

## PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/147972>

Please be advised that this information was generated on 2017-12-05 and may be subject to change.

2535

**Geluid**

**en**

**groen**



**MAURICE MARTENS**



Erratum:

pagina 97, regel 13: table II moet zijn table I.

# GELUID EN GROEN

Promotor: Prof. Dr. H.F. Linskens

Copromotor: Prof. Dr. H. Myncke

PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van de graad van  
doctor in de Wiskunde en Natuurwetenschappen  
aan de Katholieke Universiteit te Nijmegen  
op gezag van de Rector Magnificus  
Prof. Dr. P.G.A.B. Wijdeveld  
volgens besluit van het College van Decanen  
in het openbaar te verdedigen  
op donderdag 27 november 1980  
des namiddags te 16.00 uur

door

MAURICE JOSEPH MARIE MARTENS

geboren te Maastricht

1980

druk: van Mameren Nijmegen

Aan mijn ouders



Gaarne wil ik aan het begin van dit proefschrift een woord van dank richten tot een ieder, die aan het tot stand komen heeft bijgedragen.

Ingevolge het promotiereglement van de Katholieke Universiteit is het niet toegestaan docenten, die aan deze Universiteit verbonden zijn, met name te danken. Voor de faciliteiten en de personele hulp ben ik de Directeur van de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen Dr. C.J.M. Aarts en de afdelingen Botanie en Electronica Research zeer erkentelijk; met name ben ik de heer Jan van Huet voor zijn bereidheid steeds te helpen en te adviseren mijn dank verschuldigd en de heer A.H. Glaap en zijn medewerkers in de Botanische Tuin voor het geleverd plantenmateriaal. Voor de inzet tijdens de doctoraal stage en de bijdrage aan de resultaten, die mede in dit proefschrift zijn bijeengebracht, dank ik de oud-studenten Ton van der Leest, Jacques Sak, Foppe Brolsma, Roel Lauwerier, Paul Houba, Leo van der Heijden, en de studenten Jac Konings, Jos Olders, Wim Buijs en Willibrord Huisman.

Voorts richt ik een woord van dank tot het Staatsbosbeheer op de Veluwe en in de polder Oostelijk Flevoland voor het gebruik van zijn terreinen en de Nijmeegse Aeroclub voor de mogelijkheid de landingsstrip te gebruiken. Een woord van dank gaat ook naar de T.H. Twenthe te Enschede voor het gebruik van de geluiddode kamer, naar de medewerkers van de Technisch Fysische Dienst TNO/TH te Delft voor hun adviezen, naar het Ingenieursbureau Peutz te Nijmegen voor het gebruik van zijn bibliotheek en naar het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne en Rijkswaterstaat voor de geldelijke ondersteuning van het onderzoek.

Finally I express my best thanks to Prof. Dr. A. Michelsen, Institute of Biology, Odense, Denmark, for his co-operation during the pilot experiments with the Laser-Doppler-Vibrometer technique.

# INHOUD / CONTENTS

	pagina/page
Inhoud / Contents	6
1. Inleiding "Geluid en Groen"	7
2. De akoestische eigenschappen van planten	17
3. The acoustic climate of plant communities	58
4. Noise abatement in plant monocultures and plant communities	73
5. The influence of the soil on the acoustic climate of plant communities	109
6. Foliage as a low-pass filter: Experiments with model forests in an anechoic chamber	117
7. Absorption of acoustic energy by plant leaves	141
Samenvatting	153
Curriculum Vitae	156

Hoofdstuk 1. Inleiding "Geluid en Groen"

overdruk uit: Gemeentewerken 6 (1977): 58-63

eveneens integraal gepubliceerd in: Groen 34 (1978): 55-60

## Inleiding

De wereld is vol geluid aangenaam, zoals muziek of de sportuitleet van je eigen voertuig, of hinderlijk, zoals bijvoorbeeld de transistorradio van je bureu op het strand, of andermans sportuitleet

Vrijwel elke handeling of gebeurtenis heeft geluid als onvermijdelijk bijprodukt Met de hinderlijke kant, die geluid heeft voor mens en dier, zullen wij ons bezig houden Het probleem van ongewenst geluid, of wat wij in de wandeling gewoon zijn te zeggen *lawaai* bestaat langer dan menigeeen denkt en is niet iets, wat enkel samenhangt met onze technisch sterk ontwikkelde cultuur reeds klassieke schrijvers klagen over de herrie van paarden-met-wagens in de straten van het oude Rome, en de Duitse schrijver Lessing heeft begin twintigste eeuw al een „Klagschrift gegen dem Larm“ geschreven

Vreemd blijft het, dat de geluidhinder pas veel korter in het brandpunt van de belangstelling staat dan de drie andere typen van milieu-vervuiling, te weten de lucht-, water- en bodem-verontreiniging Wellicht moeten we de verklaring zoeken in de al vermelde onvermijdelijkheid van het maken van lawaai

## Oorzaken en gevolgen van geluidhinder

Een viertal categorieën van geluidhinder kan onderscheiden worden burengerucht, welke vorm van hinder buiten het kader van dit artikel valt, en lawaai ten gevolge van het verkeer, de industrie en de buiten-recreatie In het algemeen kan men zeggen, dat een geluidbron bij een bepaald *gebruik* in een zekere *situatie* aanleiding kan geven tot geluids-overlast De betreffende factor kan zijn de onnodige geluidsterkte van de bron, het onredelijk gebruik en/of de ongunstige omstandigheden naar plaats en/of tijd Laten we een voorbeeld nemen ter verduidelijking

In een woonwijk wordt ernstige geluidhinder ondervonden van doorgaand gemotoriseerd verkeer Deze hinder wordt klaarblijkelijk veroorzaakt door de volgende omstandigheden

*bron* vele voertuigen zijn kennelijk luidruchtig, van dit feit kan een ieder zich met gemak op de hoogte stellen door eenvoudigweg naar een verkeersstroom te luisteren dan vallen altijd wel een aantal voertuigen op, die meer herrie maken dan andere,

*gebruik* ongeduldig claxoneren als een mede-

weggebruiker niet snel genoeg optrekt, het „wegstuiven bij een groen verkeerslicht, het monteren van sportuitleten, het rijden met slecht vastgebonden lading

*situatie* verkeer zonder directe verbinding met een woonwijk dient uit die woonwijk te worden geweerd, immers doorgaand verkeer wordt ervaren als een belager van rust en veiligheid

De gevolgen van overmatig lawaai zijn voor de mens van tweeërlei aard fysisch en psychisch De fysische schade bestaat uit verslechtering van het gehoororgaan ten gevolge van blootstelling aan overmatig hard geluid De psychische gevolgen kunnen veel ernstiger zijn onuitgeslagen gevoel en stress ten gevolge van het s nachts voortdurend passeren van auto's Een overmatig blootstellen van grote bevolkingsgroepen aan vliegtuiglawaai kan zelfs leiden tot een verhoogd percentage sterfgevallen

## Geluid en het meten van geluid en geluidhinder

Alvorens ons betoog te vervolgen zal toch even moeten worden ingegaan op een aantal wat meer technische zaken, die verderop steeds weer terug komen Geluid is het fysisch proces van drukschommelingen rondom de atmosferische druk, die met het oor waarneembaar zijn Het aantal drukschommelingen per seconde noemen we de frequentie of toonhoogte, uitgedrukt in Hertz (Hz) Als eenheid om het geluiddrukniveau aan te geven wordt de decibel (dB) gebruikt en deze maat komt als volgt tot stand Het geluiddrukniveau  $L_p$  in decibel (dB) is gedefinieerd als

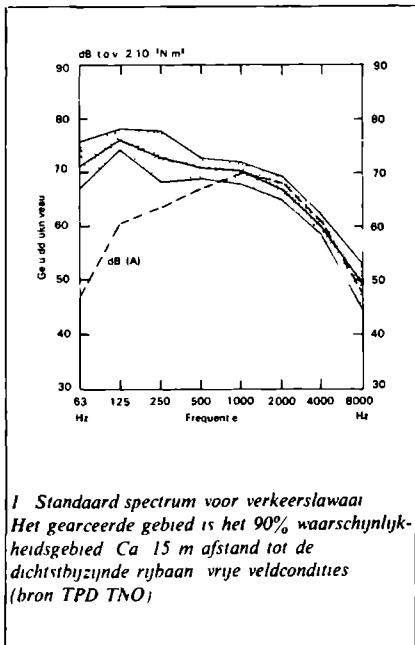
$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \text{ dB}$$

waarbij  $p_{eff}$  – effectieve geluiddruk in  $N/m^2$  en  $p_0$  = referentiedruk, waarvoor is genomen een effectieve geluiddruk nabij de gehoordrempel van het menselijk oor (=  $2 \cdot 10^{-5} N/m^2$ )

Nu is het totale geluid, dat wordt waargenomen samengesteld uit verschillende frequenties, omdat het oor echter niet voor alle toonhoogten even gevoelig is, bouwt men in geluidmeters een filter in, dat een nabootsing is van het oor Het op deze wijze gemeten geluidniveau wordt uitgedrukt in zogenaamde decibels (A) of dB(A)

Een voorbeeld van een fysische registratie is gegeven in afb 1 Als vergelijking met de absolute meting van het verkeerslawaai in dB is de gecorrigeerde dB(A) curve toegevoegd Deze

geeft aan, wat een mens met onbeschadigde oren hoort van het opgetekende verkeerslawaaï op 15 meter afstand van een weg in een vrije veld situatie



Zoals hier is aangegeven, is er bij geluid steeds sprake van een bron een ontvanger en de overdracht via de lucht van bron naar ontvanger Vanaf de bron plant het geluid zich in alle richtingen voort Men dient twee verschillende gevallen te onderscheiden

— het geluid is afkomstig van een enkele bron, bijvoorbeeld een auto

In deze situatie kunnen we spreken van een puntvormige geluidbron en telkens wanneer we de afstand van de ontvanger tot de bron verdubbelen, neemt het geluidniveau ter plaatse van de ontvanger met 6dB af

— het geluid is afkomstig van een verkeersweg met druk verkeer Nu spreken we van een lijnvormige geluidbron In dit geval zal het geluidniveau bij afstandverdubbeling van de ontvanger tot de bron slechts afnemen met 3dB De fysische component van de geluidhinder kan men derhalve met een geluidmeter registreren Heel anders staat het met de psychische kant, aangezien hinder een subjectieve ervaring is bestaat er geen andere methode om de psychische hinder te meten dan door middel van enquêtes Ook de langzamerhand op gang komende registratie van psychische en somatische klachten van patiënten door artsen is hierbij een belangrijk hulpmiddel

### Het voorkomen en bestrijden van geluidhinder

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn, dat geluidhinder het best voorkomen kan worden door de geluidbron of wel te verwijderen of wel zodanig af te zwakken, dat het niveau beneden bepaalde grenzen komt te liggen Daar echter maatregelen bij de bron niet altijd mogelijk zijn kan de overlast door geluid ook nog op andere wijzen worden bestreden Allereerst zijn er wettelijke mogelijkheden, die naast een preventieve werking ook sanctionele mogelijkheden geven Tabel 1 geeft de aanbevolen grenswaarden, welke in het ontwerp van wet inzake geluidhinder worden gehanteerd, deze aanbevelingen zijn gebaseerd op

Tabel 1. Aanbevolen grenswaarden voor de woonomgeving

Aard van de woonomgeving	Aanbevolen grenswaarden dB(A)		
	dag	avond	nacht
1 landelijke omgeving (herstellingsoorden, stille recreatie)	40	35	25
2 rustige woonwijk, weinig verkeer	45	40	30
3 woonwijk in de stad	50	45	35
4 woonwijk nabij hoofdweg, of drukke spoorlijn, woonwijk in stad met enkele werkplaatsen of bedrijven	55	50	40
5 stadscentrum (bedrijven, handel, kantoren, vermaakcentra)	60	55	45
6 gebied met voornamelijk zware industrie	65	60	50

internationale richtlijnen (ISO/R 1996) welke overeenkomen met het advies van de gezondheidsraad voor Nederland. Vervolgens zijn er mogelijkheden om het geluid bij de ontvanger tegen te houden. Het gebruik van oordoppen en -kleppen is een middel, dat in de industrie gebruikt wordt, maar voor toepassing in huis leent deze methode zich allerminst. Wil derhalve een draaglijk geluidniveau binnenshuis bereikt worden, dan zullen er speciale bouwkundige voorzieningen aan de woningen, scholen, kantoren, e.d. moeten worden aangebracht, zoals het dichten van kieren, het aanbrengen van zwaar vensterglas of dubbele beglazing en dikkere muren. Weliswaar wordt door deze maatregelen het geluid van buiten tegengehouden, maar nu kan het gebeuren, dat het burengerucht ineens duidelijker naar voren komt. Een verschijnsel, dat veel is waargenomen tijdens de periode met autoloze zondagen rond de jaarwisseling 1973-1974, toen plotseling het versluisende verkeerslawaa wegviel.

Tenslotte bestaat de mogelijkheid om geluid weg te vangen bij de overdracht via de lucht van bron naar ontvanger. Daartoe bestaat een aantal maatregelen, waarvan de meest eenvoudige is de afstand tussen bron en ontvanger zo groot te maken, dat er geen sprake meer kan zijn van hinder. Op dit principe berust mede het idee van de zonering, zoals dit is opgenomen in de al vermelde wet inzake geluidhinder. Maar deze maatregel vraagt veel ruimte en juist daaraan is in Nederland groot gebrek, zeker in stedelijke en woongebieden. Daarom kan men trachten van de volgende middelen gebruik te maken.

Bij het opzetten van stedenbouwkundige plannen kan men de gebouwen met de minst geluidgevoelige functies het dichtst bij de geluidsbron situeren. Eventueel zelfs met een blinde muur in de richting van de bron, een weg dan wel industrie. Deze bouwmassa's dienen dan als afscherming van de achtergelegen woningen. Zijn dergelijke planologische oplossingen om wat voor reden dan ook niet mogelijk, dan komen in aanmerking het aanleggen van geluidwallen, die al dan niet beplant kunnen worden, en het aanbrengen van geluidwerende muren of schermen.

Tenslotte zou groen een rol kunnen spelen als camouflage van dergelijke muren of schermen of als geluddempend medium, indien er, zoals uit het verdere betoog moge blijken, tenminste enige ruimte aanwezig is tussen bron en ontvanger.

## **Begroeiing als middel tot bestrijding van geluidhinder**

### *Een beetje historie*

Aan het eind van de zestiger jaren werd op het Botanisch Laboratorium te Nijmegen de vraag gesteld in hoeverre vegetatie een bijdrage kan leveren aan het dempen van geluid. Immers, planten hebben een zekere massa en aangezien massa geluid tegen kan houden, lijken planten ook geschikt, bovendien was de verwachting, dat door de complexe structuur van een plantengemeenschap het geluid niet alleen zou kunnen worden teruggekaatst (reflectie), maar ook worden geabsorbeerd.

Aangezien er van Nederlandse onderzoeken op dit terrein op dat moment nog geen sprake was en buitenlandse onderzoeken geen gelijklopende gegevens opleverden – waar nog bij komt, dat wij in Nederland met andere omstandigheden rekening te houden hebben – is het Botanisch Laboratorium begonnen met een reeks proefnemingen.

De eerste oriënterende experimenten naar de akoestische eigenschappen van verschillende vegetatietypen, waarvoor naar analogie met begrippen als cultureel klimaat, fiscaal klimaat, etc., het begrip *akoestisch klimaat* is ingevoerd, vonden plaats in bossen van het staatsbosbeheer op de Veluwe. Afb. 2 en 3 geven een indruk van twee meetplaatsen aldaar, resp. het Keulerbos, gekarakteriseerd door grove den, lijsterbes, vuilboom en bosbes met een hoogte van 12 m, en een perceel in het Deelerwoud met voornamelijk berk en dopheide (jonge berkenaanplant) met een hoogte van 7 meter.

### *De geluidsmetingen*

Bij het begin van de proeven rees als eerste vraag welke meetmethode de meest geschikte is voor dit soort onderzoek, toegespitst op de vraag of aanwezig geluid van verkeer of industrie als bron kon worden benut, dan wel of een eigen standaard geluidsbron geschikt is. Voor de laatste methode werd gekozen en van de huidige meetopstelling, die een verbetering is ten opzichte van die, gebruikt op de Veluwe, geeft Afb. 6 een overzicht. Het door de microfoons opgevangen signaal – ruis of tonen – kan naar gelang de aard van het experiment verschillend verwerkt worden.

### *Het akoestisch klimaat van de meetplaatsen op de Veluwe*

De proeven, die in de zomer en winter van de jaren 1971 en 1972 op de Veluwe zijn uitgevoerd, hebben aanwijzingen gegeven, dat elke

2



## 2. Keulerbos, 3. Deelerwoud.

Beide meetplaatsen zijn gelegen op de Veluwe en zijn onderzocht in de jaren 1971 en 1972. Hun vegetatiekarakteristiek is vermeld in de tekst en hun akoestisch klimaat is afgebeeld in afb. 4 resp. 5

3

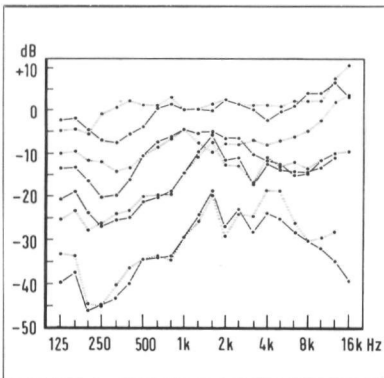


## 4. Het akoestisch klimaat van het Keulerbos.

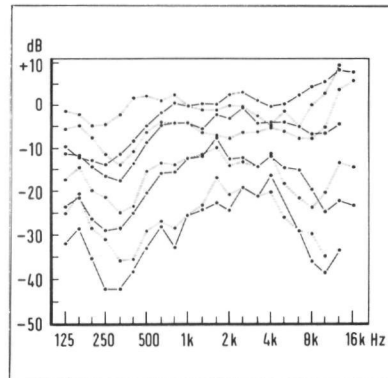
## 5. Het akoestisch klimaat van het Deelerwoud.

Als speaker is gebruikt een houten kast met daarin 2 Philips AD 400M speakers. Het uitgezonden ruissignaal is ontvangen door 2 Sennheiser MD 421 microfoons en ingespeeld op Scotch magnetische banden d.m.v. Uher no. 4200 report stereo tape recorder. De banden zijn geanalyseerd met een Brüel & Kjaer frequentie spectrometer no. 2412 met 1/3 octaaf filters. Uitgezet zijn zomermetingen (met getrokken lijnen) en wintermetingen (stippellijnen). De afstanden van bron tot meetmicrofoon zijn resp. 4, 8, 16 en 32 meter

4



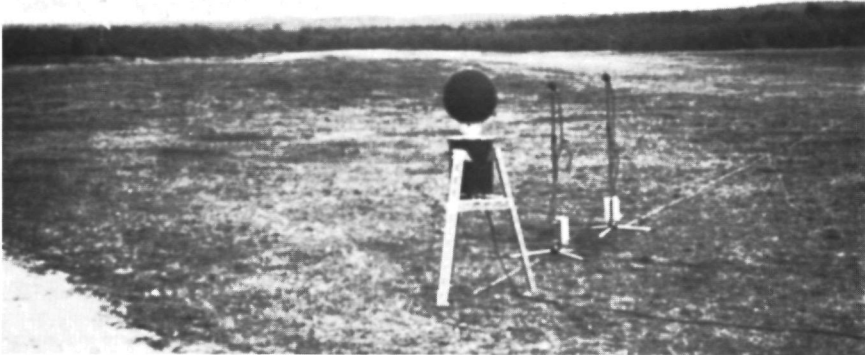
5



begroeiing een eigen akoestisch klimaat heeft, dat zich uit in een aantal algemene kenmerken en een aantal voor de betreffende vegetatie typische karakertrekken. Het gemeten akoestisch klimaat van de twee heel verschillende bostypen op de Veluwe van alf. 2 en 3 is gegeven in de figuren 4 en 5. In totaal zijn 8 bostypen onderzocht, waarvan de gegevens elders te vinden zijn.<sup>1</sup>

Wanneer we deze geluidsspectra met elkaar vergelijken dan vallen als algemene kenmerken op:  
voor frequenties lager dan 1 kHz is er, althans in de zomer, sprake van demping voor alle frequenties; in de winter is de demping minder en niet voor alle frequenties aanwezig. Daar staat tegenover, dat voor frequenties boven de 1 kHz er in zomer en winter versterking optreedt

6



7



6. De verbeterde meetapparatuur: een draaibare JVC-speaker en twee Sennheiser MD 211 microfoons boven een egaal grasveld (zweefvliegveld Malden). Deze opstelling wordt gebruikt voor het bepalen van de bodemeigenschappen

7. Gemengd populierenbos in oostelijk Flevoland. Meetopstelling voor het bepalen van het randeffect (reflecties door de bosrand). Deze metingen zijn nog niet afgerond. Links van de geluidsbron is een cup-anemometer zichtbaar. Tijdens alle metingen worden de weersomstandigheden ter plaatse vastgelegd



van het geluidsignaal, let wel ten opzichte van de 1 kHz, behalve voor de allerhoogste tonen op de wat langere afstanden van bron tot microfoon. De kleinere verschillen die optreden zijn toe te schrijven aan het verschil in samenstelling van deze twee beschouwde plantengemeenschappen: er blijkt meer overeenkomst te zijn tussen het akoestisch klimaat in zomer en winter van het Keulerbos dan van het perceel in het Deelerwoud. De verklaring vindt men in het feit, dat het Keulerbos in zomer en winter door de aanwezigheid van naaldhout minder verschillend is; daarentegen verliest het berkenbosje zijn blad, waardoor de bomen in de winter kaal, de grond echter bedekt is met een dikke laag strooisel. Opgemerkt zij, dat de wintermetingen uitgevoerd zijn zonder sneeuw. De totale geluiddemping over grotere afstand is het grootst in het oudere, beter gestructureerde Keulerbos.

### **Geluiddemping door plantengemeenschappen**

#### *De invloed van de vegetatie op het akoestisch klimaat*

Deze eerste oriënterende metingen zijn in de afgelopen jaren voortgezet, nadat de apparatuur aanmerkelijk verbeterd is. In 1976 werd met deze apparatuur (zie afb. 7) gemeten in een aantal bossen in oostelijk Flevoland en in de botanische tuin van de universiteit van Nijmegen. Het gemeten bos in Nijmegen is een gemengd eiken-

haagbeukenbos met een gemengde boom- en struiklaag. Ook de kruidlaag is redelijk ontwikkeld.

De bossen van het staatsbosbeheer in de polder oostelijk Flevoland lenen zich bijzonder goed voor onderzoek om de volgende redenen: er is keuze uit heel verschillende opstanden binnen een betrekkelijk klein gebied; deze opstanden kunnen bestaan uit één enkel soort bomen van gelijke leeftijd en hoogte, die regelmatig zijn ingeplant, of er is sprake van een gemengd bos, waarvan de boomlaag gevormd wordt door de snelgroeiende Canadassen, waaronder langzame groeiers en struiken zijn ingeplant, waardoor men in staat is de invloed van de verschillende boomsoorten op het akoestisch klimaat vast te stellen. Daar komt als positieve factor bij, dat het achtergrondlawaai, dat de waarde van de metingen grotendeels bepaalt, in het algemeen lager is dan in andere delen van het land.

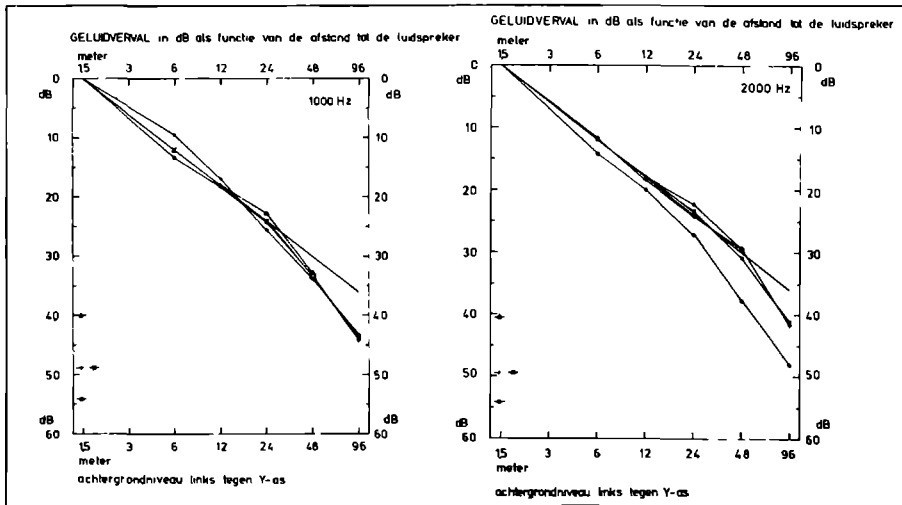
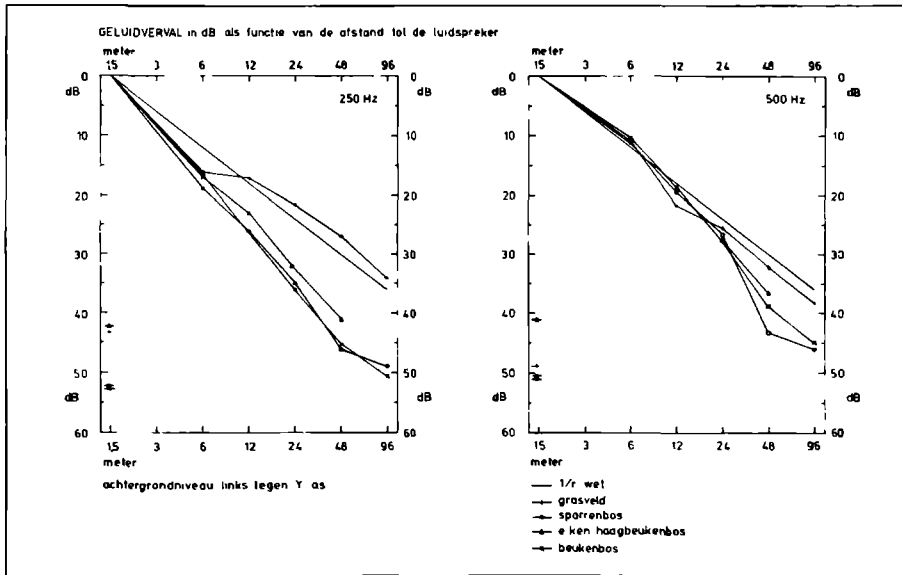
Op de foto van het gemengde populierenbos (afb. 7) is te zien, hoe de meetopstelling gebruikt wordt voor de bepaling van de reflectie van geluidgolven tegen de bosrand. Het sparrenbos, dat als meetobject gebruikt is, is te zien op afb. 8.

Niet alleen bevestigen deze metingen in de Flevopolder en in Nijmegen de resultaten van de vroegere metingen in de bossen op de Veluwe, maar, zoals afb. 9 tot en met 14 laten zien, treedt in alle vegetaties meer demping op in de octaafbanden van 250, 500 en 8000 Hz, dan het

8

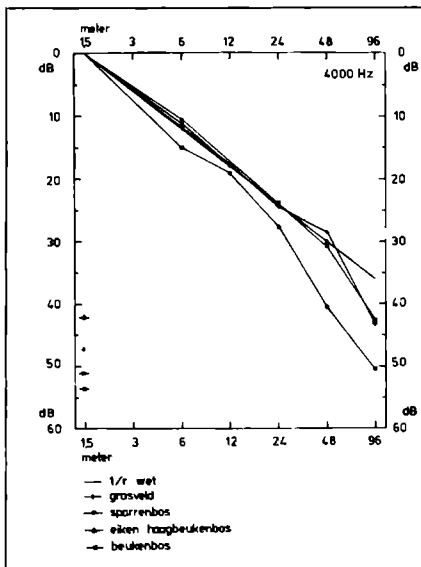


8. Het sparrenbos in de Flevopolder. Het meetobject met hoogste gemeten geluiddemping



Legenda bij afb 9 tot en met 14

De geluidbron (JVC-bol) produceert witte ruis. Het signaal is op de verschillende afstanden gemeten met een General Radio geluiddrukmeter no 1933 met octaafbandfilters.

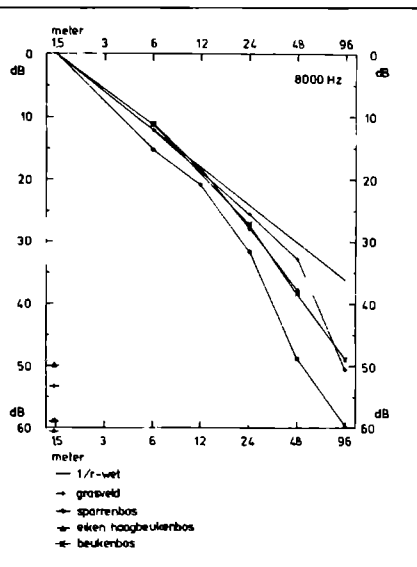


theoretisch verval en het verval boven grasland. Bovendien blijkt, dat het verval in het sparrenbos ook in de octaafbanden van 2000 en 4000 Hz groter is, dan boven gras.

#### *De bodem als belangrijke factor*

Een gedeelte van de algemene eigenschappen, die in elk akoestisch klimaat van vegetaties naar voren treden, m.n. de sterke demping van de frequenties lager dan 1000 Hz kan worden toegeschreven aan de akoestische eigenschappen van de bodem. Hiervoor bestonden reeds aanwijzingen in buitenlands onderzoek. Door echter gebruik te maken van zuivere tonen tijdens de meting en het formeren van computer-modellen, welke vergelijkbaar zijn met de in het veld gemeten resultaten, is dit vermoeden bewezen en hebben we een mogelijkheid om bodemeigenschappen ten aanzien van geluid te bepalen.<sup>2</sup>

Het gaat te ver hier op dit vooral theoretisch werk nader in te gaan, maar als praktisch resultaat komt uit deze experimenten naar voren, dat een poreuze oppervlaktelaag van de bodem meer geluid dempt dan een glad oppervlak zoals asfalt, water, kale grond of een egaal grasveld. Juist de vorming van een dikke humuslaag onder een goed ontwikkelde begroeiing blijkt zeer effectief te zijn.



#### **Discussie**

Een enkele rij bomen langs een weg mag dan fraai zijn, als geluiddempers kan men geen al te hoge verwachtingen hebben van deze bomen. Uit de hier gepresenteerde gegevens blijkt dat vegetatie wel degelijk voor extra demping van lawaai kan zorgen, mits er maar voldoende ruimte aanwezig is en de begroeiing zo dicht mogelijk is. Van de tot nu toe onderzochte plantengemeenschappen voldoet het dichte sparrenbos het best. Derhalve moet aan een aantal voorwaarden voldaan worden wil beplanting effectief zijn voor de vermindering van geluidoverlast om de bron, een industrie bijvoorbeeld, moet tenminste een strook van 50 meter zeer dicht beplant worden, langs een weg dient eenzelfde brede strook genomen te worden. Het beste resultaat wordt volgens de metingen behaald met dicht naalddhout dit heeft echter als nadeel de betrekkelijk langzame groei en de grote gevoeligheid voor luchtverontreiniging. Derhalve zal meestal de beste oplossing gevonden kunnen worden met snelgroeiende loofbomen, Canadese populier en berk, met in de onderlaag langzaamgroeiende bomen als beuk, eik en es, die later de taak kunnen overnemen van de snelgroeiers (vergelijk het beheer in oostelijk Flevoland, waar deze methode wordt toegepast).



15. Een voorbeeld van een effectieve beplanting ten behoeve van geluidwering. De foto is genomen in de Flevopolder. Het is niet de bedoeling dat hier een weg komt, maar dit zou het resultaat kunnen zijn van een vooruitziende planning

om gevarieerde bosopstanden te krijgen) en bovendien een flinke struiklaag. De humus die ontstaat moet als zeer gunstig beschouwd worden: bladeren hoeven dus niet verwijderd te worden. Afb. 15 geeft een dergelijke situatie weer voor beplanting langs een weg, die er – gelukkig – niet is.

In dit verband zij gewezen op metingen langs rijksweg 4 bij Leidschendam, die uitgevoerd zijn onder auspiciën van het ministerie van volksgezondheid en milieuhygiëne.<sup>3</sup> De resultaten van deze metingen, hoewel anders van opzet, geven vergelijkbare resultaten met de hier besproken proeven.

Plantsoenen kunnen aldus een bijdrage leveren aan de fysische vermindering van geluidhinder; het aanbrengen van hoogteverschillen en een gevarieerde beplanting zullen het beste resultaat opleveren, maar bij het aanleggen van paadjes moet er op gelet worden, dat deze niet als geluidkanalen fungeren; derhalve dienen deze door de beplanting heen te kronkelen.

Maar, zoals reeds een aantal malen is aangegeven, heeft geluidhinder ook een psychische kant en de maskering van lawaaibronnen met groen onder het motto „wat niet weet, dat niet deert”, lijkt een positief effect te hebben op de mens en zijn welbevinden.

#### Literatuur

1. Linskens, H. F., Martens, M. J. M., Hendriksen, H. J. G. M., Roestenberg-Sinnige, A. M., Brouwers, W. A. J. M., Staak, A. L. H. C. van der, and Strik-Jansen, A. M. J.: The Acoustic Climate of Plant Communities. *Oecologia (Berl.)* 23(1976): 165-177.
2. Martens, M. J. M.: The Influence of the Soil on the Acoustic Climate of Plant Communities. in: Rathe, E. J.: Proceedings of the 1977 International Conference on Noise Control Engineering INTER-NOISE 77. Zürich, 1977, pp. B 593-B 598.
3. Toorn, J. D. van der: Geluiddemping door Bossen. Rapport nr. VL-HR-06-01 van de Inter Departementale Commissie Geluidhinder Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage, 1975, (versch. 1976).

Hoofdstuk / Chapter 2. De akoestische eigenschappen  
van planten

## 1. VRAAGSTELLING-HISTORISCH

Geluidshinder is geen nieuw probleem van de tegenwoordige tijd. Reeds in de Oudheid was er sprake van klachten over te veel straatlawaai. Geschriften uit Mesopotamië en het Romeinse Rijk wijzen hier al op (7,75). Ook rond de laatste eeuwwisseling is al een inventaris gemaakt van de lawaaihinder en haar gevolgen voor vele mensen en hun activiteit (57). Dat de problemen in de loop der eeuwen niet minder geworden zijn, moge blijken uit de feiten van vandaag de dag (78). De vraag in hoeverre deze milieuhinder te voorkomen is, is even oud als het fenomeen zelf. Sinds de industriële revolutie in de vorige eeuw, die tevens een toename in de individuele verplaatsing van de mens heeft teweeg gebracht, is de hinder door geluid toegenomen, hetgeen tot uiting komt in een jaarlijkse toename van het gemiddelde geluidsniveau in de woonomgeving (78). Mogelijkheden om iets te doen aan deze geluidshinder zijn er wel degelijk: op drie punten kan het geluid worden aangepakt, bij de bron, tijdens de overdracht en bij de ontvanger (65).

Beplantingen zijn reeds sedert mensenheugenis gebruikt om het leefmilieu van de mens te veraangemen; het is dan ook niet verwonderlijk, dat het idee om planten te gebruiken als geluiddempers ontstaan is (3,69). Daar heeft zeker een rol bij gespeeld, dat de psychische reactie van de mens op de aanwezigheid van beplanting zodanig is, dat de hinderscore, die optreedt bij een door beplanting gecamoufleerd hinderlijk object, minder is dan bij een hinderlijk object, dat zonder meer zichtbaar is of omgeven door een duidelijk als scherm bedoelde constructie of een geluidswal (40, 64, 85).

