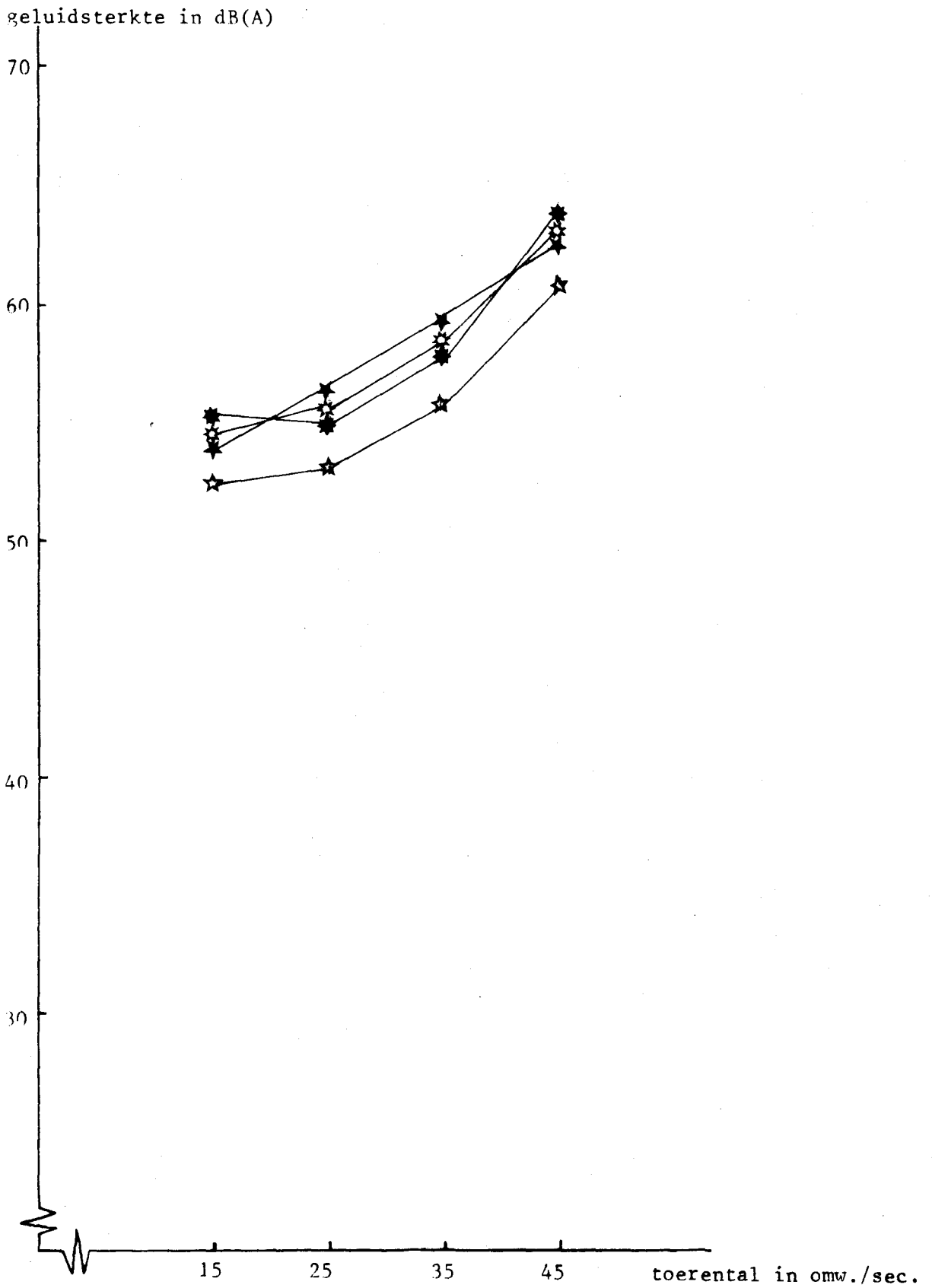
● 40 bar en

* 100 bar.

