Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2022-078 | mei 2022

Overzicht maatregelen grondgeluid en grondgebonden geluid

Inventaris van maatregelen en kwalitatieve inschatting van effect, haalbaarheid en kosten

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Dedicated to innovation in aerospace

Overzicht maatregelen grondgeluid en grondgebonden geluid

Inventaris van maatregelen en kwalitatieve inschatting van effect, haalbaarheid en kosten

Probleemstelling

Laagfrequent geluid van vliegtuigen op de start- en landingsbaan en taxibanen (hierna grondgeluid) en laagfrequent geluid van overige grondgebonden activiteiten (hierna grondgebonden geluid) veroorzaken hinder bij omwonenden. De lage tonen en het ontbreken van geaccepteerde geluidsnormen en hindermaten voor grondgeluid maken handhaving en het verminderen van deze specifiek vorm van geluidshinder extra lastig.

Beschrijving van de werkzaamheden

Het rapport geeft een overzicht van maatregelen tegen hinder van laagfrequent grondgeluid en grondgebonden geluid. Hierbij is per groep van maatregelen en op basis van een combinatie van publieke bronnen en *expert judgement* een kwalitatieve inschatting gemaakt van effect, haalbaarheid en kosten van de maatregelen. Ook is er een overzicht gegeven van regelgeving en standaarden rond laagfrequent geluid. Ten slotte zijn er aanbevelingen gedaan over onderwerpen die naar voren zijn gekomen in deze studie die relevant kunnen zijn voor een Innovatieagenda.

RAPPORTNUMMER
NLR-CR-2022-078

AUTEUR(S)
R.J. Roosien
B. Peerlings
J.A. Beintema
T.A. van Veen

RUBRICERING RAPPORT
ONGERUBRICEERD

DATUM
mei 2022

KENNISGEBIED(EN)
Vliegtuiggeluidseffecten op de omgeving
Luchtverkeersmanagement (ATM) en luchthavenoperaties

TREFWOORD(EN)
grondgeluid
grondgebonden geluid
laagfrequent geluid
infrasoon geluid

Resultaten en conclusies

De studie geeft een overzicht en algemene beoordeling van 3 groepen maatregelen tegen hinder van laagfrequent grondgeluid en grondgebonden geluid. De publiek beschikbare wetenschappelijke onderbouwing van effect, haalbaarheid en kosten bleek veelal beperkt. In totaal zijn 16 individuele maatregelen onderzocht, zie hiervoor de appendices A tot en met C van dit rapport.

Toepasbaarheid

De resultaten geven inzicht in de potentie van een breed scala aan maatregelen ten aanzien van grondgeluid en grondgebonden geluid. Hiermee kan een (voor)selectie gemaakt worden van maatregelen die interessant zijn voor de lokale situatie.

NLR
Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam
p) +31 88 511 3113
e) info@nlr.nl i) www.nlr.nl

Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2022-078 | mei 2022

Overzicht maatregelen grondgeluid en grondgebonden geluid

Inventaris van maatregelen en kwalitatieve inschatting van effect, haalbaarheid en kosten

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

AUTEUR(S):

R.J. Roosien	NLR
B. Peerlings	NLR
J.A. Beintema	NLR
T.A. van Veen	NLR

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar en/of opdrachtgever.

OPDRACHTGEVER	**Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat**
CONTRACTNUMMER	**1152142**
EIGENAAR	**NLR**
NLR DIVISIE	**Aerospace Operations**
VERSPREIDING	**Beperkt**
RUBRICERING TITEL	**ONGERUBRICEERD**

GOEDGEKEURD DOOR:		
AUTEUR	**REVIEWER**	**BEHERENDE AFDELING**
Digitally signed by RJ Roosien Date: 2022.06.01 17:38:10 +02'00'	A.B. Dolderman 2022.06.02 07:30:51 +02'00'	Digitally signed by M.H. Nagelsmit Date: 2022.06.02 16:46:06 +02'00'

Inhoudsopgave

Afkortingen 5

1 Introductie 6

2 Aanpak 7

2.1 Afbakening 7
2.2 Achtergrond 8
2.3 Literatuurstudie 11
2.4 Uitvraag onder luchthavens 11
2.5 Beoordeling maatregelen op effect, haalbaarheid en kosten 12

3 Inventarisatie van maatregelen 14

3.1 Maatregelen LF-geluid bij de bron 14
3.1.1 Effect 14
3.1.2 Haalbaarheid 15
3.1.3 Kosten 16
3.1.4 Samenvattend beoordelingskader 17
3.2 Maatregelen LF-geluid tussen bron en ontvanger 17
3.2.1 Effect 17
3.2.2 Haalbaarheid 19
3.2.3 Kosten 19
3.2.4 Samenvattend beoordelingskader 19
3.3 Maatregelen LF-geluid bij ontvanger 20
3.3.1 Effect 20
3.3.2 Haalbaarheid 22
3.3.3 Kosten 22
3.3.4 Samenvattend beoordelingskader 23
3.4 Maatregelen MHF geluid 23
3.5 Algemene ontwikkelingen vliegtuiggeluid 24

4 Regelgeving en standaarden 26

4.1 Richtlijnen voor laagfrequent geluid in Nederland 26
4.2 Standaarden voor het meten of berekenen van laagfrequent geluid 27
4.3 Nederlandse regelgeving ten aanzien van grondgeluid en grondgebonden geluid 29
4.4 Grenswaarden voor laagfrequent geluid in het buitenland 30

5 Conclusies 32

6 Aanbevelingen innovatiebeleid 33

7 Referenties 35

Appendix A **Maatregelen bij de bron** **38**

Appendix B **Maatregelen tijdens overdracht van bron naar ontvanger** **43**

Appendix C **Maatregelen bij de ontvanger** **45**

Appendix D **Uitvraag ACI** **47**

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation
AIP	Aeronautical Information Publication
APU	Auxiliary Power Unit, de hulpmotor van een vliegtuig
CO_2	Carbondioxide
FEGP	Fixed Electrical Ground Power
G2	Grondgeluid, geluid van taxiënde vliegtuigen op de luchthaven
G3	Grondgebonden geluid, geluid van grondgebonden activiteiten op de luchthaven anders dan taxiënde vliegtuigen
GGD GHOR Nederland	Vereniging voor publieke gezondheid en veiligheid in Nederland
GPU	Ground Power Unit
Hz	Hertz
LF	Laagfrequent
LFG	Laag-Frequent Geluid; geluid met een frequentie tussen 20 en ~125 Hz
LVNL	Luchtverkeersleiding Nederland
MHF	Middel-hoog frequent (geluid)
NLR	Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum
NO_X	Stikstofoxide
NSG	Nederlandse Stichting Geluidshinder
PCA	Pre-Conditioned Air
PM	Particulate Matter
PM_{10}	Particulate Matter <10 µm
$PM_{2.5}$	Particulate Matter <2,5 µm
R&D	Research and Development
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
UFP	Ultra-Fine Particles

1 Introductie

Met de Luchtvaartnota 2020-2050 heeft het kabinet zich ten doel gesteld “om te komen tot een stelsel van normen en maatregelen dat gezamenlijk de hinder rond de luchthavens aantoonbaar vermindert en goed aansluit bij de ervaren hinder van de omwonenden” (IenW, 2020). De Luchtvaartnota bevat echter geen teksten over laagfrequent geluid van taxiënde en opstijgende vliegtuigengrondgeluid.

Bewoners, actiegroepen en andere belanghebbenden hebben kunnen reageren op de Luchtvaartnota. Deze reacties worden zienswijzen genoemd. Een deel van de zienswijzen had betrekking op het ontbreken van grondgeluid in de Luchtvaartnota.

Het kabinet heeft gereageerd op de zienswijzen met een Nota van Antwoord. Hierin geeft het Kabinet aan dat laagfrequent grondgeluid (aanzienlijke) hinder kan geven maar dat het niet mogelijk is om een handhaafbare norm te stellen, omdat onderzoek naar grondgeluid uitwijst dat het meten en berekenen hiervan zeer complex is. Desondanks wil het kabinet inventariseren of er uitvoerbare mogelijkheden resteren om rekening te houden met grondgeluid in toekomstig beleid. Uit deze inventarisatie zal blijken of en op welke wijze dit kan worden aangepakt (IenW, 2020).

Laagfrequent geluid van vliegtuigbewegingen op de start- en landingsbaan en taxibanen of van overige activiteiten op de luchthaven veroorzaken echter een specifieke vorm van geluidshinder die een andere aanpak vereist dan andere vormen van geluid. Dit rapport geeft een overzicht van maatregelen tegen geluidshinder van laagfrequent grondgeluid en grondgebonden geluid. Op basis van een combinatie van publieke bronnen en *expert judgement* is een kwalitatieve inschatting gemaakt van effect, haalbaarheid en kosten. Ten slotte zijn er aanbevelingen gedaan over ontwikkelingen en technologieën die veel potentie hebben om hinder van grondgeluid en grondgebonden geluid te verminderen, maar nog meer ontwikkeling nodig hebben voordat deze ingezet kunnen worden.

2 Aanpak

Het doel van deze studie is om te inventariseren of er uitvoerbare mogelijkheden resteren om hinder van laagfrequent grondgeluid en grondgebonden geluid te verminderen. Dit hoofdstuk zet uiteen hoe deze inventarisatie is uitgevoerd van afbakening, het ophalen van beschikbare informatie, tot de kwalitatieve beoordeling van de maatregelen.

2.1 Afbakening

Dit onderzoek richt zich op hinderbeperkende maatregelen tegen laagfrequent geluid van vliegtuigen op de taxi- en/of start- en landingsbanen (grondgeluid) en laagfrequent geluid van overige luchthavenactiviteiten inclusief proefdraaien (grondgebonden geluid).

Definitie laagfrequent geluid

Voor laagfrequent geluid (LFG) bestaat geen breed geaccepteerde definitie, maar doorgaans worden de frequenties tussen 20 en 150 Hz bedoeld waarbij geluid als gevolg van de bijbehorende lange golflengte op grote afstand hoorbaar is en zich langs obstakels kan bewegen (NSG, 1999; White, van Kamp, & Welkers, 2020). Inzichten en maatregelen gericht op infrasoon geluid met frequenties tussen 0 en 20 Hz zijn ook meegenomen in dit onderzoek. Zie Tabel 1 voor de studieafbakening.

Definitie grondgeluid

Onder grondgeluid[1] wordt het geluid van vliegtuigbewegingen op de start- en landingsbaan en taxibanen verstaan. Deze studie richt zich op grondgeluid tussen de 0 en 150 Hz.

Definitie grondgebonden geluid

Met grondgebonden geluid[2] wordt in deze studie het geluid van andere luchthavenactiviteiten op het luchthaventerrein bedoeld. Hier valt ook proefdraaien onder. Deze studie richt zich op grondgebonden geluid met frequenties tussen de 0 en 150 Hz.

Tabel 1: Afbakening van studie

	Vliegtuigen op start-/ landingsbaan of taxibaan (G2)	Overige bronnen op luchthaven incl. proefdraaien (G3)	Geluidsbronnen buiten luchthaventerrein
>150 Hz (middel-hoogfrequent)	Buiten scope	Buiten scope	Buiten scope
20-150 Hz (laagfrequent)	Hoofdonderwerp van studie	Binnen scope	Buiten scope
10-20 Hz (infrasoon)	Binnen scope	Binnen scope	Buiten scope

[1] In het overzicht van maatregelen aangeduid met G2
[2] In het overzicht van maatregelen aangeduid met G3

2.2 Achtergrond

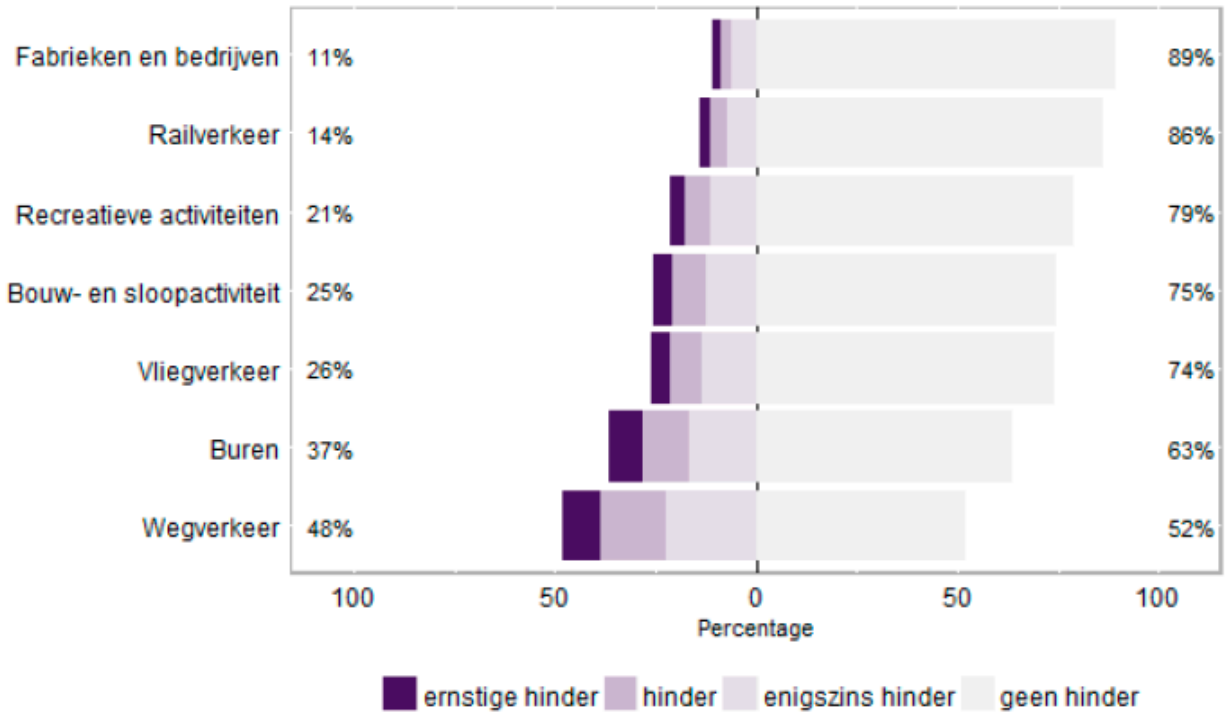
Hinder door laagfrequent geluid

In 2016 heeft RIVM voor het laatst een landelijke inventarisatie onder 8.000 inwoners uitgevoerd naar verstoringen in de woonomgeving (van Poll, Breugelmans, Houthuijs, & van Kamp, 2018). Zie hiervoor ook Figuur 1. Bij deze editie is voor het eerst ook verstoring door LFG onderzocht: 8,1% van de ondervraagden gaf aan hier minstens enige hinder van te ondervinden. Een onderverdeling naar bronnen van LFG wordt niet gegeven. Verder zegt 17% minstens enige mate van hinder door trillingen te ondervinden van 1 of meerdere bronnen. Wegverkeer is verantwoordelijk voor de meeste hinder (17%), gevolgd door bouw- en sloopactiviteiten (8%) en vliegtuig- en helikopterverkeer (8%). In 2020 is er door het RIVM een kleinere inventarisatie onder 2.300 inwoners uitgevoerd (Van Poll & Simon, 2021). Hierbij lag de nadruk op ernstige hinder en slaapverstoring in Corona-tijd. LFG is nog altijd de belangrijkste bron van slaapverstoring (7,7% ervaart enige mate van slaapverstoring door LFG). Ook in deze studie staat geen uitsplitsing van bronnen van LFG. Bij hinder van trillingen is het aandeel luchtvaart afgenomen doordat ook het aantal vluchten in Corona-tijd is afgenomen. Hierdoor stond luchtvaart op plaats 4 als bron van hinder door trillingen achter burenrumoer, wegverkeer en bouw- en sloopactiviteiten.

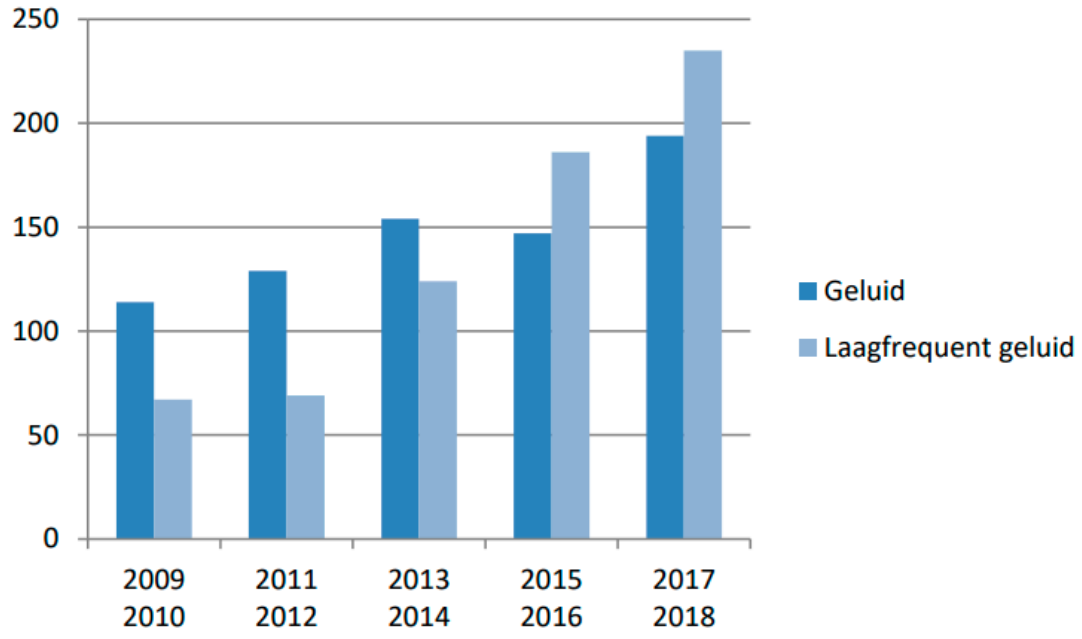
De inventarisaties bevestigen in ieder geval dat geluid in de frequentieband tussen 10 en 150 Hz anders wordt beleefd dan geluid met een hogere frequentie. Infrasoon geluid tussen de 10 en 20 Hz is niet zo zeer hoorbaar als wel voelbaar als trilling of zelfs zichtbaar in de vorm van trillende kopjes of glazen. Laagfrequent geluid tussen de 20 Hz en 150 Hz is wel hoorbaar, door gebrek aan demping soms zelfs op afstanden van meerdere kilometers, en klinkt als een bromtoon, dreunend geluid of gezoem. In veel gevallen is het lastig om de bron van laagfrequent geluid te lokaliseren en is de bromtoon niet voor iedereen hoorbaar. Van (zwaar) vliegverkeer is bekend dat het LFG-hinder kan veroorzaken, maar een aantal wordt in het rapport niet genoemd. Tenslotte is de Interactie tussen frequenties moeilijk te voorspellen, soms maskeert het een het ander, soms versterken ze elkaar. Langdurige blootstelling kan volgens het RIVM leiden tot slecht slapen en concentratieverlies.

