



Vliegtuiggeluid: *meten, rekenen en beleven*

Een verkenning van wensen
en ontwikkelopties



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven

Een verkenning van wensen en ontwikkelopties

RIVM Rapport 2019-0201



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Colofon

© RIVM 2019

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: RIVM, NLR en KNMI, de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2019-0201

R.C.G.M. Smetsers (coördinatie en eindredactie), RIVM
P.C. Siegmund (auteur), KNMI
D.J.M. Houthuijs (auteur), RIVM
R.H. Hogenhuis (auteur), NLR
S.J. Heblj (auteur), NLR
J.L.A. Devilee (auteur), RIVM
O.R.P. Breugelmans (auteur), RIVM
J.A. Beintema (auteur), NLR

Contact:
Ronald Smetsers
Milieu en Veiligheid\Centrum Milieukwaliteit
ronald.smetsers@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van de Programmatische aanpak meten vliegtuiggeluid.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven

Een verkenning van wensen en ontwikkelopties

Er is maatschappelijke onvrede over de berekende hoeveelheid geluid die vliegtuigen produceren. Omwonenden vertrouwen de informatie die de overheid hierover geeft niet. Zij willen dat het vliegtuiggeluid wordt gemeten. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft daarom beloofd dat berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid worden verbeterd. Dat is moeilijker dan het lijkt. IenW heeft daarom het RIVM, het KNMI en het Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR) om advies gevraagd.

Volgens de drie organisaties zijn er veel mogelijkheden om de meet- en rekenwijze te verbeteren. Wel kost het tijd om verschillen van inzicht tussen belanghebbenden over de methoden op te lossen. Het streven is namelijk dat alle betrokken partijen het zo goed mogelijk eens zijn over hoe de werkzaamheden uitgevoerd en verbeterd moeten worden.

Om dit te realiseren adviseren het RIVM, het NLR en het KNMI een landelijke werkstructuur in te voeren. Dit houdt in dat rond elke luchthaven van nationale betekenis een vastgesteld pakket aan taken wordt uitgevoerd (het vliegtuiggeluid meten en berekenen, de verschillen verklaren, hinder in kaart brengen, burgers informeren, enzovoort). Een onafhankelijke groep van experts ziet erop toe dat relevante onderwerpen worden onderzocht en nuttige verbeteringen worden overgenomen.

Onderdeel van het standaard pakket is om de verschillen tussen de metingen en de berekeningen te onderzoeken en te verklaren. De resultaten worden gebruikt om de berekeningen te verbeteren en het publiek beter te informeren over vliegtuiggeluid. Ook wordt systematisch gekeken naar de effecten van vliegtuiggeluid: hoe beleven omwonenden het geluid, in welke mate ervaren zij geluidhinder en slaapverstoring, en wat zijn de mogelijke gezondheidseffecten?

Het RIVM, het KNMI en het NLR bevelen verder aan om zo veel mogelijk uit te gaan van bestaande voorzieningen en beschikbare data. Ook moeten lokale initiatieven waar mogelijk worden betrokken. De nieuwe gegevens over geluid door vliegverkeer moeten voor iedereen herkenbaar zijn en zo een solide basis vormen voor beleidsmatige beslissingen en betrouwbare informatie voor burgers.

Kernwoorden: luchtvaart, geluid, geluidhinder, meten, berekenen

Synopsis

Measurement, calculation and perception of aircraft noise

An exploration of wishes and development options

There is societal discontent with regard to the calculated level of noise produced by aircrafts. Local residents do not trust the information provided by government on this subject. They want aircraft noise to be measured. The Ministry of Infrastructure and Water Management (IenW) has therefore promised to improve the modelling and measurement of aircraft noise. That is more difficult than it seems. Therefore, IenW has asked RIVM, the KNMI (National Weather Service), and the NLR - Netherlands Aerospace Centre for advice.

According to these three organizations, there are many opportunities available for improving the measurement and calculation methods. However, it does take time to resolve differences of opinion between stakeholders about the methods to be used. After all, it is our intention that all the parties involved agree on how the activities should be carried out and improved.

To achieve this, RIVM, the NLR, and the KNMI recommend the introduction of a national working structure. This means that a standard set of activities will be carried out in the vicinity of every airport of national significance: measuring and calculating aircraft noise, explaining the differences, mapping annoyance, informing citizens, etcetera. An independent group of experts ensures that relevant subjects are examined and that useful improvements are adopted.

Analyzing and explaining the differences between the measurements and the calculations is part of the standard set of activities. The results will be used to improve the calculations and to inform the public better about aircraft noise. The effects of aircraft noise will also be systematically described: how do local residents experience the noise, what is the prevalence of noise annoyance and sleep disturbance, and what are the potential risks for health?

RIVM, the KNMI, and the NLR also recommend making as much use as possible of existing facilities and available data. Local initiatives should be involved where possible. The new data on aircraft noise should be understandable for everyone and thus provide a solid basis for policy decisions and reliable information to citizens.

Keywords: aviation, noise, noise annoyance, measuring, calculating

Inhoudsopgave

Samenvatting – 11

1 Introductie – 15

- 1.1 Aanleiding – 15
- 1.2 Opdracht aan RIVM, NLR en KNMI – 15
- 1.3 Afbakening – 16
- 1.4 Leeswijzer – 17
- 1.5 Maten voor geluid – 18

2 Historisch overzicht omgevingsgeluid luchthavens – 21

- 2.1 Introductie – 21
- 2.2 Ontwikkelingen rond Schiphol sinds 1980 – 22
 - 2.2.1 Zoneringsystematiek – 22
 - 2.2.2 Systematiek met handhavingspunten – 23
 - 2.2.3 Systematiek gebaseerd op criteria voor gelijkwaardige bescherming – 23
 - 2.2.4 Meten of rekenen? – 25
- 2.3 Ontwikkelingen rond andere Nederlandse luchthavens – 26
 - 2.3.1 Bevoegdheden – 26
 - 2.3.2 Geluidbelasting – 27
 - 2.3.3 Systematiek met handhavingspunten – 27

3 De relatie tussen geluidbelasting en gezondheid – 29

- 3.1 Geluid en gezondheid – 29
- 3.2 Geluidhinder nader bekeken – 32
 - 3.2.1 Meten van hinder en slaapverstoring – 32
 - 3.2.2 Berekenen van hinder en slaapverstoring – 33
 - 3.2.3 Onderzoek naar geluidhinder rond Nederlandse luchthavens – 34
 - 3.2.4 Demografische, persoonsgebonden, sociale en contextuele, en situationele kenmerken – 37
 - 3.2.4.1 Demografische en sociaaleconomische kenmerken – 37
 - 3.2.4.2 Persoonsgebonden kenmerken – 38
 - 3.2.4.3 Contextuele en sociale kenmerken – 38
 - 3.2.4.4 Situationele kenmerken – 39
 - 3.2.5 Verschillen tussen luchthavens nader geduid – 39
- 3.3 Geluidmaten ter beoordeling van effecten van geluid – 41
 - 3.3.1 L_{den} en L_{night} – 42
 - 3.3.2 SEL en L_{Amax} – 42
 - 3.3.3 Andere geluidindicatoren – 45
 - 3.3.4 Combinaties van geluidmaten – 51
 - 3.3.5 Geluidindicatoren voor andere effecten dan hinder en slaapverstoring – 53
- 3.4 Burgerperspectieven op de betrouwbaarheid van berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid en vertrouwen in betrokken partijen – 54
 - 3.4.1 Achtergronden bij vertrouwen door burgers – 54
 - 3.4.2 Burgerperspectieven op omgevingsbelasting door Nederlandse luchthavens – 55
 - 3.4.3 Citizen science – 61
 - 3.4.4 Samenmetenaanluchtkwaliteit.nl als voorbeeld – 62
 - 3.4.5 Doelgroepen en benaderingen bij citizen science – 63

3.5	Beschouwing en conclusies – 65
3.5.1	Geluidindicatoren – 65
3.5.2	Geluidhinder en slaapverstoring – 66
3.5.2.1	Monitoring – 66
3.5.2.2	Verdiepend onderzoek – 67
3.5.3	Burgerperspectieven – 67
3.5.3.1	Vertrouwen – 67
3.5.3.2	Regionale verschillen – 68
3.5.4	Citizen science – 68

4 Geluidberekeningen rond luchthavens – 69

4.1	Introductie – 69
4.1.1	Hoe beschrijven we geluid? – 69
4.1.2	Hoe komt geluid vanuit de bron bij de ontvanger? – 71
4.2	Berekeningen met de huidige modellen – 72
4.2.1	Invoergegevens – 73
4.2.2	Berekening – 74
4.2.3	Analyse van berekeningsresultaten – 74
4.2.4	Aannames en beperkingen bij het uitvoeren van geluidberekeningen – 75
4.2.4.1	Aannames geluidberekeningen – 75
4.2.4.2	Beperkingen geluidberekeningen – 76
4.2.5	Toepassingsbereik – 78
4.3	Modellen in andere landen – 81
4.3.1	Verenigd Koninkrijk – 81
4.3.2	Zwitserland – 82
4.3.3	Finland – 83
4.3.4	Duitsland – 83
4.4	Toepassingen van berekeningen – 84
4.5	Mogelijke ontwikkelingen op het gebied van rekenmodellen – 84
4.5.1	Relatie met het huidige beleid – 85
4.5.2	Mogelijke aanpassingen of verbeteringen van bestaande rekenmodellen zonder het gebruik van metingen – 86
4.5.2.1	Verbetering van huidige modellering op basis van bekende inzichten – 86
4.5.2.2	Uitbreiding van beschikbare invoergegevens – 87
4.6	Conclusies en aanbevelingen – 90

5 Meting van geluid rond luchthavens – 93

5.1	Toepassingen van metingen – 93
5.1.1	Informatievoorziening aan burgers – 94
5.1.2	Monitoring voor nadere analyses – 95
5.1.3	Gedetailleerde metingen van vliegtuiggeluid – 95
5.1.4	Handhaven en aanspreken – 96
5.1.5	Flitspalen – 96
5.1.6	Meetlimiet jaarlijkse gemeten geluidbelasting – 97
5.1.7	Gebruik van metingen in combinatie met een rekenmodel – 98
5.1.8	Metingen door burgers – 98
5.2	Uitvoering van geluidmetingen – 98
5.2.1	Geluidmeters – 98
5.2.2	Bemand of onbemand meten – 99
5.2.3	Operationele of onderzoeksmetingen – 99
5.2.4	Geen constant beeld van de geluidproductie van vliegtuigen – 99
5.3	Beperkingen van metingen – 100

5.3.1	Beperkt aantal meetlocaties – 100
5.3.2	Verstoring door omgevingsgeluid – 100
5.3.3	Invloed van weersomstandigheden – 101
5.3.4	Niet elke vliegbeweging wordt gemeten – 102
5.3.5	Beperkingen van microfoons – 102
5.3.6	De plaatsing van de microfoon beïnvloedt de meting – 102
5.3.7	Metingen geven alleen inzicht over de meetperiode – 102
5.4	Voorbeelden van bestaande meetnetten – 102
5.4.1	Schiphol – 103
5.4.2	Vancouver International Airport – 104
5.4.3	Luchthaven Eindhoven – 105
5.4.4	Rotterdam The Hague Airport – 106
5.4.5	Lelystad Airport – 106
5.4.6	Heathrow – 106
5.4.7	Luchthaven Frankfurt – 107
5.4.8	Sydney – 107
5.5	Referentienetwerk – 108
5.6	Mogelijke andere metingen – 108
5.6.1	Ontwikkeling geluid rond Schiphol – 108
5.6.2	Innovatieve metingen – 109
5.7	Conclusies en aanbevelingen – 110
6	Combinaties van meten en rekenen – 111
6.1	Gebruik van meten en rekenen onafhankelijk van elkaar – 112
6.2	Gebruik metingen ter validatie en verbetering van bestaande rekenmodellen – 112
6.3	Dagelijkse geluidinformatie – 115
6.3.1	Interpolatie en modelcorrectie – 116
6.3.2	Machine learning – 117
6.3.3	Dynamisch modelleren van vliegtuiggeluid – 118
6.3.4	Kanttekeningen bij de dagelijkse geluidinformatie – 119
6.4	Conclusies en aanbevelingen – 120
7	Voorstel invulling 'Programmatistische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid' – 123
7.1	Inleiding – 123
7.2	Voorstel voor een uitvoeringsstructuur – 124
7.2.1	Operationele systemen per luchthaven – 125
7.2.1.1	Uitvoeren van metingen – 125
7.2.1.2	Uitvoeren van berekeningen – 125
7.2.1.3	Analyse van de verschillen tussen meten en rekenen – 126
7.2.1.4	Communicatie met betrokkenen – 126
7.2.1.5	Interactie met de omgeving – 127
7.2.2	Onderzoeksprogramma – 128
7.2.2.1	Onderzoek meten en rekenen – 128
7.2.2.2	Onderzoek beleving, hinder en gezondheid – 128
7.2.3	Wetenschappelijke aansturing als verbindende schakel – 128
7.3	Beslispunten – 130
7.4	Lijst van specifieke aanbevelingen binnen het systeemconcept – 130
7.4.1	Aanbeveling 1: Meetstrategie – 130
7.4.2	Aanbeveling 2: Signaalfunctie – 132
7.4.3	Aanbeveling 3: Modelontwikkeling – 135
7.4.4	Aanbeveling 4: Publiekscommunicatie – 140
7.4.5	Aanbeveling 5: Hinder en gezondheid – 142

- 7.4.6 Aanbeveling 6: Citizen science – 145
- 7.4.7 Aanbeveling 7: Wetenschappelijke aansturing – 147

Nawoord – 151

Referenties – 153

Bijlage 1. Vragen voor de verkenningsfase – 163

Samenvatting

Binnen de luchtvaart is de geluidruimte, de capaciteitsplanning en de evaluatie van het gebruik van de geluidruimte gebaseerd op geluidberekeningen. Geluidmetingen spelen momenteel geen directe rol in regelgeving en handhaving. Ook is er tot op heden niet structureel toegewerkt naar een systeem van onderling corresponderende metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid. De maatschappelijke discussie hierover vormde voor de minister van Infrastructuur en Waterstaat aanleiding om een Programmatische Aanpak van het Meten van Vliegtuiggeluid (PAMV) op te starten. Met de PAMV wil de minister berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid verbeteren en beide methodes onderling versterken. Gegevens over de geluidbelasting door vliegverkeer moeten in de nieuwe situatie voor iedereen herkenbaar en betrouwbaar zijn en moeten een solide basis vormen voor burgerinformatie en beleidsbeslissingen (Min IenW 2018).

De PAMV bestaat uit een verkenningsfase, een uitwerkfase en een realisatiefase. Tijdens de verkenningsfase dienden de mogelijkheden te worden verkend om het stelsel van meten en berekenen van vliegtuiggeluid te verbeteren. De minister heeft daarvoor advies gevraagd aan een consortium van RIVM, NLR en KNMI. Dit rapport presenteert de resultaten van dit onderzoek.

Gedurende de verkenning hebben RIVM, KNMI en NLR met veel partijen gesproken, een uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd en ook via andere wegen informatie opgehaald. Daaruit is een helder beeld ontstaan van de problematiek en van de vele activiteiten die op dit terrein worden uitgevoerd. Ook maakt de verkenning duidelijk dat de maatschappelijke vraag naar verbetering groot is: er is wijdverbreid sprake van ongeduld. Er zijn veel technische mogelijkheden om te komen tot een stelsel van onderling corresponderende metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid, maar realisatie daarvan vergt een aanzienlijke inspanning. Ook ontbreekt het op dit moment aan een degelijke basisstructuur die naar de mening van RIVM, KNMI en NLR noodzakelijk is om de gewenste verbeteringen structureel door te kunnen voeren.

Om invulling te geven aan de verbeterwens van de minister presenteren we daarom, als resultaat van onze verkenning, op de eerste plaats een voorstel voor een uitvoeringsstructuur die de noodzakelijke basis vormt voor de uitrol van nieuwe activiteiten op het gebied van meten en berekenen van vliegtuiggeluid, en de communicatie hierover met de omgeving.

De voorgestelde uitvoeringsstructuur bevat een *operationeel* deel (i.e. uitvoering van een standaard werkpakket), met daarnaast een positie voor (*innovatief*) *toegepast* onderzoek. Een deskundige *adviesgroep* verbindt beide onderdelen. Het geheel levert de basiscondities voor een gereguleerd proces van continue verbetering. Daarmee wordt invulling gegeven aan een voortdurende focus op betrouwbare informatie, zoals beoogd door de minister.

Uitgaande van dit voorstel komt er rond elke luchthaven van nationale betekenis een meetsysteem voor het structureel uitvoeren van geluidmetingen, gekoppeld aan berekeningen. Deze benadering omvat ook het analyseren en duiden van de verschillen, het periodiek opleveren van geluidinformatie, het periodiek uitvoeren van hinderonderzoek, het ophalen in de regio van verbeterwensen en de vertaling van dit alles naar publieksinformatie. Alle taken in het standaard werkpakket worden transparant volgens 'state-of-the-art' werkvoorschriften uitgevoerd, gebruikmakend van een betrouwbare technische infrastructuur. Parallel aan de uitvoering van structurele taken vindt (innovatief) onderzoek plaats, met als uitdrukkelijk doel het (op termijn) verbeteren van de kwaliteit van de operationele taken. De scope van het verbeterprogramma moet de hele informatieketen dekken. Het gaat daarbij dus zowel om verbetering van meten en rekenen als om nader onderzoek naar beleving, hinder en gezondheid. Innovatief onderzoek is nodig om de burgers op termijn nog beter en betrouwbaarder te informeren en te beschermen.

Voor de verbinding tussen uitvoering en onderzoek wordt de instelling van een *wetenschappelijke adviesgroep* voorgesteld. Deze groep moet het vertrouwen hebben van alle stakeholders binnen dit domein en daarom deskundig, onafhankelijk, breed samengesteld en transparant zijn. Er zijn meerdere manieren om gestalte te geven aan de wijze van wetenschappelijke aansturing. In dit rapport wordt een specifiek voorbeeld uitgewerkt, waarbij de adviesgroep een sterk sturende rol heeft op zowel de uitvoering van operationele taken (meten, rekenen, data-analyse, informatievoorziening, interactie met de omgeving) als op het verbeterprogramma (opzet, aansturing en resultaatbeoordeling onderzoeksprogramma). Maar er zijn ook andere varianten mogelijk, bijvoorbeeld een waarbij het mandaat meer bij de uitvoerende instanties ligt en de adviesgroep eerder een toetsende functie heeft. Alle te kiezen varianten hebben hun eigen voor- en nadelen.

Voor zeven onderwerpen, inclusief aansturing, geven we in dit rapport concrete aanbevelingen. Samenvattend luiden die aanbevelingen:

1. *Meetstrategie*

Ontwikkel en implementeer een nationale meetstrategie. Daarin zijn visies opgenomen omtrent de verschillende meetdoelen en is per meetdoel vastgelegd waaraan metingen moeten voldoen. In het kader van de meetstrategie dient in nauw overleg met betrokkenen een 'is/wordt'-meetlocatietabel te worden uitgewerkt die het verband legt tussen de huidige en de gewenste situatie. Er wordt toegewerkt naar de situatie waarbij alle meetgegevens volgens overeengekomen format in een openbare nationale database zijn opgeslagen. Gekozen wordt voor een gefaseerde aanpak, uitgaande van de aanwezige infrastructuur en reeds lopende initiatieven. Voor innovatief onderzoek kan het nodig zijn om op een beperkt aantal locaties aanvullende metingen uit te voeren.

2. *Signaalfunctie*

Aanbevolen wordt een methodiek te ontwikkelen die een signaalfunctie vervult. Deze methodiek heeft als doel om op basis van meetgegevens te controleren of de resultaten van geluidberekeningen van de gewenste kwaliteit zijn. Deze

methodiek is van essentieel belang voor het uitvoeren van modelvalidatiestudies en, daarmee samenhangend, modelverbetering en ontwikkeling (zie aanbeveling 3).

3. *Modelontwikkeling*

Leg voor verschillende doeleinden de criteria vast waaraan modelberekeningen moeten voldoen. Start een structureel en langjarig modelvalidatie programma, met het focus op Doc29. Gebruik zo mogelijk bestaande meetsets en pas de signaalfunctiemethodiek toe om de kwaliteit van het rekenmodel te beoordelen voor en na aanpassing. Voor het verbeteren van rekenresultaten bestaan twee opties:

1. verbeter de modellering, op basis van bekende inzichten;
2. verbeter waar mogelijk de invoergegevens.

Indien Doc29, ook na verbetering, voor een bepaald doel onvoldoende resultaat biedt, kan het opportuun zijn om voor dat doel een nieuw type berekeningswijze te ontwikkelen en in te voeren.

4. *Publiekscommunicatie*

Verbeter de publiekscommunicatie over meten, rekenen, beleven en regelgeving van vliegtuiggeluid. Bied algemene informatie gecoördineerd aan, vanuit één goed vindbare weblocatie. Zorg ervoor dat de mogelijkheden en beperkingen van het meten en berekenen van vliegtuiggeluid helder uitgelegd worden en geef aan voor welke doeleinden beide methoden worden ingezet. Denk hierbij vanuit de optiek van wetenschapscommunicatie. Ontwikkel een nationale informatievoorziening waarin de resultaten van het berekenen en meten van de geluidbelasting en de beleving daarvan op verschillende manieren worden gepresenteerd. Onderzoek regelmatig de effectiviteit van de verschillende benaderingen en stel bij indien nodig. Houd bij de informatievoorziening rekening met verschillen in informatiebehoefte tussen de luchthavens.

5. *Hinder en gezondheid*

Implementeer het systematisch monitoren van geluidhinder en slaapverstoring rond luchthavens en zorg ervoor dat het monitoren van hinder en slaapverstoring wetenschappelijk verantwoord en volgens een standaard methode gebeurt. Gebruik deze gegevens om te onderzoeken of er aanvullende geluidindicatoren zijn die, naast L_{den} en L_{night} , beter aansluiten bij de manier waarop omwonenden de effecten van vliegtuiggeluid ervaren. Voor directe reacties op vliegtuigpassages (zoals tussentijds ontwaken, verstaanbaarheid van spraak) is al wel duidelijk dat deze ook mede beïnvloed worden door het aantal vliegtuigpassages en niet alleen afhankelijk zijn van de L_{night} of L_{den} . Verbeter in de toekomst de voorspelling van en informatie over hinder en slaapverstoring met resultaten uit onderzoek. Betrek in dit onderzoek de invloed van (het ontbreken van) stille periodes en verbeter het inzicht in de luchthaven-specifieke relatie tussen geluidbelasting en geluidhinder (dosis-effectrelatie) en de factoren die daarop van invloed zijn.

6. *Citizen science*

Betrek de omgeving met 'citizen science' op een gestructureerde manier bij het opzetten van een aanvullend meetprogramma. Faciliteer citizen science-projecten voor specifieke groepen. Dit

kunnen bijvoorbeeld hoogrisicogroepen zijn, zoals burgers die dicht bij een start- of landingsbaan wonen, of burgers met specifieke persoonskenmerken zoals een verhoogde gevoeligheid voor omgevingsgeluid. Doel van deze activiteiten is enerzijds het verkrijgen van bruikbare meetgegevens en anderzijds het vergroten van het begrip van het systeem van meten en rekenen. Aanvullend geldt dat op deze wijze gebouwd kan worden aan de relatie tussen burgers en overheden. Dit proces kan ondersteund worden door de eerder genoemde site met publieks- en wetenschapscommunicatie over de mogelijkheden en beperkingen van meten en rekenen.

7. *Wetenschappelijke aansturing*

Zorg rond vliegtuiggeluid voor onafhankelijke deskundigheid om (1) de kwaliteit en juistheid van de uitvoering van structurele werkzaamheden, en (2) de kwaliteit en voortgang van het verbetertraject te toetsen en te borgen. Organiseer dit structureel en transparant, zodat er bij alle partijen inzicht en vertrouwen is in de uitvoeringspraktijk en in de daaruit voortvloeiende resultaten. Aan de taken en het mandaat van de 'wetenschappelijke advies groep' die hier zorg voor draagt, kunnen verschillende invullingen gegeven worden. Keuzes betreffen onder meer 'besluiten' versus 'adviseren' en 'op voorhand voorschrijven' versus 'achteraf toetsen'. Aanbevolen wordt om het takenpakket en het mandaat van de adviesgroep in de uitwerkfase van de Programmatistische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid nader in te vullen, met oog voor technische, juridische en maatschappelijke aspecten en de positionering van deze groep in het grotere geheel van *governance* in het dossier luchtvaart.

In het verleden hebben metingen nooit een formele rol gespeeld, vanwege praktische, beleidsmatige en operationele belemmeringen. Deze rapportage bevat aanbevelingen om spoedig vorm te geven aan het daadwerkelijk uitvoeren en praktisch toepassen van geluidmetingen. Technisch gezien kan dit snel en voortvarend opgepakt worden. Het verleden heeft echter ook geleerd dat consensus over de aanpak essentieel is en meer tijd kan vragen.

1 Introductie

1.1 Aanleiding

In een druk bevolkt land als Nederland leidt geluid als gevolg van menselijk handelen vaak tot overlast. Als gekeken wordt naar de oorzaken van geluidhinder, dan staat in de Inventarisatie Verstoringen 2016 *vliegverkeer* op de derde plaats, na *wegverkeer* en *buren* (Van Poll et al. 2018). Deze top-3 is gelijk aan de volgorde die in eerdere inventarisaties van verstoringen werd gevonden. De hoge hinderscore voor het geluid van vliegverkeer en de gestage groei in het aantal vliegbewegingen zijn er de oorzaak van dat geluidbelasting door vliegverkeer al decennia lang veel aandacht vraagt, zowel maatschappelijk als bestuurlijk.

In de afgelopen periode is er binnen dit thema discussie ontstaan over de wijze waarop de geluidbelasting door vliegverkeer bepaald wordt. Tot op heden is de wet- en regelgeving en de uitvoering gebaseerd op berekeningen. Rond de meeste luchthavens in Nederland worden weliswaar geluidmetingen uitgevoerd, maar die hebben uitsluitend een informatieve functie: lokaal uitgevoerde metingen spelen momenteel geen rol in regelgeving en handhaving. In een brief aan de Tweede Kamer heeft de minister van Infrastructuur en Waterstaat de toezegging gedaan om een Programmatische Aanpak van het Meten van Vliegtuiggeluid (PAMV) te starten (Min IenW 2018). Op basis van verschillende uitgevoerde onderzoeken, waarbij vergelijkingen gemaakt zijn tussen meten en berekenen van vliegtuiggeluid, heeft het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat geconstateerd dat er *'aanknopingspunten zijn om de rol van metingen in relatie tot de geluidberekeningen te vergroten, om zo de metingen en berekeningen onderling te versterken'*.¹ Met de PAMV wil de minister de berekeningen en de metingen van vliegtuiggeluid verbeteren en beide methodes onderling versterken. De op die manier verkregen gegevens over de geluidbelasting door vliegverkeer moeten voor iedereen herkenbaar en betrouwbaar zijn en moeten een solide basis vormen voor informatie aan burgers en het maken van weloverwogen beleidskeuzes. Naast meten en berekenen wordt in de PAMV ook aandacht besteed aan beleving (hinder) van vliegtuiggeluid. In een vervolgnota aan de Tweede Kamer zijn deze plannen nader toegelicht (Min IenW 2019). De PAMV bestaat uit meerdere fases:

1. een verkenning;
2. de uitwerking;
3. de realisatie.

De vragenlijst voor de verkenningsfase is opgenomen in Bijlage 1.

1.2 Opdracht aan RIVM, NLR en KNMI

Als onderdeel van de eerste fase van de PAMV heeft het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat aan de kennisinstituten RIVM, NLR en KNMI gevraagd om, rekening houdend met de nieuwste wetenschappelijke en internationale inzichten, een verkenning uit te

¹ Zie het Projectplan Meten en berekenen vliegtuiggeluid, dat als bijlage is toegevoegd aan (Min I&W 2019).

voeren naar verbetermogelijkheden bij het meten en berekenen van vliegtuiggeluid. Deze verkenning moet de basis vormen voor de ontwikkeling van een optimale en voor iedereen betrouwbare meet- en rekenmethodiek. Een groep van onafhankelijke (inter)nationale experts op het gebied van geluidbelasting en geluidhinder van vliegverkeer is gevraagd om te reflecteren op de aanpak en de concept-resultaten van de verkenning. De resultaten van deze studie dienden in het najaar van 2019 beschikbaar te zijn.

Bij de verkenning gaat het om vraagstukken als:

- Wat zijn de voordelen en beperkingen van geluidmetingen van vliegverkeer? Voor welke doeleinden kun je metingen inzetten, en welke voorwaarden hangen daarmee samen? Hoe doen ze dat in het buitenland en wat kunnen wij daarvan leren?
- Welke modellen worden momenteel gebruikt voor de berekening van vliegtuiggeluid, en voor welke doeleinden precies? Wat zijn reële opties om geluidberekening van vliegverkeer te verbeteren?
- Wat weten we momenteel over geluidhinder en over de effecten daarvan op gezondheid en welzijn? En wat betekent dit voor geluidmetingen?
- Met welke wensen van 'omwonenden' en 'onderwonenden' moeten we rekening houden bij het meten en berekenen van vliegtuiggeluid? Hoe kunnen we de publieksinformatie verbeteren?
- Welke eisen moet je stellen aan het beheer en de verdere ontwikkeling van een meet- en rekenmethodiek vliegtuiggeluid? Hoe kun je de continue verbetering van zo'n systeem goed vormgeven?

De minister noemt in de brief van 18 oktober 2018 als beoogd resultaat dat het PAMV moet bijdragen aan het vergroten van het vertrouwen in de bepaling van het omgevingsgeluid van vliegtuigen (Min IenW 2018).

1.3 Afbakening

Deze verkenning beperkt zich tot situaties rond de Nederlandse luchthavens 'van nationale betekenis'² (zie Figuur 1). Regionale luchthavens, waar overwegend sprake is van zogenoemd 'klein verkeer',³ zijn niet meegenomen. Die inperking is gemaakt omdat er voor 'klein verkeer' weinig prestatiegegevens beschikbaar zijn, de geluidbelasting door klein verkeer in de regel lager is en omdat de geluidniveaus van klein verkeer moeilijker te meten zijn (zie voor meer uitleg sectie 4.5.2.2). Luchthavens van Defensie worden niet meegenomen in dit onderzoek, tenzij daar sprake is van civiel medegebruik. Dat is het geval bij vliegveld Eindhoven. Verder wordt uitgegaan van de nu voorgeschreven en gebruikte rekenmodellen (Doc29 voor Schiphol en het Nationaal Rekenmodel (NRM) voor de andere luchthavens). Wel is rekening gehouden met de plannen voor de uitrol van Doc29 voor andere luchthavens. Grondgeluid wordt in deze studie niet meegenomen. De verkenning gaat dus over de geluidproductie, van start tot en met het

² Luchthavens van nationale betekenis zijn die luchthavens in Nederland (Schiphol, Rotterdam, Maastricht, Eelde en Lelystad) waarbij de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) toezicht houdt op zowel veiligheid als milieu.

³ Klein verkeer heeft betrekking op vliegtuigtypes (met uitzondering van 'jet'-vliegtuigen) met een maximaal startgewicht van tussen de 150 en 6000 kilogram.

moment dat de landingsprocedure is afgerond,⁴ van vliegtuigen in de categorie burgerluchtvaart.



Figuur 1. Schiphol, Vliegveld Eindhoven en de regionale burgerluchthavens van nationale betekenis (Eelde, Lelystad, Maastricht en Rotterdam). Het oppervlak van de dichte bollen is evenredig met het aantal vliegbewegingen (CBS 2019). De grootte van de open marker op locatie Lelystad is indicatief voor het verwachte aantal vliegbewegingen in de komende jaren.

1.4 Leeswijzer

In deze gezamenlijke rapportage van RIVM, NLR en KNMI worden de resultaten gepresenteerd van een verkenning naar mogelijkheden om het meten en berekenen van vliegtuiggeluid te verbeteren. Deze studie maakt deel uit van de eerste fase van de Programmatische Aanpak van het Meten van Vliegtuiggeluid (PAMV).

Na een beschrijving van de aanleiding en afbakening van deze studie (dit hoofdstuk) biedt hoofdstuk 2 een overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen van de afgelopen decennia met betrekking tot vliegtuiggeluid rond luchthavens voor burgerluchtvaart. In dat hoofdstuk worden veel gebruikte geluidmaten geïntroduceerd en worden de stelsels toegelicht die de basis vorm(d)en voor regelgeving en handhaving.

In hoofdstuk 3 ligt het accent op de beleving van geluid en worden vragen behandeld als: Wat bepaalt nu dat geluid als hinder ervaren wordt? Wat weten we over de relatie tussen geluidhinder en gezondheidseffecten? Welke akoestische grootheden kunnen dienen als indicator voor geluidhinder, en wat zijn daarvan de voordelen, nadelen en beperkingen? Dit hoofdstuk vat samen wat er momenteel bekend is over dit thema en signaleert witte vlekken in de kennis. Ook bespreken

⁴ Het taxiën van vliegtuigen wordt dus niet meegenomen, maar bijvoorbeeld het gebruik van 'thrust-reverse' tijdens de landing valt wel binnen de scope.

we de mogelijkheden van burgerparticipatie met betrekking tot vliegtuiggeluid.

Hoofdstuk 4 beschrijft wat nodig is om goede berekeningen van geluid van vliegverkeer uit te kunnen voeren, welke modellen daarvoor in Nederland in gebruik zijn en voor welke doelen die modellen momenteel worden ingezet. Ook wordt gekeken hoe men hier in het buitenland mee omgaat. Ten slotte wordt, voor de korte en langere termijn, een opsomming gegeven van mogelijkheden om de geluidmodellering van vliegverkeer te verbeteren.

In hoofdstuk 5 wordt op een vergelijkbare manier gekeken naar het meten van geluid van vliegverkeer. Voor welke doelen kun je metingen inzetten, welke eisen hangen daarmee samen, wat gebeurt er op dit moment al, en wat zijn reële verbetermogelijkheden? Ook nemen we in dit hoofdstuk buitenlandse ervaringen mee.

In hoofdstuk 6 bespreken we de mogelijkheden van diverse combinaties van meten en rekenen, inclusief het verbeteren van rekenmodellen met behulp van metingen.

Vanuit de brede achtergrond, zoals geschetst in de hoofdstukken 3, 4, 5 en 6, presenteren we in hoofdstuk 7 een voorstel voor een uitvoeringsstructuur voor het meten en berekenen van vliegtuiggeluid, en de interactie hierover met de omgeving. Deze uitvoeringsstructuur levert de basiscondities voor een proces van continue verbetering. Ten slotte presenteren we aanbevelingen voor zeven specifieke onderwerpen binnen het grotere geheel (meetstrategie, signaalfunctie, modelontwikkeling, publiekscommunicatie, hinder en gezondheid, citizen science en wetenschappelijke aansturing).

1.5 Maten voor geluid

Door de jaren heen zijn er verschillende maten gebruikt voor het weergeven van het geluidniveau (geluid per individuele vliegbeweging) en de geluidbelasting (geluid over een langere periode, doorgaans een jaar) door vliegtuiggeluid. Hieronder worden ze kort toegelicht.

BKL

De BKL (Belastingeenheid kleine luchtvaart) is een specifiek voor de kleine luchtvaart ontwikkelde etmaalwaarde, geldend buitenshuis. De eenheid is, net als bij $L_{Aeq-nacht}$ het geval is, gebaseerd op de geluidproductie van volledige passages. Dat maakt de BKL geschikt voor toepassing bij kleinere luchthavens, waar vliegtuigen vaak rondjes in de buurt maken.

dB(A)

De hoeveelheid geluid wordt uitgedrukt in decibellen (dB). Geluidmaten voor vliegtuiggeluid worden uitgedrukt in 'A-gewogen decibel', ofwel dB(A). Door deze weging tellen vooral lagere frequenties net als bij het menselijk gehoor minder zwaar mee. De decibel is een logaritmische eenheid die gehanteerd wordt bij geluid.

Ke

Ke staat voor Kosteneenheid. De Ke bevat drie elementen die bijdragen aan de ervaren geluidbelasting *buitenshuis*, namelijk (1) het aantal vliegbewegingen, (2) de maximale hoeveelheid geluid (LA_{max}) per vliegbeweging en (3) het tijdstip van de dag waarop het vliegtuig overkomt.

 $L_{Aeq-nacht}$

Waar de Ke een maat is voor geluidniveaus buitenshuis, is de $L_{Aeq-nacht}$ een maat voor het geluid van nachtelijke passages *binnenshuis* (in de slaapkamer). Bij de bepaling van de $L_{Aeq-nacht}$ wordt het verloop van het geluidniveau gedurende de *gehele passage* meegenomen, dit in tegenstelling tot de Ke waar alleen het maximale geluidniveau wordt meegenomen. Om een waarde voor binnen te krijgen wordt rekening gehouden met *geveldemping*. Voor starts en landingen gelden verschillende waarden voor de demping. Tot slot zijn naast de waarden voor de geveldemping voor Schiphol ook waarden vastgesteld voor Maastricht.

 LA_{max}

De LA_{max} is het maximale geluidniveau dat gedurende een bepaalde tijdsperiode is vastgesteld. Meestal wordt gesproken over de LA_{max} van een individuele vliegbeweging.

 L_{den}

De L_{den} is een dosismaat die onder andere gehanteerd wordt in EU regelgeving. De 'den' staat voor 'day-evening-night'. Het is een etmaalwaarde met verschillende wegingen voor dag, avond en nacht, waarbij het verloop van het geluidniveau gedurende de gehele passage wordt meegenomen, maar in tegenstelling tot $L_{Aeq-nacht}$ wordt de L_{den} bepaald op basis van de geluidniveaus buitenshuis.

 L_{night}

Ook dit is een in Europa gehanteerde dosismaat. De L_{night} is op een vergelijkbare wijze gedefinieerd als de L_{den} (dus gebaseerd op geluidniveaus buitenshuis), maar dan alleen voor de nacht, en zonder toepassing van weegfactoren.

 NA_x

De NA_x is het aantal vliegbewegingen per tijdsperiode (bijvoorbeeld een jaar) waarbij het maximale geluidniveau (LA_{max}) een bepaalde waarde x , uitgedrukt in dB(A), overschrijdt. Dit wordt aangeduid met Number-Above. In onderzoeken wordt veelal de NA_{60} , NA_{65} , NA_{70} als indicator gebruikt.

SEL

Het sound exposure level (SEL) is het geluiddrukkniveau dat gedurende 1s dezelfde hoeveelheid energie (dosis) vertegenwoordigt als het werkelijke geluid gedurende een periode, bijvoorbeeld een vliegtuigpassage. Het is de basis voor de berekening van onder andere de L_{den} en de L_{night} .

TAx

Om de duur van vliegbewegingen boven een bepaald geluidniveau weer te geven, wordt de TAx (Time-Above x dB(A)) gebruikt. De TAx is de tijdsduur in bijvoorbeeld een jaar dat een bepaald geluidniveau door vliegtuigpassages wordt overschreden op een bepaalde plek (in seconden).

2 Historisch overzicht omgevingsgeluid luchthavens

2.1 Introductie

De bepaling van de geluidbelasting rond luchthavens en de bescherming van burgers tegen de hinder daarvan kent een lange geschiedenis in Nederland (Van Deventer 2007). De problematiek van vliegtuiggeluid openbaarde zich voor het eerst in de buurt van Schiphol. Al begin jaren zestig van de vorige eeuw hield een commissie onder leiding van Professor Kosten een aantal enquêtes over de woonbeleving rond Schiphol. In het eindrapport, dat in 1967 uitkwam, adviseerde de commissie om voor de regulering van vliegtuiggeluid een systematiek van geluidzoning in te voeren. In 1980 werd daartoe besloten. Met deze systematiek van geluidzoning was het eerste stelsel ontstaan waarmee de geluidruimte rond Schiphol gereguleerd werd. Het zou in deze vorm standhouden tot 1995.

De systematiek over hoe om te gaan met de geluidruimte rond Schiphol is daarna twee keer fundamenteel aangepast. Zoals hierboven beschreven was het eerste stelsel (van 1980 tot 1995) gebaseerd op een zoneringsystematiek. In 1995 stapte men over op een systematiek met handhavingspunten. Daarna is een derde stelsel ontwikkeld, dat gebaseerd is op 'preferent vliegen' en een toetsing aan 'criteria voor gelijkwaardige bescherming'. Hoewel er al vele jaren 'preferent' gevlogen wordt, geldt formeel nog steeds het stelsel met handhavingspunten. Voor andere luchthavens dan Schiphol hebben zich ook systeemwijzigingen voorgedaan, met name ten tijde van de invoering van de Wet Regelgeving Burgerluchthavens en Militaire Luchthavens (RBML 2008). In de secties 2.2 (Schiphol) en 2.3 (andere luchthavens) wordt dit nader toegelicht.

De milieuregels betreffende geluidhinder zijn bij regionale luchthavens opgenomen in zogenoemde luchthavenbesluiten (LHB's) en bij Schiphol in het Luchthavenindelingbesluit en het Luchthavenverkeersbesluit (LIB-Schiphol 2002, LVB-Schiphol 2002). In de betreffende besluiten zijn de jaarlijkse geluidruimtes vastgelegd waarbinnen de luchthavens mogen opereren. Het uitgangspunt van een geluidruimte is, dat als het geluidniveau per vliegbeweging lager is, er meer vliegbewegingen in de geluidruimte passen. Omgekeerd geldt dit ook, als het geluidniveau per vliegbeweging hoger is, dan passen er minder vliegbewegingen in de geluidruimte.

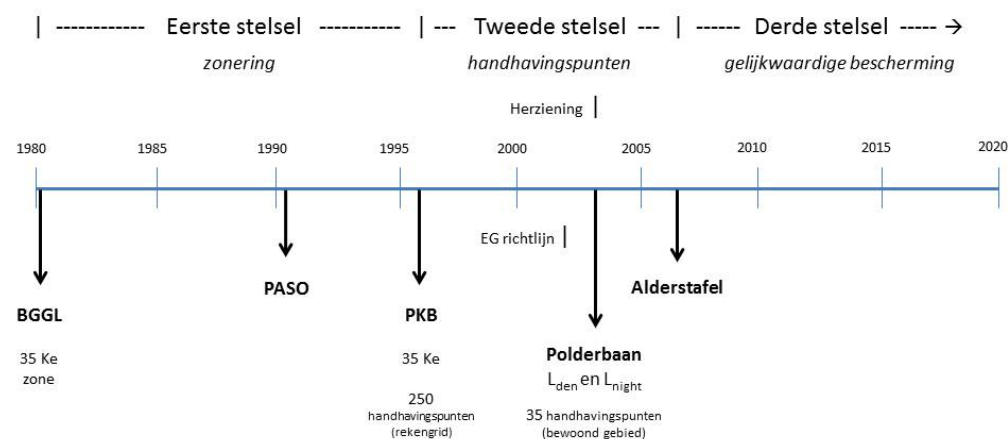
De geluidbelasting, zoals gehanteerd binnen LHB's, LIB en LVB, is gebaseerd op berekeningen. De berekende geluidbelasting is onderdeel van een stelsel van afspraken waarmee eenduidig het beschermingsniveau is vastgelegd. Achteraf kan getoetst worden of dat beschermingsniveau wel of niet overschreden is. Met de voorgeschreven rekensystematiek kan ook bepaald worden wat de effecten zijn van (voorgenomen) veranderingen in luchthavenoperaties, zoals het in gebruik nemen van een nieuwe baan. De geluidbelasting wordt met een wettelijk voorgeschreven rekenmodel berekend. De manier waarop gerekend moet worden is nauwkeurig voorgeschreven, met als doel dat,

onafhankelijk van wie de berekeningen uitvoert, er bij een bepaald scenario en met dezelfde invoerdata, altijd hetzelfde resultaat uit komt (zie hoofdstuk 4 voor meer uitleg over de manier van rekenen). Het gebruikte rekenmodel is niet per se het meest geavanceerde en accurate model: omdat het voor regelgeving en handhavingsdoelen toegepast wordt, moet het vooral robuust en operationeel betrouwbaar zijn.

In de volgende sectie worden de ontwikkelingen sinds 1980 rond Schiphol nader toegelicht. In sectie 2.3 wordt vervolgens ingegaan op andere Nederlandse luchthavens voor civiel vliegverkeer.

2.2 Ontwikkelingen rond Schiphol sinds 1980

In Figuur 2 zijn de belangrijkste gebeurtenissen rond Schiphol sinds 1980 chronologisch weergegeven. Deze gebeurtenissen worden hieronder nader toegelicht.



Figuur 2. Belangrijke gebeurtenissen in de regelgeving rond Schiphol sinds 1980. BGGL: Besluit Geluidsbelasting Grote Luchtvaartterreinen; PASO: Plan van Aanpak Schiphol en Omgeving; PKB: Planologische Kernbeslissing Schiphol en Omgeving.

2.2.1 Zoneringsystematiek

In het eindrapport van de commissie Kosten, dat in 1967 uitkwam, werd voor het eerst een maat voor de totale geluidbelasting van vliegverkeer geïntroduceerd, die naar de voorzitter van de commissie *Kosten-eenheid* (Ke) genoemd werd. De commissie adviseerde om voor de regulering van vliegtuiggeluid een systematiek van geluidzonering in te voeren. In 1980 werd daartoe besloten: in het Besluit Geluidsbelasting Grote Luchtvaartterreinen (BGGL) werd een grenswaarde vastgelegd van 35 Ke, waarbij werd aangetekend dat dit een matige vorm van bescherming betrof: bij 35 Ke ondervond namelijk 25% van de bevolking ernstige geluidhinder. Binnen de 35 Ke-zone werd daarom geen nieuwbouw toegestaan. Woningen gelegen binnen de 40 Ke contour kregen geluidisolatie. Naast zonering op basis van de Ke hanteerde men ook zonering op basis van geluidniveaus gedurende de nacht, de $L_{Aeq-nacht}$ -zones.

De handhaving gebaseerd op een zone bleek in de praktijk tot veel discussie te leiden. Daarom is men in 1995 overgestapt naar een systematiek gebaseerd op handhavingspunten.

2.2.2 *Systematiek met handhavingspunten*

Op 20 december 1995 is de Planologische Kernbeslissing Schiphol en Omgeving (PKB) gepubliceerd (PKB (3-8) 1995, PKB (3-9) 1995). Binnen het PKB is de politieke afweging gemaakt dat er 10.000 woningen binnen de berekende 35 Ke-contour mogen staan. Bij de bepaling van dit woningaantal is uitgegaan van het woningenbestand uit 1990. Dat was namelijk vastgelegd in een in 1991 gesloten convenant tussen overheden en luchtvaartsector, het zogenoemde Plan van Aanpak Schiphol en Omgeving (PASO 1991).

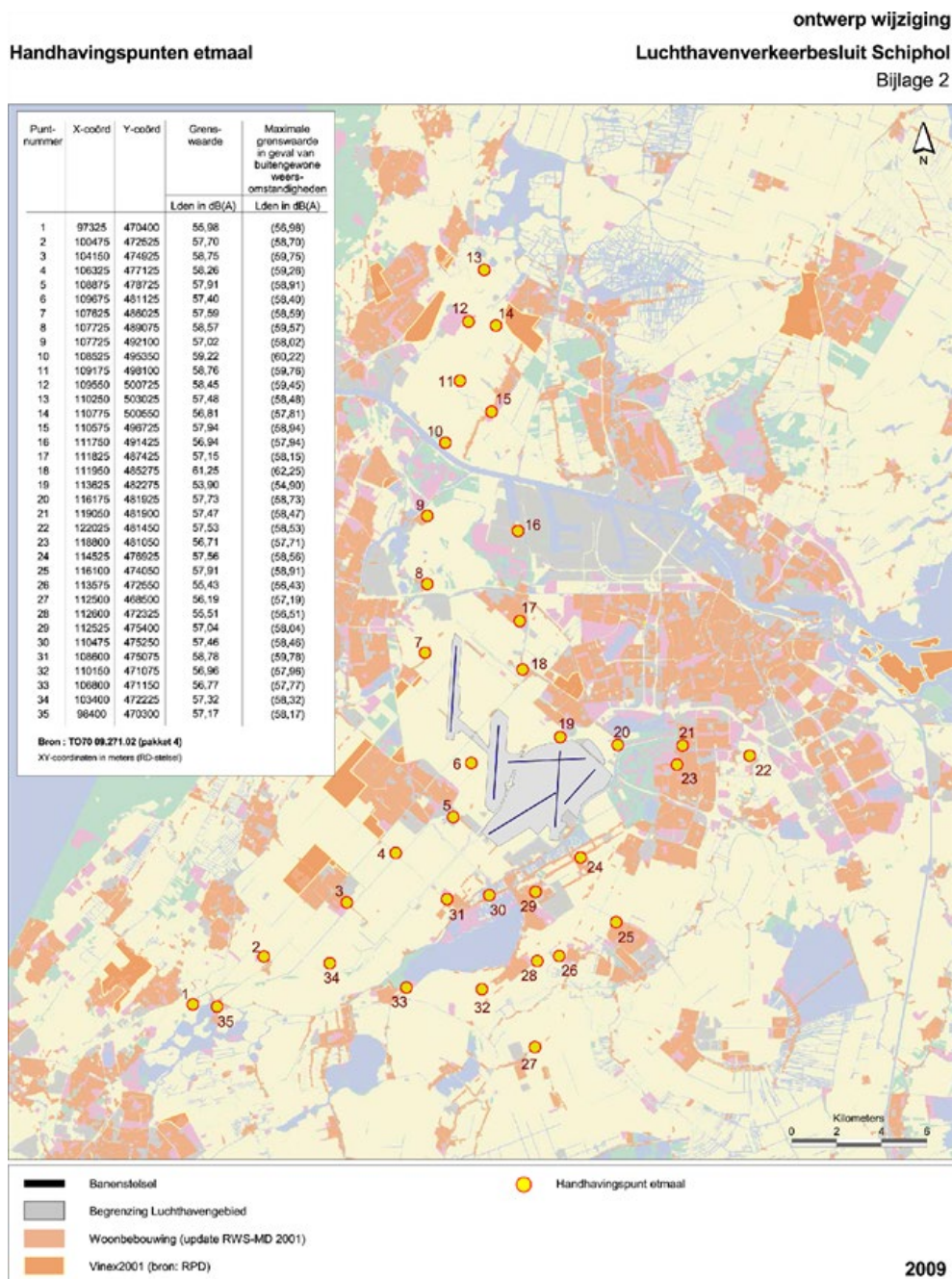
Maar voor de handhaving van het vliegtuiggeluid werden in 1995 de geluidzones vervangen door specifieke handhavingspunten. Op deze handhavingspunten zouden computers efficiënt en reproduceerbaar de geluidbelasting berekenen. In eerste instantie ging het om 250 handhavingspunten die op 500 meter van elkaar rond de 35 Ke-contour lagen. Veel van deze punten lagen in onbewoond gebied. Toen het tweede stelsel al geruime tijd in gebruik was, zijn daarom, in plaats van de oorspronkelijke 250 handhavingspunten, 35 handhavingspunten vastgelegd in woongebieden rondom Schiphol. Deze herziening is in 2003 van kracht geworden, tegelijk met de opening van de Polderbaan. Deze 35 handhavingspunten zijn nog steeds terug te vinden in het huidige luchthavenverkeerbesluit van Schiphol (LVB-Schiphol 2002), zie Figuur 3.

Bij invoering van het herziene stelsel, in 2003, zijn ook de geluidmaten vervangen voor de bepaling van de geluidbelasting van vliegtuiggeluid: in plaats van in Ke en $L_{Aeq-nacht}$ wordt de geluidbelasting vanaf dat moment uitgedrukt in L_{den} en L_{night} . In Europees verband was namelijk afgesproken om deze maten in alle EU-landen in te voeren voor het maken van geluidkaarten rondom vliegvelden (EG 2002).

2.2.3 *Systematiek gebaseerd op criteria voor gelijkwaardige bescherming*

Maar ook het stelsel met handhavingspunten kwam onder druk te staan. De strak gereguleerde geluidruimte beknelde de vliegoperaties en belemmerde de luchthaven om met zo min mogelijk geluidoverlast voor de omgeving te vliegen. In het stelsel met de 35 handhavingspunten moest soms over woongebieden worden gevlogen omdat de geluidruimte elders niet meer toereikend was.

In 2007 werd de Alderstafel (vernoemd naar Hans Alders) ingesteld: omgeving en sector zouden samen vorm gaan geven aan een nieuw stelsel. Het doel was 'duurzame' groei mogelijk te maken bij een gelijkwaardige bescherming, of *bé*ter. Het zogenoemde *preferent* vliegen kwam hierbij centraal te staan. Afhankelijk van de windrichting dienden voorkeursbanen te worden ingezet, zodanig dat vooral die routes worden gevlogen die zo min mogelijk over dicht bewoond gebied lopen. Gebieden met minder bewoners worden dan meer belast en gebieden met relatief veel bewoners worden minder belast. Zo kan operationele groei plaatsvinden met een zo klein mogelijke toename van het aantal ernstig gehinderden. Inmiddels wordt er al vele jaren 'preferent' gevlogen, maar formeel is het stelsel met handhavingspunten nog steeds van kracht.



Figuur 3. Handhavingspunten met L_{den} -grenswaarden uit het luchthavenverkeerbesluit van Schiphol (LVB-Schiphol 2002).

De oorspronkelijke criteria zijn te herleiden naar de beslissing ten tijde van de Planologische Kernbeslissing Schiphol en omgeving (PKB). Tot 2007 waren deze criteria vooral van planologisch belang; ze werden niet gebruikt voor de handhaving van het geluid geproduceerd door de luchthaven. In het tijdspad van 1995 tot nu zijn deze criteria een aantal keren geactualiseerd.

In het eerste LVB van 2002 zijn die criteria als volgt vastgelegd: binnen de 35 Ke-zone mogen 10.000 woningen staan (volgens het woningenbestand van 1990) en binnen de 20 Ke contour mogen

maximaal 33.500 personen ernstig gehinderd worden. Op basis van de berekende geluidbelasting over een gebruiksjaar (periode november t/m oktober), kon vervolgens na elk gebruiksjaar het aantal woningen binnen de 35 Ke-zone en het aantal ernstig gehinderden binnen de 20 Ke contour bepaald worden. Zie (Staatsen et al. 1993) voor gegevens over het woningenbestand en de dosis-effectrelatie zoals gevonden in de Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol.

Om handhaving aan de hand van deze criteria mogelijk te maken met L_{den} berekeningen, moest een vertaling gemaakt worden naar de nieuwe geluidmaten. Zo is bijvoorbeeld de L_{den} contour van 58 dB(A) gekozen als vervanger van de eerder gebruikte 35 Ke contour. Voor de omzetting van 35 Ke naar de geluidbelasting in termen van L_{den} bestaat echter geen exacte formule. De conversie van 35 Ke naar 58 dB(A) is dus een beleidsmatige keuze geweest, waarbij gezocht is naar de L_{den} contour die het beste paste bij de 35 Ke contour.

Tabel 1. Conversie van criteria voor geluidoverlast volgens het principe van gelijkwaardige bescherming (ESB 2007)

Aantal woningen met een hoge geluidbelasting (etmaal)

van	bescherming door 1e LVB	naar	geactualiseerd criterium
	woningbestand 1990	verbeterde modellering	woningbestand 2005
woningen	10 000 35 Ke	10 800 35 Ke	14 500 35 Ke
			12 300 58 dB(A) L_{den}

Aantal omwonenden dat ernstig wordt gehinderd door vliegtuiggeluid

Van	bescherming door 1e LVB	naar	geactualiseerd criterium
	woningbestand 1990	verbeterde modellering	woningbestand 2005
omwonenden met ernstige hinder	33 500 ¹ 20 Ke	40 500 20 Ke	47 500 20 Ke
			77 000 52 dB(A) L_{den}
			239 500 48 dB(A) L_{den}

¹ Dit getal wijkt af van het aantal dat genoemd wordt in bijlage 4 van het Kabinetstandpunt Schiphol (april 2006). Het getal van 35 500 dat daar genoemd wordt is onjuist.

Tabel 1 toont het verloop van de geluidcriteria voor gelijkwaardige bescherming tussen 1990 en 2006, zoals gemeld in de Tweede Kamerbrief Evaluatie Schiphol Beleid (ESB 2007).

De toets of Schiphol binnen de geluidruimte blijft, gebeurt in het NNHS tweemaal, namelijk vooraf en achteraf. Vooraf wordt dat gedaan met het zogenoemde *Maximale Hoeveelheid Geluid* (MHG). Het MHG stelt vast wat de maximale hoeveelheid geluid is, passend bij het verwachte verkeer en binnen de criteria voor gelijkwaardigheid. Na afloop van een gebruiksjaar wordt bepaald in hoeverre het daadwerkelijke gebruik van de luchthaven (feitelijke samenstelling vloot, feitelijk gebruik start- en landingsbanen, etc.) leidt tot een overschrijding van de normen. Zie bijvoorbeeld (AAS 2014) voor meer informatie over de MHG. Daarnaast gelden in het NNHS afspraken over het gebruik van de luchthaven, met name met betrekking tot het gebruik van start en landingsbanen.

2.2.4

Metten of rekenen?

Voorafgaand aan de invoering van het herziene stelsel in 2003 bestond het idee om het stelsel op termijn geschikt te maken voor *metingen* van geluid of voor *een combinatie van meten en berekenen* (TNL nota 1999, TNL 3 2000). Net voor de invoering heeft het NLR een analyse

uitgevoerd naar de verschillen tussen meten en berekenen, uitgedrukt in L_{den} waarden (Galis 2000). Het NLR maakte daarvoor gebruik van meetgegevens verkregen met het zogenoemde *Noise Monitoring System* rond Schiphol, kortweg NOMOS genoemd, dat in 1993 in gebruik is genomen. Het NLR concludeert dat voor de beschouwde NOMOS-locaties de verschillen in gemeten en berekende L_{den} waarden tussen -5 en 2 dB(A) liggen. Het rapport gaat niet in op de inzetbaarheid van metingen binnen het stelsel. Het in 2003 herziene stelsel maakt geen gebruik van metingen.

