

## MASTER

### Bomen en geluid

van Overbeek, Michiel

*Award date:*  
1983

[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

#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

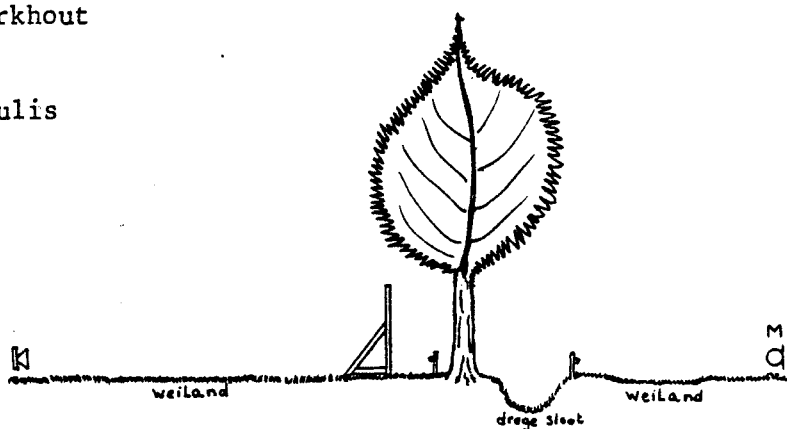
# BOMEN

en

# GELUID

Verslag van het afstudeerwerk van  
Michiel van Overbeek bij  
T.H.Delft Prof.dr.ir.A.J.Berkhout  
ir. L.Nijs  
T.H.Eindhoven Prof.dr.J.A.Poullis  
dr.J.A.Beun

jan. 1983



## Samenvatting

In dit onderzoek is de invloed van een boom op de geluidreducerende werking van een geluidscherm (of -wal) onderzocht.

Hiervoor zijn een meetmethode en een berekeningsmethode ontwikkeld.

Met de meetmethode wordt de geluidreduktie van een situatie waarin een (verplaatsbaar) scherm onder een boom staat, en de geluidreduktie van een, wat de bodem betreft, identieke situatie waarin het scherm alleen staat gemeten.

Het verschil van deze twee metingen is bepalend voor de invloed van de boom. Op deze manier zijn bij 6 solitair en één paar (2) bomen metingen verricht.

Met de berekeningsmethode kan, tot nu toe, de invloed van de verstrooiing van akoestische golven door maximaal 1000 blaadjes die in één vlak liggen op de geluidreducerende werking van een scherm berekend worden.

Ondanks deze beperking worden een aantal opvallende overeenkomsten tussen berekenings- en meetresultaten gevonden.

Uit het onderzoek blijkt dat bomen met een bladoppervlak kleiner dan  $5 \text{ cm}^2$  (sommige Wilgen en naaldbomen) geen invloed hebben op de situatie waarin één boom bij het scherm staat. Bomen met een bladoppervlak groter dan  $50 \text{ cm}^2$  hebben vooral op korte afstand achter het scherm (<50 m.) grote invloed op het geluidsnivo achter het scherm: door de aanwezigheid van een dergelijke boom kan het nivo tot meer dan 15 dB. in enkele tertsbanden tussen 250 Hz. en 4 kHz. verhoogd worden.

Deze verhoging wordt veroorzaakt door de verstrooiing van de akoestische golven door de bladeren (takken en stam hebben geen invloed).

## Lijst van gebruikte symbolen

a	: bladstraal (bij rechthoekige bladeren: de breedte)	(m.)
b	: afstand van luidspreker tot het scherm (ook: lengte v.h. blad)	(m.)
c	: de geluidsnelheid (340)	(m/s)
C(x)	: Fresnel integraal	(-)
d	: dempingsfactor	(dB./m.)
f	: frequentie	(1/s)
f <sub>b</sub>	: beginfrequentie	(1/s)
f <sub>e</sub>	: eindfrequentie	(1/s)
h, H	: hoogte	(m)
H <sub>s</sub>	: schermhoogte	(m)
h <sub>m</sub>	: mikrofoonhoogte	(m)
h <sub>b</sub>	: luidsprekerhoogte	(m)
I <sub>ab</sub>	: intensiteit van de door de bladeren geabsorbeerde golven	(kg/ms <sup>2</sup> )
I <sub>in</sub>	: intensiteit van de op de bladeren vallende golven	(kg/ms <sup>2</sup> )
I <sub>r</sub>	: intensiteit van de aan de bladeren gereflekteerde golven	(kg/ms <sup>2</sup> )
I <sub>t</sub>	: intensiteit van de doorgelaten golven	(kg/ms <sup>2</sup> )
J <sub>1</sub> (x)	: Besselfunctie van eerste orde en eerste soort	(-)
j	: imaginaire eenheid	(-)
k	: golfgetal	(1/m)
L	: geluidnivo	(dB.)
L <sub>o</sub>	: referentienivo	(dB.)
L <sub>b</sub>	: demping van situatie met boom t.o.v. een L <sub>o</sub>	(dB.)
L <sub>s</sub>	: demping van situatie zonder boom (alleen scherm)	(dB.)
L <sub>v</sub>	: het verschil L <sub>b</sub> -L <sub>s</sub>	(dB.)
L <sub>1</sub>	: nivo berekend zonder afstandsverschillen	(dB.)
L <sub>2</sub>	: nivo berekend zonder faseverschillen	(dB.)
L <sub>3</sub>	: geluidnivo fasegetrouw berekend	(dB.)
LAI	: de verhouding van het totale bladoppervlak van de hele boom en het oppervlak van de loodrechte projectie van de boomkroon op de grond.	
m	: afstand van de mikrofoon tot het scherm	(m.)
m <sup>l</sup>	: oppervlaktemassa van de bladeren	(kg/m <sup>2</sup> )
$\vec{n}$	: eenheidsvektor	(-)

$n_1, n_2$	: bladaantallen	(-)
$p$	: geluiddruk	(N/m <sup>2</sup> )
$p_A, p_p, p_m$	: geluiddruk in punt A etc.	(N/m <sup>2</sup> )
$p_o$	: geluiddruk op 1 m. afstand van de bron	(N/m <sup>2</sup> )
$p_{in}$	: geluiddruk van invallende golven	(N/m <sup>2</sup> )
$p_{blad}$	: geluiddruk ten gevolge van reflectie aan een blad	(N/m <sup>2</sup> )
$p_{scherm}$	: geluiddruk ten gevolge van afbuiging aan scherm	(N/m <sup>2</sup> )
$p_{tot.}$	: $p_{blad} + p_{scherm}$	(N/m <sup>2</sup> )
$\hat{p}$	: amplitude van druk	(N/m <sup>2</sup> )
$Q$	: drukreflectiecoëfficiënt	(-)
$R_b$	: vlakke-golf drukreflectiecoëfficiënt	(-)
$R$	: straal boomkroon (berekeningen)	(m.)
$r_1, r_2$	: afstanden	(m.)
$r_o$	: referentieafstand	(m.)
$S(x)$	: fresnelintegraal	(-)
$t$	: tijd	(s)
$T_s$	: sweeptijd	(s)
$x, y, z$	: coördinaten	(m)
$\alpha$	: reflectiecoëfficiënt $I_r/I_{in}$	(-)
$\phi$	: Fase geluiddruk	(-)
$\phi_p$	: een van de hoeken van uitval	(-)
$\delta_a$	: delta functie	
$\lambda$	: golflengte	(m.)
	in k.a. $\lambda$ : functie van $\phi_p, \theta_o$ en $\theta_p$	
$\Lambda$	: functie $\frac{J_1(x)}{x} . 2$	
$\rho$	: soortelijke massa lucht	(kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	: verstrooiingsdoorsnede bij loodrechte inval	(-)
$\sigma_{rand}$	: verstrooiingsdoorsnede bij alzijdige inval	
$\theta_p$	: hoek van uitval	
$\theta_o$	: hoek van inval	
$\tau$	: fase ten gevolge van bladstand (0° of 180°)	
$\nabla^2$	: Laplace operator	

## Inhoudsopgave

Samenvatting	
Lijst van symbolen	
Inleiding	1
1. Bomen en Geluid, een kort overzicht van de belangrijkste litteratuur	2
2. Berekeningsmethode	
2.1 Inleiding	7
2.2 Reflectie en diffractie	10
2.2.1 De benaderingsmethode	10
2.2.2 De oplossing van de Huygens-2 integraal bij schuine inval	13
2.3 De invloed van de eindige massa	14
2.4 De berekeningen aan de bladeren	
2.4.1 Bladpositie en bladstand	16
2.4.2 De rotaties	17
2.5 Het scherm	18
2.6 De bodemdemping	19
2.7 De berekende druk in M	20
3. Berekeningsresultaten	22
3.1 Een blad	
3.1.1 De invloed van de bladgrootte	22
3.1.2 De invloed van de bladvorm	24
3.1.3 De invloed van de bladmassa	25
3.1.4 De bladstand	26
3.2 Meerdere blaadjes	29
3.2.1 25 blaadjes	
3.2.1.1 H=4m., R=1.2 m., horizontaal	30
3.2.1.2 H=4m., R=4m., horizontaal	31
3.2.1.3 H=8m., R=1.2 m., horizontaal	32
3.2.1.4 H=4m., R=1.2m en R=4m., willekeurige bladstand	33
3.2.1.5 H=2m., 4m., 8m., R=1.2 m., willekeurige bladstand	34
3.2.2 Vele blaadjes	
3.2.2.1 horizontale blaadjes	35
3.2.2.2 willekeurige bladstand	37
3.2.2.3 conclusie paragraaf 3.2	38
3.3 Boom, bodem en scherm	39
4. Meetopstelling en meetmethode	
4.1 Inleiding	42
4.2 De opstellingen met het scherm	43

4.3 Bronsignaal en signaalverwerking	45
4.4 De boom- en boomsoortvariabelen	46
5. Meetresultaten	
5.1 Het signaal-ruisnivo	48
5.2 Meteorologische omstandigheden	48
5.3 Reproduceerbaarheid	49
5.4 De meetsituaties en meetresultaten	52
5.4.1 De Linden	53
5.4.2 De Eik (Knegsel)	56
5.4.3 De Els	59
5.4.4 De Eik (Heeze)	62
5.4.5 De Wilg	64
5.4.6 De Berk	66
5.4.7 De Den	69
5.5 Conclusie meetresultaten	72
6. Vergelijking tussen meetresultaten en berekenings resultaten	74
7. Conclusie en aanbevelingen voor verder onderzoek	
7.1 Conclusie	77
7.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek	80
Litteratuur	81

## INLEIDING

In de zomer van 1979 kreeg de Fysika Winkel Eindhoven een aanvraag over de effectiviteit van een met bomen omzoomde geluidwal rond een zwembad in de gemeente Someren. De geluidreductie van de wal leek erg klein omdat het zwembadlawaai goed te horen was achter de wal. Na metingen bleek de geluidreductie in de zomer aanzienlijk kleiner te zijn dan in de winter. Het vermoeden rees dat door de verstrooiing van het geluid aan de bladeren van de bomen (Amerikaanse Eiken, bomen met relatief erg grote bladeren) de geluidreductie van de situatie afnam.

In de literatuur is niet veel over de verstrooiing van akoestische golven aan boombladeren te vinden. (In hoofdstuk 1 vindt u een kort overzicht van de belangrijkste literatuur op dit gebied). De meeste onderzoekers die zich hebben beziggehouden met bomen en geluid hebben geprobeerd de absorptie van akoestische golven aan bladeren of de demping per afstandseenheid van een bos te meten. Ook is er onderzoek gedaan naar de verstrooiing door boomstammen. Er zijn in de literatuur enkele aanwijzingen dat verstrooiing aan boombladeren van invloed zou kunnen zijn op de geluidreductie van een wal of scherm.

Mede als gevolg van de Wet Geluidhinder verschijnen juist nu op veel plaatsen geluidschermen en-wallen. Omdat begroeiing van invloed kan zijn op de effectiviteit van een scherm of wal, is het belangrijk dat de verstrooiing (reflektie en diffractie) van akoestische golven aan bladeren wordt onderzocht.

Dit onderzoek naar de verstrooiing aan boombladeren bestaat uit drie delen:

- 1) Het ontwikkelen van een rekenmethode voor de absorptie, reflectie en diffractie van akoestische golven aan boombladeren en hele bomen.
- 2) Het ontwikkelen van een meettechniek waarmee de invloed van bomen op akoestische golven vastgesteld kan worden.
- 3) Het meten van de geluidoverdracht bij een groot aantal bomen.

In hoofdstuk 2 staat het eerste deel beschreven. In hoofdstuk 3 staan enkele resultaten van berekeningen uitgevoerd met de rekenmethode op een kleine computer.

In hoofdstuk 4 staat het tweede deel, de meettechniek, beschreven. Een groot deel van het ontwikkelen van de meettechniek (waaronder schaalmodelmetingen) is gebeurd in het laatste onderzoek van mijn kandidaatsstudie. De resultaten van 7 metingen aan 6 verschillende boomsoorten staan beschreven in hoofdstuk 5.



1. Bomen en Geluid, een kort overzicht van de belangrijkste literatuur op het gebied van verstrooiing aan boombladeren

In "Geluiddemping door bossen", een ICG rapport uit 1975 (litt.12) staat het resultaat van een literatuuronderzoek naar het effect van bossen, bomen en boombladeren op de voortplanting van akoestische golven. Er zijn vrij veel onderzoeksresultaten (ook van latere datum) op dit gebied bekend.

Omdat in dit onderzoek wordt ingegaan op de verstrooiing van akoestische golven door boombladeren, heb ik mij in dit literatuuroverzicht beperkt tot de literatuur die betrekking heeft op de verstrooiing en absorptie door boombladeren.

In 1946 publiceerde Eyring (1) de resultaten van akoestische experimenten in de wouden van Panama. Bij dit onderzoek en ook bij enkele van latere datum (o.a. litt. 2,3 en 5), werd de extra demping  $d$  (in dB/m.) in zomer en winter gemeten. Deze extra demping is het verschil tussen het gemeten geluidnivo en het geluidnivo wat uit de " $1/r$ " wet zou volgen. Deze demping blijkt vaak evenredig met de afstand tussen de meetpunten. De gemeten geluidnivo's worden dan beschreven met:

$$L=L_0-20.\log(r/r_0)-d.(r-r_0)$$

waarin:  $L$  het op  $r$  (m.) meter van de bron gemeten geluid(druk)nivo in dB.

$L_0$  het op referentieafstand  $r_0$  meter gemeten geluid(druk)nivo in dB.

$d$  de dempingsfactor (dB/m.)

Bij 1 kHz. vinden de verschillende auteurs waarden van  $d$  uiteenlopend van 0.03 en 0.27 dB/m.. Over de invloed van onder andere de bodem en de dichtheid van de begroeiing verschillen zij van mening.

Börner (3) heeft oök de reflektie aan een bosrand onderzocht en vindt in bepaalde situaties een nivoverhoging (tot maximaal ongeveer 8dB.) ten gevolge van deze reflectie. In figuur 1 staat een situatie waarin een dergelijke bosrandreflectie van invloed kan zijn. Geluidgolven die op een bosrand vallen zullen gedeeltelijk geabsorbeerd, gedeeltelijk gereflekterd en gedeeltelijk doorge-

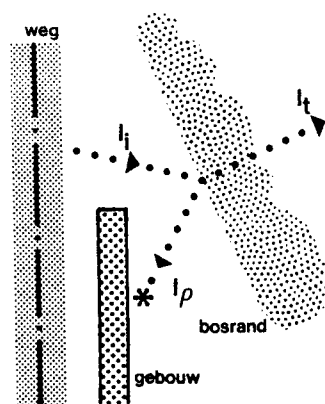


FIG.1 (uit litt.12)  
Het effect van de afscherming door het gebouw wordt voor een deel teniet gedaan door reflecties via de bosrand.

laten worden. Uit de experimenten van Börner blijkt dat de reflectie niet verwaarloosbaar klein is.

Er zijn ook experimenten op laboratorium schaal bekend: Beck (4) behangt in een reflectie-vrije ruimte een net met (echte) bladeren, zodanig dat steeds 80% van het net-oppervlak afgedekt is.

Aan een kant werd dit net bestraald met geluid en aan de andere kant werd het nivo, vóór en ná het aanbrengen van het bladerscherm, gemeten. De nivodaling voor bladeren van verschillende afmetingen staan weergegeven in figuur 2.

Het totale bladoppervlak van de op het net aangebrachte bladeren is bij elke bladsoort even groot (80% van het net-oppervlak). Omdat de oppervlaktemassa  $m^1$  van de bladeren van de loofbomen niet veel verschilt, zal het verschil in afname van de gemeten transmissie bij de verschillende bladeren verband houden met de bladgrootte.

Voor het net van Beck geldt:

$$I_{in} = I_{ab} + I_r + I_t \dots \dots \dots (1)$$

waarin:  $I_{in}$  de intensiteit van de op de bladeren vallende (vlak veronderstelde) akoestiese golven ( $kg/ms^2$ )

$I_{ab}$  de intensiteit van de door de bladeren geabsorbeerde golven

$I_r$  de intensiteit van de aan de bladeren gereflekteerde golven

$I_t$  de intensiteit van de doorgelaten golven.

Een nivodaling van (bijvoorbeeld) 5 dB. in figuur 2 betekent dat

$$10 \cdot \log\left(\frac{I_t}{I_{in}}\right) = -5dB.$$

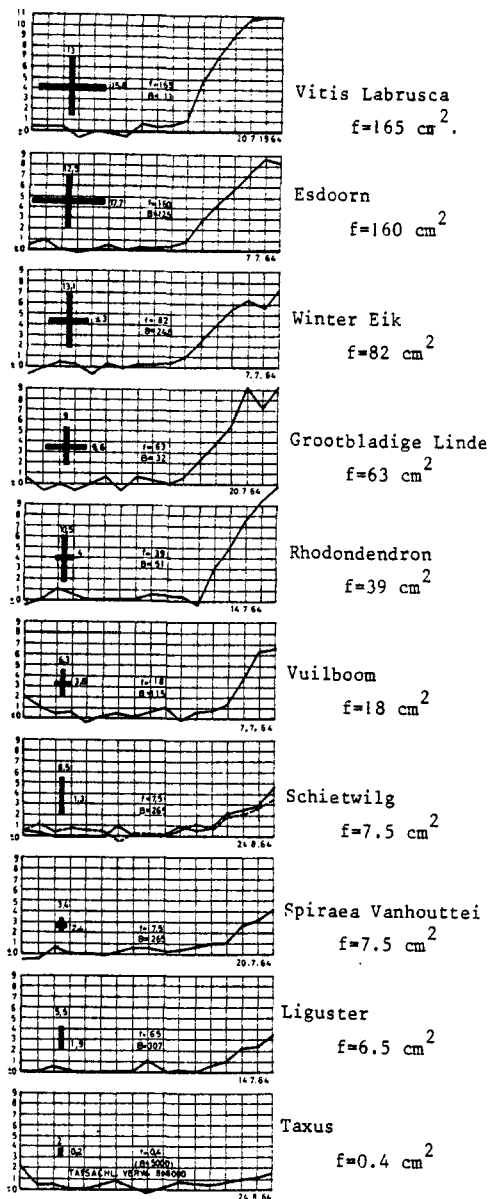


FIG.2 De nivodaling na het aanbrengen van het bladerscherm op het net; f is de bladgrootte.

zodat  $I_t \sim 0.3 \times I_{in}$ , en dus  $I_{ab} + I_r \sim 0.7 \times I_{in}$  .....(2)

Martens (10) heeft de absorptiecoëfficiënt  $\alpha$  van onder andere berkebladen (oppervlakte een blad  $\sim 25\text{cm}^2$ ) onderzocht; hij vindt:

$$\alpha = \frac{I_{ab}}{I_{in}} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ .....(3)}$$

$\alpha$  blijkt vrijwel onafhankelijk van de frequentie te zijn (fig.3).

Bladeren van de door Beck onderzochte Vuilboom (fig.2) zijn qua grootte en gewicht vergelijkbaar met Berkebladeren. Combinatie van (2) en (3) impliceert dat de door Beck gemeten nivoverlaging van de doorgelaten golven wordt veroorzaakt door reflectie aan de bladeren.

In de figuren 3 en 4 staan enkele resultaten van de metingen van Martens (10).

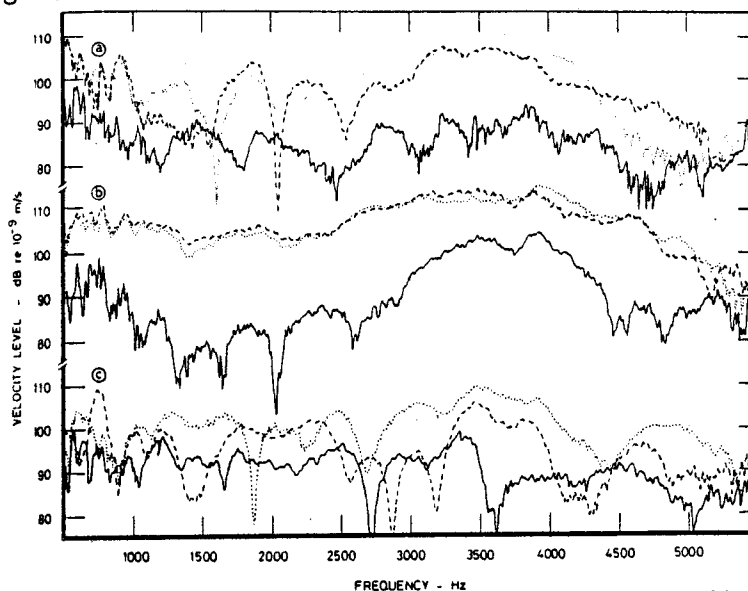


FIG. 3 De trillingssnelheden van een Berkeblad wat bestraald wordt met geluid met een geluiddrukknivo van 100 dB.

(a): Op de top van het blad, (b) in het midden van het blad  
(c): aan de rand. De hoek van de golven met het blad is  $90^\circ$  bij de stippellijn;  $45^\circ$  bij de gestreepte lijn en  $0^\circ$  bij de getrokken lijn.

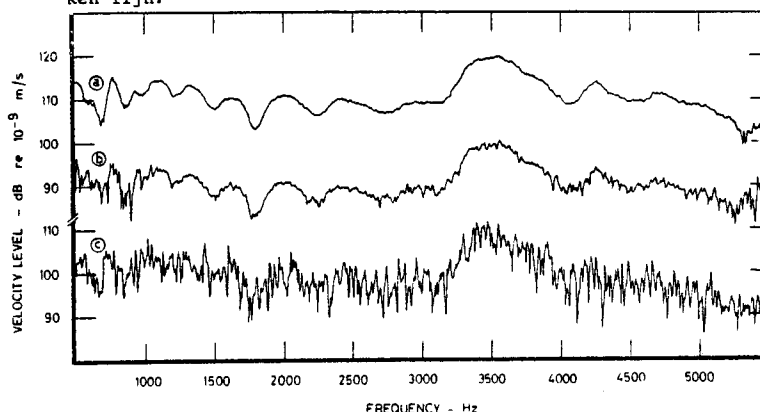


FIG. 4 De trillingssnelheden bij verschillende geluiddrukknivo's.

(a): geluiddrukknivo is 100dB.; (b): 80 dB. en (c) witte ruis van ongeveer 90 dB. .

Het geluidssnelheidsnivo (re  $10^{-9}$  m/s.) van geluidgolven is (specifieke akoestiese impedantie van lucht  $415 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .) ongeveer 134 dB. als het geluiddrukknivo 100 dB. is.

Ook heeft Martens (9) de geluidnivo-verandering gemeten na het plaatsen van een aantal bomen tussen mikrofoon en luidspreker in de reflektievrije ruimte. Ook hier is de verstrooiing aan de boombladeren een mogelijke oorzaak van de nivoverlaging en houdt de grootte van de verstrooiing verband met de bladgrootte:

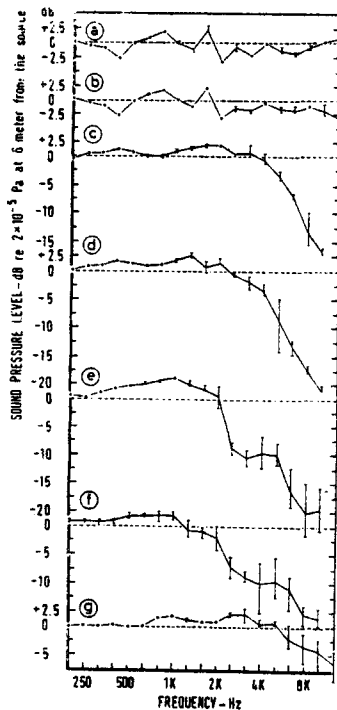


FIG.5 De door Martens gemeten nivoveranderingen  
Voor uitleg: zie tekst. (Uit litt. (9)).

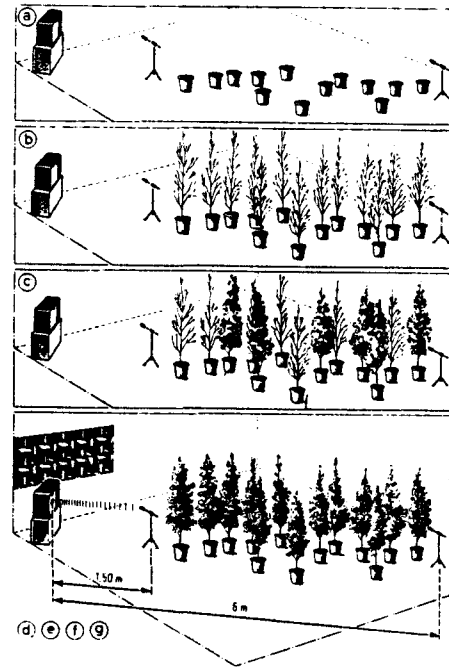


FIG.6 De meetsituaties in de reflektievrije ruimte.

De bloempotten (fig.5a) en stam, takken en twijgjes (fig.5b) hebben een verwaarloosbare invloed op de nivoverandering.

In de figuren 5c en 5d staan de nivoveranderingen bij respectievelijk 23 en 46 berkeboompjes met blad (bladoppervlak ongeveer  $20 \text{ cm}^2$ ). Figuur 5e geeft de nivoverandering bij 46 hazelaars (bladoppervlak ongeveer  $200 \text{ cm}^2$ ). Figuur 5g geeft de verandering na het plaatsen van 46 ligusterstruikjes (lancetvormige bladeren met bladoppervlak ongeveer  $5 \text{ cm}^2$ ). In deze figuren is te zien dat na het plaatsen van het boompje de nivoverlaging toeneemt naarmate de bladgrootte toeneemt.

Bullen en Fricke (11) meten in Centennial Park te Sydney de verstrooiing van akoestische golven met een frequentie van 1 kHz. aan 3 solitaire (alleenstaande bomen): twee palmen en een vijgeboom. Zij vinden dat het geluidnivo van de ver-

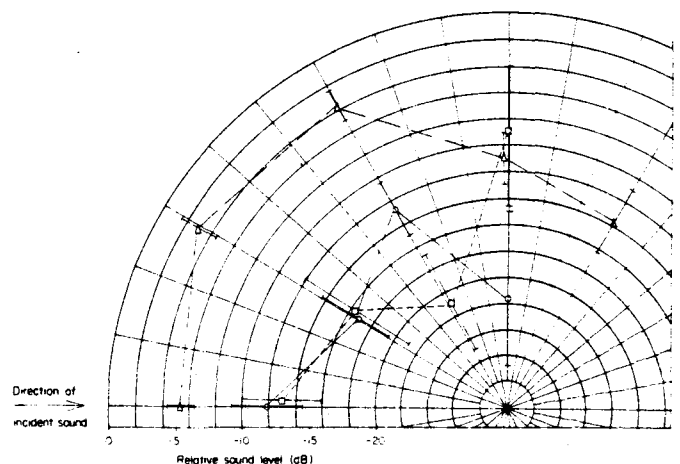


FIG.7 Geluidnivo's van aan bomen verstrooid geluid ten opzichte van de nivo's van de direkte golven (die dezelfde afstand afleggen).

stooide golven 5 tot 15 dB. onder het nivo ligt van akoestiese golven die dezelfde afstand afleggen maar direkt worden ontvangen (zie fig.7).

Ten aanzien van de absorptie van bladeren vinden Bullen en Fricke waarden overeenkomstig met de resultaten van Martens (10).

In twee recente akoestiese meetrapporten komt de invloed van begroeiing op de demping van een geluidwal (of -scherm) ter sprake (litt.13,14).

Allebei de auteurs vinden voor hogere frequenties een kleinere demping als de wal begroeid is. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door de verstrooiing van de akoestiese golven. (zie fig.8).

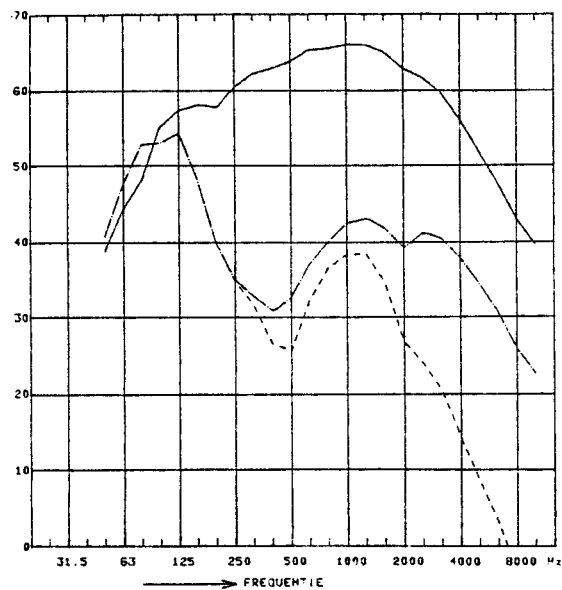


FIG. 8 Demping van een wal : - · - · : Begroeid  
 - - - : Onbegroeid  
 De getrokken lijn stelt het nivo voor in de  
 situatie zonder wal. (Uit litt.14).

Op grond van deze litteratuur vinden we dus:

- De verstrooiing van akoestiese golven door boombladeren kan van invloed zijn op het geluidnivo in een situatie waarin de direkte geluidgolven afgeschermd worden.
- De mate waarin de akoestiese golven verstrooid worden door de bladeren houdt verband met de bladgrootte.
- De intensiteit van de geabsorbeerde golven is klein ten opzichte van de gereflekterde en (of) de doorgelaten golven.

## 2. Berekeningsmethode

### 2.1 Inleiding

Om enig inzicht te krijgen in de grootte van de invloed van de verschillende variabelen (zoals bladgrootte, de bladafstand, de bladdichtheid, de afmetingen van de boom en de schermhoogte) op het geluidnivo achter een begroeide wal is er een rekenmethode ontwikkeld.

Deze rekenmethode is opgesplitst in twee delen: een deel waarin de verstrooiing aan de bladeren wordt berekend en een deel waarin schermwerking en bodemdemping worden berekend.

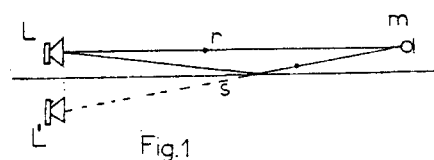
Bij het berekenen van de verstrooiing (reflektie en diffractie) aan de bladeren gaan we uit van de Kirchoff-benadering voor vlakke akoestische golven (zie o.a. litt.15). De afbuiging aan het scherm is berekend met de methode van Maekawa (Fresnel-benadering, litt. 24,34).

De bodemreflekties zijn berekend met een vlakke-golf drukreflektiecoëfficiënt  $R_b$  (fig.1), berekend met de methode van Delany en Bazley (litt.25).

Bij het ontwikkelen van de rekenmethode is begonnen met het berekenen van de invloed van bladgrootte, bladstand, bladvorm en bladmassa op de verstrooiing van akoestische golven door een enkel blad. Daarna is gerekend aan de invloed van deze vier variabelen en de invloed van bladdichtheid, afmetingen van de boom en bron- en ontvangerpositie bij een grote hoeveelheid bladeren (tot maximaal ongeveer 1000), en uiteindelijk zijn ook de afbuiging aan het scherm en de bodemreflekties erbij betrokken.

Gezien de lange rekentijden van de kleine computer (Commodore) kon er niet gerekend worden met voor bomen realistischere bladaantallen.

Met het uiteindelijke rekenprogramma kan het geluidnivo  $L(f)$  als functie van de frequentie  $f$  in het observatiepunt  $m$  berekend worden, er van uitgaande dat in  $L$  een bron met bekend vermogen  $P$  staat. Het geluiddrukknivo in  $m$  wordt veroorzaakt door de verstrooiing aan de bladeren van de boom, de afbuiging aan het scherm en de bodemreflekties (zie fig.2). De invloed van de stam en de takken is buiten beschouwing gelaten.



$$\text{Druk } p \text{ in } m: p_m = p_o \cdot \left( \frac{\exp(ikr)}{r} + R_b \cdot \frac{\exp(iks)}{s} \right)$$

waarin  $p_o$  een referentiedruk en  
 $R_b$  drukreflektiecoëfficiënt van  
 de bodem.

De berekening verloopt in drie fasen:

In de eerste fase wordt  $p_{\text{blad}}(f)$  in het punt  $m$  berekend;  $p_{\text{blad}}(f)$  is de geluiddruk (amplitude en fase) in  $m$  als functie van de frequentie, die veroorzaakt wordt door de verstrooiing van de akoestische golven aan alle bladeren, als in  $L$  een bron staat (zie fig.2).

Bodemreflekties van de van de bron afkomstige golven en van de verstrooide golven zijn ook van invloed op het geluidnivo in  $m$ . Omdat elk blad een andere (ruimtelijke)positie heeft, moeten  $R_b$  (de bodemreflektiecoëfficiënt) en  $s$  (de afstand tot de spiegelbron  $L'$ ) eigenlijk per blad uitgerekend worden. Om de rekentijd niet nog meer te vergroten is dit niet gebeurd. Om de invloed van de bodem er toch in te betrekken is  $p_{\text{blad}}(f)$  berekend met voor alle bladeren dezelfde bodemreflektiecoëfficiënt  $R_b$  en afstand  $s$  (zie fig.3).

