

Operationaliseren van normstelling
voor laagfrequent geluid
aspect: meetmethodiek

Afstudeerscriptie HBO Milieukunde
Datum : 7 juni 2005
Status : definitief
Auteur : Ron Heusdens

Operationaliseren van normstelling
voor laagfrequent geluid:
aspect: meetmethodiek



Ten behoeve van	:	Afstudeerprojectcoördinatie HvU
Contactpersonen	:	Annemiek van der Meijden (HvU) Aart Schuur (HvU) Jan Keijzer (SIGHT) Frans Houtkamp (SIGHT)
Rapportnummer	:	RH-SEM7AB-definitief
Datum	:	7 juni 2005
Opgesteld door	:	Ron Heusdens

Samenvatting

Onder laagfrequent geluid wordt geluid verstaan met frequenties van 1 tot en met 125 Hz. Laagfrequent geluid kan veroorzaakt worden door o.a. industriële installaties. Een klein deel van de bevolking ondervindt hinder van de aanwezigheid van dit geluid. Deze hinderbeleving kan ernstige vormen aannemen en leiden tot psychologische en fysiologische klachten.

Op dit moment is er een beperkt normatief kader waaraan de aanwezigheid van laagfrequent geluid getoetst kan worden, echter nog zonder wettelijke grondslag.

Deze afstudeeropdracht behandelt een onderdeel van een groter onderzoek dat volgens mij verder uitgewerkt dient te worden om als basis te kunnen dienen voor een toepasselijke normstelling inzake laagfrequent geluid.

Het onderdeel dat in dit onderzoek verder wordt uitgewerkt is het kwantitatief vaststellen van het aanwezige laagfrequente geluid. Meer precies, het onderzoek richt zich op de ontwikkeling van een meetmethode voor het vaststellen van laagfrequent geluid buitenshuis.

De basis voor het onderzoek is de inventarisatie van de voor laagfrequent geluid relevante overdrachtsfactoren. Het blijkt dat met name de invloed van de wind, de temperatuur en de zogenaamde diffractie in belangrijke mate de overdracht beïnvloeden. Geconcludeerd wordt dat een meetmethode met deze factoren in hoge mate rekening dient te houden.

Voorts wordt van de in Nederland beschikbare meetmethodieken voor laagfrequent geluid beoordeeld in hoeverre deze rekening houden met de vastgestelde relevante overdrachtsfactoren.

De meetmethode voorziet in een checklist die in het planningstadium en alvorens daadwerkelijk wordt gemeten dient te worden ingevuld. Aan de hand van 'go/no go'-criteria wordt bepaald of de (geplande) omstandigheden een betrouwbare meting toelaten.

Het meetvoorschrift houdt rekening met de invloed van wind en stelt daarom dat in het bodemvlak wordt gemeten. Afhankelijk van het type meting wordt in het meetvoorschrift rekening gehouden met de verhouding tussen het laagfrequente signaal dat we willen kwantificeren en de invloeden van stoorsignalen die zich als ruis in de meting manifesteren. Indien het doel van de meting het bepalen van de geluidsdruk ter hoogte van een geluidsgevoelige bestemming is stelt het voorschrift dat zo mogelijk met twee microfoons wordt gemeten. Door middel van nabewerking waarbij de signaalcoherentie wordt bepaald, worden vrijwel alle niet-gewenste stoorgeluiden geëlimineerd. Dit levert een 'schoon' signaal op dat representatief is voor het aanwezige laagfrequente geluid.

De meetmethode is op 27 mei 2005 in praktijk gebracht. Op basis van een analyse van de meetresultaten van ca. 40 metingen wordt geconcludeerd dat de meetmethode voldoet aan de eisen van hogere reproduceerbaarheid.

Het kwantitatieve effect van temperatuurinversie op de overdracht van laagfrequent geluid is niet in dit onderzoek uitgewerkt. Wij bevelen aan hier een nader onderzoek aan te besteden. Voorts dient meer onderzoek te worden uitgevoerd naar het effect van diffractie voor lange golven in de gebouwde omgeving.

Inhoudsopgave

Samenvatting

1	Inleiding	1
2	Operationaliseren van normstelling laagfrequent geluid	2
2.1	Probleemstelling.....	2
2.2	Onderzoeksvragen.....	2
2.3	Doelstelling onderzoek.....	3
2.4	Het doel van het uitvoeren van metingen	4
3	Laagfrequent geluid – eigenschappen	5
3.1	Theoretische beginselen van (laag frequent) geluid	5
3.1.1	Voortplanting van geluid	5
3.1.2	Geluidsvermogen en geluidsintensiteit	6
3.1.3	Geluidsuitbreiding in lucht.....	7
3.1.4	Samenvatting.....	12
4	Inventarisatie bestaande technieken, apparatuur en methodieken	13
4.1	Meettechniek.....	13
4.1.1	De microfoon.....	13
4.1.2	Filters	14
4.1.3	Signaal/ruis verhouding van het gemeten signaal.....	16
4.1.4	De 'handtekening' van herrie: spectrale componenten	16
4.2	Apparatuur	17
4.2.1	Apparatuur voor bronsterkebepaling en maatregelenonderzoek	17
4.2.2	Apparatuur ter bepaling van immissie	18
4.3	Meetmethodieken.....	18
4.3.1	Meetmethode Peutz.....	20
4.3.2	Meetmethode van Riemens (van Dorsser).....	21
4.3.3	Meetmethode Provincie Limburg	22
4.3.4	Meetmethode TNO	23
4.4	Tussenconclusie	24
5	Meetmethodiek ter verkrijging van betere reproduceerbaarheid	25
5.1	Introductie en uitgangspunten.....	25
5.2	Voorstel meetmethode	25
5.2.1	Fase voorbereiding: de checklist	26
5.2.2	Fase op locatie: het meetvoorschrift.....	27
5.2.3	Fase nabewerking: de analyse	28
5.2.4	Compensatie van invloedsfactoren.....	29
5.3	De meetmethode in de praktijk	30
5.3.1	Beschrijving meetobject en historische meetgegevens.....	31
5.3.2	Meetsessie van 27 mei 2005	32
5.4	Beoordeling van de voorgestelde meetmethode	36
6	Conclusies en aanbevelingen	38

Literatuur

Woordenlijst

Bijlagen

Bijlage 1	uitwerking tabel aspecten voor normstelling
Bijlage 2	toelichting op onderzoeksvragen
Bijlage 3	theoretische grondslagen
Bijlage 4	benadering van deeltjessnelheid uit drukgradiënt
Bijlage 5	Van Beaufort naar ...
Bijlage 6	checklist meetmethode

Tabellen

Tabel 1	te beoordelen aspecten tot voordeel van normstelling laagfrequent geluid
Tabel 2	definitie onderzoeksvragen per deelproject
Tabel 3	samenvatting fysische eigenschappen geluid in lucht
Tabel 4	meetmethodieken voor laagfrequent geluid – overzicht
Tabel 5	meetmethodieken voor laagfrequent geluid – methode Peutz
Tabel 6	meetmethodieken voor laagfrequent geluid – methode Riemens
Tabel 7	meetmethodieken voor laagfrequent geluid – Methode Provincie Limburg
Tabel 8	meetmethodieken voor laagfrequent geluid – methode TNO
Tabel 9	overzicht meetdoelstellingen

1 Inleiding

In de functie als adviseur geluid ben ik meerdere malen betrokken geweest bij onderzoek naar de oorzaak van klachten als gevolg van laagfrequent geluid. In een geval werden deze klachten geuit door mensen die woonden rondom een zandput: het bleek dat de installaties die werden toegepast om het opgezogen zand te ontwateren een bron waren van geluid dat voornamelijk bestaat uit lage frequenties. Dit geluid zorgde voor overlast binnenshuis. De klagers woonden op honderden meters afstand van de put, sommige personen waren meer dan een kilometer verwijderd van de geluidsbron maar ondervonden toch nog hinder.

Voor mij werd snel duidelijk dat het eenduidig vaststellen van de dosismaat ter plaatse waar de hinder werd ondervonden niet eenvoudig is. Verder bleek dat de burger niet zomaar terug kon vallen op een bescherming in de vorm van een grenswaarde die beschikbaar is voor de ondervonden hinder.

Deze afstudeeropdracht behandelt een onderdeel van een groter onderzoek dat volgens mij verder uitgewerkt dient te worden om als basis te kunnen dienen voor een toepasselijke normstelling inzake laagfrequent geluid. Ik duid het uitwerken van dit onderzoek aan als het 'operationaliseren' van de normstelling.

Normstelling, het woord zegt het al, stelt een (kwantitatieve) norm voor uitstoot (zgn. emissie) of ontvangst (zgn. immissie) van een gegeven milieuaspect voor een specifieke partij. Het doel van het toepassen van normen is een minimaal niveau van bescherming te garanderen voor individuen en/of ecosystemen. In het geval van de Wet geluidhinder bijvoorbeeld worden inrichtinghouders beperkt in de geluidsemissie die door de bedrijfsvoering aan de omgeving wordt afgegeven. Deze wet stelt duidelijke normen die allen getoetst kunnen worden. Het feit dat de normen in de praktijk getoetst kunnen worden is essentieel. Juist daarom werkt het normeringinstrument: het stelt de overheid in staat om vast te stellen of de minimale bescherming waartoe de norm dient ook echt geboden wordt.

Op dit moment is er een beperkt normatief kader waaraan de aanwezigheid van laagfrequent geluid getoetst kan worden. Dit kader heeft geen nog wettelijke grondslag: in gevallen waar door een bevoegd gezag in een besluit voorschriften inzake laagfrequent geluid normstelling waren opgenomen werd dit voorschrift in een bezwaarprocedure door de Raad van State vernietigd. De reden hiervoor is dat er "geen algemeen aanvaarde milieuhygiënische inzichten bestaan voor de vraag of laagfrequent geluid moet worden aangemerkt als objectieveerbare hinder, dan wel verband houdt met een bijzondere gevoeligheid van bepaalde personen voor dit type geluid". Feit blijft echter dat duizenden mensen in Nederland in min of meerdere mate hinder ondervinden van de aanwezigheid van laagfrequent geluid.

In deze afstudeeropdracht wordt een voorstel gedaan voor een meetmethode waarmee een betere mate van reproduceerbaarheid kan worden bereikt. Als gevolg hiervan kan uiteindelijk de dosismaat beter worden vastgesteld. Het voordeel hiervan is dat de grens tussen 'objectieveerbare hinder' en 'overgevoeligheid van het gehoor van specifieke personen' beter kan worden getrokken.

Leeswijzer

In dit rapport wordt als eerste ingegaan op de problematiek van de normstelling inzake laagfrequent geluid. Hoofdstuk 2 behandelt de genoemde operationalisering van de normstelling. Dit hoofdstuk geeft inzicht in de problematiek en de stappen die kunnen leiden tot een betere basis tot voordeel van normstelling van laagfrequent geluid.

Na een introductie van de fysieke eigenschappen van laagfrequent geluid in hoofdstuk 3 volgt de inventarisatie van bestaande meetmethoden in hoofdstuk 4. Na een tussenconclusie wordt een voorstel gedaan voor een gewijzigde meetmethodiek in hoofdstuk 5.

2 Operationaliseren van normstelling laagfrequent geluid

2.1 Probleemstelling

Onder laagfrequent geluid wordt geluid verstaan met frequenties van 1 tot en met 125 Hz. Laagfrequent geluid kan veroorzaakt worden door o.a. industriële installaties. Een klein deel van de bevolking ondervindt hinder van de aanwezigheid van dit geluid. Deze hinderbeleving kan ernstige vormen aannemen en leiden tot psychologische en fysiologische klachten.

In de afgelopen 15 jaar is in Nederland onderzoek verricht naar dit fenomeen met onder meer het doel een emissiegrenswaarde vast te stellen. De onderzoeken hebben geresulteerd in richtlijnen met daaraan gekoppelde grenswaarden. Overschrijding van de grenswaarden duidt aan dat sprake zou kunnen zijn van hinder, maar dat deze niet hoeft op te treden. Er blijkt een grote subjectiviteit te bestaan bij het beleven van hinder door laagfrequent geluid. Vanwege deze subjectiviteit en omdat er relatief weinig gevallen van hinder bekend zijn (en de politieke urgentie daardoor minder is), heeft het ministerie van VROM het (nog) niet aangedurfd een norm in de wet te verankeren.

De hoofdreden voor het nog immer ontbreken van een wettelijke norm is de (te grote) spreiding in uitkomsten van dosisresponse relaties. Er zijn echter nog een aantal andere aspecten die het proces van normstelling bemoeilijken.

De grenswaarden dienen handhaafbaar te zijn. Dit betekent dat het in de praktijk met relatief eenvoudige middelen mogelijk moet zijn de optredende immissiewaarden vast te stellen. Verder moet het mogelijk zijn maatregelen af te dwingen. Hiertoe dient het bevoegd gezag een dialoog te hebben met de veroorzaker van het geluid. Vaak wordt hinder ondervonden maar is het niet duidelijk waardoor de hinder veroorzaakt wordt.

Om een wettelijke basis te krijgen dient naar mijn mening de normstelling *geoperationaliseerd* (in gereedheid gebracht) te worden. Dit is het probleem dat in deze afstudeeropdracht door zijn complexiteit gedeeltelijk uitgewerkt wordt. In dit document refereer ik aan de normstelling inclusief additionele aspecten als geoperationaliseerde normstelling.

Onderstaande tabel biedt inzicht in de aspecten die alle dienen te worden vastgesteld en beoordeeld ten einde te komen tot een afweging die de basis kan zijn voor geoperationaliseerde normstelling.

Aspect	
A	kwantitatief vaststellen van het aanwezige laagfrequent geluid
B	vaststellen dosisrespons relaties
C	lokaliseren van de bron
D	overdracht bepaling
E	methodiek ter bepaling van norm

Tabel 1: te beoordelen aspecten tot voordeel van normstelling laagfrequent geluid

Voor nadere uitwerking van deze tabel wordt verwezen naar bijlage 1.

2.2 Onderzoeksvragen

De probleemstelling is dusdanig complex dat het noodzakelijk is het probleem onder te verdelen in verschillende deelprojecten. Bij de gestelde deelaspecten kunnen de volgende onderzoeksvragen worden geformuleerd.

De volgende tabel geeft de onderzoeksvragen per deelproject.

Deelproject A	kwantitatief vaststellen van het aanwezige laagfrequent geluid
onderzoeksvragen	1. is het mogelijk een meetmethode te ontwikkelen die een betere reproduceerbaarheid van de meetresultaten biedt? 2. dient deze methode zich te richten op de vaststelling binnenshuis alleen of ook buiten?
Deelproject B onderzoeksvragen	vaststellen dosisrespons relaties 1. is er een dosis vast te stellen die uniform als grenswaarde kan dienen voor een eventuele normstelling? 2. dient rekening gehouden te worden met een extreme gevoeligheid van een kleine groep gehinderde die niet representatief geacht wordt voor de gehele bevolking? 3. hoe wordt de dosis bepaald? 4. kan de dosis op eenvoudige wijze worden vastgesteld?
Deelproject C onderzoeksvragen	lokaliseren van de bron 1. hoe vaak blijkt dat de overlastveroorzakende bronnen niet kunnen worden vastgesteld? 2. welke rol kan meetinstrumentatie spelen voor brondetectie?
Deelproject D onderzoeksvragen	overdracht bepaling 1. kan de overdracht van laagfrequent geluid op betrouwbare wijze gemodelleerd worden? 2. hoe kan worden vastgesteld dat de hinder niet alleen via de lucht maar ook, of geheel, als gevolg van trillingsenergie ontstaat? En wat zijn de consequenties voor het overdrachtsmodel indien sprake is van trillingen?
Deelproject E onderzoeksvragen	methodiek ter bepaling van norm 1. in welke mate kunnen bestaande normen fungeren als model voor normstelling van laagfrequent geluid (welke normmodel is het meest geschikt en waarom)? 2. dient deze norm uitsluitend te gelden binnenshuis of ook buitenshuis? 3. is het zinvol om in de norm meerdere beschermingsniveaus vast te stellen?

Tabel 2: definitie onderzoeksvragen per deelproject

In bijlage 2 zijn de onderzoeksvragen nader toegelicht.

2.3 Doelstelling onderzoek

De omvang van het onderzoek is dusdanig groot dat het omwille van de doorlooptijd van deze afstudeeropdracht noodzakelijk is een keuze te maken uit een van de deelprojecten. Dit is de reden dat in dit rapport het deelproject A, het kwantitatief vaststellen van het aanwezige laagfrequente geluid, verder is uitgewerkt. Meer precies, het onderzoek richt zich op de ontwikkeling van een meetmethode voor het vaststellen van laagfrequent geluid buitenshuis. Het opstellen van een meetmethode die geldt voor binnenshuis is een apart onderzoek waard.

In de praktijk blijkt het niet eenvoudig om een betrouwbare geluidsmeting van een laagfrequente geluidsbron uit te voeren. Vaak is de afstand tot de bron dermate groot dat er een grote afhankelijkheid ontstaan is van factoren als atmosferische omstandigheden, terreindempingen en reflecties. Het lijkt alsof de bestaande meetmethoden onvoldoende rekening houden met deze factoren. Deze gevolgtrekking kan gemaakt worden uit de ervaring dat indien dezelfde meting herhaald wordt uitgevoerd, de resultaten vaak verschillen van elkaar. In het algemeen mag gesteld worden dat de reproduceerbaarheid van de metingen verbeterd kan worden. Wij definiëren reproduceerbaarheid hier als het kunnen vertrouwen op gelijke resultaten indien metingen meerdere malen binnen de marges van de meetmethodiek worden uitgevoerd.

In het volgende deel van het rapport worden de in Nederland bestaande meetmethodieken voor het vaststellen van de aanwezige geluidsniveaus van laagfrequent geluid geïnventariseerd. Per

meetmethodiek wordt beoordeeld in hoeverre de methodiek rekening houdt met de fysische eigenschappen van laagfrequent geluid. In een volgende hoofdstuk worden deze eigenschappen beschreven.

Na een tussenconclusie, waarin de beoordeelde inconsistenties en omissies opgesomd worden, wordt in dit rapport een voorstel gedaan voor een meetmethodiek die zo goed mogelijk rekening houdt met de overdrachtsfactoren.

2.4 Het doel van het uitvoeren van metingen

Metingen dienen veelal om de volgende redenen te worden uitgevoerd:

- voor het bepalen van de *bronsterkte* van een geluidsbron die laagfrequent geluid emitteert;
- ten behoeve van *maatregelen onderzoek* ter reductie van de geluidsemissie;
- voor het bepalen van de *immissie* van geluid met een laagfrequent component ter plaatse waar hinder wordt ervaren.

Omdat er geen formeel toetsingkader is worden laagfrequent spectra niet opgenomen in de vele rekenmodellen die zijn ontwikkeld in het kader van de leefbaarheidverhogende saneringsprojecten die krachtens de Wet Geluidhinder in de afgelopen jaren zijn uitgevoerd.

De meting wordt uitgevoerd door de meest geschikte fysische parameter, zoals geluidsdruk of intensiteit ter plaatse van een bepaald meetpunt vast te leggen. De meting wordt uitgedrukt in getalswaarden voor zowel het spectrum als ook het getotaliseerde niveau. De meetgegevens worden gebruikt als uitgangspunt ter verificatie van de dosismaat (in het geval van immissie) en ter vaststelling van het bronvermogen (emissie) van het betreffende geluidsproducerende object.

Opgemerkt dient te worden dat reproduceerbaarheid – het kunnen vertrouwen op gelijke resultaten indien metingen meerdere malen worden uitgevoerd – ook bij het meten van gewoon geluid (geluid met frequenties vanaf ca. 25 Hz) meer aandacht behoeft dan er in de praktijk aan gegeven wordt. De Handleiding Meten en Rekenen Industrielawaai HMRI [9] stelt voor het meten van gewoon geluid bepaalde meteorologische condities: metingen mogen alleen dan als geldig worden beschouwd als de atmosferische condities vallen binnen het gestelde meteoraam.

3 Laagfrequent geluid – eigenschappen

Het doel van dit hoofdstuk is aan te geven hoe laagfrequent geluid zich manifesteert en waar dit van afhankelijk is. Er wordt ingegaan op de factoren die de overdracht van laag frequent geluid bepalen. In bijlage 3 worden de overdrachtsfactoren behandeld die van toepassing zijn op geluid in het algemeen.

3.1 Theoretische beginselen van (laag frequent) geluid

Geluid is in feite een verstoring die zich voortplant in een elastisch materiaal met een snelheid c die karakteristiek is voor dat medium.