Bij GGD-en in Nederland neemt het aantal klachten over het horen van laagfrequent geluid of een bromtoon neemt sinds 2009 toe en sinds 2015 klagen meer mensen over hinder van LFG dan over ‘gewone’ geluidshinder (Dusseldorp & al., 2019). Zie hiervoor ook Figuur 2. De melders noemen als bron van het LFG de buren, verkeer (lucht/weg/rail) en bedrijven, maar vaak is de bron onbekend of niet ingevuld. Luchtvaart is met ~4% de derde grootste bron van klachten over geluidshinder (LFG + MHF geluid) na burenoverlast en overlast van wegverkeer.

Geluidsniveaus en toonhoogte van LFG binnenshuis zijn niet te voorspellen enkel op basis van geluidsniveaus buitenshuis. Resonerende onderdelen van de gevel kunnen de geluidsdemping drastisch verminderen en de lange golflengte van het LFG kan in binnenruimtes ‘staande golven’ veroorzaken. Lokale factoren bepalen welke frequentieband dominant is voor hinder binnenshuis (Buikema & Vercammen, 2010).



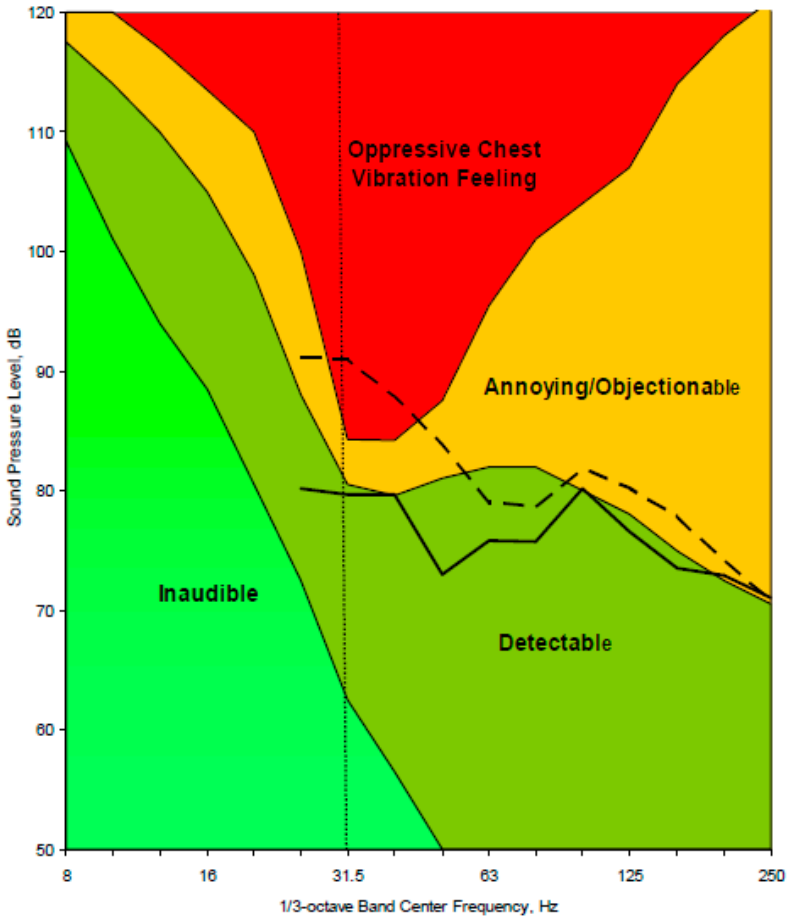
Figuur 1: Belangrijkste veroorzakers van geluidshinder in Nederland (van Poll, Breugelmans, Houthuijs, & van Kamp, 2018)



Figuur 2: Aantal geluid- en LFG-meldingen bij de GGD vanaf 2009 (Dusseldorp & al., 2019)

Ook het NLR doet al geruime tijd onderzoek naar laagfrequent geluid van vliegtuigen, voornamelijk rondom Schiphol (Bergmans & Veerbeek, 2013; Bergmans & Veerbeek, 2011a; Bergmans & Veerbeek, 2011b; Peerlings, Beintema, & van Veen, 2021). Ook heeft NLR hinder door *rattle noise* van helikopters onderzocht (MinDef, 2021; Zmarrou, Janssen, Koopman, Veen, & Hof, 2013; Veen, Heblij, Janssen, & Kaptein, 2015). Om de geluidshinder van laagfrequent vliegtuiggeluid te meten heeft NLR in eerder onderzoek een door Wyle Laboratories ontwikkelde hindercurve

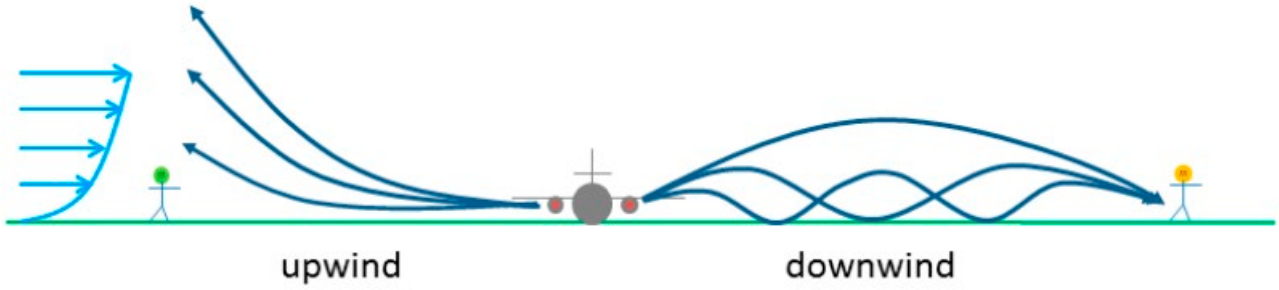
gebruikt, afgebeeld in Figuur 3 (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Hierbij wordt per frequentieband aangegeven bij welke geluidsniveaus (buitenshuis) een toon een bepaalde mate van hinder (binnenshuis) zal veroorzaken. De indeling in onhoorbaar, hoorbaar, hinderlijk en ernstig hinderlijk is gebaseerd op Japans onderzoek (Nakamura & Tokita, 1981). NLR heeft veelvuldig LFG hinderonderzoek gedaan rond Schiphol



Figuur 3: Wyle-hindercurve als gebruikt door NLR (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006)

Eigenschappen LFG

Laagfrequent geluid wordt slechter gedempt dan hoogfrequent-geluid wanneer het zich beweegt door de atmosfeer, dit is een fysisch verschijnsel. Hierdoor kan grondgeluid tot op grote afstand (enkele kilometers) waarneembaar zijn. Uit metingen is naar voren gekomen dat grondgeluid zich voornamelijk onder een hoek van 45 graden ten opzichte van het vliegtuig, tegengesteld aan de start richting, verplaatst. Verder blijkt dat de omgeving en weerscondities een grote invloed hebben op de verspreiding van LFG, waardoor er lokaal verschillen kunnen ontstaan in de luidheid van het grondgeluid. In het geval het grondgeluid zich in dezelfde richting als de wind verplaatst zal het geluid naar beneden toe worden afgebogen. Tegen de wind in wordt het naar boven toe afgebogen (zie Figuur 4). Aan de downwind-zijde weerkaatst het geluid tegen de grond. Dit terugkaatsen wordt versterkt als de grond akoestisch ‘hard’ is, bijvoorbeeld als de grond nat of bevroren is (winterse omstandigheden). Dit maakt dat de hinder van LFG met name in de wintermaanden optreedt. Door het afbuigen en het terugkaatsen is het grondgeluid aan de downwindzijde tot op grote afstand van het vliegtuig hoorbaar c.q. voelbaar. Dit in tegenstelling tot de upwind-zijde, waar geen weerkaatsing plaatsvindt. Upwind omstandigheden zullen niet vaak voorkomen bij grondgeluid. Vliegtuigen starten normaliter tegen de wind in waardoor het grondgeluid – dat zich ten opzichte van het vliegtuig schuin naar achteren verplaatst – altijd met de wind mee waait (downwind). De mate van het afbuigen is afhankelijk van de windsnelheid en de temperaturen in de verschillende luchtlagen. (Bergmans & Veerbeek, 2013).



Figuur 4: Grondgeluid door de atmosfeer onder upwind en downwind omstandigheden

De lange golflengte maakt dat de verspreiding van LFG niet tot weinig wordt beïnvloed door de meeste obstakels. Echter, grote en zware objecten zoals gebouwen, wegen of bruggen kunnen een afschermend effect hebben.

2.3 Literatuurstudie

Bij de literatuurstudie is gezocht naar publicaties over de effecten van maatregelen tegen hinder door grondgeluid en grondgebonden geluid op luchthavens. De volgende zoektermen zijn hiervoor gebruikt: ‘grondgeluid’, ‘grondgebonden geluid’, ‘taxi geluid’, ‘laagfrequent geluid luchthaven’, ‘low frequency aircraft noise’, ‘low frequency airport noise’, ‘taxi noise’, en ‘airport ground noise’.

De studies zijn vervolgens gescand en gegroepeerd op besproken geluidsmaatregelen. Voor deze inventarisatie zijn ruim 90 publicaties bekeken. Slechts 1/3^{e} van de publicaties ging daadwerkelijk over maatregelen tegen grondgeluid of grondgebonden geluid. In de literatuur werden 27 unieke maatregelen besproken.

2.4 Uitvraag onder luchthavens

Naast de literatuurstudie zijn enkele grote Europese luchthavens via koepelvereniging ACI EUROPE benaderd over hun ervaringen met grondgeluid en grondgebonden geluid. Hierbij is gevraagd naar de relevantie van het onderwerp in hun situatie, maatregelen op de luchthaven, de effectiviteit van deze maatregelen en over de regelgeving waar zij mee te maken hebben, zie hiervoor Appendix B. De vragenlijst is 2 maart 2022 verstuurd en de luchthavens hadden tot 22 april 2022 om te reageren.

Helaas is het aantal reacties zeer beperkt geweest. De twee luchthaven *operators* die gereageerd hebben laten een verschillend beeld zien. Voor de een is LFG een belangrijk thema door de intensieve helikopteroperaties die zij faciliteren, voor de ander is het onderwerp niet relevant door de grote afstand tussen luchthaventerrein en nabije bebouwing. De antwoorden van de operators zijn verwerkt in de beoordeling in hoofdstuk 3.

2.5 Beoordeling maatregelen op effect, haalbaarheid en kosten

De geïdentificeerde maatregelen zijn vervolgens beoordeeld op effect, haalbaarheid en kosten. Om de studie zo breed mogelijk toepasbaar te maken is uitgegaan van een generieke situatie. Lokale factoren kunnen ervoor zorgen dat een maatregel op de ene luchthaven wel, en op de andere luchthaven niet (of minder) tot zijn recht komt. Bij de aanpak van LFG-hinder op een specifieke luchthaven moeten deze factoren in acht genomen worden. Omdat de toelichting en onderbouwing van deze maatregelen uit de literatuur behoorlijk uiteenloopt is ervoor gekozen om per type maatregel een kwalitatieve beoordeling te geven op basis van beschikbare bronnen en *expert judgement*. De typen maatregelen zijn hieronder uiteengezet.

Tabel 2: Onderverdeling maatregelen in studie

Groep	Subgroep	Voorbeeldmaatregel
Maatregelen laagfrequent geluid (na)bij de bron	Technische aanpassingen aan de geluidsbron	Toepassing van *chevrons* op de motor
	Operationele aanpassingen	Vertrekprocedures met gereduceerd vermogen
	Afscherming en verplaatsing van de geluidsbron	Verleggen van banenstelsel
Maatregelen laagfrequent geluid (na)bij de ontvanger	Technische aanpassingen aan gebouw	Gevelisolatie
	Aanpassingen in de woonomgeving	Geluidsbarrière nabij woning
Maatregelen laagfrequent geluid tussen bron en ontvanger		Geluidsribbels in landschap
Overige maatregelen met impact op laagfrequent geluid	Geluidsmaatregelen	Stimuleren elektrisch taxiën
	Relevante ontwikkelingen en trends	Introductie elektrische vliegtuigen

Voor de effectbeoordeling van maatregelen in een bepaalde groep is gekeken naar de deelonderwerpen zoals genoemd in Tabel 3. Per deelonderwerp is op basis van *expert judgement* een kwalitatieve score (slecht, matig, gemiddeld, goed of uitstekend) toegekend.

Tabel 3: Aanpak kwalitatieve beoordeling op effect

Deelonderwerp	Invulling
Effect op geluidshinder	Kwalitatieve inschatting van de verwachte relatieve vermindering van geluidshinder door laagfrequent geluid. Hierbij gaat het specifiek om geluid met frequenties tot 150 Hz.
Neveneffecten op andere omgevingsfactoren als luchtkwaliteit, veiligheid en CO_2-emissies	Omschrijving van de potentiele neveneffecten (positief of negatief) van de geluidsmaatregel ten aanzien van luchtkwaliteit, veiligheid en klimaat.
Reikwijdte van de maatregel	Inschatting of de maatregel een lokaal effect rond de luchthaven of een breder regionaal effect heeft.
Voorwaardelijke condities	Omschrijving van de benodigde condities en omgevingsfactoren waarbij het verwachte effect op geluidshinder gerealiseerd kan worden.

Voor de beoordeling van haalbaarheid is gekeken naar de volgende deelonderwerpen.

Tabel 4: Aanpak kwalitatieve beoordeling op haalbaarheid

Deelonderwerp	Invulling
Technische volwassenheid	Inschatting van de technische volwassenheid van een maatregel. Vergelijkbaar met het *technology readiness level* (TRL)-niveau.
Impact betrokkenen	Omschrijving van het aantal betrokken partijen op en rond de luchthaven die met de maatregel te maken krijgt en de impact die deze maatregel heeft op hen heeft.
Benodigde sturing	Intensiteit van de benodigde sturing om de maatregel tot een succes te maken.
Tijd tot implementatie	Verwachte technische doorlooptijd totdat de maatregel ingevoerd kan worden (excl. participatietraject, aanpassing wetgeving, etc…).

Voor de beoordeling van kosten is gekeken naar de volgende deelonderwerpen.

Tabel 5: Aanpak kwalitatieve beoordeling op kosten

Deelonderwerp	Invulling
Onderzoek en ontwikkeling	Eenmalige ontwikkel- en onderzoekskosten om de maatregel geschikt te maken voor veilig en effectief gebruik in een operationele setting.
Implementatie	Eenmalige kosten om de maatregel te introduceren op een luchthaven.
Operatie en instandhouding	Terugkerende kosten voor instandhouding van de maatregel.

Na de kwalitatieve beoordeling volgt een overzicht van de in literatuur geïdentificeerde maatregelen met daarbij de belangrijkste kenmerken (o.a. groep waarin maatregel valt en of het grondgeluid of grondgebonden geluid betreft).

3 Inventarisatie van maatregelen

De uit literatuur geïdentificeerde maatregelen zijn gegroepeerd naar maatregelen bij de bron, maatregelen tijdens de overdracht van bron naar ontvanger, en maatregelen bij de ontvanger. Maatregelen bij de bron omvatten technische aanpassingen aan de bron, operationele aanpassingen en maatregelen op het luchthaventerrein die zorgen voor verplaatsing of afscherming van de bron. Maatregelen bij de ontvanger zijn maatregelen in de directe woon of werkomgeving van de ontvanger. Maatregelen in de overdracht van bron naar ontvanger vinden daartussen plaats. Figuur 5 illustreert de afbakening van de groepen maatregelen.

Figuur 5: Illustratieve weergave van de in dit onderzoek gebruikte definitie van groepen maatregelen

Voor ieder van de drie groepen maatregelen presenteren de volgende secties een inschatting van mogelijk effect, haalbaarheid en kosten – en de onzekerheid van die inschattingen. Voorbeelden van maatregelen per groep worden kort besproken, eventueel in verschillende varianten[3]. In de appendices A tot en met C zijn de maatregelen individueel besproken. Aangezien de beschikbare informatie sterk wisselt per maatregel kan het detailniveau en de mate van onzekerheid verschillen.

3.1 Maatregelen LF-geluid bij de bron

De groep ‘geluidsmaatregelen bij de bron’ bestaan uit technische aanpassingen aan de geluidsbron, uit aanpassingen aan de luchthavenoperatie waardoor de geluidsproductie verlaagt wordt of uit het verplaatsen of afschermen van de geluidsbron op het luchthaventerrein zodat het geluid voor minder hinder zorgt. Zie voor het volledige overzicht Appendix A.

3.1.1 Effect

Potentiële geluidreductie

De potentiële geluidsreductie van deze groep maatregelen is sterk afhankelijk van de lokale uitgangssituatie, de specifieke (set) maatregel(en) en de wijze van implementatie. In vergelijking tot de maatregelen zoals besproken in 3.2 en 3.3, zijn maatregelen bij de bron doorgaans het meest effectief. Wanneer het geluid al verder is verspreid, wordt het lastiger en daarmee vaak ook kostbaarder om geluidshinder te reduceren.

Een voorbeeld van een maatregel aan de bron zelf zijn kartelranden ofwel ‘chevrons’ op de vliegtuigmotor. Deze zijn in het verleden effectief toegepast om de geluidsproductie van vliegtuigen te verminderen. Chevrons op de motorkern kunnen hierbij effectief zijn tegen LFG. De hoeveelheid reductie hangt af van de toepassing en de geleverde

[3] Er zijn immers allerlei aanpassingen aan de start-, landings- en/of taxibanen mogelijk. Een onderscheid daartussen is in dit onderzoek niet gemaakt.

stuwkracht (Loheac, Julliard, & Dravet, 2014). Door de verregaande aerodynamisch optimalisatie en complexe geometrie lenen modernere motortypen zich helaas minder voor de toepassing van chevrons (Bastos, Deschamps, & da Silva, 2017).

Een voorbeeld van een operationele maatregel is het starten met gereduceerd startvermogen. Als de omstandigheden (zoals baanlengte) het toelaten, kan een reductie van het startvermogen ook de productie van laagfrequent grondgeluid verlagen. Echter, doordat er op diverse luchthavens al met minder vermogen wordt gestart, is het resterende potentieel beperkt.

Een bekende afschermmaatregel is het plaatsen van geluidsbarrieres. Een goed geplaatste barrière dichtbij de bron kan LFG potentieel tot wel 10 dB verminderen (Hak, et al., 2020). De daadwerkelijke vermindering hangt af van de lokale situatie.

Reikwijdte

Juist omdat het geluid bij de bron wordt gereduceerd, is de reikwijdte van dergelijke maatregelen groot. Wederom geldt dat in het bijzonder voor (technische of operationele) aanpassingen aan de bron. Afschermende maatregelen zorgen logischerwijs alleen voor geluidreductie vlak áchter de afscherming. Wanneer geluidsschermen aan de rand van het luchthaventerrein staan, zal de geluidbelasting op het platform zelf niet verlagen maar vlak achter het scherm wel. Een goed geplaatste barrière dichtbij de bron kan LFG verminderen over een afstand tot wel 2 km (Hak, et al., 2020). De daadwerkelijke reikwijdte hangt af van de lokale situatie.

Voorwaardelijke condities

LFG-maatregelen aan de geluidsbron mogen niet (te veel) conflicteren met andere criteria zoals brandstofverbruik, uitstoot van schadelijke emissies en productie van middel-hoogfrequent geluid. Op het luchthaventerrein moet met behulp van een *safety assessment* vastgesteld worden dat de veiligheid van de luchthavenoperatie niet in het geding is. Ook geldt er internationale regelgeving ten aanzien van obstakelvlakken.