De roep om metingen in te zetten voor handhaving bleef echter bestaan. In 2006 heeft de Commissie Deskundigen Vliegtuiggeluid (CDV) in dit kader haar rapport 'Luid maar duidelijk' uitgebracht (Eversdijk et al. 2006). Hierin worden aanbevelingen gedaan om geluidmetingen niet te gebruiken voor handhaving, omwille van juridische en praktische bezwaren. De commissie raadt wel aan om meer met metingen te doen en adviseert om, voor andere doeleinden dan handhaving, gebruik te maken van een methode die meten en rekenen combineert. Aan deze aanbevelingen is nooit invulling gegeven. De metingen die momenteel uitgevoerd worden hebben voornamelijk een informatief karakter.⁵

2.3 Ontwikkelingen rond andere Nederlandse luchthavens

Om de huidige situatie rond de andere luchthavens voor burgerluchtvaart in Nederland te begrijpen, moeten we terug naar 1 november 2009. Op dat moment werd namelijk de Regelgeving Burgerluchthavens en Militaire Luchthavens (RBML) van kracht, en verschoven bevoegdheden van het Rijk naar de provincies (RBML 2008). Tegelijkertijd startte een traject voor de omzetting van de luchthavenbesluiten. De geluidmaat Ke werd toen vervangen⁶ door L_{den} en de zoneringsystematiek (35 Ke en 47 BKL) werd vervangen door een systematiek gebaseerd op handhavingspunten.

2.3.1 Bevoegdheden

Zoals gezegd zorgde de RBML voor decentralisatie van regionale luchthavens. De provincie kreeg de bevoegdheid om te besluiten over de milieuruimte en ging daarmee dus ook over de handhaving van het geluid. Voor enkele luchthavens is ervoor gekozen om het bevoegd gezag bij het Rijk te laten. Dit zijn de luchthavens van nationale betekenis: Rotterdam, Maastricht, Eelde (Groningen) en Lelystad (Art. 8.1 Wet Luchtvaart) (WL 1992). Deze luchthavens zijn (nu of in de toekomst) in staat om internationale vluchten en grote toestellen te ontvangen.

Naast de luchthavens van nationale betekenis heeft Vliegveld Eindhoven een speciale status: het is een militaire luchthaven met civiel medegebruik⁷. Door deze status moet deze luchthaven voldoen aan regelgeving voor militaire luchthavens en is de minister van Defensie verantwoordelijk voor het handhaven van het geluid door vliegverkeer.

⁵ Zie in dit kader ook (Bergmans et al. 2014).

⁶ Bij Vliegveld Eindhoven is dit niet het geval, omdat dit een vliegveld is voor zowel militair als civiel gebruik.

⁷ Dit geldt ook voor Maritiem Vliegveld de Kooy.

2.3.2 *Geluidbelasting*

Waar oorspronkelijk de Ke werd gehanteerd voor de grote luchtvaart, werd er voor de kleine luchtvaart tot 2009 gerekend met een aparte maat voor de geluidbelasting, de BKL. Deze maat is met normen vastgelegd in het Besluit geluidsbelasting kleine luchtvaart (BGKL 1991). De BKL was net als de $L_{Aeq,nacht}$ gebaseerd op het verloop van het geluidniveau over het hele etmaal. Deze maat bleek voor luchthavens voor de kleine luchtvaart, zoals Texel of Seppe, beter aan te sluiten bij de hinderbeleving rond dergelijke vliegvelden. Het verschil in hinderbeleving rond luchthaven voor grote luchtvaart enerzijds en kleine luchtvaart anderzijds wordt vooral veroorzaakt door afwijkende vliegpatronen (Van Deventer 2004). Bij de omzettingen rond 2009 werd zowel de Ke als de BKL vervangen door de L_{den} .

Voor militaire luchthavens, en daarmee ook de luchthaven in Eindhoven, wordt de geluidbelasting tot op heden nog uitgedrukt in Ke (BSL 2009).

2.3.3 *Systematiek met handhavingspunten*

Bij de omzettingen rond 2009 werden ook de geluidzones vervangen door handhavingspunten ter handhaving van het vliegtuiggeluid. Deze handhavingspunten liggen op 100 meter van de uiteinden van beide zijden van de baan en op locaties waar de woonbebouwing een aaneengesloten karakter heeft in de nabijheid van de 56 dB(A) L_{den} geluidcontour. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om voor een specifieke regio handhavingspunten op andere locaties toe te voegen in het luchthavenbesluit. Tot op de dag van vandaag wordt gebruikgemaakt van deze methodiek van handhavingspunten.

Voor alle civiele Nederlandse vliegvelden anders dan Schiphol is ervoor gekozen om de 56 dB(A) L_{den} contour gelijk te stellen aan de oude 35 Ke contour. Dit is gedaan nadat voor al deze velden is onderzocht welke L_{den} contour het beste overeenkwam met de 35 Ke contour. Hierbij werd een bandbreedte van 54 tot 58 dB(A) gevonden, waarna besloten is om voor alle velden een gelijke waarde van 56 dB(A) te hanteren. Deze beleidsmatige keuze wijkt dus af van de omzetting bij Schiphol, waar de 35 Ke contour werd vervangen door de 58 dB(A) L_{den} contour.

3 De relatie tussen geluidbelasting en gezondheid

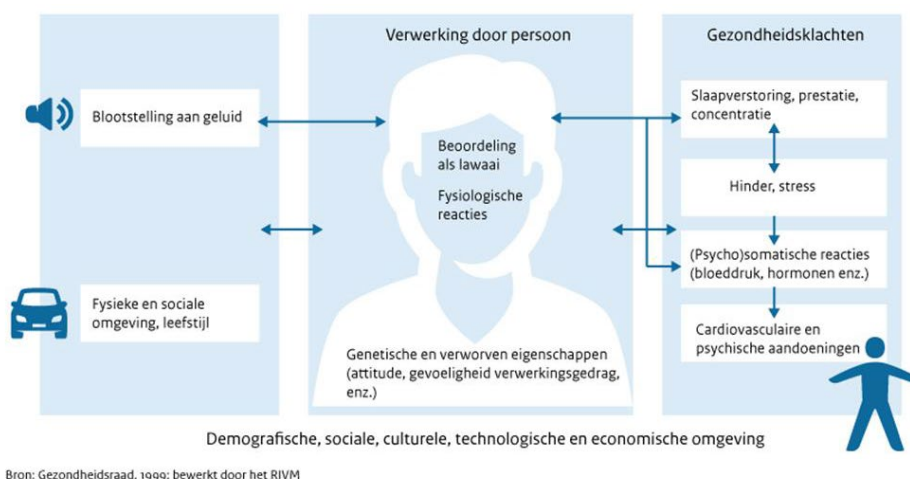
In dit hoofdstuk beschrijven we achtereenvolgens:

- de relatie tussen geluid en gezondheid (paragraaf 3.1);
- verschillende aspecten van geluidhinder (paragraaf 3.2);
- de geluidindicatoren die worden gebruikt om bescherming te bieden tegen ongewenste effecten (paragraaf 3.3);
- het perspectief van burgers op de betrouwbaarheid van berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid (paragraaf 3.4).

3.1 Geluid en gezondheid

Blootstelling aan (ongewenst) omgevingsgeluid kan uiteenlopende effecten op de gezondheid hebben. Of deze effecten optreden, hangt af van de intensiteit, frequentie, de duur van de blootstelling en de betekenis van het geluid. Maar ook andere aspecten spelen een rol. Het gaat daarbij om zaken die niet direct aan het geluid gerelateerd zijn. Denk dan aan de context waarin het geluid te horen valt, de manier waarop iemand over de bron van het geluid denkt, hoe iemand met geluid omgaat en ook angst en eventuele gevoeligheid voor geluid.

Bij bijeenkomsten met focusgroepen rond Schiphol bleken positieve en negatieve ervaringen geregeld samen te gaan als het gaat over Schiphol. Mensen kunnen prima tegelijkertijd de economische voordelen benoemen of het mooie beeld van landende vliegtuigen schetsen en zich toch gehinderd voelen door het geluid. In de discussies rond luchthavens gaat het vaak om deze specifieke vorm van beleving, en dan meestal nog verbijzonderd tot geluidhinder. Dat is niet vreemd, omdat het geluid een effect is dat – in elk geval in de ervaring van menigeen – veel andere effecten van een luchthaven overschaduwet (RIVM/RIGO 2005). Geluid leidt niet alleen tot nadelige effecten. Geluiden die als prettig ervaren worden en het ontbreken van ongewenst geluid hebben mogelijk juist een positief effect op de gezondheid, doordat ze het herstel van stress mogelijk maken. Hoe geluid en gezondheid samenhangen, wordt getoond in Figuur 4.



Figuur 4. Model voor de relatie tussen geluid en gezondheid.

Bij een toename van de blootstelling aan geluid kunnen fysiologische reacties in het lichaam optreden: geluid is een stressor en dat betekent dat als iemand eraan wordt blootgesteld, het lichaam in staat van paraatheid wordt gebracht. Iemand merkt dat doordat zijn/haar hartslag tijdelijk omhoog gaat, de ademhaling wat sneller is of spieren worden aangespannen. Naast deze lichamelijke reacties, kan iemand zich natuurlijk ook storen of ergeren aan het geluid.

De gezondheidseffecten die volgens het model op de wat langere termijn samenhangen met de blootstelling aan omgevingsgeluid zijn onder andere (ernstige) hinder, slaapverstoring, verstoring van de dagelijkse bezigheden, leesprestaties en stressreacties. Deze laatste reacties kunnen vervolgens het model in Figuur 4 aanleiding geven tot een verhoogde bloeddruk, een grotere kans op aanmaken van het stresshormoon cortisol en, als gevolg van langere termijn blootstelling, een verhoging van het risico op hart- en vaatziekten en psychische aandoeningen.

In oktober 2018 heeft een zogeheten Guideline Development Group (GDG) van de WHO op basis van een aantal onderliggende literatuurreviews nieuwe advieswaarden geformuleerd voor blootstelling aan verschillende bronnen van omgevingsgeluid (WHO 2018). De aanbevelingen voor vliegtuiggeluid staan in Tabel 2.

Tabel 2. Aanbevelingen WHO inzake geluid door vliegverkeer (WHO 2018).

Aanbevelingen Guideline Development Group (GDG) van de WHO voor vliegtuiggeluid	Kracht aanbeveling
De GDG beveelt in sterke mate aan om de geluidbelasting die wordt geproduceerd door vliegverkeer te reduceren tot onder 45 dB(A) (L_{den}) , omdat het geluid van vliegverkeer boven dit niveau is geassocieerd met negatieve gezondheidseffecten.	Sterk
De GDG beveelt in sterke mate aan om de nachtelijke geluidbelasting die wordt geproduceerd door vliegverkeer te reduceren tot 40 dB(A) (L_{night}) , omdat het nachtelijk geluid van vliegverkeer boven dit niveau is geassocieerd met negatieve effecten op de slaap.	Sterk
De GDG beveelt in sterke mate aan dat er door beleidsmakers geschikte maatregelen worden geïmplementeerd die ervoor zorgen dat de blootstelling van bevolkingsgroepen aan een geluidbelasting van vliegverkeer boven de richtlijnwaardes, worden gereduceerd. Met betrekking tot interventies, beveelt de GDG aan om door middel van veranderingen in de infrastructuur de geluidbelasting van deze populaties te reduceren.	Sterk

De GDG identificeerde de belangrijkste gezondheidseffecten die verband houden met omgevingslawaai en beoordeelde de relevantie van deze effecten op basis van hun ernst, hun vóórkomen en de beschikbaarheid van bewijsmateriaal voor een relatie met blootstelling aan geluid. De GDG selecteerde hart- en vaatziekten, hinder, effecten op de slaap, cognitieve stoornissen en slechthorendheid en oorsuizen (tinnitus) als de meest

kritische gezondheidseffecten. Daarnaast werden geboorte-uitkomsten, kwaliteit van leven, welbevinden en mentale gezondheid en metabole aandoeningen als belangrijke gezondheidseffecten van geluid geïdentificeerd. Een team van reviewers was vervolgens verantwoordelijk voor de systematische literatuur- en evidence reviews voor deze effecten (Brown en Van Kamp 2017, Guski et al. 2017, Niewenhuijsen et al. 2017, Sliwińska-Kowalska en Zaborowski 2017, Basner en McGuire 2018, Clark en Paunovic 2018, Van Kempen et al. 2018).

Bij het vaststellen van de advieswaardes is de GDG uitgegaan van de meest kritische gezondheidseffecten. Voor elk gezondheidseffect is vooraf een benchmark vastgesteld. Deze benchmark geeft aan welke toename van het gezondheidseffect in de populatie door blootstelling aan omgevingsgeluid door de GDG niet meer acceptabel wordt gevonden. Voor de incidentie van coronaire hartziekten is bijvoorbeeld gekozen om vast te stellen vanaf welke geluidbelasting het relatieve risico met 5% is toegenomen. Voor elk gezondheidseffect is vastgesteld bij welke geluidbelasting de benchmark wordt bereikt. De benchmarks die bij het laagste geluidniveau worden bereikt, zijn leidend geweest voor de gekozen advieswaarden. Voor vliegverkeer zijn dat geluidhinder in samenhang met de L_{den} (gehanteerde benchmark van 10% ernstig gehinderden door geluid leidde tot 45 dB(A) L_{den}) en slaapverstoring in samenhang met de L_{night} (gehanteerde benchmark van 11% leidde tot 40 dB(A) L_{night} ; door onzekerheid over de geluidbelasting onder de 40 dB, wijkt de gehanteerde benchmark af van die voor andere bronnen: 3%). Voor leesvaardigheid leidde de benchmark (één maand achterstand) tot een geluidbelasting van 55 dB(A) L_{den} ; deze waarde ligt boven de advieswaarde van 45 dB(A) L_{den} . Daarnaast geldt dat het risico op coronaire hartziekten toeneemt vanaf ongeveer 50-55 dB(A) L_{den} . Dit is niet specifiek voor vliegtuiggeluid, maar vooral gebaseerd op studies naar geluid van wegverkeer. Er is vooralsnog geen bewijslast om verschillen in risico's voor uiteenlopende geluidbronnen te veronderstellen (Vienneau et al. 2015, Van Kempen et al. 2018).

IenW heeft in 2019 aan het RIVM gevraagd hoe het bovengenoemde WHO-rapport zich verhoudt tot de huidige (inter)nationale wet- en regelgeving, en wat de mogelijkheden zijn om het WHO-rapport te gebruiken ter versterking van het (inter)nationale beleid. De Kamer zal nader worden geïnformeerd zodra dit onderzoek gereed is. Gezien dit lopende onderzoek, is ervan afgezien een aanbeveling over het beschermingsniveau tegen vliegtuiggeluid en/of het daaraan gerelateerde handhavingssysteem in deze rapportage op te nemen. Het is relatief eenvoudig om de hinder en slaapverstoring die mensen ondervinden door vliegtuiggeluid met veldonderzoek te meten, eenvoudiger dan bijvoorbeeld gezondheidskenmerken als cognitie, bloeddruk en coronaire hartziekten. Er is daarom internationaal maar een beperkt aantal studies naar de laatst genoemde gezondheidskenmerken uitgevoerd. Daarnaast worden deze gezondheidskenmerken in belangrijke mate bepaald door factoren als leeftijd, geslacht, leefstijl en de genetische achtergrond. Bij hinder en slaapverstoring is de blootstelling aan omgevingsgeluid voor een veel groter deel bepalend voor de respons. Vandaar dat als over het beperken van de effecten van vliegtuiggeluid op gezondheid wordt gesproken, het veelal gaat over hinder en slaapverstoring.

Met het oog op beheersing van de omvang van het aantal mensen dat hinder en/of slaapverstoring door geluid ondervindt, zijn rond luchthavens geluidcontouren of handhavingpunten gedefinieerd die onderdeel uitmaken van een bepaalde handhavingssystematiek. Rond Schiphol zijn bijvoorbeeld de jaargemiddelde 48 en 58 dB(A) L_{den} -contour en de 40 en 48 dB(A) L_{night} -contour van belang (zie paragraaf 2.2.3).

3.2 Geluidhinder nader bekeken

In deze paragraaf gaan we in op een aantal facetten van geluidhinder. Evenals bij geluidbelasting kan onderscheid worden gemaakt in het meten en het berekenen van geluidhinder. Het meten van hinder (en analoog slaapverstoring) wordt toegelicht in paragraaf 3.2.1; het berekenen van hinder op basis van de geluidbelasting in paragraaf 3.2.2.

In paragraaf 3.2.3 wordt een overzicht gegeven van recent onderzoek naar gemeten geluidhinder in relatie tot de geluidbelasting bij Nederlandse luchthavens. Geluidhinder wordt niet alleen bepaald door de geluidbelasting, maar ook door demografische, persoonsgebonden, sociale en contextuele, en situationele kenmerken. Deze kenmerken worden ook wel als niet-akoestische factoren aangeduid. In paragraaf 3.2.4 wordt hieraan aandacht besteed. Vervolgens worden in paragraaf 3.2.5 verschillen tussen Nederlandse luchthavens besproken.

3.2.1 *Meten van hinder en slaapverstoring*

Hinder is een verzamelterm voor allerlei negatieve gevoelens, zoals ergernis, ontevredenheid, boosheid, teleurstelling, zich teruggetrokken voelen, hulpeloosheid, neerslachtigheid, ongerustheid, verwarring, het zich uitgeput voelen en agitatie. De mate waarin mensen hinder (bijvoorbeeld door het geluid van vliegtuigen) ervaren, kan goed worden gemeten. Namelijk door ze dat te vragen. Binnen de Europese Unie wordt (geluid)hinder dan ook omschreven als 'de mate van hinder door omgevingslawaaï, zoals bepaald door middel van veldonderzoek'. Ook is een internationale standaard ontwikkeld (ISO-norm) waarin is omschreven hoe de hindervraag moet worden gesteld (ISO/TC43/SC1 2003). De vraag verwijst per geluidbron naar de hinderbeleving in de thuissituatie gedurende een bepaalde tijdperiode. In de praktijk wordt veelal een periode van 12 maanden gehanteerd. Het percentage van de bevolking dat ernstige geluidhinder ondervindt, wordt bepaald door respondenten op een schaal van 0 tot 10 aan te laten geven in welke mate zij zich gehinderd voelen. Respondenten die een hoge score invullen worden aangemerkt als 'erg gehinderd' of 'ernstig gehinderd'. Beide termen worden door elkaar gebruikt, al wordt in het kader van de luchtvaart in Nederland doorgaans over ernstig gehinderden gesproken. Als een andere dan een schaal van 0-10 wordt gebruikt, moet deze vergelijkbaar worden gemaakt om op gestandaardiseerde wijze te komen tot een percentage ernstig gehinderden. De WHO heeft bij het opstellen van haar advieswaarden dezelfde definitie voor ernstige geluidhinder gehanteerd als hier beschreven.

Het accent ligt bij het meten van hinder vaak op het vaststellen van ernstige hinder, maar als andere afkappunten op de schaal van 0 tot 10 worden gekozen, kan ook het percentage mensen wordt vastgesteld dat 'matig gehinderd' of 'enigszins gehinderd' is door geluid. Dezelfde

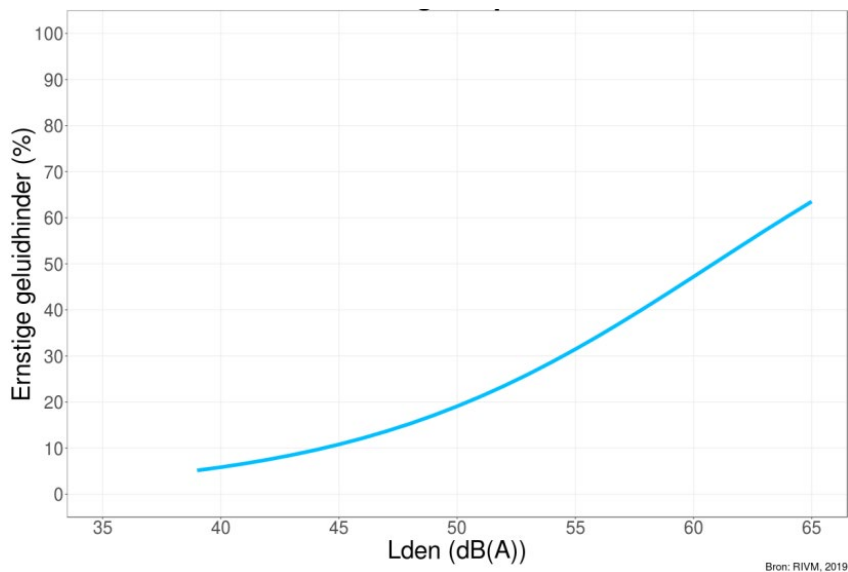
werkwijze wordt ook toegepast bij het bepalen van de andere vormen van hinder, zoals geurhinder, hinder door trillingen en bij slaapverstoring en bezorgdheid.

3.2.2 *Berekenen van hinder en slaapverstoring*

De hinder waarover in rapporten over de luchtvaart wordt geschreven is niet altijd gemeten door middel van veldonderzoek. Veldonderzoek is niet altijd mogelijk, bijvoorbeeld bij het maken van prognoses of het vergelijken van scenario's. Dan wordt uitgegaan van 'berekende hinder'. Bij een dergelijke berekening van het aantal ernstig gehinderden worden de volgende stappen doorlopen:

- Vaststellen van het (toekomstige) aantal en de aard van geluidgebeurtenissen (zoals het overvliegen van een vliegtuig) in een gebied.
- Berekening van de blootstelling aan geluid in het gebied gedurende een jaar (hoeveel vliegtuigen vliegen in een jaar over en hoeveel geluid veroorzaken ze).
- Koppeling van de geluidbelasting aan de woonadressen in het gebied of binnen de geluidcontour die onderzocht wordt en aan informatie over het (gemiddeld) aantal inwoners per woning.
- Berekening van het met die geluidbelasting corresponderende aandeel ernstig gehinderden volgens een zogeheten blootstelling-responsrelatie. Deze relatie beschrijft welk aandeel van de mensen bij een bepaalde geluidbelasting 'gemiddeld genomen' ernstig gehinderd is. Deze al bestaande relatie is afgeleid uit eerder veldonderzoek, dat veelal bij een andere luchthaven dan waarvoor de hinder wordt berekend, is uitgevoerd.
- Aggregeren van het aantal ernstig gehinderden in het gebied of binnen de geluidcontour.

In Figuur 5 is de blootstelling-responsrelatie weergegeven die in gebruik is voor het berekenen van de ernstige geluidhinder rond Nederlandse luchthavens. De relatie is gebaseerd op onderzoek uit 2002 waaraan ruim vijfduizend respondenten hebben deelgenomen die woonden in de omgeving van Schiphol (Breugelmans et al. 2004). De relatie is afgeleid door de mate van geluidhinder die de respondenten rapporteerden te koppelen aan de jaargemiddelde geluidbelasting (L_{den}) op hun woonadres. De relatie laat zien dat, naar mate de geluidbelasting toeneemt, een groter deel van de omwonenden ernstige hinder ondervindt. De figuur kan als volgt worden gelezen: als 100 mensen bij hun woning te maken hebben met een jaargemiddelde geluidbelasting van 45 dB(A) L_{den} , dan zullen gemiddeld 10 van hen ernstige geluidhinder ondervinden. Als de geluidbelasting toeneemt tot een jaargemiddelde van 55 dB(A) L_{den} , dan zullen gemiddeld 30 van de 100 mensen ernstige geluidhinder ervaren. De relatie geeft het gemiddelde weer voor een groot gebied rond Schiphol, lokaal kunnen hogere of lagere aantallen voorkomen. Een vergelijkbare relatie is beschikbaar voor de relatie tussen de jaargemiddelde nachtelijke geluidbelasting L_{night} en het verwachte percentage ernstig slaapverstoorden.



Bron: RIVM, 2019

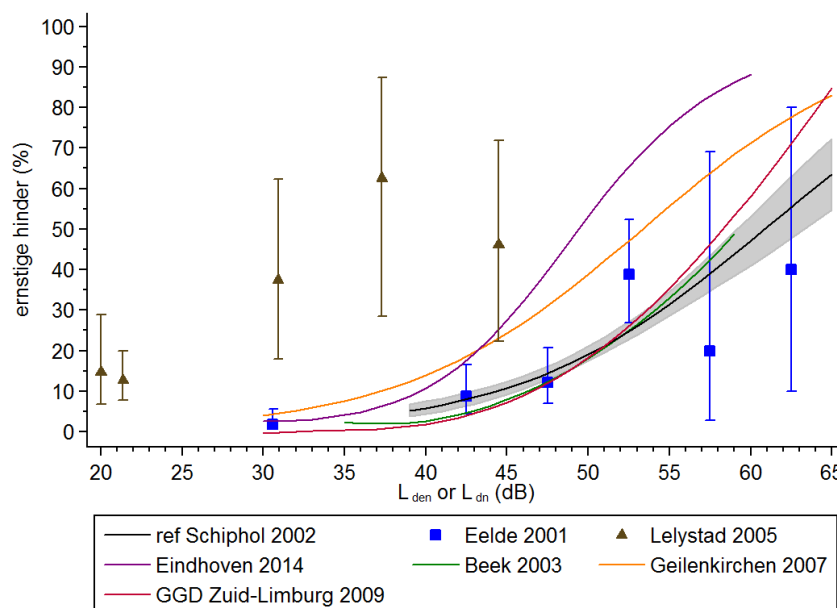
Figuur 5. Blootstelling-responsrelatie van ernstige geluidhinder als functie van de geluidbelasting. De curve is gebaseerd op onderzoek uit 2002 rond de luchthaven Schiphol (Breugelmans et al. 2004).

3.2.3

Onderzoek naar geluidhinder rond Nederlandse luchthavens

In 2016 is een overzicht verschenen van gezondheids- en belevingsonderzoeken die in de periode 1996-2015 zijn uitgevoerd rond de Nederlandse luchthavens van nationale betekenis (Breugelmans et al. 2016). Dit betrof zowel specifiek rond luchthavens uitgevoerd onderzoek als nationale inventarisaties.

In Figuur 6 zijn de blootstelling-responsrelaties opgenomen die uit de onderzoeken beschikbaar waren of uit de gegevens konden worden afgeleid. De in de figuur opgenomen onderzoeken maakten alle gebruik van dezelfde ISO-vraag om de hinderbeleving vast te stellen, en er is een koppeling gemaakt met de berekende blootstelling aan vliegtuiggeluid op het woonadres. Voor het opstellen van de relaties is, afhankelijk van het onderzoek, gebruikgemaakt van de jaargemiddelde geluidmaten L_{den} en L_{dn} . (De L_{dn} is een vergelijkbare maat als de L_{den} , maar de avond is daar bij de dagperiode getrokken, waardoor geen staffactor wordt toegepast voor avondverkeer. Dit wil zeggen dat de waarde van de L_{dn} geluidbelasting altijd gelijk is aan of lager is dan de waarde van de L_{den} geluidbelasting.). Voor de overzichtelijkheid is alleen het 95%-betrouwbaarheidsinterval rond de blootstelling-responsrelatie van Schiphol uit 2002 (zie ook Figuur 5) weergegeven. Van de onderzoeken rond Lelystad Airport en Groningen Airport Eelde was de relatie tussen blootstelling en respons niet in formulevorm beschikbaar en wordt het percentage ernstig gehinderden (met het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval) weergegeven per blootstellingscategorie.



Figuur 6. Vergelijking van de relaties tussen de blootstelling aan vliegtuiggeluid en de daardoor veroorzaakte ernstige hinder gebaseerd op belevingsonderzoeken. NB: de geluidbelasting rond de luchthavens Eelde en Beek is uitgedrukt in L_{dn} .

Figuur 6 laat zien dat de gemeten ernstige geluidhinder in relatie tot de geluidbelasting voor de verschillende Nederlandse luchthavens uiteen kan lopen. Bijvoorbeeld, bij een geluidbelasting van 55 dB(A) L_{den} is gemiddeld 30% van de omwonenden in de omgeving van Schiphol ernstig gehinderd, terwijl bij dezelfde geluidbelasting in de omgeving van de NAVO vliegbasis Geilenkirchen bijna 55% van de omwonenden ernstig gehinderd is. Ook in de literatuur- en evidence review over hinder die voor de WHO werd uitgevoerd, kwamen grote verschillen tussen luchthavens naar voren (Guski et al. 2017). Dit geeft aan dat een blootstelling-responsrelatie die is afgeleid uit onderzoek in de omgeving van een luchthaven niet representatief hoeft te zijn voor de situatie rond een andere luchthaven. Ook het gebruik van een 'gemiddelde' blootstelling-responsrelatie die onderzoeken rond verschillende luchthavens samenvat (zoals voor de WHO is gedaan in 2018), kan berekende hinderpercentages opleveren die niet representatief zijn voor de omgeving van een luchthaven. Hierdoor kunnen verschillen tussen de 'berekende' en 'gemeten' geluidhinder ontstaan. NB: Naast verschillen tussen luchthavens kan de mate van hinder ook in de loop van de tijd veranderen. Dit wordt aan het einde van de volgende paragraaf besproken.

Op de mogelijke oorzaken van verschillen tussen luchthavens wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan. Volgens (Breugelmans et al. 2016) wordt een deel van het verschil tussen de blootstelling-responsrelaties in Figuur 6 veroorzaakt door methodologische verschillen tussen de onderzoeken. Het is niet voldoende dat in belevingsonderzoek de vraag over geluidhinder gestandaardiseerd is. Als men omwonenden en beleidsmakers adequaat wil informeren over de mate waarin hinder door vliegtuiggeluid in de omgeving van luchthavens optreedt en wat de ontwikkeling daarvan over de tijd is, dan zal ook de uitvoering van de studies moeten worden geüniformeerd. Voorbeelden van studies die

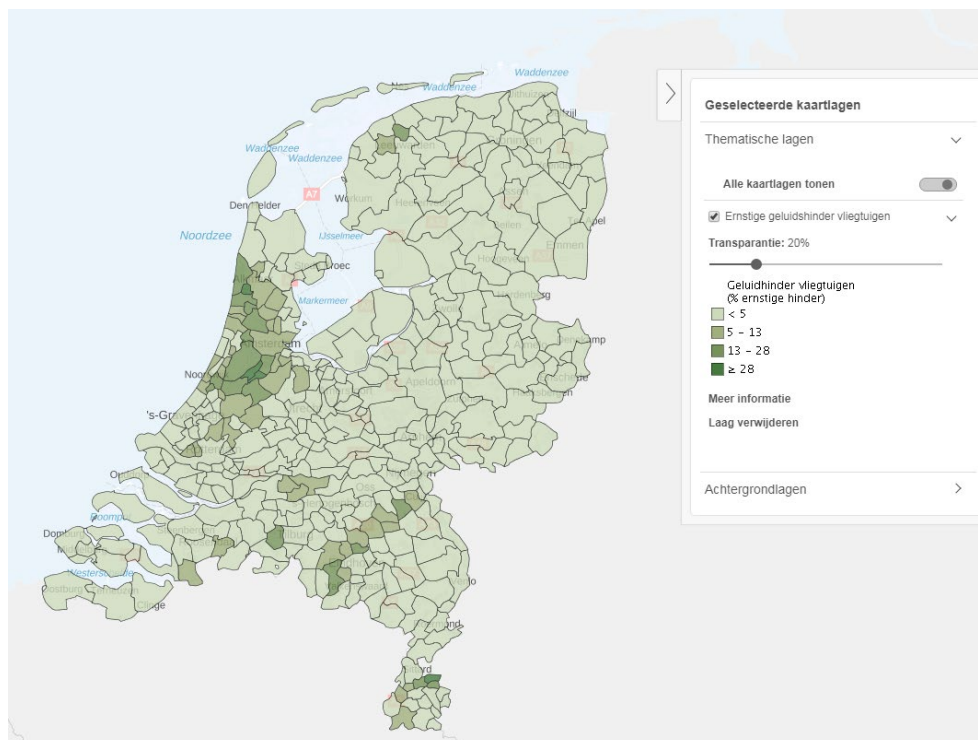
geüniformeerd over de tijd zijn uitgevoerd, zijn de metingen in 1996, 2002 en 2005 rond Schiphol (RIVM&TNO-PG 1998, Breugelmans et al. 2004, RIVM/RIGO 2005) en de metingen van GGD Brabant-Zuidoost in 2012, 2014, 2016 en 2018 rond vliegveld Eindhoven. Met de metingen van hinder in deze studies wordt een vinger aan de pols gehouden wat betreft het verloop van de mate en omvang van de geluidhinder in relatie tot de ontwikkeling van het aantal vliegbewegingen en de veranderingen in de geluidbelasting.

De vijftientig GGD'en in Nederland doen periodiek onderzoek naar de gezondheid en gezondheid gerelateerde onderwerpen op lokaal niveau. Dit betreft meestal gemeenteniveau, maar soms ook wijk- en buurniveau. De monitor komt voort uit de verplichting van gemeenten om elke vier jaar op uniforme wijze gegevens over de gezondheidssituatie te verzamelen en te analyseren. De GGD'en werken samen met het RIVM en het CBS om tot een lokale en nationale monitor Gezondheid te komen, waarin zowel de vragen als de onderzoeksmethodiek uniform worden toegepast door elke GGD.

In het kader van deze lokale en nationale monitor is ook informatie over hinder door vliegtuiggeluid verzameld (2007-2010, 2012 en 2016). De meest recente cijfers uit 2016 zijn per gemeente in Figuur 7 weergegeven. De schatting van de percentages ernstig gehinderden is gebaseerd op ruim 220.000 deelnemers van 19 tot 65 jaar.

Figuur 7 laat zien dat geluidhinder optreedt in de gemeenten in de directe omgeving van de luchthavens, met percentages ernstig gehinderden van 13% en hoger in de gemeenten in de omgeving van Schiphol en Vliegveld Eindhoven en rond enkele militaire luchthavens. Op de site <https://www.rivm.nl/media/smap/index.html> kan, per gemeente, worden ingezoomd op het percentage per buurt en per wijk.

De lokale en nationale monitor biedt mogelijkheden om voor alle luchthavens in Nederland de 'gemeten' hinder op een hoge resolutie (buurt) op een uniforme wijze vast te stellen en te volgen in de tijd. Gewenste verbeteringen in de systematiek zijn onder meer de inclusie van deelnemers boven de 65 jaar en het uitbreiden van de vragenlijst met slaapverstoring door geluid. Door de andere opzet is de jongerenmonitor minder geschikt voor dit type onderzoek. Wanneer het doel is om ook blootstelling-responsrelaties voor afzonderlijke vliegvelden af te leiden en onderling te vergelijken, of om andere onderzoeksvragen te beantwoorden (zie later), dan verdient het aanbeveling om het aantal deelnemers in de steekproef in de directe omgeving van de luchthavens op te hogen. Op die manier worden voldoende deelnemers meegenomen die aan een hogere geluidbelasting worden blootgesteld, zodat er betrouwbaar inzicht ontstaat over deze groep omwonenden (Breugelmans et al. 2016).



Figuur 7. Percentage ernstig gehinderden door vliegverkeer per gemeente in 2016 (bron: www.atlasleefomgeving.nl).

3.2.4 Demografische, persoonsgebonden, sociale en contextuele, en situationele kenmerken

In de vorige paragrafen zijn we vooral ingegaan op de relatie tussen geluidbelasting en ernstige hinder. Echter, er zijn ook factoren die niet direct met het fysieke geluid te maken hebben, maar waarvan bekend is dat ze in staat zijn de mate waarin geluidhinder wordt ervaren mede te beïnvloeden (Fields 1992, Guskı 1999, RIVM/RIGO 2005, Van Gerven et al. 2009, Dusseldorp et al. 2011, Asensio et al. 2014, National Academies of Sciences 2014). Meestal worden deze factoren aangeduid met het containerbegrip 'niet-akoestische' factoren. Omdat deze omschrijving weinig specifiek is, hebben we de verschillende kenmerken onderverdeeld in een aantal rubrieken, te weten: demografische en sociaaleconomische, persoonsgebonden, sociale en contextuele, en situationele kenmerken.

3.2.4.1 Demografische en sociaaleconomische kenmerken

Onder deze rubriek vallen demografische kenmerken (leeftijd, geslacht, burgerlijke status, land van herkomst), opleidingsniveau, arbeidssituatie (werkend, niet-werkend, studerend, werkzoekend/WAO, gepensioneerd), huiseigendom (koper of huurder) en een eventuele werkrelatie of economische binding met een luchthaven. Deze kenmerken beïnvloeden in relatief geringe mate de ervaren hinder door vliegtuiggeluid. De leeftijdsgroep van 35-55 jaar ervaart bijvoorbeeld gemiddeld genomen meer ernstige geluidhinder dan jongeren. Dit kan (denkbeeldig) worden geïllustreerd met de blootstellings-responsrelatie tussen geluidbelasting en ernstige hinder in Figuur 5. Deze kan worden gesplitst in een relatie voor mensen van 35-55 jaar en in een relatie voor jongeren. De eerste zou dan 0 tot 3 dB(A) links van de relatie van jongeren liggen

(verschuiving over de x-as). Ook voor de andere kenmerken geldt dat verschillen naar verwachting tot enkele decibellen beperkt zullen blijven. Het ligt niet voor de hand om demografische en sociaaleconomische kenmerken rond luchthavens te beïnvloeden om daarmee geluidhinderbeleid te voeren.

3.2.4.2 Persoonsgebonden kenmerken

Hieronder vallen kenmerken als angst voor de geluidbron (bijvoorbeeld voor het neerstorten van een vliegtuig, of directe angstreacties op plotseling geluid), geluidgevoeligheid en het gevoel dat het geluid onbeheersbaar is. Deze kenmerken kunnen een grote invloed hebben op de kans dat iemand ernstig gehinderd wordt door vliegtuiggeluid. Dit effect ligt in de orde van 10 tot 20 dB(A). Deze persoonsgebonden kenmerken zijn niet of nauwelijks beïnvloedbaar.

Bezorgdheid over bepaalde effecten die direct of indirect met vliegtuiggeluid samenhangen (zoals effecten op de gezondheid door geluid of luchtverontreiniging, onveiligheid) kan waarschijnlijk ook onder persoonsgebonden factoren worden geschaard. Deze factor ligt waarschijnlijk tegen angst aan, maar bezorgdheid lijkt makkelijker door voorlichting en communicatie beïnvloedbaar dan angst.

3.2.4.3 Contextuele en sociale kenmerken

Het proces rond de veranderingen van luchthavens en luchtvaart, de toegang tot informatie, de voorspelbaarheid van vliegtuiggeluid, de mogelijkheden om geluidproblemen aan te kaarten (klachtenbureau) of voorkeuren te uiten, de gevoelens over procedurele rechtvaardigheid en de media-aandacht rekenen we tot de contextuele kenmerken. De context is van invloed op de mate waarin vliegtuiggeluid als hinderlijk wordt ervaren. Het is echter niet mogelijk aan te geven wat de orde grootte van het effect is, omdat de contextuele factoren vooral indirect van invloed op de hinder zullen zijn.

Deze invloed komt tot uiting in de houding/attitude van de omwonenden ten opzichte van de (geluid)bron of de verantwoordelijken (positief/negatief/neutraal) en verwachtingen over de toekomstige geluidbelasting (verslechtering/verbetering). Houding en verwachtingen hebben een sterke invloed op de mate van geluidhinder (naar schatting 15-25 dB(A)) die omwonenden ondervinden. Deze sociale kenmerken zijn mede beïnvloedbaar door veranderingen in de contextuele factoren. Zo kunnen voorlichting en communicatie over het proces van veranderingen rond een luchthaven of over het baangebruik de houding en verwachtingen over de toekomstige geluidbelasting beïnvloeden en de voorspelbaarheid van de geluidbelasting vergroten. Ook het vergroten van betrokkenheid in het besluitvormingsproces of het creëren van een gevoel van eigenaarschap kan mogelijk het vertrouwen vergroten. Hoe dit type maatregelen het beste vormgegeven kan worden en in welke mate deze maatregelen effectief zijn om de omvang van de geluidhinder te reduceren, is niet duidelijk. Er is geen wetenschappelijke literatuur bekend waarin dit soort interventies op houding en verwachtingen via beïnvloeding van de contextuele factoren is geëvalueerd. Op de contextuele en sociale factoren wordt in paragraaf 3.5.3 (Burgerperspectieven) nader ingegaan.

3.2.4.4 Situationele kenmerken

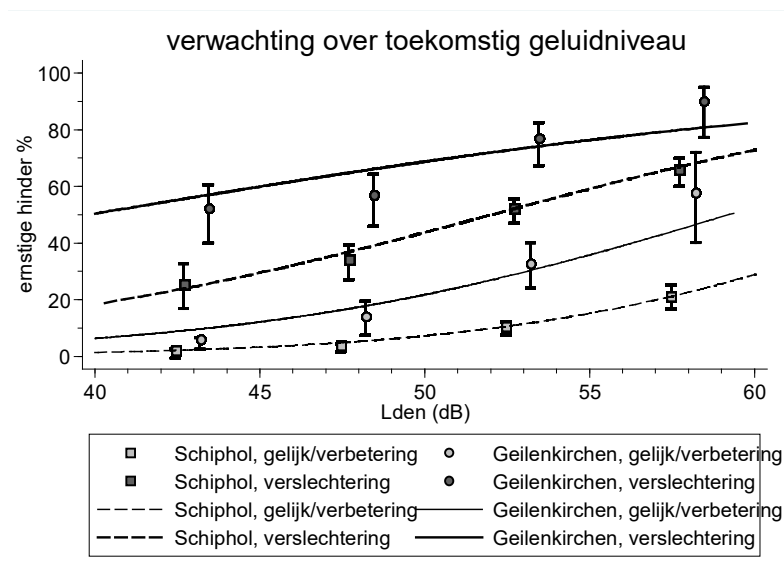
Hieronder vallen kenmerken als de aantrekkelijkheid van de buurt, woontevredenheid, afstand tot voorzieningen en de mate van stedelijkheid. Ook worden onder deze rubriek andere geluidkenmerken geschaard die niet direct zichtbaar zijn in de jaargemiddelde geluidbelasting door vliegverkeer, zoals frequentie en maximale geluidniveaus (NB: de hoogte van de maximale geluidniveaus heeft wel direct invloed op de hoogte van de jaarlijkse geluidbelasting). Ook kenmerken van de woning en woonomgeving vallen hieronder zoals geluidisolatie, beschikbaarheid van een stille zijde of ruimte en achtergrondgeluid (geluid van andere bronnen). Over het algemeen zijn de resultaten van studies over vliegtuiggeluid op het terrein van situationele kenmerken niet erg consistent, mede door het relatief kleine aantal studies dat is uitgevoerd. Naar verwachting is de invloed van deze kenmerken op de mate van geluidhinder door vliegtuiggeluid dan ook gering.

Aan kenmerken van vliegtuiggeluid zoals frequentie en geluidniveaus van vliegtuigpassages wordt in paragraaf 3.3 aandacht besteed.

3.2.5 *Verschillen tussen luchthavens nader geduid*

Zoals in de vorige paragraaf aangegeven, zijn de verwachtingen over de toekomstige geluidbelasting een belangrijke niet-akoestische factor. Aan de hand van deze factor en met onderzoeksresultaten verzameld rond Schiphol in 2002 (Breugelmans et al. 2004) en rond Geilenkirchen in 2007 (Van Poll et al. 2008) illustreren we in deze paragraaf hoe verschillen tussen blootstelling-responsrelaties van luchthavens mede door niet-akoestische factoren zijn te verklaren. De relaties van beide luchthavens zijn al in Figuur 6 weergegeven. Gemiddeld genomen bedraagt het verschil tussen beide relaties 7,4 dB(A) wanneer we het verschil definiëren als een verschuiving van de relaties over de x-as in Figuur 6, zie ook (Verheijen et al. 2011). Dit betekent dat bij dezelfde geluidbelasting L_{den} meer omwonenden van de vliegbasis Geilenkirchen ernstige geluidhinder ervaren dan rond Schiphol.

Rond de luchthaven Schiphol verwachtte in 2002 27% van de omwonenden een verslechtering van de toekomstige geluidbelasting; rond vliegbasis Geilenkirchen was dit 21%. Deze percentages waren groot genoeg om twee aparte blootstelling-respons relaties vast te stellen: één voor de respondenten die voor het komende jaar een verslechtering van de geluidssituatie verwachten en één voor de respondenten die een gelijkblijvende of verbeterde geluidssituatie verwachten. In Figuur 8 zijn voor zowel Schiphol als Geilenkirchen deze twee blootstelling-responsrelaties weergegeven. De lijn 'Schiphol, verslechtering' in Figuur 8 geeft weer welk percentage van degenen die een verslechtering in de geluidssituatie verwachten ernstige hinder ondervindt door vliegtuiggeluid. Bij 50 dB(A) L_{den} ervaart gemiddeld 40% van deze groep ernstige geluidhinder, tegenover minder dan 5% in de groep die een gelijkblijvende of verbetering van de geluidssituatie verwacht.



Figuur 8. Blootstelling-respons relatie tussen percentage ernstige hinder door vliegtuigen en de geluidbelasting in L_{den} , uitgesplitst naar luchthaven en naar de verwachting over de toekomstige geluidssituatie.

Figuur 8 laat zien dat respondenten die een verslechtering van de geluidssituatie verwachten een blootstelling-responsrelatie hebben die gemiddeld ongeveer 16 dB(A) is verschoven ten opzichte van de relatie van de respondenten die in de toekomst een gelijke situatie of een verbetering verwachten. Niettemin blijven de verschillen in blootstelling-responsrelatie tussen Geilenkirchen en Schiphol aanwezig: het verschil neemt zelfs toe van 7,4 in Figuur 6 naar 10,3 dB(A) in Figuur 8. De reden hiervoor is dat negatieve verwachtingen in 2002 rond Schiphol vaker voorkwamen dan in 2007 rond Geilenkirchen, en negatieve verwachtingen juist samenhangen met een toename van de ernstige hinder.

Een dergelijke vergelijking is ook voor andere niet-akoestische factoren uitgevoerd (Verheijen et al. 2011). Grote verschillen in het vóórkomen van niet-akoestische factoren treden op voor bezorgdheid (gemiddelde score bedroeg voor Schiphol 24 en voor Geilenkirchen 32 op een schaal van 0-100) en voor de houding ten opzichte van de luchthaven (Schiphol 31 en Geilenkirchen 49), waarbij Schiphol zich in positieve zin onderscheidt van Geilenkirchen. Wanneer voor deze factoren wordt gecorrigeerd, verdwijnt het verschil in de blootstelling-responsrelaties tussen beide luchthavens. Dit betekent dat wanneer de niet-akoestische factoren rond Geilenkirchen in dezelfde mate zouden vóórkomen als rond Schiphol, er in theorie geen verschil in blootstelling-responsrelaties meer zou zijn. Deze resultaten suggereren dat er een aanzienlijke reductie in de hinder door vliegtuiggeluid kan worden verwacht wanneer op de niet-akoestische factoren kan worden geïntervenieerd. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat door de aard van de studie het verband tussen geluid, niet-akoestische factoren en hinder niet precies bekend is. Omwonenden rond Geilenkirchen kunnen ernstig gehinderd zijn door het vliegtuiggeluid en daardoor ook bezorgd geraakt zijn en een negatieve houding ontwikkeld hebben. Ook het ongeluk met een tankervliegtuig in 1999, het kenmerkende geluid van de AWACS toestellen of de commotie over de bomkap in 2006 kunnen invloed

hebben op de geluidhinder. Oorzaak en gevolg kunnen uit een éénmalige meting niet worden afgeleid.

Opvallend is dat, ondanks de belangrijke rol die in de praktijk aan niet-akoestische factoren wordt toegeschreven, deze factoren niet systematisch en ook niet op een gestandaardiseerde wijze rond luchthavens in beeld worden gebracht. Belevingsonderzoeken worden veelal alleen ten behoeve van het beleid voor de betreffende luchthaven uitgevoerd; de resultaten worden zelden gebruikt om luchthavens onderling te vergelijken en om te achterhalen waar verschillen optreden en hoe zij de hinder in omgeving beïnvloeden.

De vergelijking tussen Schiphol en Geilenkirchen, alhoewel gebaseerd op gedateerde informatie, maakt inzichtelijk dat rond luchthavens niet alle niet-akoestische factoren even belangrijk zijn. Momenteel is niet bekend welke niet-akoestische factoren rondom de verschillende Nederlandse luchthavens er – in kwantitatieve zin – bovenuit steken. Dit betekent dat informatie ontbreekt om per luchthaven een strategie te ontwikkelen om door middel van interventies, gericht op met name contextuele en sociale factoren en op bezorgdheid, de geluidhinder te beïnvloeden.

3.3 Geluidmaten ter beoordeling van effecten van geluid

Hier wordt beschreven hoe tegen verschillende geluidmaten wordt aangekeken vanuit het perspectief van de effecten op de gezondheid. Geluidindicatoren kunnen zodanig geformuleerd zijn dat ze zeer accuraat specifieke fysische kenmerken van het geluid beschrijven. Dit betekent niet noodzakelijkerwijs dat met dezelfde indicator ook adequaat het effect van geluid op de gezondheid wordt beschreven. Dit is wel een vereiste wanneer de indicator wordt gebruikt voor een handhavingssystematiek die gericht is op bescherming van de gezondheid tegen geluid. Deze bescherming richt zich met name op het beperken van hinder en slaapverstoring, zodat deze effecten in dit deel van het hoofdstuk de nadruk krijgen.

Drie aspecten spelen een belangrijke rol bij de blootstelling aan vliegtuiggeluid:

1. het maximale geluidniveau van een vliegtuigpassage, ook wel het piekgeluid genoemd (L_{Amax});
2. de tijdsduur van een vliegtuigpassage;
3. het aantal vliegtuigpassages in een bepaalde tijdsperiode.

Deze gegevens kunnen gecombineerd worden tot:

4. geïntegreerde indicatoren (bijvoorbeeld L_{den} , L_{night} of Ke)

Paragraaf 3.3.1 neemt de L_{den} en L_{night} als vertrekpunt, omdat dit de indicatoren zijn die in Nederland en in de Europese Unie worden gebruikt. In paragraaf 3.3.2 worden twee indicatoren beschreven die gebaseerd zijn op afzonderlijke vliegtuigpassages (L_{Amax} en SEL). De L_{Amax} is het maximale geluidniveau van een vliegtuigpassage; het Sound Exposure Level (SEL) is het geluidsdrukkniveau dat gedurende 1 seconde dezelfde hoeveelheid energie vertegenwoordigt als het werkelijke geluid gedurende de passage. Deze indicatoren hangen nauw met elkaar samen. Vervolgens besteden we aandacht aan andere geluidindicatoren

(paragraaf 3.3.3), en combinaties van geluidindicatoren (paragraaf 3.3.4). Tot slot beschrijft paragraaf 3.3.5 geluidindicatoren voor andere effecten dan hinder en slaapverstoring.

3.3.1

L_{den} en L_{night}

In 1997 adviseerde de Gezondheidsraad over een uniform systeem van geluidmaten ter beoordeling van hinder en slaapverstoring door geluid (GzR 1997). Het advies van de Gezondheidsraad is geënt op L_{den} en L_{night} en maakt een aantal opmerkingen over het vaststellen van deze geluidmaten in de woonomgeving en over het toepassingsgebied van de geluidindicatoren. We noemen er drie die relevant zijn in de context van deze rapportage en die ook inzicht geven in de mogelijke tekortkomingen van een beoordelingssysteem.

- 'De voorgestelde blootstellingsmaten berusten op de equivalente geluidniveaus gedurende bepaalde gedeelten van een etmaal. Deze niveaus zijn in principe eenvoudig te gebruiken in berekeningsmodellen en met relatief eenvoudige en goedkope apparatuur te meten. De commissie erkent dat het meten van woonomgevingsgeluid een gecompliceerde zaak is, bijvoorbeeld door (geluid van) menselijke activiteiten in de buurt, variaties in de geluidsituaties van dag tot dag en eisen die bestaan om meetresultaten te verkrijgen die bron-specifiek zijn.'
- 'Omdat het stelsel berust op de beschikbaarheid van de numerieke waarden van blootstellingsniveaus die representatief zijn voor het gehele jaar, moet de gebruiker over een zekere kennis van bepaalde reken- en extrapolatietechnieken beschikken die niet altijd aanwezig zal zijn. De commissie erkent dat dit een complicatie betekent, maar wijst erop dat geen enkel systeem voor betrouwbare schatting van effecten van blootstelling hieraan kan ontkomen.'
- 'De commissie verwacht dat het stelsel in de meeste blootstellingssituaties toepasbaar is. Te denken valt aan het geluid van weg-, rail- en luchtverkeer, fabrieken, schietbanen en rangeerterreinen. Het is in dit verband belangrijk op te merken dat het stelsel is ontworpen voor het schatten van mogelijk optredende schadelijke gezondheidseffecten op de lange termijn. Het stelsel is derhalve niet geschikt voor het schatten van veranderingen in de mate van hinder of slaapverstoring die teweeg worden gebracht door plotselinge wijzigingen, bijvoorbeeld de invoering van geluidwerende maatregelen of het in gebruik nemen van een nieuwe spoorlijn.'

Deze opmerkingen maken duidelijk dat het beoordelingssysteem voor hinder en slaapverstoring niet voor alle situaties perfect is, maar in het merendeel van de situaties wel toereikend. De keerzijde hiervan is dat het relevant is om alert te blijven op situaties waarvoor het beoordelingssysteem van het meten en/of modelleren van een L_{den} en L_{night} minder geschikt is en die mogelijk om een andere beoordelingssystematiek vragen.

3.3.2

SEL en L_{Amax}

TNO nam in 1999 vanuit die optiek in het kader van het project Modernisering Instrumentarium Geluidbeleid (MIG) van het ministerie van VROM het stelsel van geluidmaten onder de loep (Miedema en

Passchier-Vermeer 1999). De centrale vraag hierbij was of het nodig is om, naast het beoordelen van de geluidssituatie aan de hand van grenswaarden voor de L_{den} en L_{night} , ook individuele geluidgebeurtenissen te beschrijven met een SEL of L_{Amax} en aan deze maten een aparte grenswaarde te verbinden.

TNO bespreekt zes bijkomende aspecten van een geluidgebeurtenis die in bepaalde situaties kunnen leiden tot een extra nadelig effect voor hinder en/of slaapverstoring. Hier worden drie aspecten van het geluid zelf besproken (schrikreacties, ontwaken, gespreksonderbreking). Vermijdbaarheid en angst (betekenissen van de geluidgebeurtenis) zijn in paragraaf 3.2.4 aan bod gekomen. TNO noemt daarnaast dat ook andere milieubelastingen (trillingen, stank en roet) bij een geluidgebeurtenis kunnen optreden die bijdragen aan een verhoogde ergernis, bijvoorbeeld vliegtuigen die trillingen van huis en huisraad teweegbrengen.

Schrik- en aandachtsreacties in relatie tot stijgtijden

Bij een onverwachte geluidgebeurtenis waarvan het niveau snel toeneemt, kan men zich niet 'instellen' op die gebeurtenis. Voor schrikreacties is de stijgsnelheid van het geluid aan het begin van de geluidspassage van belang. Tot circa 15 dB/s is er volgens TNO geen extra negatief effect. Tussen 15 en 150 dB/s neemt het extra negatieve effect ongeveer lineair toe met de logaritme van de stijgtijd. Dergelijke stijgtijden zijn afkomstig van laag overkomende straaljagers; dit speelt niet bij civiele vluchten. Stijgtijden vallen dan ook buiten de scope van dit rapport.

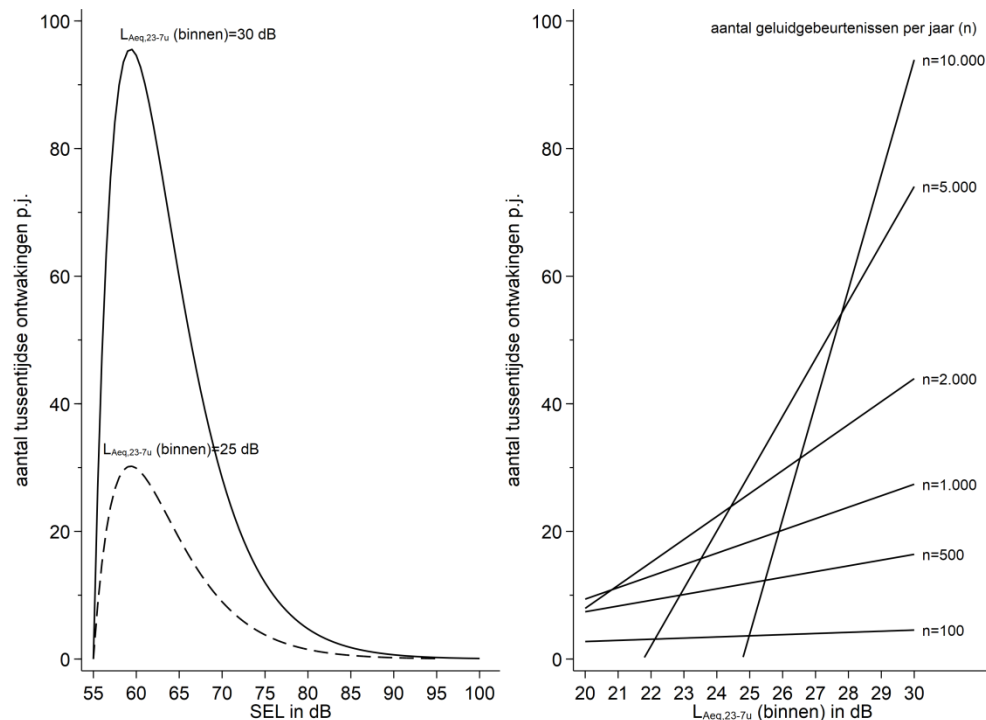
Ontwaakreacties en gespreksonderbreking in relatie tot SEL en L_{Amax}

In het TNO-rapport is onderzocht of een aanvullende maat voor 'piek'-niveaus van geluidgebeurtenissen zinvol is in verband met het beperken van ontwaakreacties en gespreksonderbreking. (Tussentijds) ontwaken wordt beschouwd als het meest ongewenste neveneffect van een enkele vliegtuigpassage tijdens de nacht. TNO nam ontwaakreacties waar vanaf 55 dB(A) SEL-waarden aan het oor. Dit is relatief hoog in vergelijking met gebeurtenissen die kunnen bijdragen aan hinder die mensen ervaren als ze (nog) niet slapen, tussentijds wakker liggen, of voortijdig ontwaken. Vliegtuigpassages met een SEL-waarde boven 55 dB(A) dragen mogelijk meer bij aan hinder dan op grond van hun bijdrage aan L_{den} of L_{night} wordt verwacht. In navolging van de Gezondheidsraad (GzR 1997) werd het gebruik van SEL verkozen boven L_{Amax} , aangezien de duur van de geluidgebeurtenis de kans op ontwaken beïnvloedt. De SEL is daarom een betere indicator voor de totale geluidgebeurtenis dan de L_{Amax} . Voor gespreksonderbreking werd als voorlopige drempelwaarde⁸ een SEL van 65 dB(A) op de plek van de spreker aangenomen bij een onderlinge afstand tussen de sprekers van 1 m.