In de periode tussen de twee wereldoorlogen, had het probleem der geluidshinder door verkeer en industrie planologen er reeds toe gebracht bij het plannen van woonwijken rekening te houden met plaatselijke omstandigheden, waaronder het voorkomen van planten (3), dit mede naar aanleiding van geluidmetingen in steden (43). Het reliëf, de bodemgesteldheid, het plantendek en het al of niet aanwezig zijn van een inversielaag in de lucht zijn belangrijke zaken, die te maken hebben met de voortplanting van geluid (3, 43, 44). Vooral was er reeds een behoorlijke kennis over de invloed van negatieve en positieve temperatuursgradiënten en windsnelheidsgradiënten op de afbuiging van geluid (3, 44, 84). Er dient op te worden gewezen, dat planten geen invloed zullen hebben op de geluiden met een grote golflengte, maar wel kunnen zij helpen bij het afschermen tegen

geluid met kleinere golflengten (3). Door de invloed, die bossen hebben op het mikroklimaat, zal ook in een vlak landschap door bebossing het akoestisch klimaat worden beïnvloed (3, 32, 55, 88).

De vraagstelling naar de akoestische eigenschappen van planten vindt een eerste - toevallige - experimentele benadering in het werk van von Bekesy, die, hoewel eigenlijk geïnteresseerd in de zaalakoestiek, een experiment uitvoert boven een grasveld; door dit experiment ontdekt hij een sterke demping en hij meent, dat gras een sterke geluidsabsorberende werking heeft, maar dit dempingseffect rond 800 Hz schrijft hij verderop in zijn publicatie toe aan reflectieverschijnselen tegen de grasbodem (12). Het moge hieruit duidelijk zijn, dat ten tijde van von Bekesy's werk het inzicht over de werkelijke factoren, die de geluidsvoortplanting buiten bepalen nog zeer summier en weinig definitief was.

Een uitgebreide bijdrage levert Sieg (92) in de vorm van een overzicht van de stand van zaken vlak voor het uitbreken van de Tweede Wereldoorlog ten aanzien van de meteorologische en landschappelijke invloed op de geluidsvoortplanting; daaraan wordt experimenteel werk toegevoegd, dat uitgevoerd is bij de opzet van een openluchttheater; daarbij vindt hij een demping veroorzaakt door 75 meter graan van 3,5 Phon (dB(A)) (92).

Het eerste naoorlogse onderzoek is uitgevoerd door Eyring in de Panamese jungle (28).

## 2. MEETMETHODEN

Beslissend echter voor de kennis van de akoestische eigenschappen van planten en beplantingen is de toepassing van kwantitatieve meetmethoden om meer en beter inzicht te verkrijgen in de specifieke invloed van vegetatie op de voortplanting van geluid. Derhalve dient de onderzoeker gebruik te maken van geschikte apparatuur. In dit hoofdstuk wordt samengevat welke methodieken en apparatuur in de loop der jaren ontwikkeld en gebruikt zijn.

### 2.1 BRON

Om de akoestische eigenschappen van planten en begroeiingen te onderzoeken is gebruik gemaakt van diverse soorten geluiden en geluidsbronnen, die hierna behandeld worden.

#### 2.1.1 Lawaai

Bij sommige onderzoeken maakt men gebruik van lawaai als geluidsbron: het passeren van een auto met een snelheid van 25 mijl/hr in de tweede versnelling gedurende enige dagen op elk vol uur is als geluidsbron gebruikt om de invloed van een begroeide geluidswal op de geluidsoverdracht te bepalen (1). Men maakt ook gebruik van op de band opgenomen verkeerslawaai en speelt dit af via een speakersysteem, dat op 7,5 of op 15 m voor de te onderzoeken beplantingen en regels staat (21, 83). Ook auto's met stationair draaiende motor worden als geluidsbron gebruikt (41, 42).

Verder zijn onderzoeken gedaan naar de invloed van groenstroken langs autosnelwegen, waarbij het rijdend verkeer als bron fungeert (54, 68, 71, 94). Verder zijn metingen gedaan aan groenbeplantingen in stadsstraten, waarbij auto's als geluidsbron fungeerden (68, 89).

Een enkele onderzoeker meet de geluidvoorplanting door stroken vegetatie langs spoorlijnen, waarbij het lawaai van de passerende trein benut wordt (53).

#### 2.1.2 Schoten

Om de invloed van beplanting na te gaan op de galmtijd in straten is een experiment uitgevoerd met schoten, maar de verdere verwerking en interpretatie van de resultaten is niet duidelijk (29).



### 2.1.3. Kunstmatige geluidsbronnen

In het algemeen gaat de voorkeur van de onderzoekers uit naar het gebruik van elektronisch opgewekt geluid, dat te onderscheiden is in ruis en/of tonen. Het elektronisch opgewekte signaal wordt versterkt en toegevoerd aan een luidspreker of een luidsprekersysteem.

#### 2.1.3.1 Ruis

##### 1. Ongefilterde ruis

Om de effecten te meten, die bladeren op geluid veroorzaken, gebruikt Beck witte ruis, uitgestuurd via een zelfbouw luidspreker (8). Hetzelfde systeem gebruikt hij bij experimenten aan verschillende plantesoorten en gemengde begroeiingen (9, 10, 11).

Een mechanische ruisgenerator, fabricaat Beyer # MGG 200, wordt op 50 cm boven de grond geplaatst; het frequentiespectrum is tamelijk recht (37). Witte ruis wordt ook gebruikt in tropische bossen in Panama en in loof- en naaldbossen in de gematigde streken; de gebruikte bron bestaat uit een Amplivox Hailer # S-610 versterker en luidspreker combinatie (61, 62). Ook in West-Duits onderzoek wordt witte ruis gebruikt (66, 67, 68, 69, 70, 73), die wordt uitgestuurd via een speciale pyramidevormige geluidsbron met schoepenrad (68, 69), een draaiende bolbron (66, 67), of een luidsprekersysteem met 6 midden-lage tonen speakers en 7 midden-hoge tonen speakers (73).

##### 2. Gefilterde ruis

Bij zijn onderzoek naar de geluidsoverdracht door verschillende beplantingen maakt Aylor gebruik van octaaf of tertsbands gefilterde ruis; deze ruis wordt geproduceerd door een speakersysteem bestaande uit een conus gecombineerd met een hoorn voor de hoge tonen (4,5). Andere onderzoekers gebruiken eveneens octaafgefilterde ruis (16, 19, 28, 99), in combinatie met puls-vormige geluidstreintjes (16). Ook tertsbands gefilterde ruis wordt gebruikt (24, 74, 99). Voor de bepaling van de absorptie door wingerd gebruikt Aylor ruis, octaafgefilterd via GenRad # 1933 (6).

### 2.1.3.2 Zuivere tonen

Men gebruikt ook vaak zuivere tonen, gegenereerd met een sinusgenerator (16, 18, 19, 20, 51, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70, 74). Als geluidsbron worden speakers gebruikt, o.a. Amlivox Hailer S-610 (61, 62).

## 2.2 MEETOPSTELLING

### 2.2.1 Impedantiemetingen

Met een impedantiebus zijn impedantie- en absorptiemetingen uitgevoerd aan de bast van bomen en aan bosbodems (19).

### 2.2.2 Buiten

#### 2.2.2.1 Plaats van de bron

De plaats van de geluidsbron ten opzichte van het te onderzoeken object is nogal variabel. Indien er sprake is van het gebruik van auto's als geluidsbron, bevindt de bron zich altijd op een weg (1, 41, 42, 54, 89, 94); bij treinlawaai op het spoor (53). Wanneer met een kunstmatige bron wordt gewerkt, wordt deze ofwel buiten de te onderzoeken vegetatie dan wel in de betreffende vegetatie geplaatst. In het eerste geval zal rekening moeten worden gehouden met de reflecterende werking door de haag, die de vegetatie vormt (4, 5, 16, 21, 24). Börner plaatst de bron met het centrum op 1,7 m boven de grond (16). Beck plaatst de geluidsbron 4 m voor het scherm, waarin de bladeren geplakt zijn (8). Bij metingen aan 53 soorten bomen en struiken enerzijds en gemengde begroeiingen anderzijds, plaatst hij de bron 1 m voor de beplantingen (9, 10, 11). Anderen plaatsen hun Altec speakersysteem, waardoor verkeerslawaai wordt afgespeeld op 7,5 of 15 m voor de te onderzoeken beplantingen op een hoogte van 4 resp. 6 ft voor de twee speakers (21). Aylor plaatst de luidspreker buiten de vegetatie met de as van de bron loodrecht op de rand van de vegetatie (4,5); bij zijn metingen in een straat, plaatst hij de bron, een hoorn, op 1 m boven de grond (6). Ook Embleton plaatst de University PA 30 speaker, gestuurd door een Brüel & Kjaer # 1014 oscillator op 4 ft hoog voor de bossen (24).

Men plaatst de bron ook wel in de vegetatie (19, 20, 28, 51), waarbij de hoogte varieert, 5 ft (28), 6 ft (19), of niet is aangegeven (20). Eyring gebruikt een lage tonen speaker A 15-PM Jensen, Spec C-4351 en een hoge tonen luidspreker Western Electric 594-A (28).

Wil men interferentieverschijnselen als gevolg van de bodem voorkomen, dan moeten bron en ontvanger hoog boven de grond geplaatst worden (12).

#### 2.2.2.2 Plaats van de mikrofoons

Soms is het niet duidelijk, waar de ontvanger geplaatst is (1). Bij andere onderzoeken plaatst men vrij dicht bij de bron een referentiemikrofoon om het uitgezonden geluidsniveau van de luidspreker te monitoren. Aylor plaatst zijn referentiemikrofoon 3 m voor de speaker op dezelfde hoogte als het centrum van de geluidsbron (4), of, zoals in de metingen aan het riet, op 4,3 m voor de geluidsbron, die nu met het centrum op 1,8 m hoogte staat (5); een tweede zelfde mikrofoon gebruikt hij om in de beplantingen het geluiddrukkniveau te meten; de hoogte is voor het maisveld 1 m en in de andere gevallen 1,5 m (4,5). Carlson et al. plaatsen de mikrofoon op een hoogte van 5-8 ft in de vegetatie (19). Chapuis gebruikt een referentiemikrofoon vlakbij de geluidsbron om het uitgezonden niveau constant te houden (20). Morton gebruikt ook een referentiemikrofoon op 15 ft voor de speaker, en plaatst tijdens de meting over 25 tot 300 ft de mikrofoon op een hoogte van 1 ft, 5 ft en soms tot 20 ft (74).

Vele onderzoekers werken zonder referentiemikrofoon (24, 28, 37, 41, 42). Embleton meet de geluidsdruk in de bostypen op 50, 100, 150 en 200 ft afstand van de speaker (24). Eyring plaatst de mikrofoons met tussenafstanden van 100 ft tot op 600 ft van de luidsprekers (28) op 5 ft hoogte. Bij onderzoek in gemengde naald- en loofbossen, wordt de mikrofoon op 1 m hoogte geplaatst met afstandsverdubbeling van 7 tot 224 m van de bron (41, 42). Haupt plaatst de geluiddrukmeter op 7, 22, 37, 52, 67 en 82 m van de ruisgenerator (37).

Bij metingen in een straat plaatst Aylor de mikrofoon op 1,7 m hoogte, 6 m achter de bron (6). Beck plaatst de mikrofoon 0,5 m achter het scherm met de bladeren (8), of achter de 53 bomen en struiken op 4 m van de bron; bij de gemengde begroeiingen is deze afstand afhankelijk van de diepte van de beplanting en kan de afstand bron-mikrofoon oplopen tot 20 m (10, 11). Börner plaatst de ontvanger op dezelfde hoogte als de bron: 1,7 m (16).

Bij metingen in Poolse steden langs straatranden plaatst men 1 sonometer vlak voor de te onderzoeken beplantingen en een tweede er direct achter; er worden zeer hoge dempingswaarden gemeten (89).

Bij onderzoek naar de geluiddemping, die veroorzaakt wordt door dichte regels en windsingels plaatst men de mikrofoon tot op 120 m ver van de speaker achter deze beplantingen; de mikrofoon staat 5,5 ft boven het maaiveld (21). Bij de metingen langs spoorlijnen wordt een referentiemikrofoon voor de beplantingen geplaatst op 7,5 m uit het hart van het spoor en de tweede mikrofoon op 40 resp. 68 m, terwijl de schermbeplantingen 25 en 50 m diep zijn (53); de hoogte van de mikrofoons is 1,5 m boven bovenkant spoorrail. Langs de autosnelwegen plaatst men een referentiemikrofoon voor de begroeiing op 3 m van de wegkant (54) of op 16,5 m (94) met de mikrofoons op een hoogte van resp. 1,5 en 1,8 m. Boven een open grasveld meet men op 1,5 m hoogte een totale demping over 100 m van 17,5 dB (A) en op 14 m hoogte 12 dB (A); over 200 m komt er nog 8 dB (A) bij voor beide hoogtes (54). Laagblijvende begroeiing verhoogt de demping met 5 tot 17 dB (A) (54).

#### 2.2.2.3 Soort mikrofoons

Soms is niet duidelijk, welke ontvanger door de onderzoeker gebruikt is (1, 12, 16, 19, 20, 29, 40, 72, 83). Niettemin kan kennis van de gebruikte mikrofoons bijdragen tot een juiste en goede interpretatie van de meetgegevens. De meeste onderzoekers geven het gebruikte type mikrofoon wel aan. Gebruikt worden: GenRad mikrofoons # 1560-P5 bevestigd op voorversterkers GenRad # 1560-P40 (4, 5, 6, 18, 21, 94).

Meetapparatuur van B & K wordt ook gebruikt (24, 41, 42); onder andere geluiddruk meter # 2203 (24). Eyring gebruikt mikrofoons W-E. 630 A en 633 A (28). Morton gebruikt een rondomgevoelige mikrofoon van Sennheiser MKH104 (74). Haupt gebruikt een impulsgeluiddrukmeter PSI202 (37).

#### 2.2.2.4 Interferenties

Bij meting van de geluidsoverdracht buiten in het vrije veld of in vegetaties kunnen er reflecties optreden tussen de diverse geluidsgolven. Met name zeer opvallend is de reflectie van de geluidsgolven tegen de grond met als gevolg een interferentie patroon tussen de directe geluidsgolf van de bron naar de ontvanger en de golf, die tegen de bodem is gereflecteerd. Bij de metingen zal dit effect te vinden zijn in de frequenties lager dan 1000 Hz. In 3.4. "Bodem" wordt hierop nader ingegaan.

### 2.2.3 Binnen

Proeven, die in het laboratorium worden uitgevoerd, vinden meestal plaats in een geluiddode of in een echokamer. Een enkele keer is de literatuur niet duidelijk ten aanzien van de ruimte waarin het experiment wordt gedaan (24). Resonanties van *Pinus resinosa* takken worden binnen gemeten met een pickup element (24).

#### 2.2.3.1 Echovrije of geluiddode kamer

Voor wat betreft het akoestisch onderzoek aan planten is er geen enkele literatuurverwijzing naar onderzoek, uitgevoerd in een geluiddode kamer, waar nochtans de vrije veld situatie uitstekend wordt benaderd.

#### 2.2.3.2 Echokamer

Men kan in deze ruimte de absorptie coëfficiënt bepalen van allerlei materialen, dus ook van plantenmateriaal. Bij de bepaling van de absorptie coëfficiënt van Onbestendige Wingerd, *Parthenocissus tricuspidata* gebruikte men een bron in de vorm van een hoorn. De bron bevindt zich op 1 m boven de grond, de mikrofoon op 1,7 m hoogte en de afstand tussen beide bedraagt 6 m. De oppervlakte van de op de grond liggende wingerd bedraagt  $3,8 \times 4,1 \text{ m}^2$  en de totale bladoppervlakte is  $57,5 \text{ m}^2$  (6).

Ook heeft men op deze wijze de absorptie coëfficiënt bepaald van een gazon waarop dan later takken van *Picea glauca* en *Abies balsamea* geplaatst zijn, waarna het experiment herhaald is door de takken te vervangen door boompjes van 1,5 tot 2,1 hoog van dezelfde twee soorten; de gemeten absorptie coëfficiënten ontlopen elkaar niet veel; tussen 125 en 500 Hz lopen ze op van 0,45 tot 0,8 om tot bij 8000 Hz op te lopen tot 1,0 (72). In tegenstelling met voorgaande waarden heeft men onder vergelijkbare meetcondities in een ander instituut hele andere absorptiewaarden voor een grasmat gevonden, die tot en met de octaafband van 1000 Hz vergelijkbaar zijn met de absorptie coëfficiënt van zwaar tapijt: 0,11 bij 125 Hz, 0,26 bij 500 Hz en 1,0 bij 4000 Hz; een herhaling met balsam sparren, zonder gras, levert zeer lage absorptie coëfficiënten van 0,03 bij 125 Hz tot 0,31 bij 4000 Hz (93). Japanse onderzoekers vinden voor vier soorten boompjes absorptie coëfficiënten oplopend van 0,02 bij 125 Hz tot 0,1-0,2 bij 8000 Hz (101).

In een kleine echokamer zijn waarnemingen gedaan aan de absorptie en resonanties door *Pinus strobus* takken en naalden (16); de gebruikte geluidsbron, een JBL LE 5-2 conus met een doorsnede van 12 cm produceert een sinussweep van 180-6000 Hz; de trillingen door de takken met naalden werden gemeten op 6 cm boven het vastklempunt met stereo pickups (18).

### 2.3 VERWERKING

Daar de interesse van een aantal akoestici en biologen uitgaat naar de invloed van de planten op de geluidstransmissie, tracht men in het algemeen zo'n zuiver mogelijk beeld te krijgen van deze invloed. Derhalve maakt men gebruik van correctie factoren om andere invloeden dan de planten uit te schakelen. Met behulp van rekenprogramma's corrigeert men de gevonden overdrachtwaarden voor de afstand door toepassing van de  $1/r$  - wet (6 dB - wet) (4) en voor de luchtdemping (4, 33, 34, 35, 36, 46, 81, 82). Men tracht de experimenten onder zodanige meteorologische omstandigheden uit te voeren, dat geen correctie nodig is voor breking als gevolg van allerlei gradiënten (4). Niettemin kan het nodig zijn dit te doen, zeker als over grote afstanden gemeten wordt.

Sommige onderzoekers corrigeren niet voor meteorologische omstandigheden, maar alleen voor de sferische uitbreiding, de 6 dB - wet (24).

#### 2.3.1 Totale ruis

Bij gebruik van verkeerslawaai als bronspectrum past men vaak analyse van het totale ruisachtige signaal toe (21, 41, 42, 53, 66, 94), waardoor een totale demping gevonden wordt in dB (A).

#### 2.3.2 Octaafbanden

Verschillende onderzoekers passen octaafbandanalyse toe (8, 9, 10, 11, 19, 28, 37, 41, 42), met analysator GenRad 1558 BP (21), met een Western Electric filterset RA-363 (28), met Brüel & Kjaer apparatuur (41, 42, 94), of met een octaafilter OF101 van VEB Messelektronik Dresden (37).

#### 2.3.3 Tertsbanden

Aylor maakt gebruik van tertsbandsanalyse via een GenRad analysator # 1564-A (5,6).

#### 2.3.4 1/10 octaafbanden

De door de ontvanger geregistreeerde geluidsdrumniveaus kunnen ook in 1/10 octaafbanden geanalyseerd worden; Aylor gebruikt hiervoor een GenRad analysator # 1564-A (4).

#### 2.3.5 Zuivere tonen

Analyse van uitgestuurde zuivere tonen gebeurt ook wel met het oor (20), maar meestal met analyse apparatuur (63).

#### 2.3.6 Gebruikte dempingswaarden

Men tracht aan bepaalde planten of bossen een eenduidige dempingswaarde toe te kennen. In de literatuur vindt men deze dempingswaarden opgegeven in dB/ft (28), dB/m (16, 66, 67, 68, 69, 70, 94), dB/100 ft (4, 24, 83) en dB/100 m (37, 38, 41, 42), berekend uit de totaal gemeten transmissiewaarden, gecorrigeerd voor een aantal factoren. In de literatuur wordt nog geen standaard maat gebruikt, hoewel men de laatste tijd er toe neigt de voorkeur te geven aan de demping in dB/100 m.

### 3. INTERACTIE PLANT-GELUID

De verwachting kan bestaan, dat de effecten, die de verschillende onderdelen van de plant op de geluidsvoortplanting zullen hebben gesommeerd kunnen worden om een totaal indruk te kunnen krijgen betreffende de invloed van beplantingen op de geluidsoverdracht. Maar men dient zich te realiseren, dat deze verschillende effecten in dezelfde frequentiegebieden kunnen liggen. Dan zal er waarschijnlijk niet meer zonder meer opgeteld kunnen worden. Het zal erg moeilijk zijn om al deze effecten te vinden en te combineren. Menig auteur doet echter een poging een bijdrage te leveren aan de oplossing van deze moeilijke problematiek.

#### 3.1 MOGELIJKE BEINVLOEDING VAN GELUID DOOR PLANTEN

Men kan planten als heel eigen structuren beschouwen, die de ruimte tussen bron en ontvanger kunnen vullen; deze structuren zullen een aantal effecten op het geluidsveld hebben, waarvan de belangrijkste hier nader beschouwd worden.

##### 3.1.1 Reflecties

De geluidsgolven van bepaalde frequenties, afhankelijk van de afmetingen der bladeren, worden voor een deel gereflecteerd tussen de bladeren; door deze reflecties kan uitdoving ontstaan, die bijdraagt aan de vermindering van de totale geluidsenergie (4). Reflecties kunnen mogelijk ook optreden tussen de bodem en de kroonlaag van de bomen, indien het bos open is en geen struik- en of kruidlaag bevat (4). Om geluid te laten reflecteren tegen de als scherm fungerende haag van een beplanting, dient deze vanaf de bodem gesloten te zijn tot bovenaan toe (10, 11, 16). Wanneer bron en ontvanger vóór de haag geplaatst zijn, kan de reflectie door de bosrand of de haag bepaald worden. Börner bepaalt de zogenaamde "Geluidsreflectiefactor" (P) van een aantal hagen en bosranden: Dennen, 0,7-10 m hoog, Robinia's, 0-5 m hoog; Thujaheg 0-4 m hoog en een populierenbos 0-7,5 m hoog. De door hem bepaalde P loopt op van 0,1-0,15 bij 200 Hz tot 0,17-0,3 bij 3000 Hz (16).



Er treedt reflectie op tegen dichte begroeiingen, zoals heggen, die in een aantal metingen van Meister en Ruhrberg de grootste bijdrage leveren aan de door hen gegeven dempingswaarden (66, 67, 68, 69, 70); bovendien blijkt uit de waarden, die zij vinden, oplopend tot 0,5 dB/m, dat de hoek van inval van het geluid een rol kan spelen (66).

### 3.1.2 Interferenties

Interferenties ontstaan als gevolg van reflecties, bij voorbeeld door de werking van de bodem of door reflecties in de vegetaties, tussen de bodem en de kroonlaag bij afwezigheid van een dichte ondergroei.

### 3.1.3 Buiging

Buiging van geluidsgolven om objecten in het geluidsveld is bekend; ten aanzien van planten wordt hierover echter maar eenmaal bericht (40).

### 3.1.4 Absorptie

De absorptie coëfficiënt van wingerd is in een echokamer bepaald en is bij 2 kHz 0,3 en bij 4 kHz 0,5 (6). Uit metingen in een straat met gebouwen, die begroeid zijn met deze Onbestendige wingerd, vindt men een afname van de galm van 30 dB/s vergeleken bij de onbegroeide situatie in het frequentie gebied van 4 kHz (6).

De absorptie van geluidsenergie zou niet veroorzaakt kunnen zijn, doordat de bladeren en naalden van bomen in trilling worden gebracht door de geluidsgolven (4).

Soms suggereert de presentatie van de resultaten van metingen, dat er sprake is van absorptie van geluidsenergie door organen van planten; nadere beschouwing van de uitvoering van de experimenten laat eerder het vermoeden ontstaan, dat er sprake is van andere effecten, bij voorbeeld reflectie (8, 9, 10, 11).

### 3.1.5 Verstrooiing

Berekeningen van Aylor uit de gemeten absorptie coëfficiënt van *Parthenocissus tricuspidata* aan de totaal gemeten afname van de galmtijd in de straat leidt tot zijn conclusie, dat het grootste deel van die

galmtijdvermindering niet veroorzaakt is door geluidsabsorptie, maar een gevolg moet zijn van verstrooiing van het geluid tussen de bladeren (4,6).

Verstrooiing van het geluid in het bladerdek van een beplanting zou de belangrijkste bijdrage leveren in de geluidsvermindering door planten; vanaf 6000 Hz zou dit effect belangrijk zijn (16); ook stammen verstrooien het geluid (4,19).

### 3.1.6 Omzetting in warmte

De omzetting van geluidsenergie in warmte door inwendige wrijving in de bladeren is te verwaarlozen; wel treedt er warmteverlies op in de luchtgrenslaag rondom het blad door het verschil in viscositeit van de lucht en de gasfase direct rondom en in het blad (4). Ook de absorptie door *Pinus* naalden, gemeten in een echokamer, komt overeen met de verwachte en berekende thermoviscose absorptie in de grenslaag tussen naalden en lucht (18).

### 3.1.7 Resonanties

Resonanties zijn gemeten aan *Pinus resinosa* takken van 6-8 ft lang in het laboratorium, en in het vrije veld. De resonantiefrequenties zijn gevonden bij 275 en 450 Hz, en in het vrije veld bij 1100 Hz voor de takken hoog in de boom, lengte van de takken 2,5 ft (24).

## 3.2 EFFECT VAN INDIVIDUELE PLANTEN OP GELUID

### 3.2.1 Onderdelen van de plant

#### 3.2.1.1 Bladeren en naalden

De afmetingen van bladeren afzonderlijk, maar ook hun totale oppervlakte per volume eenheid bos of andere vegetatie kunnen van belang zijn voor de geluidsvoortplanting door een vegetatie. Derhalve trachten verschillende auteurs een bruikbare parameter uit deze eigenschap te halen.

Beck heeft de geluidsvermindering door bladeren van diverse soorten planten gemeten in het vrije veld. Hij plakt daartoe bladeren in een raamwerk aan kunststof draden, één bladlaag dik, en zo, dat 80% van het raamwerk bedekt is (8).

Aylor heeft de geluidsvoortplanting door een maisbestand bepaald bij twee verschillende hoeveelheden bladoppervlak per volume-eenheid bladerdek, achtereenvolgens 6,3 en 3,0 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, welke waarden corresponderen met 27 respectievelijk 13 planten /m<sup>2</sup> (4), en aan een dichte begroeiing van riet met 59 planten/m<sup>2</sup> en een totale bladoppervlakte per volume-eenheid bladerdek van 3,0 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (5). De gemiddelde breedte van de maisbladeren is 74 mm en van de rietplanten 32 mm. Hij concludeert, dat er geen lineair verband bestaat tussen de totale hoeveelheid bladoppervlak per m<sup>3</sup> vegetatie en de hoeveelheid extra demping in relatie tot de frequentie van het geluid; echter geeft hij wel een curve, waarin de gevonden waarden voor mais en riet zijn gecombineerd. Deze waarden blijken goed met elkaar in overeenstemming te zijn (4,5).

Uit de resultaten, die hij gevonden heeft tijdens het onderzoek naar de soortspecifieke geluiddempende eigenschappen van plantesoorten, leidt Beck een formule af voor het dempingseffect (delta L) van de bladeren

$$\text{delta L} = (\text{bladoppervlak in cm}^2/10 \text{ cm}^2) \cdot \text{dB}.$$

Deze formule geldt niet voor bladoppervlakken groter dan 40 cm<sup>2</sup> (8, 9, 10, 11). Hij vindt alleen effecten in het frequentiegebied boven 1000 Hz; ook is de hoogte van delta L afhankelijk van de invalshoek van het geluid. Bij een verhoging van de bedekkingsgraad tot 160% door meer *Tilia plathyphyllos* bladeren op het raamwerk te plakken neemt delta L toe. Verdere verhoging van de bedekkingsgraad heeft geen effect (8,9).

### 3.2.1.2 Takken en twijgen

In de grenslaag aan takken treedt energie verlies op door verstrooiing van het geluid in de hoge frequenties vanwege de harde oppervlakken van de takken (4),

Resonantiemetingen aan *Pinus* takken in het lab leveren resonantiefrequenties bij een taklengte van 4-6 ft op van 275 en 450 Hz (24). Nauwkeurige metingen aan *Pinus* takken, 60-100 cm lang, met naalden, gemiddelde bedekking 0,78 m<sup>2</sup>, in een echokamer, geven aanwijzing, dat er ook sprake is van trillingen van deze organen onder invloed van de door geluidsenergie gedreven trillende luchtmoleculen; de trillingsnelheid van de takken is echter twee ordes van grootte kleiner, dan de snelheid van de luchtpartikels (18).

### 3.2.1.3 Stam

De maisplanten in het onderzoek van Aylor hadden een stamdoorsnede van 15 mm bij een gemiddelde hoogte van 1.8 m (4) en de hoogte van het riet was 2,5 m (5). De doorsnede van de Canadese hemlocksparstammen, gemeten op 1,5 m hoogte, bedraagt  $90 \pm 25$  mm, terwijl een groot aantal van deze stammen krom is, namelijk 70% (4). De doorsnede van de stammen van de rode dennen op 1,5 m hoogte boven de grond bedraagt  $230 \pm 35$  mm (4).

In het gebied van de lage frequenties zal geen verstrooiing van geluid optreden als gevolg van de stammen; in de hoge frequenties echter wel, aangezien de golflengten dan in de zelfde orde van grootte zijn als de doorsnede van de stammen (4). Indien de geluidsdemping in de hoge frequenties berekend wordt aan de hand van de afmetingen en het aantal struik- of boomstammen, blijkt deze in overeenstemming te zijn met de gemeten dempingswaarden (4). Ook resonanties kunnen belangrijk zijn (24).

Met een impedantiebuïs is de absorptie door de bast van verschillende soorten bomen onderzocht; *Pinus strobus*, *Quercus rubra*, *Q. suber*, *Juglans*, *Tsuga* en *Fagus silvatica* en bedraagt minder dan 0,1 over het frequentiegebied van 400-1600 Hz; de geluidsabsorptie is derhalve gering en er zal vooral verstrooiing optreden door de stammen (19).

Theoretische berekeningen steunen het idee, dat stammen en takken een bijdrage leveren aan de geluidsdemping in bossen (25, 58, 97).

### 3.2.2 De plant als geheel

Wanneer we de plant als een geheel beschouwen, en dan gaat het met name om de bovengrondse delen in hun totaliteit, dan zal zo'n plant al naar gelang de totale afmetingen invloed kunnen hebben op geluidsgolven. Terecht merkt Aujeszky op, dat planten geen invloed hebben op geluidsgolven met een grote golflengte, de lage tonen, maar zo gauw de golflengte van het geluid zodanig is, dat deze in de buurt komt van de afmetingen van de plant als geheel zal er wel degelijk sprake zijn van beïnvloeding van die geluidsgolf door de plant (3).

### 3.3 VEGETATIE EN GELUID

In de literatuur vindt men 3 patronen aangegeven volgens welke de extra demping door bebossing zou plaats vinden:

1. Een geleidelijke toename van 0,007-0,07 dB/ft bij 100 Hz tot 0,08-0,25 dB/ft bij 10.000 Hz (28). Niettemin is deze geleidelijke toename iets minder in het midden frequent gebied, dan in de lage en hoge frequenties (28,83). Wiener en Keast vinden eveneens een met de frequenties geleidelijk oplopende demping van 10 dB/1000 ft bij 400 Hz tot 75 dB/1000 ft bij 5000 Hz (99).

2. Een constante, frequentie-onafhankelijke extra demping tot de midden frequenties, en van daar af een geleidelijke toename van de extra demping met de toename van de frequentie: Embleton vindt een constante extra demping van 7 dB/100 ft tot 2000 Hz, en vanaf die frequentie een toenemende demping (24).

3. In de lage frequenties wordt een groot dempingsmaximum gevonden, in de hoge frequenties vindt men ook een gebied met een zekere geluidsdemping, terwijl in het midden frequentie gebied slechts weinig demping optreedt (4, 19, 37, 38, 74, 94).

De zichtafstand in een vegetatie correleert slecht met de gevonden dempingseigenschappen van een vegetatie; dit wordt verklaard, doordat de zichtafstand sterk kan worden verminderd door kleine objecten, die weinig geluid verstrooien (4,24).

Aanvankelijk meende men wel een relatie te kunnen leggen tussen de zichtafstand en de extra demping (28,83).

Aangezien er vaak sprake is van aangeplante begroeiingen, gaan we eerst in op een aantal vormen van dit soort met een speciaal doel, en dat kan het bestrijden van geluidhinder zijn, aangeplante vormen van vegetaties. Daartegenover staan dan de natuurlijke vegetaties, of plantengemeenschappen, waarover in paragraaf 3.3.4 meer wordt gezegd.

#### 3.3.1 Monocultures

Men heeft de geluidvoortplanting onderzocht aan dicht geplante maisplanten (*Zea mays*) (4), riet (*Phragmites communis*) (5), een tien jaar oud bestand van Canadese hemlocksparren (*Tsuga canadensis*) (4), en

een tamelijk open bestand van 16 m hoge rode dennen (*Pinus resinosa*) (4). Het patroon van de geluidstransmissie door het maisveld en het rietveld in de getijdzone vertoont in het gebied van de lage frequenties een afwijking van het gangbare patroon in die zin dat er geen extra demping is gevonden in het frequentiegebied van 300 tot 500 Hz. Daarentegen is de extra demping in de hoge frequenties erg groot: bij 1000 Hz reeds meer dan 15 dB/100 ft, bij 2000 Hz 25 dB/100 ft en bij 4000 Hz meer dan 30 dB/100 ft; een echt goede verklaring van deze hoge extra demping is niet door de auteur gegeven (4). In het rietveld vindt hij een extra demping, die vanaf 1000 Hz met 10-11 dB/100 ft toeneemt per frequentie verdubbeling tot 46 dB/100 ft bij 10.000 Hz; het verschil tussen de extra demping in mais en riet meent hij te kunnen verklaren uit het verschil in bladbreedte, respectievelijk 74 en 32 mm (5). Ook heeft men de geluidstransmissie onderzocht aan een bos bestaande uit *Thuja occidentalis* van verschillende leeftijd, 10 tot 30 ft hoog, waarbij de kroon van de oudere bossen op 20 ft boven de grond begint, en aan een sparrenbos, *Picea mariana*, 15 ft hoog. De extra demping, die tot 2000 Hz 7 dB/100 ft bedraagt, loont op tot 9 dB/100 ft bij 8000 Hz (24). Dempingsmetingen in zomer en herfst met een gering verschil in de dempingswaarden zijn uitgevoerd in bossen bestaande uit dennen, sparren, eiken en beuken al dan niet voorzien van ondergroei (37, 38). In de hoge frequenties meet men extra demping tengevolge van de aanwezigheid van struiken; de demping is significant beter in de naaldbosbossen, en het beste in het dennenbos (38); de gemeten dempingswaarden zijn bij 2000 Hz het laagst en lopen op tot 20 dB/100 m bij 8000 Hz.

Verder zijn dempingswaarden gevonden van 0-0,1 dB/m bij 200 Hz tot 0,15-0,25 dB/m bij 3000 Hz voor een *Symphoricarpos* haag, 3 m hoog, een gemengd loofhout met dichte struiklaag van 8 m hoog, een dennenopstand van 3 m hoog en bij een *Robinia* bestand van 5 m hoog (16).

### 3.3.2 Gemengde vegetaties

Verschillende onderzoekers hebben de geluidsvoortplanting onderzocht in gemengde begroeiingen onder andere in een dichte opstand van struikgewas bestaande uit diverse loofhoutsoorten met een hoogte van 6 m (4).

De extra demping, die gemeten is in het gemengde struikgewas van 6 m hoogte (4) vertoont het normaal voorkomende patroon, met dien verstande,

dat er een seizoenafhankelijkheid lijkt te bestaan ten aanzien van de extra demping in de hoge frequenties; in de zomer is deze ongeveer tweemaal zo groot als in de winter voor het frequentiegebied boven de 1000 Hz. Aangezien het om een loofhoutbestand handelt, dat in de winter vrijwel kaal is, concludeert Aylor, dat er sprake is van een bladeffect (4). Andere auteurs vinden geen verschil tussen zomer en winter (19).