Dit valt uit te drukken als: $c = k \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Waarbij:

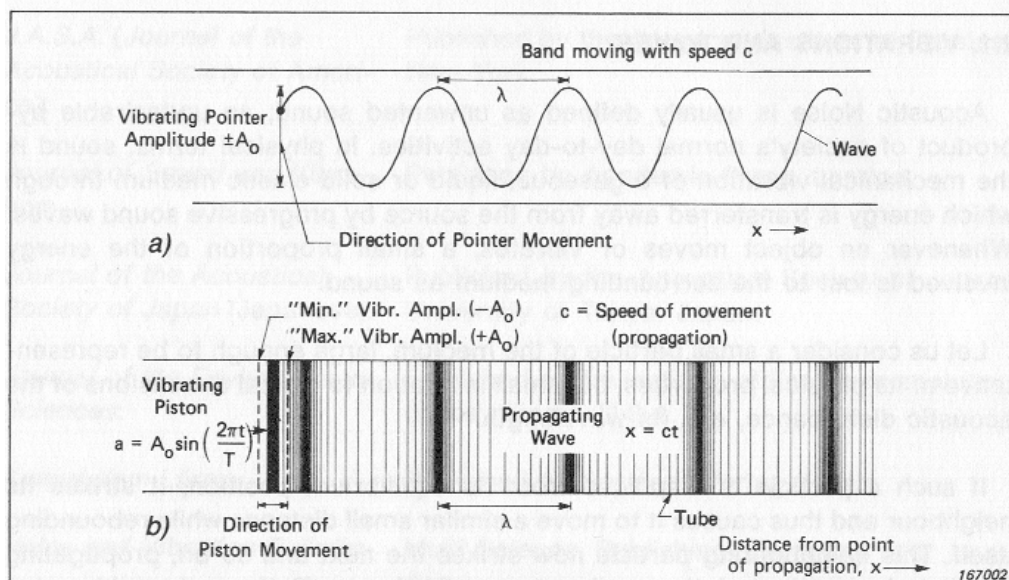
k	een constante
E	de elasticiteit van het medium [N.m^{-2}]
ρ	de dichtheid [kg.m^{-3}]
c	de snelheid van geluid in het medium [m.s^{-1}]

Voor lucht onder normale omstandigheden bedraagt de snelheid ca. 344 m.s^{-1} bij 20°C .

3.1.1 Voortplanting van geluid

Als een punt dat een trillende beweging uitvoert, deel uitmaakt van een reeks van punten die met elkaar verbonden zijn, dan komen ook de andere punten van die reeks achtereenvolgens in trilling. De trillende beweging wordt telkens door een punt van die reeks op het volgende punt overgedragen. Men noemt dit verschijnsel de voortplanting van een trillende beweging.

Als de voortplantingsrichting samen valt met de lijn waarlangs de trillende beweging plaatsvindt, noemt men dat *longitudinale* voortplanting. Geluidsgolven zijn longitudinale golven.



Figuur 1 De transformatie van trillingen in golven:

- a.) door een trillende schrijfpen op een bewegende band;
- b.) door een op en neergaande zuiger in een vloeibaar medium

Figuur 1 laat zien wat er gebeurt wanneer een zuiger in een buis wordt geplaatst en met een bepaalde regelmaat heen en weer wordt bewogen. Als de zuiger naar rechts beweegt, wordt de lucht rechts van de zuiger gecompriëerd en deze compressie wordt overgedragen in de buis met de constante snelheid van geluid in lucht. Nadat de zuiger in de meest rechtse positie weer naar links gaat wordt er in feite een vacuüm gezogen rechts van de zuiger: ook deze

plaatselijke verdunning wordt in de buis doorgegeven. De ontstane drukgolf plant zich in de buis voort met dezelfde frequentie als die van de trilling van de zuiger. Omdat de snelheid van de golf in lucht constant is, wordt de golflengte bepaald door de tijd tussen twee opeenvolgende samendrukkingen. Deze tijdsinterval wordt bepaald door de frequentie van de trilling (of van de genoemde 'verstoring').

Er geldt:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

Waarbij:	λ	de golflengte [m]
	T	de tijd tussen opeenvolgende samendrukkingen [s]
	c	de snelheid van geluid in lucht [m.s^{-1}]
	f	de frequentie [Hz]

Het voorbeeld geeft de meest simpele van alle golfbewegingen, de *eenvoudige progressieve golf*, zo genoemd omdat deze zich in één richting van de bron verrijkt. De ontstane drukgolven volgen elkaar op parallelle wijze op (zie figuur 1b). Omdat de golf zich niet kan verspreiden in de buis, wordt de enige verzwakking bepaald door transmissieverliezen en dispersie veroorzaakt door turbulentie en temperatuurgradiënten in het medium zelf.

Hoewel de omvang van een geluidsgolf op een aantal manieren kan worden bepaald, is het gebruikelijk om de geluidsdruk te meten. Het vaststellen van (lucht)deeltjesverplaatsing of snelheid is tevens maatgevend voor de omvang van de geluidsgolf. In de praktijk zijn deze genoemde parameters moeilijker vast te stellen en zijn bovendien meer geëigend zeer nabij de geluidsbron in het zogenaamde nabijheidveld.

3.1.2 Geluidsvermogen en geluidsintensiteit

Geluidsdruk is afhankelijk van waar deze wordt vastgesteld en de omvang is met name afhankelijk van externe factoren. Deze factoren zijn:

- afstand van bron tot ontvanger (microfoon)
- oriëntatie van bron ten opzichte van ontvanger
- temperatuurgradiënt
- windsnelheidsgradiënt
- fysieke omgeving (in verband met reflecties en absorptie)

Iedere geluidsbron heeft een karakteristiek geluidsvermogen. Geluidsvermogen is een basismaat voor de akoestische omvang van een geluidsbron en kan als zodanig als een fysiek kenmerk voor die bron gelden. Bronvermogen is een belangrijke absolute parameter voor geluidsbronnen. De fundamentele akoestische maat die direct gerelateerd is aan bronvermogen is de *geluidsintensiteit*.

Geluidsintensiteit is een vectorgrootheid die de richting en de hoeveelheid van de netto akoestische energie op een gegeven positie weergeeft. De dimensie is energie per tijd per oppervlakte en de eenheid is W/m^2 . Ter vergelijking: geluidsdruk is een scalaire grootheid en drukt alleen de grootte uit.

Aangetoond kan worden dat de intensiteitsvector gelijk is aan het tijdgemiddelde product van de instantane geluidsdruk en de corresponderende instantane deeltjessnelheid op dezelfde (ruimtelijke) positie.

$$I = \overline{p(t) \cdot u(t)}$$

Waarbij:	I	de geluidsintensiteit [W.m^{-2}]
	p	de momentane geluidsdruk [N.m^{-2}]
	u	de momentane deeltjessnelheid [m.s^{-1}]
	t	de tijd [s]

Deze vergelijking heeft de bekende elektrische analogie: vermogen = spanning * stroom.

Een van de kenmerken van geluidsintensiteit is het verschil dat wordt gemaakt tussen uitbreidende (Engels: “*propagating*”) en niet-uitbreidende geluidsvelden. Dit kenmerk heeft geluidsdruk niet. Een geluidsintensiteit meter reageert alleen op het uitbreidende deel van het geluidsveld; het niet-uitbreidende deel wordt simpelweg genegeerd.

Een voorbeeld van een uitbreidend geluidsveld is een geluidsgolf in het vrije veld. In dit geval kan de deeltjessnelheid (de vector uit het product) worden berekend uit de geluidsdruk door gebruik te maken van de hierboven genoemde analogie met de Wet van Ohm:

$$u = \frac{p}{\rho c}$$

De absolute grootte van de intensiteit is gegeven door:

$$|I| = \overline{p \cdot u} = \frac{\overline{p^2}}{\rho c} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

Waarbij:	I	de geluidsintensiteit [W.m ⁻²]
	p	de momentane geluidsdruk [N.m ⁻²]
	u	de momentane deeltjessnelheid [m.s ⁻¹]
	ρ	de dichtheid [kg.m ⁻³]
	c	de snelheid van geluid in het medium [m.s ⁻¹]

De noemer ‘ρc’ in bovenstaande vergelijking is de impedantie van het medium. In feite kan – alleen in vrije veld omstandigheden – de intensiteit worden afgeleid uit de heersende geluidsdruk.

In niet-uitbreidende geluidsvelden is de intensiteit gelijk aan nul: er is geen netto energiestroom. Een voorbeeld van een niet-uitbreidend geluidsveld is de volledig diffuse ruimte. In zo een ruimte is de energiestroom op een gegeven positie in alle richtingen gelijk. Er is dus netto geen energiestroom op een gegeven punt: de intensiteit is nul.

3.1.3 Geluidsuitbreiding in lucht

Er zijn diverse factoren die invloed hebben op de overdracht van geluid tussen bron en ontvanger in een medium als lucht. Het effect van deze factoren neemt toe als de afstand toeneemt.

Windsnelheid en temperatuurgradiënten veranderen de richting van de golven, turbulentie vervormt de energie en viscositeit veroorzaakt absorptie. Dit laatste effect is veel groter voor hoge frequenties dan voor lage. Lucht blijkt te werken als een zgn. *low-pass* filter die de hogere frequenties verzwakt en dus het frequentiespectrum van een geluid vervormt, de sterkte reduceert en ook nog zijn richting verandert. Los daarvan dient ook rekening gehouden te worden met invloeden als reflectie en absorptie van het bodemgebied op de overdracht.

Effecten van de atmosfeer

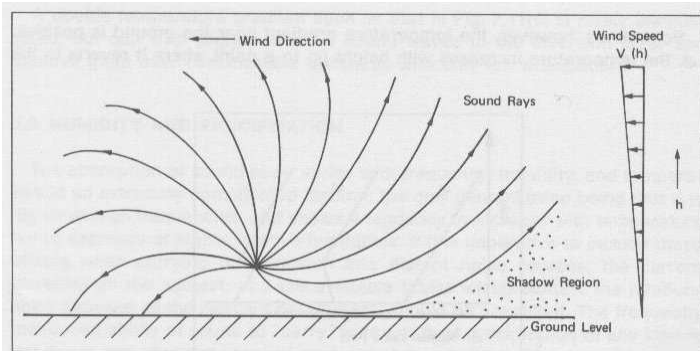
De atmosfeer is in een continue staat van beweging boven het aardoppervlak en kan beschouwd worden als een vloeistof met al zijn fysische kenmerken inclusief viscositeit. Wrijving bij de grond vertraagt stromende lucht, dus de windsnelheid vlakbij de grond is klein. Met toenemende hoogte neemt het effect van de wrijving af, zodat de windsnelheid toeneemt. Wanneer een geluidsgolf in een gebied met een andere snelheid terechtkomt zal de richting wijzigen. De richtingverandering treedt op omdat de snelheid van geluid alleen is gebaseerd op het medium waarin het zich verplaatst. Elke verschuiving van het medium legt een gelijke verschuiving op aan de geluidsgolf die zich er in bevindt.

Als de geluidssnelheid overal in de atmosfeer gelijk is, dan zijn de paden van geluidsgolven recht (afgezien van knikken bij reflecties). In de praktijk verandert de geluidssnelheid meestal met de hoogte, door veranderingen van wind en temperatuur met de hoogte (zie volgende paragrafen). Als gevolg hiervan zijn de paden van geluidsgolven krom.

Als de geluidssnelheid toeneemt met de hoogte, dan is het pad van een geluidsgolf krom zoals in figuur 2. Het pad is krom doordat het bovenste deel van de golf harder loopt dan het onderste deel, waardoor de golf voortdurend ‘draait’. Dit draaien noemen we atmosferische refractie.

Hoewel de lagere atmosfeer niet een opeenstapeling van gescheiden luchtlagen is maar er sprake is van een snelheid die gelijkmatig toeneemt met hoogte, kan vanuit deze benadering gezien worden dat geluidsgolven continu afgebogen worden als deze door de diverse lagen heen bewegen.

Vanaf een vast punt op aarde gezien worden met meewind de geluidsgolven naar de aarde toe gebogen terwijl ze van de aarde af worden gebogen bij tegenwind.



Figuur 2 Geluidsrefractie binnen een luchtlaag

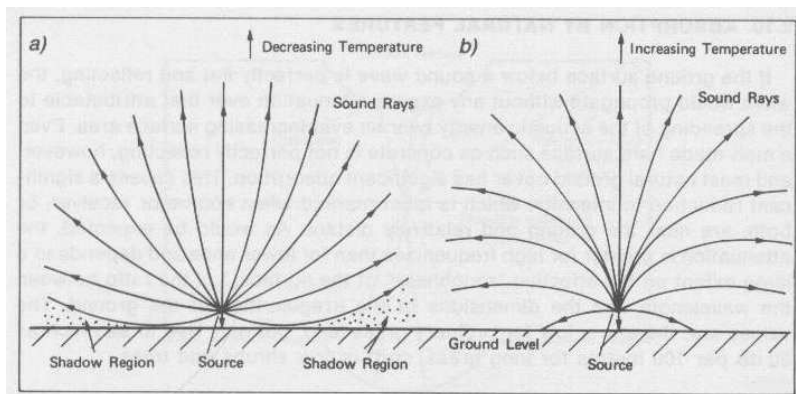
Als gevolg hiervan wordt een gebied van verhoogde geluidsniveaus vastgesteld met de gestelde meewind conditie. In de tegenwind zal een gebied optreden waar verminderde geluidsniveaus heersen, dit wordt het schaduwgebied genoemd.

Refractie effecten komen alleen maar voor omdat er wind waait en een windgradiënt aanwezig is, oftewel de windsnelheid verandert met de hoogte. De omvang van de veranderingen in geluidsintensiteit kan alleen toegeschreven worden aan de hoeveelheid en omvang van de veranderingen in windsnelheid bij diverse hoogten. Verzwakkingen tot 30 dB in geluidschaduwgebieden kunnen voorkomen, geluidsniveau toenames in meewind gebieden zijn kleiner.

In de meetpraktijk dient rekening gehouden te worden met refractie. Het is van belang dat gemeten wordt onder meewind condities. Alhoewel het schaduwgebied veroorzakende refractie effect voor laagfrequent geluidsgolven minder omvangrijk is dan voor hogere frequenties dient toch voorkomen te worden dat hier gemeten wordt. Meten onder tegenwind condities is sterk af te raden, zeker indien het doel van de meting is absolute geluidsniveauwaarden vast te stellen. Ingeval van laagfrequent geluidhinder dient de immissie zo mogelijk ten tijde dat de hinder wordt beleefd te worden vastgesteld (maar kan uiteraard geen invloed worden uitgevoerd op de heersende meteorologische omstandigheden).

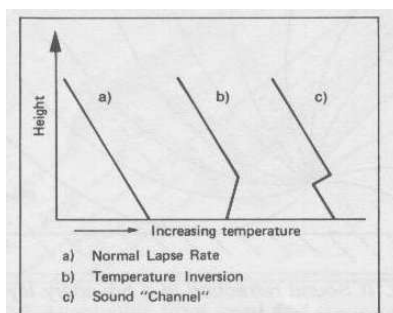
Temperatuurgradiënten

De snelheid van geluid in lucht neemt toe bij hogere temperatuur en in een normale atmosfeer neemt de temperatuur af met de hoogte (adiabatische verandering). Een stijgende geluidsgolf zal indien deze een laag van lagere temperatuur binnendringt, naar boven toe afgebogen worden (de invloeden van wind worden even buiten beschouwing gelaten). Het resultaat is dat de geluidsgolven continu van het aardoppervlak omgebogen worden en er zodoende geluidschaduw gebieden ontstaan beginnend vanaf een afstand van de bron die afhankelijk is van de temperatuurgradiënt. Net als bij windgradiënten worden de effecten van temperatuurgradiënten minder uitgesproken door de dynamische staat van de atmosfeer met zijn turbulenties en lokale hitte uitwisseling waardoor ook geluid in de schaduwgebieden worden verspreid.



Figuur 3 Refractie van geluid in een atmosfeer met:
a.) normale temperatuur gradiënt (adiabatische verloop)
b.) een geïnverteerde gradiënt

Soms is de temperatuur nabij het aardoppervlak positief dat wil zeggen de temperatuur neemt toe met stijgende hoogte tot een punt waarbij deze staat wederom omkeert (en daarna adiabatisch verloopt). Deze situatie wordt temperatuurinversie genoemd (figuur 4b) en leidt tot effecten die tegengesteld zijn als hiervoor beschreven. Een geluidsgolf wordt meer naar de aarde toe afgebogen als deze hoger naar boven doordringt. Dit brengt geluidsniveau verhogende omstandigheden met zich mee aan de aardoppervlakte. Geluidschaduwgebieden worden niet gevormd.



Figuur 4 verschillende temperatuurgradiënten

Een dubbele temperatuurgradiënt zoals in figuur 4c afgebeeld komt zelden voor, maar kan een geluidsgolf die onder de juiste hoek de inversielaag binnendringt tot grote afstanden verplaatsen zonder dat er sprake is van enige verzwakking. Temperatuurinversie heeft een grote invloed op de overdracht van met name laagfrequent geluidsgolven. Omdat verticale luchtbewegingen vrijwel niet mogelijk zijn wordt de energie meer in horizontale richting gebundeld. Het refractie-effect is hierdoor sterker. De aanwezigheid van inversie maakt dat alleen onder die conditie een hindersituatie kan optreden. De niet voorspelbare aanwezigheid van inversie maakt dat de interpretatie van het resultaat van laagfrequent metingen niet eenduidig is.

Over inversie

De inversie die relevant is voor de overdracht van laagfrequent geluid is de zgn. grondinversie. Omdat de temperatuur van de onderste luchtlaag afhankelijk is van de temperatuur van de aarde (die 's nachts afkoelt) koelt de lucht onderin het hardst af. Vanonder naar boven wordt de lucht dus warmer. Dit leidt tot een zeer stabiele situatie aan de grond en alle verticale bewegingen worden onderdrukt.

Vochtigheid en neerslag

De absorptie van geluid in lucht varieert met frequentie, luchtvochtigheid en temperatuur op een zeer gecompliceerde wijze: de enige trend die valt af te leiden is dat de absorptie hoger is bij hogere frequenties en hogere temperaturen en lager bij hogere luchtvochtigheid. Overigens is er nog relatief weinig over de effecten van luchtvochtigheid bekend. Voor de overdracht van geluid over grote afstanden kan de bijdrage echter substantieel zijn.

Er wordt wel eens gezegd dat geluid verder 'draagt' in mist of motregen. Dit heeft iets te maken

met gewijzigde eigenschappen van de lucht maar moet voornamelijk gezocht worden in een lager dan gewoonlijk achtergrondniveau gedurende deze omstandigheden waardoor het lijkt dat het geluid beter hoorbaar is.

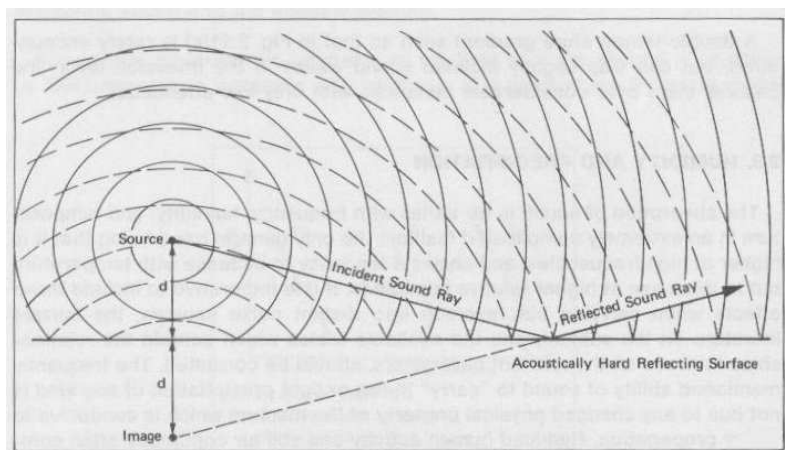
Terreinabsorptie

Indien het aardoppervlak onder een geluidsgolf perfect glad en reflecterend zou zijn, kon deze golf zich uitbreiden over een steeds groter wordend oppervlaktegebied (de geometrische verzwakking even niet meegerekend...). Maar zelfs het door de mens vervaardigde meest gladde oppervlakte is niet perfect reflecterend en vastgesteld moet worden dat het meeste buitengebied het geluid aanzienlijk absorbeert. De terreinabsorptie veroorzaakt een reductie van de intensiteit, zeker in die gevallen waar bron en ontvanger dicht bij de bodem gelegen zijn en ver uit elkaar staan. Zoals we mogen verwachten is de absorptie groter voor hogere frequenties dan voor lage en wordt het meest bepaald door de ruwheid van het terrein, ofwel de verhouding tussen de golflengte en de afmetingen van de onregelmatigheden van het terrein. De absorptiewaarden zijn laag voor gemaaid gras maar kan wel 20 dB per 100 meter bedragen voor koren velden, grote struikpartijen en bomenrijen.

Voor wat betreft water als ondergrond blijkt dat met name lage frequenties grote afstanden kunnen afleggen zonder hierdoor substantieel gedempt te worden.

Reflecties (buiten)

Wanneer geluidsgolven in contact komen met een oppervlakte, wordt een deel gereflecteerd, een deel doorgelaten en een deel geabsorbeerd. De geluidsdruk op enig punt in het veld is afkomstig van directe straling van de bron en van geluid dat indirect, via een aantal reflecties waar een deel van de energie door absorptie wordt geabsorbeerd, dit punt bereikt. Als de absorptie en het transmissiepunt laag is, wordt het merendeel van de geluidsenergie gereflecteerd op het oppervlak: het wordt akoestische 'hard' genoemd en de mate van reflectie kan worden beschouwd als wat een spiegel doet voor lichtstralen. De golf die gereflecteerd wordt door een glad vlak zien er uit zoals aangegeven in figuur 5; het lijkt alsof de geluidsgolven vanuit een virtueel beeld worden veroorzaakt. De gereflecteerde en directe golfvronten versterken en verzwakken elkaar waar zij elkaar tegenkomen. Dit effect is de oorzaak van onnauwkeurigheden bij het uitvoeren van metingen in de buurt van objecten als muren, harde vloeren, wegen etc.