In de tweede fase wordt

$p_{\text{scherm}}(f)$  in punt  $m$  berekend;  $p_{\text{scherm}}(f)$  is de geluiddruk in  $m$  (amplitude en fase) als functie van de frequentie, die veroorzaakt wordt door de afbuiging aan de bovenkant van het scherm, en de bodemreflekties, als in  $L$  een bron staat met vermogen

$P$ . In figuur 4 staan de vier geluidstralen die  $p_{\text{scherm}}(f)$  in  $m$  bepalen. In de derde fase worden  $p_{\text{blad}}(f)$  en  $p_{\text{scherm}}(f)$  fasegetrouw opgeteld en we vinden  $p_{\text{tot}}(f)$ .

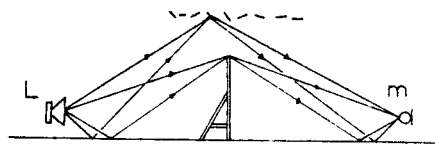


Fig.2

Enkele van de geluidstralen die verantwoordelijk zijn voor het geluidnivo in  $m$ .

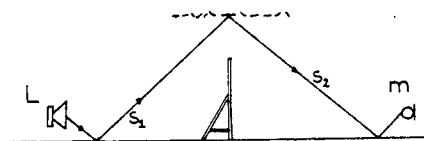


Fig.3  $R_b$

Voor alle bladeren is dezelfde (gemiddelde) bodemreflektiecoëfficiënt gebruikt.

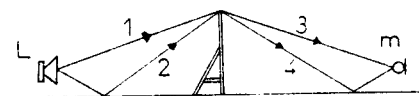


Fig.4

De vier geluidstralen 1-3; 1-4; 2-3 en 2-4

Het geluiddrukknivo in m ten opzichte van de referentiedruk  $p_0$  is nu:

$$L(f) = 20 \cdot \text{Log} \left\{ \frac{|p_{\text{tot}}(f)|}{|p_0|} \right\}$$

Bij de metingen (zie hoofdstuk 4) is telkens het energeties gemiddelde van vier metingen genomen (2 luidsprekerhoogten en 2 mikrofoonhoogten) om de invloed van de onnauwkeurigheid in de luidspreker- en mikrofoonhoogte zo klein mogelijk te maken.

Met het rekenprogramma kan ook het gemiddelde van 4 berekeningen (2 luidspreker- en 2 mikrofoonhoogten) gevonden worden, zodat metingen en berekeningen vergeleken kunnen worden.



## 2.2 Reflektie en diffractie

### 2.2.1 De benaderingsmethode

Over de verstrooiing van akoestische golven door een (akoestisch hard en star) voorwerp van eindige afmetingen is veel in de literatuur te vinden (o.a. litt. 18, 19, 21 en 33). Exacte oplossingen zijn echter vaak bijzonder omslachtig (zie litt. 21).

Met behulp van de zogenaamde Kirchoff-benaderingsmethode is de oplossing een stuk eenvoudiger te vinden.

Uitgaande van het beginsel van Huygens kan men de geluidsdruk  $p_A$  in een, binnen een gesloten oppervlak  $S$  gelegen punt  $A$  berekenen als de geluidsdruk  $p$  overal op  $S$  bekend is (zie fig. 5).

Bij de oplossing wordt gebruik gemaakt van een Greense functie  $G$ , die, evenals  $p$ , voldoet aan de driedimensionale Helmholtz-vergelijking en alleen singulier is in  $A$ :

$$\begin{aligned} \nabla^2 G + k^2 G &= -4\pi \delta_a \\ \nabla^2 p + k^2 p &= -4\pi \delta_a \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

waarin de operator  $\nabla^2$  staat voor:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad ; \text{ en } \delta_a \text{ de delta functie is.}$$

De tweede stelling van Green zegt dat voor twee functies  $f$  en  $g$ , die binnen een gesloten oppervlak geen singulariteiten vertonen geldt:

$$\int_V (f \nabla^2 g - g \nabla^2 f) dV = \int_S (f \nabla g - g \nabla f) \cdot \vec{n} dS \dots\dots\dots (2)$$

waarin  $V$  het door  $S$  omsloten volume en  $\vec{n}$  de naar buiten gerichte eenheidsnormaal is.

Kombinatie van (1) en (2) geeft (zie appendix 1, blz 1):

$$p_a = -1/4\pi \int_S (p \nabla G - G \nabla p) \cdot \vec{n} dS \dots\dots\dots (3)$$

Een veel gebruikte keuze van het gesloten oppervlak  $S$  is een oneindig plat vlak in (bijvoorbeeld)  $Z=0$ , met een halve bol in

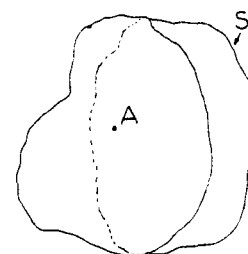


Fig. 5

De geluidsdruk in  $A$  is te berekenen als  $p$  op  $S$  bekend is.

het oneindige, die geen bijdrage levert tot de oppervlakte-integraal in de tweede stelling van Green (dit is de voorwaarde van Sommerfeld).

De eenvoud van de oplossing van (3) is sterk afhankelijk van de keuze van de Greense functie G. Voor de Greense functies bij de eenvoudig op te lossen Huygens-1 en Huygens-2 integralen hebben we een punt A' nodig. Dit punt A' is de spiegeling van het punt A in het vlak Z=0 (zie fig.6); r<sub>1</sub> en r<sub>2</sub> zijn de afstanden van respectievelijk de punten A en A' tot een punt s op S.

Voor de berekeningen van de afbuiging aan het scherm heb ik de Huygens-1 integraal gebruikt (in navolging van Maekawa, litt.24), dat is de oplossing van (3) met

$$G = \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2}$$

Ingevuld in (3) vinden we dan (zie appendix-1, blz.2) :

$$p_a = 1/2\pi \int_{s_1} \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} \cdot (n \cdot \nabla p) dS \dots\dots\dots (4)$$

Voor de berekeningen van de verstrooiing aan de bladeren heb ik de Huygens-2 integraal gebruikt, dat is de oplossing van (3) met

$$G = \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} - \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2}$$

zodat op S (waar z=0, r<sub>1</sub>=r<sub>2</sub>) geldt: G=0.

Ingevuld in (3) levert dat op:

$$p_a = -1/2\pi \int_s p \cdot \frac{\partial(\exp(-jkr_1)/r_1)}{\partial z} dS \dots\dots\dots (5)$$

Uit litteratuur blijkt dat de overeenkomst tussen de Huygens-2 integraal en metingen bij de diffractie en reflectie aan o.a. een starre schijf beter te zijn (o.a. litt.15, 16, 17 en 20).

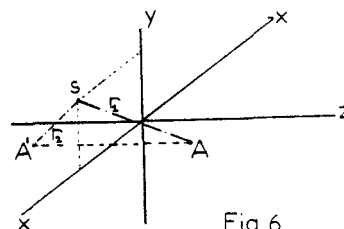


Fig.6

De ligging van A' en r<sub>1</sub> en r<sub>2</sub>. Het gesloten oppervlak S is het vlak Z=0 en een halve bol in ∞

Om de integralen (4) en (5) op te kunnen lossen, moet bij (4)  $\nabla p$  en bij (5)  $p$  op  $S$  bekend zijn.

Het vlak  $S$  bestaat uit het vlak  $Z=0$  en een halve bol in het oneindige. Om de integraal op te kunnen lossen moet dus  $\nabla p$  of  $p$  overal in het vlak  $Z=0$  bekend zijn. De Kirchoff benadering veronderstelt dat, als een vlak en star voorwerp in een geluidveld staat, op de "belichte" zijde geldt:

$p=2.p_{in}$  en  $\nabla p=2.\nabla p_{in}$ , met  $p_{in}$  de geluiddruk van de op het voorwerp vallende vlakke golven (drukverdubbeling). Op de "donkere" zijde geldt bij deze benadering  $p=0$  en  $\nabla p=0$  (zie fig.7).

Buiten het voorwerp geldt in het vlak  $Z=0$ :  $p=p_{in}$ .

Voor de verre-veld situatie vertoont de Kirchoff benadering goede overeenkomsten met metingen (o.a. litt.

17, 20).

Bij diffractieproblemen

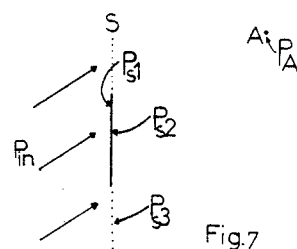
wordt de druk  $p_A$  in een punt  $A$  binnen  $S$  ook wel berekend uit de

som  $p_i$ , dat is de druk in  $A$  als er geen verstrooiers in de ruimte aanwezig zijn, en  $p_A^S$ , dat is de druk van de verstrooide golven in punt  $A$ .

$p_A$  kan worden berekend als overal in het vlak  $Z=0$   $p_A^S$  bekend is. Nu geldt op de "belichte" zijde van het voorwerp:  $p_A^S = p_{in}$ ; op de "donkere" zijde geldt  $p_A^S = -p_{in}$  en buiten het voorwerp geldt in  $Z=0$ :  $p_A^S = 0$ .

$p_A$  kan nu worden berekend door  $p_A^S$  in te vullen in (5) (of  $\nabla p_A^S$  in (4)), en te integreren over het vlak  $Z=0$ . Deze laatste keuzes van  $p_A^S$  maken de oplossing van (4) en (5) eenvoudiger, omdat nu alleen maar over het oppervlak van het voorwerp geïntegreerd hoeft te worden.

In de volgende paragraaf wordt de Huygens-2 integraal met bovengenoemde  $p_A^S$  opgelost. De oplossing van een Huygens-1 integraal voor een (oneindig lang) scherm staat uitgebreid beschreven in o.a. v.Wulffte-Palthe (litt. 34) en Maekawa (litt. 24).



$p_{s1}=2.p_{in}$ ;  $p_{s2}=0$  dus drukverdubbeling en volledige schaduw.

2.2.2 De oplossing van de Huygens-2 integraal bij schuine inval

In de vorige paragraaf vonden we de Huygens-2 integraal:

$$p_a^s = -1/2\pi \int p_s \cdot \frac{\partial(\exp(-jkR)/R)}{\partial z} dS \dots\dots\dots(6)$$

Veronderstel nu dat een vlakke golf onder een hoek  $\theta_0$  met het vlak  $X=0$  en loodrecht op de  $Y$ -as invalt op een vlak (akoesties hard en star) voorwerp in het vlak  $Z=0$  (zie fig.8).

Voor de geluiddruk van deze golf kunnen we schrijven:

$$p_{in} = \exp\{-jk(x \cdot \sin(\theta_0) + z \cdot \cos(\theta_0))\} \dots\dots(7)$$

Het observatiepunt  $P$  heeft de (pool)-coördinaten  $(r, \theta_p, \phi_p)$ .

Het punt  $Q$  op  $S$  heeft de coördinaten  $(x, y, 0)$  (=vektor  $\vec{x}$ ).

met  $r \gg \sqrt{x^2 + y^2}$  voor alle  $x, y$  op  $S$

geldt voor  $R$ :  $R \sim r - \hat{r} \cdot \vec{x}$

(zie appendix 1, blz.2), waarin  $\hat{r}$  de de vektor is met richting  $\vec{r}$  en lengte 1, dus

$$\hat{r} = \begin{pmatrix} \sin(\theta_p) \cdot \cos(\phi_p) \\ \sin(\theta_p) \cdot \sin(\phi_p) \\ \cos(\theta_p) \end{pmatrix}$$

zodat  $\frac{\exp(-jkR)}{R} \sim \frac{\exp(-jkr)}{r} \cdot \exp\{jk \cdot (x \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\phi_p) + y \cdot \sin(\theta_p) \cdot \sin(\phi_p))\}$

Als we dit invullen in (6), differentieren naar  $z$  en  $p_a^s$  invullen vinden we (appendix 1, blz.2)

$$p_A = \frac{\pm jk}{2\pi} \cdot \cos(\theta_0) \cdot \iint_S \exp\{jk\{x(\sin(\theta_p) \cdot \cos(\phi_p) - \sin(\theta_0)) + y \cdot \sin(\theta_p) \cdot \sin(\phi_p)\}\} \cdot dS \dots\dots\dots(8)$$

(positief bij reflectie, negatief bij diffractie)

In navolging van Baars (litt.20) introduceren we nu een  $\lambda$  waarvoor geldt:

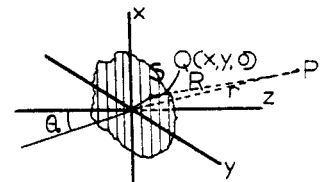


Fig.8

Het voorwerp ligt in het vlak  $Z=0$ .

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \cos(\mu) &= \sin(\theta_p) \cdot \cos(\phi_p) - \sin(\theta_o) \\ \lambda \cdot \sin(\mu) &= \sin(\theta_p) \cdot \sin(\phi_p) \end{aligned} \dots\dots\dots(9)$$

Integraal (8) kan nu vrij eenvoudig opgelost worden (appendix 1, blz.2).  
 Voor een schijf met straal a vinden we (reflektie):

$$p_{A-}^s = +jka^2 \cdot \cos(\theta_p) \cdot \frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda} \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \dots\dots\dots(10)$$

waarin  $J_1$  de Bessel-functie van de eerste orde en eerste soort is. Met behulp van een reeksontwikkeling (appendix 1, blz.2) kan  $J_1$  berekend worden.

Voor een rechthoekig voorwerp met zijden a en b (zie fig.9) introduceren we een  $\alpha$  en  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \alpha &= \sin(\theta_p) \cdot \cos(\phi_p) - \sin(\theta_o) \\ \beta &= \sin(\theta_p) \cdot \sin(\phi_p) \end{aligned}$$

zodat (8) wordt:

$$p_A = \frac{\pm jk}{2\pi} \cdot \int_{-\frac{1}{2}a}^{\frac{1}{2}a} dx \int_{-\frac{1}{2}b}^{\frac{1}{2}b} dy \cdot \cos(\theta_p) \cdot \exp(jk\{\alpha x + \beta y\}) \cdot \frac{\exp(jkr)}{r} \dots\dots(11)$$

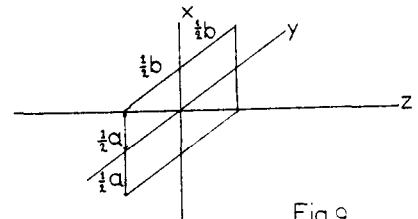


Fig.9

Een rechthoekig voorwerp met zijden a en b.

(appendix 1, blz 3), positief bij reflectie.

$$\text{en } p_A = \frac{\pm jk \cdot a \cdot b \cdot \cos(\theta_p)}{2\pi} \cdot \frac{\sin(\frac{1}{2}ka\alpha)}{\frac{1}{2}ka\alpha} \cdot \frac{\sin(\frac{1}{2}kb\beta)}{\frac{1}{2}kb\beta} \dots\dots\dots(12)$$

Resultaten van berekeningen vindt u in Hoofdstuk 3.

2.3 De invloed van de eindige massa

Bij de berekeningen in de vorige paragrafen is uitgegaan van een vlak voorwerp met een (oneindig) grote oppervlakte-massa. Bij bladeren is dat natuurlijk niet het geval. Bij de berekeningen veronderstel ik dat de bladeren een uniforme oppervlakte-massa  $m^1$  hebben ( $m^1$  is het versgewicht van 1  $m^2$  bladeren).

Voor  $\hat{p}_{in}$ , de amplitude van de druk  $p_{in}$  van de op een (oneindig) groot blad vallende akoestiese golven geldt:

$$\hat{p}_{in} = \hat{p}_r + \hat{p}_t + \hat{p}_a \dots\dots\dots(13)$$

waarin :  $\hat{p}_t$  = de amplitude van de druk  $p_t$  van de doorgelaten golven ( $N/m^2$ )

$\hat{p}_r$  = de amplitude van de druk  $p_r$  van de gereflekteerde golven  
( $N/m^2$ )

$\hat{p}_a$  = de amplitude van de druk van de geabsorbeerde golven ( $N/m^2$ )

Onder andere Martens (litt.10) vindt dat  $\hat{p}_a$  klein is ten opzichte van  $\hat{p}_{in}$ .

Ik verwaarloos  $\hat{p}_a$  bij mijn berekeningen, zodat overblijft

$$\hat{p}_{in} = \hat{p}_r + \hat{p}_t$$

$p_r$ , de geluiddruk (amplitude en fase) van de gereflekteerde golven is de geluiddruk die een rol speelt bij de verstrooiing.

Voor  $p_s$  in de benadering van Kirchoff

op blz.12 en in formule (6) op blz.13

moet nu dus  $p_r$  ingevuld worden ( $+p_r$  bij reflectie,  $-p_r$  bij diffractie).

Als de oppervlaktemassa van de (vlakke) bladeren uniform is, zal de eindige massa geen invloed hebben op de berekeningen van de integralen, maar kunnen we de resultaten (10) en (11) op blz.14 vermenigvuldigen met de (complexe) drukreflectiecoëfficiënt  $R_p = \hat{p}_r / \hat{p}_{in}$

$R_p$ , de drukreflectiecoëfficiënt van de bladeren, kan berekend worden (zie o.a. litt. v.Wulfften-Palthe {34}, blz. 157 en verder). Voor  $R_p$  vinden we (zie appendix 1, blz. )

$$R_p = \frac{j \cdot 2\pi \cdot f m^1 \cdot \cos(\theta_o)}{2\rho c + j \cdot 2\pi \cdot f m^1 \cdot \cos(\theta_o)} \dots\dots\dots(14)$$

waarin :  $m^1$  de oppervlaktemassa van de bladeren (voor bladeren is dit 0.1 tot 0.2  $kg/m^2$ )

$\theta_o$  de hoek van inval (met de normaal, zie fig. 10)

$\rho c$  de specifieke akoestiese impedantie van lucht ( $\sim 415 \text{ kg/m}^2\text{s}$  bij lucht van  $20^\circ\text{C}$ , vlakke golven)

$f$  de frequentie (1/s)

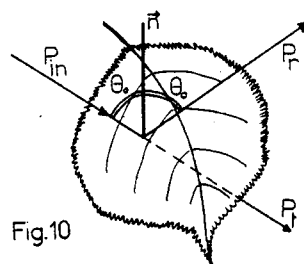


Fig.10

$p_{in}, p_r$  en  $p_t$  bij een blad.  
 $\vec{n}$  is de normaal op het blad

## 2.4 De berekeningen aan de bladeren

### 2.4.1 Bladpositie en bladstand

We zijn nu zover dat, als een bekende vlakke akoestische golf van frequentie  $f$  (of golfgetal  $k$ ) op een rond of rechthoekig blad met oppervlaktemassa  $\bar{m}$  valt, we de geluiddruk  $p_A$  in een punt A ten gevolge van de verstrooiing aan het blad en op een afstand  $r$  van het blad uit kunnen rekenen.

Om  $\lambda$  uit te kunnen rekenen moet de bladstand (gekaracteriseerd door de normaal  $\vec{n}$ ) bekend zijn.

Kombinatie van (10) op blz 14 en (14) op blz. 15 geeft:

$$p_A = jka^2 \cos(\theta_p) \cdot \frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda} \cdot \frac{j2\pi f \bar{m} \cos(\theta_p)}{2\rho c + j2\pi f \bar{m} \cos(\theta_p)} \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \dots\dots\dots (15)$$

(ronde bladeren, reflectie)

Om  $p_A$  te kunnen berekenen moet  $\lambda$  bekend zijn;  $\lambda$  kunnen we berekenen als de drie hoeken  $\theta_o$  (de hoek van inval),  $\theta_p$  en  $\phi_p$  (de twee poolcoördinaten van A) bekend zijn. Het coördinatenstelsel moet zo gekozen worden dat het blad in het vlak  $Z=0$  ligt en de invallende (vlakke) golven loodrecht op de Y-as invallen.

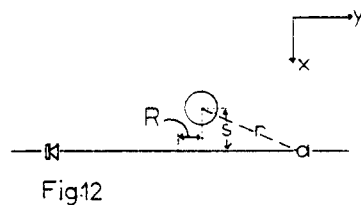
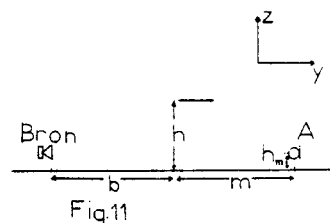
Omdat de afstand bron-blad groot is ten opzichte van de bladdiameter mogen we de invallende golven als vlak beschouwen.

Omdat het de berekeningen een stuk vereenvoudigt (vooral bij meerdere bladeren) kies ik het XYZ coördinatenstelsel zó dat het middelpunt van het blad in het punt  $O(0,0,0)$  ligt, en het XY-vlak horizontaal is (zie fig.11 en 12).

De bron heeft dan de coördinaten  $(X_b, Y_b, Z_b) = (s, -(b+r), -(h-h_b))$  en het observatiepunt A de coördinaten  $(X_m, Y_m, Z_m) = (s, m-r, -(h-h_m))$ .

Ik geef het blad een stand, zodanig dat de normaal op het blad is:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \sin(\theta_b) \cdot \cos(\phi_b) \\ \sin(\theta_b) \cdot \sin(\phi_b) \\ \cos(\theta_b) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (16)$$



De bladpositie ten opzichte van bron en microfoon. De afstand  $r = \sqrt{(h-h_m)^2 + (m-R)^2 + s^2}$  is groot genoeg om de golven in  $(0,0,0)$  als vlak te mogen beschouwen.

Met behulp van een drietal rotaties wordt het blad in het vlak  $Z'''=0$  gelegd, z6 dat de invallende golven loodrecht op het  $Y'''$ -vlak invallen.  $Y'''$  en  $Z'''$  zijn de  $Y$  en  $Z$ -as na de drie rotaties.

De zo verkregen rotatiematrix, toegepast op de coördinaten van bron en observatiepunt A, levert dan de hoeken  $\theta_o$ ,  $\theta_p$  en  $\phi_p$  op zodat  $\lambda$  berekend kan worden. Het voordeel van bovengenoemde methode is, dat voor elke bladstand (gekaracteriseerd door  $\theta_b$  en  $\phi_b$ ) en plaats van het blad (gekaracteriseerd door de coördinaten van bron B en punt A) met dezelfde procedure  $p_A$  berekend kan worden.

2.4.2 De rotaties

Met de twee eerste rotaties wordt het blad in het vlak  $Z''=0$ , of wat op hetzelfde neerkomt, de normaal op het blad  $\vec{n}$  langs de  $Z''$ -as gelegd:

(zie appendix 1, blz. 3)

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(\phi_b) \cdot \cos(\theta_b) & -\sin(\phi_b) \cdot \cos(\theta_b) & \sin(\theta_b) \\ \sin(\phi_b) & -\cos(\phi_b) & 0 \\ \sin(\theta_b) \cdot \cos(\phi_b) & \sin(\theta_b) \cdot \sin(\phi_b) & \cos(\theta_b) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Dit is de matrix  $R_{12}$  (N.B.  $R_{12} \cdot \vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  )

Met de derde rotatie wordt het  $XY$ -vlak geroteerd over een hoek  $\phi_r$ , z6 dat de golven loodrecht op de  $Y$ -as invallen.

Om  $\phi_r$  te kunnen berekenen moeten we eerst de rotatiematrix  $R_{12}$  loslaten op de oorspronkelijke coördinaten van de bron:

$$\begin{pmatrix} X'_b \\ Y'_b \\ Z'_b \end{pmatrix} = R_{12} \begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{pmatrix}$$

Voor de hoek  $\phi_r$  vinden we (appendix-1, blz. 4 )

$$\begin{aligned} \cos(\phi_r) &= \frac{X''_b}{\sqrt{X''_b{}^2 + Y''_b{}^2}} \\ \sin(\phi_r) &= \frac{Y''_b}{\sqrt{X''_b{}^2 + Y''_b{}^2}} \end{aligned} \dots\dots\dots(18)$$

Eenvoudig in te zien is, dat de derde rotatiematrix  $R_3$  wordt: (appendix 1, blz.4 )

$$R_3 = \begin{pmatrix} \cos(\phi_r) & \sin(\phi_r) & 0 \\ \sin(\phi_r) & -\cos(\phi_r) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(19)$$



De nieuwe coördinaten van B en A zijn nu eenvoudig te berekenen:

$$\text{met } R_{123} = R_3 \cdot R_{12} \quad \begin{bmatrix} X_b''' \\ Y_b''' \\ Z_b''' \end{bmatrix} = R_3 \cdot \begin{bmatrix} X_b'' \\ Y_b'' \\ Z_b'' \end{bmatrix} \quad \text{en} \quad \begin{bmatrix} X_b''' \\ Y_b''' \\ Z_b''' \end{bmatrix} = R_{123} \cdot \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix}$$

$$(Y_b''' \neq 0)$$

is nu te berekenen: (appendix 1, blz. 4)

$$\begin{aligned} \sin(\theta_0) &= \frac{X_b'''}{\sqrt{(X_b''')^2 + (Z_b''')^2}} \\ \cos(\theta_p) &= \frac{Z_m'''}{\sqrt{(X_m''')^2 + (Y_m''')^2 + (Z_m''')^2}} \quad \dots\dots\dots (20) \\ \cos(\phi) &= \frac{X_m'''}{\sqrt{(X_m''')^2 + (Y_m''')^2}} \end{aligned}$$

Bij de berekeningen neem ik de absolute waarden van (20) zodat ze positief zijn. Is  $Z_m'''/Z_b''' > 0$  dan is er sprake van reflectie. Reflectie en diffractie zijn maximaal als  $X_b'''/X_m''' > 0$ .

Als  $X_b'''/X_m''' < 0$  dan wordt  $\theta_m$  negatief genomen (zie appendix 1, blz. 4).

In de rekenprocedure wordt op bovenstaande manier van alle bladeren de waarde  $p_A$  voor de verschillende frequenties (of k-waarden) uitgerekend en (fasegetrouw) opgeteld.

De som noem ik  $p_{A,bladeren}(f)$ .

## 2.5 Het scherm

De berekeningen van de schermdemping zijn, zoals vermeld, met de Huygens-1 integraal uitgevoerd. De berekeningen velopen geheel analoog aan de berekeningen in v. Wulfften-Palthe (litt. 34, blz. 226 en verder). Dit is de methode die Maekawa gebruikt. Het verschil in tophoek bij de directe golven en de aan de bodem gereflekteerde golven is verwaarloosd (de tophoek van de directe golven is gebruikt). Uiteindelijk

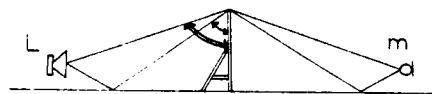


Fig13

Het verschil in tophoek is klein.

vindt v. Wulfften-Palthe (litt. 34, blz. 227):

$$p_A = \frac{1}{2} j p_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) - j \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) \right\} dt \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot q^2\right) - j \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot q^2\right) \right\} dq \quad \dots (21)$$

waarin:  $v = h \cdot \sqrt{2/\lambda \cdot (1/b + 1/m)}$

$$t = x \cdot \sqrt{2/\lambda \cdot (1/b + 1/m)}$$

$$q = y \cdot \sqrt{2/\lambda \cdot (1/b + 1/m)}$$

(alledrie dimensieloos)

$p_0$  de geluidruk in  $m$  als scherm en bodem afwezig waren ( $N/m^2$ )

$\lambda$  de golflengte ( $l/m$ )

Met behulp van de Fresnel-integralen (litt. 38, blz 300-301)

$$C(z) = \int_0^z \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt \quad \text{en} \quad S(z) = \int_0^z \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt$$

met  $C(\infty) = S(\infty) = \frac{1}{2}$  vinden we:

$$p_{A, \text{scherm}} = p_0 / 2 \cdot \{ (1 - C(u) - S(u)) + j \cdot (S(u) - C(u)) \} \quad \dots \dots \dots (22)$$

$C(u)$  en  $S(u)$  zijn te berekenen met behulp van een reeksontwikkeling (litt. 38, blz. 300-302), waarbij opgemerkt moet worden dat bij de berekeningen boven een bepaalde waarde van  $u$  ( $\sim 3$ ) een benadering van de reeks wordt gebruikt (zie appendix 1, blz. 4).

## 2.6 De bodemdemping: de bodemreflektiecoëfficiënt $R_b$

De bodemreflecties zullen ook van invloed zijn op het geluiddrukknivo in het observatiepunt. Als  $p_d$  de geluiddruk in  $P$  ten gevolge van de direkte straal is (alleen  $1/r$ -wet), vinden we voor de totale geluiddruk in  $P$ :

$$p_{b+d} = p_d \cdot (1 + R_b \cdot r/s \cdot \exp(-jk(s-r))) \quad \dots \dots (23)$$

Als de geluidgolven vlak zijn (of zo beschouwd mogen worden) kunnen we  $Q$  benaderen met  $R_b$ : de vlakke-golf drukreflektiecoëfficiënt.

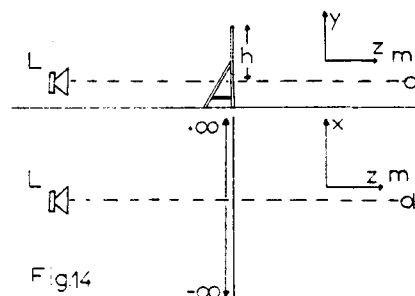


Fig. 14  
Zijaanzicht en bovenaanzicht van de situatie met het scherm.

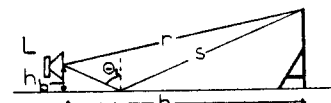


Fig. 15

$$p_{b+d} = p_d \cdot (1 + R_b \cdot r/s \cdot \exp(-jk(s-r)))$$

$$\text{Hiervoor geldt: } R_b = \frac{W \cdot \cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)}{W \cdot \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2)} \dots\dots\dots (24)$$

waarin W het quotiënt van de specifieke akoestiese golfimpedantie van de bodem en de specifieke akoestiese golfimpedantie van de lucht.

$$\cos(\theta_1) = \frac{h+h_b}{s} \quad (\text{zie fig.15})$$

De situaties waarvoor ik berekeningen uitvoer zijn zodanig (o.a. een grote specifieke stromingsweerstand van de bodem) dat we mogen stellen  $\cos(\theta_2) \approx 1$

Delany en Bazley (litt.25) hebben voor een aantal materialen een relatie gevonden tussen de specifieke stromingsweerstand  $\sigma$  en de genormaliseerde specifieke impedantie W van het materiaal.

$$\text{Zij vinden: } W = w_1 + j \cdot w_2 \quad \text{en} \quad w_1 = 1 + 0.051 \cdot \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75} \\ w_2 = 0.0769 \cdot \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73} \quad \dots\dots\dots (25)$$

Ik neem voor de bodem  $\sigma \approx 10^5 \text{Ns/m}^4$ .

Met  $\alpha = w_1 \cdot \cos(\theta_1)$  en  $\beta = w_2 \cdot \cos(\theta_2)$  vinden we voor  $R_b$ :

$$R_b = R_{rb} + j \cdot I_{rb} \quad \text{waarin } R_{rb} = \text{Re}(R_b) = \frac{\alpha^2 + \beta^2 - 1}{(\alpha + 1)^2 + \beta^2} \\ I_{rb} = \text{Im}(R_b) = \frac{2\beta}{(\alpha + 1)^2 + \beta^2} \quad \dots\dots\dots (26)$$

Ingevuld in (23) vinden we dan:

$$P_{b+d} = P_d \cdot \left( (1 + r/s \cdot R_{rb} \cdot \cos(k(s-r)) - r/s \cdot I_{rb} \cdot \sin(k(s-r))) + j \cdot (r/s \cdot I_{rb} \cdot \cos(k(s-r)) + r/s \cdot \sin(k(s-r))) \right) \dots\dots\dots (27)$$

## 2.7 De berekende druk in M

Op blz. 8 vonden we het resultaat

$P_{A,bladeren}(f)$ : de som van alle geluidsdrukken veroorzaakt door reflecties en diffrakties aan bladeren. De bodemreflecties zijn niet voor ieder blad apart uitgerekend. De invloed van de bodem op het geluidnivo in M ten gevolge van de verstrooiing aan de bladeren heb ik erbij betrokken door

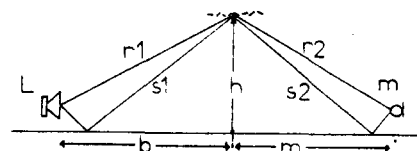


Fig.16

De bodemreflectie bij de bladeren.

de geluiddruk  $p_{A,bladeren}(f)$  te vermenigvuldigen met de faktor

$$(1+R_b \cdot r_1/s_1 \cdot \exp\{-jk(s_1-r_1)\}) \cdot (1+R_b \cdot r_2/s_2 \cdot \exp\{-jk(s_2-r_2)\}) \dots (28)$$

Dus alle bladeren hebben dezelfde bodemreflektiefaktor. Uit fig.17 is te zien dat geldt:

$$s_1 = \sqrt{b^2 + (h+h_b)^2} \quad \text{en} \quad s_2 = \sqrt{m^2 + (h+h_m)^2}$$

$$r_1 = \sqrt{b^2 + (h-h_b)^2} \quad \text{en} \quad r_2 = \sqrt{m^2 + (h-h_m)^2}$$

waarin  $h$  de gemiddelde bladhoogte is.

Het resultaat is  $p_{blad}$  (zie ook blz. 8).

Op blz.8 vonden we het resultaat  $p_{A,scherm}$ . Ook  $p_{A,scherm}$  wordt vermenigvuldigd met de faktor (28). Voor  $h$  wordt nu echter de schermhoogte ingevuld. Het resultaat is  $p_{scherm}$ .