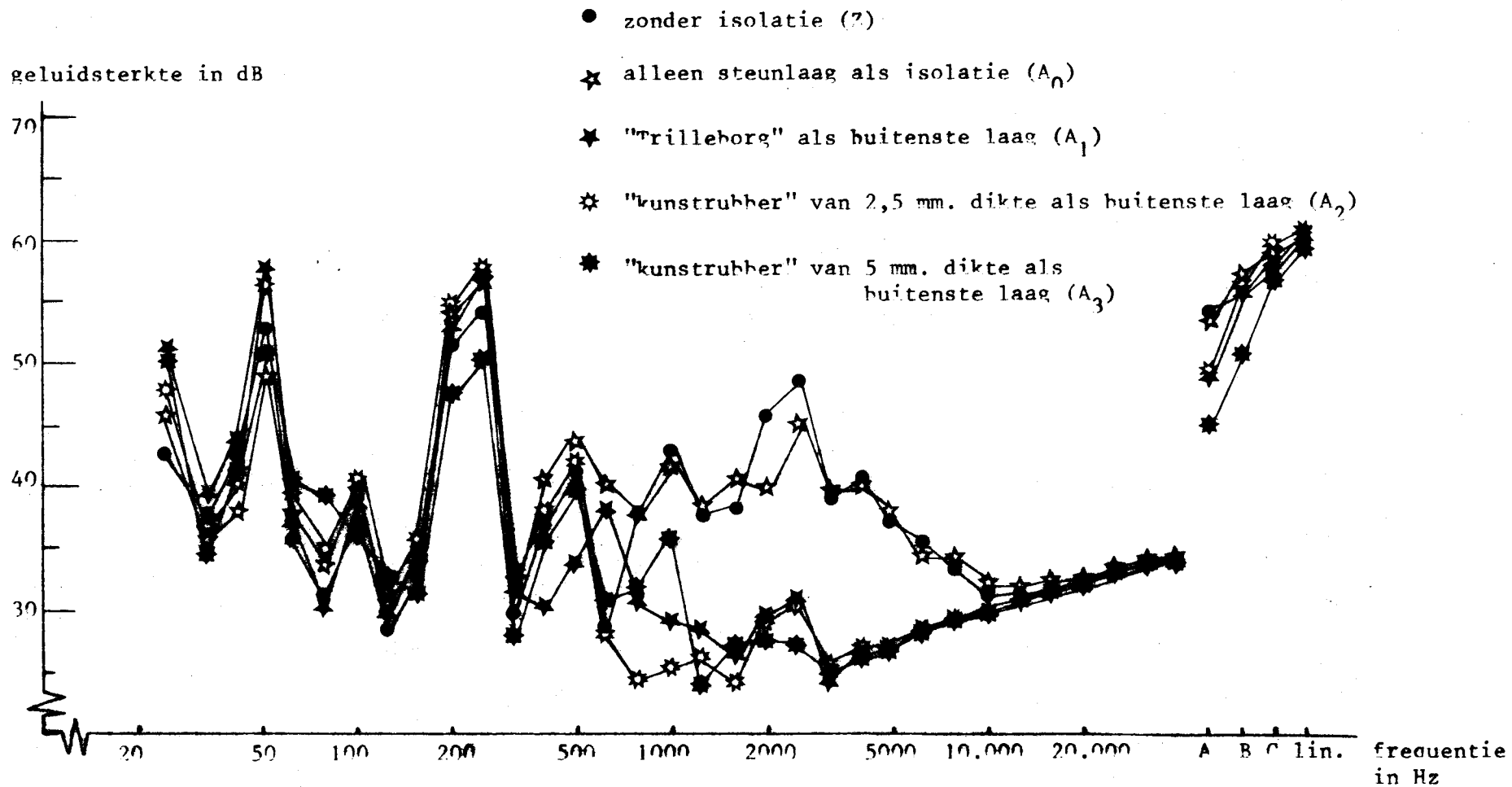


- A7 -

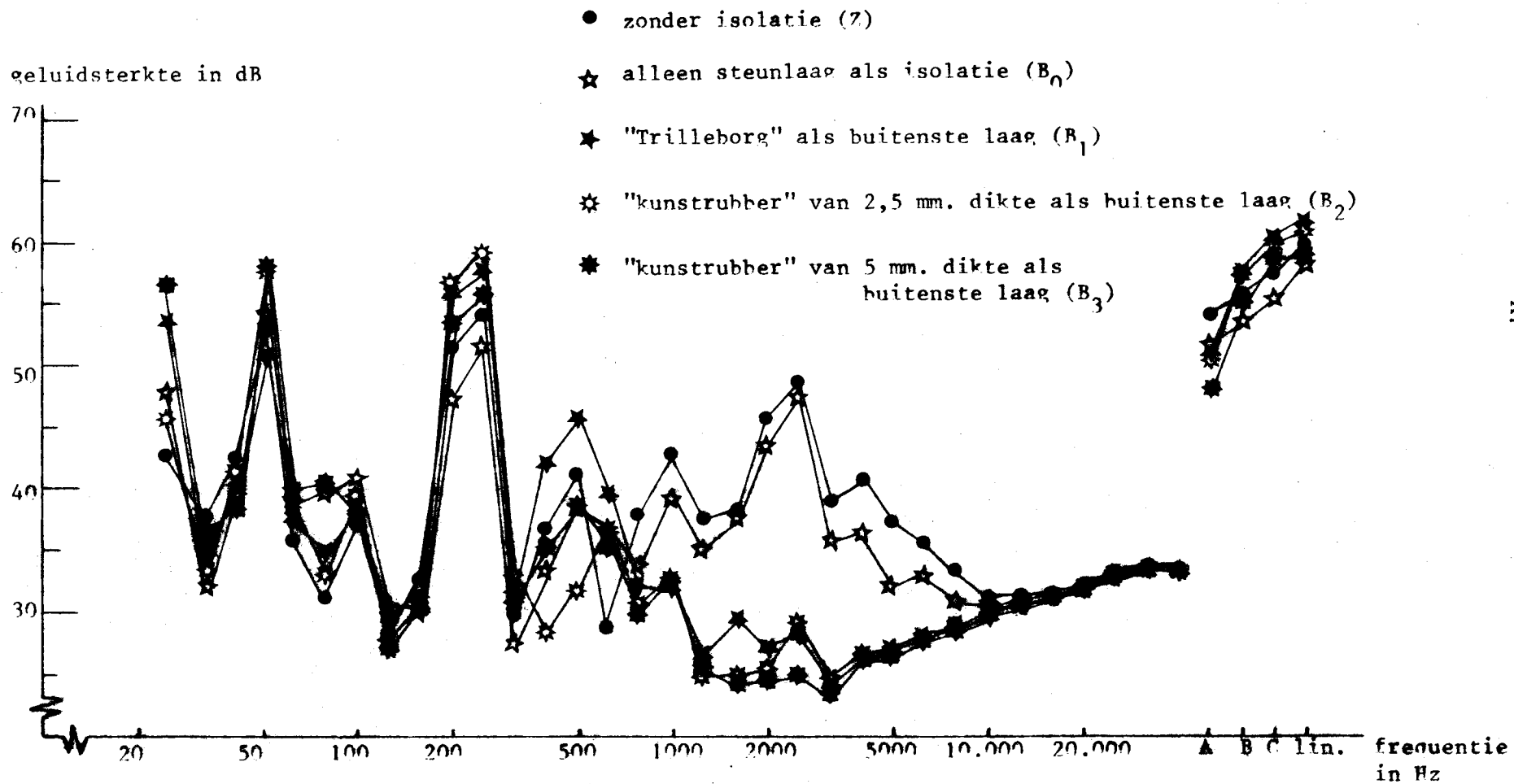
Figuur 10: geluidsterkte als functie van de plaats van de microfoon bij vier verschillende toerentallen.