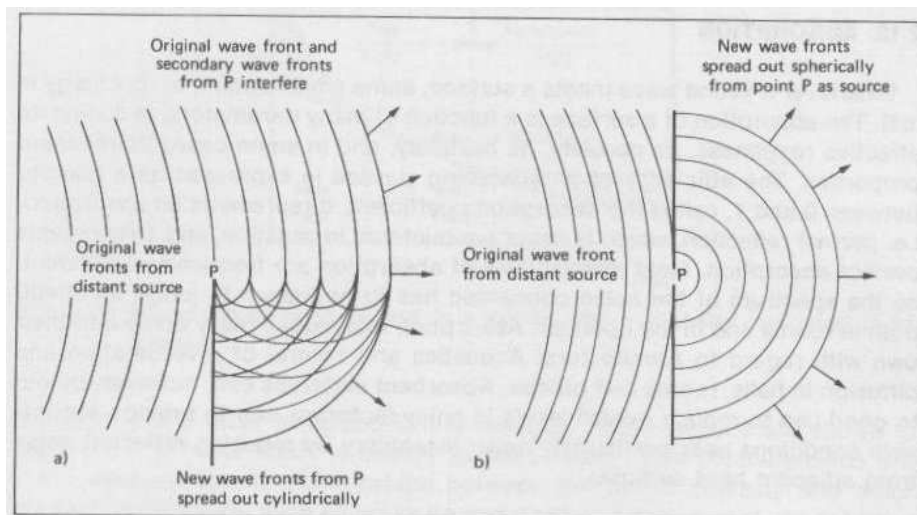
Figuur 5 Reflectie door akoestische 'harde' ondergrond

DiffRACTIE

Wanneer een geluidsgolf een obstakel tegenkomt dat klein is vergeleken met de golflengte zal de golf erlangs passeren en er verder geen invloed van ondervinden. Als echter de frequentie van de golf hoog genoeg en dus de golflengte kleiner wordt, zal er zich achter het obstakel een geluidschaduw ontstaan. Dit fenomeen kan worden verklaard aan de hand van de geluidsfront constructie principe van Christiaan Huygens (1629-1695).

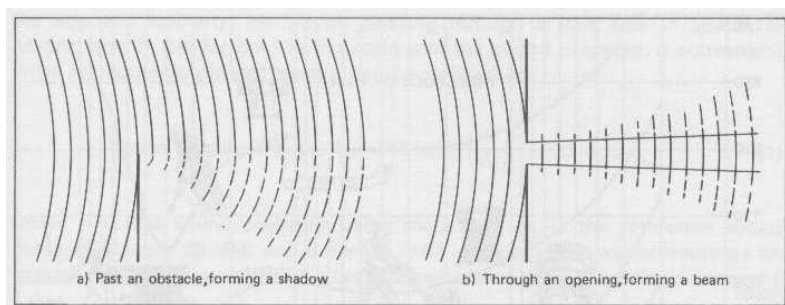
Dit principe zegt dat een bron eigenlijk bestaat uit een oneindig aantal puntbronnen die de oppervlakte bedekken en in alle richtingen uitstralen. Op elk moment in tijd emitteert elke bron

een geluidsgolf en al deze combineren om zodoende het gehele geluidsfront te vormen. Volgens dezelfde wijze kan elk punt op het geluidsfront ook weer beschouwd worden als een nieuwe bron, zodat de volgende positie van het geluidsfront kan worden geconstrueerd uit de vorige. Als dit concept wordt toegepast op de voorbeelden die zijn afgebeeld in figuur 6 is te zien wat er gebeurt met een golffront dat tegen het einde van een wanddeel (a) en in een opening (b) straalt.



Figuur 6 Effect van diffractie bij lage frequenties

In het geval van de eindige wand (figuur 6(a)) kan het einde worden beschouwd als een bron van secundaire golfjes die van de wand afstralen in alle richtingen volgens Huygens' principe. Deze secundaire golven combineren om weer een nieuw golffront te vormen die zich cilindrisch verspreid achter de wand in het zogenaamde schaduwgebied. In het geval van de opening in de wand wordt de opening in feite een nieuwe bron die zijn energie afgeeft in het gebied achter de wand maar met een lagere intensiteit (afhankelijk van de grootte van de opening) dan van de energie van het invallende geluid.



Figuur 7 Effect van refractie voor hogere frequenties

Een grote verhouding tussen golflengte en obstakelgrootte veroorzaakt de diffractie in de voorgaande voorbeelden. Een kleinere verhouding (hogere frequenties dus) resulteert in een meer onderscheidenlijke geluidschaduw achter een barrière, of een geluidsstraal die door de opening penetreert. Het effect van de geluidschaduw is het meest merkbaar wanneer of de bron of de ontvanger zich nabij een obstakel bevinden. In de praktijk is het daarom te prefereren om metingen niet in de buurt van obstakels uit te voeren.

De diffractie maakt dat er voor lage frequenties vrijwel geen schaduw gebieden bestaan: een golffront dat bestaat uit lage frequenties buigt hierdoor ook om grote obstakels (gebouwen etc.) heen. Het effect van diffractie op lage frequenties houdt een andere denkrant in: het bekende stralenmodel dat geldt voor normaal geluid is veel mindere mate van toepassing op laag frequent geluid. Voor lage frequenties geldt een alternatief 'waterkom'-model: als je in het kommetje water giet wordt alles erin nat. Vertaald naar laag frequent geluid: als je achter een flatgebouw gaat staan zul je toch nog een geluidsfront kunnen waarnemen dat zich aan de andere zijde van het gebouw begeeft.

3.1.4 Samenvatting

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de afhankelijkheid van de hiervoor beschreven fysische eigenschappen voor meettechnieken in de buitenlucht.

kenmerk	"gewoon" geluid	laagfrequent geluid
wind sterkte+richting	+	++
temperatuur (inversie)	+	++
vochtigheid	-	-
terrein absorptie	+	-
refractie	+	+
reflectie	++	+
absorptie	+	-
diffractie	+	++

Tabel 3 samenvatting invloed van fysische eigenschappen op overdracht van geluid in lucht

Legenda

weging	mate waarin met eigenschap rekening dient te worden gehouden
- -	niet relevant
-	geen
+	enigszins
++	in sterke mate

In het hoofdstuk meettechniek zal van de diverse meetmethodieken worden vastgesteld in hoeverre rekening is gehouden met de fysische eigenschappen en atmosferische omstandigheden die bepalend zijn voor de overdracht van met name laagfrequent geluid. Voor dat doel zal de bovenstaande tabel dienst doen als referentiekader.

4 Inventarisatie bestaande technieken, apparatuur en methodieken

Dit hoofdstuk geeft aan welke technieken en instrumenten dienen te worden toegepast om laagfrequent geluid te meten. Verder wordt een inventarisatie gemaakt van enkele bestaande methoden die gehanteerd worden voor het meten van laagfrequent geluid in Nederland.

Per meetmethodiek wordt beoordeeld in hoeverre rekening is gehouden met de fysische eigenschappen van laagfrequent geluid zoals deze in het vorige hoofdstuk in kaart zijn gebracht.

4.1 Meettechniek

Metingen van laagfrequent geluid worden met een specifiek doel uitgevoerd. Zoals eerder in dit document is aangegeven worden metingen uitgevoerd ten behoeve van a) bronsterkte bepaling, b) bronanalyse ten behoeve van maatregelen onderzoek en c) het bepalen van de geluidsdosis op een nader bepaalde plaats (vaak bij/in een woning van een persoon die in sterke mate hinder ondervindt van geluid waarvan wordt aangegeven dat het laagfrequent geluid componenten bevat).

Laagfrequent geluid kan worden gemeten op meerdere manieren. Hoewel de omvang van een geluidsgolf op een aantal manieren kan worden bepaald, is het gebruikelijk om de geluidsdruk te meten. Het vaststellen van (lucht)deeltjesverplaatsing of snelheid is tevens maatgevend voor de omvang van de geluidsgolf. Deze parameters zijn niet zonder meer uitwisselbaar voor een gegeven doel. In de praktijk wordt geluidsdruk voor vrijwel alle meettoepassingen gebruikt maar dient men bewust te zijn van bepaalde beperkingen onder bepaalde omstandigheden (zoals de invloed van stoortfactoren die het meetresultaat beïnvloeden). Geluidsintensiteit kan toegepast worden in zowel het vrije veld als het nabijheidveld. Intensiteitsmetingen die in het nabijheidveld worden uitgevoerd zijn maatgevend voor het geluidsvermogen van de bron. Omdat de intensiteit parameter niet gevoelig is voor de invloeden van eventuele nabije bronnen en bovendien in een zeer nauwkeurig raster kan worden gemeten vindt men in de meeste geluidslaboratoria apparatuur waarmee geluidsintensiteit kan worden gemeten.

4.1.1 De microfoon

Om geluidsdruk te meten is een microfoon benodigd. Microfoons bestaan reeds geruime tijd en hebben een hoge graad van ontwikkeling doorgemaakt. De afmetingen van het membraan bepaalt de bandbreedte van de microfoon. Daarbij geldt dat hoe groter het membraan is, hoe gevoeliger de microfoon maar ook hoe beperkter de bandbreedte. Is bovendien het membraan in de ordegrootte van de golflengte dan wordt de microfoon richtingsgevoelig en dat is niet altijd gewenst.

Professionele microfoons hebben een frequentierespons die loopt van circa 20 Hz tot 15 kHz. Voor toepassingen buiten deze waarden zijn speciale microfoons beschikbaar. Zo zijn er microfoons die in staat zijn om zeer lage frequenties te meten (kleiner dan 1 Hz). De ervaring leert dat indien hinder als gevolg van laagfrequent geluid wordt beleefd, het blijkt dat de dominante frequenties relatief hoog liggen (boven 20 Hz). Dit betekent dat het mogelijk is om de meeste onderzoeken naar laagfrequent geluid uit te voeren met standaard microfoons. Ten aanzien van akoestische calibratie van de meetset is de normale 1 KHz calibrator minder geschikt. Een akoestische ijking is niet eenvoudig uit te voeren voor frequenties van 30 Hz en lager en ook een ijking door de fabrikant is niet goed mogelijk.

Voorheen fabriceerde B&K, een belangrijke leverancier van meetapparatuur uit Denemarken, een constante druk calibrator (type 4221 voor ijking van 1 Hz tot 100 Hz), maar deze wordt niet meer gemaakt. In de praktijk zal men moeten aannemen dat de door de leverancier gegeven frequentiekaracteristiek van een microfoon niet verandert in het laagfrequent gebied als deze in het audio gebied onveranderd blijft.

Wanneer een microfoon wordt ingezet dient men zich te realiseren in welk geluidsveld wordt gemeten. De respons van de microfoon wordt voor hogere frequenties beïnvloed door de fysieke afmetingen van de microfoon zelf als gevolg van reflectie en diffractie. Voor lage

frequenties die in het vrije veld (buiten) worden gemeten bestaat dit effect niet.

Microfoon karakteristieken worden meestal ingedeeld in een van de volgende drie wijzen:

- vrije veld
- druk
- willekeurig invalrichting ("random incidence response")

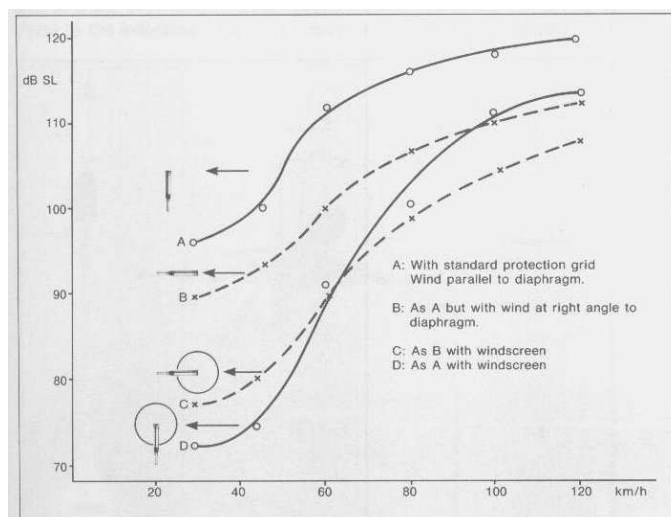
Een vrije veld microfoon is ontworpen om het effect van zijn eigen aanwezigheid in het geluidsveld te compenseren. Uitgangspunt van deze werking is dat het geluidsveld zich uitbreidt in het verlengde van het membraan van de microfoon. De grootste nauwkeurigheid wordt bereikt als de microfoon dus naar de bron is gericht.

Een drukmicrofoon heeft een uniforme frequentiekarakteristiek in het geluidsveld zoals het zich voordoet, inclusief de invloed van de microfoon zelf.

Een diffuus geluidsveld wordt gegenereerd door meervoudige reflecties van het geluid. Voor metingen in een diffuus veld is een willekeurig invalrichting microfoon ontwikkeld. Deze microfoon compenseert de invloed van de aanwezigheid van de microfoon in een diffuus geluidsveld.

De drie microfoon types kunnen ook in een ander type veld gebruikt worden, dan dat waarvoor ze ontwikkeld zijn: drukmicrofoons kunnen bijvoorbeeld in diffuse velden gebruikt worden. Als een vrije veld microfoon in een diffuus veld gebruikt wordt, dan moet een elektronische correctie doorgevoerd worden. Wordt een willekeurig invalrichting microfoon gebruikt in een vrij veld, dan moet de microfoon 70° à 80° gedraaid worden t.o.v. de richting van de bron. Een drukmicrofoon moet in een vrij veld onder een hoek van 90° t.o.v. de bron geplaatst worden.

Het is niet te vermijden dat metingen buiten onder minder goede weersomstandigheden dienen te worden uitgevoerd. Men dient echter beducht te zijn op het effect van wind dat door de microfoon wordt opgepikt. Wind is de oorzaak van ernstige beïnvloeding van het meetresultaat omdat het voor turbulentie zorgt met als resultaat dat een stoorsignaal geïntroduceerd wordt naast het feitelijke gemeten bron signaal. Dit effect is groter naarmate de windsnelheid groter is. Boven een windsnelheid van ca. 8 m/s (4 Beaufort) is het sterk af te raden om buiten metingen uit te voeren. Voor lage frequenties geldt dat de grens lager ligt bij ca. 3 Beaufort. Het spectrale niveau van windruis neemt toe met afnemende frequentie, hetgeen betekent dat wind met name voor laagfrequente geluidsmetingen speciale zorg behoeft. Een windkap vermindert de bijdrage van wind zodat deze altijd dient te worden toegepast. In figuur 8 is het reducerende effect van een windbol zichtbaar gemaakt. In bijlage 5 is een Beaufortschaal opgenomen.

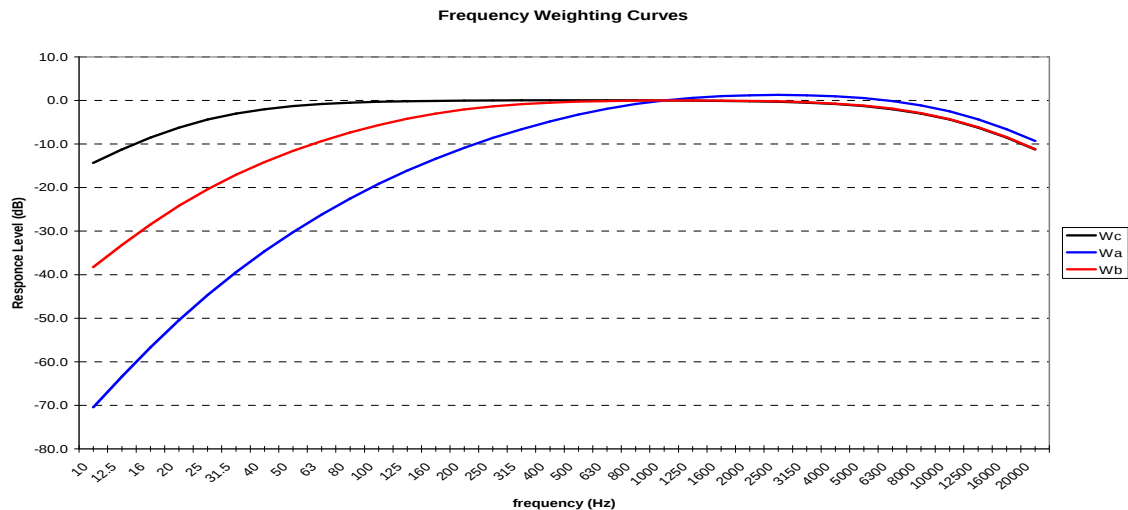


Figuur 8 Het effect van wind op de geluidsmeting

4.1.2 Filters

Meetresultaten worden uitgedrukt in een getal met als eenheid decibel (dB). Naast het getotaliseerde niveau wordt ook de verdeling van de geluidsenergie over het bepaalde spectrum vastgelegd. De breedte van zo'n frequentieband is de octaaf- of éénderde octaafband,

de laatste ook wel tertsband genoemd. Voor laagfrequent geluid is het gebruikelijk dat wordt gemeten in tertsbanden. Naast de dB-getalswaarde dient bij de presentatie van meetresultaten opgegeven te worden welk filter ten behoeve van de meting is toegepast. Filters worden toegepast in de meetapparatuur om het meetsignaal zodanig aan te passen dat het resultaat zoveel mogelijk correspondeert met de frequentiecarakteristiek van het menselijk oor. Voor het meten van “gewoon” geluid wordt vrijwel altijd het A-filter toegepast.

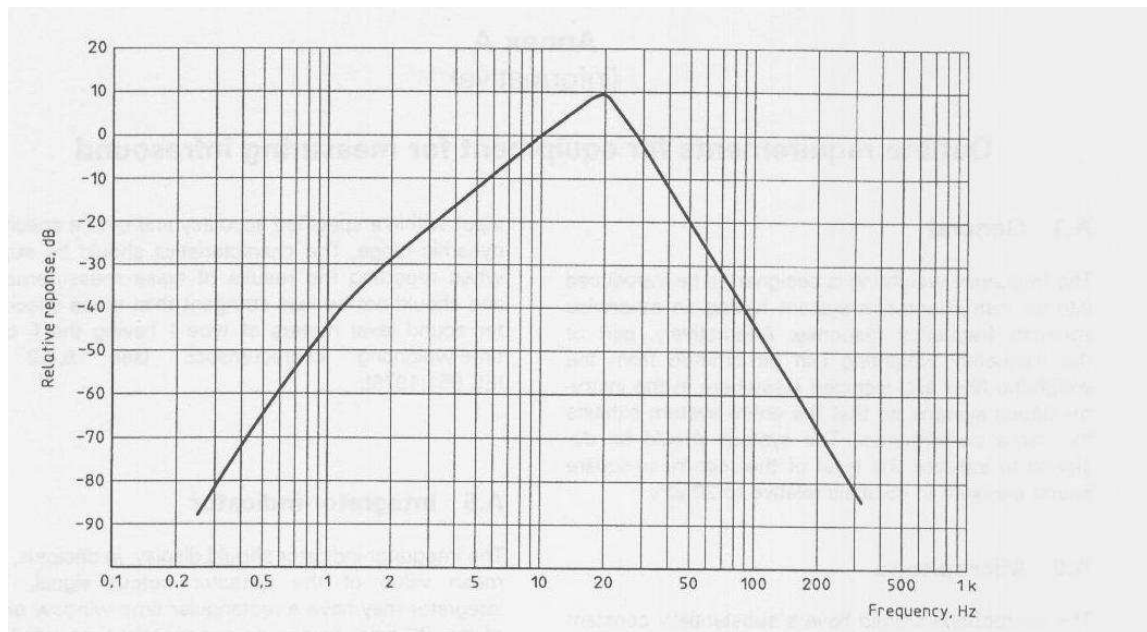


Figuur 9 Weegfilters (ISO)

Het menselijk oor is relatief ongevoelig voor de laagste en de hoogste frequenties. De frequenties ertussen (middenfrequenties) worden doorgaans veel beter gehoord: de gevoeligheid van het menselijk oor is voor dit frequentiegebied het hoogst. Stel nu dat het oor een luid signaal aangeboden krijgt dat alleen maar bestaat uit zeer lage en zeer hoge frequenties: de persoon in kwestie zal, ondanks de hoge niveaus, de *luidheid* anders ervaren dan indien dezelfde hoeveelheid geluidsenergie meer in de middenfrequenties lag.

De door de ISO organisatie vastgelegde A, B en C weegfilters, filteren het door de microfoon opgevangen geluid zodanig dat het gefilterde geluid zo veel mogelijk overeenkomt met de luidheidsgevoeligheid van het menselijk oor. Omdat de luidheidsgevoeligheid afhangt van het geluidsniveau (hoe harder het geluid, hoe minder 'krom' de luidheidsgevoeligheid curve) zijn er 3 filters. Het A-filter is ontworpen voor luidheden tussen 40-50 dB.