Een gemengd dennenbos, voor 80% bestaande uit *Pinus resinosa* en voor 20% uit *P. Strobus* en een viertal gemengde loofbossen met als voornaamste soorten *Populus*, *Ulmus* en *Acer*, resp. 40-60%, 20-40% en 10%, plus wat andere bomen en een flinke struiklaag, het geheel 20-25 ft hoog geven een constante extra demping van 7 dB/100 ft tot 2000 Hz en verder een toenemende extra demping tot 12 dB/100 ft in de frequenties tot 8000 Hz (24). De randen van deze bossen veroorzaken een negatieve demping, maar wellicht vindt dit zijn oorzaak in het feit, dat als vergelijking de demping gemeten is boven grasland (24); daarmee gepaard gaat overigens een sterke extra demping in de frequenties tot 500 Hz, hetgeen lijkt op een bodemeffect (24).

Gemengde beplantingen met een diepte van ten hoogste 20 m zijn eveneens doorgemeten (10, 11, 21). Ook 14 dicht beplante regels en windsingels 45 tot 120 ft diep en 30 tot 75 ft hoog, zijn onderzocht (21). Achter de schermbeplanting van 25 m diep werd een vermindering van Leq gemeten van 6-7 dB (A), en achter de gemengde begroeiing van 50 m werd een Leq afname van 9 dB (A) waargenomen, beide vergeleken met waarden over vlak grasland (53).

### 3.3.3 Natuurlijke vegetaties

Men heeft metingen uitgevoerd in verschillende tropische natuurlijke bossen; in Equatoriaal Afrika zijn open terreinen en gesloten bossen met elkaar vergeleken: de demping in de gesloten bossen neemt ten opzichte van de open terreinen toe van 2 dB bij 1600 Hz tot 30 dB bij 6400 Hz, maar er wordt geen afstand bij gegeven (20). Ugandese natuurlijke tropische bossen zijn onderzocht in combinatie met de voortplanting van de roep van primaten (95). In de jungle van Midden Amerika, met name Panama zijn 5 tropische vegetaties op hun geluidstransmissie onderzocht (28); deze zijn qua opbouw zo gekozen, dat er sprake is van een toenemende dichtheid en een afnemende zichtbaarheid (28). Andere onderzoekers hebben het akoestisch klimaat van een Panamees tropisch bos vergeleken met dat van de haag van zo'n bos en grasland, dat ontstaan is door jaarlijks afbranden (74).

In min of meer natuurlijk ontwikkelde gemengde naald- en loofhoutbossen in de proeftuin van de ETH- Zürich heeft men naar gelang de bossamenstelling en het reliëf van het terrein een demping gemeten van 3,5-16 dB/100 m; de beste demping treedt op in de octaven met de hoge frequenties (41, 42).

#### 3.3.4 Etages in de vegetatie

Het open rode dennenbos heeft een gesloten kroon, die bij een totale hoogte van de bomen van 16 m begint bij 10,5 m boven het grondoppervlak (4); dit houdt in, dat we in dit bos te doen hebben met een mogelijke reflectie van de geluidsgolven tussen de bodem en de onderkant van de kroonlaag.

Wanneer de kroonlaag niet gesloten is blijkt geluid, dat over de beplanting heen zou buigen tijdens een temperatuursinversie als het ware in het gat in de kroonlaag te duiken; dit blijkt uit het voorkomen van hogere geluidsdrukken in zo'n gat, dan iets verderop onder de gesloten kroonlaag (40).

#### 3.3.5 Strooisellaag

De aanwezigheid van een strooisellaag en de samenstelling van deze laag is in hoge mate afhankelijk van de soortsamenvestelling van de vegetatie ter plaatse. Ook de leeftijd van de vegetatie speelt hierbij een belangrijke rol: indien een vegetatie zeer onlangs is aangeplant, zal de strooisellaag nog dun en onbetekenend zijn; daarentegen zal de humuslaag in een oudere bosopstand zeer gecompliceerd zijn samengesteld en elk jaar een zekere cyclus doorlopen, met name in bossen in de gematigde streken. Zo vindt men onder een tien jaar oude aanplant van Canadese hemlockspar op de bodem een laagje sparrenaalden van 6 tot 12 mm dik en onder een opstand van 16 m hoge rode dennen een 25 mm dikke laag organisch materiaal bedekt door 25 mm vers gevallen naalden, die humus vormen (4). In een 6 m hoog kreupelgewas bestaande uit loofhoutsoorten is een 70 tot 80 mm dikke laag gedeeltelijk vergaan turfstrooisel op de bodem aangetroffen (4).

In het algemeen treft men geen strooisellaag aan in opstanden van eenjarige soorten of boven een kale onbebouwde akker (4).

De jaarcyclus in de strooisellaag is merkbaar in de octaafband van 250 Hz (38).



### 3.4 BODEM

Bij de berekening van de invloed van geluid absorberende oppervlakken, zoals bodems, worden er vaak moeilijkheden ondervonden; bij het vergelijken van een aantal methodieken, die in de literatuur beschreven worden, komt Attenborough dan ook tot de conclusie, dat het voldoende duidelijk is te twifelen aan de opvatting omtrent het bodemmodel van een plaatselijk reagerend half oneindig medium, vooral indien het bodemoppervlak niet bedekt is met gras. Hij stelt dan ook, dat er meer gegevens nodig zijn om de genormaliseerde bodemimpedantie van verschillende grondoppervlakken vast te stellen in relatie tot de permeabiliteit en het watergehalte van die bodems (2).

Veel onderzoek is gedaan naar de geluidsvoortplanting boven grond, die braak is of slechts begroeid met gras; verwezen zij voor dit soort grond naar enige goede samenvattende artikelen (26, 27, 30, 79, 82, 90).

Aylor constateert, dat de extra demping in de lage tonen niet lineair is met de afstand in de open Pinus aanplant (4). Dit is niet zo verwonderlijk, aangezien deze extra demping een gevolg is van interferentie van de directe geluidsgolf van bron naar ontvanger en de door de bodem gereflecteerde golf. De maximale extra demping in dit Pinus bos vindt hij bij 200 Hz. Dat er geen bodemdemping door hem is gevonden in de mais aanplant is vreemd, wellicht heeft hij deze extra demping gemist, daar de frequenties die hij gemeten heeft pas bij 200 Hz beginnen; bovendien maakt hij niet duidelijk in hoeverre de bodem van het maisveld is beïnvloed door het maaien van de maisplanten tijdens de experimenten.

Interessante gegevens presenteert hij ten aanzien van de akoestische eigenschappen van een onbegroeid stuk grond en het bewerken van de grond; de frequentie, waarbij maximale extra bodemdemping optreedt verschuift van 700 Hz voor de dichtgeslibde bodem naar 320 Hz voor de bewerkte grond; bovendien is de extra demping in het laatste geval ongeveer tweemaal zo groot (4).

#### 3.4.1 Akoestisch harde bodems

Het afwijkende patroon van de extra demping, dat Aylor gevonden heeft in de aanplanten van mais en riet, is wellicht een gevolg van het feit, dat de grond, waarop deze planten groeien beschouwd moet worden als

akoestisch "hard" (4,5). Dit geldt zeker voor de rietbegroeiing, daar deze in een getijdzone ligt (5) en de metingen boven water werden uitgevoerd. De grond onder de maisplanten kan akoestisch hard zijn door dichtslibben en de manier van bewerken, die is toegepast (4).

Bij zijn berekening van de voortplanting van het geluid boven de harde doornatte bodem, gebruikt Aylor een akoestische impedantie van 3615 maal de karakteristieke impedantie van lucht (5,47). Niettemin is deze vondst niet in overeenstemming met andere literatuurgegevens.

Het interferentieverschijnsel veroorzaakt door een grasbodem treedt op in de octaafband van 800 Hz (12). Anderen vinden dit bodemeffect boven gras in de octaafband van 500 Hz (38). In dit verband zij er op gewezen, dat men thans andere octaafbandgrenzen gebruikt, dan vroeger de gewoonte was.

### 3.4.2. Akoestisch zachte bodems

Naarmate de bovenste laag van de bodem poreuzer is, onder andere als gevolg van de samenstelling van de strooisellaag, en dus het luchtvolume groter, ontstaat een toenemende fase achterstand voor de gereflecteerde geluidsgolf (77).

De absorptie coëfficiënt, bepaald door een impedantiebuïs 15 cm de grond in te drijven, wat natuurlijk niet bevorderlijk is voor het behoud van een juiste bodemstructuur, van de bodems van een *Tsuga* bos met een tamelijk flinke ondergroei en in een gemengd bos van *Quercus*, *Betulus* en *Pinus strobus*, is vanaf 500 Hz groter dan boven een veld begroeid met luzerne (19). De bodem in dicht beplante regels en windsingels wordt als akoestisch zacht beschouwd; om de netto effecten van de beplanting te kennen, meet men derhalve de absorptie door de bodem op een vergelijkbaar zacht stuk open terrein (21). Deze methode lijkt niet juist, daar het vrijwel onmogelijk is een dergelijke zachte bodem met dezelfde structuur te vinden zonder de betreffende vegetatie erop.

Pas gevallen sneeuw, die zeer poreus is heeft eenzelfde werking als een goed absorberende bodem (96), maar verijst de sneeuw, dan gaan de akoestische eigenschappen lijken op die van een harde bodem of water (96).

### 3.4.3 Fysische invloeden op de bodemsamenstelling

#### 1. Vaste stofgehalte

Het vaste stofgehalte van de bodem is dat deel, dat overblijft als van een bodemdeel het watergehalte en luchtgehalte is bepaald. De totale hoeveelheid vaste stof staat derhalve in nauwe relatie tot de hoeveelheden water en lucht.

#### 2. Watergehalte

Overdag tijdens het proces van fotosynthese zal de plant via zijn wortels water opnemen. Deze wateropname leidt tot een geringe waterafname in de bodemlaag, waarin zich de wortels van de plant bevinden. Hierdoor zal de bovenste bodemlaag droger worden, hetgeen leidt tot een toename in luchtvolume en porositeit in de bovenste bodemlaag. Ook door verdamping onder invloed van de ingestraalde warmte zal deze verdroging optreden, maar de bijdrage van de beplanting zal veel groter zijn (91).

#### 3. Beworteling

Over de invloed van de beworteling van de bovenste bodemlaag op de akoestische eigenschappen van de bodem is nog niets bekend.

#### 4. Porositeit en luchtvolume

De porositeit en het luchtvolume van de bovenste vaak goed doorwortelde bodemlaag is een parameter, die mogelijk van veel belang is voor een goed begrip van het grondeffect. Het is derhalve van belang aan deze factor aandacht te schenken.

In een maisakker is een porositeit gemeten van 45% (4), onder een hemlockopstand en een rode dennen bos 52% en respectievelijk 68% (4), terwijl in een kreupelhouten bosachtige opstand een porositeit van 75% is gemeten (4).

### 3.5 INVLOED VAN METEOROLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN OP GELUIDSKLIMAAT

De voortplanting van geluid is in hoge mate afhankelijk van de heersende meteorologische omstandigheden tussen bron en ontvanger. Dit geldt zowel voor het makro- en mesoklimaat enerzijds als het mikroklimaat anderzijds. Voor de geluidsoverdracht over grote afstanden is vooral het makroklimaat van belang: door het bestaan van wind- en temperatuursgradiënten, worden de geluidsgolven van hun rechte pad afgebogen (17, 84). Bij het meten van de geluidsoverdracht in bossen over lange afstanden, dient rekening gehouden te worden met het bestaan van deze makroklimatologische gradiënten. Ook is niet te verwaarlozen, dat de beplanting zelf invloed op het klimaat ter plaatse heeft (32, 55, 88). Vooral echter zullen planten invloed hebben op het mikroklimaat.

Het is dus van groot belang ten minste een indruk te hebben van een aantal belangrijke parameters betreffende het weer, indien men onderzoek doet naar de invloed, die beplantingen hebben op de geluidsoverdracht. Deze parameters zijn: temperatuur(sgradiënt), windsnelheid(sgradiënt), windrichting en luchtvochtigheid.

Vooraf bij metingen boven onbegroeide oppervlakken, asfalt, gras, lage begroeiing als struikheide, wordt de meting zeer sterk gestoord door kleine, snel veranderende meteorologische omstandigheden, waardoor de metingen zeer onbetrouwbaar kunnen worden; het meten van de weersparameters is dan uiterst belangrijk en zij dienen verwerkt te worden in de meetgegevens (22, 23, 26, 27, 30, 82).

#### 3.5.1 Makroklimaat

De makroklimatologische omstandigheden zijn van groot belang bij de geluidsoverdracht over lange afstanden. Te denken valt aan afstanden groter dan 100 m. Vooral het bestaan van windsnelheids- en temperatuursgradiënten zijn zeer belangrijk (17).

Sommigen menen, dat er geen rekening gehouden hoeft te worden met de meteorologische omstandigheden, daar ze werken over afstanden kleiner dan 1 km en bij windsnelheden onder de 3 m/s (16).

### 3.5.2 Mikroklimaat

Bij het beschouwen van de invloed van planten op het mikroklimaat moet een aantal zaken onder ogen worden gezien (1), zoals het  $\text{CO}_2$  gehalte aan de oppervlakte van de bodem, de opname van water door de plant tijdens het proces van fotosynthese, de afgifte van  $\text{O}_2$  overdag, de veranderde temperatuursgradiënt in een beplanting vergeleken met deze gradiënten boven een open terrein en de veranderende situatie tijdens de nacht, wanneer door de ademhaling van de plant veel  $\text{CO}_2$  geproduceerd wordt, waardoor de  $\text{CO}_2$  concentratie, als gevolg van de productie door de bodem mikro-organismen en de planten kan oplopen tot 5%. 's Nachts treedt bovendien de vorming van dauw op aan koelere voorwerpen dan de omgevingslucht, als gevolg van een temperatuursdaling, die de oorzaak is van een verhoging van de relatieve vochtigheid.

Voor een beplanting op een geluidswal, zou dit kunnen inhouden, dat deze beplanting gaat werken als een akoestische lens, alhoewel een zeer zwakke, gedurende de nachtelijke uren. Dit kan betekenen, dat een beplante geluidswal 's nachts minder effectief is, dan theoretische berekeningen doen vermoeden. Een experiment, uitgevoerd gedurende enige cycli van 24 uur aan een begroeiende geluidswal, geeft enige grond voor bevestiging van voornoemde hypothese (1).

#### 3.5.2.1 Gradiënten

Het is van belang kennis te hebben van de gradiënten in temperatuur en windsnelheid tijdens de geluidsoverdrachtmetingen. De verticale temperatuursgradiënt in de lucht boven de grond kan negatief, neutraal of positief zijn. Overdag zal deze door opwarming aan de grond bij zonschijn negatief zijn met de hoogste luchttemperatuur aan het oppervlak en naar boven toe afnemend: bij onbewolkte hemel zal 's nachts echter een sterke afkoeling optreden aan de grond, waardoor de temperatuursgradiënt positief zal worden. Bij een negatieve temperatuursgradiënt zullen de geluidsgolven naar boven toe afbuigen, waardoor er akoestische schaduwgebieden kunnen ontstaan op enige afstand van de bron; daarentegen zullen bij een positieve temperatuursgradiënt of inversie de geluidsgolven teruggebogen worden naar de grond toe. Ook de windsnelheidsgradiënt boven de bodem veroorzaakt een afbuiging van de geluidsgolven en wel zo, dat er een schaduwzone ontstaat in tegenwindse richting (17, 82, 99, 100).

Vegetatie beïnvloedt deze beide vormen van gradiënten onder andere door de capaciteit van vegetatie om de ingestraalde zonne-energie voor fotosynthese processen en verdamping van water te gebruiken, waardoor de opwarming van de omringende lucht langzamer verloopt, de mindere uitstraling 's nachts en de remmende werking op de wind (32, 55, 64, 87, 88, 100). Derhalve ontstaan er minder steile gradiënten dan boven open terrein en bovendien meer ingewikkelde gradiënten door de verschijnselen in de kroonlaag van de begroeiing (100).

Aylor bepaalt deze parameters tijdens zijn metingen op een hoogte van 0,6, 1,8, 3,0 en 4,3 m boven het maaiveld; tevens bepaalt hij de relatieve luchtvochtigheid op 1,0 m hoogte met een psychrometer; de waarden van de gradiënten gebruikt hij echter niet bij het berekenen van de correctiefactoren (4, 5, 6). Voor zijn experimenten over een afstand van 4 m beschouwt Beck de invloeden van wind, relatieve vochtigheid en temperatuur als niet ter zake (8, 9, 10, 11). Menig onderzoeker bepaalt wel meteodata, maar alleen om ervoor te zorgen dat niet bij te hoge windsnelheden wordt gewerkt (21, 24), of om er op te letten, dat de gradiënten zeer zwak tot afwezig zijn (28). De hoge extra demping in de hoge frequenties wordt soms verklaard door de hoge heersende vochtigheidsgraad (28).

Andere onderzoekers meten de gradiënten wel, vaak tot op grote hoogte (17, 19, 37, 38, 94), vooral als het gaat om metingen over vele honderden meters (19). Maar ook indien er sprake is van afstanden korter dan 100 m (37, 38, 94).

### 3.5.2.2 Turbulenties

Als gevolg van instabiliteiten in de thermische en visceuze grenslagen aan het grondoppervlak, zoals fluctaties in windsnelheid, temperatuur en hun gradiënten worden luchtwervelingen of turbulenties veroorzaakt. De grootte van deze turbulenties varieert van enige meters tot 1 mm en de energie wordt uiteindelijk omgezet in warmte (82). Deze turbulenties worden steeds aangetroffen in de atmosfeer en de mate van turbulentie hangt ten nauwste samen met de meteorologische omstandigheden en de hoogte boven de grond (82, 100). Op een zonnige, winderige dag is de intensiteit hoog, 's nachts echter is de turbulentie, bij afwezigheid van hoge windsnelheden, gering, doch turbulenties blijven aanwezig.

Doordat deze turbulenties veranderingen veroorzaken in de amplitudo en de fase van geluidsgolven, wordt het geluidsveld op diverse manieren in toenemende mate beïnvloed door turbulenties, indien de afstand van bron tot ontvanger toeneemt en wanneer de golflengte van het geluid kleiner wordt. Er treedt als het ware verstrooiing van het geluid op, waardoor zelfs in rustige lucht binnen enige seconden nog schommelingen van 5 dB in de sterkte van het ontvangen geluidsniveau kunnen optreden; bij onrustige lucht lopen deze schommelingen op tot 15 dB (23, 82, 100).

Als gevolg van turbulenties wordt ook geluid verstrooid naar de akoestische schaduwzones, die ontstaan door wind- en temperatuursgradiënten aan het grondoppervlak, bij gebouwen en muren en door de kromming van geluidsstralen. Derhalve is de extra geluidsverzwakking in schaduwzones tot een maximum beperkt, hetgeen de afscherpende werking van geluidsschermen en geluidswallen tot een maximale waarde beperkt (82).

### 3.5.2.3 Stabiliteit

Stabiele luchttoestand zal er onder slechts zeer speciale meteorologische omstandigheden te vinden zijn: er zal dan een bewolkte hemel zijn bij geen wind of slechts geringe windsnelheid tot 1 m/s. Dit zijn utopische weersomstandigheden, die nauwelijks optreden (32, 55, 88).

## 4. IMPLICATIES EN TOEPASSING

### 4.1 OECOLOGISCHE IMPLICATIES

#### 4.1.1 Communicatie tussen dieren

Een aantal overzichtsartikelen, waarin de akoestische aspecten van verschillende milieus worden vergeleken met de communicatie tussen dieren, moeten hier vermeld worden (71, 100).

##### 4.1.1.1 Vogels

Een aantal publicaties gaan over de geluiddempende eigenschappen van vegetaties ten aanzien van de selectiviteit van het milieu op de communicatie, die vogels binnen een soort met elkaar hebben. De vogelgeluidspectra vergelijkt men dan met de geluidstransmissie spectra van de vegetaties. Dit soort onderzoek heeft plaats gevonden in Equatoriaal Afrika (20), en in tropisch Midden Amerika, met name Panama (74). Er blijkt een goede correlatie te zijn tussen de verschillende gemeten akoestische klimaten en de zangspectra van de vogelsoorten, die in die habitats leven (20, 74). Ten aanzien van het voorkomen en de zang van de mees (*Parus major*), in een aantal habitats in Europa en het Middellandse zee gebied, besluit men eveneens, dat het akoestisch klimaat van de habitats heeft bijgedragen tot de evolutie van verschillende typen zang (45). Ook voor de rietzangers *Acrocephalus schoenobaenus*, *A. scirpaceus*, en *A. arundinaceus*, komt men tot een dergelijke aanwijzing (51).

##### 4.1.1.2 Andere vertebraten

De voortplanting van apengeroep door de tropische bossen in Uganda is vergeleken met de geluidsdemping in die natuurlijke bossen (95).

##### 4.1.1.3 Insecten

De veenmol *Gryllotalpa gryllotalpa*, die leeft in vochtige weilanden, tuinen en aardappelvelden in Frankrijk, produceert tijdens de zang en grondfrequentie van 1600 Hz.

*G. vineae*, die leeft in maisvelden, hellingweiden en wijngaarden, produceert



een grondfrequentie van 3500 Hz.

Beide veenmollen leven in holletjes in de grond en de grootte van de hoornvormige uitgang van hun holen bepaalt mede de toonhoogte van de grondfrequentie (13).

#### 4.1.2 Bestrijding van insecten

De kennis van de communicatie tussen insecten en van het akoestisch klimaat van de habitats zou wellicht een mogelijkheid kunnen scheppen om over te gaan tot een akoestische bestrijding van schadelijke insecten in plaats van de nu veelal toegepaste chemische bestrijding.

#### 4.1.3 Bestrijding van vogels

Voor de bestrijding van vogels heeft men een aantal groffe akoestische methoden in gebruik: het spreuwenkanon tegen de kersenroof door spreuwen, angstgeschreeuw en geknal om vogelaanvaringen met vliegtuigen te voorkomen. Mogelijk kan de betere kennis van de vogelcommunicatie en het akoestisch klimaat ook hier subtielere methodieken aandragen.

### 4.2 PLANTEN ALS OECO-HYGIENISCH ELEMENT IN HET LANDSCHAP

Bij de behandeling van planten als oeco-hygiënisch element in het landschap bespreekt men vooral de invloed van planten en beplantingen op de zuivering van lucht in het kader van de chemische luchtverontreiniging; een aantal van die auteurs bespreekt ook de invloed van beplantingen op de fysische luchtvervuiling "geluid"; zij citeren dan alleen bestaande literatuur, zonder een actief steentje in de vorm van onderzoek bij te dragen (3, 7, 14, 15, 31, 39, 40, 49, 50, 52, 56, 59, 60, 76, 80, 85, 86, 87, 98, 102).

Bomen en beplantingen produceren tevens een aangename ruis, indien de wind door het gebladerte speelt en deze ruis kan dienen als camouflage van andere niet te sterke lawaai bronnen (87). Deze ruis neemt ongeveer lineair toe met de windsnelheid, bij voorbeeld van 35 dB (A) bij 1 m/s tot 60 dB (A) bij 10 m/s, gemeten aan Japanse ceders (101).

### 4.3. PLANOLOGISCHE TOEPASSING

Het is steeds van belang bij het gebruik van groenstroken, die een functie hebben als geluiddempers, rekening te houden met de eisen, die bepaalde planten stellen aan de groeiplaats; met ander woorden, bosbouwkundige en oecologische kennis en principes mogen nooit uit het oog verloren worden, anders dreigen de aanplantingen nooit uit te groeien tot het gewenste resultaat, waardoor de beoogde uitwerking niet optimaal is (48).

Aylor concludeert, dat een strook begroeiing van 10 m breed bestaande uit loof dragende planten met bladeren van zo'n 5 cm breed en een totale blad oppervlakte dichtheid van  $4 \text{ m}^2/\text{m}^3$  geluid met een frequentie van 2000 Hz ongeveer 10,5 dB zal dempen (5). Uit metingen aan bladeren, geplakt in een raamwerk (8, 9) wordt geconcludeerd, dat een haag van 1 m breed een even groot schermeffect en een even grote geluiddemping kan hebben als een losse beplanting van bomen en struiken van 20 m breed met een ontwikkelde haag, maar zonder ondergroei (9, 10, 11).

De geluiddempende invloed van planten is beter naarmate(8):

- 1) het bladoppervlak groter is
- 2) de bladeren breder zijn
- 3) de hoek van geluidsinval zo mogelijk loodrecht is
- 4) de bladoppervlakte dichtheid zo groot mogelijk is.

#### 4.3.1 Voorkomen van verkeerslawaaï

Verkeerslawaaï kan in het algemeen beschouwd worden als een lijnvormige geluidsbron, zeker als de verkeersbelasting tamelijk hoog is (94).

Bij het aanleggen van geluidswallen, dient men rekening te houden met de effecten die een wal met of zonder beplanting kan hebben op de geluidsoverdracht. Er zijn aanwijzingen, dat de theoretisch berekende geluiddemping vooral 's nachts niet tot stand komt door de veranderde mikrometeorologische omstandigheden bij de wal; dit kan tot gevolg hebben, dat er juist door de aanwezigheid van een wal verhoging kan optreden van het geluidsniveau (1).

Bij het aanleggen van geluidswallen tussen een verkeersweg en bij voorbeeld een woonwijk, is het ook zaak te letten op een juiste plaatsing van de wal; metingen hebben uitgewezen, dat een verkeerde planning van de wal een nutteloze investering is (17). Indien een geluidswal niet vlakbij

de bron, een weg, of bij de ontvanger, bij voorbeeld een woonwijk, wordt aangelegd is de wal uit akoestisch oogpunt zinloos, te meer indien de afstand tussen bron en ontvanger zo'n 170 m bedraagt (15). Meteorologische factoren zijn hierbij de grote "boosdoener".

Vaak wordt gesuggereerd de ruimte, die beplant kan worden zo te beplanten, dat een aantal regels ontstaan; deze zouden alle een schermwerking hebben en dus meer geluid tegen houden dan een gesloten beplanting over de gehele oppervlakte. Bewijzen voor deze hypothese zijn nog niet geleverd (8, 66, 67, 68, 69, 70, 94).

Voor een viertal haagtypen is de "Geluidsreflectiefactor" (P) bepaald (16).

Goede dempingsresultaten heeft men bereikt bij metingen aan bestaande regels en windsingels van 45 tot 120 ft diepte en tot 75 ft hoog (21); ook in stedelijke situaties zijn goede resultaten gemeten; in de bebouwde kom dienen de plantenschermen zo dicht mogelijk bij de geluidsbron geplaatst te worden; men dient rechte straten met gladde huizenwanden te voorkomen. Beter is het in woonstraten te zorgen voor afwisselende beplanting die hier en daar open mag zijn om reflecties tussen de plantenwanden te voorkomen (21). Buiten de bebouwde kom kan men tamelijk brede beplantingen aanleggen, waarvan het scherm dient te beginnen op 7,5 tot 15 m van de weg; de soortsaanstelling lijkt minder belangrijk dan het dicht op elkaar geplant zijn van de bomen en struiken (21).

#### 4.3.2 Verminderen van industrielawaai

Industrielawaai kan beschouwd worden als lawaai afkomstig van een grote puntbron, waarbij de oorzaken van het lawaai vaak hoog in het complex te zoeken zijn.

Hooggelegen geluidsbronnen, die vaak in industrie complexen worden aangetroffen "kijken" als het ware over lage begroeiingen heen; dan dient men gebruik te maken van zeer dicht, hoog opgaande beplantingen, wordt geconcludeerd uit literatuurgegevens(14). Tevens trekt men uit de literatuur de conclusie, dat de beplanting rond industriegebieden tenminste een diepte van 200 m dient te hebben, maar dat in samenhang met alle andere milieuhygiënische maatregelen (60).

## 5. CONCLUDERENDE SAMENVATTING

Uit het literatuuroverzicht kan men de volgende conclusies trekken:

- a. Er is een algemeen patroon in de geluidsoverdracht door bossen, waarbij de meeste onderzoekers er toe neigen het model te onderschrijven waarbij een goede demping is waar te nemen in de lage geluidsfrequenties onder de 500 Hz en in de hoge frequenties boven de 2000 Hz. De demping is het minst in het gebied van de midden frequenties.
- b. De demping in de lage tonen is toe te schrijven aan reflecties tegen de bodem, het zogenaamd bodemeffect. Dit bodemeffect is bij metingen te vermijden door de bron en de ontvanger hoog in de begroeiing te plaatsen, wat niet altijd mogelijk noch wenselijk is.
- c. De demping in de hoge tonen is waarschijnlijk een gevolg van de kleine structuren in de vegetatie, met name de bladeren en kleine takken.
- d. In het gebied van de middenfrequenties tussen 500 en 2000 Hz treedt een minder goede demping op, waarvoor nog geen eenduidige verklaring voorhanden is.
- e. Voor een juiste manier van meten dient men te beschikken over goede zend- en ontvangapparatuur. Bij de interpretatie moet rekening gehouden worden met de effecten, die de onderdelen van de vegetatie hebben op de geluidsoverdracht.
- f. Bij het meten kan men niet volstaan met één hoogte van bron en/of mikrofoon; het is aan te bevelen tenminste een van beide in het verticale vlak te verplaatsen.
- g. De Nederlandse situatie is nog te weinig onderzocht en er bestaat behoefte aan detailonderzoek aangaande de akoestische eigenschappen van natuurlijk gevormde bosbodems en de geluidsabsorptie door bladeren van planten.

## BIBLIOGRAFIE

1. Allan, W., and Dickinson, P. (1977), The tree lined barrier. in: Rathe, E.J. (ed.): *Proc. Inter Noise 77*. Zürich, 1977, pp. B587-B592.
2. Attenborough, K. (1978), Attenuation of noise over absorbing terrain. in Lang, W.W. (ed.): *Proc. Inter Noise 78*. San Francisco, 1978, pp. 491-496.
3. Aujeszky, L. (1938), Kleinklima und Schallklima. *Forschungen und Fortschritte*, 14, 413-415.
4. Aylor, D. (1972 a), Noise reduction by vegetation and ground. *J. Acoust. Soc. Amer.* 51, 197-205.
5. Aylor, D. (1972 b), Sound transmission through vegetation in relation to leaf area density, leaf width, and breadth of canopy. *J. Acoust. Soc. Amer.* 51, 411-414.
6. Aylor, D., Parlange, J.-Y. and Chapman, C. (1973), Reverberation in a city street. *J. Acoust. Soc. Amer.* 54, 1754-1757.
7. Barlöwen, B. von (1968), Pflanzen gegen den Lärm. *Pflanze und Garten* 18, 276-277.
8. Beck, G. (1965), Untersuchungen über Planungsgrundlagen für eine Lärmbekämpfung im Freiraum mit Experimenten zum artspezifischen Lärminderungsvermögen verschiedener Baum- und Straucharten. Dissertation, Technische Universität, Berlin.
9. Beck, G. (1967 a), Hinweise zur Anlage von Lärmschutzpflanzungen. *Mitteilungsblatt des Landesverbandes Gartenbau und Landwirtschaft*, 18, 5 paginas.
10. Beck, G. (1967 b), *Pflanzen als Mittel zur Lärmbekämpfung*. Patzer Verlag, Hannover, Berlin, Sarstedt.
11. Beck, G. (1969), Immissionsschutzpflanzungen. *Neue Landschaft*, 14, 163-173.

12. Bekesy, G. von (1933), über die Schallfeldverzerrungen in der Nähe von absorbierende Flächen und ihre Bedeutung für die Raumakustik. *Z. für technische Physik*, 14, 6-10.
13. Bennet-Clark, H.C. (1970), The mechanism and efficiency of sound production in mole crickets. *J. Exp. Biol.* 52, 619-652.
14. Bennis, P.C., Harst, J. van der, Hendriks, L., Maas, W. en Wartena, L. (1971), Groenstroken. *Tijdschrift Kon. Ned. Heidemij.* 82, 325-345.
15. Bernatzky, A. (1969), Die Bedeutung von Schutzpflanzungen gegen Luftverunreinigungen. in: *Air Pollution, Proc. first European Congr. on the influence of air pollution on plants and animals.* Wageningen, 1968, pp. 383-395.
16. Börner, H. (1963), Störschallminderung durch Schutzabstände, Böschungen oder Vegetationsbestände. *Deutsche Gartenachitektur*, 4, 39-41.
17. Buis, P.M. (1978), Geluidsoverdracht Buiten: Straalkromming, Bodemdemping. *Ned. Akoest. Genootschap, publikatie* 44, 61-76.
18. Burns, S.H. (1979), The absorption of sound by pine trees. *J. Acoust. Soc. Amer.* 65, 658-661.
19. Carlson, D.E., McDaniel, O.H. and Reethof, G. (1977), Noise control by forests. in: Rathe, E.J. (ed.): *Proc. Inter Noise 77.* Zürich, 1977, pp. B576-B586.
20. Chapuis, C. (1971), Un exemple de l'influence du milieu sur les emissions vocales des oiseaux: l'evolution des chants en foret equatoriale. *Terre et Vie* 25, 183-202.
21. Cook, D.I. and Haverbeke, D.F. van (1971), *Trees and shrubs for noise abatement.* Res. Bull. # 246, The Forest Service U.S. Dept. of Agriculture in cooperation with University of Nebraska College of Agriculture. The Agricultural Experiment Station. 77 pp.

22. Daigle, G.A., Piercy, J.E. and Embleton, T.F.W. (1978), Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves near a hard boundary. *J. Acoust. Soc. Amer.* 64, 622-630.
23. Daigle, G.A. (1979), Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary. *J. Acoust. Soc. Amer.* 65, 45-49.
24. Embleton, T.F.W. (1963), Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods. *J. Acoust. Soc. Amer.* 35, 1119-1125.
25. Embleton, T.F.W. (1966), Scattering by an array of cylinders as a function of surface impedance. *J. Acoust. Soc. Amer.* 40, 667-670.
26. Embleton, T.F.W., Piercy, J.E. and Olson, N. (1976), Outdoor sound propagation over ground of finite impedance. *J. Acoust. Soc. Amer.* 59, 267-277.
27. Embleton, T.F.W., Thiessen, G.J. and Piercy, J.E. (1976), Propagation in an inversion and reflection at the ground. *J. Acoust. Soc. Amer.* 59, 278-282.
28. Eyring, C.F. (1946), Jungle acoustics. *J. Acoust. Soc. Amer.* 18, 257-273.
29. Focsa, V., Biborosch, L. und Poppel, N. (1970), Untersuchung einiger Strassenlärmabhängigkeiten. *Lärmbekämpfung* 14, 46-48.
30. Foss, R.N. (1979), Effects of wind and ground plane attenuation on sound propagation near the ground. *J. Acoust. Soc. Amer.* 66, 1088-1092.
31. Gableske, R. (1972), Wegverkeerslawaaai en landschapsplanning. *Recreatievoorzieningen* 7, 207-210.
32. Geiger, R. (1961), *Das Klima der bodennahe Luftschicht*. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
33. Harris, C.M. (1957), *Handbook of noise control*. McGraw-Hill, New York.

34. Harris, C.M. (1963), Absorption of sound in the audio-frequency range. J. Acoust. Soc. Amer. 35, 11-17.
35. Harris, C.M. (1966), Absorption of sound in air versus humidity and temperature. J. Acoust. Soc. Amer. 40, 148-159.
36. Harris, C.M. (1975), Normalized curve of molecular absorption versus humidity. J. Acoust. Soc. Amer. 57, 241-242.
37. Haupt, R. (1973), Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 1. Teil: Methodische Grundlagen. Arch. Naturschutz und Landschaftsforschung 13, 309-327.
38. Haupt, R. (1974), Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 2. Teil: Die Ergebnisse und ihre Anwendungsmöglichkeiten. Arch. Naturschutz und Landschaftsforschung 14, 61-75.
39. Haverbeke, D.F. van, and Cook, D.I. (1974), Studies in noise pollution reduction. American Nurseryman *1974*, 6, 7-38 (5 pp.).
40. Herrington, L.P. (1974), Trees and acoustics in urban areas. J. Forestry 72, 462-465.
41. Hess, W. und Kürsteiner, E. (1961), Grundsätzliches zur Dämmung des Verkehrslärm mit Hilfe von Grünpflanzungen. Schweizerische Z. Forstwesen 112, 700-708.
42. Hess, W. und Hottinger, R. (1963), Die Möglichkeiten der Lärmdämmung an Expressstrassen. Z. Präventivmedizin 8, 194-202.
43. Hrudicka, B. (1938), Zu den optischen und akustischen Eigenschaften des Klimas einer Grossstadt, Gerlachs Beitr. Geophys. 53, 337-344.
44. Humphreys, H.J. (1929), *The physics of the air. Part III: Meteorological acoustics*. McGraw-Hill, London, New York.
45. Hunter, M.L. and Krebs, J.R. (1979), Geographical variation in the song of the great tit (*Parus major*) in relation to ecological factors. J. animal Ecol. 48, 759-785.



