

Geluidoverdracht over grote afstanden : literatuurstudie bodemdemping en afscherming

Citation for published version (APA):

Gerretsen, E. (1975). *Geluidoverdracht over grote afstanden : literatuurstudie bodemdemping en afscherming*. (Onderzoekprogramma Interdepartementale Commissie Geluidhinder. VL, Verkeerslawaaai; Vol. VL-DR-21-01). Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiene.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1975

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

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

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

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

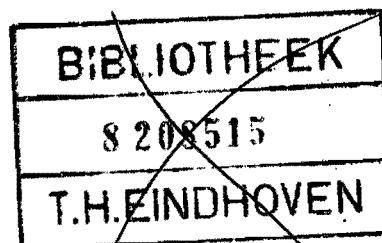
If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

VL-DR-21-01

**Geluidoverdracht
over grote afstanden
(literatuurstudie
bodemdemping en
afscherming)**



ICG

**INTERDEPARTEMENTALE
COMMISSIE
GELUIDHINDER**

1 Rapport nr. VL-DR-21-01	7 Archief nr.	
2 Sub-titel Rapport Geluidoverdracht over grote afstanden (literatuurstudie bodemdemping en afscherming).	8 Datum Publicatie mei 1975	
	9 Rapport nr. Instituut 507.268/1	
3 Schrijver(s) Ir. E. Gerretsen	10 Tijdschrift nr.	
4 Uitvoerend Instituut, Naam Adres Technische Fysische Dienst TNO-TH	11 Opdracht nr.	
	12 Rapporttype en periode Deelrapport 1975	
5 Opdrachtgever(s) Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne		
6 Titel Onderzoekproject Onderzoek naar de geluidoverdracht op grote afstanden.		
13 Samenvatting Twee aspecten van de geluidoverdracht over grote afstanden, de geluidverzwakking ten gevolge van de bodem en schermen, zijn nader bestudeerd aan de hand van de literatuur. Een aan de hand van metingen enigszins aangepaste berekeningswijze voor bodemdemping, volgens het vlakke-golfmodel, wordt besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de beperkingen waaronder dit model geldt. Enkele mogelijkheden tot verbeteringen worden eveneens aangegeven. Een berekening van de geluidverzwakking door een dun scherm volgens MacDonald wordt besproken en vergeleken met andere theoretische en empirische benaderingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de bodem op de schermwerking. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt geïllustreerd dat de verzwakking door het plaatsen van een scherm ten gevolge van de bodem veel geringer kan zijn dan bij verwaarlozing van het bodemeffect zou worden verwacht. Vervolgens wordt het effect beschreven van verschillende factoren op de schermwerking, zoals de vorm van het scherm (wig, dijk), absorberend scherm, eindige afmetingen, brontype en meteorologische omstandigheden. Voor elk van deze factoren wordt aangegeven op welke wijze het effect van deze factoren in de berekening zou kunnen worden opgenomen en met welke betrouwbaarheid.		
14 Begeleidingscommissie V en M: Ing. É.J.L. Niehoff Ir. R.B.J.C. van Noort Ir. L. van Staalduinen Ir. A.G. Spruyt V en W: Ing. G.D. Westendorp	15 Bijbehorende Rapporten	
	16 Aantal blz. 32	17 Prijs

VOORWOORD

Het project "Onderzoek naar de geluidoverdracht over grote afstanden" beoogt de ontwikkeling van een prognosemodel voor de geluidoverdracht over grote afstanden.

Ten behoeve van dit project zijn literatuurstudies verricht (rapport VL-DR-21-01) en een experimenteel en theoretisch onderzoek naar de invloed van grondabsorptie op de geluidvoortplanting (rapport VL-DR-21-02).

Beide deelrapporten zijn sterk theoretisch gericht en leiden nog niet tot voor de praktijk bruikbare richtlijnen. De publicatie van het onderhavige deelrapport dient dan ook voor de verdieping van het inzicht van diegenen die werkzaam zijn op dit specialistische gebied en niet voor direct gebruik in de praktijk.

Voor praktijkoplossingen is een inmiddels ontwikkeld rekenmodel van belang.

Dit model wordt momenteel getoetst. Het model en de toetsingsresultaten zullen in de loop van 1977 worden gepubliceerd in een hoofdrapport.

Hierop vooruitlopend zullen begin 1977 deelrapporten verschijnen over "Geometrische uitbreiding en luchtabsorptie" en "Meteorologische verschijnselen die van invloed zijn op de geluidoverdracht".

Mocht u commentaar willen leveren op dit deelrapport, dan kunt u dit toezenden aan het secretariaat van de Interdepartementale Commissie Geluidhinder, Dokter Reijersstraat 10, Leidschendam.

De Voorzitter van de Subcommissie
Verkeerslawaaai van de I.C.G.,



Ir. R.B.J.C. van Noort



adres Stieltjesweg 1 Delft 2208
postadres Postbus 155
telefoon (015) 56 93 00
telex 31614

No.: 507.268/1
Afd.: Geluid
Behandeld: ir. E. Gerretsen

Datum: 23 mei 1975

RAPPORT

GELUIDOVERDRACHT OVER
GROTE AFSTANDEN

(Literatuurstudie bodemdemping
en afscherming)

AAN

• Ministerie van Volksgezondheid
en Milieuhygiëne
Leidschendam

Samenvatting: Twee aspecten van de geluidoverdracht over grote afstanden, de geluidverzwakking ten gevolge van de bodem en van schermen, zijn nader bestudeerd aan de hand van de literatuur. Een aan de hand van metingen enigszins aangepaste berekeningswijze voor bodemdemping, volgens het vlakke-golfmodel, wordt besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de beperkingen waaronder dit model geldt. Enkele mogelijkheden tot verbetering worden eveneens aangegeven. Een berekening van de geluidverzwakking door een dun scherm volgens MacDonald wordt besproken en vergeleken met andere theoretische en empirische benaderingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de bodem op de schermwerking. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt geïllustreerd dat de verzwakking door het plaatsen van een scherm ten gevolge van de bodem veel geringer kan zijn dan bij verwaarlozing van het bodemeffect zou worden verwacht.

Vervolgens wordt het effect beschreven van verschillende factoren op de schermwerking, zoals de vorm van het scherm (wig, dijk), absorberend scherm, eindige afmetingen, brontype en meteorologische omstandigheden. Voor elk van deze factoren wordt aangegeven op welke wijze het effect van deze factoren in de berekening zou kunnen worden opgenomen en met welke betrouwbaarheid.

Zusammenfassung: Zwei Aspekte der Schallübertragung über grosse Entfernungen, die Lärminderung durch Bodendämpfung und Abschirmung, sind anhand der Literatur näher untersucht worden. Eine mit Hilfe von Messungen einigermaßen angegliche Berechnungsweise für die Bodendämpfung nach dem Flächen-Wellen-Modell wird erörtert. Hierbei finden die für dieses Modell geltenden Beschränkungen Beachtung. Einige Verbesserungsmöglichkeiten werden ebenfalls angeführt. Eine Berechnung der Lärminderung mittels eines dünnen Schirms nach MacDonald wird besprochen und anhand anderer theoretischer und empirischer Methoden verglichen. Sodann wird dem Einfluss des Bodens auf die Schirmwirkung Aufmerksamkeit zuteil. Anhand einiger Beispiele wird illustriert, dass die Lärminderung durch Anbringung eines Schirms infolge der Bodeneinwirkung viel geringer sein kann, als bei einer Nichtberücksichtigung der Bodeneinwirkung zu erwarten wäre.

Anschliessend wird der Einfluss verschiedener Faktoren - z.B. Form des Schirms (Keil, Deich), absorbierender Schirm, endlicher Abmessungen, Quellentyp und meteorologische Verhältnisse - auf die Schirmwirkung beschrieben. Für jeden dieser Faktoren wird angegeben, wie und mit welcher Zuverlässigkeit ihre Wirkung in die Berechnung einbezogen werden könnte.

Summary: Two aspects of outdoor sound propagation - attenuation due to ground and barriers - have been studied with reference to the literature. A method of calculating ground attenuation (adapted slightly in the light of measurements made) using the plane wave model is discussed. Consideration is given to the limitations to the validity of this model. A number of possible improvements are indicated. A calculation of sound attenuation by a thin barrier, according to MacDonald, is discussed and compared with other theoretical and empirical computations. Consideration is further given to the effect of the ground on barrier performance. Examples are cited which show that noise attenuation resulting from the placing of a barrier can be much smaller as a consequence of ground conditions than would be expected if the ground effect were neglected. A description is then given of the effect on barrier performance of various factors such as the shape of the barrier (wedge, dyke), the absorbency of the barrier, finite dimensions, source type and meteorological conditions. An indication is given of the way in which the effect of each of these factors could be included in the calculations and with what reliability.

Résumé: Deux aspects de la propagation du bruit sur de grandes distances - l'atténuation du bruit par le sol et les écrans - ont fait l'objet d'une étude bibliographique détaillée. Une méthode de calcul - quelque peu adaptée sur base de mesurages - de l'atténuation du bruit par le sol, selon le modèle de l'onde plane, y est analysée. On signale également les limites inhérentes à ce modèle ainsi que quelques possibilités de l'améliorer. Le calcul de l'atténuation du bruit par un mince écran selon MacDonald a été discuté et comparé aux autres méthodes théoriques et empiriques.

L'influence du sol sur l'effet de l'écran est en outre examinée. Quelques exemples ont permis d'illustrer que l'atténuation du bruit par la pose d'un écran peut être bien inférieure, par suite de l'effet du sol, à ce que l'on pourrait s'attendre si l'on ne tenait compte de l'effet du sol.

Ensuite, on a examiné l'influence de divers facteurs sur l'effet de l'écran, par exemple forme de l'écran (coin, digue), écran absorbant, dimensions, type de source et conditions météorologiques. Pour chacun de ces facteurs, on indique de quelle manière l'effet de ces facteurs peut être inclus dans le calcul et avec quelle fiabilité.

<u>Inhoud</u>	<u>Pag.</u>
1. Inleiding	1
2. Bodemdemping	1
3. Geluidafscherming	4
.1 Half-oneindig dun scherm	4
.2 Dun scherm op bodem	5
.3 Andere invloedsfactoren op de schermwerking	7
.3.1 Andere vormen dan een dun scherm	8
.3.2 Een niet-hard scherm	9
.3.3 Brontype	9
.3.4 Eindige afmetingen	10
.3.5 Meteorologische invloeden	11
4. Conclusie	13
Literatuur	14
Appendix A: bodemdemping	16
Appendix B: schermwerking	20
1. dun scherm	20
2. scherm op bodem	21
3. absorberend scherm	22
4. wigvormig scherm	22
5. breed scherm	23

1. INLEIDING

Bij veel geluidhinderproblemen is de geluidoverdracht over relatief grote afstanden van belang. Teneinde meer inzicht te krijgen in de verschillende factoren die deze overdracht beïnvloeden is door de TPD in 1972 een literatuurstudie uitgevoerd welke heeft geleid tot een intern rapport nr. 781 (1). Een uitbreiding van dit onderzoek heeft zich vooral toegespitst op bodemdemping, geluidafscherming en de onderlinge beïnvloeding hiertussen.

Ten behoeve van dit onderzoek is een eenvoudig (computer)rekenprogramma opgesteld voor de berekening van de demping door deze twee factoren. De mogelijkheden tot verbetering en uitbreiding van dit rekenprogramma zullen worden aangegeven.

2. BODEMDEMPING

In rapport 781 is een rekenmodel gegeven volgens Delany en Bazley (1, 2, 3) voor de geluidoverdracht van een puntbron boven een absorberend vlak, waarbij wordt uitgegaan van een spiegelbron met een sterkte die wordt bepaald door de geometrie en de eigenschappen van het vlak. Dit is gebaseerd op de asymptotische oplossing van Wise (29). Hierbij wordt gerekend met reflecties van vlakke golven als benadering voor de bolgolven van de puntbron. Deze benadering is geoorloofd op "enkele" golflengten afstand van de bron (zeg 10 tot 20) en bij een ontvanger op "enige" afstand van het vlak (4, 5). Deze laatste beperking is wat moeilijker te preciseren, maar gedacht moet worden aan ca. 1 golflengte; daaronder wordt door de aanname van vlakke golven de demping overschat. In Appendix A is de betreffende theorie kort samengevat. Er zal hier niet nader op de vergelijking tussen deze en andere meer exacte berekeningsmethoden worden ingegaan; dit is op het ogenblik een onderdeel van een afstudeeronderzoek dat medio 1975 zal worden afgerond (26). In veel praktische gevallen leveren bovengenoemde grenzen geen ernstige beperkingen op en liggen de problemen veel meer in het verkrijgen van de juiste uitgangsgegevens, hetgeen bij de exactere methoden evenzeer een probleem is.

Het effect van de bodem wordt beschreven met de reflectiecoëfficiënt, die afhankelijk is van de geometrie en bodemeigenschappen (de impedantie en de voortplantingscoëfficiënt van de bodem).