Ten behoeve van laagfrequent geluid is door ISO (standaard 7196:1995) het G-filter ontwikkeld [6]. Het werkgebied van het filter ligt tussen frequenties van 1 Hz tot 20 Hz. Het doel van dit specifieke filter is hetzelfde als de eerder genoemde filters: zoveel mogelijk aansluiting te vinden op de wijze waarop de luidheid van laagfrequent geluid wordt ervaren. De karakteristiek van dit filter wijkt overigens sterk af van de overige filters.



Figuur 10 De karakteristiek van het ISO G-weegfilter voor infrageluid

Het G-filter wordt tot heden alleen in zeer specifieke gevallen toegepast. De meeste geluidsniveaumeters zijn niet uitgerust met het filter. Normaliter wordt laagfrequent geluid 'lineair' vastgelegd, d.w.z. zonder toepassing van filters. Hierdoor kan de ongewogen bijdrage beoordeeld worden.

4.1.3 Signaal/ruis verhouding van het gemeten signaal

Bij het uitvoeren van metingen ter bepaling van de immissie vanwege laagfrequent geluid is men overwegend zo ver van de bron verwijderd dat het gemeten signaal een storingscomponent bevat dat het resultaat op negatieve wijze beïnvloedt. Zoals we al zagen is wind een belangrijke bron van storing. Maar ook verkeer, met name vrachtwagens, produceert lage frequenties die een meting negatief kunnen beïnvloeden. Als het geluid waar we in geïnteresseerd zijn, het signaal, zwak is kan dit zogenoemd 'verdrinken' in de aanwezige stoorsignalen, de ruis. De signaal/ruisverhouding drukt de verhouding uit tussen de aanwezigheid van beide componenten in het meetresultaat. Uitgangspunt bij het uitvoeren van metingen is dat gestreefd wordt naar een zo groot mogelijke verhouding.

Een techniek die gebruikt kan worden om de signaal/ruisverhouding te vergroten is het toepassen van coherentie tussen meerdere meetresultaten. Uitgangspunt is hierbij dat het gemeten signaal een bepaalde signatuur heeft (zie paragraaf "de handtekening van herrie") dat wel in het 'signaal' voorkomt van het meetresultaat maar niet in de 'ruis'. Door de coherentie te bepalen tussen beide meetresultaten zal het ruis component onderdrukt worden. Signaalcoherentie is een techniek die met name in de seismologie veel wordt toegepast.

4.1.4 De 'handtekening' van herrie: spectrale componenten

Wanneer we laagfrequent geluid optekenen in tertsbanden zal het veelvuldig voorkomen dat een band een verhoogde amplitude laat zien ten opzichte van de andere banden; deze band springt er zo gezegd uit doordat er zich dominante frequenties in bevinden. Wanneer we de exacte frequentie van de dominante toon willen vaststellen moeten we 'inzoomen' in de band. Om dit mogelijk te maken dient gebruikt gemaakt te worden van smalband-analyse. Een methodiek om deze smalband-analyse uit te voeren is FFT (Fast Fourier Transformation).

Fast Fourier Transformatie is een functie die beschikbaar is op de meer geavanceerde analysatoren. FFT is een berekeningstechniek die werkt op basis van nabewerking van digitaal opgeslagen informatie met smalband filtering als doel. Door de sterke technologische ontwikkelingen van de laatste decennia is het mogelijk deze faciliteit nu ook in draagbare meetapparatuur te integreren. Het resultaat is dat alle gedigitaliseerde meetsamples gelijkmatig

zijn gerepresenteerd in het analyseresultaat zonder dat gegevens verloren gaan doordat de processor bezig is met rekenen. De 'stand der techniek' meetapparatuur is in staat om een constant bandbreedte spectrum van lager dan 1 Hz tot 20.000 Hz te bestrijken. Dit spectrum wordt gekarakteriseerd door het aantal frequentiebandjes, ook wel FFT-regels genoemd. Het is mogelijk resoluties te bereiken van ca. 0,5 Hz bij de bandbreedte van het laagfrequente onderzoeksgebied. Met deze resolutie is het mogelijk om exact de spectrale componenten uit een meting te detecteren. In de praktijk geven de spectrale componenten een signatuur van de bron: vaak is de dominante frequentie direct afgeleid van een motortoerental bijvoorbeeld.

4.2 Apparatuur

Voor het meten van laagfrequent geluid dient de apparatuur aan een bepaald aantal functionele eisen te voldoen. De meeste geluidsdruckmeters, ook wel SLM's (van *Sound Level Meter*) genoemd, voldoen aan de IEC60561 norm. Deze norm beschrijft het werkgebied, de bandbreedte en de meettoleranties van deze klasse van apparaten. Hoewel de bepaling van geluidsintensiteit een andere fysische parameter benodigd (naast de geluidsdruck wordt immers ook de deeltjessnelheid bepaald), wordt voor het bepalen van de geluidsintensiteit in het algemeen toch configuraties gebruikt die gebaseerd zijn op het meten van geluidsdruck. In de volgende paragraaf wordt hier verder op ingegaan.

4.2.1 Apparatuur voor bronsterktebepaling en maatregelenonderzoek

Aan apparatuur voor het vaststellen van geluidsdruck ten gevolge van laagfrequent geluidsbronnen in het veld dient de volgende eisen te worden gesteld:

- draagbaar en accu/batterij gevoed;
- mogelijkheid om lineair en volgens de weegfilters A en C te meten;
- tertsband filters met eventueel smalband analyse mogelijkheid;
- microfoon/voorversterkers die geschikt zijn voor het toepassingsgebied;
- optionele DAT-recorder om het geluid direct digitaal 'af te tappen' voor latere nabewerking;
- ten behoeve van nabewerking: een 1 of 2-kanaals *Realtime analyser* (RTA) met de mogelijkheid tot FFT (*Fast Fourier transformations*);

Om geluidsintensiteit te meten is het noodzakelijk om zowel de instantane geluidsdruck alsook de corresponderende deeltjessnelheid tegelijkertijd te meten. De geluidsdruck kan eenvoudig met een microfoon worden gemeten. Het direct meten van de deeltjessnelheid is minder eenvoudig maar is af te leiden uit berekeningen van de drukgradiënt die verkregen wordt door twee dichtbij geplaatste geluidsdruck metingen. In praktijk betekent dit dat apparatuur voor het bepalen van geluidsintensiteit bestaat uit een hengelconstructie waarin twee microfoons zijn gemonteerd (de zgn. P-P configuratie). De microfoons zijn tegenover elkaar geplaatst door middel van een afstandhouder. De ondergrens van de te meten frequentie is afhankelijk van de lengte van deze afstandhouder. De signaalverwerking die nodig is om de geluidsintensiteit te verkrijgen uit de twee meetsignalen wordt uitgevoerd door de geluidsanalyser door middel van een methode die wordt behandeld in bijlage 4 van dit document.

Een alternatieve methode ter verkrijging van de geluidsintensiteit: de Microflow™

De Microflow is een nieuwe akoestische sensor die niet gevoelig is voor de geluidsdruck, maar voor de deeltjessnelheid. De sensor is uitgevonden in 1994 aan de Universiteit Twente en is inmiddels gepatenteerd. De Microflow wordt gemaakt van silicium en platina. Het hart van de Microflow bestaat uit twee zeer dunne platina draadjes die zeer dicht naast elkaar gepositioneerd zijn. De draadjes zijn 1 millimeter lang, 3 micrometer breed en 200 nanometer dik (zo'n 600 atomen). De weerstandswaarde van platina verandert met temperatuur. De draadjes worden elektrisch verwarmd, en omdat de Microflow symmetrisch is zullen beide draadjes dezelfde temperatuur krijgen. Een luchtstroming langs de draadjes zal ervoor zorgen dat beide draadjes afkoelen. Doordat het eerste draadje afgekoeld wordt door de langsstromende lucht zal de lucht hierdoor een beetje opgewarmd worden. Het tweede draadje wordt nu afgekoeld met warmere lucht en zal dus minder afkoelen dan het eerste draadje. Een temperatuurverschil tussen de draadjes is het gevolg. Als de richting van de langsstromende lucht omdraait zal het temperatuurverschil van teken wisselen: het temperatuurverschil is de

maat voor de snelheid en de richting van de langsstromende lucht, de deeltjessnelheid. Omdat het temperatuurverschil van de twee draadjes wordt gemeten is de Microflown niet gevoelig voor temperatuurvariaties van de omgeving. De Microflown is dus gevoelig voor deeltjessnelheid. Dit is, in tegenstelling tot de geluidsdruk, een vectorgrootheid: een grootheid met een richting. De Microflown is dus een richtingsgevoelig meetinstrument. De Microflown werkt volgens opgaaf van de fabrikant vanaf 0 Hz. De frequentieresponsie is vlak tot 1kHz en daarna daalt de gevoeligheid met 6 dB per octaaf. Dit effect is te corrigeren, hetzij elektrisch hetzij door nabewerking. De claim die het bedrijf doet is dat de intensiteit kan worden vastgesteld vanaf 0 Hz. Deze nieuwe technologie lijkt een alternatief voor de bestaande technische oplossingen voor geluidsintensiteit. Dat met name in het hoog (> 1kHz) de response afvalt is feitelijk voor onderzoek aan laagfrequente geluidsbronnen niet belangrijk.

4.2.2 Apparatuur ter bepaling van immissie

Immissie metingen worden uitgevoerd daar waar men geïnteresseerd is in de absolute hoeveelheid geluid (de dosis). De resultaten van deze vaststelling worden getoetst aan een criterium dat aangeeft of ter plaatse sprake is van een overschrijding. Immissie berekeningen worden bijvoorbeeld uitgevoerd ten gevolge van bestemmingsplanwijzigingen om vast te stellen of ter plaatse van een (toekomstige) geluidsgevoelige bestemming geen geldende norm wordt overschreden. Ook hinder die door personen in hun huizen ervaren wordt kan aanleiding zijn om een immissiemeting te laten uitvoeren om vast te stellen wat de heersende geluidsdruk is ten gevolge van de hinderveroorzakende inrichting.

Als het 'gewoon' geluid betreft is een meting eenvoudig uitgevoerd. Vaak volstaat het simpele resultaat van een meting die door de handhavende instantie wordt uitgevoerd. Indien gemeend wordt dat laagfrequent geluid een rol speelt zal de meting meer voorbereiding vergen. Vaak weten handhavers niet goed raad met de klacht. Indien het ongerief blijft aanhouden en de zaak escaleert zal de meting worden uitbesteed aan een specialist op dit gebied.

De apparatuur die men gebruikt om immissie metingen uit te voeren is dezelfde als die men gebruikt bij het onderzoek naar de bronsterkte van laagfrequent geluidsbronnen met de opmerking dat alleen geluidsdruk wordt gemeten. Geluidsintensiteit als techniek om immissie metingen uit te voeren is niet gebruikelijk, ook al is het technisch beschouwd uitvoerbaar. Men dient wel te realiseren dat in dat geval de intensiteit in het vrije veld wordt bepaald en niet in het nabijheidveld zoals meer gebruikelijk is.

4.3 Meetmethodieken

De emissie van en de immissie ten gevolge van laagfrequent geluidsbronnen kan zowel buiten als binnen worden vastgesteld. Als het bronvermogen dient te worden vastgesteld kan dit in een ruimte indien het geluidsveld volledig diffuus is (parameter: geluidsdruk) en/of in het nabijheidveld (parameter: intensiteit). De immissie van laagfrequent geluid wordt vastgesteld daar waar hinder kan worden ondervonden: zowel buiten als binnenshuis. Voor elk van deze vaststellingen dient een specifieke meetmethodiek te worden gebruikt.

In Nederland hebben een aantal organisaties in meer of mindere mate ervaring opgedaan met laagfrequent geluid.

1. Deels in opdracht van het ministerie van VROM heeft het ingenieursbureau Peutz begin jaren negentig een aantal uitgebreide studies [1,2] gedaan naar de bron-overdracht-ontvanger keten van laagfrequent geluid. In een van de studies [1] wordt een meetmethodiek geïntroduceerd.
2. Een van de oprichters van het akoestisch bureau Van Dorsser, Siegfried Riemens, heeft voor het Handboek Milieubeheer lawaai-beheersing [8] in 1995 een meetmethode geïntroduceerd. Naar deze meetmethodiek is in het verleden regelmatig verwezen.
3. In het kader van het behandelen van klachten naar aanleiding van laagfrequent geluid heeft de milieudienst van het Rijnmondgebied DCMR in de afgelopen jaren regelmatig contact met klagende omwonenden. Bij de dienst is veel nagedacht over de relatie tussen de hinder en de gezondheidseffecten. De DCMR hanteert de NSG meetmethodiek [3] voor het meten van laagfrequent geluid binnenshuis. Voor metingen buiten wordt aangesloten bij de

meetmethodiek van de Handleiding Meten en Rekenen Industrielawaai met dien verstande dat wordt gemeten in tertsbanden zonder filters (lineair).

Verder heeft de zand- en grindwinning in Limburg die in de laatste decennia heeft plaatsgevonden aanleiding gegeven tot veel onderzoek naar de oorzaken van en maatregelen tegen laagfrequent geluid. De toegepaste winninginstallaties zijn notoire bronnen van laagfrequentie geluidsuitstoot die veel hinder voor omwonenden hebben opgeleverd.

4. In dat kader heeft TNO in opdracht van de Provincie Limburg een beoordelingsmethode ontwikkeld [11]. Het rapport wijdt in beperkte mate uit over de gebruikte meetmethode.
5. De provincie Limburg zelf heeft een meetmethodiek ontwikkeld speciaal voor het vaststellen van het bronvermogen van voornoemde zand- en grindwinninginstallaties.

In dit hoofdstuk worden alle genoemde meetmethoden voor vaststelling van laagfrequent geluid buiten geïnventariseerd en getoetst aan het referentiekader dat geschetst is in hoofdstuk 3.

Bedrijf/instantie	Buiten	Binnen
DCMR	nee	ja
NSG	nee	ja
Peutz	ja	ja
Riemens (van Dorsser)	ja	ja
Provincie Limburg	ja	nee
TNO	ja	nee

Tabel 4 Overzicht meetmethodieken voor laagfrequent geluid

De in de tabel genoemde NSG (Nederlandse Stichting Geluidhinder) heeft een hindercurve ontwikkeld voor laagfrequent geluid. Deze curve wordt in Nederland meer en meer toegepast als toetsingsrichtlijn voor potentiële geluidhinder binnenshuis. Een meetmethodiek maakt ook onderdeel uit van de richtlijn. Omdat dit een meetmethode voor binnen betreft zal deze in deze inventarisatie niet nader beoordeeld worden.

4.3.1 Meetmethode Peutz

Tabel 5 geeft een opsomming van de uitgangspunten en meetvoorschriften betreffende de door Peutz en Associés ontwikkelde meetmethodiek.

Methode	Hoogte (m)	Afstand vanaf gevel (m)
emissie (vrije veld)	maaiveld	
immissie (nabij bebouwing)	< 1,0	0,3
uitgangspunten		opmerkingen
windsnelheid	tot 2 Beaufort	
frequentieband resolutie	terts	
filter/weging	lineair	
afstand tot bron (m)	> 10	
aantal meetpunten	niet gespecificeerd	
ondergrens frequentie (Hz)	10	
integratietijd (s)	1	
meetijd (s)	>120	
tijdkarakteristiek	L_{Aeq} , L_{Amax}	geen momentane geluidsdruk L_p

Tabel 5 Meetvoorschrift volgens Peutz

In tabel 5a is aangegeven in welke mate de meetmethodiek voldoet aan de beperkende overdrachtsfactoren.

Referentie factoren	significantie voor laagfrequent geluid	Mate waarin met referentiefactor rekening wordt gehouden
windsterkte+richting	++	OK
temperatuur (inversie)	++	niet genoemd
vochtigheid	-	niet genoemd
terrein absorptie	-	OK
refractie	+	niet genoemd
reflectie (bodem + gevel)	+	OK
absorptie	-	OK
diffractie	++	OK

Tabel 5a Vergelijking met referentie factoren

Beoordeling

Dit meetvoorschrift is beschreven in een notitie die in het kader van het project 'onderzoek laagfrequent geluid' destijds (1989) ontwikkelt is voor het Ministerie van VROM. In het document [1] worden zowel meetvoorschriften voor buiten als binnen voorgesteld.

De technische basis van de notitie komt voort uit een uitgebreide studie [2] die – ook in opdracht van VROM – is uitgevoerd het jaar ervoor in 1988. In de voorgestelde meetmethodiek is de verworven kennis juist toegepast. Met name de kennis rond de invloed van wind op het meetresultaat heeft ertoe geleid dat hieraan specifieke aandacht is gegeven in het meetvoorschrift.

4.3.2 Meetmethode van Riemens (van Dorsser)

Tabel 6 geeft een opsomming van de uitgangspunten en meetvoorschriften betreffende de door Riemens ontwikkelde meetmethodiek.

Methode	Hoogte (m)	Afstand vanaf gevel (m)
emissie (vrije veld)	5	minimaal 3,5 verwijderd
immissie (nabij bebouwing)	5	minimaal 3,5 verwijderd
uitgangspunten		opmerkingen
windsnelheid	tot 4 Beaufort	
frequentieband resolutie	terts	
filter/weging	A, C	
afstand tot bron (m)	> 10	
aantal meetpunten	minimaal 4	gelijke afstand tot bron
ondergrens frequentie (Hz)	20	
integratietijd (s)	1	
meettijd (s)	>120	
tijdkarakteristiek	L_p, L_{Aeq}, L_{Amax}	
correctie voor achtergrondniveau	ja	

Tabel 6 Meetvoorschrift volgens Riemens

In tabel 6a is aangegeven in welke mate de meetmethodiek voldoet aan de beperkende overdrachtsfactoren.

Referentie factoren	significantie voor laagfrequent geluid	Mate waarin met referentiefactor rekening wordt gehouden
windsterkte+richting	++	OK
temperatuur (inversie)	++	OK
vochtigheid	-	OK
terrein absorptie	-	OK
refractie	+	niet genoemd
reflectie (bodem + gevel)	+	OK
absorptie	-	OK
diffractie	++	niet genoemd

Tabel 6a Vergelijking met referentie factoren

Beoordeling

Deze meetmethodiek is gebaseerd op eerdere onderzoeken die zijn uitgevoerd door derden aangevuld met de persoonlijke praktijkervaring. Duidelijk wordt dat de ervaring de ontwikkelaar heeft geleerd extra aandacht te geven aan de reproduceerbaarheid van de metingen. In dat kader worden opmerkingen geplaatst over het effect van temperatuurinversie en windsterkte. Desalniettemin wordt ervan uitgegaan dat bij windkracht 4 toch laagfrequent geluidsmetingen kunnen worden uitgevoerd.

Hoewel de meetmethode is ontwikkeld in een tijd dat moderne lichtgewicht digitale meetapparatuur beschikbaar was is dit in de methode zelf minder goed uitgediept.

4.3.3 Meetmethode Provincie Limburg

Tabel 7 geeft een opsomming van de uitgangspunten en meetvoorschriften betreffende de door de Provincie Limburg ontwikkelde meetmethodiek.

Methode	Hoogte (m)	Afstand vanaf gevel (m)
emissie (vrije veld)	5	niet van toepassing
uitgangspunten		opmerkingen
windsnelheid		HMRI
frequentieband resolutie	terts	
filter/weging	geen	
afstand tot bron (m)	lengte van meetobject	maximaal 80 m
aantal meetpunten	minimaal 4	alzijdig van bron
ondergrens frequentie (Hz)	6,3 Hz	
integratietijd (s)	1	
meettijd (s)	>120	
tijdkarakteristiek	L_{Aeq}	geen momentane geluidsdruk L_p
correctie voor achtergrondniveau	niet genoemd	

Tabel 7 Meetvoorschrift volgens Provincie Limburg

In tabel 7a is aangegeven in welke mate de meetmethodiek voldoet aan de beperkende overdrachtsfactoren.

Referentie factoren	significantie voor laagfrequent geluid	Mate waarin met referentiefactor rekening wordt gehouden
windsterkte+richting	++	volgens HMRI
temperatuur (inversie)	++	geen
vochtigheid	-	geen
terrein absorptie	-	OK
refractie	+	niet genoemd
reflectie (bodem + gevel)	+	OK
absorptie	-	OK
diffractie	++	niet genoemd

Tabel 7a Vergelijking met referentie factoren

Beoordeling

Ten behoeve van de aanvraag WM vergunning in het kader van grindwinning wenst de Provincie Limburg van de aanvrager een bevestiging dat het bronvermogen niet groter is dan 116 dB(A). Dit geldt voor het audio geluid alsook voor de laagfrequent geluidsemissie. Om zeker te zijn dat dit vermogen op de juiste wijze wordt vastgesteld heeft de Provincie gemeend dit meetprotocol te moeten ontwikkelen. Het is dan ook primair bedoeld voor de WM vergunningaanvrager.

