



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

Programmatistische Aanpak

Metten **Vliegtuiggeluid** (PAMV):

Toepassingsbereik metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid

Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV):

Toepassingsbereik metingen en berekeningen van
vliegtuiggeluid

RIVM-rapport 2023-0366



Colofon

© RIVM 2024

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2023-0366

A. Sahai (auteur, coördinator), RIVM
N. Mabjaia (auteur), RIVM
T. Wartenberg (auteur), RIVM
R. Hogenhuis (auteur), NLR
S. Heblj (auteur), NLR
K. Vinkx (auteur), To70

Contact:
Abhishek Sahai
Centrum Milieukwaliteit
abhishek.sahai@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Ministerie Infrastructuur en Waterstaat, directie luchtvaart in het kader van de Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV).

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

Publiekssamenvatting

Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV):

Toepassingsbereik metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid

In Nederland zijn alle normen over vliegtuiggeluid gebaseerd op berekeningen. Metingen van vliegtuiggeluid zijn vooral informatief. Maar burgers hebben meer vertrouwen in metingen en willen dat de overheid ze meer gebruikt. Alleen kunnen metingen worden verstoord waardoor ze beperkingen hebben. Ook zijn ze verder weg van het vliegveld minder betrouwbaar.

Daarom is onderzocht tot welke afstand van een vliegveld en geluidbelasting de metingen én berekeningen betrouwbaar zijn; in jargon heet dat het toepassingsbereik. Dit is gedaan door te bepalen tot welke hoogte van het geluid het toepassingsbereik betrouwbaar is. Uit het onderzoek bleek dat de geluidbelasting beter aangeeft welke hoeveelheid geluid te horen is dan de afstand tot het vliegveld. Daarom is het toepassingsbereik uiteindelijk in geluidbelasting bepaald.

Voor *berekeningen* is het geluid berekend dat vliegtuigen een jaar lang gemiddeld rond Schiphol produceren. Hieruit blijkt dat het rekenmodel betrouwbare resultaten geeft bij een hoge geluidbelasting, tot ongeveer 50 decibel L_{den} . De geluidbelasting is het geluidniveau van vliegtuigen keer het aantal overvliegende vluchten. De geluidbelasting in L_{den} is de gemiddelde geluidbelasting over een jaar gewogen over een periode van 24 uur. Voor lage geluidniveaus is niet duidelijk hoe betrouwbaar de berekende resultaten zijn. Er zijn namelijk niet genoeg metingen van lage geluidniveaus om de berekeningen mee te kunnen vergelijken.

Voor *metingen* is een toepassingsbereik bepaald van 40 tot 45 decibel L_{den} . Het toepassingsbereik kan niet preciezer worden bepaald omdat er weinig gegevens over lage geluidniveaus zijn. De analyse van de metingen is gedaan voor twee luchthavens: Schiphol en Eindhoven Airport. Een van de aanbevelingen is te onderzoeken welk effect de beperkte meetdata van lage geluidniveaus heeft op de resultaten. Ook wordt geadviseerd uit te zoeken hoe deze geluidniveaus beter kunnen worden gemeten.

Een consortium van het RIVM, het Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR) en adviesbureau To70 heeft dit onderzoek gedaan. Zij deden dat voor de Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV), in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW).

Kernwoorden: vliegtuiggeluid, meten, berekenen, toepassingsbereik, PAMV, Doc.29

Synopsis

Programme-Based Approach to Measuring Aircraft Noise (PAMV)

Area of application of aircraft noise measurements and modelling

In the Netherlands, all aircraft noise limit values are based on modelling. Aircraft noise measurements mainly serve an informative purpose. However, citizens have more confidence in measurements and would like the government to make more use of them. The disadvantage of measurements is that they can be distorted, in which case their benefits are limited. Also, the further away from the airport they are conducted, the less reliable they become.

For this reason, researchers have investigated up to which distance from an airport or which noise exposure level the measurements and modelling are both reliable. The technical term for this is 'area of application'. They did so by determining the noise level up to which the area of application was reliable. Their investigation showed that noise exposure is a better way to express the area of application than the distance from the airport. As a consequence, the area of application is expressed in terms of noise exposure.

For the purpose of *modelling*, researchers modelled the average noise level produced by aircraft taking off from and landing at Amsterdam Airport Schiphol over the course of one year. This showed that modelling yields reliable results for high noise exposures up to around 50 dB L_{den} . The noise exposure (L_{den}) is the annually averaged, weighted noise level produced by aircraft. For low noise levels, the reliability of the modelled results is unclear. This is because not enough low noise level measurements have been conducted to compare the modelled results with.

For the purpose of *measurements*, an area of application was determined of 40–45 dB L_{den} . A narrower area of application could not be determined due to the lack of data on low noise levels. The researchers performed a measurement analysis for two airports: Amsterdam Airport Schiphol and Eindhoven Airport. One of their recommendations is to study the effect of the lack of low noise level measurement data on the results. A second recommendation is to investigate how the measurement of low noise levels could be improved.

This research was carried out by a consortium made up of RIVM, the National Aerospace Laboratory (NLR) and the consultancy To70. They did so on behalf of the Ministry of Infrastructure and Water Management for the Programme-Based Approach to Measuring Aircraft Noise (*Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid*, PAMV).

Keywords: aircraft noise, measuring, modelling, area of application, PAMV, Doc.29

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 15

- 1.1 Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV) — 15
- 1.1.1 Aanleiding PAMV — 15
- 1.1.2 Aanbevelingen PAMV-verkenningfase — 15
- 1.2 Toepassingsbereik metingen en berekeningen — 17
- 1.2.1 Aanleiding en behoefte — 17
- 1.2.2 Relatie met andere onderzoeken en adviezen — 19
- 1.3 Opdrachtverlening — 21
- 1.4 Leeswijzer — 21

2 Toepassingsbereik berekeningen vliegtuiggeluid — 23

- 2.1 Aanpak en methodologie — 23
- 2.2 Aannamen behorend bij de rekenmethodiek en invoergegevens — 24
- 2.3 Kwantificatie van onzekerheden — 29
- 2.4 Samenvatting en discussie toepassingsbereik van berekeningen — 35

3 Toepassingsbereik metingen vliegtuiggeluid — 37

- 3.1 Aanpak en methodologie — 37
- 3.2 Onzekerheidsfactoren bij het meten van vliegtuiggeluid — 39
- 3.2.1 Factoren die afhankelijk zijn van de meetlocatie — 39
- 3.2.2 Factoren die afhankelijk zijn van weersomstandigheden — 40
- 3.2.3 Factoren die afhankelijk zijn van de positie van het vliegtuig ten opzichte van de meetpost — 42
- 3.2.4 Aanvullende factoren die het meten van vliegtuiggeluid beïnvloeden — 43
- 3.3 Analyse metingen Schiphol — 45
- 3.3.1 Effect onzekerheidsfactoren op metingen — 47
- 3.3.2 Analyse toepassingsbereik metingen voor validatie — 55
- 3.3.3 Analyse toepassingsbereik metingen voor informatievoorziening — 64
- 3.4 Analyse metingen Eindhoven Airport — 67
- 3.4.1 Effect onzekerheidsfactoren op metingen — 67
- 3.4.2 Analyse toepassingsbereik metingen voor validatie — 69
- 3.4.3 Analyse toepassingsbereik metingen voor informatievoorziening — 71
- 3.5 Samenvatting bevindingen toepassingsbereik van metingen — 73

4 Toepassingsbereik combinatie van metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid — 77

- 4.1 Analyse vergelijking berekeningen met metingen — 78
- 4.1.1 Effect validatiefilters op de vergelijking — 78
- 4.1.2 Vergelijking meten-rekenen — 82
- 4.2 Samenvatting bevindingen en conclusie toepassingsbereik – combinatie van metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid — 88

5 Conclusies en aanbevelingen — 91

Referenties — 95

Bijlage 1 Resultaten indicatieve geluidberekeningen — 97

Samenvatting

Aanleiding

Rekenmodellen spelen een belangrijke rol binnen de huidige systematiek rondom vliegtuiggeluid. Berekeningen, die zijn uitgevoerd met rekenmodellen, worden gebruikt voor het maken van jaarprognoses en voor de handhaving van de geproduceerde geluidbelasting. Alle normen die binnen het Nederlandse beleid worden gehanteerd, zijn gebaseerd op berekende waarden. Metingen van vliegtuiggeluid hebben daarentegen vooral een informatieve rol. De ondergeschikte rol van metingen in het luchtvaartdossier leidde in de afgelopen jaren tot veel discussie en maatschappelijke onvrede. Voor de Minister van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) was dat aanleiding om een Programmatische Aanpak van het Meten van Vliegtuiggeluid (PAMV) op te starten. Met de PAMV wil de minister zowel berekeningen als metingen van vliegtuiggeluid verbeteren en beide methoden onderling versterken. Gegevens over de geluidbelasting door vliegverkeer moeten in de nieuwe situatie voor iedereen herkenbaar en betrouwbaar zijn en een solide basis vormen voor informatie voor omwonenden en beleidsbeslissingen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 2018).

De PAMV begon in 2019 met een verkenning van de mogelijkheden om het stelsel van meten en rekenen te verbeteren en leidde tot een aantal aanbevelingen. Een van deze aanbevelingen ging over 'modelontwikkeling', waarbij werd aanbevolen om een analyse uit te voeren van de grens waarbinnen metingen en berekeningen betrouwbaar kunnen worden toegepast. Het bepalen van het toepassingsbereik door het vaststellen van ondergrenzen heeft als doel om discussies over de vergelijking tussen meten en rekenen op basis van een goed gefundeerde en feitelijke basis uit te voeren. Op deze manier kunnen ook realistische verwachtingen worden gesteld over de doelen waarvoor beide methoden zowel dicht bij de luchthaven als er verder vandaan kunnen worden toegepast.

Behoefte

In het algemeen kan gesteld worden dat rekenmodellen als het Doc.29-model met name gericht zijn op het bepalen van geluid in de nabije omgeving van luchthavens. De nauwkeurigheid van deze rekenmodellen hangt namelijk van verschillende factoren af, zoals de hoeveelheid verkeer, de kwaliteit van de invoergegevens, de voorspelbaarheid van het gedrag van vliegtuigen, enzovoort. Voor veel van deze parameters neemt de onzekerheid met toenemende afstand tot de luchthaven en afnemende geluidbelasting toe. Voor de toepassing van dit soort rekenmodellen in gebieden die verder van de luchthaven af liggen en in gebieden met een lage geluidbelasting is het van belang dat de rekenmodellen in deze gebieden betrouwbare resultaten geven en dat bekend wordt vanaf waar de betrouwbaarheid afneemt. Het is op dit moment echter niet bekend tot waar, als functie van zowel afstand tot de luchthaven als geluidbelasting, de rekenmodellen betrouwbare resultaten geven.

Hoewel metingen geen deel uitmaken van de officiële handhavings- en normeringssystematiek, worden burgers primair op basis van metingen geïnformeerd over de geluidssituatie in hun omgeving. Metingen die verder weg van de luchthaven of in gebieden met een lage geluidbelasting worden uitgevoerd, zijn echter ook niet altijd toepasbaar. Bij deze metingen zijn de gemeten geluidniveaus doorgaans lager en is de kans van verstoring door omgevingsgeluid of door weersomstandigheden, zoals harde wind, hoger. Indien verder bij de luchthaven vandaan of in gebieden met een lage geluidbelasting wordt gemeten, worden de metingen minder betrouwbaar. Een concrete grens vanaf waar dit gebeurt, is op dit moment niet bekend.

Doel

Voor dit rapport heeft een consortium van RIVM-NLR-To70 onderzoek uitgevoerd om het toepassingsbereik van berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid te bepalen door de volgende twee vragen te beantwoorden:

1. Tot waar kunnen berekeningen van vliegtuiggeluid betrouwbaar worden uitgevoerd als functie van afstand en geluidbelasting?
2. Tot waar kunnen metingen van vliegtuiggeluid voor verschillende doelen betrouwbaar worden uitgevoerd als functie van afstand en geluidbelasting?

Omdat de aanbeveling voor het bepalen van het toepassingsbereik onder modelontwikkeling valt, heeft dit onderzoek als primair doel om het toepassingsbereik te bepalen voor modelvalidatie. Het onderzoek richt zich hiernaast als secundair doel op informatievoorziening aan omwonenden.

Toepassingsbereik berekeningen

De focus in dit onderzoek wat betreft berekeningen ligt op het ECAC Doc.29-model (ECAC.CEAC 2016a), en specifiek op de implementatie van dit model voor Schiphol. Om het toepassingsbereik van *berekeningen* te bepalen, is het onderzoek in twee stappen uitgevoerd – door middel van een gevoeligheidsanalyse van de invoergegevens van het Doc.29-model en door een vergelijking van berekende geluidbelasting met gemeten geluidbelasting op de NOMOS-metposten van Schiphol.

Aanpak gevoeligheidsanalyse

Om inzicht te verkrijgen in het toepassingsbereik van berekeningen, is eerst een inventarisatie gemaakt van alle globale en lokale factoren die de nauwkeurigheid van berekeningen beïnvloeden. Vervolgens zijn de factoren geanalyseerd die typisch toenemen met de afstand tot de luchthaven en tot onzekerheden leiden, waarbij de afstand gekoppeld is aan een typische geluidbelasting. Om de onzekerheden als gevolg van deze factoren te kwantificeren, zijn diverse testberekeningen uitgevoerd met het Doc.29-rekenmodel voor Schiphol door de betreffende invoergegevens te laten variëren.

Bevindingen gevoeligheidsanalyse

Voor zowel starts als landingen is er op basis van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse geen aanleiding gevonden om het

toepassingsbereik van berekeningen te limiteren. De variaties in de onderzochte invoergegevens vanaf een bepaalde afstand of geluidbelasting leiden niet tot een zodanig grote afwijking in de berekende geluidbelasting dat de rekenresultaten als niet of minder plausibel moeten worden beschouwd.

Vergelijking berekende en gemeten geluidbelasting

Aangezien de invoergegevens niet tot een duidelijke beperking van het toepassingsbereik van berekeningen leiden, is vervolgens een vergelijking uitgevoerd van de jaargemiddelde berekende geluidbelasting met de jaargemiddelde gemeten geluidbelasting.

Aanpak vergelijking meten en rekenen

De vergelijking is gemaakt voor berekeningen die zijn uitgevoerd met het Doc.29-rekenmodel en de gemeten geluidbelasting op de NOMOS-meetposten rondom Schiphol. Voor de vergelijking is de PAMV-validatieaanpak gevolgd (Sahai 2022), die het consortium in 2022 heeft bepaald. Daarin zijn het doel, de scope en criteria voor de vergelijking (dat wil zeggen, de validatie) beschreven, alsook de eisen aan de meetdata en aanvullende overwegingen die de vergelijking kunnen beïnvloeden. Het doel van de vergelijking die in dit onderzoek is uitgevoerd, was ten eerste om het effect van de validatie-eisen op het verschil tussen meten en rekenen en de spreiding daarin te duiden, en vervolgens om een ondergrens te bepalen vanaf waar de berekeningen wezenlijk van de metingen beginnen af te wijken. De analyse geeft dan ook aan tot waar een zinvolle vergelijking tussen berekeningen en metingen mogelijk is en vanaf waar de onzekerheid in de vergelijking significant toeneemt.

Voor de analyse is eerst gekeken naar het effect van aanvullende meeteisen die zijn bepaald voor de PAMV-validatieaanpak op het verschil tussen meten en rekenen. Deze aanvullende eisen, gezamenlijk aangeduid als 'filters', zijn op de data toegepast en hun effect op het verschil tussen meten en rekenen is bepaald voor: 1) elevatiehoek van minimaal 60 graden; 2) windsnelheid van maximaal 5 m/s; en 3) geen neerslag. Vervolgens zijn de trends geanalyseerd voor het verschil tussen meten en rekenen als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting.

Bevindingen vergelijking meten en rekenen

De analyse laat zien dat het model voor hoge geluidbelastingwaarden betrouwbare resultaten geeft indien berekeningen worden vergeleken met metingen die voldoen aan validatie-eisen bepaald voor de nationale meetstrategie en aan de aanvullende meeteisen bepaald voor de PAMV-validatieaanpak. Het verschil tussen berekende en gemeten geluidbelasting blijft tot circa 50 dB L_{den} onder de 2 dB, wat volgens de PAMV-validatieaanpak als de bovengrens van een aanvaardbaar verschil wordt beschouwd. Als lagere geluidbelastingwaarden worden berekend, ligt het verschil tussen de gemeten en berekende geluidbelasting doorgaans hoger, al kent de vergelijking bij lage geluidbelastingwaarden een hogere onzekerheid. De genoemde waarde van het toepassingsbereik is verder bepaald op basis van de trend in het verschil voor alle validatiemeetposten. Voor sommige meetposten waren de beschikbare meetdata na het toepassen van de validatiefilters vrij

beperkt. De trends zijn zeker waarneembaar maar het genoemde toepassingsbereik dient daarom met een bepaald niveau van voorbehoud te worden beschouwd.

De hoge onzekerheid als er lage geluidbelastingwaarden worden vergeleken, komt doordat er bij deze lage waarden een relatief klein aantal metingen beschikbaar is dat met berekende waarden kan worden vergeleken. De analyse in dit onderzoek is uitgevoerd voor een dataset waarin iedere gemeten vliegbeweging aan een berekende vliegbeweging is gekoppeld. Bij meetposten met een lage geluidbelasting ontbreekt een groot deel van de vliegbewegingen door het gebruik van de drempelwaarde, en metingen onder de drempelwaarde worden niet in het NOMOS-meetsysteem geregistreerd. Als gevolg hiervan is de bijdrage van de ontbrekende vluchten aan de gemeten geluidbelasting onbekend. Om deze reden is er op dit moment op meetposten met een lage geluidbelasting geen goede vergelijking tussen meten en rekenen mogelijk.

Daarnaast zijn de volgende bevindingen gedaan op basis van de vergelijking:

- Het toepassen van de validatie-eisen verkleint het verschil tussen meten en rekenen aanzienlijk en elimineert grotendeels de spreiding in het verschil.
- Afstand tot de luchthaven lijkt geen geschikte maat voor het uitdrukken van het toepassingsbereik van het model. Geluidbelasting lijkt voor dit doel door de combinatie van geluidniveaus en aantal vliegbewegingen beter geschikt.
- Er is een sterke correlatie tussen gemeten en berekende geluidbelasting en beide volgen dezelfde trends.
- Het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting is iets groter voor landingen dan voor starts, vooral bij lage geluidbelastingwaarden.

Bovenstaande conclusies omtrent het toepassingsbereik van berekeningen gelden voor de analyse die is uitgevoerd voor Schiphol. Of vergelijkbare conclusies ook voor regionale luchthavens gelden, is op dit moment niet bekend.