Neveneffecten

De exacte neveneffecten verschillen per maatregel, maar kunnen zowel positief als negatief zijn. Maatregelen aan geluidsbron kunnen onbedoelde effecten hebben op brandstofverbruik, uitstoot van schadelijke emissies en productie van hoger frequent geluid. Operationele maatregelen kunnen zorgen voor reducties in brandstofverbruik en aanverwante uitstoot. Dergelijke besparingen resulteren ook in lagere kosten. Aan de andere kant kunnen maatregelen, bijvoorbeeld als ze resulteren in meer onderhoud, kostenverhogend werken. De neveneffecten van afschermende maatregelen zijn over het algemeen beperkt. Maatregelen die de bron verplaatsen, zoals het verplaatsen van een taxi-, start- of landingsbaan, zorgen ook voor verplaatsing van andere effecten. Het is sterk situatieafhankelijk (bijvoorbeeld de afstand tot nabijgelegen natuur) of dat netto positief of negatief is.

3.1.2 Haalbaarheid

Technische volwassenheid

Verschillende van de in literatuur geïdentificeerde maatregelen aan de bron worden al toegepast of zijn geschikt voor toepassing. Een set nieuwere maatregelen, zoals waterinjectie, worden nog niet breed toegepast, maar zijn al wel in experimentele omgeving getest en gedemonstreerd. Sommige maatregelen zijn alleen van toepassing op grondgebonden geluid (G3, van bijvoorbeeld proefdraaien), of zijn daarvoor eenvoudiger te realiseren dan voor grondgeluid (G2, van startende of landende vliegtuigen).

Impact betrokkenen

Ten opzichte van maatregelen tijdens de overdracht en bij de ontvanger is de hoeveelheid betrokkenen bij maatregelen aan de bron groter. Aanpassingen aan het vliegtuig vergen bijvoorbeeld actie van de fabrikant (of tenminste de onderhoudsorganisatie), de luchtvaartmaatschappijen die dat toestel gebruiken, en regelgevende instanties. Operationele aanpassingen raken niet alleen de operator, maar ook de luchthaven en luchtverkeersleiding, naast mogelijke andere organisaties die werkzaam zijn op en rond het platform. Maatregelen die het laagfrequente geluid komend van de bron afschermen vereisen vaak slechts betrokkenheid van een (relatief) kleinere groep betrokkenen.

Benodigde sturing

De benodigde sturing hangt sterk samen met het aantal betrokken partijen (Hak, et al., 2020). Maatregelen die resulteren in kostenverlagingen (of algemener: positieve neveneffecten hebben) vergen naar verwachting minder sturing dan maatregelen die kostenverhogende werkend, of resulteren in nadelige neveneffecten.

Tijd nodig tot implementatie

De implementatie van technische aanpassingen aan de bron kan, zeker wanneer dergelijke aanpassingen niet als retrofit beschikbaar zijn, decennia duren. In zo'n geval vergt het immers een ronde van vlootvernieuwing voordat maatregelen in de operatie doordringen. Kleinere operationele maatregelen kunnen naar verwachting op kortere termijn (één tot enkele jaren) worden gerealiseerd, afhankelijk van de mate van onderzoek en ontwikkeling die nog benodigd is. De benodigde tijd tot implementatie van ingrepen die zich richten op het afschermen of verplaatsen van de bron lopen sterk uiteen: de realisatie van een geluidscherm kost minder tijd dan het verplaatsen van een start-, landings- of taxibaan.

3.1.3 Kosten

Onderzoek en ontwikkeling (R&D)

De benodigde investering in onderzoek en ontwikkeling verschilt sterk per maatregel. In sommige gevallen is R&D niet of nauwelijks nodig, zodat ook kosten laag zijn. In andere gevallen is er onderzoek en ontwikkeling vereist om een eerder *proof of concept* geschikt te maken voor operationeel gebruik. In literatuur zijn geen ideeën van maatregelen geïdentificeerd die nog veel fundamenteel onderzoek vergen.

Implementatie

Technische aanpassingen aan de bron brengen typisch hogere implementatiekosten met zich mee, omdat dan immers alle bronnen moeten worden aangepast. Operationele maatregelen vergen lagere investeringen vooraf. Maatregelen die zich richten op het afschermen van de bron zijn qua implementatie duurder, omdat ze bijvoorbeeld de realisatie van een geluidscherm vergen. Het duurst zijn aanpassingen aan start-, landings- en taxibanen.

Operatie en instandhouding

De operationele kosten zijn sterk afhankelijk van de financiële neveneffecten. Als vermeld in Sectie 3.1.1 kunnen die per maatregel verschillen. Een hogere noodzaak aan sturing werkt eveneens kostenverhogend. De instandhouding van maatregelen gericht op het afschermen en verplaatsen van de bron zijn juist lager – of veranderen soms in het geheel niet. Omdat de meeste in de literatuur gevonden maatregelen operationeel van aard zijn, zijn de te verwachten kosten voor operatie en instandhouding over het algemeen hoger.

3.1.4 Samenvattend beoordelingskader

Tabel 6 toont het ingevulde beoordelingskader, als gedefinieerd en toegelicht in Sectie 2.4, voor maatregelen bij de bron. De beschikbare informatie uit de literatuur over effect, haalbaarheid en kosten verschilt sterk per maatregel, onderstaande beoordeling betreft daarom een kwalitatieve inschatting die geldt voor de groep van maatregelen. Een meer gedetailleerde beoordeling is te vinden in Appendix A.

Tabel 6: Ingevuld samenvattend beoordelingskader voor maatregelen bij bron

Criterium	Score	Onzekerheid	Toelichting
Effect	Goed	Gemiddeld	De effecten van maatregelen aan de bron zijn typisch het grootst en hebben een grote reikwijdte. Aan de andere kant gelden er óp het luchthaventerrein meestal ook meer voorwaardelijke condities dan daarbuiten. Niet-financiële neveneffecten verschillen per maatregel, maar zijn veelal neutraal of positief.
Haalbaarheid	Gemiddeld	Gemiddeld	Veel maatregelen zijn technisch al volwassen, maar juist maatregelen aan de bron raken aan of vergen medewerking van veel verschillende partijen. De benodigde sturing en tijd tot implementatie lopen uiteen tussen de verschillende maatregelen.
Kosten	Matig	Groot	De investering voor R&D en implementatie is naar verwachting meestal beperkt, of af te schrijven over een relatief lange periode. Operationele en instandhoudingskosten zijn voor bronmaatregelen vaak hoger, omdat veel maatregelen operationeel van aard zijn.

3.2 Maatregelen LF-geluid tussen bron en ontvanger

De groep ‘maatregelen bij de overdracht van bron naar ontvanger’ hebben ten doel om de geluidsoverdracht te verstoren of zo te verzwakken tijdens het pad dat het geluid aflegt van de bron naar de ontvanger. Deze maatregelen worden getroffen tussen het luchthaventerrein en het gebied waarin de ontvanger zich bevindt – bijvoorbeeld een woonwijk of bedrijventerrein. Geluidsribbels of het aanpassen van de (akoestische) eigenschappen van de grond (door middel van ander materiaal, andere begroeiing, …) zijn enkele voorbeelden zie voor het volledige overzicht Appendix B.

3.2.1 Effect

Door wind- en temperatuurgradiënten heeft LFG de neiging ‘over de grond te stuiteren’. Hiermee kunnen afstanden van enkele kilometers worden overbrugd zonder dat het geluid substantieel wordt gedempt. Des te (akoestisch) harder de ondergrond, des te sterker dit effect is. Door middel van verstrooiende, absorberende of afschermende maatregelen kan de overdracht van laagfrequent geluid verminderd worden. Denk hierbij respectievelijk aan geluidribbels, het akoestisch zachter maken van de ondergrond met beplanting en geluidsschermen (Bergmans & Veerbeek, 2013).

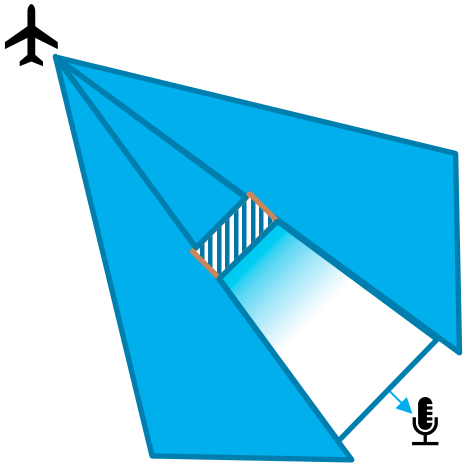
Potentiële geluidreductie

Afhankelijk van de weerscondities en de oppervlakte waarop de maatregel wordt toegepast, kan het zachter maken van de grond een geluidreductie van 5 tot 10 dB opleveren voor geluid in de 31.5 Hz octaafband (van der Eerden,

Salomons, & Beeks, 2007), of zelfs nog meer dan dat (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Het effect van beplanting met olifantsgras is eerder eveneens geschat op zo'n 10 dB, over een afstand van 2 kilometer (Hak, et al., 2020). Geluidribbels rondom de Polderbaan hebben grondgeluid in Hoofddorp-Noord met 6 dB verlaagd (Schiphol & LVNL, 2021). Volgens Bergmans & Veerbeek (2013) is absorptie minder effectief van verstrooiing.

Reikwijdte

Maatregelen tussen bron en ontvanger hebben enkel effect op het transmissie-pad tussen bron en ontvanger in de luwte achter de desbetreffende maatregel (zie Figuur 6). Volgens de literatuur kan de reikwijdte van de maatregel enkele kilometers bedragen. Maatregelen die gericht zijn op verstrooiing of absorptie hebben geen effect op het gebied tussen de geluidbron en de locatie waarop de maatregel is geïmplementeerd. In het geval van barrières kan geluid worden teruggekaatst richting de bron.



Figuur 6: Illustratie reikwijdte van maatregel tussen bron en ontvanger

Voorwaardelijke condities

Belangrijk is dat er voldoende ruimte beschikbaar is om maatregelen te treffen. Eén dunne groenstrook, van bijvoorbeeld 10 meter breed, zal weinig effect hebben. Het gebruik van olifantsgras rondom Schiphol bestrijkt meerdere tientallen hectares (Hak, et al., 2020). Voor de implementatie van geluidribbels bij de Polderbaan werd een gebied van 55 hectare geschat (Monster, 2013); het huidige Park Buitenschot, waar deze ribbels zijn toegepast, beslaat een oppervlakte van zo'n 30 hectare. Ondanks dat dergelijke ruimte dus soms wel gevonden kan worden, is dat niet altijd het geval – bijvoorbeeld vanwege taxibanen of autoverkeerswegen (Bergmans & Veerbeek, 2013). Een andere belangrijke voorwaarde is dat landschapsaanpassingen geen nadelig effect hebben op de (vlieg)veiligheid, en bijvoorbeeld geen vogels aantrekken.

Neveneffecten

Met name olifantsgras heeft een aantal gunstige neveneffecten: het is onaantrekkelijk voor vogels, neemt veel CO_2 op en kan na oogst voor verschillende toepassingen worden gebruikt (Hak, et al., 2020; WUR, sd). Geluidsribbels rondom Schiphol zijn geïntegreerd in een park dat geschikt is voor recreatie (Schiphol, sd). Maatregelen tijdens de overdracht zijn uiteraard niet van invloed op de productie van motoremissies of brandstofverbruik.

3.2.2 Haalbaarheid

Technische volwassenheid

Zowel geluidribbels als olifantsgras worden al toegepast rondom Schiphol (Schiphol & LVNL, 2021; Hak, et al., 2020).

Impact betrokkenen

Afhankelijk van de totale omvang van de maatregel is het aantal betrokken partijen bij de realisatie van deze maatregelen doorgaans kleiner dan voor maatregelen bij de bron of bij de ontvanger. Primair gaat het om de eigenaar van het land waarop de maatregel moet worden geïmplementeerd. Desondanks kan de invloed per betrokkene nog steeds groot zijn. Omdat de locatie waarop de maatregel wordt gerealiseerd van belang is voor het effect, geeft dat een landeigenaar mogelijk veel invloed.

Benodigde sturing

Sturing is nodig bij het bepalen van geschikte locaties voor de implementatie van een maatregel, en het realiseren daarvan.

Tijd nodig tot implementatie

Beplanting is naar verwachting sneller te realiseren dan ribbels. Bij de implementatie rondom Schiphol zat er twee jaar tussen onderzoek en (eerste) implementatie (Schiphol & LVNL, 2021). Voor alle maatregelen tijdens de overdracht geldt dat de implementatietermijn afhangt van de omvang van het project en het aantal betrokkenen.

3.2.3 Kosten

Onderzoek en ontwikkeling (R&D)

Gegeven het feit dat beide in literatuur geïdentificeerde maatregelen al worden toegepast, is de benodigde R&D-investering beperkt. Mogelijk kan aanvullend onderzoek worden gedaan om de positieve effecten te vergroten.

Implementatie

Enige mate van onderzoek is sowieso nodig om te komen tot een geschikt ontwerp en passende implementatie. Daarnaast zijn er kosten gemoeid met het realiseren van de maatregel, zoals de eventuele aanschaf of huur van land, of het planten van olifantsgras (WUR, sd). Die kosten zijn sterk situatieafhankelijk.

Operatie en instandhouding

Kosten voor operatie en instandhouding zijn minimaal. Olifantsgras dient periodiek geoogst te worden. De oogst kan vervolgens worden verkocht.

3.2.4 Samenvattend beoordelingskader

Tabel 8 toont het ingevulde beoordelingskader, als gedefinieerd en toegelicht in Sectie 2.4, voor maatregelen tijdens de overdracht van bron naar ontvanger. De beschikbare informatie uit de literatuur over effect, haalbaarheid en kosten verschilt sterk per maatregel, onderstaande beoordeling betreft daarom een kwalitatieve inschatting die geldt voor de groep van maatregelen. Een meer gedetailleerde beoordeling is te vinden in Appendix B.

Tabel 7: Ingevuld samenvattend beoordelingskader voor maatregelen tijdens overdracht van bron naar ontvanger

Criterium	Score	Onzekerheid	Toelichting
Effect	Goed	Klein	Effecten worden in literatuur geschat tussen de 5 en 10 dB, en soms hoger. De voorwaardelijke condities zijn beperkt en maatregelen hebben effect op het gehele gebied 'achter' de locatie waarop de maatregel is geïmplementeerd. Neveneffecten zijn positief, maar kleiner dan bij sommige bronmaatregelen.
Haalbaarheid	Goed	Groot	Verschillende innovatieve maatregelen (geluidribbels en olifantsgras) worden al toegepast. Implementatie is sterk afhankelijk van omvang en het aantal betrokken grondeigenaren. Wanneer zij welwillend staan tegenover ontwikkeling, kunnen maatregelen binnen enkele jaren worden gerealiseerd.
Kosten	Uitstekend	Groot	Vanwege bestaande praktijkervaring is er weinig (fundamenteel) onderzoek nodig. Kosten voor implementatie zijn sterk afhankelijk van de situatie en kosten voor operatie en instandhouding zijn minimaal, of zelfs negatief (d.w.z.: de maatregel levert geld op).

3.3 Maatregelen LF-geluid bij ontvanger

De groep 'maatregelen bij de ontvanger' beogen om de geluidoverdracht in de nabijheid van de ontvanger te verstoren of te verminderen. Maatregelen in deze groep hebben betrekking op aanpassingen aan de woning en de nabije leefomgeving (woonwijk, bedrijventerrein, etc.). Concrete voorbeelden zijn woningisolatie of de inzet van antigeluid. Zie voor het volledige overzicht Appendix C.

3.3.1 Effect

Potentiële geluidreductie

De geluidsbelasting op de gevel in combinatie met de gevelconstructie van de woning bepalen welke frequentieband dominant is voor de hinder. Maatregelen dienen zich primair te richten op deze frequenties. Onderzoek naar de aard en omvang van hinder van grondgeluid rondom Schiphol gaf aan dat onder de meest ongunstige omstandigheden een reductie van 5 tot 10 dB gewenst is (Buikema & Vercammen, 2010). Voor andere luchthavens is dit onbekend.

Maatregelen kunnen zich richten op het afschermen, absorberen, of maskeren van geluid. Het afschermen van LFG bij de ontvanger is minder effectief dan bij de bron en vereist een barrière met een hoge dichtheid en voldoende hoogte (15 m voor een vermindering van 6 dB). Het effect is het grootst vlakbij de barrière en neemt daarna af. Ook kan wind in de richting van de ontvanger de effectiviteit van een barrière drastisch verminderen (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Veel geluidsschermen zijn vooral effectief tegen hogere tonen waarbij LFG overblijft. Het LFG lijkt dan gevoelsmatig zelfs toe te nemen.

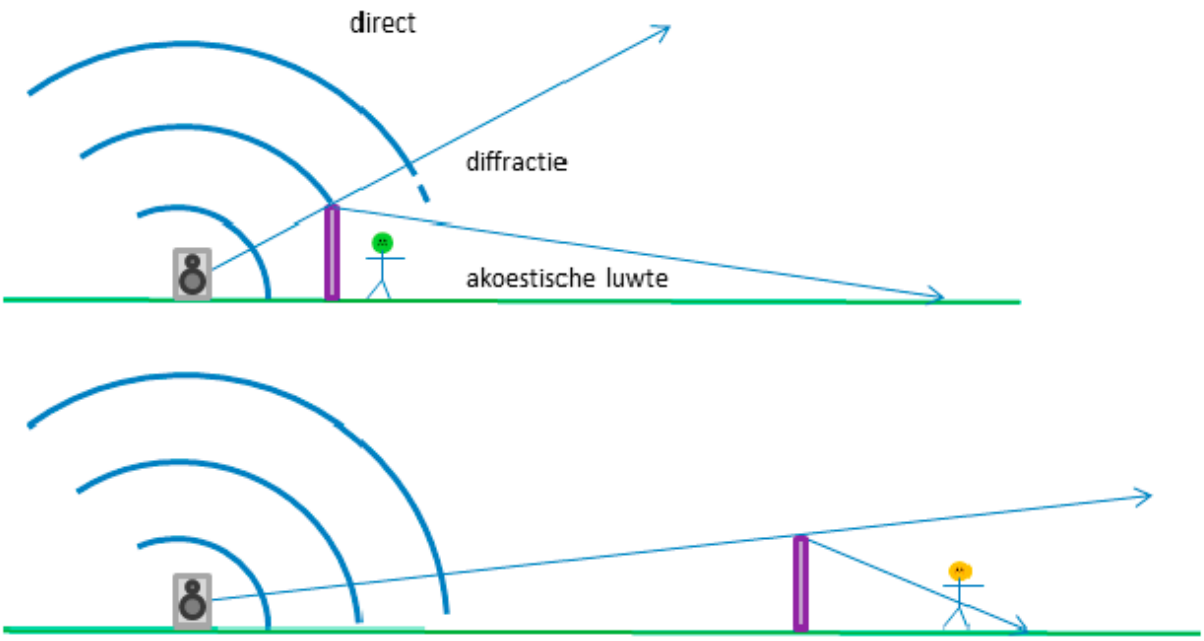
Woningisolatie kan zeer effectief zijn tegen hinder van 'gewoon' geluid. Echter voor geluid onder ~160 Hz zijn deze maatregelen veel minder effectief. Het plaatsen van 3-voudig dubbelglas kan hinder van LFG met 5 dB verminderen ten opzichte van enkel glas maar voor een soortgelijke reductie komend van modern dubbelglas is beduidend meer massa nodig (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006).