TNO berekende hoe vaak mensen ontwaken door geluid bij een nachtelijke grenswaarde van 25 en 30 dB(A) L_{night} in de slaapkamer. Het resultaat staat in Figuur 9. De linkerzijde laat zien dat mensen het vaakst ontwaken in het geval dat alle geluidgebeurtenissen een SEL-waarde hebben van 59,3 dB(A). Dit is net boven de drempelwaarde van 55 dB(A) voor ontwaken. Luidere geluidgebeurtenissen gaan weliswaar

⁸ De GzR vond de kennisbasis nog te smal om een definitieve drempelwaarde te kiezen.

gepaard met een hogere kans op ontwaken per individuele gebeurtenis, maar zullen vanwege een kleiner aantal (gegeven een L_{night} binnenskamers van 25 of 30 dB) toch tot minder ontwaakreacties leiden. De grafiek toont een hypothetische situatie omdat het niet te verwachten is dat alle vliegtuigpassages in een jaar dezelfde SEL-waarde zullen produceren. Maar de grafiek is illustratief voor de wijze waarop de SEL-waarden van individuele vliegtuigpassages en daarbij behorende jaargemiddelde geluidbelasting in L_{Aeq} samenhangen met het aantal ontwaakreacties. De rechtergrafiek in Figuur 9 is een nadere bewerking van de linkergrafiek en geeft aan dat, bij een zekere L_{night} , een toename van het aantal vliegtuigpassages met lagere geluidniveaus leidt tot een stijging van het aantal ontwaakreacties per jaar. Het hierboven beschrevene voor ontwaakreacties geldt ook voor spraakverstaanbaarheid. Hier ligt de drempel op ongeveer 65 dB(A) SEL.



Figuur 9. Links: Aantal ontwaakreacties per jaar als functie van de SEL, voor een L_{night} ($L_{\text{Aeq},23-7u}$, binnenwaarde) van 25 en 30 dB(A) (Miedema en Passchier-Vermeer 1999). Rechts: Aantal ontwaakreacties per jaar als functie van de L_{night} ($L_{\text{Aeq},23-7u}$, binnenwaarde), voor een verschillend aantal vliegtuigpassages per jaar (bewerking RIVM). Alle geluidgebeurtenissen hebben een gelijke SEL, zodat het aantal geluidgebeurtenissen per jaar (of de SEL) vastligt als de SEL (of het aantal gebeurtenissen) en de L_{night} gegeven zijn.

Het TNO-rapport concludeerde dat er grofweg twee manieren zijn om beperkingen te stellen aan het aantal ontwaakreacties of gespreksonderbrekingen, ofwel door de grenswaarde voor de L_{den} of L_{night} aan te passen aan de hand van het aantal acceptabel geachte ontwaakreacties en/of gespreksonderbrekingen, ofwel door een additionele grenswaarde te stellen aan de SEL. Echter, gezien de relatief lage SEL-waarden waarbij het maximale aantal ontwaakreacties

optreedt, is de invoering van een grenswaarde voor SEL (of L_{Amax}) zowel praktisch als beleidsmatig weinig realistisch.

De Gezondheidsraad onderschrijft de redenering uit het TNO-rapport (GzR 2004). Zij geeft als overweging om naast de normering van de L_{night} additioneel een grens te stellen aan het aantal geluidgebeurtenissen. De Gezondheidsraad voegt daaraan toe dat mensen gedurende de nacht ook 'spontaan' wakker worden. Beperking van het aantal geluidgebeurtenissen leidt er tevens toe dat het horen van passages tijdens het 'spontaan' wakker zijn minder vaak optreedt en daarmee de slaapverstoring beperkt. De Gezondheidsraad geeft aan dat de wenselijkheid van een verdere inperking van het aantal geluidgebeurtenissen afhangt van het beschermingsniveau dat gekozen wordt.

Recenter hebben Basner en McGuire in hun literatuurreview voor de WHO aangegeven dat de waarde van equivalente geluidniveaus (zoals de L_{night}) bij de beschrijving van de effecten van geluid op de slaap beperkt is. Zij stellen dat verschillende scenario's (in aantallen passages en hoogte van de geluidniveaus) tot dezelfde equivalente geluidbelasting leiden, maar aanzienlijk kunnen verschillen in de omvang van de acute effecten tijdens de slaap (Basner en McGuire 2018). En zij concluderen dat het aantal en de akoestische kenmerken van afzonderlijke geluidgebeurtenissen (SEL, L_{Amax}) beter de werkelijke mate van nachtelijke slaapverstoring in één nacht weergeven dan een L_{night} . Net als de Gezondheidsraad, stellen zij de vraag of de L_{night} als enige indicator voor effecten van geluid tijdens de nacht kan dienen, of dat aanvullende indicatoren nodig zijn, zoals het aantal vliegtuigpassages waarop de L_{night} is gebaseerd (Basner et al. 2010).

3.3.3 *Andere geluidindicatoren*

Uit de kenmerken van een vliegtuigpassage (maximaal geluidniveau, tijdsduur en het aantal) kunnen andere indicatoren worden afgeleid, wanneer zij over een bepaalde tijdsperiode worden gemiddeld of gesommeerd. We introduceren hieronder een aantal indicatoren die in sommige studies in relatie tot geluidhinder is onderzocht, waarbij een tijdsperiode van een uur tot een jaar is beschouwd.

Afgeleid uit het maximale geluidniveau van alle vliegtuigpassages in een bepaalde periode

De L_{Amax} is het maximale geluidniveau dat gedurende een bepaalde tijdsperiode is vastgesteld. De L_{Amax} beschrijft dus slechts één vliegtuigpassage. Dit is beperkte informatie om de geluidssituatie van een langere periode te beschrijven; daarom worden ook wel indicatoren gebruikt die een groter aantal luide passages beschrijven. Zo beschrijft de L_{Amax_3} het maximale geluidniveau van de op 3 na luidste vliegtuigpassage in een bepaalde periode, de L_{Amax_5} de op 5 na luidste, enzovoort. De formulering van deze indicatoren heeft tot gevolg dat het aantal vliegtuigpassages een rol gaat spelen in de bepaling van de geluidindicator, maar dat de duur van de blootstelling buiten beschouwing blijft. Daarnaast kan bepaald worden welke L_{Amax} door 1, 5 of 10 procent van de vliegtuigpassages in een tijdperiode overschreden wordt. Zo duidt L_{Amax_p1} de L_{Amax} aan die door 1% luidere passages wordt overtroffen. Tot slot, kan de gemiddelde L_{Amax} berekend worden

van de vliegtuigpassages die een zeker geluidniveau overschrijden. Zo beschrijft de indicator $M_{L_{\text{Amax}},60}$ het rekenkundig gemiddelde L_{Amax} van alle vliegtuigpassages in een tijdperiode die een maximaal geluidniveau boven de 60 dB(A) produceren.

Afgeleid uit het aantal vliegtuigpassages in een bepaalde periode

Om het aantal vliegbewegingen dat meer dan x dB(A) produceert weer te geven wordt de NA_x ('Number Above x dB(A)') gebruikt. De NA_x is het aantal vliegbewegingen in een bepaalde periode waarvan het maximale geluidniveau (L_{Amax}) een bepaalde waarde overschrijdt. Dit wordt aangeduid met Number-Above. In onderzoeken wordt veelal de NA_{60} , NA_{65} , NA_{70} als indicator gebruikt.

Afgeleid uit de duur van vliegtuigpassages in een bepaalde periode

Om de duur van vliegbewegingen boven een bepaald geluidniveau weer te geven, wordt de T_{Ax} ('Time-Above x dB(A)') gebruikt. De T_{Ax} is de tijdsduur in bijvoorbeeld een jaar dat een bepaald geluidniveau door vliegtuigpassages wordt overschreden op een bepaalde plek (in seconden). Uit dezelfde informatie kan ook worden afgeleid welk geluidniveau door vliegtuigpassages ten minste een bepaalde tijdsduur in dat jaar optrad. De geluidindicator L_{4u} beschrijft bijvoorbeeld het geluidniveau dat minimaal 4 uur per jaar optreedt.

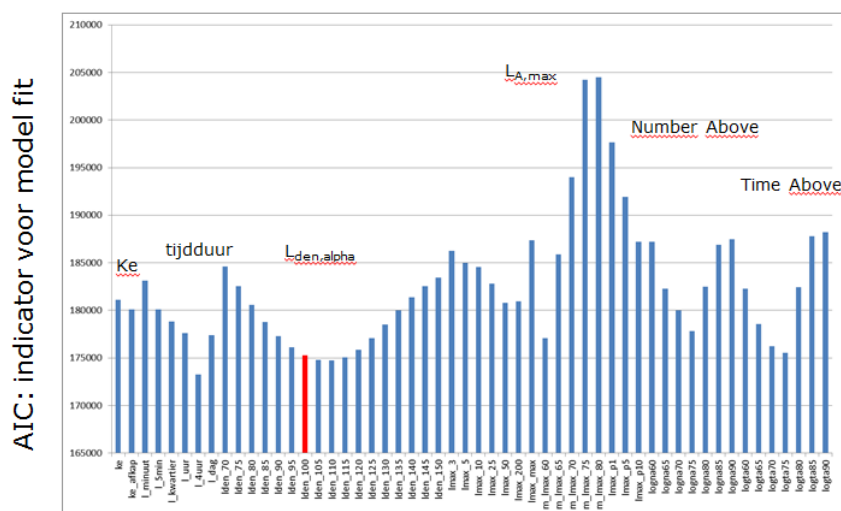
Geïntegreerde indicatoren over een jaar

De in Nederland gebruikte geïntegreerde maten zijn de L_{den} , de L_{night} en de K_e . De L_{den} verenigt de drie genoemde aspecten van vliegtuiggeluid (geluidniveau per passage, tijdsduur per passage en aantal passages in een jaar), gecombineerd met een etmaalweegfactor voor bewegingen in de avond en nacht in één jaargemiddelde geluidbelastingindicator. De L_{den} is gebaseerd op het zogenaamde 'equal energy principe'. Hierbij geldt dat in de berekening van de L_{den} één vliegtuigpassage kan worden vervangen door tien vliegtuigpassages met een SEL (geluidenergie) die 10 dB(A) lager ligt; de geluidbelasting uitgedrukt in de L_{den} verandert dan niet. In de L_{den} is er dus sprake van een (impliciete) afweging tussen het aantal passages en het geluidniveau van de afzonderlijke passages. Dit wordt wel de 'trade-off' factor genoemd. De trade-off was onderwerp van discussie toen van geluidindicatoren gebaseerd op aantal passages werd overgeschakeld naar L_{eq} -achtige indicatoren zoals de L_{den} , zie bijvoorbeeld (Fields 1984).

In de ANASE-studie, uitgevoerd rond Engelse luchthavens, werd een optimale trade-off van ongeveer 15 gevonden. De ANASE-studie was deels een herhaling van de ANIS-studie uit de jaren '80. Daarin werd een optimale trade-off van 6 vastgesteld (Le Masurier et al. 2007). Ook in Nederland is naar de optimale trade-off in de L_{den} gezocht (Miedema et al. 2000, Van Poll et al. 2014). In deze studies zijn alternatieve L_{den} -en geformuleerd. Door als het ware aan de trade-off in de L_{den} te 'draaien', zijn er L_{den} -en gemaakt waarin het aantal vliegtuigpassages belangrijker is gemaakt ten koste van het geluidniveau van afzonderlijke passages. Andersom zijn L_{den} -en gemaakt waarin het geluidniveau van de passage belangrijker werd gemaakt (ten koste van het aantal passages). Voor de omgeving van Schiphol en de NAVO Airbase Geilenkirchen werden trade-off-factoren gevonden die dicht in de buurt van 10 liggen. Deze uitkomst sluit aan bij de trade-off van de L_{den} .

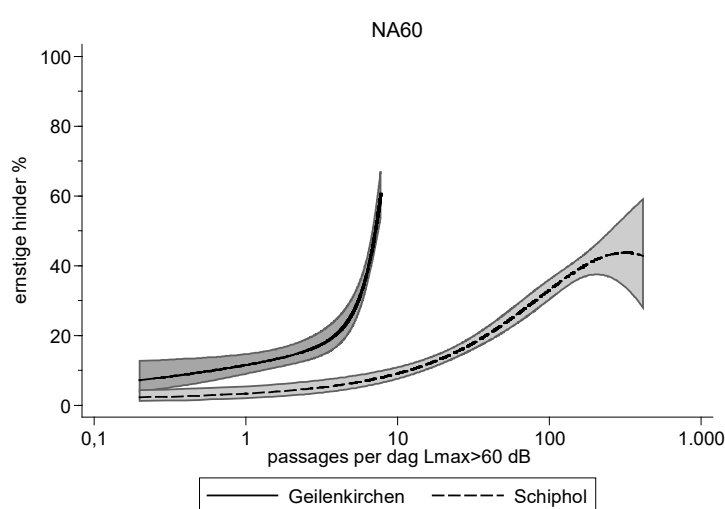
De Ke is de Kosten eenheid, een Nederlandse geluidmaat voor vliegverkeer, die momenteel nog voor militair vliegverkeer wordt gebruikt (maar in het verleden ook voor civiel vliegverkeer). In de Ke worden het maximale geluidniveau van passages en het aantal passages in een jaar tot een jaargemiddelde belasting verwerkt, waarbij verschillende nachtstraffactoren gebruikt worden voor vliegbewegingen in de avond en nacht. De trade-off factor van de Ke is 15.

In Figuur 10 wordt een overzicht gegeven van de resultaten van een studie op basis van de lokale gezondheidsmonitor 2012 in Zuid-Limburg. De geluidbelasting veroorzaakt door zowel NAVO-vliegbasis Geilenkirchen als Maastricht Aachen Airport werd hierbij gerelateerd aan ernstige geluidhinder door vliegtuiggeluid. Op de linkeras van de figuur is het Akaike Information Criterion (AIC) weergegeven. Deze indicator geeft een schatting van de relatieve kwaliteit van het statistische model voor de gegeven data. Hiermee kunnen verschillende modellen met elkaar vergeleken worden. In dit geval geeft de AIC weer welke geluidindicator het beste de samenhang met de gerapporteerde hinder beschrijft, waarbij een lagere AIC een betere samenhang weergeeft.



de trade-off-factor in de buurt van die van de de L_{den} . Opgemerkt moet worden dat in beide onderzoeken (rond Schiphol in 1996 en Zuid-Limburg in 2012) het (groten)deels oude vliegtuigtypes betreft met relatief hogere maximale geluidniveaus. Ook de frequentie van vliegtuigpassages was lager dan bijvoorbeeld nu rond Schiphol het geval is.

Rond vliegbasis Geilenkirchen was eerder een afzonderlijk onderzoek naar geluidhinder uitgevoerd (Van Poll et al. 2008). Bij een her-analyse van de gegevens waarbij naast de L_{den} ook de NA60 en NA70 werden betrokken, bleek dat de samenhang tussen de geluidhinder en de afzonderlijke geluidindicatoren (L_{den} , NA60 en NA70) elkaar weinig ontliet (Verheijen et al. 2011). Ook werd in het onderzoek gesignaleerd dat de blootstelling-responsrelaties van andere indicatoren rond luchthavens meer uiteen kunnen lopen dan voor de L_{den} het geval is. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 11 waarin de blootstellings-responsrelaties voor vliegbasis Geilenkirchen (Van Poll et al. 2008) en van Schiphol (Breugelmans et al. 2004) op basis van de (log getransformeerde) NA60 zijn uitgezet.



Figuur 11. Blootstelling-responsrelatie tussen percentage ernstige hinder door vliegtuigen en het geluidniveau in NA60 voor vliegbasis Geilenkirchen en luchthaven Schiphol (Verheijen et al. 2011).

Uiteraard geldt dat vliegbasis Geilenkirchen vergeleken met burgerluchthavens een heel ander type vliegveld is (lage frequentie maar hoge geluidniveaus van afzonderlijke passages). Figuur 11 wijst er echter op dat blootstelling-responsrelaties voor geluidhinder van vliegtuigen uitgedrukt in andere geluidindicatoren mogelijk minder goed toepasbaar zijn rond andere luchthavens dan voor de blootstelling-responsrelaties met de L_{den} het geval is. Dit is een aandachtspunt wanneer overwogen wordt andere geluidindicatoren te gebruiken.

Ook in buitenlandse studies zijn geluidindicatoren in relatie tot hinder onderling vergeleken. Zo werd in Engeland in 2007 op 56 locaties rond 16 luchthavens de ANASE-studie naar hinder door vliegtuiggeluid uitgevoerd (Le Masurier et al. 2007). Hierbij werd gekeken naar de $L_{Aeq,16u}$ (equivalent geluidniveau over de dag en de avond gedurende de zomer,

een Britse indicator), het maximale geluidniveau van een vliegtuigpassage (L_{Amax}), het aantal passages met een L_{Amax} boven de 65 dB(A) (NA65) en het rekenkundig gemiddelde van alle vliegtuigpassages die L_{Amax} boven de 65 dB(A) produceerden. De conclusie uit de vergelijking was onder meer dat $L_{Aeq,16u}$ een goede indicator is voor het vaststellen van geluidhinder. De resultaten van de ANASE-studie werden ook vergeleken met een eerdere Engelse studie (Brooker et al. 1985). Geconstateerd werd dat het percentage ernstige hinder bij een gelijke $L_{Aeq,16u}$ aanmerkelijk was toegenomen. Onder meer omdat de statistische analyses niet op individueel niveau maar met locatie-gemiddelden zijn verricht en er tevens zorgen zijn over de berekeningen van de geluidbelasting, is er methodologisch een en ander op de ANASE-studie af te dingen en moeten de resultaten met enige terughoudendheid worden geïnterpreteerd.

In 2014 werd er vervolgonderzoek uitgevoerd rond negen luchthavens (CAA 2017). De geluidindicatoren waren een driemaands gemiddelde $L_{Aeq,16u}$, NA65 en NA70, en de jaargemiddelde L_{den} . De samenhang met hinder was het sterkst voor de $L_{Aeq,16u}$, gevolgd door de L_{den} , de NA65 en als laatste de NA70. De gerapporteerde hinder in relatie tot de $L_{Aeq,16u}$ lag lager dan in de ANASE-studie. In de rapportage wordt niet ingegaan op de eventuele consequenties voor een trade-off-factor. Geconcludeerd wordt dat er geen reden is om de Britse indicator $L_{Aeq,16u}$ te vervangen door een van de andere indicatoren. Er wordt ook erkend dat omwonenden worstelen met het concept van een equivalent gemiddeld geluidniveau ($L_{Aeq,16u}$ en L_{den}). Men pleit daarom voor meer gebruik van N_{Ax} -achtige indicatoren, met de voorkeur voor de NA65 boven de NA70, omdat de vliegtuigpassages met een L_{Amax} boven de 70 dB(A) steeds minder (zullen) optreden. Het rapport geeft aan dat voor op bewijs gebaseerde beslissingen de $L_{Aeq,16u}$ in gebruik moet blijven.

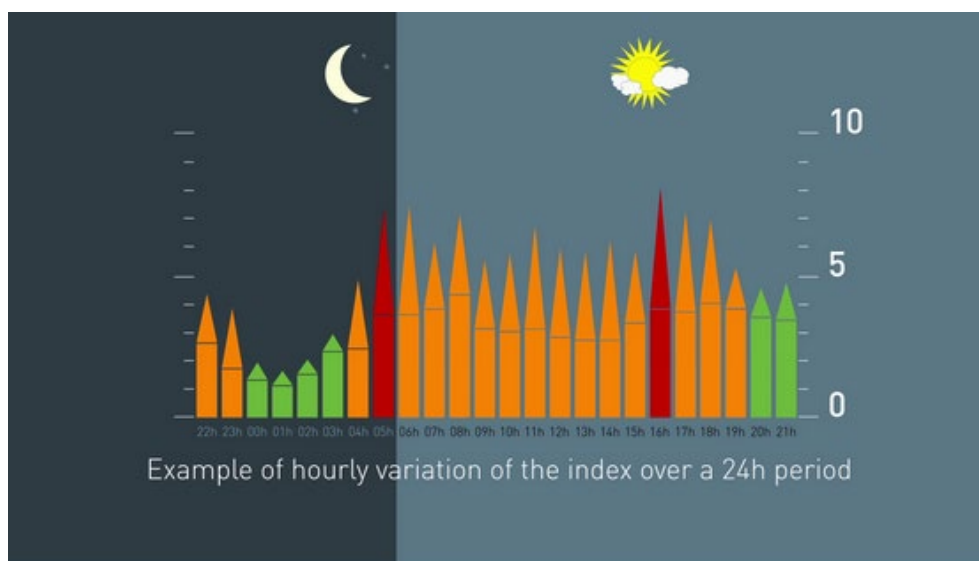
Rond Frankfurt Airport is op 66 locaties een zevental geluidmaten geanalyseerd in relatie met hinder en zelfgerapporteerde gezondheid (Schreckenbergh en Meis 2007). De drie L_{den} -maten (de originele, één waarin de tijdstippen van de dag, avond en nacht met een uur waren verschoven, en één zonder etmaalweegfactor⁹ voor de avond) hadden de hoogste correlatie met hinder door vliegtuiggeluid; de onderlinge verschillen waren klein. De correlatie met hinder was minder goed voor de andere vier indicatoren (NA55, NA70 en gemiddelde L_{Amax} van passages met een L_{Amax} boven de 55 of boven de 70 dB(A)); van deze vier scoorde de NA55 nog het best.

In een poging informatie over omgevingsgeluid beschikbaar te stellen die eenvoudiger te begrijpen is, is in Frankrijk de Harmonica-index ontwikkeld (Mietlicki et al. 2014). Met een survey zijn de wensen van burgers geïnventariseerd. Uit de resultaten werden 4 indices geformuleerd die vervolgens weer door burgers zijn beoordeeld. De Harmonica-index geeft op een schaal van 0 tot 10 weer hoe ernstig de uurgemiddelde geluidoverlast is. Het achtergrondniveau van het geluid wordt weergegeven met een rechthoek, terwijl de invloed van maximale geluidniveaus met een driehoek wordt aangeduid. Kleurgebruik geeft aan hoe de geluidssituatie zich verhoudt tot de advieswaarden van de WHO. Figuur 12 geeft een voorbeeld van de Harmonica-index voor een

⁹ Bij de L_{den} wordt gesproken van etmaalweegfactoren, terwijl de K_e de term nachtstraffactor gebruikt wordt.

periode van 24 uur. Zover bekend is de Harmonica-index nog niet geanalyseerd in relatie tot geluidhinder door vliegtuiggeluid die omwonenden ervaren. Ook is nog onduidelijk in hoeverre de Harmonica-index meerwaarde heeft opgeleverd voor burgers en beleidsmakers in Frankrijk.

Bij de bespreking van de ANASE-studie is aangestipt dat de kans op ernstige hinder door vliegtuiggeluid bij een zeker geluidniveau in de loop der jaren is toegenomen. Guski vroeg hier al eerder aandacht voor (Guski 2004). De notie van dat verschijnsel wordt overigens breder gedragen (Van Kempen en Van Kamp 2005).



Figuur 12. Harmonica-index: voorbeeld van de variatie van de index over een periode van 24 uur (bron: www.noiseineu.eu/en/20-graphical_representation).

Guski beschrijft dat de geluidhinder bij dezelfde geluidbelasting (bijvoorbeeld 60 dB(A) L_{den}) over de jaren wel is toegenomen voor vliegverkeer, maar niet voor wegverkeer. Daarnaast geeft hij aan dat er verschil is tussen stabiele geluidsituaties en veranderingssituaties ('change'). Veranderingen doen zich voor rond luchthavens wanneer een extra startbaan wordt geopend of een luchthaven wordt uitgebreid, waarbij de geluidbelasting redelijk abrupt of meer geleidelijk kan toenemen.

Bij abrupte veranderingen wordt veelal een 'overshoot' in de geluidhinder gevonden; de hinder neemt meer toe dan op grond van de geluidverandering wordt verwacht. Dit is al in de vorige eeuw uitgebreid gedocumenteerd. Recentere voorbeelden zijn de opening van de Polderbaan op Schiphol in 2003 (RIVM/RIGO 2005) en een nieuwe startbaan bij Frankfurt Airport in 2011 (Schreckenberget al. 2016). De 'overshoot' wordt veelal beschreven in L_{Aeq} -achtige maten. Het is aannemelijk dat bij een abrupte verandering geluidindicatoren die alleen gebaseerd zijn op aantallen ook goed werken, doordat de veranderingen veelal het gevolg zijn van een toename van het aantal vliegbewegingen.

Wat betreft geleidelijke veranderingen, wordt wel onderscheid gemaakt tussen 'high rate of change'-luchthavens (HRC) en 'low rate of change'-

luchthavens (LRC). HRC-luchthavens worden hierbij gekenschetst als die luchthavens waarvoor in de afgelopen drie jaar plannen voor een uitbreiding van het aantal vliegbewegingen of voor veranderingen van vliegroutes publiek zijn gemaakt of nog worden bediscussieerd. In het onderliggende literatuurreview voor de GDG wordt aangegeven dat er verschillen zijn in blootstelling-responsrelaties tussen HRC en LRC luchthavens (Guski et al. 2017).

Guski gaf eertijds geen verklaring voor de toename van de vliegtuiggeluidhinder over de tijd (Guski 2004). Het is niet eenvoudig om hierover op basis van verschillende studies verricht over een lange tijdsperiode een conclusie te trekken. Een onderzoek naar de kenmerken van de studies wees op een mogelijke rol van de schaal waarop hinder wordt gemeten (Janssen et al. 2011). De antwoorden die respondenten kunnen geven in een vragenlijst variëren tussen onderzoeken van een eenvoudig 'ja, nee, of soms' tot het waarderen van de geluidhinder op een schaal van 0 tot 10. Een andere mogelijke verklaring is dat survey's in de loop der jaren relatief meer bij HRC- dan LRC-luchthavens zijn uitgevoerd (Gelderblom et al. 2017). Ook wordt op de rol gewezen van een toename van het aantal vliegbewegingen bij gelijkblijvende L_{den} . Dit effect zou alleen bij LRC-luchthavens zichtbaar zijn (Gjestland en Gelderblom 2017). Een tekortkoming van deze laatste studies is dat alleen luchthavens onderling worden vergeleken, zonder dat daarbij gekeken wordt welke verandering in de tijd zich bij de omwonenden van een individuele luchthaven voordoet. Dit is dan ook de reden dat we in de volgende paragraaf ingaan op individuele studies die een combinatie van verschillende geluidindicatoren hebben gebruikt.

Er zijn voor zover bekend weinig studies naar slaapverstoring door vliegtuiggeluid uitgevoerd waarin geluidindicatoren onderling werden vergeleken. Veelal wordt naar combinaties van indicatoren gekeken; deze studies worden in de volgende paragraaf besproken. Quehl en collega's keken in een veldstudie naar zelfgerapporteerde slaapverstoring (in de vorm van hinder door nachtelijk geluid) gedurende drie nachten onder 187 deelnemers rond Frankfurt (Quehl et al. 2017). Uit metingen in de slaapkamer werd zowel een L_{Aeq} tijdens de slaap afgeleid als het aantal vliegtuigpassages. Voor beide indicatoren werd afzonderlijk een relatie met slaapverstoring afgeleid. De auteurs benadrukken het belang van het aantal vluchten als indicator. Hoewel de auteurs dit niet expliciet benoemen, lijkt uit de resultaten naar voren te komen dat het aantal passages een iets sterkere relatie heeft met de dagelijkse slaapverstoring dan voor de L_{Aeq} tijdens de slaap het geval is.

3.3.4

Combinaties van geluidmaten

In de vorige paragraaf zijn studies besproken waarbij afzonderlijke geluidindicatoren onderling zijn vergeleken. In deze paragraaf behandelen we studies waar een combinatie van geluidindicatoren is beschreven om de relatie met geluidhinder en/of slaapverstoring te beschrijven.

In Zwitserland is de Intermittency Ratio (IR) ontwikkeld. De IR beschrijft op een schaal van 0 tot 100 welk percentage van de totale geluidenergie wordt veroorzaakt door geluidgebeurtenissen die boven een bepaalde grenswaarde uitkomen. Een weg die een vrij constant geluidniveau produceert geeft een lage IR, doordat het geluid van individuele

voertuigen in een meting niet van het achtergrondgeluid te onderscheiden is. De passages van bijvoorbeeld vliegtuigen en treinen die het geluidniveau tijdelijk sterk verhogen, leiden tot een hoge IR (Wunderli et al. 2015). In een nationale survey is bekeken of de blootstelling-responsrelatie tussen ernstige geluidhinder en L_{den} verbeterd als de IR aan de relatie wordt toegevoegd (Brink et al. 2019). Voor vliegverkeer was de toegevoerde waarde van de IR relatief klein. De blootstelling-respons relatie verschoof ongeveer 2-3 dB(A) tussen geluidsituaties met lage en hoge IR waarden.

Bartels en collega's voerden een veldstudie uit naar de geluidhinder door vliegtuigen rond Keulen Bonn Airport (Bartels et al. 2015). Ze keken hierbij naar de hinder die per uur door 55 deelnemers werd gerapporteerd vanaf het opstaan tot het slapen gaan. Het betrof 4 dagen in een tijdsperiode van een halfjaar waarbij het geluid buitenshuis werd gemeten. Ook werden geïndividualiseerde L_{Aeq} 's berekend waarin rekening werd gehouden met de geluidwering van de gevel en verblijfsduur binnenshuis. De NA65 bleek de kortetermijnhinder beter te voorspellen dan de equivalente en maximale (buiten) geluidniveaus. In iets mindere mate gold dit ook voor de NA55 en NA60. Een combinatie van de geïndividualiseerde L_{Aeq} voor vliegtuiggeluid, het totaal aantal passages en de NA70 gedurende het uur, leidde tot de beste voorspelling van de geluidhinder van uur tot uur. Benadrukt moet worden dat de studie zich richtte op hinder over een uur. De correlatie met de gerapporteerde hinder over de afgelopen 12 maanden bedroeg 0,50. Deze samenhang is in overeenstemming met andere studies (Schreckenbergh en Schuemer 2010). Vanwege deze correlatie suggereren de auteurs dat de bevindingen ook gelden voor hinder over een langere periode.

In september 2019 zijn de eerste resultaten van het ' $L_{eq}+X$ '-project gepresenteerd (Haubrich et al. 2019). Rond een aantal Duitse en Zwitserse luchthavens is, om de relatie met geluidhinder te beschrijven, gekeken naar de combinatie van een (log-getransformeerde) N_{Ax} met andere geluidindicatoren (L_{Aeq} , L_{den} , gemiddeld maximaal geluidniveau boven een bepaalde afkapwaarde). Tevens werd rekening gehouden met kenmerken van de luchthavens zoals 'change' (HRC versus LRC). De auteurs concluderen dat een blootstelling-responsrelatie waarbij de L_{den} wordt gecombineerd met de log(N_{Ax}) een betere voorspellende waarde heeft dan een relatie alleen gebaseerd op de L_{den} of de L_{Aeq} . Ook de combinatie van log(N_{Ax}) met een L_{Aeq} of met een gemiddeld maximaal geluidniveau gaf een mindere voorspelling van de geluidhinder. Het model met de L_{den} en log($NA70$) voorspelde beter dan met de log($NA60$). Ook was er een duidelijke invloed van 'change' op de resultaten. De combinatie van L_{den} met log($NA70$) leidde tot een iets andere vorm van blootstelling-responsrelaties voor HRC- dan voor LRC-luchthavens het geval was. De invloed van de L_{den} op de hinder was groter dan voor de log($NA70$).

Vergelijkbare resultaten zijn in Nederland gevonden rond vliegbasis Geilenkirchen. Daar is gekeken naar combinaties van L_{den} en NA60 en NA70 in relatie tot hinder (Verheijen et al. 2011). De combinatie NA70 en L_{den} voorspelde beter dan de combinatie NA60 en L_{den} . Uit de weergave van de blootstelling-responsrelaties bleek dat de L_{den} de grootste rol speelde in de blootstelling-responsrelatie; de NA70 had

daarop slechts een kleine invloed. Rond Geilenkrieken is het aantal passages zeer beperkt, terwijl het geluidniveau per passage zeer hoog is. Dit is een mogelijke verklaring voor de kleine invloed van de NA70.

Er zijn ook twee slaapstudies waarin combinaties van indicatoren zijn beschouwd. Beide studies keken naar effecten over een periode van een nacht. In een secundaire analyse van een slaaponderzoek op 15 locaties rond Schiphol onder 400 deelnemers gedurende 10 nachten (Passchier-Vermeer et al. 2002) werd door Janssen en collega's gekeken naar zelfgerapporteerde slaapkwaliteit over en naar de gemiddelde (gemeten) motorische onrust tijdens de nacht in relatie tot L_{Aeq} , het aantal geluidspassages, de gemiddelde SEL van de passages en verschillende NAX-maten (alle binnenshuis gemeten tijdens de slaaptijd) (Janssen et al. 2014). De conclusie was dat het aantal passages redelijk goed gerepresenteerd wordt door het gebruik van de L_{Aeq} . Alleen passages met een relatief hoge L_{Amax} binnenshuis (≥ 60 dB(A)) hadden een extra effect op de motorische onrust. Dit resultaat is niet in lijn met de eerder genoemde bevindingen voor acute gevolgen van passages, zoals ontwaakreacties. Een mogelijke verklaring is dat in dit veldonderzoek het aantal passages toenam naarmate deelnemers langer sliepen, wat niet per se inhoudt dat er ook sprake is van een luidruchtiger nacht. Daarnaast neemt, los van het geluidniveau, de motorische onrust toe naarmate de slaapduur langer wordt.

Quehl en Basner deden onderzoek naar zelfgerapporteerde slaapverstoring onder 128 deelnemers gedurende 13 nachten in een slaaplaboratorium, en 64 deelnemers gedurende 9 nachten in een veldonderzoek (Quehl en Basner 2006). Zowel het aantal vluchten per nacht, de L_{Amax} van de passages als de L_{Aeq} gedurende de slaap werd gemeten. Uit het veldonderzoek kwam naar voren dat niet alleen de L_{Aeq} gedurende de slaap, maar ook het aantal vliegtuigpassages bijdraagt aan de gerapporteerde slaapverstoring (hinder door nachtelijk geluid). Als de voorspelling van de slaapverstoring alleen is gebaseerd op de L_{Aeq} , wordt deze onderschat wanneer er sprake is van veel passages met een relatief lage L_{Amax} . De slaapverstoring wordt overschat wanneer er slechts enkele passages met een hoge L_{Amax} optreden. In het laboratorium werd hetzelfde mechanisme gevonden; door de kunstmatige omstandigheden werd er in deze studie meer slaapverstoring gerapporteerd dan in de veldstudie.

3.3.5

Geluidindicatoren voor andere effecten dan hinder en slaapverstoring

De literatuur- en evidence reviews die voor het recente WHO-rapport zijn gemaakt, geven aan dat veldstudies naar de invloed van vliegtuiggeluid op andere gezondheidseffecten (hart- en vaatziekten, bloeddruk, diabetes, cognitie, etcetera) over het algemeen alleen de L_{den} - of een L_{Aeq} -achtige geluidindicator gebruiken. Wel is er in veldstudies naar cognitie van kinderen ook gekeken naar de acute blootstelling aan vliegtuigpassages tijdens de uitvoering van de tests, maar deze bleken de relatie tussen de langetermijnblootstelling aan vliegtuiggeluid en de leesachterstand niet te beïnvloeden (Clark et al. 2005).

De Intermittency Ratio (IR) is, naast de L_{den} , als aanvullende indicator toegepast in een Zwitsers onderzoek naar de samenhang tussen blootstelling aan zowel weg-, rail- als vliegverkeer en de sterfte aan hart-

en vaatziekten (Héritier et al. 2017). Er werd een relatie tussen de geluidbelasting (L_{den}) en hart- en vaatziekten gevonden. De onderzoekers geven aan dat ook de IR tijdens de nacht een rol speelt. IR-waarden in het midden van de schaal van 0 tot 100 hadden een relatie met het optreden van hart- en vaatziekten. Deze klokvormige relatie geeft aan dat mensen mogelijk beter in staat zijn een continue ruis dan zeer variabele ruis aan te kunnen. Dit laatste zijn situaties gekenmerkt door zeer weinig geluidspassages, met lange stille periodes ertussen.

3.4 Burgerperspectieven op de betrouwbaarheid van berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid en vertrouwen in betrokken partijen

In deze paragraaf gaan we na in welke mate burgers de indruk hebben dat autoriteiten in de context van verschillende Nederlandse luchthavens te vertrouwen zijn en welke rol het meten en berekenen van vliegtuiggeluid hierbij speelt, naast een aantal andere factoren. We maken hierbij gebruik van materiaal uit focusgroepen dat het RIVM in de loop der jaren verzameld heeft en van Internetbronnen (paragraaf 3.4.1 t/m 3.4.2). Focusgroepen en Internetbronnen kunnen kwalitatief inzicht geven in relevante burgerperspectieven, maar zijn geen weergave van de opvattingen van alle burgers en omwonenden. Paragraaf 3.4.3 geeft een korte introductie op 'citizen science'. Citizen science biedt naast het verzamelen van data ook de mogelijkheid om te bouwen aan de relatie tussen burgers, wetenschappers en overheden. Paragraaf 3.4.4 illustreert deze karakteristieken aan de hand van het voorbeeld 'Samenmetenaanluchtkwaliteit.nl'. Paragraaf 3.4.5 en 3.5 bevatten een korte conclusie over het vertrouwen, de rol van rekenen en meten hierbij, het belang van publiekscommunicatie en hoe citizen science een bijdrage kan leveren.

3.4.1 *Achtergronden bij vertrouwen door burgers*

Het vertrouwen in betrokken partijen is volgens (Peters et al. 1997) afhankelijk van drie factoren:

1. Van de inschatting dat deze partijen voldoende kennis en expertise hebben;
2. Van de inschatting dat deze partijen open en eerlijk zijn;
3. Van de inschatting dat deze partijen het belangrijk vinden om ergens zorg en verantwoordelijkheid in te pakken.

Belangrijke aanvulling hierbij is dat burgers over het algemeen geen idee hebben of overheden te vertrouwen zijn of niet. Ze vinden het over het algemeen maar grote ondoorgrondelijke instituten. Om te kunnen beoordelen of een overheid betrouwbaar is, wordt er gekeken naar de handelwijzen; of men de indruk heeft dat processen eerlijk verlopen (Van den Bos et al. 1998, Van den Bos et al. 1998b).

Belangrijk voor de perceptie dat processen eerlijk verlopen, is dat alle relevante perspectieven en argumenten worden meegenomen. Vaak wordt gedacht dat dit te realiseren is door er grote groepen burgers bij te betrekken. Dat houdt echter maar weinig rekening met de karakteristieken van maatschappelijk protest. Maatschappelijk protest is namelijk een collectief goed (Olson 1965). Het is een specifieke vorm van een sociaal dilemma, waarin een kleine groep burgers de tijd en moeite neemt om de belangen van een grotere groep te vertegenwoordigen –

zonder dat het zeker is dat ze succesvol zal zijn. Het is een vrijwilligers-timing dilemma (Diekmann 1985, Weesie 1993), waarbij de grootste groep profiteert zonder zich in te hoeven spannen. Vaak zijn het de meest kundige, capabele burgers die het initiatief nemen in het protest. Zij vormen protestbewegingen en actiegroepen. Als het gaat om het verbeteren van besluitvormingsprocedures en het creëren van vertrouwen, zijn dit vaak de mensen waarmee je in gesprek moet gaan. Zij zullen in staat zijn om betekenisvolle input op het proces te geven. Dat wil niet zeggen dat het altijd eenvoudig is om een dergelijk proces vorm te geven.

3.4.2 *Burgerperspectieven op omgevingsbelasting door Nederlandse luchthavens*

We beginnen deze beschouwing van burgerperspectieven logischerwijs met de luchthaven Schiphol. Belangrijk in de burgerperspectieven en in de beoordeling of processen eerlijk verlopen, is dat luchtvaart en in het bijzonder Schiphol in Nederland een uitzonderingspositie heeft. Bewonersorganisaties willen dat de overheid de financiële voordelen voor de luchtvaartsector opheft en de sector gaat behandelen zoals elke andere bedrijfstak. Zolang de Nederlandse overheid dit niet doet, zit de procesgang volgens omwonenden niet eerlijk in elkaar. Dit heeft in het luchtvaartdossier een negatieve invloed op het vertrouwen in de overheid.

Het Landelijk BewonersBeraad Luchtvaart (LBBL), het platform van de bewonersorganisaties rond de zes Nederlandse luchthavens, zegt het in zijn manifest op Internet (<https://lbbl.nl/>) als volgt (zie Box 1).

Box 1: Deel van het manifest van het Landelijk Bewonersberaad Luchtvaart

Bewonersorganisaties rond de zes Nederlandse luchthavens hebben het Landelijk Bewonersberaad Luchtvaart (LBBL) opgericht. Zij vinden dat de groei van de luchtvaart in Nederland moet stoppen.

- De regering moet zorgen voor forse afname van hinder als gevolg van luchtvaart en moet prioriteit geven aan de bescherming van milieu, gezondheid en klimaat.
- Net als alle ondernemingen in Nederland, moeten ook luchtvaartmaatschappijen hun CO₂-uitstoot terugdringen.
- Op vliegtickets en vliegtuigbrandstof moeten met spoed dezelfde belastingen geheven worden als bij andere vormen van vervoer zoals trein, bus en auto.
- In het kader van de internationale bereikbaarheid moeten comfortabele treinverbindingen tegen concurrerende prijzen een prominente plaats krijgen, zodat veel korte Europese vluchten kunnen vervallen.

De bewonersdelegatie van de Omgevingsraad Schiphol, vind het vreemd dat er weer wordt gesproken van groei terwijl oude afspraken niet zijn nagekomen (afname van het aantal nachtvluchten). Ook denkt men dat de groei van belangrijke intercontinentale vluchten uit reservecapaciteit kan komen (vakantievluchten duurder maken, korte Europese vluchten vervangen door trein). Schiphol voldoet, volgens de bewonersdelegatie, daarom noch aan de regels van het oude stelsel gebaseerd op handhavingpunten, noch aan de afspraken volgens het nieuwe stelsel

(Nieuw Normen- en Handhavingstelsel Schiphol, NNHS). Handhaving is echter niet mogelijk, vanwege het zogenoemde anticiperend handhaven. De bewonersdelegatie stelt daarom dat hierdoor een rechtsvacuüm is ontstaan, dat het gevoel van bewoners dat zij in een rechtsstaat leven, ernstig ondermijnt.¹⁰



Figuur 13. Betekenis van het woord 'schiphollen'.

Illustratief voor de perceptie van omwonenden is dat op de site van de Vereniging Bewoners Tegen Vliegtuigoverlast van Rotterdam The Hague Airport staat uitgelegd wat het woord 'schiphollen' betekent en dat het een twijfelachtige eer is dat dit in het Van Dale woordenboek terecht is gekomen.¹¹ In Figuur 13 is het lemma uit dit woordenboek weergegeven.

In Box 2 wordt gerapporteerd over een focusgroeponderzoek onder omwonenden van Schiphol (Marsman et al. 2005) en over de uitkomsten van een recent en uitgebreid participatietraject (ORS 2019). Uit het focusgroeponderzoek blijkt het belang van geluidveranderingen ten opzichte van het achtergrondniveau. Ook hier is sprake van irritatie van omwonenden over de uitzonderingspositie van Schiphol en van gebrek aan vertrouwen in de overheid. Verder wordt duidelijk dat het systeem van meten en rekenen voor een leek onbegrijpelijk is.

Er lijkt een voorkeur te zijn voor cognitief eenvoudige benaderingen van meten en rekenen. De opkomst van burgermetingen zoals door European Aircraft Noise Services (<http://www.eans.net/EANSindex.php>) en Explain (<https://reports.explane.org/nl/>) is te begrijpen door enerzijds een technologiepush, maar anderzijds ook door een behoefte om ondoorgroondelijke modellen op een 'eenvoudige wijze' te controleren. Dat toont ook aan dat er een noodzaak bestaat om beter uit te leggen hoe modellering in elkaar steekt. Dat wil zeggen, op een manier dat burgers het begrijpen. Ook een recent voorbeeld met de modellering van ammoniak laat zien dat de communicatie verbeterd kan worden, maar dat kennisinstituten hier onvoldoende aandacht aan besteden (Munnichs en de Vriend 2018). In dit soort gevallen leidt een gebrek aan begrip van het meet- en rekensysteem mede tot een gebrek aan vertrouwen.

¹⁰ Zie: <https://www.bewonersomgevingschiphol.nl/petitie-26-maart-2019/>

¹¹ Zie: <https://www.btv-rotterdam.nl/veel-gestelde-vragen/faq-s>

Box 2: Burgerperspectieven op de Luchthaven Schiphol

In het focusgroep onderzoek uit 2005 geven omwonenden aan dat ze last hebben van de nachtelijke vluchten, van een gebrek aan voorspelbaarheid, van afwijkingen in geluidfrequentie en vliegpatroon, van geluid van vliegtuigen aan de grond en van het verschil met een voorheen stille situatie ('change effect'). Dit laatste geldt vooral voor bewoners in Castricum. Bij bewoners is er de stellige overtuiging dat, als Schiphol meer wil vliegen, dit zonder meer toegestaan zal worden. Volgens omwonenden worden ze in de maling genomen. Er is vooral onbegrip over het feit dat de overheid Schiphol niet als een normaal bedrijf behandelt en dat er geen goede discussie over nut, noodzaak en locatie gevoerd wordt. Schiphol staat volgens de deelnemers aan de focusgroep boven de wet. Er is sprake van een gebrek aan erkenning. Ook is het volgens deze omwonenden lastig om betrouwbare, objectieve informatie te krijgen.

Met betrekking tot rekenen en meten geldt dat deze omwonenden het gebruik van gemiddelde waarden lastig vinden; bijvoorbeeld een jaargemiddelde waarde, uitgedrukt in L_{den} , is erg lastig terug te leiden naar geluiden van individuele vliegtuigen. Ook de grenzen van de zonering zijn voor omwonenden lastig te begrijpen. Zij pleiten daarom voor begrijpelijke taal voor niet-experts. De huidige termen en regelgeving zijn voor leken niet te volgen.

Uit de huiskamergesprekken gehouden in 2018 volgt dat de lokale geluidniveaus steeds minder acceptabel gevonden worden. De door deze bewoners ervaren en zelf gemeten maximale geluidniveaus zijn erg hoog. Daarbij komt dat als onbedoeld bijeffect van de zogenaamde 50-50-regel de frequentie waarmee vliegtuigen overkomen steeds toeneemt, waardoor er voor bewoners minder rustperiodes voorkomen en er steeds minder mogelijkheid tot restauratie is.

Uit de huiskamergesprekken, gevoerd met burgers die direct onder de aanvliegroutes wonen, blijkt dat geluid van vliegverkeer een superlokaal probleem kan zijn. Iets wat bijvoorbeeld ook bekend is in stedelijke omgevingen, waarin geluidniveaus sterk verschillen met de afstand van wegen en afhankelijk zijn van bebouwing (denk ook aan stille zijdes bij woningen) en andere stedelijke inrichting.

Burgerperspectieven, zoals deze tot uiting komen in huiskamergesprekken in Box 2, zijn vaak beter te begrijpen vanuit een 'soundscape-benadering' waarin gewild en ongewild geluid en congruentie tussen geluid en landschap centraal staan (Brown 2006, Brown 2012, Brown et al. 2016), dan vanuit een optiek gedomineerd door gemiddelde geluidniveaus. Bij soundscapes draait het ook om geluidkwaliteit, in aanvulling op geluidvolumes. Onderdeel hiervan zijn bijvoorbeeld het soort geluid, hoe vaak het geluid voorkomt en het tijdstip van voorkomen van het geluid. De vraag van omwonenden van Schiphol om rustperiodes, is een verzoek om iets te doen aan de geluidkwaliteit.

Bij soundscapes staat de perceptie van het geluid centraal. Het in kaart brengen van een soundscape voor een groter gebied is echter nog niet zo eenvoudig; vaak beperkt men zich tot kleine gebieden (parken, natuurgebieden, straten). Als de geluidproblematiek erg lokaal is, is dit

geen probleem. In de benadering is ook aandacht voor de invloed van het ontwerp van de fysieke omgeving op geluid.

Een volgend perspectief dat we in beschouwing nemen, is dat op de Luchthaven Lelystad (zie Box 3). Ook in dit perspectief is de mate waarin geluid van luchtverkeer past bij de omgeving van groot belang. Als we de informatie in de Box analyseren op basis van de drie componenten van vertrouwen, dan blijkt dat er op alle drie de onderdelen wel wat aan te merken is. Bovendien stellen deze burgers zelf al dat er sprake is van een vertrouwensbreuk, wat getypeerd wordt als het meest betreurenswaardige van de gehele procedure.

Box 3: Burgerperspectieven op de Luchthaven Lelystad

Dit is geen focusgroep onderzoek. De informatie komt van de site van de Samenwerkende Actiegroepen Tegen Laagvliegen (<https://satl-lelystad.nl/>) en geeft het perspectief vanuit de actiegroepen weer.

Volgens de omwonenden georganiseerd in de actiegroep SATL, is er over de uitbreiding van Luchthaven Lelystad nauwelijks met betrokken gemeenten gecommuniceerd. Hun grote probleem met het plan is dat het alleen functioneert met laagvliegroutes. Dat is nodig om Schiphol in de hogere luchtlagen niet in weg te zitten. Dat impliceert dat er verder weg dan gebruikelijk, in gebieden die niet worden betrokken in de MER-procedure en die nu geen belasting door vliegtuiggeluid kennen, heel laag gevlogen zal worden. Dit geldt ook voor stiltegebieden, Natura 2000-gebieden en andere gebieden waarvan de rust door bewoners gewaardeerd wordt. SATL denkt dat dit tot veel geluidhinder en gezondheidseffecten door (ultra)fijnstof gaat leiden. Bovendien is vliegen door lage luchtlagen volgens hen energie-inefficiënt; het leidt tot significant extra kerosinegebruik en geluid.

Karakteristiek voor de huidige indeling van het luchtruim is dat die stamt uit 1950 en dat er door het luchtruim opnieuw in te richten wellicht een optimalisatieslag te maken is. Dat vergt samenwerking tussen verschillende organisaties. SATL pleit daarom voor uitstel totdat het luchtruim heringericht is en er wellicht minder laagvliegroutes nodig zijn. Het ergste van het geheel is volgens hen dat er een vertrouwensbreuk is tussen omwonenden, gemeenten en de Rijksoverheid.

Leden van de actiegroep hebben de MER doorgelicht en zijn tot de conclusie gekomen dat er verschillende fouten in de MER zitten: men ging uit van een te klein aantal vliegtuigen, dat te hoog vloog met een te lage stuwkracht. Dat zijn alle drie fouten die volgens SATL positief uitpakken voor de luchthaven. De omwonenden verenigd in SATL denken dat hier bewust mee gemanipuleerd is. Zij hebben, na een verzoek hierom, de Rijksoverheid een uitgebreid adviesrapport overhandigd, waar volgens hen niets mee gedaan is. In de eerste MER stond volgens SATL vrijwel niets over de impact van ganzen en grote trekvogels op het vliegverkeer, terwijl daar op laagvliegroutes wel degelijk rekening mee gehouden dient te worden. Ook omdat vogeltrekroutes haaks en op dezelfde hoogte op de laagvliegroutes staan. Daarbij komt dat nabij de Oostvaardersplassen, nabij Luchthaven Lelystad, veel ganzen voorkomen. Defensie gebruikt wel systemen om hier rekening mee te houden. SATL is van mening dat dit in de MER opgenomen zou moeten zijn. Ten slotte was het volgens SATL

aanvankelijk onduidelijk of er met kleine of grote vliegtuigen op Vliegveld Lelystad gevlogen zal worden. Het bleek dat er ook met grote vliegtuigen gevlogen zou gaan worden.

Alles bij elkaar vinden de deelnemers aan deze actiegroep de besluitvorming rond Luchthaven Lelystad maar een mistige aangelegenheid en vragen zij zich af voor wie de Rijksoverheid nu eigenlijk werkt.

Inmiddels is de Rijksoverheid de bewoners rond Luchthaven Lelystad tegemoetgekomen door het herinrichten van het luchtruim in de tijd naar voren te halen en per direct te starten met het wegnemen van belemmeringen om zo veel mogelijk ongehinderd te klimmen op de routes van Lelystad Airport. Dat wil niet zeggen dat de relatie met SATL en hun achterban weer hersteld is.

In Box 4 staat een korte weergave van de kijk van omwonenden op de Vliegbases Volkel en Leeuwarden (Jabben et al. 2015). Ook hier wordt duidelijk dat het, net als bij de andere twee behandelde luchthavens, niet puur gaat om het geluidniveau, maar ook over de geluidkarakteristieken van een omgeving. Ook dit duidt op het belang van soundscapes. Ook rond de Vliegbases Volkel en Leeuwarden is de vertrouwensrelatie tussen enerzijds burgers en gemeenten en anderzijds de Rijksoverheid slecht te noemen. Dit komt door de besluitvormingsprocedure over de F-35.

Box 4: Burgerperspectieven op de vliegbases Leeuwarden en Volkel

Het gaat hier om onderzoek onder omwonenden dat werd gedaan naar aanleiding van de komst van de F-35 (Jabben et al. 2015). Deze omwonenden willen (vooral in Leeuwarden) graag een meetsysteem om maximale geluidniveaus in kaart te kunnen brengen, waardoor er volgens hen op een rechtvaardige manier met milieu- en gezondheidsaspecten kan worden omgegaan. Men ziet geluidpieken als een ernstige aantasting van de leefomgevingskwaliteit en men heeft zorgen over de effecten van fijnstof. Men wil op basis van onafhankelijke informatie met de vliegbasis in gesprek kunnen. Vervelend is dat je niet aan het geluid kunt ontkomen. Het gaat volgens de deelnemers aan de focusgroep ook om het frequentiespectrum, dus om de toonhoogte van het geluid. Gesproken wordt ook over de mogelijkheid van het neerstorten van toestellen en het optreden van gehoorschade. Dat laatste is een reële mogelijkheid bij het opstijgen van straaljagers. De relatie tussen de twee vliegbases en de omwonenden is redelijk goed te noemen.

Over de besluitvormingsprocedures in de aanschaf van de F-35 hebben de deelnemers aan de focusgroep geen goed woord over. Die waren ondoorgrondelijk en er is nauwelijks rekening gehouden met het feit of dit vliegtuig qua geluidbelasting wel over een dichtbevolkt land als Nederland zou kunnen vliegen. Men geeft aan dat men de Rijksoverheid op dit punt absoluut niet vertrouwt, ook omdat er volgens hen veel te weinig informatie met gemeenten en burgers gedeeld is.

Ook rond NAVO Vliegbasis Geilenkirchen (Van Poll et al. 2008) is onderzoek gedaan naar de manier waarop omwonenden de vliegbasis en de omgevingsbelasting ervan beleven (zie Box 5). Kenmerkend zijn weer de aantasting van de soundscape door onvoorspelbaarheid en de

frequentie van het geluid. Ook hier speelt een gebrek aan vertrouwen in de Rijksoverheid. In deze casus is er ook gebrek aan vertrouwen in de NAVO, waarvan men vindt dat deze boven de wet denkt te staan.

Box 5: Burgerperspectieven op de Vliegbasis Geilenkirchen

Het gaat hier om een onderzoek in de voormalige gemeente Onderbanken, Brunssum en Schinnen naar de beleving van AWACS-vliegverkeer van de NAVO Vliegbasis Geilenkirchen (Van Poll et al. 2008). Opvallend hierbij was dat het Rijk de zogenoemde NIMBY-procedure heeft ingezet om verzet door omwonenden en gemeenten tegen bomenkap te beteugelen. Vervelend vinden deze omwonenden dat het geluid niet te voorspellen is, het gaat hen ook om de hoogte van het geluid, de mogelijkheid dat een toestel neerstort en de verwachting dat de geluidsoverlast toeneemt in de toekomst. Kenmerkend is dat er absoluut geen vertrouwen is in de NAVO en in de Rijksoverheid. De NAVO staat volgens de deelnemers aan de focusgroep boven de wet: ze kan geluidsnormen (met verouderde vliegtuigmotoren) overschrijden zonder daarvoor gestraft te worden. Men voelt zich machteloos, vooral ook omdat de Nederlandse overheid hen beloftes heeft gedaan die niet nagekomen zijn. Er is een sterk gevoel van oneerlijke en onrechtvaardige behandeling. De vliegbasis doet en mag van alles omdat de NAVO zo groot is.

In Box 6 staat het burgerperspectief op de doorontwikkeling van Vliegbasis Twente voor burgerluchtvaart (De Wolf 2014). Dit voornemen is afgebroken, maar het burgerperspectief is daarom niet minder relevant. Het perspectief laat zien dat de openstelling voor burgerluchtvaart onder burgers gemêleerd ontvangen wordt. Er is bezorgdheid over gezondheid en aantasting van het landschap. Men is niet tevreden over de afweging van voor- en nadelen van de openstelling voor burgerluchtvaart. Dit leidt tot een gebrek aan vertrouwen in de betrokken overheden.

Box 6: Burgerperspectieven op Vliegbasis Twente

Het gaat hier om een voorbereidend kwalitatief onderzoek onder omwonenden ten behoeve van belevingsonderzoek, omdat Vliegbasis Twente mogelijk opengesteld zou worden voor burgerluchtvaart. Het onderzoek biedt een gemêleerd beeld als het gaat om voor- of tegenstanders van de openstelling voor burgerluchtvaart. Sommige deelnemers aan de focusgroep zien dat het werkgelegenheid voor de regio oplevert. Anderen twijfelen hierover. Er is bezorgdheid om gezondheidsschade door geluid en fijnstof. Men is niet te spreken over recent aangekondigde bomenkap. Een deel van de aanwezigen is bezorgd over de aantasting van het landschap. Ook bespreekt men de mogelijkheid van neerstorten.

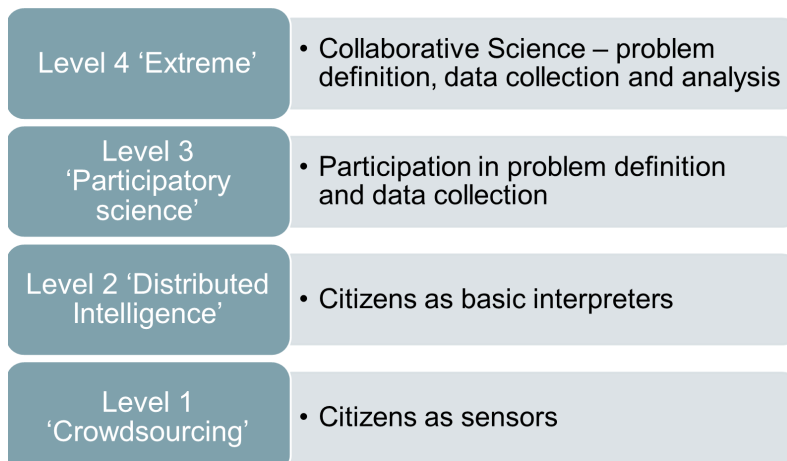
Er is grote overeenstemming dat de informatievoorziening over de openstelling van de vliegbasis voor burgerluchtvaart onvoldoende is. Nog sterker geldt dat er een gebrek aan vertrouwen is in de betrokken overheden. Dit komt doordat er onvoldoende goed en duidelijk is afgewogen wat de voor- en nadelen zijn. Daar zijn geen objectieve cijfers voor gebruikt en er is onvoldoende gekeken naar de mogelijkheden die luchthavens net over de grens in Duitsland (Münster en Osnabrück) bieden.