Toepassingsbereik metingen

Vervolgens is het toepassingsbereik van *metingen* bepaald. De leidende gedachte bij de analyse van metingen is dat bij grote afstanden van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting de geluidniveaus als gevolg van vliegtuiggeluid in het algemeen laag zijn. Vanaf een bepaalde afstand of geluidbelasting zullen de gemeten geluidniveaus zodanig laag worden dat ze niet van het achtergrondgeluid te onderscheiden zijn. Vanaf deze grenswaarden moeten de metingen van vliegtuiggeluid als niet of minder betrouwbaar worden beschouwd.

De analyse voor het bepalen van het toepassingsbereik van metingen is uitgevoerd voor het kalenderjaar 2019 voor twee luchthavens – Schiphol en Eindhoven Airport. Voor deze analyse is eerst gekeken naar factoren die het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid beïnvloeden

en is een inventarisatie gemaakt van diverse factoren die hierbij een rol spelen. Voor beide luchthavens zijn vervolgens de meetdata van elke meetpost geanalyseerd als functie van afstand tot de luchthaven en als functie van de geluidbelasting.

Bevindingen toepassingsbereik metingen

De bevindingen voor het toepassingsbereik van metingen worden opgesplitst voor de meetdoelen validatie en informatievoorziening aan omwonenden.

Validatie:

De analyse laat zien dat naast de validatie-eisen aan de meetlocatie ook de aanvullende meeteisen aan windsnelheid, neerslag en elevatiehoek de spreiding in de metingen (en dus de onzekerheid) kunnen verkleinen. Verder de luchthaven vandaan en in gebieden met een lage geluidbelasting wordt het gemiddeld genomen lastiger om consistent metingen uit te voeren die boven het achtergrondgeluid uitkomen. Op basis van de uitgevoerde analyse kan het toepassingsbereik voor validatie als volgt worden bepaald:

- *Als functie van afstand tot de luchthaven:* De trends op basis van afstand tot de luchthaven leveren in het algemeen geen eenduidig antwoord op de vraag tot welke afstand van de luchthaven vliegtuiggeluid betrouwbaar kan worden meten. Wel wordt gezien dat het toepassingsbereik van metingen als functie van afstand tot de luchthaven verschilt tussen starts en landingen. Starts zijn gemiddeld genomen tot een afstand van circa 15-20 km van de luchthaven van het achtergrondgeluid te onderscheiden, landingen tot minstens 27 km van de luchthaven. Het aantal metingen dat op deze grote afstanden aan alle validatie-eisen voldoet is vrij laag. Het is op basis van de meetdata die voor deze studie zijn gebruikt niet mogelijk om te bepalen tot welke afstand voorbij 27 km voor landingen en 20 km voor starts vliegtuiggeluid nog van het achtergrondgeluid te onderscheiden zal zijn. De trends als functie van afstand leiden niet tot een concrete conclusie wat betreft een bovengrens.
- *Als functie van geluidbelasting:* In vergelijking tot afstand tot de luchthaven laten de trends als functie van geluidbelasting een duidelijker beeld zien van het toepassingsbereik van metingen. Het toepassingsbereik als functie van geluidbelasting kan per luchthaven gedeeltelijk verschillen. Dit komt door verschillen in de vlootsamenstelling en aantal vliegbewegingen per luchthaven, maar ook door de ligging van de vliegroutes.
 - Voor Schiphol wordt geconcludeerd dat metingen gemiddeld genomen bij een geluidbelasting tussen de 40-45 dB L_{den} in de buurt van het achtergrondgeluid beginnen te komen, waardoor het consistent betrouwbaar meten van vliegtuiggeluid lastiger wordt. Het aantal beschikbare metingen dat aan de strenge validatie-eisen voldoet neemt bij afnemende geluidbelasting sterk af. Bij lage geluidbelasting speelt hierbij de drempelwaarde ook een belangrijke rol.
 - Voor Eindhoven Airport is het toepassingsbereik voor validatie voorlopig niet te bepalen omdat zeer weinig metingen aan de validatie-eisen (in hun huidige vorm) voldoen.

Het toepassingsbereik van metingen kan verder gedeeltelijk verschillen per vliegtuigtype, waarbij langeafstandsvliegtuigtypen door hun hogere geluidniveaus ook op grotere afstanden en bij lagere geluidbelasting meetbaar zijn dan vliegtuigtypen bedoeld voor korte afstandsvluchten.

Informatievoorziening:

In tegenstelling tot bij validatie worden conform de nationale meetstrategie geen strenge eisen aan metingen voor informatievoorziening voorgesteld. Metingen voor informatievoorziening laten daardoor een veel grotere spreiding zien vergeleken met metingen voor validatie. Rekening houdend met het feit dat een deel van de metingen voor informatievoorziening potentieel door factoren afhankelijk van de meetlocatie, weer of elevatiehoek is verstoord, zijn de gemiddelde trends die voor informatievoorziening worden gezien vergelijkbaar met die voor validatie.

Aanbevelingen

De invloed van de drempelwaarde op de metingen dient nader onderzocht te worden. Het toepassen van de drempelwaarde voor metingen bemoeilijkt een afdoende formulering van het toepassingsbereik van metingen en berekeningen bij lage geluidbelasting. Het kan worden aanbevolen om de validatie op grotere afstand van de luchthaven te baseren op vliegpassages die over het hele meetbereik betrouwbaar kunnen worden gemeten. Hierbij kan ook worden aanbevolen om een aantal meetposten onder of dichterbij de vliegroutes te plaatsen zodat meer metingen voor de vergelijking beschikbaar komen.

Indien er voor vervolgonderzoek een modelverbetering wordt uitgevoerd en de rekenwijze wordt aangepast, is het aan te bevelen om de vergelijking als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting opnieuw uit te voeren. De vergelijking met het verbeterde model zal aangeven of en in hoeverre het toepassingsbereik van het model door modelverbetering is aangepast.

Conform de PAMV-validatieaanpak is eerst begonnen met de vergelijking voor Schiphol. Toen dit onderzoek begon, was de Doc.29-implementatie alleen voor Schiphol gereed en niet voor regionale luchthavens. In een vervolgtraject kan het waardevol zijn om een soortgelijke vergelijking ook voor regionale luchthavens uit te voeren. Hiermee kan een indruk worden verkregen van de verschillen tussen meten en rekenen bij regionale luchthavens in vergelijking met bij Schiphol. Tevens kan hiermee de robuustheid van het Doc.29-model worden getoetst.

1 Inleiding

1.1 Programmatistische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV)

1.1.1 *Aanleiding PAMV*

Rondom Nederlandse luchthavens worden er al vele jaren metingen van vliegtuiggeluid uitgevoerd. Op basis daarvan worden omwonenden geïnformeerd over de geluidniveaus en de geluidbelasting in hun omgeving. In de regelgeving en handhaving van de luchtvaart wordt géén gebruikgemaakt van geluidmetingen.

De ondergeschikte rol van geluidmetingen in het luchtvaartdossier leidde in de afgelopen jaren tot veel discussie en maatschappelijke onvrede. Voor de Minister van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) was dat aanleiding om een Programmatistische Aanpak van het Meten van Vliegtuiggeluid (PAMV) op te starten. Met de PAMV wil de minister zowel berekeningen als metingen van vliegtuiggeluid verbeteren en beide methoden onderling versterken. Gegevens over de geluidbelasting door vliegverkeer moeten in de nieuwe situatie voor iedereen herkenbaar en betrouwbaar zijn en een solide basis vormen voor informatie voor omwonenden en beleidsbeslissingen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 2018).

Een belangrijke stap bij het verbeteren van meet- en rekengegevens is het vaststellen van de grenzen van toepasbaarheid van beide methoden. Inzicht in de beperkingen van rekenmodellen geeft de mogelijkheid om de rekenmodellen gericht te verbeteren op aspecten waar de grootste winst te behalen is. Kennis van de grenzen van toepasbaarheid van berekeningen en metingen, ook wel het toepassingsbereik genoemd, geeft richtlijnen voor tot waar berekeningen en metingen voor verschillende doelen betrouwbaar kunnen worden toegepast.

De PAMV is medio 2019 gestart met een verkenningsfase. De verkenningsfase is door de kennisinstituten RIVM, NLR en KNMI uitgevoerd. Hierbij zijn mogelijkheden onderzocht om het stelsel van meten en rekenen van vliegtuiggeluid te verbeteren. De resultaten van deze verkenning zijn in december 2019 gerapporteerd (Smetsers, Siegmund et al., 2019). In de beleidsreactie op dat rapport, de dato 18 december 2019, heeft de minister toegezegd dat zij alle aanbevelingen uit dat rapport uit zal voeren (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 2019). Sinds medio 2020 zit de PAMV in de uitwerkfase, waarbij de diverse aanbevelingen die tijdens de verkenning zijn gedaan, worden uitgewerkt. Het is beoogd dat de PAMV-uitwerkfase uiteindelijk zal leiden tot een structurele fase van de PAMV.

1.1.2 *Aanbevelingen PAMV-verkenningsfase*

Het rapport van de verkenningsfase doet zeven aanbevelingen, die hier kort worden herhaald en samengevat. Voor meer informatie omtrent de aanbevelingen en hoe ze tot stand kwamen, wordt verwezen naar het PAMV-verkenningsrapport uit 2019 (Smetsers, Siegmund et al., 2019). De aanbevelingen die daarin zijn gedaan waren:

1. *Meetstrategie en nationale database*
Ontwikkel een nationale meetstrategie, met visies over de verschillende meetdoelen. Leg per meetdoel vast waaraan metingen moeten voldoen. Werk de nationale meetstrategie op regionaal niveau uit.
2. *Signaalfunctie*
Ontwikkel een methodiek die op basis van meetgegevens kan signaleren of de resultaten van geluidberekeningen van de gewenste kwaliteit zijn.
3. *Modelontwikkeling*
 - a. Leg voor verschillende doeleinden de criteria vast waaraan modelberekeningen moeten voldoen. Start een structureel en langjarig modelvalidatieprogramma, met de focus op berekeningen volgens de Doc.29-methode (ECAC.CEAC 2016a).
 - b. Om inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van berekeningen en metingen wordt aanbevolen om voor één of voor een aantal luchthavens de grenzen te analyseren waarbinnen geluidberekeningen en metingen betrouwbaar kunnen worden uitgevoerd.
4. *Publiekscommunicatie*
Verbeter de publiekscommunicatie over meten, berekenen, beleven en regelgeving van vliegtuiggeluid. Bied algemene informatie gecoördineerd aan, vanuit één goed vindbare weblocatie.
5. *Hinder en gezondheid*
Ga geluidhinder en slaapverstoring rond luchthavens systematisch monitoren volgens een wetenschappelijk verantwoorde standaardmethode. Gebruik deze gegevens onder meer om te onderzoeken of er aanvullende geluidindicatoren zijn die beter aansluiten bij de manier waarop omwonenden de effecten van vliegtuiggeluid ervaren.
6. *Citizen Science*
Betrek de omgeving op een gestructureerde manier bij het opzetten van een aanvullend meetprogramma. Faciliteer citizen science-projecten voor hoogrisicogroepen, zoals burgers die dicht bij een start- of landingsbaan wonen of een verhoogde gevoeligheid voor omgevingsgeluid hebben.
7. *Wetenschappelijke aansturing*
Zorg voor onafhankelijke deskundigheid rond vliegtuiggeluid, om de kwaliteit van de structurele werkzaamheden en het onderzoekstraject te toetsen en te borgen.

Dit rapport gaat in op de derde aanbeveling voor de PAMV, met name het verkrijgen van inzicht in de toepasbaarheid van zowel berekeningen als metingen van vliegtuiggeluid (3b). Hiervoor dienen de grenzen te worden bepaald waarbinnen beide methoden betrouwbaar kunnen worden uitgevoerd. De aanbeveling valt formeel onder modelontwikkeling, en dit onderzoek heeft daarom als primair doel om het toepassingsbereik van berekeningen en metingen te bepalen voor het meetdoel *validatie*. Het onderzoek richt zich daarnaast, als secundair doel, op het verkrijgen van inzicht voor het meetdoel informatievoorziening aan omwonenden.

1.2 Toepassingsbereik metingen en berekeningen

1.2.1 *Aanleiding en behoefte*

Het gebruik van rekenmodellen speelt een belangrijke rol binnen de huidige systematiek rondom vliegtuiggeluid. Berekeningen die met rekenmodellen worden uitgevoerd, worden bijvoorbeeld gebruikt voor het maken van jaarprognoses van de verwachte geluidbelasting en voor de handhaving van de geproduceerde geluidbelasting over een gebruiksjaar. Alle normen die binnen het Nederlandse beleid worden gehanteerd, zijn gebaseerd op berekende waarden. Het is op dit moment echter niet bekend tot waar, zowel als functie van afstand tot de luchthaven als geluidbelasting, de rekenmodellen betrouwbare resultaten geven.

In het algemeen kan gesteld worden dat rekenmodellen met name gericht zijn op het bepalen van geluid in de nabije omgeving van luchthavens. De nauwkeurigheid van rekenmodellen 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, enzovoort. Voor veel van deze parameters neemt de onzekerheid met toenemende afstand tot de luchthaven en toenemende afstand tot de vliegroutes toe. Voor de toepassing van rekenmodellen in gebieden verder weg van de luchthaven of in gebieden met een lage geluidbelasting is het van belang dat de rekenmodellen in deze gebieden betrouwbare resultaten geven en het bekend wordt vanaf waar de betrouwbaarheid afneemt.

Hoewel metingen geen deel uitmaken van de officiële handhavings- en normeringssystematiek, spelen ook metingen een belangrijke rol binnen de luchtvaart, namelijk in de informatievoorziening aan omwonenden. Burgers worden primair op basis van metingen van vliegtuiggeluid geïnformeerd over de geluidssituatie in hun omgeving. Metingen die verder weg van de luchthaven of de vliegroutes worden uitgevoerd, zijn echter ook niet altijd toepasbaar. Bij deze metingen zijn de gemeten geluidniveaus doorgaans lager dan dicht bij de luchthaven (of dicht bij vliegroutes) en de kans van verstoring door omgevingsgeluid of door weersomstandigheden, zoals harde wind, is hoger. Hiernaast geldt dat vliegtuigen verder weg van de luchthaven hoger vliegen en er een grotere spreiding optreedt in de gevlogen vliegprofielen en vliegroutes. Naarmate er verder van de luchthaven of vliegroutes wordt gemeten, worden de metingen minder betrouwbaar.

Zoals we beschreven in paragraaf 1.1, is het verbeteren van rekenmodellen door het vergelijken van berekeningen met (betrouwbare) metingen een van de kerndoelen van de PAMV (Smetsers, Siegmund et al. 2019), (Sahai 2021). Zowel berekende resultaten als gemeten waarden van vliegtuiggeluid worden verder weg van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting naar verwachting minder betrouwbaar. Het is op dit moment niet bekend of en in hoeverre rekenmodellen in deze gebieden kunnen worden gevalideerd.

In de PAMV-verkenningfase werd concreet aanbevolen om voor één of een aantal luchthavens een analyse uit te voeren van de grens

waarbinnen geluidberekeningen en geluidmetingen betrouwbaar kunnen worden uitgevoerd. Bij deze analyse zullen de parameters die de betrouwbaarheid van beide methoden beïnvloeden in kaart gebracht worden. Op basis daarvan wordt voor de betreffende luchthavens vastgesteld tot welke afstand of waarde van de geluidbelasting betrouwbaar kan worden berekend en gemeten, rekening houdend met de verschillende toepassingen (validatie of informatievoorziening).

Het toepassingsbereik kan in principe op twee manieren worden geformuleerd – op basis van de afstand tot de luchthaven of op basis van een minimale waarde van de geluidbelasting in L_{den} . De keuze van afstand tot de luchthaven kan worden gemaakt omdat het bekend is dat met toenemende afstand de onzekerheden bij het meten en rekenen van vliegtuiggeluid toenemen. De keuze van een minimale geluidbelasting kan ook worden toegepast omdat dan het effect van het aantal vliegbewegingen in de omgeving van een reken- of meetpunt wordt meegenomen, naast de geluidniveaus. Beide mogelijkheden voor het formuleren van het toepassingsbereik geven inzicht en kunnen bij verschillende doelen worden toegepast. Voor het formuleren van beleid en normering is het gebruikelijk om een waarde van de geluidbelasting te hanteren, terwijl een afstand voor het modelleren een concrete en tastbare waarde kan zijn vanaf waar de modelleringsonzekerheden beginnen toe te nemen. Bij het gebruik van een waarde van de geluidbelasting in L_{den} is het van belang om te beseffen dat lage L_{den} -waarden ook relatief dicht bij de luchthaven kunnen optreden, afhankelijk van de vliegroutes die worden gevlogen. In gebieden waar het reken- of meetpunt verder bij de betreffende vliegroute vandaan ligt, zullen de geluidniveaus lager uitvallen, wat tot lagere L_{den} -waarden leidt. Voor Schiphol liggen significante delen van Amsterdam en Hoofddorp formeel buiten de 48 dB L_{den} -contour terwijl deze locaties vrij dicht bij de luchthaven liggen.

Omdat een deel van de beperkingen gerelateerd is aan de afstand tot de luchthaven, is de verwachting dat voor relatief kleine luchthavens bepaalde lage L_{den} -waarden nog wel betrouwbaar kunnen worden berekend, terwijl eenzelfde niveau voor een grote luchthaven als Schiphol niet meer mogelijk is (de geluidcontouren van Schiphol zijn meerdere malen groter dan die van regionale luchthavens). Naast de verschillen per luchthaven is het ook mogelijk dat het toepassingsbereik per doel (validatie en informatievoorziening) potentieel verschilt. Voor validatie worden strengere eisen aan metingen gesteld dan voor informatievoorziening.

Het vaststellen van het toepassingsbereik van berekeningen en metingen door middel van ondergrenzen heeft als doel om discussies over de vergelijking tussen berekenen en meten op basis van een goed gefundeerde en feitelijke basis uit te voeren. Op deze manier kunnen ook realistische verwachtingen worden gesteld over de doelen waarvoor beide methoden zowel dicht bij als verder weg van de luchthaven kunnen worden toegepast. Op basis van de onderliggende analyses die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd, zal ook duidelijk worden welke beperkingen de ondergrenzen bepalen van het toepassingsbereik en welke acties eventueel nodig zijn om het toepassingsbereik te vergroten.