Een relatief nieuwe ontwikkeling is het toepassen van *noise cancelling* ramen. Het verminderen van geluidshinder met antigeluid wordt al langer onderzocht als maatregel tegen 'gewoon' geluid, maar de Delftse start-up DeNoize claimt een manier gevonden te hebben waardoor deze technologie ook de geluidsbelasting van lagere frequenties (tot 100 Hz) met 6-7 dB kan verminderen. Dit wordt momenteel onderzocht in de buurt van Schiphol (DeNoize testing window technology to reduce noise nuisance in homes, 2021).

Het effect van zichtbaar groen op het beperken van geluidhinder wordt geschat op het equivalent van 10 dB(A). Het effect van natuurlijke geluiden is lastiger te schatten, en zal afhangen van de locatie. Grove schatting is dat maskerende geluiden een equivalente hinderreductie tussen de 5 dB(A) en 10 dB(A) kunnen realiseren, maar het is onbekend of en in welke mate dit voor infrasoon en LFG geldt (Hak, et al., 2020).

Reikwijdte

Door de lange golflengte zal LFG onder *down-wind* condities over de barrière heen buigen. Dit verkleint de geluidsluwe ruimte achter de barrière. Hierdoor is de reikwijdte van de maatregel beperkt (Bergmans & Veerbeek, 2013).



Figuur 7: Afschermingsprincipe (Bergmans & Veerbeek, 2013)

Maatregelen aan de woning zelf zijn enkel effectief voor die woning en hebben geen effect op geluidsniveaus in de omgeving.

Voorwaardelijke condities

Om zo veel mogelijk akoestische luwte te creëren moeten barrières zo dicht mogelijk bij de ontvanger geplaatst worden. Ook is een hoogte tussen de 10 en 15 m vereist om effectief te zijn tegen LFG. Dit is vergelijkbaar met een gebouw van 3 tot 5 verdiepingen. Windcondities spelen een belangrijke rol in de effectiviteit van de barrière (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006).

Woningisolatie is minder effectief tegen LFG dan tegen geluid met hogere frequenties. Ten opzicht van enkel glas valt met dubbel of trippel-glas en dikkere kozijnen nog een duidelijke winst te behalen. Voor woningen die al voorzien zijn van dubbel glas of beter is het beduidend moeilijker om, voor LFG, een verbetering te realiseren

(Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Wanneer *noise-cancelling* ramen inderdaad effectief blijken tegen LFG, dan kunnen deze worden geïnstalleerd bij nieuwbouw of als *retrofit* in bestaande gebouwen.

Neveneffecten

Afschermende en absorberende maatregelen voor de vermindering van LFG hinder hebben tevens een positief effect op geluidshinder van middel- en hoogfrequent geluid. Ook heeft isolatie mogelijk een positief effect op de warmtehuishouding van de woning of kantoor. Afscherming kan echter ook leiden tot visuele vervuiling als de maatregelen niet passen in de woonomgeving.

3.3.2 Haalbaarheid

Technische volwassenheid

Geluidsbarrières worden lang en breed toegepast tegen 'gewone' geluidshinder. Om effectief te zijn tegen LFG moet aan aanvullende voorwaarden worden voldaan, maar de technologie op zich is niet nieuw. Vanwege de vereiste hoogte (>10 m) is een stevige fundering noodzakelijk met oog op de windbelasting. De impact van *noise cancelling* ramen wordt momenteel in een proefopstelling onderzocht. Hieruit volgt mogelijk een noodzaak voor verdere doorontwikkeling.

Impact betrokkenen

Maatregelen in de leefomgeving hebben zowel een positief (minder geluid) als negatief (visuele vervuiling) effect op het welzijn van omwonenden. Voor projectontwikkelaars en woningeigenaren kunnen de bouwkosten stijgen door de aanvullende maatregelen.

Benodigde sturing

De voorgenomen maatregelen moeten passen in de bestemmingsplannen en welstandseisen van de betreffende locatie. In het bouwbesluit staan momenteel geen eisen ten aanzien van LFG. De voorgeschreven NEN5077 meet geluid vanaf 100 Hz. Hierdoor is er vanuit de regelgeving geen prikkel om aanvullende maatregelen te nemen tegen LFG. Wanneer de maatregelen eenmaal geïmplementeerd zijn is er weinig sturing meer nodig.

Tijd nodig tot implementatie

Afhankelijk van de lokale situatie kunnen de LFG-maatregelen bij de ontvanger opgenomen worden in de planning van de nieuwbouw. Participatietrajecten vanwege de visuele impact van de maatregelen en aanpassingen van de regelgeving kunnen het traject vertragen.

3.3.3 Kosten

Onderzoek en ontwikkeling (R&D)

De techniek voor geluidsschermen is reeds volwassen, ontwikkelkosten zijn daarmee laag. Aanvullend locatieonderzoek kan nodig zijn om te bepalen waar de schermen het meest effectief zijn. De techniek voor *noise cancelling* ramen is relatief nieuw en vereist mogelijk aanvullend budget om door te ontwikkelen.

Implementatie

Ten opzichte van geluidsschermen bij de bron of geluidsschermen tegen middel-hoogfrequent geluid, vereisen geluidsschermen bij de ontvanger tegen LFG meer hoogte en daarmee meer materiaal en versterkte fundering. Indien een barrière wordt geïntegreerd in een breder ruimtelijk ontwerp zullen kosten waarschijnlijk relatief laag zijn.

Wanneer een barrière wordt aangelegd zoals bij de Polderbaan (Buitenschot) zullen de kosten enkele miljoenen euro's bedragen. Advies en uitwerking van varianten zal, afhankelijk van de omvang van de werkzaamheden, grofweg tussen de €50.000en €100.000 aan advieskosten bedragen (Hak, et al., 2020). Aanvullende participatietrajecten kunnen deze kosten verder ophogen. Woningisolatie kosten bedragen in de regel tussen de €10.000 en 50.000 per woning (Hak, et al., 2020). Ook n*oise cancelling* ramen hebben meerkosten ten opzichte van passief meervoudig glas. De hoogte van de meerkosten is onbekend.

Operatie en instandhouding

Wanneer de maatregelen eenmaal geïmplementeerd zijn de operationele kosten vergelijkbaar met conventionele geluidsschermen.

3.3.4 Samenvattend beoordelingskader

Tabel 8 toont het ingevulde beoordelingskader, als gedefinieerd en toegelicht in Sectie 2.4, voor maatregelen bij de ontvanger. De beschikbare informatie uit de literatuur over effect, haalbaarheid en kosten verschilt sterk per maatregel, onderstaande beoordeling betreft daarom een kwalitatieve inschatting die geldt voor de groep van maatregelen. Een meer gedetailleerde beoordeling is te vinden in Appendix C.

Tabel 8: Ingevuld samenvattend beoordelingskader voor maatregelen bij ontvanger

Criterium	Score	Onzekerheid	Toelichting
Effect	Matig	Groot	Barrières zijn minder effectief bij de ontvanger dan bij de bron en zijn sterk weersafhankelijk. Isolatie is minder effectief tegen LFG dan tegen 'gewoon' geluid.
Haalbaarheid	Gemiddeld	Gemiddeld	Veel maatregelen zijn technisch al volwassen, maar stellen aanvullende eisen om effectief te zijn tegen LFG. Deze eisen vergroten de impact op de leefomgeving en vereisen daarmee aanvullend draagvlak van de omgeving. De benodigde sturing en tijd tot implementatie hangt af van het benodigde participatietraject en eventuele aanpassingen in wet- en regelgeving.
Kosten	Goed	Laag	Eenmalige ontwikkel- en implementatiekosten zijn relatief laag. Participatie en aanpassingen van wet- en regelgeving kunnen de kosten verhogen. Wanneer de maatregelen eenmaal geïmplementeerd zijn de operationele kosten vergelijkbaar met conventionele maatregelen.

3.4 Maatregelen MHF geluid

In de voorgaande drie secties zijn maatregelen besproken die mogelijk kansrijk zijn om laagfrequent geluid te verminderen. Deze sectie benoemt enkele aanvullende maatregelen, die niet zozeer effect hebben op laagfrequent geluid, maar wel op midden- of hoogfrequent geluid. Daar dit onderzoek zich richt op laagfrequent geluid, worden de maatregelen in deze sectie slechts kort benoemd en niet beoordeeld.

Technische aanpassingen aan de bron

Geluidssignalen van grondvoertuigen en GSE (ground support equipment) kunnen zorgen voor geluidbelasting in geluidgevoelige gebieden in de omgeving van de luchthaven (Jopson, Jones, Porter, & White, 1998). Door signalen opnieuw te ontwerpen, kan eventuele overlast mogelijk verminderd worden.

Operationele aanpassingen op het platform

Mede aangejaagd door de noodzaak van het reduceren van CO_2-uitstoot en bijbehorende klimaatimpact worden maatregelen uitgerold die het gebruik van de APU (hulpmotor in de staart van het vliegtuig, bedoeld voor stroomvoorziening en cabineluchtbehandeling als het toestel geparkeerd is) terugdringen (van der Sman, Peerlings, Kos, Lieshout, & Boonekamp, 2021). In plaats van de APU kunnen GPUs (ground power units) worden gebruikt. Tenzij deze elektrisch zijn, produceren ook deze apparaten geluid (Hak, et al., 2020). Een alternatief is het aanbieden van vaste walstroom (fixed electrical ground power, FEGP). De als onderdeel van het Europese *Fit for 55*-pakket voorgestelde *Alternative Fuels Infrastructure Regulation* (AFIR) verplicht luchthavens tot het aanbieden daarvan (EC, 2021). Dat dringt geluidproductie dan ook verder terug.

Vaste walstroom is echter alleen een alternatief voor de elektriciteit die door de APU geleverd wordt. Om helemaal zonder APU te kunnen, is ook de beschikbaarheid van behandelde lucht (pre-conditioned air, PCA) nodig (van der Sman, Peerlings, Kos, Lieshout, & Boonekamp, 2021). Die verplichting is geen deel van het AFIR-voorstel.

Het verminderen van APU-gebruik reduceert ook brandstofverbruik, emissies en daaraan gerelateerde kosten. Havengelden zullen naar verwachting stijgen, omdat luchthavens kosten (deels) zullen (moeten) doorbelasten. Een ander mogelijk nadeel voor luchtvaartmaatschappijen is dat de omdraaitijd (tijd tussen landing en daaropvolgend vertrek) wordt verlengd, waardoor de inzetbaarheid van een toestel verlaagt en kosten toenemen.

Operationele aanpassingen buiten het platform

Naast het reduceren van APU-gebruik onderneemt de luchtvaartsector stappen om taxiemissies te reduceren. Dat kan door te taxiën op één motor (single engine taxi, SET) of het gebruik van alternatieven – al dan niet (hybride-)elektrisch aangedreven (van der Sman, Peerlings, Kos, Lieshout, & Boonekamp, 2021). De Nederlandse sector specifiek heeft daarvoor een roadmap ‘Sustainable Taxiing’ opgesteld (Schiphol, 2021), die zich richt op een volledig duurzaam taxiënde operatie op Schiphol per 2030. Naast een geluidsreductie zorgt dit voor een afname van uitstoot, ten gevolge van een afname in brandstofverbruik. Taxiën op één motor kan echter niet altijd en gebruik van sleepvoertuigen (zoals de TaxiBot, waar Schiphol zich op richt) verhogen de operationele complexiteit. Ook is met de aanschaf van dergelijke voertuigen een investering gemoeid.

Naast alternatieven voor taxiën kan ook het verplaatsen of afschermen van taxibanen zorgen voor een reductie van geluidbelasting van gevoelige gebieden.

3.5 Algemene ontwikkelingen vliegtuiggeluid

Vliegtuiggeluid is een onderwerp dat continue aandacht heeft van omwonenden en de politiek. Hieronder volgt een samenvatting van de belangrijkste ontwikkelingen (Derei, Hogenhuis, Hoolhorst, Veerbeek, & Speijker, 2018).

Een belangrijke ontwikkeling is dat in de toekomst meer gebruik gemaakt zal gaan worden van geluidmetingen. Deze ontwikkeling is al enige tijd gaande, zoals onder andere blijkt uit de eerder genoemde studies naar het gebruik van

metingen voor handhaving en de trendvalidaties voor Geilenkirchen en Schiphol. Samen met RIVM en KNMI, werkt NLR aan een landelijke programmatische aanpak voor het meten van vliegtuiggeluid. Hierbij wordt onderzoek gedaan naar het verbeteren van zowel berekeningen als metingen en het onderling versterken van beide methodes. De nadruk ligt hierbij op MHF geluid.

Een trend is dat de hoeveelheid geluid die vliegtuigen per vliegbeweging produceren in de loop van de tijd afneemt. De verwachting is dat deze ontwikkeling zich voortzet. Of de ervaren hinder daarmee ook afneemt hangt af van de geluidsbeleving van toekomstige vliegtuigen en het aantal vliegbewegingen. Door COVID heeft de luchtvaart een stevig krimp doorgemaakt en de mate en snelheid van het herstel is nog onzeker. Een andere ontwikkeling die de komende jaren aandacht verdient is elektrisch vliegen. Weliswaar zal dit in de komende jaren slechts aan de orde zijn voor relatief kleine vliegtuigen, maar ook met die vliegtuigen kan inzicht verkregen worden in de geluidproductie bij elektrisch vliegen. Een elektrische motor zal aanzienlijk stiller zijn dan de huidige generatie motoren, maar ander onderdelen van elektrische vliegtuigen zullen wel geluid produceren. Met reeds bestaande elektrische vliegtuigen kan in de praktijk onderzoek gedaan worden naar de geluidproductie van dergelijke vliegtuigen. Daarnaast kunnen theoretische studies al een doorkijk geven naar de verwachte geluidproductie van grotere elektrische toestellen. Veel concepten die uitgaan van elektrische voortstuwing, maken gebruik van *distributed propulsion*. Dit wil zeggen dat de stuwkracht geleverd wordt door een groot aantal motoren die over een groot deel van het vliegtuig verdeeld zitten. Dit in tegenstelling tot conventionele vliegtuigen die meestal met twee motoren zijn uitgerust. Het toepassen van *distributed propulsion* kan de geluidproductie van een vliegtuig verminderen. Bovenstaande trend vindt primair plaats vanwege duurzaamheid (specifiek een vermindering van de hoeveelheid CO_2), een eventuele vermindering van de hoeveelheid geluid is hierbij een gunstig neveneffect. LFG krijgt relatief weinig aandacht bij de ontwikkeling van vliegtuigmotoren ten opzichte van emissies en MHF geluid. Ook bij elektrische motoren lijkt weinig aandacht te zijn voor LFG en daardoor is er ook weinig over bekend. Een recente studie uit Zweden laat in elk geval op basis van een bewonersenquête zien dat LFG hinder van stadsbussen significant daalde nadat de hybride bussen vervangen werden door volledig elektrische voertuigen (Waye & al, 2021). Mogelijk belangrijker voor hinder van LFG is dat een toename van elektrische vliegtuigmotoren gepaard zal gaan met een toename van het gebruik van 1 of 2 propellers of een reeks van kleine propellers (de hierboven genoemde *distributed propulsion*). Hoewel de totale hoeveelheid geluid van deze vliegtuigen zal verminderen, is de impact op LFG hinder onbekend.

Ten slotte zal het gebruik van drones en luchttaxi's in Europa in de komende jaren naar verwachting toenemen. Daarbij gaat het zowel om gebruik door particulieren als om commercieel gebruik, bijvoorbeeld voor het vervoeren van pakketjes. Het geluid dat deze voertuigen produceren is een van de punten van aandacht. Dit betekent dat een nieuwe geluidbron in de lucht wordt geïntroduceerd waarvoor onderzocht moet worden hoeveel geluid deze produceert en welke regelgeving nodig is voor het gebruik van dergelijke toestellen. Door het beperkte formaat en gewicht van deze voertuigen en de elektrische aandrijving waarmee ze zijn uitgerust ligt hinder van LFG niet voor de hand.

4 Regelgeving en standaarden

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van regelgeving en standaarden ten aanzien van laagfrequent geluid. Hierbij wordt ingegaan op richtlijnen voor LFG in Nederland, standaarden voor het meten en berekenen van LFG en hoe LFG van vliegtuigen meeweegt in de Nederlandse handhaving. Ten slotte worden grenswaarden voor LFG uit het buitenland besproken.

4.1 Richtlijnen voor laagfrequent geluid in Nederland

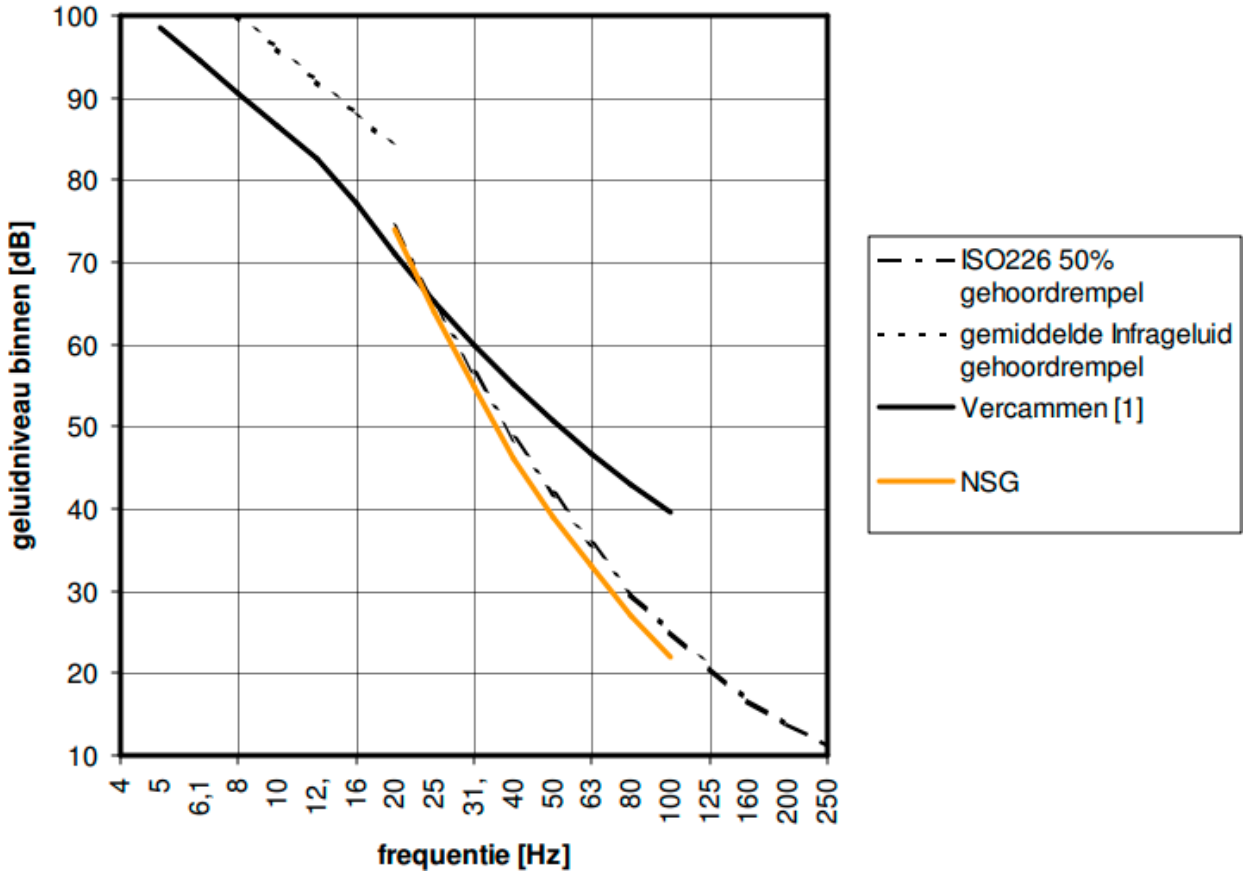
In Nederland zijn er geen normen specifiek gericht op geluid onder de 125 Hz. Voor geluid in het algemeen is de Wet geluidhinder (Wgh) in 1979 opgesteld. Deze wet moet de toename van geluidblootstelling beperken. Gemeenten kunnen voor specifieke situaties maatwerkvoorschriften of vergunningsvoorschriften voor LFG opstellen. In plaats van een landelijke norm zijn er richtlijnen voor LFG. Deze geven aan bij welke geluidsniveaus geluid van een bepaalde frequentie hoorbaar is. Het precieze frequentiebereik kan per richtlijn verschillen (White, van Kamp, & Welkers, 2020).