Denaly en Bazley beschouwen de bodem als een half-oneindig absorberend medium (glaswol, steenwol) waarvan de impedantie en de voortplantingscoëfficiënt met empirische formules kunnen worden berekend uit de stromingsweerstand (6). Bij een aangenomen stromingsweerstand van 10^5 Ns/m^4 blijkt een vrij goede overeenstemming te bestaan tussen berekeningen en metingen (1, 2). Dit wordt door TPD metingen (7) bevestigd (zie ook figuur 1). Bij zeer lage frequenties (lager dan ca. 200 Hz) blijkt dit bodemmodel niet te voldoen; de bodem gedraagt zich bij die frequenties als een vrijwel volledig reflecterend vlak. Dit blijkt ook uit metingen van Jonasson (8). Jonasson en ook Doak (9) hebben tevens impedantiemetingen aan verschillende bodems verricht. De metingen van Jonasson zijn kwalitatief in overeenstemming met het model van een half-oneindig absorberend medium. De resultaten van Doak wijken hiervan af; zijn meetwaarden zijn meer in overeenstemming met een gelaagd model van de bodem: een absorberende laag op een harde(re) ondergrond. Een dergelijk model wordt ook door Pao (10) voorgesteld. De vlakke golf-reflectiecoëfficiënt voor een dergelijk gelaagd model kan ook bij de hier beschreven berekeningsmethode worden toegepast (zie Appendix A). Mogelijk kan dit model de discrepantie tussen berekeningen en metingen ondervangen. Dit model zal ook in het kader van genoemd afstudeeronderzoek worden bekeken. Voorlopig is bij de berekeningen voor frequenties lager dan 180 Hz volledige reflectie aangehouden.

In rapport 781 zijn reeds enkele algemene aspecten van de bodeminvloed volgens bovenstaande berekening aangegeven, zij het zonder de aanname van volledige reflectie bij de lage frequenties. Hier worden nog enige aanvullende berekeningsresultaten gegeven.

In figuur 2 zijn voor een frequentie van 500 Hz lijnen van geluid geluiddruk-niveau weergegeven boven een bodem voor twee verschillende bronhoogten. De grens tot waar deze lijnen betrouwbaar zijn ligt ongeveer op de hoogte van 1 m. Aangezien de berekening zuivere tonen betreft worden door interferentie soms zeer scherpe minima in geluiddruk berekend. Dergelijke minima worden in de praktijk niet gevonden; deels doordat in terts- of octaafbanden wordt gemeten, waardoor uitmiddeling plaatsvindt, deels door de niet geheel vlakke en homogene bodem. Een betere berekening zou kunnen worden verkregen door het overgedragen geluid energetisch te middelen over enkele frequenties binnen een terts- of octaafband.

Bij deze berekening is de geluiddruk uitgedrukt in een grootheid die de bron beschrijft, waarvoor in dit geval een willekeurige waarde is aangenomen. Vaak wordt bij de beschrijving van het geluidveld van een puntbron uitgegaan van een bepaalde geluiddruk op een golflengte afstand, maar de bron kan even goed worden beschreven met een vermogen of een volumedebiet (Appendix A). De overdracht wordt gegeven door de verhouding van de geluiddruk ten opzichte van de grootheid die de bron beschrijft (overdrachtsfunctie, transfer function).

Het is echter gebruikelijker en vaak handiger om het effect van een bepaalde factor (bv. absorberende bodem, scherm) op de geluidoverdracht aan te geven ten opzichte van de overdracht tussen dezelfde punten in een geïdealiseerde situatie. Dat laatst kan bv. de overdracht in het volledig vrije veld zijn of de overdracht over een oneindig harde bodem. Een andere mogelijkheid is om het verschil in geluid(druk)niveau op een bepaalde positie te geven, veroorzaakt door een wijziging in één van de factoren die de geluidoverdracht beïnvloeden.

Deze twee mogelijkheden worden vaak door elkaar gebruikt, waarbij de verwarring nog wordt vergroot doordat geen eenduidige benaming wordt gehanteerd. Voor beide grootheden worden benamingen gebruikt als attenuation, reduction, demping, verzwakking e.d..

In dit rapport zullen de volgende definities worden aangehouden:

overdrachtdemping D_{vv} : het verschil in geluid(druk)niveau op een bepaalde positie tussen de overdracht in het vrije veld en de overdracht beïnvloed door de beschouwde factor.

overdrachtdemping t.o.v. hard vlak D_h : het verschil in geluid(druk)niveau op een bepaalde positie tussen de overdracht met de bron op een oneindig hard vlak en de overdracht, beïnvloed door de beschouwde factor (D_h is 6 dB groter dan D_{vv})

tussenschakeldemping D_t : het verschil in geluid(druk)niveau op een bepaalde positie ten gevolge van een wijziging in één van de factoren die de geluidoverdracht beïnvloeden.

Wanneer voor de twee situaties, die bij de tussenschakeldemping worden vergeleken, de overdrachtdemping (t.o.v. dezelfde referentie) bekend is dan is de tussenschakeldemping gelijk aan het verschil in overdrachtdemping.

Door het groot aantal parameters dat de overdracht beschrijft, is het moeilijk op overzichtelijke wijze het effect van alle parameters te demonstreren. Een vereenvoudiging kan worden verkregen door voor een bepaald spectrum het geluidniveau in dB(A) te beschouwen. Dit zou voor een arbitrair spectrum weinig zinvol zijn. Voor verkeerslawaai wordt echter reeds een standaard bronspectrum gehanteerd (fig. 3). Voor een aantal geometrische situaties is voor verkeerslawaai de overdrachtdemping t.o.v. hard vlak in dB(A) berekend bij een absorberende bodem (grasland; stromingsweerstand ca. 10^5 Ns/m⁴). Hierbij is tevens de luchtdemping verdisconteerd bij 15°C en 70% relatieve vochtigheid. De keuze van het harde vlak als referentie is gebaseerd op de aanname dat de beschikbare bronniveaus van verkeerslawaai zijn gemeten in een situatie waarbij volledige reflectie plaatsvindt op het wegdek bij een geringe bronhoogte^{x)}. Uit deze berekeningen blijkt duidelijk, dat door de frequentie-afhankelijkheid van de invloed van de bodem (en luchtdemping) de overdrachtdemping in dB(A) pas op enige afstand sterk toeneemt om daarna vrijwel constant te worden. Het spectrum is dan zodanig gewijzigd dat de frequenties rond 125 Hz bepalend zijn voor het geluidniveau in dB(A) (bij deze lage frequentie is aangenomen dat de bodem geen dempend effect meer heeft en er volledige reflectie plaatsvindt). Het is duidelijk dat voor geheel andere bronspectra de overdrachtdemping in dB(A), als functie van de afstand en van de bron-ontvanger hoogte, een heel ander verloop kan hebben. Naast de korte beschrijving van de gehanteerde berekeningsmethode staat in Appendix A ook aangegeven wat het computerberekeningsprogramma voor bodemdemping kan berekenen en welke uitgangsgegevens daarvoor nodig zijn.

3. GELUIDAFSCHERMING

.1 Half-oneindig dun scherm

Over afscherming van geluid zijn ook zeer recent vrij veel artikelen gepubliceerd. Dit betreft zowel de bepaling van de afschermende werking van een constructie zelf, als de invloed van verschillende factoren zoals bodem, wind, afmetingen e.d. daarop.

x) Of aan deze voorlopige aanname ook werkelijk wordt voldaan zal nog moeten worden geverifieerd. Een andere referentie zal overigens geen invloed hebben op de verschillen in demping tussen verschillende afstanden tot de bron.

Een van de meest gebruikte empirische berekeningen van de afscherming is die van Maekawa (11), gebaseerd op modelmetingen. Daarnaast bestaan veel benaderende oplossingen (in formule- of nomogram-vorm) van de exacte oplossing van het diffractie probleem voor een half-oneindig plat vlak (scherm) (Sommerfield, MacDonald, zie (12)). Vooral recentelijk is dit uitgebreid met exacte of benaderende oplossingen voor een afwijkende vorm van het scherm (wiggen, eindige breedte, al of niet absorberende vlakken van het scherm) (13, 14, 15).

Wanneer we de afscherming door een dun scherm volgens Maekawa en volgens de theorie van Sommerfield/MacDonald (op welke theorie vrijwel alle andere theoretische benaderingen zijn gebaseerd) vergelijken met de model meetresultaten van Maekawa (fig. 5), dan zien we dat de verschillen niet zeer groot zijn en dat ruwweg kan worden gezegd dat Maekawa's empirische lijn de minimaal gemeten overdrachtdempingen markeert en de benadering volgens Kirchhoff de bovengrens; de verschillen hiertussen bedragen maximaal ca. 3 dB (zie ook Appendix B). Men kan hieruit concluderen dat deze verschillende berekeningsmethoden ongeveer even goed zijn om de afschermende werking van een dun scherm zonder verdere invloeden te bepalen. Een uitgebreidere vergelijking tussen verschillende berekeningen is te vinden in een artikel van Kurze (16) hetgeen een uitgebreid literatuuronderzoek is, waarin ook allerlei nog te behandelen aspecten worden besproken.

3.2 Dun scherm op bodem

We zullen in eerste instantie nagaan hoe de invloed van de bodem op de overdrachtdemping bij aanwezigheid van een scherm kan worden beschreven. Maekawa (11) suggereert dat de invloed van een bodem kan worden meegerekend door de overdrachtdemping van een scherm ook te berekenen voor de spiegelontvanger onder de aanname van volledige reflectie (harde grond), waarbij de totale overdrachtdemping kan worden verkregen door de demping voor de ontvanger en de spiegelontvanger energetisch te sommeren onder de aanname dat de twee bijdragen onafhankelijk zijn.

Vooral deze laatste veronderstelling is zeer twijfelachtig; het betreffen beide overdrachtdempingen t.o.v. dezelfde bron. Bovendien zal in veel gevallen de bodem verre van hard zijn en wordt de invloed van de bodem tussen bron en scherm niet in rekening gebracht.

Op grond van de berekeningsmethode voor bodemdemping die in hoofdstuk 1 is beschreven kunnen we deze bezwaren en beperkingen voorkomen met het model zoals in Appendix B is gegeven (Jonassen (8)). Hierbij worden de bodemreflecties voor en na het scherm verwerkt via een spiegelbron en spiegelontvanger waarvan de sterkte wordt bepaald overeenkomstig hoofdstuk 1. De totale overdrachtdemping t.g.v. scherm en bodem wordt gevonden door op grond van het superpositiebeginsel over de vier overdrachtswegen te sommeren, rekening houdend met de onderlinge faserelatie. In Appendix B wordt een korte beschrijving gegeven van deze theorie. Voor de overdrachtdemping van een scherm is daarbij uitgegaan van de formulering volgens MacDonald.

N.B. Gezien de noodzaak om rekening te houden met de faserelatie van de verschillende overdrachtswegen is het niet mogelijk van empirische formules gebruik te maken voor de overdrachtdemping per weg. Zoals we hebben gezien in 3.1 waren de onderlinge verschillen overigens toch gering en ook niet in strijd met model-meetgegevens, voor de situatie zonder bodem.

Met deze berekeningsmethoden en die uit hoofdstuk 1 kunnen we de overdrachtdemping berekenen onder de aanwezigheid van een bodem, al of niet met scherm. En daarmee kan de tussenschakeldemping voor een scherm op een bodem worden bepaald. Als voorbeeld van de resultaten is in figuur 6 een vergelijking gemaakt tussen de gemeten en berekende tussenschakeldemping voor een aantal geometrische situaties (metingen van Scholes e.a. (17)). De meetgegevens zijn weergegeven voor situaties zonder wind, met meewind en met tegenwind. Aangezien enige meewind het effect van de meestal voorkomende temperatuurgradiënt juist kan opheffen zal het resultaat onder "neutrale" meteorologische omstandigheden waarschijnlijk tussen die zonder wind en met meewind in liggen. Uit de figuur blijkt dat de afwijkingen tussen de tussenschakeldemping en de (eveneens ingetekende) overdrachtdemping vrij goed door de berekeningen worden voorspeld. Vooral wanneer wordt bedacht dat de metingen in octaafbanden zijn uitgevoerd en de berekening voor zuivere tonen geldt; de vaak scherpere maxima en minima (interferentieverschijnselen) bij de berekening komen o.a. hierdoor niet bij de metingen tot uiting. Hierop is in hoofdstuk 2 ook reeds ingegaan.

Als voorbeeld van de invloed van vooral de geometrische situatie zijn ook nu weer tussenschakeldempingen in dB(A) berekend voor verkeerslawaai (figuur 7). De berekeningsresultaten zijn vergeleken met gegevens van Scholes e.a. (18). Deze gegevens zijn gebaseerd op metingen met een luidspreker in een werkelijke situatie, waaruit dempingen zijn berekend voor (Engels) verkeerslawaai.

N.B. Het bronspectrum wijkt enigszins af van het TPD-bronspectrum (figuur 3); om de berekeningen eventueel direct bruikbaar te maken is toch de voorkeur gegeven aan berekeningen met het TPD-spectrum boven een wat nauwkeuriger vergelijken met de (meet)gegevens door gebruik te maken van het Scholes-spectrum.