Er wordt in de methodiek aangesloten bij de HMRI. Hiervan is inmiddels bekend dat deze een vast meteoraam stelt waarbinnen de metingen voldoende representatief geacht worden. Voornoemde handleiding sluit echter minder goed aan op de specifieke overdrachtsfactoren die relevant zijn voor laagfrequent geluid. Getoetst aan de referentiefactoren uit tabel 7a kan gesteld worden dat hieraan beperkt rekening is gehouden tijdens de meetpraktijk. Omdat de methode specifiek tot doel heeft om het bronvermogen vast te stellen en de meetafstand kort genoemd mag worden dient wel opgemerkt te worden dat afwijkingen in de reproductie van metingen waarschijnlijk beperkt zullen blijven.

4.3.4 Meetmethode TNO

Tabel 8 geeft een opsomming van de uitgangspunten en meetvoorschriften betreffende de door TNO ontwikkelde meetmethodiek.

Methode	Hoogte (m)	Afstand vanaf gevel (m)
emissie (vrije veld)	5	niet van toepassing
uitgangspunten		opmerkingen
windsnelheid	niet genoemd	
frequentieband resolutie	ters, smalbandig	
filter/weging	niet genoemd	
afstand tot bron (m)	2x lengte bron	100 a 150 meter
aantal meetpunten	minimaal 4	alzijdig van bron
ondergrens frequentie (Hz)	20	
integratietijd (s)	1	
meettijd (s)	niet genoemd	
tijdkarakteristiek	L_{Aeq}	
correctie voor achtergrondniveau	ja	

Tabel 8 Meetvoorschrift volgens TNO

In tabel 8a is aangegeven in welke mate de meetmethodiek voldoet aan de beperkende overdrachtsfactoren.

Referentie factoren	significantie voor laagfrequent geluid	Mate waarin met referentiefactor rekening wordt gehouden
windsterkte+richting	++	niet genoemd
temperatuur (inversie)	++	niet genoemd
vochtigheid	-	niet genoemd
terrein absorptie	-	niet genoemd
refractie	+	niet genoemd
reflectie (bodem + gevel)	+	OK
absorptie	-	OK
diffractie	++	niet genoemd

Tabel 8a Vergelijking met referentie factoren

Beoordeling

In opdracht van de Provincie Limburg heeft TNO Civiele Infrastructuur een rapport opgesteld waarin voorstellen worden gedaan voor beoordelingsmethoden inzake laagfrequent geluid en trillingen in woningen ten gevolge van grindwinning vanaf grindwinningschepen [11]. De aanleiding van dit rapport is dat de Provincie een wetenschappelijk onderbouwd voorstel wenste te ontvangen op basis waarvan zij de taak als bevoegd gezag inzake vergunningverlening voor grindwinningprojecten zo goed mogelijk kunnen uitvoeren.

De voorgestelde meetmethodiek is beperkt van opzet en richt zich voornamelijk op vaststelling van het bronvermogen van grindschepen.

Er wordt niet ingegaan op de voor laagfrequent geluid belangrijke referentiefactoren.

4.4 Tussenconclusie

Het doel van deze paragraaf is aan te geven welke inconsistenties en omissies er zijn bij de bestaande meetmethodieken in relatie tot de fysische beginselen van laagfrequent geluid.

Ten aanzien van de invloed van wind op het meetresultaat is het meetvoorschrift van Peutz het meest stellig. Er wordt voorgesteld waar mogelijk te meten op maaiveld hoogte, dat is aan de bodem. Verder wordt geadviseerd niet te meten bij een windsterkte van meer dan 2 Beaufort. Dit legt beperkingen op aan geschikte meetmomenten.

Het effect van temperatuurinversie wordt in geen enkel meetvoorschrift genoemd. Riemens maakt een opmerking maar het voorschrift gaat niet in op het daadwerkelijk effect op het resultaat.

DiffRACTIE is van groot belang bij laagfrequent geluid. Het maakt dat het bekende stralenmodel dat van toepassing is op normaal geluid vervangen is door een 'waterkom'-model voor laagfrequent geluid. Het effect van diffractie is relevant voor buitenmetingen in het vrije veld dat door aanwezigheid van grote objecten als flatgebouwen en hoge woonrijen toch mogelijk niet zo vrij is als gewenst. Het effect van diffractie kan het resultaat beïnvloeden.

5 Meetmethodiek ter verkrijging van betere reproduceerbaarheid

5.1 Introductie en uitgangspunten

Het doel van dit hoofdstuk is een meetmethode te introduceren die zo goed mogelijk rekening houdt met relevante fysische eigenschappen van lucht in de atmosfeer op de overdracht van laagfrequent geluid en hierdoor poogt een betere reproduceerbaarheid te bieden. Op basis van de tussenconclusie uit het vorige hoofdstuk worden voorstellen gedaan ten einde een meetmethode te verkrijgen die in hoge mate voldoet aan de belangrijkste referentiecriteriën opgesomd in hoofdstuk 3.

Deze methode is niet goed vergelijkbaar met andere meetmethodes. De reden hiervoor is dat deze methode is gebaseerd op FFT-spectrumanalyse. Deze analyse levert zo veel data op dat deze het best visueel geïnterpreteerd kan worden. De geïnterpreteerde methodes zijn afgeleid van de meetmethodes voor normaal geluid en zijn gebaseerd op het uitdrukken van het resultaat in getalwaarden.

De uitgangspunten van de voorgestelde meetmethode zijn als volgt:

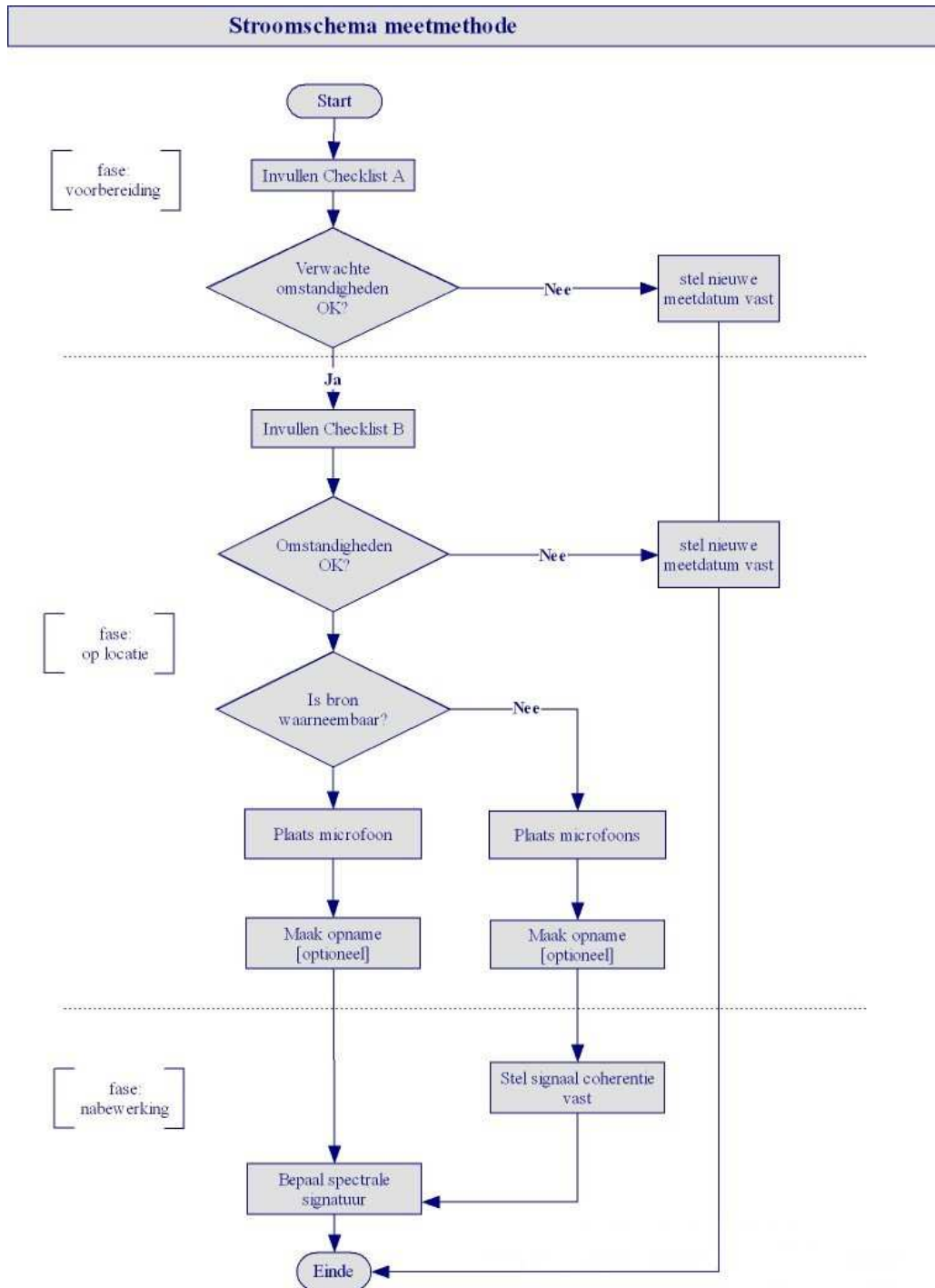
1. Geschikt voor metingen in de buitenlucht;
Zoals eerder in dit rapport is aangegeven richt het onderzoek zich op de invloed van de atmosferische overdrachtsfactoren. De meetmethode is derhalve geschikt voor het uitvoeren van metingen buiten. Binnenshuis gelden andere uitgangspunten, waarin de voorgestelde meetmethode niet voorziet. Dit is een mogelijk onderwerp voor verdere studie.
2. Voor zowel bronsterkte bepalingen, maatregelen onderzoek alsook immissie metingen;
De voorgestelde meetmethode biedt voor de genoemde meetdoelen een goed resultaat.
3. Een optimaal resultaat vereist nabewerking van metingen;
De meetmethodiek voorziet in het vaststellen van de spectrale 'signatuur' van de bron. Indien er sprake is van hoge stoorniveaus voorziet de meetmethode in onderdrukking van de storingsinvloeden ten gevolge van omgevingslawaaï ten tijde van de metingen. Hiervoor is echter nabewerking noodzakelijk. Met de geavanceerde meetapparatuur van vandaag is het in de praktijk mogelijk direct een spectrumanalyse uit te voeren. Vaststellen van de correlatie tussen meerdere meetresultaten vereist een nabewerking met FFT-spectrumanalyse berekeningen die ofwel beschikbaar zijn in de gebruikte analysator of berekend kunnen worden met een computer. Indien betrouwbare meetresultaten snel dienen te worden geproduceerd is het niet ondenkbaar de noodzakelijke nabewerking met behulp van een notebook computer op locatie uit te voeren.
4. Geschikt voor de specialist;
Het doelmatig hanteren van de voorgestelde apparatuur en de benodigde kennis van de vereiste nabewerking maken dat deze meetmethode meest geschikt is voor de professional. De methode is minder geschikt (en ook niet bedoeld) voor de handhaver. Overigens maakt de vereiste lijst van benodigde apparatuur dat in de praktijk alleen gespecialiseerde akoestische adviesbureaus deze meetmethodiek zullen uitvoeren.

5.2 Voorstel meetmethode

De meetmethode beschrijft in detail hoe een laagfrequent geluidsmeting dient te worden uitgevoerd. Voordat echter wordt gemeten, en dit geldt speciaal voor immissiemetingen, dient eerst bepaald te worden of de weersomstandigheden een meting toelaten. Hiertoe maakt een checklist deel uit van de meetmethode. De ingevulde checklist geeft door middel van het toekennen van een 'go/no go'-criterium aan in hoeverre de omstandigheden een meting op het geplande tijdstip toelaten. Het laat zich aanzien dat gestreefd dient te worden naar meewerkende omstandigheden en dat deze omstandigheden worden bereikt indien voldaan kan worden aan de referentiecriteriën voor laagfrequent geluid.

Stroomschema

Hieronder is het stroomschema van de meetmethodiek laagfrequent geluid uitgewerkt.



Figuur 11 stroomschema meetmethode voor laagfrequent geluid

5.2.1 Fase voorbereiding: de checklist

De checklist heeft twee gedeelten: een gedeelte dat inzicht geeft of het zinvol is om de meting uit te voeren op het geplande tijdstip en een deel dat ingevuld wordt op locatie zodat de omstandigheden goed gedocumenteerd zijn.

De volgende vragen komen voor op de checklist:

- Rubriek A: ter voorbereiding van de meetsessie
- Rubriek B: op locatie

De vragen die in rubriek A zijn ondergebracht zijn de volgende:

1. Verwachte datum/tijdstip meetsessie
2. Verwachte windrichting
3. Verwachte windsnelheid
4. Verwachte bewolkingsgraad
5. Verwachte temperatuur
6. Verwachte stabiliteitsklasse

De vragen die in rubriek B zijn ondergebracht zijn de volgende:

1. Datum/tijdstip meetsessie
2. Windrichting
3. Windsnelheid
4. Bewolkingsgraad
5. Temperatuur
6. Stabiliteitsklasse
7. Kan er sprake zijn van temperatuurinversie?
8. Is de vermeende geluidsbron in de meewind of tegenwind t.o.v. meetpunt?
9. Hoever staat meest dichtbij gelegen object? (schets de directe omgeving)
10. Zijn er stoorgeluiden hoorbaar?
11. Hoe manifesteert het laagfrequente geluid zich?

Toelichting:

Ad 7 Wordt de meting 's nachts/ in de vroege ochtend uitgevoerd en is het helder en koel?

Ad 10 Waaruit bestaat het stoorgeluid?

Ad 11. Kan zijn continu, intermitterend regelmatig, intermitterend onregelmatig, incidenteel

In bijlage 6 is Checklist B uitgewerkt.

5.2.2 Fase op locatie: het meetvoorschrift

Op locatie kan men zich bedienen van een minimale en een optimale configuratie. Ten aanzien van apparatuur dient vermeld te worden dat meerdere apparaten in staat zijn om dezelfde functie te vervullen. Recente technologische ontwikkelingen op het gebied van draagbare computers maken dat het anno 2005 eenvoudig is geluidsopnamen direct, dat wil zeggen in realtime, ten behoeve van nabewerken op de harddisk van een computer op te slaan. Enige jaren geleden had men voor dat doel van opslag een DAT-recorder nodig. Een DAT-recorder voldoet nog steeds voor dit doel maar de beschikbaarheid van speciale nabewerkingprogrammatuur in combinatie met op de PC opgeslagen geluidsopnamen maakt dat dit de trend aan het worden is.

De minimale configuratie bestaat uit een:

- Een standaard microfoon ingebouwd in een bodem meetbak;
- type I SLM of RTA met ondersteuning van tertsbanden en/of smalbanden;
- mogelijkheid voor Fast Fourier Transformation (FFT) op RTA dan wel PC;
- DAT-recorder of (draagbare) PC met geluidskaart;

De optimale configuratie bestaat uit een:

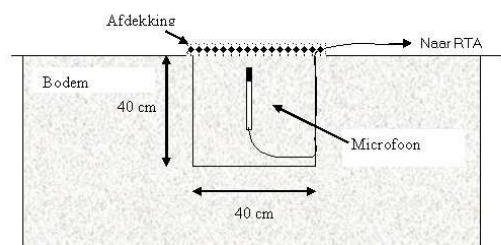
- Twee microfoon ingebouwd in separate bodem meetbakken;
- Twee-kanaals RTA met ondersteuning van tertsbanden en smalbanden;
- mogelijkheid voor Fast Fourier Transformation (FFT) op RTA dan wel PC;
- DAT-recorder (of PC) waarop beide signalen in 'realtime' kunnen worden opgenomen;

Indien bron bekend en akoestisch gezien duidelijk waarneembaar is kan volstaan worden met de minimale configuratie. De optimale configuratie wordt toegepast in alle overige gevallen.

Positie van de microfoon

De microfoon wordt met behulp van een microfoonhouder geïsoleerd opgehangen in een zgn. bodembak. De bodembak is een houten of kunststof bak die in de grond ingegraven wordt. De microfoon is zodanig geplaatst dat het membraan vrijwel gelijk loopt met het bodemvlak. Over de bak wordt een geluidsdoorlatende schuimmat gelegd. Als alternatief kan de microfoon met

windkap rechts omhoog in de bodembak geplaatst worden (zie foto).



Figuur 12 Schets en foto van de bodembak

De microfoon wordt aangesloten op een kanaal van de RTA. Indien een DAT-recorder aanwezig is wordt deze gevoed uit de *AC-output* van de RTA. Op deze uitgang is het geluid analoog beschikbaar. Men sluit dit aan op een kanaal van de DAT recorder.

De optimale configuratie wordt toegepast indien de bronlocatie onduidelijk is en bovendien op het gehoor niet waarneembaar is. In dit geval worden twee bodembakken geplaatst op circa 10 meter van elkaar (circa 2 kabellengten van 5 meter). De beide microfoons worden aangesloten op een 2-kanaals analysator. Optioneel gaan de uitgangen naar een DAT-recorder die dan op elk van de kanalen een meetsignaal vastlegt.

Kalibreren

De gehele keten wordt gekalibreerd met een gewone 1KHz calibrator. Bij gebrek aan calibratoren in het frequentiegebied waarin we geïnteresseerd zijn zullen we het ermee moeten doen. Dat de frequentieresponse voor zeer lage frequenties lager is dan op de genoemde ijkfrequentie hoeft geen probleem te zijn: de verzwakking zal hooguit enige dBV's zijn. Zorg er wel voor dat het iksignaal op 0 dB op de DAT recorder wordt opgenomen. Bij het afspelen ten behoeve van het nabewerken dient deze ook weer op 0 dB te staan.

Instellingen RTA

Indien het heersende geluid wordt opgenomen om later nabewerkt te worden hebben de bandfilters van de RTA nog niet direct een functie. Indien men in aanvulling op de gegevens die volgen uit de nabewerking geïnteresseerd is in dB getalswaarden is het best de RTA in te stellen met volgende parameters:

- tijdbasis: slow
- weging: lineair
- meetstand:
- indien continu aanwezig: Leq
- indien intermitterend aanwezig: Leq gedurende hoorbare intervallen *
- meetduur: minimaal 2 minuten

Positie van personen

De fysieke positie van personen in de directe nabijheid van de microfoons is niet kritisch. Aanbevolen wordt om de meetapparatuur op te stellen tussen de twee meetbakken in, dus op ca. 5 meter van de microfoons. Het gebruik van al te lange kabels (>15m) en verlengkabels dient vermeden te worden in verband met de invloeden van impedantie demping.

5.2.3 Fase nabewerking: de analyse

Vaststellen van spectrale signatuur

Het doel van deze bewerking is de spectrale signatuur (zie 4.1.4) vast te stellen van het opgenomen signaal. Dit kan eenvoudig kan door middel van nabewerking door gebruikmaking

van de FFT-techniek, zowel in *realtime* als later op een andere locatie.

Stel de RTA in op FFT analyse. Gebruik hierbij het *Hanning window*. Toepassing van het Hanning window geeft een goede onderdrukking van de zogenaamde zijlobben zonder de resolutie te zeer aan te tasten. In de verklarende woordenlijst wordt verder ingegaan op het gebruik van deze (en andere) functies die onderdeel zijn van FFT-functies.

Vaststellen coherentie tussen beide meetsignalen

De reden dat we in deze meetmethode twee microfoons gebruiken is om de *coherentie* tussen beide signalen te kunnen vaststellen. Doordat de microfoons 10 meter uit elkaar zijn opgesteld zal het aanwezige laagfrequente geluid door beide microfoons zijn opgepikt. De turbulenties van de wind en andere stoorgeluiden, oftewel de ruis, wordt door elke microfoon apart vastgelegd. Coherentie tussen de signalen is datgene dat beide signalen in min of meer gelijke mate gemeenschappelijk hebben. Omdat ruis per definitie geen patronen in het amplitude of tijddomein vastlegt zal deze worden onderdrukt. Storing als gevolg van wind is turbulent van karakter en zal zich nooit op eenzelfde wijze tegelijkertijd manifesteren. Dit betekent dat het aandeel van de ruis sterk wordt verkleind in het zogenaamde *kruisspectrum*.

Nadat de opnames zijn gemaakt, of in 'realtime', wordt van elk signaal een smalband-analyse door middel van FFT gemaakt.

Het kruisspectrum

Het kruisspectrum kan op meerdere manieren worden bepaald en hangt af van de gebruikte apparatuur. Gesteld mag worden dat alle realtime analysatoren met ondersteuning van minimaal twee kanalen een kruisspectrum bieden waar de coherentie van kan worden afgeleid. Verder is het mogelijk om met geavanceerde mathematische rekenprogrammatuur zoals PC Matlab een kruisspectrum te berekenen. In het laatste geval dienen de twee signaalstromen op de PC beschikbaar te zijn.