46. International Organization for Standardization (1975), *Acoustics-procedure for describing aircraft noise heard on the ground*. ISO/DIS 3891.
47. Ingard, U. (1953), A review of the influence of meteorological conditions on sound propagation. *J. Acoust. Soc. Amer.* 25, 405-411.
48. Jager, K. en Leek, N.A. (1979), Bosbouwkundige principes bij het ontwerpen van beplantingen buiten bosverband. *Groen* 35, 381-389.
49. Janse, A.R.P. (1970 a), Beplantingen en geluid. *Tijdschrift Kon. Ned. Heidemij.* 81, 214-218.
50. Janse, A.R.P. (1970 b), Bomen en het lawaai in de straat. *Landbouwkundig Tijdschrift* 82, 227-232.
51. Jilka, A. und Leisler, B. (1974), Die Einpassung dreier Rohrsängerarten (*Acrocoephalus schoenoboenus*, *A. scirpaceus*, *A. arundinaceus*) in ihre Lebensräume in bezug auf das Frequenzspektrum ihrer Reviergesänge. *J. Ornithology* 115, 192-212.
52. Keulen, T. van (1970), *Groenzones bij verkeerswegen*. Grontmij., de Bilt.
53. Kragh, J. (1979), Pilot study on railway noise attenuation by belts of trees. *J. Sound Vib.* 66, 407-415.
54. Lamure, C. et Auzou, S. (1964), *Les niveaux de bruit au voisinage des autoroutes dégagées*. Cahiers du Centre scientifique et technique des batiments # 72, Paris.
55. Lee, R. (1978), *Forest Microclimatology*. Columbia University Press, New York.
56. Leonard, R.E. and Parr, S.B. (1970), Trees as a sound barrier. *J. Forestry*, 68, 282-283.
57. Lessing, Th. (1908), *Der Lärm. Eine Kampfschrift gegen die Geräusche unseres Lebens*. Verlag von J.F. Bergmann, Wiesbaden.

58. Liao, S. and Sachse, W. (1978), Experimental measurements of acoustic scattering by rows of cylindrical obstacles. *J. Acoust. Soc. Amer.* 64, 563-570.
59. Lyon, R.H. (1973), Propagation of environmental noise. *Science* 179, 1083-1089.
60. Maas, F.M. en Beenhakker, A.J. (1969), De betekenis van groenzones in hun relatie tot industrieterreinen. *Stedebouw en Volkshuisvesting* 1, 32-44.
61. Marten, K. and Marler, P. (1977), Sound transmission and its significance for animal vocalization. I. Temperate habitats. *Behav. Ecol, Sociobiol.* 2, 271-290.
62. Marten, K. Quine, D. and Marler, P. (1977), Sound transmission and its significance for animal vocalization. II. Tropical Forests habitats. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2, 291-302.
63. Martens M.J.M. and Linskens, H.F. (1976), Noise pollution and a botanical answer. in: *Proceedings Third MPP-Meeting*, Izmir, pp. 98-102.
64. Martens, M.J.M. (1978), Groen als geluidsscherm? *Extern* 7, 199-219.
65. Martens, M.J.M. (1979), Sound attenuation of Dutch forests. in: *Proc. 1th Simposio Luso-Espanhol de Acústica ambiental*. Lisboa, 1978, 5, pp. 4-VI-1 - 4-VI-11.
66. Meister, F.J. (1959), Über einige Besonderheiten der Schallausbreitung auf natürliche bewachsenen Flächen. in: *Proceedings 3rd International Congress on Acoustics*, pp. 1090-1092.
67. Meister, F.J. (1960), Über einige Besonderheiten der Schallausbreitung auf natürlich bewachsenen Flächen. *Frequenz* 14, 211-217.
68. Meister, F.J. und Ruhrberg, W. (1955), Der Einfluss von Grünanlagen auf den Verkehrsgeschwelligkeitspegel; Schallabsorption durch Baum- und Heckenanpflanzungen. *V.D.I.-Z.* 97, 1063-1067.

69. Meister, F.J. und Ruhrberg, W. (1959 a), Die Dämmung von Verkehrsgeräuschen durch Grünanlagen. V.D.I.-Z. 101, 527-535.
70. Meister, F.J. und Ruhrberg, W. (1959 b), Der Einfluss von Grünanlagen auf die Ausbreitung von Geräuschen. Lärmbekämpfung 3, 5-11.
71. Michelsen, A. (1978), Sound reception in different environments. in: Ali, M.A. (ed.): *Sensory Ecology*. Plenum, New York, pp. 345-373.
72. Mignerou, J.G. (1980), *Acoustie urbaine*. Masson, Paris, New York, Barcelone, Milan, Quebec.
73. Mitscherlich, G. und Schölzke, D. (1977), Schalldämmung durch Wald. Allg. Forst Jandzeitung 148, 125-143.
74. Morton, E.S. (1975), Ecological sources of selection on avian sounds. Amer. Naturalist 109, 17-34.
75. Nieuwenhuizen, J.K. (1969), *Stilte Alstublieft*. Inaugurele Rede, Technische Hogeschool, Eindhoven.
76. Oftinger, K. (1968), Naturschutz und Lärmbekämpfung. Schweizer Naturschutz 34, 6-9.
77. Oncley, P.B. (1970), Propagation of jet engine noise near a porous surface. J. Sound Vib. 13, 27-35.
78. Organisation for Economic Co-operation and Development, (1971) *Urban traffic Noise*. Paris.
79. Pao, S.P. and Evans, L.B. (1971), Sound attenuation over simulated ground cover. J. Acoust. Soc. Amer. 49, 1069-1075.
80. Parleviet, G. (1979), Geluidhinder en geluidwerende voorzieningen in het landschap. Groen 35, 520-526.
81. Pesuit, D.R. (1979), Air absorption calculations for outdoor plant design. J. Sound Vib. 61, 427-436.

82. Piercy, J.E., Embleton, T.F.W. and Sutherland, L.C. (1977), Review of noise propagation in the atmosphere. J. Acoust. Soc. Amer. 61, 1403-1418.
83. Reethof, G. (1973), Effect of plantings on radiation of highway noise. J. Air Pollution Control Assoc. 23, 185-189.
84. Reynolds, O. (1874), On the refraction of sound by the atmosphere. Proc. Roy. Soc. London 22, 531-548.
85. Rieckenberg, (1958), Zur Frage des Lärmschutzes durch Pflanzungen. Strasse und Autobahn 3, 92-93.
86. Robel, F. und Schwab, K. (1962), Landschaftsakustische Probleme im Städtebau. Lärmbekämpfung 6, 1-5.
87. Robinette, G.O. (1972), *Plants/People/and environmental quality*. U.S. Dept. of the Interior, Washington DC.
88. Rosenberg, N.J. (1974), *Microclimate: the biological environment*. John Wiley & Sons, New York, London, Sidney, Toronto.
89. Sadowski, J. und Hodzinski, L. (1959), Lärmbekämpfung in Städten. Lärmbekämpfung 3, 14-16 und 37-38.
90. Scholes, W.E. Salvidge, A.C. and Sargent, J.W. (1975), Motorway noise propagation and screening. J. Sound Vib. 38, 281-303.
91. Schroeder, H. (1926), Ein Versuch, die Oberflächenentwicklung eines Baumes (*Fagus sylvatica*) zahlenmässig zu bewerten. Ber. d. deutschen Bot. Ges. 44, 579-583.
92. Siec, H. (1940), Über die Schallausbreitung im Freien und ihre Abhängigkeit von den Wetterbedingungen. Elektrische Nachrichten-Technik 17, 193-208.
93. Siekman, W. (1969), Outdoor acoustical treatment: grass and trees. J. Acoust. Soc. Amer. 46, 863-864.

94. Toorn, J. van der (1975), *Geluiddemping door bossen*. Rapport ICG, VL-HR-06-01, 's-Gravenhage.
95. Waser, P.M. and Waser, M.S. (1977), Experimental studies of primate vocalizations: specializations for long distance propagation. *Z. Tierpsychol.* 43, 239-263.
96. Watson, R.B. (1948), On the propagation of sound over snow. *J. Acoust. Soc. Amer.* 20, 846-848.
97. Westphal, W. (1975), Eindimensionale Schallausbreitung in einem Medium mit Streuung und Absorption. (Schalldämpfung im Wald). *Acustica* 33, 58-59.
98. Whitcomb, C.E. and Stowers, J.F. (1973), Sound abatement with hedges. *HortScience* 8, 128-129.
99. Wiener, F.M. and Keast, D.N. (1959), Experimental study of the propagation of sound over ground. *J. Acoust. Soc. Amer.* 31, 724-733.
100. Wiley, R.H. and Richards, D.G. (1978), Physical constraints in the atmosphere: Implications for the evolution of animal vocalizations. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 3, 69-94.
101. Yamada, S., Watanabe, T., Nakamura, S., Yokoyama, H. and Takeoka, S. (1977), Noise reduction by vegetation. in: Rathe, E.J. (ed.): *Proc. Inter Noise 77*, Zürich, pp. B599-B606.
102. Zundel, R. (1965), Luftfilterung und Lärmdämpfung durch Strassenbegleitpflanzungen. *Der Forst- und Holzwirt* 10, 223-224.

Hoofdstuk / Chapter 3. The acoustic climate of plant  
communities

overdruk uit: Oecologia (Berlin) 23 (1976): 165-177

# The Acoustic Climate of Plant Communities

H.F. Linskens, M.J.M. Martens, H.J.G.M. Hendriksen,  
A.M. Roostenberg-Sinnige, W.A.J.M. Brouwers, A.L.H.C. van der Staak,  
and A.M.J. Strik-Jansen

Department of Botany, Faculty of Science - Radboud University,  
Toernooiveld, Nijmegen, The Netherlands

**Summary.** During summer season and winter season of 1971 and 1972, the acoustic properties, defined as the acoustic climate, of 8 semi-natural plant communities in the Netherlands were investigated. It appeared that each plant community has its own acoustic climate as a consequence of the specific species composition and the specific acoustic properties of the soil. Seasonal changes influenced the acoustic climate to some extent, since during summer there is a better attenuation of low frequencies and in winter of mid frequencies. Comparing all plant communities the total variation in attenuation differed from 29.6 dB/100 m at 1250 Hz (cps) in winter to 74.6 dB/100 m at 10,000 Hz in summer, as is shown in Table 3. In general best attenuation occurred at low and high frequencies in both seasons, which has to be attributed to soil and foliage characteristics.

## 1. Introduction

Some investigations have been conducted associating sound transmission with plantations containing a limited number of species. The practical value of these studies was to determine if such plantations could be used as a sound barrier and thus reduce noise pollution resulting from traffic and industry. These investigations employed two methods of measurement. One method (Aylor, 1972; Beck, 1965; Börner, 1963; Embleton, 1963; Meister and Ruhrberg, 1959; Whitcomb and Stowers, 1973) has the sound source outside the plantation while in the second method (Eyring, 1946; Haupt, 1973, 1974) the sound source is set up *in* the vegetation to avoid the boundary effect. The second method allows measurement not only of the sound attenuation (expressed in dB/100 m or a comparable measure) of the vegetation but also the acoustical properties of more or less natural plant communities.

The acoustic properties (or using the analogy of meteorology the *acoustic climate*) of a plant community can be considered as a summation of many factors that produce the specific sound absorption spectrum of that particular

species association. These factors are: spherical divergence; air and molecular absorption (as physical components); absorption and reflection by soil characteristics; and absorption, reflection, refraction, diffraction and scattering by the various biological components.

Using this definition of acoustic climate, the properties of various natural and semi-natural plant communities in the Netherlands were determined, supposing that their genuine structure has a more efficient sound barrier effect and may have specific acoustic properties, characteristic for their species composition. Thus the acoustic climate of each plant community could be characterized.

## 2. Apparatus

### 2.1. Acoustics

Random noise was projected through the plant community and the total transmission loss was recorded. The sound-emitting system was designed and built by the Department of Electronics of the Faculty of Sciences of the University and consists of a power supply (storage battery or a Honda generator, no E 300) amplifier and final amplifier transmitting the signal through two Philips speakers no AD4000M. This system was fitted in a wooden box (46 × 55 × 88 cm) so that the speakers were placed over one another. Two Sennheiser microphones no MD421 with windscreens were coupled to an Uher no 4200 Report Stereo tape recorder. Scotch tapes were used for all experiments. The sensitivity of the recorder was linear in the frequency range up to 10 kHz (cps) but a decay of 6 dB from 10 to 16 kHz was present. The field-recorded sound was analyzed in the Audiological laboratory of the Medical Faculty of the University. The total sound intensity level of the tapes was determined with a Bruel and Kjaer Audio Frequency Spectrometer no 2112 and the signal was recorded with a B and K Level Recorder no 2305. The sound spectrum was analyzed with the same B and K Audio Frequency Spectrometer combined with  $1/3$  octave filters.

For analysis, only those parts of the magnetic tapes on which the sound intensity level was at least 10 dB higher than the intensity of the ambient noise level were used. The frequency spectrum of the measuring equipment was determined in an anechoic chamber of the Technical Service TNO/TH Delft, firstly, by using the B and K instruments of that chamber directly without our recorder and secondly, by recording the sound on the tape recorder so that the signal could be analyzed later on the B and K instruments of the Audiological Laboratory. This blank (Fig 1) was used to correct field-measured sound pressure levels before plotting.

During the field experiments, the center between the two speakers was placed 1 m above the soil in the vegetation. Two microphones were placed 1 m above the soil in front of the speakers at distances of 4, 8, 16 and 32 m. These distances were selected so that the inverse square law could be used to correct for spherical divergence (Harris, 1957).

### 2.2. Weather

All field experiments were conducted under favorable weather conditions with windspeed (monitored with a cup anemometer) less than 2 m/s and relative humidity (monitored with a ventilated wet-dry bulb psychrometer) more than 70%. The temperature during the winter experiments (from 24/2 to 13/4/72) ranged from 4.5 to 21.5°C and in summer during July and August (1971 and 1972) from 13.5 to 26.0°C. No corrections were made for the windspeed and temperature gradients (Parkin and Scholes, 1965, Meister and Ruhrberg, 1959, Embleton, 1963).



**Table 1.** Species composition and geographical location of the plant communities

Species	Syntaxon <sup>a</sup>	Plant community <sup>b</sup>							
		3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Betula verrucosa</i>	37A		2, 1	3, 1			4, 2	3, 1	2, 1
<i>Pteridium aquilinum</i>	37A			5, 1	2, 1				
<i>Corydalis claviculata</i>	37Aa	+, 1							
<i>Lonicera periclymenum</i>	37A					+, 1			
<i>Melampyrum pratense</i>	37A								+, 1
<i>Quercus robur</i>	37,38		r, 1	4, 1	5, 2	+, 1	r, 1	r, 1	5, 2
<i>Pinus sylvestris</i>	37Aa1	4, 1	4, 1	r, 1		3, 1	+, 1	4, 1	r, 1
<i>Prunus serotina</i>	37Aa2	5, 2	2, 2						
<i>Deschampsia flexuosa</i>	37,18Aa1	1, 3	5, 4	1, 3		2, 3		2, 3	3, 3
<i>Vaccinium myrtillus</i>	36,37	2, 1	2, 2	3, 2	2, 2	5, 2		2, 2	4, 2
<i>Sorbus aucuparia</i>	36,37	+, 1	+, 2	r, 1	r, 1	4, 1			
<i>Molinia caerulea</i>	37Aa1b	+, 2	2, 3	1, 2				1, 2	+, 2
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	37Aa1			r, 1		+, 1		1, 2	
<i>Fagus sylvatica</i>	37,38					r, 1			
<i>Galium hercynicum</i>	30Aa	+, 1	+, 2			+, 2			+, 2
<i>Calluna vulgaris</i>	30B,18Aa						4, 4	2, 2	+, 2
<i>Rumex acetosella</i>	20, 18Aa						1, 1		
<i>Festuca ovina</i>	20, 21						1, 2		
<i>Corynephorus canescens</i>	20						1, 3		
<i>Carex arenaria</i>	20Ba2								+, 3
<i>Picea abies</i>	38							5, 1	
<i>Poa nemoralis</i>	38							2, 3	
<i>Dryopteris filix-mas</i>	38A	2, 2							
<i>Frangula alnus</i>	32Aa			+, 1	2, 2	5, 2			
<i>Rubus spec</i>		r, 1	1, 1						
<i>Pseudotsuga menziesii</i>			2, 1						
<i>Quercus rubra</i>					r, 1				
Maximum height (m) of the plants		15	3	12	5	12	7	35	85
Name of the forest and Geographical location (Mapnumber, and E L & N L)		Millingerweg, mapn 33A (52°12'10"N L - 5°49'15"E L)	Vroome Bergen, mapn 33A (52°12'30"N L - 5°49'E L)	's Greevenhout, mapn 33A (52°13'05"N L - 5°49'15"E L)	Hoog Buurlo, mapn 33A (52°10'15"N L - 5°51'20"E L)	Keulerbosch, mapn 33A (52°10'07"N L - 5°52'15"E L)	Deelerwoud, mapn 33C (52°04'55"N L - 5°52'50"50"E L)	De Imbosch, mapn 33D (52°03'45' N L - 5°59'55"E L)	Imboschberg, mapn 33D (52°03'35"N L - 5°59'55' E L)

<sup>a</sup> See for the exact names of the syntaxa Westhoff and Den Held (1969), of which the species are character or differential species

<sup>b</sup> To determine the abundance or dominance and the number of shoots of the several species, the method of Braun-Blanquet (1928) is used

### 3. Plant Communities

All 8 forest plant communities were located at the "Veluwe" in the Netherlands and can be identified by means of the topographical maps of the Ministry of Defence (Table 1) These plant communities are semi-natural and can be characterized by their species composition in accordance with the classification system of Westhoff and Den Held (1969). A summary of the plant communities is given in Table 1 and it is evident that they all belong to the syntaxon *Quercion roburi-petraeae* (Malcuit 1929) Br-BI 1932 (37), although some other syntaxa such as *Vaccinio-Piceetea* (36), *Nardo-Callunetea* (30), *Koelerio-Corynephoretea* (20), *Festuco-Brometea* (21), *Querco-Fagetea* (38) and *Franguletea* (32) exert some influence The syntaxa 32 and 38 in particular are a considerable influencing factor in plant communities no 7 and no 9, and syntaxon 30 in community no 8 It should be noted, that *Picea abies* is not a faithful nor differential species of the *Vaccinio-Piceetea* (36) in the Netherlands, since this species is found only in plantations, which belong to the *Querco-Fagetea* (38) according to their herb species composition Plant community no 9 therefore can be considered as a mixture of the syntaxon *Quercion roburi-petraeae* (37) and *P. abies*, therefore this community differs from the *Picea* woods of central and northern Europe

The soil associated with plant communities no 4 and no 9 lacks a top layer and the foliage of these communities is primarily of the needle type

An open sandfield devoid of vegetation and a sandpath with dense growth at both sides were selected as controls and were designated plant communities no 1 and no. 2 respectively Both were located in the vicinity of Nijmegen

### 4. Results

#### 4.1 The Acoustic Climate of the Plant Communities

The results presented in Figures 2-10 show the total measured transmission loss at various distances from the source and these were corrected for the

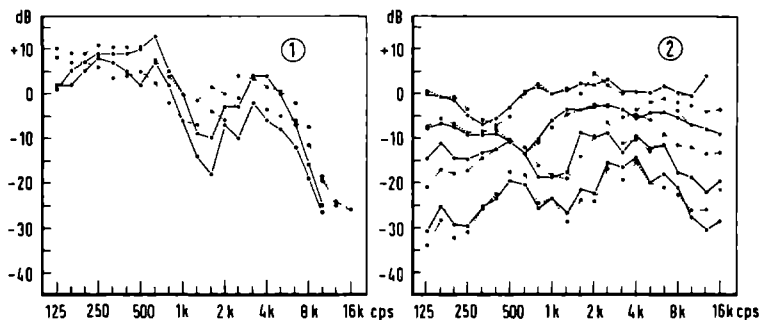
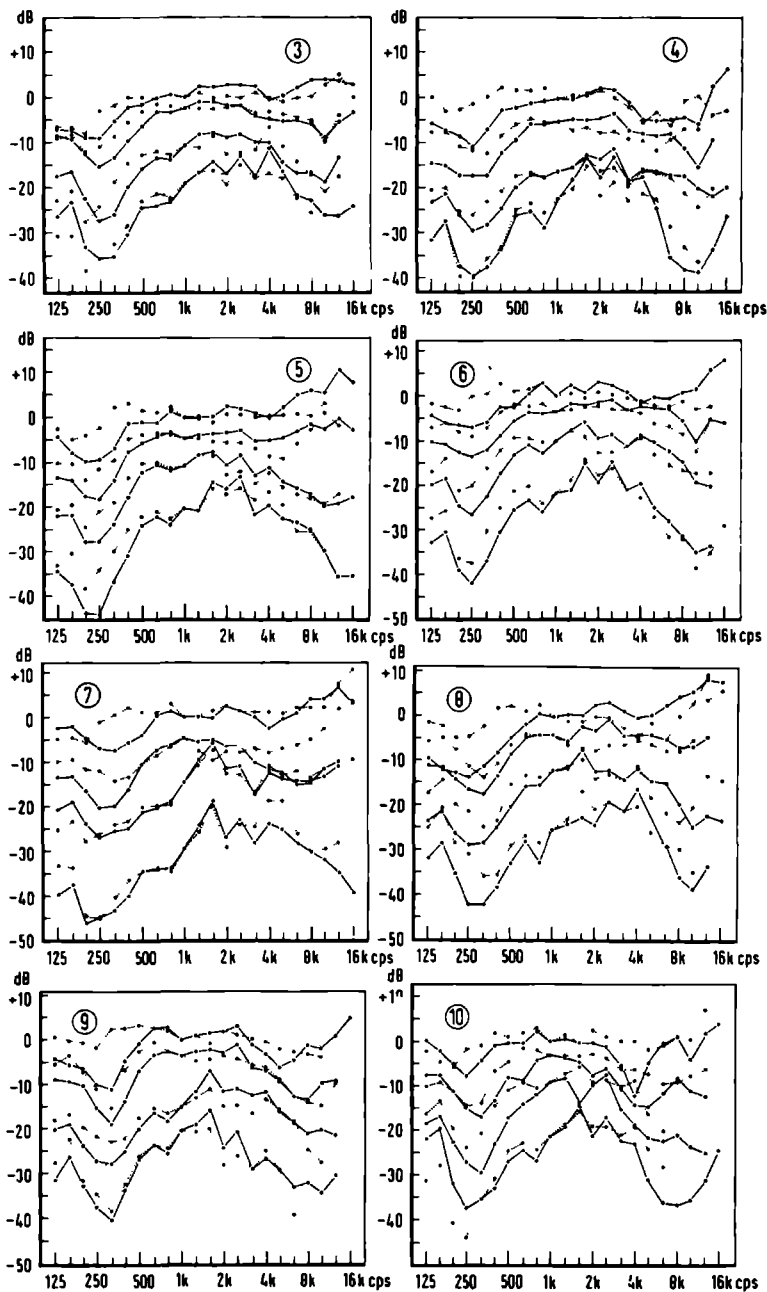


Fig. 1. Sound Pressure Level (SPL) measured in an anechoic chamber at 4 and 8 m distance from our source with our microphones ● ● SPL directly analysed by B & K apparatus in Delft, ● —● SPL recorded on our tapes by our taperecorder and analysed by B & K apparatus in Nijmegen (blank for all measurements)

Fig. 2. Summer measurements (1972) over barren plane (plant community no 1 Maldensvlak) (●—●) at 4 distances (4, 8, 16, and 32 m), and over sandpath (no 2 Maldensvlak) (● ●)



Figs. 3-10. SPL in plant communities over 4 distances from the source (4, 8, 16, and 32 m) during summer (●—●) and during winter (● - ●), respectively

Fig. 3. Plant community no 3 Millingerweg

Fig. 4. Plant community no 4 Vroome Bergen

Fig. 5. Plant community no 5 's Greevenhout

Fig. 6. Plant community no 6 Hoog Buurlo

Fig. 7. Plant community no 7 Keulerbos

Fig. 8. Plant community no 8 Deelerwoud

Fig. 9. Plant community no 9 Imbosch

Fig. 10. Plant community no 10 Imboschberg

**Table 2.** Excess attenuation (Ae) in dB/100 m for the plant communities

Plant community			Frequencies (Hz)								
			125	160	200	250	320	400	500	640	800
No 1	(sum 72)	4-32 m	45.7	23.3	35.3	23.9	1.8	-0.7	-5.4	10.7	32.8
		8-32 m	46.6	26.7	41.2	34.5	17.0	10.4	14.1	-20.0	14.1
No 2	(sum 72)	4-32 m	58.9	35.3	48.6	33.9	6.8	-9.6	-20.3	1.8	31.4
		8-32 m	59.9	44.1	55.3	42.4	21.2	5.8	-20.8	-29.5	5.8
No 3	(summer)	4-32 m	2.5	-7.1	18.6	31.1	43.2	36.4	17.5	19.6	21.4
		8-32 m	24.1	16.8	34.9	34.5	62.4	37.0	25.0	37.9	38.3
No 3	(winter)	4-32 m	22.5	22.1	43.9	52.8	45.7	37.5	17.9	11.1	17.9
		8-32 m	39.9	19.1	59.1	53.2	49.1	45.8	32.5	32.5	35.4
No 4	(summer)	4-32 m	28.2	8.0	39.6	38.9	35.9	46.1	24.6	12.1	16.4
		8-32 m	21.5	1.5	34.9	43.3	34.5	38.7	24.1	17.5	20.8
No 4	(winter)	4-32 m	48.9	23.6	68.2	73.9	64.3	62.5	31.2	26.1	35.0
		8-32 m	49.9	32.9	70.7	65.7	47.4	53.7	30.2	28.3	34.1
No 5	(summer)	4-32 m	43.6	41.1	56.9	60.3	43.2	43.8	17.9	10.7	26.8
		8-32 m	38.3	47.8	58.9	58.7	45.8	49.9	25.0	25.0	37.0
No 5	(winter)	4-32 m	42.1	21.1	55.3	50.0	50.9	36.4	20.7	21.8	25.3
		8-32 m	45.8	34.5	51.6	44.7	36.2	34.3	22.0	31.6	30.4
No 6	(summer)	4-32 m	40.7	23.6	52.7	60.3	47.5	36.4	18.2	21.1	38.2
		8-32 m	43.7	31.6	60.3	68.2	53.7	40.8	34.1	32.0	41.6
No 6	(winter)	4-32 m	27.5	18.6	54.6	68.9	46.4	35.7	13.2	15.0	32.1
		8-32 m	34.5	31.6	68.2	68.6	47.4	40.1	30.4	24.1	42.4
No 7	(summer)	4-32 m	68.5	62.1	83.2	70.7	63.9	59.3	42.8	59.3	61.4
		8-32 m	59.1	50.7	73.2	52.0	41.4	49.1	46.6	62.0	62.8
No 7	(winter)	4-32 m	36.8	39.6	75.3	90.0	82.1	73.2	63.4	60.0	70.5
		8-32 m	46.6	50.8	87.4	87.8	59.1	45.8	45.6	62.4	65.9
No 8	(summer)	4-32 m	16.1	-5.4	16.4	37.5	46.4	43.2	36.4	29.6	55.7
		8-32 m	36.6	20.8	38.3	57.0	53.2	54.1	52.0	47.8	69.9
No 8	(winter)	4-32 m	20.7	1.4	54.3	30.3	55.7	69.6	47.1	35.7	45.7
		8-32 m	31.2	15.8	37.0	32.0	42.0	53.7	44.9	45.3	50.8
No 9	(summer)	4-32 m	33.6	10.0	29.3	27.5	25.3	39.6	28.9	28.9	36.1
		8-32 m	40.6	20.4	43.3	42.8	39.9	33.3	33.3	34.5	45.8
No 9	(winter)	4-32 m	36.4	15.4	47.1	53.9	82.5	60.7	41.4	31.1	30.7
		8-32 m	42.4	28.7	53.7	48.7	47.4	57.0	48.7	47.4	42.0
No 10	(summer)	4-32 m	15.0	-2.1	31.8	42.5	47.1	54.6	32.1	22.5	40.0
		8-32 m	10.4	0.4	37.0	44.5	26.6	36.6	30.4	16.6	44.9
No 10	(winter)	4-32 m	39.6	18.2	61.0	87.1	60.0	53.2	28.2	24.6	33.2
		8-32 m	38.7	27.5	73.6	72.0	37.0	51.6	34.1	39.1	43.7

acoustic properties of the equipment which are indicated in Figure 1. The measured sound pressure levels at 4 and 8 m in the anechoic room, both with and without the in the field used taperecorder, were plotted, and in general there was good agreement with the inverse square law (or inverse distance law), which states that doubling the distance from the source reduces the sound pressure level with 6 dB (Harris, 1957), as is evident in Figure 1. However, the properties of the taperecorder show some less agreement at 125 Hz (cps) (Fig 1, solid curve). Since the anechoic room was not large enough to determine the sound pressure level at 16 and 32 m, these values were extrapolated from the measured values at 4 and 8 m. In extrapolating we used the inverse

Frequencies (Hz)

1k	1250	1 6k	2k	2 5k	3,2k	4k	5k	6 4k	8k	10k	12 5k	16k
19 1	33 3	19 5	22 2	1 1	5 5	-14 4	4 1	0 4	4 5	22 3	8 2	
22 3	46 4	24 2	30 2	2 8	2 3	15 9	10 8	19 8	7 3	25 7	28 3	
19 1	41 2	20 3	30 4	1 5	2 7	21 2	3 8	1 4	4 8	9 1		
15 7	50 2	33 3	39 4	6 9	6 4	8 0	4 9	15 1	29 3	36 9	26 2	1 3
4 1	3 5	-5 4	4 7	-9 6	3 1	27 9	10 2	15 7	24 1	33 1	28 2	8 9
19 5	15 2	5 0	11 9	-3 9	1 0	23 0	15 5	13 4	13 9	12 0	22 4	14 7
4 1	1 3	-7 5	5 1	12 5	2 0	4 0	7 0	10 0	19 8			
19 5	9 0	5 9	20 6	3 2	8 9	5 3	5 8	19 3	29 3			
14 9	-0 6	-14 0	6 1	11 8	3 7	-21 2	0 8	40 0	49 8	43 4	51 0	37 1
21 1	5 6	16 2	4 0	11 0	-4 8	12 6	10 8	61 3	55 5	37 3	37 0	
14 9	9 8	9 0	18 6	1 1	8 5	-10 1	1 4	11 1	45 2	57 2		
21 1	3 6	-15 4	7 3	-5 8	5 6	3 8	8 2	25 9	52 6	62 9		
8 1	9 8	-12 6	0 1	11 8	14 9	3 5	21 2	32 1	39 8	50 9	85 3	67 1
15 7	19 4	-5 8	1 3	-8 5	17 2	8 2	22 2	29 2	41 0	53 1	82 8	62 9
8 1	8 9	-12 2	-1 4	7 1	0 6	6 2	8 7	23 9	20 5	43 4		
15 7	17 3	-7 0	2 2	9 7	-3 6	-19 2	-10 0	26 7	37 6	68 5		
12 7	14 4	-9 4	15 1	4 6	11 3	2 1	20 5	28 2	43 0	55 5	79 1	
25 3	24 8	2 9	24 0	6 1	22 6	19 7	40 3	48 8	50 9	42 7	73 4	
12 7	4 4	-16 0	1 1	6 8	7 7	11 0	21 2	34 6	39 5	53 0	37 8	
25 3	15 2	-2 3	13 1	4 4	24 5	27 4	33 2	48 0	41 4	48 6	60 1	
39 8	22 6	2 4	38 6	21 8	35 2	9 5	19 8	36 4	52 0	53 8	70 0	64 3
51 9	28 1	6 7	33 5	17 3	23 1	1 4	0 9	0 1	8 5	17 0	39 5	
39 8	28 3	11 3	47 6	25 7	25 9	4 5	1 6	32 1	45 2	38 1	48 5	
51 9	25 6	-8 7	37 3	16 1	21 0	-8 0	-3 8	28 8	48 4	52 3	61 5	
25 2	22 6	17 4	31 5	14 3	14 2	10 1	14 4	43 6	73 0	86 6	70 7	
37 8	26 9	35 4	38 1	26 5	19 3	-2 2	23 7	44 6	64 7	71 5	56 6	
25 2	14 0	-8 7	9 0	0 7	-0 1	-10 8	20 7	16 1	35 5	60 2		
37 8	19 0	-21 2	9 4	0 7	10 2	9 9	29 9	33 4	34 9	63 1		
8 4	6 9	-3 3	29 7	20 0	34 9	17 4	15 5	32 1	39 1	41 6	33 2	
20 3	17 7	5 4	38 9	31 5	44 3	29 8	30 3	30 1	21 4	42 3	24 1	
8 4	11 9	4 6	41 5	32 2	39 5	22 2	41 2	60 7				
20 3	16 0	15 0	51 8	39 8	47 2	26 7	45 7	54 6				
11 1	5 8	-14 7	9 4	12 8	-4 4	-29 4	27 3	57 8	64 1	38 8	38 2	14 6
25 5	14 4	-9 5	5 7	-6 0	-1 5	-35 5	15 8	47 6	61 8	42 7	18 6	
11 1	7 3	-10 1	12 2	7 2	9 9	2 0	12 6	27 5				
25 5	14 0	0 4	17 3	13 2	11 0	2 2	18 2	22 6				

square law in supposing that the transmission loss over 8 16 and 16-32 m in the anechoic room will be equal to the transmission loss over the distance 4-8 m, and these calculated values were used to correct the field-measured sound pressure levels. In Figures 2-10 no correction was made for air and molecular absorption since the maximal distance (32 m) is relatively small and the value of this absorption will fall within the measuring error (Harris, 1963). Summer values were computed from at least 3 measurements up to the 6 determined for both summer seasons. The winter values represent 2 to 3 measurements.

The  $1/3$  octave band with a center frequency of 1 kHz was used as a

**Table 3.** Differences between maximum and minimum values for the absorption coefficients in

Frequencies (Hz)	125	160	200	250	320	400	500	640	800	1k
Maximum	68.5	62.1	87.4	90.0	82.5	73.2	63.4	62.4	70.5	51.9
Veg no	7	7	7	7	9	7	7	7	7	7
Winter/summer	s	s	w	w	w	w	w	w	w	s/w
Minimum	2.5	-7.1	16.4	27.5	25.3	33.3	13.2	11.1	16.4	4.1
Veg no	3	3	8	9	9	9	6	3	4	3
Winter/summer	s	s	s	s	s	s	w	w	s	s/w
Max-Min	66.0	69.2	71.0	62.5	57.2	39.9	50.2	51.3	54.1	47.8
In all veg positive Ae	yes	not	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes

s=summer, w=winter

reference and the levels of the other frequency bands were compared with this 1 kHz band. Thus, the level of the 1 kHz band at 4 m from the source was fixed at 0 dB and the attenuation was recorded in negative values. Nevertheless, it is important to determine if the 1 kHz band decays in accordance with the inverse square law as Embleton (1963) suggested. This problem was examined using the summer measurements of 1972 and the results are presented in Figures 2-10. It appears that the 1 kHz band follows the inverse square law more closely than other frequencies but some excess attenuation (Ae) was present varying from 2.5 dB Ae at 32 m in community no 3 to 11.5 dB Ae at 32 m in community no 7.

At shorter distances, the Ae is frequently negative as indicated in all communities at 8 m and in communities no 3, 5, 6, and 10 at 16 m. Since this phenomenon was not found in either control, it apparently is the result of reflection and scattering by the vegetation.