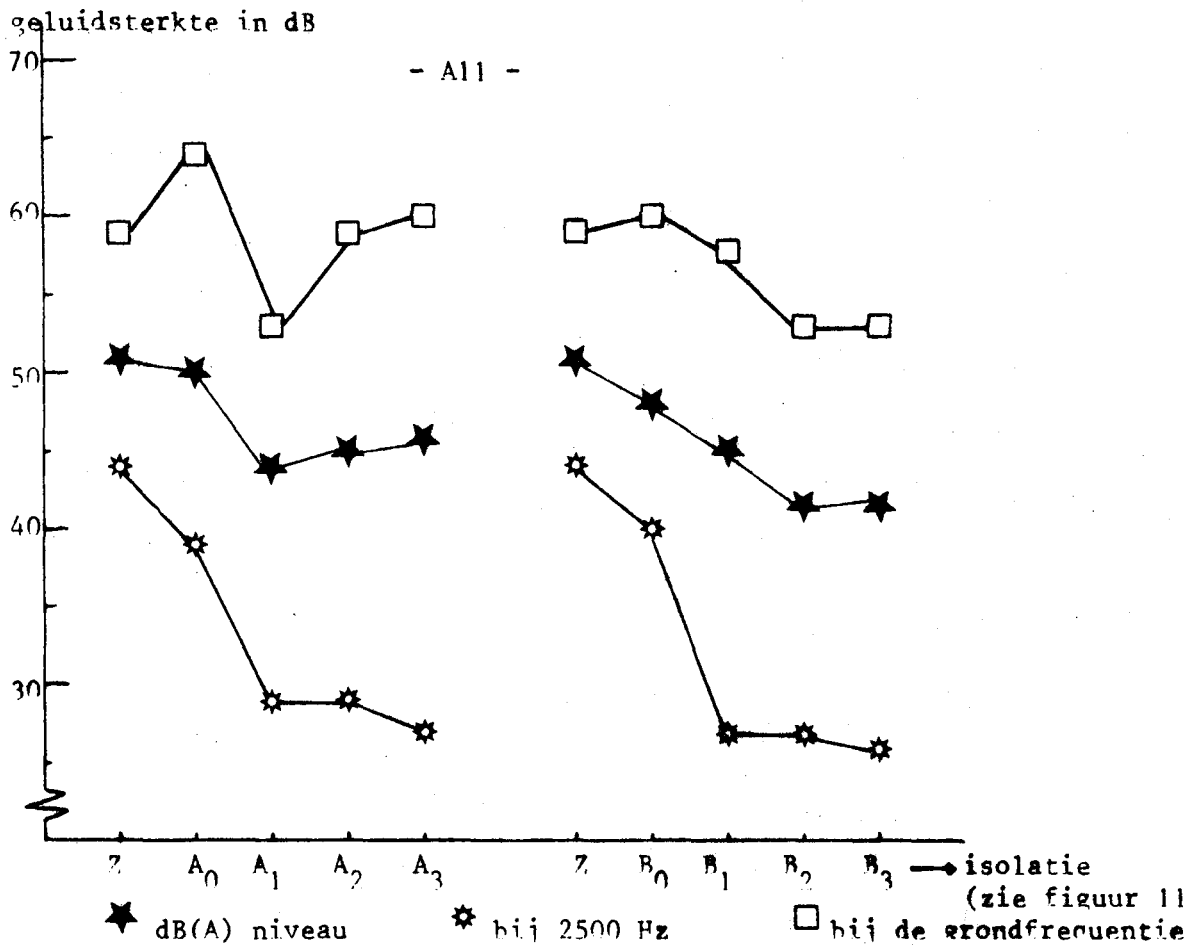
Figuur 11: geluidsterkte als functie van het toerental van de pomp bij een statische druk van respectievelijk
☆ 20 bar, ★ 40 bar, ✳ 60 bar en ✴ 80 bar.