3.4.3

Citizen science

Zoals eerder aangekondigd, bespreken we in deze paragrafen over vertrouwen in meten en rekenen en in de instanties die hierbij betrokken zijn, ook de mogelijkheden van 'citizen science'. Bij citizen science gaat het om de betrokkenheid van burgers bij wetenschap anders dan als respondent. Burgers kunnen bijvoorbeeld betrokken zijn bij dataverzameling, data-analyse of bij het opstellen van de onderzoeksvraag. Ook de mate waarin burgers of wetenschappers de leiding hebben in een project kan verschillen. Haklay gebruikt de genoemde verschillen voor het opstellen van een typologie (zie Figuur 14), waarbij het op het hoogste niveau gaat over gelijkwaardige samenwerking tussen burgers en wetenschappers, terwijl er op het laagste niveau door burgers alleen data aangeleverd wordt (Haklay 2012).

Levels of Citizen Science



Figuur 14. Indeling van citizen science naar mate van betrokkenheid (Haklay 2012).

Bij rekenen en meten aan vliegtuiggeluid kunnen burgers zelf meten en kunnen zij op deze manier bijdragen aan een citizen science-project, maar dat hoeft dus niet. Ook als zij meedoen in een meetnet met sensoren die beter vertrouwd kunnen worden, is er sprake van citizen science. In Nederland zijn er meerdere voorbeelden van meetnetten die in overleg met omwonenden zijn opgezet of waarbij de meetgegevens gebruikt worden voor analyses die door omwonenden worden voorgesteld. De crux van het verhaal is dat burgers meedoen aan een wetenschappelijke activiteit, wat bijvoorbeeld kan bijdragen aan het leren over de mogelijkheden en beperkingen van meten en rekenen aan vliegtuiggeluid. Er zijn echter ook andere effecten, bijvoorbeeld op vertrouwen, waarmee we dit hoofdstuk begonnen. Op basis van een literatuurreview onderscheidt (Haywood 2014) aanzienlijke voordelen voor burgerwetenschappers, zoals deze in empirische studies gevonden worden (zie Tabel 3).

Deze beschouwing laat zien dat er mogelijkheden zijn voor een combinatie van citizen science en kwalitatief goede metingen. Daarbij komt dat er goede aanvullende redenen zijn om burgers middels citizen science bij geluidmetingen te betrekken. Bij dit laatste gaat het vooral om:

- a. vergroten van het begrip van de mogelijkheden en beperkingen van meten en rekenen, en;
- b. bouwen aan de relatie tussen burgers, wetenschappers en overheden.

Tabel 3. Opbrengsten van deelname aan citizen science (Haywood 2014).

1	Verbeterde wetenschappelijke kennis en geletterdheid (bijvoorbeeld kennis van wetenschappelijke inhoud, wetenschappelijke toepassingen, risico's en voordelen van wetenschap en bekendheid met wetenschappelijke technologie)
2	Verbeterd begrip van het wetenschappelijke proces en de wetenschappelijke methode
3	Verbeterde toegang tot wetenschappelijke informatie (bijvoorbeeld één-op-één interactie met wetenschappers, toegang tot real-time informatie over lokale wetenschappelijke variabelen)
4	Verbeterd vermogen om wetenschappelijke informatie te interpreteren (bijvoorbeeld kritisch denken, inzicht in elementaire analytische metingen)
5	Wetenschap gedemystificeerd (bijvoorbeeld het verminderen van de 'intimidatiefactor' van de wetenschap, het corrigeren van percepties van de wetenschap als te complex of ingewikkeld, het verhogen van het comfort met en waardering voor de wetenschap)
6	De deelnemers 'empoweren' en de zelfeffectiviteit vergroten (bijvoorbeeld geloof in het vermogen om wetenschappelijke problemen en vragen aan te pakken, tot geldige conclusies komen en passende oplossingen bedenken)
7	Meer gemeenschapsopbouw, sociaal kapitaal, sociaal leren en vertrouwen (bijvoorbeeld wetenschap als een middel om netwerken te verbeteren, wederzijds leren te versterken en sociaal kapitaal tussen verschillende groepen te vergroten)
8	Veranderingen in attitudes, normen en waarden (bijvoorbeeld over het milieu, over wetenschap, over instellingen)

3.4.4

Samenmetenaanluchtkwaliteit.nl als voorbeeld

Een voorbeeld dat als inspiratie kan dienen voor citizen science bij het meten en rekenen aan vliegtuiggeluid, is de citizen science zoals toegepast bij het meten en rekenen aan luchtkwaliteit. Omdat erkend werd dat het meten aan luchtkwaliteit niet langer het exclusieve domein is van kennisinstituten en omdat kleine, goedkope sensoren kunnen bijdragen aan een betere ruimtelijke en temporele resolutie tegen op termijn lagere kosten, is gestart met de ontwikkeling van een hybride meetsysteem, waar data uit citizen science ook deel van uitmaken.¹²

Kern van het idee is dat gekeken wordt naar de mogelijkheden van data in plaats van het op voorhand kritisch beschouwen en afwijzen op basis

¹² Het bestaande meetnetwerk blijft belangrijk voor kalibratiedoeleinden. Daarnaast gebruikt men data uit intermediate cost sensoren, satellietdata en vertrouwt men op datascience.

van kwaliteitscriteria. Wel streeft men ernaar om met elkaar tot zo goed mogelijke data te komen door onder meer kennis uit te wisselen over sensoren, de juiste manier van meten en het bieden van de mogelijkheid om sensoren te kalibreren bij een meetstation uit het nationale net.

Burgerwetenschappers en luchtkwaliteitspecialisten hebben in dit proces geregeld contact. Een belangrijke rol in de communicatie met bestaande en nieuwe burgerinitiatieven wordt gevormd door de site samenmetenaanluchtkwaliteit.nl. Deze site biedt duidelijke publiekscommunicatie over de mogelijkheden en beperkingen van meten en doet dit met behulp van tekst, visuals en korte filmpjes.

Onderdeel van samenmetenaanluchtkwaliteit.nl is het zogenoemde dataportaal, waarin de informatie uit burgermetingen ontsloten wordt. Voor geluid van vliegverkeer is het portaal van samenopdehoogte.nl een goed voorbeeld, maar deze site levert nauwelijks informatie over de methodiek van meten en rekenen.

3.4.5 *Doelgroepen en benaderingen bij citizen science*

De manier waarop en de intensiteit waarin burgers bij citizen science betrokken willen zijn, zal verschillen. Wel geldt dat burgers waarschijnlijk alleen willen meedoen als metingen ook daadwerkelijk wat opleveren. Dit vraagt dat wetenschappers en burgers met elkaar in gesprek gaan over de manier van meten; en impliceert bijvoorbeeld dat als er veel vraag is naar meten met mobiele telefoons, er een experiment gestart kan worden waarin nagegaan wordt in welke mate de gegevens uit deze metingen iets bijdragen. Cruciaal in dit experiment is niet de techniek – een app is snel gemaakt en bestaat vaak al¹³ – maar wel de manier waarop een dergelijk project georganiseerd is. Belangrijk is interactie tussen wetenschappers en burgers, wederzijds leren en dat de data daadwerkelijk aanvullend op en samen met de officiële geluidmeetnet metingen gebruikt worden. Dat stelt zowel eisen aan de bereidheid als aan techniek en data science om dit te kunnen realiseren.

Wat betreft de techniek zijn citizen science-metingen goedkoop, hebben ze een grote ruimtelijke dekking, maar zijn ze minder nauwkeurig dan professionele metingen. Dankzij het grote aantal metingen kunnen echter met big data-technieken in principe foutieve data worden herkend en verwijderd, en kunnen variaties in individuele metingen worden gefilterd. Deze methode is succesvol toegepast bij bijvoorbeeld temperatuurmetingen (Overeem et al. 2013). Geluidmetingen zijn echter ingewikkelder dan temperatuurmetingen, bijvoorbeeld omdat reflecties van geluid de metingen beïnvloeden. Of de big data-aanpak ook werkt bij geluidmetingen, zou in de praktijk moeten worden uitgezocht. Bovendien kunnen, ter verdere verificatie van de methodiek, metingen door omwonenden worden vergeleken met metingen van hoge nauwkeurigheid, bijvoorbeeld met een (mobiele) meetpost en met modelresultaten.

Wat betreft de bereidheid geldt dat er een verschil is tussen burgers die meedoen aan citizen science uit een technische interesse en burgers die gemotiveerd zijn vanuit hun ervaring van overlast door vliegtuiggeluid.

¹³ Een voorbeeld is de Explane-app van de actiegroep Schipholwatch. Zie: www.explane.org

Bij dit laatste geldt dat de overheid zo veel mogelijk probeert om alle burgers bescherming te bieden. Complicerende factor daarbij is dat mensen onderling sterk verschillen in de mate waarin ze risico lopen op ziekte en gezondheidsschade. De menselijke verscheidenheid is dus met recht een uitdaging. Als een gevolg van deze verscheidenheid zijn er zogenaamde hoogrisicogroepen te onderscheiden. Hoogrisicogroep is een relatief begrip. Het gaat hierbij volgens de Gezondheidsraad om een subpopulatie die een grotere kans heeft op blootstelling aan een agens of gevoeliger is voor een ziekte dan de rest van de populatie (GzR 2011). In absolute zin kan het echter om een klein risico gaan. Veel factoren kunnen het risico op ziekte en gezondheidsschade beïnvloeden:

- persoonsgebonden kenmerken, zoals geslacht, leeftijd, erfelijke eigenschappen;
- gezondheidstoestand (conditie, pre-existente ziekte);
- leefstijlgebonden kenmerken, zoals voedingspatroon, bewegen, roken;
- kenmerken van de fysieke en sociale omgeving, waaronder milieukwaliteit van de woon- en werkomgeving en voedselveiligheid.

In de hoogrisicogroep bij vliegtuiggeluid is onderscheid te maken tussen geluidgevoeligen en burgers die in gebieden wonen met een hoge geluidbelasting, waar vliegtuiggeluid langdurig hoorbaar is. Er kan overlap zijn tussen deze groepen, maar het is waarschijnlijk dat in hoog en langdurig belaste gebieden meer geluidrobuuste burgers wonen.

Een eerste mogelijkheid voor citizen science met hoogrisicogroepen is een project specifiek gericht op geluidgevoeligen.¹⁴ In het huidige stelsel is gekozen voor bescherming van de gemiddelde bevolking. We hebben geen inzicht in de hinder zoals deze door de specifieke groep geluidgevoeligen ervaren wordt. Dit onderzoek zou gehouden kunnen worden op basis van apps, waarin men op gezette tijden de ervaren hinder registreert. Dit geeft inzicht in de mate waarin deze groep hinder ervaart en geeft erkenning aan het feit dat er grote verschillen zijn tussen personen in de mate waarin geluid van vliegverkeer als hinderlijk ervaren wordt. Dit kan gevolgen hebben voor opvattingen over het te hanteren beschermingsniveau.

Een tweede mogelijkheid is een citizen science project met omwonenden in de hoog en langdurig belaste gebieden in de omgeving van een luchthaven (die waarschijnlijk behoorlijk geluidrobuust zijn). Een deel van deze laatste groep geeft aan dat overlast verergerd is ten gevolge van de toename van vliegverkeer en dat er behoefte is aan rustperiodes. In dit project staat daarom het onderzoeken van de invloed van rustperiodes centraal. In onderzoek naar rustperiodes (in het Engels: respite) rond de luchthaven Heathrow werd duidelijk dat er geen goede, breed geaccepteerde definitie van een rustperiode bestaat. Verwacht wordt dat niet-akoestische factoren zoals publiek bewustzijn, vertrouwen en begrip ten minste even belangrijk zullen zijn als de daadwerkelijke maatregelen om rustperiodes te creëren. In een citizen science-project over rustperiodes gaat men in feite samen met omwonenden op zoek naar een samenhangend stelsel van soundscapes onder de start- en landingsbanen

¹⁴ Volgens de zogenoemde Weinsteinschaal, waarbij mensen zelf aangeven hoe ernstig ze gehinderd zijn.

van luchthavens die door omwonenden als acceptabel geacht wordt. Deze soundscapes laten zich niet goed uitdrukken in L_{den} en L_{night} . Dit is een ingewikkelde opgave, waarbij het maar de vraag is of zo'n stelsel van soundscapes daadwerkelijk gerealiseerd kan worden. Omwonenden moeten daarbij goed geïnformeerd worden dat de invoering van rustperiodes op andere momenten tot extra hinder kan leiden.

3.5 Beschouwing en conclusies

3.5.1 *Geluidindicatoren*

De L_{den} en L_{night} zijn goede geluidindicatoren om de relatie met geluidhinder, slaapverstoring en langetermijngezondheidseffecten te beschrijven, maar zijn soms lastig te interpreteren voor omwonenden en sluiten niet altijd aan bij hun beleving. Uit onderzoek komt naar voren dat andere geluidindicatoren – zoals de 'Number Above'-index – ook gebruikt kunnen worden om de (langetermijn)geluidhinder te beschrijven of te voorspellen. Deze indicatoren zijn echter minder goed dan de L_{den} in staat om de samenhang tussen de geluidbelasting en de daarbij optredende geluidhinder te beschrijven.

Combinaties van geluidindicatoren om de relatie met geluidhinder te verklaren lijken meerwaarde te hebben boven het gebruik van alleen de L_{den} . Uit de drie besproken studies komt naar voren dat de N_{Ax} , in combinatie met de L_{den} , de voorspelling van de hinder kan verbeteren. De studies verschillen onderling in welk afkappunt voor de N_{Ax} het meest relevant is en in de inschatting hoeveel meerwaarde deze indicator zal hebben. De resultaten suggereren dat het afkappunt voor civiel vliegverkeer niet te hoog gelegd moet worden (≤ 65 dB(A) L_{Amax}).

De onderzochte additionele geluidindicatoren zijn gebaseerd op de SEL of L_{Amax} van individuele vliegtuigpassages. Dit betekent dat voor het vaststellen van deze geluidindicatoren geen extra informatie hoeft te worden verzameld, omdat de huidige systematiek voor het vaststellen van de L_{den} en L_{night} ook gebruikmaakt van de SEL en de L_{Amax} . Een eventuele toevoeging aan de huidige systematiek zou het berekenen en/of meten van het achtergrondniveau of het gemiddelde geluidniveau zijn dat door andere bronnen wordt veroorzaakt. In relatie tot hinder of slaapverstoring is er echter weinig onderzoek met deze indicatoren uitgevoerd, zodat het vooralsnog geen prioriteit is om achtergrondniveau of gemiddeld niveau vast te stellen.

De situatie rond luchthavens in Nederland kan onderling sterk verschillen. Het wordt dan ook aanbevolen om per luchthaven (of clusters van luchthavens) door middel van onderzoek te bezien welke combinaties van geluidindicatoren het meest relevant zijn om de hinder (beter) te voorspellen. Het gaat dan om onderzoek waarin zowel naar kortdurende als naar lange-termijneffecten op hinder en slaapverstoring (zie later) wordt gekeken. Het onderzoek naar kortdurende effecten vindt veelal plaats in kleine groepen zodat metingen als basis voor de vaststelling van geluidniveaus kunnen worden gebruikt. Voor onderzoek naar lange-termijn gevolgen zijn grote groepen nodig; deze studies zijn daarom veelal op gemodelleerde geluidgegevens gebaseerd.

Voor andere langetermijneffecten dan hinder en slaapverstoring is er nu geen reden om aan te nemen dat de L_{den} (of L_{night}) niet voldoet. Het aantal studies naar effecten zoals hart- en vaataandoeningen en leesvaardigheid is zeer beperkt. Ook zijn hierin vrijwel geen andere indicatoren dan L_{Aeq} -achtige geluidindicatoren gebruikt.

Opvallend is dat de langetermijneffecten van nachtelijk geluid op gezondheid en welbevinden, zoals slaapverstoring en slaapkwaliteit, nauwelijks onderzocht zijn op de meerwaarde van aanvullende geluidindicatoren, naast de L_{night} .

Wanneer naar acute reacties door nachtelijk geluid van afzonderlijke passages wordt gekeken, is duidelijk dat de totale omvang van deze acute reacties over de nacht niet alleen van de L_{night} maar ook van het aantal passages afhankelijk is. Dit wordt ook door de Guideline Development Group (GDG) van de WHO onderschreven (WHO 2018). De meeste gezondheidseffecten die de GDG in beschouwing neemt zijn het gevolg van langetermijnblootstelling. De GDG doet dan ook geen aanbevelingen voor geluidindicatoren die individuele gebeurtenissen beschrijven.

De Gezondheidsraad beoordeelde de effecten van nachtelijk geluid tijdens de slaap waarbij zij onderscheid maakte tussen biologische (acute) reacties (zoals wakker worden, moeilijker inslapen en meer motorische onrust tijdens het slapen) en gevolgen voor gezondheid en welbevinden (GzR 2004). De Gezondheidsraad achtte de L_{night} nog steeds geschikt als indicator voor nachtelijk geluid, met de kanttekening dat een L_{night} nooit een volledige bescherming kan bieden tegen de verstoring van inslapen en slapen, omdat ongeveer de helft van de volwassenen om 7 uur 's morgens nog slaapt. Naast het stellen van normen voor L_{night} concludeerde de Gezondheidsraad dat, afhankelijk van de norm voor L_{night} en het gekozen beschermingsniveau tegen acute reacties, er ook grenzen kunnen worden gesteld aan het aantal geluidgebeurtenissen.

3.5.2 *Geluidhinder en slaapverstoring*

Het doel van geluidbeleid rond de Nederlandse luchthavens is het beschermen van de bevolking tegen ongewenste negatieve effecten van vliegtuiggeluid, zoals geluidhinder en slaapverstoring. Om de discussie daarover te kunnen voeren, moet duidelijk zijn wat wordt verstaan onder geluidhinder en slaapverstoring, en in welke mate de bevolking last heeft van deze effecten.

3.5.2.1 Monitoring

Bij het vaststellen van de hinder- en gezondheidseffecten van blootstelling aan vliegtuiggeluid kan onderscheid gemaakt worden tussen berekeningen en metingen. Berekeningen veronderstellen een vaste relatie tussen de geluidbelasting en geluidhinder/slaapverstoring (dosis-effectrelaties). Metingen van de ervaren hinder worden doorgaans uitgevoerd met enquêtes. Om vergelijking tussen luchthavens mogelijk te maken, trends in de tijd te kunnen volgen, en de dosis-effectrelatie voor de berekeningen te controleren, verdient het aanbeveling om te streven naar een nationale geharmoniseerde aanpak om periodiek de geluidhinder en slaapverstoring van omwonenden rond de Nederlandse luchthavens te meten. Een mogelijkheid om de

systematiek te verbeteren is de inzet van de landelijke vierjaarlijkse gestandaardiseerde GGD Gezondheidsmonitor (Breugelmans et al. 2016).

3.5.2.2 Verdiepend onderzoek

De relatie tussen geluidbelasting en geluidhinder is in de loop der jaren veranderd: omwonenden ondervinden meer hinder bij dezelfde geluidbelasting dan vroeger het geval was. De dosis-effectrelatie die in Nederland wordt gebruikt om de verwachte geluidhinder te berekenen, is in 2002 afgeleid uit onderzoek onder omwonenden van Schiphol. Het is onduidelijk in welke mate de huidige door de omwonenden beleefde geluidhinder afwijkt van de dosis-effect relatie uit 2002. Daarnaast worden substantiële verschillen waargenomen in de ervaren hinder tussen luchthavens: de mate van hinder die omwonenden ondervinden verschilt bij dezelfde geluidbelasting. In aanvulling op het voorgestelde onderzoek naar aanvullende geluidindicatoren wordt geadviseerd om vast te stellen of de dosis-effectrelaties voor geluidhinder en slaapverstoring uit 2002 nog up-to-date zijn voor de situatie rond Schiphol en toepasbaar rond de andere Nederlandse burgerluchthavens. Daarbij kan ook de invloed van niet-akoestische factoren op verschillen in geluidhinder tussen Nederlandse luchthavens worden meegenomen. Verdiepend onderzoek biedt ook de mogelijkheid om te bezien welke invloed (het verminderen van) rustperiodes (ook wel 'respite' genoemd) op de ervaren hinder van omwonenden heeft. Door een toename in de afgelopen jaren van het aantal vliegbewegingen zijn de mogelijkheden voor respite beperkter geworden.

Het onderzoek naar geluidindicatoren, respite en niet-akoestische factoren kan in principe in samenhang worden uitgevoerd, maar vraagt om een extra onderzoeksinspanning ten opzichte van activiteiten gericht op monitoring. Mocht blijken dat deze factoren de verschillen tussen luchthavens (deels) kunnen verklaren, dan kan vervolgens overwogen worden onderzoek uit te laten voeren naar hoe de betreffende factoren rond specifieke luchthavens ten positieve aangewend kunnen worden.

3.5.3 *Burgerperspectieven*

De algemene geldigheid van de bevindingen heeft beperkingen, omdat de Boxen gebaseerd zijn op focusgroepen en Internetraadpleging. Daarmee komt slechts een beperkte groep burgers aan het woord. Desalniettemin is dit relevante informatie die met behulp van enquête-onderzoek minder makkelijk verzameld kan worden.

3.5.3.1 Vertrouwen

In de burgerperspectieven in de Boxen over Schiphol, Lelystad en Twente komt naar voren dat een gebrek aan vertrouwen wordt ingegeven door een gebrek aan open discussie en transparante afweging van nut, noodzaak en locatie van luchthavens.

Daarnaast geldt dat er in vrijwel alle gepresenteerde burgerperspectieven op Nederlandse luchthavens een gebrek is aan vertrouwen in de verantwoordelijke overheden. Vaak heeft dat te maken met gepercipieerde oprechtheid en eerlijkheid en met het idee dat de overheid te weinig zorg draagt voor de belangen van de burgers. Dit zijn de laatste twee componenten van vertrouwen, zoals geschetst in paragraaf 3.4.1. De discussie gaat veel minder vaak over deskundigheid. In de burgerperspectieven op de Luchthavens Schiphol en Lelystad speelt dit

weliswaar een rol, maar ook hier is het sterk gekoppeld aan oprechtheid, eerlijkheid en zorg.

Uit de burgerperspectieven komt naar voren dat met betrekking tot eerlijkheid en oprechtheid, de perceptie dat (de ontwikkeling van) luchthavens boven de wet staan en dat er aparte regels voor gelden, een belangrijke rol speelt. Om meer vertrouwen van burgers te krijgen, is het daarom belangrijk dat er voor luchthavens processen doorlopen worden die als eerlijk en fair gepercipieerd worden. Dat betekent, volgens de perspectieven in deze paragraaf, niet alleen dat burgers betrokken moeten worden, maar ook dat de regels voor luchthavens vergelijkbaar moeten zijn met die voor andere bedrijvigheid.

Ook volgt uit de burgerperspectieven dat omwonenden pleiten voor begrijpelijke taal over rekenen en meten voor niet-experts. De huidige termen en regelgeving zijn voor hen vaak niet te volgen. Dit vraagt om kwalitatief goede publiekscommunicatie.

3.5.3.2 Regionale verschillen

De argumenten tegen de luchthavens zijn niet in iedere regio dezelfde. Vaak zijn ze het gevolg van specifieke besluitvormingsprocessen of de manier waarop luchthavens beheerd worden. Ook zijn ze vaak beter te begrijpen vanuit het concept 'soundscapes', waarbij er geredeneerd wordt vanuit geluidskwaliteit en geluiden die al dan niet bij een bepaalde omgeving passen. Dit geldt in het bijzonder voor het protest tegen laagvliegroutes en in de roep om rustperiodes door burgers, die direct onder de start- en landingsbanen van Schiphol wonen. Dit roept de vraag op of en hoe 'soundscapes' in een systematiek van meten en rekenen aan luchtvaartgeluid verwerkt kunnen worden. De regionale verschillen uit zich ook in aanzienlijke verschillen in de informatiebehoefte, waarin alleen op regionaal niveau voorzien kan worden.

3.5.4 *Citizen science*

Uit de paragrafen over citizen science komt naar voren dat dit fenomeen veel meer omvat dan het zelf meten door burgers. Er zijn verschillende manieren om dit vorm te geven en toch kwalitatief goede data te verzamelen. Aanvullend geldt dat citizen science positief kan bijdragen aan het begrip van rekenen en meten en het vertrouwen in de verantwoordelijken hiervoor. Dit biedt dus een mogelijkheid om een betrouwbaar systeem van meten en rekenen te ontwikkelen waarbij ook de betrokken partijen vertrouwd worden. Cruciaal hierbij is niet de techniek, maar de manier waarop het project georganiseerd is. Doelstelling moet zijn relaties te verbeteren, wederzijds te leren en het combineren van data. Dit stelt eisen aan bereidheid, techniek en data science.

Het is zinnig om bij citizen science projecten een onderscheid te maken in technisch geïnteresseerden en hoogrisicogroepen die hun motivatie tot deelname vinden in de hinder die zij van vliegverkeer ondervinden. Deze laatste groep bestaat uit burgers die in hoog belaste gebieden wonen waar vliegtuiggeluid langdurig hoorbaar is en geluidgevoeligen. De technisch geïnteresseerden en de hoogrisicogroepen sluiten elkaar niet noodzakelijk uit. Output van de projecten met hoogrisicogroepen is:

- a. inzicht in de definitie van en mogelijkheden tot respijt, en;
- b. inzicht in de hinderbeleving van geluidgevoeligen en mogelijk nieuwe inzichten in het bijpassende beschermingsniveau.

4 Geluidberekeningen rond luchthavens

Met rekenmodellen wordt de geluidproductie van vliegverkeer in kaart gebracht. Hierbij worden verschillende aannames en keuzes in de modellering gemaakt. Dit hoofdstuk legt uit hoe het maken van geluidberekeningen in zijn werk gaat. De volgende zaken worden behandeld:

- Hoe beschrijven we geluid, hoe komt vliegtuiggeluid bij de ontvanger op de grond en welke geluidmodellen zijn er?
- Hoe werken berekeningen met de huidige modellen? Daarbij komen bijvoorbeeld invoergegevens, de berekening en de analyse van berekeningsresultaten aan de orde, maar ook aannames en beperkingen van geluidberekeningen.
- Welke andere rekenmodellen zijn beschikbaar?
- Wat zijn mogelijke toepassingen van berekeningen?
- Wat zijn mogelijke ontwikkelingen op het gebied van rekenmodellen?

4.1 Introductie

4.1.1 *Hoe beschrijven we geluid?*

De hoeveelheid geluid die wordt geproduceerd door vliegverkeer kan op verschillende manieren beschreven worden:

1. Voor een individuele vliegtuigpassage; dit wordt geluidniveau genoemd.
2. Voor meerdere vliegtuigpassages gedurende een langere periode samen; dit wordt geluidbelasting genoemd.

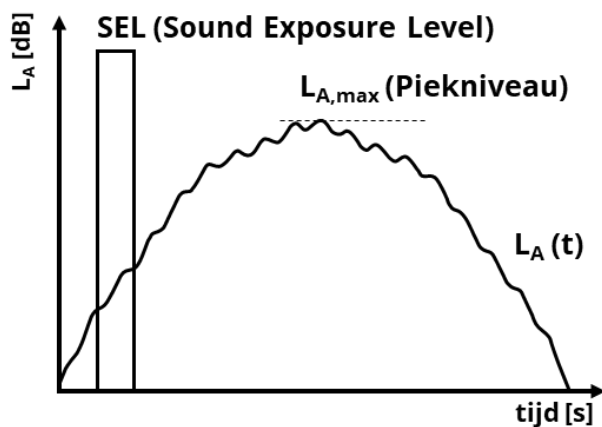
De hoeveelheid geluid wordt uitgedrukt in decibellen (dB). Geluidmaten voor vliegtuiggeluid worden uitgedrukt in 'A-gewogen decibel', ofwel dB(A). Door deze weging tellen vooral lagere frequenties net als bij het menselijk gehoor minder zwaar mee. De decibel is daarbij een logaritmische maat die gehanteerd wordt bij geluid.

Box 7: Manieren om het geluid van een vliegtuigpassage te beschrijven

Een individuele vliegtuigpassage kan worden beschreven met de volgende twee maten:

1. Het maximale geluidniveau LA_{max} . Dit is het hoogste geluidniveau dat een vliegtuig gedurende een passage produceert,
2. Sound Exposure Level (SEL). Dit is het geluidniveau dat, als de vliegtuigpassage slechts één seconde zou duren, dezelfde hoeveelheid geluidenergie zou produceren als de gehele beschouwde vliegtuigpassage.

Beide maten zijn gevisualiseerd in Figuur 15 waar het verloop van het geluidniveau $LA(t)$ als functie van tijd geplot is. Hierin is te zien dat de LA_{max} hoger ligt dan het gemiddelde geluidniveau. De SEL ligt voor vliegtuiggeluid altijd hoger dan de LA_{max} omdat het werkelijke event langer duurt dan één seconde.



Figuur 15. Verschillende geluidmaten tijdens een vliegtuigpassage.

Bij het vaststellen van de geluidbelasting ten gevolge van meerdere vliegbewegingen wordt de bijdrage van elke vliegbeweging binnen een dag opgeteld. Dit kan door $L_{A,max}$ of SEL waarden op te tellen volgens een voorgeschreven formule waarbij ook het tijdstip van de vliegbeweging wordt meegenomen.

Daarnaast kan ook nog rekening worden gehouden met het moment van de dag waarop een vliegbeweging plaatsvindt. De L_{den} (dag-avond-nacht-geluidbelasting) wordt bepaald door de SEL per vliegbeweging op te tellen. Het is de gemiddelde geluidblootstelling over een langere periode (meestal een jaar), waarbij voor vliegbewegingen in de avond en nacht een extra etmaalweegfactor wordt gerekend. Bij een passage in de nacht (van 23.00 tot 07.00) wordt 10 dB(A) opgeteld bij de SEL-waarde en in de avond (van 19.00 tot 23.00) 5 dB(A).

De decibel is een logaritmische maat, waardoor dB(A)-waarden van geluidniveaus van vliegtuigen niet direct bij elkaar kunnen worden opgeteld (twee bronnen van 60 dB(A) geven gezamenlijk géén 120 dB(A)). Hieronder volgen enkele rekenvoorbeelden.

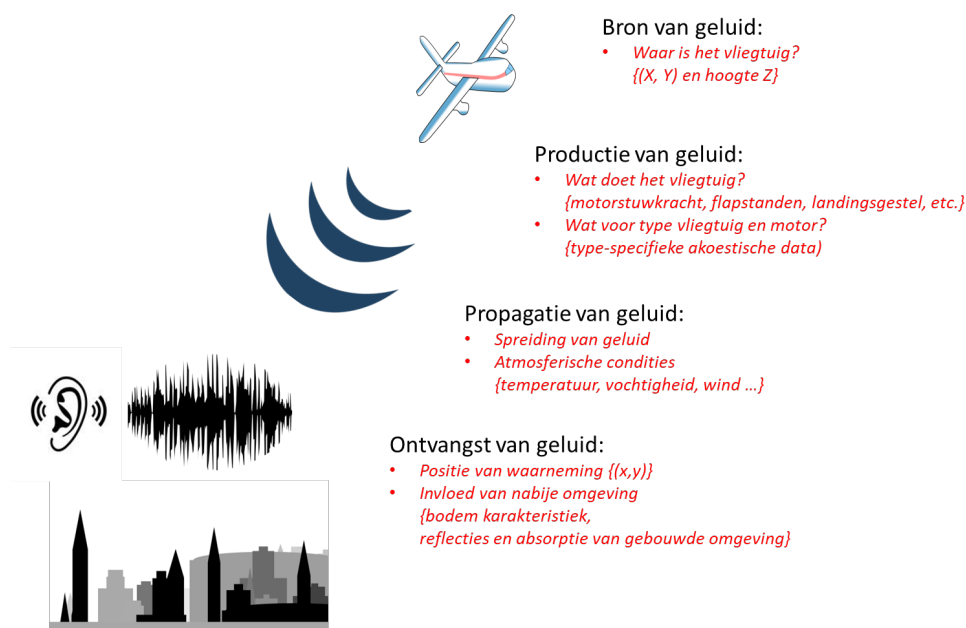
$$\begin{array}{rcl}
 60 \text{ dB(A)} & + & 60 \text{ dB(A)} = 63.0 \text{ dB(A)} \\
 5 & \times & 60 \text{ dB(A)} = 67.0 \text{ dB(A)} \\
 10 & \times & 60 \text{ dB(A)} = 70.0 \text{ dB(A)} \\
 70 \text{ dB(A)} & - & 60 \text{ dB(A)} = 69.5 \text{ dB(A)}
 \end{array}$$

Hierbij wordt opgemerkt dat verschillen van 3 dB(A) of minder tussen twee passages voor de gemiddelde waarnemer moeilijk te horen zijn. Uit diverse studies is bekend dat mensen pas vanaf 5 dB(A) een duidelijk verschil gaan horen. Bij een verschil van 10 dB(A) wordt geluid over het algemeen als twee keer zo hard ervaren (Goelzer et al. 2001). Echter, kleinere verschillen in de geluidbelasting doen er wel toe. Een 3 dB(A)-toename van de geluidbelasting komt, bij gelijkblijvende niveaus per vlucht, overeen met een verdubbeling van het verkeer. Ook in termen van hinder kunnen relatief kleine verschillen in de geluidbelasting relevant zijn. De voor Schiphol gehanteerde dosis-effectrelatie (zie paragraaf 3.2.2) geeft aan dat in het traject tussen de 57 en 63 dB(A) een verschil in geluidbelasting van 0,3 dB(A) L_{den} overeenkomt met ongeveer 1% verschil in de kans op ernstige hinder.

4.1.2

Hoe komt geluid vanuit de bron bij de ontvanger?

Een vliegtuig produceert geluid, met de motoren, maar ook door de luchtstroming langs bijvoorbeeld het landingsgestel en de vleugels. Dit geluid zal vervolgens door de lucht van het vliegtuig naar een ontvanger gaan. Dit wordt ook wel de propagatie van geluid door de lucht genoemd. Uiteindelijk zal het geluid een ontvanger bereiken, bijvoorbeeld een microfoon of een oor. Dit is geschetst in Figuur 16.



Figuur 16. Geluid van bron tot ontvanger.

Figuur 16 laat zien welke elementen bepalen hoeveel geluid op de grond te horen is:

- De geluidbron: hierbij zijn verschillende zaken van belang, zoals de positie van de bron (die de afstand tot de ontvanger bepaalt) en de geluidproductie van de bron (zowel de intensiteit van het geluid als de frequenties die worden uitgezonden).
- Propagatie: het geluid reist door de lucht naar de ontvanger. Hierbij spelen verschillende zaken een rol, zoals demping van geluid door de atmosfeer en verspreiding van geluid door de atmosfeer. De mate van demping hangt af van de toestand van de atmosfeer; in het algemeen worden hoge frequenties eerder gedempt dan lage frequenties. Daarnaast zal de geluidintensiteit verder van de bron afnemen doordat het geluid over een groter gebied verspreid wordt.
- De ontvanger: de situatie nabij de ontvanger zal invloed hebben op de hoeveelheid geluid die wordt waargenomen. Zo kunnen bijvoorbeeld gebouwen in de buurt van de ontvanger geluid afschermen of juist weerkaatsen, waardoor het geluidsniveau respectievelijk afneemt of toeneemt. Als geluid weerkaatst tegen een object of de ondergrond kan een deel van het geluid geabsorbeerd worden. Daarbij zal een harde en vlakke ondergrond minder geluid absorberen (en dus meer geluid weerkaatsen) dan bijvoorbeeld een grasveld.

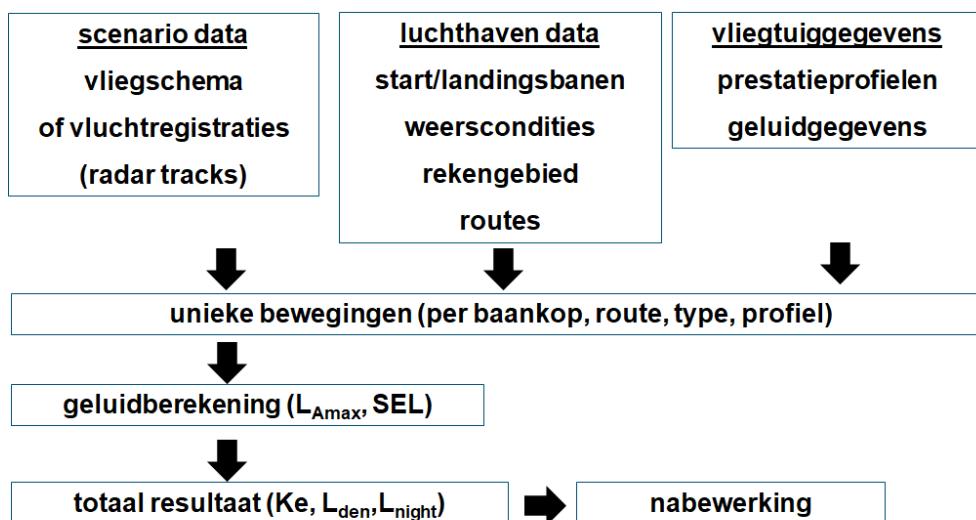
Naast vliegtuiggeluid kunnen in de praktijk ook andere geluidbronnen (zoals verkeer of industrie) geluid produceren nabij de ontvanger, waardoor het waargenomen geluidniveau wordt beïnvloed.

4.2 Berekeningen met de huidige modellen

Voor het berekenen van geluidbelasting is een aantal modellen beschikbaar, waaronder het Nederlandse Rekenmodel (NRM) (Van der Wal et al. 2001) en het NLR-model TUNA (Heblij et al. 2017), dat gebaseerd is op de Europese rekenmethodiek ECAC Doc29 (ECAC.CEAC 2016a, ECAC.CEAC 2016b, ECAC.CEAC 2016c). In Nederland wordt momenteel voor handavingsberekeningen het NRM gebruikt (en Doc29 dus niet).

Voor het Milieu Effect Rapport (MER) van Schiphol is gebruikgemaakt van een rekenmethode gebaseerd op de nieuwste aanbevelingen van de European Civil Aviation Conference (ECAC), ook wel bekend als ECAC Doc29 (kortweg Doc29). ECAC Doc29 beschrijft een voor Europa geharmoniseerde methode om de geluidbelasting rondom civiele luchthavens te bepalen. Het document beschrijft vooral de Doc29-rekenmethode tot in detail en is wat dat betreft te vergelijken met het rekenvoorschrift voor het NRM.

Figuur 17 geeft een schematisch overzicht van een geluidberekening. Eerst worden alle relevante invoergegevens verzameld en bewerkt, zodat ze in het rekenmodel gebruikt kunnen worden. Daarna wordt het geluidniveau per individuele vliegbeweging (of per groep identieke vliegbewegingen) berekend, en vervolgens kunnen de bijdragen van alle vliegbewegingen worden opgeteld om zo tot de totale geluidbelasting te komen. Tot slot kan de uitkomst verder worden geanalyseerd, door bijvoorbeeld geluidcontouren te bepalen. Dit schema geldt voor zowel Doc29- als NRM-berekeningen.



Figuur 17. Overzicht rekenmethodieken geluidberekeningen.

Het bovenstaande schema wordt in de volgende secties nader toegelicht.

4.2.1

Invoergegevens

Om vliegtuiggeluid te kunnen berekenen zijn drie soorten invoergegevens nodig (zie de bovenste drie blokken in Figuur 17):

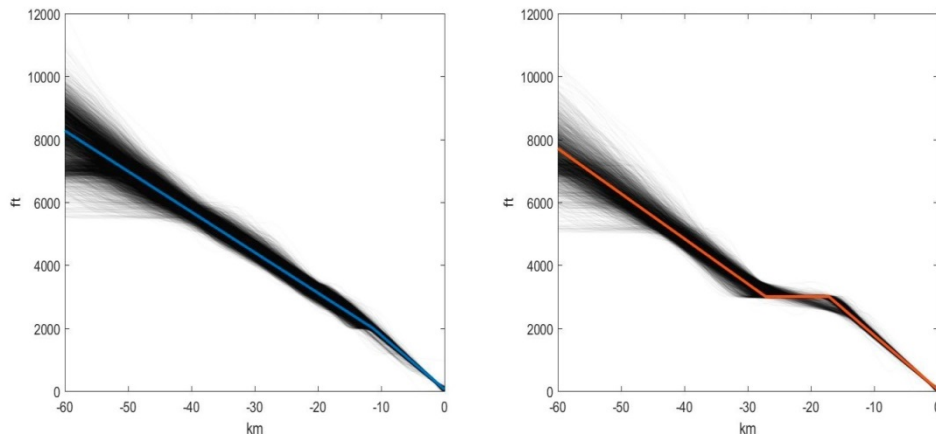
- Scenariogegevens definiëren per vliegbeweging het vliegtuigtype, de starttijd of landingstijd, de gevlogen route en de gevolgde procedure (start of landing, maar ook bijvoorbeeld wel of geen continue daalvlucht bij een landing). Bij een deel van de geluidberekeningen worden ook de radartracks verzameld en omgezet in grondpaden voor de geluidberekening.
- Luchthavengegevens bevatten informatie over zaken die gerelateerd zijn aan de luchthaven, zoals coördinaten van de startbaan of -banen.
- Vliegtuiggegevens beschrijven de vliegprestaties en de geluidproductie per combinatie van vliegtuigtype en motortype gedurende een vliegtuigbeweging:
 - Vliegtuigprestaties (vliegprofielen of prestatieprofielen) betreffen het verloop van de hoogte, vliegsnelheid en stuwkracht van een vliegtuig als functie van de afgelegde weg.
 - De geluidproductie van een vliegtuig wordt gemodelleerd met geluidtabellen. De geluidtabel (ook wel Noise-Power-Distance-tabel of NPD-tabel genoemd) beschrijft de geluidniveaus als functie van de stuwkracht en de afstand tussen het vliegtuig en het berekeningspunt. In de tabellen die gebruikt worden voor Doc29-berekeningen zijn afzonderlijke gegevens opgenomen voor starts en landingen. Het is van groot belang om op te merken dat deze tabellen worden vastgesteld met behulp van geluidmetingen die onder gecontroleerde omstandigheden worden uitgevoerd. Dit wil zeggen dat de basis van een rekenmodel gebaseerd is op geluidmetingen.¹⁵

Voor het NRM zijn de vliegtuigprestatiegegevens vastgesteld in de zogeheten appendices (Heppe 2015). De voor Schiphol ontwikkelde invoergegevens voor Doc29-berekeningen zijn gebaseerd op gegevens uit een Europese database, namelijk de Aircraft Noise and Performance (ANP) database (Eurocontrol 2019). Dit is een internationale databank met geluid- en vliegprestaties (hoogte-, stuwkracht- en snelheidsverloop).

Omdat het hoogteverloop in de praktijk kan afwijken van een standaard start- of landingsprocedure uit de ANP-database, is voor Doc29-berekeningen voor Schiphol een grotere set van start- en landingsprofielen aangemaakt. Vervolgens kan op basis van het daadwerkelijke hoogteverloop uit een radartrack bepaald worden welk profiel het beste kan worden toegepast (Heblij et al. 2017). Twee voorbeelden van de match tussen radardata en een profiel zijn gegeven in Figuur 18.

Door het gebruik van veel meer profielen dan in de oude situatie met het NRM, zijn verschillen in hoogtemodellering tussen model en praktijk nu veel kleiner.

¹⁵ NB: Vanwege het feit dat er tegenwoordig meer kennis is en omdat er uitgebreidere procedures gehanteerd worden bij de certificatie, is het mogelijk dat recente NPD-metingen nauwkeuriger zijn dan oudere metingen, bijvoorbeeld metingen voor vliegtuigen die 25 of 30 jaar geleden gecertificeerd zijn.



Figuur 18. Voorbeelden, voor twee verschillende landingsprocedures, van radartracks (weergegeven met zwarte lijnen) die aan het best bijpassende prestatieprofiel zijn gekoppeld (weergegeven met blauwe (links) en rode lijn (rechts)). De Y-as toont de vlieghoogte, de X-as de afstand tot de landingsbaan.

4.2.2 Berekening

Als de invoergegevens beschikbaar zijn, worden de rekeninstellingen gedefinieerd, zoals de ligging van het rekengebied (op welke punten dient geluid berekend te worden) en welke geluidmaat dient berekend te worden. Daarna kan een geluidberekening worden uitgevoerd voor elke individuele vliegbeweging. Met behulp van het grondpad en het hoogteprofiel (deze is gedefinieerd in een prestatieprofiel) wordt een 3-dimensionale (3D) vliegbaan gemaakt, waarbij op elk moment de 3D-positie, de snelheid en de stuwkracht van het vliegtuig bekend zijn. De snelheid en stuwkracht worden bepaald aan de hand van het prestatieprofiel.

Uiteindelijk wordt het geluidniveau per vliegbeweging op een grid van rekenpunten bepaald. Deze wordt bepaald met behulp van de geluidtabel op basis van stuwkracht van het vliegtuig en de afstand tussen vliegtuig en rekenpunt. Hierbij wordt voor rekenpunten die zich niet onder maar aan weerszijden van het vliegp pad bevinden nog één (of meerdere) correctie(s) toegepast. Een bekend voorbeeld is de laterale geluidverzwakking van het NRM (Van der Wal et al. 2001) of Doc29 (ECAC.CEAC 2016b). Daarna wordt de bijdrage van elke afzonderlijke vliegbeweging opgeteld, om zo op elk rekenpunt de geluidbelasting te bepalen. Hierbij worden voor een L_{den} -berekening etmaalweegfactoren toegepast, waardoor vliegbewegingen die gedurende de avond of nacht plaatsvinden zwaarder meetellen dan vliegbewegingen die overdag plaatsvinden.

4.2.3 Analyse van berekeningsresultaten

Een geluidberekening resulteert in de waarde van de geluidbelasting op een groot aantal rekenpunten. Om deze informatie te kunnen gebruiken wordt dit resultaat doorgaans nader geanalyseerd (zie paragraaf 4.4 voor meer informatie over toepassingen van rekenmodellen). Welke analyse wordt uitgevoerd hangt af van het doel van de berekening, maar hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het bepalen van geluidcontouren. Vervolgens kan desgewenst worden vastgesteld

hoeveel woningen er binnen bepaalde contouren liggen of hoeveel personen hier wonen.

Als bekend is hoeveel personen zich binnen bepaalde contouren bevinden, kan met behulp van een dosis-effectrelatie een schatting gemaakt worden van het aantal ernstig gehinderden ten gevolge van vliegtuiggeluid (zie hoofdstuk 3). Andersom kunnen resultaten van berekeningen ook gebruikt worden bij het vaststellen van dosis-effectrelaties, door gerapporteerde hinder te koppelen aan de berekende geluidbelasting.

4.2.4 *Aannames en beperkingen bij het uitvoeren van geluidberekeningen*

4.2.4.1 Aannames geluidberekeningen

Bij het uitvoeren van berekeningen met een rekenmodel worden aannames gedaan. Voor handhavingsberekeningen wordt een wettelijk voorgeschreven rekenmodel gebruikt zodat vaststaat hoe de geluidbelasting bepaald dient te worden en ook welke aannames daarbij gehanteerd dienen te worden. Deze aannames geven een belangrijke verklaring voor het feit dat de uitkomsten van meten en rekenen kunnen verschillen.

Dit geldt zowel voor berekeningen met het NRM als voor Doc29-berekeningen. Weliswaar verschillen de modellering en de gehanteerde invoergegevens, maar op hoofdlijnen worden dezelfde aannames gedaan, waardoor het overzicht van aannames in deze paragraaf voor beide modellen geldt. De verschillen tussen beide modellen zullen er wel toe leiden dat beide modellen andere uitkomsten en dus ook andere verschillen met metingen geven.

Bij handhavingsberekeningen voor Nederlandse luchthavens zijn de volgende aannames van invloed op verschillen tussen rekenen en meten:

- Bij berekeningen worden vaste weersomstandigheden verondersteld, op basis van de Internationale Standaard Atmosfeer (ISA). Dit wil bijvoorbeeld zeggen dat variaties in windrichting en snelheid, temperatuur en luchtvochtigheid gedurende het jaar niet worden meegenomen. De weersomstandigheden zullen in de praktijk zowel invloed hebben op de prestaties van het vliegtuig als op de voortplanting van het geluid door de atmosfeer en zo dus op het waargenomen geluidsniveau.
- Tevens wordt verondersteld dat de vliegtuigprestaties (het verloop van hoogte, snelheid en stuwkracht) bij een bepaalde procedure altijd gelijk zijn. Voor Doc29-berekeningen voor Schiphol zijn prestatiegegevens voor een veel groter aantal vliegtuigtypes en procedures beschikbaar dan voor het NRM.
- De geluidgegevens van vliegtuigen zijn over het algemeen alleen beschikbaar voor twee specifieke condities (nadering en vertrek), met voor elk toestel bijbehorende representatieve configuraties en snelheid. Er wordt aangenomen dat deze geluidgegevens ook geldig zijn bij andere condities en snelheden, maar verder van de luchthaven kunnen hierdoor verschillen ontstaan tussen meten en rekenen.
- Indien voor een bepaald vliegtuigtype geen prestatiegegevens beschikbaar zijn worden gegevens van een vergelijkbaar type gebruikt. Dit kan tot verschillen tussen meten en rekenen leiden,

met name indien op een bepaalde luchthaven relatief veel verkeer is waarvoor dit speelt.

- In sommige gevallen wordt de vliegroute gemodelleerd, met name als er geen geschikte radargegevens beschikbaar zijn. Daarbij worden aannames gedaan over waar vliegtuigen vliegen.
- Over de omgeving van de luchthaven worden de volgende aannames gedaan:
 - De omgeving is vlak en er is geen bebouwing.
 - Er wordt uitgegaan van een zachte bodem.
 - De omgeving is stil, kortom, er wordt geen rekening gehouden met mogelijke andere geluidbronnen die bijvoorbeeld vliegtuiggeluid kunnen maskeren. Hier wordt later in deze paragraaf nog nader op ingegaan.

Verschillen tussen metingen en berekeningen zijn onvermijdelijk. Een verschil hoeft geen systematische oorzaak te hebben. Soms meet je meer dan wat je berekent, soms minder. Als de meetwaarden even vaak onder als boven de berekende waarden zitten, dan zullen gemeten en berekende jaargemiddelden (L_{den}) ongeveer gelijk zijn. Zit er echter een aantal dB(A) tussen, dan is er sprake van een systematische fout en is er een goede reden om kritisch naar de oorzaak te zoeken.

Tot slot is het van belang om op te merken dat niet alle aannames die gedaan worden bij handavingsberekeningen noodzakelijk zijn. Zo biedt Doc29 bijvoorbeeld de mogelijkheid om berekeningen te doen waarbij variaties in weersomstandigheden wel gedeeltelijk worden meegenomen (zie paragraaf 4.2.4.2), of kunnen invloeden van hoogteverschillen in de omgeving van een vliegveld gedeeltelijk worden meegenomen.

4.2.4.2 Beperkingen geluidberekeningen

Op basis van de bovengenoemde aannames kan een aantal beperkingen van berekeningen worden geconstateerd. De volgende beperkingen worden hieronder besproken:

- De vliegtuigprestaties (hoogte, snelheid en stuwkracht) van vliegtuigen worden gemodelleerd, waardoor de waarden van deze parameters kunnen afwijken van de werkelijkheid. In sommige gevallen worden ook vliegroutes gemodelleerd.
- Voor handavingsberekeningen worden variaties in het weer niet meegenomen. Hierop geldt wel één uitzondering. Weersomstandigheden (wind en zichtcondities) bepalen ook mede het baangebruik van luchthavens, wat weer grote invloed heeft op de geluidbelasting. Dit wordt wel meegenomen in de berekeningen.
- Bij geluidberekeningen wordt doorgaans alleen het geluid van vliegverkeer van en naar één luchthaven berekend en worden andere geluidbronnen niet meegenomen.

Overigens worden bij het bepalen van de jaarlijkse geluidbelasting dezelfde aannames gedaan als bij het vaststellen van de maximaal toegestane geluidbelasting. Hierdoor is er sprake van een zuivere vergelijking tussen de berekende jaarlijkse geluidbelasting en de bijbehorende norm waartegen getoetst wordt.

Vliegtuigprestaties

Bij handhavingsberekeningen worden de vliegtuigprestaties (hoogte, snelheid en stuwkracht) van vliegtuigen gemodelleerd, waardoor de waarden van deze parameters kunnen afwijken van de werkelijkheid. In de eerste plaats geldt dat de gebruikte vliegprestatie modellen (bij gebrek aan meer gedetailleerde gegevens) een vereenvoudiging van de werkelijkheid zijn. Daarnaast kan in praktijk ook anders worden gevlogen dan verondersteld in de modellering.

Wel wordt op basis van onder andere het werkelijke hoogteverloop bepaald welke gemodelleerde prestatiegegevens het beste passen bij het werkelijke vlieggedrag. Met name bij de Doc29-berekeningen voor Schiphol is een grote hoeveelheid aan prestatiegegevens aangemaakt, met als doel ervoor te zorgen dat de gemodelleerde prestatiegegevens goed aansluiten bij de werkelijkheid.

Daarnaast biedt Doc29 in theorie ook de mogelijkheid om op basis van radargegevens per individuele vliegbeweging prestatiegegevens te bepalen. Dit is echter nog geen gangbare praktijk en deze mogelijkheid zou eerst nader onderzocht moeten worden om te kijken in hoeverre dit kan leiden tot een kleiner verschil tussen meten en rekenen. Daarnaast is deze toepassing niet zonder meer toepasbaar binnen de huidige handhavingssystematiek omdat dit tot meer onzekerheid leidt (in paragraaf 4.5.1 wordt met een voorbeeld toegelicht hoe een aanpassing tot meer onzekerheid kan leiden).

Voor een gedeelte van de berekeningen wordt de vliegroute (het pad over de grond) afgeleid aan de hand van radargegevens. In andere gevallen worden ook de vliegroutes gemodelleerd. In het laatste geval ontstaat ook hier een mogelijk verschil tussen model en werkelijkheid.

Weerscondities

Bij handhavingsberekeningen worden vaste weerscondities aangenomen. In werkelijkheid zullen ook andere condities optreden. Dit heeft zowel invloed op de vliegtuigprestaties als op de propagatie van geluid door de lucht.

Ook hier geldt dat Doc29 kan omgaan met de werkelijke temperatuur en luchtvochtigheid. Hierbij wordt een deel van de invloed van weerscondities op de propagatie meegewogen. Gebruik van deze mogelijkheid is niet gangbaar en daar is ook in Nederland nog geen sprake van. Wel heeft dit onderwerp de aandacht van AIRMOD, de werkgroep die Doc29 onderhoudt: er wordt een advies hierover verwacht. Vooruitlopend daarop wordt aanbevolen om te onderzoeken in hoeverre een aangepaste modellering de verschillen tussen meten en rekenen kan verkleinen. Dit kan op basis van bestaande gegevens relatief snel en eenvoudig onderzocht worden. Evenals bij de vliegtuigprestaties moet hierbij worden opgemerkt dat dit niet zonder meer kan worden meegenomen bij de handhaving. Daarnaast kunnen ook andere geluidmodellen ontwikkeld worden die rekening houden met de actuele weerscondities.

Geluid van meerdere bronnen

Doorgaans worden berekeningen uitgevoerd per luchthaven. Daarbij wordt niet gekeken naar de mogelijke geluidproductie van andere bronnen, zoals wegverkeer, treinen, industrie of andere luchthavens. In de praktijk zullen mensen wel meerdere geluidbronnen ervaren en soms ook van verschillende luchthavens. Van al deze bronnen kan de geluidbelasting berekend en desgewenst opgeteld worden. Bij de handhaving voor Nederlandse vliegvelden wordt dit echter niet gedaan, waardoor deze opgetelde geluidbelasting hierbij geen rol speelt. Anderzijds zullen naar alle waarschijnlijkheid in het Besluit kwaliteit leefomgeving (één van de AMvB's van de Omgevingswet) instructieregels worden opgenomen over het beoordelen van het geluid van meerdere geluidbronsoorten tegelijk (cumulatie), waarbij ook het geluid van luchtvaart kan worden betrokken.

Hoe dit onderwerp meegenomen zou kunnen worden in de handhaving, valt buiten de scope van de Programmatische Aanpak; het zal in dit rapport dus niet aan de orde komen. Wel zijn de volgende opmerkingen met betrekking tot de cumulatie van geluid van belang in dit kader:

- Om goede uitspraken te kunnen doen over de verschillen tussen metingen en berekeningen zullen de gemeten en berekende geluidbelasting op dezelfde manier bepaald moeten worden. Bronnen die niet meegenomen worden in de berekende geluidbelasting dienen zo veel mogelijk uit de gemeten geluidbelasting gefilterd te worden.
- De beleving van omwonenden kan wel beïnvloed worden door de gecumuleerde geluidbelasting. Indien de gecumuleerde geluidbelasting ten gevolge van meerdere geluidbronnen berekend wordt, is het echter nodig te beseffen dat hierbij verschillende modellen gebruikt worden, met elk hun eigen aannames en nauwkeurigheid.

4.2.5 Toepassingsbereik

Zoals eerder genoemd, bepaalt het rekenmodel aan de hand van invoergegevens de geluidbelasting rondom een luchthaven. Over het algemeen neemt de geluidbelasting af op grotere afstand van de luchthaven door grotere hoogte en spreiding in routes. Afhankelijk van meteorologische condities, gehoordrempel en omgevingsgeluid, kan een vliegtuig nog hoorbaar zijn en bijdragen aan de geluidbelasting op grote afstand van de luchthaven. Rekenmodellen bieden de mogelijkheid om op zeer grote afstanden van de luchthaven geluidberekeningen uit te voeren. Echter, er zijn redenen (zie onder) om een grens te bepalen tot waar gerekend wordt.

In het algemeen kan gesteld worden dat rekenmodellen met name gericht zijn op het bepalen van geluid in de nabije omgeving van luchthavens. Het is niet zonder meer mogelijk om aan te geven tot waar een model bruikbaar is. Dit hangt namelijk af van verschillende factoren, zoals de hoeveelheid verkeer, de kwaliteit van de invoergegevens, de voorspelbaarheid van het gedrag van vliegtuigen rondom een luchthaven, het bereik van geluidtabellen, etcetera. Daarnaast zal de kwaliteit van de uitkomsten van een rekenmodel geleidelijk afnemen en ook daardoor kan geen harde grens bepaald worden tot waar de uitkomsten betrouwbaar zijn.