Only a few differences were found in comparing the controls (Fig 2). No difference in attenuation was apparent at lower frequencies presumably because the soil absorption and reflection were similar. Slight attenuation in the open field control (community no 1) for the  $1/3$  octave bands of 5-16 kHz was indicated probably because there was no scattering against the vegetation screens as was present in the sandpath control (community no 2).

The general picture presented by Figures 3-10 indicates clearly that in comparison to the controls, more attenuation is found in the lower and higher frequencies. Some negative attenuation for the mid-frequencies from 450 Hz to 2.5 kHz was present. Differences between summer and winter results were minor but there was generally more attenuation in summer for the  $1/3$  octave bands lower than 1 kHz.

#### 4.2 Absorption of the $1/3$ Octave Bands

Ae expressed in dB/100 m (or a comparable measure) offers a useful tool for planners when selecting plantations for noise control. Table 2 indicates the computed values of Ae in dB/100 m and these can be compared with Ae figures reported by other researchers (Aylor, 1972, Eyring, 1946, Embleton, 1963, Meister and Ruhrberg, 1959, Meister, 1960, Parkin and Scholes, 1965). The

1250	1,6k	2k	2.5k	3.2k	4k	5k	6,4k	8k	10k	12,5k	16k
28.3	35.4	51.8	39.8	47.2	29.8	45.7	61.3	73.0	86.6	85.3	67.1
7	8	9	9	9	9	9	4	8	8	5	5
w	s	w	w	w	s	w	s	s	s	s	s
-1.3	-21.2	-2.2	-12.8	-4.8	35.5	-15.5	-0.1	8.5	12.0	18.6	8.9
3	8	5	3	4	10	3	7	7	3	10	3
w	w	w	w	s	s	s	s	s	s	s	s
29.6	56.6	54.0	52.6	52.0	65.3	61.2	61.4	64.5	74.6	66.7	58.2
not	not	not	not	not	not	not	not	yes	yes	yes	yes

**Table 4.** Correction values, used to compute the values of Ae in dB/100 m

Frequencies (kHz)	1	1.25	1.6	2	2.5	3.2	4	5	6.4	8	10	12.5	16
Correction values (dB)	0.5	0.6	0.8	1.0	1.4	1.9	2.6	3.8	5.7	7.3	10.5	15	23.2

values presented here were computed from the sound absorption spectra using the attenuation over 4–32 and 8–32 m and were corrected for spherical divergence and air and molecular absorption over 100 m. The computed correction values are given in Table 4.

### 4.3 The Specific Sound Absorption of Plant Communities

Although in general the plant communities (Figs 3–10) appear quite similar, each community has its own unique and specific absorption characteristics. This is supported by the following observations:

1 The decay of the 1 kHz band in the two control communities is quite similar. However, the other communities differ among themselves and from the controls.

2 In various features, the sound absorption spectra of all communities differ among themselves and from the controls. The most obvious difference is the high attenuation of the frequencies of 500 Hz–2 kHz in the controls, possibly caused by the acoustic properties of the soil (Aylor, 1972).

3 In general the winter results follow the same pattern as the summer. However, there are clear seasonal differences among communities to absorb in different frequency bands.

To present a general overview, each community will be listed and characterized individually.

**Community No 3 (Fig 3)** Minor differences between summer and winter results with a maximum difference of 7 dB at 320 Hz at 8 m. The most striking feature is low attenuation in the higher frequency bands.

*Community No 4 (Fig 4)* Compared to no 3, more differences between summer and winter results with a maximum difference of 10 dB at 250 and 300 Hz at 4 m and for frequencies up to 250 Hz at 8 m. In the winter more attenuation was found in the frequency range from 600 Hz-5 kHz with high attenuation of low frequencies and high frequencies up to 10 kHz.

*Community No 5 (Fig 5)* At 32 m, more attenuation in the frequency range from 200 to 300 Hz was found in the summer than the winter.

*Community No 6 (Fig 6)* Good attenuation of both low and high frequencies was present in both summer and winter.

*Community No 7 (Fig 7)* The most striking feature is the large decay from 16 to 32 m, in most cases exceeding 12 dB. This suggests that there is actual absorption since Meister and Ruhrberg (1959) and Meister (1960) stated that in a statistic total homogeneous vegetation per doubling distance, there is an attenuation of at least 12 dB due to spherical divergence and scattering between branches, twigs and leaves for the high frequencies. However, it should be noted that scattering resulting from the vegetation is a property of that vegetation and thus is one factor that influences the distinctive acoustic climate of a particular plant community. In this plant community the attenuations during winter and summer were different at frequencies below 500 Hz at small distances (4 and 8 m). There was even a negative attenuation (amplification) at higher frequencies.

*Community No 8 (Fig 8)* In summer and winter, amplification of higher frequencies was found at short distances and rather large differences (up to 10 dB) between attenuations up to 500 Hz.

*Community No 9 (Fig 9)* The attenuation peak at 300 Hz at 4 m was present in summer but absent in winter.

*Community No 10 (Fig 10)* A substantial attenuation peak between 2.5 and 6.4 kHz at 4 and 8 m was found in the summer. In winter, there was better attenuation of frequencies below 300 Hz at 32 m.

## **5. Discussion**

As is clear from the listed differences in sound absorption of the various plant communities (see "Results" 4.3), it can be concluded, that every examined community has its own absorption characteristics. These differences may be attributed to the variations in the vegetations, like differences in height, foliage, plant mass, humus layer and soil. For example the foliage of two vegetations are of the needle type (community no 4 and no 9), while the remaining ones are of the deciduous type. From the reported results, it is not yet evident if there exists a correlation or if so, what the possible correlation is between



the density of the plant mass and the absorption, although preliminary calculations (not reported here) seem to indicate a positive correlation

What exactly the influences of these differences are on the different absorption characteristics is as yet unknown. There exists only some knowledge about soil and foliage, which will be discussed later in this paper

At the moment it is not possible to give a correlation between different syntaxa and the attenuation spectra, because all examined plant communities belong to the same syntaxon (*Quercion robori-petreaea*) To survey this problem, research is now in progress.

In order to compare the results reported here with those of other researchers, the Ae (excess attenuation) in dB/100 m for all frequency bands from the plant communities examined were computed over the longest distances measured, namely 4–32 and 8–32 m From these calculations it appears as if relatively long distances should be examined to obtain meaningful results

Also from the sound absorption curves it is concluded that each plant community has an unique and specific sound absorption spectrum and considerable differences among plant communities are present Table 3 contains the most extreme absorption coefficients with the values obtained from the controls no 1 and 2 omitted A mean difference between maximal and minimum absorption coefficients of 57.5 dB/100 m for all frequency bands was found

Moreover, it should be noted that the value calculated over 8–32 m is frequently higher than that over 4–32 m Perhaps, this phenomenon is the result of the heterogeneity within the plant communities, and the reflection and scattering by the vegetation. From Table 3 it also appears that some communities have a small amplification of the sound energy at some frequency bands but in most cases there is an overall Ae.

The highest Ae (more than 70 dB/100 m), calculated over the distances 4–32 or 8–32 m, was found at the frequency bands of 200, 250, 320, 400 and 500 Hz in winter, and at 8, 10, and 12.5 kHz in summer. The higher Ae found at the low frequencies in winter was not unexpected, since the soil was not covered with snow, but with fallen foliage causing a very porous layer covering the soil. This will enhance the ground absorption, which, like Aylor (1972), has also been measured by us in summer at the low frequencies The transmission loss at high frequencies in summer is higher than in winter in nearly every plant community It can be suggested (Beck, 1967) that this phenomenon may be attributed to reflection, scattering and perhaps absorption by the various leaves which are absent in winter

Various Ae values have appeared in the literature. Aylor (1972) reported Ae values for corn (maize) to be 15 dB/100 m at 200 Hz and 90 dB/100 m at 4 kHz He also reported Ae values for brush to be 45 dB/100 m at 4 kHz in summer and 15 dB/100 m at 4 kHz in winter A slight relationship between Ae and increase in plant mass was also indicated It should be pointed out that this studies involved placing the sound source in front of the plantation so that the barrier effect of the boundary was a factor in Aylor's measurements. The boundary effects were investigated by Whitcomb and Stowers (1973) Embleton (1963) reported Ae values up to 40 dB/100 m The highest Ae values were associated with both the high and low frequencies while low Ae values were

present at mid-frequencies. The results reported here, are similar to the results of Embleton, but Embleton like Aylor placed his sound source in front of the plantation.

Eyring (1946), whose sound source was located in the community, reported an increase in absorption coefficients for both grass and brush. A maximum of 63.2 dB/100 m at 10 kHz for a dense grassland 1.80 m in height was found. Also, a maximum of 73.4 dB/100 m at 10 kHz was determined for a dense jungle. Meister and Ruhrberg (1959) found only low values with a maximum mean value of 17 dB/100 m for deciduous forests and 30 dB/100 m for dense hedges. The results presented here parallel those reported by Haupt (1973, 1974), who investigated the attenuation by oak, beech, pine and spruce-fir forest with or without herbs and/or shrubs. Haupt found the maximum  $A_e$  in the frequency range of 250–500 Hz to be 15–25 dB/100 m and of 4–8 kHz to be 2–20 dB/100 m, but his values were generally lower than the values reported herein. Possibly, the results of Haupt were lower because he analyzed the sound in octave bands instead of the  $1/3$  octave bands used in this study. In addition, the forest used by Haupt was over 20 m in height. Seasonal differences in  $A_e$  were found by Haupt as we did. Weiner and Keast (1959) examined dense woods and reported small absorption coefficients increasing from 3.5 dB/100 m at 350 Hz to 25 dB/100 m at 5 kHz.

This comparison clearly indicates that the results available at the present time are in disagreement. So it is obvious that plant communities differ in their sound absorption patterns. Additional research is now underway to determine the acoustic climate and attenuation patterns of other natural and semi-natural plant communities. It is felt that differences in small frequency bands, even smaller than the  $1/3$  octave band used here, will have to be examined. The results of these studies will be reported in the future.

*Acknowledgments* The authors are much indebted to Prof. Dr. Ir. F. J. Meister (Aachen) for his stimulating discussion, Prof. Dr. P. L. Pfahler (Gainesville, Florida) for correcting the English text and to Mr. J. A. M. van Huet of the Dept. of Technical Services of the Faculty for his continuous and skilful technical assistance.

## References

- Aylor, D. Noise reduction by vegetation and ground. *J. acoust. Soc. Amer.* **51**, 197–205 (1972).
- Beck, G. Untersuchung über Planungsgrundlagen für eine Lärmbekämpfung im Freiraum mit Experimenten zum artspezifischen Lärminderungsvermögen verschiedener Baum- und Straucharten. Dissertation, Universität Berlin (1965).
- Beck, G. Hinweise zur Anlage von Lärmschutzpflanzungen. *Mitteilungsblatt des Landesverbandes Gartenbau und Landwirtschaft Berlin* **18**, 13–17 (1967).
- Borner, H. Storschallminderung durch Schutzabstände, Boscungen oder Vegetationsbestände. *Deutsche Gartenarchitektur* **2**, 39–41 (1963).
- Braun-Blanquet, J. *Pflanzensoziologie*. Berlin: Springer, 1928.
- Embleton, T. F. W. Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods. *J. acoust. Soc. Amer.* **35**, 1119–1125 (1963).
- Eyring, C. F. Jungle acoustics. *J. acoust. Soc. Amer.* **18**, 257–270 (1946).
- Harris, C. M. *Handbook of noise control*. New York: McGraw-Hill, 1957.

- Harris, C M Absorption of sound in air in the audio-frequency range J acoust Soc Amer **35**, 11-17 (1963)
- Haupt, R Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände 1 Teil Methodische Grundlagen Arch Naturschutz Landschaftsf **13**, 309-327 (1973)
- Haupt, R Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände 2 Teil Die Ergebnisse und ihre Anwendungsmöglichkeiten Arch Naturschutz Landschaftsf **14**, 61-75 (1974)
- Meister, F J Über einige Besonderheiten der Schallausbreitung auf natürlich bewachsenen Flächen Frequenz **14**, 211-217 (1960)
- Meister, F J, Ruhrberg, W Der Einfluß von Grünanlagen auf die Ausbreitung von Geräuschen Lärmbekämpfung **3**, 5-11 (1959)
- Meister, F J, Ruhrberg, W Die Dämmung von Verkehrsgeräuschen durch Grünanlagen V D I - Zeitschrift **101**, 527-535 (1959)
- Parkin, P H, Scholes, W E The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at Hatfield J Sound Vibr **2**, 353-374 (1965)
- Westhoff, V, Den Held, A Plantengemeenschappen van Nederland Zutphen Thieme 1969
- Whitcomb, C E, Stowers, J F Sound abatement with hedges Hort Science **8**, 128-129 (1973)
- Wiener, F M, Keast, D N Experimental study of the propagation of sound over ground J acoust Soc Amer **31**, 724-733 (1959)

*Received November 25 1975*



Hoofdstuk / Chapter 4. Noise abatement in plant  
monocultures and plant communities.

submitted for publication in Applied Acoustics.

Maurice J.M. Martens,  
Department of Botany,  
Section Experimental Ecology,  
Catholic University,  
Toernooiveld,  
6525 ED Nijmegen,  
The Netherlands.

\* This work was supported by a grant of the "Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne" (Ministry of Public Health and Environmental Hygiene), Leidschendam, the Netherlands.

(submitted for publication in Applied Acoustics)

## SUMMARY.

Three types of vegetations could be discerned with regard to the acoustic climate investigated in 4 different plantations, 2 plant communities, and above a grassfield. In the first type of vegetations i.e. beech and ash tree forests the excess attenuation was at least 10 dB/100 m with the receiver at the same height as the source, 1.2 m, and at least 5 dB/100 m with the receiver at 3.9 m, and even more in most 1/3-octave bands studied. In the second type of vegetations i.e. the mixed poplar forest and the Stellario-Carpinetum a so called "sound window" could be detected around 2 kHz; the ground effect was more extended towards the high frequency range compared with the first type of vegetations. In the third type consisting of evergreen spruce-fir best excess attenuation was found in the closed forest: at least 10 dB/100 m with the receiver at 1.2 m, and 7 dB/100 m with the receiver at 3.9 m; in the belts the excess attenuation was at least 7 dB/100 m and 4 dB/100 m respectively. Best attenuation was, therefore, found in the closed forest, and not in the belts. It was concluded that the sound attenuating capacity of planted vegetations can be used to abate noise pollution in town and landscape planning, if the plantations are at least 12 m wide. To obtain the best effect the rows of trees have to be planted perpendicular to the direction of the sound field.

## 1. INTRODUCTION.

During the last decades there is an increasing interest in sound transmission and attenuation in the environment among physicists and biologists. This interest originates from a pure scientific view to understand the sound absorption in the medium air<sup>1-6</sup>, and the sound transmission and absorption above acoustically hard soil surfaces like concrete, asphalt, or above grass covered soil surfaces<sup>7-9</sup>. In addition the increasing noise pollution problems caused by traffic and industry drew the interest to the possible abatement of this physical air pollution in town and landscape planning<sup>10, 11</sup>. Finally, there is a special biological interest in animal vocalization and communication in the natural, semi-natural, and cultural environment<sup>12, 13</sup>.

Since a plant community is a complex medium with respect to both biology and acoustics, we started in the early seventies a series of investigations about the acoustic climate of 8 Dutch semi-natural plant communities in order to offer a biological solution for noise pollution problems and to contribute to the ecological interest in animal communication and vocalization<sup>14, 15</sup>. From these investigations it became clear that the different parts of a vegetation i.e. the soil surface, the trunks, stems, and branches of the trees, the foliage of the herbs, shrubs, and trees, and the air in the vegetation all contribute to the overall acoustic climate of each plant community.



To investigate these parts systematically and the total complex of a vegetation, we started more detailed research to increase our knowledge about the soil surface<sup>16</sup> and the foliage<sup>17, 18</sup> on the one hand and the acoustic climate of planted forests consisting of one species or of mixtures of planted trees and shrubs on the other hand.

Preliminary investigations had been carried out in 1976<sup>19, 20</sup>. This paper presents the detailed observations over the two year period 1977 - 1979. The usefulness of these planted vegetations in town-, landscape-, and physical planning to avoid and abate noise pollution from traffic and industry will also be discussed.

## 2. MATERIALS AND METHODS.

### 2.1. Plant Communities.

We investigated the acoustic climate and the sound attenuation of 6 planted forests and a flat grassfield of a glider airport. Five of these planted vegetations were located in the Flevopolder, the new land reclaimed from the Zuider Zee in 1954. The Dutch State Forests Services planted these forests during 1959, 1960, and 1961, and 4 of the forests consist at present of but one tree species and are, therefore, very suitable for investigations on the effect of monocultures on the acoustic climate.

(1). The beech tree forest (Fagus sylvatica L.) was planted in 1961 and the height of the rather uniform trees was 7.5 m. The diameter of the stems at 1.5 m above the ground level was  $110 \pm 24$  mm. The canopy of the trees was closed and bended towards the soil surface at the forest boundaries. There were no shrubs or herbs in this forest. The trees were planted in rows 2.5 m apart. The distance between the trees in a row varied around 1.35 m. The ground was intersected every 10 m with ditches, parallel to the tree rows, which were 1.5 m wide and 0.35 m deep. The ground was covered with 50 mm litter consisting of decaying beech tree leaves and in the dry ditches this layer of litter was 150 mm.

We investigated in this forest the sound propagation in three directions: transection A, perpendicular to the tree rows; transection B, parallel to the rows; and C,

diagonal with an angle of  $45^{\circ}$  between the rows of trees and the measuring axis.

(2). The ashtree forest (Fraxinus excelsior L.) was also planted in 1961 and the height of the trees was 6 m. The canopy of the trees was not closed, it covered 75 % of the soil. The diameter of the stems at 1.5 m above the ground level was  $40 \pm 3$  mm. The trees were planted in rows 1.4 m apart, while the distance between the trees in a row varied around 1.1 m. A dense herb layer consisting merely of reed (Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud) covered the soil surface of the forest, and some mosses were found growing on tree branches fallen on the ground. Not much litter was found between the reed plants on the soil surface. This forest was intersected with ditches every 10 m, parallel to the rows, 0.40 m deep and 1.5 m wide. In this forest we investigated two transections: A, angle between tree rows and the measuring axis equalled  $30^{\circ}$ ; and B, measuring axis was perpendicular to the rows.

(3). The spruce-fir forest (Picea abies (L.) Karsten) was planted in 1960 and the height of the trees in this very dense planted forest was 8 m. The diameter of the stems at 1.5 m over the ground was  $114 \pm 20$  mm. The canopy of the trees was closed and reached the soil surface at the forest boundaries. Few reeds were found between the trees. The trees carry many branches and twigs without needles in the lower region. The trees were planted in rows 2 m apart; distance between trees in a row varied around 1.8 m. The ground was intersected every 12 m with ditches parallel to the rows.

The litter layer, 50 mm, had a fine structure and consisted of dropped needles. We investigated in this forest the sound propagation over one transection, perpendicular to the rows of the trees.

(4). The spruce-fir belts (Picea sitchensis (Bong.) Carr) were planted in 1959. The belts were 4 m wide and the open area between the belts was 3 m. In the belts the trees were densely planted covering 100 % of the soil surface. The height of the belts was 7.5 m and the diameter of the trees at 1.5 m above the ground was  $100 \pm 20$  mm. The litter, 30 mm, covering the soil was very fine structured and consisted of dropped and decomposed needles. Between the belts the soil surface was covered with grass, very few reeds, and a single mountain-ash berry (Sorbus aucuparia L.). No litter was found. This vegetation was not intersected with ditches. One measuring transection was investigated.

(5). The mixed poplar forest was well developed since it was planted in 1960 and consisted of various deciduous plant species arranged in four vegetation layers. The upper layer covering 80 % of the soil surface reached up to 12 m in height and consisted of poplar trees only (Populus x canadensis Moench); the diameter of the stems at 1.5 m over the ground equalled  $290 \pm 14$  mm. The trees were planted in rows 3.3 m apart. The forest had been thinned so that the distance between the trees in a row was 7.75 m when the experiments started; therefore, the original planting pattern can now hardly be determined.

A second tree layer reached a height of 7 m and covered 50 % of the ground; this tree layer consisted of Quercus robur L., Carpinus betulus L., Corylus avellana L., Alnus glutinosa (L.) Vill., and Acer campestre L..

The shrub layer consisted merely of young individuals of the same species growing in the second tree layer completed with a number of Rosa canina L. shrubs.

The herb layer consisted of Phragmites communis Trin., Petasites hybridus (L.) G., M. et Sch., Tussilago farfara L., Epipactis palustris (L.) Crantz, mosses and seedlings of the species growing in the other plant layers.

The soil was covered with dropped branches overgrown with mosses and with litter during winter and spring, and this litter decomposed very rapidly during the other seasons. The ground was not intersected with ditches. This forest might develop in future to the syntaxon 38 Ab Carpinion betuli with hedges syntaxon 34 Aa Rubion subatlanticum with influence of the wet plant communities 16Aa4 Tussilaginetum and 17Ac1 Agropyro repentis-Aegopodietum podagrariae (Ref.21 ).

In this forest we investigated two transections A and B, and the angle between these transections equalled 45°; transection B was chosen parallel between two rows.

(6). The Stellario-Carpinetum (R. Tx. 1937 p.p.) Oberd. 1957, syntaxon number 38Ab1 (Ref. 21, pp. 270-271) in the Botanical Garden of the Nijmegen University is a well developed forest consisting mostly of deciduous species, but among them some evergreen species were present in this 17 m high forest. The first tree layer had an open canopy covering

60 % of the soil surface and consisted of Betula verrucosa Ehrh., Fagus sylvatica L., Quercus robur L., Q. petraea (Mattuschka) Lieblein, Acer pseudoplatanus L. and Larix leptolepis (Sieb. et Zucc.) Gord..

The second tree layer, 10 m in height, covered 75 % of the soil surface and consisted of the following species: Fraxinus excelsior L., Fagus sylvatica L., Carpinus betulus L., and Corylus avellana L..

The shrub layer reaching 5 m and covering 70 % of the ground consisted of young individuals of the species growing in the tree layers and some Alnus glutinosa (L.) Vill., Sarothamnus scoparius (L.) Wimm. ex Koch, Sambucus nigra L., and Ribes sanguineum Purch..

The herbs covering 75 % of the ground were less than 1 m in height. The most frequently occurring species were Glechoma hederacea L. and Chamaenerion angustifolium (L.) Scop.. Some less occurring species were Euphorbia amygdaloides L., Dryopteris filix-mas (L.) Schott, and Stellaria media (L.) Vill..

The soil surface was covered with a litter layer varying in thickness between 20 and 60 mm and the soil was not intersected with ditches. In this forest we investigated one measuring transection.

(7). For comparison we measured the sound propagation over the runway of a glider airport. This runway was covered with short grasses and some heather-bells (Erica tetralix L.) with a maximum height of 50 mm. The solid soil was not covered with litter and very flat; this runway is referred to in this paper as the grassfield.

## 2.2. Soil-composition.

During the investigations in 1978 we took two soil samples from the ground in each measured transection with an earth-drill 36 mm deep and a total content of 70 ml. We determined the water- and aircontent, and the percentage of soil particles or dry matter<sup>22</sup>.

## 2.3. Weather.

The windspeed was monitored with a cup anemometer and was less than 2 m/s in the forests or above the grassfield and the wind direction was almost the same as the direction in which the sound from the speaker was emitted<sup>23</sup>. The relative humidity and the temperature of the air were determined with a ventilated wet-dry bulb Assmann psychrometer. These values were used to compute the air absorption in accordance with ISO/DIS 3891<sup>24</sup>.

## 2.4. Acoustics.

The noise generating and analysing system has been described in detail elsewhere<sup>17</sup>, however, the 1/1-octave filter set in the noise generating system was now used to create an octave filtered white noise. The 8 octaves had normalised centre-frequencies of 63 to 8000 Hz. The multi-meter indicated 12.0 in the linear position of the 1/1-octave filter, which established a current of 1.2 Ampère, resulting in a sound

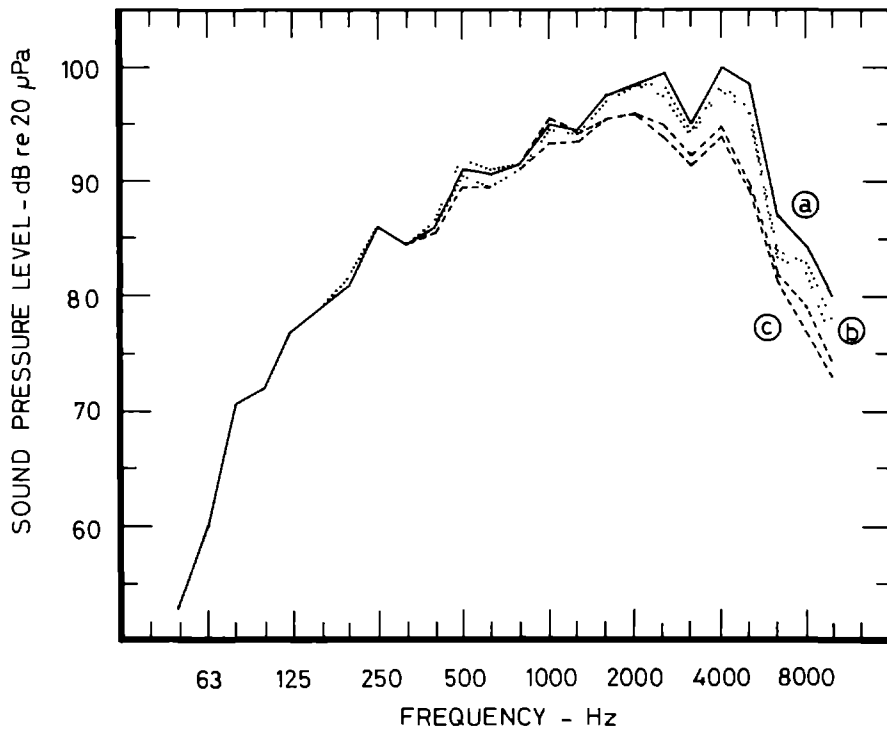


Figure 1. Frequency spectrum of the Dynacord D 310 woofer measured with the Philips multimeter indicating  $13.2 \pm 0.1$  at 4.77 m in front of the woofer: (a) in the speaker axis, (b)  $10^\circ$  deviation from the axis, and (c)  $20^\circ$  deviation from the speaker axis.



pressure level (SPL) of the unfiltered noise of 104.0 dB SPL re 20  $\mu$ Pa at 6.0 m in front of the woofer during all experiments. The correct number of the GenRad microphones is 1961 - 9601. The frequency spectrum of the Dynacord woofer and the directionality over 20 degrees deviation from the speaker axis were measured in an anechoic chamber and shown in figure 1. During this experiment the multi-meter indicated  $13.2 \pm 0.1$ , which established a current of 1.32 Ampère, with the 1/1-octave filter set in the linear position resulting in 107 dB SPL re 20  $\mu$ Pa at 4.77 m in front of the woofer.

The loudspeaker and the microphones were placed in the plantations and in the plant communities with the centre of the woofer at 1.2 m above the soil surface, and the microphones at a height of 1.2 and 3.9 m respectively. The distances between the loudspeaker and the microphones during an experiment were respectively 6, 12, 24, 48, and 96 m; but in the spruce-fir belts we had to vary these distances because of the very dense planted rows of trees in the belts. At every distance the frequency spectrum was measured and analysed in 1/3-octave bands with centre-frequencies of 50 Hz to 10 kHz during three times and between each measurement the microphones were replaced 0.5 to 1.5 m in a direction perpendicular to the noise path out of the speaker axis in order to obtain a statistical SPL value.

### 3. RESULTS.

The soil surface composition of the different investigated vegetations are shown in table I. It is evident that the percentage of dry matter is correlated with the kind of vegetation as a result of the micro-climatic conditions in the soil surface caused by the vegetation, mostly by the roots<sup>22</sup>.

The excess attenuation values for the 5 investigated distances in the plant communities and above the grassfield were calculated with a computer program<sup>25, 26</sup> from the measured sound pressure levels (SPL) in the field experiments. These SPL were corrected in that very program for the  $1/r$  doubling distance law, the frequency spectrum of the used sound source (figure 1), the air absorption, according to ISO/DIS 3891<sup>24</sup>, however, the values are not corrected in this program for the directionality of the woofer, because the angle between the direct and ground reflected sound waves is less than 22 degrees, and since this causes only problems in the frequencies above 2.5 kHz on distances less than 12 m.

A plotting program was coupled to the calculating program and the spectra of the computed excess attenuation values ( $A_e$ ) are plotted. The  $A_e$  spectra of the different vegetations are shown in the figures 2-8; the  $A_e$  spectra at receiver height 1.2 m and at distances between source and receiver of 6, 12, 24, 48, and 96 m in the figures 2a-8a, and the  $A_e$  spectra at receiver height 3.9 m and at distances 24, 48, and 96 m in the figures 2b-8b respectively. From the  $A_e$  spectra over the source-receiver distances of 48 and 96 m respectively, we

TABLE I.

SOIL SURFACE COMPOSITION OF THE INVESTIGATED PLANT COMMUNITIES.  
MEAN VALUES OF TWO SAMPLES.

Investigated plant community	date of experiment	% dry matter	% water	% air
grassfield	780818	48.2	14.0	37.8
	780602	42.5	12.0	45.5
spruce-fir belts	780906 *)	46.8	8.7	44.5
	780906 **)	41.9	11.5	46.6
	781011 *)	45.8	7.6	46.6
	781011 **)	47.2	12.1	40.7
beech tree forest	780607	43.0	23.0	34.0
spruce-fir forest	780905	36.3	15.2	48.5
	780920	39.2	9.9	50.9
Stellario-Carpi- netum	780531	35.0	16.5	48.5
	780620	35.6	12.9	51.5
mixed poplar forest	780823	36.1	25.6	38.3
	781004	31.4	37.3	31.3
	780907	25.7	12.6	61.7
ash tree forest	781003	30.3	37.3	32.4
	780606	25.5	13.5	56.0
*) soil surface in a belt				
**) soil surface between two belts (grassfield)				

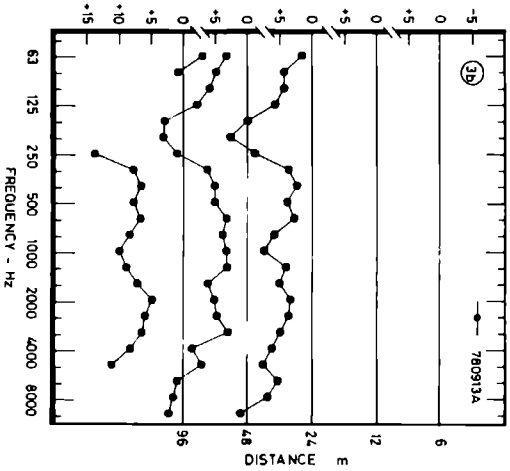
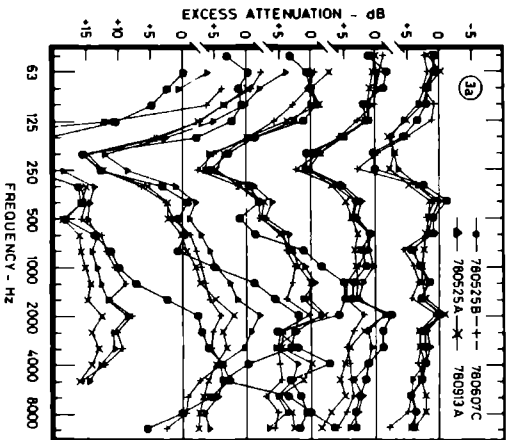
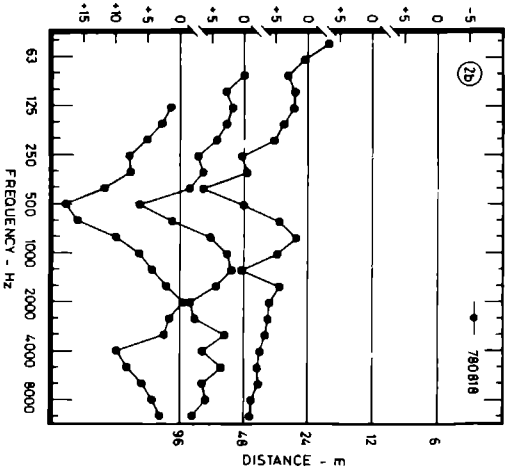
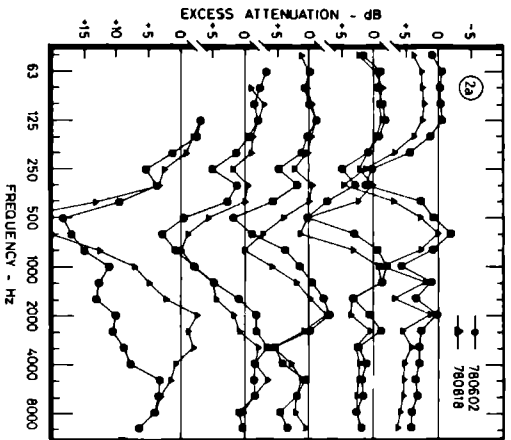
TABLE II. EXCESS ATTENUATION VALUES IN dB/100 m WITH STANDARD DEVIATION FOR 5 INVESTIGATED PLANT MONOCULTURES AND A PLANT COMMUNITY, CALCULATED FROM THE EXCESS ATTENUATION VALUES AT 48 AND 96 m, WITH RECEIVER HEIGHT 1.2 AND 3.9 m WITH CONSTANT SOURCE HEIGHT 1.2 m.