Ook hier bestaat een goede overeenstemming tussen berekening en meting. Duidelijk blijkt dat daar waar zonder scherm de bodemdemping vrij groot is, de tussenschakeldemping duidelijk achter blijft bij de overdrachtdemping van het scherm zonder bodem; door de plaatsing van een scherm dicht bij de bron, wordt de bronhoogte schijnbaar verhoogd (naar de top van het scherm) waardoor de bodemdemping afneemt, het netto effect is dus ruwweg de schermwerking zonder bodem, verminderd met het verschil in bodemdemping.

In Appendix B is een korte beschrijving opgenomen van het computerprogramma waarmee voornoemde berekeningen zijn uitgevoerd, waarbij is aangegeven welke aannamen daarbij zijn gedaan en welke basisgegevens voor de berekening nodig zijn.

3.3 Andere invloedsfactoren op de schermwerking

In het voorgaande zijn reeds verschillende andere factoren dan de bodem genoemd die de afscherpende werking van een dun scherm kunnen beïnvloeden. Een vrij uitgebreide behandeling van deze factoren is te vinden in het reeds genoemde overzichtsartikel van Kurze (16). Het is hier slechts de bedoeling om de effecten kort aan te geven. Daarbij zal ook worden nagegaan of deze effecten in de berekeningsmethode die tot nu toe is besproken zouden kunnen worden opgenomen.

3.3.1 andere vormen dan een dun scherm

Geluidafschermende constructies kunnen niet altijd worden opgevat als een dun, hard scherm (bv. dijken, gebouwen e.d.). Een exacte oplossing van de diffractie bij een andere vorm van het scherm is alleen bekend voor een wigvormig scherm (12). Jonasson (15) leidt hieruit een benadering af in een handzamere vorm onder de restricties van een tophoek groter dan 90° en een bron en ontvanger op enige (golflengten) afstand van de rand van de wig (Appendix B). Deze formulering sluit aan bij die welke gebruikt is voor het dunne scherm zodat deze op eenvoudige wijze in het berekeningsprogramma is op te nemen.

Uit modelmetingen (14, 19) blijkt dat de demping vrij onafhankelijk is van de precieze vorm van de wig. Wat betreft de orde van grootte is de overdrachtdemping voor een wig ca. 2 dB minder dan voor een dun scherm.

Een andere voor de praktijk interessante vorm is een scherm met enige dikte (een trapezoïde). Het diffractie probleem bij een dergelijke vorm is nog niet exact opgelost. Een zeer bruikbare benadering lijkt die volgens Pierce (13). Op basis daarvan leidt Kurze (16) een eenvoudige formule af door het probleem van de dubbele diffractie te benaderen met twee keer een enkele diffractie. Het berekeningsprogramma voor de overdrachtdemping van een scherm kan op de door Pierce aangegeven wijze worden uitgebreid voor de berekening van de demping bij een dik scherm.

Een scherm moet als dik worden beschouwd wanneer de dikte groter is dan een golflengte; in het andere geval geeft de beschouwing als dun scherm de beste benadering.

Het model van een dik scherm kan ook worden gebruikt voor de berekening van het effect van twee evenwijdige schermen op enige afstand. Als de tussenruimte reflecterend is zijn de beide situaties gelijk; in het geval dat de tussenruimte volledig absorberend is is het resultaat ca. 6 dB beter dan voor het equivalente dikke scherm (16).

Bij de beschrijving van de diffractie van een scherpe rand is de fase-relatie tussen de golven aan de rand van belang. In werkelijkheid zal deze rand vaak niet scherp zijn waardoor deze faserelatie verstoord kan worden. Dat heeft tot gevolg dat verstrooiing optreedt en de schermdeemping vooral diep in de schaduw afneemt. Een dergelijk effect is te verwachten wanneer oneffenheden bij de rand afmetingen hebben in de orde van grootte van een golflengte. Het effect kan dus van belang zijn bij de afscherming door gebouwen met onregelmatige gevelconstructies of bij begroeiing en beboming van dijken e.d..

3.3.2 een niet-hard scherm

De berekening voor de schermdeemping zijn meestal gegeven voor twee randvoorwaarden aan het scherm: een hard scherm (drukverdubbeling bij het scherm) en een zacht scherm (verdwijnende druk bij het scherm).

N.B. In veel benaderende formuleringen wordt de term waarmee deze randvoorwaarde in de formulering tot uitdrukking komt verwaarloosd.

Voor de praktische geometrische situaties betekent dat een overschatting van de demping van een hard scherm met ca. 2 dB; zie bv. figuur 5, Kirchhoff en Appendix B.

De randvoorwaarde "zacht scherm" moet niet worden verward met een "absorberend scherm". Een zacht scherm wil zeggen dat volledig reflectie plaatsvindt in tegenfase; de grotere demping die in dat geval wordt bereikt dan met een hard scherm (ca. 6 tot maximaal 25 dB) is echter niet haalbaar door de moeilijk praktisch te realiseren randvoorwaarde.

Bij een absorberend scherm vindt in het gunstigste geval geen reflectie plaats; dan is de winst t.o.v. een hard scherm in de meeste praktische situaties in de orde van grootte van 2 dB met een maximum van 6 dB diep in de schaduw. Voor meer gebruikelijke absorptiewaarden van het schermoppervlak is het verschil nog kleiner (20, 19).

Overigens zou deze winst al bereikt kunnen worden wanneer uitsluitend het scherm dicht bij de rand absorberend wordt gemaakt (ter breedte van ca. een golflengte) en verder hard is. Blijkt het dus voor de overdrachtdemping van een scherm weinig nuttig dit absorberend te bekleden, een dergelijke uitvoering kan natuurlijk wel nodig zijn om reflecties van het scherm te voorkomen naar de kant van de bron.

De overdrachtdemping voor een absorberend scherm (gekaracteriseerd door een impedantie) zou kunnen worden berekend door in de formule voor deze demping de reflectiecoëfficiënt van het scherm op te nemen (Appendix B). Dit geldt met ongeveer dezelfde nauwkeurigheid zowel voor het dunne scherm als voor een wigvormig scherm (21, 15). Dit laatste is echter alleen een bruikbaar model in speciale situaties, zoals bv. een verdiepte weg waar de berm met de bodem ernaast als wigvormig scherm kan worden geïnterpreteerd (15).

3.3.3 brontype

Tot nu toe is als geluidbron een puntbron beschouwd, waarbij in sommige benaderingen gebruik is gemaakt van het feit dat op grote afstand de bolgolven als vlakke golven kunnen worden beschouwd.

Een andere bron waarvoor een exacte oplossing is gevonden in het geval van een dun scherm is de coherente lijnbron. De oplossing neemt in dat geval een vorm aan die overeenkomt met die voor een puntbron, waarbij de positie van de equivalente puntbron moet worden gedacht in het verticale vlak door de ontvanger loodrecht op het scherm. De term die bij de puntbron de bolvormige uitbreiding verdisconteert moet dan aangepast worden aan de cilindervormige uitbreiding van de lijnbron. Voor de praktijk is deze oplossing echter minder interessant aangezien praktische lijnbronnen over het algemeen incoherent zijn (bv. een verkeersstroom). In zo'n geval kan de overdrachtdemping worden berekend door de lijnbron opgebouwd te denken uit onafhankelijke puntbronnen en over al deze puntbronnen de overdracht te integreren, of in het discrete geval te sommeren (22, 23, 24). Een dergelijke berekening blijkt redelijk in overeenstemming te zijn met modelmeetgegevens (24); de overdrachtdemping is zo'n 2 tot 5 dB minder dan voor een puntbron.

Met het beschikbare computerprogramma zou een berekening van de overdrachtdemping voor een discrete lijnbron, rekeninghoudend met de bodemdemping, mogelijk zijn, zij het dat de taal waarin het geschreven is (Focal voor een PDP-8) in dit geval zeer lange rekestijden zou opleveren. Aanwijzingen over het aantal puntbronnen dat hierbij nodig is voor een adequate beschrijving van de lijnbron zijn te vinden bij Kurze e.a. (23).

3.3.4 eindige afmetingen

Alle tot nu toe beschreven empirische en theoretische verhandelingen betreffen schermen met een oneindige lengte.

Maekawa (11) benadert het probleem van eindige afmetingen door de diffractie aan de zijranden van een scherm of gebouw op dezelfde wijze te berekenen als voor de bovenrand en dan de verschillende bijdragen te sommeren als geluid van onafhankelijke bronnen. Modelmetingen met een harde bodem (25) blijken deze benaderingswijze in grote lijnen te bevestigen.

Het in rekening brengen van bodemdemping bij deze zijrand-afscherming is niet goed mogelijk, zodat het effect van de eindige afmeting op de tussenschakeldemping moeilijk is aan te geven. Aangenomen kan worden dat de bodemdemping voor de zijranden vaak groter zal zijn dan voor de bovenrand, zodat verwaarlozing van de bodem deze bijdragen in het algemeen zal overschatten.

Maekawa (21) heeft voor dunne schermen met een driehoekige vorm ook een andere benadering bekeken. De theoretische beschrijving van dit probleem bleek een redelijke overeenstemming te geven met modelmetingen, zowel voor ontvangposities loodrecht op de driehoek als evenwijdig aan de driehoek. In het geval van een lijnbron ligt de benadering voor de hand om de zijrand effecten van het eindige scherm te verwaarlozen en te sommeren over de bijdragen van de afgeschermdde en onafgeschermdde stukken van de lijnbron (23, 16, 27). Uit een dergelijke beschouwing kan worden afgeleid dat een scherm het zich op een lijnbron voor ca. 95% moet afdekken wil de overdrachtdemping niet meer dan 1 dB van die voor een oneindig lang scherm afwijken. De overdrachtdemping wordt ongeveer gehalveerd wanneer de afgeschermdde hoek 120° (oneindig-scherm-waarden tot 10 dB) tot 150° (bij oneindig-scherm-waarden van 20 dB) bedraagt. Wanneer hierbij met bodemdemping rekening wordt gehouden wordt het beeld gunstiger; ruwweg kan gezegd worden dat dezelfde vermindering t.o.v. een oneindig scherm optreedt bij ongeveer de helft van de hiervoor aangegeven hoeken (bron en ontvanger niet hoger dan enkele meters).

3.3.5 meteorologische invloeden

In de praktijk wordt de overdracht sterk beïnvloed door wind- en temperatuureffecten en turbulentie. Dit geldt voor de situatie met scherm in het algemeen niet op dezelfde wijze als voor de situatie zonder scherm zodat ook de tussenschakeldemping door dergelijke factoren wordt beïnvloed. Doordat de windsnelheid en de temperatuur met de hoogte variëren worden de geluidgolven afgebogen; naar boven toe bij normale temperatuurverdeling en tegenwind, naar beneden toe bij inverse temperatuurverdeling en meewind. Bij een windsnelheid van rond de 2 m/s blijkt het windeffect in het algemeen het temperatuureffect te overheersen. Door deze effecten zijn de hoeken waaronder de geluidgolven de schermrand naderen en waaronder deze worden afgebogen anders dan in het geval zonder wind-temperatuur afbuiging. In het geval van meewind schijnen de geluidgolven van een hogere bron afkomstig te zijn en door een hogere ontvanger te worden waargenomen; dit heeft tot gevolg dat de overdrachtdemping afneemt. In het geval van tegenwind is het omgekeerde het geval. De Jong (28) heeft modelmetingen in een windtunnel uitgevoerd. De meetresultaten blijken redelijk overeen te stemmen met berekende wind-tussenschakeldempingen, waarbij de schermwerking met wind werd berekend aan de hand van bovengenoemde schijnbronnen en ontvangers.

Een gelijksoortige berekening kan ook in het beschreven computerprogramma worden opgenomen. De wind-tussenschakeldemping blijkt van dezelfde orde van grootte te zijn (in omgekeerde richting) voor meewind als voor tegenwind van dezelfde sterkte en het effect neemt toe met toenemende windsnelheid. De vorm van het scherm is van weinig invloed. Windrichtingen evenwijdig aan het scherm blijken weinig invloed te hebben. Naast dit effect heeft de wind ook luchturbulentie tot gevolg, welke toeneemt met toenemende snelheid. Door deze turbulentie treedt behalve een grotere fluctuatie in de sterkte ook verstrooiing van het geluid op. Hierdoor vermindert de demping, vooral diep in het (scherm)schaduwgebied, en dit in toenemende mate voor hogere frequenties en grotere turbulentie (windsnelheid).

Hiermee hangt ook samen dat in de praktijk geen hogere waarden dan ca. 25 dB worden geconstateerd voor de extra overdrachtdemping, noch voor bodemdemping noch voor schermwerking. De (beperkte) informatie van Scholes (17) uit praktijkmetingen lijken bovenstaande resultaten uit de modelmetingen voor de wind-tussenschakeldemping te bevestigen.

De overige resultaten worden door Scholes echter gepresenteerd in de vorm van scherm-tussenschakeldempingen waardoor een ander beeld ontstaat (figuur 6). Voor meewind treden ongeveer dezelfde verschillen op, maar in het geval van tegenwind is op enige afstand het niveau zonder scherm door schaduwvorming al gereduceerd, zodat het te verwachten effect van het scherm niet meer volledig doorwerkt. Daardoor is het verschil met en zonder scherm minder groot dan zou kunnen worden verwacht en treedt voor ontvangerposities diep in dit schaduwgebied zelfs een vermindering van de schermwerking op ten gevolge van de genoemde limietwaarde voor extra demping.