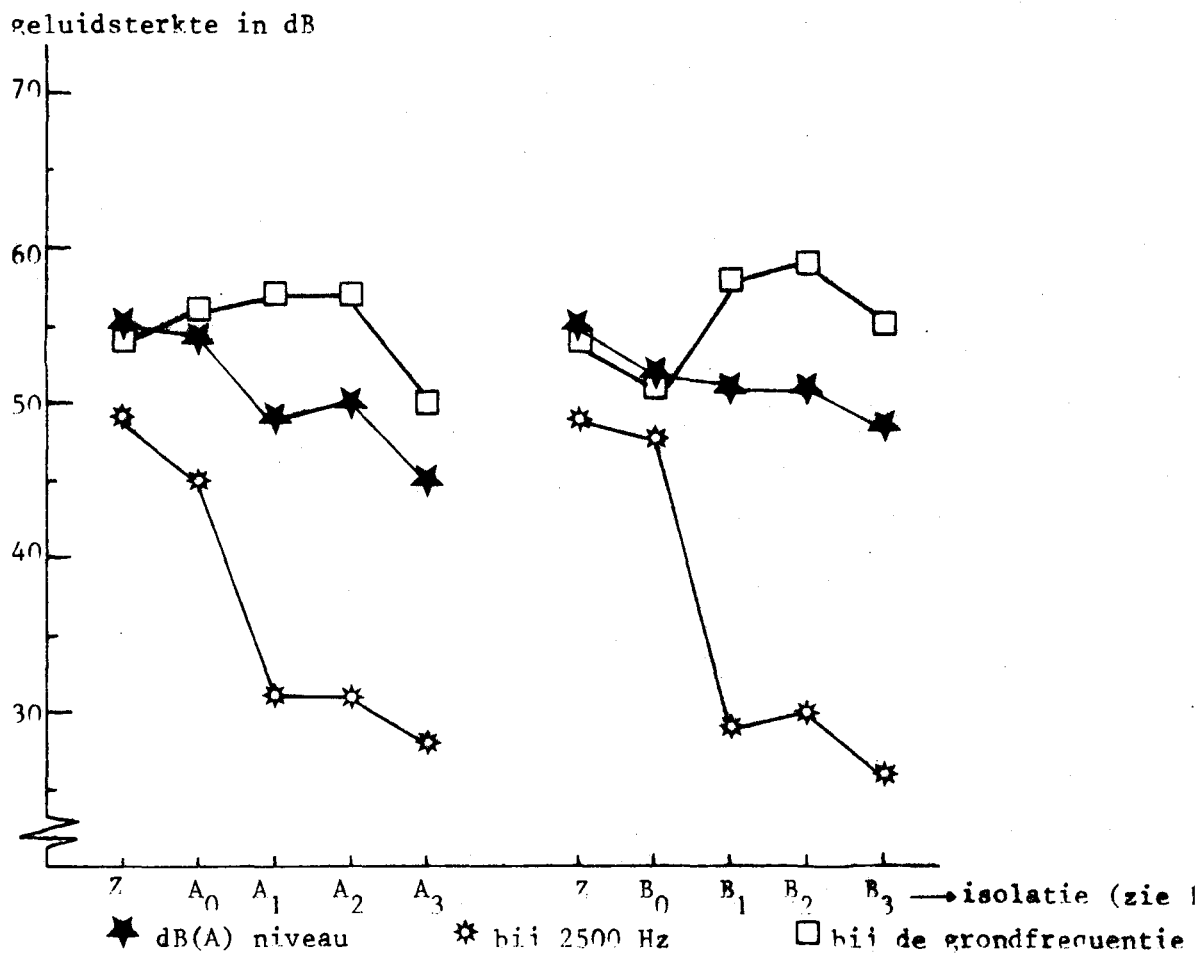
Figuur 12: frequentiekaracteristieken van de geluidsterkte bij verschillende isolatie om de slang (schuim van 20 kg/m^3 als steunlaag).



Figuur 13: frequentiekenarakteristieken van de geluidsterkte bij verschillende isolatie om de slang (schuim van 40 kg/m^3 als steunlaag).