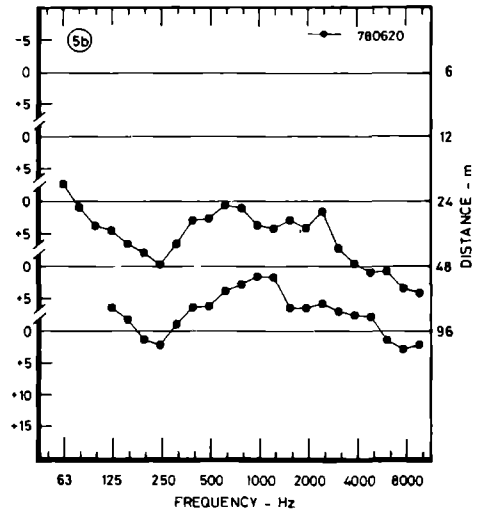
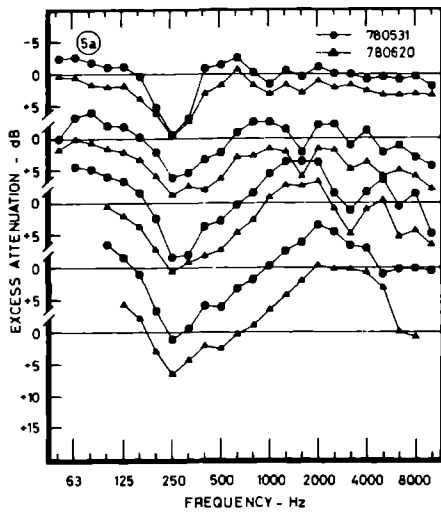
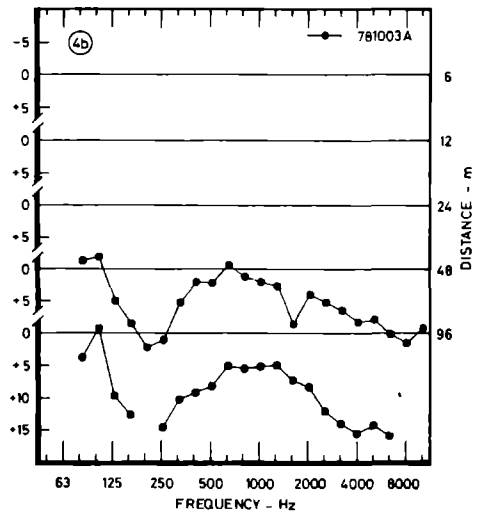
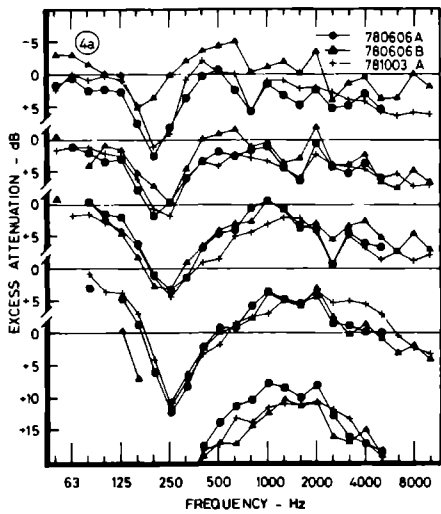
VEGETATION	FREQUENCY - Hz										
	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6400	8000	10000
Beech tree	12.7±2.8	10.4±3.9	10.1±3.8	7.9±3.0	9.7±2.8	8.9±3.0	11.3±3.5	13.3±3.0	15.0±4.4	16.7±4.0	18.5±6.3
Ash tree	9.0±3.4	8.9±2.0	11.7±3.1	8.6±1.7	13.7±2.5	15.6±3.3	16.6±2.6	18.4±2.8	21.7±3.9	24.8±0.5	28.5±1.0
Poplar forest	8.9±4.7	8.0±3.9	9.4±5.8	6.9±4.7	8.3±2.7	9.1±2.4	13.4±3.2	16.3±3.0	20.5±3.7	21.6±3.6	24.0±4.8
Spruce-fir forest	9.6±3.4	8.5±2.0	13.5±2.8	15.3±2.5	19.0±2.6	21.5±3.6	24.7±3.2	28.1±3.5	33.2±6.4	37.4±2.9	35.0±2.3
Spruce-fir belts	7.2±5.4	7.1±4.2	11.0±3.6	8.9±4.3	11.8±3.0	13.7±3.5	19.2±4.6	21.4±4.8	21.3±4.8	27.2±8.6	29.8±4.2

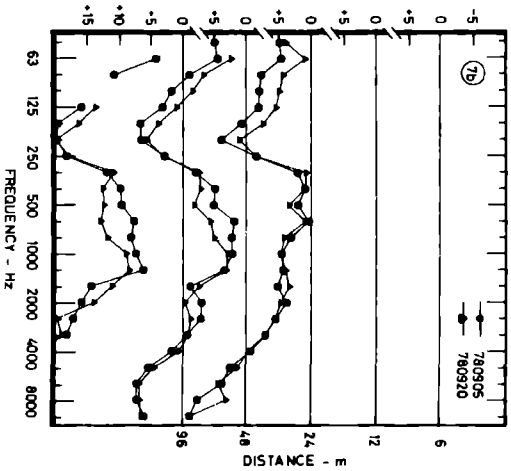
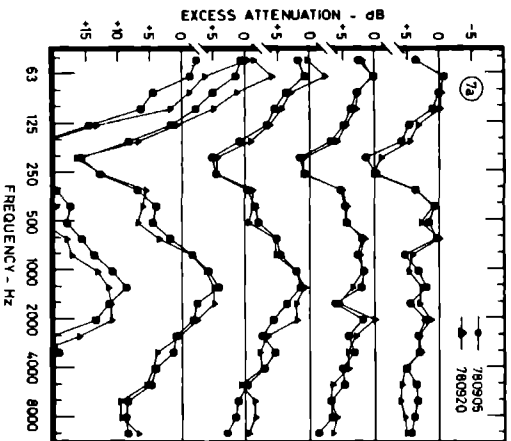
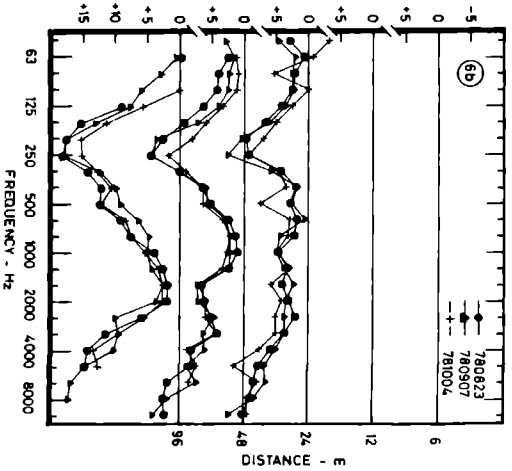
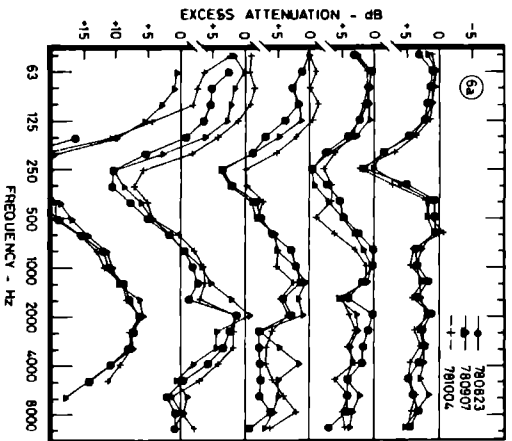
calculated the Ae in dB/100 m over the frequencies from 1000 to 10 000 Hz. These excess attenuation values are presented in table II.

A good agreement was found with the results of the experiments carried out in 1977 and 1978 in all investigated vegetations.

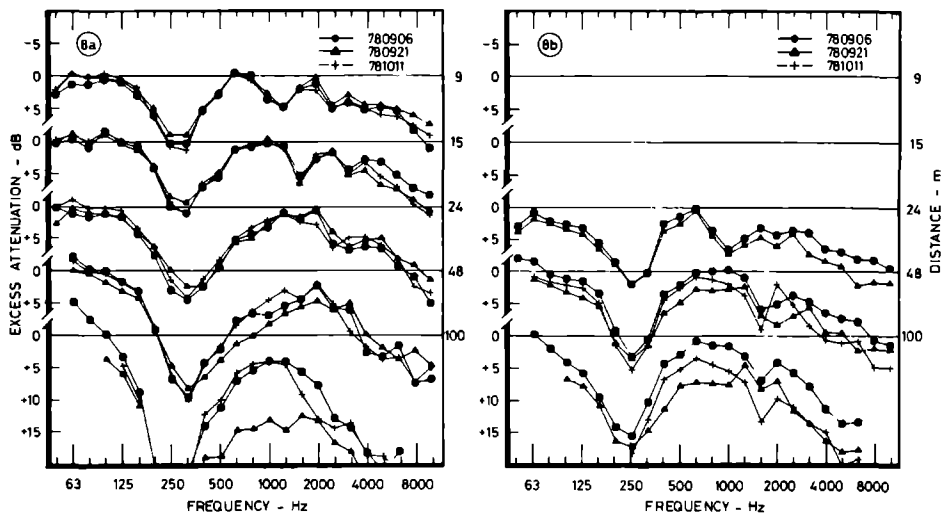
The Ae values found at 1.2 and 3.9 m above the ground differ in all investigated plant communities in a quite similar way (c.f. figures 2a-8b), mainly in the frequency range, where the ground effect occurs.











Figures 2 to 8. Excess attenuation spectra in dB at the different distances between source and receiver versus the frequencies in Hertz. Note that a positive excess attenuation is plotted downward. Series (a): receiver at the same height as the source: 1.2 m; series (b): receiver at 3.9 m above the ground. The date of the experiment and the transections are indicated; fig 2: grassfield, fig 3: beechtree forest, fig 4: ashtree forest, fig 5: Stellario-Carpinetum, fig 6: mixed poplar forest, fig 7: spruce-fir forest, and fig 8: spruce-fir belts.

#### 4. DISCUSSION.

It is evident that the frequency dependent spectra of the excess attenuation values ( $A_e$ ) of all plant communities show three similarities: (1) the low frequencies up to 1000 Hz show a clear  $A_e$  maximum, (2) the high frequencies show a second but smaller  $A_e$  maximum in the forests which is absent above the grassfield, (3) between these two regions with maximum  $A_e$  in the mid-frequencies a region with no or very few or sometimes even some negative  $A_e$  were observed. These phenomena can be explained to some extent by the following effects.

##### 4.1. The ground effect.

The first maximum of the  $A_e$  values in the low frequencies is related to the experimental arrangement of the sound source and the microphones which results in a ground effect. Table III shows the frequencies at which these maximum  $A_e$  values occur in all experiments. These maximum  $A_e$  values are caused by a destructive phase difference ( $\varphi = \pi$ ) between the direct and the ground reflected sound waves. This phase difference is given in:

$$\varphi = 2\pi f \cdot \Delta r / c + \psi \quad (1)$$

where  $f$  is the frequency of the sound wave;  $c$  is the velocity of sound in air i.e. 340 m/s at 15 °C;  $\Delta r$  is the difference in pathlength between the direct path from source to receiver and the path via the soil surface; and  $\psi$  is the phase angle

TABLE III. CENTERFREQUENCIES (Hz) OF THE 1/3-OCTAVE BANDS IN WHICH THE FIRST SOUND PRESSURE MINIMA APPEAR, AND THE CALCULATED SOIL SURFACE DEPENDENT REFLECTING FACTOR PHASE  $\psi$  (DEGREES), FROM FORMULA  $\psi = (\frac{1}{2} - f \cdot \Delta r / c) \cdot 360$ .

Plant Community	Frequency (Hz) and Reflecting Factor Phase ( $\psi$ )	Distance between sound source (S) and microphone (R), and pathlength difference ( $\Delta r$ ) between direct and soil surface reflected sound waves.									
		$h_S = h_R = 1.2 \text{ m}$					$h_S = 1.2 \text{ m}, h_R = 3.9 \text{ m}$				
		6	12	24	48	96	24	48	96	distance (m)	
		0.46	0.24	0.12	0.06	0.03	0.39	0.19	0.10	$\Delta r$ (m)	
Grassfield	Hz	315	500-640	500-800	640-800	500-1000	400	500	500		
	$\psi$	27	17-53	76-115	130-140	151-166	15	79	126		
Spruce-fir belts	Hz	315	250-315	315	315	200-250	250	250	250		
	$\psi$	27	97-115	140	158	173	76	130	155		
Beech tree forest	Hz	160-250	250	250	200-250	200-250	200	200	200		
	$\psi$	58-100	115	148	166	173	97	137	158		
Spruce-fir forest	Hz	200-250	200-250	200	200	200	200	200	200		
	$\psi$	58-83	115-130	155	166	173	97	137	158		
Stellarico-Carpine-tum	Hz	250	250	250	250		250	250			
	$\psi$	58	115	148	166		76	130			
Mixed Poplar forest	Hz	250	250	250	250-315	250	250	250	250		
	$\psi$	58	115	148	158-166	173	76	130	155		
Ash tree forest	Hz	200	250	250	250	200-250		200	250		
	$\psi$	83	115	148	166	173		137	155		

of the reflection coefficient at the soil surface in radians.

The frequency  $f'$ , where the first maximum  $A_e$  value occurs,

is found when  $\phi = \pi$ , i.e. when

$$2\pi f' \cdot \Delta r / c + \psi = \pi \quad (2).$$

This frequency  $f'$  equals:

$$f' = \frac{c}{2 \cdot \Delta r} - \frac{c}{\Delta r} \cdot \frac{\psi}{2\pi} \quad (3).$$

If the acoustic impedance of a hard surface nears infinite,

then  $\psi = 0$ , and equation (3) will read:

$$f'(\psi=0) = \frac{c}{2 \cdot \Delta r} \quad (4).$$

However, if the acoustic impedance is not infinite, as

will be the case above grass or another soft impedance

boundary like the soil surface in forests, then  $\psi \neq 0$ , and

equation (3) will read:

$$f'(\psi \neq 0) = \frac{c}{2 \cdot \Delta r} - \frac{c}{\Delta r} \cdot \frac{\psi}{2\pi} \quad (5).$$

Combining equations (4) and (5) gives the final equation:

$$f'(\psi \neq 0) = f'(\psi=0) - \frac{c}{\Delta r} \cdot \frac{\psi}{2\pi} \quad (6).$$

In theory, two possibilities exist:

- (a) if  $\psi > 0$ , then  $f'(\text{soft soil surface}) < f'(\text{hard soil surface})$ ,
- (b) if  $\psi < 0$ , then  $f'(\text{soft soil surface}) > f'(\text{hard soil surface})$ .

The phase angle of the soil surface dependent reflecting coefficient is shown to be positive in table III.

The results given in table III show that  $f'$  in the vegetations is between 160 and 250 Hz, and  $f'$  for the grassfield between 315 and 1000 Hz, while the  $f'$  for the spruce-fir belts is in between the  $f'$  of the forests and the grassfield. This is logical, since the composition of the soil surfaces in the different vegetations differs in the dry matter,

water- and air content. Consequently, these soil surfaces are not uniform with regard to the acoustic impedance and reflecting coefficient and, therefore, also not the propagation of sound waves in this upper layer of the soil surface. The percentage of air in the upper soil surface layer is dependent on the dry matter and water content. The dry matter component of this upper layer is the most constant factor in each kind of plant community, and determines the total volume of the water and air quantities in the upper layer of the ground. The water volume depends on several factors: quantity of precipitation and duration of drought, capillarity and water tension of the soil<sup>22</sup>. Nevertheless, the air volume will increase, when the volume of dry matter decreases (table II), and as a consequence, the phase angle of the acoustic waves reflecting at the upper part of the soil surface layer will increase because of a time delay, as is clearly shown in table III. Therefore, with regard to the acoustic properties of the soil surfaces in the plant communities, it can be concluded, that the soil surface in plant communities is softer than the soil surface of a grassfield.

The ground effect caused by a hard surface, like asphalt or concrete, has to be distinguished from a less hard surface, like grass, and very soft soil surfaces as found in vegetations, when using a computer model for the prediction of SPL caused by traffic or industry. This difference between grass and softer soil surfaces is as yet not always used<sup>27</sup>.

#### 4.2. Leaf absorption.

The second Ae maximum is found in all forest types, but is absent above the grassfield (c.f. figure 2 and figures 3-8); the standard deviations less than 4 presented in table II, suggest also that the Ae in the high frequencies is proportional with the pathlength and the foliage density between the source and the receiver. Since it is known that plant leaves absorb sound energy and transform this energy into heat<sup>17, 18, 28, 29</sup>, there is little doubt that this second Ae maximum is caused by the sound energy absorbing properties of the plant leaves.

#### 4.3. The mid-frequencies.

When regarding the Ae patterns of the investigated plant communities, a mid-frequency region around 1-2 kHz is found between the two Ae maxima in the low and the high frequencies. In this mid-frequency region the Ae caused by the plant organs is but a few dB, or as in other cases does not even exist, mainly at the short distances between the source and receiver. This phenomenon in the acoustic climate of plant communities has been found many times, and is in the literature sometimes referred to as the "sound window"<sup>14, 30-32</sup>, and it might be an important characteristic of the acoustic climate of a plant community with regard to the acoustic communication between animals living in those particular vegetations.

It is suggested that this phenomenon could be the consequence of sound propagation in a wave guide<sup>13</sup>, or a resonance of

the tree branches<sup>30</sup>. This last suggestion could not be confirmed<sup>17</sup>, although in the experiments, referred to in Ref. 17, a negative attenuation of sound in the frequencies around 1-2 kHz was detected in the presence of the leaves attached to the trees, and dependent on the plant species under investigation. It was, therefore, suggested that an explanation for this amplification, measured in model forests, 4.5 m in length, in an anechoic chamber, might be the transformation of sound energy from the high frequencies to the mid-frequencies. This explanation needs a non-linear behaviour of the vibrating plant leaves. However, this non-linearity could not be established by using a Laser-Doppler-Vibrometer system to determine the mode of vibrations of plant leaves caused by sound energy<sup>18</sup>.

The sound amplification measured in the beech tree forest in transection B, that is parallel to the rows, 2.5 m apart, of planted trees in the mid and high frequencies (figure 3a), can be explained by multiple scattering and reflecting of the sound waves between the tree stems. Calculations confirm this: the direct and by the stems reflected waves are in phase at 24, 48, and 96 m at frequencies of 1.25, 2.5, and 5.0 kHz. Maximum amplification of 6 dB is found and logical, since the absorption coefficients over the frequency spectrum of the bark of beech tree are less than 0.05<sup>33</sup>, and since these stems can be compared with cylindric structures with a mean diameter of 110 mm<sup>34</sup>.

It is evident, that the explanation of the existence of this so called "sound window" needs further research.

## 5. CONCLUSIONS.

### 5.1. Classification of plant communities.

From the results and the discussion on the investigated plant communities presented in this paper it is evident, that three types of vegetations can be classified from the acoustic point of view.

type 1: the beech tree (but not transection B), and the ash tree forest. The Ae over 100 m exceeds in these forests 10 dB in all investigated 1/3-octave bands with centre-frequencies above 100 Hz with the receiver at 1.2 m above the soil surfaces, and 5 dB with the receiver at 3.9 m. The ground effect is concentrated in a rather small frequency range.

type 2: the mixed poplar forest and the Stellario-Carpinatum.

These class 2 deciduous forests show less Ae over 100 m than the class 1 forests around 2 kHz, with the receivers at 1.2 and 3.9 m above the ground. This is the "sound window" region. The ground effect frequency range, however, is more extended than in the type 1 forests.

type 3: the evergreen spruce-fir forest and belts.

The most striking result, when comparing these two spruce-fir plantations, is the better sound attenuation in the forest in comparison with the belts.

These results are in conflict with the hypothesis that a plantation of belts would cause more and better Ae than closed forests, because of the reflections from the fronts of the



TABLE IV. COMPARISON OF THE MINIMUM EXCESS ATTENUATION VALUES IN dB/100 m OVER THE TOTAL FREQUENCY SPECTRUM IN THE INVESTIGATED SPRUCE-FIR VEGETATIONS.

Spruce-fir vegetations	Receiver height	
	1.2 m	3.9 m
forest	10	7
belts	. 7	4

belts<sup>35-37</sup> over the same distance at least in the investigated case of the spruce-firs.

This is illustrated in the figures 7a-8b and in table IV, from which it is evident that the overall Ae is much better in the spruce-fir forest than in the belts.

### 5.2. Plantations for noise abatement.

When comparing the Ae values in all forests with the Ae values above a grassfield it is evident that the Ae in the plant communities is better over distances between source and receiver more than 12 m in both receiver heights. An exception should be made for a very small frequency range, in which the ground effect maxima are shifted.

Since the purpose of this work was to investigate the usefulness of plant communities to abate noise pollution in town and landscape planning we conclude from figure 9 that indeed plants can abate noise pollution.

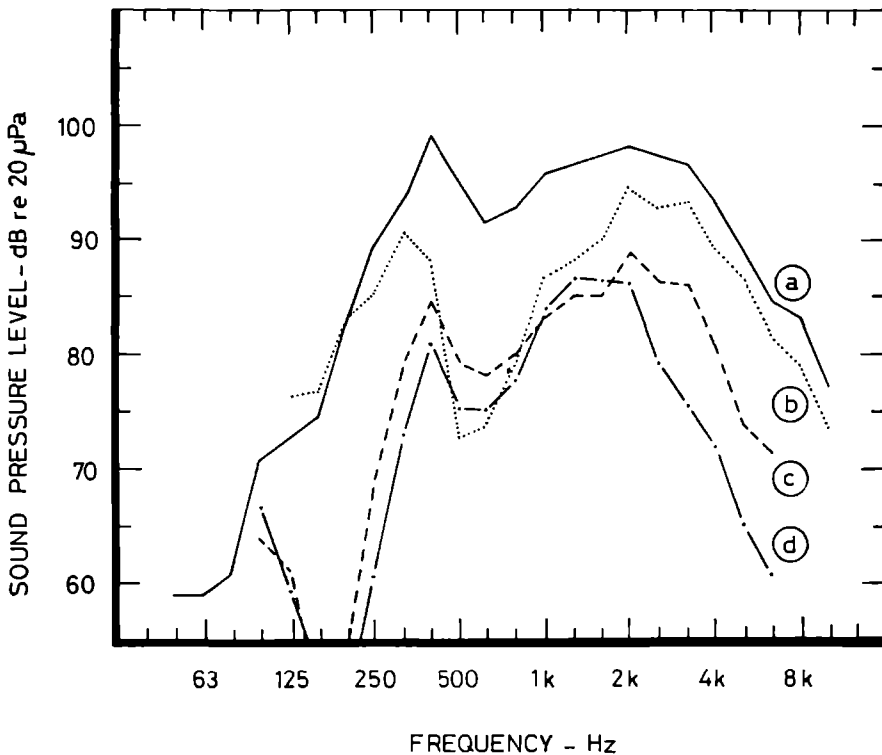


Figure 9. Influence of the excess attenuation of some plant communities in the abatement of traffic noise.

- (a) Typical spectrum of traffic noise (Reference 27).
- (b) Spectrum of traffic noise after filtering over 100 m grassland, if the traffic noise spectrum was emitted by the sound source; net effect of the grass, without air absorption and  $1/r$  doubling distance law.
- (c) Like (b), but 100 beech tree monoculture.
- (d) Like (b), but 100 m spruce-fir forest.

However, planting rows of trees perpendicular to the sound source, a road or an industrial park, should be avoided, because of the possible sound amplification between the rows of the tree stems, as was found in the beech tree forest in the measuring transection B.

In town and landscape planning today it is often necessary to predict the expected sound pressure levels caused by traffic or industry. In the computer models used for such predictions mostly an attenuating factor can be established including the ground effect and the excess attenuation caused by the vegetation present along the (future) road, or around an industrial park<sup>27</sup>. The results presented in this paper may contribute to a better estimation of this attenuation factor and give, therefore, a more accurate prediction of the expected sound pressure levels.

#### ACKNOWLEDGEMENTS.

The author is much indebted to the Ministry of Public Health and Environmental Hygiene, Leidschendam, The Netherlands, for supporting this research; to Ir. F.J. van Tol and Ir. J.D. van der Toorn of the Technical Physical Services /TNO/TH, Delft; to Prof. Dr. H. Myncke, Catholic University at Leuven, Belgium for his critical reading of this paper; to the State Forests Services, Lelystad, for the consent to do the experiments in the forests in the Flevopolder and to the Nijmeegse Aeroclub, Malden, to do the experiments on the runway of the glider airport; to Prof. Dr. H.F. Linskens, head of the department of Botany, Nijmegen, for his stimulating interest; to Mr. J.A.M. van Huet, department of Technical Services of the Faculty of Sciences; to Mr. Roel Lauwerier, Jac Konings and Jos Olders for their co-operation during the experiments, and to Dr. G. Barendse for correcting the English text.

REFERENCES.

1. H.O. Kneser, The interpretation of the anomalous sound absorption in air and oxygen in terms of molecular absorption.  
J. Acoust. Soc. Amer.,5 (1933): 122.
2. V.O. Knudsen, Absorption of sound in air, in oxygen, and in nitrogen - Effects of humidity and temperature.  
J. Acoust. Soc. Amer.,5 (1933): 112.
3. V.O. Knudsen, The absorption of sound in gases.  
J. Acoust. Soc. Amer.,6 (1935): 199.
4. C.M. Harris, Absorption of sound in air in the audio-frequency range.  
J. Acoust. Soc. Amer.,35 (1963): 11.
5. C.M. Harris, Absorption of sound in air versus humidity and temperature.  
J. Acoust. Soc. Amer.,40 (1966): 148.
6. C.M. Harris, Normalized curve of molecular absorption versus humidity.  
J. Acoust. Soc. Amer.,57 (1975): 241.
7. T.F.W. Embleton, J.E. Piercy and N. Olson, Outdoor sound propagation over ground of finite impedance.  
J. Acoust. Soc. Amer.,59 (1976): 267.
8. T.F.W. Embleton, G.J. Thiessen and J.L. Piercy, Propagation in an inversion and reflections at the ground.  
J. Acoust. Soc. Amer.,59 (1976): 278.
9. J.E. Piercy, T.F.W. Embleton and L.C. Sutherland, Review of noise propagation in the atmosphere.  
J. Acoust. Soc. Amer.,61 (1977): 1403.
10. C.M. Harris, Handbook of Noise Control. McGraw-Hill, New York, 1957.
11. L.L. Beranek (ed.), Noise and Vibration Control. McGraw-Hill, New York, 1971.

12. A. Michelsen, Sound reception in different environments., in:  
M.A. Ali (ed.): Sensory Ecology, Plenum, New York, 1978,  
pp. 345-373.
13. R.H. Wiley and D.G. Richards, Physical constraints on acoustic  
communication in the atmosphere: implications for the evolution  
of animal vocalizations.  
Behavioural Ecology and Sociobiology, 3 (1978): 69.
14. H.F. Linskens, M.J.M. Martens, H.J.G.M. Hendriksen, A.M. Roostenberg  
-Sinnige, W.A.J.M. Brouwers, A.L.H.C. van der Staak and A.M.J.  
Strik-Jansen, The acoustic climate of plant communities.  
Oecologia (Berl.), 23 (1976): 165.
15. M.J.M. Martens and H.F. Linskens, Noise pollution and a botanical  
answer., in: Y. Vardar, Sheikh, K.H. and M.A. Oztürk (eds.):  
Proceedings third MPP-Meeting, Izmir, 1976, pp. 98-102.
16. M.J.M. Martens, The influence of the soil on the acoustic climate  
of plant communities., in: Rathe, E.J. (ed.): Proceedings  
Inter Noise 77, Zürich, 1977, pp. B593-B596.
17. M.J.M. Martens, Foliage as a low-pass filter. Experiments with  
model forests in an anechoic chamber.  
J. Acoust. Soc. Amer., 67 (1980): 66.
18. M.J.M. Martens and A. Michelsen, The absorption of acoustic energy  
by plant leaves. (Submitted for publication).  
J. Acoust. Soc. Amer.,
19. M.J.M. Martens, Geluid en Groen.  
Gemeentewerken, 6 (1977): 58 (in Dutch).
20. M.J.M. Martens, Sound attenuation of Dutch forests., in: Proceedings  
1<sup>o</sup> Simpósio Luso-Espanhol de Acústica ambiental, 1978, Lisboa.,  
2 (1979): pp. 4-VI-1 - 4-VI-11.

21. V. Westhoff en A.J. den Held, Plantengemeenschappen in Nederland.  
Thieme & Cie, Zutphen, 1969 (in Dutch).
22. D. van der Heij en P.K. Peerlkamp, Kennis van grond en bodem.  
Wolters, Groningen, 1961 (in Dutch).
23. G.A. Daigle, J.E. Piercy and T.F.W. Embleton, Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves near a hard boundary.  
J. Acoust. Soc. Amer., 64 (1978): 622.
24. International Organization for Standardization, Acoustics-Procedure for describing aircraft noise heard on the ground.  
ISO / DIS 3891, 1975.
25. J.G.B. Konings, Onderzoek naar de geluiddempende eigenschappen van diverse vegetaties., Doctoraalverslag, Afdeling Botanie I, Katholieke Universiteit, Nijmegen, 1979 (in Dutch).
26. J. Olders, Voortgezet onderzoek naar de geluiddempende eigenschappen van diverse vegetaties., Doctoraalverslag, Afdeling Botanie I, Katholieke Universiteit, Nijmegen, 1980 (in Dutch).
27. W.A. Oosting, Berekeningsmethode wegverkeerslawaai voor zoneringsdoeleinden., Rapport Interdepartementale Commissie Geluidhinder VL-HR-22-01, 's Gravenhage, 1977 (in Dutch).
28. G. Beck, Untersuchungen über Planungsgrundlagen für eine Lärmbekämpfung im Freiraum mit Experimenten zum artspezifischen Lärminderungsvermögen verschiedener Baum- und Straucharten., Dissertation, Universität, Berlin, 1965.
29. D. Aylor, Sound transmission through vegetation in relation to leaf area density, leafwidth and breadth of canopy.  
J. Acoust. Soc. Amer., 51 (1972): 411.

30. T.F.W. Embleton, Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods.  
J. Acoust. Soc. Amer., 35 (1963): 1119.
31. E.S. Morton, Ecological sources of selection on avian sounds.  
American Naturalist, 109 (1975): 17.
32. P.M. Waser and M.S. Waser, Experimental studies of primate vocalizations: specializations for long distance propagation.  
Zeitschrift für Tierpsychologie, 43 (1977): 239.
33. D.E. Carlson, O.H. McDaniel and G. Reethof, Noise control by forests.,  
in: J.E. Rathe (ed.): Proceedings Inter Noise 77, Zürich, 1977,  
pp. B576-B586.
34. T.F.W. Embleton, Scattering by an array of cylinders as a function of surface impedance.  
J. Acoust. Soc. Amer., 40 (1966): 667.
35. H. Bürner, Störschallminderung durch Schutzabstände, Böschungen oder Vegetationsbestände.  
Deutsche Gartenarchitektur, 2 (1963): 39.
36. F.J. Meister und W. Ruhrberg, Die Dämmung von Verkehrsgeräuschen durch Grünanlagen.  
Verein Deutsche Ingenieure-Zeitschrift, 101 (1959): 527.
37. J.D. van der Toorn, Geluiddemping door bossen., Rapport Interdepartementale Commissie Geluidhinder VI-HR-06-01, 's Gravenhage, 1975 (in Dutch).





Hoofdstuk / Chapter 5.

The influence of the soil on the acoustic climate  
of plant communities.

M.J.M. Martens

Department of Botany, Faculty of Sciences, Catholic University,  
Toernooiveld, Nijmegen, The Netherlands.

### Summary

Sound pressure level (SPL) spectra, measured in plant communities and over level fields are compared with a computer simulation model. For discrete reflection coefficients and phaseshifts the computed SPL are identical with field measured SPL over several frequency ranges. The reflection coefficient and the phaseshift are varied stepwise in the model. In this way, the acoustic impedance of different (vegetation-dependent) soils can be calculated.

### 1. Introduction

In noise pollution studies, several investigators have examined the usefulness of vegetation as either a noise barrier or an attenuating medium (Aylor, D., 1972; Haupt, R., 1973 and 1974). It has been suggested that the soil is one of the factors that influences the acoustic climate (Linskens, H.F., et al., 1976; Martens, M.J.M. and Linskens, H.F., 1976). Since every plant community has its own soil type, it is necessary to investigate the influence of these soil types on the behavior of sound waves. Field measured sound pressure level (SPL) spectra are here compared with a computer simulation model, that describes the pattern of interference over the soil surface.

<sup>\*</sup>slightly modified and improved from: E.J. Rathe (ed.), Proceedings Inter Noise 77, Zürich, 1977, pp. B 593-B 598.

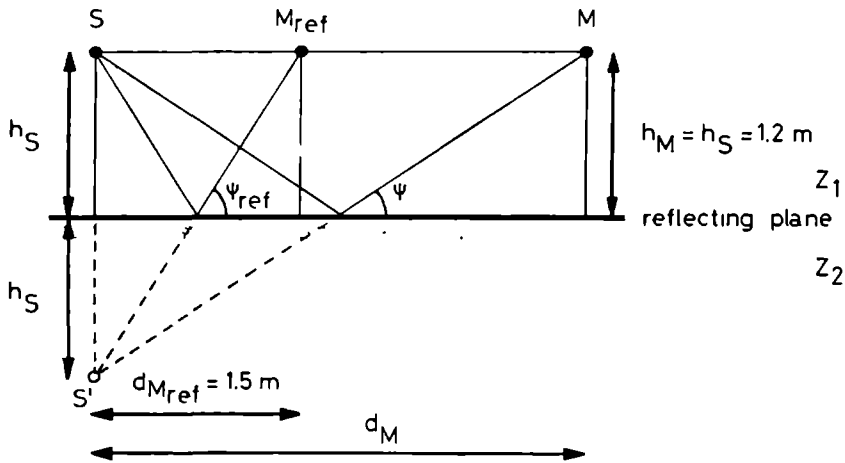


Figure 1. Situation of sound source (S) and microphones ( $M_{ref}$  and M) with respect to the soil surface.

## 2. Methods

### 2.1. Computer Simulation Model

As far as the interaction with sound is concerned, the soil surface can be considered as a reflecting medium. In the simulation, we studied the interferences between the sound waves that travel immediately from source to microphones through the air, and those that travel via the soil surface. This model is derived from a general case (Embleton, T.F.W., et al., 1976; Rudnick, I., 1947), and is shown in figure 1.

The SPL measured by  $M_{ref}$  and M are a summation of the pressures, caused by the direct and the reflected wave. The difference in pathlength in meters

between the waves is:  $D_M = \Delta_{d_M} = 2 \sqrt{h_S^2 + (\frac{1}{2}d_M)^2} - d_M$  meter.

We consider the soil surface as a reflecting medium with a reflection coefficient with magnitude R and phase  $\varphi$ . In the case when the sound pressure at the source is:  $p_S = A$  Pa, then the sound pressure at M is:

$$p_M = \frac{A}{d_M} \cos(\omega t - kd_M) + \frac{R \times A}{d_M + D_M} \cos(\omega t - k(d_M + D_M) + \varphi) \quad \text{Pa.}$$

This formula can be rewritten as:

$$p_M = A \sqrt{\frac{1}{d_M^2} + \frac{R^2}{(d_M + D_M)^2} + \frac{2R}{d_M(d_M + D_M)} \cos(-kd_M + \varphi)} \quad \text{Pa.}$$

But in our model a feedback system keeps the sound pressure at  $M_{ref}$  constantly at  $p_{M_{ref}} = A$  Pa. This is reached by varying the sound pressure at

the source according to:

$$p_S = \sqrt{\frac{A}{1.5^2 + \frac{R^2}{(1.5+D_{1.5})^2} + \frac{2R}{1.5(1.5+D_{1.5})} \cos(-kD_{1.5} + \varphi)}} \text{ Pa.}$$

Therefore  $p_{M_{ref}} = p_S \times \sqrt{\frac{1}{1.5^2 + \frac{R^2}{(1.5+D_{1.5})^2} + \frac{2R}{1.5(1.5+D_{1.5})} \cos(-kD_{1.5} + \varphi)}} \text{ Pa}$

and the sound pressure at M is:

$$p_M = p_S \times \sqrt{\frac{1}{d_M^2 + \frac{R^2}{(d_M+D_M)^2} + \frac{2R}{d_M(d_M+D_M)} \cos(-kD_M + \varphi)}} \text{ Pa}$$

resulting in a SPL at M of  $L_M = 20 \log p_M / p_0$  with  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa and with  $d_M = 1.5; 3; 6; 12; 24$  and  $48$  meters, so that the  $1/r$  - law is valid. We used the last formula in the simulation model. The parameters for the reflection coefficient R varied from 0 to +1, and the phaseshift from 0 to 2 rad.

## 2.2. Field Measurements

The sound emitting and measuring device was designed and built by the Department of Electronics of the Faculty of Sciences. It consists of the following units: a Philips loudspeaker no. AD4000M in a wooden box, which transmits a sine-form tone with frequency from 15 to 15 000 Hz, generated by a sweep generator; two linear Sennheiser no. MD211 microphones with wind-screens are used as a reference microphone ( $M_{ref}$ ) and a measuring microphone (M). The signals from both microphones pass a selective amplifier, the tuning frequency of which is the same as the transmitted frequency of the loudspeaker. The bandwidth is 50 Hz.

The SPL of the speaker is controlled in such a way, that the SPL at  $M_{ref}$  is at a constant, frequency-independent level. The measuring level, recorded on a Houston X-Y recorder no. 2000, is the difference in dB between the level of the two microphones.

The speaker and the microphones are placed on 1.2 m above the soil surface as is indicated in figure 1, and the distance between the speaker (S) and the reference microphone ( $M_{ref}$ ) is 1.5 m ( $d_{M_{ref}}$ ).

## 2.3. Weather

Windspeed was measured with a cup anemometer, and relative humidity and temperature with a ventilated wet-dry bulb psychrometer. Windspeed was less than  $4 \text{ ms}^{-1}$  and relative humidity more than 60 %.