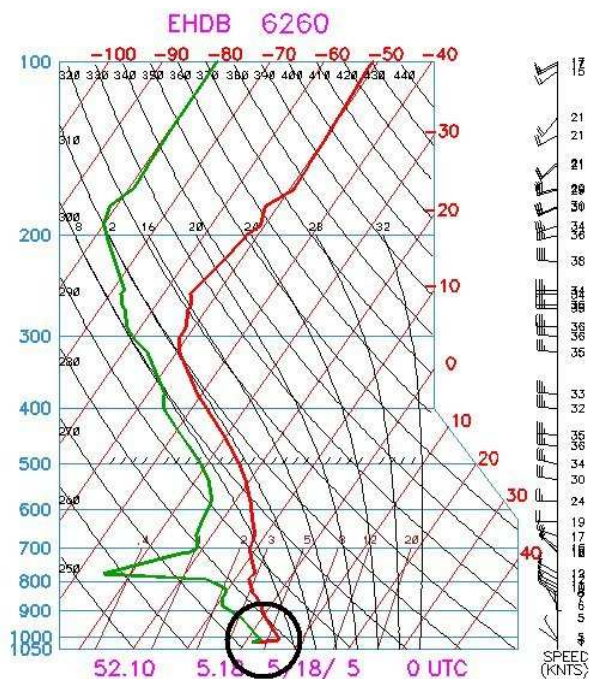
5.2.4 Compensatie van invloedsfactoren

Met behulp van de checklists kan een minder gunstige omstandigheid worden voorzien en uitgesloten. Er zijn echter factoren die desondanks het meetresultaat zullen beïnvloeden. In de paragraaf worden deze behandeld.

Temperatuurinversie

In paragraaf 3.1.3 zagen we dat temperatuurinversie een effect heeft op de overdracht van laagfrequent geluid. De lange golven zitten 'vast' in de luchtlaag waarin de temperatuurinversie optreedt. Het effect is dat (door reflecties en refractie) meer golven (lees: meer energie) gebundeld worden. Dit verklaart waarom – bij een laag achtergrondniveau - soms wel en soms niet 's nachts en 's ochtend extra last van hinder ondervonden wordt: bij inversie draagt het geluid verder dan in de normale temperatuursituatie. Het effect van een laagfrequent geluidsbron is dus op grotere afstand waarneembaar. Het is dus zaak rekening te houden met inversie. Maar hoe kan men vaststellen dat er sprake is/was van grondinversie zodat we het meetresultaat hierop kunnen compenseren? En hoe groot dient deze compensatie te zijn?

Voor het bepalen van de aanwezigheid van grondinversie bestaat een bron op het Internet (<http://www.arl.noaa.gov/> te bereiken via <http://meteosite.net/>) die twee maal per dag de gegevens ververst. Voor Nederland wordt de situatie in De Bilt als uitgangspunt gehanteerd. Hieronder is een figuur afgebeeld waarop is te zien dat er sprake is van grondinversie.



Figuur 12 Plot met informatie over temperatuurverloop als functie van luchtdruk(hoogte)
(bron: <http://www.arl.noaa.gov/> via <http://meteosite.net/>)

De rode lijn geeft de temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) aan als functie van luchtdruk (hPa). Diagonaal van rechts naar linksonder zijn de isothermen afgedrukt. De isobaren (in blauw) lopen horizontaal aan de linkerzijde van het diagram.

In de cirkel is zichtbaar dat juist boven het aardoppervlak de rode lijn naar rechts loopt: dit is de grondinversie.

Hoe dienen we te compenseren voor het effect van inversie?

Het effect van inversie is dat laagfrequent geluid verder draagt. Indien sprake is van inversie zal het geluid zich kunnen manifesteren op locaties waar het onder normale temperaturomstandigheden niet meer reikt. Voor locaties die in het laagfrequente geluid golfvront onder normale temperaturomstandigheden liggen is het aannemelijk om te verwachten dat hogere geluidsdrumniveaus zullen heersen. De omvang van de geluidsdrumniveaus toename dient naar mijn mening in een verdere studie onderzocht te worden. De voorgestelde meetmethodiek toetst in ieder geval het bewustzijn op de mogelijke aanwezigheid van de effecten van temperatuurinversie.

5.3 De meetmethode in de praktijk

In deze paragraaf wordt beschreven hoe het meetvoorschrift zich in praktijk bewijst. Het doel van de praktijktoets is vast te stellen dat de voorgestelde meetmethode daadwerkelijk een meer reproduceerbaar resultaat levert.

Hiertoe zijn een 40-tal metingen uitgevoerd waarbij de meethoogte zowel op maaiveld lag (gebruik van de bodembak) alsook op 5 meter door middel van een statief. De meethoogte van 5 meter is de gebruikelijke meethoogte en is toegepast om een goede vergelijking te kunnen maken met de metingen in het bodemvlak. Naast variaties in het z-vlak (de hoogte) is ook de invloed van variaties in het x-vlak (afstand bron-ontvanger) vastgesteld.

De tabel hieronder geeft een overzicht van de meetdoelstellingen:

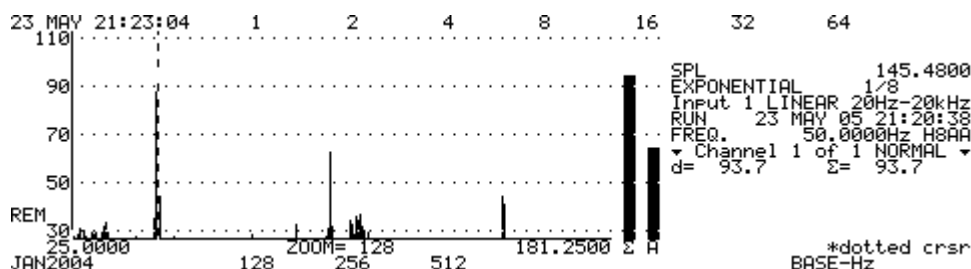
doelstelling	techniek	meetcriterium
1	variatie in meethoogte (mv+0, mv+5)	invloed van wind vaststellen
2	variatie in meetpositie x,y,z en x-5, y,z	invloed van golfvase vaststellen
3	FFT spectraalanalyse	spectrale signatuur vaststellen

Tabel 9: Overzicht meetdoelstellingen

De apparatuur die gebruikt is voor deze praktijktoets bestaat uit:

- Larson & Davis model 2800 RTA - single channel s/n 0369
- Drukmicrofoon type 2541 s/n 4172 en preamp type 900B s/n 0344

De realtime analysator beschikt over een FFT-functie tot 800 regels waarbij het FFT-window variabel is in te stellen. De *apodizatiefuncties* 'Hanning' en 'linear' worden ondersteund.



Figuur 13 Larson & Davis 2800 RTA – spectrumanalyse van een pure 50 Hz sinustoon

Verder beschikt de analysator over een groot scherm dat realtime spectrale informatie kan weergeven. In figuur 13 is het spectrum te zien van een pure 50 Hz sinusoidale toon. Op het scherm is een cursor door middel van streepjes aangegeven. Deze staat op de frequentie van 50 Hz. Wanneer we beter kijken naar de spectrale verdeling zien we ook bij 100 Hz en 150 Hz een (steeds kleiner wordende) bijdrage. Het betreft hier harmonischen van de aangeboden grondtoon van 50 Hz. Feitelijk geeft dit aan dat de toon niet zuiver sinusoidaal is: er is enige aantasting van de pure golfvorm.

Indien we de meter aansluiten op een PC kunnen we de spectrale data beschikbaar maken in bijvoorbeeld een spreadsheet. Als we de FFT-resolutie hebben ingesteld op 800 regels resulteert dit in een spreadsheet met 800 kolommen om het bovenstaande spectrum numeriek te beschrijven.

5.3.1 Beschrijving meetobject en historische meetgegevens

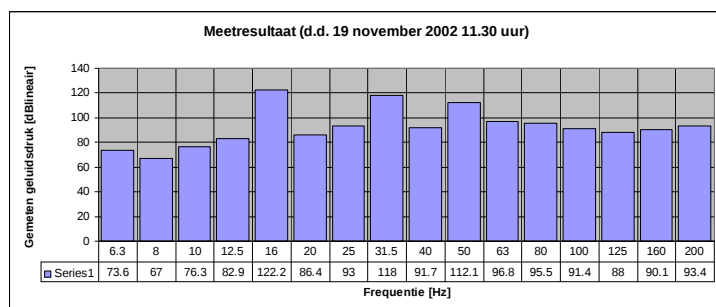
De laagfrequent bron in kwestie is een zand- en grindverwerkend ponton van de firma Dekker uit IJzendoorn genaamd Rotterdam 55. De inzet van dit werktuig maakt deel uit van een grootschalig zandwinning project in de Kraaijbergse Plassen (nabij Cuijk in Noord Brabant). In 2002 is door SIGHT een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden om de uitstoot van laagfrequent geluid dat wordt veroorzaakt door de winningwerktuigen te reduceren. Op basis van metingen destijds is vastgesteld dat met name de Rotterdam 55 een belangrijke bijdrage levert aan deze uitstoot. Het blijkt dat de laagfrequent energie wordt opgewekt door de trilzeven aan boord. De zeven worden belast met opgezogen (nat) zand en door middel van trilling droog gezeefd. De zeven zijn omvangrijk met een lengte van 3 meter en een breedte van ca. 2 meter. De trilfrequentie was destijds niet variabel en bedroeg 965 toeren per minuut.

Het doel van de meting was om op detailniveau vast te stellen welke procesonderdelen de grootste bijdrage aan de laagfrequent uitstoot hadden. Om dit doel te bereiken werden delen van de ponton aan- en uitgeschakeld, de zeven belast en niet belast etc. Tussen elke genomen stap werd een meting uitgevoerd. Op basis van analyse van de meetresultaten achteraf (op kantoor) hebben wij getracht de 'boosdoener' op componentniveau te traceren.

De volgende uitgangspunten waren destijds van toepassing:

- de afstand tot het object bedroeg tussen 50 en 100 meter;
- het windkracht was licht, kracht 2 a 3;
- de lucht was vochtig zonder neerslag;
- de meethoogte 5 meter;
- er werd lineair gemeten in tertsbanden;

Een van de metingen uit november 2002 geeft het volgende spectrum aan.



Figuur 14 Tertsband spectrum van werktuig Rotterdam 55

Het meetresultaat laat zien dat de 16 Hz tertsband domineert. Additionele trillingsmetingen van de trilzeef zelf gaven ten tijde aan dat de kast trilt met een frequentie van 16,08 Hz. Dit komt exact overeen met het toerental van 965 toeren per minuut. De geluidsmeting op afstand bevestigde de gemaakte conclusie.

5.3.2 Meet sessie van 27 mei 2005

Op locatie is de Checklist ingevuld:

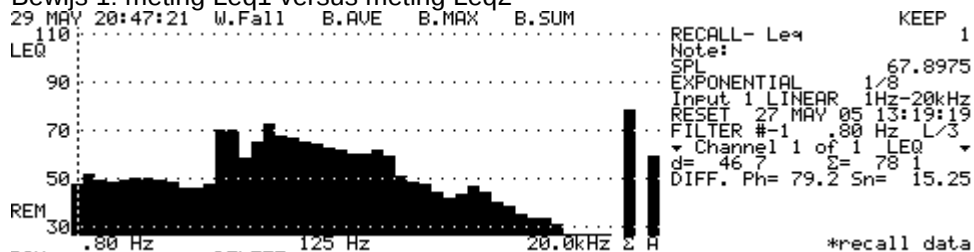
	Vragen	Antwoord	Criterium: STOP* indien
	Atmosferische omstandigheden		
1	Windrichting	Z-zo	
2	Windsterkte	1	>4 Beaufort
3	Bewolgingsgraad	0/8 (onbewolkt)	
4	Stabiliteitsklasse	A	
5	Neerslag	nee	ja
6	Temperatuur	30 °C	
7	Kan er sprake zijn van inversie?	nee	
8	Is bron geleden in meewind of tegenwind?	meewind	indien in tegenwind: zoek meetpunt in meewindrichting
9a	Maak schets van de directe omgeving en overdrachtsgebied		
9b	Hoe ver staat meest dichtbijgelegen object (waarvan diameter > 34 m)?		zoek ander meetpunt indien afstand tot object < 35 m
10	Zijn stoorgeluiden waarneembaar?	ja, - wegverkeer - overig werktuig (K41, R58)	indien Ja: gebruik zo mogelijk 2 microfoons
11	Is het geluid	X continu	
		☐ intermitterend, regelmatig	
		☐ intermitterend, onregelmatig	
		☐ incidenteel	
12	Datum/Tijdstip	27 mei 2005 13.00 -15.45	
13	Afstand tot (vermeende) bron (m)	180 m	

De omstandigheden zijn ter plaatse beoordeeld en goed bevonden, derhalve kon de meet sessie uitgevoerd worden. Er wordt voldaan aan vrije veld condities. Gezien de kleine afstand tot de bron kan voor deze meting volstaan worden met de minimale meetconfiguratie.

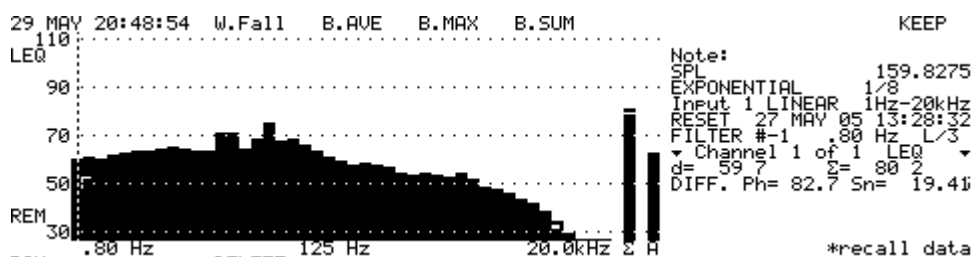
Doelstelling 1: bewijs verschil tussen gekozen meethoogte (effect van wind)

Om te bewijzen dat de voorgestelde meetmethode minder kritisch is voor de aanwezigheid van wind tijdens de meting worden de resultaten van zes metingen vergeleken.

Bewijs 1: meting Leq1 versus meting Leq2



Figuur 15 Tertsbandsanalyse : Leq 1 (meethoogte mv+0)

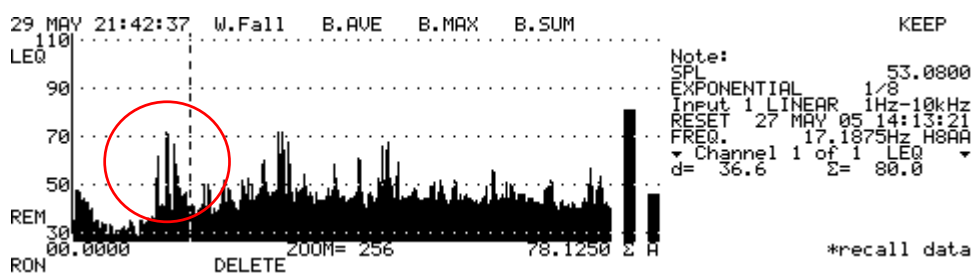


Figuur 16 : Tertsbandsanalyse : Leq 2 (meethoogte mv+5)

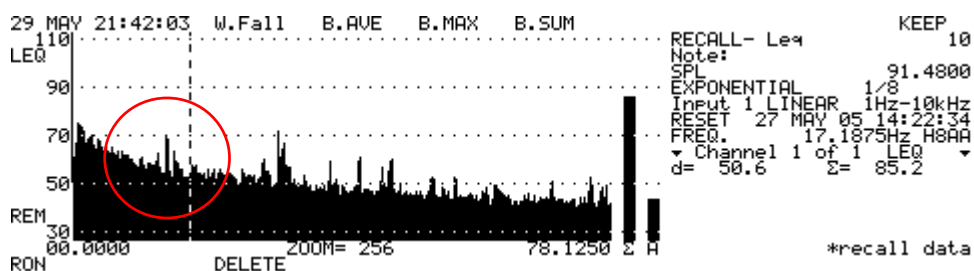
Observatie en interpretatie

Het betreft een vergelijking van twee metingen die opgetekend zijn in tertsbands. De meting genaamd Leq1 is gemaakt met behulp van de bodembak waarbij de microfoon zich op maaiveldhoogte begaf. Bij de meting Leq2 bedroeg de meethoogte 5 meter boven maaiveld. Duidelijk is te zien dat bij meting Leq2 met name de lage frequenties bijna 'verdrinken' in de lage frequentiebanden. De extra energie die is opgetekend in deze lage banden is windruis.

Bewijs 2: Leq7 versus Leq10

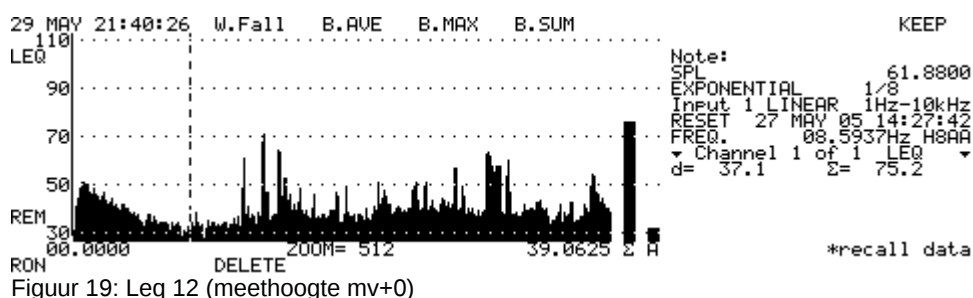


Figuur 17 : Leq 7 (meethoogte mv+0)

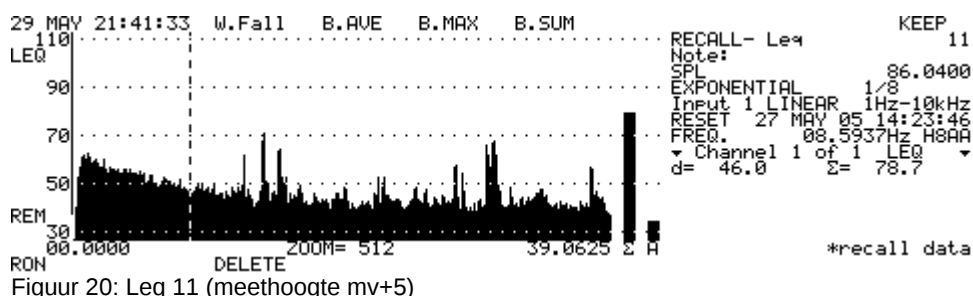


Figuur 18 : Leq 10 (meethoogte mv+5)

Leq12 versus Leq11



Figuur 19: Leq 12 (meethoogte mv+0)



Figuur 20: Leq 11 (meethoogte mv+5)

Observatie en interpretatie

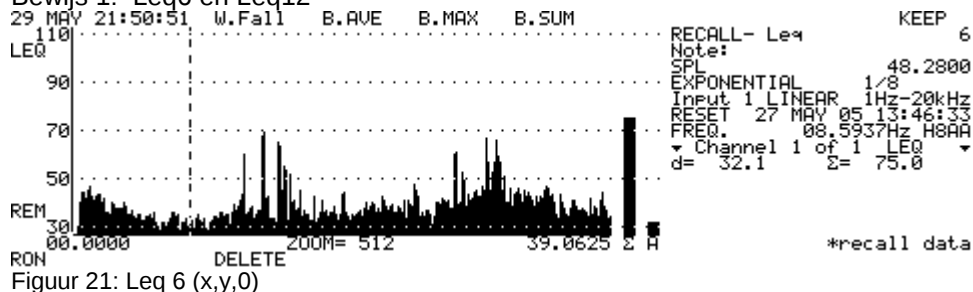
Dit betreft een 2 paar metingen waarbij gebruik is gemaakt van FFT-spectrumanalyse. Er is gekozen voor 2 paar om te kunnen experimenteren met diverse waarden van de FFT Zoom : voor de metingen Leq7 en Leq10 bedroeg de zoomwaarde 256 ; voor Leq 12 en Leq 11 bedroeg de zoomwaarde 512. De zoomwaarde geeft aan hoeveel maal wordt ingezoomd op het spectrum. Een zoomwaarde van 512 en een FFT-resolutie van 800 regels betekent dat er 800 regels beschikbaar zijn om een frequentiegebied dat loopt van 0 Hz tot 39,0625 Hz te beschrijven. Het laat zich aanzien dat hiermee het berekende signaal zeer goed beschreven kan worden.

Wanneer we kijken naar het verschil tussen de meetresultaten die gemaakt zijn op 5 meter hoogte en in het bodemvlak valt weer op dat het ruisniveau bij de metingen op mv+0 meter veel lager is dan bij metingen met een hoogte van mv+5 meter. Verschillen tot soms 30 dB zijn zichtbaar. Vergelijk de inhoud van de aangegeven circels met elkaar: bij de Leq 10 meting lijken de dominante frequenties vrijwel op te lossen in de ruis.

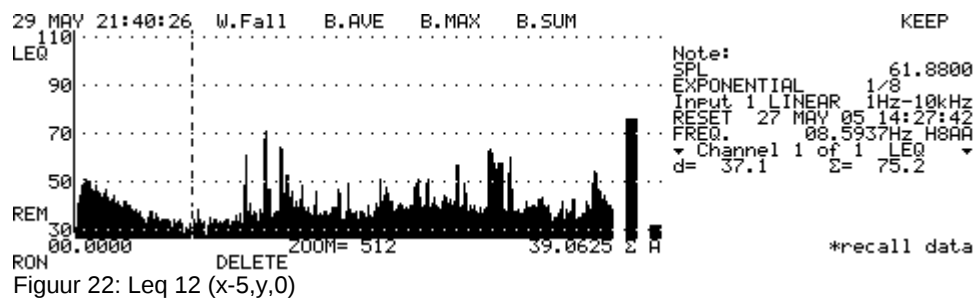
Doelstelling 2: Reproduceerbaarheid (5 meter opgeschoven in x-vlak t.o.v. eerste sessie)

Om te bewijzen dat de voorgestelde meetmethode minder kritisch is veranderingen in het x-vlak, dat wil zeggen in de afstand tussen bron en ontvanger worden de resultaten van vier metingen vergeleken.