We kunnen nu  $p_{blad} + p_{scherm}$  optellen en het berekende geluidnivo in  $M$  wordt:

$$L_M = 20 \cdot \log |(p_{blad} + p_{scherm})| / |p_o|$$

$L_M$  is, evenals  $p_{blad}$  en  $p_{scherm}$ , natuurlijk een functie van de frequentie  $f$ .

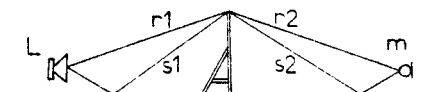


Fig.17

De bodemreflekties bij het scherm

### 3. Berekeningsresultaten

De berekeningen zijn uitgevoerd op een kleine Commodore Computer. Het gebruik van deze computer legde, door de lange rekentijden, beperkingen op aan het maximum aantal bladeren waarmee gerekend kon worden. Met behulp van de ontwikkelde rekenmethode (Hoofdstuk 2) is eerst de invloed van de grootte, de massa, de vorm en de stand bij de verstrooiing aan één blad berekend. Dit staat in paragraaf 3.1.

Daarna is de invloed van de dichtheid van de bladeren (of de LAI), de plaats van het blad in de boom en de gemiddelde bladstand berekend. Dit staat in paragraaf 3.2. In paragraaf 3.3 tenslotte staat het resultaat van de berekeningen die uitgevoerd zijn om vast te stellen hoe groot de invloed van de verstrooiing is in een situatie waarin een boom bij een scherm staat.

#### 3.1 Eén blad

##### 3.1.1 De invloed van de bladgrootte

Om de invloed van de bladgrootte te berekenen heb ik onder andere het verstrooide vermogen bij loodrechte inval berekend.

Veronderstel dat vlakke akoestische golven met een intensiteit  $I_{in}$  loodrecht op een schijf met straal  $a$  invallen (oppervlakte massa  $m^1 = \infty$ ).

Het vermogen dat invalt op de schijf is dan:

$$P_{in} = \pi a^2 I_{in} = \pi a^2 \hat{p}_o^2 / 2 \rho_s c \dots \dots \dots (1)$$

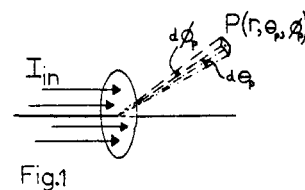
waarin  $\hat{p}_o$  de amplitude van de geluidsdruk  $p_o$  van de op de schijf vallende golven is en  $\rho_s c$  de specifieke akoestische impedantie van lucht.

Met formule (10) op blz.14 kunnen we de geluidsdruk, in een punt P met poolcoördinaten  $(r, \theta_p, \phi_p)$ , die wordt veroorzaakt door de verstrooiing aan de schijf, berekenen:

$$p_p(r, \theta_p, \phi_p) = p_o \cdot jka^2 \cos(\theta_p) \cdot \frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda} \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \dots \dots \dots (2)$$

Het vermogen dat gaat door het oppervlakte element waarin P ligt, met grootte  $r \cdot \sin(\theta_p) \cdot d\theta_p \cdot d\phi_p$  is dan (zie ook fig. 1):

$$\Delta_{\theta\phi} P_{\theta\phi} = \hat{p}_p^2 \cdot \frac{r^2 \sin(\theta_p)}{2 \rho_s c} \cdot d\theta_p \cdot d\phi_p \dots \dots \dots (3)$$



Het oppervlakte element, waarin P ligt.

De verstrooiingsdoorsnede  $\sigma$  is nu gedefinieerd als de verhouding tussen het totale, door het voorwerp verstrooide vermogen  $P_s$  en het op het op het voorwerp vallende vermogen  $P_{in}$ . Voor golflengten die groot zijn ten opzichte van de afmetingen van het voorwerp zal  $\sigma$  naar nul gaan. Voor golflengten die (heel) klein zijn ten opzichte van de afmetingen van het voorwerp wordt  $\sigma$  gelijk aan 2 : In hoofdstuk 2 is de totale geluiddruk in een punt P gedefinieerd als de som van de geluiddruk in het punt P, als het verstrooiende voorwerp er niet is plus de geluiddruk van de aan het voorwerp verstrooide golven:

$p_p^{tot} = p_i + p_s^P$  (blz.12 ). Op de "belichte" zijde is  $p_s^P$  gelijk aan  $p_i$  (drukverdubbeling); op de schaduwzijde geldt  $p_s^P = -p_i$  (volledige schaduw). zodat (voor grote waarden van  $k.a$ ) zowel aan de belichte zijde als aan de schaduwzijde van het voorwerp het verstrooide vermogen (evenredig met  $(p_s^P)^2$ ) gelijk is aan het vermogen dat invalt, en  $\sigma$  gelijk wordt aan 2!  
 Dus  $\sigma = \frac{\int \int \Delta \theta \phi^P \Delta \phi \phi}{P_{in}} \dots \dots \dots (4)$

(zie ook (3) )

Met (2), (3) en (4) vinden we voor  $\sigma_{\perp}$ , de verstrooiingsdoorsnede bij loodrechte inval:

$$\sigma_{\perp} = \frac{k \cdot a^2}{\pi} \cdot \int \int_{bol} \cos^2(\theta_p) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \left\{ \frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda} \right\}^2 \cdot d\theta_p \cdot d\phi_p \dots \dots \dots (5)$$

Deze integraal is niet zo eenvoudig op te lossen ( $\lambda$  is een functie van  $\theta_p$  en  $\phi_p$ , zie blz.14 ).

Zij kan worden benaderd door een reeks:

$$\sigma_{\perp} = \sum \sum \frac{k \cdot a^2}{\pi} \cdot \frac{\Lambda^2}{4} \cdot \cos^2(\theta_p) \cdot \sin(\theta_p) \Delta \theta_p \Delta \phi_p \dots \dots \dots (6)$$

waarin  $\Lambda = \frac{2J_1(ka\lambda)}{ka\lambda}$

N.B.  $\sigma$  is een functie van  $k.a$  .

In figuur 2 staat  $\sigma$  , berekend met formule (6); voor  $\Delta \theta_p$  en  $\Delta \phi_p$  heb ik  $\pi/90$  radialen genomen (stapjes van  $2^\circ$  ).

Figuur 2 is een welbekend plaatje (litt. 15, 16, 17, 18, 19 en 20); voor grote waarden van  $ka$  wordt  $\sigma_{\perp}$  gelijk aan 2.

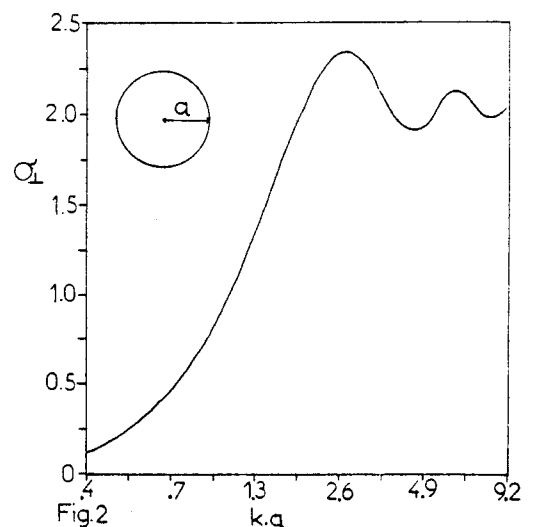


Fig.2 De verstrooiingsdoorsnede bij loodrechte inval van een schijf met straal a.

In figuur 3 staan literatuurwaarden van en  $\sigma_{rand}$  bij een schijf. In deze figuur is  $\sigma_I$  berekend volgens de exacte theorie;  $\sigma_{rand}$  is de verstrooiingsdoorsnede bij alzijdige inval. (uit: Baars, litt.20).

We kunnen ook de geluiddruk in één punt als functie van de bladgrootte bekijken. De geluiddruk  $p_p^s$  is volgens formule (10) op blz. 14 :

$$p_p^s = jka^2 \cos(\theta_p) \cdot \frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda} \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r}$$

Voor kleine  $ka$  geldt :  $\frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda} \sim \frac{1}{2}$

(voor  $ka\lambda < 0.4$  is de afwijking kleiner dan 2%)

zodat voor  $ka\lambda < 0.4$  geldt:

$$p_p^s \sim \frac{1}{2} jka^2 \cos(\theta_p) \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \dots \dots \dots (7)$$

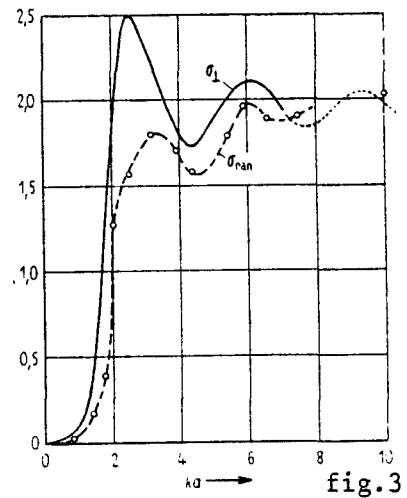
N.B.  $\lambda$  is hier niet de golflengte, maar de waarde gedefinieerd volgens formule (9) op blz.14

De amplitude  $\hat{p}_p^s$  van de druk  $p_p^s$  is in formule (7) evenredig met het golfgetal  $k$  en de bladgrootte  $\pi a^2$ !

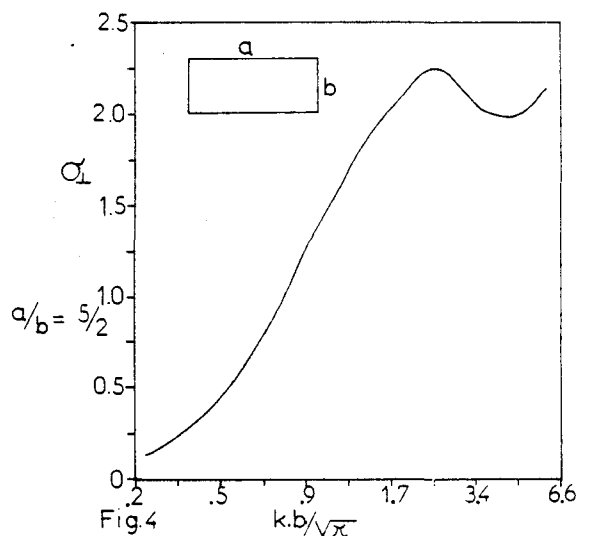
3.1.2 De invloed van de bladvorm

Om een indruk te krijgen van de invloed van de vorm van het blad, is de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma$  berekend voor een vierkant en twee rechthoekige "bladeren". De oppervlakten van de bladeren is gelijk aan  $(\pi \cdot \{0.1\}^2)$  en de oppervlaktemassa is  $\infty$ .

Voor een vierkant met zijde  $z$  is de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma_z$  gelijk aan de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma_o$  voor ronde bladeren. (getekend in figuur 2) als de zijde  $z$  gelijk is aan de straal  $a \cdot \sqrt{\pi}$ .



De verstrooiingsdoorsneden  $\sigma$  en  $\sigma_{rand}$  is de verstrooiingsdoorsnede bij alzijdige inval. (Uit Baars, litt.20)



De verstrooiingsdoorsnede bij een rechthoekige plaat met  $a/b=5/2$

In figuur 4 staat de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma$  bij een rechthoek met lengte  $a$  en breedte  $b$  waarvoor geldt:  $a/b=5/2$  ( $a=0.28$ ;  $b=0.11$ ) als functie van  $k \cdot b/\sqrt{\pi}$ .

Eenzelfde grafiek in figuur 5 laat als functie van  $k \cdot b/\sqrt{\pi}$  zien voor  $a/b=5$  ( $a=0.396$  en  $b=0.079$ ).

We zien dat de verstrooiingsdoorsnede bij ronde en rechthoekige bladeren ongeveer hetzelfde verloop heeft, als  $\sigma$  getekend wordt als functie van  $ka$  bij ronde bladeren en als functie van  $kb/\sqrt{\pi}$  bij rechthoekige bladeren ( $b$  is de breedte).

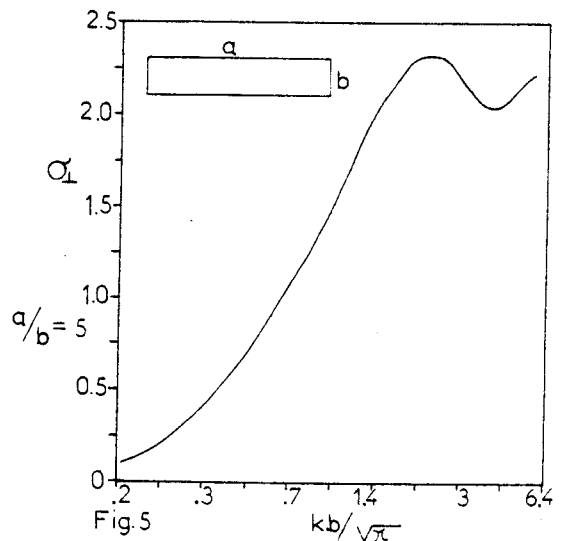


Fig. 5  
De verstrooiingsdoorsnede bij een rechthoekige plaat met  $a/b=5$ .

### 3.1.3 De invloed van de bladmassa

Als het blad niet oneindig zwaar is, maar een oppervlakte-massa  $m^1$  heeft, is  $\sigma_{\perp, m}$  geen functie meer van  $ka$ , omdat de reflectie-coëfficiënt en transmissiecoëfficiënt alleen een functie van  $k$  (of de frequentie  $f$ ) zijn, en niet van  $ka$ . (zie blz.23).

In de figuren 6, 7 en 8 staat de berekende waarde van  $\sigma_{\perp, m}$  dan ook als functie van de frequentie voor  $m^1 = \infty$ ,  $m^1 = 0.2$  en  $m^1 = 0.1$   $\text{kg/m}^2$  bij drie schijfjes met stralen van respectievelijk 7 cm. (oppervlakte  $150\text{cm}^2$ ), 4 cm. (oppervlakte  $50\text{cm}^2$ ) en 1.8 cm. (oppervlakte  $10\text{cm}^2$ ).

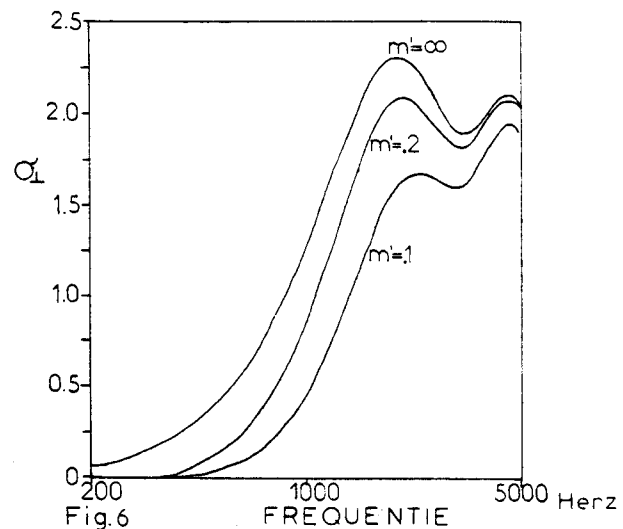


Fig. 6  
De verstrooiingsdoorsnede bij een schijf met een straal van 7 cm, opp. massa  $m=0.1$ ,  $m=0.2$  en  $m=\infty$ .



Bladeren van de meeste loofbomen hebben een waarde van  $m^1$  tussen 0.1 en  $0.2 \text{ kg/m}^2$  en een bladoppervlak tussen  $5 \text{ cm}^2$  en  $150 \text{ cm}^2$ .

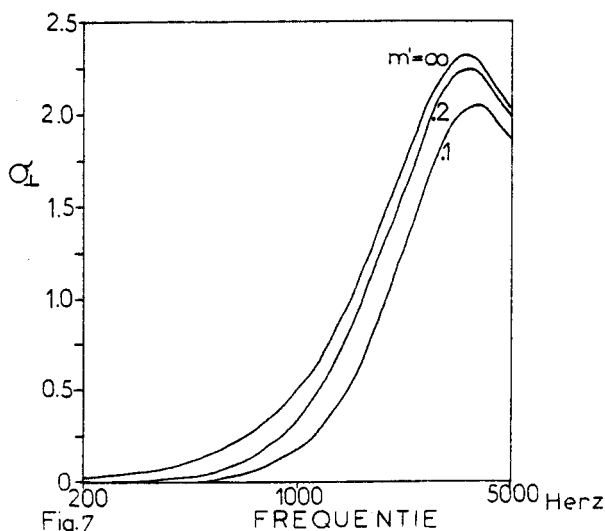


Fig. 7  
De verstrooiingsdoorsnede  $\sigma$  bij een schijf met een straal van 4 cm. en oppervlakte-massa's .1, .2 en  $\infty$  ( $\text{kg/m}^2$ ).

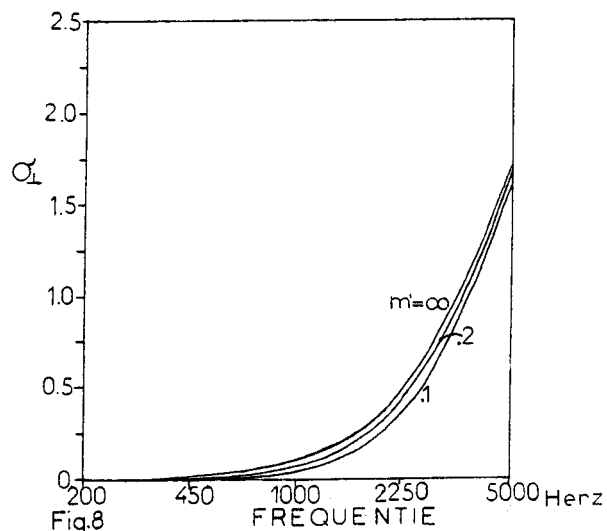


Fig. 8  
De verstrooiingsdoorsnede  $\sigma$  bij een schijf met straal 1.8 cm.

Doordat het blad een eindige massa heeft verschuift de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma_{\perp, m}$  naar hogere frequenties. Deze verschuiving wordt groter naarmate de bladgrootte toeneemt. In figuur 9 staat  $10 \cdot \log(\sigma_{\perp, m=0.1})$  uit tegen de frequentie voor de drie schijfjes met stralen van 7 cm. (1), 4 cm. (2) en 1.8 cm. (3).

### 3.1.4 De bladstand

In paragraaf 3.1.1 is beschreven hoe de verhouding tussen het op een schijf vallende vermogen bij loodrechte inval  $\sigma_{\perp}$ , samenhangt met de waarde

$ka$  (of  $kb/\sqrt{\pi}$ ). Met behulp van deze verstrooiingsdoorsnede

is echter niet te zien in welke richting het vermogen bij een bepaalde waarde van  $ka$  verstrooid wordt. In deze paragraaf staat beschreven waar het vermogen blijft: Voor een aantal hoeken van inval

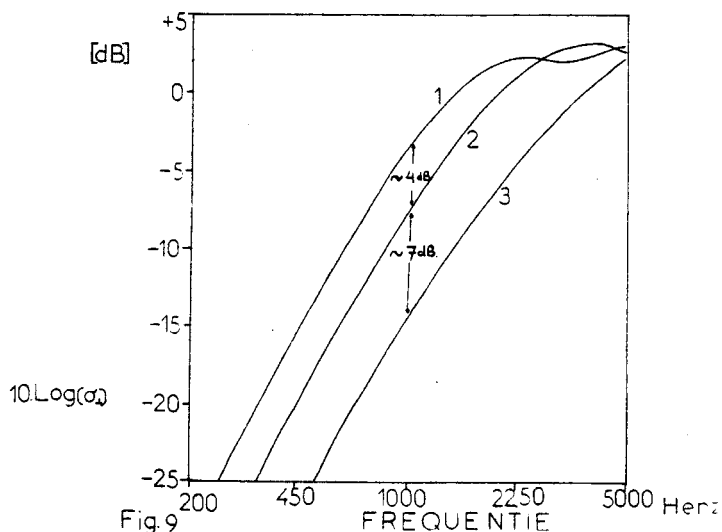


Fig. 9  
Het verschil in verstrooiingsdoorsnede in dB. bij drie schijfjes met stralen 7 cm. (1), 4 cm. (2) en 1,8 cm. (3). De oppervlaktemassa is  $0.1 \text{ kg/m}^2$ .

is de geluiddruk in een punt P ( $r=1$ ) berekend als functie van  $\theta_p$  en  $\phi_p$  bij een aantal waarden van  $ka$  (zie ook fig.10).

In de figuren 11 t/m 14 staan voor vier waarden van  $ka$  ( $a=0.1$ ) de verhouding  $p/p_0$  (waarin  $p_0$  de geluiddruk van de invallende golven is) als functie van de hoek van uitval met de Z-as:  $\theta_p$ . In deze figuren is  $\phi_p$ , de hoek tussen de projectie van P op het vlak  $Z=0$  en de X-as, gelijk aan nul. Dus het punt P ligt bij deze figuren in het vlak  $Y=0$  (zie fig.10). In elk van deze figuren staat  $p/p_0$  getekend voor vier hoeken van inval  $\theta_0$  bij een schijf ( $a=0.1$ ;  $m^1=\infty$ ). De figuren 11 en 12 lijken (op de verticale schaal na!) veel op elkaar: bij waarden van  $ka < 2$  is de hoek van inval onbelangrijk: het vermogen wordt in een grote ruimtehoek verstrooid. In de figuren 13 en 14 is te zien dat voor toenemende waarden van  $ka$  ( $ka > 2$ ;  $\sigma$  verandert daar nog maar weinig) het vermogen van de onder hoek  $\theta_0$  invallende golven verstrooid worden in een kleiner wordende ruimtehoek. Voor hele grote waarden van  $ka$  ( $ka \gg 10$ ) wordt deze hoek gelijk aan de hoek van inval (of: op een schijf waarvan de straal heel groot is ten opzichte van de golflengte geldt dat de hoek van uitval gelijk is aan de hoek van inval).

In de figuren 11 t/m 14 is de hoek  $\phi_p$  gelijk aan nul. Reflectie (en dif-

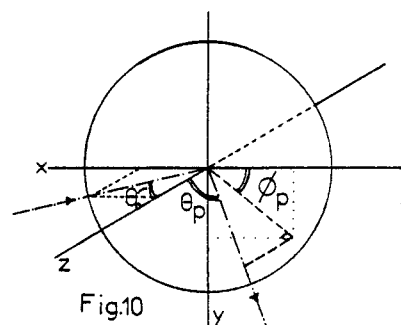


Fig.10  
De hoeken van inval en uitval.  
De golven vallen loodrecht op de Y-as in.

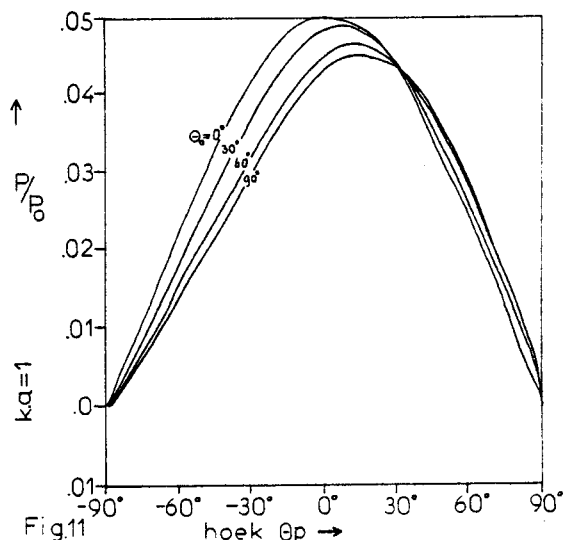


Fig.11  
De verhouding  $p/p_0$  bij een schijf.  $ka=1$ ;  $p_0$  is de geluiddruk van de op de schijf vallende golven.  $\phi_p=0^\circ$

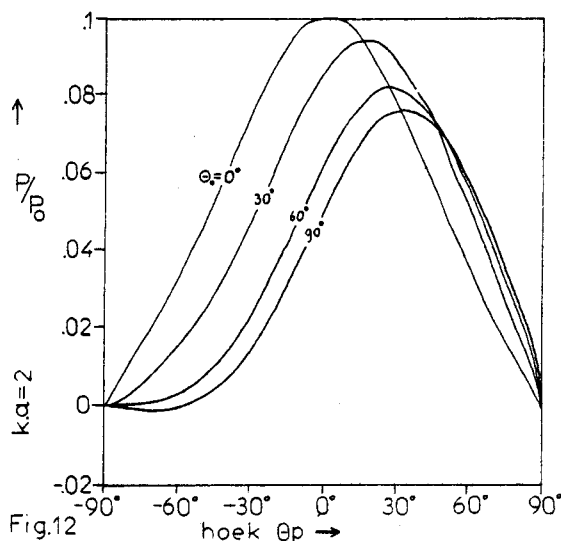


Fig.12  
De verhouding  $p/p_0$  bij een schijf;  $ka=2$   $\phi_p=0$

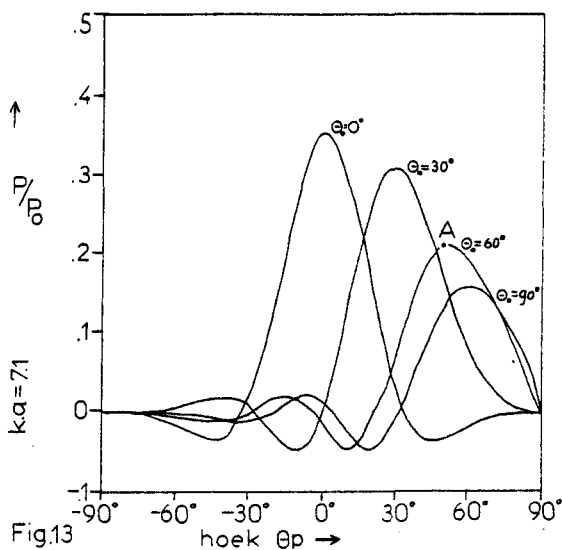


Fig.13 De verhouding  $p/p_0$  als functie van de hoek van inval  $\theta_p$  met  $ka=7.1$  bij een schijf.  $\phi_p=0^\circ$

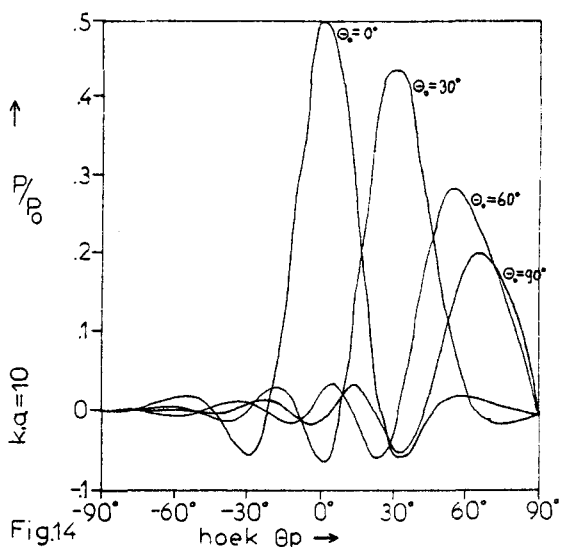


Fig.14 De verhouding  $p/p_0$  bij een schijf met  $ka=10$   $\phi_p=0^\circ$

fraktie ) zijn voor alle combinaties van  $\theta_p$  en  $\theta_0$  maximaal als  $\phi_p = 0$ . Als  $\phi_p = 180^\circ$  en  $\theta_p = \theta_0$  ligt het observatiepunt P in de richting van de invallende golven (zie fig.10).

In de figuren 15 en 16 staan voor twee waarden van  $ka$   $p/p_0$  als functie van  $\phi_p$  bij een hoek  $\theta_p = 45^\circ$ , ook weer voor vier hoeken van inval  $\theta_0$ . Het punt A:  $\phi_p = 0^\circ$ ;  $\theta_p = 45^\circ$  en  $\theta_0 = 60^\circ$  in figuur 16 komt overeen met het punt A in figuur 13.

De punten  $\phi_p = 180^\circ$  en  $\theta_p = 45^\circ$  komen overeen met de punten  $\phi_p = 0^\circ$  en  $\theta_p = -45^\circ$ .

In de figuren 15 en 16, ( $ka=2$  en  $ka=7.1$ ) zien we dat voor de lage waarde van  $ka$  ook  $\phi_p$  minder steil verloopt, zodat het verstrooide vermogen over een grotere ruimtehoek verspreid wordt. Met behulp van de figuren 11 t/m 16 kunnen we een voorstelling maken van de richtingen waarin het geluid verstrooid wordt bij een schijf.

In de volgende paragrafen, waar het effect van verstrooiingen aan meerdere blaadjes wordt besproken zal meerdere malen terugverwezen worden naar deze figuren.

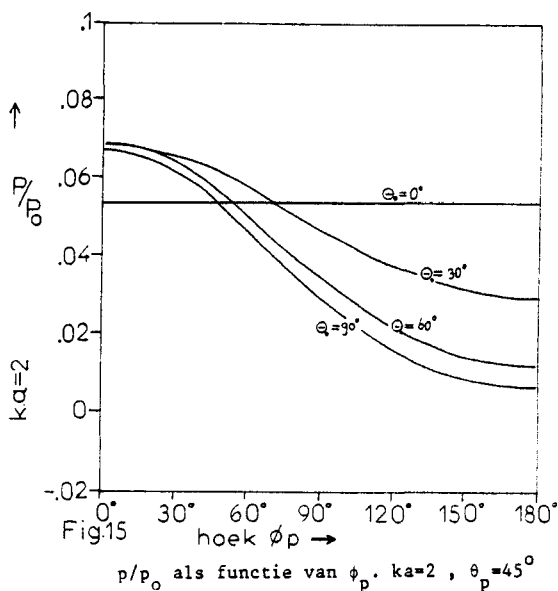


Fig.15  $p/p_0$  als functie van  $\phi_p$ .  $ka=2$ ,  $\theta_p=45^\circ$

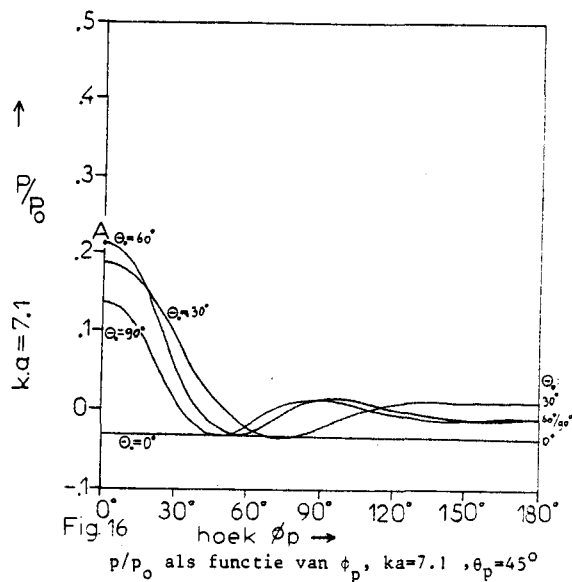


Fig.16  $p/p_0$  als functie van  $\phi_p$ ,  $ka=7.1$ ,  $\theta_p=45^\circ$

### 3.2 Meerdere blaadjes

De berekeningen aan meerdere blaadjes zijn allemaal uitgevoerd voor ronde bladeren. Bij de berekeningen zijn meervoudige verstrooiingen buiten beschouwing gelaten. Bij de berekeningen in deze paragraaf wordt het geluidnivo in M (zie figuren 17 en 18) alleen bepaald door de verstrooiing aan blaadjes. In paragraaf

3.3 worden bodem en schermwerking erbij betrokken.

De blaadjes liggen op concentrische cirkels op één horizontaal vlak.

Bij alle berekeningen is het vermogen van de bron (L) zodanig dat op 1 m. van de bron (in een reflektievrije ruimte) de geluiddruk voor alle frequenties  $p_0$  is. Dus in alle gevallen wordt  $p_i$ , de bijdrage van blad i aan de geluiddruk in M als functie van de frequentie, uitgaande van  $p_0$

berekend. Het geluiddrukknivo  $L_{p_i}$  ten gevolge van de verstrooiing aan blad i in M is gedefinieerd als  $L = 20 \cdot \log \left| \frac{p_i}{p_0} \right|$ .

Het geluiddrukknivo in M is steeds gedefinieerd ten opzichte van  $p_0$ : ten gevolge van de verstrooiing aan alle blaadjes vinden we:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{\sum p_i}{p_0} \right| \quad \text{waarin gesommeerd wordt over de } n \text{ blaadjes.}$$

De geluiddruk  $p_i$  wordt berekend met formule (10) op blz 14.

Voor  $p_i$  geldt:  $p_i = \hat{p}_i \cdot \exp(j\phi_i)$

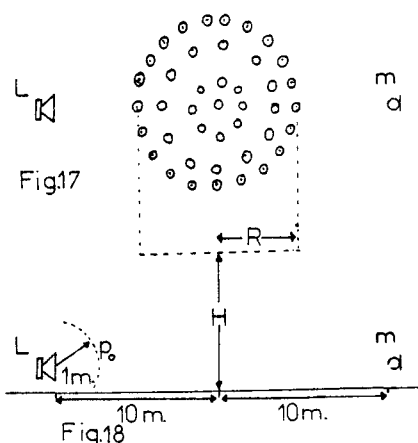
waarin  $\hat{p}_i$  de amplitude en  $\phi_i$  de fase van  $p_i$  is.

Er zijn twee effecten van invloed op de fase  $\phi_i$ : de afstand bron-blad-ontvanger, en de bladstand. De fase tengevolge van de afstand is  $k \cdot r_i$ . De fase  $\tau_i$  tengevolge van de bladstand is  $0^\circ$  of  $180^\circ$  (zie bijvoorbeeld fig. 14 op blz. 28: bij  $\theta_0 = 0$  draait de fase  $180^\circ$  tussen  $20^\circ$  en  $45^\circ$ ).

Als er sprake is van diffractie in plaats van reflectie verandert  $\tau_i$  ook  $180^\circ$ .