4. CONCLUSIE

De beschikbare berekeningsmodellen voor bodemdemping en schermwerking kunnen in veel praktische gevallen een redelijk beeld geven van de werkelijkheid. Er zijn mogelijkheden tot verbetering en uitbreiding voor wat betreft het model van de bodem, de vorm en afmeting van het scherm en het (geometrisch) toepassingsgebied van de berekeningen. Het effect van meteorologische omstandigheden lijkt vooralsnog slechts globaal door berekeningen te kunnen worden aangegeven.

Delft, 23 mei 1975

Technisch Fysische Dienst

ir. E. Gerretsen

Literatuur

- (1) Gerretsen, E.: "De invloed van verschillende factoren op de geluidvoortplanting over grote afstanden", TPD-rapport nr. 781, sept. 1972
- (2) Delany, Bazley: "A note on the effect of ground absorption on the measurement of aircraft noise", Journal of Sound and Vibration 16 (1971), blz. 315
- (3) Delany, Bazley: "Monopole radiation in the presence of an absorbing plane", Journal of Sound and Vibration 13 (1970), blz. 269
- (4) Ingard, U.: "On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane", JASA 23 (1951), blz. 329
- (5) Brekhovskikh, L.M.: "Waves in Layered Media, Academic, New York, 1960
- (6) Delany, Bazley: "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", Applied Acoustics 3 (1970), blz. 105
- (7) Gerretsen, E.: "De invloed van de bronhoogte op bodemdemping", TPD-rapport nr. 207.347/2, juli 1973
- (8) Jonasson, H.G.: "Sound reduction by barriers on the ground", Journal of Sound and Vibration 22 (1972), blz. 113
- (9) Dickinson, Doak: "Measurements of the normal acoustic impedance of ground surfaces", Journal of Sound and Vibration 13 (1970), blz. 309
- (10) Pao, Evans: "Sound attenuation over simulated ground cover", JASA 49 (1971), blz. 1069
- (11) Maekawa, Z.: "Noise reduction by screens", Applied Acoustics 1 (1968), blz. 157
- (12) Bowman, Senior, Uslenghi: "Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes", North-Holland Publishing comp., Amsterdam
- (13) Pierce, A.D.: "Diffraction of sound around corners and over wide barriers", JASA 55 (1974), blz. 941
- (14) Fujiwara, Ando, Maekawa: "Attenuation of a spherical sound wave diffracted by a thick plate", Acustica 28 (1973), blz. 341
- (15) Jonasson, H.G.: "Diffraction by wedges of finite acoustic impedance with application to depressed roads", Journal of Sound and Vibration 25 (1972), blz. 577

- (16) Kurze, U.J.: "Noise reduction by barriers", JASA 55 (1974), blz. 504
- (17) Scholes, Salvidge, Sargent: "Field performance of a noise barrier",
Journal of Sound and Vibration 16 (1971),
blz. 627
- (18) Scholes, Salvidge, Sargent: "Barriers and traffic noise peaks",
Applied Acoustics 5 (1972), blz. 205
- (19) Maekawa, Z.: "Environmental sound propagation", Proceedings of 8th ICA
Invited papers, London 1974
- (20) Butler, G.F.: "A note on improving the attenuation given by a noise
barrier", Journal of Sound and Vibration 32 (1974), blz. 367
- (21) Maekawa, Z. e.a.: "Noise reduction by screens of various shapes",
Proceedings of 7th ICA, Budapest 1971, paper 21N3
- (22) Jonasson, H.G.: "A theory of traffic noise propagation with applications
to L_{eq} ", Journal of Sound and Vibration 30 (1973), blz. 289
- (23) Kurze, Anderson: "Sound attenuation by barriers", Applied Acoustics 4
(1971), blz. 35
- (24) Koyasu, Yamashita: "Scale model experiments on noise reduction by
acoustic barrier of a straight line source",
Applied Acoustics 6 (1973), blz. 233
- (25) Lutz, P.: "Zur Abschirmwirkung von Gebäuden", Proc. DAGA-Tagung,
Stuttgart, september 1972
- (26) Moerkerken, A.: Afstudeerverslag, medio 1975
- (27) Scholes, Sargent: "Designing against noise from road traffic",
Applied Acoustics 4 (1971), blz. 203
- (28) De Jong, Stusnick: "Scale model studies of the effect of wind on acoustic
barrier performance", Proc. Internoise 74, Kopenhagen,
1974
- (29) Wise, W.H.: "Asymptotic dipole radiation formulas", Bell system
Techn. J 8, (1929), blz. 622

Appendix A: Bodemdemping

De geluiddruk bij de ontvanger kan worden voorgesteld door:

$$p = A \left\{ \frac{e^{jkR_1}}{kR_1} + Q \frac{e^{jkR_2}}{kR_2} \right\} \quad (A1)$$

Hierin is A een constante waarmee de sterkte van de puntbron wordt beschreven en Q de relatieve sterkte van de spiegelbron. Verdere symbolen worden in de figuur gedefinieerd. In het vervolg zal $A = 1$ worden gesteld.

N.B. Op deze wijze wordt een puntbron beschreven met een bepaalde constante geluiddruk op een golflengte afstand; het afgegeven vermogen $(= \frac{4\pi A^2}{k^2 \rho c})$ is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de frequentie.

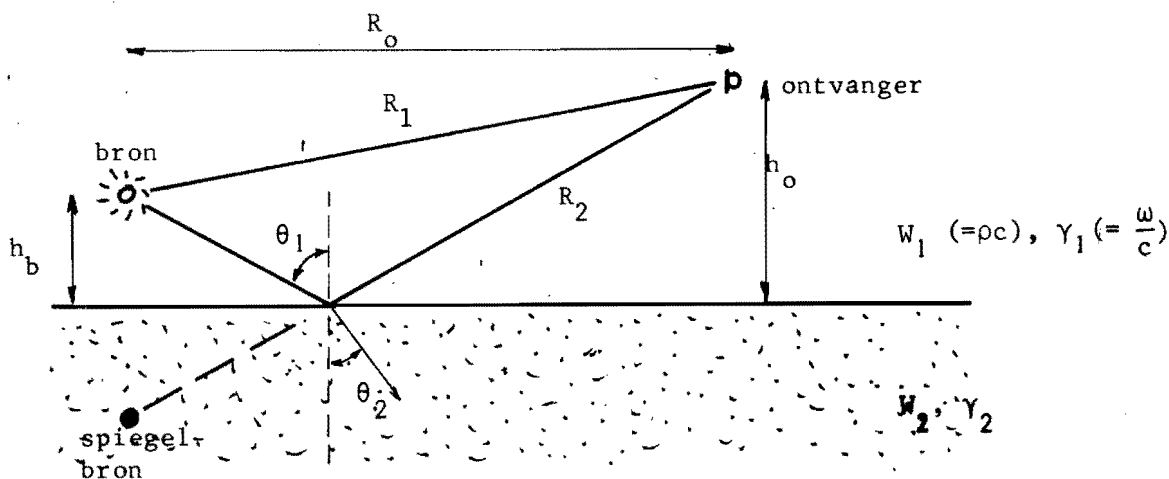
Voor een bron met een constant vermogen moet A evenredig zijn met de frequentie. Voor de beschrijving van een bron met een constant volumedebiet U_0 moet A worden vervangen door $\frac{k^2 \rho c U_0}{4\pi}$.

Op deze wijze worden geidealiseerde puntbronnen beschreven. In het algemeen zullen A en U_0 nog afhankelijk zijn van de frequentie.

Voor twee situaties is een exacte formulering bekend, waaruit deze Q kan worden afgeleid.

Sommerfeld/Van der Pol (3) beschouwen de bodem als een half-oneindig homogeen medium Weyl (3) geeft een formulering voor een willekeurige bodem, gekarakteriseerd door een vlakke golf reflectiecoëfficiënt R_v .

Met behulp van reeksontwikkelingen, gebruik makend van de vlakke golf reflectiecoëfficiënt, zijn op basis van beide formuleringen oplossingen gevonden (Ingard, Rudnick, Norton (3, 4)) waarbij een aantal beperkende aannamen nodig zijn.



Een eenvoudige vorm is gevonden door Wise (3, 30) voor grote afstanden, eindige bronhoogte en een homogene bodem met een grotere voortplantingscoëfficiënt dan lucht. In dat geval blijkt Q gelijk te zijn aan de vlakke golf reflectiecoëfficiënt, die als volgt kan worden geschreven:

$$R_v = \frac{W_2 \cos \theta_1 - \rho c \cos \theta_2}{W_2 \cos \theta_2 + \rho c \cos \theta_2} \quad (A2)$$

De hoek θ_2 volgt uit de wet van Snellius

$$\gamma_2 \sin \theta_2 = k_1 \sin \theta_1 \quad (A3)$$

Vergelijking tussen deze asymptotische oplossing en meer exacte oplossingen geeft aan dat naarmate bron en ontvanger dichter bij het oppervlak liggen de afstand tussen beide steeds groter moet zijn om overeenstemming te geven. Anders geformuleerd kunnen de beperkingen als volgt ruwweg worden beschreven:

$$R_o \geq 20 \lambda \quad \text{en} \quad (h_o + h_b) \geq \lambda \quad (A4)$$

Op basis van het andere model is door Brekhovskikh (5) een asymptotische benadering gegeven met minder beperkingen:

$$Q = R_v - j \frac{1}{kR_2} \left[\frac{1}{2}(1 - \cos^2 \theta_1) R'_v - \cos \theta_1 R''_v \right] \quad (A5)$$

waarin de accenten afgeleid van R_v naar $\cos \theta_1$ aangeven.

De enige beperking van grote afstand ($kR_2 \gg 1$) blijkt voor een plaatselijk reagerende bodem ($\cos \theta_2 = 1$) nader te kunnen worden aangegeven als $kR_2 > \left| \left(\frac{W_2}{\rho c} \right)^2 \right|$. Ook in dit geval kan deze eis worden ingeperkt, wanneer tevens de bronhoogte tot eindige waarde worden beperkt.

In dat geval geldt globaal:

$$R_o \geq 10 \lambda \quad (h_o + h_b) \geq \lambda/3 \quad (A6)$$

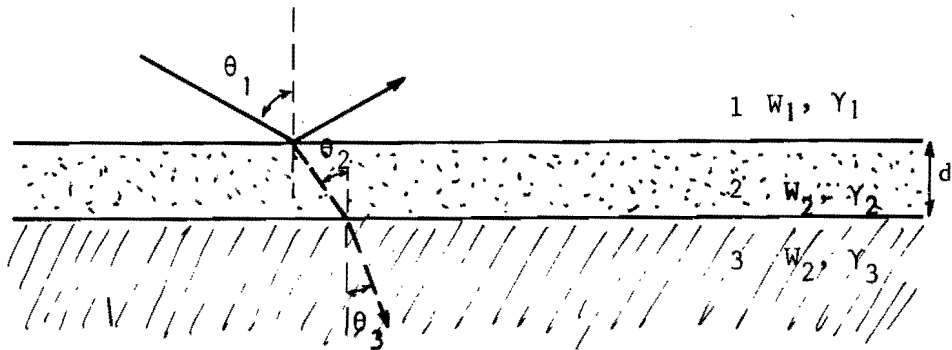
Een nadere en nauwkeuriger vergelijking tussen deze verschillende berekeningen en hun beperkingen zal worden gegeven door Moerkerken (26).

Pao & Evans (10) gebruiken de benadering van Brekhovskikh met een gelaagd bodemmodel. De reflectiecoëfficiënt daarvoor wordt gegeven door:

$$R_v = \frac{R_{12} + R_{23} e^{-2jd\gamma_2 \cos \theta_2}}{1 + R_{12} \cdot R_{23} e^{-2jd\gamma_2 \cos \theta_2}} \quad (A7)$$

R_{ij} is de reflectiecoëfficiënt volgens formule (A2) voor de grenslaag van medium i naar j , d de dikte van de tussenlaag; θ_2 en θ_3 volgen uit formule (A3).

N.B. De formule die Pao en Evans geven voor R_v is niet juist. Dit blijkt al direct wanneer de limietwaarden worden bekeken voor $d \rightarrow 0$ en $d \rightarrow \infty$.



Het rekenprogramma is gebaseerd op de benadering van Wise waarbij de bodemgegevens zijn ontleend aan Delany en Bazley (6). Onderstaand worden de gebruikte formules samengevat:

$$p = \frac{e^{-jkR_1}}{kR_1} \left[1 + R_v \frac{R_1}{R_2} e^{jk(R_2 - R_1)} \right] \quad R_v = \frac{W_2 \cos \theta_1 - \rho c \cos \theta_2}{W_2 \cos \theta_1 + \rho c \cos \theta_2} \quad (A8)$$

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \frac{k^2}{\gamma^2} \sin^2 \theta_1}$$

$$\frac{W_2}{\rho c} = R_w + jX_w \quad \frac{\gamma_2}{k} = \beta + j\alpha \quad \theta_1 = \arctg \frac{R_o}{h_o + h_b}$$

voor $f \geq 180$ Hz

$$R_w = 1 + 5,1 \cdot 10^{-2} \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,75} \quad \alpha = 0,175 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,59}$$

$$X_w = 7,69 \cdot 10^{-2} \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,73} \quad \beta = 1 + 8,59 \cdot 10^{-2} \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,70}$$

voor $f \leq 180$ Hz

• $W_2 \rightarrow \infty$ geeft $R_v = 1$

Voor de berekening van de bodemdemping moeten de volgende grootheden worden gegeven:

bronhoogte, ontvangerhoogte, bron-ontvangerafstand (R_o),
stromingsweerstand bodem.