1.2.2 *Relatie met andere onderzoeken en adviezen*

1.2.2.1 Het PAMV-validatietraject

Het onderzoek naar het toepassingsbereik van metingen en berekeningen heeft tot doel om de grenzen te bepalen waarbinnen metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid betrouwbaar kunnen worden uitgevoerd. Voor het bepalen van het toepassingsbereik van berekeningen is eerst een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van de modelinvoergegevens. Vervolgens is er een vergelijking gemaakt van berekende en gemeten geluidbelasting voor Schiphol. Het verschil tussen meten en rekenen is vervolgens als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting per meetpost geanalyseerd.

Delen van het onderzoek naar het toepassingsbereik van metingen en berekeningen zijn op dezelfde vergelijking van berekende en gemeten geluidbelasting gebaseerd als het validatieonderzoek. De vergelijking voor het toepassingsbereikonderzoek was nodig om de onderzoeksvraag te beantwoorden en te weten tot waar het model nog betrouwbare resultaten geeft. Hiermee is onderzocht of het verschil tussen meten en rekenen verder weg van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting toeneemt en tot waar de rekenmodellen nog een goede overeenstemming met gemeten waarden laten zien. Het punt vanaf waar het verschil zodanig toeneemt dat het niet meer als acceptabel kan worden beschouwd, bepaalt in principe het toepassingsbereik van het rekenmodel.

Voor het voorliggende onderzoek wordt verder het effect van versturende factoren zoals wind, neerslag en lage elevatiehoek op het verschil tussen meten en rekenen in kaart gebracht. Inzicht in deze aspecten is direct ook voor het validatieonderzoek van belang omdat het duidelijk maakt of de versturende factoren de vergelijking van berekeningen met metingen verslechteren.

Hiernaast zijn de volgende punten niet in het voorliggende onderzoek geadresseerd en worden in het rapport over de validatie van het Doc.29-model voor Schiphol gerapporteerd (Sahai 2024):

- De vergelijking van de geluidbelasting die is berekend met het Doc.29-model en de gemeten geluidbelasting op de NOMOS-meetposten gepresenteerd in het voorliggende rapport wordt in het validatierapport uitgebreid met een meer uitvoerige statistische analyse.
- De analyse wordt verder verdiept door de vergelijking ook op vliegtuigtype-niveau te presenteren, naast de analyse op vluchtsoort-niveau gepresenteerd in een compacte vorm in het voorliggende rapport.
- In het validatieonderzoek wordt het effect onderzocht op de vergelijking tussen metingen en berekeningen van het gebruik van de drempelwaarde en de vliegtuigbewegingen die daardoor in het meetdataset ontbreken. Dit effect wordt geanalyseerd door de berekende geluidbelasting indien alle vliegbewegingen van en naar Schiphol worden meegenomen te vergelijken met de berekende geluidbelasting die wordt bepaald alleen op basis van vliegbewegingen die aan een gemeten vlucht kon worden gekoppeld.

- Er wordt voor het validatieonderzoek ook een vergelijking op SEL-niveau per meetpost gepresenteerd voor het verkrijgen van meer inzicht in de verschillen die zijn waargenomen op L_{den} -niveau. In het voorliggende rapport wordt de focus gelegd op uitkomsten van de vergelijking in de L_{den} -maat om het toepassingsbereik van het model te bepalen.

1.2.2.2 WHO-advies omtrent omgevingsgeluid

In 2018 heeft de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) nieuwe richtlijnen voor omgevingsgeluid uitgebracht (WHO 2018). Deze WHO-richtlijnen zijn als advieswaarden bedoeld en hebben als doel om de schadelijke gezondheidseffecten door geluid, zoals hinder en slaapverstoring, te verminderen. In deze richtlijnen wordt rekening gehouden met nieuwe inzichten dat de ernstigere gezondheidseffecten van geluid, zoals coronaire hart- en vaatziekten, al bij lagere geluidbelastingniveaus optreden dan tot nu toe werd aangenomen. De WHO doet in verband met vliegtuiggeluid een aantal aanbevelingen:

- De aanbeveling om de geluidbelastingniveaus van vliegverkeer te reduceren tot onder 45 dB L_{den} , omdat het geluid van vliegverkeer boven dit niveau wordt geassocieerd met negatieve gezondheidseffecten.
- De aanbeveling om de nachtelijke geluidniveaus van vliegverkeer te reduceren tot 40 dB L_{night} , omdat het geluid van vliegverkeer boven dit niveau in de nacht wordt geassocieerd met negatieve effecten op de slaap.
- De aanbeveling dat er door beleidsmakers passende maatregelen worden genomen om bevolkingsgroepen te beschermen tegen blootstelling aan geluidbelasting van vliegverkeer boven de richtlijnen voor de dag en voor de nacht.

Binnen de huidige wet- en regelgeving in Nederland wordt de geluidbelasting rondom luchthavens vanaf een niveau van 48 dB L_{den} bepaald. De WHO beveelt echter aan om de blootstelling aan vliegtuiggeluid vanaf L_{den} -waarden van 45 dB te bepalen, om op deze manier de gezondheidseffecten die buiten het 48 dB L_{den} -gebied optreden in kaart te brengen. Omdat vliegtuigen en de omgeving in het algemeen over de jaren heen stiller zijn geworden, neemt de aandacht voor effecten bij lage geluidbelasting de laatste jaren toe. Het is inmiddels bekend dat er ook in gebieden waar de geluidbelasting lager is dan 48 dB L_{den} hinder wordt ervaren (Breugelmans, Houthuijs and Van Poll 2016). In deze gebieden, die vaak verder bij de luchthavens en de vliegroutes vandaan liggen, wonen in het algemeen meer mensen dan in gebieden waar de geluidbelasting hoog is. Daardoor is het totaal aantal mensen dat in deze gebieden hinder ervaart ook groter.

Het onderzoek naar het toepassingsbereik levert inzicht in de mate waarin vliegtuiggeluid in lage geluidbelastinggebieden betrouwbaar kan worden berekend en gemeten. De analyse geeft vanuit een beleidsperspectief inzicht in de praktische toepasbaarheid van berekeningen in gebieden met lagere geluidbelasting en tot welke waarde de modelresultaten als betrouwbaar kunnen worden beschouwd. Wat betreft metingen levert dit onderzoek inzicht in de ondergrens van de geluidbelasting tot waar omwonenden betrouwbaar over vliegtuiggeluid kunnen worden geïnformeerd.

Opstellen van nieuwe blootstelling-responsrelaties

Een voorbeeld van een situatie waarbij mogelijk tot relatief lage geluidbelastingen gerekend wordt is het vaststellen van een blootstelling-responsrelatie (ook wel dosis-effectrelatie genoemd). Blootstelling-responsrelaties spelen een belangrijke rol in het Nederlandse luchtvaartbeleid en worden gebruikt om het aantal ernstig gehinderde en slaapverstoorde mensen te berekenen. In onderzoeken waarin de blootstelling-responsrelaties tussen geluidbelasting en gerapporteerde hinder zijn afgeleid (Breugelmans, Van Wiechen et al. 2004), (Breugelmans, Houthuijs and Van Poll 2016), (Van Poll 2023), wordt bijvoorbeeld tot onder 40 dB L_{den} gerekend. Het feit dat berekeningen gebruikt kunnen worden om een blootstelling-responsrelatie te bepalen, betekent echter niet dat ze bij lage geluidbelasting net zo betrouwbaar zijn als bij hoge geluidbelasting. Er kunnen bij deze lage L_{den} -waarden grote afwijkingen met gemeten geluidbelasting optreden, die daarmee dus worden meegenomen in de afgeleide blootstelling-responsrelatie. Aan de ene kant is het een inherente beperking van de gebruikte rekenmodellen dat de berekeningen bij lage geluidbelasting minder betrouwbaar zijn. Hier dient tijdens het opstellen van de relaties rekening mee te worden gehouden. Aan de andere kant is het wel van belang om te weten tot welke ondergrens van de geluidbelasting de berekeningen in ieder geval betrouwbaar zijn en hoe hoog de onzekerheid is bij berekeningen die bij lage geluidbelasting worden uitgevoerd.

1.3 Opdrachtverlening

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft in 2022 het consortium van RIVM, NLR en To70 binnen de PAMV de opdracht gegeven om het onderzoek naar het toepassingsbereik van metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid uit te voeren. Dit onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van de uitwerkfase van de PAMV, als opvolging van de aanbeveling die tijdens de verkenningsfase is gedaan (aanbeveling 3b).

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport analyseert het toepassingsbereik van berekeningen van vliegtuiggeluid door eerst een beschrijving te geven van de aannamen behorend bij de rekenmethodiek en invoergegevens. Hierna volgt een kwantificatie van onzekerheden die het toepassingsbereik van berekeningen beïnvloeden door middel van een gevoeligheidsanalyse van specifieke modelinvoergegevens.

Hoofdstuk 3 presenteert de analyse voor het bepalen van het toepassingsbereik van metingen met als eerste een beschrijving van de onzekerheidsfactoren die de betrouwbaarheid van metingen beïnvloeden. Dit wordt gevolgd door een analyse van de meetgegevens voor Schiphol en Eindhoven Airport voor 2019. Op basis van de analyses voor deze twee luchthavens wordt gekeken tot waar vliegtuiggeluid op basis van bestaande metingen op betrouwbare wijze voor validatie en informatievoorziening kan worden gemeten.

Hoofdstuk 4 presenteert de vergelijking van berekeningen met metingen als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting en maakt

duidelijk vanaf waar de verschillen tussen beide methoden boven een acceptabele marge beginnen te komen. Hiermee wordt het toepassingsbereik van het bestaande Doc.29-model bepaald. Ook wordt in hoofdstuk 4 het effect van het toepassen van de validatie-eisen op de vergelijking inzichtelijk gemaakt.

Het rapport sluit in hoofdstuk 5 af met de belangrijkste conclusies en aanbevelingen voor eventuele vervolgonderzoeken.

2 Toepassingsbereik berekeningen vliegtuiggeluid

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van het toepassingsbereik van berekeningen van vliegtuiggeluid door middel van een gevoeligheidsanalyse van de modelinvoergegevens. De centrale vraag die hierbij beantwoord moet worden is:

“Tot waar kunnen berekeningen van vliegtuiggeluid betrouwbaar worden uitgevoerd als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting.”

Dit onderzoek richt zich op het toepassingsbereik van de ECAC-Doc.29-rekenmethode voor Schiphol die sinds 2017 wordt toegepast. De nauwkeurigheid van de resultaten van geluidberekeningen wordt bepaald door een relatief groot aantal factoren. Deze factoren zijn onder te verdelen in de volgende twee categorieën:

1. vereenvoudigingen (aannamen) in de rekenmethode ten opzichte van de werkelijkheid;
2. onnauwkeurigheden, onzekerheden en vereenvoudigingen (aannamen) in de gebruikte invoergegevens.

De belangrijkste factoren binnen deze twee categorieën worden in dit hoofdstuk kwalitatief besproken. Eerst wordt voor diverse factoren onderzocht in welke mate ze invloed hebben op het berekende resultaat. Daarna volgt een totaaloverzicht van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse op basis van een variatie van de betreffende invoergegevens.

2.1 Aanpak en methodologie

Om inzicht te krijgen in het toepassingsbereik van berekeningen is eerst een inventarisatie gemaakt van alle (globale en lokale) factoren die de nauwkeurigheid van berekeningen beïnvloeden en is beschreven hoe in de berekeningen rekening wordt gehouden met deze factoren. Globale factoren, zoals de invloed van temperatuur en luchtvochtigheid, zijn grotendeels onderdeel van het PAMV-validatietraject maar worden ook in deze analyse gekwantificeerd. Het kwantificeren van effecten op de geluidbelasting van lokale omgevingsfactoren, zoals lokale reflecties of afscherming van geluid, valt buiten de scope van de PAMV.

Van de factoren is vervolgens aangegeven welke impact ze hebben op de resultaten van berekeningen. Dit is gebaseerd op indicatieve berekeningen. De indicatieve berekeningen zijn bedoeld om inzicht te geven in de locatie waar – als functie van de afstand tot de start-/landingsbaan en als functie van de geluidbelasting – de verschillende factoren de nauwkeurigheid van berekeningen kunnen beïnvloeden (bijvoorbeeld dicht bij een luchthaven of er juist ver vandaan) en van de grootte van dit effect.

De indicatieve berekeningen zijn uitgevoerd met het Doc.29-geluidmodel voor Schiphol, op basis van de verkeersverdeling van het jaar 2018. Om een algemeen beeld van de diverse effecten te kunnen geven is het verkeer op één start- en landingsbaan geplaatst. Daarbij is het aantal

bewegingen gereduceerd, zodat de totale hoeveelheid verkeer realistisch is voor één baan, waarbij wel gezorgd is voor een representatieve verkeerssamenstelling voor Schiphol. De effecten voor starts en landingen zijn afzonderlijk beschouwd, als functie van de afstand tot de start-/landingsbaan. Daarbij is aangegeven wat de typische afstanden zijn van de 45, 48 en 58 L_{den} -contouren voor Schiphol ten opzichte van de baan, waarmee inzichtelijk wordt bij welke geluidbelastingen welke onnauwkeurigheden kunnen optreden.

De resultaten kunnen onder andere gebruikt worden om vast te stellen:

- welke factoren de grootste invloed hebben op de nauwkeurigheid van de berekeningen;
- waar, als functie van de afstand tot de baan en de geluidbelasting, de onnauwkeurigheid in de berekeningen het grootst is;
- of de nauwkeurigheid van berekeningen betekenisvol verhoogd kan worden door factoren in de berekeningen aan te passen.

2.2 Aannamen behorend bij de rekenmethodiek en invoergegevens

Met betrekking tot de rekenmethode gelden de volgende vereenvoudigingen en aannamen:

1. Er wordt in de rekenmethode aangenomen dat de omgeving vlak is en dus geen bebouwing kent. Er wordt geen rekening gehouden met afscherming en reflecties door bijvoorbeeld hoogbouw.
2. Het geluid wordt berekend op 1,5 m boven een zachte bodem (gras). Vooral als het vliegtuig vanuit de waarnemer gezien relatief laag aan de horizon staat, kunnen er bij andere condities verschillen optreden met de praktijk. Deze verschillen worden veroorzaakt door de hoogte en ondergrond, die bepalen hoeveel geluid wordt geabsorbeerd en/of gereflecteerd. Een lage elevatiehoek leidt tot laterale spreidingseffecten die niet makkelijk gemodelleerd kunnen worden.
3. De omgeving is stil en er wordt geen rekening gehouden met mogelijke andere geluidbronnen die bijvoorbeeld vliegtuiggeluid kunnen maskeren. Passages met relatief lage geluidsniveaus zullen daardoor in de praktijk niet altijd waarneembaar zijn.
4. De definitie van de geluidbron is eenvoudig. Er geldt (wel of niet) een zeer beperkte laterale richtingsafhankelijkheid van het geluid en geen longitudinale richtingsafhankelijkheid. Dit laatste aspect hoeft bij een volledige vliegpassage geen beperking te zijn, maar kan in specifieke situaties, zoals op locaties achter de startrol, wel een rol spelen. Verder is de bronsterkte vaak vooral van het motorvermogen afhankelijk en slechts in beperkte mate van de vliegtuigconfiguratie (bijvoorbeeld vleugellekken). Bij starts is het motorgeluid dominant, maar bij landingen speelt de vliegtuigconfiguratie een grotere rol door een lager motorvermogen en meer airframe noise (kleppen, onderstel). Daarnaast is de vliegsnelheid geen onafhankelijke variabele, maar typisch gebaseerd op een vaste waarde per vluchtfase. De gebruikte condities zijn representatief voor startend en naderend verkeer nabij de luchthaven. Op grotere afstand van de luchthaven zijn de snelheden in de praktijk over het algemeen

hoger en dit zou, vooral in combinatie met relatief weinig geluid van de motoren (naderingen), in de praktijk tot andere niveaus kunnen leiden.

Met betrekking tot de invoergegevens gelden de volgende vereenvoudigingen, aannamen en onnauwkeurigheden:

5. Er worden in de berekeningen voor Schiphol vaste weersomstandigheden verondersteld, gebaseerd op de Internationale Standaard Atmosfeer (ISA). Dit wil bijvoorbeeld zeggen dat variaties in windrichting en snelheid, temperatuur en luchtvochtigheid gedurende het jaar, alsook afwijkingen ten opzichte van de ISA niet worden meegenomen, terwijl deze wel effect hebben op de propagatie van het geluid. Bij het bepalen van de geluidbelasting op jaarbasis zullen veel van de variaties die in de praktijk voorkomen elkaar minimaal gedeeltelijk uitmiddelen. Bij de bepaling van geluidniveaus van individuele vluchten of de geluidbelasting voor een korte(re) periode geldt deze uitmiddeling niet. In het model zou meer gedetailleerd rekening kunnen worden gehouden met de weersomstandigheden, in theorie de gegevens per vlucht. Voor de toepassing van de Doc.29-rekenmethode voor de regionale luchthavens (hieronder aangeduid als 'Doc.29 regionaal') is voorgesteld om, als er gekozen wordt voor een verdere detaillering, vaste waarden per luchthaven te hanteren per seizoen (zomer en winter), gebaseerd op de openstellingstijden van de betreffende luchthaven.
6. Hoewel scenariogegevens over het algemeen betrouwbaar en compleet zullen zijn voor berekeningen van een historische periode, geldt wel dat voor een deel van de vluchten van civiele luchthavens (typisch <1 procent) vluchtgegevens gedeeltelijk ontbreken (bijvoorbeeld over het gevolgde vliegpad of over het (specifieke) vliegtuigtype), zodat een berekening niet mogelijk is. Hoewel hiervoor bij geluidberekeningen voor wordt gecorrigeerd door opschaling, wordt bij deze correctie aangenomen dat de ontbrekende vluchten een bijdrage aan de geluidbelasting leveren die gelijk is aan het gemiddelde van alle vluchten waarvoor wel gegevens zijn.
7. Er worden aannamen gedaan met betrekking tot de gevlogen startprocedure. Voor Schiphol zijn deze gebaseerd op enquêtes onder luchtvaartmaatschappijen, terwijl in de praktijk een andere startprocedure kan zijn toegepast. Voor andere luchthavens ontbreken deze gegevens nog veelal, of wordt een inschatting gemaakt op basis van radargegevens.
8. De gevlogen route wordt ook als onderdeel van de scenariogegevens gezien. Hierbij kunnen er van situatie tot situatie grote verschillen in de nauwkeurigheid optreden:
 - a. Daar waar gebruik wordt gemaakt van radargegevens, geldt een beperkte onnauwkeurigheid, welke het gevolg is van positiefouten in de radardata zelf en aannamen bij de reconstructie van de vliegbaan op basis van de radargegevens.
 - b. Radargegevens worden tot een bepaalde hoogte verwerkt, typisch tot 15.000 voet. Afhankelijk van het gebruikte rekenmodel eindigt dan de berekening, of wordt de track

vanaf dat punt geëxtrapoleerd. Voor de Doc.29-implementatie voor Schiphol wordt voor starts gerekend tot 20.000 voet, waarbij de track in de laatst bekende richting wordt verlengd. Met name op grote afstand van de luchthaven, bij lagere geluidsniveaus, kan dit verschillen geven ten opzichte van de praktijk.