De faseverschillen spelen een belangrijke rol bij de verstrooiing.

De fase  $\phi_i$  is de som van  $k \cdot r_i$  en  $\tau_i$ :  $\phi_i = k \cdot r_i + \tau_i$ .



Bovenaanzicht (fig. 17) en zijaanzicht (fig. 18) van de ligging van de blaadjes bij één vlak.

Om de invloed van de fase  $k \cdot r_i$  en  $\tau_i$  op de rekenresultaten vast te kunnen stellen zijn voor een aantal situaties telkens drie nivo's berekend:

$L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$ .

Bij de berekeningen van  $L_1$  zijn de geluiddruk bijdragen in M van elk blad opgeteld zonder rekening te houden met de verschillen in afstand,

dus  $k \cdot r_i = 0$ : 
$$L_1 = 20 \cdot \log \left| \frac{\sum \hat{p}_i \cdot \exp(j\tau_i)}{p_0} \right| \dots \dots \dots (8)$$

Bij de berekeningen van  $L_2$  zijn de amplitudes van de geluiddruk bijdragen kwadratisch opgeteld:

$$L_2 = 10 \cdot \log \left| \frac{\sum \hat{p}_i^2}{p_0^2} \right| \dots \dots \dots (9)$$

Bij de berekening van  $L_3$  is  $p_i$  fasegetrouw opgeteld:

$$L_3 = 20 \cdot \log \left| \frac{\sum \hat{p}_i \cdot \exp(j \cdot \{k r_i + \tau_i\})}{p_0} \right| \dots \dots \dots (10)$$

### 3.2.1 Een sterk vereenvoudigde situatie: 25 blaadjes

Om er een idee van te krijgen welke fase-effecten een rol spelen bij het probleem van vele reflekerende oppervlakken, en om later te kunnen extrapoleren naar vele blaadjes, eerst iets over een "boom" van 25 blaadjes. Deze (ronde) blaadjes hebben een oppervlaktemassa  $m^1$  van  $0.15 \text{ kg/m}^2$ . en een straal van 10 cm. (vergelijkbaar met de relatief erg grote bladeren van de (exclusieve) "Pauwlownia tomentosa").

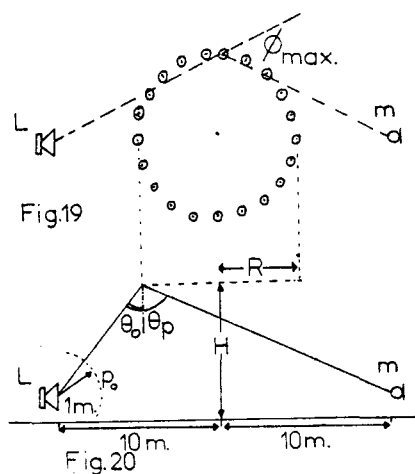
De 25 blaadjes van deze boom liggen op de rand van een horizontaal liggende cirkel.

Er is gerekend aan "bomen" met een straal van 1.2 en 4 m., waarvan de blaadjes op 4 m. of 8 m. boven bron en ontvanger liggen. De berekeningen zijn uitgevoerd aan horizontale blaadjes, blaadjes met een willekeurige bladstand en verticale blaadjes.

Bron en ontvanger staan op 10 m. aan weerszijden van de boom. (zie fig.19,20).

#### 3.2.1.1 25 blaadjes, $H=4\text{m}$ , $R=1.2\text{m}$ .

Bij horizontale bladeren is er alleen sprake van reflectie, zodat er geen faseverschillen (van  $180^\circ$ ) ten gevolge van reflectie of diffractie op kunnen treden. De straal van de cirkel waarop de 25 blaadjes liggen is 1.2 m.; de blaadjes liggen op een hoogte van 4 m. boven luidsperker en



De hoeken  $\theta_p$ ,  $\theta_0$  en  $\phi_p$  bij  $R=1.2 \text{ m}$ . en  $H = 4 \text{ m}$ .

mikrofoon (zie fig.19,20).

De hoeken  $\theta_o$  en  $\theta_p$  van respectievelijk inval en uitval liggen hier in de buurt van  $65^\circ$  en verschillen maximaal  $5^\circ$  (zie fig.19,20). De hoek  $\phi_p$  is maximaal  $15^\circ$ .

Met behulp van de figuren 11 t/m 16 op blz.28 is te zien dat voor waarden  $ka < 10$  geen faseverschillen door de bladstand op zullen treden, zodat voor elk blad geldt:  $\tau_i = 0$ .

Met de formules (8) en (9) op blz. vinden we in dit geval ( $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ ):  $L_1 - L_2 < 10 \cdot \log(25) = 14$  dB.

In figuur 21 staan  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  getekend. Het afstandsverschil  $r_1 - r_2$  (zie figuur 19,20) is ongeveer 10 cm., de kleinste golflengte waarbij deze twee uitersten in tegenfase zijn is dus ongeveer 20 cm. ( $f \approx 1600$  Hz.).

Bij ongeveer 2200 Hz. ligt in  $L_3$  het eerste minimum door deze afstandsverschillen. Bij lage frequenties ( $< 700$  Hz.) is  $L_3$  gelijk aan  $L_1$ : door de kleine afstandsverschillen spelen faseverschijnselen hier geen rol. Bij frequenties  $f > 2000$  Hz. slingert  $L_3$  rond  $L_2$ . Belangrijk is het om in te zien dat in dit geval (dat wil zeggen bij kleine verschillen in de door de golven afgelegde weg) een verdubbeling van het bladaantal bij  $f < 1$  kHz een verhoging van het nivo met 6 dB. en bij  $f > 2$  kHz. een verhoging van het nivo met ongeveer 3 dB. geeft.

### 3.2.1.2 25 horizontale blaadjes,

$$R=4 \text{ m.}, H=4 \text{ m.}$$

In figuur 22 staan eveneens de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$ . Nu liggen de blaadjes echter op een cirkel met een straal van 4 m.. De ligging van de blaadjes op deze grotere cirkel heeft in de eerste plaats tot gevolg dat het verschil tussen de hoek van inval en de

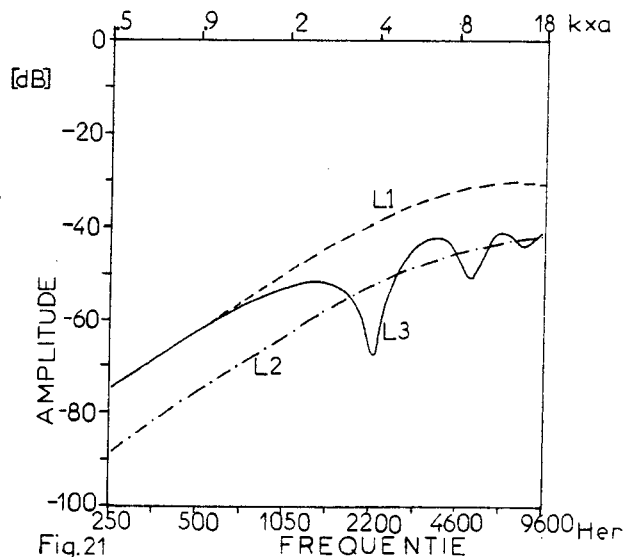


Fig.21

De nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij één laag van 25 bladeren met  $R=1.2$  m. en  $H=4$  m.

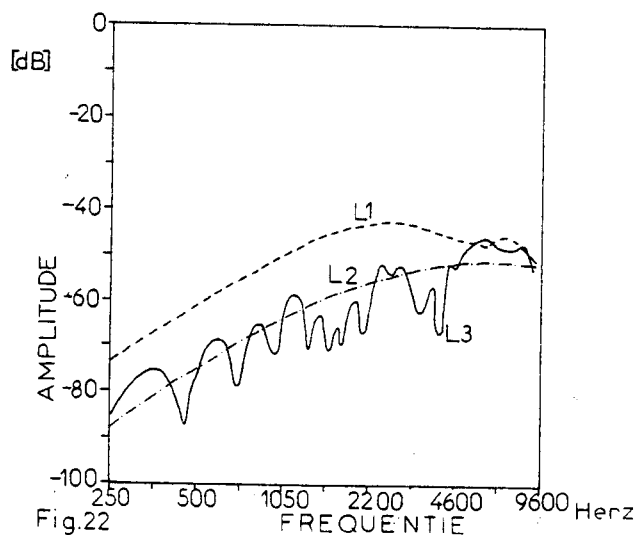


Fig.22

De nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 25 blaadjes,  $H=4$  m.,  $R=4$  m.

hoek van inval hier maximaal ongeveer  $20^\circ$  is, en dat de hoek  $\phi_p$  ongeveer  $45^\circ$  is (zie fig. 19,20). De gevolgen hiervan zijn te zien in figuur 22 en kunnen verklaard worden met de figuren 11 t/m 16: bij  $f > 2$  kHz. dragen de blaadjes die door hun ligging een grote hoek  $\phi_p$  of een groot verschil tussen  $\theta_p$  en  $\theta_o$  hebben weinig bij aan de geluiddruk in M. Ook is bij grote hoeken een fasedraaiing van  $180^\circ$  mogelijk ( $f > 2$  kHz.).

Bovenstaande heeft tot gevolg dat  $L_1$  en  $L_2$  in fig. 22 bij  $f > 1$  kHz. (waar  $ka > 2$ ), afwijken van  $L_1$  en  $L_2$  in fig. 21 (tot ongeveer 15 dB.). Het verschil tussen  $L_1$  en  $L_2$  in figuur 22 is ongeveer 14 dB. ( $\approx 20 \cdot \log(25)$ ), bij  $f > 2$  kHz. wordt dit verschil kleiner: voor grote waarden van k kunnen nu faseverschillen optreden door de bladstand (dat wil zeggen de hoeken  $\theta_o$ ,  $\theta_p$  en  $\phi_p$ ). Bovendien verschillen de waarden  $\hat{p}_i$  onderling sterk waardoor  $\{\sum(\hat{p}_i)\}^2 < 25 \cdot |\sum \hat{p}_i^2|$  en dus  $L_1 - L_2 < 14$  dB..

De verschillen in weglengte van de akoestische golven zijn bij een grotere cirkelstraal uiteraard grater: maximaal ongeveer 1.20 m.. De kleinste golflengte waarbij de twee uitertsen in tegenfase zijn is ongeveer 2.40 m. ( $\approx 140$ Hz.). Dit betekent dat ook bij lage frequenties  $L_3$  (het nivo waarbij de geluiddrukken worden opgeteld) rond  $L_2$  slingert, zodat verdubbeling van het bladaantal bij blaadjes die op een cirkel met een grote straal liggen voor alle frequenties een verhoging zal geven van ongeveer 3 dB.!

Tenslotte kunnen we opmerken dat door enerzijds de grotere afstandsverschillen, en anderzijds de grotere hoek  $\phi_p$  (en het grotere verschil tussen hoek van inval en hoek van uitval) zowel laagfrequent als hoogfrequent  $L_3$  bij de kleine cirkel ( $R=1.2$  m., fig. 21) ongeveer 10 dB. boven  $L_3$  bij de grote cirkel ( $R=4$  m., fig. 22) ligt.

### 3.2.1.3 25 horizontale blaadjes, $R=1.2$ m., $H=8$ m.

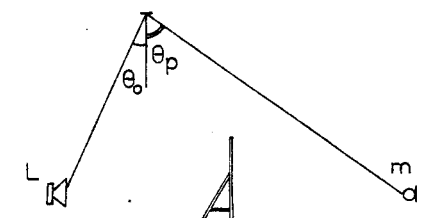
$L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  zijn ook berekend voor een "boom" met 25 horizontale blaadjes op 8 m. boven luidspreker en microfoon.

Nu geldt  $\theta_o \approx 50^\circ$ ;  $\theta_p \approx 50^\circ$ ;  $|\theta_o - \theta_p| < 7^\circ$ .

Omdat  $R=1.2$  m. blijft gelden:  $-15^\circ < \phi_p < 15^\circ$ .

(zie fig. 23).

Als we fig. 24 ( $R=1.2$  m.,  $H=8$  m.) vergelijken met figuur 21 ( $R=1.2$  m.,  $H=4$  m.), dan zien we



FIGUUR 23 De hoeken  $\theta_o$  en  $\theta_p$  worden kleiner als de bladhoogte toeneemt.

dat, voor  $f < 1$  kHz., de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  in fig. 24 ongeveer 5 dB. hoger liggen dan de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  in fig.21. Twee effecten zijn daar de oorzaak van :

- 1° De grotere weglengte
- 2° De kleinere hoeken  $\theta_o$  en  $\theta_p$  in de situatie van fig. 24

Door de grotere weglengte nemen de nivo's af ( $1/r$ -wet), maar de kleinere hoeken  $\theta_o$  en  $\theta_p$  nemen de nivo's toe (wat volgt uit de berekeningen volgens Kirchoff, zie fig.11 t/m 16, en uit de berekening van de drukreflektiecoëfficiënt, zie blz.15).

De verschillen in weglengte bij de situatie van fig. 24 zijn kleiner (maximaal ongeveer 7 cm.), zodat  $L_3$  tot een hogere frequentie  $L_1$  volgt.

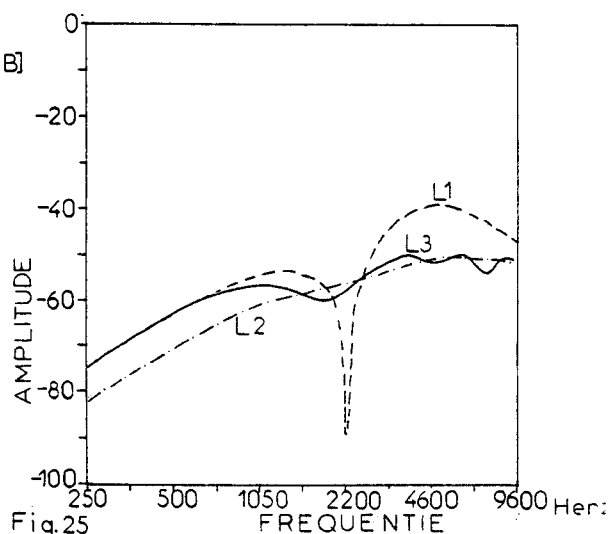
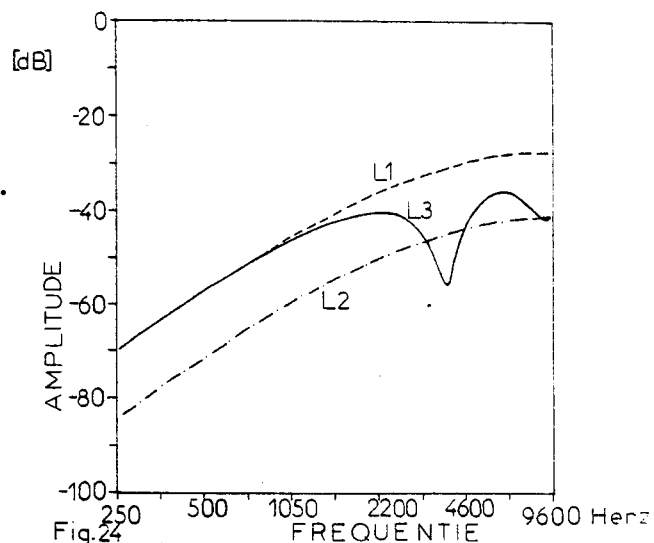
Bij te grote hoogten zal bovenstaande niet meer gelden (afhankelijk van blad-massa, straal cirkel etc.).

#### 3.2.1.4 25 blaadjes met een willekeurige bladstand, $H=4$ m., $R=1.2$ m. en $R=4$ m.

Bij blaadjes met een willekeurige bladstand kunnen verschillen in de fase  $\tau_i$  optreden bij de verstrooiing aan meerdere blaadjes doordat er soms sprake is van diffractie en soms sprake is van reflectie. Voor grote waarden van  $k.a$  ( $k.a > 2$ ) ontstaan ook faseverschillen doordat  $\theta_p$ ,  $\phi_p$  en  $\theta_o$  alle mogelijke waarden kunnen aannemen.

Opgemerkt moet worden dat bij een willekeurige bladstand voor grote  $k.a$  (of hoogfrequent) ten eerste de geluiddruk, veroorzaakt door diffractie aan de blaadjes erg klein is omdat  $\theta_o$  en  $\theta_p$  tegengesteld van teken zijn en ten tweede de geluiddruk, veroorzaakt door reflectie aan blaadjes waarvoor  $\phi_p$  óf het verschil in  $\theta_o$  en  $\theta_p$  groot is, klein is. De geluiddruk in het observatiepunt wordt dus bepaald door een relatief klein aantal bladeren.

In figuur 25 staan voor 25 blaadjes





de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$ , zoals ze gedefinieerd zijn op blz.30 . De 25 blaadjes liggen op de rand van een cirkel met straal  $R=1.2$  m. op 4 m. boven luidspreker en mikrofoon (die ieder op 10 m. aan weerszijden van de "boom" staan).

We zien dat  $L_1$  en  $L_2$  numinder dan 14 dB. ( $10 \cdot \log(25)$ ) van elkaar verschillen, voornamelijk door de faseverschillen in  $\tau$ .  $L_3$  verschilt weinig van  $L_1$  als  $f < 1$  kHz. en slingert ook hier om  $L_2$  als  $f > 1$  kHz.. De bladstanden zijn bij deze "boom" toevallig zódanig, dat  $L_3$  geen grote "dip" heeft zoals in de figuren 21 en 24.

Drie berekeningen aan 25 blaadjes met willekeurige bladstanden leveren op dat  $L_1$  en  $L_3$  sterk kunnen verschillen (tot 15 dB.) bij andere bladstanden. De verschillen bij de drie berekeningen van  $L_2$  geven een veel kleiner verschil te zien ( $< 5$  dB.). De grote verschillen in  $L_1$  en  $L_3$  worden dus veroorzaakt door de verschillende fasen  $\tau$ .

In figuur 26 staan  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  voor 25 blaadjes met een willekeurige bladstand op een cirkel met straal  $R=4$  m. In deze figuur doen zich geen verschijnselen voor die niet al eerder aan bod zijn geweest:

$L_1 - L_2 < 14$  dB.;  $L_3$  slingert al laagfrequent om  $L_2$  etc..

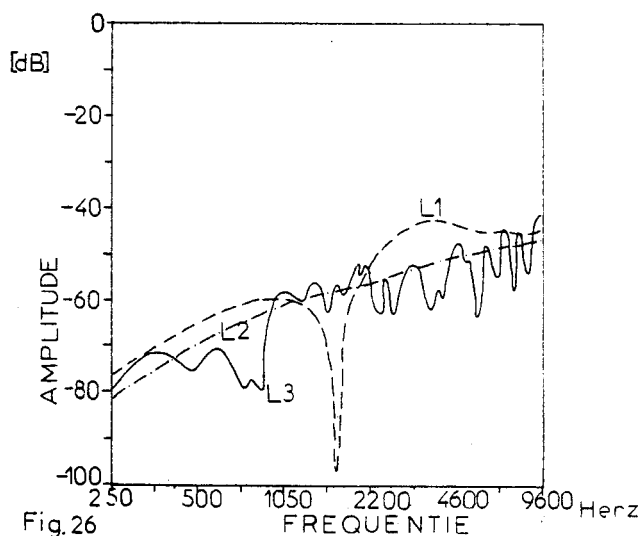


Fig. 26  
25 blaadjes met een willekeurige bladstand,  $H=4$  m.,  $R=4$  m.

### 3.2.1.5 25 blaadjes met willekeurige bladstand, $R=1.2$ en $H=2$ m., $H=4$ m. en $H=8$ m.

In figuur 27 staan drie berekeningen van  $L_2$  voor 25 blaadjes met willekeurige bladstand op een cirkel met straal  $R=1.2$  m.

$L_{2,8}$  is de berekening van  $L_2$  met de blaadjes op 8 m. hoogte;  $L_{2,4}$  is de berekening van  $L_2$  op 4 m. hoogte en  $L_{2,2}$  is de berekening van  $L_2$  op 2 m. hoogte.

In tegenstelling tot de berekeningen bij horizontale blaadjes neemt hier het nivo  $L_2$  (en ook de niet getekende nivo's  $L_1$  en  $L_3$ ) juist af met toenemende hoogte van de bladlaag. Bij blaadjes op 4 m. hoogte is  $L_2$  bij een willekeurige bladstand ongeveer

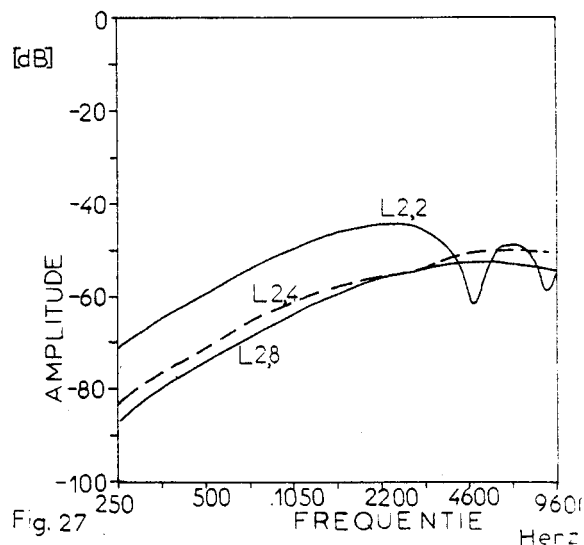


Fig. 27  
Het nivo  $L_2$  bij 25 blaadjes op 2, 4 en 8 m. hoogte.

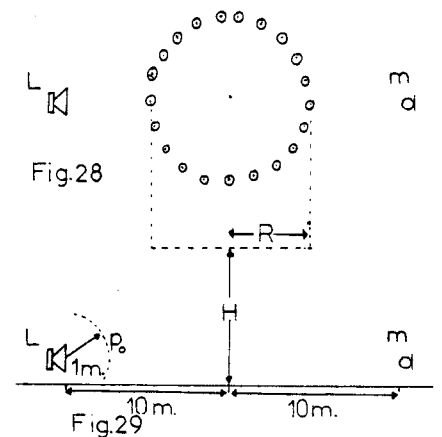
gelijk aan  $L_2$  bij horizontale blaadjes. Dit wordt veroorzaakt doordat de diffractie aan blaadjes gunstiger wordt en de reflectie ongunstiger wordt naarmate de geluidgolven een kleinere hoek maken met het vlak waarin de blaadjes liggen. Voor  $f > 1$  kHz. wordt dit effect kleiner.

Gewapend met de bij kleine bladhoeveelheden opgedane kennis, én met behulp van hoofdstuk 3.1 zullen we nu enkele grafieken met grote bladhoeveelheden bekijken.

### 3.2.2 Vele blaadjes

#### 3.2.2.1 Horizontale blaadjes

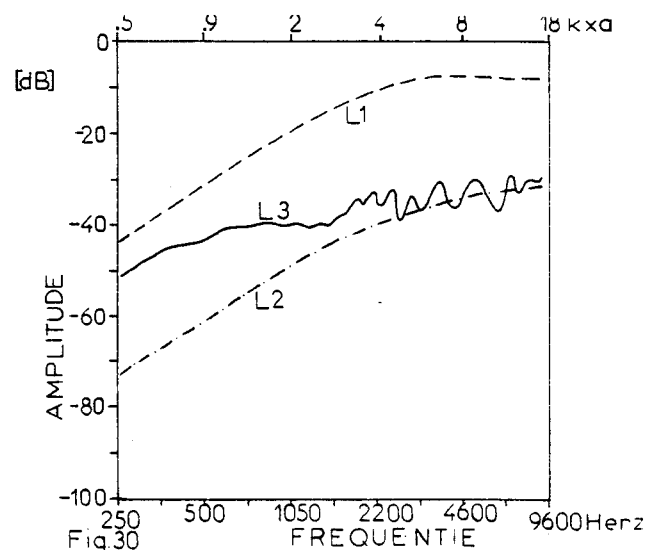
We zullen eerst onderzoeken wat de invloed van de bladgrootte op één laag horizontale blaadjes is. Daarvoor zijn voor drie waarden van  $a$  (de bladstraal)  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  berekend, nu voor 765 horizontaal liggende blaadjes. Deze blaadjes liggen op de randen van 15 concentrische cirkels met een onderlinge afstand van 0.25 m.. De grootste cirkel heeft een straal van 3.8 m., de kleinste een straal van 0.3 m. De laag blaadjes ligt op 4 m. hoogte boven luidspreker en microfoon (afstand: 10 m., zie fig. 28, 29).



In figuur 30 staan de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  voor blaadjes met  $a=0.1$  m. (oppervlakte  $A_1 \approx 300 \text{ cm}^2$ ,  $LAI=0.53$ ).

Als we figuur 30 ( $a=0.1$ , 765 blaadjes) vergelijken met de figuren 21 en 22 ( $a=0.1$ , 25 blaadjes), dan zien we dat voor  $k \cdot a < 4$  ( $f < 2$  kHz.)  $L_1$  in figuur 30 30 dB. ( $=20 \cdot \log(\frac{765}{25})$ ) boven  $L_1$  in figuur 21 en 22 ligt. Het nivo  $L_2$  in figuur 30 ligt 15 dB. ( $=10 \cdot \log(\frac{765}{25})$ ) hoger. Dat is geheel te verklaren met de definities van  $L_1$  en  $L_2$ , én met het feit dat (in dit geval)  $\lambda$  klein is ( $< 0.4$ ).

De ligging van één van de 15 concentrische cirkels.  
Fig. 28 : bovenaanzicht; fig. 29 : zijaanzicht.



$L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 765 horizontale blaadjes in één vlak met  $H=4$  m. en  $a=0.1$  m.

Voor kleine waarden van  $k.a$  ( $ka < 4$ ) ligt  $L_3$  in figuur 30 tussen  $L_1$  en  $L_2$  in.

Vergelijken we de figuren 30 en 21 nog eens, dan zien we dat  $L_3$  (765 blaadjes) -  $L_3$  (25 blaadjes)  $\approx 23$  dB.  $\approx 15 \cdot \log\left(\frac{765}{25}\right)$ . Voor  $f > 2$  kHz.

slingert  $L_3$  om  $L_2$ . Daar geldt:

$L_2$  (765 blaadjes) -  $L_2$  (25 blaadjes)  $\approx 10$  dB.  $\approx 7 \cdot \log\left(\frac{765}{25}\right)$ .

We zien dus dat voor  $f < 1$  kHz. een verdubbeling van het bladaantal een verhoging van ongeveer 4.5 dB. en voor  $f > 2$  kHz. een verhoging van ongeveer 2 dB. geeft.

In de figuren 31 en 32 staan  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  berekend voor 765 horizontale blaadjes met respectievelijk  $a=0.07$  en  $a=0.04$  m.

Als we de figuren 31 en 32 vergelijken met figuur 30, zien we dat  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  in figuur 30 voor  $f < 2$  kHz. 6 dB. boven  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  in figuur 31 en 16 dB. boven  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  in figuur 32 liggen.

Dit is gelijk aan de bladgrootte-

verhouding:  $20 \cdot \log\left(\frac{0.1}{0.07}\right)^2 \approx 6$  dB.

en  $20 \cdot \log\left(\frac{0.1}{0.04}\right)^2 \approx 16$  dB. ....(11)

Dit is niet verwonderlijk omdat we

zagen dat voor kleine  $k.a.\lambda$  de geluiddruk evenredig is met het bladoppervlak (zie blz.23).

Voor  $f < 2$  kHz geeft een verdubbeling van het bladaantal bij  $a=0.07$  en  $a=0.04$  m. een verhoging van 4.5 dB. Verdubbelen we dus het bladaantal in figuur 31, dan zullen  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  4.5 dB. hoger liggen. Het totale bladoppervlak ( $= 2 \cdot 765 \cdot \pi \cdot (0.07)^2$ ) is dan gelijk aan het totale bladoppervlak van de 765 blaadjes met  $a=0.1$  van figuur 30 ( $765 \cdot \pi \cdot (0.1)^2$ ). De nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij de 1530 blaadjes met  $a=0.07$  liggen dan voor  $f > 2$  kHz. 6 dB. - 4.5 dB. = 1.5 dB. onder de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  van de 765 blaadjes met  $a=0.1$  (zie (11)).

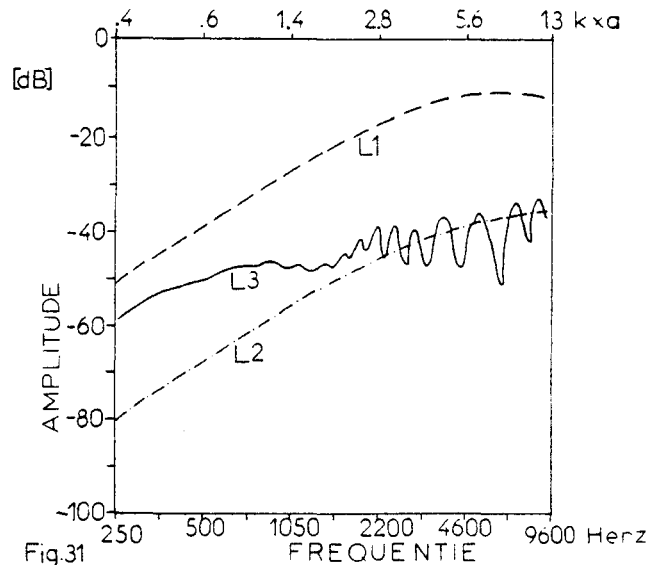


Fig.31  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 765 horizontale blaadjes in één vlak met  $H=4$  m. en  $a=0.07$  m.

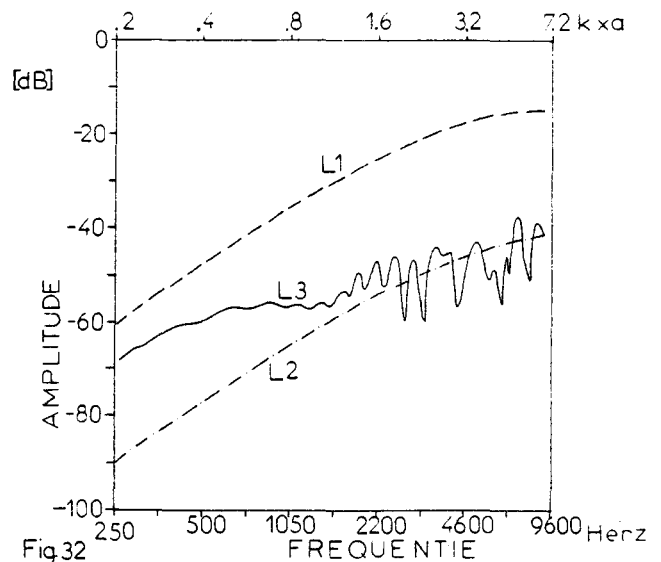


Fig.32  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 765 horizontale blaadjes in één vlak met  $H=4$  m. en  $a=0.04$  m.

Bij 4780 blaadjes met  $a=0.04$  m. is het totaal bladoppervlak ook even groot als bij 765 blaadjes met  $a=0.1$ . De nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 4780 blaadjes met  $a=0.04$  zullen voor  $f < 2$  kHz. ongeveer 12 dB. boven de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  van figuur 32, en dat is  $16 \text{ dB.} - 12 \text{ dB.} = 4 \text{ dB.}$  onder de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  van figuur 30. We zien dat voor  $f < 2$  kHz. bij horizontale blaadjes het verstrooide vermogen bij gelijk totaal bladoppervlak toeneemt met de bladgrootte. Voor  $f > 3$  kHz. slingert  $L_3$  in figuur 31 en 32 om  $L_2$ . De nivo's  $L_2$  van figuur 30 en figuur 32 verschillen daar ongeveer 4.5 dB. Een verdubbeling van het bladaantal geeft voor  $f > 3$  kHz. een verhoging van  $L_2$  met 2 dB., zodat ook voor  $f > 3$  kHz. bij gelijk totaal bladoppervlak de grootste blaadjes de meeste verstrooiing geven.

### 3.2.2.2 Bladeren met willekeurige bladstand.

Ook voor bladeren met een willekeurige bladstand zijn  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  berekend voor 765 blaadjes. In figuur 33 staan

$L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  voor 765 blaadjes met  $a=0.1$  m. We zien dat  $L_1$  en  $L_3$  in figuur 33 (willekeurige bladstand) voor  $f < 1$  kHz. iets onder  $L_1$  en  $L_3$  in figuur 30 (horizontale bladstand) liggen.

Het nivo  $L_2$  is in figuur 33 aanvankelijk hoger, maar voor  $f > 1.5$  kHz. ligt  $L_2$  in figuur 30 juist hoger.

$L_3$  wijkt in figuur 33 af van  $L_3$  in figuur 30 voor  $f > 1.5$  kHz.

Bovenstaande is in overeenstemming met wat we zagen bij 25 blaadjes.

In figuur 34 staan de nivo's  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  voor 352 blaadjes met  $a=0.1$  m. en in figuur 35 deze nivo's bij 125 blaadjes met  $a=0.1$  m. Vergelijken we de figuren 33 t/m 35 dan zien we dat ook hier geldt dat het nivo  $L_2$  toeneemt met het bladaantal volgens  $L_{2,n1} - L_{2,n2} = 10 \cdot \log\left(\frac{n1}{n2}\right)$ .

Voor  $f > 1.5$  kHz. wordt dit verschil kleiner.