Wanneer de demping in dB(A) moet worden berekend moet een dB(A) gecorrigeerd bronspectrum in tertsen worden opgegeven, met het dB(A) bronniveau.

N.B. In verschillende artikelen worden andere uitgangspunten en notaties gebruikt die soms verwarrend werken. Zo is het bij interferometer- en absorptieberekeningen gebruikelijk de tijdsafhankelijkheid $e^{j\omega t}$ aan te houden. Bij puntbron berekeningen wordt echter meestal gerekend met $e^{-j\omega t}$. Dit laatste resulteert in de toegevoegde complexe waarde voor de impedantie en de voortplantingscoëfficiënt ten opzichte van de eerste aanname. Daarnaast wordt voor de plaatsafhankelijkheid gebruikt e^{jkR} , $e^{\gamma R}$ of $e^{j\gamma R}$ hetgeen extra aandacht vraagt voor de betekenis van de reële en imaginaire delen van γ . In dit rapport is consequent $e^{-j\omega t}$ aangehouden met $e^{j\gamma R}$ als plaatsafhankelijkheid, waarbij γ door k (reëel) wordt vervangen voor voortplanting in lucht.

Appendix B: Schermwerking

1. dun scherm

De formulering van MacDonald (12) voor de geluiddruk bij diffractie van een puntbron aan een dun scherm kan voor enige afstand ($kR_1 \gg 1$) tussen bron en ontvanger worden gesplitst in een diffractie deel (p_d) en het geometrisch optisch deel (p_{go}):

$$p = p_{go} + p_d \tag{B1}$$

$$p_{go} = \eta (\pi + \phi_o - \phi) \frac{e^{ikR}}{kR} + \eta (\pi - \phi_o - \phi) \frac{e^{ikS}}{kS} \quad \begin{array}{l} - = \text{zacht scherm} \\ + = \text{hard scherm} \end{array} \quad \eta(a) = \begin{array}{l} 1 \quad a > 0 \\ 0 \quad a < 0 \end{array} \tag{B2}$$

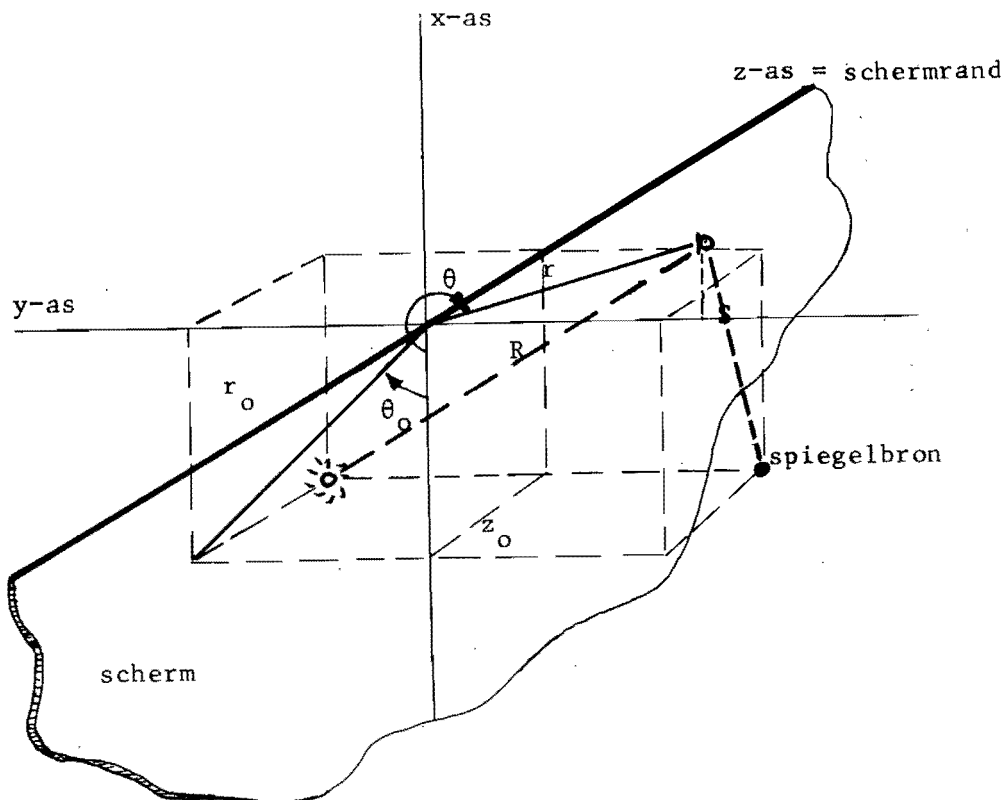
$$p_d = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{-i\pi/4} \left[\text{sgn}(\pi + \phi_o - \phi) \frac{e^{ikR}}{\sqrt{k(R_1+R)}} F(|m|) + \text{sign}(\pi - \phi_o - \phi) \frac{e^{ikS}}{\sqrt{k(R_1+S)}} F(|m'|) \right] \tag{B3}$$

waarin $F(\tau)$ de Fresnelintegraal is: $\frac{df}{d\tau} = \int_{\tau}^{\infty} e^{it^2} dt$ en $m = \pm \sqrt{k(R_1 - R)}$
 $m' = \pm \sqrt{k(R_1 - S)}$ (B4)

Deze integraal wordt gegeven door de volgende reeksontwikkeling)

$$F(\tau) = \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{\tau}{1} - \frac{\tau^5}{5 \cdot 2!} + \frac{\tau^9}{9 \cdot 4!} \dots \right) \right) + j \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{\tau^3}{3 \cdot 1!} - \frac{\tau^7}{7 \cdot 3!} + \dots \right) \right)$$

Voor $\tau \rightarrow \infty$ kan in 1^e orde worden volstaan met $F(\tau)_{\infty} = \frac{j}{2\pi} e^{j\tau^2}$



$$R^2 = r^2 + r_o^2 - 2rr_o \cos(\theta - \theta_o) + z_o^2 = (h_o - h_b)^2 + R_o^2 + z_o^2$$

$$R_1^2 = (r + r_o)^2 + z_o^2$$

$$S^2 = r^2 + r_o^2 - 2rr_o \cos(\theta + \theta_o) + z_o^2 = (h_o - h_b)^2 + (R_o - R_{bs})^2 + z_o^2$$

$$r^2 = (h_s - h_o)^2 + R_{os}^2$$

$$R_o^2 = (h_s - h_b)^2 + R_{bs}^2$$

Als $k(R_1 - R) \gg 1$, $k(R_1 - S) \gg 1$ en $kR_1 \gg 1$ dan volgt uit B3 en B4, bij verwaarlozing van de $\bar{+}$ term:

$$p_d \sim - \frac{e^{i\pi/4}}{2\sqrt{\pi}} \frac{e^{ikR_1} \sqrt{R_1}}{kR_1} \frac{1}{2krro} \frac{1}{\cos^{\frac{1}{2}}(\phi - \phi_o)} \quad (B5)$$

Verwaarlozing van de \pm term komt overeen met de aanname van een volledig absorberend scherm. Formule (B5) is direct vergelijkbaar met de anders afgeleide Kirchhoff-theorie (11).

Hierbij blijkt voor praktische situaties de schermwerking voor een hard scherm ca. 2 dB te worden overschat (8, 16).

2. scherm op bodem

In het geval het scherm op een bodem is geplaatst kan de situatie worden beschreven met een spiegelbron en spiegelontvanger, met resp. een relatieve sterkte Q_{b2} en Q_{o2} .

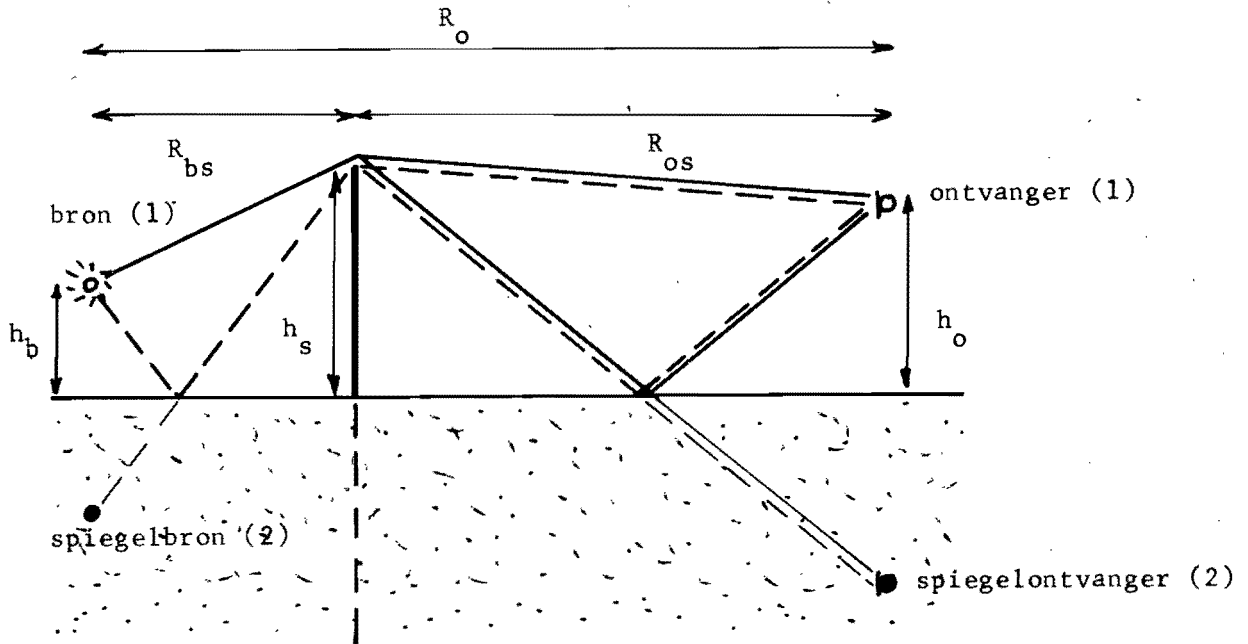
Het veld wordt dan opgebouwd volgens:

$$p = p_{go} + p_d(11) + p_d(12) + p_d(21) + p_d(22) \quad (B6)$$

waarin $p_d(ij)$ wordt gegeven door formule (B3), vermenigvuldigd met

$$Q_{bi} \times Q_{oj}$$

Q kan volgens Appendix A in veel gevallen gelijk worden genomen aan R_v .



3. absorberend scherm

Wanneer het scherm niet (oneindig) hard is (een zacht scherm is niet realiseerbaar) dan kan de ten opzichte van het scherm gespiegelde bron S op dezelfde manier als bij bodemdemping in rekening worden gebracht door de spiegelbronsterkte niet 1, maar gelijk aan Q te nemen. In dat geval moet in formule (B3) de ± term met Q worden vermenigvuldigd. Aangezien in veel gevallen deze spiegelbron te verwaarlozen is (voor Q = 0 meestal ca. 2 dB meer demping dan voor Q = 1) lijkt deze uitbreiding van de berekening niet zeer zinvol. Ook hier zou Q weer door R_v kunnen worden vervangen.

4. wigvormig scherm

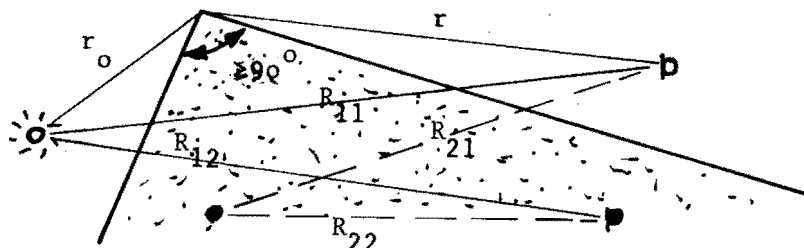
De diffractie aan een wigvormig scherm is ook exact geformuleerd door MacDonald (12). Voor wiggen met een tophoek groter dan 90° en bron en ontvanger op voldoende grote afstand van de rand van de wig, leidt Jonasson (15) een benaderende oplossing af die tot een gelijksoortige formule leidt als (B3) voor een dun scherm (bij verwaarlozing van de tweede term), gebruikmakend van een t.o.v. de wigoppervlakken gespiegelde bron en ontvanger:

$$P_d = \sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{-i\pi/4} \frac{e^{ikR_1}}{\sqrt{k(R_1 + (R)_{11})}} \sum_{m,n=1}^2 (\pm 1)^{m-n} B_{mn} F(\tau_{mn}) e^{-j\tau_{mn}^2} \quad (B7)$$

$$\text{met } B_{mn} = \sqrt{\frac{R_1 + (R)_{11}}{R_1 + R_{mn}}} \quad \tau_{mn} = \pm \sqrt{k(R_1 - R_{mn})}$$

Formule (B7) geldt voor het schaduwgebied, daarbuiten moet de Fresnel-integraal worden vervangen door $\sqrt{\pi e^{i\pi/4}} - F(|\tau_{mn}|)$.