In Nederland zijn er 2 gangbare richtlijnen voor laagfrequent geluid: de richtlijn Laagfrequent geluid van de Nederlandse Stichting Geluidshinder (NSG, 1999) en de Vercammen-curve (Vercammen & Heringa, 1990) van Martijn Vercammen van adviesbureau Peutz. De NSG-richtlijn geeft de drempelwaardes weer waarbij 10% van 50- tot 60-jarigen het geluid kan horen. De richtlijn heeft een bereik van 20 tot 100 Hz en lijkt sterk op de ISO-226 richtlijn. De NSG-richtlijn is vooral bedoeld voor de afhandeling van klachten over LFG-geluidshinder door experts (Stichting LaagFrequentgeluid, sd). Geen van beiden is specifiek opgesteld voor luchtvaartgeluid.

De Vercammen-curve omvat ook infrasoon geluid en heeft een bereik van 0 tot 125 Hz. Voor het infrasone deel tot 20 Hz ligt de curve 10 dB onder de gemiddelde gehoordrempel voor infrasoon (96 dB_G). De inschatting van Vercammen is dat bij deze waarde slechts 3 tot 10% van de mensen deze tonen kunnen horen. Van 20 tot 125 Hz ligt de curve boven de gehoordrempel. Dit deel van de curve komt overeen met een geluidsniveau van 20 dB_A (Vercammen M. , 2006). De Vercammen-curve wordt vooral gebruikt om bouwplannen te toetsen aan grenswaarden (Stichting LaagFrequentgeluid, sd). Beide richtlijnen worden soms door de rechtbank gebruikt om uitspraak te doen over (hinder door) LFG (White, van Kamp, & Welkers, 2020). Figuur 8 laat de drempelwaardes van beide curves zien.

Beide richtlijnen laten zien dat lagere frequenties pas bij hogere geluidsniveaus hoorbaar zijn dan hogere frequenties. Met ander woorden: de meeste mensen horen laagfrequent geluid minder goed dan geluid met hogere frequenties. Infrasoon geluid wordt hoorbaar tussen de 70 en 100 dB, laagfrequent geluid – afhankelijk van de frequentie – tussen de 20 en 70 dB. De drempelwaarde waarbij een frequentie hoorbaar wordt verondersteld kan verder tot 20 dB uiteenlopen afhankelijk van de gehanteerde richtlijn.

Ten aanzien van trillingen is de SBR-richtlijn een belangrijk hulpmiddel. Deze richtlijn doet aanbevelingen voor het meten en beoordelen van trillingen en door trillingen veroorzaakte schade of hinder. De richtlijn wordt met name ingezet als onderdeel van de ruimtelijke ordening nabij spoorwegen of industrie (Rijkswaterstaat, 2022).



Figuur 8: LF geluidcriteria: Vercammen-curve en NSG-richtlijn (Vercammen M. , 2006)

4.2 Standaarden voor het meten of berekenen van laagfrequent geluid

Meten in de praktijk

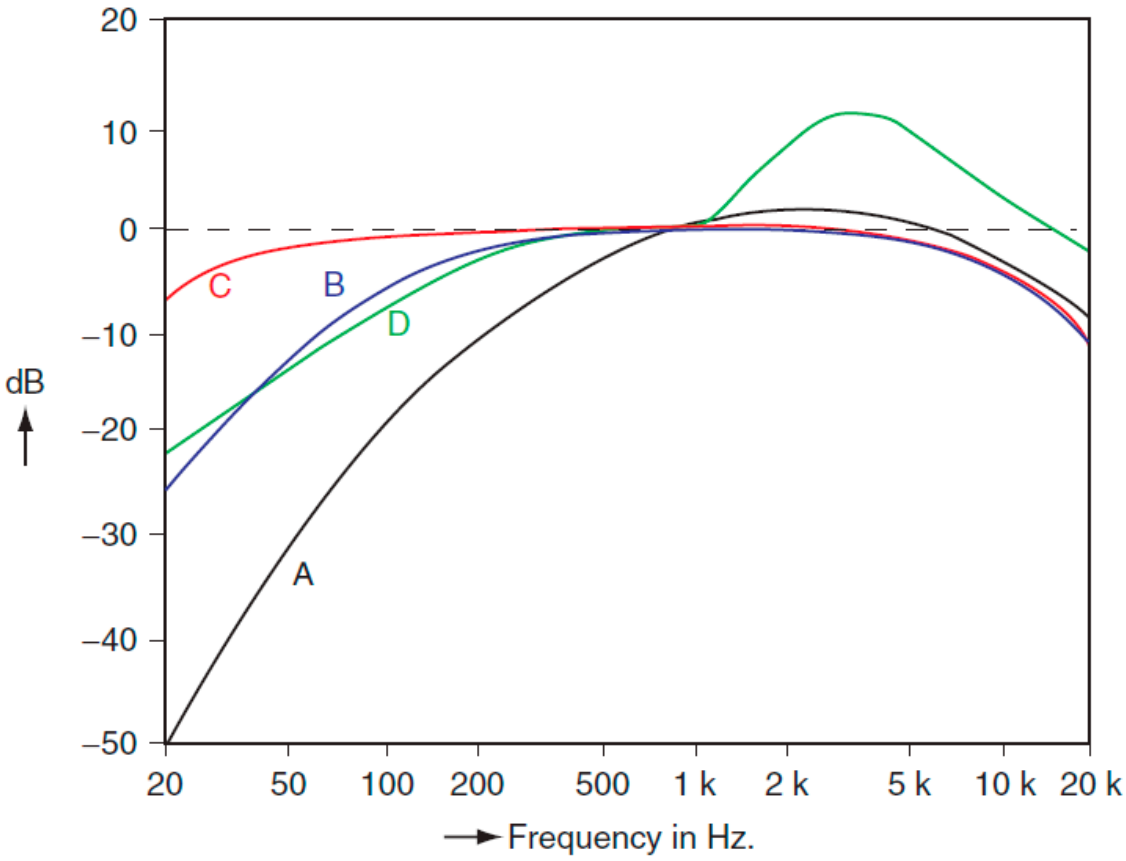
Het meten van laagfrequent geluid is lastig. De meeste meetapparatuur en meetstandaarden zijn niet specifiek gericht op laagfrequent geluid. LFG is vaak wel meetbaar, maar als de gemeten frequenties aan de randen van het meetbereik zitten is de nauwkeurigheid minder. Ook kan ruis in de apparatuur zelf de meting verstoren. Volgens het bouwbesluit worden geluidsmetingen bij woningen volgens de NEN5077 norm uitgevoerd; hierbij wordt standaard pas vanaf 100 Hz gemeten (White, van Kamp, & Welkers, 2020). Ook de 'Regeling geluidwerende voorzieningen militaire luchthavens 2015' gaat uit van NEN5077. De richtlijn van de NSG doet aanbevelingen specifiek voor het meten van laagfrequent geluid in woningen (NSG, 1999).

Frequentieweging

Ten tweede is er geen overeenstemming welke frequentieweging moet worden toegepast op de geluidsmeting. Het menselijk oor registreert niet alle frequenties even goed. Om beter aan te sluiten op de ervaren geluidshinder wordt er meestal een weging toegepast die goed hoorbare frequenties zwaarder laat wegen dan frequenties die minder hoorbaar zijn. De *European Noise Directive* schrijft een A-weging voor de bepaling van vliegtuiggeluid. Deze weging sluit aan bij het gemiddelde menselijke oor bij matige geluidsniveaus. Het menselijk oor registreert vooral geluid rond de 1000 Hz (niet toevallig de frequenties van spraak) en deze wegen dan ook het zwaarst mee. LFG wordt met een A-weging 'minder goed' gemeten. De meeste dosis-effect relaties die gebruikt worden voor de berekening van het

aantal ernstig gehinderden zijn op basis van A-gewogen geluid. De minder gebruikte C-weging geeft een beter beeld van de totale hoeveelheid geluid en deze weging neemt meer LFG mee in de meting. Echter, de C-weging sluit mogelijk minder goed aan bij de frequenties die wij als mensen kunnen waarnemen. Indien het verschil tussen het geluidsniveau met een A-weging en een C-weging meer dan 20 dB bedraagt, dan is dat een indicatie voor de aanwezigheid van LFG (White, van Kamp, & Welkers, 2020). Voor (infrasoon) geluid tot 40 Hz wordt soms de G-weging gebruikt welke zich enkel richt op zeer laagfrequent geluid. Onderzoek in 4 woningen rondom Schiphol wijst erop dat de A-weging de beste voorspeller is voor de ervaren hinder van LFG (binnenshuis) (Buikema & Vercammen, 2010).

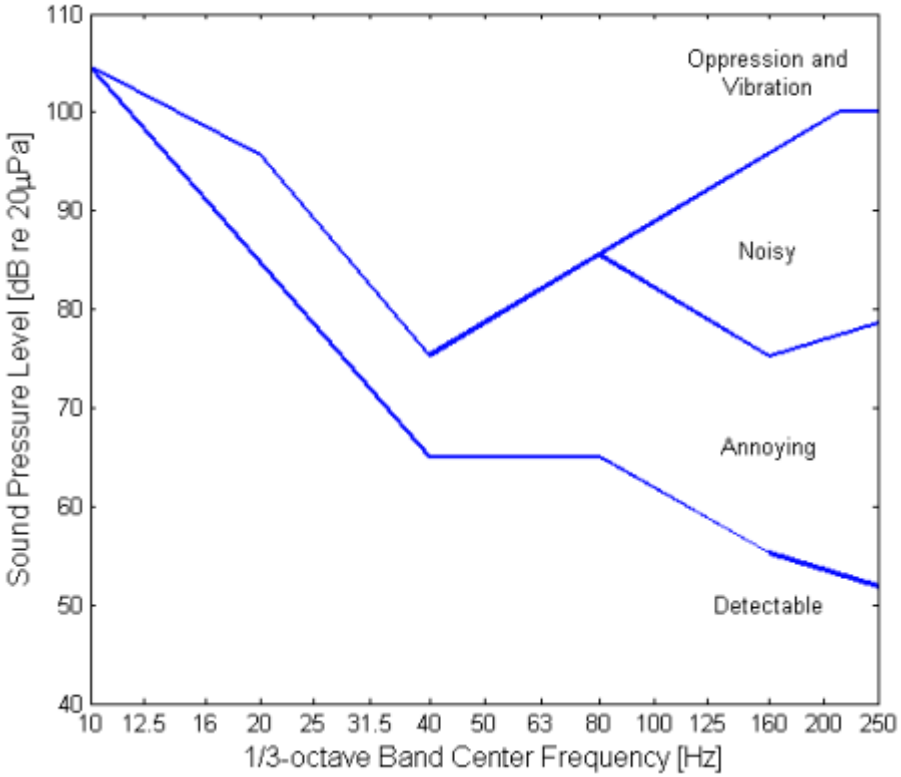
Figuur 9 geeft een overzicht van verschillende wegingen.



Figuur 9: Verschillende weegcurves voor het bepalen van geluidsbelasting (Jabben & Verheijen, 2012)

Hinderbepaling van LFG door NLR

De NSG en Vercammen richtlijn hebben betrekking op hoorbaarheid en hinder bij directe blootstelling aan LFG. Bij luchtvaartgeluid is de geluidsbelasting buitenshuis (gevelwaarde) leidend voor de handhaving. Om de hinder binnenshuis te bepalen, gebruikt NLR daarom de Wyle-curve om geluidsniveaus buitenshuis te correleren aan geluidshinder binnenshuis. Hierbij wordt gebruik gemaakt van hindercriteria van Tokita en Nakamura (1981), zie Figuur 10.



Figuur 10: LF geluidcriteria Tokita en Nakamura

4.3 Nederlandse regelgeving ten aanzien van grondgeluid en grondgebonden geluid

Doc29 voor grondgeluid

Voor Schiphol worden de geluidberekeningen uitgevoerd volgens het ECAC Doc.29 voorschrift. Dit is een voorschrift dat in Europa ontwikkeld wordt, waarbij gebruik wordt gemaakt van de laatste inzichten met betrekking tot het modelleren van vliegtuiggeluid rondom vliegvelden. Bij deze berekeningen is gewerkt met een rekenmodel op basis van de meest recente editie van Doc.29 en zijn invoergegevens vastgesteld volgens de huidige inzichten en in een aantal gevallen zelfs gedetailleerder dan volgens de huidige inzichten nodig is (ECAC, 2016).

Per Doc29 wordt de gemiddelde geluidsbelasting tussen de 20 Hz en 20 kHz bepaald met een L_{DEN}-waarde in combinatie met een A-weging. De berekening richt zich op geluid vanaf het begin van de startrol (met *instant thrust*). Geluid van taxiën wordt beschouwd als verwaarloosbaar (ten opzichte van het overige geluid). Ten aanzien van grondgeluid valt het opstijgen dus wel onder de geluidsberekening, maar de voorafgaande taxibeweging niet. Al in 2001 werd voor Schiphol geconcludeerd dat taxigeluid (in vergelijking tot overig vliegtuiggeluid) verwaarloosbaar is (Peutz, 2001). Deze conclusie is gebaseerd berekeningen volgens de standaard “Handleiding meten en rekenen industrielawaai” en is op basis van een scenario met 517.000 vliegtuigbewegingen. De vliegtuigen die destijds de grootste overlast van grondgeluid veroorzaakten (o.a. MD11), zijn inmiddels grotendeels uitgefaseerd.

Grondgebonden geluid

Het grondgebonden geluid van proefdraaien is onderdeel van de milieuvergunning van de luchthaven. Hierin staat onder andere waar en wanneer het proefdraaien mag plaatsvinden. Ander grondgebonden geluid wordt verwaarloosbaar geacht. In tegenstelling tot de vergunning voor lucht-gebonden activiteiten wordt de

milieuvergunning voor grondgebonden activiteiten afgegeven door de lokale overheid. Hierbij geldt dat de vergunning moet passen binnen het ruimtelijk plan van de Provincie. Wanneer vermoed wordt dat de activiteiten in strijd zijn met de Wet Natuurbescherming dan kan dat met een Passende Beoordeling getoetst worden.

Vliegtuiggeluid in het bouwbesluit

In het bouwbesluit staan normen voor de bescherming tegen geluid van buiten, inclusief vliegtuiggeluid. Deze normen gelden voor nieuwbouw, verbouwingen en tijdelijke bouw. Ten aanzien van 'luchtvaartlawaai' staan minimale geluidsweringswaardes opgenomen voor woningen binnen de 35-Ke- of 56-dB_A-L_{DEN}-contour. De de geluidswering wordt bepaald volgens de NEN5077 norm (zie ook 4.2) (Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2022).

4.4 Grenswaarden voor laagfrequent geluid in het buitenland

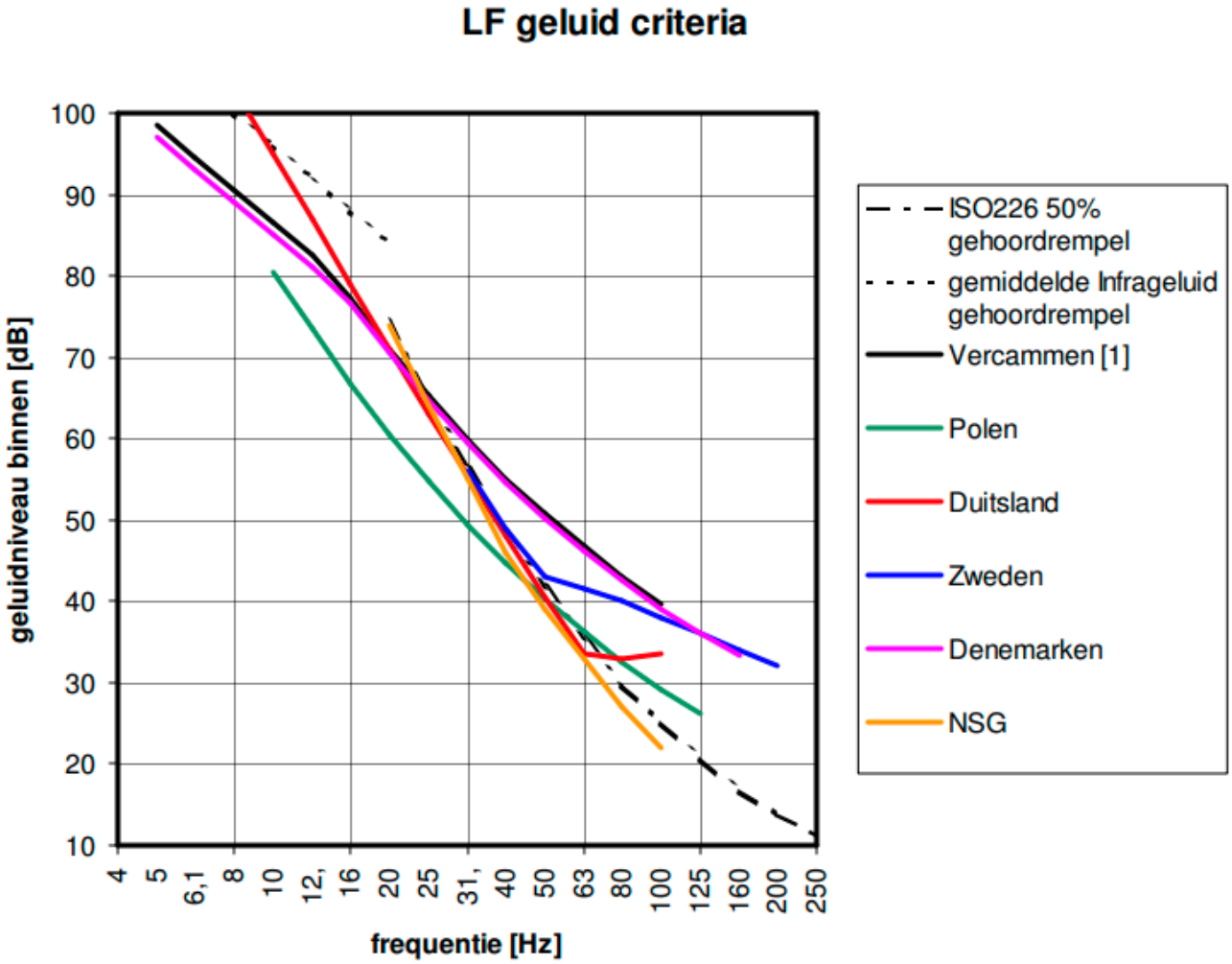
In Europa hanteren Zweden, Denemarken, Duitsland en Polen grenswaarden specifiek gericht op infrasoon en LFG. Vercammen vergelijkt in meerdere publicaties deze grenswaarden met de in Nederland gangbare richtlijnen (Vercammen M. , Criteria for low frequency noise, 2007; Buikema E. , Vercammen, van der Ploeg, Granneman, & Voos, 2010; Vercammen & Heringa, Laagfrequent geluid; Grenswaarden, overdracht en meten, 1990). De grenswaarden zijn algemeen en niet specifiek bedoeld voor luchtvaartgeluid. Hieronder volgt een samenvatting van de verschillende grenswaarden. Figuur 11 geeft een grafisch overzicht.