- c. Daar waar in plaats van radargegevens gemodelleerde routes worden gebruikt, kunnen, afhankelijk van de kwaliteit van de gemodelleerde routes, grote positieverschillen optreden tussen model en praktijk, zeker voor individuele vluchten en op grotere afstand van de luchthaven. Voor starts kan dit ook al rondom bochten dicht bij de luchthaven optreden; voor naderingen, in het bijzonder bij civiel, groot verkeer is het effect in de laatste 12 km minimaal doordat het verkeer daar doorgaans in het verlengde van de baan vliegt.
9. Van de luchthavengegevens, met name de locaties van de baandrempels, mag verwacht worden dat ze betrouwbaar en nauwkeurig zijn. In de praktijk zullen vluchten niet allemaal op hetzelfde punt starten dan wel eindigen. Vooral zogenaamde 'intersectiestarts' (niet starten vanaf het begin van de baan) kunnen leiden tot verschillen tussen model en praktijk. In de berekeningen wordt verondersteld dat het verkeer start vanaf het begin van de baan en wordt een gemiddeld goed passend hoogteprofiel met bijbehorend motorvermogen gehanteerd. Het starten vanaf een intersectie heeft als mogelijk gevolg dat het vliegtuig lager vliegt en/of meer motorvermogen gebruikt. Het startpunt op de baan zou aangepast kunnen worden. Hierbij geldt echter wel dat de vliegprestatiegegevens die in de berekeningen gebruikt worden, gemiddeld passend zijn gemaakt, uitgaande van een startpunt op 100 meter van het begin van de baan. Als in berekeningen rekening wordt gehouden met een ander startpunt, zouden de prestatiegegevens hiervoor gecorrigeerd moeten worden.
10. Berekeningen worden doorgaans uitgevoerd in rasterpunten die, voor Schiphol, 250 meter uit elkaar liggen. Daar waar op tussenliggende punten (met behulp van interpolatie) waarden moeten worden bepaald, leidt deze beperkte resolutie tot mogelijke onnauwkeurigheden.
11. Voor de vliegtuiggegevens wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende vliegtuigtypen, met doorgaans één uitvoeringsvariant (start- en landingsgewicht, motortype) per vliegtuigtype. Dit onderscheid is binnen de geluidmodellering beperkter dan in de praktijk. Zo is het aantal verschillende typen in de praktijk groter dan beschikbaar in het model. Typen die niet beschikbaar zijn, moeten worden gerepresenteerd door een vergelijkbaar type (al dan niet met correctiefactoren voor het verschil in (certificatie)waarden van geluid, voor Schiphol gebaseerd op worst-caseaannamen bij het betreffende vliegtuigtype), wat zal leiden tot onnauwkeurigheden. Verder geldt nog dat er binnen een vliegtuigtype, afhankelijk van het gebruikte motortype en (seriematige) modificaties, sprake kan zijn van verschillende geluidemissies. De invoergegevens zijn echter niet zo fijnmazig.

12. De geluidgegevens per vliegtuigtype zijn over het algemeen aangeleverd door verschillende vliegtuigfabrikanten. Hoewel er momenteel strenge onafhankelijke verificatieprocedures zijn, is van oudere gegevens minder goed duidelijk in welke mate er onafhankelijke controles hebben plaatsgevonden. Met name voor oudere, maar nog steeds veel gebruikte, vliegtuigtypen is daardoor minder goed duidelijk hoe nauwkeurig de gegevens zijn.
13. De geluidgegevens van vliegtuigen hebben een beperkt bereik (stuwkracht en afstand). Buiten dit bereik wordt door het geluidmodel geëxtrapoleerd, waarbij het resultaat minder nauwkeurig wordt. Deze extrapolatie kan plaatsvinden op stuwkracht, afstand of beide. Extrapolatie naar lagere stuwkracht is in sommige geluidtabellen kunstmatig geblokkeerd. Extrapolatie komt typisch voor in de volgende situaties:
 - a. tijdens de startrol en de landingsrol. De eventuele effecten spelen vooral op het luchthaventerrein;
 - b. tijdens de naderingen bij lage stuwkrachtniveaus.
14. Op grote hoogte en/of afstand. Bij naderingen is in deze situatie(s) de stuwkracht, en zijn daarmee de geluidniveaus, relatief laag, zodat eventuele onnauwkeurigheden minder relevant zijn. Voor starts kan er sprake zijn van een overschatting door het model. Dit kan vooral relevant zijn bij toestellen met hoge bronniveaus, omdat hier, ook op grote afstand, de geluidniveaus nog bijdragen aan geluidbelasting. Ook de vliegtuigprestatiegegevens zijn over het algemeen afkomstig van de fabrikanten. Voor de betrouwbaarheid gelden dezelfde beperkingen als onder punt 12).
15. De prestatieprofielen (verloop van hoogte, snelheid en stuwkracht als functie van de afgelegde afstand) zijn gebaseerd op een vereenvoudigd vliegtuigprestatiemodel, onder atmosferische standaardcondities, zoals ook beschreven onder punt 5 met betrekking tot de geluidpropagatie, en onder een aanname van een horizontale tegenwindcomponent van 8 knopen. Niet-standaardcondities zullen niet alleen effect hebben op de propagatie, maar ook op de vliegtuigprestaties. Zo zal een startend vliegtuig bij veel tegenwind steiler uitklimmen.
16. De vliegtuigprestatiegegevens voor starts zijn gemodelleerd voor maximaal negen verschillende startgewichten. Op basis van afstand naar de eerste bestemming wordt bepaald welk van deze gewichten als representatief wordt verondersteld. Afhankelijk van de belading en de hoeveelheid brandstof van een vlucht zullen er verschillen zijn tussen het werkelijke startgewicht en het gemodelleerde startgewicht. Als een vliegtuig in de praktijk zwaarder is, klimt deze minder steil uit en/of wordt een hoger motorvermogen toegepast. In beide gevallen leidt dit tot hogere geluidniveaus op de grond. Als het werkelijke startgewicht beschikbaar zou zijn voor de geluidmodellering, kan de koppeling rechtstreeks op basis van het geregistreerde gewicht worden gemaakt in plaats van (indirect) via de vliegafstand.
17. De vliegtuigprestatiegegevens die in de berekeningen gebruikt worden, zijn gebaseerd op een beperkt aantal vliegprocedures voor starts en naderingen. Tussen maatschappijen kunnen er echter verschillen zijn, bijvoorbeeld in de acceleratie of in de

overgang van take-off naar klimvermogen op een ander moment. Daarnaast is vliegen, zeker het vliegen 'op de hand', mensenwerk, waarbij van vlucht tot vlucht variaties zullen ontstaan die niet gemodelleerd zijn. De prestatiegegevens kunnen (mogelijk) beter passend worden gemaakt bij de praktijk als in detail bekend is wat de (meest toegepaste) vliegprocedures zijn.

18. Het vliegprestatie-model en de resulterende vliegprestatiegegevens zijn gebaseerd op de operatie nabij de luchthaven. Voor locaties op grotere afstanden wordt extrapolatie toegepast. Vanaf welke hoogte geëxtrapoleerd wordt, verschilt per vliegtuigtype en per procedure, maar modellering boven de 10.000 voet is altijd gebaseerd op extrapolatie.
19. Het effect van bochten op de vliegprestatie is niet meegenomen. De vliegtuigprestatiegegevens zijn gebaseerd op een gemiddeld goed passend hoogteprofiel met bijbehorend motorvermogen. Het vliegen van bochten heeft invloed op de klimprestatie, , zodat minder steil geklommen wordt dan wanneer rechtuit wordt gevlogen.
20. Het effect van hoogteverschillen in de omgeving van de luchthaven ten opzichte van de luchthaven is niet meegenomen in de berekeningen voor Schiphol. De omgeving van de luchthaven Schiphol is nagenoeg vlak. De minimale hoogteverschillen hebben een verwaarloosbare invloed op de geluidbelasting. Voor Doc.29 regionaal is voorgesteld om alleen rekening te houden met hoogteverschillen als deze minimaal 25 meter bedragen (dit speelt eigenlijk alleen voor MAA).
21. Aannamen in de profielen, bijvoorbeeld ten aanzien van de mate van 'derating' voor startend verkeer (derating betreft het starten met minder motorvermogen dan de maximale stuwkracht). Daarnaast worden er zowel voor starts als voor landingen aannamen gedaan over de momenten waarop bepaalde vleugelklepstanden worden geselecteerd. Specifiek voor naderingen zijn er ook nog aannamen over het moment waarop het onderstel wordt neergelaten en hoeveel motorvermogen wordt toegepast op de baan ('reverse thrust').

De hierboven benoemde aspecten hebben invloed op de nauwkeurigheid van geluidberekeningen. Deze aspecten kunnen over het algemeen worden ingedeeld in een van de volgende vier categorieën:

1. Variatie of spreiding: veel van de genoemde aspecten hebben tot gevolg dat de berekende niveaus voor een bepaalde vlucht of dag te hoog zijn en vervolgens voor andere vluchten of dagen te laag zijn. Dergelijke effecten zullen elkaar minimaal gedeeltelijk uitmiddelen en hebben daarmee een beperkt(er) effect op de jaarlijkse geluidbelasting.
2. Uitzonderlijke situaties: Een aantal aspecten komt slechts in uitzonderlijke situaties voor, zoals doorstarts of onjuiste vluchtgegevens. Het effect op de geluidbelasting is dus minimaal.
3. Lokale effecten: Effecten van bijvoorbeeld afscherming, reflecties, terreinhoogte, waarnemingshoogte en type ondergrond kunnen lokaal tot systematische afwijkingen leiden. Dit speelt met name als het vliegverkeer vanuit deze locatie gezien relatief laag aan de horizon staat. In hoofdstuk 4 wordt de vergelijking

gepresenteerd van berekende en gemeten geluidbelasting waarbij met deze effecten rekening wordt gehouden door het toepassen van de validatie-eisen zoals bepaald voor de nationale meetstrategie (Sahai 2021).

4. Afstandsafhankelijk: Als laatste zijn er onzekerheden die typisch toenemen met de afstand tot de luchthaven, zoals verschillen tussen de gemodelleerde routes en profielen, extrapolatie van gegevens en propagatie onder niet-standaardomstandigheden. Dit betekent automatisch ook dat bij een lagere geluidbelasting de onzekerheden groter worden.

Onder de aanname dat voor categorie 1 geldt dat onnauwkeurigheden elkaar over een langere periode minimaal gedeeltelijk zullen opheffen en dat de invloed van categorie 2 en 3 op het geheel beperkt is, vormt categorie 4 met afstandsafhankelijke aspecten naar verwachting de belangrijkste beperking voor de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de resultaten, waarbij deze beperkingen toenemen met de afstand tot de luchthaven.

Wat betreft de geluidbelasting, geldt dat voor een grote luchthaven als Schiphol een bepaalde contour verder van de luchthaven ligt dan bij een kleinere regionale luchthaven. Daardoor mag verwacht worden dat bijvoorbeeld de 48 dB L_{den} bij Schiphol, bij een gelijke modelleringsaanpak, een grotere onzekerheid kent dan dezelfde contour bij een regionale luchthaven. De hoogte van de geluidbelasting is echter niet allesbepalend. Zo kan bijvoorbeeld geluidbelasting van 48 L_{den} opgebouwd zijn uit 100.000 overvluchten met een SEL-waarde van 70 dBA, maar ook uit 10.000 overvluchten van 80 dBA. In het laatste geval zullen de onzekerheden naar verwachting lager zijn.

De volgende paragraaf gaat nader in op berekeningen om de afstandsafhankelijkheid van diverse aspecten in kaart te brengen.

2.3 Kwantificatie van onzekerheden

Om de effecten van in de vorige paragraaf beschreven onzekerheden te kunnen kwantificeren, zijn diverse testberekeningen uitgevoerd met het Doc.29-rekenmodel voor Schiphol.

Deze paragraaf geeft een overzicht op hoofdlijnen van de resultaten van de indicatieve berekeningen. De berekeningen hebben tot doel om inzicht te geven in de locatie waar bepaalde invoerparameters een effect kunnen hebben (bijvoorbeeld dicht bij de luchthaven of er ver vandaan) en in de grootte van dit effect. De algemene aanpak staat beschreven in paragraaf 2.1. Bijlage 1 geeft meer detailinformatie over de individuele berekeningen die voor dit doel zijn uitgevoerd.

Met deze aanpak zijn berekeningen uitgevoerd om inzicht te geven in de volgende aspecten:

1. Het effect van het moment waarop het landingsgestel uitgekapt wordt.
2. Effecten van temperatuur en luchtvochtigheid op de demping van geluid door de atmosfeer.

3. Het effect van wind op de vliegtuigprestaties en het effect van deze veranderende vliegtuigprestaties op de uitkomsten van geluidberekeningen.
4. Het effect van de gekozen startprocedure (NADP1¹ of NADP2).
5. Het effect van extrapolatie van de geluidproductie indien de stuwkracht van een vliegtuig lager is dan de laagste stuwkrachtwaarde in de geluidtabel.
6. Het effect van de temperatuur op de vliegtuigprestaties.
7. Het effect van aannamen met betrekking tot de gewichtsklassen van startend verkeer.
8. Het effect van de mogelijke versnelling van vliegverkeer boven de 10.000 voet.
9. Het effect van vliegtuigen die bochten maken.
10. Het effect van zogeheten 'derating'. Dit betreft startprocedures waarbij een toestel niet met de maximale hoeveelheid stuwkracht vertrekt.

Per aspect is onderzocht hoe groot het effect van de parameter op de nauwkeurigheid van de berekende geluidbelasting is en waar het grootste effect als afstand tot de luchthaven optreedt. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

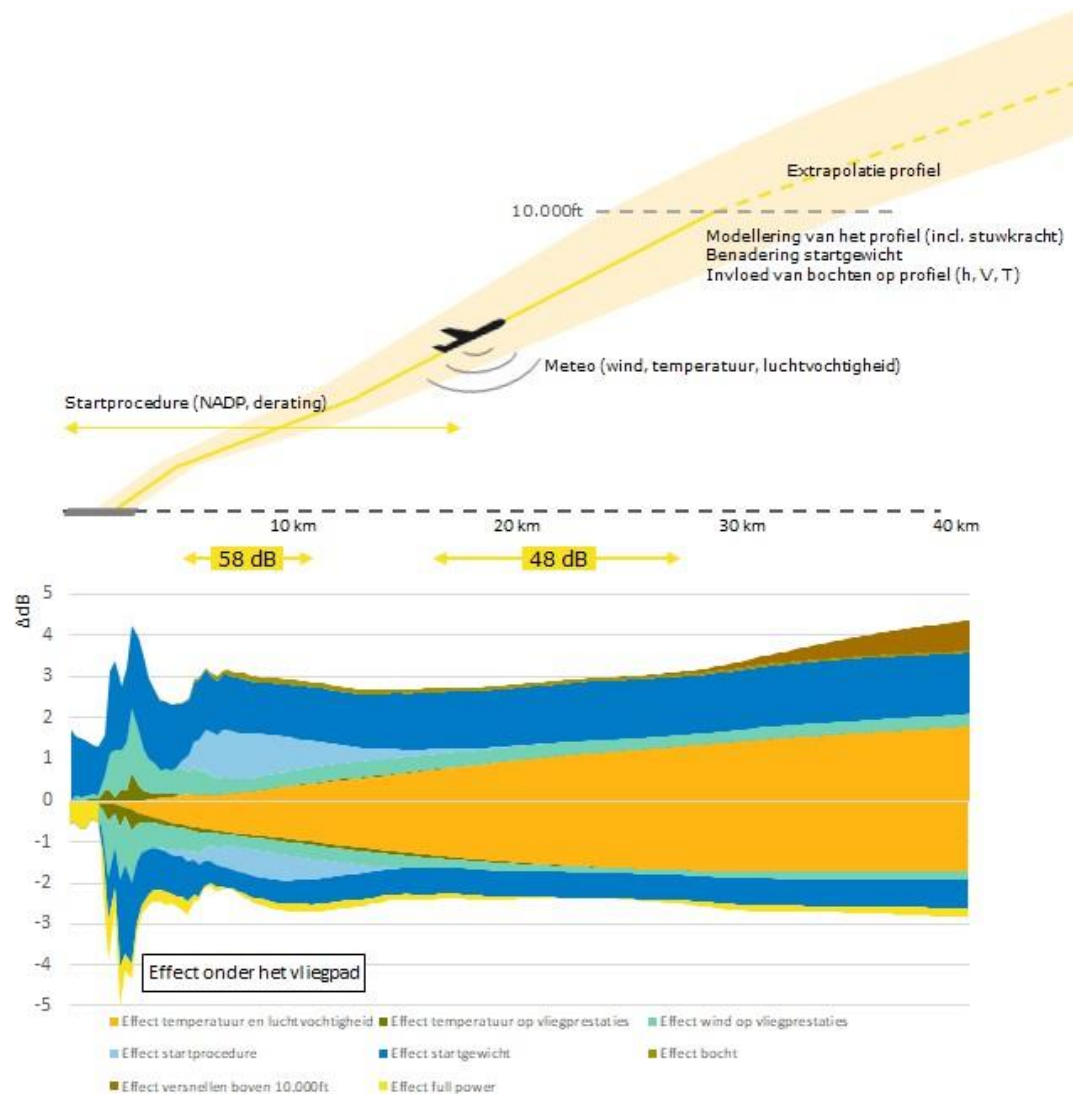
Tabel 1 Gevoeligheidsanalyse voor het variëren van een aantal invoergegevens en het betreffende effect op de grootte van de geluidbelasting en locatie als afstand tot de luchthaven

Parameter nummer	Parameter	Grootte effect (in dB L_{den})	Locatie effect (in km)
1	Uitklappen landingsgestel	Ongeveer -0,2 tot 0,5 dB.	Tussen 10-20 km voor landing, recht onder het vliegp pad.
2	Effect temperatuur en luchtvochtigheid op demping	Ongeveer -2 tot 2 dB.	Vanaf ongeveer 5 km van de baan en verder.
3	Windsnelheid	Ongeveer -1,5 tot 1,5 dB dicht bij luchthaven, enkele tiende dB's op grotere afstand.	Bij starts, met name recht onder vliegp pad en vooral dicht bij de luchthaven.
4	Startprocedure	Maximale effecten na ongeveer 5 km, -0,8 tot 1,1 dB onder het vliegp pad, -2 tot 1,8 dB op 2,5 km opzij van het vliegp pad.	Tot ongeveer 15 km na de start, zowel onder als 2,5 km opzij van het vliegp pad, met een groter effect opzij van het vliegp pad.
5	Extrapolatie geluidproductie	Zeet kleine effecten van maximaal 0,02 dB.	Zeet kleine effecten op alle locaties.