De nivo's  $L_3$  zullen voor  $f < 1$  kHz., waar  $L_3$  niet om  $L_2$  slingert, toenemen met

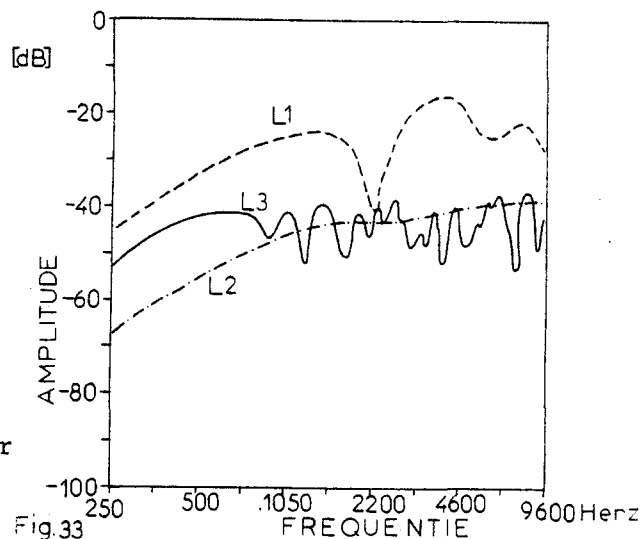


Fig.33  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 765 blaadjes met willekeurige bladstand met  $H=4$  m. en  $a=0.1$  m.

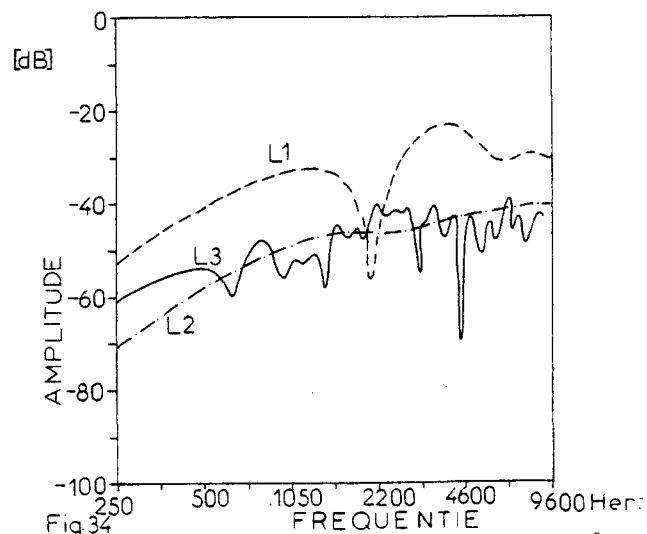


Fig.34  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 352 blaadjes met willekeurige bladstand met  $H=4$  m. en  $a=0.1$  m.

meer dan  $10 \cdot \log\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ , maar minder dan  $20 \cdot \log\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ .

We zien dat, zoals te verwachten is,  $L_2$  zich bij (veel) blaadjes met willekeurige bladstand gedraagt als de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma_{\text{rand}}$  (zie fig.3 blz. 24).

In fig.36 staan de nivo's voor 765 blaadjes met een willekeurige bladstand en  $a=0.07$ . Het totale bladopp. in fig. 36 is gelijk aan het totale bladopp. van de 352 blaadjes met  $a=0.1$  m. (fig.34). Voor  $f > 1.5$  kHz. slingeren de nivo's  $L_2$  rond elkaar. Voor  $f < 1.5$  kHz ligt het nivo  $L_3$  ongeveer 5dB. hoger in fig.34 (de grootste blaadjes!). Fig.35 is vergelijkbaar met 765 blaadjes met  $a=0.04$  m. Hier vinden we: voor  $f < 2$  kHz. ligt  $L_3$  10 dB. hoger. (niet getekend).

In figuur 37 staan  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  voor 765 blaadjes met een willekeurige bladstand en  $a=0.1$  m. op 8 m. hoogte.

Als we figuur 37 met figuur 33 vergelijken, dan zien we dat voor  $f < 1.5$  kHz. de verstrooiing bij hoger gelegen blaadjes (veel) kleiner is. Voor  $f > 1.5$  kHz. liggen  $L_3$  in fig.33 en  $L_3$  in fig. 37 even hoog.

### 3.2.2.3 Conclusie §3.2

Het geluiddrukknivo in het observatiepunt is in de grafieken telkens  $L_3$ . Als (heel) veel blaadjes met een willekeurige bladstand  $L_3$  bepalen, en de blaadjes staan ver van elkaar verwijderd, zal het nivo  $L_3$  het nivo  $L_2$  volgen, en kunnen we de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma_{\text{rand}}$  gebruiken om de invloed van de bladgrootte en het bladaantal te bepalen.

Liggen veel blaadjes dicht bij elkaar, dan zijn de verschillen in weglengten van de golven, die naar de verschillende blaadjes gaan, voor lage frequenties klein ten opzichte van de golflengte. Dit kan voor frequenties  $1 < \text{kHz}$ . een aanzienlijke verhoging van het geluidnivo  $L_3$  ten opzichte van het nivo  $L_2$  geven.

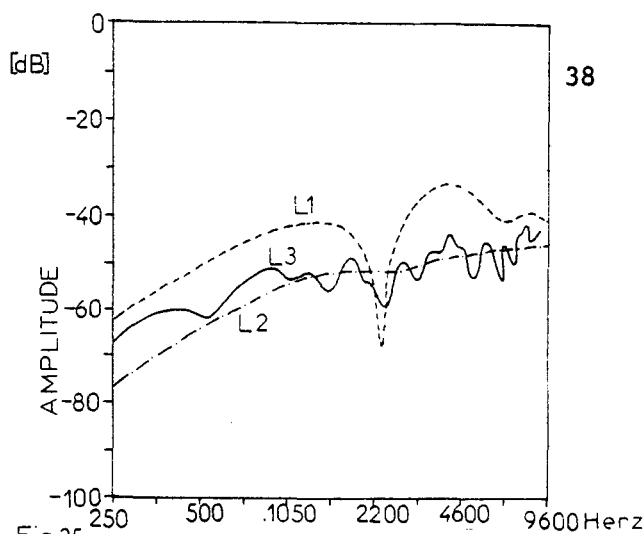


Fig.35  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 125 blaadjes met willekeurige bladstand met  $H=4$  m. en  $a=0.1$  m.

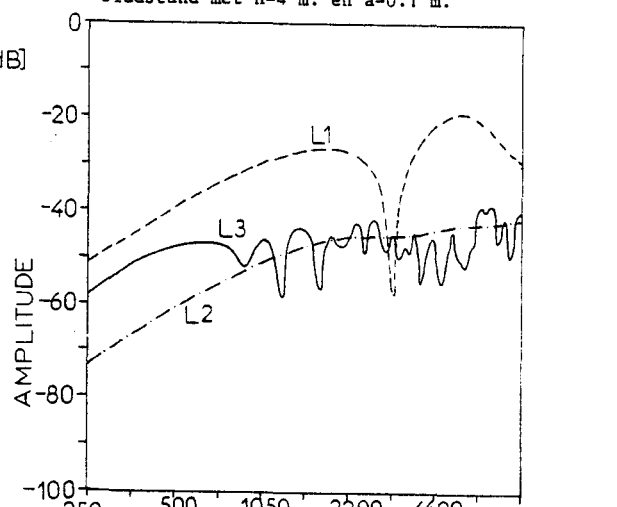


Fig.36  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 765 blaadjes met willekeurige bladstand met  $H=4$  m. en  $a=0.07$  m.

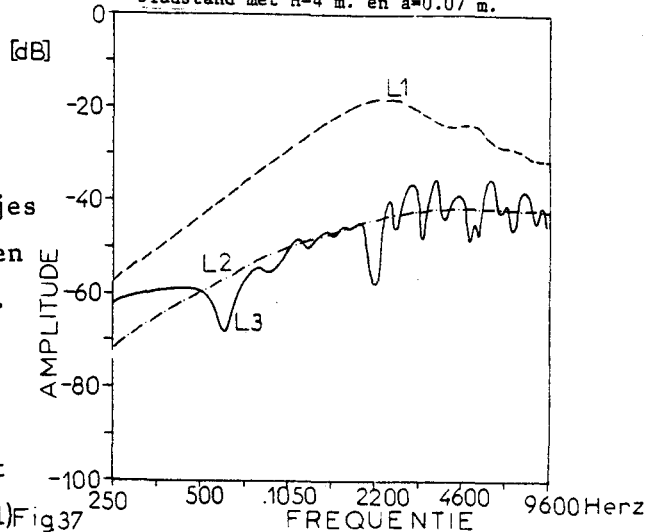


Fig.37  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  bij 765 blaadjes met willekeurige bladstand met  $H=8$  m. en  $a=0.1$  m.

De verstrooiing is in dat geval bij veel lagere frequenties van invloed op het geluidnivo, dan op grond van de verstrooiingsdoorsnede  $\sigma_{rand}$  te verwachten is.

Voor blaadjes met een horizontale bladstand is voor het hele frequentiegebied (250 Hz <  $f$  < 40 kHz.) waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd de verstrooiing bij gelijkblijvend totaal bladoppervlak groter naarmate de bladgrootte toeneemt.

Voor blaadjes met een willekeurige bladstand is dat afhankelijk van de onderlinge bladafstand en de bladgrootte. Voor de uitgevoerde berekeningen ( $a=0.1$  en  $a=0.07$ , bladafstand 0.25 m.) is alleen voor  $f < 1.5$  kHz. de verstrooiing aan de blaadjes met  $a=0.1$  m groter bij gelijkblijvend totaal bladoppervlak.

### 3.3 Boom, Bodem en Scherm

In 3.2 is voor een aantal "bomen" het geluidnivo in een observatiepunt berekend. Dit geluidnivo wordt alleen veroorzaakt door de verstrooiing aan de blaadjes. Het geluidnivo in het observatiepunt wordt in werkelijkheid ook bepaald door directe golven, of, ingeval er een scherm staat, de afbuiging aan het scherm, én de demping- en reflectie van de bodem.

De invloed van de aan de bladeren verstrooide golven op een situatie met scherm en bodem is berekend volgens de in de rekenmethode genoemde methode.

In figuur 38 staan drie nivo's:

$L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$

$L_s$  is de demping van het scherm en de bodem berekend met de in Hfst.2 genoemde rekenmethode (zie blz 19).

$L_b$  is de demping van de situatie waarin boven het scherm en de bodem 765 blaadjes liggen (zie fig.39)

$L_s$  en  $L_b$  zijn getekend ten opzichte van het nivo  $L_o$ .  $L_o$  is het nivo wat in M berekend zou zijn als bodem, boom en scherm afwezig waren. In de figuren 38 en 40 t/m 42 is dus  $L_o$  voor alle frequentie 0 dB.!

Het nivo  $L_v$  is het verschil  $L_b - L_s$ .

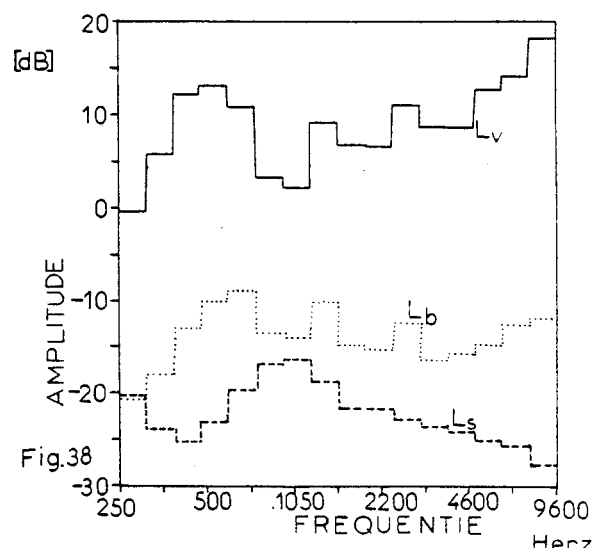
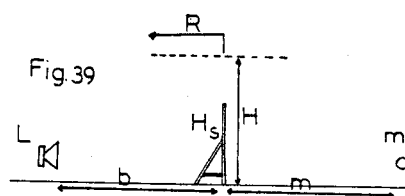


Fig. 38  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  bij 765 blaadjes met  $a=0.1$ , schermhoogte: 2.4 m. en boomhoogte  $H=4$  m.



De ligging bij de blaadjes bij de berekeningen.

In figuur 38 is duidelijk te zien dat in de situatie, zoals getekend in figuur 39, de verstrooiing aan de (zeer grote) bladeren van grote invloed is op het geluidnivo achter het scherm.

De verhoging van het verschilnivo  $L_v$  rond 500 Hz. wordt veroorzaakt door de kleine onderlinge bladafstand, die zorgt voor een (aanzienlijke) verhoging van het nivo  $L_3$  bij frequenties  $f < 1$  kHz..

Bij 4780 blaadjes met  $a=0.04$  m. is het totaal bladoppervlak gelijk aan dat van 765 blaadjes met  $a=0.1$  m.. Gezien de resultaten van de vorige paragrafen kunnen we verwachten dat het nivo van de aan deze 4780 blaadjes verstrooide golven voor  $f < 2$  kHz. tot 5 dB. (bij heel lage frequenties) lager is dan het nivo bij 765 blaadjes met  $a=0.1$  m. Voor  $f > 2$  kHz. zal het effect van 4780 blaadjes met  $a=0.04$  vergelijkbaar zijn met de resultaten getekend in figuur 38.

In figuur 40 ook de drie nivo's  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$ , nu voor 765 blaadjes met  $a=0.04$  m. ( $H=4$  m.). De verstrooiing is aanzienlijk afgenomen, en de aanwezigheid van de boom is alleen voor frequenties  $f > 8$  kHz. van invloed op de situatie (niet omdat de verstrooiing bij die hoge frequenties toeneemt, maar omdat de schermdeemping toeneemt).

In figuur 41 staan de nivo's  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  bij 765 blaadjes met  $a=0.1$  m. die op een hoogte van 8 m. liggen (zie ook fig.37). Vergelijken we deze figuur met figuur 38 (waar  $H=4$  m.) dan valt op dat het verschilnivo nu rond 500Hz. minder sterk verschilt van 0. Hoger gelegen blaadjes zullen dus voor  $f < 1$  kHz. minder en voor  $f > 1$  kHz. evenveel van invloed zijn als lager gelegen blaadjes

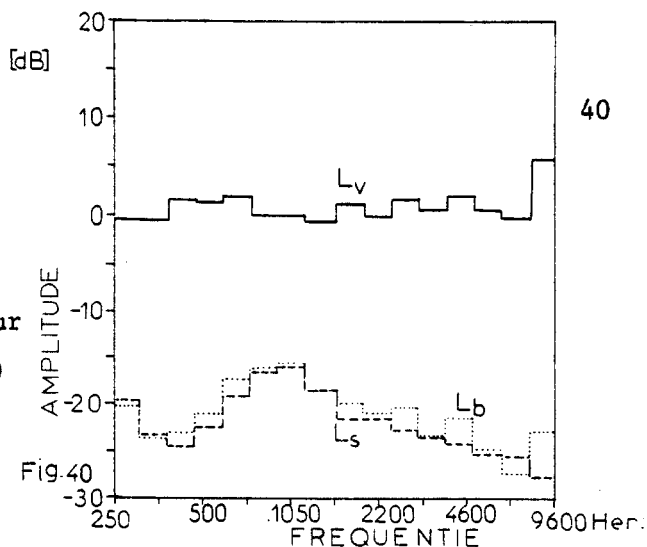


Fig.40  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  bij 765 blaadjes met  $a=0.04$ , schermhoogte :2.4 m. en boomhoogte 4 m.

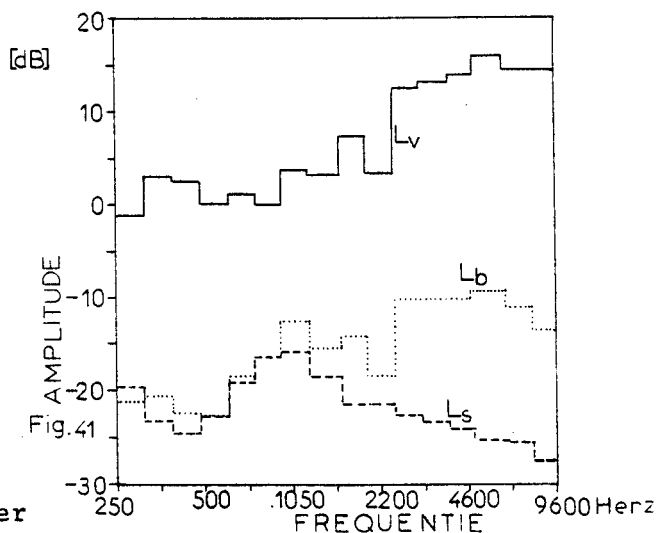


Fig.41  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  bij 765 blaadjes met  $a=0.1$ , schermhoogte 2.4 m. en boomhoogte 8 m.

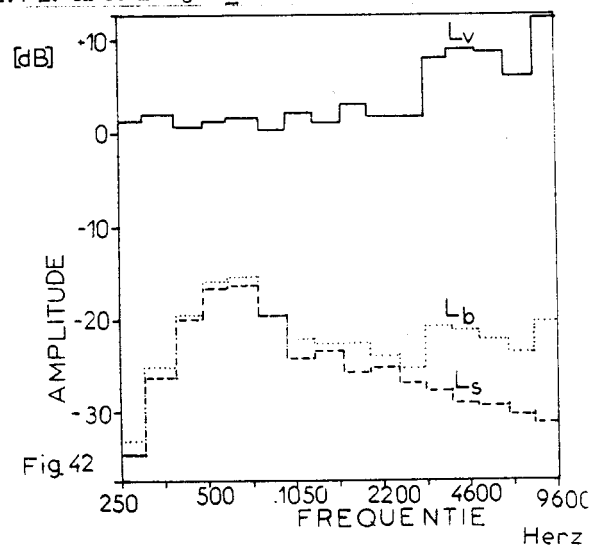


Fig.42  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  bij 765 blaadjes met  $a=0.04$ , schermhoogte 3.5 m. en boomhoogte 4 m.

In figuur 42 tenslotte de 765 blaadjes met  $a=0.04$  (en  $H=4$  m.), nu bij een scherm van 3.5 m. (in plaats van 2.4 m.). Vergelijken we fig.42 met figuur 40 ( $a=0.04, H=4$  m. , schermhoogte 2.4 m.), dan zien we dat door de grotere schermdemping bij  $f > 3$  kHz. (in plaats van 8 kHz., fig.40) de verstrooiing aan de blaadjes van invloed is op het geluidsnivo.

We zien dat bij relatief weinig bladeren (b.v. 4780 bladeren met  $a=0.04$  m.) er al sprake is van invloed (tot 15 dB. in een tertsband) op de akoestiese situatie achter een scherm, als bij het scherm een boom staat. Als de bladeren dicht bij elkaar hangen, kan door interferentie óók laagfrequent ( $< 1$  kHz.) de verstrooiing aan blaadjes van invloed zijn.

In Hoofdstuk 6, waarin berekeningsresultaten en meetresultaten worden vergeleken, kunnen we bovenstaande resultaten vergelijken met praktijk-situaties.



#### 4. Meetopstelling en meetmethode

##### 4.1 Inleiding

De meetmethode is ontwikkeld om de grootte van de verstrooiing van akoestische golven door verschillende boomsoorten te kunnen meten.

Om de meetomstandigheden bij de diverse meetlocaties zoveel mogelijk vergelijkbaar te maken, en metingen en berekeningen te kunnen vergelijken is er gekozen voor metingen aan solitaire (alleenstaande bomen), met een eigen

bron (luidsprekers). In één geval is aan twee naast elkaar staande bomen gemeten (omdat solitaire met grote bladeren moeilijk te vinden zijn). Uit metingen (medio 1981) aan een schaalmodel werd al snel duidelijk dat de bijdrage aan het geluidsnivo bij de mikrofoon M van de door de bron verstrooide golven bijzonder klein is ten opzichte van de direkte golven (fig.1).

In recente literatuur (litt.11, Bullen en Fricke) wordt dit bevestigd voor metingen aan echte bomen. Wordt in de meetopstelling een scherm aangebracht (fig.2) dan worden de direkte golven gedempt en zal het aandeel in de geluidsdruk in M ten gevolge van de verstrooide golven veel groter zijn. Situaties waarin solitaire van verschillende soort bij een geluidscherm staan zijn zeldzaam. Vandaar dat gekozen is voor een verplaatsbaar scherm wat onder de te meten boom geplaatst kan worden.

Op deze manier is de geluidoverdracht bij 6 solitaire en een stel (2) bomen gemeten (6 verschillende soorten). De geluidoverdracht bij een dergelijke situatie wordt bepaald door de boom, het scherm, de bodem en de meteorologische omstandigheden. Om de invloed van de boom vast te stellen zijn telkens twee metingen verricht, één bij de boom, en één bij een wat bodem, scherm en meteorologische omstandigheden betreft identieke situatie, maar nu zonder boom. Het verschil van beide situaties wordt dan veroorzaakt door de aanwezigheid van de boom.

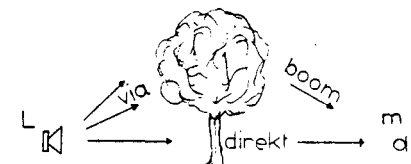


Fig.1

Direkte golven en verstrooide golven.

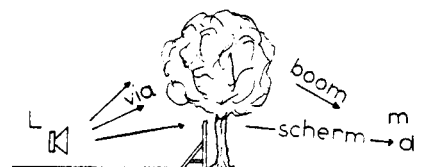


Fig.2

Door het scherm gedempte golven en verstrooide golven

#### 4.2 De opstellingen met het scherm

Het verplaatsbaar scherm bestaat uit 10 platen spaanplaat (2.44x1.22m.) en is 12.20m breed en 2.44m. hoog (fig.4). De oppervlaktemassa van het scherm is  $\sim 9\text{kg/m}^2$ .

In fig.3 het scherm onder een boom, in fig.4 het scherm alleen. De invloed van de eindige lengte van het scherm vindt u in de meetresultaten (Hfst.5).

De situatie zonder boom werd altijd op dezelfde dag, en op zo kort mogelijk afstand van de situatie met boom gemeten: door het scherm ongeveer 40 m. in de lengte te verplaatsen was meestal de bodemdemping en het meteoraam goed vergelijkbaar.

Doordat de bodem in alle meetsituaties erg hobbelig was (weilanden), was het bijzonder moeilijk de luidspreker- en mikrofoonhoogten goed te reproduceren. Luidspreker- en mikrofoonhoogten worden namelijk gekarakteriseerd door de hoogten ten opzichte van het reflektiepunt en de bovenkant van het scherm. Bij het vergelijken van twee metingen kan dit, door het verschil in interferentiepatroon tussen de direkte golven en de bodemreflektie, aanleiding zijn tot grote verschillen.

De gebruikelijke oplossing is het kiezen van een grote luidspreker- en mikrofoonhoogte, maar dan zou in dit geval het scherm geen functie meer hebben. Een mogelijke oplossing is het energeties middellen van meerdere meetresultaten met verschillende luidspreker- en mikrofoonhoogten.

Alle metingen zijn verricht met twee verschillende luidspreker- en twee verschillende mikrofoonhoogten. De luidsprekerhoogten ten opzichte van de bodem zijn 50 cm. en 75 cm.; de mikrofoonhoogten zijn 60 cm. en 70 cm.. Meer bijzonderheden over deze meetmethode staan in hoofdstuk 5: De meetresultaten.

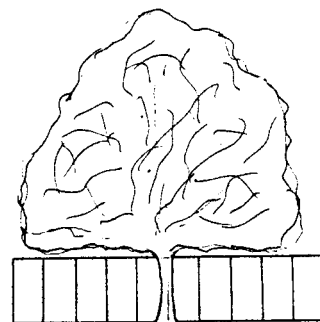


FIG.3 De meetsituatie met boom



FIG.4 De meetsituatie zonder boom

In figuur 6 een overdrachtsituatie (bij een hollandse Eik in Knegsel N.B.) met de twee luidsprekers en mikrofoons.

In figuur 7 de situatie zónder boom, 40 meter verder. In deze figuren is de luidspreker- en mikrofoonafstand tot het scherm 10 m.. In elke meetsituatie zijn ook metingen bij mikrofoonafstanden van 20 m. en 30 m. verricht. De luidsprekerafstand was in alle gevallen 10 m..

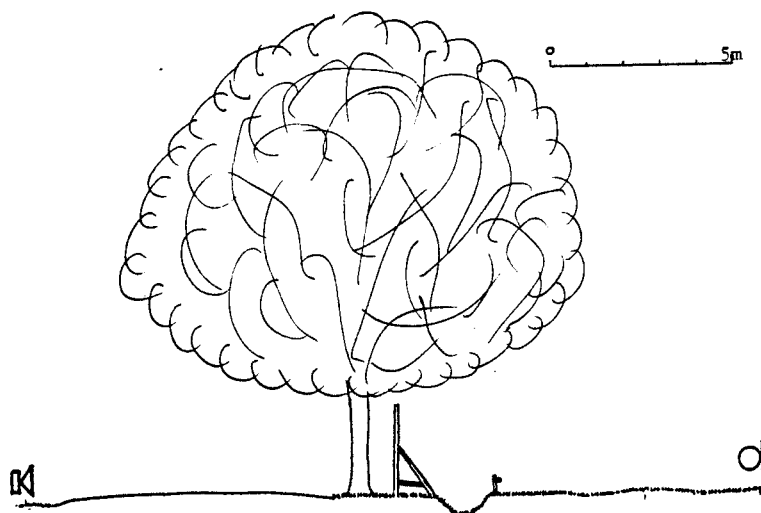


Fig.6

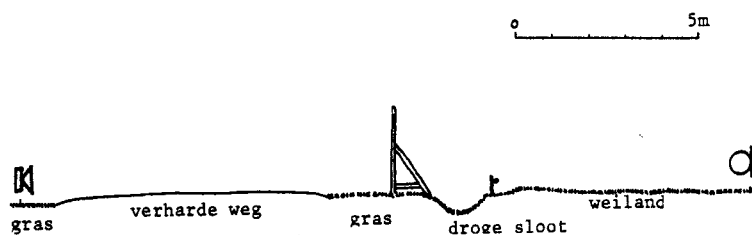


FIG.7 Een overdrachtsituatie (behorend bij fig.6) zonder boom.

### 4.3 Bronsignaal en signaalverwerking

Het ingangssignaal bij de metingen is een sweep- of slingersignaal. De frequentie bij dit signaal verloopt van beginfrequentie  $f_b$  tot eindfrequentie  $f_e$  lineair volgens de vergelijking:

$$w_o(t) = \sin(2\pi f_b t + 2\pi \alpha t^2) \dots\dots\dots (29)$$

waarin  $\alpha = \frac{1}{2}(f_e - f_b)/T_s$

$t$  = de tijd vanaf het begin van de sweep (s.)

$T_s$  = de totale sweeptijd (=100 ms.)

$f_b = 100\text{Hz.}$  en  $f_e = 4000\text{Hz.}$

De korte sweeptijd heeft als voordeel dat reflecties aan obstakels die op meer dan 40 m. van de boom liggen geëlimineerd kunnen worden. (elk meetsignaal duurt 200 ms.).

Bovendien is bij een dergelijk signaal binnen de verlangde frequentieband de absolute waarde van het zendsignaal  $w_o(t)$  voor elke frequentie even groot, met andere woorden: de sweep heeft in die frequentieband hetzelfde spectrum als de pulsfunctie.

De sweep is met tussenpozen van twee seconden, opgenomen op een bandrekorderband. De signalen van de bandrekorder (Sony Elcaset, EL-D8) worden via een 50 watt-vermogensversterker toegevoerd aan de bron, een luidspreker (9710m, Philips).

In figuur 8 staat de opstelling aan luidsprekerzijde getekend. De responsies van de uitgezonden signalen worden opgenomen door een mikrofoon ( $\frac{1}{2}$  inch) met windbol. De mikrofoon is gemonteerd op een geluidsdrukmeter (B&K 2215). Via de geluidsdrukmeter worden de signalen A-gefilterd op een tweede bandrekorder (ook Sony Elcaset) vastgelegd. Het hoge nivo van de (zeer) laag frequente akoestiese ruis beïnvloedt zodanig de gevoeligheidsinstelling van de geluidmeter dat een A-filter is gebruikt. In figuur 9 de meetopstelling aan ontvangstzijde.

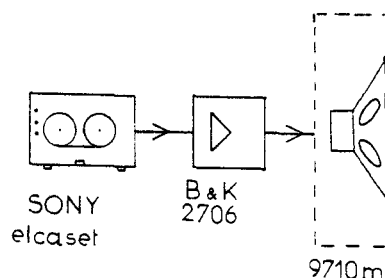


FIG.8 De opstelling aan luidsprekerzijde: De SONY Elcaset EL-D8; de vermogensversterker B&K 2706 en de luidspreker 9710m (in behuizing).

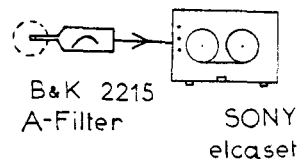


FIG.9 De opstelling aan mikrofoonzijde: De geluidnivometer B&K 2215 en de SONY Elcaset EL-D8.

Omdat het wel kan gebeuren dat een meetsignaal plotseling (en ongemerkt) verstoord wordt door een insect of andere akoestiese ruisbron, worden voor elke meting 15 sweepsignalen opgenomen. Tien van deze signalen

worden geanalyseerd: via een anti-alyasingfilter om vouweffekten te voorkomen<sup>1)</sup> wordt elk signaal in een A-D converter (Biomation 805) opgeslagen in 2048 punten (bemonsterfrequentie 10 kHz.). De computer (HP-1000) neemt al deze punten over, en middelt de 10 signalen. Frequentiespektra, geluidnivo's en verschillen in geluidnivo's kunnen nu berekend worden. In figuur 10 staat de opstelling voor de verwerking van de signalen in het laboratorium getekend.

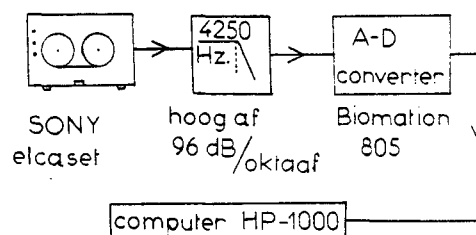


FIG.10 De opstelling in het laboratorium.

<sup>1)</sup> Het deel van het frequentiespectrum boven 5 kHz. (Nyquist-frequentie) wordt, door de fourier-transformatie van het bemonsterde signaal, om 5 kHz. teruggevouwen in het laagfrequente deel. Dit is het vouweffekt. Het hoogfrequente deel is ruis; met een zogenaamd anti-aliasingfilter kan deze ruis worden verzwakt.

#### 4.4 De boom- en boomsoortvariabelen

Als de meetresultaten uitwijzen dat de aanwezigheid van een (bepaalde) boom aanleiding is tot significante verschillen, is het natuurlijk interessant te weten welke fysische variabelen van de boom en de bladeren verband kunnen houden met de significante verschillen. Deze variabelen kunnen bovendien in de rekenmethode worden gebruikt. Een door biologen veel gebruikte variabele van de boom is de zogenaamde LAI (Leaf Area Index), die voor veel bomen ongeveer gelijk is. De LAI is de verhouding van het totale bladoppervlak van de

hele boom, en het oppervlak van de loodrechte projectie van de boomkroon op de grond.

Daarom zijn voor elke boom de fysische variabelen bepaald, die verband kunnen houden met de verstrooiing door akoestiese golven.

Bepaald zijn: -De gemiddelde bladgrootte ( $m^2$ )

-De gemiddelde oppervlaktemassa van de bladeren ( $kg/m^2$ )

-De boomhoogte (m)

-De hoogte van de onderkant van het bladerdek (m)

-De gemiddelde bladdichtheid ( $1/m^3$ )

-De grootste kroondiameter (m)

-De LAI

De gemiddelde bladgrootte en bladmassa zijn bepaald door het totale bladoppervlak en bladmassa (versgewicht) van een aantal bladeren te meten (100-200 bladeren). De verdeling van bladgrootte en bladmassa heb ik niet gemeten. In de literatuur is daar ook weinig over bekend (litt.28,29 en 31).

De gemiddelde bladdichtheid van het bladerdek kan bepaald worden als de bladstandverdeling en de LAI bekend zijn. De bladstand wordt bepaald door de hoeken die het blad maakt met het horizontale vlak en een (te kiezen) verticaal vlak. Voor de bladstand is aangenomen dat deze hoeken willekeurig zijn (litt.31,35).

Om een schatting van het LAI te maken, moet het percentage van het loodrecht op de boomkroon vallende licht gemeten worden, dat ongestoord door het bladerdek op de bodem onder de boom valt ( $=I/I_0$ ).

Bij een willekeurige bladstand geldt hiervoor (litt.35):

$$I/I_0 \approx (1 - s \cdot \frac{2}{\pi}) LAI/s \dots\dots\dots (30)$$

waarin  $s$  de bladoppervlakedichtheid is: Als we een boom opgedeeld denken in (vele) bladlagen, dan is  $s$  het LAI van één laag (zie appendix 2, blz. ) .

$$\text{Voor } s \text{ geldt } s = \left( \frac{b_0 \cdot (LAI)^2}{h^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (31)$$

waarin  $b_0$  ( $m^2$ ) het gemiddeld bladoppervlak, en  $h$  de hoogte van de boom. (zie appendix 2, blz. í )

Het percentage  $I/I_0$  kan gemeten worden met behulp van foto's die onder de boomkroon, met de kamera loodrecht omhoog gericht, genomen zijn.

Bij de meetresultaten zullen de variabelen van elke boom vermeld worden.

## 5. Meetresultaten

In dit hoofdstuk staan de resultaten van metingen bij zes situaties met een solitair en één situatie met twee bomen. Alle metingen zijn verricht met de in hoofdstuk 4 beschreven meetmethode in de periode van begin juni tot eind augustus 1982.

Vóór de meetresultaten ter sprake komen, eerst iets over het signaal-ruis nivo, de meteorologische omstandigheden en de reproduceerbaarheid van de metingen.

### 5.1 Het signaal-ruis nivo

De grootste ruisbron is de akoestiese ruis ten gevolge van buitenge-luiden (lucht- en wegverkeer, vogels, voorbijgangers etc.). Bij elke meting is het ruisnivo opgenomen. Met de in hoofdstuk 4 beschreven meetmethode en verwerking van de meetresultaten, en door een meting af en toe te onderbreken tijdens het passeren van een ruisbron (traktor, vliegtuig, etc.), is het Signaal-Ruis nivo bij alle metingen voor de frequentie tussen 180 Hz. en 4000 Hz. minimaal 10 dB.