Er is echter wel een aantal zaken aan te geven dat van invloed is op het toepassingsbereik van een rekenmodel:

- De vliegtuigprestatiegegevens in de ANP-database zijn gedefinieerd tot een hoogte van 10.000 ft. Berekeningen voor verkeer boven deze hoogte zijn gebaseerd op extrapolaties en daardoor minder betrouwbaar. Deze beperking heeft ook in internationaal kader de aandacht en wordt mogelijk op termijn verholpen.
- Vanaf een hoogte van 10.000 ft neemt ook de onzekerheid over vlieggedrag toe, omdat tot deze hoogte een snelheidsbeperking geldt (maximale snelheid van 250 knopen). Op grotere hoogte kunnen dus grotere variaties in snelheid optreden, en dus ook in hoogte, omdat bij vliegtuigen het accelereren ten koste gaat van de klimprestaties.
- Geluidtabellen zijn vastgesteld voor een bepaalde configuratie van een vliegtuig (wel of geen landingsgestel uit en een bepaalde uitslag van de kleppen van het vliegtuig). Naarmate de afstand tot de luchthaven toeneemt, wordt de kans groter dat in een andere configuratie gevlogen wordt. Idealiter worden hiervoor in de toekomst de geluidtabellen uitgebreid, zie ook paragraaf 4.5.2.2.
- Bij naderingen ligt met name het vlieggedrag in het laatste deel van de vlucht vast, omdat vliegtuigen daar een vast glijpad volgen. Als het toestel nog boven de 2000 of 3000 ft zit (afhankelijk van de procedures op een luchthaven), zal er doorgaans meer spreiding gaan optreden in het hoogteverloop van vliegbanen, waardoor er meer onzekerheid is over het vlieggedrag. Dit is met name relevant voor een luchthaven met veel verkeer (zoals Schiphol), omdat daar de totale geluidbelasting hoger is waardoor deze ook op grotere afstand van het veld bepaald wordt. In de Doc29-berekeningen voor Schiphol wordt daarom rekening gehouden met dit verschijnsel, doordat er een groot aantal verschillende naderingsprofielen is gedefinieerd en voor elke vlucht het best bijpassende profiel wordt gekozen op basis van radargegevens (zie ook paragraaf 4.2.1). Voor andere velden wordt dit niet met dezelfde mate van detail gedaan. Dit kan er dus toe leiden dat op andere velden al op kortere afstand grotere verschillen tussen meten en rekenen ontstaan.

Daarnaast wordt opgemerkt dat indien een vergelijking gemaakt wordt tussen meten en rekenen, dan zullen de verschillen tussen meten en rekenen naar verwachting toenemen op grotere afstand van het vliegveld en op grotere afstand van de vliegroutes (zoals te zien bij de trendvalidatie voor Doc29 op Schiphol). Doordat op die plaatsen ook de meetonnauwkeurigheid toeneemt zal het verschil tussen meten en rekenen nog verder toenemen.

Door de hiervoor genoemde punten zijn rekenmodellen niet geschikt om betrouwbare berekeningen te doen tot zeer lage waarden van de geluidbelasting. Omdat het bereik door meerdere factoren bepaald wordt, zoals afstand tot een luchthaven maar ook het aantal vliegbewegingen dat in de omgeving van een rekenpunt vliegt, ligt het voor de hand om het bereik te bepalen op basis van een ondergrens van

de geluidbelasting (dus bijvoorbeeld een minimale waarde van de L_{den} -geluidbelasting). Ook uit (inter)nationale regelgeving blijkt dat slechts tot een bepaald niveau geluid berekend wordt. Zo wordt de L_{den} -geluidbelasting voor Schiphol bepaald tot een waarde van 48 dB(A), terwijl de European Noise Directive (END) berekeningen tot minimaal 50 dB(A) L_{den} voorschrijft. Daarnaast wordt opgemerkt dat de benodigde kwaliteit van de uitkomsten van een rekenmodel ook afhankelijk is van hetgeen waar de uitkomsten voor gebruikt worden (informatievoorziening vergt bijvoorbeeld minder betrouwbaarheid dan handhaving).

Een voorbeeld van een situatie waarbij mogelijk wel tot relatief lage geluidbelastingen gerekend kan worden is het vaststellen van een dosis-effectrelatie. In het onderzoek waarin de blootstelling-responsrelatie tussen geluidbelasting en hinder rond Schiphol is afgeleid (zie Figuur 5), is het Nederlands Rekenmodel toegepast. Uit Figuur 5 blijkt dat bij lage geluidbelastingen (onder de 45 dB(A) L_{den}) er nog sprake is van een blootstelling-responsrelatie. De kwaliteit van de geluidberekeningen blijkt bij deze lage geluidbelastingen voldoende om in enquêtes of gezondheidskundig onderzoek te worden ingezet. Mede op basis van dit type onderzoek adviseert de GCG van de WHO een advieswaarde voor de L_{den} van 45 dB(A). Hierbij moet echter wel het volgende worden opgemerkt:

- Het feit dat de berekening gebruikt kan worden om een dosis-effectrelatie zegt niks over de kwaliteit van de berekening (er kunnen grote afwijkingen zijn, die daarmee dus worden meegenomen in de dosis-effectrelatie). Het geeft dus bijvoorbeeld geen garantie dat de berekening dicht bij metingen zal liggen.
- Indien berekeningen met grotere onnauwkeurigheden gebruikt worden kan de mate van hinder op basis van de gevonden dosis-effect relatie niet meer vergeleken worden met de uitkomsten op basis van andere relaties die met andere modellen bepaald zijn.
- Het toepassingsbereik van een berekening bij het ene vliegveld hoeft niet voor andere vliegvelden te gelden, dus met name bij lage geluidbelastingswaarden is het de vraag in hoeverre een dosis-effect relatie die is gevonden bij het ene vliegveld ook bij een ander vliegveld toegepast kan worden.

Uit oogpunt van communicatie en informatie is het ongewenst om de ondergrens van het toepassingsbereik te hoog te leggen. Het lijkt daarom bij het eventueel formuleren van een toepassingsbereik van belang om onderscheid te maken naar de verschillende doelen waarvoor meten en modelleren kunnen dienen.

Om discussie te vermijden en valse verwachtingen te voorkomen, is het aan te bevelen om de ondergrenzen van het toepassingsbereik van de gebruikte modellen te verkennen. Deze ondergrenzen kunnen per luchthaven worden bepaald door te analyseren in welk gebied rondom de luchthaven welke modelbeperkingen gelden. Hierboven is bijvoorbeeld aangegeven dat geluidberekening op basis van verkeer boven een hoogte van 10.000 ft minder betrouwbaar kunnen zijn. Voor een specifiek veld kan worden bepaald in welke gebieden vliegverkeer boven de 10.000 ft hoogte wordt gemodelleerd en of dergelijk verkeer

een nog significante bijdrage levert aan de geluidbelasting. Omdat een deel van de beperkingen gerelateerd is aan de afstand tot aan de luchthaven, is de verwachting dat voor relatief kleine velden bepaalde lage L_{den} -waarden nog wel betrouwbaar kunnen worden berekend, terwijl eenzelfde niveau voor een grote luchthaven als Schiphol niet meer mogelijk is.

Concreet wordt aanbevolen om voor één of een aantal vliegvelden een analyse uit te voeren van de grens waarbinnen geluidberekeningen betrouwbaar uitgevoerd kunnen worden. Bij deze analyse zullen de parameters die de betrouwbaarheid beïnvloeden in kaart gebracht worden. Op basis daarvan wordt voor de betreffende velden vervolgens vastgesteld tot welke waarde van de geluidbelasting een betrouwbare berekening kan worden uitgevoerd, eventueel rekening houdend met verschillende toepassingen van de rekenresultaten.

Op het moment dat ook vergelijkingen tussen meten en rekenen gemaakt worden, kan deze ondergrens ook afhankelijk worden van de metingen, bijvoorbeeld de achtergrondniveaus en de locaties van de meetposten. Dit levert een mogelijk ondergrens voor het kunnen vergelijken van meten en rekenen, maar deze ondergrens is niet noodzakelijk gelijk aan de gehanteerde ondergrens voor de handhaving.

Het is denkbaar dat een dergelijke ondergrens hoger ligt dan wenselijk wordt geacht. In dat geval is het op basis van de onderliggende analyses ook duidelijk welke beperkingen de hoge ondergrens veroorzaken en welke acties nodig zijn om het toepassingsbereik te vergroten.

4.3 Modellen in andere landen

Naast de hierboven besproken modellen bestaan er ook andere typen modellen. Zowel de geluidmodellering als het gebruik van invoergegevens kan verschillen ten opzichte van de bovengenoemde modellen, bijvoorbeeld doordat ze invoergegevens en/of modelberekeningen aanpassen op basis van metingen. In deze paragraaf wordt een aantal voorbeelden uit het buitenland besproken. In paragraaf 4.5 wordt nader toegelicht welke ontwikkelingen in Nederland mogelijk zijn en wat de bijbehorende voor- en nadelen van deze ontwikkelingen zijn.

4.3.1 *Verenigd Koninkrijk*

Bij Heathrow wordt het model ANCON2.0 gebruikt (CAA 2019). De onderliggende methodiek voor modelleren gaat uit van Doc29- en ANP-data, maar men past per vliegtuigtype regelmatig het startgewicht en/of de geluidtabel aan op basis van de resultaten van geluidmetingen (Rhodes 2018). De match tussen model en een individuele vliegbeweging wordt daarmee beter. Het nadeel van deze aanpak is wel dat het een eerder gemaakte prognose verandert door aanpassing van de berekening. Het exact vasthouden aan eerder gemaakt afspraken is daarmee principieel niet mogelijk.

De aanpassingen worden gedaan op basis van lokale waarnemingen, waardoor ze voor deze luchthaven specifiek zijn. De gegevens kunnen dus niet zonder meer gebruikt worden voor andere luchthavens. Op metingen gebaseerde modellen worden in de praktijk vooral gebruikt

voor een terugblik van gerealiseerde geluidbelasting, maar niet voor een strakke vergelijking van handhaving ten opzichte van een prognose.

Een laatste nadeel is dat het niet zeker is dat de kwaliteit van het model verbetert met deze methode. Verschillen tussen meten en rekenen worden verkleind door een beperkt aantal parameters aan te passen, terwijl deze niet per definitie het verschil tussen meten en rekenen veroorzaken. Indien een meting bijvoorbeeld verstoord is door een andere geluidbron kan dit resulteren in een aanpassing van de modellering.

4.3.2 *Zwitserland*

In Zurich wordt het Flula2.0-model gebruikt (EMPA 2019a) voor het bepalen van de jaarlijkse geluidbelasting. Daarbij zijn voor een 70-tal vliegtuigtypes de geluiddata gemeten tijdens vluchten en zijn modelparameters aangepast aan de hand van de gemeten geluidniveaus. Hier ligt geen fysische modellering aan ten grondslag, waardoor alleen op de gemeten posities een goede match mogelijk is tussen model en metingen. Daardoor zijn op andere posities of bij aanpassingen aan vliegprocedures wel verschillen te verwachten tussen berekeningen en metingen.

Daarnaast is in Zwitserland het sonAIR-model ontwikkeld om de geluidniveaus van individuele vliegbewegingen te modelleren (EMPA 2019b). Hierbij wordt uitgegaan van een fysische modellering gecombineerd met een op meetdata-gebaseerde bronmodellering. Bij de gehanteerde aanpak zijn de meetgegevens gecombineerd met *Flight Data Recordings* (FDR zijn gegevens die tijdens een vlucht door een vliegtuig worden opgeslagen) en een nauwkeurige locatiebepaling. Hierdoor is het niet alleen een complexe methode, maar is de methode ook alleen werkbaar indien luchtvaartmaatschappijen voor grote aantallen vliegbewegingen gegevens beschikbaar stellen.

Het voordeel van de methode is dat het leidt tot slechts kleine verschillen tussen meten en rekenen, niet alleen voor de gemiddelde vlucht, maar ook voor specifieke vluchten onder afwijkende weersomstandigheden. De methode zou daarom bij uitstek geschikt kunnen zijn om actuele voorspellingen van geluidniveaus te maken (zie paragraaf 6.3 voor meer informatie over deze toepassing). De beperking van deze aanpak is wel dat hierbij is gebruikgemaakt van FDR-data van een beperkte vloot (namelijk de vliegtuigen van Swiss-Air). Om het model verder te ontwikkelen en geschikt te maken voor Nederland, zou dat de beschikbaarheid vergen van FDR van een groot aantal verschillende maatschappijen.

Daarnaast is het de vraag of dit model ook geschikt is om de geluidbelasting over een langere periode te bepalen; bijvoorbeeld omdat dit veel rekentijd en kosten kan vergen. Dit kan de mogelijkheid tot het doorrekenen van verschillende toekomstscenario's hinderen.

Een andere ontwikkeling is dat een aanvullende applicatie ontwikkeld wordt om ook bebouwde omgeving te simuleren. Dit kan extra inzichten geven over het geluid in de bebouwde omgeving, waarbij nog niet duidelijk is wat de kwaliteit van de uitkomsten is.

4.3.3 *Finland*

Het gebruik van de luchthaven en de geluidbewaking wordt gedaan door middel van berekeningen. De berekeningen worden gedaan met het Integrated Noise Model (INM). Er vinden op enkele punten in de omgeving geluidmetingen plaats. Die dienen vooral om de trend van de geluidemissie te bewaken en de uitgangspunten van rekenmodellen te toetsen. De meetpunten liggen op niet al te grote afstand van de luchthaven en zijn gekozen onder, of nabij vertrek- en naderingsroutes. Er zijn in Finland wel klachten over geluidhinder, maar dat zijn er weinig in vergelijking met andere landen.

Er wordt veel geïnvesteerd in communicatie, bijvoorbeeld in de vorm van nieuwsberichten en jaarrapportages.

De situatie in Finland wijkt met name in twee aspecten af van die van Nederland:

- De woningdichtheid in de omgeving is laag; een aantal belangrijke routes gaat over onbewoond of nauwelijks bewoond gebied.
- Luchtvaart is in het algemeen sterk geaccepteerd. Het is de belangrijkste, en praktisch gesproken enige internationale verbinding voor Finland: door de geografische ligging zijn verbindingen over land met de rest van Europa lastig. Er bestaan dus nauwelijks redelijke alternatieven voor luchtverkeer.

4.3.4 *Duitsland*

In Frankfurt wordt gebruikgemaakt van het AzB-model (Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen). Het is een Duits nationaal model, net zoals NRM dat is voor Nederland. AzB is specifiek ontwikkeld voor het handhaven van geluidzones, en wordt dus gebruikt voor het bepalen van de jaarlijkse geluidbelasting.

AzB verschilt in een aantal opzichten van Doc29 (Isermann en Vogelsang 2010) en kent een aantal voordelen die kunnen bijdragen tot kleinere verschillen tussen meten en rekenen. De belangrijkste verschillen zijn dat AzB een meer gedetailleerd bronmodel en propagatiemodel gebruikt. Verder is de database met geluidgegevens over het algemeen gebaseerd op metingen rondom Duitse luchthavens, in plaats van metingen tijdens certificatievluchten. Ten slotte beschouwt AzB ook het geluid van taxiën en APU-gebruik. AzB kent ook een aantal beperkingen, zoals de indelingen van al het luchtverkeer, inclusief militair verkeer en helikopterverkeer in slechts 36 klassen. Hierdoor is het belangrijk dat klassen actueel gehouden moeten worden en representatief blijven voor het verkeer op de Duitse luchthavens. Dit maakt het model tegelijkertijd minder geschikt voor het doorrekenen van historische scenario's of het in kaart brengen van effecten van vlootvernieuwing. Ook is het model niet automatisch geschikt voor gebruik op andere luchthavens. AzB heeft zelf ook geen vliegmechanisch model, waardoor effecten van veranderingen in procedures vooraf niet goed gemodelleerd kunnen worden.

4.4 Toepassingen van berekeningen

Berekeningen kunnen onder meer de volgende toepassingen hebben:

1. handhaving;
2. inzicht verkrijgen in en het analyseren van de geluidniveaus en geluidbelasting rondom luchthavens in het verleden, het heden en de toekomst;
3. informatievoorziening;
4. hinderonderzoek.

Een belangrijke toepassing van geluidberekeningen is de handhaving van de wet- en regelgeving. Handhaving kan worden uitgevoerd door na afloop van een jaar met een berekening te controleren of een luchthaven binnen de geluidnormen is gebleven. Ook is het mogelijk om al tijdens een lopend jaar op basis van het reeds geproduceerde geluid en het nog te verwachten geluid te bepalen of er een overschrijding van de maximale hoeveelheid geluid dreigt. Op basis daarvan kunnen dan tijdig maatregelen genomen worden.

Ook worden berekeningen toegepast bij onderzoek naar veranderingen rondom luchthavens. Als er veranderingen optreden in het gebruik van een luchthaven, bijvoorbeeld door het implementeren van geluidreducerende maatregelen, het in gebruik nemen van een nieuw vliegtuigtype of een verandering van het aantal vliegbewegingen, dan kan met behulp van berekeningen voorspeld worden hoe de geluidbelasting zal wijzigen. De berekeningen geven inzicht in de gevolgen voor de geluidbelasting nog voordat een verandering is doorgevoerd.

Een derde toepassing is informatievoorziening, waarbij vele soorten van informatie kunnen worden berekend. Op basis van berekeningen kunnen bijvoorbeeld geluidcontouren bepaald worden die inzicht geven in de hoeveelheid geluid waaraan een specifieke locatie wordt blootgesteld. Deze informatie kan ook gebruikt worden door mensen die overwegen om op een bepaalde locatie te gaan wonen. Dergelijke berekeningen kunnen zowel inzicht geven in geluidniveaus ten gevolge van individuele vliegbewegingen, als in de geluidbelasting ten gevolge van meerdere vliegbewegingen.

De berekende geluidbelasting wordt ook gebruikt in combinatie met dosis-effectrelaties om een schatting te maken van het aantal ernstig gehinderden of slaapverstoorden. Andersom worden dergelijke dosis-effect relaties vastgesteld door de berekende geluidbelasting te koppelen aan geënquêteerde hinder.

4.5 Mogelijke ontwikkelingen op het gebied van rekenmodellen

Een rekenmodel, met de gemaakte aannames en gebruikte invoergegevens, geeft een benadering van de werkelijkheid waardoor verschillen optreden tussen de berekende geluidniveaus en de daadwerkelijk optredende geluidniveaus. Bij het bepalen van de jaarlijkse geluidbelasting worden dezelfde aannames gedaan als bij het vaststellen van de maximaal toegestane geluidbelasting. Hierdoor is sprake van een zuivere vergelijking tussen de berekende jaarlijkse geluidbelasting en de bijbehorende norm waartegen getoetst wordt.

Deze paragraaf gaat in op mogelijke ontwikkelingen op het gebied van rekenmodellen waarbij de volgende zaken aan de orde komen:

- relatie met het huidige beleid (paragraaf 4.5.1);
- mogelijke aanpassingen of verbeteringen van bestaande rekenmodellen zonder het gebruik van metingen (paragraaf 4.5.2).

Daarnaast komen in dit rapport nog andere ontwikkelingen aan bod, waarbij gebruik wordt gemaakt van een combinatie van meten en rekenen. Deze worden besproken in een separaat hoofdstuk met betrekking tot het gecombineerd gebruiken van metingen en berekeningen:

- gebruik metingen ter validatie en verbetering van bestaande rekenmodellen (paragraaf 6.2);
- mogelijke andere rekenmodellen die gebruik maken van geluidmetingen (paragraaf 6.3).

4.5.1 *Relatie met het huidige beleid*

De berekeningsmethodiek van vliegtuiggeluid is vervlochten met de handhavingssystematiek. Het huidige beleid (normen en handhaving) is gebaseerd op berekeningen waarbij metingen alleen voor informatievoorziening gebruikt worden. Geluidmetingen rondom luchthavens hebben vooralsnog een informatief karakter. Als men het verschil tussen meten en berekenen wil verkleinen, kan dat leiden tot veranderingen in de berekeningssystematiek.

Op hoofdlijnen kunnen twee keuzes gemaakt worden:

1. Zoeken naar mogelijkheden om de verschillen tussen meten en rekenen te verkleinen binnen de huidige handhavingssystematiek.
2. Aanpassen van de huidige handhavingssystematiek waarbij ruimte wordt gecreëerd om de verschillen tussen meten en rekenen te verkleinen.

In de huidige handhavingssystematiek kunnen geplande operaties vooraf getoetst worden aan de geldende normen, onafhankelijk van de weersomstandigheden. Voor variaties in baangebruik als gevolg van variabel weer gedurende het jaar wordt in de norm rekening gehouden met een meteo-marge. Een mogelijke manier om het verschil tussen meten en berekenen te verkleinen, is het effect van wisselende weersomstandigheden mee te nemen, niet alleen op het baangebruik, maar ook op de voortplanting van geluid door de atmosfeer. Dit betekent echter dat de meteomarge toeneemt omdat de onzekerheid in de voorspelde geluidbelasting toeneemt. Het resultaat is dat het model verbetert, de verschillen tussen rekenen en meten kleiner worden en dat de mate van bescherming kan afnemen.

Indien het huidige handhavingssysteem aangepast wordt, kan ervoor gekozen worden om meten een prominentere plaats te geven in het handhavingssysteem. Dit kan op verschillende manieren, bijvoorbeeld:

1. met een flitspalensysteem, of;
2. met een systeem waarbij de jaarlijkse gemeten geluidbelasting binnen een bepaalde norm moet blijven.

Beide systemen hebben als voordeel dat ze tegemoetkomen aan de behoefte tot het meer gebruiken van metingen. Dit kan leiden tot meer vertrouwen in de gehanteerde systematiek (mits de toepassingen op een begrijpelijke en breed gedragen manier geïmplementeerd worden).

Geen van beide opties leidt direct tot een verkleining van het verschil tussen meten en rekenen. Wel kunnen beide ertoe leiden dat er behoefte ontstaat om een betere voorspelling van de geluidproductie te kunnen maken, waardoor ze indirect wel resulteren in de ontwikkeling van nauwkeuriger rekenmethoden.

Een systematiek van flitspalen kan naast het bestaande handhavingssysteem gebruikt worden, terwijl het bij de gemeten limiet minder voor de hand ligt deze te combineren met limieten op basis van berekeningen (dit wil zeggen dat er twee vergelijkbare limieten zijn die op twee manieren worden getoetst). Voor beide opties geldt dat aanvullend onderzoek nodig is alvorens ze worden toegepast. Met name voor een systeem met een meetlimiet is de vraag in hoeverre dit haalbaar is. Beide opties worden nader toegelicht in sectie 5.1.

4.5.2 *Mogelijke aanpassingen of verbeteringen van bestaande rekenmodellen zonder het gebruik van metingen*

Twee andere mogelijkheden om tot verbeteringen van een rekenmodel te komen zijn:

1. verbetering van de huidige modellering op basis van bekende inzichten over mogelijke verbeteringen;
2. uitbreiding van beschikbare invoergegevens.

Bij de in dit hoofdstuk genoemde opties wordt opgemerkt dat het geen doel op zich is om bestaande modellen aan te passen. Daarom wordt aanbevolen om eerst vast te stellen waar behoefte aan bestaat en om vervolgens te kiezen voor een ontwikkeling die daarbij past. Hierbij ligt het voor de hand om in eerste instantie te kiezen voor ontwikkelingen die relatief eenvoudig doorgevoerd kunnen worden, zodat een snel resultaat behaald wordt voor beperkte kosten. Als blijkt dat hiermee de vooraf gestelde doelen behaald worden, is het niet nodig om meer complexe oplossingsrichtingen te onderzoeken.

4.5.2.1 Verbetering van huidige modellering op basis van bekende inzichten

Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het verbeteren van de modellering van *airframe noise* tijdens de landing (zie ook paragraaf 4.5.2.2). Aangezien voor civiele luchthavens wordt overwogen om binnen afzienbare termijn gebruik te gaan maken van Doc29, ligt het voor de hand om hierbij te focussen op verbeteringen aan Doc29.

Doc29 is een Europees model, waardoor het veel tijd zal vergen om verbeteringen ook daadwerkelijk door te voeren in het model. Dit proces loopt via de AIRMOD-werkgroep en het is wenselijk om aanpassingen van het Doc29-model via deze werkgroep te laten verlopen om te voorkomen dat in Nederland een andere versie van Doc29 gebruikt wordt dan in de rest van Europa (en daarbuiten). Indien verbetervoorstellen breed gedragen worden binnen AIRMOD, vergroot dit ook de kans dat deze voorstellen doorgevoerd kunnen worden.

Naast het aanpassen van het Doc29-geluidmodel kan ook voor specifiek verkeer onderzocht worden of daar een ander model tot nauwkeurigere resultaten leidt. Zo wordt momenteel binnen AIRMOD onderzocht of helikoptergeluid berekend kan worden met het NORAH-model (Van Oosten et al. 2018). Deze ontwikkeling zal echter nog zeker enkele jaren vergen alvorens het model daadwerkelijk op grote schaal binnen de EU gebruikt kan worden.

4.5.2.2 Uitbreiding van beschikbare invoergegevens

Hierbij wordt in eerste instantie gedacht aan het beschikbaar maken van het werkelijke startgewicht van vertrekkende vliegtuigen. Het startgewicht, wat nu een aanname is op basis van ANP-gegevens en de afstand tot aan de eerste bestemming, is van grote invloed op de klimprestaties van vertrekkende vliegtuigen. Naarmate een vliegtuig zwaarder is zal het minder hoogte maken, of, indien beschikbaar, met meer motorvermogen uitklimmen. Bij gelijk motorvermogen kan de vlieghoogte voor hetzelfde vliegtuigtype in een extreem geval meer dan een factor 2 verschillen. Verschillen van 5 dBA of meer in SEL zijn dan mogelijk.

Het startgewicht is momenteel één van de niet-gevalideerde invoergegevens bij geluidberekeningen (Rhodes 2018). Als er systematische afwijkingen zijn tussen praktijk en model, bijvoorbeeld door hoge of lage bezettingsgraden, het toevoegen van vracht en/of het meenemen van extra brandstof, dan zal dit effect hebben op de geluidbelasting, hetzij lokaal hetzij meer algemeen. Het proces tot valideren en eventueel aanpassen van de startgewichten zal stapsgewijs doorlopen moeten worden. De optimale oplossing is dat de gewichten door maatschappijen aangeleverd worden.

Indien dit niet haalbaar blijkt, zou getoetst kunnen worden of het (met voldoende nauwkeurigheid) mogelijk is om een schatting te maken van het startgewicht van een vliegtuig door middel van metingen (bijvoorbeeld een meting van het gewicht van rijdende vliegtuigen, of door het meten van drukverschillen tijdens de passage van een vliegtuig). Omdat dit meer onderzoek vergt en ook leidt tot een grotere onzekerheidsmarge in het betreffende startgewicht, wordt dit gezien als tweede optie. Beter is om de informatie te krijgen van de vliegmaatschappijen.

Hierbij wordt overigens opgemerkt dat bij Doc29-berekeningen een groter aantal zogeheten afstandsklassen beschikbaar is dan bij NRM-berekeningen. Met behulp van deze afstandsklassen wordt een schatting gemaakt van het startgewicht op basis van de afstand tot de bestemming van een vliegtuig (hoe verder weg deze ligt, hoe hoger het startgewicht). Door het hogere aantal afstandsklassen is de verwachting dat het gewicht bij een Doc29-berekening nauwkeuriger geschat wordt dan bij een NRM-berekening. Het gebruik van meer afstandsklassen geeft echter geen zicht op daadwerkelijke startgewichten in de praktijk.

De startgewichten uit de praktijk kunnen op verschillende manieren worden gebruikt. Onderzoek zal moeten uitwijzen wat hiervoor de beste methode is. De eerste optie is dat de informatie alleen wordt gebruikt om

de huidige aannames te controleren en eventueel aan te passen. Deze optie is relatief eenvoudig en heeft daarom op voorhand de voorkeur.

De andere optie, het toepassen van actuele startgewichten per vlucht, heeft impact op bestaand beleid omdat hiermee een nieuwe variabele wordt geïntroduceerd in geluidberekeningen. Dit heeft ook tot gevolg dat deze variabele tot een lagere voorspelbaarheid van resultaten kan leiden. Daarom heeft de eerder genoemde optie op voorhand de voorkeur waarbij onderzocht dient te worden welke impact dit heeft op beleid. Twee mogelijke routes hierbij zijn:

1. Op basis van het werkelijke startgewicht een keuze maken voor het best passende profiel (de gemodelleerde prestatiegegevens van een vliegtuig). Deze optie heeft een beperkte impact op de rekensystematiek omdat de invoergegevens zelf niet veranderen, maar alleen de manier waarop de keuze voor deze gegevens gemaakt wordt.
2. De vliegtuigprestaties modelleren op basis van het werkelijke startgewicht. Deze optie heeft een grotere impact op de rekensystematiek doordat de invoergegevens op een andere manier bepaald worden. Voor handavingsberekeningen zal deze methode waarschijnlijk goed toepasbaar zijn, maar onderzocht moet worden in hoeverre de voorspelbaarheid van de prognoses van de geluidbelasting hiermee ook afneemt.

Omdat niet bekend is wat het effect zal zijn van het meenemen van daadwerkelijke startgewichten, zal eerst onderzocht moeten worden in hoeverre dit daadwerkelijk tot verbeteringen leidt, alvorens startgewichten daadwerkelijk mee te nemen bij geluidberekeningen.

Een tweede element van de uitbreiding van beschikbare invoergegevens betreft het toepassen van variabele weerscondities, specifiek de temperatuur en luchtvochtigheid. Doc29 heeft al de mogelijkheid om met deze invoerparameters te werken. Hierbij wordt een deel van de invloed van weerscondities op de propagatie meegewogen. Gebruik van deze mogelijkheid is echter niet gangbaar en wordt ook in Nederland nog niet toegepast. Wel heeft dit onderwerp de aandacht van AIRMOD, de werkgroep die Doc29 onderhoudt, en wordt een advies hierover verwacht. Vooruitlopend daarop wordt het aanbevolen om te onderzoeken in hoeverre een aangepaste modellering de verschillen tussen meten en rekenen kan verkleinen. Dit kan op basis van bestaand onderzoek relatief snel en eenvoudig onderzocht worden. Hierbij kan ook worden bepaald welke uitwerking welke verbetering zou kunnen opleveren. Deze uitwerking kan variëren van een relatief eenvoudige optie als het gebruik van vaste condities per seizoen, tot aan het gebruik van actuele condities per vlucht.

Naast het startgewicht en weerscondities is nog een aantal andere aanvullende invoergegevens denkbaar. De hieronder genoemde opties zijn echter minder kansrijk en/of hebben minder impact dan het verkrijgen van startgewichten:

- Registreren van het gebruik van de mate van straalomkering (*thrust reversers*) en dit meenemen in de geluidberekening. Indien prestatieprofielen gemaakt worden met verschillende mate van straalomkering, kan in een berekening een betere inschatting

van de geluidniveaus gebruikt worden voor een toestel dat geland is. Dit zal alleen een effect hebben op de geluidbelasting nabij de luchthaven. Indien beleid gemaakt wordt om het gebruik van straalomkering te verminderen, moet ook rekening worden gehouden met eventuele veiligheidsrisico's.

- Voor klein verkeer zijn relatief minder prestatiegegevens beschikbaar dan voor groot verkeer. Dit zal ertoe leiden dat geluidberekeningen voor velden met veel klein verkeer minder nauwkeurig zullen zijn dan Doc29-berekeningen voor Schiphol. Dit kan een argument zijn om te onderzoeken of het mogelijk is om meer invoergegevens voor velden met veel klein verkeer beschikbaar te maken. Hierbij wordt echter wel opgemerkt dat de geluidbelasting rondom deze velden doorgaans ook lager is dan rondom velden met meer groot verkeer en dat het uitvoeren van geluidmetingen rondom velden met veel klein verkeer ook lastiger is omdat de lagere geluidniveaus moeilijker te meten zijn. Hierdoor is een validatie op basis van metingen ook lastiger.
- Bij het berekenen van geluid worden geluidtabellen gebruikt. De huidige geluidtabellen zijn alleen gemeten bij representatieve snelheden voor starten en naderen, met een bijbehorende representatieve configuratie (klepstanden en landingsgestel). De geluidtabellen zouden bijvoorbeeld uitgebreid kunnen worden met tabellen voor verschillende snelheden en bijbehorende configuraties. Dit is echter een bewerkelijke en dure ontwikkeling, waarbij de winst in nauwkeurigheid niet vooraf vaststaat, ook omdat de vliegsnelheid en configuratie van een vliegtuig niet exact bekend zijn. Binnen AIRMOD, de werkgroep die Doc29 beheert, wordt deze uitbreiding van de invoergegevens (en de bijbehorende modelaanpassing) al wel onderzocht.
- Vanuit de expertgroep die het opstellen van dit rapport begeleidt, is een suggestie gedaan om ook meer gegevens te verzamelen over een coëfficiënt die de verhouding tussen de draagkracht en de weerstand van een vliegtuig beschrijft. In de huidige opzet van Doc29 zijn deze coëfficiënten niet afhankelijk van de vliegsnelheid, maar representatief voor vluchtsegmenten. De toevoeging van de snelheidsafhankelijkheid zou de geluidberekening inderdaad iets nauwkeuriger kunnen maken. Twee grote nadelen van deze optie zijn echter dat:
 1. de informatie niet beschikbaar is (en dat deze vanwege commerciële gevoeligheid waarschijnlijk ook niet beschikbaar gesteld zal worden door fabrikanten);
 2. de waarde van de coëfficiënt zonder medewerking van de fabrikanten niet nauwkeurig herleidbaar is.

De inschatting is daarnaast dat de gebruikte waarden van de coëfficiënten voor de draagkracht/weerstandverhouding dicht bij de werkelijke waarden liggen en dat de afwijking hierdoor beperkt is. Mocht de waarde van dergelijke coëfficiënten wel veel afwijken van de werkelijkheid, dan zal dit er toe leiden dat de prestatieprofielen van vliegtuigen niet overeenkomen met de praktijk. Dit zal dan systematische afwijkingen geven tussen meten en rekenen. Met behulp van een systeem met een signaalfunctie (zie paragraaf 6.2) kan dit dan alsnog gedetecteerd en verbeterd worden. Naast de voorgestelde methode kan ook onderzocht worden of de modellering van

vliegtuigprestaties verbeterd kan worden op basis van reeds bestaande bronnen, zoals BADA (Base of Aircraft Data) gegevens van EUROCONTROL.¹⁶

- Bepaal het daadwerkelijke toerental van motoren op basis van geluidmetingen. Deze mogelijkheid wordt beschreven in referentie (Merino-Martínez et al. 2019). Het idee achter deze optie is dat het hierdoor niet meer nodig is om een schatting te maken van de stuwkracht op basis van standaard prestatiegegevens. Er kleeft echter een aantal belangrijke nadelen aan deze methode:
 1. Het is niet realistisch om voor zeer grote aantallen vliegbewegingen op een groot aantal locaties metingen uit te voeren en om die vervolgens te analyseren om zo invoergegevens per vliegbeweging te genereren.
 2. Deze methode geeft een schatting en geen exacte waarde van het toerental, waardoor dit dus geen exacte waarde van het toerental oplevert.
 3. Ook met een nauwkeurigere schatting van het toerental moet nog altijd gemodelleerd worden tot welke geluidproductie op de grond dat toerental leidt, waarbij alsnog onnauwkeurigheden geïntroduceerd worden. De geluidgegevens van de meeste toestellen zijn namelijk niet opgesteld op basis van toerental, maar als functie van stuwkracht.

4.6 Conclusies en aanbevelingen

Rekenmodellen kennen verschillende toepassingen. De belangrijkste toepassing van de in Nederland gebruikte modellen is de handhaving van de wet- en regelgeving. Handhaving kan worden uitgevoerd door na afloop van een jaar met een berekening te controleren of een luchthaven binnen de geluidnormen is gebleven.

Bij het uitvoeren van geluidberekeningen worden aannames gedaan. Voor handhavingsberekeningen wordt een wettelijk voorgeschreven rekenmodel gebruikt zodat vaststaat hoe de geluidbelasting bepaald dient te worden en dus ook welke aannames daarbij gedaan gehanteerd dienen te worden. Deze aannames geven een belangrijke verklaring voor het feit dat de uitkomsten van meten en rekenen kunnen verschillen.

Er zijn mogelijkheden om de verschillen tussen meten en rekenen te verkleinen. Dit kan door metingen en berekeningen te combineren (zie hoofdstuk 6), maar modellen kunnen ook zonder gebruik van metingen verbeterd worden. Hiervoor kunnen op basis van reeds beschikbare inzichten zowel de modellering als de invoergegevens van de berekeningen worden verbeterd. Omdat de normen ook gebaseerd zijn op geluidberekeningen, geldt bij aanpassingen aan het rekenmodel dat vaak ook de normen moeten worden aangepast. Dit kan gevolgen hebben voor de mate van bescherming van omwonenden.

Voor Doc29 geldt dat een aantal potentiële verbeteringen momenteel al in internationaal kader wordt onderzocht. Daarnaast wordt aanbevolen

¹⁶ <https://simulations.eurocontrol.int/solutions/bada-aircraft-performance-model/>

om zelf een aantal opties te verkennen. Hierbij wordt in eerste instantie gedacht aan het beschikbaar maken van het werkelijke startgewicht van vertrekkende vliegtuigen, om zo de huidige aannames te valideren en eventueel aan te passen. Daarnaast kan Doc29 tot op zekere hoogte rekening houden met actuele temperatuur en luchtvochtigheid en wordt aanbevolen om de waarde van deze optie nader te verkennen. Op basis van bestaande gegevens kan relatief snel en eenvoudig onderzocht worden in hoeverre dit de verschillen tussen meten en rekenen zou kunnen verkleinen.

5 Meting van geluid rond luchthavens

5.1 Toepassingen van metingen

Geluidmetingen en berekeningen kunnen uitgevoerd worden voor verschillende doeleinden, zoals regelgeving en handhaving, informatievoorziening, modelvalidatie en wetenschappelijk onderzoek. De eisen die aan de meetsystemen gesteld worden verschillen per doel. Zo zijn de technische eisen die gesteld worden aan meetopstellingen voor modelvalidatie bij voorkeur conform ISO 20906:2009 *Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports* (ISO/TC 43/SC 1 2010), een stuk strenger dan de eisen voor metingen ten behoeve van informatievoorziening.

Validatiemeetposten staan bijvoorbeeld op locaties met een laag achtergrondniveau, dus buiten druk stedelijk gebied, terwijl meetposten voor informatievoorziening bij voorkeur *juist* in bewoond gebied staan. Er is reeds informatie beschikbaar over eisen aan meetnetten afhankelijk van de doelstellingen. Zo geeft bijvoorbeeld tabel 4 van NLR-CR-2015-186 (Hogenhuis et al. 2016) een overzicht van verschillende eisen voor meetnetten voor informatievoorziening en validatie. Hieronder is een tabel opgenomen (zie Tabel 4) die op de betreffende tabel gebaseerd is. Voor meer uitleg bij de tabel wordt naar het oorspronkelijke rapport verwezen.

Als meetgegevens voor analyses worden gebruikt, kunnen strengere eisen gelden voor de meetgegevens dan bij informatievoorziening. Zo kan bij een vergelijking tussen meten en rekenen bijvoorbeeld een extra controle worden uitgevoerd om te toetsen of er niet te veel wind was (die ertoe kan leiden dat een te hoge meetwaarde gegenereerd is), terwijl dit bij informatievoorziening wellicht wel gewenst, maar niet noodzakelijk is.

Deze paragraaf beschrijft de verschillende doelen van het meten van geluid, namelijk:

1. informatieverstrekking aan burgers;
2. monitoring van geluid voor nadere analyses;
3. gedetailleerde metingen van vliegtuiggeluid;
4. handhaven en aanspreken;
5. gebruik van metingen in combinatie met een rekenmodel;
6. metingen door burgers.

De informatie kan vervolgens op één of meerdere manieren beschikbaar gemaakt worden voor een breed publiek, bijvoorbeeld met een website, een smartphone-applicatie, of via (periodieke) rapportages.

Tabel 4. Voorbeelden van eisen aan meetnetten op basis van doelstellingen van het meetnet, gebaseerd op (Hogenhuis et al. 2016).

Type meetnet	Informatievoorziening	Metingen voor vergelijking met berekeningen
Doelstelling	Informatievoorziening aan omwonenden.	Vergelijk uitkomsten van berekeningen met metingen (zie ook paragraaf 6.2).
Meetlocaties	Metingen vinden plaats op voor omwonenden relevante punten, doorgaans nabij woonbebouwing.	Metingen in de nabije omgeving van een luchthaven.
Duur van de metingen	Tot het moment dat aan de informatiebehoefte van de omgeving is voldaan.	Minimaal één jaar. Metingen over een langere periode zijn nodig om een voldoende betrouwbare vergelijking te kunnen maken tussen meten en rekenen.
Methode van informatievoorziening	Website met actuele maximale geluidniveaus, historische meetgegevens en achtergrondinformatie over geluidmetingen en het gebruik van de basis.	Rapportage met uitkomst van vergelijking tussen meten en berekenen.
Noodzaak voor aanvullende analyses	Niet nodig.	Meetgegevens dienen nader geanalyseerd te worden om afwijkende, missende of niet aan vliegbewegingen gerelateerde geluidniveaus te verklaren.
Technische specificaties		
Eisen aan meetlocaties	Trachten te kiezen voor relevante locaties waar de kans op verstoring door andere geluid-bronnen en reflecties een weerkaatsing klein zijn.	Meetlocaties dienen (bij voorkeur) te voldoen aan alle eisen uit de ISO-norm met betrekking tot het meten van vliegtuiggeluid.
Mogelijkheid tot terug luisteren metingen	Niet noodzakelijk, maar kan in bepaalde gevallen wel wenselijk zijn.	Dit is gewenst om opvallende resultaten (steekproefsgewijs) terug te luisteren.
Microfoon	Minimaal klasse 2.	Klasse 1.

5.1.1

Informatievoorziening aan burgers

Informatievoorziening is het presenteren van gegevens aan geïnteresseerden, met name aan burgers. Een meetnet kan hierbij ondersteunend zijn, bijvoorbeeld door informatie te geven over:

- De actuele geluidniveaus zoals die door het meetnet worden geregistreerd (bijvoorbeeld elke seconde). Hierbij wordt niet aangegeven welke bron het geluid veroorzaakt.
- Geluidniveaus ten gevolge van individuele vliegbewegingen; zoals LA_{max} en SEL.
- Geluidbelasting ten gevolge van meerdere vliegbewegingen; zoals Kosteneenheden en L_{den} .
- Historische informatie met bijvoorbeeld overzichten van meetresultaten gedurende voorgaande maanden of jaren.
- Achtergrondinformatie bij de geluidmetingen, zoals aantallen gemeten vliegbewegingen en tijdstippen waarop is gemeten. Door ook tijdstippen van metingen te vermelden kan iemand die een vliegtuig heeft horen passeren, later terugzoeken hoeveel geluid de betreffende passage heeft geproduceerd ter hoogte van een meetlocatie.

5.1.2 *Monitoring voor nadere analyses*

Onder monitoring verstaan we meten over een langere periode waarbij de meetresultaten worden gebruikt om nadere analyses mee uit te voeren. Monitoring kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd in opdracht van luchthavens of omringende gemeenten. Voorbeelden van monitoring zijn:

- tellingen uitvoeren van het aantal meetbare vliegbewegingen;
- toetsen hoe vaak de gemeten geluidniveaus een bepaalde drempelwaarde overschrijden;
- het uitvoeren van een trendvalidatie (zie paragraaf 6.2);
- metingen ten behoeve van onderzoek naar het effect op de geluidbelasting van operationele veranderingen, zoals de introductie van een nieuw vliegtuigtype;
- metingen om inzicht te geven in de invloed van vliegtuigen op omgevingsgeluid;
- signaleren van maximale geluidniveaus;
- geluidmetingen in het kader van gezondheid- of belevingsonderzoek (bijvoorbeeld in slaapkamers ten behoeve van onderzoek naar slaapverstoring).

5.1.3 *Gedetailleerde metingen van vliegtuiggeluid*

Metingen kunnen een zeer gedetailleerd beeld geven van de geluidproductie van vliegtuigen in een bepaalde situatie. Hierbij gaat het doorgaans niet om metingen tijdens reguliere vluchten, maar om meetvluchten ten behoeve van onderzoek, die worden uitgevoerd volgens een vooraf opgezet plan. Daarbij kunnen tegelijkertijd gedetailleerde gegevens worden verzameld met betrekking tot de condities waaronder de metingen worden uitgevoerd. Een dergelijke meting heeft doorgaans een korte looptijd, waardoor het mogelijk is om continu iemand aanwezig te laten zijn om te registreren of er tijdens de meting onregelmatigheden optreden.

Dergelijke metingen kunnen gedetailleerd inzicht geven in de samenstelling van het geluid. Dit wil zeggen dat gekeken wordt welke frequenties met welke geluidniveaus optreden. Hiermee kan bepaald worden welke invloeden de belangrijkste bijdrage leveren aan het karakter van het vliegtuiggeluid.

Het onderzoeken van de gedetailleerde samenstelling van geluid zal in de praktijk alleen gedaan worden met kortdurende metingen, bijvoorbeeld voor het opstellen van geluidstabellen. Hierbij gaat het om gedetailleerde metingen onder gecontroleerde omstandigheden. Het langdurig uitvoeren van gedetailleerde metingen is niet realistisch, onder meer vanwege de hoge kosten.

5.1.4 *Handhaven en aanspreken*

Handhaven gebeurt momenteel op basis van modelresultaten, niet op basis van metingen (waarbij de berekeningen wel mede gebaseerd zijn op gemeten geluidstabellen, zie ook paragraaf 4.2.1). De Commissie Deskundigen beschrijft in het rapport *Luid en Duidelijk* (Eversdijk et al. 2006) haar onderzoek naar in hoeverre metingen te gebruiken zijn voor handhaven. De commissie concludeert dat voor transparantie en duidelijkheid naar omwonenden het wenselijk is dat de berekende geluidbelasting voor de handhaving zo goed mogelijk overeenkomt met de in werkelijkheid optredende geluidbelasting.¹⁷

Geluidmetingen zijn daarbij van groot belang, evenals informatie over de uitvoering van de metingen en het gebruik van de resultaten bij de handhaving. Ook concludeert de commissie dat handhaven op basis van alleen metingen niet mogelijk is. De commissie hecht veel waarde aan eenduidigheid en uniformiteit bij het vaststellen van de geluidbelasting voor verschillende doeleinden (waaronder handhaving) en adviseert daarvoor gebruik te maken van een model dat meten en rekenen combineert. Het model dat Nederland gebruikt, zal moeten passen binnen de kaders die de EU aan haar lidstaten voorschrijft.

Voorbeelden van handhaving zijn flitspalen en het gebruik maken van een limiet op de gemeten geluidbelasting. Deze voorbeelden worden hierna toegelicht.

5.1.5 *Flitspalen*

Een flitspaal is een meetsysteem waarmee wordt geconstateerd of tijdens een vliegtuigpassage een vooraf vastgestelde grenswaarde wordt overschreden. In dat geval krijgt de overtreder een boete. Op het gemeten vliegtuiggeluid moet een meetmarge worden toegepast vanwege onnauwkeurigheden bij het meten. De meetmarge wordt afgetrokken van het gemeten geluid, voordat toetsing aan de grenswaarde plaatsvindt (dit is vergelijkbaar met flitspalen voor het meten van snelheden voor wegverkeer).

Het NLR heeft in 2008 onderzoek gedaan (Bergmans et al. 2008) naar de vraag of, en zo ja hoe, flitspalen vormgegeven kunnen worden in het buitengebied (buiten de 58 dB(A) L_{den} contour). De toe te passen meetmarge bleek dusdanig hoog te zijn dat het systeem geen boetes zou genereren in het buitengebied. De flitspalensystematiek voor het buitengebied is daardoor nutteloos. Daarnaast kunnen alleen betrouwbare metingen gedaan worden bij goede weersomstandigheden (windsnelheid minimaal minder dan 10 m/s, bij voorkeur nog lager) en bij geen of beperkte neerslag (regen en met name onweer kunnen ook geluid veroorzaken dat de meting vervolgens kan verstoren).

¹⁷ Het rapport betrof Schiphol, maar de argumentatie is breed toepasbaar.

Flitspalen kunnen alleen toegepast worden naast de bestaande handhavingssystematiek (of een nieuwe handhavingssystematiek die binnen een groter gebied wordt toegepast), omdat ze voor een klein gebied en alleen bij goed weer bescherming bieden. Daarnaast zal een dergelijk systeem ertoe leiden dat maatschappijen zullen proberen om hun geluidproductie nabij de flitspaal te minimaliseren. Kanttekening hierbij is wel dat deze optimalisatie zich dan juist richt op de locatie waar de microfoon staat, terwijl het bij metingen voor handhaving juist wenselijk is dat de microfoon op een rustige locatie staat (dus vaak in dunbevolkt gebied). Kortom, het systeem kan leiden tot een afname van geluid in onbewoond gebied hetgeen zou kunnen leiden tot een toename elders (mogelijk in bewoond gebied).

Heathrow heeft een flitspalensysteem, dat in de praktijk echter resulteert in een zeer beperkt aantal boetes. Als in Nederland overwogen wordt om een dergelijk systeem te implementeren, dient het volgende onderzocht te worden:

- Leidt dit systeem daadwerkelijk tot lagere geluidniveaus ten gevolge van vliegtuiggeluid in bewoond gebied (bij voorkeur niet alleen ter hoogte van de flitspaal).
- Kan het lage aantal boetes nabij Heathrow verklaard worden door het feit dat maatschappijen heel bewust omgaan met de geluidproductie van hun vliegtuigen, of komt dit doordat de effectiviteit van het systeem beperkt is. Onderzoek van de CAA uit 2018 laat zien dat het aantal boetes relatief beperkt is, hetgeen verklaard wordt doordat oudere vliegtuigtypes zoals de Boeing 747 en Airbus 340 geleidelijk worden vervangen door nieuwere en stillere vliegtuigtypes (CAA 2018).

Samenvattend kan gesteld worden dat dit systeem alleen relatief dicht bij een luchthaven kan werken, dat het niet in alle omstandigheden werkt, dat het mogelijk ertoe leidt dat geluidniveaus in bewoond gebied toenemen en dat het de vraag is of het systeem er vaak toe leidt dat vliegtuigen minder geluid produceren. Als de implementatie van dit systeem desondanks wordt overwogen, wordt aanbevolen om eerst te onderzoeken in hoeverre dit systeem haalbaar is, of het meerwaarde heeft en wat de nadelen zijn. Daarbij kan gezocht worden naar een invulling van het flitspalensysteem waarbij getracht wordt om de nadelen van bestaande systemen zoals bij Heathrow te beperken.

5.1.6 *Meetlimiet jaarlijkse gemeten geluidbelasting*

Bij het hanteren van een absolute meetlimiet voor jaarlijkse geluidbelasting is de geluidbelasting minder goed voorspelbaar dan wanneer de geluidbelasting wordt berekend. Hierdoor is het dus ook minder goed vooraf te voorspellen wanneer de limiet wordt overschreden. Dat kan betekenen dat ofwel andere start- en landingsbanen gebruikt moeten worden (waarbij mogelijk een grotere populatie overvlogen wordt) of dat de luchthaven zelfs op enig moment op slot moet. Dit geldt ook voor het huidige systeem, maar omdat het lastiger is om de geluidbelasting op basis van metingen vooraf te voorspellen, is dat risico bij dit systeem groter. De gemeten geluidbelasting hangt namelijk van veel meer variabelen af dan de berekende geluidbelasting. Denk hierbij aan de werkelijke weerscondities, bijdragen van andere bronnen, reflecties en afscherming

van geluid, etcetera. Als al deze factoren worden meegenomen in een marge op de gestelde limiet (vergelijkbaar met de meteomarge die in de huidige situatie wordt toegepast) zal deze zeer groot zijn, waardoor het systeem mogelijk zijn beschermende werking verliest.

Ook bij deze toepassing geldt dat bij slecht weer geen handhaving plaats kan vinden doordat dan geen betrouwbare metingen gedaan kunnen worden en dat dit geen of mogelijk zelfs een negatief effect kan hebben op de geluidbelasting op andere locaties (zie sectie 5.3 voor meer informatie over de beperkingen van metingen).

Alle bovengenoemde beperkingen zorgen ervoor dat de implementatie van een systeem met een limiet op basis van metingen in plaats van berekeningen niet realistisch lijkt.

Geluidmetingen kunnen ook worden gebruikt om luchtvaartmaatschappijen aan te spreken als zij met een bepaald vliegtuigtype stelselmatig significant meer (gemeten) geluid maken dan andere maatschappijen met hetzelfde of gelijkwaardig vliegtuigtype. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij Luchthaven Frankfurt. Door 'aan te spreken', kan een dialoog gestart worden tussen de betreffende luchtvaartmaatschappijen en de autoriteiten om te bezien wat de mogelijkheden zijn om het aantal gemeten hoge geluidsniveaus te verminderen. Hierbij gaat het er primair om dat maatschappijen die structureel meer geluid produceren gevraagd wordt om hier iets aan te doen, waarbij een neveneffect kan zijn dat meten en rekenen dicht bij elkaar gebracht worden, doordat het vlieggedrag van deze maatschappijen beter gaat aansluiten bij het gemiddelde vlieggedrag waar de berekeningen op gebaseerd zijn.

5.1.7 *Gebruik van metingen in combinatie met een rekenmodel*
Dit onderwerp wordt beschreven in hoofdstuk 6.

5.1.8 *Metingen door burgers*
Dit onderwerp is beschreven in paragraaf 3.4.3.

5.2 Uitvoering van geluidmetingen

5.2.1 Geluidmeters

Geluidmeters bestaan uit een microfoon en elektronica voor de verwerking van het signaal dat de microfoon registreert. Ze zijn ingedeeld in door de IEC (International Electrotechnical Commission) geformuleerde klassen (NEN-EN-IEC 2014), waarbij klasse 1-geluidmeters nauwkeuriger zijn dan klasse 2-geluidmeters. De te gebruiken apparatuur moet voldoende nauwkeurig zijn voor, en bestand zijn tegen, temperatuurvariaties en vocht binnen een voorgeschreven bereik, en moet een voldoende hoge nauwkeurigheid hebben. Voor een klasse 1-geluidmeetstation is de meetonzekerheid 0.7-0.9 dB, voor een klasse 2-geluidmeetstation is dat 1.1-1.4 dB(A) (Soede 2012). De precieze eisen voor de nauwkeurigheid hangen overigens samen met de frequentie van het geluid dat gemeten wordt.

De kwaliteit van meetresultaten is ook afhankelijk van de opstelling van de microfoon. Obstakels die de weg van het geluid tussen het vliegtuig en de meetpost belemmeren, en reflecterende oppervlakken – zoals

gevels en daken van gebouwen, maar ook het bodemoppervlak – kunnen zorgen voor een onvoorspelbare versterking of verzwakking van het geluid. Richtlijnen voor een goede plaatsing van microfoons staan in de ISO-norm voor het onbemand meten van vliegtuiggeluid (ISO/TC 43/SC 1 2010). Tot slot moet men een meetpost ook goed onderhouden en regelmatig kalibreren.

De Commissie Deskundigen Vliegtuiggeluid geeft overigens aan dat het in de praktijk niet altijd mogelijk zal zijn om aan alle voorschriften te voldoen. Het afwijken van de voorschriften brengt het risico met zich mee dat er onduidelijkheid gaat ontstaan over wat een meetresultaat precies voorstelt en met welke nauwkeurigheid dit is bepaald (Eversdijk et al. 2006).

Naast metingen met enkele microfoons kan ook worden gemeten met arrays van microfoons, zogeheten akoestische camera's, die zowel de intensiteit als de richting van de bron van het geluid in beeld kunnen brengen (Simons et al. 2015). Hiermee kan bijvoorbeeld inzicht verkregen worden in de bijdrage van verschillende onderdelen van een vliegtuig aan de totale geluidproductie van het vliegtuig.

5.2.2 *Bemand of onbemand meten*

Bij 'bemand meten' bevindt zich een waarnemer in de buurt van de meetpost om te zien en te horen wat wordt gemeten en om eventuele afwijkingen te registreren. Bij 'onbemand meten' is dat niet het geval. Om een meting te interpreteren kan dan desgewenst een geautomatiseerde kwaliteitscontrole worden uitgevoerd, bijvoorbeeld met behulp van radar en vluchtinformatiesystemen. Hiermee kan bijvoorbeeld vastgesteld worden of een vliegtuig voorbijvliegt op het moment van de meting en welk vliegtuig dat dan is. Voor meetposten die het geluid continu meten, zoals het NOMOS-meetnet rond Schiphol, gaat het om 'onbemande metingen'. Het is gezien de hoge kosten niet realistisch om daar 24/7 iemand naast te zetten.

5.2.3 *Operationele of onderzoeksmetingen*

Een ander onderscheid is of de metingen onder 'gewone' operationele condities worden uitgevoerd, dus aan vliegtuigen die hun dagelijkse operaties uitvoeren rondom luchthavens als Schiphol, of dat ze worden uitgevoerd aan vluchten die specifiek bedoeld zijn voor onderzoek met behulp van geluidmetingen. Bij metingen aan operationeel verkeer wordt gemeten aan het vliegverkeer zoals zich dat 'toevallig' aandient. Bij metingen aan specifieke meetvluchten gaat het om metingen aan één bepaald vliegtuig op een luchthaven of in een gebied dat speciaal daarvoor vrij gemaakt is. Een voorbeeld hiervan zijn metingen voor de geluidcertificatie van een vliegtuig die onder strikt voorgeschreven condities uitgevoerd dienen te worden.

5.2.4 *Geen constant beeld van de geluidproductie van vliegtuigen*

Meetresultaten vertonen spreiding in de geluidproductie van individuele vliegtuigpassages. Hierdoor ontstaat geen eenduidig beeld van de geluidproductie van vliegtuigen. Zo blijkt uit eerder onderzoek voor Schiphol dat de resultaten van een grote hoeveelheid metingen van landingen met één vliegtuigtype op één locatie tot 12 dB(A) kunnen verschillen (Bergmans et al. 2011). Meetresultaten hangen van veel

variabelen af en de meetresultaten kunnen daardoor sterk verschillen. Hierbij kan het gaan om:

- verschillen bij de bron; de hoeveelheid stuwkracht en dus de geluidproductie van een vliegtuig kan verschillen per situatie;
- verschillen in de overdracht van het geluid door de atmosfeer van het vliegtuig naar de ontvanger. Zo zullen de weersomstandigheden de hoeveelheid geluid op de grond beïnvloeden;
- variaties die optreden bij het bepalen van het geluidniveau ter hoogte van de meetpost.