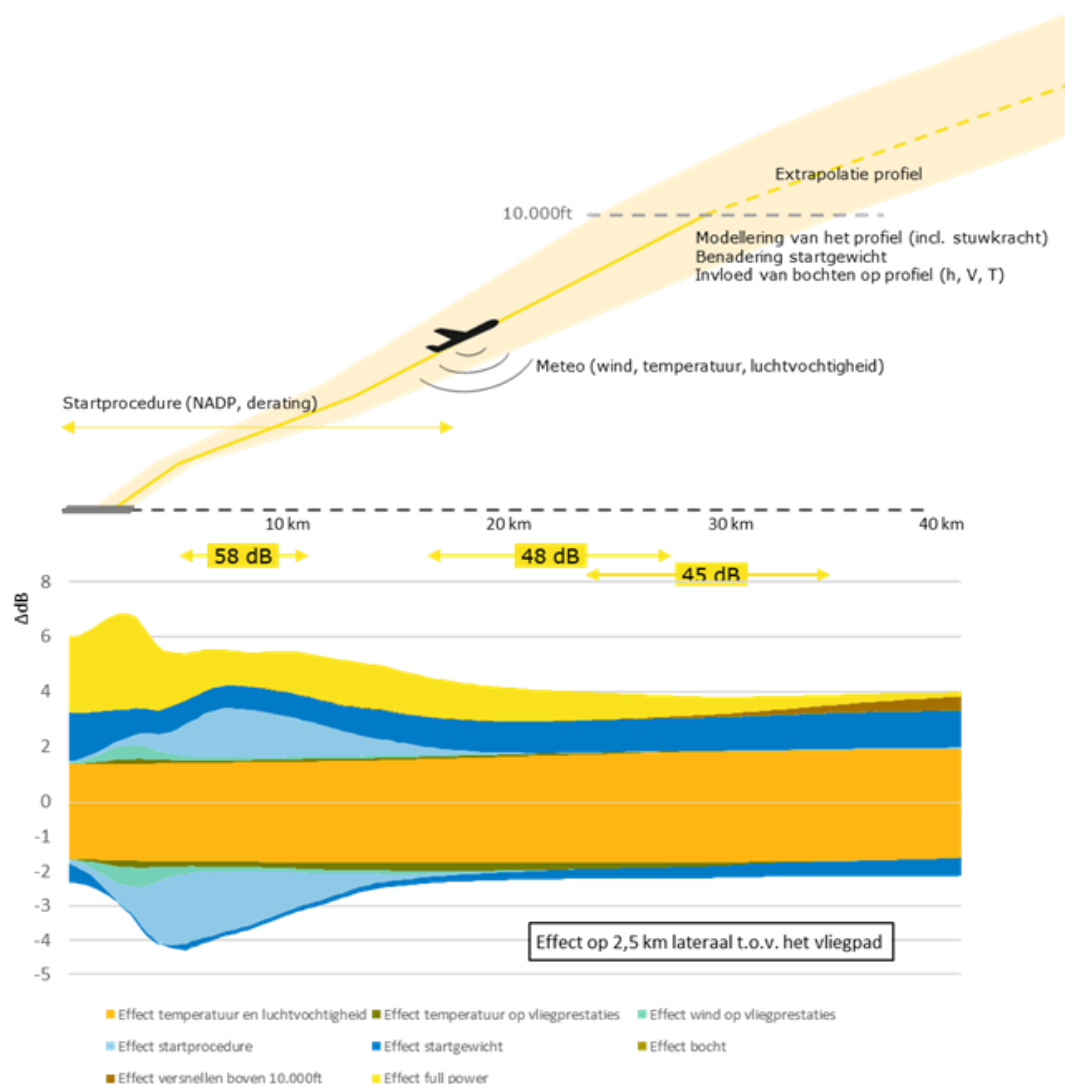
¹ NADP staat voor Noise Abatement Departure Procedure, de NADP1 en NADP2 procedure zijn beide startprocedures waarbij de hoeveelheid geluid op de grond varieert.

Parameter nummer	Parameter	Grootte effect (in dB L _{den})	Locatie effect (in km)
6	Effect temperatuur op vliegtuigprestaties	Maximaal ongeveer -0,5 tot 0,5 dB recht onder het vliegp pad, op 2,5 km opzij van het vliegp pad ongeveer -0,2 tot 0,2 dB.	Met name enkele kilometers na de start is er een effect dat recht onder het vliegp pad het sterkst is.
7	Gekozen gewichtsklasse	Op en dicht bij de baan ruim -2 tot ruim 2 dB, op grotere afstand -0,8 tot 1,5 dB onder het vliegp pad en -0,5 tot 1,5 dB op 2,5 km opzij van het vliegp pad.	Alleen voor starts, grootste effect op en dicht bij de baan, op grotere afstand vrijwel constant effect dat onder het vliegp pad iets groter is dan opzij van het vliegp pad.
8	Versnelling boven 10.000 voet	Effect vanaf 30 km na start en loopt op tot iets minder dan 1 dB op 40 km na start.	Bij starts, zowel onder als opzij van het vliegp pad, vanaf 30 km.
9	Bochten	Zeer kleine effecten tot ongeveer 0,1 dB vanaf ongeveer 5 km na de start.	Vrijwel geen effect, maar nog het grootste effect recht onder het vliegp pad.
10	Derating startprocedures	Ruim 3 dB nabij luchthaven op 2,5 km opzij van vliegp pad; op grotere afstand neemt het effect af tot enkele tiende dB's op 40 km.	Op de baan en daarbuiten alleen 2,5 km opzij van het vliegp pad, waarbij het effect dicht bij de baan het sterkst is.

Het gezamenlijke effect van de onderzochte aspecten voor starts is gevisualiseerd in Figuur 1 en Figuur 2. Deze figuren tonen de effecten respectievelijk recht onder het vliegp pad en op 2,5 km lateraal ten opzichte van het vliegp pad. Indicatief laten de figuren ook zien op welke afstanden respectievelijk de 58, 48 en 45 dB-contouren liggen voor Schiphol. Omdat deze contouren niet overal op dezelfde afstand van de luchthaven liggen geeft dit een globale indicatie.



Figuur 1 Gezamenlijk effect van diverse invoerparameters voor starts onder het vliegpad

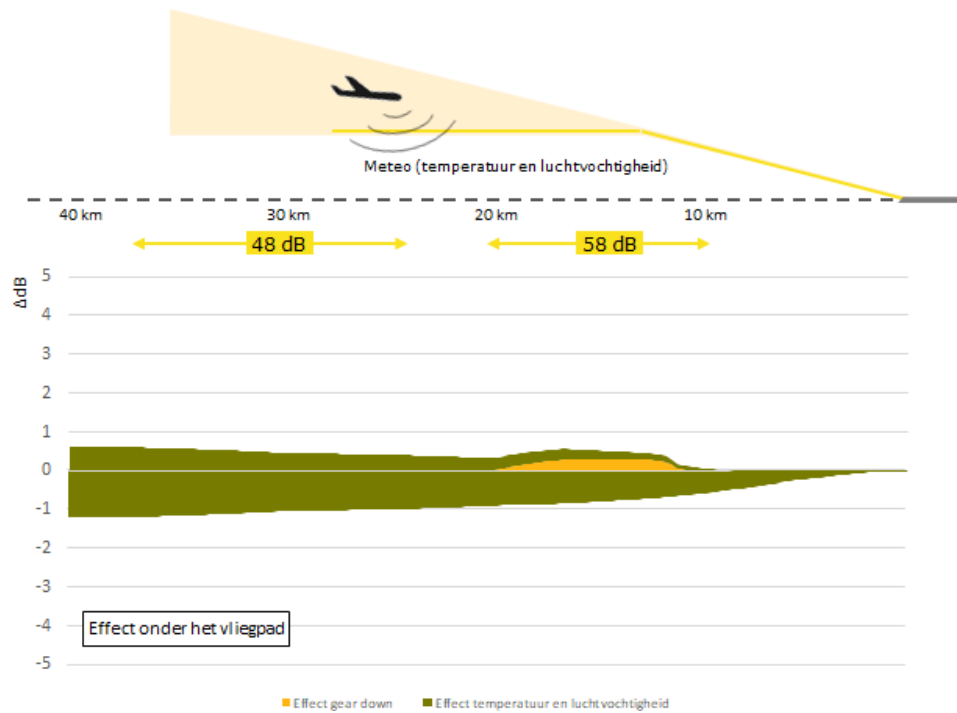


Figuur 2 Gezamenlijk effect van diverse invoerparameters voor starts op 2,5 km lateraal ten opzichte van het vliegpad

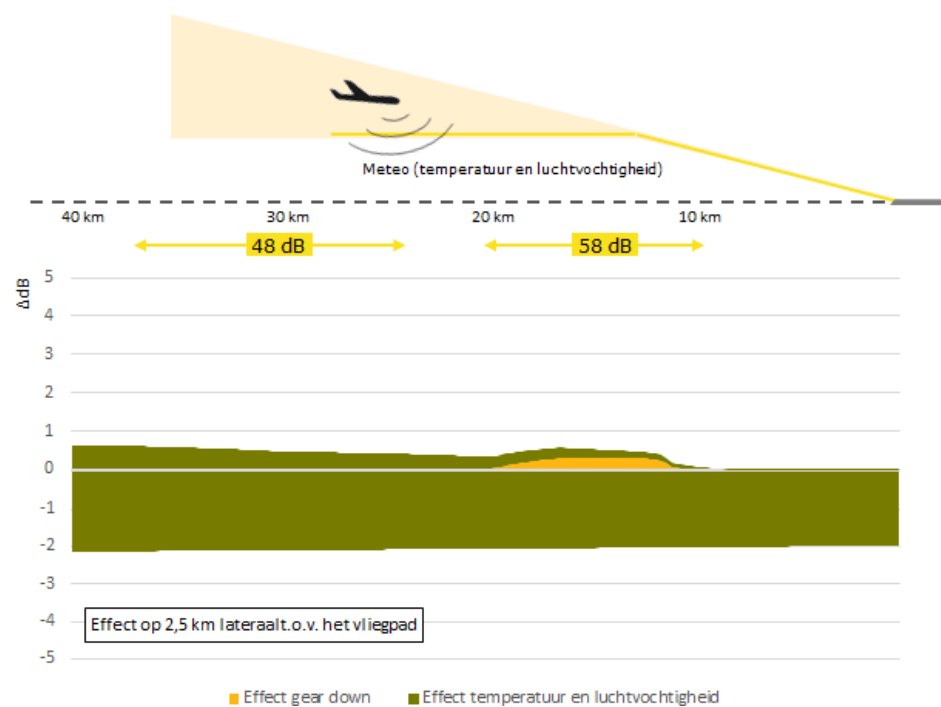
De twee meest opvallende trends in Figuur 1 en Figuur 2 zijn:

1. De grootste effecten treden dicht bij het vliegveld op, op afstanden tussen de 2 en 10 km. De grootste bijdrage aan dit verschijnsel wordt geleverd door de gekozen startprocedure, het effect van wind op de vliegprestaties, het startgewicht en het al dan niet toepassen van derating (deze laatste heeft met name een effect aan de zijkant van het vliegpad).
2. Op grotere afstand nemen de effecten slechts beperkt (onder het vliegpad) of vrijwel niet (opzij van het vliegpad) toe. Met name de effecten van versnellen boven de 10.000 voet en van temperatuur en luchtvochtigheid op demping zorgen voor grotere effecten op grotere afstand van de luchthaven. De gevolgen van versnellen boven de 10.000 voet worden zichtbaar vanaf ongeveer 30 km vanaf het startpunt.

De effecten voor landingen zijn samengevat in Figuur 3 en Figuur 4. Deze figuren laten zien dat voor landingen minder parameters een rol spelen dan voor de starts.



Figuur 3 Gezamenlijk effect van diverse invoerparameters voor landingen onder het vliegpad



Figuur 4 Gezamenlijk effect van diverse invoerparameters voor landingen op 2,5 km lateraal ten opzichte van het vliegpad

Voor landend verkeer is te zien dat het moment waarop het landingsgestel wordt uitgekapt een beperkt effect heeft tussen de 20 en 10 km voor de baan. Het effect van temperatuur en vochtigheid op de luchtdemping loopt recht onder het vliegp pad in de eerste 15 tot 20 km relatief snel op, daarna is de toename van het effect beperkt. Op 2,5 km lateraal ten opzichte van het vliegp pad is een groter effect zichtbaar, waarbij minder verschillen optreden afhankelijk van de afstand. Dit hangt onder andere samen met het feit dat de minimale afstand in dit geval 2,5 km bedraagt, omdat de effecten op 2,5 km naast de vliegbaan geanalyseerd zijn.

2.4 Samenvatting en discussie toepassingsbereik van berekeningen

Voor zowel startend als landend verkeer kan geconcludeerd worden dat het afstandseffect op de nauwkeurigheid van de berekening beperkt is, omdat variaties in de invoergegevens niet vanaf een bepaalde afstand of geluidbelasting tot een grote afwijking in de berekende geluidbelasting leiden. De resultaten geven geen aanleiding om het toepassingsbereik voor berekeningen van startend en landend verkeer te limiteren.

De grootste onzekerheden voor starts treden op tussen de 2 en 10 km en vanaf 30 km na het startpunt; dit laatste geldt met name recht onder het vliegp pad omdat dit effect op 2,5 km opzij van het vliegp pad minder duidelijk zichtbaar is. Voor landingen treden recht onder het vliegp pad de grootste onzekerheden ver van de luchthaven op. Vanaf ongeveer 20 km vanaf de luchthaven blijven de effecten vrijwel gelijk.

De analyse in dit hoofdstuk heeft zich grotendeels beperkt tot de invoergegevens en hun effect op de berekende geluidbelasting. Hiernaast zijn er ook aannamen in de rekenmethode zelf – dat wil zeggen, in het model –, die tevens de uitkomst van het rekenmodel beïnvloeden. Een aanpassing van de rekenmethode voor het Doc.29-rekenmodel valt buiten de huidige scope van de PAMV, maar de uitkomsten van dit onderzoek kunnen wel aanleidingen bieden voor aanpassing van de rekenmethode die op Europees niveau dienen te worden besproken en uitgevoerd. In hoofdstuk 4 worden de berekende resultaten voor de geluidbelasting vergeleken met de gemeten geluidbelasting voor het gebruiksjaar 2019 voor Schiphol. Dankzij de vergelijking van berekende en gemeten geluidbelasting kan gekeken worden vanaf waar, zowel als functie van afstand tot de luchthaven als geluidbelasting, het verschil tussen berekeningen en metingen significant begint toe te nemen. Aangezien de gevoeligheidsanalyse van dit hoofdstuk geen beperkingen laat zien wat betreft de plausibiliteit van de rekenresultaten verder weg en in gebieden met een lage geluidbelasting, wordt de vergelijking met metingen als de volgende stap gezien om het toepassingsbereik van het model te bepalen. Voordat de vergelijking van berekeningen met metingen wordt uitgevoerd, is eerst in hoofdstuk 3 het toepassingsbereik van metingen geanalyseerd.

3 Toepassingsbereik metingen vliegtuiggeluid

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid. De centrale vraag die hierbij beantwoord moet worden, is:

“Tot waar kunnen metingen van vliegtuiggeluid voor verschillende doelen betrouwbaar worden uitgevoerd als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting?”

Het onderzoek richt zich primair op het bepalen van het toepassingsbereik van metingen voor het meetdoel validatie, dat wil zeggen, tot waar metingen kunnen worden gebruikt voor het valideren van rekenmodellen van vliegtuiggeluid. Als secundair doel zal het onderzoek ook inzicht bieden in het toepassingsbereik van metingen voor informatievoorziening aan omwonenden. Hiermee dient te worden bepaald tot waar metingen van vliegtuiggeluid betrouwbaar kunnen worden gebruikt voor het informeren van omwonenden over de geluidssituatie in hun omgeving.

Het hoofdstuk begint met een beschrijving van de gevolgde aanpak om de gestelde onderzoeksvraag te beantwoorden. Hierna worden de onzekerheidsfactoren beschreven die de betrouwbaarheid van metingen beïnvloeden en laten we zien hoe met deze factoren in dit onderzoek wordt omgegaan. Vervolgens wordt de analyse gepresenteerd van de meetgegevens voor twee luchthavens voor het kalenderjaar 2019 – Schiphol als de grootste luchthaven van Nederland en Eindhoven Airport als voorbeeld van een regionale luchthaven van nationale betekenis. Op basis van de analyses voor deze twee luchthavens wordt gekeken of en in hoeverre een antwoord kan worden gegeven op de gestelde onderzoeksvraag.

3.1 Aanpak en methodologie

Om inzicht te krijgen in factoren die het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid potentieel beïnvloeden, is begonnen met een inventarisatie van diverse factoren die hierbij een rol spelen. Deze lijst is opgesteld op basis van zowel een literatuuronderzoek als eerdere ervaring op het gebied van meten van vliegtuiggeluid. Het effect van deze factoren is vervolgens nader onderzocht voor reeds uitgevoerde metingen voor het kalenderjaar 2019 afkomstig van geluidmeetnetten rondom Schiphol en Eindhoven Airport. De meetposten van de luchthavens zijn vervolgens op twee manieren gesorteerd:

1. Op basis van toenemende afstand van de luchthaven in km;
2. Op basis van afnemende geluidbelasting in L_{den} . Dichter bij de luchthavens treedt de hoogste geluidbelasting op en naarmate verder van de luchthaven of vliegroutes wordt gemeten, neemt de geluidbelasting af.

De relevante meetgegevens van elke meetpost zijn vervolgens geanalyseerd, als functie van afstand tot de luchthaven en als functie van de geluidbelasting in L_{den} . Hiermee wordt inzicht verkregen in het

verloop van diverse parameters als functie van afstand en geluidbelasting en wordt onderzocht vanaf welke afstand, respectievelijk geluidbelasting er sprake kan zijn van (consistent) minder betrouwbare metingen.

Voor de analyse van het toepassingsbereik van metingen voor het meetdoel validatie worden de validatie-eisen uit de nationale meetstrategie (Sahai 2021) toegepast en wordt het effect aangetoond van het toepassen van aanvullende meeteisen conform de PAMV-validatieaanpak voor windsnelheid, neerslag en elevatiehoek (Sahai 2022).