Zweden heeft criteria voor LFG tussen de 31 en 200 Hz. Criteria voor (infra)geluid onder de 31 Hz ontbreken. Van 31 tot 50 Hz volgt het geluidscriterium van de gemiddelde gehoordrempel, gelijk aan de NSG-richtlijn. Tussen de 100 en 200 Hz volgt de norm een 20 dB_A-lijn. De twee gebieden worden met een recht lijn verbonden.

Denemarken heeft criteria voor infrasoon en LFG van 0 tot 150 Hz. Hierbij volgt het Vercammen's aanbevelingen voor LFG limieten (Vercammen M. , Setting limits for low frequency noise, 1989) vrijwel tot de letter. Voor infrasoon geluid is het uitgangspunt dat het niet hoorbaar mag zijn. Hiervoor is gekozen voor een limiet van 85 dB bij 10 Hz met een hellingshoek van 12 dB per octaaf. Dit komt overeen met een G-gewogen 85 dB en is naar verwachting voor 5 tot 10% van de bevolking hoorbaar. Voor geluid boven de 20 Hz kan niet meer gesteld worden dat hoorbaar geluid automatisch hinderlijk is, daarom is voor de nacht gekozen voor een lijn die overeenkomt met een A-gewogen 20 dB. Overdag ligt de limiet voor geluid tussen de 20 en 150 Hz op 25 dB.

Duitsland heeft criteria voor infrasoon en LFG van 8 tot 100 Hz met enkele aanvullende voorwaarden. Zo hebben de criteria enkel betrekking op tonaal geluid (de betreffende tertsband moet minimaal 5 dB boven de aanpalende tertsbanden liggen) en het verschil in A-gewogen en C-gewogen dB bedraagt minimaal 20 dB (zie ook 4.2). Is dit het geval dan mag het geluid tot 61 Hz maximaal 5 dB boven de gemiddelde gehoordrempel liggen. Voor 80 en 100 Hz is dit respectievelijk 10 en 15 dB boven de gemiddelde gehoordrempel. Voor de nacht gaan alle criteria 5 dB omlaag.

Polen heeft criteria voor infrasoon en LFG van 10 tot 125 Hz. Voor geluid 10 dB boven het achtergrondniveau geldt een maximum overeenkomstig met 10 dB_A.



Figuur 11: LFG criteria in verschillende landen (Vercammen M. , Criteria for low frequency noise, 2007)

5 Conclusies

Dit rapport geeft een overzicht van maatregelen tegen geluidshinder van laagfrequent grondgeluid en grondgebonden geluid. Vervolgens is op basis van publieke bronnen en *expert judgement* per groep van maatregelen een kwalitatieve inschatting gemaakt van effect, haalbaarheid en kosten. Ten slotte zijn er aanbevelingen gedaan over ontwikkelingen en technologieën die veel potentie om hinder van grondgeluid en grondgebonden geluid te verminderen, maar nog meer ontwikkeling nodig hebben voordat deze ingezet kunnen worden.

De definities van grondgeluid, grondgebonden geluid en laagfrequent geluid (LFG) liggen niet vast. Voor deze studie zijn deze termen daarom werkdefinities opgesteld (zie 2.1): grondgeluid is geluid van bewegende vliegtuigen op de grond, grondgebonden geluid omvat ander luchtvaartgeluid op de luchthaven. Met laagfrequent wordt het frequentiegebied tussen de 20 en 150 Hz bedoeld tenzij anders aangegeven. De studie bespreekt waar relevant ook infrasoon geluid tussen de 0 en 20 Hz. Deze studie richt zich op maatregelen tegen hinder van laagfrequent grondgeluid en laagfrequent grondgebonden geluid.

Volgens een inventarisatie van het RIVM ervaart circa 8% van de Nederlanders minstens enige vorm van hinder door LFG (van Poll, Breugelmans, Houthuijs, & van Kamp, 2018). Op basis van meldingen van GGD-en in Nederland ervaart 2% van de Nederlanders hinder van LFG of bromtonen. Meldingen over LFG nemen toe, zowel in absolute zin als in vergelijking tot andere vormen van hinder. De melders noemen als bron van het LFG de buren, verkeer (lucht/weg/rail) en bedrijven, maar vaak is de bron onbekend of niet ingevuld (Dusseldorp & al., 2019).

De literatuurstudie heeft 27 maatregelen gerelateerd aan hinder van grondgeluid en grondgebonden geluid opgehaald. Hiervan vallen 16 maatregelen binnen de afbakening zoals hierboven besproken. Deze worden in H3 en appendices A tot en met C beoordeeld op effect, haalbaarheid en kosten (zie 2.5 voor de methodiek). Het beoordelen van de maatregelen bleek zeer lastig zonder kennis van context. Ook was er vaak weinig wetenschappelijke onderbouwing voor de effectiviteit van maatregelen te vinden. Informatie over kosten of haalbaarheid ontbreekt ook veelal. In algemene zin kan gesteld worden dat maatregelen (na)bij de geluidsbron het meest effectief zijn ter bestrijding van hinder van LFG. Dichtbij de ontvanger is hinder van LFG moeilijker te bestrijden in vergelijking tot geluidshinder van middel- tot hoogfrequent geluid: hetzij door de vereiste afmetingen van een geluidsscherm, hetzij door de vereiste massa van isolatiemateriaal in een woning. Voor maatregelen in transitie tussen bron en ontvanger is vooral veel ruimte nodig. Deze is lang niet altijd voorhanden.

In Nederland zijn geen normen specifiek gericht op LFG (zie hoofdstuk 4). Geluidshinder wordt vastgesteld aan de hand van een berekende geluidsbelasting. Voor woningen is het Bouwbesluit leidend, hierbij wordt geluid gemeten volgens de NEN5077 (vanaf 100 Hz). De geluidsbelasting komend van luchthavens wordt berekend volgens de Doc29 methodiek. Laagfrequent grondgeluid van opstijgende vliegtuigen worden hierbij meegenomen vanaf 20 Hz. Hinder van taxiënde vliegtuigen en overig grondgebonden geluid wordt verwaarloosbaar geacht. In onder andere Zweden, Denemarken, Duitsland en Polen gelden wel specifieke normen ten aanzien van infrasoon en LFG (zie 4.4). Partijen als adviesbureau Peutz pleiten al langer om deze ook in Nederland in te voeren. Hierbij wordt gedacht aan grenswaarden van 86 dB_G voor infrasoongeluid tussen 0 en 20 Hz en 20 dB_A voor LFG van 20 tot 125 Hz; vergelijkbaar met de norm in Denemarken.

6 Aanbevelingen innovatiebeleid

In tegenstelling tot hinder en slaapverstoring door ‘gewoon’ geluid is op basis van de literatuur onduidelijk wat het aandeel luchtvaart is voor LFG-hinder. De onduidelijkheid over welke geluidsbron verantwoordelijk is voor de ervaren LFG hinder maakt dat reductiemaatregelen bij een bekende bron van LFG niet automatisch leiden tot een evenredige vermindering van LFG-hinder. Met andere woorden: je kunt LFG geluid van vliegtuigen aanpakken, maar als vliegtuiggeluid niet de bron van de LFG hinder blijkt te zijn dan neemt de ervaren hinder niet af. Innovatiebeleid zou zich daarom kunnen richten op het beter in kaart brengen van de omvang van het probleem en de belangrijkste bronnen met behulp van omgevingsonderzoek op locaties met de meeste LFG-meldingen. Voor gebieden nabij luchthavens kan aan de hand van vertrektijden en een inventarisatie van het type bodem, afwatering, bebouwing en meteogegevens een statistisch model worden opgesteld waarmee de verwachting van laagfrequente geluidshinder kan worden berekend. Op basis van dit model kan gerichter opgetreden worden tegen hinder door LFG.

Uit de inventarisatie blijkt dat de (wetenschappelijke) onderbouwing van het effect, haalbaarheid en kosten van een maatregel tegen LFG-hinder vaak beperkt is. Sommige maatregelen zoals grondabsorptie zijn zelfs nooit in de praktijk onderzocht. Ook vereisen LFG-maatregelen bij uitstek maatwerk; een veralgemenisering voor alle locaties en situaties is meestal niet te maken. Als onderdeel van een innovatieagenda zou er daarom op locaties met veel LFG-hinder geëxperimenteerd kunnen worden met voor die locatie interessante veelbelovende maatregelen om zo proefondervindelijk het effect vast te stellen. Dit in proportie tot de ernst van de hinder en de frequentie (hier als in aantal) waarin deze voorkomt. Tenslotte dient bij aanvang van het onderzoek een budget voor de maatregelen vastgesteld te worden, zodat er voldoend budget beschikbaar is om ingrepen op realistische en bruikbare schaal te implementeren. Tabel 9 geeft een overzicht van potentieel interessante maatregelen om te verkennen.

Tabel 9: Mogelijk te verkennen maatregelen in Innovatieagenda

Bij bron

- Achter de startdrempel van de baan opklapbare *blast deflectors*
- Geluidsdemper op APU plaatsen (Honeywell)
- Waterinjectie bij proefdraaien

Overdracht tussen bron en ontvanger

- Geluidsabsorptie door absorberende bodem
- Onderzoek naar bodemtypen en impact bebouwing

Nabij ontvanger

- Bebouwing in verzonken gebied
- Hoogbouw
- Afscherming nabij woning
- Absorptie nabij woning
- Ontwerp situering en oriëntatie woningen (locatie tov bron en bepalende windrichting)
- Woningen niet loodrecht op de richting waar het geluid vandaan komt (minimale impact, maximale reflectie)
- Woningen met zwaardere gevels, daken
- Vorm van kamers in woning waarbij de nagalmtijd minimaal is voor de lagere frequenties

Omdat de hinder in belangrijke mate binnenshuis plaatsvindt en LFG sterk interacteert met de constructie van een gebouw zou er meer aandacht besteed kunnen worden aan de eigenschappen van woon en werkruimtes ten aanzien van LFG. Denk aan de impact houten of betonnen constructies, hoog- of laagbouw, afmetingen en indelingen van verblijfsruimtes en de gebruikte materialen voor daken op hinder van LFG binnenshuis. Wellicht kan de opzet van het eerder uitgevoerde NLR onderzoek naar hinder door *rattle* geluid van helikopters gebruikt worden om te verkennen

welke factoren bepalend zijn voor LFG hinder binnenshuis en welke maatregelen voor welke type woningen geschikt zijn.

In Nederland zijn geen normen specifiek gericht op LFG. In enkele andere Europese landen zijn deze er wel, zij het niet specifiek gericht op luchtvaartgeluid. Door adviesbureau Peutz wordt met name de Deense norm aanbevolen. Om te onderzoeken of de Deense of andere genoemde normen geschikt is om hinder van LFG van luchtvaartbronnen te verminderen zou contact gezocht kunnen worden met de Deense autoriteiten en partijen uit de Deense luchtvaartsector om te vragen naar hun ervaringen. Ook kan een vergelijking gemaakt worden met de gerapporteerde hinder in Nederland en die in Denemarken relatief aan het aantal bewegingen en de geluidscontouren rondom grote luchthavens.

Momenteel valt infrasoon vliegtuiggeluid van 0 tot 20 Hz buiten de scope van de Doc29 methodiek om de geluidsbelasting rond luchthavens te bepalen. Het kan nader onderzocht worden of dit een significante bijdrage levert aan de ervaren hinder rondom luchthavens. Voorwaarde hiervoor is dat beter bekend wat de bronnen zijn die LFG-hinder veroorzaken.

7 Referenties

Adecs Airinfra. (2009). *Milieueffectrapport Lelystad Airport. Hoofdrapport Ontwikkeling Lelystad Airport.* Adecs Airinfra BV; Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR); Bureau Waardenburg BV; Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO) Bouw en Ondergrond; RIGO. Delft, Nederland: Adecs Airinfra BV.

Bastos, L., Deschamps, C., & da Silva, A. (2017, December 1). Experimental investigation of the far-field noise due to jet-surface interaction combined with a chevron nozzle. *Applied Acoustics, 127*, 240-249. doi:10.1016/j.apacoust.2017.06.008

Bergmans, D., & Veerbeek, H. (2011a). *Grondgeluid Badhoevedorp, Amsterdam-West, Zuideramstel - Een inventarisatie op basis van metingen.* Amsterdam, Nederland: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR).

Bergmans, D., & Veerbeek, H. (2011b). *Grondgeluid Badhoevedorp en Amsterdam-West - Een inventarisatie op basis van metingen.* Amsterdam, Nederland: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR).

Bergmans, D., & Veerbeek, H. (2013). *Grondgeluid Badhoevedorp - Een quick scan met in achtneming van de verlegging van de rijksweg A9.* Amsterdam, Nederland: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR).

Boeing. (2005, december). *A Boeing-led team is working to make quiet jetliners even quieter*. Opgehaald van Boeing Frontiers: https://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2005/december/ts_sf07.html

Bosschaart, C. (2012). LF airport ground noise mitigation using scattering sect. *9th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2012.* Praag, Tsjechië.

Bosschaart, C., Eisses, A., & van der Eerden, F. (2010). A barrier for low frequency noise from starting aircraft: comparison between numerical and scale model results. *INTER-NOISE.* Lissabon, Portugal: TNO Science & Industry.

Buikema, E., & Vercammen, M. (2010, Juni). Gebulder op de grond. *Geluid*, pp. 15-19.

Buikema, E., Vercammen, M., van der Ploeg, F., Granneman, J., & Voos, J. (2010). Development of a rating procedure for low frequency noise: results of measurements near runways. *INTER-NOISE 2010.* Lissbon, Portugal: Peutz & TNO Human Factors.

Campmans, T. (2017). *Laagfrequent geluid - orienterende studie naar de ontwikkeling van laagfrequent geluid in Nederland.* Nieuwegein, Nederland: LBP Sight.

DeNoize. (n.d.). *Product*. Retrieved april 22, 2022, from https://denoize.com/product/

DeNoize testing window technology to reduce noise nuisance in homes. (2021, November 11). Retrieved from Website van DeNoize: https://denoize.com/denoize-testing-window-technology-to-reduce-noise-nuisance-in-homes/

Derei, J., Hogenhuis, R., Hoolhorst, A., Veerbeek, H., & Speijker, L. (2018). *Kennis ten behoeve van de Luchtvaartnota.* Amsterdam: NLR.

Dusseldorp, & al., e. (2019). *Meldingen van milieugerelateerde gezondheidsklachten bij GGD'en.* RIVM.

EASA. (2021, november 24). *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25.* Opgehaald van CS-25 Amendment 27: https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-25-amendment-27

EC. (2021, juli 14). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council. *COM/2021/559 final*. Brussel, België: Europese Commissie. Opgehaald van https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52021PC0559

ECAC. (2016). *ECAC.CEAC Doc29 - 4th edition volume I.* Neuilly-sur-Seine Cedex, Frankrijk: European Civil Aviation Conference.

Esposito, M., Manna, L., Natale, F., Carotenuto, C., & Lancia, A. (2016). Wet Electrostatic Scrubber For Gas Pollutants Emission Control. *XXXIX Meeting of the Italian Section of the Combustion Institute* (p. IV9). Combustion Institute. Opgehaald van http://www.combustion-institute.it/proceedings/XXXIX-ASICI/papers/39proci2016.IV9.pdf

Germain, P. (2000). *Active Control of Run-Up Noise from Propeller Aircraft.* University of British Columbia.

Glas in Beeld. (2021, december 7). *DeNoize blij met resultaten pilot tegentrillend glas* . Retrieved from https://www.glasinbeeld.nl/21358/denoize-blij-met-resultaten-pilot-tegentrillend-glas/

Hak, M., Hogenhuis, R., Veerbeek, H., Sutopo, K., Roosien, R., van Es, G., & Ohlenforst, B. (2020). *Stiller en schoner Maastricht Aachen Airport.* Amsterdam, Nederland: NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum.

Heblij, S., & Derei, J. (2019). *Methodenrapport Doc.29.* Amsterdam, Nederland: NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum.

IenW. (2020). *Nota van Antwoord - Luchtvaartnota 2020-2050.* Den Haag, Nederland: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

IenW. (2020). *Verantwoord vliegen naar 2050 - Luchtvaartnota 2020-2050.* Den Haag, Nederland: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Jabben, J., & Verheijen, E. (2012). Options for Assessment and Regulation of Low Frequency Noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 225-238.

Jopson, I., Jones, C., Porter, N., & White, S. (1998). *Night-Time Ground Noise.* Norwich, Verenigd Koninkrijk: CAA UK.

Kamigawara, K., Yue, J., Saito, T., & Hirano, T. (2004). *Handbook to deal with low frequency noise.* Tokio, Japan: INCE Japan.

Kingsley-Jones, M. (2006, januari 17). *Second chance - the A350.* Opgehaald van Flight Global: https://www.flightglobal.com/second-chance-the-a350/64974.article

Leylekian, L., Lebrun, M., & Lempereur, P. (2014, June). An Overview of Aircraft Noise Reduction Technologies. *Journal Aerospace Lab*(7), 1-15.

Li, X. (2020). Experimental Investigation of Jet Flow Fields with Chevron Nozzles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (p. 042010). IOPScience.