De omgevingsfactoren die het gemeten geluidniveau beïnvloeden zullen ook het geluidniveau beïnvloeden dat door bewoners wordt ervaren. Om inzicht te geven in de geluidniveaus in de bebouwde omgeving, kunnen daarom (ook) metingen uitgevoerd worden. Met deze gegevens kan geen goede vergelijking met berekeningen gemaakt worden, maar dit kan bijvoorbeeld wel inzicht geven in de spreiding van meetwaarden op locaties die voor omwonenden relevant zijn.

5.3 Beperkingen van metingen

Bij het uitvoeren van geluidmetingen geldt een aantal beperkingen en kunnen verschillende externe factoren van invloed zijn op de resultaten:

- beperkt aantal meetlocaties;
- verstoring door omgevingsgeluid;
- invloed van weersomstandigheden;
- niet elke vliegbeweging wordt gemeten;
- nauwkeurigheid van microfoons;
- de plaatsing van de microfoon beïnvloedt de meting (zowel de ondergrond als de eventuele aanwezigheid van objecten nabij de microfoon);
- metingen geven alleen inzicht gedurende de meetperiode.

5.3.1 *Beperkt aantal meetlocaties*

Metingen vinden slechts op een beperkt aantal locaties plaats doordat het aantal meetlocaties om praktische en financiële redenen beperkt is. De kosten van metingen zullen oplopen als het aantal meetposten toeneemt, en niet elke locatie is geschikt om te meten, bijvoorbeeld doordat er andere objecten zoals gebouwen in de weg staan, of door verstoring door andere geluidbronnen. Door het beperkte aantal meetlocaties is het niet mogelijk geluidcontouren te baseren op uitsluitend metingen. Deze moeten dan, zoals ook nu het geval is, nader worden bepaald met een rekenmodel.

5.3.2 *Verstoring door omgevingsgeluid*

De meting van een vliegtuigpassage kan verstoord worden door andere geluidbronnen, bijvoorbeeld wegverkeer, harde wind of vogels. Als bijvoorbeeld een vrachtauto passeert op korte afstand van de meetpost terwijl tegelijkertijd een vliegtuig overvliegt, zal het gemeten geluidniveau hierdoor toenemen. Ook kan de meting van een andere bron ten onrechte geregistreerd worden als vliegtuigpassage, of kan een vliegtuigpassage niet worden herkend.

Er bestaan technische methoden om de kans te vergroten dat wat gemeten wordt ook werkelijk vliegtuiggeluid is (Van Deventer 2014), bijvoorbeeld:

- een waarde waaronder niet wordt gemeten ('drempelwaarde');
- maximum stijg- en daaltijden, wat wil zeggen dat als het geluidsniveau sneller dan 10 dB(A) per seconde toe- of afneemt, de meting genegeerd wordt;
- als de hoorbaarheidsduur boven de drempelwaarde erg kort is (korter dan 10 seconden) of juist heel erg lang is (120 seconden of meer), wordt de meting genegeerd;
- radargegevens van de vliegbaan (plaats en hoogte) correleren met de meting;
- analyse van het frequentiespectrum: voor een auto is dat anders dan voor een vliegtuig;
- uitluisteren van de audio-opname van de meting;
- het gebruik van microfoon arrays, zie bijvoorbeeld (Boone et al. 2000).

Deze methodieken dragen ertoe bij dat vliegtuiggeluid minder vaak verward wordt met andere geluidbronnen, maar ze zijn niet foutloos. Bij de laatste twee opties wordt opgemerkt dat deze zeer tijdrovend zijn en daardoor niet of slechts in beperkte mate toepasbaar zijn voor grote hoeveelheden metingen.

5.3.3 *Invloed van weersomstandigheden*

De voortplanting van geluid hangt af van de atmosferische toestand (zie paragraaf 4.1.2). De weersomstandigheden zullen daarom de uitkomst van geluidmetingen beïnvloeden. Indien eenzelfde vliegtuig meerdere keren met een gelijke geluidproductie en op gelijke afstand van de meetpost passeert, kan het gemeten geluidsniveau toch variëren. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in de temperatuur en temperatuurgradiënt (het verloop van de temperatuur als functie van hoogte en locatie), luchtvochtigheid, windsnelheid, windrichting en windgradiënt. De invloed van het weer op de geluidoverdracht neemt toe wanneer vliegtuigen niet recht overkomen, maar vanuit het waarneempunt betrekkelijk laag boven de horizon worden gezien.

Ook kunnen bepaalde weersomstandigheden ervoor zorgen dat het achtergrondgeluid toeneemt, waardoor het niet meer mogelijk is om een vliegtuigpassage te detecteren. De ISO-norm 20906:2009 *Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports* (ISO/TC 43/SC 1 2010) geeft daarom richtlijnen voor meteocondities en de positie van een vliegtuig ten opzichte van de microfoon. Zo moeten bijvoorbeeld metingen die zijn gedaan bij een windsnelheid van meer dan 10 m/s gemarkeerd worden omdat de meetonzekerheid toeneemt onder windere condities.

Ook geeft de norm aan dat een windsnelheid van 10 m/s maximaal mag leiden tot een stoorgeluid van 65 dB(A). Dit wil dus zeggen dat vliegtuigpassages die bijvoorbeeld minder dan 70 dB(A) produceren ook bij windsnelheden van 10 m/s of iets minder al niet meer nauwkeurig te meten zijn. Een nadeel van het uitsluiten van metingen vanwege weerscondities is dat het de meetresultaten minder representatief maakt, wat argwaan kan veroorzaken bij omwonenden (Leeuwen 2019).

Overigens beïnvloeden windsnelheid, windrichting, temperatuur en luchtdruk ook de (stijg)prestaties van het vliegtuig en daarmee ook het geluidniveau op de meetlocatie.

5.3.4 *Niet elke vliegbeweging wordt gemeten*

Met de huidige onbemande meetsystemen is het niet mogelijk op elke locatie alle passerende vliegbewegingen te registreren, bijvoorbeeld doordat metingen verstoord kunnen worden, of omdat het vlieggeluid ter plekke onvoldoende boven het achtergrondgeluid uitkomt. Daarom kan het wenselijk zijn om een meetlocatie te kiezen met een laag achtergrondgeluidniveau en een kleine kans op verstoring door andere bronnen. Metingen kunnen echter ook juist wenselijk zijn op locaties met een hoger achtergrondgeluidniveau, namelijk om burgers te informeren over het geluidniveau in hun omgeving.

5.3.5 *Beperkingen van microfoons*

Bij het bepalen van het geluidniveau, geven de metingen het werkelijke geluidniveau weer binnen een bepaalde nauwkeurigheidsmarge. Deze marge hangt af van welke klasse microfoon wordt gebruikt (zie 5.2). Daarnaast is een microfoon ontworpen voor het meten binnen een bepaald meetbereik. Dit wil zeggen dat de microfoon geschikt is om geluid te meten binnen een bereik van frequenties en een bereik van geluidniveaus. Indien geluiden geregistreerd worden die niet binnen het meetbereik vallen, kunnen grotere afwijkingen optreden.

5.3.6 *De plaatsing van de microfoon beïnvloedt de meting*

De plaatsing van een microfoon kan invloed hebben op de meetresultaten. Als een microfoon dicht bij objecten zoals gebouwen wordt geplaatst, kan dit leiden tot reflecties van geluid (resultierend in hogere meetwaarden) of afscherming van geluid (resultierend in lagere meetwaarden). Wanneer een microfoon dicht bij de grond staat, wordt het gemeten geluidniveau beïnvloed door grondreflecties. Hierbij heeft ook het type ondergrond, naast de microfoonhoogte, invloed op de hoeveelheid geluid die via de grond weerkaatst. Zo leidt een harde ondergrond (stedelijke omgeving) in het algemeen tot een hoger geluidniveau dan bijvoorbeeld een zachte ondergrond (zand, weiland).

5.3.7 *Metingen geven alleen inzicht over de meetperiode*

Metingen geven enkel informatie over de periode dat de meetpost daadwerkelijk functioneert. In geval van storingen of onderhoud aan een meetpost, kan deze gedurende een bepaalde periode geen gegevens leveren.

5.4 **Voorbeelden van bestaande meetnetten**

Ongeveer 85% van de honderd drukste luchthavens in de wereld heeft geluidmeetsystemen geïnstalleerd voor het meten van geluidniveaus (Brüel & Kjær 2010). Deze systemen geven inzicht in het gemeten geluid rondom deze luchthavens. In deze paragraaf worden enkele voorbeelden gegeven van bestaande meetnetten waarmee de door vliegverkeer veroorzaakte geluidniveaus en/of geluidbelasting rondom luchthavens wordt gemeten.

Deze paragraaf beschrijft acht meetnetten:

- van verschillende omvang;
- met verschillende doelen;
- voor civiel vliegverkeer en militair vliegverkeer.

Hierbij wordt ingegaan op de doelen en eigenschappen van elk meetnet. De voorbeelden van meetnetten zijn mede gekozen op basis van de hoeveelheid beschikbare informatie.

Tabel 5 vat de informatie van enkele meetnetten rond luchthavens samen. In het vervolg van deze paragraaf wordt in meer detail ingegaan op deze meetnetten.

Tabel 5. Enkele voorbeelden van luchthavens met een geluidmeetnet.

Luchthaven	Land	# loc.	Doel metingen
Schiphol	Nederland	40	Informatievoorziening
Eindhoven*	Nederland	9	Informatievoorziening
Rotterdam	Nederland	6	Informatievoorziening
Lelystad	Nederland	23	Informatievoorziening
Vancouver	Canada	20	Informatievoorziening
Heathrow	VK	50	Informatie, handhaving en modelkalibratie
Frankfurt	Duitsland	29	Informatievoorziening
Sydney	Australië	12	Informatievoorziening

*Vliegveld Eindhoven is een militair vliegveld met civiel medegebruik. Alle andere luchthavens zijn civiel.

Voorbeelden van Nederlandse leveranciers van geluidmeetsystemen zijn Casper,¹⁸ SensorNet¹⁹ en Geluidconsult.²⁰ Voorbeelden van internationale leveranciers zijn Brüel & Kjær (B&K),²¹ Topsonic,²² Cirrus²³ en 01dB10.²⁴

5.4.1

Schiphol

Het Noise Monitoring System (NOMOS) is een geautomatiseerd systeem dat het vliegtuiggeluid rondom Schiphol meet en vastlegt (zie Figuur 19). Het systeem omvat momenteel 41 meetposten en wordt beheerd en onderhouden door Brüel & Kjær (B&K) in opdracht van Amsterdam Airport Schiphol (Horsten en Soede 2011). Er wordt gebruikgemaakt van 'klasse 1'-microfoons. Het NOMOS-geluidmeetnet is gekoppeld aan de radar van Schiphol en aan andere vluchtinformatiesystemen. Voor elk vliegtuig dat start van of landt op Schiphol wordt informatie verzameld (zoals het gemeten geluidniveau, het datum en tijdstip van de meting en het vliegtuigtype) en op basis van deze informatie kunnen rapportages gemaakt worden via de website.

¹⁸ <http://casper.aero>

¹⁹ www.sensor.net

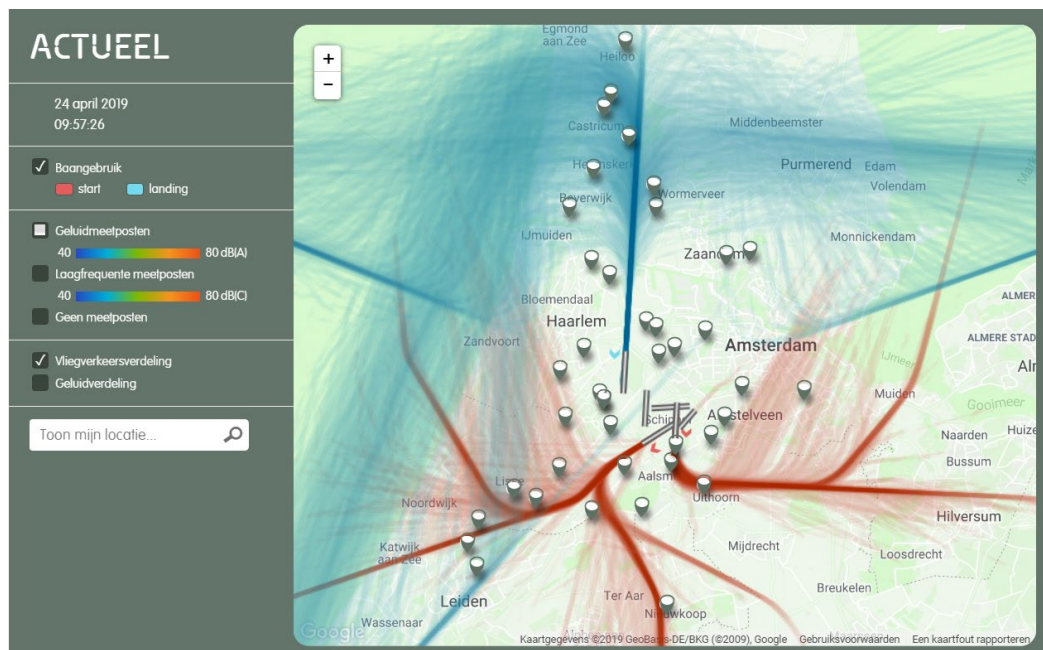
²⁰ www.geluidconsult.nl

²¹ www.bksv.com/

²² <http://topsonic.aero/en/>

²³ www.cirrusresearch.co.uk/applications/aircraft-noise/

²⁴ <http://01db.acoemgroup.com/airport-noise-abatement>



Figuur 19. NOMOS Online met real-time informatie over gemeten geluidniveaus in de omgeving van Schiphol (Bron: <http://nomos.schiphol.nl>).

De meetresultaten worden gebruikt voor informatievoorziening, bijvoorbeeld voor rapportages aan gemeentes en milieudiensten en via een openbare website.²⁵ Figuur 19 toont een screenshot van de website van NOMOS voor real-time informatievoorziening. Zoals uit de figuur blijkt, wordt het systeem in dit geval niet enkel gebruikt voor het presenteren van gemeten geluidniveaus, maar is het ook mogelijk om de actuele grondpaden afkomstig uit de radargegevens te visualiseren, evenals de in gebruik zijnde start- en landingsbanen.

Naast NOMOS zijn rond Schiphol nog twee andere meetsystemen voor vliegtuiggeluid in bedrijf, namelijk Luistervink en Sensor.net. Zie (Soede 2012) voor een technische beschrijving van de drie geluidmeetsystemen.

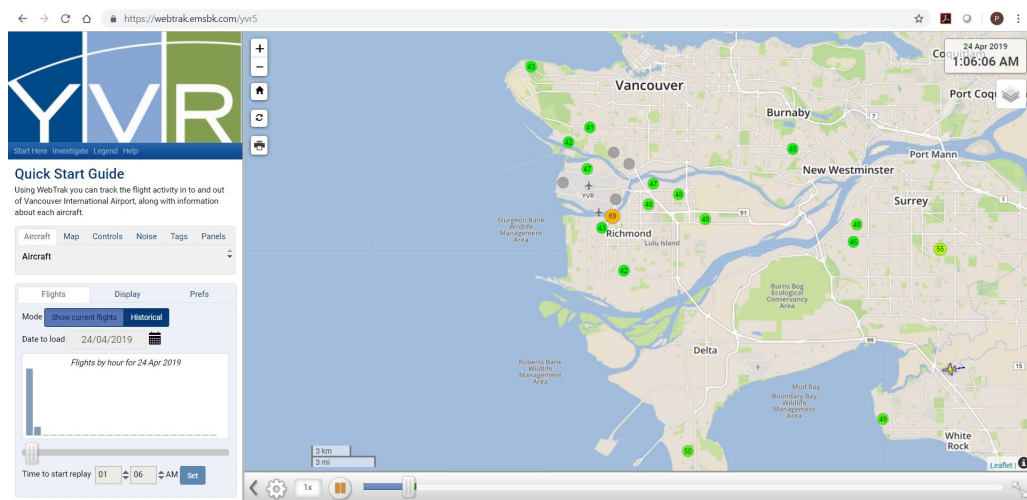
5.4.2 Vancouver International Airport

Sinds 1995 heeft de luchthaven van Vancouver een 'Airport Noise & Operation Monitoring System' (ANOMS), dat beheerd en onderhouden wordt door Brüel & Kjær. Het systeem registreert geluidniveaus op twintig permanente meetposten in de omgeving van de luchthaven (zie Figuur 20).

De verkregen informatie wordt jaarlijks in een rapport samengevat (Min en Cheng 2018) en daarnaast is de online tool WebTrak²⁶ geïmplementeerd, waarmee omwonenden de mogelijkheid hebben om real-time en historische data van vluchten en gemeten geluidniveaus te zien (informatievoorziening). De informatie uit het jaarlijkse rapport wordt gebruikt voor discussies tussen omwonenden en andere belanghebbenden.

²⁵ <http://nomos.schiphol.nl>

²⁶ <https://webtrak.emsbk.com/yvr5>

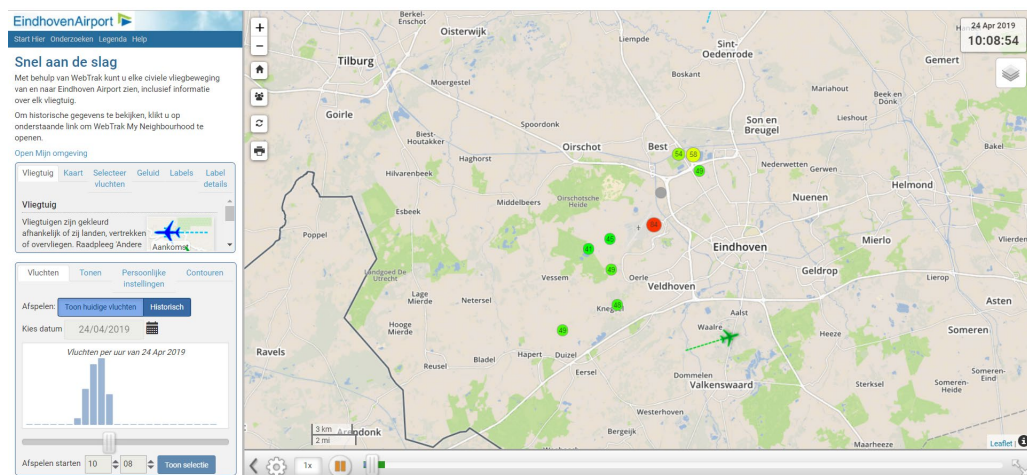


Figuur 20. WebTrak met real-time informatievoorziening van meetposten in de omgeving van de luchthaven van Vancouver (<https://webtrak.emsbk.com/yvr5>).

5.4.3

Luchthaven Eindhoven

Rondom Luchthaven Eindhoven staan negen meetposten van Brüel & Kjær die dagelijks meetgegevens naar het registratiesysteem ANOMS sturen. De meetposten liggen in Eindhoven, Best, Wintelre, Veldhoven, Knegsel en Duizel (zie Figuur 21). Voor deze meetposten is een gedetailleerde set van meetgegevens aanwezig (geluidniveau per passage van luchtverkeer) over het jaar 2014 en daaropvolgende jaren.



Figuur 21. WebTrak met real-time informatievoorziening van meetposten in de omgeving van Vliegveld Eindhoven (Bron: www.samenopdehoogte.nl).

Om actuele en historische vliegbanen en gemeten geluidniveaus te tonen, is de online tool WebTrak geïmplementeerd. Deze tool is via een website²⁷ te bereiken. Via deze website kan ook toegang worden verkregen tot het My Neighbourhood-systeem waarmee historische informatie over het gebruik van de luchthaven opgevraagd kan worden per periode van een maand, kwartaal of jaar. Hiermee wordt bijvoorbeeld inzichtelijk hoe vaak in een bepaalde richting wordt gevlogen en hoe de verdeling van het verkeer is over de uren van de dag. Tevens kan per meetpost nadere informatie van de geluidniveaus

²⁷ www.samenopdehoogte.nl; dit is een initiatief van de Alderstafel Eindhoven.

worden opgezocht, zoals het totaal aantal geluidregistraties per meetlocatie en de verdeling per uur en per geluidniveau.

5.4.4 Rotterdam The Hague Airport

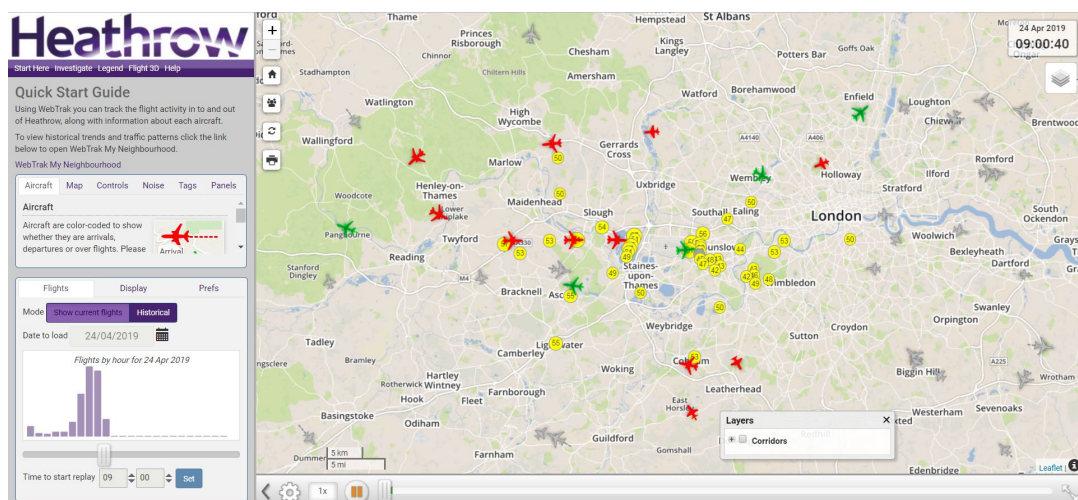
Rondom Rotterdam The Hague Airport wordt op zes punten het geluidniveau gemeten. De metingen zijn online beschikbaar,²⁸ zowel near-real-time als achteraf. Twee meetposten liggen in de buurt van handhavingspunten waarop handhavingsberekeningen uitgevoerd worden. Daarom kan op indicatieve wijze bekeken worden of de gemeten geluidniveaus overeenkomen met de berekende geluidniveaus op de handhavingspunten (DCMR 2018). De DCMR wisselt binnen het Europese project FONOMOC (FOCUS group On NOise MONitoring Cities)²⁹ kennis en ervaring uit op het gebied van geluidmetingen in steden.

5.4.5 Lelystad Airport

Rondom Lelystad Airport wordt in opdracht van enkele omliggende gemeenten op 23 punten het geluidniveau gemeten. De metingen zijn voor het publiek online³⁰ beschikbaar, en voor de gemeenten in rapportages achteraf. Om na te kunnen gaan wat de effecten zijn van Lelystad Airport als de luchthaven straks open is voor commercieel vliegverkeer, ontwikkelt het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat een monitoring- en evaluatieprogramma. Burgers en overheden uit zes provincies denken mee over de opzet. Dit is een bron van informatie over het meten van vliegtuiggeluid op grotere afstand van de luchthaven.

5.4.6 Heathrow

Rondom Heathrow Airport staan elf meetposten die meetgegevens naar het registratiesysteem ANOMS sturen (zie Figuur 22). De meetgegevens worden gelinkt met de vluchtgegevens van het civiele luchtverkeer, zodat informatie over individuele vluchten (zoals vliegtuigtype) kan worden opgezocht.



Figuur 22. WebTrak met real-time informatievoorziening van meetposten in de omgeving van Heathrow (Bron: <http://webtrak5.bksv.com/lhr4>).

²⁸ <https://flighttracking.casper.aero/rtm/>

²⁹ <https://workinggroupnoise.com/fonomoc/>

³⁰ <http://www.sensornet.nl/project/>

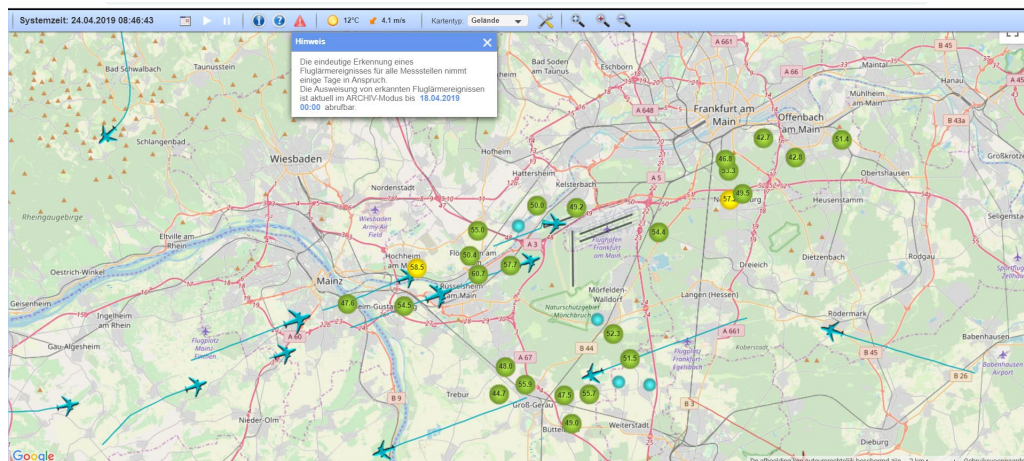
Met WebTrak en My Neighbourhood kan informatie verkregen worden over vliegbewegingen en geluidmetingen. In enkele meetposten gelden maximale geluidsniveaus die niet door vliegtuigen overschreden mogen worden.³¹ De grenswaarden zijn afhankelijk van de periode van het etmaal; als de grenswaarde is overschreden, krijgt de luchtvaartmaatschappij die het vliegtuig gebruikt een heffing opgelegd.

Deze heffingen worden besteed ten behoeve van de lokale gemeenschappen (Heathrow 2019). Sinds 2014 variëren de boetes van £ 500 per dB(A) overschrijding overdag tot £ 4000 per dB(A) overschrijding in de nacht (Dawes 2015).

5.4.7 Luchthaven Frankfurt

Het meetnet werd ruim 50 jaar geleden geïnstalleerd (Fraport 2019) en bestaat momenteel uit 29 vaste en 3 mobiele meetposten (zie Figuur 23). De meetresultaten worden maandelijks gepubliceerd en near-real-time metingen zijn visueel beschikbaar op internet.³² Gebruikers kunnen op internet³³ een rapport genereren met:

- gedetailleerde informatie over aankomst- en vertrekroutes en de berekende geluidsniveaus binnen een straal van 5 km rondom een door de gebruiker opgegeven locatie;
- vluchtactiviteitsgegevens per route voor de huidige maand en zes drukste maanden van het jaar;
- indien van toepassing, informatie over mogelijke financieringsmogelijkheden voor geluidsisolatie en/of dakbeschermingsmaatregelen.



Figuur 23. WebTrak met real-time informatievoorziening van meetposten in de omgeving van Luchthaven Frankfurt (<https://franom.fraport.de/franom.php>).

5.4.8 Sydney

Airservices Australia beheert het Noise and Flight Path Monitoring System bij de belangrijkste luchthavens in Australië³⁴ (zie Figuur 24 voor Sydney). Dit systeem is het grootste, geografisch meest uitgebreide systeem in zijn soort³⁵ en informeert over vliegtuig- en achtergrondgeluid, vlucht- en routegegevens en het weer. De metingen worden niet voor

³¹ <https://www.heathrow.com/noise/making-heathrow-quieter/departure-noise-infringement-fines>

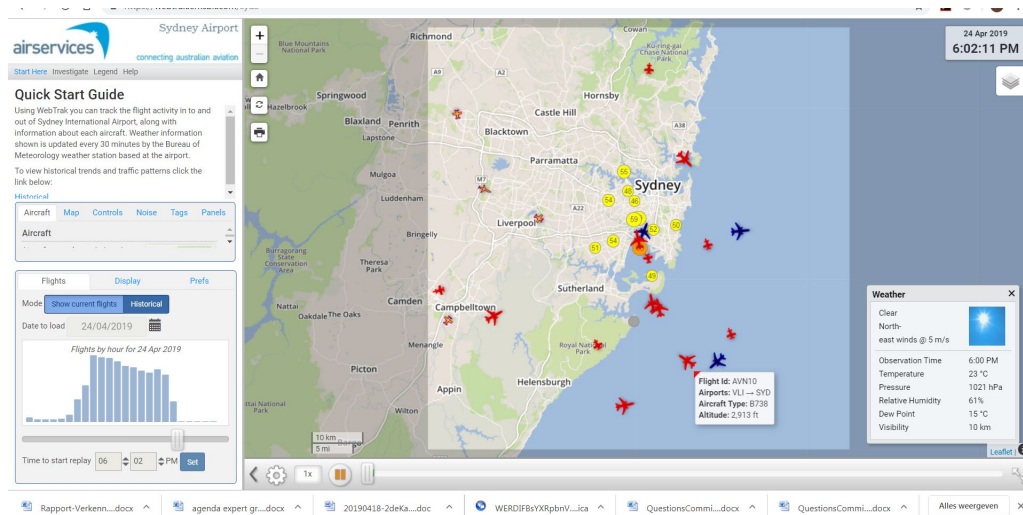
³² <https://franom.fraport.de/franom.php>

³³ <http://www.fraport.de/fluglaerminfo>

³⁴ <http://www.airservicesaustralia.com/aircraftnoise/webtrak/>

³⁵ https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2004/ACOUSTIC/PDF/AUTHOR/AC040045.PDF

handhaving toegepast, wel voor onder meer informatieverstrekking, modelvalidatie, en detectie van buitensporig vliegtuiggeluid.



Figuur 24. WebTrak met real-time informatievoorziening van meetposten in de omgeving van Sydney Airport (Bron: <https://webtrak.emsbk.com/syd3>).

5.5 Referentienetwerk

Uit de verschillende meetnetten en meetposten in Nederland kan een landelijk referentienetwerk worden samengesteld. Het gaat daarbij om die meetposten die voldoen aan de eisen voor tenminste één van de meetdoelen zoals nog vast te leggen in de nationale meetstrategie, en waarvan de data bovendien in het overeengekomen format beschikbaar zijn in een nationale database (aanbeveling 1, paragraaf 7.4.1). Er kan desgewenst worden gekozen voor twee referentienetwerken, een voor informatievoorziening en een voor modelvalidatie.

5.6 Mogelijke andere metingen

Naast het meten met een geluidmeetnet, kan ook gemeten worden met andere meetopstellingen en meetinstrumenten. Deze paragraaf geeft daarvan een paar voorbeelden.

5.6.1 Ontwikkeling geluid rond Schiphol

De Omgevingsraad Schiphol (ORS) heeft het bedrijf To70 gevraagd een integraal plan op te stellen voor een meetsysteem en methode voor informatievoorziening over de ontwikkeling van de geluideigenschappen van de Schipholvloot door de jaren heen en over de maximale geluidbelasting in de woonomgeving (Bijsterbosch en Vinkx 2018). Voor vlootontwikkeling hebben zij gezocht naar een meetopstelling waarbij een groot aantal vluchten wordt gemeten en de metingen onder vergelijkbare omstandigheden worden uitgevoerd. Door de geluidmetingen te koppelen aan vluchtgegevens ontstaat een beeld van de geluideigenschappen van de Schipholvloot en de ontwikkeling daarvan.

Hierbij wordt opgemerkt dat een dergelijk onderzoek ook op basis van de historische vlootontwikkeling in combinatie met geluidtabellen en/of op basis van metingen met bestaande meetstations gedaan zou kunnen worden. Hierbij kan op basis van deze meetgegevens bijvoorbeeld

onderzocht worden hoe ver gemiddelde meetwaarden van verschillende types uit elkaar liggen. Daarbij is het raadzaam om vooraf te toetsen welke meetwaarden mogelijk onbetrouwbaar zijn (bijvoorbeeld door metingen die gedaan zijn met harde wind of regen niet mee te nemen). Deze methode heeft als voordeel dat dit snel en relatief goedkoop kan worden toegepast doordat geen nieuwe gegevens verzameld moeten worden. Mocht uit dit onderzoek blijken dat niet alle vragen beantwoord kunnen worden, kan vervolgens gericht gezocht worden naar een meetmethode die de gewenste aanvullende informatie oplevert.

Indien gezocht wordt naar nieuwe locaties ten behoeve van informatievoorziening, wordt in (Bijsterbosch en Vinkx 2018) een alternatieve optie beschreven. Namelijk door zo dicht mogelijk bij start- en landingsroutes te meten en vandaaruit te extrapoleren naar de omgeving, met een aantal mobiele meetposten voor validatie van de afgeleide maximale geluidsniveaus in de omgeving. Dit raakt aan het combineren van meten en rekenen zoals beschreven in paragraaf 6.3.

5.6.2 *Innovatieve metingen*

Voor sommige specifieke onderzoeken is mogelijk informatie nodig die niet verzameld kan worden met onbemande metingen zoals die door bijvoorbeeld het NOMOS-meetnetwerk worden uitgevoerd. In die gevallen kunnen bijvoorbeeld additionele geavanceerde geluidmetingen worden uitgevoerd.

Voorbeelden zijn het meten met arrays van microfoons (ook wel akoestische camera's genoemd (Simons et al. 2015), met microbarometers en met microflows. Met deze meetmethoden kan een breed deel van het geluidsspectrum gemeten worden, zoals het laagfrequente grondgeluid achter de vliegtuigen. Door te meten met meerdere microfoons is het mogelijk om naast de sterkte ook de richting van het geluid te meten. Dergelijke gegevens zouden bijvoorbeeld aanvullende informatie kunnen leveren die gebruikt kan worden bij het combineren van meten en rekenen (zie paragraaf 6.3).

Wat betreft microfoonarrays is onderscheid te maken in:

- grote arrays (50-200 microfoons; mogen goedkoop zijn). Hiermee kunnen vliegtuigen, als daar aanleiding toe is, nader geanalyseerd worden bij lage vlieghoogte (dus dicht bij de luchthaven).
- kleine arrays (4-10 microfoons, maar dan van goede kwaliteit) om de kwaliteit van validatiemetingen te verhogen.

Naast validatie met geluidmetingen van overvliegende vliegtuigen, kunnen sommige aspecten van vliegtuiggeluid ook gevalideerd worden in een testopstelling met bekende (vaste) geluidbronnen (luidsprekers). Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de validatie van verzwakking van geluid in zijwaartse richting en van atmosferische absorptie onder invloed van veranderende weersomstandigheden.

5.7 Conclusies en aanbevelingen

Geluidmetingen hebben verschillende toepassingen en kunnen met verschillende typen apparatuur en op verschillende typen locaties worden uitgevoerd. Geluidmetingen hebben beperkingen, waarvan de grootte afhangt van de toepassing, de meetapparatuur en de meetlocatie. De aanbeveling is om bij het plaatsen en gebruik van meetposten zorgvuldig rekening te houden met het doel van de meting.

Het is mogelijk dat bepaalde informatie met vaste meetnetten niet goed kan worden verkregen, bijvoorbeeld als detailmetingen aan de propagatie van geluid gewenst worden. Voor dit soort gevallen wordt aanbevolen om additioneel geavanceerde metingen uit te voeren, waarmee innovatief onderzoek ten behoeve van operationele toepassing kan worden uitgevoerd binnen het thema meten en berekenen van vliegtuiggeluid.

6 Combinaties van meten en rekenen

De voorgaande twee hoofdstukken beschrijven onder andere hoe vliegtuiggeluid gemeten en berekend kan worden, wat toepassingen van meten en rekenen zijn en wat beperkingen van beide opties zijn. Dit hoofdstuk bespreekt een aantal opties om meten en rekenen te combineren.

In de praktijk zullen verschillen tussen meten en rekenen optreden. Dit komt doordat bij berekeningen aannames worden gedaan die kunnen leiden tot verschillen met de werkelijkheid. Ook is bij metingen sprake van meetonnauwkeurigheden en cumulatief geluid waarbij andere bronnen ongemerkt meegenomen kunnen worden.

De wens om meer gebruik te maken van geluidmetingen kan als aanleiding gezien worden om te zoeken naar methoden om de rekensystematiek aan te passen op basis van metingen, en om metingen toe te passen naast berekeningen, of om andere rekenmethoden te ontwikkelen die tot kleinere verschillen tussen meten en rekenen leiden.

Hierbij is het belangrijk om te beseffen dat:

- zowel rekenmodellen als metingen nooit 100% nauwkeurig zullen zijn;
- de gewenste nauwkeurigheid van berekeningen en metingen afhangt van de toepassing (en dat het dus niet altijd nodig is om een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid na te streven);
- het introduceren van nieuwe rekenmodellen en/of combinaties van meten en rekenen kan leiden tot een complexere situatie waarbij meerdere berekende geluidbelastingen naast elkaar bestaan. Hierdoor is het voor omwonenden mogelijk lastiger om een goed beeld te vormen van de door hen ondervonden geluidbelasting.
- dat het bij het maken van een keuze voor aanpassingen en ontwikkelingen van belang is om naast het beoogde doel ook een kostenafweging te maken (welk probleem wordt opgelost en wat zijn de kosten hiervan?).

Dit hoofdstuk gaat in op de volgende mogelijke combinaties van meten en rekenen:

- gebruik van meten en rekenen naast elkaar (paragraaf 6.1);
- gebruik van metingen ter validatie en verbetering van bestaande rekenmodellen (paragraaf 6.2);
- mogelijke andere rekenmodellen die gebruikmaken van geluidmetingen (paragraaf 6.3).

Bij alle in deze paragraaf beschreven opties dient opgemerkt te worden dat ze er niet toe zullen leiden dat de verschillen tussen meten en rekenen teruggebracht worden naar nul. Ten eerste zitten in de modellen, ook na het uitvoeren van eventuele aanpassingen naar aanleiding van metingen, nog altijd aannames (bijvoorbeeld met betrekking tot het gedrag van het vliegtuig). Daarnaast is bij metingen sprake van meetonnauwkeurigheden en verstoring door andere bronnen, waardoor

zowel meten als rekenen geen exacte waarde geeft van het door een vliegtuig geproduceerde geluidniveau. Tot slot is het belangrijk om op te merken dat het geen doel op zich is om nieuwe rekenmodellen te ontwikkelen of om bestaande modellen aan te passen. Daarom wordt aanbevolen om eerst vast te stellen waar behoefte aan bestaat en om vervolgens te kiezen voor een ontwikkeling die daar bij past. Daarbij ligt het voor de hand om in eerste instantie te kiezen voor ontwikkelingen die relatief eenvoudig doorgevoerd kunnen worden, zodat een snel resultaat behaald wordt met beperkte kosten. Als blijkt dat hiermee de vooraf gestelde doelen behaald worden, is het niet nodig om ook complexere oplossingen te onderzoeken.

6.1 Gebruik van meten en rekenen onafhankelijk van elkaar

De eerste combinatie van meten en rekenen is om bij één luchthaven onafhankelijk van elkaar geluidmetingen en geluidberekeningen toe te passen, waarbij beide hun eigen doelen hebben. Voorbeelden hiervan zijn Schiphol en de Luchthaven Eindhoven, waar de normering en handhaving plaatsvinden op basis van berekeningen, en de geluidmetingen voor informatievoorziening bedoeld zijn. We bevelen aan deze werkwijze te verlaten, en een structureel en langjarig modelvalidatieprogramma te starten.

6.2 Gebruik metingen ter validatie en verbetering van bestaande rekenmodellen

Er bestaan meerdere methoden om de huidige modellen verder te verbeteren binnen de bestaande handhavingssystematiek. Dit kan bijvoorbeeld met behulp van metingen (uitgewerkt in deze paragraaf), maar ook door modelverbeteringen of door invoergegevens te verbeteren of uit te breiden (zie paragraaf 4.5.2). Aanbevolen wordt om een of meerdere van deze opties te kiezen.

Om te onderzoeken of het wenselijk is om invoergegevens van berekeningen te verbeteren, wordt aanbevolen om een systeem op te zetten dat een signaalfunctie vervult. Het doel is om tot een trendvalidatiesysteem te komen dat met metingen controleert of de resultaten van geluidberekeningen van voldoende kwaliteit zijn. Daarbij kan onderzocht worden of de invoergegevens een goede weergave van de werkelijkheid geven, maar ook of er mogelijk verbeteringen doorgevoerd kunnen worden aan de geluidmodellering van een rekenmodel. Overigens wordt aanbevolen om eerst de invoergegevens te onderzoeken, omdat dit eenvoudiger is en omdat eventuele verbeteringen eenvoudiger te implementeren zijn. Bij eventuele aanpassingen aan Doc29 geldt daarnaast nog de complicatie dat ook internationaal voldoende draagvlak gecreëerd moeten worden voor het doorvoeren ervan. Met name onderzoek naar geluidmodellering kan ook gedaan worden met specifiek daarvoor uitgevoerde geluidmetingen (in plaats van metingen met een permanent geluidmeetnet).

Zoals genoemd kan de signaalfunctie worden gebaseerd op trendvalidatie. Het doel van een trendvalidatie is om de trends in de berekenende geluidbelasting te vergelijken met trends in de geluidbelasting op basis van metingen. Deze methodiek is toegepast bij het invullen van de motie Neppérus-Jansen (Tweede Kamer 2009) en ter validatie van Schiphol

Doc29-berekeningen (Hogenhuis en Heblj 2018). De resultaten van de trendvalidatie voor Geilenkirchen staan in (Hogenhuis 2013).

- De motie had betrekking op de geluidbelasting op Nederlands grondgebied nabij de vliegbasis Geilenkirchen (Duitsland) en verzocht om een validatieprocedure van een berekende geluidreductie die gebouwd is op een fundament van zo veel mogelijk metingen. Het NLR heeft deze validatie uitgevoerd door trends in de berekende geluidbelasting te vergelijken met trends in de geluidbelasting op basis van metingen (Hogenhuis 2013). Uit deze validatie bleek dat voor de zes beschouwde meetlocaties de berekende trend overeenkwam met de gemeten trend in de periode tussen 2008 en 2012.
- Voor 2015 bleken de Doc29 berekende en gemeten trends voor de geluidbelasting rondom Schiphol elkaar te volgen. In het NLR-onderzoek (Hogenhuis en Heblj 2018) worden niet alleen trends in de L_{den} -geluidbelasting onderzocht, maar wordt bijvoorbeeld ook ingezoomd op vliegtuigniveau.

In tegenstelling tot een hybride systeem of kalibratie (zie paragraaf 6.3 voor voorbeelden hiervan, waarbij geluidmetingen worden gebruikt om het rekenmodel te kalibreren of om op basis van zowel een model als metingen geluidniveaus te voorspellen) wordt bij modelverbetering gericht gezocht naar aanpassingen aan de invoergegevens van een berekening of methodiek. Deze verbeteringen worden doorgevoerd als deze passen binnen de Doc29/NRM-systematiek en als deze in voldoende mate onderbouwd kunnen worden op basis van meetresultaten en fysica.

Het doel van het verbetersysteem is om op basis van metingen eerst te controleren of de resultaten van geluidberekeningen van voldoende kwaliteit zijn. Deze methode kan zowel voor het NRM als voor Doc29 worden toegepast. De eerste stap hierbij is om voor een aantal periodes (bijvoorbeeld maanden, mits er voldoende vliegbewegingen per maand plaatsvinden) te toetsen of de berekende geluidbelasting dezelfde trends volgt als de geluidbelasting op basis van metingen. Vervolgens kan in meer detail naar specifieke groepen verkeer gekeken worden (bijvoorbeeld starts of landingen of individuele vliegtuigtypes). Daarmee kan getoetst worden in hoeverre de modellering aansluit bij de metingen.

Zo is in het rapport met betrekking tot de trendvalidatie voor Schiphol bijvoorbeeld geconstateerd dat de verschillen tussen meten en rekenen bij de Boeing 747-400 gemiddeld groter zijn dan bij andere onderzochte vliegtuigtypes. Een dergelijke afwijking is niet goed te verklaren uit algemene beperkingen van geluidmodellen, maar zou eerder aanleiding zijn om de invoergegevens van dit specifieke type verder te onderzoeken.

Op hoofdlijnen kunnen er drie mogelijke uitkomsten zijn indien verschillen tussen meten en rekenen nader onderzocht worden:

- De invoergegevens van het rekenmodel (Nederlandse invloedsfeer) en/of de rekenmethodiek (Europese invloedsfeer) kunnen worden aangepast om de verschillen te verkleinen.
- Er wordt geconstateerd dat in bepaalde gevallen aanpassingen van het vlieggedrag wenselijk zijn, waardoor de operaties worden aangepast (dit is alleen aan de orde daar waar dit mogelijk is). Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als blijkt dat een bepaalde

maatschappij hogere geluidniveaus produceert dan andere maatschappijen die vergelijkbare procedures vliegen met vergelijkbare vliegtuigen. Ook hierdoor kunnen verschillen tussen meten en rekenen verkleind worden.

- Er wordt geen duidelijke oorzaak gevonden of er wordt geconstateerd dat het verkleinen van de verschillen in een specifiek geval niet nodig, wenselijk of mogelijk is.

De eerste twee opties zullen er vervolgens toe leiden dat de verschillen tussen meten en berekenen worden teruggebracht en dat het rekenmodel een betere voorspelling van de werkelijkheid geeft. Hierbij moet worden nagedacht over vragen als: 'Hoe werken deze wijzigingen door in de handhavingssystematiek?' en 'Met welke frequentie moeten de aanpassingen worden doorgevoerd?'.

Verder zal (bij voorkeur vooraf) bepaald moeten worden wat de criteria zijn om over te gaan tot nader onderzoek. De waarde waarbij dit gedaan wordt zal van verschillende factoren afhangen, zoals de ligging van de meetpost ten opzichte van de gemiddelde vliegroute, het aandeel vliegtuigen dat een geluidniveau produceert dat boven de meetdrempel (de minimale waarde die een geluidniveau moet hebben om gemeten te worden) uitkomt, of de spreiding in vliegroutes ter hoogte van de meetpost. Indien op basis van validatie op een beperkt aantal meetlocaties een modelverbetering wordt doorgevoerd, wordt aanbevolen om na te gaan of dit ook leidt tot verbetering op andere locaties.

De jaarlijkse validatie- en verificatieaanpak van het model van CAA-UK is op punten vergelijkbaar met dit verbeteringssysteem. Zo worden hierbij bijvoorbeeld jaarlijks de gemodelleerde vlieghoogtes aangepast aan de gemiddelde vlieghoogtes uit de praktijk.

Met modelvalidatie kan desgewenst nu al begonnen worden op basis van reeds beschikbare datasets met de in de voorgaande aanbeveling beschreven methode. Wel is het van belang om van te voren vast te stellen of die data voldoen aan de kwaliteitseisen. Voorbeelden van meetnetwerken waarvan al meetgegevens gebruikt kunnen worden, zijn onder andere Schiphol (NOMOS-netwerk, vanaf 1993, momenteel 41 meetposten), Luchthaven Eindhoven (vanaf 2014, 9 meetposten) en Rotterdam The Hague Airport (vanaf 2012, 6 meetposten). Hierbij dient wel uitgezocht te worden of de meetgegevens vrij beschikbaar zijn om nadere analyses mee uit te voeren.

Indien afwijkingen tussen de dagelijkse praktijk en de (internationale) databases met vliegtuiggegevens geconstateerd worden, doordat er bij een specifiek vliegtuigtype sprake is van meer dan gemiddelde verschillen tussen meten en rekenen en dit niet te herleiden is naar aannames rondom dit type, dan kan deze constatering worden neergelegd bij de beheerders van de database. Deze kunnen vervolgens onderzoeken of een correctie nodig is.

Daar waar metingen niet (volledig) voldoen aan de eisen uit de ISO-norm voor het uitvoeren van onbemande metingen (ISO/TC 43/SC 1 2010), kan een inschatting gemaakt worden van de ordegrrootte van verschillen tussen meten en rekenen die dat teweeg zal brengen. Ook

kan onderzocht worden of de kwaliteit van de metingen omhoog kan, bijvoorbeeld door (daar waar dat niet al gebeurd is) te toetsen welke meetwaarden daadwerkelijk aan vliegtuigen zijn toe te schrijven.

Bij gebrek aan passende data kan het nodig zijn om nieuwe meetapparatuur te plaatsen of om bestaande meetlocaties te herplaatsten. Indien deze metingen bestemd zijn voor validatie, heeft het de voorkeur om locaties te kiezen die voldoen aan de ISO-norm, waarbij zo veel mogelijk wordt aangesloten bij de geluidberekeningen (plaats bijvoorbeeld de microfoon op dezelfde hoogte als waarop gerekend wordt). Dit zullen doorgaans locaties in het open veld met weinig achtergrondgeluid zijn, die zo veel mogelijk onder de vluchtroutes liggen. Hierbij kan gekozen worden voor verschillende locaties, zowel dichtbij als verder weg van de luchthaven en op plaatsen met meer landend verkeer of juist meer startend verkeer.

Bij het toepassen van deze methodiek moet worden nagedacht over hoe om te gaan met de impact van modelaanpassingen op het beleid en de frequentie waarmee aanpassingen gedaan worden. Indien (de invoer van) het model namelijk verandert, betekent dit meestal dat zowel de jaarlijks berekende geluidbelasting verandert als de methode waarmee de normen worden vastgesteld. Voordat gestart wordt met het structureel verbeteren van (invoergegevens van) het model, dient ook vast te staan wat dit betekent voor de handhaving.

Alvorens metingen te gebruiken ter validatie en verbetering van bestaande rekenmodellen, kunnen de volgende zaken nader worden onderzocht:

- Onderzoek naar de bijdrage van aannames in het rekenmodel op de verschillen tussen meten en rekenen. Een voorbeeld hiervan is het hanteren van een vaste waarde voor temperatuur in het rekenmodel. Indien variaties in temperatuur en luchtvochtigheid worden meegenomen, kan wellicht een deel van het verschil tussen meten en rekenen verklaard worden. Deze kennis is daarmee niet bedoeld om het rekenmodel aan te passen, maar kan helpen bij het vaststellen van criteria voor nader onderzoek naar verschillen tussen meten en rekenen.
- Deze criteria kunnen gebaseerd zijn op verschillen in geluidniveaus of geluidbelastingniveaus, maar kunnen ook gebaseerd zijn op de correlatie tussen berekende en gemeten geluidniveaus.

6.3 Dagelijkse geluidinformatie

Omwonenden van luchthavens kunnen geïnteresseerd zijn in het geluidniveau en de geluidbelasting nabij hun eigen woonlocatie. Dit kunnen waarden uit het verleden zijn, bijvoorbeeld gemiddeld over het afgelopen jaar of de afgelopen dag, maar ook huidige waarden of zelfs voorspellende waarden voor bijvoorbeeld de komende dag. Omdat het aantal meetlocaties beperkt is, zullen alleen meetdata voor grote groepen omwonenden onvoldoende inzicht geven in hun lokale situatie.

Ruimtelijke geluidinformatie kan bepaald worden op basis van (aangepaste respectievelijk gevalideerde versies van) de huidige rekenmodellen, in het bijzonder Doc29, maar ook op basis van nieuw te

ontwikkelen modellen die zich specifiek richten op het gebruik van actuele metingen. Dit kan in de vorm van geluidinformatie die periodiek ververst wordt. Denk daarbij aan de ruimtelijke weergave (kaart) van het geluidniveau voor het gebied rond een luchthaven. Zo'n kaart kan elke dag, of desgewenst elk uur, ververst worden. Ook is het mogelijk om, op basis van verwachtingen met betrekking tot weer, vliegbewegingen en baangebruik, een prognose voor de volgende dag te maken. Het doel van de periodieke geluidinformatie is om omwonenden zo goed mogelijk te informeren over huidige en komende geluidniveaus.

Hieronder worden de volgende drie opties voor het maken van periodieke geluidinformatie besproken:

1. interpolatie en modelcorrectie (zie paragraaf 6.3.1);
2. machine learning (zie paragraaf 6.3.2);
3. dynamisch modelleren van vliegtuiggeluid (zie paragraaf 6.3.3).

Deze aanpak sluit aan bij het door Berkhout bepleite meetsysteem waarbij met nauwkeurige metingen het rekenmodel gevalideerd en verbeterd wordt (Berkhout 2019). Hij stelt een hybride meetsysteem (combinatie van modelleren en meten) voor van de allerhoogste kwaliteit. Daarbij doet hij geen uitspraak over het te gebruiken model. Hij geeft aan dat de verschillen tussen meten en rekenen bij de voorgestelde methode een continu leerproces opleveren en dat de uitkomsten van het model bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden om de effecten van voorgenomen beleidsmaatregelen te voorspellen.

6.3.1 *Interpolatie en modelcorrectie*

Dit is een relatief eenvoudige en goedkope oplossing die gericht is op het bepalen van de geluidbelasting over een periode in het verleden.

De methode bestaat uit de volgende stappen:

- Bepaal op meetlocaties het gemeten geluidniveau van vliegtuigpassages.
- Bereken voor de meetlocaties het geluidniveau, gebruikmakend van Doc29 of NRM.
- Bepaal voor de meetlocaties het verschil tussen meting en berekening.
- Bepaal voor een fijnmazig grid rondom de meetpunten de verschilwaarde op basis van interpolatie.
- Bereken de geluidbelasting op het grid.
- Pas de berekende geluidbelasting op het grid aan met de door interpolatie verkregen correctie.

Dit geeft geluidinformatie die op de meetlocaties precies overeenkomt met de gemeten waarde. Voor alle andere locaties wordt een schatting gemaakt. De methode kan met een mobiele meetpost ter plekke van één of meerdere gridpunten worden gevalideerd. Bij de berekening kan eventueel worden gebruikgemaakt van meteorologische gegevens, zodat deze worden meegenomen in de berekening. Deze methode beperkt zich tot het actuele geluid, en kan geen voorspelling geven van het geluid in de komende uren/dagen.

In het verleden heeft TNO reeds onderzoek gedaan naar een geluidmodel dat geluidberekeningen en metingen combineert (Van den

Berg et al. 2009). Hierbij ging het om geluidberekeningen die niet met het NRM of Doc29 gedaan werden. De resultaten werden vervolgens aangepast op basis van meetgegevens die op 2 meetlocaties verkregen werden. Ook voor deze aanpak gelden de eerder genoemde beperkingen dat niet zeker is of de correcties op basis van 2 meetlocaties ook elders gelden, dat een nieuwe berekende geluidbelasting wordt geïntroduceerd en dat mogelijke meetfouten in het rekenmodel worden meegenomen.

6.3.2 *Machine learning*

Deze methode bestaat uit de volgende stappen:

- Verzamel voor een bepaalde periode (de trainingsfase) meetgegevens op een aantal meetposten.
- Koppel deze metingen aan de bijbehorende vlucht- en weergegevens en verzamel de gekoppelde gegevens in een database.
- Gebruik zogeheten machine learning-technieken om patronen te ontdekken.
- Gebruik deze patronen na de trainingsfase om op een fijnmazig grid rondom de meetpunten uit de nieuwe vlucht- en weergegevens de bijbehorende geluidniveaus te bepalen.

Voor een nauwkeurige berekening is het belangrijk om een grote en gevarieerde dataset op te bouwen. Als de patronen eenmaal bepaald zijn, zijn in principe geen metingen meer nodig om het geluidniveau te berekenen. Ook kan met deze methode het geluidniveau voor de volgende dagen worden voorspeld, gebruikmakend van de verwachte vluchtgegevens en de weersverwachting. Indien de patronen niet constant blijven (bijvoorbeeld ten gevolge van nieuwe routes of nieuwe vliegtuigtypes), dan is het systeem niet meer in staat om het geluid van deze afwijkende patronen te herkennen.

Met additionele verificatiemetingen kan de nauwkeurigheid van de berekende geluidniveaus worden bepaald. Een nadeel van deze methode is dat niet duidelijk is hoe lang moet worden gemeten om nauwkeurige berekende waarden te krijgen. Het is ook mogelijk dat de relatie tussen vliegtuiggeluid en vlucht- en weergegevens, plus andere omgevingsfactoren, dermate complex is, dat machine learning-technieken zich hier niet goed voor lenen. Er kan worden begonnen met een simulatiestudie om te constateren hoeveel training data nodig zijn voordat het systeem werkt.

Daarnaast zal deze methode niet werken voor momenten waarop geen goede metingen gedaan kunnen worden, zoals bij relatief harde wind en bij neerslag, en is onbekend of de methode ook bruikbaar is voor locaties waar niet gemeten is. Tot slot worden meetwaarden ook bij deze methode als de werkelijkheid beschouwd, waardoor meetfouten ook meegenomen worden in de rekenresultaten.

Samenvattend zijn er veel onzekerheden, waardoor het zeer de vraag is in hoeverre deze methode tot bruikbare resultaten leidt, terwijl veel tijd en onderzoek nodig is om te bepalen wat deze methode oplevert.

6.3.3 *Dynamisch modelleren van vliegtuiggeluid*

Hierbij gaat het om modellen die het actuele geluidniveau berekenen, gebruikmakend van actuele vluchtgegevens en het actuele weer. Deze gegevens kunnen verzameld worden met apparatuur die continu weersgegevens verzameld, maar bijvoorbeeld ook met een LIDAR-systeem dat informatie geeft over temperatuurgradiënten en turbulentie.

Geluid van vliegverkeer wordt berekend met een model dat uitgaat van natuurkundige principes. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen twee onderdelen van het model:

1. Het modelleren van de prestaties en de geluidproductie van het vliegtuig op basis van actuele gegevens.
2. Het modelleren van de propagatie van geluid door de lucht op basis van actuele gegevens.

De berekening kan op operationele basis continu worden uitgevoerd, 24 uur per dag, 7 dagen per week. Desgewenst kan, op basis van de verwachte vluchtgegevens en het verwachte weer, een verwachting van geluidniveaus worden gemaakt, voor maximaal twee dagen vooruit. Hierbij kunnen met geavanceerde modellen effecten van de atmosfeer op de voortplanting van geluid meegenomen worden. Hierbij kan bijvoorbeeld rekening gehouden worden met het verticale profiel van de wind en van de temperatuur. Daarnaast kan rekening gehouden worden met het gegeven dat de atmosferische absorptie van het (hoogfrequente) vliegtuiggeluid afhangt van de temperatuur en luchtvochtigheid.

Een dergelijke aanpak is al getest door NLR en TU Delft, waarbij de propagatiemodule van een op Doc29 gebaseerd geluidmodel is vervangen door een module op basis van weersafhankelijke ray-tracing (Arntzen et al. 2014). Hierbij wordt rekening gehouden met de verticale profielen van temperatuur, wind en luchtvochtigheid. Mogelijke vervolgstappen op dit onderzoek zijn om te onderzoeken of de gehanteerde methode inderdaad leidt tot een kleiner verschil tussen gemeten en berekend geluid en om gebruik te maken van actuele weersgegevens (in plaats van historische gegevens zoals tijdens het onderzoek is gedaan).