### 5.2 Meteorologische omstandigheden

Elk stel meetseries (3 metingen "met boom", en 3 metingen "zonder boom") is op één dag uitgevoerd.

Alle meetseries (een meetserie bestaat uit drie metingen; een meting bestaat uit ongeveer 15 signalen) zijn in de middag (na 12 uur) gedaan. De luchttemperatuur op de meetdagen was  $22^{\circ}\text{C}.$  $\pm 5^{\circ}\text{C}.$  de luchtvochtigheid was  $50\% \pm 10\%.$

Speciale aandacht is besteed aan de windsnelheid. Dagen waarop de gemiddelde windsnelheid voldoende klein is (minder dan 2 m/s.), zijn zeldzaam. Met een cup-anemometer is om de 10 seconden de windsnelheid bij het scherm gemeten, zodat op dagen met een gemiddelde windsnelheid boven 2 m/s in de winstille perioden toch gemeten kon worden.

Alle meetseries zijn opgenomen bij een windsnelheid (bij het scherm) kleiner dan 2 m/s.

Op geen van de dagen is er neerslag geweest (ook niet in de ochtend), en het weer is over het algemeen zonnig geweest.

De meetomstandigheden zijn dus zowel voor de metingen als voor de onderzoekers gunstig geweest.

### 5.3 De Reproduceerbaarheid

Omdat telkens twee metingen vergeleken worden, "met boom" en "zonder boom", is het belangrijk dat de meetmethode goed gereproduceerd kan worden. De drie belangrijkste oorzaken die de reproduceerbaarheid nadelig kunnen beïnvloeden zijn:

- 1) Een slechte reproductie van het zendsignaal
- 2) Een verandering in de meteorologische omstandigheden
- 3) Een onnauwkeurigheid in de plaatsbepaling van luidsprekers en microfoons.

- ad 1) Metingen in de dode kamer met de meetopstelling hebben aangetoond dat de meetmethode daar goed reproduceert: voor frequenties tussen 180 Hz. en 4000 Hz. zijn de verschillen tussen twee meetseries kleiner dan 1 dB.
- ad 2) De meteorologische omstandigheden zijn goed geweest en, op de windsnelheid na, konstant.

De windsnelheid is bij het scherm voortdurend gemeten. De indruk bestaat dat bij de luidsprekers of bij de microfoons de windsnelheid soms hoger dan 2 m/s is geweest. Met één windsnelheidsmeter is het niet mogelijk geweest die indruk te verifiëren.

De windrichting is alléén bij het begin van de metingen gemeten. In hoeverre de windrichting wisselt is niet vastgesteld.

Omdat bij alle metingen het scherm evenwijdig aan prikkeldraad of een weg geplaatst moest worden, is het niet mogelijk geweest in alle gevallen met wind mee te meten.

De 15 meetsignalen waaruit elke meting van een meetserie bestaat verschillen echter in een tertsband onderling minder dan 3 dB.

Juist omdat de windsnelheid zo snel wisselt (en het opnemen van een meting ongeveer 10 minuten duurt), mogen we veronderstellen dat bovengenoemde veranderingen in de windsnelheid van kleine invloed zijn geweest op de reproduceerbaarheid (minder dan 3 dB.).

- ad 3) De onnauwkeurigheid in de plaatsbepaling kan op twee manieren de meetresultaten beïnvloeden. Een is het gevolg van de eindige lengte van het scherm (de horizontale plaatsbepaling), de andere het gevolg van de ongelijkheid van de bodem (verticale plaatsbepaling).

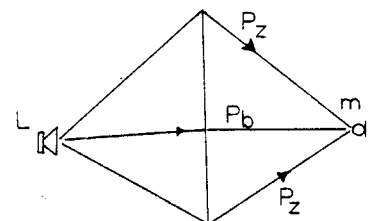


Fig.1

$p_z$ : de geluidsdruk in M ten gevolge van de afbuiging aan de zijkant van het scherm,  
 $p_b$ : de geluidsdruk in M ten gevolge van de afbuiging aan de bovenkant van het scherm.



1) Door de eindige lengte van het scherm draagt het geluid dat ombuigt aan de zijkanten van het scherm ook bij aan het geluidnivo achter het scherm. Omdat de weglengte van de golven die aan de zijkant afbuigen groter is kunnen faseverschillen ontstaan tussen  $p_z$  en  $p_b$  (zie fig.1). In het ongunstigste geval zijn bij de meting mét boom de fasen van  $p_z$  en  $p_b$  tegengesteld, en bij de meting zonder boom de fasen van  $p_z$  en  $p_b$  gelijk (of andersom). Dit geeft een verschil tussen de meting met boom en de meting zonder boom van maximaal 3 dB. (bij 170 Hz. en een mikrofoonafstand van 30 m.). Dit verschil wordt met toenemende frequentie kleiner (bij 500Hz. is het ongeveer 1.5 dB., zie appendix 2, blz. 1.).

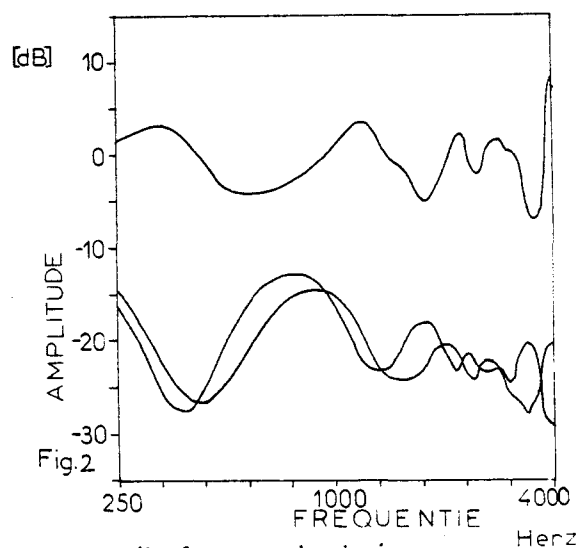
2) Om na te gaan in hoeverre een verandering in de mikrofoon- en bronhoogten van invloed is op de meetresultaten, zijn (met de in Hoofdstuk 2 genoemde rekenmethode, blz. 20 ) berekeningen uitgevoerd aan twee situaties : Een situatie met één bron en één mikrofoon, en een situatie met twee bronnen en twee mikrofoons.

Bij deze laatste situatie wordt het energetisch gemiddelde van de vier mogelijke situaties bronhoogte-mikrofoonhoogte als representatief voor de scherm- en bodemdemping genomen.

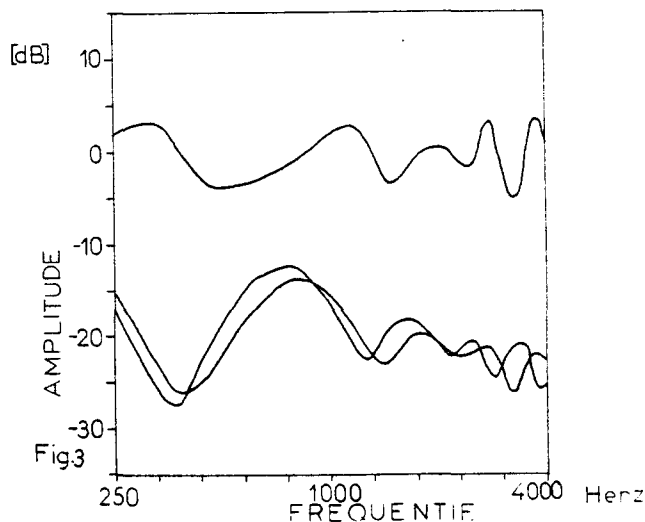
In figuur 2 staat het resultaat van twee berekeningen, én het verschil van die twee in de situatie met één bron en één mikrofoon: één berekening met bronhoogte 0.6 m. en mikrofoonhoogte 0.65 m., en één berekening met bronhoogte 0.7 m. en mikrofoonhoogte 0.75 m.. In figuur 2 is te zien dat

een verandering in de bron- en mikrofoonhoogte van 10 cm. in deze situatie vooral hoogfrequent (3-4 kHz.) een groot verschil kan geven in de meetresultaten (maximaal 9 dB.).

In figuur 3 staat het resultaat van berekeningen waarbij het energetisch



Een bron en een mikrofoon: twee berekeningen met 10 cm. verschil in hoogte en het verschilnivo.



Twee bronnen en twee mikrofoons (zie tekst).

gemiddelde van 2 mikrofoonhoogten en 2 bronhoogten wordt genomen: één berekening met mikrofoonhoogten 0.6 en 0.7 m. en bronhoogten 0.5 en 0.75 m., en één met mikrofoonhoogten 0.7 en 0.8 m. en bronhoogten 0.6 en 0.85 m.. De hoogfrequente verschillen zijn hier kleiner.

Bij een experiment op een vlak grasveld zijn ook dergelijke resultaten gevonden: bij een hoogteverandering van 10 cm. (zelfde bron- en mikrofoonhoogten als bij de berekeningen) is het verschil (hoogfrequent, tussen 3 en 4 kHz.) maximaal 8 dB. in de situatie met één bron en één mikrofoon, en maximaal 4 dB. bij het energetisch middelen van 4 metingen.

Overigens blijkt (uit zowel metingen als berekeningen) dit verschil nog kleiner te worden als over meer mikrofoon- en bronhoogten wordt gemiddeld. Voor de metingen neem ik aan dat bij het energetisch middelen van 4 metingen (2 luidsprekerhoogten en 2 mikrofoonhoogten) een meting gereproduceerd kan worden binnen 5 dB., als de afwijkingen in luidspreker- en mikrofoonhoogten minder dan 10 cm. zijn.

In de meeste meetsituaties zijn deze afwijkingen, door onregelmatigheden in de bodem, kleiner dan 10 cm..

Bij afwijkingen groter dan 10 cm., neemt het verschil in geluiddrukknivo vooral laagfrequent (onder 1 kHz.) sterk toe (bij 20 cm. tot 12 dB.).

In de meetsituaties, waarin de afwijkingen kleiner zijn dan 10 cm., beschouw ik een verschil van +7.5 dB. (of meer) tussen de geluiddrukknivo's in tertsbanden van een meting mét boom en een meting zónder boom als een positief signifikant verschil, veroorzaakt door de aanwezigheid van de boom. Als het verschil tussen het geluiddrukknivo in tertsbanden van de situatie mét boom en de situatie zónder boom -7.5 dB. is, beschouw ik dat als een negatief signifikant verschil.

Bij de meetsituaties waarbij de afwijkingen groter zijn (door grotere onregelmatigheden in de bodem), is een groter verschil signifikant (zie daarvoor de paragrafen 5.4.1 t/m 5.4.7).

We zien dat bij de metingen de onregelmatigheden in het oppervlak van de bodem de grootste bron van fouten is.

#### 5.4 De meetsituaties bij de bomen en de meetresultaten

Er zijn metingen verricht bij zes solitair en één paar van twee bomen, allen in de omgeving van Eindhoven: het paar Linden (Gijzenrooy, gemeente Geldrop), een Zomereik in Knegsel, een Els in Heeze, een Wilg in st. Oedenrode, een Zomereik in Heeze, een Berk in Waalre en een grove Den in Heeze.

In de paragrafen 5.4.1 t/m 5.4.7 staan de meetsituaties en de meetresultaten. De meetresultaten staan telkens weergegeven in drie grafieken: één grafiek waarbij de mikrofoonafstand 10 m. is, één waarbij de mikrofoonafstand 20 m. is, en een waarbij de mikrofoonafstand 30 m. is. De luidsprekerafstand is telkens 10 m.. In elke grafiek staan drie nivo's getekend als functie van de frequentie (tussen 180 Hz. en 3500 Hz.) in dB.:

$L_s$ : De gemeten demping van de situatie waarin het scherm alleen aanwezig is, uitsluitend gecorrigeerd naar de luidsprekerkarakteristiek en de afstand (1/r-wet).

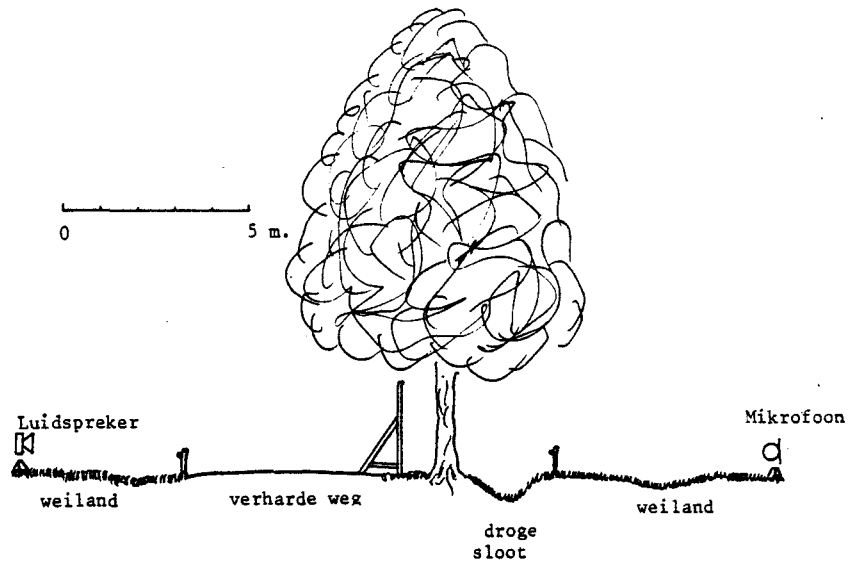
$L_b$ : De gemeten demping van de situatie waarin ook de boom aanwezig is, uitsluitend gecorrigeerd naar de luidsprekerkarakteristiek en de afstand.

$L_v$ : Het verschil  $L_b - L_s$

Alle drie de nivo's staan getekend in tertsbanden. Tertsbanden met een positief significant verschil (dus als  $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staan aangegeven met een +; tertsbanden met een negatief significant verschil (dus als  $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staan aangegeven met een -.

Per boom staan tevens in een figuur een situatieschets en de bijzonderheden aangegeven.

### 5.4.1 De grootbladige Linden (*Tilia Cordata*)



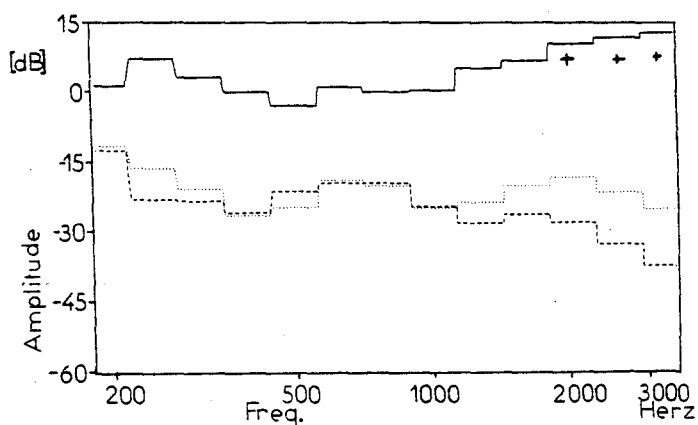
FIGUUR 4

De meetsituatie bij de Linden, bij een mikrofoonafstand van 10 m.

#### Bijzonderheden:

Datum meting	: 16-7-1982
Kroondiameter	: 8 m.
Hoogte boom	: 12.5 m.
LAI	: 7.6
Totaal bladopp.:	800 m <sup>2</sup> (alletwee de bomen samen)
Bodem	: Gras/Verhard
Bladdichtheid	: 300 bl./m <sup>3</sup>
Bladopp.	: 50 cm <sup>2</sup>
Bladopp.dichth.:	1.5 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Bladstraal	: 0.04 m.
Bladopp.massa	: 0.1 kg/m <sup>2</sup>
Bladvorm	: rond

De grootbladige Linden zijn van de gemeten bomen, de bomen met de grootste bladeren en de grootste bladoppervlaktedichtheid. Bovendien hebben de bomen samen het grootste totale bladoppervlak. De bladstand van de bomen neigt meer naar horizontaal dan naar verticaal. De twee Linden staan ongeveer 7 meter van elkaar, zodat de kronen in elkaar overlopen. In figuur 4 staat een situatieschets. In de figuren 5, 6 en 7 staan de nivo's  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  getekend.



$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....

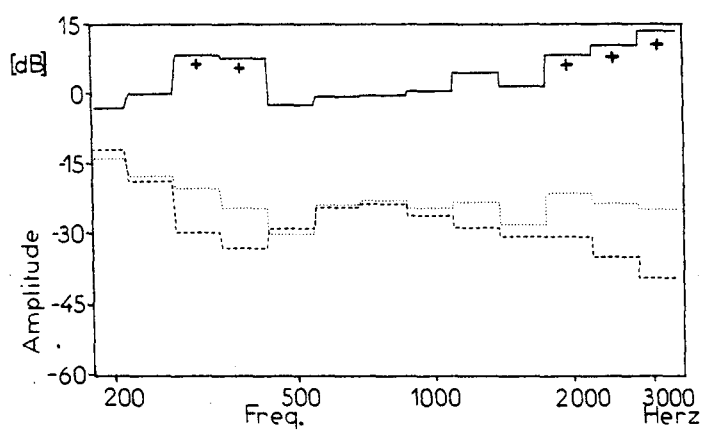
$L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----

$L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met .....

Figuur 5

Luidspr.afstand: 10 m.

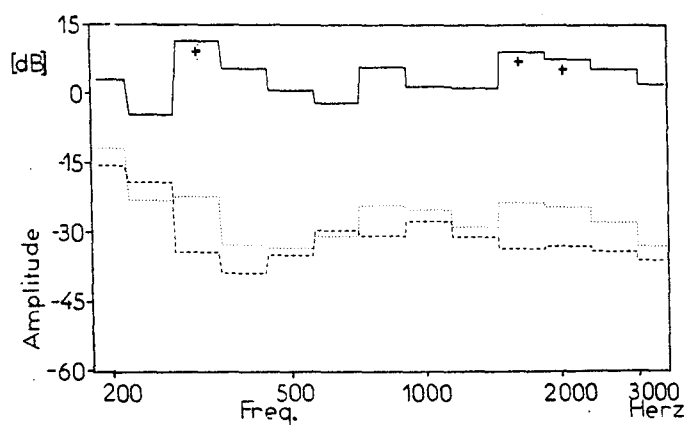
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 6

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



Figuur 7

Luidspr.afstand : 10 m.

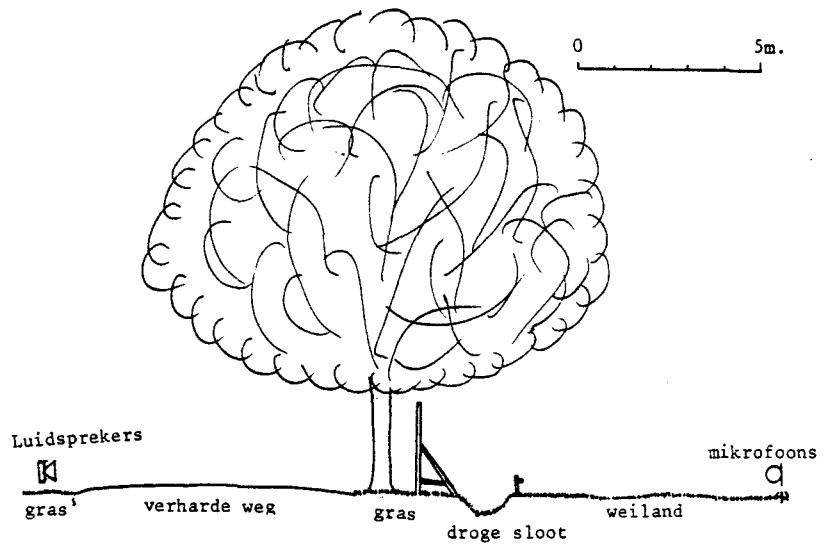
Mikrofoonafstand: 30 m.

Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.

Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.

Opvallend is dat in de buurt van 300 Hz. ook positieve significante verschillen worden gevonden. Een verschuiving van de bodemdempingsdip door foutieve instelling van luidsprekers- en mikrofoonhoogten kan deze verhoging maar gedeeltelijk verklaren. Bij de vergelijking van meet- en berekeningsresultaten blijkt dit verschil ook in de berekeningen naar voren te komen (Hfst.6). Bij de mikrofoonafstanden 10 m. en 20 m. neemt het (positieve) verschil, voor  $f > 1.5$  kHz. ( $k.a > 1.0$ ) toe met de frequentie. Bij de grootste mikrofoonafstand is dat niet zo duidelijk het geval.

We kunnen dus niet concluderen dat het effect toeneemt met de frequentie.

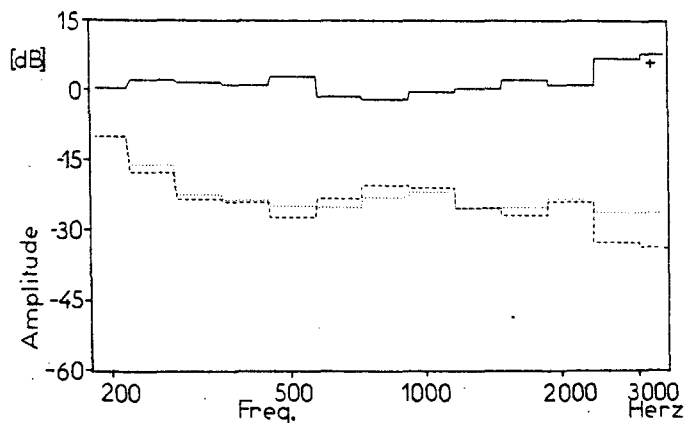
5.4.2 Zomereik te Knegsel (*Quercus Robur*)

FIGUUR 8 De situatie bij de Eik in Knegsel. De bolling van de weg is ongeveer 5 cm. hoog. De luidsprekers staan in de berm van de verharde weg.

Bijzonderheden:

Datum meting : 7-7-1982  
 Kroon diameter : 13 m.  
 Hoogte boom : 14 m.  
 LAI : 4.4  
 Totaal bladopp.: 600 m<sup>2</sup>  
 Bodem : Gras/Verhard  
 Bladdichtheid : 500 bl./m<sup>3</sup>  
 Bladopp. : 12 cm<sup>2</sup>  
 Bladopp.dichth.: 0.6 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>  
 Bladstraal : 0.02 m.  
 Bladopp.massa : 0.16 kg/m<sup>2</sup>  
 Bladvorm : gelobd

Bij deze Eik is het bladoppervlak veel kleiner dan bij de Linden. De bladstand is geheel willekeurig. Het totaal bladoppervlak is én kleiner én over een groter volume verspreid dan bij de Linden. In figuur 8 staat de situatieschets, in de figuren 9, 10 en 11 staan de meetresultaten.

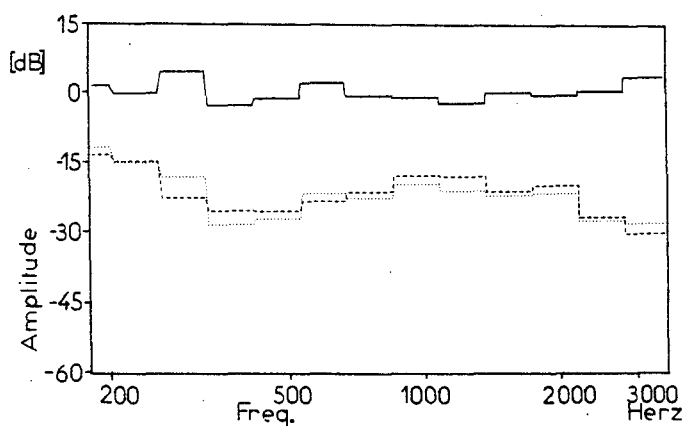


$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....  
 $L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----  
 $L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met ———

Figuur 9

Luidspr.afstand: 10 m.

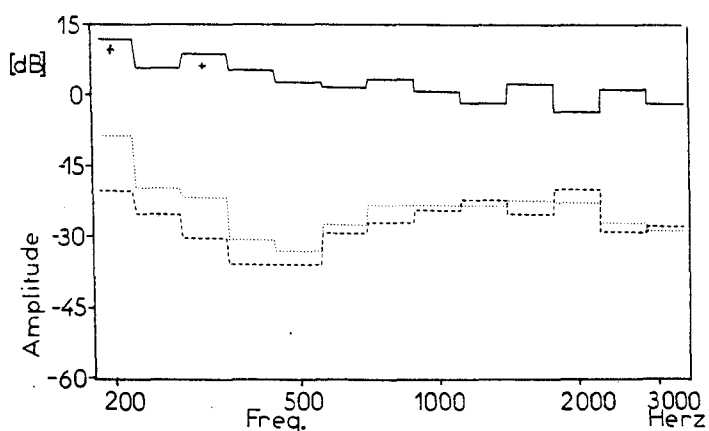
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 10

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



Figuur 11

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand: 30 m.

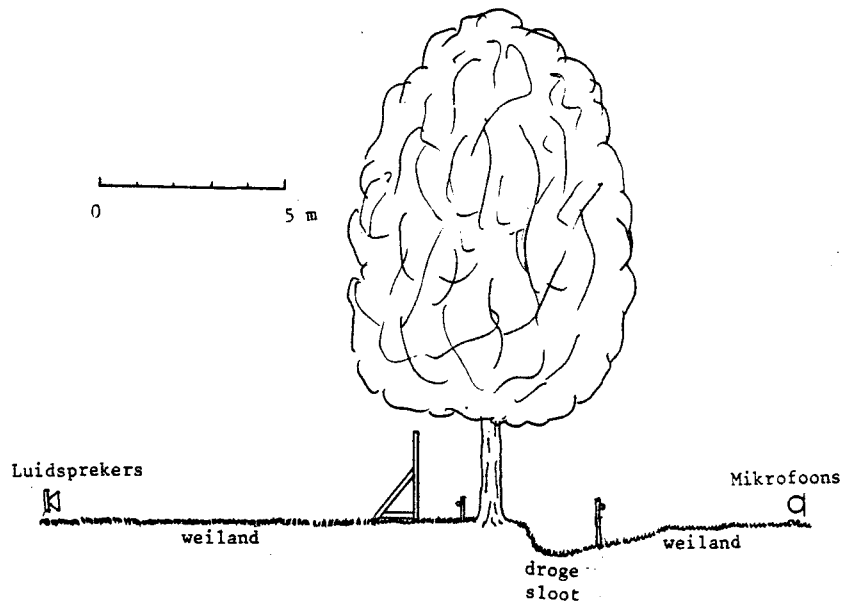
Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.  
 Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.



Bij twee mikrofoonafstanden worden significante verschillen gevonden:

Bij een mikrofoonafstand van 10 m. en 30 m.

De grootste onregelmatigheden in de bodem zijn bij een mikrofoonafstand van 30 m. ongeveer 15 cm., zodat een verschilnivo voor meer dan 7.5 dB. significant is . De verschillen in fig. 11 lijken dus, ook gezien het verloop van  $L_s$  en  $L_b$ , veroorzaakt door een slecht gereproduceerde mikrofoonhoogte.

5.4.3 Els in Heeze (*Alnus Glutinosa*)

FIGUUR 12 De situatie bij de Els. Aan mikrofoon-zijde loopt het weiland schuin af in de sloot.

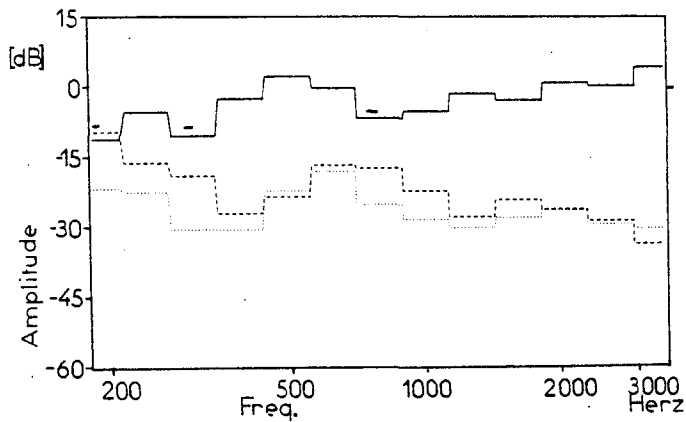
Bijzonderheden:

Datum meting	: 19-7-1982
Kroondiameter	: 7.5 m.
Hoogte boom	: 13.5 m.
LAI	: 5.8
Totaal bladopp.:	250 m <sup>2</sup>
Bodem	: Gras/Gras
Bladdichtheid	: 250 bl/m <sup>3</sup>
Bladopp.	: 40 cm <sup>2</sup>
Bladopp.dichth.:	1 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Bladstraal	: 0.035 m.
Bladopp.massa	: 0.17 kg/m <sup>2</sup>
Bladvorm	: rond

Het totaal bladoppervlak van deze boom is klein in vergelijking met de andere bomen. De bladeren zijn vrij groot, de bladoppervlakte-dichtheid is ook vrij groot in verhouding met de andere bomen (alleen de Linden en de Den hebben een grotere oppervlakte-dichtheid).

In figuur 12 staat een situatieschets. In de figuren 12 t/m 13 staan de meetresultaten.

Aan de mikrofoon-zijde van het scherm, loopt het weiland schuin af in de sloot. Dit kan van invloed zijn op de meting bij een mikrofoonafstand van 10 m.

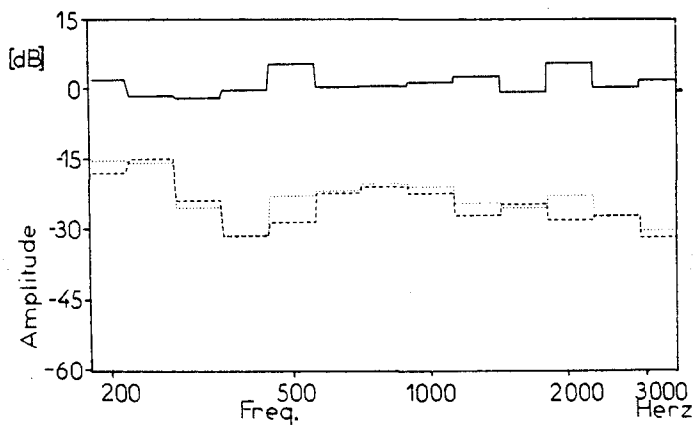


$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....  
 $L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----  
 $L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met ———

Figuur 13

Luidspr.afstand: 10 m.

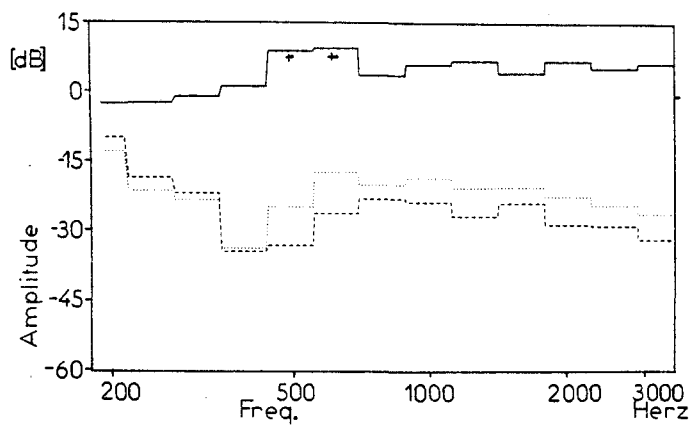
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 14

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



Figuur 15

Luidspr.afstand : 10 m.

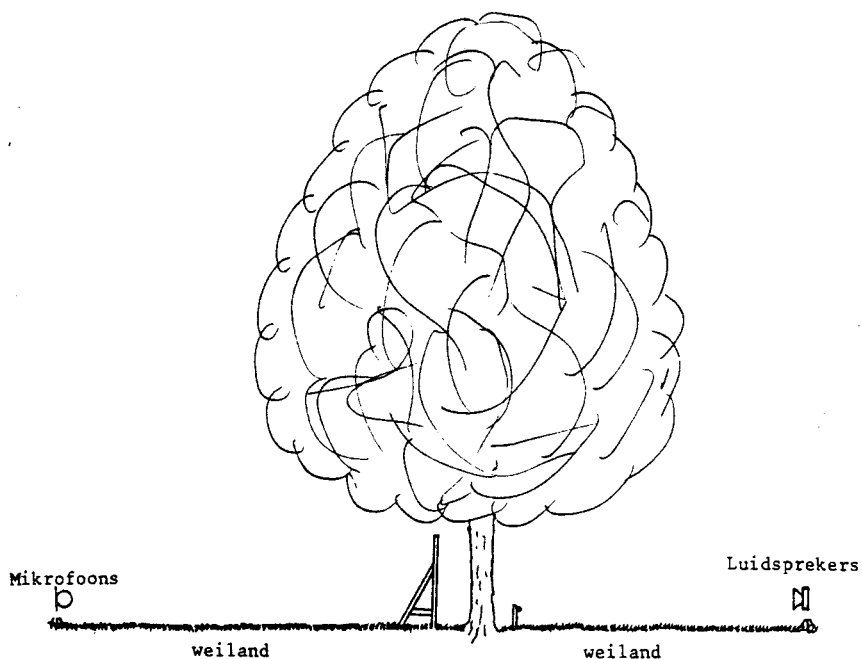
Mikrofoonafstand: 30 m.

Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.  
 Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.

De negatieve laagfrequente verschillen bij de mikrofoonafstand van 10 m. lijken veroorzaakt te worden door een groot verschil in mikrofoonhoogten bij de metingen met en de metingen zonder boom. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat het weiland bij de boom afloopt in de sloot (zie fig. 12). De fout in de mikrofoonhoogte-instelling is daardoor veel groter dan 10 cm. (ongeveer 50 cm!).

Bij de mikrofoonafstand van 30 m. vinden we rond 500 Hz. een significant verschil (positief), dat veroorzaakt zou kunnen zijn door het in fase zijn van de aan de blaadjes verstrooide golven (zie ook de berekeningsresultaten en Hfst. 6).