Onder dezelfde aanname blijkt deze formulering overeen te komen met de asymptotische benadering van de oplossing die recentelijk door Pierce (13) is gegeven.

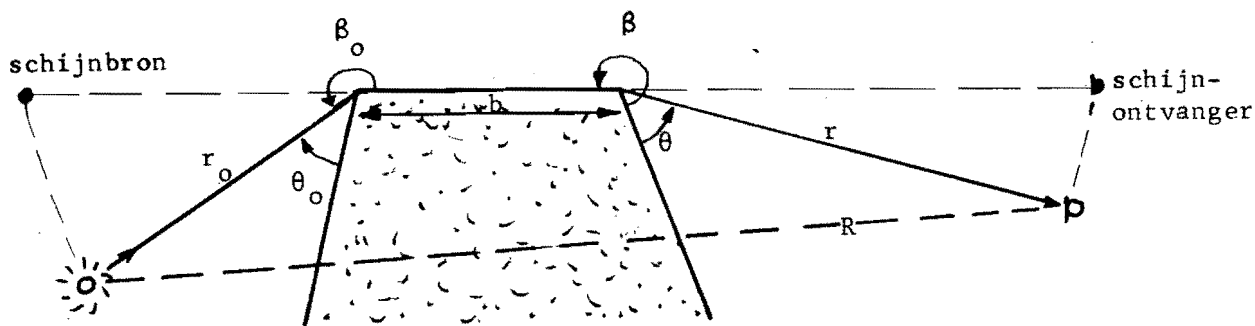


Voor een absorberende wig (impedantie W) volgt in dit model de oplossing door in formule (B7) de $(\pm)^{m-n}$ term te vervangen door Q_{ij} op dezelfde wijze als in het voorgaande.

De beschrijving van een scherm als wig is alleen zinvol wanneer de vlakken van de wig in feite de begrenzing vormen waarboven bron en ontvanger zich bevinden. De toepassing van Jonasson op een verdiepte weg met een (absorberend) talud is een van de situaties die hierin zijn in te passen. Een ander toepassingsgebied is de diffractie om hoeken, bv. van gebouwen.

5. breed scherm

Een oplossing voor de (dubbele) diffractie aan een breed scherm wordt gegeven door Pierce (13) en Fujiwara é.a. (14). Beide oplossingen stelen op oplossingen van analoge problemen en het logisch koppelen daarvan.



De oplossing van Pierce kan vrij eenvoudig worden geschreven in een vorm die overeenkomt met formule (B3, B7):

$$P_d = \frac{e^{ikR_1} e^{-i\pi/2}}{kR_1} \frac{2}{\pi} \left[e^{-j(X_>^2 + B^2 X_<^2)} \cdot F(1X_>1) \cdot F(1B^2 X_<1) \right]$$

$$X = \sqrt{\frac{kr_o r'}{2R_1}} \frac{\cos \frac{\pi^2}{\beta_o} + \cos \frac{\pi\theta}{\beta}}{\frac{\pi}{\beta} \sin^2 \frac{\pi}{\beta}} \quad R_1 = r_o + r + b \quad (B8)$$

$$X_o = \sqrt{\frac{kr_o' r}{2R_1}} \frac{\cos \frac{\pi^2}{\beta} + \cos \frac{\pi\theta_o}{\beta_o}}{\frac{\pi}{\beta_o} \sin^2 \frac{\pi}{\beta_o}} \quad r'(o) = r(o) + b$$

$$B = \sqrt{\frac{bR_1}{r_o' r'}}$$

Wanneer bron en ontvanger zich beide voldoende ver van het denkbeeldige vlak over de top van de trapezoïde bevinden vereenvoudigt dit tot (gebruikmakend van de limietwaarde voor de Fresnel-integraal (B4)):

$$P_d = \frac{e^{ikR_1}}{kR_1} \frac{1}{\pi^2 B X X_o} \quad (B9)$$

Deze formule kan vrij eenvoudig worden geïnterpreteerd als het resultaat van twee onafhankelijke diffracties met een schijnbron en ontvanger zoals aangegeven in de figuur.

De overdrachtdemping van een breed scherm kan dan worden aangegeven als:

$$D = D_1 + D_2 + 20 \log \frac{R_1}{R} - 6 \quad (B10)$$

waarin $D_{1,2}$ de beide afzonderlijke diffracties betreffen die bv. ook met een van de bekende empirische methoden voor een dun scherm kunnen worden bepaald (Kurze (16)).

N.B. De hier genoemde berekeningen hebben alleen betrekking op de geluiddruk tengevolge van diffractie. Afhankelijk van de geometrie zal in sommige gevallen ook rekening moeten worden gehouden met direct en gereflecteerd geluid (zie bv. Pierce), zoals dat wel is opgenomen in de formule (B3) en (B7) voor een dun scherm en een wig.

Het computerprogramma voor de berekening van de overdrachts- en tussenschakeldemping van een scherm is gebaseerd op de formules B1, 2, 3 en 6, waarbij de spiegelbronsterkte wordt bepaald overeenkomstig Appendix A. Beide berekeningen zijn samen opgenomen in één programma. De overdrachtdemping wordt gegeven door:

$$D_{vv} = -20 \log |kR \cdot p \text{ (formule (B3))}|$$

De tussenschakeldemping door:

$$D_t = -20 \log \left| \frac{p \text{ (formule (B6))}}{p \text{ (formule (A8))}} \right|$$

Als invoergegevens zijn nodig:

bronhoogte, dwarsafstand bron t.o.v. vlak door ontvanger | op scherm
afstand bron-scherm, stromingsweerstand bodem daartussen, afstand ontvangerscherm, ontvangershoogte, stromingsweerstand na scherm
schermhoogte, stromingsweerstand zonder scherm
onder- en bovenfrequentie waartussen berekeningen moeten worden uitgevoerd.

In geval de berekeningsresultaten ook in dB(A) moeten worden gegeven:

- dB(A) gecorrigeerd bronspectrum in tertsen en dB(A) waarde daarvan
- eventueel luchtdemping per terts, per 1000 m.

Uitgevoerd worden deze invoergegevens, met enige extra afgeleide informatie en:

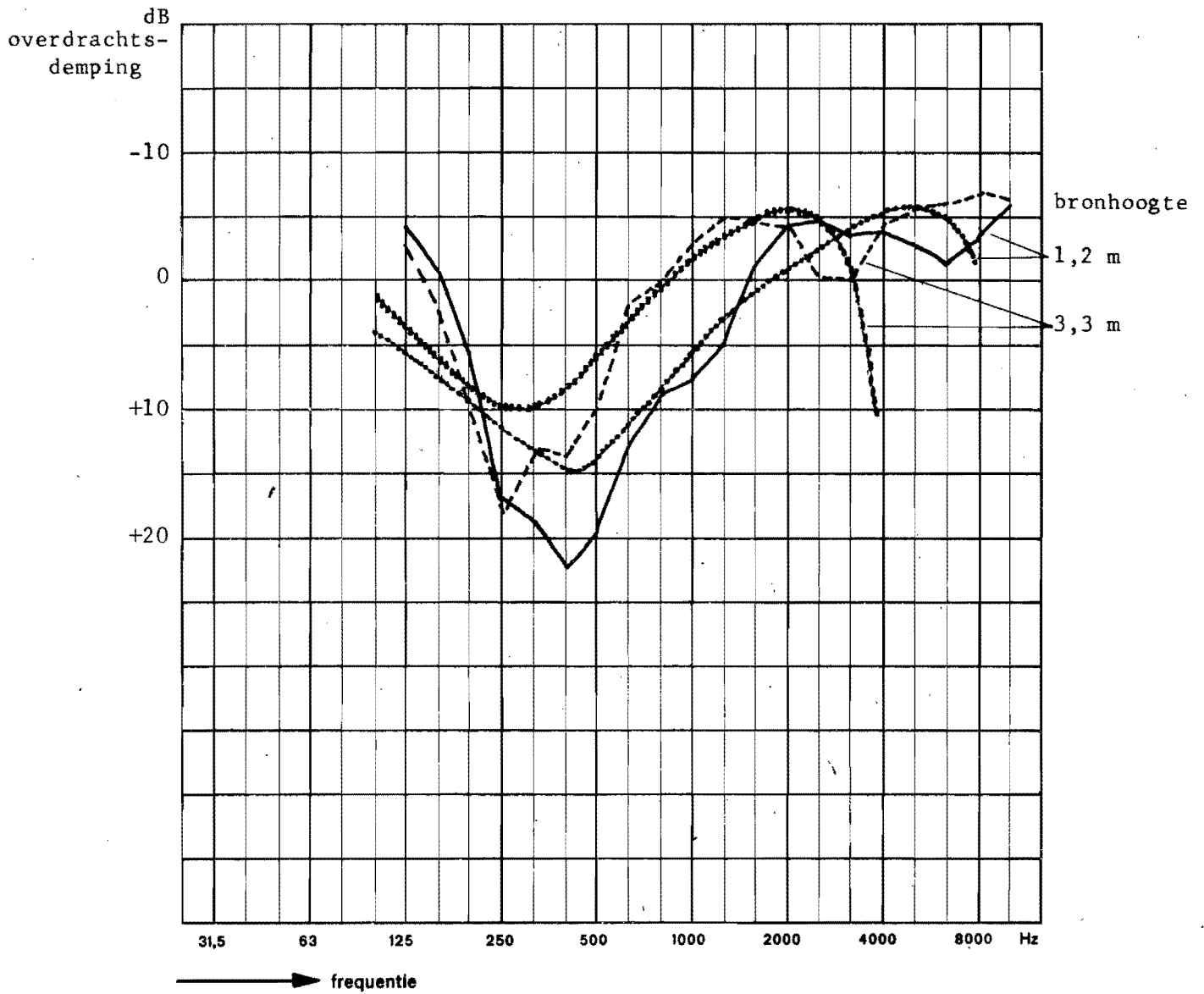
tussenschakeldemping

overdrachtdemping

overdrachtdemping volgens Maekawa-Kurze

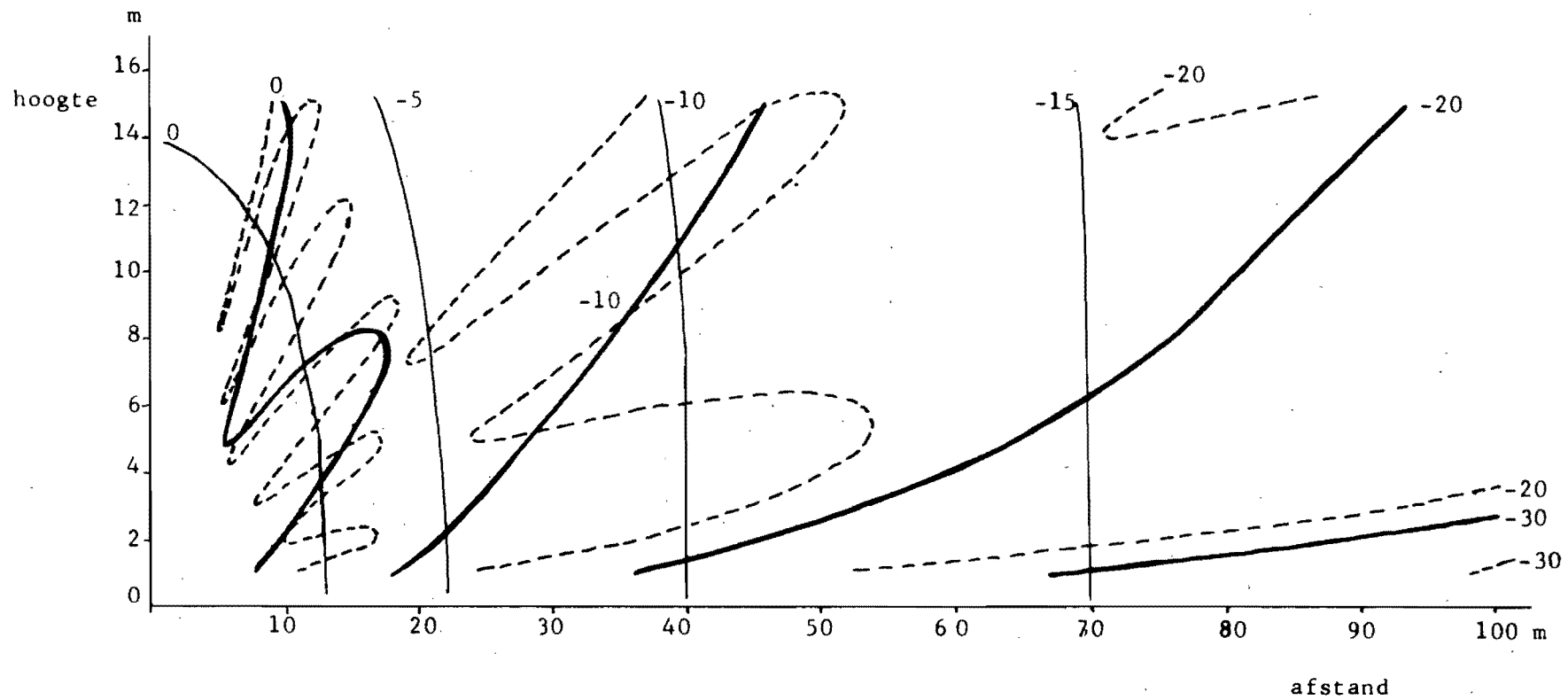
bodemdemping zonder scherm

Fresnel-getal.