Het akoestische propagatiemodel kan worden gevoed met nieuwe geluidmetingen en weersgegevens en het berekent daaruit het actuele vliegtuiggeluid. Het berekende vliegtuiggeluid op een bepaald moment volgt uit een combinatie van de modelvoorspelling voor dat moment en recente nabije waarnemingen. Momenteel wordt bij EMPA in Zwitserland met het SonAIR-model (zie paragraaf 4.3) aan een dergelijke methode gewerkt.

Deze methode gebruikt de meest gedetailleerde modellering. Daarom zou het in potentie het kleinste verschil tussen meten en rekenen kunnen geven. Het is echter ook de meest rekenintensieve methode en het vergt nog veel onderzoek en dus ook kosten om tot een dergelijk model te komen. Daarbij is de modellering complexer dan bij andere modellen, waardoor het vooraf niet zeker is dat deze methode tot de beste resultaten leidt. Ook zal niet altijd alle vereiste input (tijdig) beschikbaar zijn.

6.3.4 *Kanttekeningen bij de dagelijkse geluidinformatie*

Doordat de hierboven beschreven modellen meer variabelen meenemen, zijn de uitkomsten lastiger te voorspellen. Als een dergelijk model voor handhaving gebruikt zou worden, is een grote marge op de berekeningsresultaten nodig om deze onzekerheden mee te kunnen nemen. Dit maakt dergelijke modellen ongeschikt voor handavingsberekeningen.

Een nadeel van de geschetste opties is dat voor elke methode geldt dat een extra rekenmethode wordt geïntroduceerd naast de rekenmethode voor handhaving. Dit wil zeggen dat drie verschillende waarden van het geluid beschikbaar zijn, namelijk de resultaten van twee rekenmethoden (een voor informatievoorziening en een voor handhaving) en meetgegevens, naast ook de werkelijke ervaring van geluid. Deze hoeveelheid informatie kan juist ook tot verwarring en een nog complexere discussie over vliegtuiggeluid leiden. Om ervoor te zorgen dat dit effect beperkt wordt, is het in elk geval van belang dat slechts voor één van de genoemde opties gekozen wordt (en dat dus niet alle drie de opties uitgewerkt worden).

Daarbij ligt het voor de hand om in eerste instantie te kiezen voor ontwikkelingen die relatief eenvoudig doorgevoerd kunnen worden, zodat een snel resultaat behaald wordt voor beperkte kosten. Dit wil zeggen dat zo veel mogelijk aangesloten moet worden bij de Doc29-methodologie, zoals bijvoorbeeld de in paragraaf 6.3.3. genoemde studie van NLR en TU Delft (Arntzen et al. 2014). Als blijkt dat hiermee de vooraf gestelde doelen behaald worden, is het niet nodig om ook complexere oplossingen te onderzoeken.

Tevens maken deze modellen gebruik van metingen om de berekeningsresultaten aan te passen. Daarbij is het nadeel dat metingen niet volledig nauwkeurig zijn. Zo kunnen andere geluidbronnen gemeten worden en hebben microfoons een bepaalde nauwkeurigheid. Hierdoor is niet duidelijk waar het verschil tussen meten en rekenen vandaan komt. Indien bijvoorbeeld een meting verstoord wordt door een andere geluidbron, wordt het geluidniveau van de berekening ook hiervoor gecorrigeerd en neemt het verschil tussen meten en rekenen weliswaar af, maar is de kwaliteit van de berekening verslechterd.

Daarnaast is niet zeker in hoeverre de correctie van de berekening geldig is in een groter gebied. Wordt deze bijvoorbeeld veroorzaakt door het weer, dan zal dit in een groter gebied spelen; maar komt het doordat de piloot kortdurend meer of minder stuwkracht toepast dan normaal, dan is er sprake van een lokaal effect, waardoor het corrigeren daarvoor elders juist een groter verschil tussen meten en rekenen geeft.

Indien de modellen gebruikt worden om een voorspelling te maken van geluid in de nabije toekomst, dient opgemerkt te worden dat een dergelijke voorspelling waarschijnlijk gepaard gaat met een grote onzekerheid. Dit komt doordat bij een voorspelling niet alleen de onzekerheid in weerscondities een rol speelt, maar ook doordat een voorspelling gedaan moet worden van vlieggedrag (welke banen en routes gaan gebruikt worden en hoe gaan vliegtuigen zich gedragen). Daarom richten toepassingen die een voorspelling doen zich vaak niet op

de absolute waarde van toekomstige geluidsniveaus, maar eerder op de gebieden waar geluid verwacht wordt op basis van voorspeld baangebruik en eventueel routegebruik. Een voorbeeld hiervan is dat het verwachte baan- en routegebruik van de luchthaven van Eindhoven in de toekomst beschikbaar gemaakt zal worden via de zogeheten BurenApp.

Vanwege bovengenoemde beperkingen is het van belang eerst te beslissen of het opzetten van een extra rekenmodel wenselijk is, alvorens veel tijd en geld wordt geïnvesteerd in de ontwikkeling van een dergelijk model. Een alternatief is om de bestaande rekenmethoden te gebruiken om beter inzicht te geven in het geluid op specifieke locaties. Dit heeft tevens als voordeel dat dit sneller en tegen lagere kosten te implementeren is.

6.4 Conclusies en aanbevelingen

In de huidige praktijk worden geluidmetingen en geluidberekeningen onafhankelijk van elkaar toegepast, waarbij beide hun eigen doelen hebben. We bevelen aan deze werkwijze te verlaten, en een structureel en langjarig modelvalidatie programma te starten.

Om te onderzoeken of het wenselijk is om invoergegevens van berekeningen te verbeteren, wordt aanbevolen om een systeem op te zetten dat een signaalfunctie vervult. Het doel is om tot een validatiesysteem te komen dat op basis van metingen controleert of de geluidberekeningen van voldoende kwaliteit zijn. Indien dat niet het geval is, kan gezocht worden naar verbeteringen die passen binnen de Doc29/NRM systematiek en die in voldoende mate onderbouwd kunnen worden op basis van meetresultaten en fysica.

Periodieke, bijvoorbeeld dagelijkse geluidinformatie, op basis van meten en rekenen, informeert over het vliegtuiggeluid op een fijnmazig rooster rondom een luchthaven op de huidige dag en eventueel de volgende dagen, waarbij opgemerkt dient te worden dat een dergelijke voorspelling waarschijnlijk gepaard gaat met een grote onzekerheid. De aanbeveling is om deze informatie op dagelijkse basis te leveren. Aanbevolen wordt om eerst vast te stellen waar precies behoefte aan bestaat, om vervolgens te kiezen voor een ontwikkeling die daarbij past, bijvoorbeeld:

- uitbreiding van het Doc29-model;
- uitwerken van een interpolatie- en modelcorrectiemethode, gebruikmakend van Doc29;
- toepassing van machine learning-technieken;
- het aanschaffen van het Zwitserse dynamisch geluidmodel *Sonair* en dat aanpassen voor de Nederlandse situatie;
- het zelf ontwikkelen van een dynamisch geluidmodel.

Hierbij wordt aanbevolen om waar mogelijk uit te gaan van het Doc29-model, in combinatie met een (geoptimaliseerde) set van invoergegevens. Van de verschillende mogelijkheden is het dynamisch geluidmodel het meest *state-of-the art*.

Hierbij wordt opgemerkt dat zowel berekeningen als metingen van vliegtuiggeluid nooit honderd procent nauwkeurig zijn. De vereiste nauwkeurigheid hangt af van de toepassing; en het introduceren van

nieuwe rekenmodellen en/of combinaties van meten en rekenen kan leiden tot een complexere situatie waarbij meerdere berekende geluidbelastingen naast elkaar bestaan, waardoor het voor omwonenden mogelijk lastiger is om een goed beeld te vormen van de door hen ondervonden geluidbelasting.

7 Voorstel invulling 'Programmatistische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid'

7.1 Inleiding

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft aan de kennisinstituten RIVM, NLR en KNMI gevraagd om, rekening houdend met de nieuwste wetenschappelijke en internationale inzichten, de mogelijkheden te verkennen om verbeteringen door te voeren bij het meten en berekenen van vliegtuiggeluid. Deze verkenning moet de basis vormen voor de ontwikkeling van een optimale en voor iedereen betrouwbare meet- en rekenmethodiek.

Bij luchtvaart is de geluidruimte, de capaciteitsplanning en de evaluatie van het gebruik van de geluidruimte gebaseerd op geluidberekeningen. Er worden weliswaar op diverse plaatsen rond luchthavens geluidmetingen uitgevoerd, maar die worden alleen gebruikt voor informatieve doeleinden en spelen geen formele rol. Ook is er niet structureel toegewerkt naar een systeem van onderling corresponderende metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid. Eerdere initiatieven om metingen te gebruiken, en ook de aanbevelingen daarover van de Commissie Deskundigen Vliegtuiggeluid (Eversdijk et al. 2006), zijn niet in praktijk gebracht, door praktische, beleidsmatige en operationele belemmeringen.

Gedurende de verkenning heeft het consortium van RIVM, KNMI en NLR met veel partijen gesproken, een uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd en ook via andere wegen informatie opgehaald. Daaruit is een helder beeld gedestilleerd van de problematiek en van de vele activiteiten die op dit terrein worden uitgevoerd, in Nederland maar ook in andere westerse landen met veel ervaring op het gebied van meten en berekenen van vliegtuiggeluid. Uit de verkenning volgt klip en klaar dat de maatschappelijke vraag naar verbetering van de situatie groot is: de algemene stemming kenmerkt zich door een hoge mate van ongeduld. Ook hebben we geconcludeerd dat het wel degelijk mogelijk is om de bepaling van geluidniveaus en geluidbelasting door een gecombineerd gebruik van metingen en berekeningen te verbeteren.

Vanwege de maatschappelijke, bestuurlijke en technische complexiteit van dit thema vergt dit wel een aanzienlijke inspanning. Daar komt bij dat veranderingen aanbrengen in de systematiek zoiets betekent als 'instappen in een rijdende trein'. Ook bestaan er veel ideeën en wensen om de situatie aan te passen, maar die zijn niet altijd wetenschappelijk onderbouwd en soms onderling tegenstrijdig. In elk geval ontbreekt het aan een gezamenlijk beeld over een systematische aanpak waarmee structureel kan worden toegewerkt naar verbetering. Een degelijke en breed geaccepteerde aanpak en een nationale basisstructuur vormen naar onze mening echter een noodzakelijke randvoorwaarde om een betrouwbaar en voor alle partijen bruikbaar systeem 'Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven' te kunnen realiseren.

Om invulling te geven aan de maatschappelijke wens tot verbetering presenteren we daarom, als resultaat van onze verkenning, op de eerste

plaats een voorstel voor een uitvoeringsstructuur die de noodzakelijke basis vormt voor de uitrol van nieuwe activiteiten op het gebied van meten en berekenen van vliegtuiggeluid, en de communicatie hierover met de omgeving. De voorgestelde uitvoeringsstructuur bevat een *operationeel* deel, met daarnaast een positie voor (*innovatief*) *toegepast* onderzoek. Beide delen zijn verbonden door een *wetenschappelijke adviesgroep* die als interface fungeert. Het geheel levert de basiscondities voor een gereguleerd proces van continue verbetering. Deze voorgestelde uitvoeringsstructuur wordt in de volgende paragraaf nader toegelicht.

Na die toelichting volgt een overzicht van door de rijksoverheid te nemen besluiten die hiermee samenhangen (paragraaf 7.3). Tot slot zoomen we in op een aantal specifieke aandachtspunten binnen het systeemconcept waarover we in meer detail aanbevelingen geven. Deze set van aanbevelingen wordt behandeld in paragraaf 7.4.

Om dit hoofdstuk behapbaar te houden, beperken we ons hier tot de hoofdlijnen. Voor de bespreking van opties en bevindingen die hier niet (uitgebreid) aan de orde komen, verwijzen we naar de voorafgaande hoofdstukken 3 t/m 6.

7.2 Voorstel voor een uitvoeringsstructuur

De voorgestelde uitvoeringsstructuur met betrekking tot het meten en berekenen van vliegtuiggeluid, de relatie daarmee met geluidhinder en de communicatie hierover met de omgeving, verder aangeduid als 'systeemconcept', bevat drie essentiële onderdelen (zie Figuur 25):

1. de operationele uitvoering van een standaard takenpakket;
2. de uitvoering van een onderzoeksprogramma, gericht op verbetering van de operationele taken;
3. de kwaliteitsborging van het operationele takenpakket en de wetenschappelijke aansturing van het onderzoeksprogramma.



Figuur 25. Voorstel uitvoeringsstructuur 'Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven'.

In de volgende secties worden deze onderdelen nader toegelicht. Daarbij is uitgegaan van de veronderstelling dat de eerste versie van het operationele takenpakket reeds uitgekristalliseerd is. Het vergt echter nog tijd en overleg om zover te komen.

7.2.1 *Operationele systemen per luchthaven*

Rond elke luchthaven van nationale betekenis is sprake van een operationeel systeem voor het meten en berekenen van vliegtuiggeluid, het leveren van informatie over de resultaten en het vormgeven aan de interactie hierover met de omgeving. Kenmerk van alle operationele systemen is dat daarbinnen 'volgens werkvoorschrift' structurele activiteiten met betrekking tot meten, rekenen en informeren worden uitgevoerd en dat daarvoor een adequate infrastructuur wordt ingericht. Het gaat daarbij in hoofdlijn om de volgende vijf onderdelen:

7.2.1.1 Uitvoeren van metingen

Rond elke regio ligt een meetnet voor het monitoren van vliegtuiggeluid, waarbij helder onderscheid gemaakt wordt tussen meetlocaties voor modelvalidatie en meetlocaties voor andere doeleinden, zoals het bieden van informatie aan omwonenden. Meetlocaties voor modelvalidatie moeten aan strenge technische eisen voldoen, voor andere locaties zijn die eisen minder zwaar. Omwille van harmonisatie en beschikbaarheid worden alle geluiddata, samen met de bijbehorende meteo- en vluchtgegevens, volgens een landelijk geldend format ingevoerd in een nationale database. De inhoud van deze database is openbaar. Reeds bestaande data kunnen, mits ze voldoen aan de gestelde eisen, met terugwerkende kracht in de nationale geluiddatabase worden ingevoerd, zodat er bij aanvang al meerdere meetreeksen voor onderzoeksdoelen beschikbaar zijn. Voor onderzoeksdoeleinden, gericht op verbetering van de operationele meet- en rekensystematiek in de nabije toekomst, kan het nodig zijn om op één of een paar meetlocaties in Nederland aanvullende, geavanceerde metingen uit te voeren.

7.2.1.2 Uitvoeren van berekeningen

Voor meerdere doeleinden is het noodzakelijk of wenselijk om het geluid van vliegtuigen te berekenen. Het gaat daarbij om geluidniveaus van individuele vliegbewegingen en om de geluidbelasting ten gevolge van meerdere vliegbewegingen, maar ook om berekeningen voor het verleden (realisatie), het heden (actueel) en de toekomst (prognose). Voor dit soort berekeningen bestaan verschillende modellen, of ze kunnen daarvoor ontwikkeld worden. Uit oogpunt van kosteneffectiviteit en harmonisatie ligt het voor de hand om voor iedere luchthaven hetzelfde model te gebruiken. Dat geldt in ieder geval voor handavingsdoeleinden. Wel kan per luchthaven sprake kan zijn van specifieke invoergegevens. De manier waarop het vliegtuiggeluid berekend wordt is (per doel) in voorschriften of richtlijnen vastgelegd.

Het is duidelijk dat de modelering van vliegtuiggeluid op onderdelen verbeterd kan worden. We bevelen daarbij aan om, in ieder geval op de korte termijn, het accent te leggen op verbeteringen binnen Doc29. Het aanbrengen van verbeteringen zit deels in het toepassen van aanvullende invoergegevens. Een verbetering ten opzichte van de huidige situatie wordt verwacht indien bijvoorbeeld informatie van het werkelijke startgewicht van opstijgende vliegtuigen gebruikt wordt (zie

paragraaf 4.5.2.2). Ook het model zelf kan op enkele punten verbeterd worden. Nederland is aangesloten bij de AIRMOD werkgroep die verantwoordelijk is voor de ontwikkeling van Doc29. Via deze werkgroep kan vanuit Nederland in internationaal verband bijgedragen worden aan de verdere ontwikkeling van Doc29, waarbij het accent ligt op onderdelen die we in Nederland het meest belangrijk vinden. In de toekomst kunnen mogelijk ook andere modellen, naast Doc29, een rol gaan spelen bij het berekenen van vliegtuiggeluid. Maar het vergt nog nader onderzoek om de mogelijkheden en consequenties daarvan goed in kaart te brengen. Aanbevolen wordt om nieuwe ontwikkelingen waar mogelijk te baseren op bestaande modellen, in het bijzonder op Doc29.

- 7.2.1.3 Analyse van de verschillen tussen meten en rekenen
Rond elke luchthaven wordt volgens een vastgelegde methode het verschil in kaart gebracht tussen metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid. Dit gebeurt bij voorkeur met geluiddata die voldoen aan de ISO-norm. In eerste instantie ligt het accent op het vergelijken van de gemeten en berekende geluidbelasting (L_{den}) over een langere periode. Met die analyse kan overigens al gestart worden op basis van bestaande meetreeksen die (redelijk) goed voldoen aan de technische eisen. Uit de analyse volgt hoe goed of slecht de meet- en rekenresultaten overeenkomen, waarbij wordt aanbevolen om criteria op te stellen op basis waarvan bepaald kan worden wanneer nader onderzoek gewenst is om de bepaling van de geluidbelasting te verbeteren. Als de vergelijking van de gemeten en berekende geluidbelasting (na verbetering van de rekenmethode) goed uitvalt kan de aandacht verlegd worden naar de vergelijking van meten en rekenen voor individuele vliegtuigpassages en modellen die geschikt zijn voor deze vergelijking (zie paragraaf 6.3). Door de toegepaste systematiek van continue verbetering zal de kwaliteit van de geluidinformatie met de jaren toenemen. Op basis van voortschrijdend inzicht kunnen op termijn ook uitspraken gedaan worden over het toepassingsbereik waarbinnen meet- en rekenresultaten betrouwbaar zijn. Hiermee wordt voor alle partijen duidelijk wat, per doel, de geschiktheid is van meet en rekenresultaten. Zie voor details over de voorgestelde aanpak paragraaf 7.4.3.

- 7.2.1.4 Communicatie met betrokkenen
Voor de meeste luchthavens van nationale betekenis is momenteel al een informatiesysteem voor burgers (website) aanwezig. Op deze sites wordt veel informatie aangeboden, maar in sommige gevallen ontbreekt het aan informatie die omwonenden (mogelijk) belangrijk vinden. Ook is wel aanwezige informatie soms moeilijk te vinden en de beschikbare informatie is niet altijd geproduceerd met publiekscommunicatie als doelstelling. De publiekscommunicatie over het meten en rekenen aan vliegtuiggeluid kan dus aan kwaliteit winnen. Wij stellen voor om algemene informatie 'gecoördineerd' aan te bieden, wat het doelmatig beheer van de inhoud en kwaliteit ten goede komt. Denk daarbij aan informatie over maten voor geluid en hinder, wet- en regelgeving en uitleg over de (voordelen en beperkingen) van meet- en rekenvoorzieningen. Met behulp van begrijpelijke teksten, *infographics* en korte filmpjes moet daarbij vooral aandacht geschonken worden aan het geven van uitleg aan niet-deskundigen.

Een van de kernpunten van de communicatie met betrokkenen is het leveren van heldere informatie over de opgetreden en te verwachten geluidsniveaus en/of geluidbelasting. Volgens plan gebeurt dat in de toekomst op basis van een combinatie van metingen en berekeningen. Gezien het belang hiervan moet hier een ontwikkeltraject aan gekoppeld worden, met als doel om op termijn hoogwaardige geluidinformatie te produceren. Dit soort informatie, die periodiek versterkt wordt, moet een solide basis vormen om te kunnen beoordelen hoe de werkelijkheid zich verhoudt tot eerder gemaakte afspraken. Ook laat het regionale informatiesysteem de resultaten zien van periodiek uit te voeren onderzoek naar beleving en hinder.

Publiekscommunicatie bij luchthavens is echter maatwerk. Per regio spelen er andere vragen en bestaat er dus op onderdelen een andere informatiebehoefte. Dit betekent dat, naast algemene informatie over (de systematiek van) rekenen en meten en regionale informatie over geluidbelasting en hinder, ook luchthaven-specifieke informatie op de regionale websites weergegeven moet worden. Dat is en blijft een taak van de regio's.

7.2.1.5 Interactie met de omgeving

Een hoogwaardig informatiesysteem voorziet in een brede behoefte, maar interactie is meer dan het leveren van publieksinformatie in één richting. In de afgelopen jaren is al veel ervaring opgedaan met publieksconsultatie en participatie, bijvoorbeeld bij de 'proefcasus Eindhoven'. Vanuit die proefcasus wordt aanbevolen om de opzet van een meetprogramma rondom vliegveld Eindhoven en de ligging van meetlocaties in overleg met de omgeving plaats te laten vinden. Dit kan beschouwd worden als een vorm van burgerparticipatie. Zo'n participatieprogramma levert niet alleen extra data op, maar verhoogt ook het wederzijds begrip. Het is daarom wenselijk dat de rijksoverheid een stimulerende houding aanneemt bij de verdere uitwerking van regionale proefcasussen, gericht op het verbeteren van de interactie met de omgeving.

Daarnaast stellen we de volgende onderwerpen voor die een vaste plaats moeten krijgen in de interactie met de omgeving:

- Het periodiek in de regio monitoren van de hinderbeleving, aan de hand van een landelijk vastgelegd format. Dit maakt hindergegevens tussen regio's en door de tijd heen beter vergelijkbaar.
- Het periodiek in de regio ophalen van verbeterwensen met betrekking tot inhoud en vorm van de aangeboden informatie. Deze wensenlijst vormt, samen met de bevindingen die door professionals zijn vastgesteld, de basis voor nader onderzoek binnen het onderzoeksprogramma vliegtuiggeluid (zie paragraaf 7.2.2).

De operationele systemen dienen als geheel robuust en transparant te zijn. Dat betekent dat alle uit te voeren activiteiten nauwkeurig omschreven moeten zijn en gebaseerd moeten zijn op bewezen kennis en techniek. Ook moet de infrastructuur van de operationele systemen aan hoogwaardige kwaliteitseisen voldoen. Operationele systemen zijn niet continu onderhevig aan verandering: eventuele updates van

werkwijze of infrastructuur vinden plaats op vooraf overeengekomen tijden, en niet voordat nut, noodzaak en kwaliteit zorgvuldig getest en beoordeeld zijn.

Met uitsluitend het nauwgezet uitvoeren van structurele taken wordt geen invulling gegeven aan de wens tot continue verbetering. Om toch aan die wens te voldoen, moet er binnen het systeemconcept plaats ingeruimd zijn voor welgekozen (innovatief) onderzoek. Dat brengt ons bij de tweede pijler van het systeemconcept.

7.2.2 *Onderzoeksprogramma*

In het voorstel van het consortium vindt, parallel aan de uitvoering van structurele taken, (innovatief) onderzoek plaats, met als uitdrukkelijk doel het (op termijn) verbeteren van de kwaliteit van de operationele taakuitvoering. Door het innovatieve onderzoek onder te brengen in een (nationaal) onderzoeksprogramma, kunnen aangeboden onderzoeksvoorstellen op transparante wijze getoetst worden op nut, noodzaak, wetenschappelijke kwaliteit, kosteneffectiviteit en operationele toepasbaarheid. De scope van het onderzoeksprogramma moet het geheel aan structurele activiteiten, zoals ondergebracht in de operationele systemen, dekken.

7.2.2.1 Onderzoek meten en rekenen

Het onderzoeksprogramma bevat technologische thema's, gericht op het verkleinen van de verschillen tussen meten en rekenen. Zo kan bijvoorbeeld de invloed van verschillende parameters op de bepaling van het geluidsniveau onderzocht worden, of de mogelijkheden onderzocht worden van alternatieve meet- en rekentechnieken (zoals dynamische modellering). Voor dat doel kan het nodig zijn om op een (beperkt) aantal meetlocaties in Nederland aanvullende meetapparatuur te plaatsen (bijvoorbeeld microfoon arrays, microbarometers, etc.). Dit soort metingen dient uitgevoerd te worden als blijkt dat met metingen met de reguliere meetnetten nabij luchthavens niet voldaan kan worden aan een bepaalde informatiebehoefte of als dergelijke metingen nodig zijn voor de beantwoording van specifieke onderzoeksvragen.

7.2.2.2 Onderzoek beleving, hinder en gezondheid

Het programma biedt ook ruimte aan thema's uit het maatschappelijke domein. Voorbeelden van onderzoek in deze categorie zijn: onderzoek naar de bruikbaarheid van aanvullende geluidmaten naast L_{den} , onderzoek naar nieuwe mogelijkheden voor aanlevering van hinderdata, onderzoek naar de regio- en tijdafhankelijkheid van de dosis-effectrelaties en onderzoek naar de regio-afhankelijke invloed van niet-akoestische factoren en hoe daarmee om te gaan. Ook hier geldt dat dit onderzoek moet dienen om antwoord te geven op een informatiebehoefte vanuit de maatschappij.

7.2.3 *Wetenschappelijke aansturing als verbindende schakel*

Innovatief onderzoek en de uitvoering van structurele taken moeten op een goede manier met elkaar verbonden worden. Voor dat doel wordt de instelling van een *wetenschappelijke adviesgroep* voorgesteld. Er zijn meerdere manieren om gestalte te geven aan de wijze van wetenschappelijke aansturing. In deze sectie wordt een specifiek voorbeeld uitgewerkt, waarbij de adviesgroep een sterk sturende rol

heeft op zowel de uitvoering van structurele taken (meten, rekenen, data-analyse, informatievoorziening, interactie met de omgeving) als op het verbeterprogramma (opzet, aansturing en beoordeling nationaal onderzoeksprogramma). Maar er zijn ook andere varianten mogelijk, bijvoorbeeld een waarbij het mandaat meer bij de uitvoerende instanties ligt en de adviesgroep eerder een toetsende functie heeft. Alle te kiezen varianten hebben hun eigen voor- en nadelen. Zie sectie 7.4.7.

Volgens het hier uitgewerkte voorbeeld heeft de adviesgroep twee hoofdtaken:

1. Het periodiek vastleggen van de specificaties van de operationele systemen.
2. Het uitzetten en beoordelen van het verbeterprogramma.

Dit is een iteratief proces. In eerste instantie stelt de adviesgroep de specificaties op van de operationele systemen voor de eerste termijn. Ook bepaalt de adviesgroep, op basis van wensen vanuit de omgeving en bevindingen vanuit het operationele domein, de centrale thema's van het eerste nationale onderzoeksprogramma 'Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven'. Het accent ligt dus op thema's waar de (maatschappelijke of technische) vraag het grootst is en waar onderzoek het meest kansrijk geacht wordt om tot verbeteringen te komen. Na het vaststellen van de onderzoeksbehoefte toetst de adviesgroep ingediende onderzoeksvoorstellen op nut, noodzaak, wetenschappelijke kwaliteit, kosteneffectiviteit en operationele toepasbaarheid. Binnen het beschikbare budget kunnen vervolgens de best beoordeelde onderzoeksvoorstellen uitgevoerd worden. Na enige tijd levert dat nieuwe kennis en technieken op. De adviesgroep beoordeelt vervolgens of, en zo ja, hoe en wanneer de nieuwe kennis een plaats kan krijgen binnen de operationele systemen. In die afweging wordt onder andere bekeken:

- of de baten van een verbeterd operationeel systeem opwegen tegen kosten van de voorgestelde aanpassing van werkwijze of techniek;
- of invoering van de voorgestelde aanpassing consequenties heeft voor regelgeving en handhaving;
- of invoering van de voorgestelde aanpassing past in het kader van internationale afspraken.

Met de invoering van de verbeteropties is de cirkel rond en kan desgewenst een nieuwe verbetercyclus ingezet worden.

De adviesgroep voert binnen dit systeemconcept een essentiële taak uit. Deze groep moet daarom een zo breed mogelijk vertrouwen hebben van de stakeholders binnen dit domein. Dit stelt zeer hoge eisen aan de kwaliteit van deze groep ten aanzien van deskundigheid, onafhankelijkheid en transparantie. Diepgaande kennis over geluid van vliegtuigen en over de effecten daarvan voor de volksgezondheid is echter schaars belegd in Nederland. Een belangrijk punt van aandacht is daarom dat binnen dit systeemconcept onafhankelijkheid en betrouwbaarheid goed geborgd zijn (zie verder sectie 7.4.7).

7.3 Beslispunten

Als de rijksoverheid ervoor kiest om dit systeemconcept geheel of gedeeltelijk in te voeren, dan zal zij over de volgende punten een besluit moeten nemen:

- Budget beschikbaar stellen, of op een andere wijze financiering regelen voor een meerjarig onderzoeksprogramma 'Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven';
- Instellen van een onafhankelijke en vakdeskundige adviesgroep, waarbij keuzes gemaakt moeten worden over het takenpakket en het mandaat van deze groep;
- Het faciliteren van de uitwerking van een nationale meetstrategie en de inrichting van een geharmoniseerde decentrale meetnetinfrastructuur (meetlocaties, data-acquisitie, nationale database);
- Mensen en/of middelen leveren voor de uitvoering van structurele meet- en rekentaken, als onderdeel van het operationele beheer van de regionale meet- en rekensystemen.
- Mensen en/of middelen leveren voor verbetering, harmonisatie en beheer van de informatievoorziening, voor zover het algemene (dat wil zeggen niet zuiver regionale) aspecten betreft, bijvoorbeeld door een 'nationale landingspagina' te laten ontwikkelen.
- Bijdragen aan de verdere uitwerking van regionale proefcasussen, gericht op het verbeteren van de interactie met de omgeving.

7.4 Lijst van specifieke aanbevelingen binnen het systeemconcept

In sectie 7.2 hebben we in vogelvlucht toegelicht wat we bedoelen met het systeemconcept en welke onderdelen daarin zijn ondergebracht. In deze sectie komen we met een serie meer gedetailleerde aanbevelingen op het gebied van meten, rekenen, vergelijken, beleven, informeren, participeren, onderzoeken en besturen (wetenschappelijke aansturing).

De aanbevelingen betreffen de volgende onderwerpen:

1. meetstrategie
2. signaalfunctie
3. modelontwikkeling
4. publiekscommunicatie
5. hinder en gezondheid
6. Citizen Science
7. wetenschappelijke aansturing

7.4.1 Aanbeveling 1: Meetstrategie

Ontwikkel en implementeer een nationale meetstrategie. Daarin zijn visies opgenomen omtrent de verschillende meetdoelen en is per meetdoel vastgelegd waaraan metingen moeten voldoen. In het kader van de meetstrategie dient in nauw overleg met betrokkenen een 'is/wordt'-meetlocatietabel te worden uitgewerkt die het verband legt tussen de huidige en de gewenste situatie. Er wordt toegewerkt naar de situatie waarbij alle meetgegevens volgens overeengekomen format in een openbare nationale database zijn opgeslagen. Gekozen wordt voor een gefaseerde aanpak, uitgaande van de aanwezige infrastructuur en reeds lopende initiatieven. Voor innovatief onderzoek kan het nodig zijn om op een beperkt aantal locaties aanvullende metingen uit te voeren.

Metingen: doelen en criteria

Zoals beschreven in paragraaf 5.1, kunnen geluidmetingen worden uitgevoerd voor verschillende doeleinden, zoals informatievoorziening, modelvalidatie en innovatief onderzoek. De criteria die je stelt aan de meetsystemen verschillen per doel. Zo zijn de technische eisen die gesteld worden aan meetopstellingen voor modelvalidatie een stuk strenger dan de eisen voor metingen ten behoeve van informatievoorziening. Daarnaast is voor de criteria voor modelvalidatie landelijke harmonisatie vereist, terwijl de criteria voor informatievoorziening regioafhankelijk kunnen zijn.

Transitie meetconfiguratie

Voor de 'is/wordt'-meetlocatietabel wordt om te beginnen, in nauw overleg met betrokkenen, een overzicht gemaakt van bestaande meetlocaties in Nederland en wordt per locatie en per meetdoel de kwaliteit van de reeds beschikbare data beoordeeld. Dit overzicht bevat in elk geval de naam en coördinaten van de locatie, de meetperiode, de tijdsresolutie, de gemeten en eventueel hieruit berekende grootheden, of de meetgegevens openbaar zijn, waar en in welk format ze beschikbaar zijn, gegevens over de gebruikte meetapparatuur, omgevingskenmerken en contactgegevens van de eigenaar/beheerder van de meetgegevens. Het geheel aan meetlocaties wordt dan getoetst aan de eisen van de verschillende meetdoelen. Met name voor modelvalidatie kan het zijn dat de huidige situatie onvoldoende tegemoet komt aan de hieraan te stellen eisen. De oplossing zit dan in verbetering van de technische infrastructuur van een aantal meetlocaties, verplaatsing van een aantal meetlocaties, een combinatie van upgrade en verplaatsing en/of de inrichting van enkele nieuwe meetlocaties, specifiek voor validatie doeleinden. Dit leidt uiteindelijk tot een 'is/wordt'-meetlocatietabel die de basis vormt voor een gefaseerde transitie van de huidige naar de verbeterde meetconfiguratie.

Nationale database

Vervolgens worden de meetgegevens voor zover deze openbaar zijn opgeslagen in een Nationale Database Metingen Vliegtuiggeluid, volgens een landelijk overeengekomen format. Dit geldt zowel voor metingen die in het verleden zijn verricht als voor metingen die in de toekomst worden verricht. De database kan ook gebruikt worden voor aanvullende metingen, bijvoorbeeld uit *citizen science* trajecten. Er wordt op voorhand vastgesteld of, en zo ja welke eisen gesteld moeten worden aan de nauwkeurigheid, de representativiteit en de toegankelijkheid van de data. Voor meetgegevens die niet openbaar zijn, wordt nagegaan of deze toch zodanig in de database kunnen worden opgenomen dat ze niet vrij toegankelijk zijn maar wel in producten kunnen worden verwerkt. Om opslag van gegevens uit verschillende bronnen te stimuleren en te bespoedigen, verdient het aanbeveling het vereiste format niet al te rigide te maken. Anderzijds dient het format wel voldoende specifiek te zijn om de meetgegevens eenvoudig te kunnen verkrijgen. De data en hoe deze te verkrijgen zijn dient helder te worden gedocumenteerd, en voor vragen dient er een contactpunt te zijn. Bij het opstellen van de database en het verwerken van data uit verschillende bronnen is het raadzaam te kijken naar hoe dit in andere soortgelijke situaties is gedaan, bijvoorbeeld de *Copernicus Climate Data Store*. Waar mogelijk dient te worden aangesloten bij bestaande initiatieven.

Gefaseerde aanpak

Het vullen van de database gebeurt op gefaseerde wijze, waarmee begonnen wordt met (geschikte) data waarvan de toepassing, met name voor modelvalidatie, het meest urgent is. In een tweede fase worden overige data die voldoen aan het format opgenomen. In een derde fase worden resterende data zo mogelijk omgezet in het vereiste format en alsnog opgenomen in de database. Voor alle meetgegevens in de database wordt vastgesteld in welke mate ze - per meetdoel - voldoen aan de kwaliteitseisen. Voor meetgegevens die niet voor (een van) de doelen kunnen worden toegepast, wordt bezien in hoeverre dit alsnog voor toekomstige metingen op dezelfde stations te realiseren is.

Aanvullende metingen

Zoals beschreven in paragraaf 5.5 kan het voor specifieke ontwikkelingen nodig zijn om aanvullende informatie te verkrijgen met geavanceerde metingen; informatie die niet verzameld kan worden met de metingen met vaste meetnetten rondom luchthavens.

Het kan hierbij gaan om uitbreiding van het bestaande meetnet, of om geavanceerde metingen. Denk bij dit laatste bijvoorbeeld aan meten met arrays van microfoons of met microbarometers. Dergelijke opstellingen kunnen informatie geven over de bijdrage van specifieke onderdelen of aspecten van een vliegtuig, bijvoorbeeld de vleugelkleppen, aan de totale geluidproductie van het vliegtuig. In de aanvullende metingen kunnen metingen die zijn voorgesteld door de ORS worden meegenomen.

Naast onderzoek met geluidmetingen van overvliegende vliegtuigen, kunnen sommige aspecten van vliegtuiggeluid ook onderzocht worden in een testopstelling met bekende (vaste) geluidbronnen (luidsprekers). Hiermee is bijvoorbeeld de verzwakking van geluid in zijwaartse richting en de atmosferische absorptie van geluid bij verschillende weersomstandigheden af te leiden.

7.4.2

Aanbeveling 2: Signaalfunctie

Aanbevolen wordt een methodiek te ontwikkelen die een signaalfunctie vervult. Deze methodiek heeft als doel om op basis van meetgegevens te controleren of de resultaten van geluidberekeningen van de gewenste kwaliteit zijn. Deze methodiek is van essentieel belang voor het uitvoeren van modelvalidatiestudies en, daarmee samenhangend, modelverbetering en ontwikkeling (zie aanbeveling 3).

Het is mogelijk om een rekenmodel te verbeteren met behulp van metingen, maar ook op basis van reeds bekende inzichten (dus zonder metingen, zie aanbeveling 3). De eerste optie wordt hier beschreven. Aangezien voor civiele luchthavens van nationale betekenis wordt onderzocht of hiervoor gebruikgemaakt kan worden van Doc29, ligt het voor de hand om hierbij te focussen op verbeteringen aan Doc29.

Zoals beschreven in paragraaf 6.2 kunnen metingen gebruikt worden om de uitkomsten van het rekenmodel te verbeteren. Om te onderzoeken of het wenselijk is om invoergegevens van berekeningen te verbeteren, wordt aanbevolen om een systeem op te zetten dat een signaalfunctie vervult. Dit systeem kan inzicht geven in de vraag of het

geluidmodel verder verbeterd kan worden. Het doel is om tot een systeem te komen met behulp van een trendvalidatie dat op basis van metingen controleert of de resultaten van geluidberekeningen van voldoende kwaliteit zijn. Het vertrouwen van burgers in het rekenmodel zal hierdoor naar verwachting groter worden.

Het doel van dit systeem is om te kunnen signaleren of er niet algemeen bekende verschillen tussen meten en rekenen optreden. Indien dit aan de orde blijkt te zijn, kan op basis van de gevonden verschillen onderzocht worden of het mogelijk is om, op basis van een fysische verklaring, verbeteringen door te voeren waardoor de verschillen kleiner worden.

In tegenstelling tot onderzoek naar het aanpassen van reeds bekende oorzaken van verschillen (zoals het feit dat geen gebruik wordt gemaakt van werkelijke startgewichten, zie aanbeveling 3), gaat het hierbij dus om oorzaken voor verschillen tussen meten en rekenen die niet algemeen bekend zijn. Beide typen verbeteringen kunnen zowel gelijktijdig als na elkaar onderzocht worden:

- *Na elkaar*: als eerst met behulp van de signaalfunctie gezocht wordt naar mogelijke verbeteringen, kan daarna worden vastgesteld of het nog nodig is verder onderzoek te doen naar het verkleinen van de verschillen tussen meten en rekenen. Indien de verschillen voldoende klein zijn, kan besloten worden het model niet verder aan te passen.
- *Gelijktijdig*: omdat er reeds zaken bekend zijn die nader onderzocht kunnen worden (zie aanbeveling 3, bijvoorbeeld met betrekking tot startgewichten), kan overwogen worden om gelijktijdig te starten met het zoeken naar verbetermogelijkheden met behulp van de signaalfunctie en het onderzoeken van reeds bekende verbeteropties.

Bij het vergelijken van metingen en berekeningen moeten soms keuzes worden gemaakt, bijvoorbeeld over het verwijderen van onbetrouwbare metingen. Bij voorkeur worden deze keuzes in afspraken vastgelegd.

In tegenstelling tot een hybride systeem of kalibratie wordt bij modelverbetering gericht gezocht naar aanpassingen aan de invoergegevens van een berekening of methodiek. Deze verbeteringen worden doorgevoerd als deze passen binnen de Doc29-systematiek en als deze in voldoende mate onderbouwd kunnen worden op basis van meetresultaten en fysica.

Op hoofdlijnen zijn er drie mogelijke uitkomsten indien verschillen tussen meten en rekenen nader onderzocht worden:

1. De invoergegevens van het rekenmodel en/of de rekenmethodiek kunnen worden aangepast om de verschillen te verkleinen.
2. Er wordt geconstateerd dat in bepaalde gevallen aanpassingen van het vlieggedrag wenselijk zijn.
3. Er wordt geen duidelijke oorzaak gevonden of er wordt geconstateerd dat het verkleinen van de verschillen in een specifiek geval niet nodig, wenselijk of mogelijk is.

Het doen van aanpassingen aan het rekenmodel heeft gevolgen voor beleid en mogelijk voor de mate van bescherming van omwonenden.

Deze gevolgen dienen goed meegewogen te worden bij het kiezen voor een bepaalde toepassing van metingen.

Om ervoor te zorgen dat snel gestart kan worden met modelverbeteringen op basis van het systeem met signaalfunctie, wordt aanbevolen om waar mogelijk gebruik te maken van bestaande meetsets die voor dit doel geschikt zijn. Omdat Doc29 nu nog niet op alle velden gebruikt wordt, wordt aanbevolen om een gefaseerde aanpak te volgen, waarbij eerst voor Schiphol (waar al een Doc29-implementatie voor beschikbaar is) te onderzoeken of modelverbeteringen mogelijk zijn. In een later stadium kan dit ook voor andere velden onderzocht worden. Deze methode wordt samengevat in Tabel 6.

Tabel 6. Karakterisatie signaalfunctie methodiek

Doorlooptijd	Dit systeem is relatief snel te realiseren voor luchthavens waarvoor meetgegevens reeds beschikbaar zijn (<1 jaar). Dit kan voor sommige velden betekenen dat gebruikgemaakt wordt van meetgegevens die niet volledig voldoen aan voorschriften uit de ISO-norm voor het onbemand meten van vliegtuiggeluid. Daar waar nog geen meetnet beschikbaar is, zal de doorlooptijd hoger zijn doordat eerst meetposten geplaatst moeten worden en omdat vervolgens minimaal een halfjaar en bij voorkeur een jaar gemeten moet worden alvorens een zinvolle validatie gestart kan worden (2-3 jaar).
Kosten	Kosten voor een beperkt aantal meetposten per veld, vaststellen van criteria voor aanpassingen en implementeren van een systeem om trendvalidatie uit te voeren. Kan deels gebruikmaken van bestaande meetposten. Geschatte kosten totaal 0,5-1 miljoen euro. Als dit systeem langere tijd blijft bestaan, komen daar kleine periodieke kosten bij voor nieuwe validatieslagen.
Relatie met huidig beleid	Het is van belang na te denken over hoe om te gaan met de impact van modelaanpassingen op het beleid en de frequentie waarmee aanpassingen gedaan worden. Dit is alleen aan de orde indien de gesignaleerde verschillen tussen meten en rekenen ook daadwerkelijk leiden tot een aanpassing van het model. Potentiële verbeteringen kunnen direct nationaal worden ingezet, maar kunnen ook op Europese niveau worden ingebracht om het model te verbeteren.
Beperkingen	Niet alle oorzaken van verschillen tussen meten en rekenen worden aangepakt (ze kunnen wel in kaart gebracht worden). Onderzocht moet worden of de aanpassingen op basis van trends op meetlocaties ook verbetering geven op andere locaties.
Mogelijke neven-effecten	Het systeem kan ook aantonen dat in sommige gevallen afwijkend vlieggedrag optreedt. In die gevallen zal het model niet worden aangepast, maar mogelijk het vlieggedrag wel. In dat geval zullen meten en rekenen alsnog dicht bij elkaar komen.

Om te bepalen wanneer het wenselijk is om een rekenmodel aan te passen, wordt aanbevolen om criteria vast te stellen die aangeven wanneer nader onderzoek naar de verschillen tussen meten en rekenen gewenst is. Hierbij kan onderzoek gedaan worden naar de bijdrage van aannames in het rekenmodel op de verschillen tussen meten en rekenen. Een voorbeeld hiervan is het hanteren van een vaste waarde voor temperatuur in het rekenmodel. Indien variaties in temperatuur en luchtvochtigheid worden meegenomen, kan wellicht een deel van het verschil tussen meten en rekenen verklaard worden. Deze kennis kan helpen bij het vaststellen van criteria voor nader onderzoek naar verschillen tussen meten en rekenen. Deze criteria kunnen gebaseerd zijn op verschillen in geluidniveaus of geluidbelastingniveaus, maar kunnen ook gebaseerd zijn op correlatiecoëfficiënten.

Zodra de criteria vastgesteld zijn kan op basis van het systeem met de signaalfunctie periodiek worden onderzocht in hoeverre aanvullend onderzoek nodig is naar mogelijke verbeteringen van het rekenmodel en de invoer van dat model.

Indien gezocht wordt naar verbetermogelijkheden op basis van het systeem met signaalfunctie, kan het model waar mogelijk worden verbeterd. Vervolgens kunnen de verschillen tussen meten en rekenen continu gemonitord worden. Het wordt echter aanbevolen om eventuele verdere verbeteringen niet continu door te voeren, maar om dit juist periodiek te doen (bijvoorbeeld eens per vijf jaar) om de continuïteit van het model te borgen.

Daarnaast is het mogelijk om in eerste instantie verbeteringen te onderzoeken voor één luchthaven en om vervolgens na te gaan of deze verbeteringen ook voor de geluidmodellering rondom andere luchthavens van belang zijn. Desgewenst kan dit nader getoetst worden met een beperkt aantal meetposten bij één of meerdere andere luchthavens.

7.4.3

Aanbeveling 3: Modelontwikkeling

Leg voor verschillende doeleinden de criteria vast waaraan modelberekeningen moeten voldoen. Start een structureel en langjarig modelvalidatieprogramma, met focus op Doc29. Gebruik zo mogelijk bestaande meetsets en pas de signaalfunctie methodiek toe om de kwaliteit van het rekenmodel te beoordelen voor en na aanpassing. Voor het verbeteren van rekenresultaten bestaan twee opties:

1. verbeter de modellering, op basis van bekende inzichten;
2. verbeter waar mogelijk de invoergegevens.

Indien Doc29, ook na verbetering, voor een bepaald doel onvoldoende resultaat biedt, kan het opportuun zijn om voor dat doel een nieuw type berekeningswijze te ontwikkelen en in te voeren.

Rekenmodellen kunnen voor verschillende doeleinden gebruikt worden, zoals handhaving en informatievoorziening. Het verdient aanbeveling om voor verschillende doelen op hoofdlijnen vast te leggen waar een model aan moet voldoen. Hierbij kunnen ook andere eisen gelden, afhankelijk van de periode waarover een berekening gedaan wordt, bijvoorbeeld

voor de actuele of zeer recente situatie, een voorspelling of een berekening over een jaar.

Het verbeteren van de huidige modellering op basis van bekende inzichten (zie paragraaf 4.5.2.1) betreft het updaten van het huidige Doc29-rekenmodel, zonder daarbij geluidmetingen te gebruiken. Aangezien Doc29 reeds voor Schiphol gebruikt wordt en omdat voor civiele luchthavens van nationale betekenis wordt onderzocht of hiervoor gebruikgemaakt kan worden van Doc29, ligt het voor de hand om te focussen op verbeteringen aan Doc29. In het kader van harmonisatie wordt aanbevolen om inderdaad ook voor andere Nederlandse civiele luchthavens gebruik te gaan maken van Doc29. Binnen AIRMOD (de werkgroep die het Doc29 geluidmodel beheert) zijn voor het verbeteren van het model verschillende opties bekend, zoals een verbetering van de modellering van airframe noise.

Bij het uitbreiden van beschikbare invoergegevens (zie paragraaf 4.5.2.2) wordt in eerste instantie gedacht aan het beschikbaar maken van het werkelijke startgewicht van vertrekkende vliegtuigen. Deze informatie kan vervolgens gebruikt worden om te toetsen in hoeverre de huidige afschatting van startgewichten voldoende goed is en, om indien nodig, deze afschatting te verbeteren. Een tweede optie is onderzoeken of het rekenen met variabele in plaats van vaste, nominale weersomstandigheden de modeluitkomsten zou kunnen verbeteren. Daarnaast is nog een aantal andere aanvullende invoergegevens denkbaar. Deze opties zijn echter minder kansrijk en/of hebben minder impact dan het verkrijgen van startgewichten. Denk hierbij aan het registreren van het gebruik van de mate van straalomkering (*thrust reversers*) en dit meenemen in de geluidberekening.

Tabel 7 vat de bovengenoemde punten samen, waarbij voor de uitbreiding van invoergegevens als voorbeeld ingegaan wordt op het bepalen van startgewichten.

Tabel 7. Opties voor verbetering rekenresultaten samengevat

	Mogelijke modelverbeteringen op basis van bekende inzichten	Uitbreiden invoergegevens, bijvoorbeeld door het bepalen van werkelijke startgewichten
Doorlooptijd	Er bestaat al een overzicht van aanbevelingen vanuit AIRMOD; deze kunnen dus snel geïnventariseerd worden. De implementatie van aanpassingen zal echter wel veel tijd vergen, waarbij de daadwerkelijke doorlooptijd afhangt van het draagvlak bij andere landen om bepaalde aanpassingen door te voeren.	Dit proces zal stapsgewijs doorlopen moeten worden. De optimale oplossing is dat de gewichten door maatschappijen aangeleverd worden. Als blijkt dat dit niet haalbaar is, kan nagedacht worden over andere methoden om startgewichten te bepalen. In dat geval is meer tijd nodig om tot een methode te komen waarmee de gewichten bepaald worden. Zoals reeds bij aanbeveling 2 opgemerkt, moet een keuze worden gemaakt voor het moment waarop hiermee gestart wordt (op korte termijn, of nadat met behulp van de signaalfunctie gezocht is naar mogelijke verbeteringen).

	Mogelijke modelverbeteringen op basis van bekende inzichten	Uitbreiden invoergegevens, bijvoorbeeld door het bepalen van werkelijke startgewichten
Kosten	De kosten voor aanpassingen hangen af van de complexiteit van de betreffende aanpassing. Zolang aanpassingen binnen AIRMOD worden uitgevoerd, zullen de kosten beperkt blijven (0,5-2 ton).	Voor de kosten geldt dat het aanleveren van startgewichten door maatschappijen het laagste zijn. In dat geval zal een systeem gemaakt moeten worden waarmee de gewichten verzameld, vastgelegd en beschikbaar gemaakt worden. Als een andere methode moet worden opgezet, vergt dit extra investeringen.
Relatie met huidig beleid	Deze aanpassingen leiden tot andere uitkomsten van het rekenmodel, waardoor grenswaarden opnieuw bepaald moeten worden. Daarnaast kan de voorspelbaarheid van de uitkomsten van het model afnemen als meer variabelen geïntroduceerd worden.	Het valideren van het model hoeft geen invloed te hebben op het huidige beleid, maar het toepassen van daadwerkelijke startgewichten in de berekening heeft dat wel omdat hiermee een nieuwe variabele wordt geïntroduceerd in geluidberekeningen. Dit betekent ten minste dat beleid gemaakt dient te worden om te borgen dat deze parameter voldoende bekend is.
Beperkingen	Bovengenoemde afhankelijkheid van andere ECAC-lidstaten en/of de EU kan een beperking zijn. Daarnaast zal per mogelijke modelaanpassing gekeken moeten worden in hoeverre deze tot beperkingen leidt.	Het effect van deze aanpassing hangt sterk samen met de nauwkeurigheid waarmee het startgewicht bepaald kan worden. Indien het gewicht niet geleverd wordt door maatschappijen, is de vraag hoe nauwkeurig het bepaald kan worden.
Mogelijke neven-effecten	Dit is afhankelijk van de aanpassingen die doorgevoerd gaan worden.	Doordat een extra variabele wordt geïntroduceerd, kan de voorspelbaarheid van de geluidbelasting afnemen, wat kan leiden tot het toepassen een extra marge.

Toepassingsbereik

Om inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van berekeningen en metingen wordt aanbevolen om voor één of voor een aantal luchthavens de grenzen waarbinnen geluidberekeningen en -metingen betrouwbaar uitgevoerd kunnen worden te analyseren, zodat er beter inzicht is, en transparant is binnen welk gebied en met welke betrouwbaarheid omwonenden geluidinformatie gegeven kan worden. Het vaststellen van ondergrenzen heeft als doel om oneigenlijke discussies over de vergelijking tussen rekenen en meten te vermijden en valse verwachtingen te voorkomen. Deze kennis kan worden betrokken in de communicatie naar omwonenden.

Bij lagere geluidbelastingen en op grotere afstand van een luchthaven neemt de nauwkeurigheid van de modelberekeningen af. De redenen hiervoor zijn beschreven in paragraaf 4.2.5. Een vergelijking tussen berekende en gemeten geluidwaarden is daardoor minder goed mogelijk.

Ook metingen zijn niet altijd toepasbaar, bijvoorbeeld door verstoring door omgevingsgeluid of door invloed van weersomstandigheden. Dit is nader beschreven in paragraaf 5.3.

We bevelen aan om voor één of voor een aantal luchthavens een analyse uit te voeren van de grenzen waarbinnen geluidberekeningen en -metingen betrouwbaar uitgevoerd kunnen worden. Bij deze analyse zullen de parameters die de betrouwbaarheid beïnvloeden in kaart gebracht worden. De gevonden ondergrens kan daarbij variëren, afhankelijk van de grootte van de luchthaven en het doel van een meting of berekening.

Tabel 8. Kenmerken onderzoek toepassingsgebied meten en rekenen

	Onderzoek naar toepassingsgebied meten en rekenen
Doorlooptijd	Dit onderzoek kan in beperkte tijd worden afgerond (0,5-1 jaar)
Kosten	De kosten voor een dergelijk onderzoek kunnen beperkt zijn. De precieze invulling bepaalt hoe hoog deze daadwerkelijk zijn (als de resultaten bijvoorbeeld getoetst worden in de praktijk, zal dit tot hogere kosten leiden dan wanneer een aanbeveling wordt gedaan op basis van reeds beschikbare state-of-the-art kennis).
Relatie met huidig beleid	Deze relatie is beperkt; zelfs als blijkt dat berekeningen in het buitengebied onbetrouwbaar worden, wil dat niet per definitie zeggen dat het handhavingssysteem aangepast moet worden. Daarnaast kan dit relevante informatie opleveren in relatie tot aanbevelingen van de Wereld Gezondheidsorganisatie (WHO) die voorstelt om een geluidbelasting tot 45 dB(A) L_{den} mee te nemen.
Beperkingen	Dit onderzoek is bedoeld om beperkingen van rekenmodellen en metingen in kaart te brengen en kan dus leiden tot een advies om in bepaalde gebieden geen gebruik meer te maken van geluidberekeningen en metingen (eventueel afhankelijk van het doel van de metingen).
Mogelijke neveneffecten	Dit onderzoek kan ertoe leiden dat aanvullend inzicht wordt verkregen over de betrouwbaarheid van reeds uitgevoerde berekeningen en metingen.

Het is denkbaar dat de vastgestelde ondergrenzen hoger liggen dan wenselijk wordt geacht in het kader van de handhaving of vanuit het oogpunt van de omwonenden. In dat geval is het op basis van de onderliggende analyses ook duidelijk welke beperkingen de hoge ondergrens veroorzaken en welke acties nodig zijn om het toepassingsbereik te vergroten.

De communicatie over dit onderwerp met maatschappelijke groeperingen verdient aandacht. Het eenzijdig vanuit het bevoegd gezag vaststellen van ondergrenzen op basis van het hier aanbevolen onderzoek kan tot discussie leiden. De interpretatie van de resultaten en de beoordeling van de onnauwkeurigheid zouden in samenspraak met inhoudelijke geluidexperts van de adviesgroep en van een aantal maatschappelijke groeperingen kunnen plaatsvinden. In deze dialoog moet ook ruimte zijn voor de wijze waarop overheid en burger communiceren over (de beleving van) vliegtuiggeluid in die gebieden waar de berekende en gemeten geluidbelasting niet kan worden vergeleken, maar waar wel zorgen zijn over het geluid.

Gebruik modellen voor ruimtelijke informatie over geluidniveaus

Omwonenden van luchthavens kunnen op verschillende manieren geïnteresseerd zijn in het geluidniveau en de geluidbelasting nabij hun eigen woonlocatie. Omdat niet op elke locatie gemeten kan worden, ligt het voor de hand om dergelijke informatie met behulp van berekeningen beschikbaar te maken. Dit kunnen de waarden zijn gemiddeld over een periode in het verleden, bijvoorbeeld het afgelopen jaar, of de afgelopen dag, maar ook huidige waarden, of zelfs (voorspellende) waarden in de nabije toekomst, bijvoorbeeld de huidige dag en de volgende dag (prognose). Indien blijkt dat er behoefte bestaat aan informatie die niet op basis van de bestaande modellen beschikbaar gemaakt kan worden, kan het opportuun zijn om voor dat doel een nieuw type berekeningswijze te ontwikkelen.

Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan dagelijkse geluidoverzichten. Paragraaf 6.3 beschrijft drie mogelijke methoden om dergelijke overzichten te genereren:

1. interpolatie en modelcorrectie (zie paragraaf 6.3.1);
2. machine learning (zie paragraaf 6.3.2);
3. dynamisch modelleren van vliegtuiggeluid (zie paragraaf 6.3.3).

In de beschrijving worden voor- en nadelen van deze methoden beschreven, evenals een aantal voorbeelden waarbij de methoden in de praktijk al zijn onderzocht.

De drie genoemde opties hebben alle tot doel om geluidoverzichten te kunnen maken, maar het is niet zinvol om geluidoverzichten te genereren met meerdere methoden tegelijk (dit zou vooral tot verwarring kunnen leiden). Daarom wordt aanbevolen om eerst vast te stellen waar behoefte aan bestaat en om vervolgens te kiezen voor een ontwikkeling die daarbij past. Zie ook aanbeveling 4.

De methoden zijn geschikt om inzicht te geven in de actuele of zeer recente geluidproductie van vliegtuigen. Eventueel kan met de tweede en derde optie ook een voorspelling gedaan worden van toekomstig geluid (mede op basis van een weersvoorspelling), al moet daarbij worden opgemerkt dat de nauwkeurigheid van deze voorspelling waarschijnlijk beperkt is; dit omdat niet alleen de weerscondities niet exact voorspeld kunnen worden, maar met name omdat het lastig is om het precieze gedrag van vliegtuigen in de nabije toekomst (zoals vliegroute, hoogte en stuwkracht) te voorspellen. Daarom kan een voorspelling er ook uit bestaan om niet de absolute waarde van toekomstige geluidniveaus te bepalen, maar om de gebieden te voorspellen waar geluid verwacht wordt op basis van voorspeld baangebruik en eventueel routegebruik (momenteel wordt aan een voorspelling van baan- en routegebruik gewerkt voor de BurenApp van de luchthaven van Eindhoven). Hierbij ligt het voor de hand om in eerste instantie te kiezen voor ontwikkelingen die relatief eenvoudig doorgevoerd kunnen worden, zodat een snel resultaat behaald wordt voor beperkte kosten. Dit wil zeggen dat zo veel mogelijk aangesloten moet worden bij de Doc29-methodologie, zoals bij het onderzoek waarbij de propagatiemodule van een op Doc29 gebaseerd geluidmodel is vervangen door een module op basis van *ray-tracing*. Als blijkt dat hiermee de vooraf gestelde doelen behaald worden, is het niet nodig om ook complexere oplossingen te onderzoeken.