#### 5.4.4 De Zomereik in Heeze (Quercus Robur)

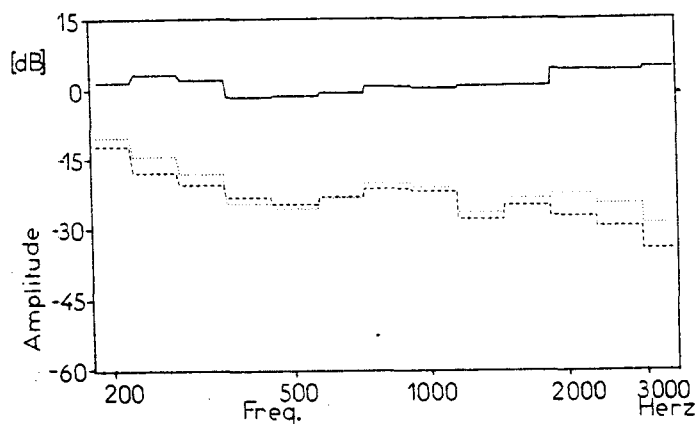


Figuur 16 De situatie bij de Eik in Heeze. Luidsprekers en mikrofoons staan op 10 m. van het scherm.

#### Bijzonderheden:

Datum meting : 10-8-1982  
 Kroondiameter : 11 m.  
 Hoogte boom : 16.6 m.  
 LAI : 5.8  
 Totaal bladopp.: 500 m<sup>2</sup>  
 Bodem : Gras/Gras  
 Bladdichtheid : 700 bl./m<sup>2</sup>  
 Bladopp. : 12 cm<sup>2</sup>  
 Bladopp.dichth.: 0.8 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>  
 Bladstraal : 0.02 m.  
 Bladopp.massa : 0.15 kg/m<sup>2</sup>  
 Bladvorm : gelobd

Deze eik is vergelijkbaar met de eik in Kneysel. De bladdichtheid is wat groter maar het totaal bladoppervlak is iets kleiner. In figuur 16 een situatieschets, en in de figuren 17 t/m 19 de meetresultaten.

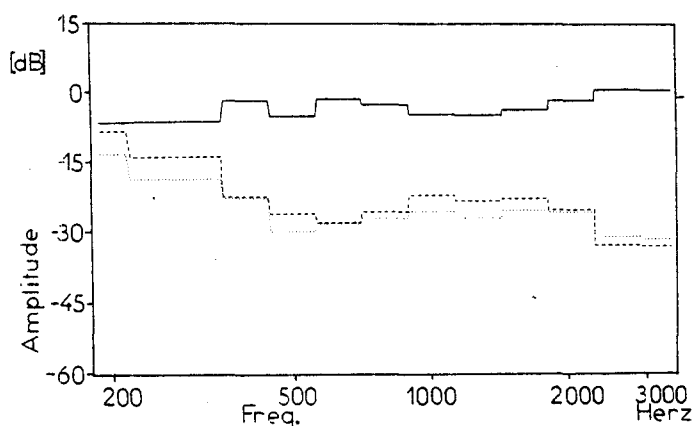


$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....  
 $L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----  
 $L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met ———

Figuur 17

Luidspr.afstand: 10 m.

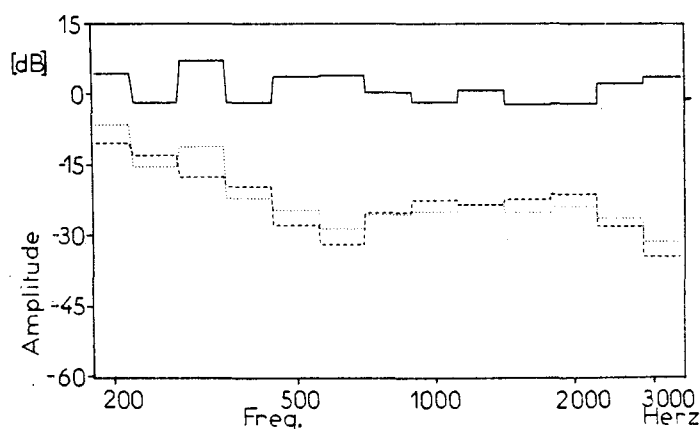
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 18

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



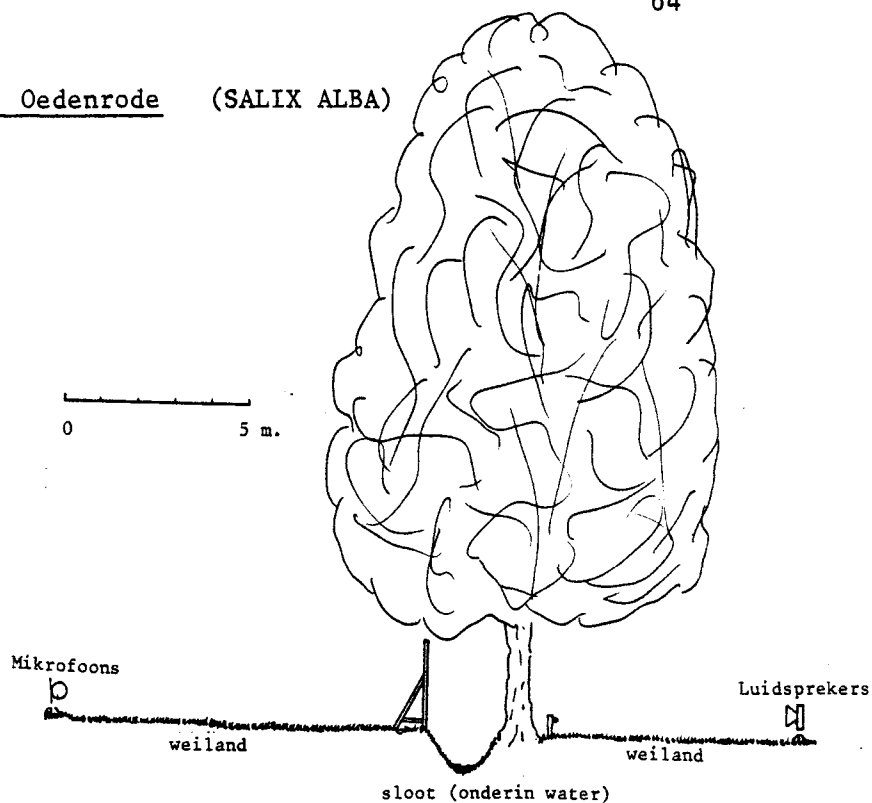
Figuur 19

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand: 30 m.

Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.  
 Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.

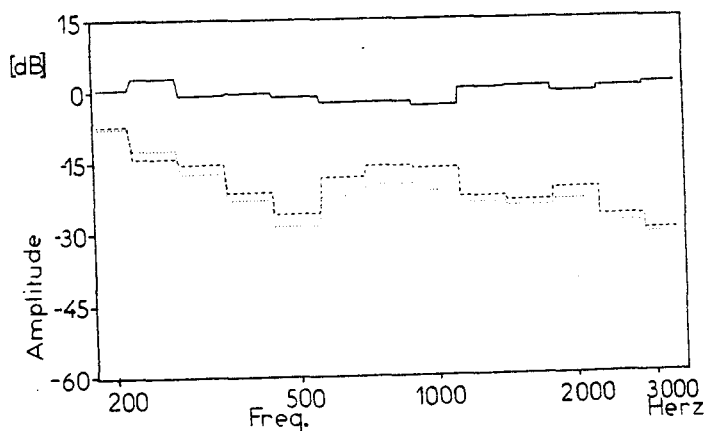
We zien in de figuren 17 t/m 19 dat er geen significante verschillen gemeten zijn bij de eik in Heeze.

5.4.5 Wilg te st. Oedenrode (SALIX ALBA)Bijzonderheden:

Datum meting : 24-7-1982  
 Kroon diameter : 10 m.  
 Hoogte boom : 19 m.  
 LAI : 6.2  
 Totaal bladopp.: 500 m<sup>2</sup>  
 Bodem : Gras/Gras  
 Bladdichtheid : 1200 bl/m<sup>3</sup>  
 Bladopp. : 6 cm<sup>2</sup>  
 Bladopp.dichth.: 0.7 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>  
 Bladstraal : 0.1 m. x 0.015 m. (zie bladvorm)  
 Bladopp.massa : 0.16 kg/m<sup>2</sup>  
 Bladvorm : Lancet

FIGUUR 20 De meetsituatie bij de Wilg in st. Oedenrode.

Deze Wilg heeft een tamelijk grote LAI-waarde doordat hij zo hoog is. De bladoppervlaktedichtheid is bijna even groot als bij de eik in Heeze. De bladstand neigt bij deze boom naar verticaal (hangende blaadjes). In figuur 20 staat de meetsituatie bij een luidsprekerafstand en mikrofoonafstand van 10 m. In de figuren 21 t/m 23 staan de meetresultaten.

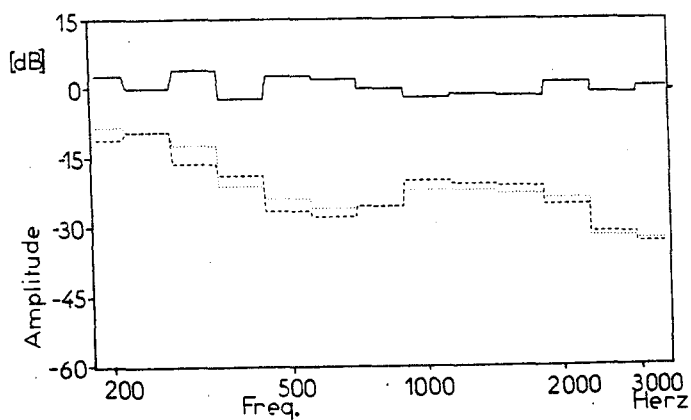


$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....  
 $L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----  
 $L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met ———

Figuur 21

Luidspr.afstand: 10 m.

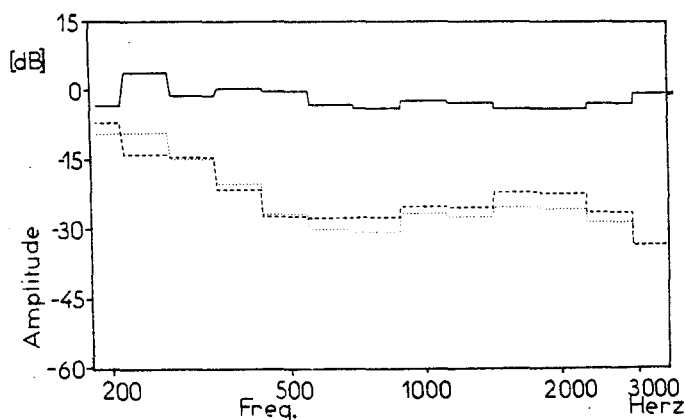
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 22

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



Figuur 23

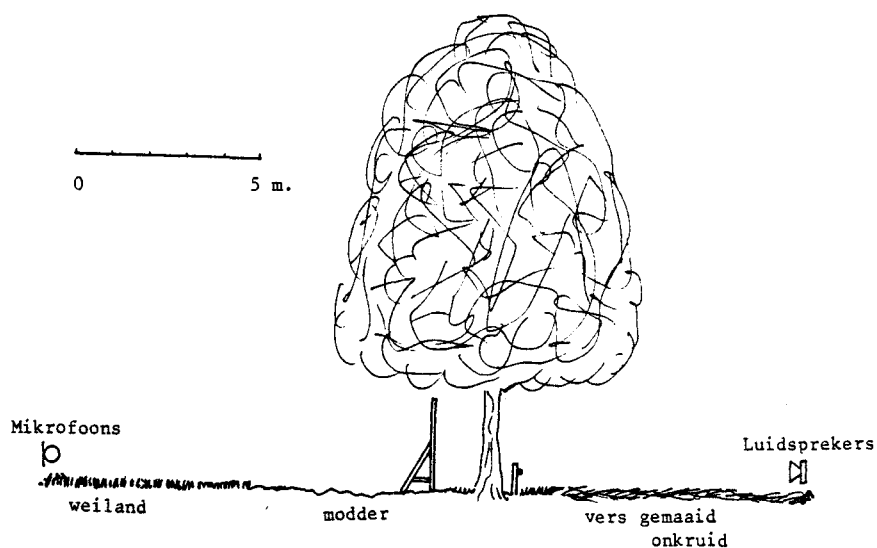
Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand: 30 m.

Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.  
 Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.

Ook bij de Wilg worden geen significante verschillen gevonden.



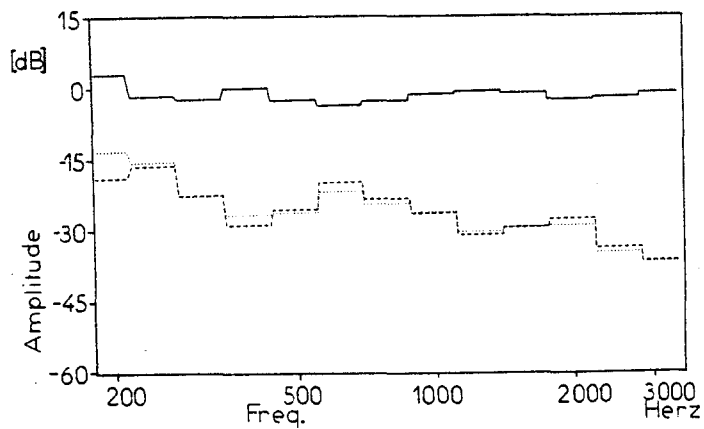
5.4.6 Berk in Waalre (Betula Pendula)

Figuur 24 De meetsituatie bij de berk. De bodem in de situatie met het scherm alleen is aan beide zijden een weiland (geen modder en geen onkruid!).

Bijzonderheden:

Datum meting : 14-7-1982  
 Kroon diameter : 8.5 m.  
 Hoogte boom : 13 m.  
 LAI : 5.4  
 Totaal bladopp.: 300 m<sup>2</sup>  
 Bodem : Gras/Gras  
 Bladdichtheid : 900 bl./m<sup>3</sup>  
 Bladopp. : 10 cm<sup>2</sup>  
 Bladopp.dichth.: 0.9 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>  
 Bladstraal : 0.02 m.  
 Bladopp.massa : 0.18 kg/m<sup>2</sup>  
 Bladvorm : rond

De bladstand van deze berk is geheel willekeurig. De bladoppervlaktedichtheid is vrij groot. Bij de meting mét boom lag op de bodem aan de luidsprekerzijde vers gemaaid onkruid. Bij de meting met mikrofoonafstand 30 m. waren de onregelmatigheden in de bodem aan mikrofoonzijde maximaal ongeveer 15 cm.. Dit kan van invloed zijn op de meetresultaten. In figuur 24 staat de meetsituatie, en in de figuren 25 t/m 27 staan de meetresultaten.

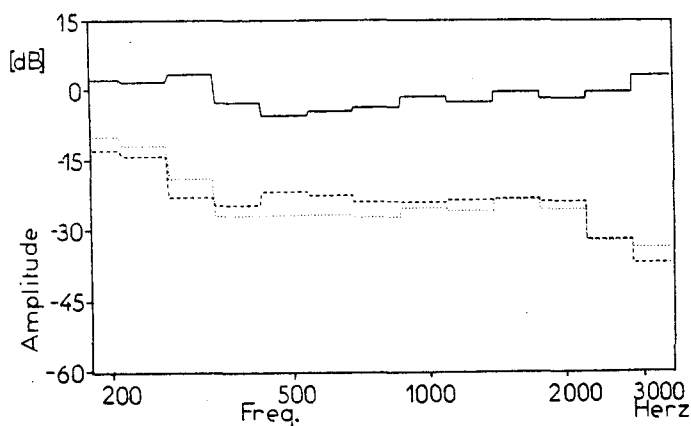


$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....  
 $L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----  
 $L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met ———

Figuur 25

Luidspr.afstand: 10 m.

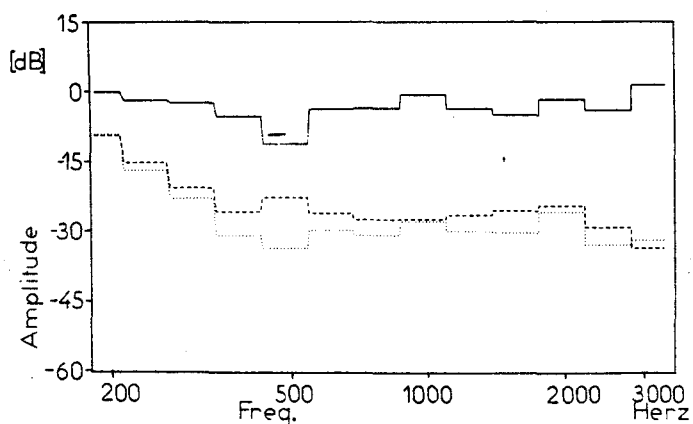
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 26

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



Figuur 27

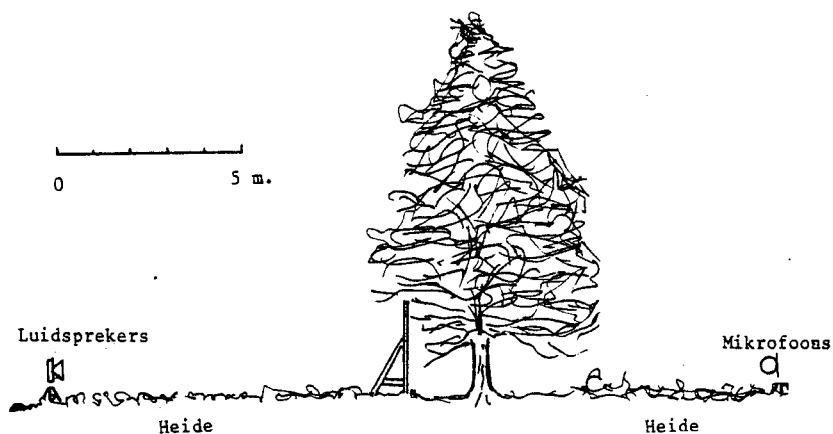
Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand: 30 m.

Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.

Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.

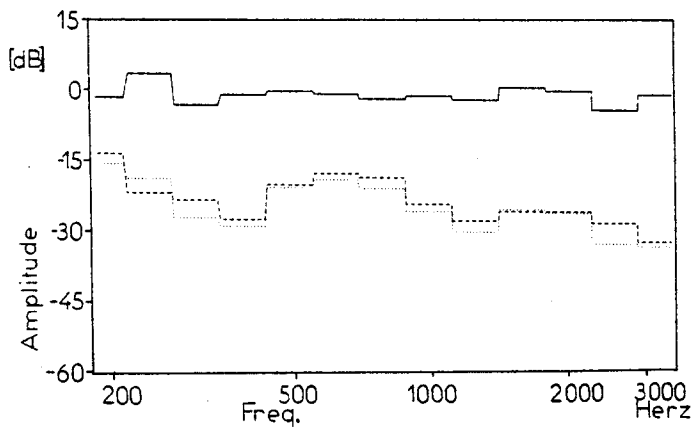
Op afstanden grater dan ongeveer 15 m. van de boom is de boom aan mikrofoon-  
zijde onregelmatiger dan op kleinere afstand. Dit is waarschijnlijk de oor-  
zaak van het negatieve signifikante verschil in de tertsband rond 500 Hz.  
bij de mikrofoonafstand van 30 m. Het is onwaarschijnlijk dat dit nega-  
tieve verschil wordt veroorzaakt door de boom omdat de onderkant van de  
boom hoger was dan de bovenkant van het scherm.

5.4.7 De Grove Den in Heeze (Pinus Sylvestris)

Figuur 28 De meetsituatie bij de grove den op de heide.

Bijzonderheden:	
datum meting	:18-7-1982
kroondiameter	:5.5 m.x 8 m.
hoogte boom	:9.5 m.
LAI	:5
totaal naaldopp.	:240 m <sup>2</sup>
bodem	:Heide/Heide
naalddichtheid	:29000/m <sup>3</sup>
naaldopp.	:0.8 cm <sup>2</sup>
naald opp.dichtheid	:2.4 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
afmetingen naald	:0.09 m. x 0.0009 m.
naald opp. massa	:0.53 kg/m <sup>2</sup>
naaldvorm	: naald

De naaldstand bij deze den is geheel willekeurig. Wat opvalt is de grote naaldoppervlaktedichtheid in vergelijking met andere bomen. De bodem bij de Den is zeer onregelmatig : onregelmatigheden tot ongeveer 0.25 m. komen voor. Het vaststellen van luidspreker- en mikrofoonhoogten wordt bovendien bemoeilijkt door de heidegroei. In figuur 28 staat de situatieschets en in de figuren 29 t/m 31 staan de meetresultaten.

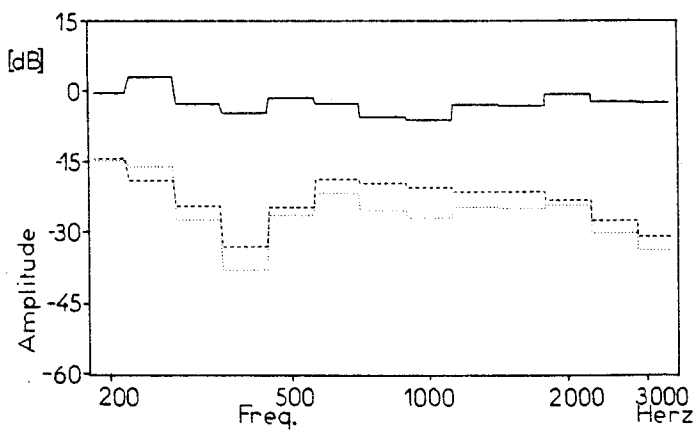


$L_b$ , het nivo van de situatie waarin de boom aanwezig is staat aangegeven met .....  
 $L_s$ , het nivo van de situatie waarin de boom afwezig is staat aangegeven met ----  
 $L_v$ , het verschil  $L_b - L_s$  staat aangegeven met .....

Figuur 29

Luidspr.afstand: 10 m.

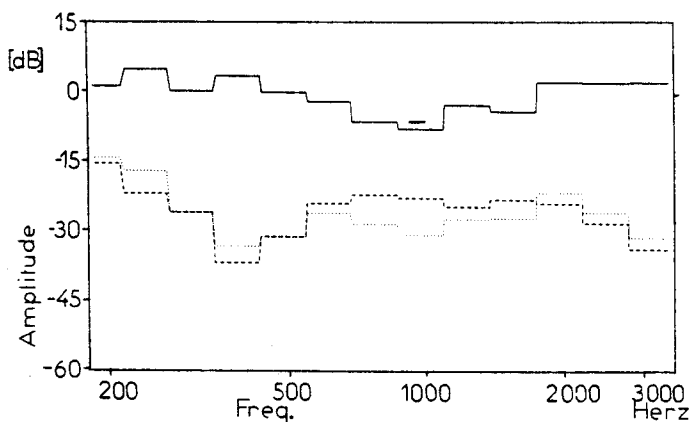
Mikrofoonafstand : 10 m.



Figuur 30

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand : 20 m.



Figuur 31

Luidspr.afstand : 10 m.

Mikrofoonafstand: 30 m.

Een positief significant verschil ( $L_b - L_s > 7.5$  dB.) staat aangegeven met +.  
 Een negatief significant verschil ( $L_b - L_s < -7.5$  dB.) staat aangegeven met -.

De grote onregelmatigheden in de bodem lijken ook hier de oorzaak te zijn van het significante verschil in de tertsband rond 1 kHz. bij de mikrofoonafstand van 30 m. Het is echter niet uitgesloten dat, gezien de heidegroei, ook verstrooiing aan de heideplanten van invloed is geweest op de meetresultaten.

### 5.5 Conclusie meetresultaten

Uit de meetresultaten blijkt dat met de meetmethode significante verschillen van meer dan 7.5 dB. aan kan tonen als de onregelmatigheden in de bodem niet groter zijn dan 10 cm.

Bij bodems met grotere onregelmatigheden is het raadzaam te middelen over meer dan 4 metingen. Ook als men met de meetmethode significante verschillen minder dan 7.5 dB. wil aantonen is het noodzakelijk over meer dan 4 metingen te middelen.

In tabel 1 staan de meetresultaten samengevat. Horizontaal staan luidspreekerafstandsmikrofoonafstand en verticaal de bomen. Een + in de tabel betekent dat in een (of meer) tertsbanden het verschil  $L_b - L_s > 7.5$  dB. Tussen haakjes staat erachter het aantal tertsbanden waarvoor  $L_s - L_b > 7.5$  dB. Een sterretje in de tabel betekent dat de onregelmatigheden in de bodem bij die meting groter waren dan 10 cm.

We zien in tabel 1 dat de negatieve significante verschillen in alle gevallen samenvalen met metingen waarvoor de onregelmatigheden in de bodem groter zijn dan 10 cm.

Demping van akoestiese golven door de aanwezigheid van een boom in een situatie zoals bij deze metingen is niet gemeten. Dit is in overeenstemming met de literatuur (zie Hfst. 1).

Om te onderzoeken of er verband bestaat met de variabelen van de boom, de bladeren of de meet-situatie zijn drie tabellen gemaakt.

In tabel 2 staan de bladvariabelen met de significante verschillen (zie tabel 1).

Uitgezet staan de gemiddelde bladstraal (a), het totale bladoppervlak (Tb.), de oppervlakte-massa ( $m^1$ ) en de bladvorm tegen de bomen en de significante verschillen.

BOOM	10x10	10x20	10x30
Linden	+(3)	+(5)	+(3)
Eik kn.	+(1)	o	+(1)*
Els	-(3)*	o	+(2)
Eik h.	o	o	o
Wilg	o	o	o
Berk	o	o	-(1)*
Den	o	o	-(1)*

TABEL 1

De significante verschillen bij de metingen. Horizontaal de luidspreekerafstand en mikrofoonafstanden, verticaal de bomen. Positieve significante verschillen zijn aangegeven met een +. Tussen haakjes erachter het aantal tertsbanden waarin een significant verschil wordt gevonden. Negatieve significante verschillen: -.

TABEL 2

BOOM	a	Tb	$m^1$	V.m	Sig.
Linden	4	800 <sup>3)</sup>	.10	R	+++
Eik kn.	2	600	.16	G	+o+*
Els	3.5	250	.17	R	*o+
Eik h.	2	500	.15	G	ooo
Wilg	.5 <sup>0)</sup>	500	.16	L	ooo
Berk	2	300	.18	R	oo-*
Gr. Den	.08 <sup>0)</sup>	250	.5	N	oo-*

De bladvariabelen met de significante verschillen: a= de blastraal (cm.)  
 Tb= het totaal bladopp.(m<sup>2</sup>)  
 $m^1$  = de opp.massa van de bladeren (kg/m<sup>2</sup>)  
 V.m= Bladvorm: R= rond, G= gelobd  
 L= lancet, N= naald.

Sig. =significante verschillen

TABEL 3

BOOM	hg	dia.	LAI	bd.	Sig.
Linden	12.5	8 <sup>1)</sup>	7.6	G/V	+++
Eik kn.	14	13	4.4	G/V	+0+*
Els	13.5	7.5	5.8	G/G	-*0+
Eik h.	16.5	11	5.8	G/G	ooo
Wilg	19	10	6.2	G/G	ooo
Berk	13	8.5	5.4	G/G <sup>3)</sup>	oo-*
Gr. Den	9.5	8x5 <sup>3)</sup>	5	H/H <sup>4)</sup>	oo-*

Enkele boom- en situatievariabelen:

hg= de boomhoogte (m.)

dia.= de kroon diameter (m.)

bd.= de bodem : G=gras

V=verhard (asfalt)

H=Heide

- 1) De diameter van één Lindeboom
- 2) De Den heeft een rechthoekige kroon.
- 3) Bij de boom aan luidsprekerzijde lag het gras bedekt met gemaaid onkruid.
- 4) Heidestruiken (ongeveer 25 cm.hoog).

In tabel 3 staan enkele boom- en situatievariabelen met de significante verschillen.

Uitgezet zijn de boomhoogte (hg.), de kroon diameter (dia.), het LAI en de bodemsoort.

In tabel 4 staan enkele blad- en situatievariabelen met de significante verschillen.

Uitgezet zijn de schermpositie (luidsprekerzijde of mikrofoonzijde, S.P.), de bladstand (bl.st.), de bladoppervlaktedichtheid (B.o.), de bladdichtheid (B.D.) en natuurlijk de significante verschillen.

Het is moeilijk op grond van de 21 metingen bij de 7 situatiesconclusies te trekken ten aanzien van de relaties tussen de significante verschillen en de variabelen.

Wel is duidelijk dat de bladstraal, het totale bladoppervlak en mogelijk ook de bodem (verharde weg) van invloed zijn op de grootte van de verstrooiing van akoestische golven door boombladeren.

Grofweg vinden we in twee frequentiegebieden significante verschillen:

1° In het frequentiegebied  $f < 700$  Hz.

2° In het frequentiegebied  $f > 1500$  Hz.

In de buurt van 1 kHz. worden geen significante verschillen gevonden.

Dit is in overeenstemming met de berekeningsresultaten.

TABEL 4

BOOM	S.P.	Bl.st.	B.o.	B.D.	Sig.
Linden	L	H	1.5	3	+++
Eik kn.	M	W	0.6	5	+0+*
Els	L	W	1.0	2.5	-*0+
Eik h.	M	W	0.8	7	ooo
Wilg	M	V	0.7	12	ooo
Berk	M	W	0.9	9	oo-*
Gr. Den	L	W	24	290	oo-*

Enkele boom-situatievariabelen:

S.P.= de schermpositie :

L =het scherm aan luidsprekerzijde

M = het scherm aan mikrofoonzijde

Bl.st.= Bladstand: H=overwegend horizontaal, W=willekeurig, V= overwegend vertikaal.

B.o.=Bladoppervlaktedichtheid ( $m^2/m^3$ )

B.D.=Bladdichtheid ( $1/m^2$ )



## 6. Vergelijking tussen meetresultaten en berekeningsresultaten

De berekeningen zijn uitgevoerd aan een beperkt aantal blaadjes, die allen in één vlak liggen. Bij de berekeningen is geen rekening gehouden met meervoudige verstrooiingen: dat is de verstrooiing aan een blad van akoestiese golven afkomstig van aan een ander blad verstrooide golven. Bij één laag blaadjes zal deze meervoudige verstrooiing van geringe invloed zijn, bij meerdere bladlagen hoeft deze invloed niet gering te zijn.

Bovendien zijn de berekeningen uitgevoerd aan maximaal 765 blaadjes.

De "bomen" waaraan gerekend is, zijn dus niet erg realistisch, en een goede vergelijking tussen metingen en berekeningen is niet te maken.

Het is echter wel interessant om te onderzoeken of de effecten die bij de berekeningen naar voren komen ook bij de metingen terug te vinden zijn. Ook is het belangrijk of door extrapolatie van de berekeningsresultaten uit berekenig aan realistische bladaantallen dezelfde resultaten gevonden zouden worden als als bij de metingen gevonden wordt.

De belangrijkste effecten die uit de berekeningen volgen, en die van belang zijn voor de vergelijking tussen berekeningen en metingen, zijn:

1<sup>o</sup> De verstrooiing aan de bladeren wordt, bij gelijkblijvend totaal bladoppervlak, groter bij toenemende bladgrootte.

Bij bomen met een willekeurige bladstand geldt dit alleen voor  $k \cdot a < 2$ . (k golfgetal en a de bladstraal).

De bladgrootte wordt bij ronde bladeren gekarakteriseerd door de straal a, bij vierkante bladeren door de zijde z gedeeld door  $\sqrt{\pi}$  (zodat een rond blad evenveel verstrooid als een vierkant blad als de oppervlakten gelijk zijn), en bij een rechthoekig blad door de breedte van het blad gedeeld door  $\sqrt{\pi}$ .

2<sup>o</sup> De verstrooiing aan bladeren wordt, bij gelijkblijvende bladgrootte, groter bij toenemend totaal bladoppervlak.

3<sup>o</sup> De weglengteverschillen tussen de aan verschillende bladeren verstrooide akoestiese golven kan voor lage frequenties klein ten opzichte van de golflengte van de bladeren zijn.

Dit heeft tot gevolg dat, voor de situaties waaraan gerekend is, voor frequentie  $f < 1$  kHz. de verstrooiing veel groter is dan op grond van de verstrooiingsdoorsnede van de bladeren ( $\sigma_{\text{rand}}$ ) te verwachten is.

4<sup>o</sup> De bladmassa is in geringe mate van invloed op de verstrooiing.

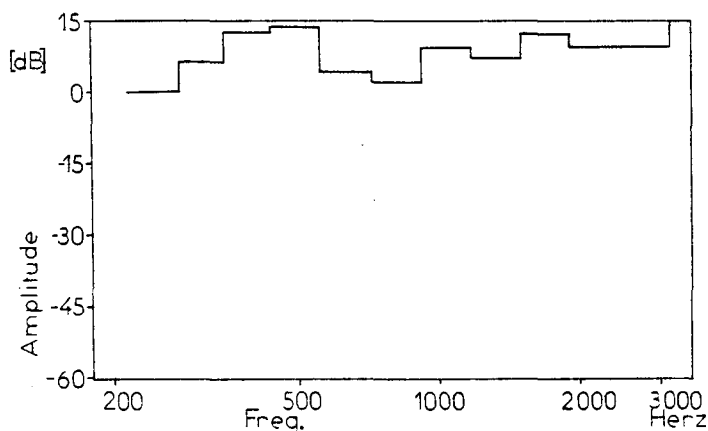
In de tabellen 2, 3 en 4 van hoofdstuk 5 (blz 72) staan de meetresultaten samengevat. Bovengenoemde punten 1 en 2 zijn in overeenstemming met deze

tabellen. In tabel 2 is te zien dat significante verschillen optreden bij een grote bladstraal en (of) een groot totaal bladoppervlak. Ook punt 3 is in overeenstemming met de meetresultaten: bij drie metingen wordt een significant verschil gevonden voor frequenties  $f < 700$  Hz., dus waar voor beide bomen geldt  $k.a < 0.5$  (2 metingen bij de Linden, 1 meting bij de Els). Er lijkt bij meerdere metingen een tendens te zijn voor een positief verschil bij frequenties  $f < 700$  Hz.