Leidend bij het bepalen van het toepassingsbereik van metingen is de gedachte dat de geluidniveaus als gevolg van vliegtuiggeluid in het algemeen lager zijn bij grote afstanden van de luchthaven en bij lage geluidbelasting. Vanaf een nog te bepalen afstand of geluidbelasting zouden de gemeten geluidniveaus zodanig laag worden dat ze door het achtergrondgeluid worden verstoord, waardoor de metingen als niet of minder betrouwbaar moeten worden beschouwd. Metingen met maximale geluidniveaus (L_{Amax}) die consistent minimaal 10 dB boven het achtergrondgeluid uitkomen, worden volgens internationale normen (ISO-20906/TC 2009) als betrouwbaar beschouwd. Dit is dan ook de reden waarom dit criterium als een validatie-eis werd opgenomen tijdens het bepalen van de PAMV nationale meetstrategie. Indien de maximale geluidniveaus consistent lager uitkomen dan 10 dB boven het achtergrondgeluidniveau, zijn de metingen niet op betrouwbare wijze van het achtergrondgeluid te onderscheiden. In dat geval zijn de metingen ook niet meer bruikbaar voor het valideren van rekenmodellen.

Hiernaast is het van belang dat een meetpost ook verder weg van de luchthaven en in gebieden met lage geluidbelasting een voldoende aantal vliegbewegingen kan meten om de representatieve geluidbelasting op die meetlocatie betrouwbaar te bepalen. Hierbij gaat het om zowel het absolute aantal metingen van vliegtuiggeluid die op een bepaalde meetlocatie worden geregistreerd als om het relatief aantal metingen op die meetlocatie, dat wil zeggen, het percentage van geregistreerde vliegbewegingen in relatie tot alle vliegbewegingen die op de meetlocatie meetbaar waren.

Voor het door beide luchthavens gebruikte meetsysteem, dat in dit rapport is geanalyseerd, geldt dat zogeheten 'drempelwaarden' worden toegepast per meetpost. Dit kan van invloed zijn op de gemeten data voor lage geluidniveaus, want metingen van vliegtuiggeluid met maximale niveaus onder de drempelwaarde worden door het meetsysteem niet geregistreerd. Dit kan betekenen dat een deel van de metingen in de geanalyseerde dataset ontbreekt en vooral informatie over hogere geluidniveaus beschikbaar is. Op de vraag welke impact deze constatering heeft voor de conclusies over het toepassingsbereik van metingen gaan we later in dit hoofdstuk nader in.

3.2 Onzekerheidsfactoren bij het meten van vliegtuiggeluid

Vliegtuiggeluid betrouwbaar meten is niet altijd eenvoudig. Er zijn verschillende factoren die tot onzekerheden kunnen leiden in de betrouwbaarheid van het gemeten vliegtuiggeluid. Een aantal van deze factoren is in het rapport over de nationale meetstrategie genoemd (Sahai 2021). Ook in internationale normen (ISO-20906/TC 2009) en literatuur over het meten van vliegtuiggeluid is een aantal factoren beschreven waarmee bij het (onbemand) uitvoeren van betrouwbare metingen rekening dient te worden gehouden. In deze paragraaf worden de meest relevante onzekerheidsfactoren beschreven die het toepassingsbereik van metingen kunnen beïnvloeden. Deze kunnen in het algemeen afhankelijk zijn van:

1. De meetlocatie en de omgeving van de meetpost;
2. De weersomstandigheden;
3. De positie van het vliegtuig ten opzichte van de meetpost.

Daarnaast worden in deze paragraaf aanvullende factoren genoemd die niet direct tot verstoorde metingen leiden maar wel bepalen hoe betrouwbaar vliegtuiggeluid, ook bij lage geluidsniveaus, kan worden gemeten.

3.2.1 Factoren die afhankelijk zijn van de meetlocatie

De omgeving en ligging van de meetlocatie kunnen tot onzekerheden leiden in de betrouwbaarheid van de meting. In Tabel 2 worden de meetlocatie-gerelateerde factoren samengevat die voor het onderzoek naar het toepassingsbereik van metingen het meest relevant zijn. In deze tabel staat ook aangegeven welk effect de betreffende factor heeft op metingen van vliegtuiggeluid en hoe in deze studie met deze factor rekening wordt gehouden.

Tabel 2 Relevante factoren die afhankelijk zijn van de meetlocatie:

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
Afstand tot de luchthaven of vliegroutes (ligging meetpost)	Geluidsniveaus van vliegtuiggeluid nemen met toenemende afstand van de luchthaven af en kunnen op grote afstanden makkelijker beïnvloed worden door hoge achtergrondgeluidsniveaus of harde wind. Hetzelfde geldt in principe voor locaties die verder bij de vliegroutes vandaan liggen en waar de geluidsniveaus doorgaans laag zijn.	Ten eerste wordt per meetlocatie de afstand tot de luchthaven en de geluidbelasting op de meetpost bepaald in L_{den} . Vervolgens wordt het verloop van verschillende relevante parameters zoals geluidsniveaus, het achtergrondgeluid maar ook vlieghoogte e.d. weergegeven als functie van de afstand tot de luchthaven en geluidbelasting. Door middel van een visuele weergave van het verloop wordt geanalyseerd vanaf

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
		welke afstand of geluidbelasting de geluidniveaus in de buurt van het achtergrondgeluid beginnen te komen.
Afscherming	Afschermende objecten kunnen tot verstoorde metingen leiden door lagere waarden van het gemeten geluid te registreren dan wat aan vliegtuiggeluid toe te schrijven is.	Deze factor is gedekt als validatie-eis. Er wordt in de analyse onderscheid gemaakt tussen meetposten die geschikt zijn voor validatie en meetposten die geschikt zijn voor informatievoorziening.
Reflecties	Leiden doorgaans tot hogere waarden van het gemeten geluid dan wat aan vliegtuiggeluid toe te schrijven is.	Gedekt als validatie-eis. Er wordt in de analyse onderscheid gemaakt tussen meetposten die geschikt zijn voor validatie en meetposten die geschikt zijn voor informatievoorziening.
Achtergrondniveau (L95)	Bepaalt voor een deel in hoeverre gemeten vliegtuiggeluid van het achtergrondgeluid te onderscheiden is. Hoog achtergrondgeluid vergroot de kans dat vliegtuiggeluid door de geluidmeter niet wordt herkend of geregistreerd. In het rapport over de nationale meetstrategie is voor validatiedoelen een minimaal verschil van 10 dB tussen L_{Amax} en het achtergrondgeluidniveau L95 vereist. Voor informatievoorziening is een minimaal verschil aan te bevelen maar niet verplicht.	Het achtergrondniveau L95 is het geluidniveau dat voor 95% van de tijd van de meting wordt overschreden. Per meetlocatie wordt het verschil in kaart gebracht tussen gemeten L_{Amax} -waarden en het L95-niveau als functie van afstand tot de luchthaven en als functie van geluidbelasting in L_{den} .

3.2.2

Factoren die afhankelijk zijn van weersomstandigheden

Weersomstandigheden kunnen ook de onzekerheid in gemeten geluidniveaus vergroten, zoals bij harde wind of tijdens regen of sneeuw. In Tabel 3 worden weersfactoren samengevat die voor het onderzoek naar het toepassingsbereik van metingen het meest relevant zijn. In deze tabel wordt ook aangegeven hoe de betreffende factor tot

onzekerheid kan leiden in de meting en hoe in deze studie met deze factor rekening wordt gehouden.

Tabel 3 Relevante factoren afhankelijk van weersomstandigheden:

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
Windsnelheid	Kan gemeten geluidniveaus beïnvloeden. Volgens ISO-20906 is de kans groot dat metingen bij windsnelheden van >10 m/s verstoord zijn. In een eerdere versie van ISO-20906 lag deze grenswaarde zelfs bij 5 m/s (Noise 1978).	De windsnelheid per meetpost wordt in kaart gebracht door een koppeling te maken met het dichtstbijliggende KNMI-weerstation. Vervolgens worden diverse 'filters' voor de windsnelheid op de meetdata toegepast om het effect te zien van verschillende windsnelheden op het aantal beschikbare metingen dat aan de validatie-eis voldoet.
Windrichting	Kan leiden tot een verhoging (versterking) of verlaging (demping) van het geluidniveau door de propagatie van het geluid te beïnvloeden, bijvoorbeeld door te leiden tot schaduwzones.	De windrichting kan de voortplanting van het geluid beïnvloeden, maar leidt niet direct tot een verstoorde of onzekere meting. Het effect van de windrichting voor metingen wordt daarom buiten de analyse gelaten voor dit onderzoek.
Luchtvochtigheid	Beïnvloedt de hoeveelheid luchtdemping van het geluid.	Luchtvochtigheid kan de voortplanting van het geluid beïnvloeden, maar leidt niet direct tot een verstoorde of onzekere meting. Daarom wordt het effect hiervan niet verder in de analyse van metingen meegenomen. Wel is de invloed hiervan op berekende resultaten in hoofdstuk 2 geanalyseerd.
Temperatuur	Beïnvloedt de hoeveelheid luchtdemping van het geluid.	Speelt een vergelijkbare rol als luchtvochtigheid en kan de demping van het geluid beïnvloeden, maar leidt niet direct tot een verstoorde of

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
		onzekere meting. Daarom is het effect hiervan ook niet verder in de analyse van metingen meegenomen. Wel is de invloed hiervan op berekende resultaten in hoofdstuk 2 geanalyseerd.
Neerslag (regen en sneeuw)	Kan tot verstoorde of onzekere metingen leiden. Bij neerslag hoger dan 0,1 mm/uur en tijdens sneeuw kan volgens ISO-20906 de kans bestaan dat metingen verstoord worden.	Het effect van neerslag op de metingen wordt in deze studie in kaart gebracht. Het aantal beschikbare metingen met en zonder neerslag wordt bepaald volgens de grenswaarden aangegeven in ISO-20906 en overgenomen in de PAMV-validatieaanpak.

3.2.3

Factoren die afhankelijk zijn van de positie van het vliegtuig ten opzichte van de meetpost

De positie van het vliegtuig (de geluidbron) ten opzichte van de meetpost heeft veel impact op wat op de meetpost wordt gemeten. Voor het bepalen van het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid gaat het primair om de hoogte waarop het vliegtuig ten tijde van de meting vliegt, in combinatie met de afstand van het vliegtuig tot de meetpost. De combinatie van deze twee parameters bepaalt de elevatiehoek, wat een belangrijke factor is bij het betrouwbaar meten van vliegtuiggeluid.

Tabel 4 Relevante factoren die afhankelijk zijn van de positie van het vliegtuig:

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
Vlieghoogte	Een vliegtuig op lage vlieghoogte produceert in het algemeen meer geluid dan wanneer het hoger vliegt. Een variatie in de vlieghoogte kan tot een grote spreiding leiden in de gemeten geluidniveaus.	De vlieghoogte op het moment dat het maximale geluidniveau wordt gemeten, wordt per meting in kaart gebracht. Vervolgens wordt het verloop van de vlieghoogte als functie van zowel afstand tot de luchthaven als geluidbelasting weergegeven.
Afstand tussen de meetpost en het vliegtuig	Vergelijkbaar met de afstand tot de luchthaven, hoe verder weg het	De afstand tussen het vliegtuig en de meetpost op het moment dat het

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
	vliegtuig van de meetpost vliegt, hoe lager de gemeten geluidniveaus zijn. Bij lage niveaus is de kans hoger dat de meting door stoorgeluiden of wind verstoord raakt.	maximale geluidniveau wordt gemeten, wordt bepaald en in de analyse meegenomen.
Elevatiehoek	Bij lage elevatiehoeken neemt de onzekerheid in de geluidmeting toe. Bij elevatiehoekwaarden van lager dan 60 graden wordt de kans hoog geschat dat de meting door factoren als laterale spreiding en objecten tussen het vliegtuig en de waarnemer (gebouwen, bomen etc.) wordt verstoord (ISO-20906/TC 2009). In het Verenigd Koninkrijk (VK) is deze eis de laatste jaren minder streng gemaakt door metingen bij een elevatiehoek van lager dan 45 graden buiten beschouwing te laten, in ieder geval voor validatiedoeleinden. Voor informatievoorziening kunnen metingen ook bij lagere elevatiehoeken worden gebruikt. Wel is ook voor dit doel een minimale grens aan te bevelen, zodat burgers niet op basis van verstoorde metingen worden geïnformeerd.	De elevatiehoek wordt per gemeten vliegtuigpassage per meetpost bepaald. Er wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor het effect van het hanteren van verschillende elevatiehoekeisen op het aantal beschikbare metingen dat aan deze eisen voldoet. Hiermee wordt inzichtelijk wat bijvoorbeeld het effect is van het toepassen van de strenge validatie-eis van minimaal 60 graden elevatiehoek op het aantal metingen en hoe dit zich verhoudt tot het hanteren van een lagere ondergrens van 45 of 30 graden.

3.2.4

Aanvullende factoren die het meten van vliegtuiggeluid beïnvloeden

Naast de factoren die metingen van vliegtuiggeluid kunnen verstoren wordt in de analyse van het toepassingsbereik van metingen ook met een aantal aanvullende parameters rekening gehouden. Deze aanvullende parameters leiden niet direct tot een verstoorde meting, maar zijn wel van belang bij het bepalen van het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid.

Tabel 5 Aanvullende parameters die relevant zijn voor het toepassingsbereik van metingen

Vluchtgerelateerd:

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
Type vliegtuig	Verschillende type vliegtuigen produceren verschillende geluidniveaus op de grond. Dit kan van invloed zijn op het toepassingsbereik van vliegtuiggeluidmetingen omdat grotere vliegtuigen doorgaans tot grotere afstanden hoorbaar zijn dan kleinere toestellen. Ook voor validatie is het onderscheid in (groepen) van vliegtuigtypen van belang.	De gemeten geluidniveaus voor de meest voorkomende vliegtuigtypen worden per luchthaven in kaart gebracht. Het toepassingsbereik als functie van afstand en geluidbelasting wordt vervolgens per vliegtuigtype geanalyseerd om tot algemene conclusies over het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid te komen.
Type vlucht (vluchtsoort)	Het gemeten geluidniveau verschilt voor startende en landende vliegtuigen door verschil in motorvermogen, vliegprocedure en vluchtconfiguratie. Doorgaans produceren starts hogere geluidniveaus dan landingen.	Er wordt een onderscheid gemaakt in de gemeten geluidniveaus voor starts en landingen. Vervolgens wordt geanalyseerd hoe het toepassingsbereik als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting voor beide vluchtsoorten verschilt.

Meetsysteemtechniek gerelateerd:

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
Drempelwaarde	Kan het toepassingsbereik beïnvloeden door metingen met lage geluidniveaus af te kappen. Speelt vooral op grote afstanden van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting een rol. Het belangrijkste effect hiervan voor dit onderzoek is dat er een deel van de metingen voor lage geluidniveaus	Per meetpost wordt gekeken tot welke minimale L_{Amax} -waarden vliegtuiggeluid wordt gemeten en hoe dit zich verhoudt met het achtergrondgeluid (L95) op die locatie.

Factor	Effect op metingen	Hoe wordt hiermee rekening gehouden?
	ontbreekt, waarmee het nauwkeuriger bepalen van het toepassingsbereik van metingen lastig wordt.	
Methode van koppeling metingen met vluchtgegevens	Afhankelijk van het toegepaste algoritme (radar, ADS-B, OpenSky etc.) kunnen bepaalde vliegbewegingen worden gemist. Voor Schiphol en Eindhoven wordt gebruik gemaakt van radargegevens.	Het aantal gekoppelde vliegtuigpassages per meetpost wordt in kaart gebracht.
Methode eventdetectie	Verschillende eventdetectiemethoden kunnen tot een verschillende hoeveelheid events (vliegtuigpassages) leiden. Voor dit onderzoek heeft het bedrijf Envirosuite (leverancier geluidmeetnet) een eigen eventdetectie algoritme toegepast om een vliegtuigpassage te detecteren.	Wordt gedekt door het in kaart brengen van het aantal gekoppelde vliegtuigpassages per meetpost.

3.3 Analyse metingen Schiphol

In deze paragraaf wordt de analyse voor Schiphol gepresenteerd. Hiervoor zijn alle gemeten vliegtuigpassages van commercieel verkeer in het kalenderjaar 2019 voor Schiphol geanalyseerd. Zoals eerder genoemd, legt de analyse de focus op het primaire doel van validatie van rekenmodellen, met als secundair doel informatievoorziening.

De leverancier van het meetsysteem voor beide luchthavens is het bedrijf Envirosuite (voorheen Bruel en Kjaer). Voor het ophalen van meetgegevens van beide luchthavens is gebruikgemaakt van de Airport Noise and Operations Monitoring System (ANOMS)-database van Envirosuite. In de ANOMS-database worden meetdata afkomstig van alle door de luchthaven beheerde meetposten opgeslagen, naast informatie over de vlucht en het bijbehorende vliegtuigtype. Voor het ophalen van de Schiphol-meetdata heeft Schiphol het RIVM ten behoeve van dit onderzoek toegang verleend tot de ANOMS-database.. Voor Eindhoven Airport zijn de data door de luchthaven zelf aan het RIVM geleverd.

Conform de relevante factoren voor het bepalen van het toepassingsbereik van metingen, genoemd in paragraaf 3.2, zijn de volgende parameters voor de analyse van het toepassingsbereik van metingen verzameld:

Tabel 6 Parameters geanalyseerd voor analyse naar het toepassingsbereik van metingen met de bijbehorende bron van de data

Parameter	Bron
Meetpost ID	ANOMS
SEL-waarde	ANOMS
L_{Amax} -waarde	ANOMS
Tijdstip van de meting	ANOMS
Tijdsduur van meting	ANOMS
Leq-waarde (equivalent geluidniveau)	ANOMS
Toegepaste drempelwaarde	ANOMS
Afstand meetpost-vliegtuig	ANOMS
Horizontale afstand meetpost-vliegtuig	ANOMS
Elevatiehoek	Berekend door RIVM o.b.v. afstand meetpost-vliegtuig en horizontale afstand.
Vlieghoogte op moment van meting van L_{Amax}	ANOMS
Type vlucht	ANOMS
Vliegtuigtype	ANOMS
L95-dagwaarde	ANOMS
L90-dagwaarde	ANOMS
L50-dagwaarde	ANOMS
L90-uurwaarde	ANOMS
L50-uurwaarde	ANOMS
Windsnelheid	KNMI
Neerslag	KNMI
Temperatuur	KNMI

Zoals te zien in Tabel 6, is voor de analyse van meteorologische condities gebruikgemaakt van publiek beschikbare uurgegevens van het KNMI. De reden hiervoor was dat de meteorologische gegevens uit ANOMS niet met de KNMI-gegevens overeenkwamen en bovendien niet gebaseerd waren op weersgegevens afkomstig van windmeters en andere meteorologische apparatuur die op de meetposten zelf zijn geïnstalleerd. De meerderheid van de NOMOS-meetposten heeft geen meteorologische apparatuur beschikbaar en de KNMI-gegevens werden als betrouwbaarder beschouwd voor de Nederlandse weersituatie. Hiervoor is gebruikgemaakt van het meest dichtbijliggende KNMI-weerstation per meetpost.