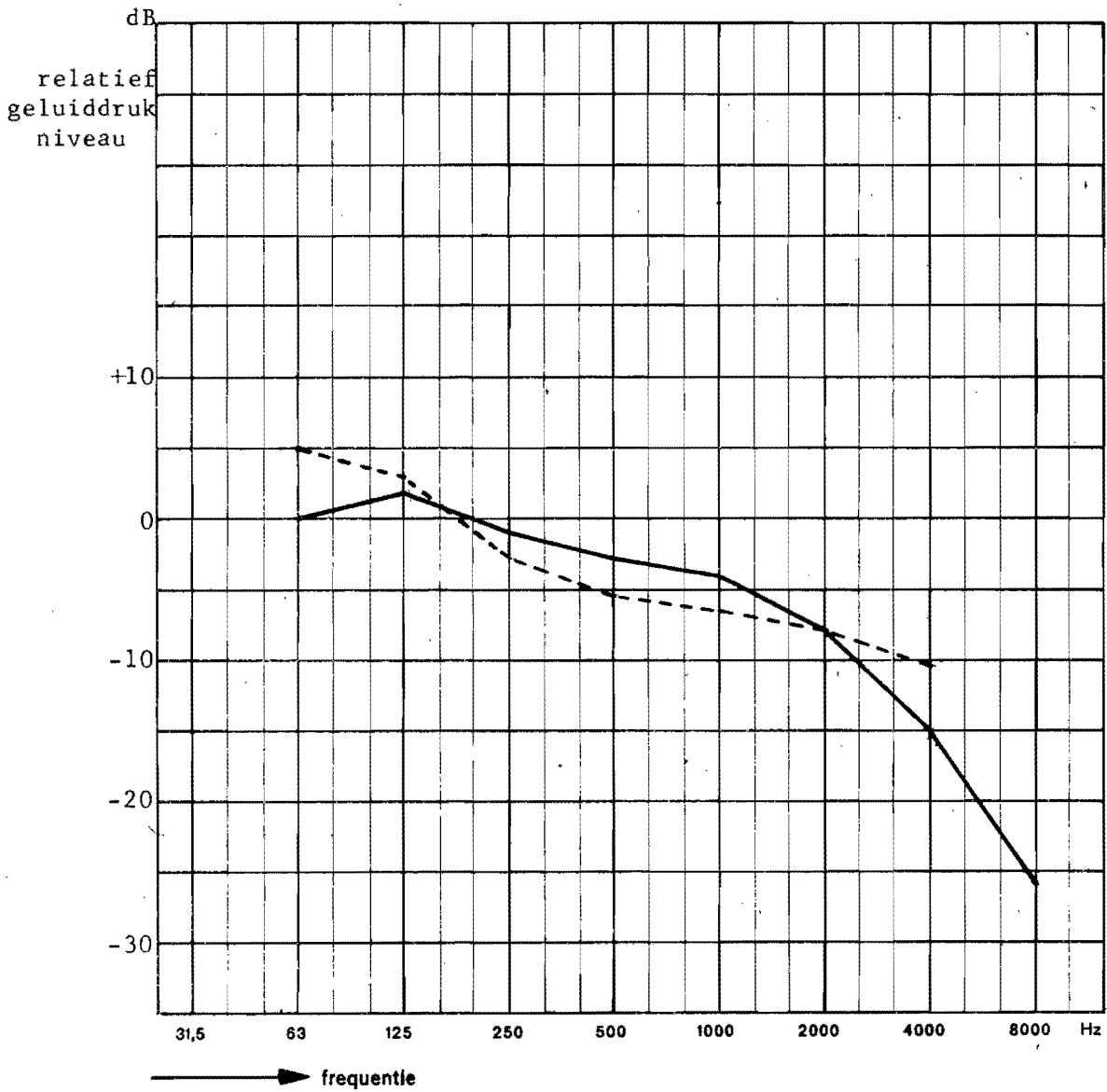


Figuur 1: Gemeten en berekende overdrachtsdemping boven grasland over 100 m (7); ontvangerhoogte 1,2 m; bronhoogte 1,2 en 3,3 m

- gemeten
- berekend

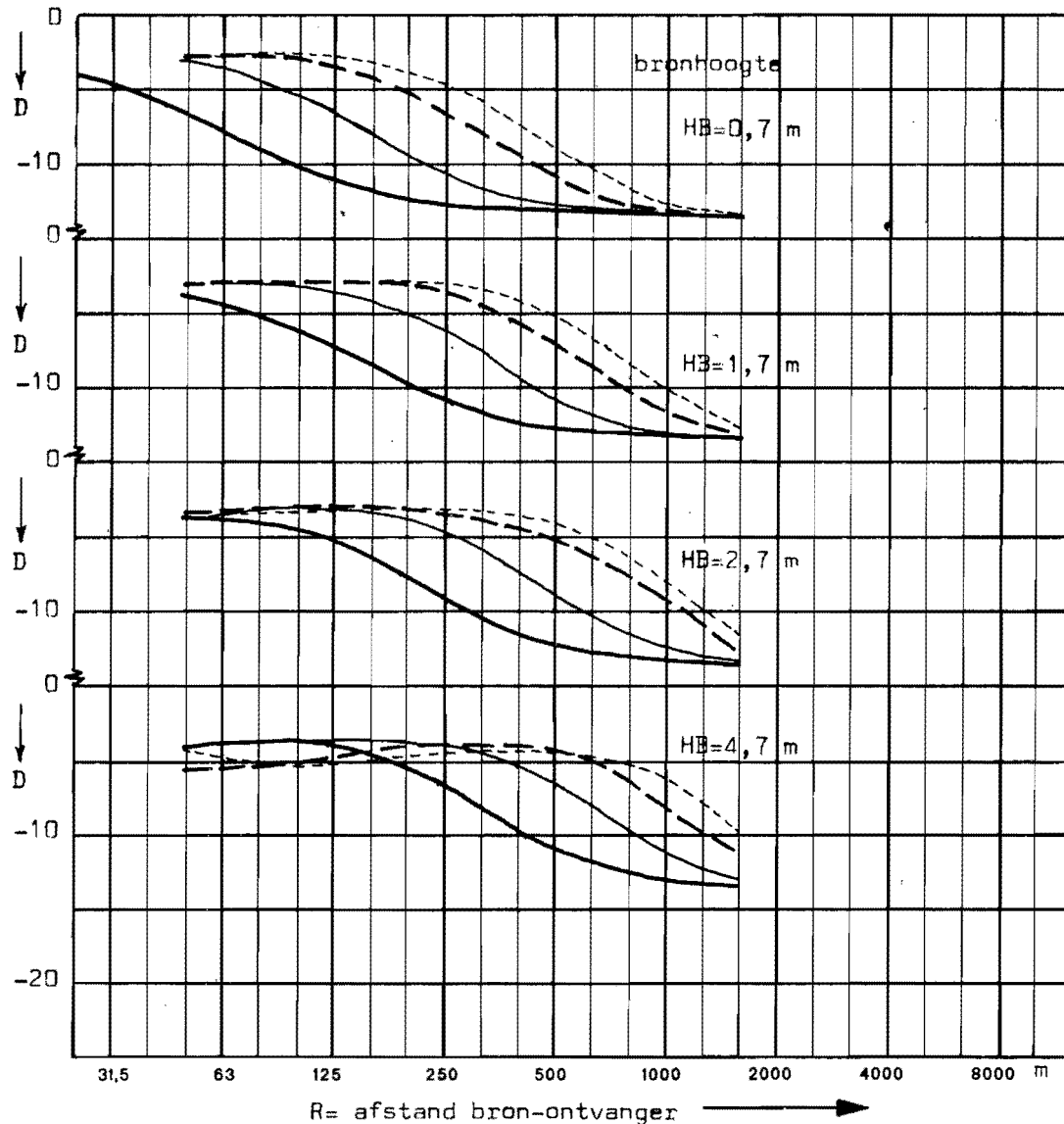


Figuur 2: Lijnen van gelijk geluiddruk niveau (willekeurige referentiedruk) boven een harde bodem met bron op 1,5 m (—), boven "grasland" met bron op 0,75 m (---), boven "grasland" met bron op 2,25 m (---). Frequentie 500 Hz



Figuur 3: Relatief octaafspectrum van het TPD-standaard verkeerslawaai (—) en Scholes-standaard verkeerslawaai (---) bij gelijk geluid-niveau (0 dB(A))

dB(A) OVERDRACHTSDEMPING T.O.V. HARD VLAK in dB(A) voor VERKEERSLAWAAI



——— 1,5 m }
 - - - - 4,0 m } ontvanger-hoogte HO
 - - - - 9,0 m }
 - · - · 14,0 m }

BENADERINGS FORMULE:

de demping is gelijk aan de middelste van de volgende drie getallen:

$$\begin{aligned}
 D_n &= -4 \\
 D_n &= -13 \\
 D_n &= 15 + 5 \log(HB) + 14 \log\left(\frac{HB + HO}{R}\right)
 \end{aligned}$$

Figuur 4: Overdrachtsdemping voor verkeerslawaai bij voortplanting over grasland t.o.v. een hard vlak; luchtdemping verdisconteerd.

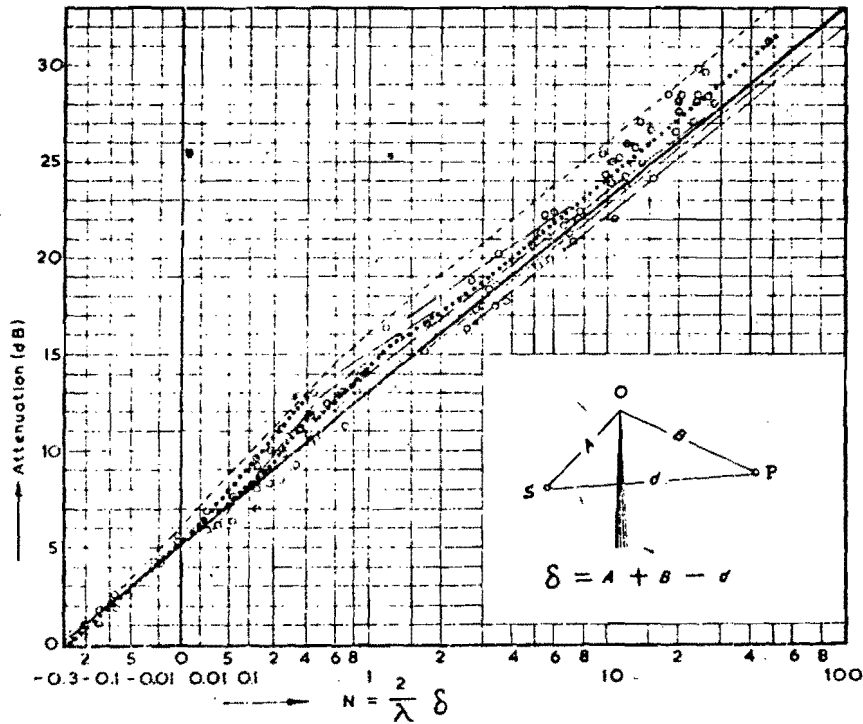


Fig. 4. Sound attenuation by a semi-infinite screen in free space. Horizontal scale, logarithmic scale in the region of $N < 1$, adjusted so that the experimental curve becomes a straight solid line in the region of $N > 1$. Depending on whether $N > 0$ or $N < 0$, the receiving point P lies in the illuminated region or in the geometrical shadow, respectively. Attenuation is relative to propagation in free space. - - - - - , Redfearn's theory; ———, Maekawa's work; - - - - - , Kirchhoff's theory; o, experimental value measured by pulsed tone; **MacDonald's theory.**

Figuur 5: Overdrachtdemping van een dun scherm; vergelijking tussen verschillende benaderingen en Maekawa's meetresultaten. (Overgenomen uit (11) met ingetekend MacDonaldis theorie)