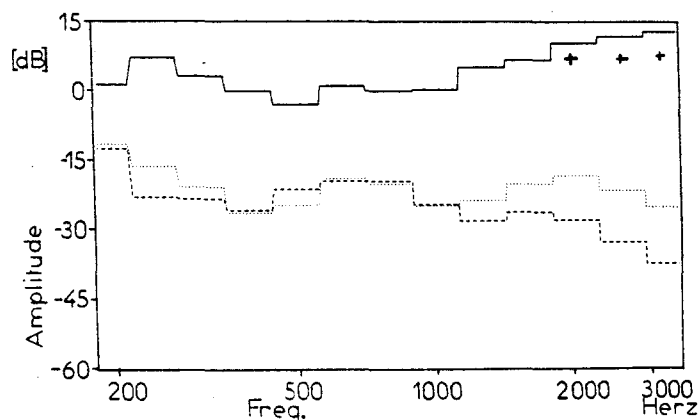
Uit tabel 2 (blz 72) blijkt tenslotte ook dat de bladmassa geen grote invloed heeft op de meetresultaten, en dat is in overeenstemming met punt 4.

Een extrapolatie van de berekeningsresultaten kan niet anders dan erg grof gebeuren. De grootste bladeren waarbij metingen zijn verricht hebben (gemiddeld) een straal van 0.04 m.

In hfst. 3 (blz 38) zagen we dat 4780 bladeren met  $a=0.04$  m. voor frequenties  $f > 2$  kHz. ( $k.a > 1.5$ ) evenveel verstrooiing geven als 765 blaadjes met  $a=0.1$  (zodat de totale oppervlakten gelijk zijn). Voor  $f < 2$  kHz. verstrooien de grootste blaadjes meer, dat scheelt ongeveer 5 dB. In figuur 1 staat het berekende resultaat van de 765 blaadjes met  $a=0.1$  m.



Figuur 1: Het berekende verschilnivo  $L_v$  bij 765 blaadjes met  $a=0.1$  m. Voor frequenties  $f > 2$  kHz. komt dit overeen met het verschilnivo bij ongeveer 5000 blaadjes met  $a=0.04$  m.



Figuur: De gemeten nivo's  $L_s$ ,  $L_b$  en  $L_v$  bij de Lindebomen. Deze bomen hebben samen ongeveer 80.000 blaadjes. De gemiddelde bladstraal  $a=0.04$  m.

Vergelijken we figuur 1 met figuur 2, waarin de meetresultaten van de Lindeboom staan (bij een mikrofoonafstand van 10 m.), dan zien we dat voor  $f > 2$  kHz. het gemeten en het berekende verschilnivo ongeveer overeenkomen.

Voor  $f < 2$  kHz. is het berekende nivo veel hoger dan het gemeten nivo. Het berekende nivo gaat uit van 5000 blaadjes met  $a = 0.04$ .

De beide Linden hebben (samen) ongeveer 80.000 blaadjes.

Verklaringen voor dit verschil in bladaantal zijn:

- De bladeren bij de Linde bomen liggen niet in één vlak, maar verspreid over de hele kroon. Afscherming van hoger gelegen blaadjes door lager gelegen blaadjes zorgt er kennelijk voor dat de hoger gelegen blaadjes in mindere mate meetellen.
- Bladeren op grotere hoogte geven (vooral voor frequenties onder 1 kHz., zie hfst.3, blz 38) minder verstrooiing
- Bij de berekeningen hebben alle bladeren dezelfde (gemiddelde) bladgrootte, de boom heeft een bladgrootteverdeling.
- De berekende bodem- en schermdeemping hoeft niet gelijk te zijn aan de gemeten deemping (bij de berekeningen is uitgegaan van een oneindig lang scherm).

We zien dat een extrapolatie van de berekening aan één vlak bladeren naar een hele boom (nog) niet goed te maken is.

Het is dus belangrijk de meervoudige verstrooiing bij meerdere bladlagen bij de berekeningsmethode te betrekken.

## 7. Conclusie en aanbevelingen voor verder onderzoek

### 7.1 Conclusie

Met behulp van de ontwikkelde meetmethode kan de invloed van de verstrooiing van akoestische golven aan boombladeren op het geluidsnivo achter een scherm (of wal) gemeten worden (zie fig.1).

De invloed van de verstrooiing aan de boombladeren wordt gevonden door het verschil te nemen van het geluidsnivo in een situatie met boom en het geluidsnivo in een situatie zonder boom, die, wat de bodem betreft, identiek is.

De nauwkeurigheid van de meetresultaten wordt sterk beïnvloedt door de onnauwkeurigheid in de plaatsbepaling (voornamelijk verticaal) van de luidsprekers en de mikrofoons. Verschillen tussen beide geluidsnivo's in een tertsband (met en zonder boom) van meer dan 7.5 dB. worden als significant beschouwd.

Er zijn bij 14 situaties metingen verricht: zes situaties met één boom, één situatie met twee bomen en zeven situaties zonder boom.

In één geval was het verschil in geluidsnivo (met boom min zonder boom) positief significant in een aantal tertsbanden bij alledrie de mikrofoonafstanden (10 m., 20 m. en 30 m., de luidsprekers staan op 10 m. van het scherm). Dit was de situatie met de twee bomen (Linden). Deze bomen hebben het grootste gemiddelde bladoppervlak en (samen) het grootste totale bladoppervlak van de gemeten bomen. Uit de metingen aan andere bomen blijkt dat onder andere de onderlinge bladafstand en de bodemreflektiefactor van invloed kunnen zijn op het geluidsnivo ten gevolge van de verstrooide akoestische golven.

In zowel het laagfrequente deel (<1000Hz.) als in het hoogfrequente deel (>2000 Hz.) van het frequentiespektrum van de metingen worden significante verschillen gevonden.

Met behulp van de berekeningsmethode, die uitgaat van de Kirchoffbenaderingsmethode voor de verstrooiing van akoestische golven, kunnen tot nu toe berekeningen uitgevoerd worden van de verstrooiing aan een beperkt aantal blaadjes die in één laag liggen.

In de litteratuur zijn meet- en berekeningsresultaten bekend van de verstrooiing aan onder andere één schijf. De met de berekeningsmethode

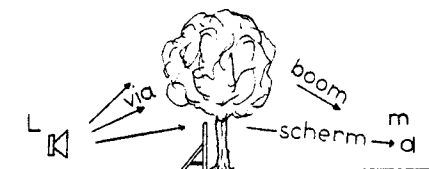


Fig.1

De situatie waarin de invloed van de verstrooiing van akoestische golven aan boombladeren gemeten en berekend is.

uitgevoerde berekeningen komen met die resultaten overeen.

Een grote beperking bij het uitvoeren van de berekeningen is de beperkte capaciteit, én de aard van de gebruikte computer. Hierdoor is het maximum bladaantal beperkt, en waren de rekentijden bijzonder groot. Er zijn berekeningen uitgevoerd aan maximaal 765 blaadjes die in één vlak liggen.

Ondanks de geringe bladaantallen, komen metingen en berekeningen op een aantal opvallende punten overeen. Uit metingen en berekeningen blijkt dat:

1<sup>o</sup> Bij gelijkblijvend totaal bladoppervlak (van alle blaadjes) wordt de verstrooiing aan blaadjes groter bij toenemende bladgrootte. Bij blaadjes met een willekeurige bladstand geldt dit voor  $k \cdot a < 2$  ( $k$  is het golfgetal en  $a$  de bladstraal).

Dit is in overeenstemming met de literatuur (o.a. Martens {10} en Beck {4}).

2<sup>o</sup> Bij toenemend totaal bladoppervlak wordt de verstrooiing groter. Dit vindt Martens (10) ook.

3<sup>o</sup> De weglengteverschillen tussen de aan verschillende bladeren verstrooide akoestiese golven kan voor lage frequenties klein zijn ten opzichte van de golflengte van de akoestiese golven.

Dit heeft tot gevolg dat voor frequenties  $f < 1$  kHz. de verstrooiing veel groter is dan op grond van de verstrooiingsdoorsnede te verwachten is.

4<sup>o</sup> Het feit dat de bladeren een eindige oppervlaktemassa hebben is van geringe invloed op de metingen.

De meetresultaten van de metingen bij het zwembad in de gemeente Someren (litt. 13) zijn in overeenstemming met de meet- en berekeningsresultaten: Het betreft daar Amerikaanse eiken rond een geluidswal. De bladgrootte van de bladeren van deze bomen is erg groot (ongeveer  $200 \text{ cm}^2$ ), en het is dan ook niet verwonderlijk dat de verstrooiing van akoestiese golven aan dergelijke bladeren in belangrijke mate van invloed is op het geluidnivo achter de wal.

De conclusies zijn:

- 1) De verstrooiing aan boombladeren kan in belangrijke mate van invloed zijn op het geluidnivo achter een wal of scherm.
- 2) De belangrijkste grootheden die bepalen hoe groot deze invloed is zijn de gemiddelde bladgrootte en het totale bladoppervlak van alle blaadjes. Op grond van meet- en berekeningsresultaten is het niet te verwachten dat de verstrooiing van akoestiese golven aan boombladeren met een bladoppervlak van maximaal  $5 \text{ cm}^2$  (naaldbomen, sommige Wilgen) van invloed is op

het geluidnivo in een situatie waarin een boom op of bij een wal of scherm staat.

Bomen met een gemiddeld bladoppervlak groter dan  $50 \text{ cm}^2$  hebben vooral op korte afstand achter het scherm (<50 m.) grote invloed op het geluidnivo achter scherm: door de aanwezigheid van een dergelijke boom kan het nivo tot meer dan 15 dB. in enkele tertsbanden tussen 250 Hz. en 4 kHz. verhoogd worden.

- 3) Bij kleine onderlinge bladafstand wordt ook bij lage frequenties (<1 kHz.) een verhoging in het geluidnivo ten gevolge van de verstrooiing aan de boombladeren gevonden. Deze verhoging kan erg groot zijn (tot 20 dB.) en wordt veroorzaakt door het in fase zijn van de vele verstrooide golven.
- 4) De oppervlakte-massa van de bladeren is klein ( $0.15 \text{ kg/m}^2$ ). Ten opzichte van bladeren met een (oneindig) grote oppervlaktemassa scheelt dit echter alleen voor  $k \cdot a < 1$  ( $k$ =golfgetal,  $a$ =bladstraal van het rond veronderstelde blad) enkele dB.'s in de grootte van de verstrooiing. (b.v. 3 dB. bij 1 kHz. en blaadjes met  $a=0.04$ ).
- 5) Takken en stam hebben een klein oppervlak in vergelijking tot de bladeren. Zij zullen een relatief klein aandeel hebben in de verstrooiing van de akoestiese golven door een boom.
- 6) Ondanks de beperkingen van zowel de meetmethode als de berekeningsmethode komen metingen en berekeningen op een aantal opvallende punten overeen.

## 7.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Er is verder onderzoek nodig om het onderzoek naar het effect van boombladeren op de verstrooiing van akoestiese golven af te ronden.

### 7.2.1 Metingen

Wat de metingen betreft komen de volgende punten in aanmerking:

- Er moeten meer metingen worden verricht aan solitair (in ieder geval met grote bladeren)
- Voor metingen waarbij de onregelmatigheden in de bodem groter zijn dan 10 cm. is het noodzakelijk dat over meer dan 4 metingen gemiddeld wordt.
- Voor metingen met kleine blaadjes moet het significantie-nivo verkleind worden. Dit kan als er over meer dan 4 metingen gemiddeld wordt.
- Meetresultaten van metingen aan rijtjes bomen zijn belangrijk.
- Het gebruik van meer dan één windsnelheidsmeter is aan te raden.

### 7.2.2 Berekeningen

Wat de berekeningen betreft zijn de volgende punten belangrijk:

- Er moet een oplossing worden gezocht voor het probleem van de meervoudige verstrooiing.
- De programma's van de berekeningsmethode moeten overgezet worden op een grotere computer.
- Hierna zijn berekeningen aan rijen bomen, meerdere blaadjes, transmissie door een bladerdek en meerdere mikrofoon- en luidsprekerafstanden waarschijnlijk eenvoudig te berekenen.
- Het frequentiespektrum van de bron met aangepast worden aan de praktijk (b.v. verkeerslawaai) en de berekeningsresultaten moeten in dB.(A) gepresenteerd worden.

LITTERATUUR

- (1) C.F. Eyring, Jungle Acoustics. Jasa 18 (1946),257
- (2) T.F.W. Embleton, Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods. Jasa 35 (1963),1119
- (3) H.Börner, Störschallminderung durch Schutzabstände, Böschungen oder Vegetationbestände. Deutsche Gartenarchitektur 2 (1963),39
- (4) G.Beck, Untersuchung über Planungsgrundlagen für eine Lärm-bekämpfung im Freiraum mit Experimenten zum artspezifischen Lärm-minderungsvermögen verschiedener Baum- und Straucharten. Dissertatie Technische Universiteit Berlijn (1965)
- (5) D.Aylor, Noise reduction by vegetations and ground. Jasa 51 (1972), 197
- (6) P.J. Dickinson, Sounding Board. Noise Control Engineering 10 (1978),91
- (7) L.N. Miller, Sound levels of rain and of wind in the trees. Noise Control Engineering 11 (1978),101
- (8) W.Leschnik, Schallausbreitung in bebauten und bepflanzten Gebieten. Acustica 44 (1980),14
- (9) M.J.M Martens,Foliage as a low-pass filter: Experiments with model forests in an anechoic chamber. Jasa 67 (1980),66
- (10) M.J.M.Martens, Absorption of acoustic energy by plant leaves. Jasa 69 (1981),303
- (11) R.Bullen and F.Fricke, Sound propagation trough vegetation. Journal of Sound and Vibration (1982),11
- (12) J.D, van der Toorn, Geluiddemping door bossen. ICG-rapport VL-HR-06-01 (1975) TPD-TNO Delft
- (13) C.Lahaya, Geluidsreduktie door een begroeide wal. Stageverslag Fysika Winkel Eindhoven (1981), T.H.Eindhoven
- (14) R.Breeuwer en W.A.Oosting, Geluidoverdrachtmetingen aan een begroeide en onbegroeide wal. (1980) TPD-TNO Delft.
- (15) R.D.Spence, A Note on the Kirchoff approximation in diffraction theory. Jasa 21 (1949), 98
- (16) A.Leitner, Diffraction of sound by a circular disk. Jasa 21 (1949),331
- (17) F.M.Wiener, The diffraction of sound by rigid disks and rigid square plates. Jasa 21 (1949),334
- (18) C.J.Bouwkamp, On the freely circular disk and the diffraction by circular disks and apertures. Physica XVI (1950),1
- (19) F.M.Wiener, On the relation between the sound fields radiated and diffracted by plane obstacles. Jasa 23 (1951),697



- (20) J.W.M.Baars, On the diffraction of sound waves by a circular disk. *Acustica* 14 (1964),289
- (21) Bowman c.s., Electro magnetic and acoustic scattering by simple shapes. North Holland publishing group,(1969)
- (22) Nakayama et.al., Sound insulation of a circular plate. *Acustica* 46 (1980),335
- (23) F.M.Wiener, D.N.Keast, Experimental study of the propagation of sound over ground. *Jasa* 31 (1959),724
- (24) Z.Maekawa, Noise reduction by screens. *Applied Acoustics* 1 (1968),157
- (25) M.E.Delany and E.N.Bazley, A note on the effect of ground absorption in the measurement of Aircraft noise. *Journal of Sound and Vibration* 16 (1971),315
- (26) A.Moerkerken, De invloed van grondabsorptie op de geluidvoortplanting boven een bodem. T.P.D.-rapport 507.268/2 1975 Delft
- (27) C.T.de Wit, Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural research reports,no.663 (1965),Wageningen
- (28) H.G.Jonasson, Sound reduction by barriers on the ground. *Journal of Sound and Vibration* 22 (1976),113
- (29) G.Mitscherlich, Wald Wachstum und Umwelt,Erster Band. J.D. Sauerländers Verlag (1970).Frankfurt a/m
- (30) T.H.Klinkspoor,Kosmos Bomen boek, Kosmos b.v. (1974)
- (31) J.Ross, The radiation regime and architecture of plant stands (1981) Dr.W.Junk Publishers
- (32) A.R.P.Janse en D.H.Hoekman, Radarreflekties aan bomen. *Ned. Bosbouwtijschrift* 54 (1982),111
- (33) B.Baker and E.Copson, The mathematical theorie of Huygens' principle. Oxford at the Clarendon Press,1950
- (34) Inleiding in de akoestiek, Prof.Ir.D.W.van Wulfften Palthe, diktaat van het college C 36, vakgroep Akoestiek T.H.Delft (1974)
- (35) Elmore and Heald, *Physics of Waves*. Mc.Graw-Hill (1969)
- (36) F.B.Stumpf, *Analytical Acoustics*, Ann-Arbor science (1980)
- (37) M.Abramowitz,I.Stegun,*Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications (1965)
- (38) E.Jahnke,F.Emde, *Tables of Functions*. Dover publications (1945)

## APPENDIX 1

Blz. 10 :  $\int_V (f\nabla^2 g - g\nabla^2 f) dV$  en Helmholtz:

$$\nabla^2 g + k^2 g = 0$$

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0$$

$$\int_V (f\nabla^2 g - g\nabla^2 f) dV = \int_V (k^2 fg - k^2 fg) dV = 0$$

$$\text{dus } \int_S (f\nabla g - g\nabla f) \cdot \vec{n} \cdot dS = 0$$

In punt A zijn p en G singulier, dus S opsplitsen in  $S_1$  en  $S_2$

$$\int_S (p\nabla G - G\nabla p) \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_{S_1} (p\nabla G - G\nabla p) \cdot \vec{n} \cdot dS_1 + \int_{S_2} (p\nabla G - G\nabla p) \cdot \vec{n} \cdot dS_2 = 0$$

met b.v.  $G = \frac{\exp(-jkr)}{r}$  kan de geluiddruk in A berekend worden:

$$\int_{S_2} (p\nabla G - G\nabla p) \cdot \vec{n} \cdot dS_2 = \int_{S_2} p\nabla G \cdot \vec{n} \cdot dS_2 - \int_{S_2} G\nabla p \cdot \vec{n} \cdot dS_2 =$$

$$= \int_{S_2} p \cdot \frac{1-jkr}{r_0^2} \cdot \exp(-jkr_0) \cdot dS_2 \quad (r_0 \text{ straal verdwijnend klein bolletje } S_2)$$

$$\approx \int_{S_2} p/r_0 \cdot dS_2 = 4\pi p_A, \text{ zodat } 4\pi p_A = - \int_{S_1} (p\nabla G - G\nabla p) \cdot \vec{n} \cdot dS_1$$

Blz. 11 :  $p_A = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} (p\nabla G - G\nabla p) \cdot \vec{n} \cdot dS_1$  en

$$G = \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \quad \vec{n} \text{ in } -Z \text{ richting}$$

$$r_1 = r_2 \text{ dus } \frac{\partial r}{\partial z} = - \frac{\partial r}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \rightarrow \vec{n} \cdot \nabla G = 0$$

$$p_A = + \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \frac{2 \cdot \exp(-jkr_1)}{r_1} \cdot (\nabla p \cdot \vec{n}) \cdot dS_1$$

Blz. : punt P:  $(X_a, Y_a, Z_a)$  (zie figuur 3)

$$\text{dus } r^2 = X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2 \text{ en } R = (X_a - X)^2 + (Y_a - Y)^2 + (Z_a - Z)^2 =$$

$$= r^2 - 2 \cdot (X_a \cdot X + Y_a \cdot Y) + X^2 + Y^2$$

$$\text{nu : } X_a = r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \text{ en } Y_a = r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

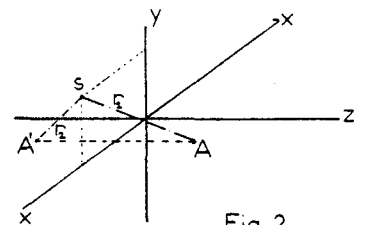
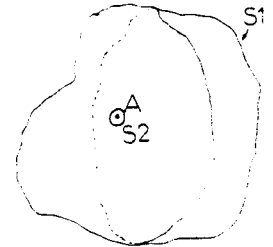


Fig. 2

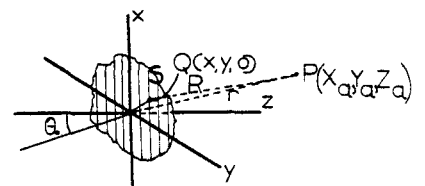


Fig. 3

met  $X, Y \gg r$  vinden we

$$R = r \cdot \sqrt{1 - (2/r) \cdot (X \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + Y \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta))} \approx \\ \approx r - (X \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + Y \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta))$$

Blz. 13

$$p_A = -\frac{1}{2\pi} \cdot \int p_s \cdot \left( \frac{\partial \exp(-jkR)}{\partial z} \right) \cdot \vec{n} \cdot dS \quad \text{bij reflectie geldt } p_s = p_{in} \text{ en}$$

$$p_{in} = \exp\{-jk \cdot (X \sin(\theta_0) + Z \cos(\theta_0))\}$$

$$\left\{ \frac{\partial \exp(-jkR)}{\partial z} \right\} = \exp\{jk(X \sin(\theta_p) \cos(\phi_p) + Y \sin(\theta_p) \sin(\phi_p))\} \cdot \left\{ \frac{\partial \exp(-jkr)}{\partial z} \right\} = \\ = \exp\{jk(X \sin(\theta_p) \cos(\phi_p) + Y \sin(\theta_p) \sin(\phi_p))\} \cdot \left\{ \frac{-1+jkr}{r} \cdot \exp(-jkr) \right\} \frac{\partial r}{\partial z}$$

nu is  $\frac{\partial r}{\partial z} = -\cos(\theta_p)$  en als  $kr \gg 1$  vinden we

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \exp\{jk(X \sin(\theta_p) \cos(\phi_p) + Y \sin(\theta_p) \sin(\phi_p))\} \cdot \cos(\theta_p) \cdot \frac{jk}{r} \cdot \exp(-jkr)$$

met  $\frac{\partial G}{\partial z} \cdot \vec{n} = -\frac{\partial G}{\partial z}$  en met  $p_{in}$  vinden we

$$p_A = \frac{jk}{2\pi} \cdot \cos(\theta_p) \int p_s \exp\{jk(X \cos(\phi_p) \sin(\theta_p) + Y \sin(\theta_p) \sin(\phi_p) - X \cos(\theta_0))\} dS \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r}$$

Blz.13 : Om bovenstaande integraal uit te kunnen rekenen voeren we  $\lambda$  in zoals gedefinieerd in (9), blz. .

Met  $X = r \cdot \cos(\phi)$

$Y = r \cdot \sin(\phi)$  vinden we:

$$\iint \exp\{jkr(\lambda \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\psi) + \lambda \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\psi))\} d\phi dr = \\ \int_0^a r dr \int_0^{2\pi} \exp(jkr\{\cos(\phi-\psi)\}) d\phi = \int_0^a r \cdot 2\pi \cdot J_0(kr\lambda) = 2\pi a^2 \cdot \frac{J_1(ka\lambda)}{ka\lambda}$$

$\infty$  Blz 14 reeksontwikkeling  $J_m(x)$  (zie o.a. litt. 35):

$$J_m(x) = \frac{x^m}{2^m \cdot m!} \cdot \left( 1 - \frac{x^2}{1! \cdot 2^2 \cdot (m+1)} + \frac{x^4}{2! \cdot 2^4 \cdot (m+1)(m+2)} - \dots \right)$$

voor  $m=1$  vinden  $\Lambda_1 = 2 \cdot J_1(x)$

Voor  $m=1$  vinden we:  $\Lambda_1(x) = \frac{2 \cdot J_1(x)}{x} = \left(1 - \frac{x^2}{1! \cdot 2^2 \cdot 2} + \frac{x^4}{2! \cdot 2^4 \cdot 2 \cdot 3} - \dots\right)$

Blz. 14 : de integraal:

$$\int_{-\frac{1}{2}a}^{\frac{1}{2}a} \exp(jk\alpha x) dx \cdot \int_{-\frac{1}{2}b}^{\frac{1}{2}b} \exp(jk\beta y) dy =$$

$$\frac{-1}{k^2 \cdot \alpha \cdot \beta} \cdot \left\{ \left| \exp(jk\alpha x) \right|_{-\frac{1}{2}a}^{\frac{1}{2}a} \cdot \left| \exp(jk\beta y) \right|_{-\frac{1}{2}b}^{\frac{1}{2}b} \right\} = \frac{4}{k^2 \alpha \beta} \cdot \sin\left(\frac{1}{2}k\alpha a\right) \cdot \sin\left(\frac{1}{2}k\beta b\right)$$

Blz. 15 : De bladreflektiecoëfficiënt  $R_p$  :  $R_p = \frac{\hat{p}_r}{\hat{p}_i}$  Uit v. Wulfften-Palthe,  
(litt. 34, blz. 158)

$$\left. \begin{aligned} (\hat{p}_i - \hat{p}_r) \cdot \frac{\cos(\theta)}{\rho c} &= \hat{v}_o = \hat{p}_t \cdot \frac{\cos(\theta)}{\rho c} \\ \hat{p}_i + \hat{p}_r - \hat{p}_t &= j\omega m \hat{v}_o \end{aligned} \right\} \hat{p}_t = \frac{\rho c}{\cos(\theta)} \cdot \hat{v}_o$$

$$\hat{p}_i + \hat{p}_r = \left( \frac{\rho c}{\cos(\theta)} + j\omega m \right) \cdot \hat{v}_o = \left( \frac{\rho c}{\cos(\theta)} + j\omega m \right) \cdot (\hat{p}_i - \hat{p}_r) \cdot \frac{\cos(\theta)}{\rho c}$$

$$\hat{p}_i + \hat{p}_r = \hat{p}_i - \hat{p}_r + (\hat{p}_i - \hat{p}_r) \cdot j\omega m \cdot \frac{\cos(\theta)}{\rho c} \quad \text{dus} \quad \frac{\hat{p}_r}{\hat{p}_i} = \frac{j\omega m \cos(\theta)}{2\rho c + j\omega m \cos(\theta)} \quad \text{en } \omega = 2\pi f$$

Blz. 16 :

1<sup>o</sup> rotatie: het X-Y vlak wordt over een hoek  $+\phi_b$   
geroteerd:

$$x' = x \cos(\phi_b) + y \sin(\phi_b)$$

$$y' = x \sin(\phi_b) - y \cos(\phi_b)$$

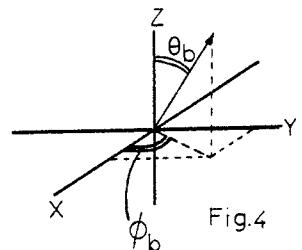
$$z' = z$$

2<sup>o</sup> rotatie: Het X'-Z' vlak wordt over een hoek  
 $90^\circ - \theta_b$  geroteerd:

$$x'' = -x' \cos(\theta_b) + z' \sin(\theta_b)$$

$$y'' = y'$$

$$z'' = x' \sin(\theta_b) + z' \cos(\theta_b)$$



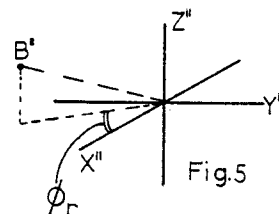
Kombinatie geeft:

$$x'' = -x \cos(\theta_b) \cos(\phi_b) - y \cos(\theta_b) \sin(\phi_b) + z \sin(\theta_b)$$

$$y'' = x \sin(\phi_b) - y \cos(\phi_b)$$

$$z'' = x \sin(\theta_b) \cos(\phi_b) + y \sin(\theta_b) \sin(\phi_b) + z \cos(\theta_b)$$

$$\text{Blz. 17} \quad : \quad \cos(\phi_r) = \frac{x_b''}{\sqrt{(x_b'')^2 + (y_b'')^2}}$$



$$x''' = \cos(\phi_r) \cdot x'' + \sin(\phi_r) \cdot y''$$

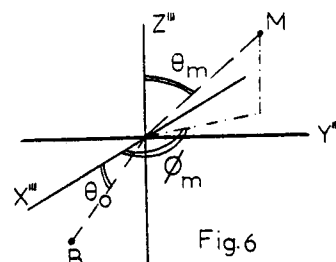
$$y''' = \sin(\phi_r) \cdot x'' - \cos(\phi_r) \cdot y''$$

$$z''' = z''$$

$$\infty \text{Blz.} \quad : \quad \sin(\theta_o) = \frac{x_m'''}{\sqrt{(x_m''')^2 + (z_m''')^2}}$$

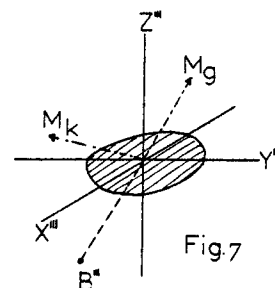
$$\cos(\phi_m) = \frac{x_m'''}{\sqrt{(x_m''')^2 + (y_m''')^2}}$$

$$\cos(\theta_m) = \frac{z_m'''}{\sqrt{(x_m''')^2 + (y_m''')^2 + (z_m''')^2}}$$



Reflektie als  $b'''$  en  $m'''$  allebei boven of allebei onder het vlak  $Z=0$  liggen.

Liggen  $b'''$  en  $m'''$  aan dezelfde kant van het vlak  $Y=0$ , dan is zowel de reflectie als de diffractie klein ( $m_k$ , zie figuur);  $\sin(\theta_p)$  en  $\sin(\theta_o)$  zijn dan tegengesteld van teken.



Blz. 19 :

$$\frac{1}{2} j p_o \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt - j \int_{-\infty}^{+\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt \right\} \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt - j \int_{-\infty}^{+\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt \right\} =$$

$$\text{met } \int_{-\infty}^{+\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt = \int_0^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt = 1$$

$$= \frac{1}{2} \cdot p_o (1-j) \cdot \left\{ \left(\frac{1}{2} - C(v)\right) - j \cdot \left(\frac{1}{2} - S(v)\right) \right\} = \frac{1}{2} \cdot p_o \left\{ (1-C(v)) - S(v) \right\} + j \left\{ S(v) - C(v) \right\}$$

$$\text{Blz. 19} \quad : \quad C(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot (\pi/2)^{2n}}{(2n)!(4n+1)} \cdot z^{(4n+1)}$$

$$S(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot (\pi/2)^{(2n+1)}}{(2n+1)!(4n+3)} \cdot z^{(4n+3)}$$

Voor waarden van  $z$  groter dan 3.1 wordt de reeks te onnauwkeurig (door  $z^{4n}$ ).

$C(z)$  en  $S(z)$  kunnen dan benaderd worden (litt.37).

## Appendix 2

In navolging van de Wit, litt. 28 :

Veronderstel dat de bladen uniform verdeeld zijn over een cilinder met hoogte  $h$  en straal  $R$ .

Als ieder blaadje in een doosje zit met inhoud  $a^3$ , dan is het aantal blaadjes:

$$N = \frac{h \cdot \pi \cdot R^2}{a^3}, \text{ het totale bladoppervlak is nu}$$

$$N \cdot (bo) \text{ en het LAI} = \frac{N \cdot (bo)}{\pi R^2} = \frac{h \cdot (bo)}{a^3}$$

$s$  is het LAI voor één laag; er zijn  $h/a$  lagen dus  $s = \text{LAI} \cdot a/h = \frac{(bo)}{a^2}$

Bij een willekeurige bladstand is het horizontaal geprojecteerde oppervlak  $(bo) \cdot \left( \frac{\sin(\phi_1) + \sin(\phi_2) + \sin(\phi_3) + \dots + \sin(\phi_n)}{n} \right) = (bo) \cdot \frac{2}{\pi}$

als er  $n$  blaadjes in één laag liggen met hoeken  $\phi_1, \phi_2$  etc. en  $n$  groot genoeg is

$$\text{Uit } a = \left( \frac{h \cdot (bo)}{\text{LAI}} \right)^{1/3} \text{ vinden we } : s = \left( \frac{(bo) \cdot \text{LAI}^2}{h^2} \right)^{1/3}$$

blz. : Op blz. is de geluiddruk achter een oneindig lang scherm berekend:

$$p_{m, \infty} = \frac{1}{2} \cdot j \cdot p_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \{ \cos(\frac{\pi}{2} \cdot t^2) - j \cdot \sin(\frac{\pi}{2} \cdot t^2) \} dt \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \{ \cos(\frac{\pi}{2} \cdot q^2) - j \cdot \sin(\frac{\pi}{2} \cdot q^2) \} dq$$

Voor een scherm met eindige lente wordt de eerste integraal in plaats van over het interval  $-\infty, +\infty$  geïntegreerd over het interval  $-1, +1$  waarin  $l = b_z \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot (1/b + 1/m)}$  en  $b_z$  is de halve breedte van het scherm.

We vinden dan  $p_{m,1} \cdot p_b$  de geluiddruk achter het scherm ten gevolge van de afbuiging aan de bovenkant is gelijk aan  $p_{m, \infty} \cdot p_{m,1}$  is de som van  $p_b$  en  $p_z$  zodat  $p_z$  de geluiddruk ten gevolge van de afbuiging aan de zijkant is. Met behulp van de formules op blz. en wat rekenwerk is te vinden dat bij 170 Hz.,  $b=10$  m. en  $m=30$  m. geldt:

$$p_b \text{ en } p_z \text{ in fase : } 20 \cdot \log \left| \frac{p_b + p_z}{p_b} \right| = +1.4 \text{ dB.}$$

$$p_b \text{ en } p_z \text{ in tegenfase : } 20 \cdot \log \left| \frac{p_b - p_z}{p_b} \right| = -1.4 \text{ dB.}$$