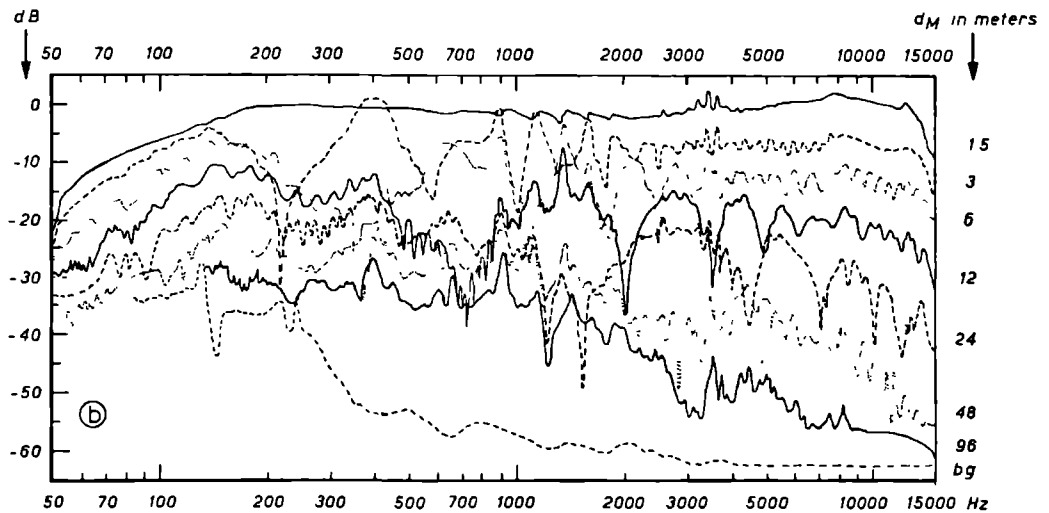
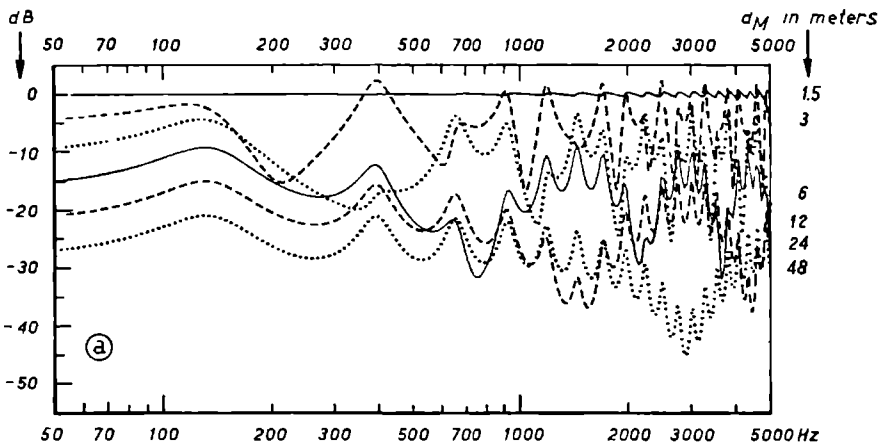


Figure 2.a and b. Sound pressure level (SPL) spectrum on several distances ( $d_M$ ) from the source:

2.a computed SPL with reflection coefficient of magnitude  $R = 0.75$  and phase shift  $\phi = 0$  rad.

2.b measured SPL over asphalt (bg. = background noise level).

### 3. Results

During 1975 and 1976 we determined the acoustic climate of 5 different field situations. These were an asphalt road; two level fields covered with grass not higher than 5 cm; a swampy field with a marshland vegetation with a mean height of 1 m; and a mixed deciduous wood with oak, birch, and ash-tree (up to 25 m high), a dense shrublayer and the soil covered by humic mould and herbs. We show an example of the acoustic climate over the asphalt road in figure 2.b, that can be compared with the computer simulation in figure 2.a.

Parts of the measured acoustic climates are in substantial agreement with parts of the computer simulations (table 1).

<u>Table 1</u>									
Reflection coefficient with magnitude R and phaseshift $\varphi$ of the simulations that best fit the measured SPL spectra over some soil surfaces for the given frequency ranges; $\varphi$ in radians; $d_M = 24$ m.									
Field situation	freq.(Hz)	R	$\varphi$	freq.(Hz)	R	$\varphi$	freq.(Hz)	R	$\varphi$
asphalt road	150-1000	0.75	0	1350-1550	0.75	0	2000-5500	0.5	0
grassfield (1)	200-300	0.75	0	300-900	0.75	$1.67\pi$	900-4000	0.5	$1.33\pi$
" (2)	410-720	0.75	$1.67\pi$	720-4000	0.5	$1.33\pi$	4000-5500	0.5	$\pi$
marshland	600-1800	0.5	$\pi$						
deciduous wood									
oct. 1975	600-4000	0.5	$\pi$						
oct. 1976	500-4000	0.5	$\pi$						

### 4. Discussion

To study the complex problem of the acoustic climate of plant communities, we have developed an indirect method to investigate the influence of the soil surface. The results show firstly, that the low SPL measured in the frequency range from 200 to 600 Hz is due to interference of the direct and reflected sound waves. The second conclusion is, that by comparing the measured and computed SPL, we can determine the reflection coefficient and the phaseshift. The reflection coefficient depends on the specific acoustic impedances of air and soil, according to the equation:

$$R = \frac{\sin \psi - Z_1/Z_2}{\sin \psi + Z_1/Z_2} \quad (\text{Embleton, T.F.W., et al., 1976})$$

Therefore it should be possible to calculate the acoustic impedances of the different soil surfaces in plant communities, when R and  $\psi$  are known from the computer simulation model. This possibility is now under investigation.

Acknowledgements. The author is much indebted to Prof. Dr. H.F. Linskens, Nijmegen, for his stimulating interest and discussions, Dr. J. Jackson, Nijmegen, for correcting the English text, Mr. J. A.M. van Huet of the Dept. of Technical Services of the Faculty for his continuous and skilful technical assistance, and to Mr. F. Broelsma, Nijmegen, for his co-operation.

### References

- Aylor, D.(1972): Noise reduction by vegetation and ground. J. Acoust. Soc. Amer. 51, 197-205.
- Embleton, T.F.W., Piercy, J.E. and Olson, N.(1976): Outdoor sound propagation over ground of finite impedance. J. Acoust. Soc. Amer. 59, 267-277.
- Haupt, R.(1973): Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 1. Teil: Methodische Grundlagen. Arch. Naturschutz Landschaftsforsch. 13, 309-327.
- Haupt, R.(1974): Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 2. Teil: Die Ergebnisse und ihre Anwendungsmöglichkeiten. Arch. Naturschutz Landschaftsforsch. 14, 61-75.
- Linskens, H.F., Martens, M.J.M., Hendriksen, H.J.G.M., Roestenberg-Sinnige, A.M., Brouwers, W.A.J.M., Staak, A.L.H.C. van der, and Strik-Jansen, A. M.J.(1976): The acoustic climate of plant communities. Oecologia (Berl.) 23, 165-177.
- Martens, M.J.M. and Linskens, H.F.(1976): Noise pollution and a botanical answer. In: Vardar, Y., Sheikh, K.H. and Öztürk, M.A. (eds.): Proceedings of the third MPP meeting, Izmir, 1975; pp. 98-102.
- Rudnick, I.(1947): The propagation of an acoustic wave along a boundary. J. Acoust. Soc. Amer. 19, 348-356.





Hoofdstuk / Chapter 6.

Foliage as a low-pass filter.

Experiments with model forests in an anechoic chamber.

overdruk uit: J. Acoust. Soc. Am. 67(1980): 66-72.

FOLIAGE AS A LOW-PASS FILTER: EXPERIMENTS WITH MODEL FORESTS  
IN AN ANECHOIC CHAMBER.

Maurice J.M. Martens,  
Department of Botany,  
Section Experimental Ecology,  
Catholic University,  
Toernooiveld,  
6525 ED Nijmegen,  
The Netherlands.

J. Acoust. Soc. Am. 67, 66-72 (1980)

(Received 6 June 1979; accepted for publication 5 September 1979)

## SUMMARY.

In order to investigate the influence of foliage on sound transmission through vegetation, we have examined four model forest situations in an anechoic chamber. In general, we found that the foliage acts in the midfrequencies as a noise amplifier, which is important for the vocalization and communication of animals. In the high frequencies the foliage of the plants acts as a good noise filter. The acoustic properties of this filter are determined by the plant species, and depend mainly on the maximum size of the plant organs. A clear correlation is found between the maximum size of the plant leaves and the frequency, from which the filtering capacity of the plants starts. Also, a correlation could be detected between the total biomass of a specific plant species and the noise "attenuation" in the  $1/3$  - octave bands that are examined. The total noise attenuation caused by the vegetation depends on the spectrum of the noise: the sound pressure level of a noise spectrum with high levels in the high frequencies will be decreased by the plant foliage but the traffic noise spectrum will be changed only in pitch. We conclude that this filtering property of plant communities could be useful in noise abatement.

PACS numbers: 43.28.Fp, 43.50.Vt

## 1. INTRODUCTION.

The acoustic climate of plant communities is an important factor in noise abatement problems, and in addition, this physical property of the biological environment gathers, now, more attention than ever from ecologists because of the possible biological constraints about the evolution of animal communication.

In outdoor noise propagation much attention has been given to the influence on the noise pattern caused by the soil surface as a boundary layer<sup>1</sup> and to the atmospheric absorption of noise.<sup>2,3</sup> However, to understand the propagation and the transmission of noise and sound in plant communities, which is important in animal communication on the one hand,<sup>4-10</sup> and in noise abatement and in town and landscape planning on the other,<sup>11-19</sup> it is necessary to understand the complete acoustic climate of a plant community.<sup>20,21</sup> The influence of the particular soil surface on the sound propagation<sup>22-24</sup> and of the overground plant organs like stems, branches, twigs, and foliage on the sound field in the vegetation are equally important.

Some detailed work has been carried out by Embleton,<sup>25</sup> who gives a theoretical treatment of the influence on the sound field, caused by trunks and stems of trees, which can be thought to be cylindrical structures with a surface impedance. Beck<sup>26</sup> measured the sound attenuation of plant leaves of different plant species, by picking the leaves from the plants and glueing these leaves in a square framework with nylon fibers, overlapping each other like roof tiles. In nature, however, almost no plant species has such an arrangement of the leaves, so these experiments seem rather artificial.

Aylor<sup>27,28</sup> surveyed the influence on the sound field of the canopy of the perennial reed, Phragmites communis L., and of corn, Zea mays L., in situ. He finds an increasing excess attenuation with increasing frequency, and he offers a plot to calculate the excess attenuation when the parameters -leaf area density, breadth of vegetation, and the leaf width- are known. He used in his experiments only monocotyledonous plants, of which the dimensions of the leaves have an extreme length-width ratio. Moreover, these plant species are rather impracticable in town planning because of their reduced aesthetic value and their demands for water and agricultural treatment during growth.

To obtain a good understanding of the influence of the leaf canopy on noise propagation and transmission through plant communities, either natural or cultural, it will be useful to investigate this phenomenon in a well conditioned situation, with the foliage attached at the plants as it occurs in nature.

Here we present the results of experiments, carried out with four model forests. Three models consisted of three different plant species in turn, and the fourth model forest consisted of a mixture of tropical plant species. The experiments have been carried out in an anechoic chamber, since this offers an ideal simulation of the outdoor situation with an undisturbed atmosphere and a measurable "ground effect". Therefore, it is possible to correct the results for this ground effect, so that a net influence on the sound field caused by the plant canopies will be obtained. The results can be extrapolated to the outdoor situation in a plant community and can explain part of the findings earlier described.<sup>20,21</sup>

## 2. MATERIALS AND METHODS.

### 2.1 Vegetation.

The following plants were planted in earthenware pots and grown in the Botanical Garden of the Nijmegen University: 46 Birch trees (Betula spec. L. Betulaceae), 25 hazeltrees (Corylus avellana L. Corylaceae), and 12 privets (Ligustrum vulgare L. Oleaceae). Also a mixed tropical vegetation of different species, comprising Ardisia crispa (Thbg) DC. (Myrsinaceae) 3x, Bixa orellana L. (Bixaceae) 3x, Carica papaya L. (Caricaceae) 1x, Cassia glauca Lam. (Papilionaceae) 1x, Coffea arabica L. (Rubiaceae) 4x, Delonix regia (Bojer ex Hook.) Raf. (Papilionaceae) 2x, Gardenia jasminoides Ellis (Rubiaceae) 1x, Homalocladium platycladum (F. Muall.) Bail. (Polygonaceae) 1x, Leea aculeata Royen (Vitaceae) 1x, Musa ensete Gm. (Musaceae) 2x, Parkia javanica R. Br. (Papilionaceae) 3x, Pavonia sepium Cav. (Malvaceae) 2x, Solanum torvum Buch.-Ham. ex Wall. (Solanaceae) 1x, and Spathodea campanulata Buch.-Ham. ex DC (Bignoneae) 1x, was included.

White noise is generated and transmitted through the model forests in the anechoic chamber with a working area of  $4.5 \times 4.5 \text{ m}^2$ . These model forests comprised (letters a to g correspond with the letters in the Figs. 1, 2, 4, and 5)

(a) 46 pots filled with soil only and the plants sawn down, in order to determine their influence on the noise field in the anechoic chamber; this experiment has been repeated as a blank for all model forests with 25, 26, and 12 flowerpots, i.e., the pots in which the plants were grown;

(b) 46 pots with the soil and the defoliated stems, branches, and

twigs of the birch trees, with a diameter of the stems of 8 to 20 mm (mean value  $15 \pm 3$  mm);

(c) 46 birch trees in pots, half of the plants defoliated, maximum height 2 m;

(d) 46 fully foliated birch trees with a total fresh biomass of 8.4 kg and a water content of 60 %; dimensions of the leaves: length equal or less than 70 mm, width equal or less than 60 mm;

(e) 25 hazel trees, with a maximum height of 1.10 m, and a total fresh biomass of 3.6 kg, and a water content of 50 %; dimensions of the leaves: length equal or less than 130 mm, and width equal or less than 115 mm;

(f) 26 tropical plants, partly planted in plastic flowerpots or in earthenware flowerpots with a maximum height of 2.30 m, a total fresh biomass of 11.5 kg, and a water content of 75 %; the dimensions of the leaves varied from very small (Parkia javanica L., 20 x 5 mm) to large (Musa ensete Gm., banana tree, 750 x 350 mm);

(g) 12 privets in earthenware pots with a maximum height of 0.85 m, a total fresh biomass of 2.5 kg, and a water content of 60 %; the dimensions of the leaves: equal or less than 40 mm in length, and equal or less than 20 mm in width.

One hour before starting an experiment all plants were supplied with fresh water. During the experiments the anechoic chamber was illuminated, and the change in temperature and relative humidity in the room were monitored with a dry-wet bulb Assmann psychrometer. The temperature in the anechoic chamber varied during all experiments, the control experiments included, from 21.0° to 22.4 °C, and the relative humidity varied between 55 % and 62 %. Immediately after the experiments the plant material was gathered in plastic bags for

the determination of the fresh and dried biomass with a Berkel balance. The plant material is dried at 105 °C, and the percent water content is calculated on the fresh biomass basis.

## 2.2 Acoustics.

The noise generating system comprised a Sennheiser MZL 400 white noise generator, a 1/1 - octave filterset in the linear position (put at the disposal by the Technical Physical Services of TNO/Technical University Delft), a variable preamplifier, a Quad 303 stereo amplifier with one channel in use, and a series resistor, 0.2 ohm, connected to a Philips digital multimeter PM 2513 A in order to determine the value of the current passing a Dynacord D 310 speakerbox with the high noise tweeter switched out to avoid an interference pattern between the tweeter and the low noise woofer; this speaker was placed in the anechoic chamber. The noise spectrum, generated in the anechoic chamber at 6.0 m, is shown in figure 3. The noise analyzing system comprised two GenRad 1961-9601 1-in. electret microphones attached on GenRad 1560-P 42 preamplifiers fixed on microphone supports, a switchbox to be able to analyze the signal resulting from either microphone in the anechoic chamber, a GenRad 1933 sound level meter and analyzer, a Brüel & Kjaer 1616 1/3 - octave filterset, and a Brüel & Kjaer 2306 level recorder. This analyzing system was verified before, during, and after the experiments with a GenRad 1562-A sound level calibrator. The deviations were less than 0.5 dB.

The Philips multimeter indicated during all experiments 4.0 - 4.2, resulting in a sound pressure level of the white noise of 104.5 ± 0.5 dB re  $2 \times 10^{-5}$  Pa at 1.5 m in front of the woofer during



TABLE I. Comparison of plant parameters with the sound pressure levels measured in the anechoic chamber at 6.0 m, and the "attenuation" curves of Fig. 1.

Plant species	Number of plants	Total biomass in kg	Total SPL at 6.0 m in dB			$\Delta$ SPL for the used spectrum (attenuation)	Graphic drop kHz	Maximum size of plant organs in mm
			Empty room	Flowerpots only	Plants foliated			
Birch trees	46	8.4	94.0	93.0	92.8	-0.2	2-4	70
Tropical plants	26	11.5	95.0	94.7	92.0	-2.7	1-1.25	various
Hazeltrees	25	3.6	96.0	95.0	94.1	-0.9	2-2.5	130
Privets	12	2.5	96.0	94.8	96.0	+1.2	5-6.4	40
Birch trees	46	5.9	94.0	93.0	93.0	0.0	8-10	20

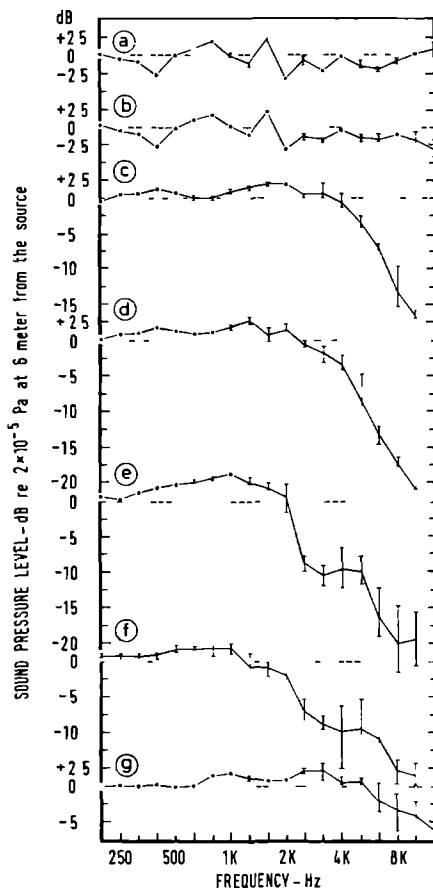
all measurements. The experiments were carried out over a diagonal track in the anechoic chamber with one microphone at 1.5 m and the other microphone at 6.0 m in front of the center of the woofer. The plants formed model forests of length 4.5 m and width 1.0 m between the two microphones. The height of the center of the woofer and of the microphones over the grate was 0.89 m during the experiments with the birch trees and the tropical plants and their controls; 0.6 m during the experiments with the hazeltrees and their flowerpots; and 0.41 m for the privets and their control measurements. To obtain useful and accurate results, all samples were measured three times, and in between these measurements the pots with or without the plants were displaced. The model forests were constructed in the free-field area of the speaker.

The excess attenuation has not been corrected for atmospheric absorption, since at temperatures between 21.0° and 22.4 °C and a relative humidity between 55 % and 62 %, the total atmospheric absorption over a 6.0 m distance between source and microphone is at 10 kHz: 0.5 dB.<sup>29</sup> Therefore it seems allowable to neglect the atmospheric absorption in these results.

FIG. 1. Influence of 46 earthenware flowerpots on the noise field in the anechoic chamber;

(a) birch trees, all sawn down, (b) all birch trees fully defoliated, stems, branches and twigs present. Net influence of leaves, stems, branches, and twigs on the noise field in the anechoic chamber; (c) 46 birch trees of which 23 are defoliated, the others foliated, (d) 46 fully foliated birch trees, (e) 25 fully foliated hazeltrees, (f) 26 fully

foliated tropical plants of different species, (g) 12 fully foliated privets. The broken lines at 0 dB indicate: in (a) and (b) the noise field as it is generated by the sound source in the empty anechoic chamber at 6.0 m and put at 0 dB (the real spectrum is shown in Fig. 3); in (c) to (g) the noise field generated in the anechoic chamber, when filled with the total number of empty flowerpots and with the trees sawn down, respectively. A dot in the curves indicates that the values of the sound pressure levels of three measurements were identical within 0.5 dB, and a vertical bar indicates the spreading of three measured values.



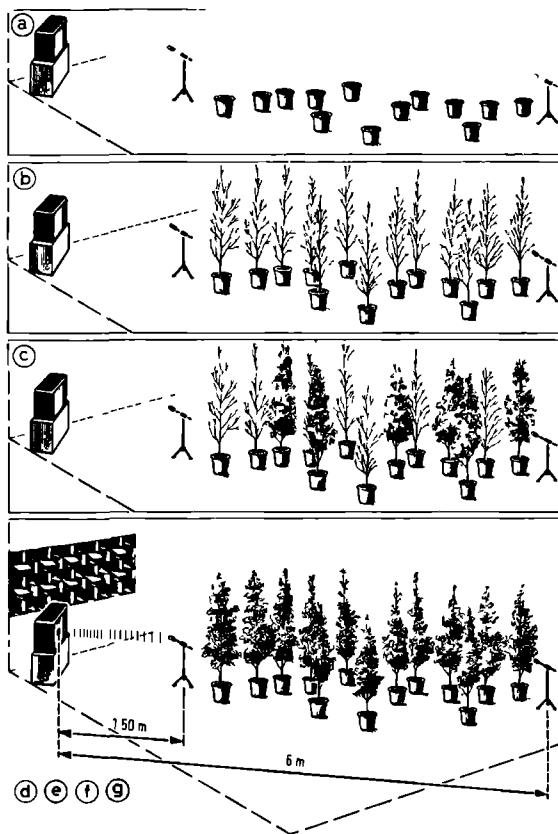


FIG. 2. Schematic view of the experimental arrangement in the anechoic chamber, corresponding to the curves of Fig. 1.

### 3. RESULTS.

Table I and Fig. 1 summarize the results of the measurements on the noise propagation and transmission through the canopies of some plant species in the anechoic chamber. Figure 2 offers the corresponding schematic views of the actual situations in the chamber during these experiments. The  $1/3$  - octave bands with center frequencies less than 200 Hz gave the same sound pressure levels within 0.5 dB during all experiments and in all situations, as in the control experiments with only the speaker and the microphones present in the chamber; therefore, we omitted in Fig. 1 the frequencies less than 200 Hz.

The real frequency spectrum of the sound source at 6.0 m is shown in Fig. 3. However, in Figs. 1a and 1b we consider this frequency spectrum to be 0 dB re  $2 \times 10^{-5}$  Pa during the control experiments at 6.0 m in front of the woofer in the empty anechoic chamber in order to show the actual effects on the sound field, as is caused by the experimental arrangements. Then the curves in Figs. 1a and 1 b represent the net influence on the noise field that is caused by the 46 buckets, filled with soil and the root system only, and the same pots with the defoliated birch trees. It is evident that an interference pattern is built up between the direct sound waves from the woofer to the microphone at 6.0 m and those that are reflected by the flowerpots. It should be mentioned here that we found these kinds of interference patterns in all experiments with flowerpots only and pots with plants. The reason that they differed slightly from each other is because of the different numbers of buckets (46, 25, 26, and 12), their different shapes, and the

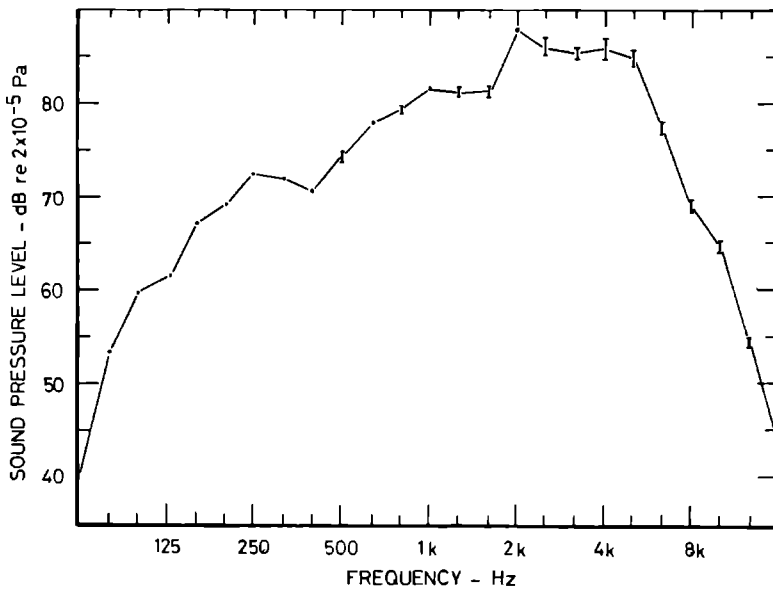


FIG. 3. The 1/3 - octave band measured noise spectrum of the Dynacord D 310 speakerbox at 6.0 m in the anechoic chamber. This spectrum is the mean spectrum as it is recorded before and after the measurements with the plants.

height of the speaker and the microphones over the grate ( 0.89, 0.6, 0.89, and 0.41 m, respectively). As could be expected, these patterns of interference are quite similar with those that can be measured over soil surfaces.<sup>1,22</sup> Since these patterns can be well reproduced in the experiments, we are allowed to eliminate these measurable "ground effect" results from the measurements with the intact plants.

When comparing Fig. 1a and 1b, it is evident that up to 8 kHz no difference can be detected, whether the birch tree stems and twigs are present or absent, since these results do not differ by

more than 0.5 dB. The data in Table I confirm this conclusion, because no  $\Delta$  total SPL is detectable; it should be noted, however, that a graphic drop is visible in Fig. 1b at 8-10 kHz, which is compatible with the dimensions of the birch tree stems.

Since we are allowed to eliminate the ground effect, as outlined above, the net influence of the leaves, twigs, and stems of the surveyed plant species on the noise field is shown in the curves 1c to 1g, and a general pattern is evident. Some amplification of the noise is measured in the midfrequencies up to a certain frequency, where a graphic drop is to be found, and from that frequency an "excess attenuation" is detectable. This excess attenuation increases with increasing frequency. The total attenuation, caused by the biomass present between the two microphones, is also measured, and these data are offered in Table I, together with some other relevant plant parameters. One can explain why no significant relation is found between the biomass of the plant material and the  $\Delta$  total SPL, if one keeps in mind that this total attenuation is measured with the broadband noise spectrum, that is shown in Fig. 3. Only the mixed tropical plant forest reduces the total noise level, since these plants attenuate part of the 2 kHz peak level in the used spectrum.

A good relation, however, exists between the excess attenuation in the  $1/3$  - octave bands and the plant parameters biomass and maximum dimension of the plant leaves. This relation is shown in Fig. 4, and the results suggest a species specific relation because, for the three surveyed plant species, three different linear curves are found; for the mixed tropical plants a near linear relation is evident. Good agreement seems to exist also when the parameter

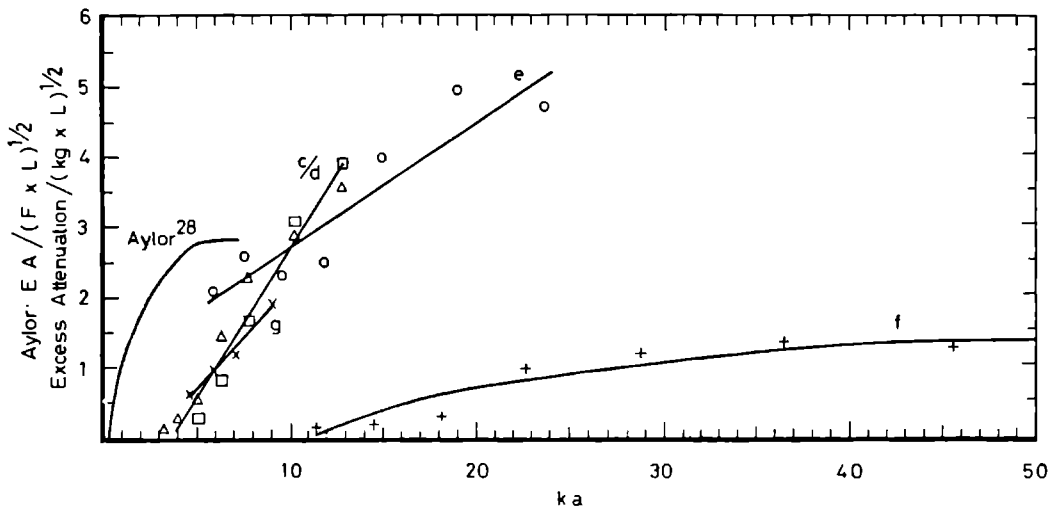


FIG. 4. Relation between excess attenuation, biomass of the plants in kg, length of model forest ( $L=4.5$  m), maximum dimension of leaves in cm,  $a$ , and wavenumber ( $k=2\pi$  divided by the wavelength). Curve c/d for the birch trees, e for the hazeltrees, f for the tropical plants, and g for the privets. For comparison Aylor's curve<sup>28</sup> is given; note that Aylor used the leaf area density ( $F$ ), instead of the plant biomass.

biomass is varied, since curve c/d offers the combined results of the two birch tree experiments, where in experiment c the biomass of the plants is half that of the biomass in experiment d. A good agreement is also found between the maximum size of the plant organs of the examined species and the frequencies, where the graphic drop begins. The wavelengths of these frequencies are compatible with the sizes of the plant leaves and stems, since the maximum dimension of the plant organs is lying between  $\frac{1}{2}\lambda$  and  $\lambda$ .

#### 4. DISCUSSION.

Considering the results described in the Figs. 1 and 2, and in Table I, it is evident that the canopy of vegetation has a detectable influence on the noise field, that is generated by a source, at least in the frequency range starting at 200 Hz and up to 12.5 kHz. In our experiments it was not possible to prove whether the sound energy in the high frequencies is absorbed, and so transformed in heat. But it can be concluded, that the leaf canopy interferes with the noise energy at least by scattering, refracting, and diffracting the sound waves.

It can be concluded from Fig. 1, that plant canopies can act as a kind of sound amplifier in the midfrequencies: 200 Hz-3.2 kHz for birch trees, 200 Hz-2 kHz for hazeltrees, 200 Hz-1 kHz for tropical plants, and 640 Hz-5 kHz for privets. As these frequencies differ from one plant species to another, this property of vegetation can be very important as an evolutionary environmental factor in the development of communication and vocalization of animals living in vegetative habitats.<sup>4-9</sup> This is especially so in the temperate regions, where in deciduous forests the plant leaves are on plants during the summer season. This sound amplifying capacity of the plant canopy may explain the differences in the acoustic climate that we found in earlier experiments in eight different vegetations in summer and winter.<sup>20,21</sup>

Embleton<sup>12</sup> measured sound amplification between 500 and 1250 Hz over the first 15 m in different woods, the edge effect included, and he explains part of this amplification as a resonance of the branches of the trees. He measured the oscillations of branches,



1.2 to 1.8 m long, and found a resonance between 275 and 400 Hz. The stems of our plants were equally long as the branches Embleton examined. We found that this might be an explanation for the amplification. However, in the experiments with the birch tree stems only, no amplification is found (Fig. 1b). Aylor<sup>27</sup> explains the negative attenuation, that has been measured by Embleton, in terms of the ground attenuation. In our experiments the ground effect has been ruled out, so the amplification we measured can not be explained as a ground effect. Another possible explanation may be the transformation of sound energy, but this explanation needs more research.

From Fig 1 it is also evident that plant leaves, and therefore whole plants, can be used as low-pass noise filter, although the exact mechanism of filtering is not yet understood. One can use this biological filter in town and landscape planning situations to change the pitch of the noise and also to reduce the total sound pressure level of, for example, traffic or industrial noise. Figure 5a shows a standard traffic noise spectrum as is used at present in The Netherlands.<sup>30</sup> Figure 5d-g shows how this spectrum could have been changed by our model forests, when used as the sound spectrum in the experiments described herein. It can be concluded that the total SPL caused by traffic noise is not lowered by our model forests, since the model forests do not reduce the sound pressure level in the  $1/3$  - octave band of 400 Hz; the noise energy in this  $1/3$  - octave band determines the total SPL. The pitch however can be changed markedly because of the fact that the model forests reduce the SPL in the high frequencies dramatically. However, when using a noise spectrum that shows high sound pressure levels in the

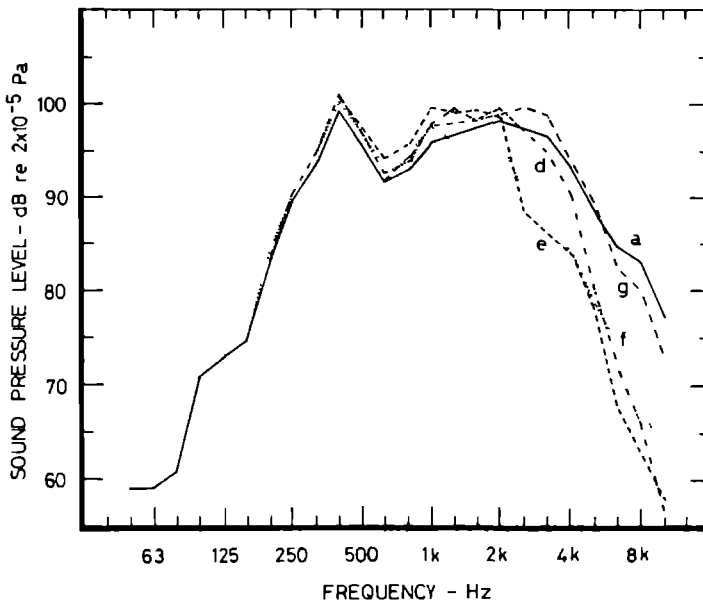


FIG. 5. Standard traffic noise spectrum used in The Netherlands<sup>30</sup> (curve a), and how this spectrum can be changed by the foliage of different plant species: d spectrum with fully foliated birch trees, e hazeltrees, f tropical plants, and g privets.

highfrequency range, the total SPL can be reduced severely by the filtering foliage. This phenomenon is shown very clearly in the thesis of Beck.<sup>26</sup> Regarding his results, the importance of the noise spectrum that is used in the experiments is undeniable. The fact that the spectrum, which is generated by his equipment, shows very high sound pressure levels in the frequencies over 1000 Hz, when compared to the other low-pitch frequencies,<sup>31</sup> causes Beck to claim that plant leaves have a high attenuation capacity. He offers a very simple formula to calculate the excess attenuation from the leaf surface:  $\Delta L = f/10$  dB, where  $f$  means the leaf surface in  $\text{cm}^2$ .

This formula can be used, in his opinion, up to a surface area of  $40 \text{ cm}^2$ ; deviations in his relation occur when the leaf surface exceeds the given value of  $40 \text{ cm}^2$ . His conclusion about the total  $\Delta L$  values,<sup>32</sup> should be criticized, since he neglects the noise spectrum in his conclusion. This can be confirmed by comparing his total  $\Delta L$  data and the  $\Delta$  total SPL values offered in Table I. Nevertheless, the "attenuation" curves of several plant species<sup>33</sup> show good agreement with the results that are found in our experiments and that are shown in Fig. 1. One should note that Beck arranged the plant leaves in a square frame perpendicular to the sound path, so that his data will be the result of reflection of the sound waves, rather than by attenuation. This effect is not checked in his survey. By using a reference microphone at 1.5 m in front of the woofer where our model forests begin, we were able to check that no measurable backscattering and reflection of noise energy occurred, since the SPL at 1.5 m was constant, 104.5 dB, in all our experiments. So it can be concluded that the noise level reducing capacity of plant leaves is not caused by reflecting the noise waves back against the plant "wall." We made an attempt to correlate some plant parameters, such as biomass, maximum dimension of the surveyed plant organs, and the depth of the model forests, with the excess attenuation in the different  $1/3$  - octave bands. Fig. 4 seems to show a species specific sound attenuating capacity. No definite explanation can be given at the moment for curve 4f, which represents the relation for the mixed tropical model forest. The fact that no linear relation is found might be caused by the various dimensions of the plant leaves of the different plant species of which this model forest consisted. This hypothesis has to be

surveyed yet, and to offer a more definite conclusion about this relation between plant parameters and acoustic properties, more species have to be examined.