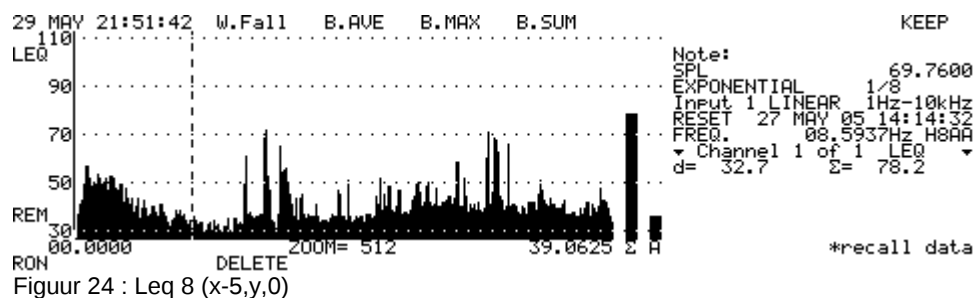
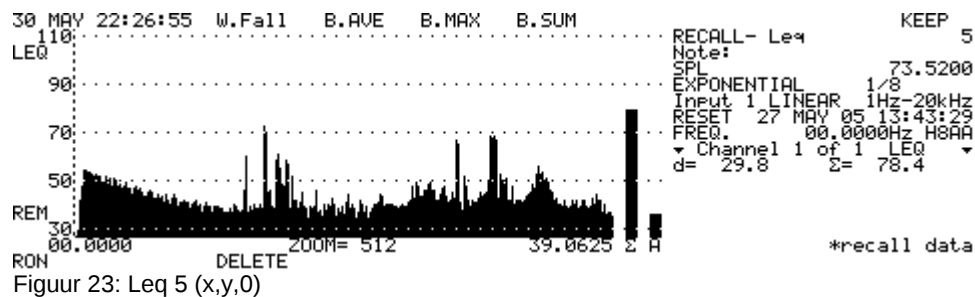
Bewijs 1: Leq6 en Leq12



Figuur 21: Leq 6 (x,y,0)



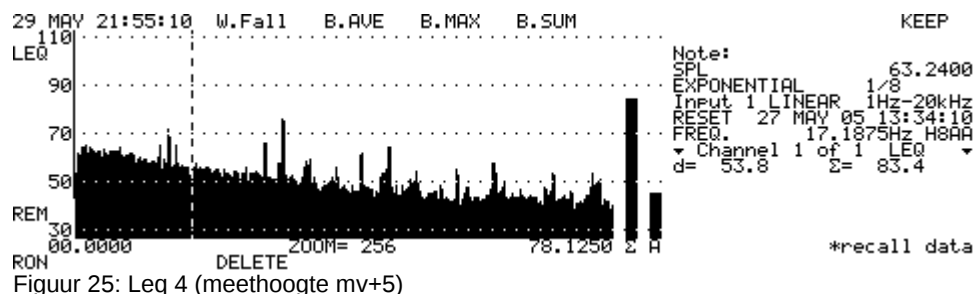
Bewijs 2: Leq5 en Leq8

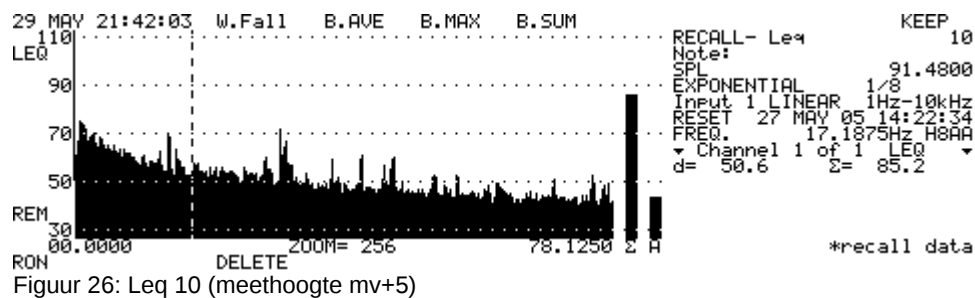


Observatie en interpretatie

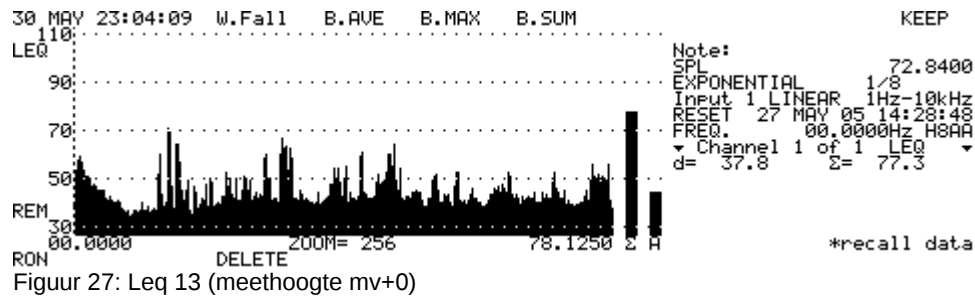
Alle metingen Leq 5,6,8 en 12 zijn uitgevoerd op meethoogte mv+0. De positie in het x-vlak echter is voor de metingen 6 en 12 een aantal meters (ca. 5) verschoven ten opzichte van de meetpunten van metingen 5 en 8. Wat hier zichtbaar wordt gemaakt is de relatieve consistentie in de uitkomst van de verschillende metingen op meerdere meetposities. De resultaten geven aan dat de uitkomsten binnen 0,5 dB identiek reproduceren (twee maal herhaald).

Tegenbewijs 1: Leq4 versus Leq10





Figuur 26: Leq 10 (meethoogte mv+5)



Figuur 27: Leq 13 (meethoogte mv+0)

Observatie en interpretatie

Dezelfde metingen waarbij de x-richting ten opzichte van de bron is gewijzigd is ook herhaald op een meethoogte van 5 meter. Duidelijk is wederom zichtbaar dat de signaal/ruis verhouding een stuk lager ligt dan bij de metingen op mv+0. Doordat de energetische inhoud hoger is reproduceert de meting iets minder goed. Merk ook op dat deze energetische inhoud tot wel 7 dB hoger ligt dan indien gemeten aan de bodem (bijv. Σ voor Leq4 = 83,4 dB. Σ voor Leq 13 = 77,7 dB). Dit verschil is toe te schrijven aan het aandeel windruis in het meetsample.

Wat zegt de gemeten spectrale signatuur?

Als we kijken naar bijvoorbeeld de meting Leq7 zien we dat de frequentie 13,86 Hz dominant is. Het blijkt dat dit de trilzeef is. Na het in 2002 uitgevoerde maatregelenonderzoek is besloten het toerental variabel te maken. De dominante frequentie die destijds is vastgesteld was 16,08 Hz, overeenkomend met een toerental van 965 toeren per minuut. De gemeten 13,86 Hz komt overeen met een toerental van ca. 831 tpm., zoals ingesteld. De piek die te zien is bij 12,5 Hz is afkomstig van een ander werktuig, n.l. de Kaliwaal 41. Dit zware werktuig – ook een bron van laagfrequent geluid – stond op ca. 400 meter afstand opgesteld.

5.4 Beoordeling van de voorgestelde meetmethode

De voorgestelde meetmethode dient te voorzien in een consistente betrouwbaarheid van de meetresultaten. Praktisch gesteld dient de meetmethode er in te voorzien dat een meting – ongeacht of deze een, twee maal of vele malen op diverse tijdstippen wordt uitgevoerd – binnen een bepaalde marge hetzelfde resultaat geeft. Het resultaat wordt niet alleen uitgedrukt in een getalswaarde (bijvoorbeeld in het geval van een bronsterktemeting) maar dient ook inzicht te geven in de spectrale verdeling van de geluidsenergie, de zogenaamde spectrale signatuur.

Een belangrijke factor die roet in het eten gooit is windruis. Vergelijkingen van de geanalyseerde meetresultaten geven aan dat indien de meethoogte op maaiveldniveau ligt, conform de voorgestelde meetmethode, de invloed van wind fors gereduceerd wordt. Reducties tot 25 dB voor frequenties tot 40 Hz zijn hierbij mogelijk. *Ten aanzien van windruis reductie biedt de meetmethode een verbetering ten opzichte van de bestaande meetmethoden.*

Met het doel de reproduceerbaarheid verder te bewijzen zijn in de praktijktoets diverse metingen uitgevoerd op diverse verschillende meetposities. Analyse van de metingen levert op dat de resultaten goed reproduceerbaar zijn. *Ten aanzien van meetpositie onafhankelijkheid biedt de meetmethode een verbetering ten opzichte van de bestaande meetmethoden.*

Indien de afstand vanaf het meetpunt tot de bron groot wordt blijkt dat veel stoorinvloeden het meetresultaat negatief beïnvloeden: de signaal/ruisverhouding is vaak te klein om het werkelijke bronsignaal te onderscheiden van de omgevingsstoring, de ruis. De meetmethode voorziet in vergroting van de genoemde signaal/ruisverhouding door een kruisspectrum bepaling op basis van twee separate meetsignalen. Om deze nabewerking uit te voeren is geavanceerde meetapparatuur nodig. De apparatuur was niet voorhanden op het moment dat de meetmethode in praktijk werd gebracht. *Ten aanzien van signaal/ruisverhouding vergroting biedt de meetmethode een verbetering ten opzichte van de bestaande meetmethoden. Het feitelijke bewijs hiervoor zal op een later tijdstip geleverd worden.*

6 Conclusies en aanbevelingen

In Nederland ontbreekt een wettelijk kader waaraan de immissie van laagfrequent geluid kan worden getoetst. In dit rapport worden de aspecten die kunnen leiden tot de operationalisering (het in gereedheid brengen) van de normstelling voor laagfrequent geluid beschouwd.

Vanwege de omvang en complexiteit van het geheel is dit onderzoek beperkt tot het deelproject dat de kwalitatieve vaststelling van het aanwezige laagfrequente geluid tot doel heeft. De directe onderzoeksvraag die aan de basis van deze vaststelling ligt is of het mogelijk is een meetmethode te ontwikkelen die een betere reproduceerbaarheid van de meetresultaten biedt. De praktijk wijst namelijk uit dat meetresultaten vaak een grote spreiding geven, ook als ze onder dezelfde condities worden herhaald.

Het onderzoek heeft een meetmethode opgeleverd die goede resultaten biedt voor de beoogde toepassingsgebieden. Deze toepassingen zijn het buiten vaststellen van

- de geluidsemisatie die veroorzaakt wordt door de bron;
- de mogelijkheid om diepgaand maatregelenonderzoek uit te voeren;
- de immissie ter plaatse van een (potentiële) hinderlocatie vast te stellen.

Op basis van een inventarisatie van het effect van atmosferische invloeden op de overdracht van laagfrequent geluid is duidelijk geworden dat de invloed van wind absoluut vermeden dient te worden. Dit is de reden dat de meetmethode voorstelt om in het bodemvlak te meten.

Een verder inzicht dat is ontstaan tijdens het onderzoek is dat bij immissiemetingen de signaal/ruisverhouding te klein is om eenduidig de bronbijdrage vast te stellen. Om dit probleem te neutraliseren stelt de methode het gebruik van twee microfoons voor. Door middel van nabewerking waarbij de signaalcoherentie wordt bepaald, worden vrijwel alle niet-gewenste stoorgeluiden geëlimineerd. Dit levert een 'schoon' signaal op dat representatief is voor het aanwezige laagfrequente geluid.

Een praktijktoets levert op dat in ieder geval het effect van wind in grote mate kan worden onderdrukt door in het bodemvlak te meten. Omdat de juiste apparatuur niet ingezet kon worden binnen de tijd die nog beschikbaar was voor dit onderzoek is de signaalcoherentie nabewerkingtoets nog niet uitgevoerd. Zonder twijfel wil ik stellen dat de meetmethode ook op dit punt het gewenste resultaat zal bieden.

Het kwantitatieve effect van temperatuurinversie op de overdracht van laagfrequent geluid is niet in dit onderzoek uitgewerkt. Wij bevelen aan hiervoor een nader onderzoek uit te voeren. Dit onderzoek zou moeten opleveren a.) inzicht in de extra afstand die laagfrequente geluidsgolven kunnen afleggen en b.) welke geluidsdruktoename gehanteerd mag worden indien gemeten wordt ten tijde dat temperatuurinversie zich voordoet.

Voorts dient meer onderzoek te worden uitgevoerd naar het effect van diffractie voor lange golven in de gebouwde omgeving. Het moet naar mijn mening mogelijk zijn het effect van diffractie en reflectie kwantitatief te beschrijven. Het onderzoek zou zich dan ook moeten richten op een rekenmodel specifiek voor lage frequenties.

LITERATUUR

- 1 Laagfrequent geluid – grenswaarden, overdracht en meten, adviesbureau Peutz & Associates B.V. in opdracht van Ministerie van VROM, rapportnummer R 548-13, 8 juni 1990
- 2 Laagfrequent geluid; een literatuurstudie, adviesbureau Peutz & Associates B.V. in opdracht van Ministerie van VROM, rapport nummer GF-HR-01-04, februari 1988
- 3 NSG-Richtlijn laagfrequent geluid – beoordeling, uitvoering, informatie, Nederlandse Stichting Geluidhinder, 1999;
- 4 DIN: Messung und Bewertung tieffrequenter Gerauschemissionen in der Nachbarschaft, Deutsches Institut für Normierung (DIN 45680), Berlijn, 1997
- 5 G.P. van den Berg: Meten van laagfrequent geluid in woningen, voorstel voor een richtlijn, Natuurkundewinkel RuG (rapportnummer NWU-84), februari 1999
- 6 International Organization for Standardization. ISO7196 Acoustics – Frequency weighting characteristics for infrasound. Geneve: ISO, 1994
- 7 International Organization for Standardization. ISO1996-2 Acoustics – Description and measurement of environmental noise. Geneve: ISO, 1987
- 8 S. Riemens: Meten van Laagfrequent geluid, Handboek voor Milieubeheer – Deel III: Lawaaibeheersing, Samson H.D. Tjeenk Willink, Alphen aan de Rijn, september 1995
- 9 Handleiding Meten en Rekenen Industrielawaai. Ministerie van VROM, 1999
- 10 Acoustic Noise Measurements, Brüel & Kjaer, June 1998
- 11 TNO CI Delft, Laag frequent geluid en trillingen in woningen ten gevolge van grindwinning door grindwinschepen, februari 2003

WOORDENLIJST

apodizatie	letterlijk, "de voet verwijderen". Apodizeren is het verwijderen van een discontinuïteit in een mathematische functie, elektrisch signaal of een mechanische structuur. Een voorbeeld van apodizatie is het gebruik van de <i>Hanning window</i> in de FFT-analysator om discontinuïteit aan het begin en eind van het behandelde tijdrecord op te heffen.
bronvermogen	het akoestische vermogen van een geluidsbron uitgedrukt in dB t.o.v. 0 dB ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa). Vaak wordt ook het immissierelevante bronvermogen L_{wr} aangehaald.
coherentie	het samenvallen van golftoppen en golfdalen. Dit is het geval bij golven die tegelijkertijd dezelfde frequentie hebben en ook nog eens in fase zijn.
dBV	afkorting voor deciBelVolt. Geeft een verhouding aan ten opzichte van 1 Volt. 0 dBV komt overeen met 1 Volt. – 6 dBV komt overeen met 0,5 Volt.
flutter echo	een echo die ontstaat als geluidsgolven heen er weer kaatsen tussen twee gladde parallelle wanden. Heeft sterke invloed op spraakverstaanbaarheid in de ruimte.
immissie	beoordelingspunt waarop de omvang van een milieuaspect wordt geaggregeerd. Locatie komt vaak overeen met grenswaarde referentiepunten.
infrageluid kruisspectrum	geluid dat is opgebouwd uit frequenties lager dan 20 Hz. een spectrum dat het resultaat is van een bewerking tussen twee of meer separate spectra. De bewerking bepaalt de functie van het kruisspectrum.
low pass filter luidheid	laag doorlaat filter. Een filter dat alleen de lage frequenties door laat. een subjectieve maat die de sensatie van een gegeven geluidsniveau weergeeft voor een individu. Voor pure tonen zijn voor gegeven geluidsniveaus standaard luidheidcurven ontwikkeld.
meteoraam	conditie die bepaald onder welke atmosferische omstandigheden mag worden gemeten.
realtime RTA	Engels voor 'op het werkelijke tijdstip, zonder tijdverlies' Engels voor Realtime Analyser. Een analysator die in werkelijke tijd een bewerking kan uitvoeren.
SLM	Engels voor Sound Level Meter. Geluidsdrukmeter.

BIJLAGEN

BIJLAGE 1: UITWERKING ASPECTEN VOOR NORMSTELLING

Toelichting op tabel 1 (blz. 2)

Ad A. kwantitatief vaststellen van het aanwezige laagfrequent geluid

Allereerst is het van belang om de aanwezigheid van laagfrequent geluid vast te stellen. Dit lijkt eenvoudiger dan het in de praktijk is: de bestaande methodiek, de zgn. Handleiding Meten en Rekenen Industrielawaai (HMRI) uitgegeven door het ministerie van VROM, die van toepassing is op het vaststellen van 'normaal' geluid zijn niet of slechts in beperkte mate van toepassing op laagfrequent geluid (het gebied vanaf 31,5 Hz tot 125 Hz valt binnen het bereik van de HMRI: daaronder niet meer)

Voor de lagere frequentie zijn er opmerkelijke verschillen in met name de volgende gebieden:

- overdrachtsberekeningen
- meetmethode

De verschillen maken dat de HMRI niet toegepast kan worden voor laagfrequent geluid en bij ontbreken van leidende buitenlandse standaarden er tot heden geen eenduidige manier is om de aanwezigheid van laagfrequent geluid te kwantificeren. Omdat de methode niet eenduidig is, is de reproduceerbaarheid van de meetresultaten beperkt. En omdat de reproduceerbaarheid beperkt is, wordt hierdoor de kwantitatieve vaststelling bemoeilijkt. Daarbij dient men zich te realiseren dat de aanwezigheid van laagfrequent geluid vastgesteld dient te worden daar waar de hinder meestal optreedt, en dat is binnenshuis. Daarmee komen we op het terrein van de akoestiek. Met akoestiek wordt in de voornoemde HMRI geen rekening gehouden.

Ad B. vaststellen dosisrespons relaties

Laagfrequent geluid is zoals gezegd geluid dat bestaat uit lage frequenties. In veel gevallen wordt deze vorm van geluid zeer persoonlijk beleefd. Sommige personen ondervinden bij een gegeven dosis geen hinder terwijl een ander persoon zegt ernstige hinder te ondervinden. Deze individuele hinderbeleving maakt het moeilijk een duidelijke grenswaarde te onderkennen die de scheiding aanbrengt tussen wat wel en geen hinder oplevert. Er is slechts beperkt onderzoek gedaan naar dosisrespons relaties voor wat betreft laagfrequent geluid. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat:

- niet alle gehinderden melding maken van de overlast;
- niet in alle gevallen waar gehinderden melding maken van overlast ook daadwerkelijk wordt getracht te dosis vast te stellen (zie 1);
- de dosis afhankelijk is van de fysieke positie van de gehinderde binnenshuis;
- het geluid niet continu wordt ervaren;

Ad C. lokaliseren van de bron

Het blijkt dat in veel gevallen waar melding wordt gemaakt van overlast door laagfrequent geluid en/of trillingen de oorzaak van de overlast niet bekend is. De praktische onmogelijkheid om in voorkomende gevallen een bron te identificeren maakt het onmogelijk de emissie door middel van het treffen van maatregelen te reduceren. De onmogelijkheid om eenduidig de bron vast te stellen maakt het fenomeen laagfrequent geluid vaak ongrijpbaar.

Ad D. overdracht bepaling

Geluid heeft een medium nodig om zich in voort te planten. Naast lucht kan geluid zich ook voortplanten in water en door vaste stoffen als bodem en bouwconstructies. De weg die het geluid aflegt tussen bron en ontvanger wordt het overdrachtsgebied genoemd. De overdracht is gehouden aan fysieke wetmatigheden. Voor het hoorbare geluid zijn de meeste van deze natuurkundige rekenregels vastgelegd in de eerder genoemde rekenmethodiek HMRI. Echter, laagfrequent geluid volgt andere wetmatigheden dan normaal (audio) geluid. De reden hiervan is:

- de optredende energieniveaus door het medium;
- het feit dat de lengte van laagfrequent geluidsgolven lang tot zeer lang zijn en daarmee van een geheel andere orde grootte dan van 'normaal' geluid;

Het voor normaal geluid gebruikte stralenmodel ("hoek van inval is gelijk aan hoek van reflectie") is niet toepasbaar voor laagfrequent geluid.

Atmosferische omstandigheden (zoals temperatuur gradiënten) blijken een grote invloed te hebben op de overdracht. Laagfrequent geluid valt vrijwel niet te dempen.