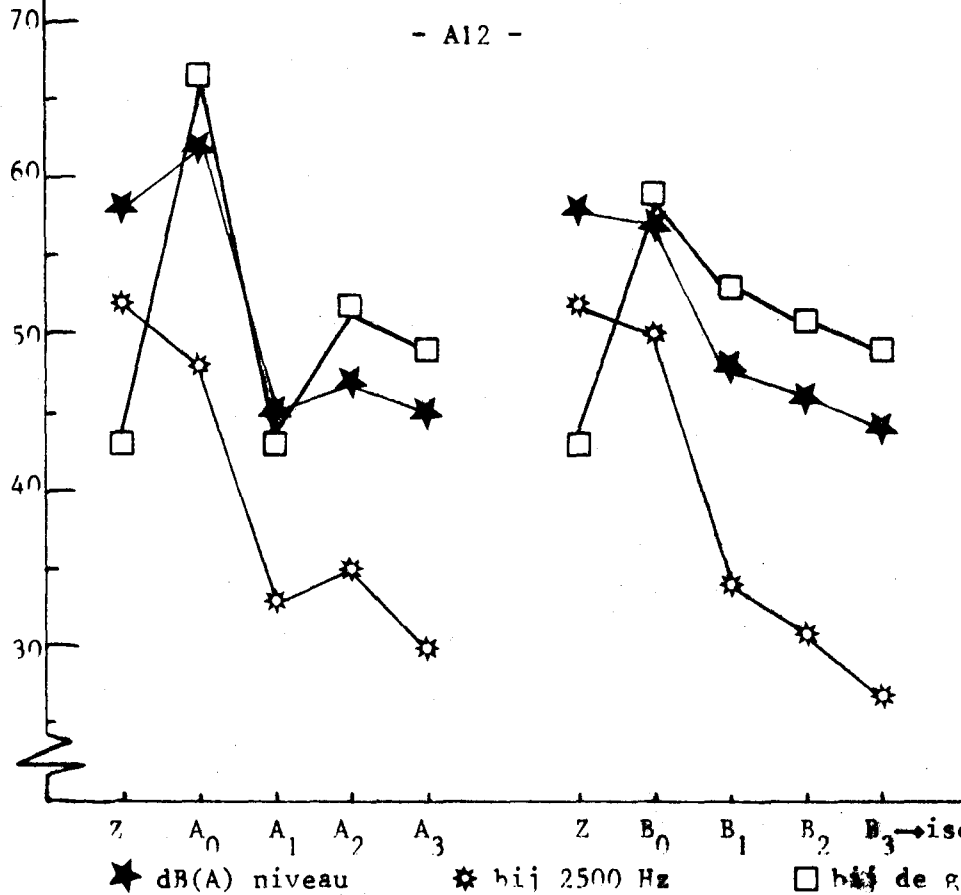


Figuur 14: geluidsterkte bij verschillende isolatie en bij een toerental van 15 omw./sec.



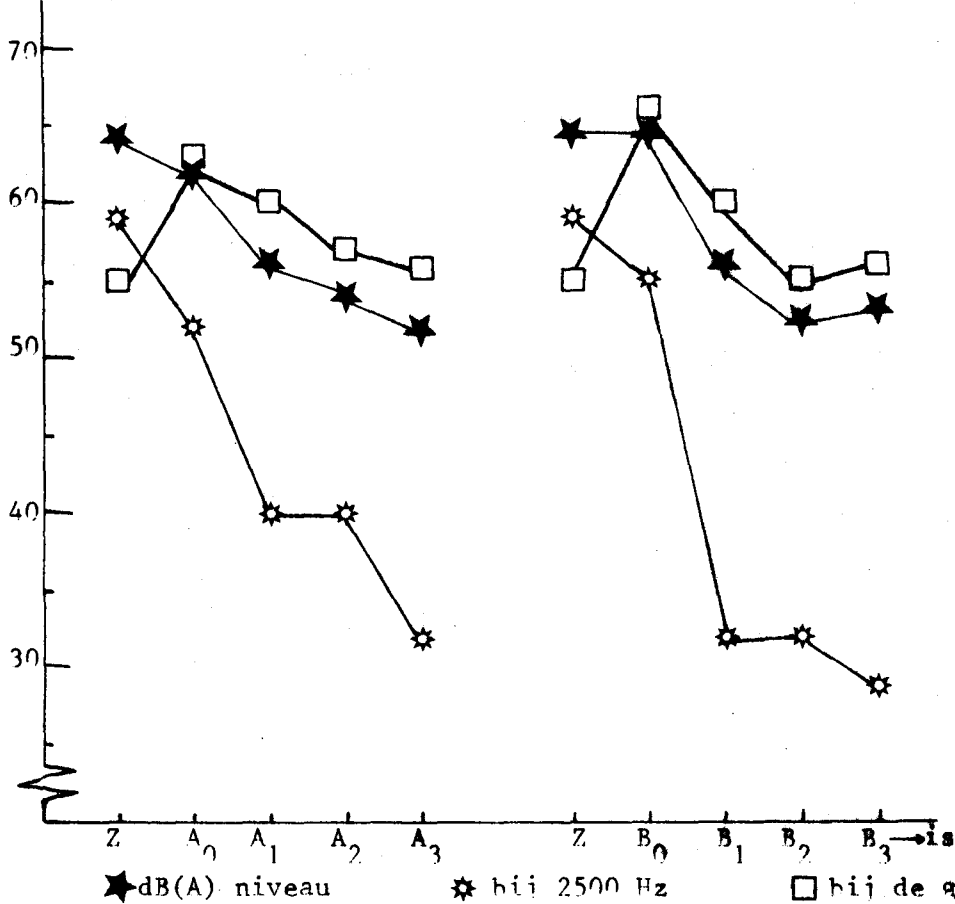
Figuur 15: geluidsterkte bij verschillende isolatie en bij een toerental van 25 omw./sec.