Keuze van geluidmaat voor de analyse – L_{Amax} of SEL:

Een geluidmeting van een vliegbeweging wordt uitgedrukt in een geluidmaat, zoals de L_{Amax} (maximaal geluidniveau) of SEL (geluidblootstellingsniveau), waarbij SEL vooral voor validatiedoeleinden van belang is. Afhankelijk van de nauwkeurigheid van de apparatuur en invloed van onzekerheidsfactoren, zal het gemeten geluidniveau van een bepaalde betrouwbaarheid zijn. In de analyse gepresenteerd in deze paragraaf wordt geprobeerd de invloed van de onzekerheidsfactoren op de gemeten geluidniveaus vast te stellen. Aangezien de geluidmaat L_{Amax} voor de meeste lezers een meer begrijpelijke maat is dan de SEL, worden de figuren in dit hoofdstuk voor de geluidmaat L_{Amax} gepresenteerd. De relatie tussen L_{Amax} en SEL voor vliegtuiggeluid is

verder lineair, wat betekent dat de bevindingen en trends die worden gezien voor L_{Amax} voor vliegtuiggeluid ook voor SEL zullen gelden.

Voor de analyse zijn enkele bewerkingen op de totale meetdataset uitgevoerd, om ervoor te zorgen dat duidelijk verstoorde of onbetrouwbare metingen de analyse en de conclusies van het onderzoek niet beïnvloeden. Hiervoor zijn enkele filters op de meetdataset toegepast:

- Alleen startende of landende vliegtuigen van of naar de betreffende luchthaven worden geanalyseerd (overvluchten van andere luchthavens zijn buiten beschouwing gelaten).
- Om er zeker van te zijn dat de analyse alleen voor civiel vliegverkeer wordt uitgevoerd, is er een selectie gemaakt op de meest voorkomende civiele vliegtuigtypen die tezamen 90 procent van alle vluchten vormen. Dit is vooral van toepassing voor Eindhoven Airport omdat daar ook een aanzienlijke hoeveelheid militair vliegverkeer wordt gemeten.
- Voor Schiphol zijn enkele meetposten niet in de analyse meegenomen: meetposten 78 en 80 (LFG-posten) en meetpost 94 (slechts een deel van het jaar actief in 2019).

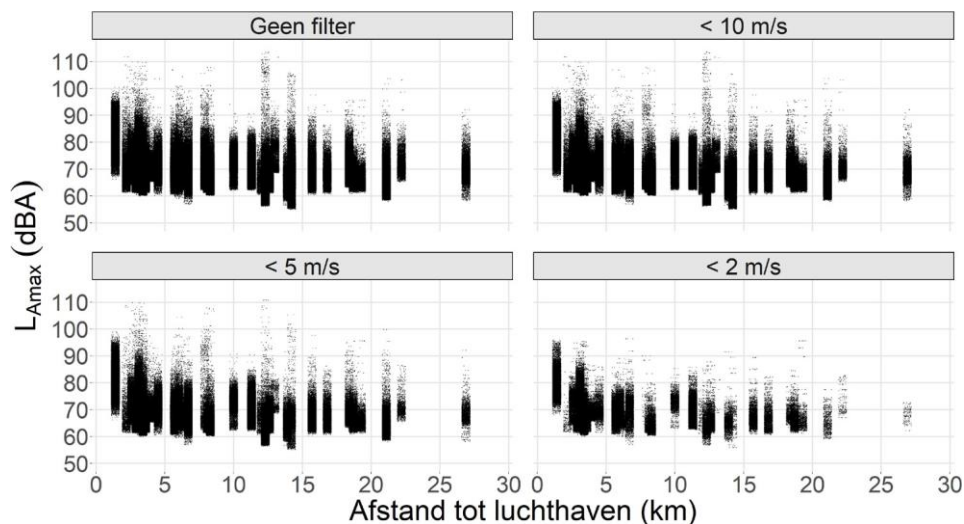
3.3.1 *Effect onzekerheidsfactoren op metingen*

3.3.1.1 Weersomstandigheden

3.3.1.1.1 Wind

In Figuur 5 is het effect te zien van wind op de metingen op de NOMOS-meetposten. Het effect wordt getoond door toepassing van diverse 'filters' op de meetdata, waarbij metingen die tijdens wind boven een bepaalde windsnelheid zijn uitgevoerd, worden uitgesloten. Linksboven kunnen de metingen worden gezien zonder toepassing van een filter op de windsnelheid, dat wil zeggen dat metingen die voor alle windsnelheden zijn uitgevoerd, worden toegestaan. Rechtsboven zijn metingen aangetoond die bij een windsnelheid van lager dan 10 m/s zijn uitgevoerd, links- en rechtsonder zijn metingen te zien die bij windsnelheden van maximaal 5 m/s en 2 m/s zijn uitgevoerd.

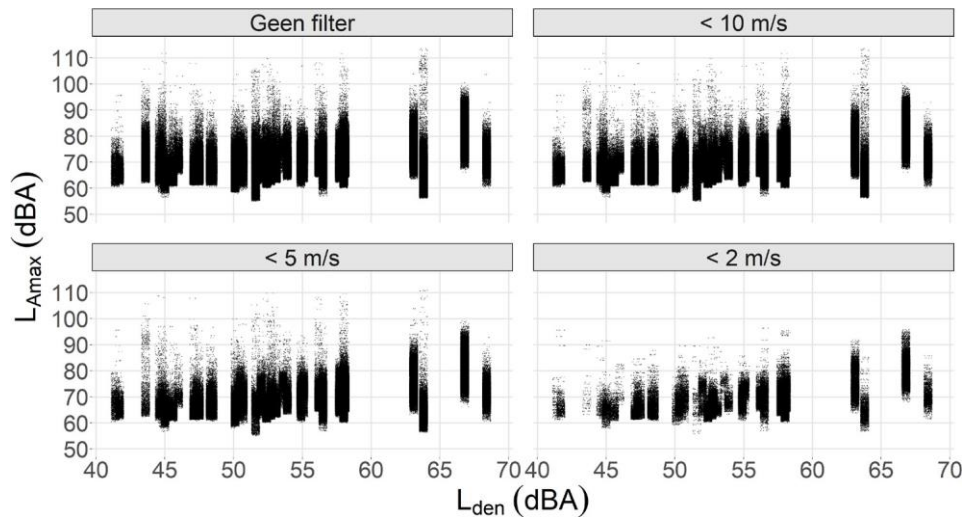
Het effect van het uitsluiten van metingen die tot een bepaalde maximale windsnelheid worden uitgevoerd, is vooral verder weg van de luchthaven te zien, op afstanden groter dan circa 20 km. Verder bij de luchthaven vandaan lijkt de kans dus groter dat de gemeten geluidsniveaus door wind worden beïnvloed.



Figuur 5 Effect van windsnelheid op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van afstand tot de luchthaven Schiphol

Hoge windsnelheden treden echter bij meetlocaties vrijwel onafhankelijk van de afstand tot de luchthaven op, zodat metingen ook dicht bij de luchthaven door wind kunnen worden beïnvloed. Het effect van hoge windsnelheden is daarom niet alleen tot grote afstanden van de luchthaven beperkt. De visuele weergave van Figuur 5 kan ook in aantal metingen worden uitgedrukt. Gemiddeld genomen blijft bij een maximale windsnelheid van 10 m/s 84 procent van de metingen over, bij een maximum van 5 m/s blijft 37 procent over en bij een maximum van 2 m/s (alleen ter illustratie) blijft slechts 3,5 procent van de metingen over.

In Figuur 6 is het effect te zien van wind op de metingen op de NOMOS-metposten als functie van de geluidbelasting in L_{den} . De trends als functie van geluidbelasting zijn vergelijkbaar met de trends die worden gezien als functie van afstand tot de luchthaven. Als functie van geluidbelasting is te zien dat bij lage geluidbelastingniveaus minder metingen beschikbaar zijn die aan de gegeven windsnelheideis voldoen.



Figuur 6 Effect van windsnelheid op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van gemeten geluidbelasting op de NOMOS-meetposten

Wel is in Figuur 6 op te merken dat de meetposten op basis van geluidbelasting anders zijn gesorteerd dan op basis van afstand tot de luchthaven. Om de sortering op basis van geluidbelasting beter te begrijpen, kan Tabel 7 als hulpmiddel dienen. Tabel 7 laat zien op welke afstand tot de luchthaven iedere meetpost staat en welke geluidbelasting bij deze meetpost hoort, op basis van de metingen in 2019. Hierbij is op te merken dat een aantal meetposten relatief dicht bij de luchthaven staat maar toch een geluidbelasting heeft van lager dan 48 dB L_{den} . Deze meetposten zijn in Tabel 7 vetgedrukt. Meetposten die relatief dicht bij de luchthaven staan, kunnen lage geluidbelastingniveaus ervaren, doordat deze locaties relatief ver bij de *vliegroutes* vandaan liggen. Daardoor vallen de gemeten geluidniveaus (L_{Amax} , SEL) op deze locaties lager uit, wat vervolgens tot een lagere geluidbelasting leidt. Om deze reden is de volgorde van de meetposten in Figuur 5 en Figuur 6 niet hetzelfde.

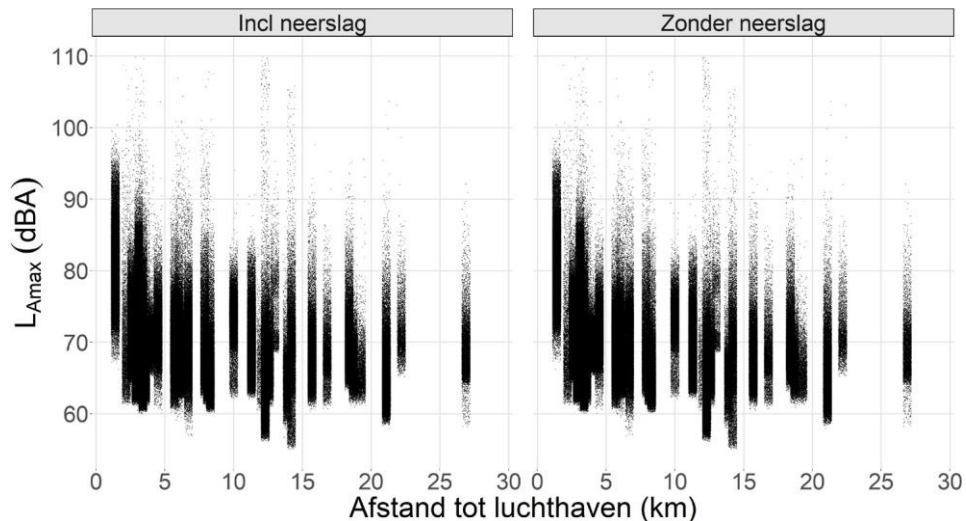
Tabel 7 NOMOS-geluidmeetposten rondom Schiphol, gesorteerd op basis van toenemende afstand tot de luchthaven en bijbehorende gemeten geluidbelasting

Meetlocatie ID	Afstand tot de luchthaven (km)	Geluidbelasting in L_{den} (dB)
40	1,4	66,8
17	2,2	44,8
80	2,2	41,8
78	2,3	40,9
1	2,6	58,1
16	2,9	52,7
10	3,1	63,1
2	3,1	56,2
7	3,2	50,5
30	3,3	53,6
12	3,4	58

Meetlocatie ID	Afstand tot de luchthaven (km)	Geluidbelasting in L _{den} (dB)
18	3,6	47,5
35	3,9	52,8
29	4,5	68,4
25	5,7	54,9
39	5,7	45,6
34	6	52
44	6	50,7
19	6,1	53,1
41	6,7	56,5
26	7,9	43,6
15	8,1	47,1
13	8,3	52,4
20	10	55,1
14	11,3	57,7
31	12	41,4
21	12,3	63,8
42	12,6	48,3
33	13	57,9
23	13,9	45
38	14 2	51,6
24	15,7	44,6
46	15,7	50,3
45	16,8	48,5
27	18,4	53,9
43	18,7	47,3
4	19,3	41,7
32	21,1	50,1
28	22,2	46
51	26,9	44,8

3.3.1.1.2 Neerslag (incl. sneeuw)

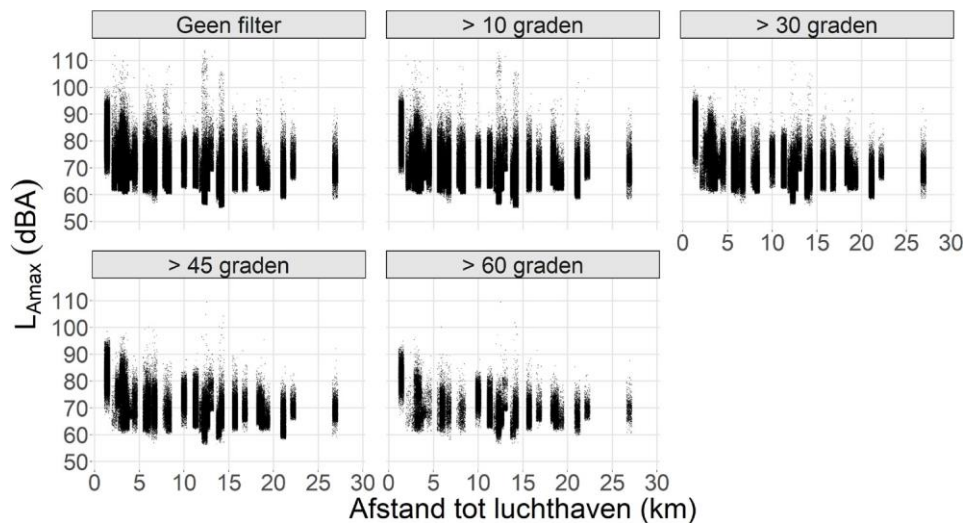
In Figuur 7 is het effect te zien van neerslag op de metingen als functie van afstand tot de luchthaven. Hierbij gaat het om metingen die zijn uitgevoerd bij neerslag met een waarde van hoger dan 0,1 mm/uur of metingen uitgevoerd tijdens sneeuw. Gemiddeld genomen over alle 41 meetposten blijft 86 procent van de metingen over na het toepassen van deze eis omtrent neerslag. Dat wil zeggen dat 14 procent van de metingen die in 2019 zijn uitgevoerd potentieel door neerslag is beïnvloed. In tegenstelling tot windsnelheid is er voor neerslag geen samenhang te zien tussen beschikbare metingen en afstand tot de luchthaven (of geluidbelasting).



Figuur 7 Effect van neerslag op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van afstand tot de luchthaven Schiphol

3.3.1.2 Effect elevatiehoek

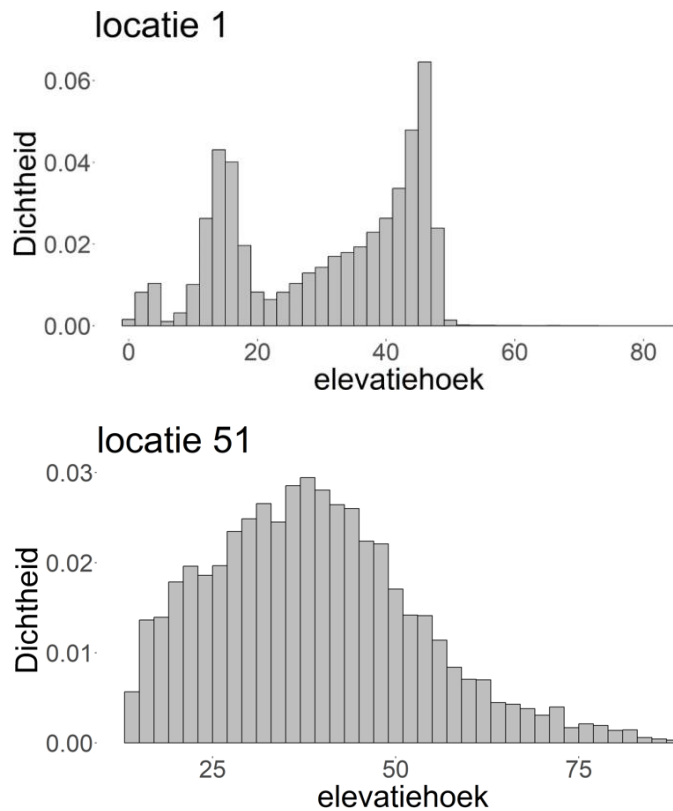
In Figuur 8 wordt het effect van elevatiehoek op de metingen op de NOMOS-meetposten gepresenteerd als functie van afstand tot de luchthaven. Hierbij is te zien dat een minimale eis van 10 graden elevatiehoek een beperkte impact heeft op het aantal beschikbare metingen (visueel vrijwel niet waarneembaar). Het is ook op te merken dat vanaf een eis van 45 graden of hoger, en vooral bij 60 graden of hoger, een groot deel van de metingen wegvalt. In Figuur 8 is ook te zien dat het toepassen van een ondergrens aan de elevatiehoek de spreiding in de gemeten geluidniveaus vermindert en dat lage elevatiehoeken een mogelijke verklaring kunnen zijn voor de grote spreidingen in gemeten geluidniveaus op sommige meetlocaties.