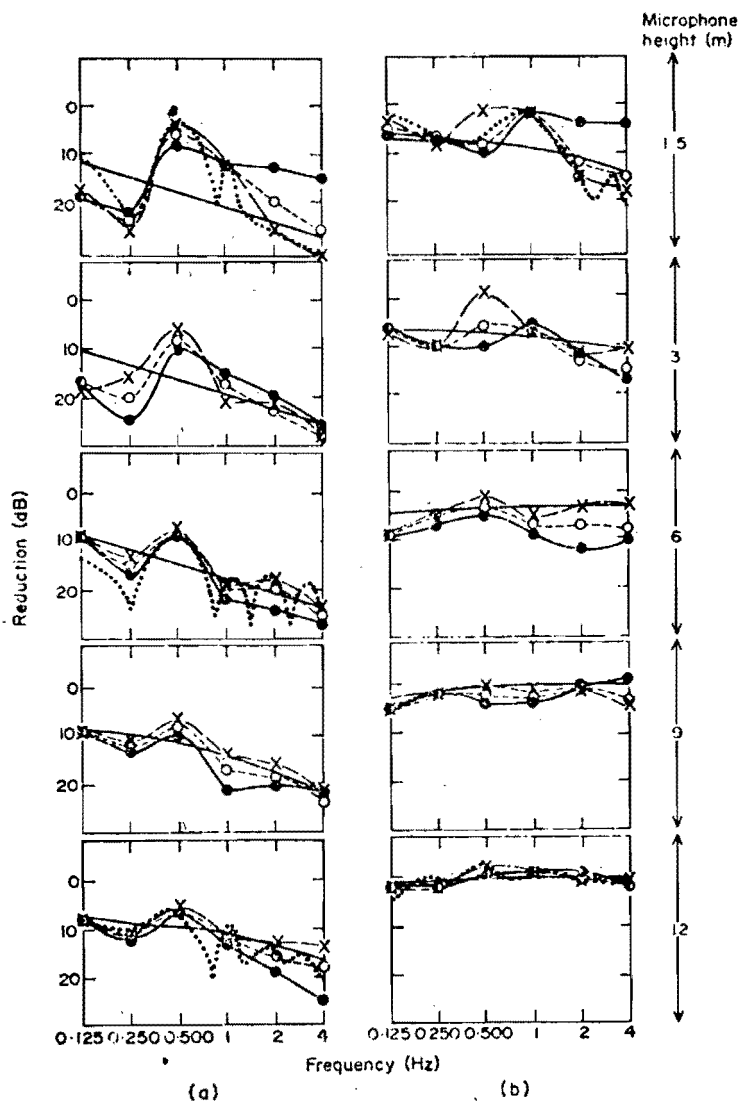
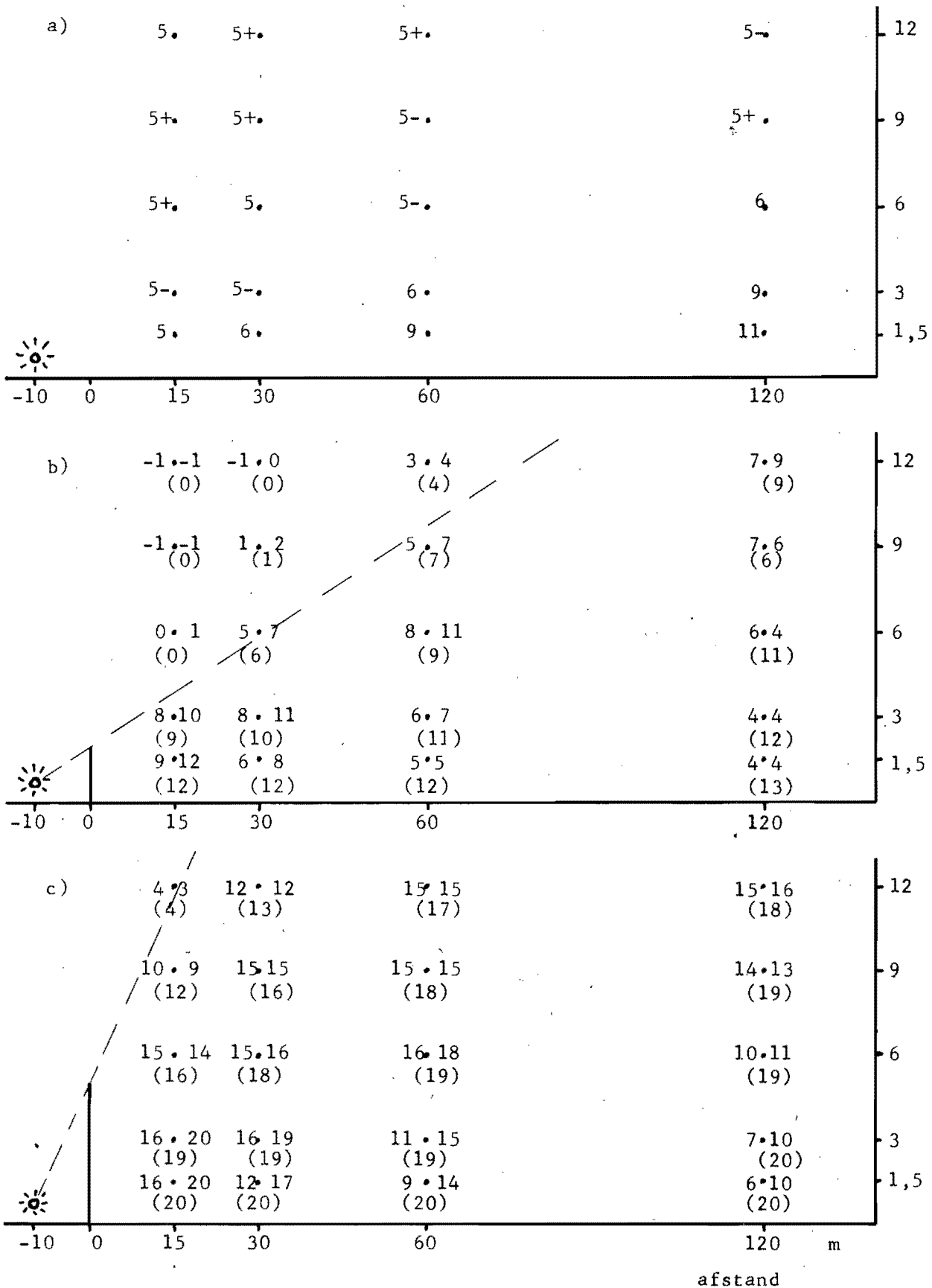


Figure 6. Reductions due to barrier, based on measured levels without barrier. Source 10 m and microphone 30 m from barrier. (a) Barrier 4.9 m high; (b) barrier 1.8 m high. ●—●, Negative wind, -5 ms^{-1} ; ○—○, zero wind; x—x, positive wind, $+5 \text{ ms}^{-1}$; —, theoretical [4]; berekend met bodem,

Figuur 6: Tussenschakeldemping van een scherm, gemeten door Scholes e.a. (17).
 Vergelijking met overdrachtdemping volgens Maekawa en ingetekende tussenschakeldemping volgens Jonasson.



Figuur 7: Damping in dB(A) voor verkeerslawaaai, gemeten (18) en berekend; bodemdamping (a), bodem- en schermdamping (b, c). Links van de stip berekende, rechts gemeten tussenschakeldamping, tussen haken berekende schermoverdrachtdamping

t.b.v. documentatie-
systemen

1. VL-DR-21-01.
2. Geluidoverdracht over grote afstanden (literatuur-
studie en afscherming).
3. Ir. E. Gerretsen.
4. Technisch Fysische Dienst TNO-TH.
5. Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne.
6. Onderzoek naar de geluidoverdracht op grote af-
standen.
8. Mei 1975.
12. Deelrapport 1975.
16. 32 bladzijden.

t.b.v. documentatie-
systemen

1. VL-DR-21-01.
2. Geluidoverdracht over grote afstanden (literatuur-
studie en afscherming).
3. Ir. E. Gerretsen.
4. Technisch Fysische Dienst TNO-TH.
5. Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne.
6. Onderzoek naar de geluidoverdracht op grote af-
standen.
8. Mei 1975.
12. Deelrapport 1975.
16. 32 bladzijden.

t.b.v. documentatie-
systemen

1. VL-DR-21-01.
2. Geluidoverdracht over grote afstanden (literatuur-
studie en afscherming).
3. Ir. E. Gerretsen.
4. Technisch Fysische Dienst TNO-TH.
5. Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne.
6. Onderzoek naar de geluidoverdracht op grote af-
standen.
8. Mei 1975.
12. Deelrapport 1975.
16. 32 bladzijden.

t.b.v. documentatie-
systemen

1. VL-DR-21-01.
2. Geluidoverdracht over grote afstanden (literatuur-
studie en afscherming).
3. Ir. E. Gerretsen.
4. Technisch Fysische Dienst TNO-TH.
5. Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne.
6. Onderzoek naar de geluidoverdracht op grote af-
standen.
8. Mei 1975.
12. Deelrapport 1975.
16. 32 bladzijden.

13. Twee aspecten van de geluidoverdracht over grote afstanden, de geluidverzwakking ten gevolge van de bodem en schermen, zijn nader bestudeerd aan de hand van de literatuur. Een aan de hand van metingen enigzins aangepaste berekeningswijze voor bodemdemping, volgens het vlakke-golfmodel, wordt besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de beperkingen waaronder dit model geldt. Enkele mogelijkheden tot verbeteringen worden eveneens aangegeven. Een berekening van de geluidverzwakking door een dun scherm volgens MacDonald wordt besproken en vergeleken met ander theoretische en empirische benaderingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de bodem op de schermwerking. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt geïllustreerd dat de verzwakking door het plaatsen van een scherm ten gevolge van de bodem veel geringer kan zijn dan bij verwaarlozing van het bodemeffect zou worden verwacht. Vervolgens wordt het effect beschreven van verschillende factoren op de schermwerking, zoals de vorm van het scherm (wig, dijk), absorberend scherm, eindige afmetingen, brontype en meteorologische omstandigheden.

Voor elk van deze factoren wordt aangegeven op welke wijze het effect van deze factoren in de berekening zou kunnen worden opgenomen en met welke betrouwbaarheid.

13. Twee aspecten van de geluidoverdracht over grote afstanden, de geluidverzwakking ten gevolge van de bodem en schermen, zijn nader bestudeerd aan de hand van de literatuur. Een aan de hand van metingen enigzins aangepaste berekeningswijze voor bodemdemping, volgens het vlakke-golfmodel, wordt besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de beperkingen waaronder dit model geldt. Enkele mogelijkheden tot verbeteringen worden eveneens aangegeven. Een berekening van de geluidverzwakking door een dun scherm volgens MacDonald wordt besproken en vergeleken met ander theoretische en empirische benaderingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de bodem op de schermwerking. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt geïllustreerd dat de verzwakking door het plaatsen van een scherm ten gevolge van de bodem veel geringer kan zijn dan bij verwaarlozing van het bodemeffect zou worden verwacht. Vervolgens wordt het effect beschreven van verschillende factoren op de schermwerking, zoals de vorm van het scherm (wig, dijk), absorberend scherm, eindige afmetingen, brontype en meteorologische omstandigheden.

Voor elk van deze factoren wordt aangegeven op welke wijze het effect van deze factoren in de berekening zou kunnen worden opgenomen en met welke betrouwbaarheid.

13. Twee aspecten van de geluidoverdracht over grote afstanden, de geluidverzwakking ten gevolge van de bodem en schermen, zijn nader bestudeerd aan de hand van de literatuur. Een aan de hand van metingen enigzins aangepaste berekeningswijze voor bodemdemping, volgens het vlakke-golfmodel, wordt besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de beperkingen waaronder dit model geldt. Enkele mogelijkheden tot verbeteringen worden eveneens aangegeven. Een berekening van de geluidverzwakking door een dun scherm volgens MacDonald wordt besproken en vergeleken met ander theoretische en empirische benaderingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de bodem op de schermwerking. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt geïllustreerd dat de verzwakking door het plaatsen van een scherm ten gevolge van de bodem veel geringer kan zijn dan bij verwaarlozing van het bodemeffect zou worden verwacht. Vervolgens wordt het effect beschreven van verschillende factoren op de schermwerking, zoals de vorm van het scherm (wig, dijk), absorberend scherm eindige afmetingen, brontype en meteorologische omstandigheden.

Voor elk van deze factoren wordt aangegeven op welke wijze het effect van deze factoren in berekening zou kunnen worden opgenomen en met welke betrouwbaarheid.

13. Twee aspecten van de geluidoverdracht over grote afstanden, de geluidverzwakking ten gevolge van de bodem en schermen, zijn nader bestudeerd aan de hand van de literatuur. Een aan de hand van metingen enigzins aangepaste berekeningswijze voor bodemdemping, volgens het vlakke-golfmodel, wordt besproken. Hierbij wordt aandacht besteed aan de beperkingen waaronder dit model geldt. Enkele mogelijkheden tot verbeteringen worden eveneens aangegeven. Een berekening van de geluidverzwakking door een dun scherm volgens MacDonald wordt besproken en vergeleken met ander theoretische en empirische benaderingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de bodem op de schermwerking. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt geïllustreerd dat de verzwakking door het plaatsen van een scherm ten gevolge van de bodem veel geringer kan zijn dan bij verwaarlozing van het bodemeffect zou worden verwacht. Vervolgens wordt het effect beschreven van verschillende factoren op de schermwerking, zoals de vorm van het scherm (wig, dijk), absorberend scherm eindige afmetingen, brontype en meteorologische omstandigheden.

Voor elk van deze factoren wordt aangegeven op welke wijze het effect van deze factoren in berekening zou kunnen worden opgenomen en met welke betrouwbaarheid.