Een nadeel van de geschetste opties is dat voor elke methode geldt dat een extra methode wordt geïntroduceerd naast het rekenmodel voor handhaving. Dit wil zeggen dat drie verschillende waarden van het geluid beschikbaar zijn, namelijk de resultaten van twee rekenmethoden (een voor informatievoorziening en een voor handhaving) en meetgegevens, naast ook de werkelijke ervaring van geluid. Deze hoeveelheid informatie kan tot verwarring en een nog complexere discussie over vliegtuiggeluid leiden. Indien een aanbeveling wordt uitgewerkt, is het derhalve van belang dat dit helder gecommuniceerd wordt met omwonenden, zodat de mogelijkheden en beperkingen van de geluidoverzichten vooraf helder zijn.

7.4.4 *Aanbeveling 4: Publiekscommunicatie*

Verbeter de publiekscommunicatie over meten, rekenen, beleven en regelgeving van vliegtuiggeluid. Bied algemene informatie gecoördineerd aan, vanuit één goed vindbare weblocatie. Zorg ervoor dat de mogelijkheden en beperkingen van het meten en berekenen van vliegtuiggeluid helder uitgelegd worden en geef aan voor welke doeleinden beide methoden worden ingezet. Denk hierbij vanuit de optiek van wetenschapscommunicatie. Ontwikkel een nationale informatievoorziening waarin de resultaten van het berekenen en meten van de geluidbelasting en de beleving daarvan op verschillende manieren worden gepresenteerd. Onderzoek regelmatig de effectiviteit van de verschillende benaderingen en stel bij indien nodig. Houd bij de informatievoorziening rekening met verschillen in informatiebehoefte tussen de luchthavens.

Algemene informatievoorziening

Met betrekking tot vliegtuiggeluid zijn omwonenden momenteel slecht op de hoogte van de functies van meten en rekenen en ook is er onduidelijkheid over het gebruik van gemiddelde geluidbelasting per jaar. Daarnaast is er grote belangstelling voor maximale geluidsniveaus en wil men weten in hoeverre vliegafspraken daadwerkelijk nagekomen worden. Er wordt momenteel veel informatie aangeboden, maar die is niet altijd eenvoudig te vinden en teksten zijn veelal niet geschreven met publiekscommunicatie als doelstelling. Verbeter daarom de publiekscommunicatie over meten en rekenen aan vliegtuiggeluid. Bied algemene informatie gecoördineerd aan, vanuit één goed vindbare weblocatie. Dit kan gecombineerd worden met citizen science rond meten en rekenen. Op sites die citizen science ondersteunen, zoals <https://www.samenmetenaanluchtkwaliteit.nl>, wordt veel uitleg gegeven. Met hulp van begrijpelijke teksten, infographics en korte filmpjes wordt daar met name ingespeeld op het geven van uitleg aan niet-deskundigen. Onderwerpen die behandeld moeten worden, zijn:

1. voor- en nadelen van metingen en berekeningen, in samenhang met de doelen waarvoor dit gebeurt;
2. grootheden en eenheden met betrekking tot geluidsniveaus en geluidbelasting;
3. welke processen van invloed zijn op de geluidproductie, de overdracht en de receptie;
4. hinder, slaapverstoring, gezondheidseffecten en dosis-effectrelaties;
5. regelgeving en handhaving.

Informatie over geluidniveaus en belasting

Publiekscommunicatie bij luchthavens is maatwerk. Hoewel er sprake is van een basisbehoefte aan informatie, zijn vragen vanuit bijvoorbeeld de regio Lelystad anders dan deze vanuit de regio rond Schiphol of Eindhoven. Het is belangrijk om hier in de publiekscommunicatie rekening mee te houden. Dit impliceert dat naast algemene informatie over (de systematiek van) rekenen en meten, er ook luchthaven-specifieke informatie op regionale websites weergegeven moet worden (zie bijvoorbeeld <http://samenopdehoogte.nl> voor een toepassing rond vliegveld Eindhoven). Het is op dit punt belangrijk om een helder onderscheid te maken tussen de informatie die landelijk wordt aangeboden ('nationale landingspagina') en de informatie die primair door de regio verzorgd wordt. Afstemming met en tussen de al bestaande voorzieningen rond de luchthavens is daarbij noodzakelijk.

Omwonenden van luchthavens kunnen op verschillende manieren geïnteresseerd zijn in het gemeten en/of berekende geluidniveau en de geluidbelasting nabij hun eigen woonlocatie. Daarbij kan het gaan om (1) inzicht in 'real-time' geluidniveaus, (2) waarden die zijn gemiddeld over een periode in het verleden (bijvoorbeeld de geluidbelasting van het afgelopen jaar), of (3) voorspellende waarden in de nabije toekomst, bijvoorbeeld de huidige dag en de volgende dag (prognose). Rond de luchthavens zijn al verschillende systemen in gebruik die 'real-time' informatie over de geluidniveaus op een aantal meetpunten leveren. Deze systemen bieden waardevolle informatie voor de omwonenden, maar doordat metingen slechts op een beperkt aantal locaties plaats kunnen vinden, zullen deze metingen voor grote groepen omwonenden geen inzicht geven in hun lokale situatie. Dit inzicht kan wel gegeven worden middels dagelijkse geluidoverzichten. Bij aanbeveling 3 zijn verschillende methoden besproken om dit soort overzichten te maken. Aanbevolen wordt om eerst vast te stellen waar precies behoefte aan bestaat, om vervolgens te kiezen voor een ontwikkeling die daarbij past.

Ruimtelijke informatie over hinder, slaapverstoring en gezondheidsrisico's

Net als bij geluidniveaus en belasting, geldt ook voor hinder, slaapverstoring en gezondheidsrisico's door geluid dat voor omwonenden de ruimtelijke informatie relevant is. Omdat bewoners vliegtuiggeluid vaak associëren met andere milieueffecten van vliegverkeer (luchtkwaliteit, veiligheid), kan het nuttig zijn om hiermee in de informatievoorziening een koppeling te leggen. Dit valt echter buiten de scope van deze verkenning.

Ook deze informatie kan het beste vanuit de regio verzorgd worden. De 'nationale landingspagina' biedt uitleg over de achterliggende concepten en principes (punt 1 t/m 5 onder algemene informatievoorziening) en verwijst door naar regionale sites voor de wijze waarop dit ruimtelijk uitpakt. Voor de uitleg van zaken (punt 1 t/m 5), verwijzen de regionale sites terug naar de 'nationale landingsite'.

Ruimtelijke informatie is vaak maatwerk. Het is daarom belangrijk om in goed overleg met de omgeving na te gaan aan welke informatie over hinder, slaapverstoring en gezondheidsrisico's nog meer behoefte is.

Ook moet de informatie beschikbaar worden gesteld op een wijze die past bij de doelgroep.

7.4.5 *Aanbeveling 5: Hinder en gezondheid*

Implementeer het systematisch monitoren van geluidhinder en slaapverstoring rond luchthavens en zorg ervoor dat het monitoren van hinder en slaapverstoring wetenschappelijk verantwoord en volgens een standaard methode gebeurt. Gebruik deze gegevens om te onderzoeken of er aanvullende geluidindicatoren zijn die, naast L_{den} en L_{night} , beter aansluiten bij de manier waarop omwonenden de effecten van vliegtuiggeluid ervaren. Voor directe reacties op vliegtuigpassages (zoals tussentijds ontwaken, verstaanbaarheid van spraak) is al wel duidelijk dat deze ook mede beïnvloed worden door het aantal vliegtuigpassages en niet alleen afhankelijk zijn van de L_{night} of L_{den} . Verbeter in de toekomst de voorspelling van en informatie over hinder en slaapverstoring met resultaten uit onderzoek. Betrek in dit onderzoek de invloed van (het ontbreken van) stille periodes en verbeter het inzicht in de luchthaven-specifieke relatie tussen geluidbelasting en geluidhinder (dosis-effectrelatie) en de factoren die daarop van invloed zijn.

Het doel van geluidbeleid rond de Nederlandse luchthavens is het beschermen van de bevolking tegen ongewenste negatieve effecten van vliegtuiggeluid, zoals geluidhinder en slaapverstoring. Om de discussie daarover te kunnen voeren, moet duidelijk zijn wat wordt verstaan onder geluidhinder en slaapverstoring, en in welke mate de bevolking last heeft van deze effecten.

Bij het vaststellen van de hinder- en gezondheidseffecten van blootstelling aan vliegtuiggeluid kan onderscheid gemaakt worden tussen berekeningen en metingen. Berekeningen veronderstellen een vaste relatie tussen de geluidbelasting en geluidhinder/slaapverstoring (dosis-effectrelaties). Metingen van de ervaren hinder worden doorgaans uitgevoerd met enquêtes. Een inventarisatie van onderzoeken naar geluidhinder rond Nederlandse luchthavens geeft aan dat de onderzoeksopzet, de gebruikte vragenlijst en de benadering van de deelnemers invloed hebben op de uitkomsten van het onderzoek. Dit kan verschillen in de uitkomst opleveren die bepaald worden door de methodiek en niet door werkelijke verschillen in de tijd of tussen luchthavens. Om vergelijking tussen luchthavens mogelijk te maken en trends in de tijd te kunnen volgen, verdient het aanbeveling om te streven naar een nationale geharmoniseerde aanpak om periodiek de geluidhinder en slaapverstoring van omwonenden rond de Nederlandse luchthavens te meten.

Een mogelijkheid om de systematiek te verbeteren is de inzet van de landelijke vierjaarlijkse GGD Gezondheidsmonitor. GGD'en voeren in opdracht van gemeenten elke vier jaar onderzoek uit naar de gezondheid van burgers. In het verleden zijn gestandaardiseerde vragen over geluidhinder in het onderzoek onder 19 tot 65 jarigen opgenomen. Op basis van deze gegevens zijn landdekkende kaarten gemaakt van de geluidhinder door vliegtuigen. Om de kwaliteit van dit onderzoek te borgen is een aantal verbeteringen noodzakelijk, zoals de uitbreiding van de leeftijd naar alle volwassenen, het ophogen van de steekproef in de nabijheid van de luchthavens, en het opnemen van een vraag over

slaapverstoring. IenW wordt geadviseerd hierover in gesprek te gaan met GGD Nederland, de koepelorganisatie van de GGD'en in Nederland. De L_{den} en L_{night} zijn goede geluidindicatoren om de relatie met geluidhinder, slaapverstoring en langetermijngezondheidseffecten te beschrijven, maar zijn soms lastig te interpreteren voor omwonenden en sluiten niet altijd aan bij hun beleving. Om de informatie voor omwonenden in de toekomst te verbeteren, wordt geadviseerd rond Nederlandse luchthavens te laten onderzoeken of extra geluidindicatoren – in aanvulling op de L_{den} en L_{night} – gezamenlijk beter in staat zijn om de beleving van de geluidbelasting te verklaren. Het gaat daarbij om onderzoek waarin zowel naar kortdurende effecten als naar langetermijneffecten op hinder en slaapverstoring wordt gekeken, gebaseerd op zowel gemeten als gemodelleerde geluidgegevens. Deze inzichten kunnen vervolgens worden gebruikt om de informatie over het optreden van hinder en slaapverstoring van vliegtuiggeluid, naar bijvoorbeeld tijdstip en plaats, te verfijnen. Ook kunnen de inzichten worden gebruikt wanneer geluidgrenzen van (handhavings)zones worden heroverwogen en/of wanneer afspraken over de verdeling van 'geluidwinst' worden gemaakt.

Voor directe reacties op geluid van vliegtuigpassages, zoals tussentijds ontwaken en slechtere spraakverstaanbaarheid, geldt dat het aantal reacties gedurende een jaar niet alleen afhankelijk is van de L_{night} of de L_{den} , maar ook van het aantal geluidpassages. De Gezondheidsraad gaf in 2004 aan dat bij een gegeven nachtelijke geluidbelasting (L_{night}) het beschermingsniveau tegen ontwaakreacties kan worden vergroot door aanvullende eisen te stellen aan, met name, het aantal geluidgebeurtenissen.

Betrek in het onderzoek naar aanvullende geluidindicatoren de invloed die (het ontbreken van) rustperiodes op de ervaren hinder van omwonenden hebben. Het aantal vliegbewegingen in Nederland is de afgelopen jaren toegenomen, waardoor het aantal rustige periodes voor omwonenden afneemt (ook wel 'respit' genoemd). Tijdens de recente maatschappelijke consultatie van de omgevingsraad Schiphol hebben omwonenden duidelijk aangegeven dat het ontbreken van rustperiodes een negatieve invloed heeft op de geluidhinder die zij ervaren.

Het veranderen van de operatie om rustperiodes te creëren is geen eenvoudige opgave. Afname van het aantal vluchten op de ene vliegroute heeft direct een toename van het aantal vluchten en de daarmee samenhangende geluidhinder op een andere vliegroute tot gevolg. Rond Heathrow in het Verenigd Koninkrijk zijn pogingen ondernomen om maatregelen voor het creëren van rustperiodes in te voeren. Het belang van het probleem werd door alle betrokkenen onderkend, maar het bleek lastig om tot maatregelen te komen die het probleem kunnen adresseren. Ook werd geconcludeerd dat de L_{den} en L_{night} geen geschikte geluidindicatoren zijn om rustperiodes in uit te drukken.

Voordat met de wens van omwonenden om relatieve rustperiodes in te voeren rekening kan worden gehouden, zal overeenstemming moeten worden bereikt over de indicatoren die deze rustperiodes kunnen beschrijven. Daarnaast moet worden vastgesteld wat de benodigde

verandering in deze indicatoren is om een rustperiode te creëren die als positief wordt ervaren door de omwonenden. Omwonenden moeten daarbij wel helder geïnformeerd worden over de consequentie, namelijk dat invoering van rustperiodes op andere momenten tot extra hinder kan leiden. Acceptatie van de 'rustindicatoren' door de omwonenden van de luchthaven en aanvaarding van de consequenties van invoering speelt dus een belangrijke rol. Het *citizen science* project uit de volgende aanbeveling kan aan dit proces een bijdrage leveren.

De relatie tussen geluidbelasting en geluidhinder is in de loop der jaren veranderd: omwonenden ondervinden meer hinder bij dezelfde geluidbelasting dan vroeger het geval was. De dosis-effectrelatie die in Nederland wordt gebruikt om de verwachte geluidhinder te berekenen (bijvoorbeeld voor MER-procedures) is in 2002 afgeleid uit onderzoek onder omwonenden van Schiphol. Het is onduidelijk in welke mate de huidige door de omwonenden beleefde geluidhinder afwijkt van de dosis-effect relatie uit 2002. Daarnaast worden substantiële verschillen waargenomen in de ervaren hinder tussen luchthavens: de mate van hinder die omwonenden ondervinden verschilt bij dezelfde geluidbelasting. De veranderingen in de ervaren hinder in de tijd en de verschillen tussen de luchthavens tonen dat er – naast de geluidbelasting – andere factoren zijn die de geluidhinder beïnvloeden. Deze factoren worden ook wel niet-akoestische factoren genoemd.

In aanvulling op het voorgestelde onderzoek naar aanvullende geluidindicatoren wordt geadviseerd om vast te stellen of de dosis-effectrelaties voor geluidhinder en slaapverstoring uit 2002 nog up-to-date zijn voor de situatie rond Schiphol en toepasbaar rond de andere Nederlandse burgerluchthavens. Daarbij kan ook de invloed van niet-akoestische factoren op verschillen in geluidhinder tussen Nederlandse luchthavens worden meegenomen. Het onderzoek naar geluidindicatoren en niet-akoestische factoren kan in samenhang worden uitgevoerd. Mocht blijken dat deze factoren de verschillen tussen luchthavens (deels) kunnen verklaren, dan kan vervolgens overwogen worden onderzoek uit te laten voeren naar hoe de betreffende factoren rond specifieke luchthavens ten positieve aangewend kunnen worden.

Een kanttekening bij deze aanbeveling is dat de mate waarin individuele omwonenden rond luchthavens worden beschermd tegen de nadelige gevolgen van vliegtuiggeluid niet alleen wordt bepaald door de keuze van de geluidindicator(en). Ook het geluidniveau van de indicatoren die zones definiëren, en de afspraken die daarbij gelden (zoals woningisolatie of het beperken van de omvang van de populatie) zijn mede van invloed op het beschermingsniveau. Ook geldt dat er uiteenlopende effecten door vliegtuiggeluid kunnen optreden. Volgens recente inzichten zijn dat, naast hinder en slaapverstoring, ook coronaire hartziekten en leesachterstand bij kinderen. De WHO heeft, op basis van studies met de L_{den} , geconcludeerd dat het verhoogde risico voor coronaire hartziekten door geluid begint vanaf geluidniveaus van 50-55 dB(A) L_{den} . Dit is onder het huidige geboden beschermingsniveau tegen geluidhinder.

Deze informatie illustreert dat voor de afzonderlijke effecten van geluid mogelijk wisselende geluidindicatoren het meest relevant zijn. Het is dus goed mogelijk dat voor de informatievoorziening over hinder en

slaapverstoring andere geluidindicatoren wenselijk zijn dan voor bijvoorbeeld de handhaving van het beschermingsniveau.

7.4.6

Aanbeveling 6: Citizen science

Betrek de omgeving met 'citizen science' op een gestructureerde manier bij het opzetten van een aanvullend meetprogramma. Faciliteer citizen science-projecten voor specifieke groepen. Dit kunnen bijvoorbeeld hoogrisicogroepen zijn, zoals burgers die dicht bij een start- of landingsbaan wonen, of burgers met specifieke persoonskenmerken zoals een verhoogde gevoeligheid voor omgevingsgeluid. Doel van deze activiteiten is enerzijds het verkrijgen van bruikbare meetgegevens en anderzijds het vergroten van het begrip van het systeem van meten en rekenen. Aanvullend geldt dat op deze wijze gebouwd kan worden aan de relatie tussen burgers en overheden. Dit proces kan ondersteund worden door de eerder genoemde site met publieks- en wetenschapscommunicatie over de mogelijkheden en beperkingen van meten en rekenen.

Wat is citizen science?

Citizen science is het betrekken van burgers bij onderzoek anders dan in de vorm van respondent. Het is dus echt samen onderzoek doen. De intensiteit van deze betrokkenheid kan verschillen. Sommige burgers willen bijvoorbeeld actief meedenken en meedoen aan meetnetten, terwijl anderen hooguit een plek en wat stroom voor een sensor ter beschikking stellen. Citizen science heeft verschillende kenmerken die voor het meten en rekenen aan vliegtuiggeluid van belang zijn. Literatuuronderzoek naar de werking van citizen science in de praktijk laat zien dat deze karakteristieken ruwweg op te delen zijn in de volgende drie categorieën:

1. Verzamelen van data aanvullend op bestaande metingen.
2. Vergroten van het begrip (mogelijkheden en beperkingen) van meten en rekenen.
3. Bouwen aan de relatie tussen burgers, wetenschappers en overheden.

Citizen science is dus niet alleen een manier van data verzamelen, maar ook een belangrijke manier om het ondoorzichtige proces van meten en rekenen te openen en om te bouwen aan vertrouwen tussen wetenschappers, burgers en overheden op het onderwerp vliegtuiggeluid rond luchthavens. Er is een aanzienlijke variëteit mogelijk in de wijze waarop de omgeving met citizen science bij het rekenen en meten aan vliegtuiggeluid betrokken kan worden en in feite ook al betrokken wordt. Hieronder beschrijven we een aantal mogelijkheden en al bestaande praktijken.

Citizen science in huidige en toekomstige meetnetten

In Nederland zijn er meerdere voorbeelden van meetnetten die in overleg met omwonenden zijn opgezet of waarbij de meetgegevens gebruikt worden voor analyses die door omwonenden worden voorgesteld. Voor de militaire bases van Leeuwarden, Volkel en Gilze-Rijen wordt gewerkt aan het opzetten van een meetnet. Dit wordt gedaan met een commissie van omwonenden-vertegenwoordigers, die bijvoorbeeld meedenken over meetlocaties en de inhoud van een website waarop meetresultaten en achtergrondinformatie worden

getoond. Deze omwonenden kunnen desgewenst ondersteund worden door inhoudelijke deskundigen om zo tot een optimale inrichting van een meetnet te komen dat voldoet aan de lokale wensen.

Rondom de luchthaven van Eindhoven is al langere tijd een meetnet actief. Bij de keuze voor de meetlocaties zijn ook hier omwonenden betrokken geweest. De meetresultaten kunnen via een website bekeken worden, maar daarnaast bestaat ook de mogelijkheid om onderzoek te laten doen waarbij meetgegevens gebruikt worden. Een voorbeeld hiervan is onderzoek naar het verschil in de geluidproductie en de ervaring van geluid van twee verschillende startprocedures.

Ondersteun burgers die zelf willen meten

Een andere mogelijkheid is dat vanuit het rijk, met de inzet van 'mensen en middelen', ondersteuning geboden wordt aan burgers of groeperingen die zelf met het meten van geluid aan de slag willen (met kleine, betaalbare sensoren of telefoons), en doe dat op een zodanige wijze dat die metingen zinvol gebruikt kunnen worden binnen het onderzoeksprogramma. Betrek daarbij de opgedane ervaringen van andere citizen science-projecten en van de proefcasus Eindhoven en stimuleer de opzet van een vergelijkbare aanpak rond andere luchthaven. Burgers die deelnemen aan deze citizen science-projecten zullen zich pas echt serieus genomen voelen als hun metingen er ook toe doen. Gestreefd wordt daarom naar citizen science-data van hoge kwaliteit, die als extra data in de analyses in het onderzoeksprogramma van de programmatische aanpak meegenomen kunnen worden. De kwaliteit van grote aantallen goedkope, minder nauwkeurige metingen kan worden verhoogd met big data-technieken, waarin in principe foutieve data kunnen worden herkend en verwijderd. Citizen science vraagt om goed onderling overleg over het gebruik van betaalbare sensoren en de te hanteren meetstrategie. Maak hierbij ook gebruik van de ervaringen van www.samenmetenaanluchtkwaliteit.nl, waarbij wetenschapscommunicatie, kalibratie van sensoren en data science belangrijke componenten zijn. Dit voorbeeld laat ook zien dat citizen science goed ondersteund kan worden met een site met publiekscommunicatie over de mogelijkheden en beperkingen van meten en rekenen aan vliegtuiggeluid.

Ontwikkel citizen science projecten voor hoogrisicogroepen

De overheid probeert zo veel mogelijk alle burgers bescherming te bieden. Complicerende factor daarbij is dat mensen onderling sterk verschillen in de mate waarin ze risico lopen op ziekte en gezondheidsschade. De menselijke verscheidenheid is dus met recht een uitdaging. Als een gevolg van deze verscheidenheid zijn er zogenaamde hoogrisicogroepen te onderscheiden. Hoogrisicogroep is een relatief begrip. Het gaat hierbij om een subpopulatie die een grotere kans heeft op blootstelling aan een agens of gevoeliger is voor een ziekte dan de rest van de populatie. In absolute zin kan het echter om een klein risico gaan. Veel factoren kunnen het risico op ziekte en gezondheidsschade beïnvloeden:

- persoonsgebonden kenmerken, onder andere geslacht, leeftijd, erfelijke eigenschappen;
- gezondheidstoestand, zoals conditie, pre-existente ziekte;

- leefstijlgebonden kenmerken, zoals voedingspatroon, bewegen, roken;
- kenmerken van de fysieke en sociale omgeving, waaronder de milieukwaliteit van de woon- en werkomgeving en voedselveiligheid.

Een eerste mogelijkheid voor citizen science met hoogrisicogroepen, is een project specifiek gericht op geluidgevoeligen. Geluidgevoeligen vormen een volstrekt andere groepering binnen de maatschappij dan de vaak technisch ingestelde personen die graag zelf geluid wil meten. In het huidige stelsel is gekozen voor bescherming van de gemiddelde bevolking. We hebben geen inzicht in de hinder zoals deze door de specifieke groep geluidgevoeligen ervaren wordt. Dit onderzoek zou bijvoorbeeld opgezet kunnen worden met apps, waarin men op gezette tijden de ervaren hinder geregistreert. Om het citizen science te maken, moeten deelnemers die dat willen, betrokken kunnen worden bij de verschillende onderzoeksfases. Belangrijke spin-off van dit onderzoek is een groei van het wederzijds begrip van de leefwereld van wetenschappers, beleidsmakers en geluidgevoeligen.

Een tweede mogelijkheid is een citizen science project met omwonenden die in gebieden met een hoge geluidbelasting wonen, waar vliegtuiggeluid langdurig hoorbaar is (die waarschijnlijk geluidrobuust zijn). In dit project staat het onderzoeken van de invloed van rustperiodes centraal. In onderzoek naar rustperiodes (in het Engels: respite) rond de luchthaven Heathrow werd duidelijk dat er geen goede, breed geaccepteerde definitie van een rustperiode bestaat. Verwacht wordt dat niet-akoestische factoren, zoals publiek bewustzijn, vertrouwen en begrip ten minste even belangrijk zullen zijn als de daadwerkelijke maatregelen om rustperiodes te creëren. In een citizen science-project over rustperiodes gaat men in feite samen met omwonenden op zoek naar een samenhangend stelsel van soundscapes onder de start- en landingsbanen van luchthavens, die door omwonenden als acceptabel geacht worden. Deze soundscapes laten zich niet goed uitdrukken in L_{den} en L_{night} . Dit is een ingewikkelde opgave, waarbij het maar de vraag is of zo'n stelsel van soundscapes wel samen kan gaan met huidig of toekomstig vliegverkeer.

7.4.7

Aanbeveling 7: Wetenschappelijke aansturing

Zorg rond vliegtuiggeluid voor onafhankelijke deskundigheid om (1) de kwaliteit en juistheid van de uitvoering van structurele werkzaamheden, en (2) de kwaliteit en voortgang van het verbetertraject te toetsen en te borgen. Organiseer dit structureel en transparant, zodat er bij alle partijen inzicht en vertrouwen is in de uitvoeringspraktijk en in de daaruit voortvloeiende resultaten. Aan de taken en het mandaat van de 'wetenschappelijke advies groep' die hier zorg voor draagt, kunnen verschillende invullingen gegeven worden. Keuzes betreffen onder meer 'besluiten' versus 'adviseren' en 'op voorhand voorschrijven' versus 'achteraf toetsen'. Aanbevolen wordt om het takenpakket en het mandaat van de adviesgroep in de uitwerkfase van de Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid nader in te vullen, met oog voor technische, juridische en maatschappelijke aspecten en de positionering van deze groep in het grotere geheel van *governance* in het dossier luchtvaart.

Binnen het dossier vliegverkeer speelt de bepaling van geluidniveaus en geluidbelasting een cruciale rol. Voor handhaving zijn deze bepalingen tot op heden gebaseerd op berekeningen³⁶, maar die worden door de omgeving niet op voorhand vertrouwd. Hoofddoel van de Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid is om op dit vlak het vertrouwen te versterken. Technische verbeteringen, zoals de inzet van metingen, kunnen hierbij een belangrijke rol spelen, maar voor het winnen van vertrouwen vormen transparantie en onafhankelijke toetsing van processen en werkzaamheden essentiële randvoorwaarden. Wij bevelen daarom aan om in een nieuw op te zetten structuur, onafhankelijke toetsing op de inhoud door een deskundige en breed samengestelde partij een belangrijke en structurele positie te geven. Deze partij dient niet alleen de kwaliteit en juistheid te borgen van de uit te voeren operationele werkzaamheden, maar ook de kwaliteit en voortgang te borgen van het ontwikkel- en verbetertraject.

In het eerder in dit hoofdstuk gepresenteerde systeemconcept 'Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven' wordt dit ingevuld door onderscheid te maken tussen:

1. een operationele setting die ten behoeve van alle burgerluchthavens van nationale betekenis³⁷ structurele taken uitvoert (meten en berekenen van vliegtuiggeluid, het analyseren van de verschillen tussen metingen en berekeningen en het leveren van informatie, met speciale aandacht voor geluidbelasting en hinder), en;
2. een nationaal programma waarbinnen innovatief onderzoek wordt uitgevoerd gericht op verbetering van operationele werkzaamheden. Structurele taakuitvoering en verbetertraject worden verbonden door een wetenschappelijke adviesgroep. Deze adviesgroep legt de randvoorwaarden vast waaraan de operationele uitvoeringspraktijk moet voldoen, zet het nationale onderzoeksprogramma uit, beoordeelt de resultaten daarvan en besluit (of adviseert³⁸) over aanpassingen in de operationele sfeer (welke en wanneer). Bij dit alles wordt goed geluisterd naar wensen vanuit de omgeving.

In het gepresenteerde systeemconcept wordt de externe borging op een zeer expliciete manier ingevuld. Er zijn echter ook andere varianten mogelijk, die allemaal hun eigen voor- en nadelen hebben. In een alternatieve optie, met een heel andere invulling van een systematiek van externe borging, bepalen de (overheids)diensten die belast zijn met de uitvoering van structurele taken zelf welke instrumenten en voorschriften zij hanteren. Ook sturen zij (binnen randvoorwaarden en eventueel in samenspraak met de sector) hun eigen verbeterprogramma aan. Aan de externe borging kan dan invulling gegeven worden door taakuitvoering en verbeterprogramma op gezette tijden te laten evalueren door een externe, onafhankelijke en breed samengestelde toetsingscommissie. Met onafhankelijk wordt in deze context bedoeld op een commissie die als groep onafhankelijk is (en dus bijvoorbeeld niet

³⁶ Bij deze berekeningen worden geluidgegevens gebruikt die bepaald zijn op basis van metingen.

³⁷ Inclusief Vliegveld Eindhoven.

³⁸ Als veranderingen in de uitvoeringspraktijk consequenties (kunnen) hebben voor regelgeving of handhaving, dan dient het besluit daarover bij het ministerie van I&W te liggen.

onder een ministerie of luchthaven valt), waarbij de leden van deze commissie een brede afspiegeling vormen van alle betrokken partijen.

De keuzes die gemaakt worden ten aanzien van de wetenschappelijke aansturing zullen ongetwijfeld effect hebben op de mate waarin het vertrouwen van de omgeving in dit dossier zal toenemen. Vanwege de complexiteit van dit onderwerp bevelen we aan om het takenpakket en het mandaat van de wetenschappelijke adviesgroep in de uitwerkfase van de Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid nader in te vullen. Daarbij dient niet alleen gekeken te worden naar de technische invulling, maar nadrukkelijk ook naar de juridische en de maatschappelijke inbedding. De adviesgroep moet dus ook een passende positie bekleden binnen het grotere geheel van *governance* in het dossier luchtvaart.

Nawoord

This report could not have been written without the constructive discussions, we had, with the members of the aircraft noise expert group: Darren Rhodes (UK), Dirk Schreckenberg (Germany), Arno Eisses, Ed Goudriaan, Guus Berkhout, Pieter Sijtsma, Klaas Kopinga and Dick Simons. We are also very grateful for the opportunity given to us to visit the EMPA Laboratories in Swiss, where we had fruitful discussions with Jean-Marc Wunderli and Christoff Zellmann, and Finavia, where we received important information from Mikko Viinikainen, Tuomo Linnanto and Samu Tuparinne of the experiences obtained in Finland with measurements and calculations of aircraft noise.

Ook willen we de vele personen en vertegenwoordigers van Nederlandse organisaties bedanken. Zij hebben ons erg geholpen om deze verkenning in de juiste context te zetten. Tot slot bedanken we onze collega's van KNMI, NLR en RIVM voor hun hulp bij het tot stand laten komen van deze rapportage.

Referenties

AAS (2014). Schiphol Gebruikprognose 2015 Amsterdam Airport Schiphol.

Arntzen, M., S. J. Heblj en D. G. Simons (2014). "Weather dependent airport noise contour prediction concept based on ray-tracing." Journal of Aircraft **51**(5): 1351-1359.

Asensio, C., M. Recuero en I. Pavon (2014). "Citizen's perception of the efficacy of airport noise insulation programmes in Spain." Applied Acoustics **4**(84): 107-115.

Bartels, S., F. Márki en U. Müller (2015). "The influence of acoustical and non-acoustical factors on short-term annoyance due to aircraft noise in the field - The COSMA study." Sci Total Environ **538**: 834-843.

Basner, M. en S. McGuire (2018). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep." Int. J. Environ. Res. Public Health **15**(3).

Basner, M., U. Müller en B. Griefahn (2010). "Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep." Applied Acoustics **71**(6): 518-522.

Bergmans, D. H. T., M. Arntzen en W. F. Lammen (2011). Noise attenuation in varying atmospheric conditions. NLR-Netherlands Aerospace Centre, report NLR-TP-2011-262, Amsterdam.

Bergmans, D. H. T., H. M. M. van der Wal en H. W. Veerbeek (2008). Technische mogelijkheden van 'Flitspalen' voor vliegtuiggeluid rond Schiphol. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2007-767, Amsterdam.

Berkhout, G. (2019). De Toekomst van Schiphol - Een indringend pleidooi om het roer helemaal om te gooien.

BGKL (1991). Besluit geluidsbelasting kleine luchtvaart. Min VROM. Den Haag, Sdu Uitgevers.

Bijsterbosch, V. en K. Vinkx (2018). Advies meten vliegtuiggeluid voor vlootontwikkeling en informatievoorziening. To70, 17.871.05, Den Haag.

Boone, M., T. Dool, P. Sijsma, et al. (2000). Microphone array technology for aircraft noise measurements. INTER-NOISE 2000 - 29th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Nice.

Breugelmans, O., D. Houthuijs en R. Van Poll (2016). Inventarisatie van gezondheids- en belevingsonderzoeken (1996-2015) rondom (regionale) luchthavens van nationale betekenis. RIVM, RIVM Briefrapport 2016-0101, Bilthoven.

Breugelmans, O., C. Van Wiechen, I. Van Kamp, et al. (2004). Gezondheid en beleving van de omgevingskwaliteit in de regio Schiphol: 2002. Tussenrapportage Monitoring Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol. RIVM, RIVM rapport 630100001/2004, Bilthoven.

Brink, M., B. Schäffer, D. Vienneau, et al. (2019). "A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise." Environ Int **125**: 277-290.

Brooker, P., J. Critchley, D. Monkman, et al. (1985). United Kingdom Aircraft Noise Index Study: Main Report. Civil Aviation Authority, DR Report 8402, London.

Brown, A. L. (2006). Thinking about "Quiet Areas": Sounds we want and sounds we do not want. Quiet Areas and Health. The Hague, Health Council of the Netherlands. **Publication number 2006/12**.

Brown, A. L. (2012). "A Review of Progress in Soundscapes and an Approach to Soundscape Planning." International Journal of Acoustics and Vibration **17**(2): 73-81.

Brown, A. L., T. Gjestland en D. Dubois (2016). Acoustic Environments and Soundscapes. Soundscape and the Built Environment: pp. 1-16.

Brown, A. L. en I. Van Kamp (2017). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review of Transport Noise Interventions and Their Impacts on Health." Int. J. Environ. Res. Public Health **14**(8).

Brüel & Kjær (2010). Legislation, Regulation and Best Practise in Airport Noise Management. Brüel & Kjær EMS, report BN0800.

BSL (2009). Besluit Militaire Luchthavens. Min Defensie. Den Haag, Sdu Uitgevers.

CAA (2017). Survey of noise attitudes 2014: Aircraft. Policy Programmes Team, CAA House, CAP 1506, London.

CAA (2018). Departure Noise Mitigation: Main Report. Policy Programmes Team, CAA House, CAP 1691, London.

CAA (2019). "Features of the ANCON noise modelling process." from <https://www.caa.co.uk/Consumers/Environment/Noise/Features-of-the-ANCON-noise-modelling-process/>.

CBS (2019). Vliegbewegingen van en naar luchthavens van nationaal belang, 2018.

Clark, C., R. Martin, E. Van Kempen, et al. (2005). "Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension: The RANCH project." American Journal of Epidemiology **163**(1): 27-37.

Clark, C. en K. Paunovic (2018). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cognition." Int. J. Environ. Res. Public Health **15**(2).

Dawes, J. (2015). "Noise Infringements." from https://www.heathrow.com/file_source/HeathrowNoise/Static/noise-infringements.pdf.

DCMR (2018). Analyse meldingen rondom Rotterdam the Hague Airport - Jaarrapportage 2018. DCMR Milieudienst Rijnmond, Schiedam.

De Wolf, J. (2014). Gezondheidsmonitor luchthaven Twente. Eindrapport voortijdig gestopte uitvoering 1e meting 2014. GGD Twente, RIVM en Universiteit Twente.

Diekmann, A. (1985). "Volunteer's Dilemma." Journal of Conflict Resolution **29**(4): 605-610.

Dusseldorp, A., D. Houthuijs, A. Van Overveld, et al. (2011). Handreiking geluidhinder wegverkeer: Berekenen en meten. RIVM, RIVM rapport 609300020, Bilthoven.

ECAC.CEAC (2016a). Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, ECAC.CEAC Doc 29. European Civil Aviation Conference, Neuilly-sur-Seine.

ECAC.CEAC (2016b). Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, ECAC.CEAC Doc 29. European Civil Aviation Conference, Neuilly-sur-Seine.

ECAC.CEAC (2016c). Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, ECAC.CEAC Doc 29. European Civil Aviation Conference, Neuilly-sur-Seine.

EG (2002). RICHTLIJN 2002/49/EG VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 25 juni 2002 inzake de evaluatie en de beheersing van omgevingslawaai. Europese Gemeenschap, L 189/12, Luxemburg.

EMPA (2019a). "The aircraft noise calculation FLULA2 program ". from <https://www.empa.ch/web/s509/flula2>.

EMPA (2019b). "The aircraft noise calculation model sonAIR." from <https://www.empa.ch/web/s509/sonair>.

ESB (2007). Evaluatie Schiphol Beleid. Min VenW. Den Haag, Sdu Uitgevers.

Eurocontrol (2019). "The Aircraft Noise and Performance (ANP) Database : An international data resource for aircraft noise modellers." from <https://www.aircraftnoisemodel.org/>.

Eversdijk, H., B. M. Spee, G. J. J. Ruijgrok, et al. (2006). Luid, maar duidelijk. Commissie Deskundigen Vliegtuiggeluid, Den Haag.

Fields, J. (1984). "The effect of number of noise events on people's reactions to noise.: An analysis of existing survey data." J Acoust Soc Am **75**: 447-467.

Fields, J. (1992). Effect of personal and situational variables on noise annoyance: with special reference to implications for en route noise. Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Fraport (2019). "Aircraft Noise." from <https://www.fraport.com/content/fraport/en/our-company/responsibility/aircraft-noise-infoservice/aircraft-noise.html>.

Galis, S. P. (2000). Vergelijking van gemeten en berekende geluidbelasting Lden rondom de luchthaven Amsterdam Airport Schiphol (AAS) voor het jaar 1999. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2000-647, Amsterdam.

Gelderblom, F., T. Gjestland, S. Fidell, et al. (2017). "On the Stability of Community Tolerance for Aircraft Noise." Acta Acustica united with Acustica **103**(1): 17-27.

Gjestland, T. en F. Gelderblom (2017). "Prevalence of Noise Induced Annoyance and Its Dependency on Number of Aircraft Movements." Acta Acustica united with Acustica **103**(1): 28-33.

Goelzer, B., C. H. Hansen en G. H. Sehrndt (2001). Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control. Geneva, WHO.

Guski, R. (1999). "Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance." Noise and Health **1**(3): 45-56.

Guski, R. (2004). "How to forecast community annoyance in planning noisy facilities." Noise and Health **6**(22): 59-64.

Guski, R., D. Schreckenberger en R. Schuemer (2017). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance." Int. J. Environ. Res. Public Health **14**(12).

GzR (1997). Omgevingslawaai beoordelen - Voorstel voor een uniform systeem van geluidmaten ter beoordeling van hinder en slaapverstoring door geluid. Gezondheidsraad, GzR publicatie 1997/23, Rijswijk, Gezondheidsraad.

GzR (2004). Over de invloed van geluid op de slaap en de gezondheid. Gezondheidsraad, GzR publicatie 2004/14, Den Haag, Gezondheidsraad.

GzR (2011). Leidraad voor identificatie en bescherming van hoogrisicogroepen. Gezondheidsraad, GzR publicatie 2011/39, Den Haag, Gezondheidsraad.

Haklay, M. (2012). Citizen Science and Volunteered Geographic Information – Overview and Typology of Participation. Crowdsourcing

Geographic Knowledge. D. Sui, S. Elwood and M. Goodchild. Dordrecht, Springer: pp. 105-122.

Haubrich, J., S. Benz, M. Brink, et al. (2019). Leq + X: Re-Assessment of exposure-response relationships for aircraft noise annoyance and disturbances to improve explained variance. ICA 2019: 23rd International Congress on Acoustics, Aachen.

Haywood, B. K. (2014). "A "Sense of Place" in Public Participation in Scientific Research." Science Education **98**(1): 64-83.

Heathrow (2019). "Community Investment." from www.heathrow.com/noise/making-heathrow-quieter/community-investment.

Heblij, S. J., J. Derei en R. H. Hogenhuis (2017). Toepassing ECAC Doc29 voor het bepalen van de geluidbelasting van het vliegverkeer van Schiphol - Methode zoals gevolgd bij de MER NNHS Schiphol. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2017-305, Amsterdam.

Heppe, G. J. T. (2015). Appendices van de voorschriften voor de berekening van de geluidbelasting in Lden voor de overige burgerluchthavens bedoeld in artikel 8.1 van de Wet luchtvaart, Geluidsniveaus, prestatiegegevens en indeling naar categorie. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-96650 L - Versie 13.3, Oktober 2015, Amsterdam.

Héritier, H., D. Vienneau, M. Foraster, et al. (2017). "Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: a nationwide cohort study from Switzerland." Eur J Epidemiol **32**(4): 307-315.

Hogenhuis, R. H. (2013). Validatie van geluidreductie Geilenkirchen – Beschrijving en uitkomsten van validatie met behulp van metingen. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2013-198, Amsterdam.

Hogenhuis, R. H. en S. J. Heblij (2018). Trendvalidatie van Doc.29 berekeningen. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2017-371, Amsterdam.

Hogenhuis, R. H., M. P. G. Van Miltenburg en S. J. Heblij (2016). Beantwoording vragen met betrekking tot de motie Eijssink. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2015-186, Amsterdam.

Horsten, R. C. en W. Soede (2011). Audit Noise Monitoring Systeem (NOMOS III). ARDEA acoustics & consult, rapport 1118GZA1.008, Leiden.

Isermann, U. en B. Vogelsang (2010). "AzB and ECAC Doc.29—Two best-practice European aircraft noise prediction models." Noise Control Engineering Journal **58**(3).

ISO/TC43/SC1 (2003). Acoustics -- Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. International Organization for Standardization, ISO/TS 15666:2003, Geneva.

ISO/TC 43/SC 1 (2010). Acoustics — Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports. International Organization for Standardization, ISO 20906:2009(en), Geneva.

Jabben, J., R. van Poll, J. Devilee, et al. (2015). Geluid en Informatie rondom vliegbases Leeuwarden en Volkel - Opties voor monitoring en informatievoorziening. RIVM, RIVM Briefrapport 2015-0214, Bilthoven.

Janssen, S., H. Vos, E. Van Kempen, et al. (2011). "Trends in aircraft noise annoyance: The role of study and sample characteristics." J Acoust Soc Am **129**(4): 1953-1962.

Janssen, S. A., M. Centen, H. Vos, et al. (2014). "The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality." Applied Acoustics **84**: 9-16.

Le Masurier, P., J. Bates, J. Taylor, et al. (2007). Attitudes to noise from aviation sources in England (ANASE): Final Report for Department for Transport. MVA Consultancy, Great Britain.

Leeuwen, J. J. A. v. (2019). Luchtvaartgeluidsmodellen en meetmethoden - Kantekeningen bij de liggende voorstellen. Memo M.2019.0575.00.N001.

LIB-Schiphol (2002). Luchthavenindelingbesluit Schiphol. Nederlandse Overheid. Den Haag, Staatscourant.

LVB-Schiphol (2002). Luchthavenverkeerbesluit Schiphol. Nederlandse Overheid. Den Haag, Staatscourant.

Marsman, G., F. Den Breejen en K. Leidelmeijer (2005). Achtergronden bij de beleving van Schiphol - Een kwalitatief onderzoek onder omwonenden. RIGO Research en Advies BV, Rapportnummer: 89850, Amsterdam.

Merino-Martínez, R., S. J. Heblj, D. H. T. Bergmans, et al. (2019). "Improving Aircraft Noise Predictions Considering Fan Rotational Speed." Journal of Aircraft **56**(1): 284-294.

Miedema, H., H. Vos en R. De Jong (2000). "Community reaction to aircraft noise: time-of-day penalty and tradeoff between levels of overflights." J Acoust Soc Am **107**(6): 3245-3253.

Miedema, H. M. E. en W. Passchier-Vermeer (1999). Beoordeling van geluidpieken in de woonomgeving. TNO, TNO rapport 99.023.

Mietlicki, C., F. Mietlicki, C. Ribeiro, et al. (2014). The HARMONICA project, new tools to assess environmental noise and better inform the public. Forum Acusticum, Krakow.

Min, R. en M. C. Cheng (2018). 2017 Aeronautical Noise Management Report. Vancouver Airport Authority, Vancouver.

Min IenW (2018). Over de rol die metingen van vliegtuiggeluid kunnen spelen in relatie tot berekeningen ervan. Tweede Kamer, vergaderjaar 2018–2019, 31 936, nr. 518, Den Haag.

Min IenW (2019). Projectplan meten en berekenen vliegtuiggeluid. Tweede Kamer, vergaderjaar 2018-2019, Amendement 2019D16642, Den Haag.

Munnichs, G. en H. de Vriend (2018). In gesprek over ammoniak - Contouren van een uitweg uit de controverse. Rathenau Instituut, Den Haag.

National Academies of Sciences, E., and Medicine (2014). Research Methods for Understanding Aircraft Noise Annoyances and Sleep Disturbance. Washington, DC, The National Academies Press.

NEN-EN-IEC (2014). Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications. NEN-EN-IEC, NEN-EN-IEC 61672-1:2014 en.

Niewenhuijsen, M., G. Ristovska en P. Dadvand (2017). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Adverse Birth Outcomes." Int. J. Environ. Res. Public Health **14**(10).

Olson, M. (1965). The logic of collective action - Public goods and the theory of groups. Cambridge, Harvard University Press.

ORS (2019). Advies Toekomstbestendig NNHS & Advies Middellange termijnoplossing "wonen en vliegen". Omgevingsraad Schiphol.

Overeem, A., J. Robinson, H. Leijnse, et al. (2013). "Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures." Geophys Res Lett **40**(15): 4081-4085.

PASO (1991). Plan van Aanpak Schiphol en Omgeving. Min VROM. Den Haag, Sdu Uitgevers.

Passchier-Vermeer, W., H. M. E. Miedema, H. Vos, et al. (2002). Slaapverstoring door vliegtuiggeluid. TNO, RIVM, TNO Inro rapport 2002.028, RIVM rapport 441520019.

Peters, R. G., V. T. Covello en D. B. McCallum (1997). "The determinants of trust and credibility in environmental risk communication: an empirical study." Risk Anal **17**(1): 43-54.

PKB (3-8) (1995). Planologische Kernbeslissing Schiphol en Omgeving (Deel 3: Kabinetsstandpunt). Den Haag, Sdu Uitgevers.

PKB (3-9) (1995). Planologische Kernbeslissing Schiphol en Omgeving (Deel 3: Nota van Toelichting). Den Haag, Sdu Uitgevers.

Quehl, J. en M. Basner (2006). "Annoyance from nocturnal aircraft noise exposure: Laboratory and field-specific dose-response curves." Journal of Environmental Psychology **26**(2): 127-140.

Quehl, J., U. Muller en F. Mendolia (2017). "Short-term annoyance from nocturnal aircraft noise exposure: results of the NORAH and STRAIN sleep studies." Int Arch Occup Environ Health **90**(8): 765-778.

RBML (2008). Regelgeving burgerluchthavens en militaire luchthavens. Den Haag, Sdu Uitgevers.

Rhodes, D. (2018). Guidance on comparing calculated aircraft noise levels with measurements. UK Civil Aviation Authority.

RIVM&TNO-PG (1998). Hinder, slaapverstoring, gezondheids- en belevingsaspecten in de regio Schiphol, resultaten van een vragenlijstonderzoek. RIVM en TNO-PG, RIVM rapport 441520010, TNO rapport 98.038, Leiden/Bilthoven.

RIVM/RIGO (2005). Evaluatie Schipholbeleid - Schiphol beleefd door omwonenden. Min VenW.

Schreckenber, D., C. Belke, F. Faulbaum, et al. (2016). Effects of aircraft noise on annoyance and sleep disturbances before and after expansion of Frankfurt Airport - Results of the NORAH study, WP 1 'annoyance and quality of life'. INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, Hamburg.

Schreckenber, D. en M. Meis (2007). Noise annoyance around an international airport planned to be extended. INTER-NOISE 2007 - 36th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Istanbul.

Schreckenber, D. en R. Schuemer (2010). The impact of acoustical, operational and non-auditory factors on short-term annoyance due to aircraft noise. INTER-NOISE 2010 - 39th International Congress on Noise Control Engineering, Lisbon.

Simons, D. G., M. Snellen, B. v. Midden, et al. (2015). "Assessment of noise level variations of aircraft fly-overs using acoustic arrays." Journal of Aircraft **52**(5): 1625-1633.

Śliwińska-Kowalska, M. en K. Zaborowski (2017). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Permanent Hearing Loss and Tinnitus." Int. J. Environ. Res. Public Health **14**(10).

Soede, W. (2012). Technische beschrijving vliegtuig geluidmeetsystemen: Luistervink, Nomos, SensorNet. ARDEA acoustics & consult, rapport 25971JGA1.016, Leiden.

Staatsen, B. A. M., E. A. M. Franssen, G. Doornbos, et al. (1993). Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.

TNL 3 (2000). Toekomst van de nationale luchthavens (Brief). Min VenW. Den Haag, Sdu Uitgevers.

TNL nota (1999). Toekomst van de nationale luchthaven (Nota). Min VenW. Den Haag, Sdu Uitgevers.

Tweede Kamer (2009). Motie van de leden Neppérus en Samsom. Nederlandse Overheid. Den Haag, Staatscourant.

Van den Berg, F., F. Van der Eerden, D. Land, et al. (2009). A new approach to aircraft noise monitoring: ANIMO. 38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2009 : INTER-NOISE 2009, Ottawa.

Van den Bos, K., H. A. M. Wilke en E. A. Lind (1998). "When do we need procedural fairness? The role of trust in authority." Journal of Personality and Social Psychology **75**(6): 1449-1458.

Van den Bos, K., H. A. M. Wilke, E. A. Lind, et al. (1998b). "Evaluating outcomes by means of the fair process effect: Evidence for different processes in fairness and satisfaction judgments." Journal of Personality and Social Psychology **74**: 1493-1503.

Van der Wal, H. M. M., P. Vogel en F. J. M. Wubben (2001). Voorschrift voor de berekening van de Lden en Lnight geluidbelasting in dB(A) ten gevolge van vliegverkeer van en naar de luchthaven Schiphol, Part 1: Berekeningsvoorschrift. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, NLR-CR-2001-372-PT-1, Amsterdam.

Van Deventer, F. W. J. (2014). Handboek basiskennis vliegtuiggeluid.

Van Gerven, P. W., H. Vos, M. P. Van Boxtel, et al. (2009). "Annoyance from environmental noise across the lifespan." J Acoust Soc Am **126**(1): 187-194.

Van Kempen, E., M. Casas, G. Pershagen, et al. (2018). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary." Int. J. Environ. Res. Public Health **15**(2).

Van Kempen, E. en I. Van Kamp (2005). Annoyance from air traffic noise. Possible trends in exposure-response relationships. RIVM, RIVM rapport 01/2005, Bilthoven.

Van Oosten, N., L. Meliveo, M. Tuinstra, et al. (2018). The new EU helicopter noise model NORAH. Euronoise 2018, Crete.

Van Deventer, F. W. J. (2004). Basiskennis geluidzonering luchtvaart.

Van Deventer, F. W. J. (2007). "Vliegtuiggeluid rond Schiphol - een geschiedenis in vogelvlucht." Geluid **Jaargang 30**(Nr. 3).

Van Poll, R., C. Ameling, O. Breugelmans, et al. (2014). Gezondheidsonderzoek Vliegbasis Geilenkirchen (Desk research) I : Hoofdrapportage: samenvatting, conclusies en aanbevelingen Gezondheidsonderzoek Vliegbasis Geilenkirchen. RIVM, RIVM rapport 630028011/2014, Bilthoven.

Van Poll, R., O. Breugelmans en L. Dreijerink (2008). Geilenkirchen Air Base Perception Survey - Perceptions of residents in the Netherlands. RIVM, RIVM Report 630311001/2008, Bilthoven.

Van Poll, R., O. Breugelmans, D. Houthuijs, et al. (2018). Beleving Woonomgeving in Nederland. Inventarisatie Verstoringen 2016. RIVM, RIVM Rapport 2018-0084, Bilthoven.

Verheijen, E., D. Houthuijs en J. Jabben (2011). Geluid en hinder door AWACS Geilenkirchen. Verdieping relatie geluidbelasting en ernstige hinder. RIVM, RIVM briefrapport 680555006, Bilthoven.

Vienneau, D., C. Schindler, L. Perez, et al. (2015). "The relationship between transportation noise exposure and ischemic heart disease: a meta-analysis." Environ Res **138**: 372-380.

Weesie, J. (1993). "Asymmetry and Timing in the Volunteer's Dilemma." Journal of Conflict Resolution **37**(3): 569-590.

WHO (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

WL (1992). Wet luchtvaart. Min VenW. Den Haag, Sdu Uitgevers.

Wunderli, J. M., R. Pieren, M. Habermacher, et al. (2015). "Intermittency ratio: A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure." J Expo Sci Environ Epidemiol **26**(6): 575-585.

Bijlage 1. Vragen voor de verkenningfase

In het Projectplan meten en berekenen vliegtuiggeluid zijn de volgende vragen voor de verkenningfase vragen geformuleerd:

Metingen

- Voor welke luchthavens wordt gemeten?
 - Besteed daarbij aandacht aan de verschillende typen luchthavens (en luchtverkeer): luchthavens van nationale betekenis, luchthavens van regionale betekenis, helihavens, militaire luchthavens met civiel medegebruik.
 - Is meten op alle luchthavens nuttig en nodig?
 - Defensie luchthavens (zonder civiel medegebruik) zitten niet in de scope, maar de ervaringen van meten bij Defensieluchthavens dienen wel meegenomen te worden. Daar waar er verschillen of aandachtspunten zijn, worden die benoemd.
- Hoe kunnen de bestaande meetnetten en meetinitiatieven in het project ingepast worden? Daarbij geldt als uitgangspunt dat dit project aanvullend is op deze initiatieven. Dit betreft onder andere:
 - Lelystad: Meetinitiatieven Flevoland, initiatieven gemeenten/provincies buiten Flevoland en het monitoring- en evaluatieprogramma dat nu opgezet wordt voor het gebied onder de aansluitroutes buiten Flevoland.
 - Schiphol: bestaande meetnetten en het recente voorstel van het KNMI aan ORS.
 - Vliegveld Eindhoven.
 - Maastricht/Aachen Airport.
 - Rotterdam/The Hague airport.
 - Metingen Defensie; in hoeverre kunnen we gelijk optrekken en wat kunnen we hiervan leren?
- *Hoe en waar* moet gemeten worden?
 - Wat zijn de functionele en technische eisen die aan de meetposten gesteld moeten worden?
 - Welke innovaties zijn mogelijk en welke bekende innovaties kunnen benut worden?
 - Hoeveel meetposten moeten worden geplaatst en waar?
 - Welke rol kunnen burgermetingen spelen?
 - Hoe ziet het referentiemeetnet eruit?
- Welke rol kunnen bestaande/historische meetdata spelen?
- Welke opties zijn er voor aanleg en beheer van meetposten en meetdata: hoe kunnen we metingen voldoende betrouwbaar en valide maken?

Berekeningen:

- Hoe kunnen meten en berekenen waar nodig dicht bij elkaar gebracht worden?
 - Welke verschillende mogelijkheden zijn er?
 - Wat zijn de aandachtspunten?
 - Wat is nodig om berekeningen aan te passen en op welke termijn kan dat?
- Welke andere mogelijkheden (buiten geluidmetingen) zijn er om

- berekeningen te verbeteren?
- Welke mogelijkheden zijn er qua 'beheer' van berekeningen/rekenmodellen?

Draagvlak en beleving

- Welke rol kunnen burgers verder spelen bij (het project) meten en berekenen?
- Hoe kunnen we data ontsluiten? Welke informatiebehoefte is er en hoe kunnen we daaraan voldoen?
- Op welke wijze kan beleving/hinder een plek krijgen? Welke maatregelen zouden genomen kunnen worden (generiek en meer specifiek)?
- Welke opties zijn er om hinderbeleving een plek te geven in beleid en wat zijn de mogelijke implicaties voor normen? Wat zijn de voor- en nadelen en aandachtspunten qua uitvoerbaarheid en handhaafbaarheid van die voorgestelde opties?
- Welke andere opties zijn er om draagvlak te vergroten?

Overig

- Welke invloed zouden de WHO-aanbevelingen van 10 oktober 2018 kunnen hebben op het antwoord op bovengenoemde vragen?
- Welke lessen en ervaringen uit het buitenland kunnen we benutten en hoe?
- Welke lessen en ervaringen vanuit spoor en weg kunnen we benutten en hoe?
- Planning uitrol: wat kan op korte termijn en wat moet op langere termijn; is een pilot zinvol en zo ja, hoe zou deze eruit kunnen zien?

Kosten

- Welke kosten horen bij effectieve en efficiënte meetnetten in relatie tot de doelstellingen?
- Welke kosten horen bij aanpassingen berekeningen?

.....
R.C.G.M. Smeters (coördinatie en eindredactie), RIVM | P.C. Siegmund (auteur), KNMI |
D.J.M. Houthuijs (auteur), RIVM | R.H. Hogenhuis (auteur), NLR | S.J. Heblj (auteur), NLR |
J.L.A. Devilee (auteur), RIVM | O.R.P. Breugelmans (auteur), RIVM | J.A. Beintema (auteur), NLR
.....

RIVM Rapport 2019-0201



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

november 2019