geluidsterkte in dB



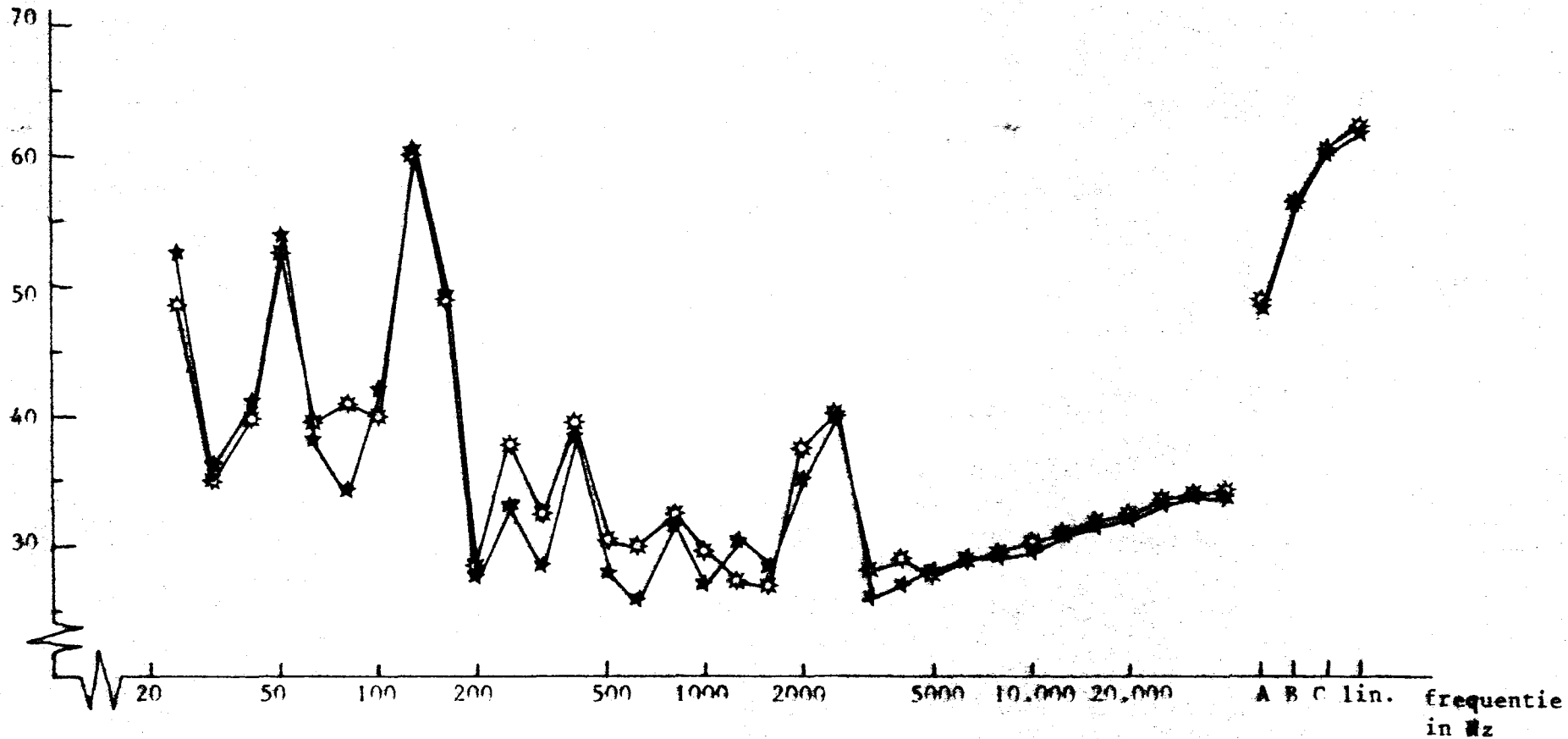
Figuur 16: geluidsterkte bij verschillende isolatie en bij een toerental van 35 omw./sec.