Loheac, P., Julliard, J., & Dravet, A. (2014). CFM56 Jet Noise Reduction with the Chevron Nozzle. *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (p. 3044). Manchester, Verenigd Koninkrijk: Aerospace Research Central. doi:10.2514/6.2004-3044

LVNL. (2021, december 16). *EHAM — AMSTERDAM/SCHIPHOL*. Opgeroepen op april 13, 2022, van Aeronautical Information Publication: https://www.lvnl.nl/eaip/2021-12-16-AIRAC/html/eAIP/EH-AD-2.EHAM-en-GB.html

McKay, A., Davis, I., Killeen, J., & Bennett, G. (2020). SeMSA: a compact super absorber optimised for broadband, low-frequency noise attenuation. *Scientific Reports, 10*, 17967. doi:10.1038/s41598-020-73933-0

MinDef. (2021, september 8). *Chinook vliegt voorbereidingsvluchten om 'rattle noise' te meten.* Retrieved from Website van Ministerie van Defensie: https://www.defensie.nl/actueel/nieuws/2021/09/08/chinooks-vliegen-voorbereidingsvluchten-om-rattle-noise-te-meten

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2022, Februari 2). *Afdeling 3.1 Bescherming tegen geluid van buiten, nieuwbouw.* Retrieved from Online Bouwbesluit: https://www.onlinebouwbesluit.nl/?v=34

Monster, N. (2013). Ribbels beheersen grondgeluid bij Schiphol. *Land+Water*(12), 36-38.

Montgomery, S. (2005, December). Engine noise reduction programme. Making aircraft engines better neighbours. *FAST*, 19-22.

Nakamura, S., & Tokita, Y. (1981). Frequency Characteristics of Subjective Responses to Low Frequency. *International Conference on Noise Control Engineering* (pp. 735-738). Delft, Nederland: Nederlands Akoetisch Genootschap.

Nakashima, A. (2003). *Active Control of Propeller Aircraft Run-up Noise.* University of British Columbia.

NLR. (2010, februari 25). *Waterinjectie maakt F-16 op de grond stiller*. Opgehaald van https://www.nlr.nl/nieuws/waterinjectie-maakt-f-16-op-de-grond-stiller/

NSG. (1999). *NSG-RICHTLIJN LAAGFREQUENT GELUID.* Delft, Nederland: Nederlandse Stichting Geluidshinder.

Peerlings, B., Beintema, J., & van Veen, T. (2021). *Hinder door grondgeluid bij Schuilhoeve.* Amsterdam, Nederland: NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum.

Peutz. (2001). *Geluid vanwege het taxien van vliegtuigen op de Luchthaven Schiphol (ML447-1).* Zoetermeer: Peutz.

Rijkswaterstaat. (2022, January 20). *Beleid, wet- en regelgeving - Trillingen.* Retrieved from Kenniscenbrum InfoMil: https://www.infomil.nl/onderwerpen/ruimte/omgevingsthema/trillingen/tril-beleid-w/

Saiyed, N., Mikkelsen, K., & Bridges, J. (2000). *Acoustics and thrust of separate-flow exhaust nozzles with mixing devices for high-bypass-ratio engines.* NASA. Opgehaald van https://ntrs.nasa.gov/citations/20000083968

Schiphol & LVNL. (2021, April). *Geluidsribbels bij de Polderbaan*. Opgeroepen op april 21, 2022, van Minder hinder Schiphol: https://minderhinderschiphol.nl/maatregelen/gerealiseerd/geluidsribbels-bij-de-polderbaan/

Schiphol & LVNL. (sd). *Stiller remmen 's nachts*. Opgeroepen op april 12, 2022, van Minder hinder Schiphol: https://minderhinderschiphol.nl/maatregelen/gerealiseerd/stiller-remmen-s-nachts/

Schiphol & LVNL. (sd). *Verminderen grondgeluid in Hoofddorp-Noord*. Opgeroepen op april 22, 2022, van Minder hinder Schiphol: https://minderhinderschiphol.nl/maatregelen/in-behandeling/verminderen-grondgeluid-in-hoofddorp-noord/

Schiphol. (2021, oktober 25). *Luchtvaartsector presenteert stappenplan om duurzaam taxiën te realiseren*. Opgeroepen op april 13, 2022, van Newsroom: https://nieuws.schiphol.nl/luchtvaartsector-presenteert-stappenplan-om-duurzaam-taxien-te-realiseren/

Schiphol. (2022). *Ultrafijnstof vernevelen: wat levert het op?* Opgehaald van Blog: https://www.schiphol.nl/nl/schiphol-group/blog/ultrafijnstof-vernevelen-wat-levert-het-op/

Schiphol. (sd). *Landschapsontwerp tegen geluidsoverlast: Geluidsribbels weerkaatsen vliegtuiggeluid*. Opgeroepen op April 21, 2022, van https://www.schiphol.nl/nl/schiphol-als-buur/pagina/landschapsontwerp-tegen-geluidsoverlast/

Sharp, B., Beeks, T., & Veerbeek, H. (2006). *Groundnoise Polderbaan - Overview of Results.* El Segundo, CA, Verenigde Staten: Wyle Laboratories.

SKYbrary. (2021). *Reduced Thrust Takeoff*. Opgeroepen op april 13, 2022, van SKYbrary Aviation Safety: https://skybrary.aero/articles/reduced-thrust-takeoff

Stichting LaagFrequentgeluid. (sd). *Wet- en regelgeving*. Opgehaald van Stichting LaagFrequentgeluid: https://www.laagfrequentgeluid.nl/wet-regelgeving/

TNO. (2014). *Laag frequent geluid: van bron naar ontvanger.* Den Haag, Nederland: TNO.

van der Berg, F. (2020, juli 7). *Herrie van vliegtuigen en auto's al bij ramen weren*. Opgeroepen op april 22, 2022, van Noordhollands Dagblad: https://www.noordhollandsdagblad.nl/cnt/dmf20200707_58660918

van der Eerden, F., Salomons, E., & Beeks, T. (2007). Mitigation of low-frequency groundnoise from runways. *INTER-NOISE 2007.* Istanbul, Turkije: TNO, Industry & Science.

van der Sman, E., Peerlings, B., Kos, J., Lieshout, R., & Boonekamp, T. (2021). *Destination 2050: A Route To Net Zero European Aviation.* Amsterdam, the Netherlands: Royal Netherlands Aerospace Centre - NLR.

Van Poll, R., & Simon, S. (2021). *Ernstige hinder en slaapverstoring in Nederland – Onderzoek Beleving Woonomgeving 2020.* Bilthoven, Nederland: RIVM.

van Poll, R., Breugelmans, O., Houthuijs, D., & van Kamp, I. (2018). *Beleving woonomgeving in Nederland - Inventarisatie verstoringen 2016.* Bilthoven, Nederland: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

Veen, V., Heblij, Janssen, & Kaptein. (2015). *Een onderzoek naar de rol van rattle noise bij hinder door helikoptergeluid.* Amsterdam, Nederland: NLR&TNO.

Veerbeek, H., Hak, M., Hoolhorst, A., van der Sman, E., Roosien, R., & Middel, J. (2019). *Proefcasus Eindhoven Airport.* Amsterdam, Nederland: NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum.

Vercammen, M. (1989). Setting limits for low frequency noise. *Journal of low frequency noise, vibration and active control - Volume 8, issue 4*, 105-109.

Vercammen, M. (2006). *Hinderlijkheid van laagfrequent geluid.* Opgehaald van Nederlandse Stichting Geluidshinder (NSG): https://nsg.nl/file/58/MVercammen.PDF

Vercammen, M. (2007). Criteria for low frequency noise. *19th International Congres on Acoustics.* Madrid: SEA Acustica.

Vercammen, M., & Heringa, P. (1990). *Laagfrequent geluid; Grenswaarden, overdracht en meten.* Mook, Nederland: Peutz Consultants.

Waye, K. P., & al, e. (2021). *PÅVERKAN PÅ BULLER, BULLERSTÖRNING OCH HÄLSA BLAND BOENDE FÖRE OCH EFTER INFÖRANDEAV ELEKTRIFIERAD BUSSTRAFIK.* Goteburg, Zweden: Universiteit van Goteburg. Retrieved from https://www.greencarcongress.com/2022/05/20220502-gothenburg.html

White, K., van Kamp, I., & Welkers, D. (2020). *Factsheet Laagfrequent Geluid.* Bilthoven, Nederland: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

WUR. (sd). *Olifantsgras - Miscanthus*. Opgeroepen op april 21, 2022, van https://www.wur.nl/nl/Dossiers/dossier/Olifantsgras-Miscanthus.htm

Zmarrou, Janssen, Koopman, Veen, V., & Hof, V. '. (2013). *Literatuurstudie "rattle noise" van helikopters.* TNO&NLR.

Appendix A Maatregelen bij de bron

In geraadpleegde literatuur zijn verschillende specifieke maatregelen besproken of nader onderzocht.

Technische aanpassingen aan de bron

Toepassing van 'chevrons' op de motorkern en/of -nacelle

G2 / G3: **G2 + G3** Geluidsbron: **Vliegtuig**

Onder andere de Boeing 787 en 737 MAX zijn uitgevoerd met zogenaamde 'chevrons' op de motor. Dit zijn gekartelde randen aan de achterkant van de motorkern of de achterkant van de nacelle, bedoeld om geluidproductie te verlagen.

Chevrons op de kern zijn bedoeld om (ook laagfrequent, Bastos, Deschamps, & da Silva, 2017; Saiyed, Mikkelsen, & Bridges, 2000) startgeluid te verminderen; die op de nacelle werken vooral tijdens de kruisvlucht (Leylekian, Lebrun, & Lempereur, 2014).

De hoeveelheid geluidreductie in decibellen varieert, onder andere van de exacte vorm, de geleverde stuwkracht en de positie van de waarnemer (Loheac, Julliard, & Dravet, 2014; Li, 2020). Ook installatie-effecten spelen een rol (Loheac, Julliard, & Dravet, 2014). Chevrons zijn eerder toegepast om naleving van geluidseisen te realiseren (Leylekian, Lebrun, & Lempereur, 2014). Dat impliceert dat de effecten breder zijn dan alleen het terugdringen van grondgeluid. Met name chevrons op de *nacelle* zorgen voor een toename in gewicht en weerstand. Dat resulteert in een hoger brandstofverbruik, motoremissies en aanverwante kosten.

Hoewel sommige recent geïntroduceerde toestellen van chevrons zijn voorzien, geldt dat niet voor allemaal (Kingsley-Jones, 2006). Voor zover bekend bij de auteurs zijn chevrons niet als retrofit beschikbaar, maar op de A320 leverde Airbus ze als optie (Montgomery, 2005).

Operationele aanpassingen

Gereduceerd startvermogen

G2 / G3: **G2** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens start**

Wanneer vliegtuigen aan hun start beginnen en vol gas geven, wordt grondgeluid geproduceerd. Het is duidelijk herkenbaar als een laagfrequente 'rommel' en is hoorbaar, of zelfs voelbaar, tot op meerdere kilometers van de baan (Peerlings, Beintema, & van Veen, 2021).

Als de omstandigheden (zoals baanlengte) het toelaten, kan een reductie van het startvermogen ook de productie van laagfrequent grondgeluid verlagen. Brandstofverbruik, andere emissies en brandstof- en onderhoudskosten nemen eveneens af (SKYbrary, 2021). Omdat het toestel trager accelereert, wordt de startrol verlengd en neemt de klimsnelheid af. De langere startrol betekent ook een langere duratie van het grondgeluid, hoewel niveaus dus lager liggen.

Het feit dat in ieder geval op Schiphol "lang niet altijd [wordt] gestart met behulp van het maximaal beschikbare motorvermogen" (Heblij & Derei, 2019, p. 26), laat zien dat vertrekken met gereduceerd startvermogen technisch en operationeel haalbaar is, en het op medewerking van betrokkenen kan rekenen. Aan de andere kant betekent de (gedeeltelijke) toepassing van de maatregel ook dat het resterende reductiepotentieel kleiner is.

Gewijzigde startpositie of rollende start

G2 / G3: **G2** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens start**

Naast het reduceren van startvermogen (eerder in deze sectie) of het verplaatsen van de startbaan (verderop), kan de startpositie worden verlegd naar een positie verder weg van een geluidgevoelig gebied (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Dat vereist wel dat de beschikbare en benodigde baanlengte zo'n verschoven startpunt toestaan. Omdat de afstand waarover het startpunt verplaatst kan worden relatief beperkt is (ordegrootte: honderden meters), is het effect echter beperkt. Het feit dat de geluidproductie directioneel is (en de propagatie van laagfrequent geluid wordt beïnvloed door wind) reduceert de mogelijke effecten verder (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006).

Ook bij een rollende start, waarbij pas op een later moment in de startprocedure het volledige startvermogen wordt aangesproken, verplaatst het gros van de geluidproductie naar een ander punt op de baan. Onderzoek bij de Polderbaan heeft laten zien de geluidbelasting in nabijgelegen gemeenschappen hierdoor iets verlaagde, maar een statistisch significant effect kon niet worden vastgesteld (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006).

Gereduceerd gebruik van straalomkeerders

G2 / G3: **G2** Geluidsbron: **Vliegtuig, na *touchdown***

Om na landing af te remmen, maken veel vliegtuigen gebruik van straalomkeerders. Hiermee wordt (een deel van) de straalstroom van de motor omgekeerd, zodat deze naar voren blaast. De hoeveelheid vermogen kan variëren van *idle reverse* tot *max reverse*. Zeker bij hogere vermogens, neemt ook het (grond)geluid toe (Adecs Airinfra, 2009). Dat geldt ook voor brandstofverbruik en uitstoot van CO_2, NO_X, $PM_{2.5}$ en PM_{10} (Hak, et al., 2020).

Door het gebruik van straalomkeerders te reduceren (of de hoeveelheid vermogen dat wordt gebruikt), kunnen grondgeluid en motoremissies afnemen. Dat betekent echter ook dat vliegtuigen meer gebruik zullen moeten maken van wielremmen, waardoor met name banden sneller slijten – resulterend in meer fijnstofemissie en hogere (onderhouds)kosten (Hak, et al., 2020). Als de remweg langer wordt, is het mogelijk dat het vliegtuig niet in staat is om een eerdere afrit te nemen. Daardoor nemen taxiemissies mogelijk toe en kan de baancapaciteit verminderen (Hak, et al., 2020).

Vanuit technisch oogpunt en certificatie is er op droge banen geen belemmering voor het niet of minder gebruik maken van straalomkeerders. Een vliegtuig moet op een droge baan namelijk op tijd tot stilstand kunnen komen zonder gebruik te maken van straalomkeerders (EASA, 2021, CS25.109(f)(1)). Implementatie zou op korte termijn mogelijk zijn, maar vergt medewerking van luchtvaartmaatschappijen en hun piloten. Een verbod is niet mogelijk; maar luchthavens en overheden kunnen "erop aandringen dat reverse thrust alleen met stationair toerental mag worden uitgevoerd" (Adecs Airinfra, 2009, p. 47). Dat gebeurt onder andere op de luchthavens van Schiphol, Londen (Heathrow), Frankfurt en Zürich middels het AIP (Aeronautical Information Publication), vaak alleen in de avond en/of nacht (Hak, et al., 2020; LVNL, 2021, Sec. 5.2; Schiphol & LVNL, sd).

Op natte banen staan certificatie-eisen wél toe dat straalomkering wordt gebruikt om de veilige stopafstand te garanderen (EASA, 2021, CS25.109(f)(2)). Ook vanuit veiligheidsoverwegingen is het limiteren van straalomkeerders in dat soort situaties waarschijnlijk onwenselijk.

Verschuiving van de baandrempel

G2 / G3: **G2** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens landing**

Vergelijkbaar met het wijzigen van de startpositie kan ook de positie op de baan waar het landende vliegtuig voor het eerst de wielen aan de grond zet worden verschoven. Dit heet een verschuiving van de baandrempel (Hak, et al., 2020). Mits de beschikbare en benodigde baanlengte voor landing het toestaat, kan door de geluidbron hiermee worden verplaatst. In ieder geval op Maastricht Aachen Airport wordt al gebruik gemaakt van verschoven baandrempels. Hak et al. (2020) verwachten daardoor dat het effect van een mogelijke extra verschuiving beperkt is, tot minder dan 1 dB(A). Er is niet onderzocht in hoeverre deze maatregel ook op andere Nederlandse luchthavens wordt toegepast.

Waterinjectie tijdens proefdraaien

G2 / G3: **G3** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens proefdraaien**

Door water onder hoge druk in de luchtstroom van de motoruitlaat van een straalmotor te spuiten, kan het geluid worden gereduceerd. NLR (2010) heeft dat in samenwerking met de Koninklijke Luchtmacht succesvol getest voor een militair jachtvliegtuig (F-16).

In dat onderzoek bleek door middel van metingen dat laagfrequent geluid met zo'n 10dB werd gereduceerd. Voor hogere frequenties zijn hogere reducties waarschijnlijk haalbaar. De geluidsreductie op civiele vliegtuigen is niet onderzocht. Waterinjectie kan ook helpen bij het terugdringen van uitstoot van ultrafijnstof (Schiphol, 2022) en NO_x-emissies (Esposito, Manna, Natale, Carotenuto, & Lancia, 2016). De waterdamp kan negatieve invloed hebben op de lokale zichtcondities en kan, bij temperaturen onder nul, na neerslag zorgen voor gladheid.

De haalbaarheid voor en effecten van toepassing bij civiele luchtvaart moet worden onderzocht. Daarbij kan worden voortgebouwd op voornoemde proef in militaire context. Aandachtsgebieden zijn onder andere de stabiliteit van het systeem, in relatie tot de grote (stuw)krachten die het moet doorstaan, en het effect op grondwaterkwaliteit (verzuring). Onderzoek vergt zo'n 3 tot 12 maanden; de verdere ontwikkeling van een operationeel systeem kost ruim een jaar.

Antigeluid

G2 / G3: **G2 / G3** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens start**
Mogelijk breder toepasbaar

Onderzoek naar grondgeluid bij de Polderbaan noemt het toepassen van antigeluid (of *active noise control*) als mogelijke maatregel tegen grondgeluid van startende vliegtuigen (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Hiermee wordt door middel van luidsprekers geluid geproduceerd dat in tegenfase is met het te-verminderen laagfrequente geluid en het daarmee vermindert. Eerste experimenten laten een afname in geluid zien van zo'n 5 tot 10 dB.

Voornoemd onderzoek benadrukt echter ook dat meer onderzoek nodig is om vast te stellen in welk (geografisch) gebied deze geluidvermindering plaatsvindt en om deze techniek voor toepassing 'in het veld' mogelijk te maken. Uitdagingen daarbij is, onder andere, om het antigeluid af te stemmen op windeffecten (windrichting en -snelheid hebben sterke invloed op de verspreiding van grondgeluid) en de exacte geluidsignatuur van de bron. Het feit dat in ieder geval het grondgeluid van startende vliegtuigen niet tonaal is (maar breedband), maakt reductie daarvan via antigeluid überhaupt uitdagend (McKay, Davis, Killeen, & Bennett, 2020).

Ondanks dat het Polderbaan-onderzoek antigeluid alleen bespreekt in verband met het reduceren van geluid van startende vliegtuigen, is het concept mogelijk breder toepasbaar. Gebruik van antigeluid om geluid van proefdraaiopstellingen te reduceren is eerder onderzocht en bleek kansrijk (Germain, 2000; Nakashima, 2003), hoewel het in die onderzoeken ging om een tonale en statische bron.

Coördinatie bij proefdraaien

G2 / G3: **G3** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens proefdraaien**

Een studie van de Britse luchtvaartautoriteit noemt het coördineren van proefdraaien als maatregel om geluidoverlast van proefdraaiende vliegtuigen te verminderen (Jopson, Jones, Porter, & White, 1998). Activiteiten van verschillende operators kunnen mogelijk worden afgestemd om geluidproductie in tijd de concentreren of juist te spreiden, eventueel met inachtneming van lokale meteorologische condities.