Another useful suggestion is given by Aylor,<sup>27,28</sup> who investigated two monocotyledonous plant species on the sound attenuating capacity of the leaf canopies. His conclusion is presented in a plot,<sup>34</sup> that suggests a clear and simple relation between some plant parameters and the measured excess attenuation in the measured frequency bands. He used, instead of the parameter biomass, the parameter leaf area density. This parameter is less useful for dicotyledonous plant species, which we have used in our experiments, but it is now under consideration for use in future experiments, and it can be expected that the results will be much more consistent between different species. However, when using the parameter leaf area density, the biomass of the stems, branches, and twigs will be neglected. But in experiments with dicotyledonous plants, the wooden parts of the plants are a major part of the total biomass, since the leaves are but the smaller fraction (see, for example, the birch trees in Table I). The monocotyledonous plants, that Aylor used in his experiments, consisted mostly of leaves. To compare the results of the present investigation to that of Aylor, we show also his plot in Fig. 4. It should be noted, however, that one parameter has been changed in order to make the comparison. The results of Aylor and the present results differ markedly.

## ACKNOWLEDGMENTS.

The author is much indebted to Prof. Dr. H.F. Linskens, head of the Department of Botany, Nijmegen, for his stimulating interest in our work; to Mr. J.A.M. van Huet, Department of Technical Services of the Faculty of Sciences, for his skilful and continuous technical assistance; to Mr. W.H.T. Huisman for his cooperation during the experiments; to Mr. A.G.N.M. Ploegmakers, Ph.D., Technical University Twente, for the consent to do our experiments in the anechoic chamber of the T.U. Twente; to Mr. J. Muller, T.U. Twente, for his helpful assistance and his cooperation; to Mr. G.J. Kuiperij and his colleagues, T.U. Twente for tending the plants during spring and summer 1978 in the market garden of the T.U. Twente; and to Dr. J. Jackson for correcting the English text. The experiments are partly granted by the Ministerie van Volksgezondheid & Milieuhygiëne, Leidschendam, The Netherlands.

## REFERENCES.

1. T.F.W. Embleton, J.E. Piercy, and N. Olson, "Outdoor Sound Propagation over Ground of Finite Impedance," *J. Acoust. Soc. Am.* 59, 267-277 (1976).
2. G.A. Daigle, J.E. Piercy, and T.F.W. Embleton, "Effects of Atmospheric Turbulence on the Interference of Sound Waves near a hard Boundary," *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 622-630 (1978).
3. J.E. Piercy, T.F.W. Embleton, and L.C. Sutherland, "Review of Noise Propagation in the Atmosphere," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 1403-1418 (1977).
4. C. Chapuis, "Un Exemple de l'Influence du Milieu sur les Emissions Vocales des Oiseaux: l'Evolution des Chants en Foret Equatoriale," *Terre et Vie* 25, 183-202 (1971).
5. K. Marten and P. Marler, "Sound Transmission and its Significance for Animal Vocalization, I. Temperate Habitats," *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2, 271-290 (1977).
6. K. Marten, D. Quine and P. Marler, "Sound Transmission and its Significance for Animal Vocalization, II. Tropical Forests Habitats," *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2, 291-302 (1977).
7. A. Michelsen, "Sound Reception in different Environments," in Sensory Ecology, edited by M.A. Ali (Plenum, New York, 1978), pp. 345-373.
8. E. Morton, "Ecological Sources of Selection on Avian Sounds," *Am. Naturalist* 109, 17-34 (1975).
9. R.H. Wiley and D.G. Richards, "Physical Constraints on Acoustic Communication in the Atmosphere: Implications for the Evolution of Animal Vocalizations," *Behav. Ecol. Sociobiol.* 3, 69-94 (1978).
10. P.M. Waser, "Sound Localization by Monkeys. A Field Experiment," *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2, 427-431 (1977).

11. C.F. Eyring, "Jungle Acoustics," J. Acoust. Soc. Am. 18, 257-273 (1946).
12. T.F.W. Embleton, "Sound Propagation in Homogeneous Deciduous and Evergreen Woods," J. Acoust. Soc. Am. 35, 1119-1125 (1963).
13. R. Haupt, "Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 1. Teil: Methodische Grundlagen," Arch. Naturschutz Landschaftsforsch. 13, 309-327 (1973).
14. R. Haupt, "Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 2. Teil: Die Ergebnisse und ihre Anwendungsmöglichkeiten," Arch. Naturschutz Landschaftsforsch. 14, 61-75 (1974).
15. M.J.M. Martens, "Sound Attenuation of Dutch Forests," Proc. 1<sup>o</sup> Simpósio Luso-Espanhol de Acústica Ambiental, Lisboa, 1978 (in press).
16. M.J.M. Martens, "Geluid en Groen," Gemeentewerken 6, 58-63 (1977) (in Dutch).
17. H. Mattern und G. Beck, Pflanzen als Mittel zur Lärmbekämpfung, (Patzner-Verlag, Berlin, 1966).
18. F.J. Meister und W. Ruhrberg, "Der Einfluss von Grünanlagen auf den Verkehrsgeräusch-Pegel. Schallabsorption durch Baum- und Heckenanpflanzungen," VDI-Z. 97, 1063-1067 (1955).
19. G. Mitscherlich und D. Schölzke, "Schalldämmung durch Wald," Allg. Forst Jagdztg. 148, 125-143 (1977).
20. H.F. Linskens, M.J.M. Martens, H.J.G.M. Hendriksen, A.M. Roestenberg-Sinnige, W.A.J.M. Brouwers, A.L.H.C. van der Staak, and A.M. J. Strik-Jansen, "The Acoustic Climate of Plant Communities," Oecologia (Berlin) 23, 165-177 (1976).
21. M.J.M. Martens and H.F. Linskens, "Noise Pollution and a Botanical Answer," Proc. Third MPP-Meeting, Izmir (1976), pp. 98-102.

22. M.J.M. Martens, "The Influence of the Soil on the Acoustic Climate of Plant Communities," Proc. InterNoise 77, Zürich (1977), pp. B593-B598.
23. A. Moerkerken, "De Invloed van Grondabsorptie op de Geluidvoortplanting boven een Bodem," ICG-rapport VL-DR-21-02, Den Haag (1975) (in Dutch).
24. K. Attenborough, "Attenuation of Noise over Absorbing Terrain," Proc. InterNoise 78, San Francisco (1978), pp. 491-496.
25. T.F.W. Embleton, "Scattering by an Array of Cylinders as a Function of Surface Impedance," J. Acoust. Soc. Am. 40, 667-670 (1966).
26. G. Beek, "Untersuchungen über Planungsgrundlagen für eine Lärm-bekämpfung im Freiraum mit Experimenten zum artspezifischen Lärm-minderungsvermögen verschiedener Baum- und Straucharten," Dissertation, Universität, Berlin, 1965.
27. D. Aylor, "Noise Reduction by Vegetation and Ground," J. Acoust. Soc. Am. 51, 197-205 (1972).
28. D. Aylor, "Sound Transmission through Vegetation in Relation to Leaf Area Density, Leaf Width and Breadth of Canopy," J. Acoust. Soc. Am. 51, 411-414 (1972).
29. International Organization for Standardization: Acoustics-Procedure for describing aircraft noise heard on the ground. ISO/DIS 3891, p. 19, Tables 7 and 8 (1975).
30. W.A. Oosting, "Berekeningsmethode wegverkeerslawaai voor zone-ringsdoeleinden," Rapport Interdepartement. Commissie Geluidhinder VL-HR-22-01, 's Gravenhage, The Hague (1977) (in Dutch).
31. Reference 26, Fig. 128.
32. Reference 26, p. 225.
33. Reference 26, Fig. 130/1 and 130/2.
34. Reference 28, Fig.3.



Hoofdstuk / Chapter 7. The absorption of acoustic  
energy by plant leaves.

overdruk uit: J. Acoust. Soc. Am. 68 (1980).

ABSORPTION OF ACOUSTIC ENERGY BY PLANT LEAVES.

Maurice J. M. Martens,  
Section Experimental Ecology,  
Department of Botany,  
Catholic University,  
6525 ED Nijmegen,  
The Netherlands,

and

Axel Michelsen,  
Institute of Biology,  
Odense University,  
DK 5230 Odense M,  
Denmark.

J. Acoust. Soc. Am. 68 (1980).

(Received 6 May 1980; accepted for publication 22 July 1980)

## SUMMARY.

We investigated the vibration of leaves of four plant species in a sound field using a laser-Doppler-vibrometer system. All leaves behave as linear mechanical systems when driven by sound and noise at sound pressure levels (SPL) of up to 100 dB re 20  $\mu$ Pa. The modes of vibration are complex in the investigated frequencies (0.5 - 5.5 kHz), and change with the orientation of the leaf in the sound field. The vibration velocities of the leaves varied between  $10^{-5}$  and  $3 \times 10^{-4}$  m/s, while the vibration velocity of the air particles is  $5 \times 10^{-3}$  m/s at 100 dB SPL. Although the amount of sound energy absorbed in this way by a single leaf is very small, this mechanism may anyhow contribute to sound attenuation by plants and plant communities, since the number of leaves of one fullgrown tree equals  $2 \times 10^5$ .

PACS numbers: 43.80.Gx

## 1. INTRODUCTION.

The acoustic properties of the environment are important with regard to noise pollution problems and noise abatement<sup>1-8</sup>, and for the understanding of sound communication by animals<sup>9-12</sup>. Vegetation is a complex medium consisting of air, soil, and the stems, trunks, branches, and foliage of herbs, shrubs, and trees. Despite both theoretical<sup>13, 14</sup> and experimental work<sup>1-8, 14-16</sup>, the mechanisms of sound attenuation in various types of plant communities remain obscure. Among the mechanisms which have been suggested are the ground effect, the thermoviscous absorption of sound at the soil and in the boundary layer of air at the surface of the leaves, scattering from trunks, branches and leaves, and the vibration of thin branches and leaves. The aim of this paper is to investigate the vibration of plant leaves in a sound field using a laser-Doppler-vibrometer system<sup>17</sup>.

The acoustic force acting upon a leaf is determined by the vectorial difference between the sound pressures at its two surfaces, cf. a ribbon microphone and other pressure gradient receivers<sup>18</sup>. A part of the sound energy received by a leaf may be lost by friction and thus absorbed, and some of the energy may be re-emitted. At low frequencies the force acting on the leaf is small, and the re-emission of sound is likely to be inefficient<sup>19</sup>. At higher frequencies the driving force is larger, and a considerable part of the energy received by the leaves may -in theory- be reradiated as sound depending on the mechanical properties and the modes of vibration. If a plant leaf is behaving as a linear mechanical system, the re-emitted sound will be of almost the same frequency as the received sound.

## 2. EXPERIMENTS AND RESULTS.

Four plant species grown in pots were placed in a free sound field in the laboratory: Ligustrum regelianum (privet), Betula verrucosa (birch), Corylus avellana (hazel), and Quercus robur (oak). The studied leaves remained attached in situ to the entire plants.

Laser vibrometry is a suitable technique for measuring the vibration velocity of small areas on the plants over a wide frequency range (0-100 kHz) without loading the plants mechanically. The lower limit of detection is at displacement amplitudes of about 1 nm. The laser beam is focused on small dots, less than  $\frac{1}{2}$  mm in diameter, made with correction fluid (Tipp-Ex) on the surface of the leaves. The experimental setup is described in detail elsewhere<sup>20</sup>. Spectra of the sound reaching a microphone (Brüel & Kjaer 4135) and of the vibration velocity of the dot were made on a spectrum analyzer (Hewlett-Packard 3588 A) with a fixed bandwidth of 100 Hz. The output of the speaker varied about  $\pm 3$  dB within the frequency range investigated. The spectra shown in the figures are referred to a constant SPL, however, by storing the spectra in a digital memory (Nicolet 1170) and subtracting the sound spectrum from the vibration spectra.

In a sound field up to 100 dB SPL (re 20  $\mu$ Pa) vibration velocities were measured up to  $10^{-4}$  m/s and it is demonstrated that plant leaves behave as linear systems (Fig. 1, a and b). A linear behavior was also observed in experiments where we looked for possible frequency transformations: the leaves were activated with pure tone sounds and the vibration spectrum was

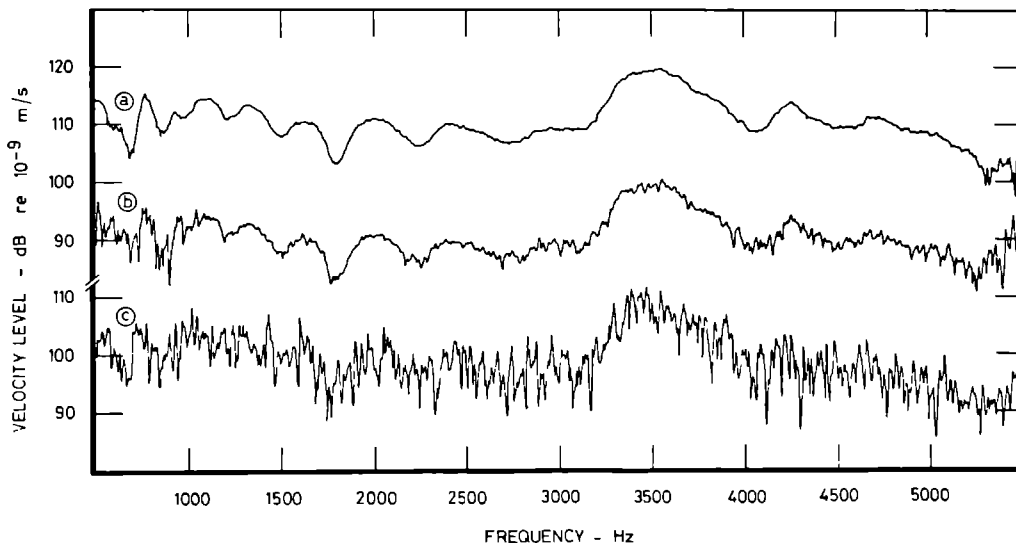


Figure 1.

The amplitude of vibrations of a hazel leaf related to the magnitude of the sound pressure. The relation is linear: in (a) the leaf was activated by pure tones of about 100 dB SPL, in (b) by about 80 dB SPL. In (c) the leaf was activated by white noise, the intensity of which was chosen so as to cause amplitudes of vibration intermediate between those of (a) and (b). The leaf was 100 mm long and 85 mm broad, and the angle between the plane of the leaf and the direction to the loudspeaker was about  $60^{\circ}$ . The measuring spot was situated on the mesophyll between the main nerve and the margin of the leaf.

searched for vibration components at other frequencies. No frequency transformation could be detected. Also the spectra of the leaf vibrations caused by white noise were very similar to the spectra produced by activating the leaves with a slowly sweeping sine-wave synchronized with the frequency analysis in the spectrum analyzer (Fig. 1,c).

The vibration velocity spectra obtained from a large number of leaves varied greatly, and it is not yet clear whether the differences between the plant species are consistent. The differences in the vibration spectra obtained by consecutive measurements at different spots on a leaf, which is not moved between the individual measurements, suggests that the mode of vibration may be extremely complex. No systematic investigation was made of the phase relation between sound and leaf vibration, but the phase shifts observed with the small changes in frequency were similar to those expected around resonances or when nodal lines are passing the spots under investigation. The leaves studied thus appear to behave like plates with many different modes of vibration within the frequency range studied (Fig. 2).

The vibration of a certain point on a leaf also depends on the orientation of the leaf relative to the sound source (Fig. 2), which is not surprising. From theory one would expect that at low frequencies, where the leaf is small, relative to the wavelength of sound, the force acting to move the leaf is uniform over the whole leaf surface. At higher frequencies, however, the phase of the sound waves acting on the two surfaces will vary across the leaf. A leaf exposed to high frequency sound will, therefore, be driven by a force which varies in magnitude and phase across the leaf surface.

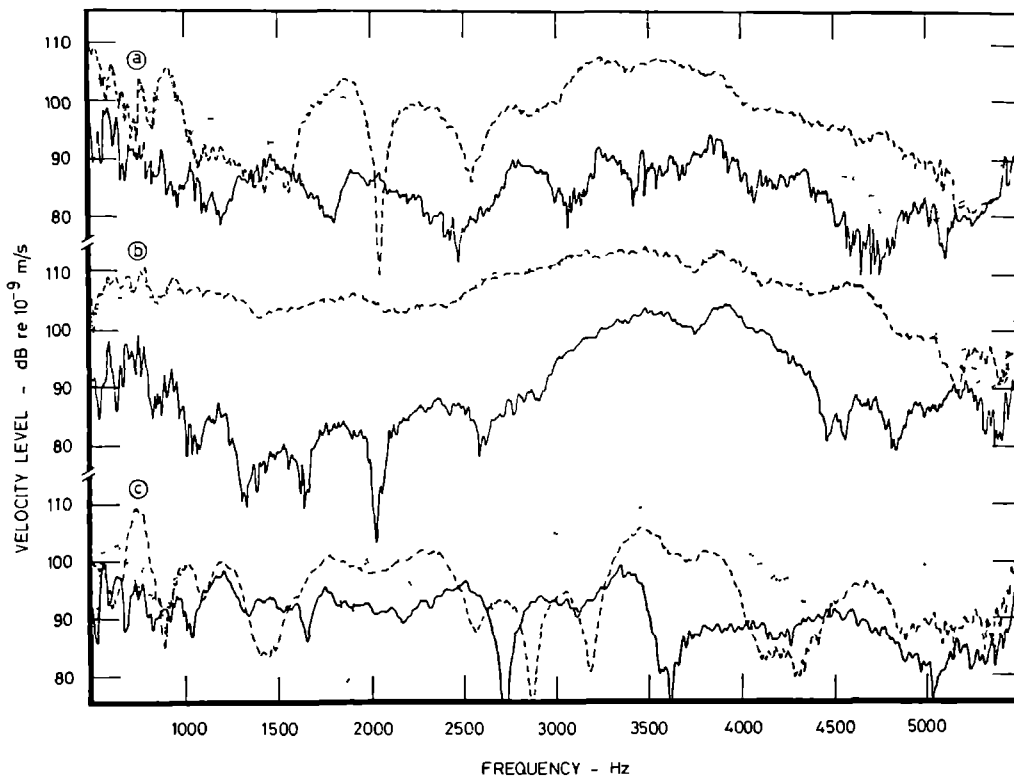


Figure 2.

Vibration velocities of a birch tree leaf measured at three spots and with different orientation to the sound source, generating a pure tone sound field of 100 dB SPL: top of the leaf (the three curves marked (a)), at the center (b), and near the margin (c). The leaf was 60 mm long and 46 mm broad. The angle between the plane of the leaf and the direction of the loudspeaker was  $90^\circ$  (dotted lines),  $45^\circ$  (broken lines) and  $0^\circ$  (solid lines). The angle between the laser beam and the plane of the leaf varied somewhat ( $30^\circ$  for the dotted lines,  $60^\circ$  for the solid lines, and  $75^\circ$  for the broken lines). The real vibration velocities perpendicular to the plane of the leaf were therefore 6 dB higher for the dotted curves and about 1 dB higher for the solid curves.



The vibration velocity observed at a certain spot on a leaf may vary about 40 dB (100 times) with frequency and with the orientation of the leaf relative to the sound source. A considerable part of this variation is due to the minima associated with the passing of nodal lines. The average variation is less, about 20 dB (10 times). At 100 dB SPL most of the vibration velocities observed were between  $10^{-5}$  and  $3 \times 10^{-4}$  m/s. These values should be compared with the vibration velocity of the air particles, which is about  $5 \times 10^{-3}$  m/s at 100 dB SPL. The vibration velocities of the leaves are thus one to three orders of magnitude smaller than the vibration velocity of the air particles. This means that only a part of the sound energy reaching the leaf will cause the leaf to vibrate. The other part of the sound energy is reflected and diffracted around the leaf as if the leaf did not move at all.

The re-emission of sound from a leaf will be very small for two reasons. Firstly, the vibration velocity of the leaf is small; secondly, the vibration of different areas of the leaf separated by nodal lines will be out of phase, and the pressure variation generated by these areas will therefore annihilate: The net effect will be a pumping of air back and forth across the nodal lines, with a cancellation in sound output.

Sound energy causing vibration in a leaf is effectively "trapped", i.e., absorbed by the leaf tissue and converted into heat. The amount of sound energy absorbed in this way by a single leaf is rather small. However, the number of leaves in a plant community is enormous, since the number of leaves of a full-grown beech tree has been determined to be about 200,000<sup>21</sup>.

It might be expected that, if the absorption of sound energy by plant leaves is of major importance, the excess attenuation should be linear with pathlength and with foliage density in a plant community. A linear excess attenuation is not found in the low frequencies, since the ground effect plays a major role in that frequency range<sup>1-6, 22</sup>. In the high frequencies above 1 kHz, however, a better linear relation is found between excess attenuation in vegetations and the pathlength and foliage density<sup>16, 22</sup>. The observed vibrations of plant leaves may, therefore, be one of the processes contributing to attenuation of high frequency noise and sound by plants in the environment.

It remains to be learned, how large a fraction of sound energy is converted into heat by this process, and how much of the sound attenuation is due to other processes like the ground effect and the thermoviscous absorption in boundary layers.

#### ACKNOWLEDGMENTS.

We wish to thank the firm Kortegaards Planteskole for supplying the potted plants studied. We thank H. Myncke, H.F. Linskens and J. Kragh for their comments on the manuscript, and G. Barendse and M. Robson for correcting the English text.

## References.

1. D. Aylor, "Noise reduction by vegetation and ground.," J. Acoust. Soc. Am. 51, 197-205 (1972).
2. D. Aylor, "Sound transmission through vegetation in relation to leaf area density, leaf width and breadth of canopy," J. Acoust. Soc. Am. 51, 411-414 (1972).
3. R. Haupt, "Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 1. Teil: Methodische Grundlagen," Arch. Naturschutz Landschaftsforsch. 13, 309-327 (1973).
4. R. Haupt, "Beitrag zum Problem der Lärminderung durch Waldbestände. 2. Teil: Die Ergebnisse und ihre Anwendungsmöglichkeiten," Arch. Naturschutz Landschaftsforsch. 14, 61-75 (1974).
5. H.F. Linskens, M.J.M. Martens, H.J.G.M. Hendriksen, A.M. Roostenberg-Sinnige, W.A.J.M. Brouwers, A.L.H.C. van der Staak, and A.M.J. Strik-Jansen, "The acoustic climate of plant communities," Oecologia (Berlin) 23, 165-177 (1976).
6. M.J.M. Martens, "Sound attenuation of Dutch forests," Proc. 1<sup>o</sup> Simpósio Luso-Espanhol de Acústica Ambiental, Lisboa, 1978, 2, 4-VI-1 - 4-VI-11 (1979).
7. F.J. Meister und W. Ruhrberg, "Die Dämmung von Verkehrsgerauschen durch Grünanlagen," V.D.I.-Z. 101, 527-535 (1959).
8. G. Mitscherlich und D. Schölzke, "Schalldämmung durch Wald," Allg. Forst Jagdz. 148, 125-143 (1977).
9. K. Marten and P. Marler, "Sound transmission and its significance for animal vocalization, I. Temperate Habitats," Behav. Ecol. Sociobiol. 2, 271-290 (1977).
10. K. Marten, D. Quine, and P. Marler, "Sound transmission and its significance for animal vocalization, II. Tropical Forests Habitats," Behav. Ecol. Sociobiol. 2, 291-302 (1977).

11. A. Michelsen, "Sound reception in different environments," in Sensory Ecology, edited by M.A. Ali (Plenum, New York, 1978), pp. 345-373.
12. R.H. Wiley and D.G. Richards, "Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: implications for the evolution of animal vocalizations," *Behav. Ecol. Sociobiol.* 3, 69-94 (1978).
13. T.F.W. Embleton, "Scattering by an array of cylinders as a function of surface impedance," *J. Acoust. Soc. Am.* 40, 667-670 (1966).
14. S.H. Burns, "The absorption of sound by pine trees," *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 658-661 (1979).
15. M.J.M. Martens, "The influence of the soil on the acoustic climate of plant communities," *Proc. InterNoise 77*, Zürich, (1977), pp. B593-B598.
16. M.J.M. Martens, "Foliage as a low-pass filter: Experiments with model forests in an anechoic chamber," *J. Acoust. Soc. Am.* 67, 66-72 (1980).
17. A. Michelsen and O.N. Larsen, "Biophysics of the ensiferan ear. I. Tympanal vibrations in bushcrickets (Tettigoniidae) studied with laser vibrometry," *J. Comp. Physiol.* 123, 193-203 (1978).
18. See Ref. 17, pages 196, 197, and formulas 1, 2, and 3.
19. L.L. Beranek, Acoustics, (McGraw-Hill, New York, 1954).
20. A. Michelsen, F. Fink, M. Gogala, and D. Traue, *J. Experimental Biol.* (in the press).
21. H. Schroeder, "Ein Versuch, die Oberflächenentwicklung eines Baumes (Fagus silvatica) zahlenmässig zu bewerten," *Ber. d. deutschen Bot. Ges.* 44, 579-583 (1926).
22. M.J.M. Martens, "Noise abatement in plant monocultures and plant communities," (submitted for publication in *Applied Acoustics*).

## SAMENVATTING.

De geluidsvoortplanting in de buitenlucht en de factoren, die daarop invloed hebben, zijn in tweeërlei opzicht van belang: ten eerste ten aanzien van het gebruik van akoestische signalen, niet alleen in het intermenselijk communiceren, maar ook ten behoeve van de akoestische communicatie tussen dieren in hun milieu, ten tweede ten aanzien van een teveel aan niet relevante akoestische signalen, lawaai, als bijproduct van onze technische en ingewikkelde samenleving. Planten en plantengemeenschappen maken deel uit van de biosfeer, enerzijds als habitat voor andere biologische soorten, anderzijds als min of meer natuurlijk element in een gecultiveerd landschap. Gezien de nauwe verwevenheid van aan de ene kant planten en vegetatie en aan de andere kant de buitenlucht, die deze omgeeft, kunnen planten en plantengemeenschappen factoren zijn die van invloed zijn op de geluidsvoortplanting. Het totaal van eigenschappen van vegetatie met betrekking tot het geluid is gedefinieerd als het akoestisch klimaat van vegetaties.

De onderdelen, waaruit een plantengemeenschap is opgebouwd, de bodem, die tevens als substraat dient, stammen, takken en bladeren als samenstellende delen van het bovengrondse deel van de planten, blijken een karakteristiek deel van het akoestisch klimaat van een plantengemeenschap te bepalen. Het onderzoek is daarom niet alleen gericht op het vaststellen van het akoestisch klimaat van plantengemeenschappen als geheel en de verschillen hierin als gevolg van de samenstellende soorten, maar ook op de akoestische karakterisering van de onderdelen van de planten en de plantengemeenschappen.

De metingen zijn uitgevoerd met elektronisch opgewekte ruis of zuivere tonen. De geluidsoverdracht in afhankelijkheid van de frequenties in het voor de mens hoorbare gebied is bepaald. In alle onderzochte vegetaties, hetzij gemengde of halfnatuurlijke bossen, hetzij monocultures, wordt een akoestisch klimaat gevonden, dat aan een algemene beschrijving voldoet: er blijkt in het gebied van de lage tonen tot ongeveer 800 Hz en in het gebied van de hoge tonen vanaf ongeveer 2000 Hz een extra geluidsdemping op te treden, die toegeschreven kan worden aan de aanwezigheid van de plantengemeenschap als geheel, terwijl in het tussenliggende frequentiegebied van de midden tonen deze extra demping gering tot afwezig is. De mate van demping en de grenzen van de genoemde frequentiegebieden liggen niet vast en worden beïnvloed door de ontwikkelingstoestand van de planten, de opbouw van de plantengemeenschap en de plaats van de geluidsbron en de ontvanger.

De extra demping van de lage geluidsfrequenties wordt veroorzaakt door de akoestische eigenschappen van de bodem, waarvan de samenstelling onder andere een relatie heeft met de plantengemeenschap ter plaatse. Dit bodemeffect is groter naarmate de geluidsbron en/of ontvanger zich dichterbij de bodem bevinden. De extra, van de vegetatie afhankelijke, demping van de hoge frequenties vindt zijn oorzaak in de specifieke akoestische eigenschappen van de bladeren, die door geluidsenergie in trilling gebracht worden, zoals bij vier soorten bladeren is aangetoond met een laser-Doppler-vibrometer. Als gevolg van de optredende verschillende trillingsmoden zal inwendige wrijving in de bladeren optreden en dus omzetting van bewegingsenergie in warmte plaats vinden.

Meting van de geluidsoverdracht door een viertal kleine bossjes in een vrije veld situatie in een echovrije kamer laten zien, dat soortspecifieke eigenschappen als bladoppervlak, biomassa en bladvorm van invloed zijn op deze door het gebladerte veroorzaakte extra demping.

De meestal zeer geringe extra demping in het gebied van de midden frequenties kan wellicht voor een deel verklaard worden door op dit moment nog niet begrepen eigenschappen van het gebladerte, waardoor geluidsversterking kan optreden, zoals gemeten is in experimenten onder vrije veld condities.

De vastgestelde akoestische eigenschappen van planten en plantengemeenschappen kunnen een bijdrage leveren in de discussie omtrent de evolutie van akoestische communicatie tussen soortgenoten en individuen van biologisch verschillende soorten en de invloed van de verschillende habitats op deze evolutie. Ook kan kennis van de hier beschreven resultaten een bijdrage leveren voor een juistere toepassing van planten en begroeiingen in de strijd tegen de lawaaihinder.

## Curriculum Vitae.

MARTENS, Maurice Joseph Marie werd op 19 maart 1948 te Maastricht geboren, alwaar hij na lagere en middelbare school doorlopen te hebben op 16 juni 1967 met goed gevolg het eindexamen Gymnasium bèta aflegde aan het Henric van Veldeke College.

Het kandidaatsexamen Biologie (B1w) werd op 7 juli 1970 behaald aan de Katholieke Universiteit te Nijmegen, waar tevens het doctoraal examen in de Biologie, inclusief lesbevoegdheid (eerste graad), met genoegen werd afgelegd op 6 november 1973, met als hoofdvak Plantenfysiologie en de bijvakken Geobotanie en Microbiologie. In maart 1978 werd met gunstig gevolg het examen afgelegd, dat verbonden was aan de Hogere Kursus Akoestiek, die van september 1977 tot januari 1978 te Antwerpen werd gevolgd. In augustus 1980 nam hij deel aan een zomercursus, gegeven aan het Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U.S.A., welke handelde over de toepassing en de gevaren van Niet-Ioniserend Straling.

Van 1 augustus 1972 tot 1 augustus 1973 was hij, in een deeltijd functie, als leraar in de Biologie verbonden aan het Eijkhagen College te Schaesberg en vanaf 16 november 1973 volgde zijn benoeming tot wetenschappelijk medewerker aan het Botanisch Laboratorium I van de Katholieke Universiteit van Nijmegen.

Hier was en is hij belast met onderwijs aan studenten in de Biologie op prekandidaatsniveau (cursussen Plantenfysiologie en Biomonitoring van Milieuverontreinigingen) en op postkandidaatsniveau en werkte hij aan zijn proefschrift.

In die periode bezocht hij congressen in Zürich en Lissabon, waar hij lezingen hield betreffende het onderzoek, dat beschreven is in dit proefschrift.

Hij is lid van de Koninklijke Nederlandse Botanische Vereniging, de Nederlandse Dierkundige Vereniging, het Nederlands Akoestisch Genootschap en de Air Pollution Control Association.

Als bestuurslid van het Nijmeegs Barokensemble en de Stichting Nijmeegs Cantoraat was en is hij actief in het sociaal culturele leven in Nijmegen.



Stellingen bij het proefschrift "Geluid en groen".

1

Bij de geluidsdemping door een vegetatie speelt met name de structuur van de bodem, die mede tot stand gekomen is door de inwerking van het plantendek, een grote rol.

Dit proefschrift.

2

De geluidsdempingswaarden voor bladmateriaal, die Beck in zijn proefschrift beschreven heeft, mogen niet als zodanig gebruikt worden.

Beck, G., Dissertation, Berlin, 1965; dit proefschrift.

3

De hypothese dat regelbeplanting beter geluid dempt dan een aaneengesloten bos, moet in het geval van Picea verworpen worden.

Dit proefschrift.

4

In het kader van het onderzoek betreffende de geluidsvoortplanting in de buitenlucht wordt te weinig aandacht besteed aan de relatie planten-mikroklimaat-geluidsvoortplanting.

Martens, M.J.M. in Proc. 1<sup>o</sup> Simpósio Luso-Espanhol de Acústica Ambiental, Lisboa, 1979, pp. 4-VI-1 - 4-VI-11.

5

"Non clamor, sed amor", dient de lijfspreuk van iedere geluidshinderbestrijder te zijn.

Lessing, Th., Der Lärm, Wiesbaden, 1908; Martens, M.J.M., Extern 7 (1978): 199-219.

6

Het gebruik van zuivere tonen dient bij het onderzoek van het akoestisch klimaat van plantengemeenschappen gestimuleerd te worden.

Martens, M.J.M. & Linskens, H.F., In Vardar, Y., Sheikh, K.H. and Öztürk, M.A. (eds.), Proc. 3<sup>o</sup> MPP-Meeting, Izmir, 1976, pp. 98-102.

Bestudering van de biologische effecten veroorzaakt door ultrageluid in het frequentiegebied van 0,6 tot 12 MHz, welke frequenties in het medisch onderzoek toegepast worden zonder alle gevaren te onderkennen, kan uitstekend plaats vinden aan plantenmateriaal.

Special Summer Session on Non-Ionizing-Radiation, M.I.T.;  
Miller, D.L., J. Acoust. Soc. Amer. 65 (1979): 1313-1321.

Er dient een Europees meetnet voor de luchtverontreiniging te worden opgezet, waarbij planten als snuffelpaal fungeren.

Martens, M.J.M., Vakblad voor Biologen 60 (1980): 170-171.

De zich ontwikkelende meeldraden in de bloemknoppen van lelies zijn door hun synchronisatie een uitstekend botanisch object om het verloop van de reductiedeling morfologisch en biochemisch te bestuderen.

Martens, M.J.M. & Croes, A.F. in Linskens, H.F. (ed.),  
Fertilization in higher plants, Amsterdam, 1974, pp. 43-48.

Zolang er geen objectief en reproduceerbaar onderzoek is uitgevoerd naar de invloed van geluid op planten, moeten verhalen over de bevordering of afremming van de groei van planten onder invloed van verschillende soorten muziek naar het rijk der fabelen worden verwezen.

Tompkins, P. & Bird, C., The secret of life of plants, New York, Evanston, San Francisco & London, 1973.

Hoewel het intellect een getransplanteerd orgaan beschouwt als een positieve toevoeging aan het organisme, kan deze kennis niet via de normale neurale weg worden doorgegeven aan het immunologisch systeem.

Het fundament, waarop Natuurbehoud en -beheer zijn gebaseerd, kan aanmerkelijk worden versterkt door naast inventariseren, karteren en milieu-effect-rapportage, meer experimenteel oecologisch onderzoek toe te passen.

Het is mede een taak van de bioloog het leven te bestrijden.

Bij de restauratie van de Westbouw van de Sint Servaaskerk te Maastricht is het beter de huidige situatie met de gedeeltelijk afgebrande middentoren van Cuypers te handhaven, dan deze weg te breken tussen twee torens, die, hun plattegrond in aanmerking genomen, eigenlijk geen torens zijn; nog beter is het de Westbouw te restaureren in de geest van het "Plan Meurs".

Meurs, B., de Maasgouw, 1963; Timmers, J.J.M., De kunst van het Maasland, Assen, 1971; Veken, C.J.M. van der, St. Servaaskerk te Maastricht, Den Haag, Maastricht, 1974.

De dienstregeling op het traject Nijmegen-Roermond van de Nederlandse Spoorwegen kan drastisch verbeterd worden door een kleine ingreep in de infrastructuur ten westen van station Blerick, namelijk door de wisselstraat, die eindigt bij wissel 69 A in zuidoostelijke richting te verleggen en aan te sluiten op het spoor Venlo-Eindhoven v.v.

Naarmate de perceptie voor Bacchus toeneemt, neemt die voor Bach af.

Nijmegen, 27 november 1980

M.J.M. Martens