geluidsterkte in dB



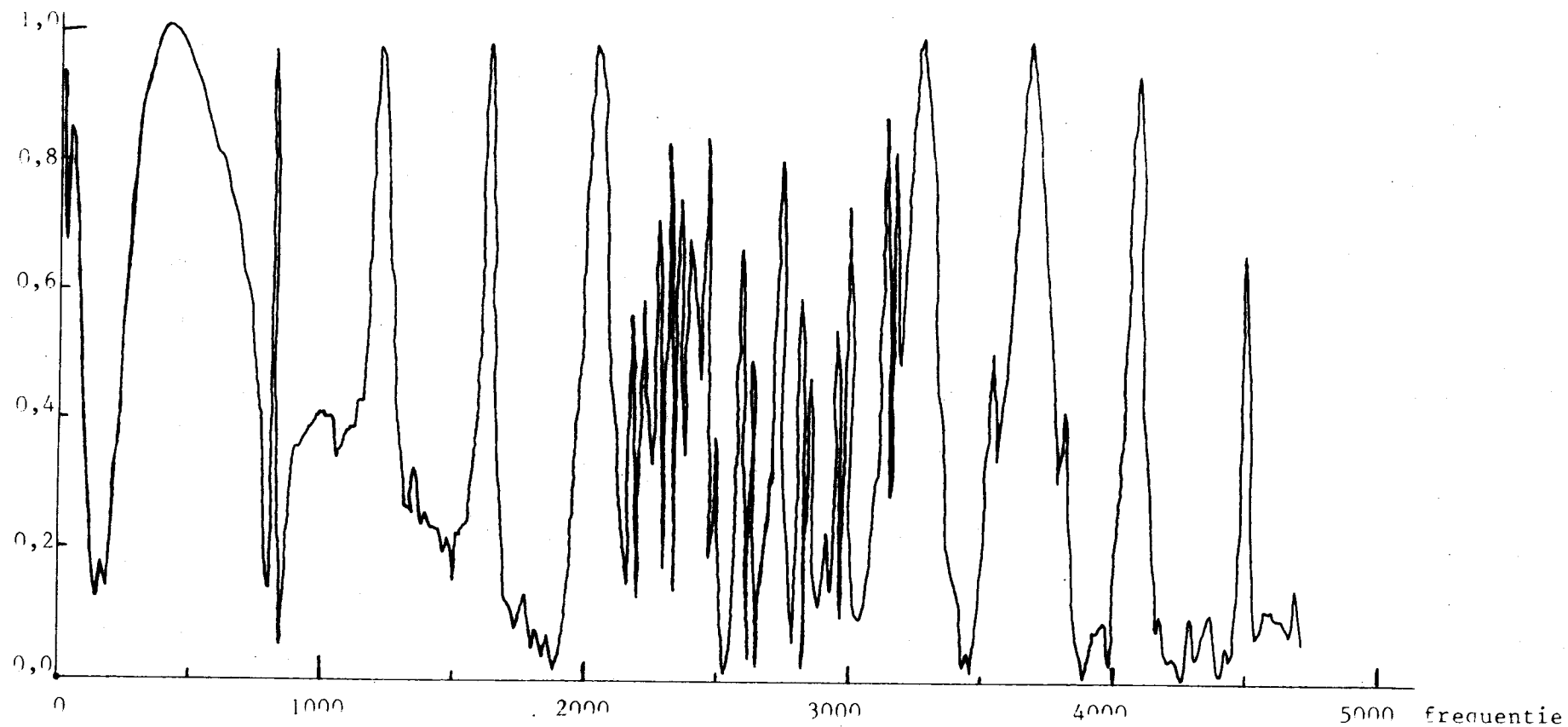
Figuur 17: geluidsterkte bij verschillende isolatie en bij een toerental van 45 omw./sec.

geluidsterkte in dB



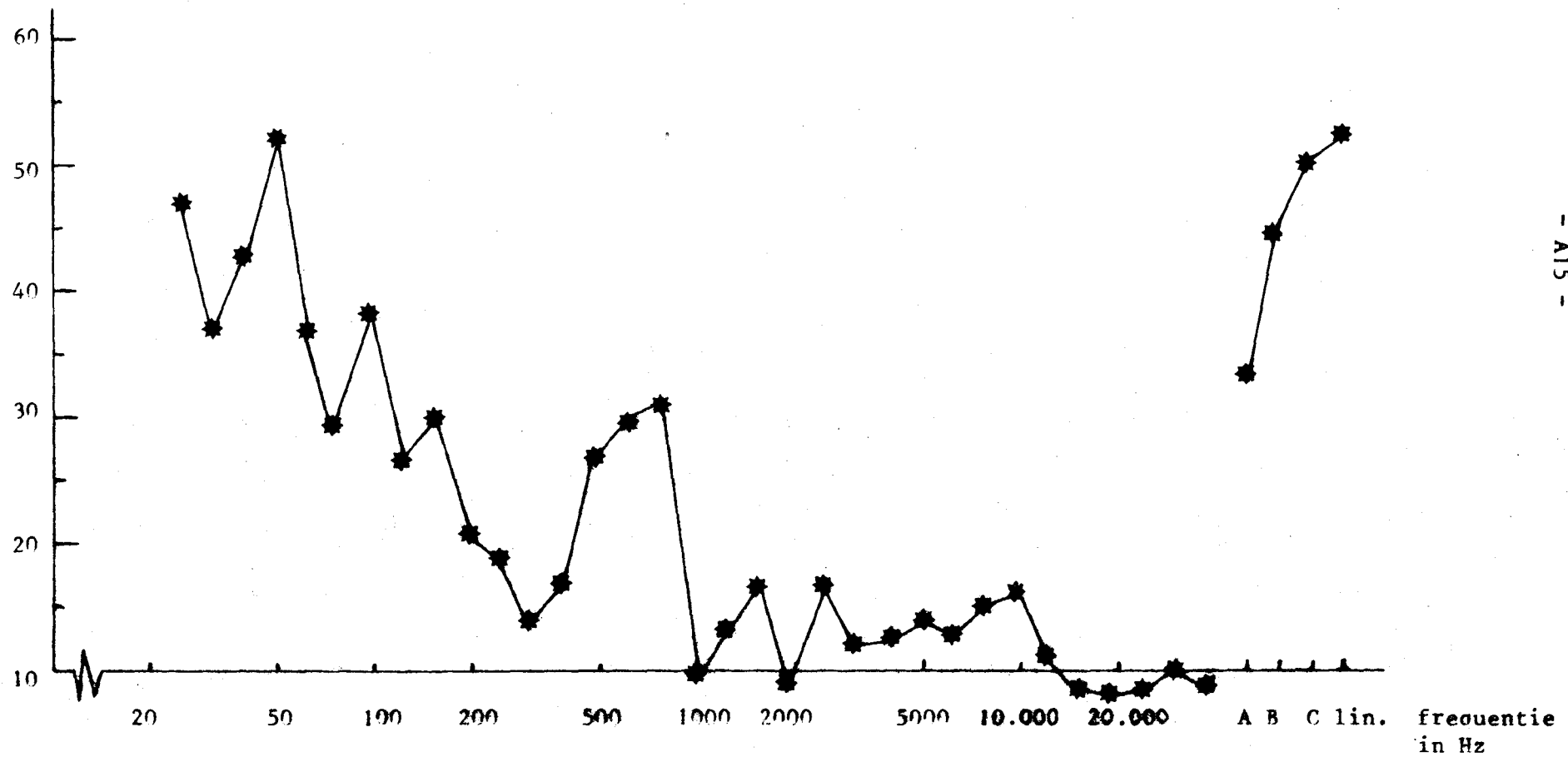
Figuur 19: twee frequentiekaracteristieken, gemaakt onder dezelfde omstandigheden, maar na opnieuw instellen van de plaats van de microfoon, de druk en het toerental.