Hoewel de totale geluidproductie naar verwachting niet verandert, kunnen de belasting en hinder op specifieke plaatsen mogelijk wel worden gereduceerd. Neveneffecten zijn er niet of nauwelijks: hooguit vergt de benodigde afstemming tijd en inzet. De maatregel is haalbaar, maar kwantitatieve informatie over het effect is niet bekend.

(Generieke of specifieke) operationele restrictie	
G2 / G3: **G2 + G3**	Geluidsbron: **Vliegtuig**

Generieke of specifieke operationele restricties, zoals bijvoorbeeld een vermindering van het totaalaantal vluchten (generiek) of het verbieden van operaties met een bepaald type tijdens een bepaald moment van de dag (specifiek), reduceren (bepaalde) luchtvaartactiviteit en de bijbehorende geluidproductie. Alternatief aan restricties zijn maatregelen die activiteiten die gemoeid gaan met de productie van laagfrequent geluid geografisch of in tijd spreiden. Daarbij valt te denken aan het spreiden van startend en landend verkeer, rustperiodes door alternerend baan- en/of routegebruik (Hak, et al., 2020). Ondanks dat de totale geluidproductie hier niet door afneemt, kan de geluidbelasting of ervaren hinder op een individuele locatie wel afnemen.

De effecten (zowel positief als eventueel negatief) zijn sterk afhankelijk van het type maatregel, en mogelijk ook van de manier waarop deze wordt ingevoerd en eventueel gehandhaafd. Dit maakt een algemene beoordeling over effect, haalbaarheid en kosten lastig. Aan de andere kant betekent dat dat de maatregel kan worden ontworpen op bijvoorbeeld het grootste effect, of de gunstigste verhouding tussen kosten en baten.

Verplaatsing en afscherming van de bron

Aanpassingen aan start- en landingsba(a)n(en)	
G2 / G3: **G2**	Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens start en landing**

Door start- en landingsba(a)n(en) te verplaatsen, kan de productie van grondgeluid worden verplaatst naar een locatie (verder) weg van geluidgevoelige gebieden (bijvoorbeeld een woonwijk of natuurgebied), of naar een locatie waar meer mogelijkheden zijn voor afscherming of het treffen van maatregelen tijdens de overdracht van bron naar ontvanger. Het verzinken van banen, zoals soms wordt toegepast bij autoverkeerswegen (bijvoorbeeld A4 Midden-Delfland) is als onhaalbaar beoordeeld. Afscherming is verderop beschreven.

De effecten van het verplaatsen van één of meerdere banen op grondgeluid is sterk afhankelijk van de situatie, zowel op de grond (meteorologische situatie, beschikbare ruimte, afstand tot geluidgevoelige gebieden, etc.) als in het luchtruim (in verband met de aansluiting van start- en naderingsroutes). Met het verplaatsen van grondgeluid verplaatsen ook uitstoot en luchtgebonden geluid (van klim en nadering) mee. De verplaatsing van een baan biedt, desalniettemin, een kans om midddels het ontwerp andere negatieve effecten te minimaliseren en/of veiligheid te vergroten.

Technisch zijn er geen obstakels voor deze maatregel. Er zijn echter hoge kosten en veel tijd mee gemoeid.

Afscherming

G2 / G3:	**G3 + G2**	Geluidsbron:	**Vliegtuig, tijdens proefdraaien** **Vliegtuig, tijdens start en landing**

Door geluidsbronnen af te schermen, kan de hoeveelheid geluid die het gebied achter de afscherming bereikt afnemen. Voor het verminderen van laagfrequent geluid zijn bredere en massievere structureren gewenst (Hak, et al., 2020). Een afschermende functie kan worden geïntegreerd in gebouwen en ruimtelijk ontwerp, en vergt dus niet altijd een (losstaand) geluidsscherm. Het effect van afschermingen is groter op geluid van hogere frequenties: laagfrequent grondgeluid kan 'over de barrière' buigen (Jopson, Jones, Porter, & White, 1998; Germain, 2000; Nakashima, 2003; Bergmans & Veerbeek, 2013).

Afscherming is het meest effectief wanneer dit dichtbij de bron gebeurt, middels een hoog, breed en aaneengesloten scherm (Bergmans & Veerbeek, 2013). Het kan lage tonen met 6 (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006, bij een geluidsabsorberende bodem en een barrière van 10 meter hoog) tot ruim 10 dB (Hak, et al., 2020; Bosschaart, 2012; TNO, 2014, ongespecificeerde hoogte) reduceren. Naar mate het bron van een scherm weg verplaatst, neemt de effectiviteit af (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Afschermende constructies (losstaand of geïntegreerd in een gebouw) kunnen zo worden ontworpen dat reflecties, bijvoorbeeld tussen dergelijke constructies, worden beperkt, bijvoorbeeld door gebruik te maken van schuine of geluiddempende (groene) gevels (Hak, et al., 2020).

Het afschermen van laagfrequent geluid dat wordt geproduceerd bij proefdraaien is daarom eenvoudiger dan het geluid van startende of landende vliegtuigen. Naast geluid kunnen afschermingen ook de verspreiding van gasvormige emissies (NO_X, fijnstof) en neerslag daarvan beïnvloeden. Vaak is dat positief voor gebieden achter het scherm, terwijl uitstoot en neerslag ervóór (aan bronzijde) kan toenemen (Hak, et al., 2020).

De realisatie van barrières op het luchthaventerrein is technisch mogelijk. Rondom banen is regelgeving rondom obstakels van invloed. Integratie van barrières met andere functies in de gebouwde omgeving maakt de ontwerpopgave mogelijk ingewikkelder, maar kan ook zorgen voor bredere acceptatie. Vanwege de hoogte van de barrières (minimaal 10 tot 15 meter, volgens Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006) kunnen losstaande barrières namelijk een inbreuk hebben op de kwaliteit van de leef- of werkomgeving.

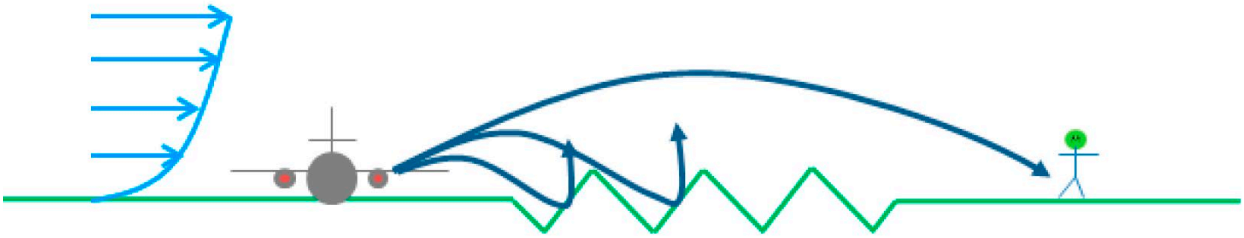
Appendix B Maatregelen tijdens overdracht van bron naar ontvanger

In geraadpleegde literatuur zijn verschillende specifieke maatregelen besproken of nader onderzocht.

Geluidribbels t.b.v. verstrooiing

G2 / G3: **G2 (m.n.)** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens start en landing**

Door laagfrequente geluidsgolven te verstrooien komen ze minder of niet meer aan bij de ontvanger, die er hinder van kan ondervinden. Eén manier om verstrooiing te realiseren is door het aanbrengen van geluidribbels in het landschap, als geïllustreerd in onderstaande schets (Bergmans & Veerbeek, 2013, p. 17).



Bij de Polderbaan zijn geluidribbels toegepast om grondgeluidbelasting van Hoofddorp-Noord te verminderen. In 2017 is uit onderzoek gebleken dat de geluidniveaus met 6 dB zijn afgenomen (Schiphol & LVNL, 2021). Andere onderzoeken hebben het effect op 5 tot 10 dB geschat (van der Eerden, Salomons, & Beeks, 2007), of nog meer (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). De te realiseren effecten zijn sterk afhankelijk van de situatie en implementatie. Dat geldt ook voor de benodigde tijd en (financiële) middelen.

Olifantsgras t.b.v. absorptie

G2 / G3: **G2 (m.n.)** Geluidsbron: **Vliegtuig, tijdens start en landing**

Wanneer de grond akoestisch hard is, kan grondgeluid over de grond blijven ‘stuiteren’. De doorgetrokken (donkerblauwe) lijnen in onderstaande schets illustreren dat (Bergmans & Veerbeek, 2013, p. 17).

Absorberende maatregelen, bijvoorbeeld het plaatsen van olifantsgras, verlagen de akoestische hardheid van de bodem. De geluidpropagatie neemt daardoor af, zodat de geluidbelasting op en de mogelijk ervaren hinder door een ontvanger wordt gereduceerd.

Naast het positieve effect op grondgeluid kent olifantsgras verschillende andere voordelen: het is onaantrekkelijk voor vogels, waardoor de kans op botsingen tussen vliegtuigen en vogels (*bird strikes*) afneemt. Daarnaast neemt het CO_2 op en is het geoogste gewas breed inzetbaar: als brandstof, of grondstof voor *bio-based* materialen of brandstoffen (Hak, et al., 2020; WUR, sd). Ten slotte kan het ultrafijnstof afvangen.

Rondom Schiphol wordt al sinds 2010 geëxperimenteerd met olifantsgras. Sinds 2013 beslaat de teelt zo’n 60 hectare. De opbrengsten worden door bedrijven in de buurt verwerkt (WUR, sd). Ook voor andere Nederlandse luchthavens is olifantsgras aangeduid als kansrijke maatregel tegen geluid (Hak, et al., 2020; Veerbeek, et al., 2019).

De benodigde sturing en het aantal betrokkenen is sterk afhankelijk van de situatie. Bij meerdere landeigenaren is realisatie mogelijk ingewikkelder en tijdrovender dan bij een enkele. Desalniettemin is olifantsgras ook voor landeigenaren (financieel) aantrekkelijk. Het gewas is onderhoudsvriendelijk: onkruid krijgt na het eerste jaar geen kans en irrigatie is in Nederland niet nodig (WUR, sd). De aanplant brengt wel kosten met zich mee, maar is een investering die na vijf tot zes jaar wordt terugverdiend. Daarna kan winst worden gemaakt (WUR, sd).

Naast olifantsgras kunnen ook andere gewassen zorgen voor absorptie van grondgeluid. Ook het Amsterdamse Bos zal bijdragen aan het reduceren van de overdracht van grondgeluid naar gebieden ten westen van de luchthaven (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). *Factoren die een rol spelen bij de gewaskeuze zijn financiële aspecten, maar ook de aantrekkelijkheid voor vogels (i.v.m. het risico op botsingen) en eventuele andere milieueffecten.*

Appendix C Maatregelen bij de ontvanger

In geraadpleegde literatuur zijn verschillende specifieke maatregelen besproken of nader onderzocht.

Geluidsbarrière nabij gebouw			
G2 / G3:	**G2 (m.n.)**	Geluidsbron:	**Taxieende en opstijgende vliegtuigen**

Het afschermen van LFG bij de ontvanger is minder effectief dan bij de bron en vereist een barrière met een hoge dichtheid en voldoende hoogte (15 m voor een vermindering van 6 dB).

Het effect is het grootst vlakbij de barrière en neemt daarna af. Ook kan wind in de richting van de ontvanger de effectiviteit van een barrière drastisch verminderen (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Veel geluidsschermen zijn vooral effectief tegen hogere tonen waarbij LFG overblijft. Het LFG lijkt dan gevoelsmatig zelfs toe te nemen.Door de lange golflengte zal LFG onder *down-wind* condities over de barrière heen buigen. Dit verkleint de geluidsluwe ruimte achter de barrière. Hierdoor is de reikwijdte van de maatregel beperkt (Bergmans & Veerbeek, 2013).

De voorgenomen maatregelen moeten passen in de bestemmingsplannen en welstandseisen van de betreffende locatie. In het bouwbesluit staan momenteel geen eisen ten aanzien van LFG. De voorgeschreven NEN5077 meet geluid vanaf 100 Hz. Hierdoor is er vanuit de regelgeving geen prikkel om aanvullende maatregelen te nemen tegen LFG. Wanneer de maatregelen eenmaal geïmplementeerd zijn is er weinig sturing meer nodig.

Geluidsbarrières worden lang en breed toegepast tegen ‘gewone’ geluidshinder. De technologie is niet nieuw. Vanwege de vereiste hoogte (>10 m) is een stevige fundering noodzakelijk met oog op de windbelasting. Indien een barrière wordt geïntegreerd in een breder ruimtelijk ontwerp zullen kosten waarschijnlijk relatief laag zijn. Wanneer een barrière wordt aangelegd zoals bij de Polderbaan (Buitenschot) zullen de kosten enkele miljoenen euro’s bedragen. Advies en uitwerking van varianten zal, afhankelijk van de omvang van de werkzaamheden, grofweg tussen de €50.000en €100.000 aan advieskosten bedragen (Hak, et al., 2020).

Woningisolatie			
G2 / G3:	**G2 (m.n.)**	Geluidsbron:	**Taxieende en opstijgende vliegtuigen**

Het aanbrengen van geluidisolatie van woningen en andere gebouwen rondom luchthavens wordt vaak toegepast. Het met 5 dB of meer reduceren van geluid van overvliegende vliegtuigen is relatief eenvoudig, maar voor lagere frequenties (onder de 160 Hz) is het moeilijker (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). De kans op resonantie van structurele elementen wordt dan groter, en hoewel die aangepakt kunnen worden, is het elimineren ervan lastig.

Passieve isolatie tegen laagfrequent (grond)geluid vergt zware elementen, zoals dik glas, en het vervangen van eventuele houten elementen door stenen constructies (Sharp, Beeks, & Veerbeek, 2006). Rondom Schiphol is door TNO onderzocht dat een 3 dB reductie haalbaar is doormiddel van bouwtechnische aanpassingen (Schiphol & LVNL, sd). Details daarvan zijn niet bekend.

Om de blootstelling van gebouwgebruikers aan grondgeluid te reduceren, moet ieder geluidbelast gebouw aangepast worden. De reikwijdte van een enkele isolatie-ingreep is dus beperkt. Daarnaast zijn de maatregelen natuurlijk alleen binnen het gebouw effectief, en niet in eventueel bijbehorende buitenruimte. De kosten voor het aanbrengen van geluidwerende voorzieningen zijn in eerder onderzoek geschat op €10.000 tot €50.000 per woning (Hak, et al., 2020).

Geluidwerende ramen op basis van antigeluid			
G2 / G3:	**G2 (m.n.)**	Geluidsbron:	**Taxieende en opstijgende vliegtuigen**

De Nederlandse start-up DeNoize ontwikkelt een op bestaande ramen installeerbare module die inkomend geluid (100 tot 1000 Hz) tegengaat door middel van anti-geluid. Het geluid van buiten wordt geanalyseerd en vervolgens wordt het raam in tegenfase in trilling gebracht. Daardoor dringt het meeste geluid niet door (DeNoize, n.d.). De start-up richt zich op het isoleren van ramen, omdat die, aldus DeNoize, de “zwakste schakel” zijn (van der Berg, 2020).

Uit een pilotstudie blijkt dat het systeem laagfrequent geluid met 6,5 tot 7 dB kan reduceren. De afname bij hogere frequenties is groter, tot 15 dB (Glas in Beeld, 2021).

Appendix D Uitvraag ACI

NLR survey on LF noise and rattle

NLR is making an assessment and overview for the Dutch Ministry of Transport of known measures to mitigate (annoyance of) low-frequency noise and rattle caused by (A) aircraft ground movements and (B) other ground-based airport activities for future policy (if needed).
In addition to a review of literature, NLR likes to reach out to the members of ACI Europe with a short questionnaire about measures and policy at your airport. Your response will help us and the Dutch Ministry to better understand the current practice at European airports. The results will be included in the (public) study report – please do not forget to state your preferences at the end of this questionnaire.

I. General

How important is the topic of low-frequency noise and rattle to your airport?

Rate 1-5 (not important – very important) + motivation

II. Noise from aircraft ground movements

What measures are in place for low-frequency noise and rattle from **aircraft ground movements**?

E.g. restrictions on use of reverse thrusters, adaptations to taxiway / runway layout, noise barriers

How effective are these measures in your experience?

Rate 1-5 (not effective – very effective) + motivation

Do you experience difficulties implementing these measures?

Rate 1-5 (many difficulties – no difficulties) + motivation

III. Noise from other ground-based airport activities

What measures are in place for low-frequency noise and rattle from **other ground-based airport activities**?

E.g. restrictions on engine testing, electric GSE, noise barriers

How effective are these measures in your experience?

Rate 1-5 (not effective – very effective) + motivation

Do you experience difficulties implementing these measures?

Rate 1-5 (many difficulties – no difficulties) + motivation

IV. Enforcement by competent noise authority

Does your competent noise authority enforce policy on low-frequency noise and rattle?

No / Yes (please describe policy and noise sources that are restricted)

V. Contact information

Is there anything else you would like to share?

Please fill in:

- Name of airport:
- You may mention airport's participation in this study in report: yes/no
- You may mention airport's response in this study in report: yes/no
- I want to be updated on the study: yes/no

Thank you very much for your time and input!

Dedicated to innovation in aerospace

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het onderzoekscentrum Koninklijke NLR werkt op objectieve en onafhankelijke wijze met zijn partners aan een betere wereld van morgen. NLR biedt daarbij innovatieve oplossingen en technische expertise en zorgt voor een sterke concurrentiepositie van het bedrijfsleven.

NLR is ruim 100 jaar een kennisorganisatie met de diepgewortelde wil om te blijven vernieuwen en zet zich in voor een duurzame, veilige, efficiënte en effectieve lucht- en ruimtevaart.
De combinatie van diepgaand inzicht in de klantbehoefte, multidisciplinaire expertise en toonaangevende onderzoeksfaciliteiten, maakt snel innoveren mogelijk. NLR vormt in binnen- en buitenland de spilfunctie tussen wetenschap, bedrijfsleven en overheid, en overbrugt de kloof tussen fundamenteel onderzoek en toepassingen in de praktijk. Daarnaast werkt NLR als Groot Technologisch Instituut ruim tien jaar in de TO2-federatie samen aan toegepast onderzoek in Nederland.

Vanuit de hoofdvestigingen in Amsterdam en Marknesse en twee satellietvestigingen, draagt NLR bij aan een veilige en duurzame maatschappij en werkt met partners in vele (defensie)programma's, onder andere aan complexe composieten constructies voor verkeersvliegtuigen en aan doelgericht gebruik van het F-35-jachtvliegtuig. Daarnaast geeft NLR invulling aan Nederlandse en Europese (klimaat)doelstellingen conform de Luchtvaartnota, de European Green Deal, Flightpath 2050, en door deelname aan programma's zoals Clean Sky en SESAR.

Voor meer informatie bezoek: **www.nlr.nl**

Postal address
PO Box 90502
1006 BM Amsterdam, The Netherlands
e) info@nlr.nl **i)** www.nlr.org

Royal NLR
Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam, The Netherlands
p) +31 88 511 3113

Voorsterweg 31
8316 PR Marknesse, The Netherlands
p) +31 88 511 4444