Ad E. methodiek ter bepaling van norm

Door de overheid wordt normstelling gebruikt om, in het geval van geluid, de burger te beschermen tegen al te hoge geluidsbelastingen. Dit is de reden dat er rekening is gehouden met dag, avond en nachtperioden. Het is eenvoudig in te zien dat de grenswaarden 's nachts minder ruim (lees: lager) zijn dan overdag. De normering is gebaseerd op immissiewaarden. Dat wil zeggen dat de norm wordt gesteld daar waar de burger beschermt dient te worden tegen potentiële geluidsoverlast. In de nachtperiode is daarom in de HMRI vastgesteld dat het immissiepunt zich dient te bevinden op 5 meter hoogte: daar waar mensen plegen te slapen.

Een norm die de immissie van laagfrequent geluid aan banden tracht te leggen dient rekening te houden met de volgende uitgangspunten:

- de hinder wordt zowel overdag als ook 's nachts ervaren;
- de hinder wordt voornamelijk binnenshuis ervaren;
- de hinder is afhankelijk van de bouwkundige eigenschappen van de woning;

BIJLAGE 2: TOELICHTING EN OPMERKINGEN ONDERZOEKSVRAGEN

In deze toelichting worden waar nodig de deelvragen nader uitgelegd. De aanleiding voor de vragen zijn gegeven in de toelichting van tabel 1.

Deelproject A “kwantitatief vaststellen van het aanwezige laagfrequent geluid”

- Ad 1. bij het onderzoek zal de invloed van de atmosferische omstandigheid moeten worden betrokken.
- Ad 2. indien metingen binnenhuis noodzakelijk blijken: de akoestische omstandigheden van de te meten ruimte.

Deelproject B “vaststellen dosisrespons relaties”

- Ad 1. de vast te stellen dosis dient zodanig te zijn dat ook nog rekening wordt gehouden met de belangen van de veroorzaker van de potentiële hinder.
- Ad 2. uit eerder onderzoek blijkt dat met name vrouwen boven 55 jaar een hogere gevoeligheid hebben voor hinder ten gevolge van laagfrequent geluid. Het grootste deel van de bevolking is minder gevoelig.
- Ad 3. laagfrequent geluid kan zich openbaren als gezoem, gedreun, gebonk, al dan niet fluctuerend of continu. Dient met dit karakter van voorkomen rekening gehouden te worden bij de bepaling van de dosis. Zo ja, wat is de relatieve bijdrage van deze karakteristieken?
- Ad 4. hoe kan bij toekomstige handhaving eenvoudig doch betrouwbaar een dosisoverschrijding worden vastgesteld? Of kan de dosis vaststelling alleen worden uitgevoerd door experts (zoals het tot heden gebeurd)?

Deelproject C “lokaliseren van de bron”

- Ad 1. Is het überhaupt zinnig na te denken over normering als blijkt dat in veel gevallen de veroorzakende bron niet te traceren is, en dus niemand kan worden gehouden aan emissiebeperking?

Deelproject D “overdracht bepaling”

- Ad 1. zoals eerder aangegeven bestaan er voor normaal geluid betrouwbare overdrachtsmodellen. Omdat laagfrequent geluid maar ten dele de wetmatigheden volgt waarop de overdracht van normaal geluid is gebaseerd, dienen additionele factoren te worden beschouwd.

Deelproject E “methodiek ter bepaling van norm”

- Ad 1. de meeste methodieken ter bepaling van een norm zijn gebaseerd op toetsing van een door meting of berekening verkregen waarde (voor geluid: gemeten/berekende dB-getalswaarde). Voor grootheden die niet te vatten zijn in metingen, zoals risico ten gevolge van een potentiële explosie zijn andere rekenmodellen ontwikkeld. In hoeverre kunnen deze worden toegepast voor de normering van laagfrequent geluid?
- Ad 3. mag men stellen dat iemand ook in lichte mate gehinderd kan worden of is er immer sprake van ‘one hit’: als je het ervaart is het hinderlijk en/of schadelijk.

BIJLAGE 3: THEORETISCHE GRONDSLAGEN

Deze bijlage behandelt theoretische aspecten van geluid. De informatie kan als aanvullend op de hoofdtekst beschouwd worden. De hoofdtekst gaat specifiek in op aspecten met betrekking tot laagfrequent geluid.

Type geluidsbronnen

De puntbron

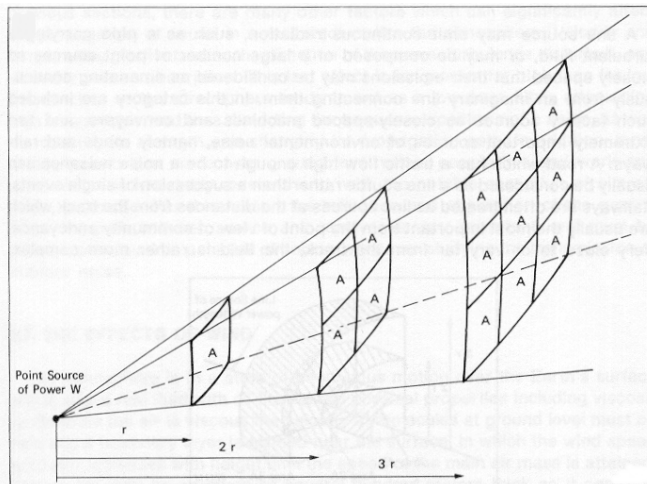
Geluidsbronnen worden beschouwd als puntbronnen als de dimensies klein zijn ten opzichte van de afstand tot de ontvanger. Veel geluidsbronnen zoals vliegtuigen, auto's en ook procestechnische installaties kunnen beschouwd worden als puntbronnen. Figuur 28 laat zien dat een ideale puntbron op gegeven afstanden een bolvormig golffront vormt. De geluidsenergie verspreidt zich gelijkmatig in alle richtingen zodat als de golf verder en verder van de bron verwijderd raakt, zijn energie verdeeld wordt over een steeds groter worden bolvormig oppervlak. Als ervan uitgegaan wordt dat het medium geen energie opneemt, zal alle geluidsenergie een bol met radius r passeren. De intensiteit is daarom gelijk aan het vermogen van de geluidsbron gedeeld door het oppervlakte van de bol.

In formule vorm:
$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

Waarbij:

I	de geluidsintensiteit [W.m^{-2}]
W	het geluidsvermogen [W]
r	de straal [m]

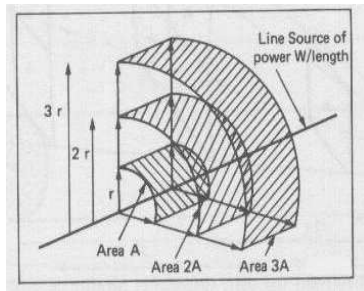
Uit de formule is zichtbaar dat de geluidsintensiteit omgekeerd proportioneel is met het kwadraat van de afstand van de bron tot de ontvanger: dit komt overeen met 6 dB per afstandverdubbeling.



Figuur 28: de uitbreiding van geluid van een puntbron
N.B. boven een plat vlak straalt het geluid van een puntbron in een halve bol uit.

De lijnbron

Een lijnbron kan geluidsenergie op een continue wijze uitstralen, zoals bijvoorbeeld een pijp waardoor de continue stroming van een vloeistof te horen is, of kan zijn opgebouwd uit een dusdanige hoeveelheid dicht bij elkaar gelegen separate bronnen dat deze als een lijn op te vatten zijn. Een voorbeeld hiervan is een (drukke) autoweg en een treintracé.



Figuur 29: de uitbreiding van geluid van een lijnbron

Als we figuur 29 beschouwen zien we een deel van een oneindige lijnbron die een constant vermogen per lijnstuk uitstraalt. De energie verspreidt zich van de lijn in een dimensie en wel haaks op de richting van de lijn. De golffronten vormen op deze wijze concentrische cilindrische oppervlakten rond de lijn als as. De energie die vrijkomt per lijnstuklengte per tijdseenheid passeert door dezelfde lengte van het cilindrische oppervlakte voor alle radii. De intensiteit bij een gegeven straal r is daarom gelijk aan het vermogen W uitgestraald door het lijnstuk, gedeeld door het oppervlakte van de cilinder.

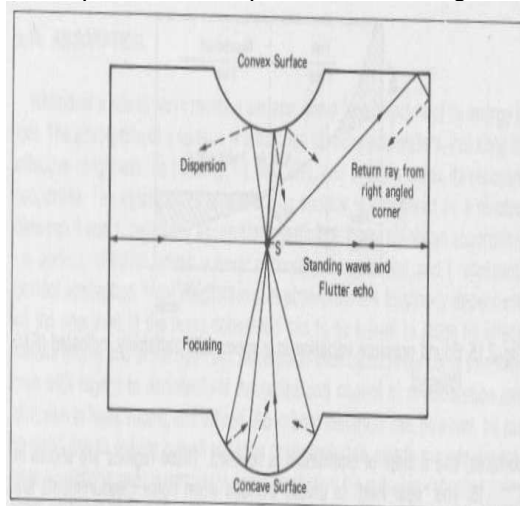
$$I = \frac{W}{2\pi r \times l}$$

In formule vorm:

Uit de formule is zichtbaar dat de geluidsintensiteit omgekeerd proportioneel tot de afstand van het lijnstuk: dit komt overeen met 3 dB per afstandverdubbeling.

Reflecties (binnen)

Het effect van gebogen oppervlakten, parallelle vlakke oppervlakten en hoeken op het geluidsveld is afgebeeld in figuur 30. Indien het reflecterende oppervlakte gebogen is worden de geluidsgolven gefocuseerd als het oppervlakte hol is en verspreid als het oppervlakte bol is. Een geluidsgolf die in een rechte hoek straalt wordt na twee reflecties teruggestuurd op een ander pad maar wel parallel aan de ingaande straal.



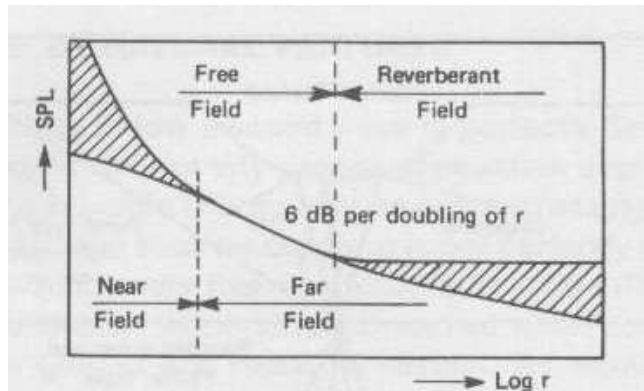
Figuur 30 reflecties van oppervlakten met verschillende vormen

Parallele wanden geven twee belangrijke effecten. Ten eerste, het ontstaan van staande golven, die voorkomen bij frequenties die overeenkomen met (multipels van) halve golflengten die ontstaan tussen de twee parallelle wanden. Staande golven leiden tot een grote variatie in geluidsdruk binnen de golf. Het tweede effect, de zogenaamde *flutter echo* wordt veroorzaakt door de continue en algemene reflectie van een puls (bijv. handen geklap) tussen wanden met weinig absorptie. De genoemde effecten zijn onwenselijk in ruimten waar uniformiteit van het geluidsveld gewenst is, zoals concert zalen, conferentiezalen etc.

In een gesloten geluidsveld zal er altijd een gebied zijn dichtbij de geluidsbron waar de fysieke brondimensies een belangrijk effect hebben, een gebied verder van de bron waarbij het directe

geluid dominant is en een gebied nog verder verwijderd waar de (na)galm domineert en blijft reflecteren totdat de geluidsenergie van de bron in balans is met de door de wanden geabsorbeerde energie in de ruimte. De genoemde gebieden zijn afgebeeld in figuur 31.

Het nabijheidveld wordt gewoonlijk vermeden wanneer metingen worden verricht omdat simpele verhoudingen tussen de geluidsintensiteit en andere parameters als druk en deeltjessnelheid daar niet bestaan. Metingen worden in het nabijheidveld uitgevoerd als er exacte gegevens van de stralingskarakteristiek moeten worden vastgesteld in een laboratorium of 'in situ'.



Figuur 31 Geluidsdruk variaties in een ruimte (bron: F.M. Wiener)

Het verre veld bestaat uit twee delen: het vrije veld, waarin geluid zoals de term al aangeeft alsof het in de open lucht straalt zonder invloeden van reflecties, en het galmveld, waarin reflecties domineren en daardoor dus voorkomt in de meeste ruimten. Een diffuus veld, waarin een grote hoeveelheid reflecties uit alle richtingen met elkaar combineert zodat de gemiddelde geluidsdruk door de gehele ruimte gelijk is geschikt voor het uitvoeren van bronsterkte metingen en voor het bepalen van de geluidsisolerende eigenschappen van materialen. Nagalm kamers die voor dit doeleinde worden gebouwd hebben vaak niet-parallelle, reflecterende wanden.

Absorptie

Wanneer een geluidsgolf in contact komt met een vlak verliest deze golf iets van zijn energie. De absorptie van een vlak is afhankelijk van meerdere parameters, waaronder de ruwheid, de porositeit, de flexibiliteit (buigzaamheid) en in sommige gevallen zijn resonantie eigenschappen. De efficiëntie van een absorberend materiaal wordt uitgedrukt in een factor tussen 0 en 1 die absorptiecoëfficiënt heet.

0 geeft aan dat er geen absorptie is, een coëfficiënt van 1 betekend dat de geluidsgolf in zijn geheel wordt geabsorbeerd. De meeste absorptie mechanismen zijn frequentieafhankelijk zodat het spectrum van het geluid bekend moet zijn om absorptie doelmatig te kunnen toepassen zowel in ruimten als in de open lucht. Absorptie technieken worden toegepast om de akoestische eigenschappen van ruimten in gebouwen als (concert) zalen, scholen en kantoren te optimaliseren voor het gebruik. Absorberende materialen kunnen worden toegepast om hoge binnenniveaus die veroorzaakt worden door machines te reduceren en door specifieke herriemakers 'in te pakken' met absorptiemateriaal.

BIJLAGE 4: BENADERING VAN DEELTJESSNELHEID UIT DRUKGRADIËNT

Geluidsintensiteit is het tijdgemiddelde product van de geluidsdruk en de deeltjessnelheid. Een microfoon is ontworpen om de geluidsdruk te meten. De deeltjessnelheid is niet te meten met een (enkele) microfoon. De deeltjessnelheid kan echter worden gerelateerd aan de *drukgradiënt* (de mate waarin de instantane geluidsdruk verandert met afstand) door gebruikmaking van de vergelijking van Euler (1707-1783). De drukgradiënt kan gemeten worden met twee dichtbij tegenover elkaar geplaatste microfoons.

De vergelijking van Euler is in essentie Newton's tweede wet toegepast op een vloeistof. De tweede wet van Newton relateert de versnelling van een gegeven massa aan de kracht die erop werkt. Wanneer we de kracht en massa weten, kan de versnelling worden bepaald. De integraal van de versnelling over tijd geeft de snelheid.

In formule vorm:

$$v = \int \frac{F}{m} \Delta t$$

Waarbij:	v	snelheid [m.s ⁻¹]
	F	kracht [N]
	m	massa [N]
	t	tijd [s]

In de vergelijking van Euler is het de drukgradiënt die een vloeistof met dichtheid ρ versnelt. Met kennis van de drukgradiënt en de dichtheid van de vloeistof kan de deeltjesversnelling worden berekend. Integratie van de versnelling geeft dan de snelheid.

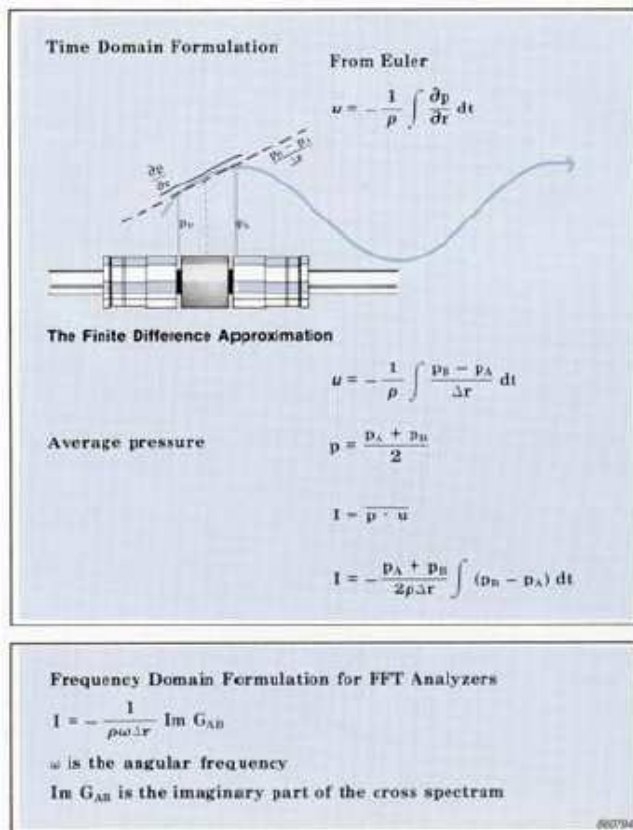
$$a = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p \quad \text{en} \quad u = \int \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta r} \Delta t$$

Waarbij:	a	versnelling [m.s ⁻²]
	ρ	dichtheid [kg.m ³]
	p	geluidsdruk [N.m ⁻²]
	r	afstand tussen microfoons [m]
	t	tijd [s]

De drukgradiënt is een continue functie, een ononderbroken curve. Met twee dichtbij tegenover elkaar geplaatste microfoons is het mogelijk om een rechte lijn benadering van de drukgradiënt te verkrijgen door het verschil in geluidsdruk te delen door de afstand tussen beide microfoons. Dit wordt een eindig verschil benadering (in het Engels: "*finite difference approximation*") genoemd.

Het drukgradiënt signaal moet vervolgens worden geïntegreerd om de deeltjessnelheid te geven. De schatting van de deeltjessnelheid wordt gemaakt precies in het midden tussen de twee microfoons. Op exact hetzelfde punt wordt ook de geluidsdruk bepaald. De geluidsdruk en de deeltjessnelheid worden vermenigvuldigd en het tijdgemiddelde ervan geeft dan de geluidsintensiteit.

Een systeem dat de geluidsintensiteit analyseert bestaat uit een probe en een analysator. De probe meet de geluidsdruk met beide microfoons. De analysator biedt de integreer- en rekenfuncties die nodig zijn om de intensiteit te bepalen. In 'stand-der-techniek' apparatuur wordt de intensiteit berekend uit het kruisspectrum van beide microfoonsignalen door middel van de FFT-functie.



Figuur 32 Benaderen van intensiteit uit geluidsdruk (Euler)

BIJLAGE 5: VAN BEAUFORT NAAR

Bft	Benaming	m/s	knopen	km/u	Kenmerken
0	Windstil	<0.2	< 1	< 1	Rook stijgt (recht) omhoog
1	Zwakke wind	0.3-1.5	1-3	1-5	Rookpluimen geven richting aan
2	Zwakke wind	1.6-3.3	4-6	6-11	Bladeren ritselen
3	Matige wind	3.4-5.4	7-10	12-19	Bladeren, twijgen voortdurend in beweging
4	Matige wind	5.5-7.9	11-16	20-28	Stof en papier dwarrelen op
5	Vrij krachtige wind	8.0-10.7	17-21	29-38	Takken maken zwaaiende bewegingen
6	Krachtige wind	10.8-13.8	22-27	39-49	Grote takken bewegen
7	Harde wind	13.9-17.1	28-33	50-61	Bomen bewegen
8	Stormachtige wind	17.2-20.7	34-40	62-74	Twijgen breken af
9	Storm	20.8-24.4	41-47	75-88	Takken breken af, dakpannen waaien weg
10	Zware storm	24.5-28.4	48-55	89-102	Bomen worden ontworteld
11	Zeer zware storm	28.5-32.6	56-63	103-117	Uitgebreide schade bossen en gebouwen
12	Orkaan	>32.6	>63	>117	Niets blijft meer overeind

BIJLAGE 6: CHECKLIST MEETMETHODE

Checklist B

	Vragen	Antwoord	Criterium: STOP* indien
	Atmosferische omstandigheden		
1	Windrichting		
2	Windsterkte		>4 Beaufort
3	Bewolkingsgraad		
4	Stabiliteitsklasse		
5	Neerslag		ja
6	Temperatuur		
7	Kan er sprake zijn van inversie?		
8	Is bron geleden in meewind of tegenwind?		indien in tegenwind: zoek meetpunt in meewindrichting
9a	Maak schets van de directe omgeving en overdrachtsgebied		
9b	Hoe ver staat meest dichtbijgelegen object (waarvan diameter > 34 m)?		zoek ander meetpunt indien afstand tot object < 35 m
10	Zijn stoorgeluiden waarneembaar?		indien Ja: gebruik zo mogelijk 2 microfoons
11	Is het geluid	☐ continu	
		☐ intermitterend, regelmatig	
		☐ intermitterend, onregelmatig	
		☐ incidenteel	
12	Datum/Tijdstip		
13	Afstand tot (vermeende) bron (m)		

Nota bene: STOP betekent dat beter een ander tijdstip gepland kan worden in verband met te grote verwachte invloeden van de omgevingsfactoren op het meetresultaat.

ruimte voor schets