coherentie



Figuur 20: coherentiefunctie van twee geluidsignalen (bij de afsluiter en midden boven de slang op 80 cm. daarvandaan).

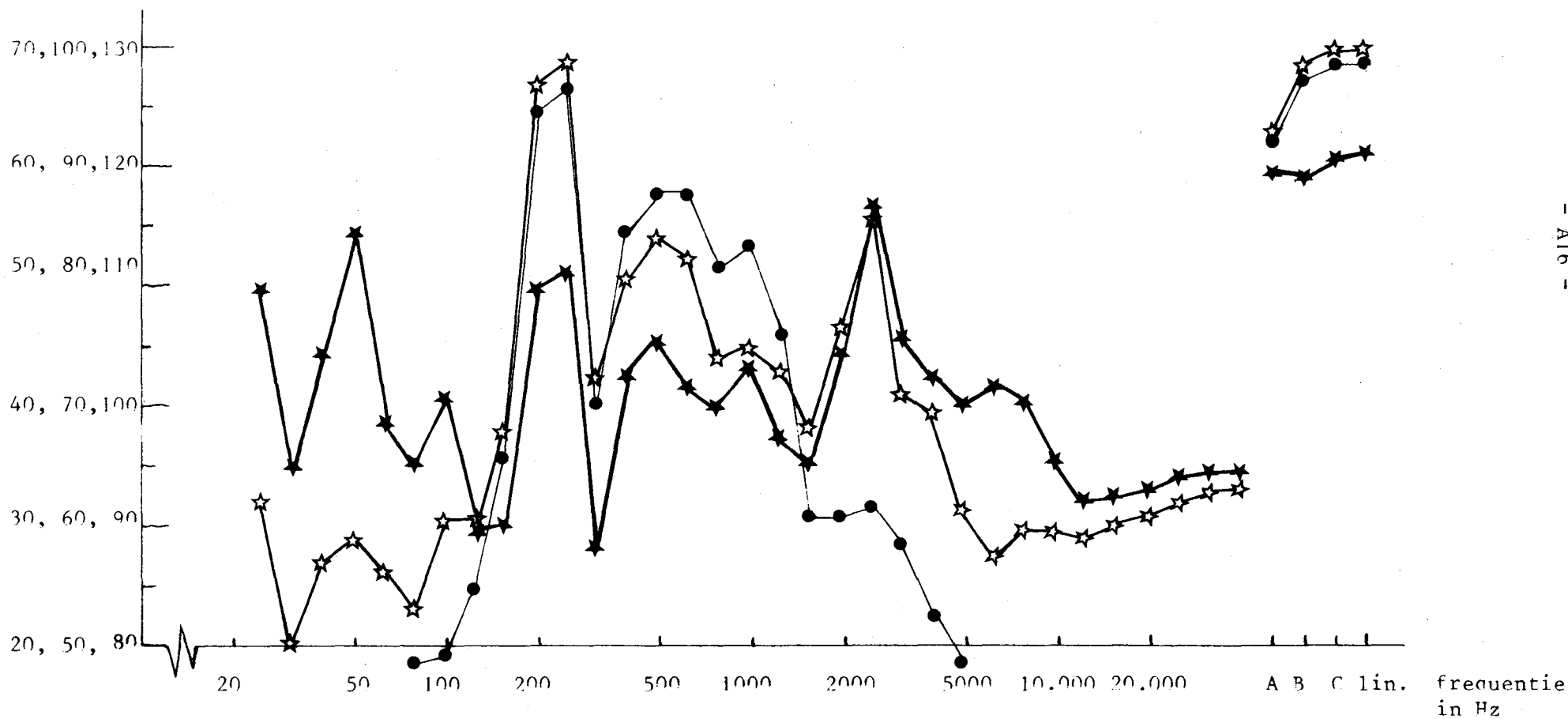
geluidsterkte in dB



- A15 -

Figuur 21: stoorniveau in meetruimte bij het in-bedrijf-zijn van twee hoge-druk-pompen in de kelder en een proefopstelling in het laboratorium.

★ ☆ ● in dB



Figuur 22: spectra van

★ het geluid,

☆ de dynamische druk en

● de trilling

onder dezelfde omstandigheden.