Figuur 8 Effect van elevatiehoek op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van afstand tot de luchthaven Schiphol

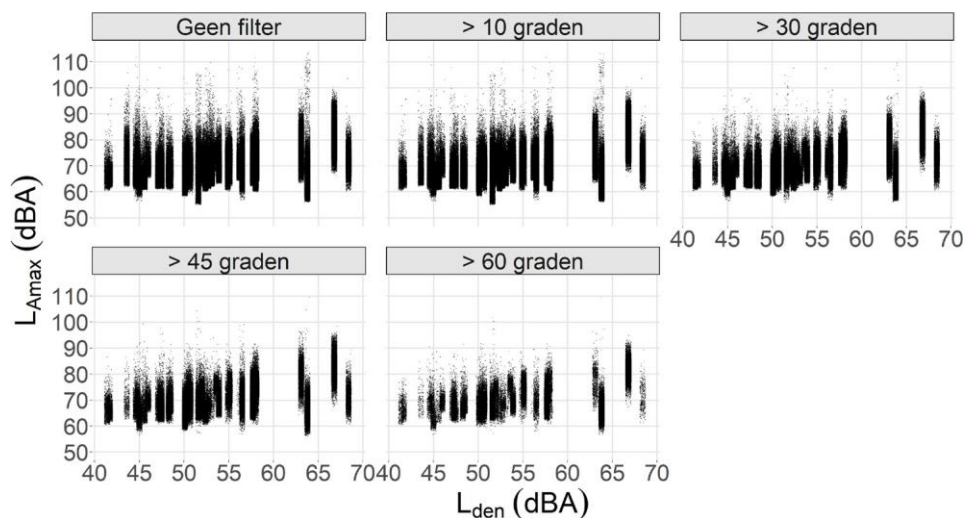
In termen van aantallen blijft 93 procent van de metingen over na het toepassen van een eis van minimaal 10 graden elevatiehoek. Bij een elevatiehoek van minimaal 30 graden of hoger blijft 60 procent van de metingen over. Bij een eis van minimaal 45 graden neemt dit aantal af tot 36 procent en bij een eis van 60 graden of hoger blijft slechts 14 procent van de metingen over. Deze laatste constatering impliceert dat er bij een eis van minimaal 60 graden aan de elevatiehoek voor validatie een vrij laag aantal metingen over zal blijven voor een statistische vergelijking met berekeningen. Deze constatering impliceert ook dat er wellicht een verplaatsing nodig is van een aantal meetposten tot onder of dichterbij de vliegroutes, om aan de elevatiehoek te voldoen. De impact van het hanteren van verschillende ondergrenzen voor de elevatiehoek op het verschil tussen metingen en berekeningen is in paragraaf 4.1.1.1 van dit rapport toegelicht.

Wat betreft het toepassingsbereik van metingen als functie van afstand tot de luchthaven, heeft het toepassen van een strenge eis aan de elevatiehoek dichterbij de luchthaven een groter effect dan op grotere afstanden van de luchthaven. Dit komt vooral doordat vliegtuigen dicht bij de luchthaven op lage vlieghoogtes vliegen, zodat de elevatiehoek tussen het vliegtuig en de meetpost doorgaans laag is. Verder weg van de luchthaven hebben vliegtuigen hogere vlieghoogtes bereikt, waardoor de elevatiehoeken doorgaans groter zijn. Dit wordt bevestigd door naar de aantallen als functie van afstand tot de luchthaven te kijken. Tot een afstand van 10 km tot de luchthaven voldoet slechts 7,5 procent van de metingen aan de eis van minimaal 60 graden elevatiehoek. Vanaf een afstand van 10 km tot 27 km voldoet 24 procent van de metingen aan deze eis. Figuur 9 geeft een voorbeeld van de frequentie waarmee verschillende elevatiehoekwaarden op twee meetposten optreden – NMT 1 op een afstand van 2,6 km en NMT 51 op een afstand van 27 km van de luchthaven.



Figuur 9 Frequentie van elevatiehoekwaarden voor metingen op twee NOMOS-meetposten – NMT 1 (boven) en NMT51 (onder)

Figuur 10 toont het effect van elevatiehoek als functie van geluidbelasting, waarbij weer vergelijkbare trends worden gezien als functie van afstand tot de luchthaven. De afname in het aantal beschikbare metingen als gevolg van het toepassen van een eis aan de elevatiehoek is in dit geval vooral bij meetposten met een hoge geluidbelasting te zien, die doorgaans dicht bij de luchthaven liggen.

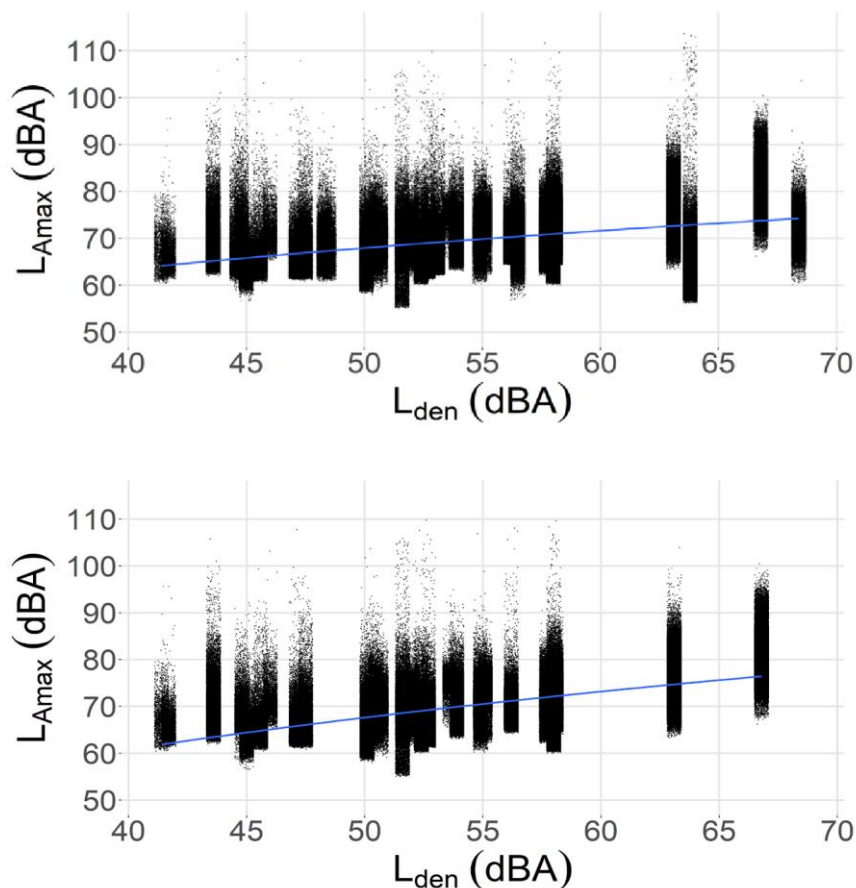


Figuur 10 Effect van elevatiehoek op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van gemeten geluidbelasting op de NOMOS-meetposten

3.3.1.3 Effect validatie-eisen aan de meetlocatie

Zoals we paragraaf 3.2.1 hebben genoemd, kan de omgeving van de meetpost metingen van vliegtuiggeluid beïnvloeden. Het effect van een aantal onzekerheidsfactoren die afhankelijk zijn van de meetlocatie, zoals reflecties en afscherming, wordt in dit onderzoek niet afzonderlijk geanalyseerd en valt buiten de scope van PAMV. Voor de doelen van dit onderzoek zijn deze eisen gezamenlijk opgenomen als onderdeel van validatie-eisen aan de *meetlocatie*.

In Figuur 11 is het effect op de metingen te zien van het toepassen van validatie-eisen voor de meetlocatie. Van de 41 NOMOS-meetlocaties zijn volgens de kaders van de nationale meetstrategie 11 locaties ongeschikt voor validatie (door afscherming, reflecties en andere factoren). Het toepassen van de validatie-eisen op de meetlocaties sluit een aantal meetposten uit die een grote spreiding toonden in de gemeten geluidsniveaus. Een vergelijking van de bovenste grafiek in Figuur 11 – voor alle meetposten – met de onderste grafiek – uitsluitend voor validatiemeetposten – maakt dit duidelijk. Aan de andere kant schijnt een aantal meetposten wel geschikt te zijn voor validatie maar laten zij toch een vrij grote spreiding in de gemeten geluidsniveaus zien. Dit geeft aan dat de validatie-eisen aan de meetlocatie wel een bijdrage leveren aan meer betrouwbare metingen, maar dat andere onzekerheidsfactoren, zoals lage elevatiehoeken en weersomstandigheden, nog steeds de metingen kunnen beïnvloeden.



Figuur 11 Effect op beschikbare metingen voor Schiphol van het toepassen van validatie-eisen aan de meetlocatie – alle meetposten zonder validatie-eisen toegepast (boven) en met validatie-eisen aan de meetlocatie toegepast (onder). De blauwe lijn is de trendlijn voor gemiddelde waarden over alle meetposten.

3.3.2 Analyse toepassingsbereik metingen voor validatie

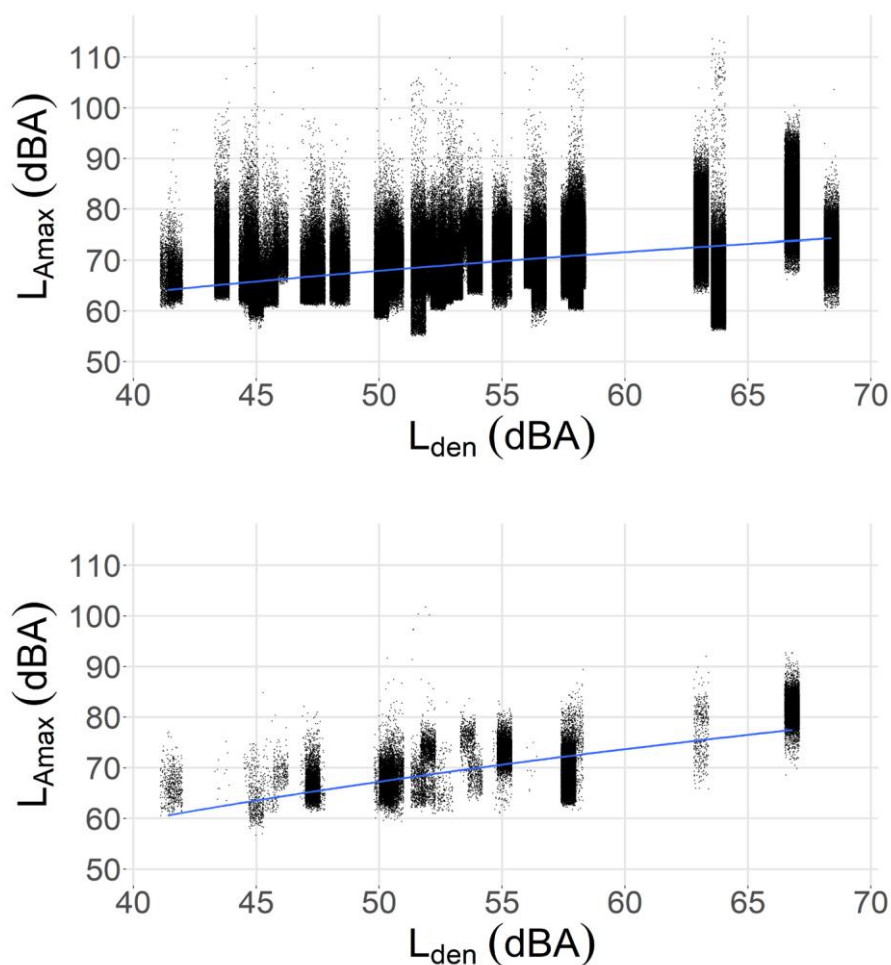
In deze paragraaf wordt de analyse van het toepassingsbereik van metingen uitgevoerd voor het meetdoel validatie. Hierbij wordt het gezamenlijke effect van *alle* validatie-eisen op de metingen geanalyseerd (dat wil zeggen, eisen aan de meetlocatie plus aanvullende meeteisen aan elevatiehoek en weersomstandigheden die zijn bepaald voor de PAMV-validatieaanpak). De conclusies met betrekking tot het meetdoel validatie worden uitsluitend getrokken voor meetposten die volgens de nationale meetstrategie voor validatie geschikt zijn.

3.3.2.1 Effect op aantal beschikbare metingen

Figuur 12 is een uitbreiding van Figuur 11, waarin naast de eisen aan de meetlocatie zelf ook de aanvullende meeteisen uit de PAMV-validatieaanpak – minimaal 60 graden elevatiehoek, geen neerslag en maximale windsnelheid van 5 m/s – zijn toegepast. Om de vergelijking van metingen met en zonder toepassing van validatie-eisen mogelijk te maken, is de x-as van beide grafieken constant gehouden. Indien de geluidbelasting alleen wordt bepaald op basis van metingen die aan alle validatie-eisen voldoen, zal deze lager uitvallen dan wanneer er geen validatie-eisen worden toegepast. De bovenste grafiek in Figuur 12

bevat veel meer metingen met hoge geluidsniveaus, wat tot hogere L_{den} -waarden leidt. De geluidbelastingwaarden zonder toepassing van de validatie-eisen zijn representatiever voor de daadwerkelijke geluidbelasting op de gegeven meetlocatie en worden uiteindelijk gebruikt voor het uitdrukken van het toepassingsbereik van metingen.

Het valt in Figuur 12 meteen op dat het toepassen van de relatief strenge aanvullende meeteisen een significant effect heeft op het aantal beschikbare metingen. Voor een aantal meetposten blijft na het toepassen van alle validatie-eisen (eisen aan de meetlocatie en aanvullende meeteisen) een zeer klein aantal metingen beschikbaar, iets waar de analyse voor windsnelheid en elevatiehoek in paragraaf 3.3.1 ook op wees.



Figuur 12 Effect van het toepassen van alle validatie-eisen op de beschikbare metingen voor Schiphol – alle meetposten zonder validatie-eisen toegepast (boven) en met alle validatie-eisen toegepast op meetposten geschikt voor validatie (onder). De blauwe lijn is de gemiddelde trendlijn voor L_{Amax} -waarden over alle meetposten.

De visuele weergave van Figuur 12 wordt in Tabel 8 gekwantificeerd in aantallen metingen per meetpost. Zoals eerder genoemd, is voor het meetdoel validatie een statistische beoordeling van de overeenkomst

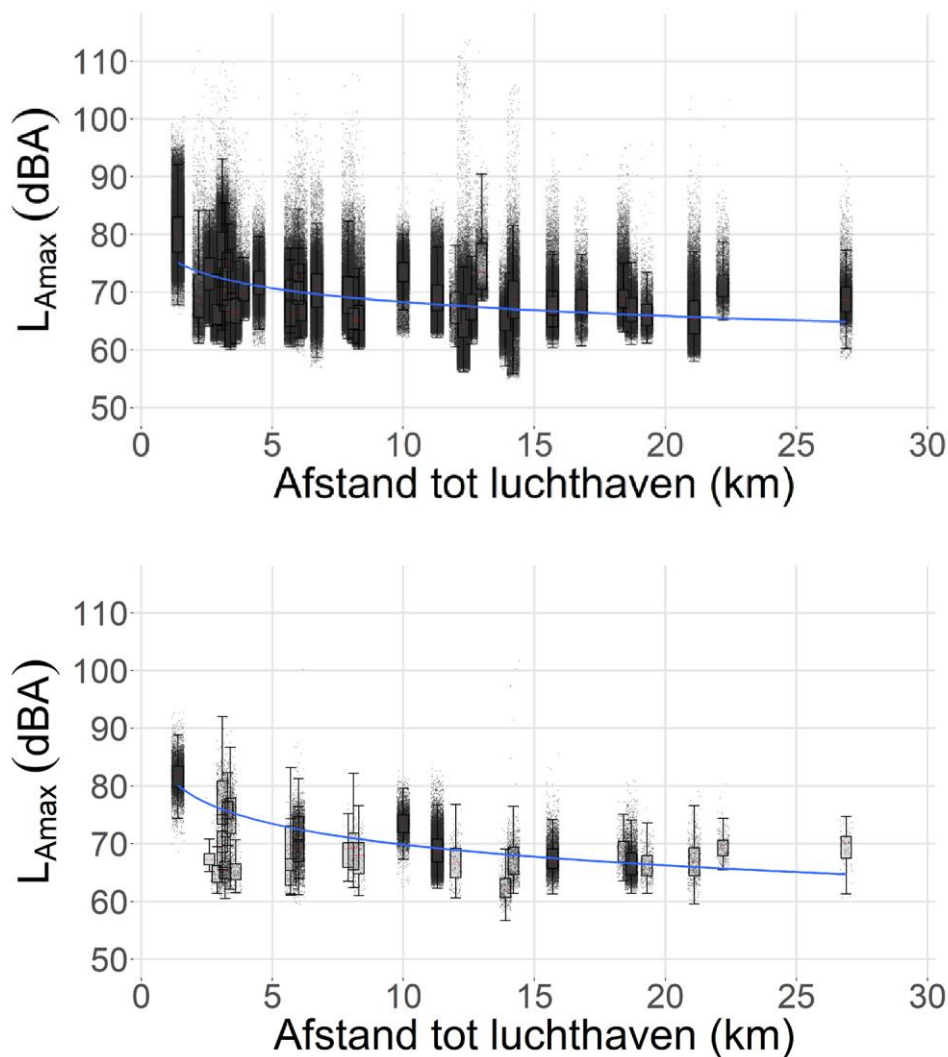
tussen metingen en berekeningen nodig. De aantallen in Tabel 8 laten zien dat het toepassen van de aanvullende meeteisen in hun huidige vorm tot een zodanig laag aantal beschikbare metingen kan leiden dat een zinvolle statistische beoordeling op sommige meetposten wellicht niet mogelijk is. In de vergelijking van metingen en berekeningen die in hoofdstuk 4 worden uitgevoerd, wordt met deze constatering rekening gehouden. Dit wordt gedaan door een ondergrens toe te passen aan het minimaal aantal gemeten vliegtuigpassages dat voor de validatie dient te worden gebruikt.

Tabel 8 Aantal beschikbare metingen op de NOMOS-meetposten met en zonder toepassing van aanvullende meeteisen voor validatie

Loc.ID	Validatie meetpost	Aantal metingen zonder toepassing van aanvullende meeteisen	Aantal metingen na toepassing van aanvullende meeteisen
1	Ja	56.230	10
2	Ja	48.121	9
4	Ja	4090	319
7	Ja	5696	881
10	Ja	87.352	416
12	Ja	85.044	516
13	Ja	34.102	126
14	Ja	62.464	16.692
15	Ja	13.636	92
16	Ja	48.228	102
17	Nee	5810	N.v.t.
18	Ja	15.987	157
19	Nee	45.851	N.v.t.
20	Ja	23.750	4569
21	Ja	72.372	4263
23	Ja	11.897	377
24	Nee	9838	N.v.t.
25	Ja	48.771	83
26	Ja	18.453	12
27	Ja	45.657	436
28	Ja	4039	236
29	Nee	31.140	N.v.t.
30	Ja	5072	565
31	Ja	1903	185
32	Ja	28.204	424
33	Nee	2786	N.v.t.
34	Ja	10.115	1526
35	Nee	17.484	N.v.t.
38	Ja	19.793	822

Loc.ID	Validatie meetpost	Aantal metingen zonder toepassing van aanvullende meeteisen	Aantal metingen na toepassing van aanvullende meeteisen
39	Ja	7716	112
40	Ja	88.024	6032
41	Nee	37.611	N.v.t.
42	Nee	18.413	N.v.t.
43	Ja	12.604	3720
44	Ja	12.119	1945
45	Nee	7681	N.v.t.
46	Ja	22.172	4736
51	Ja	8287	86
78	Nee	973	N.v.t.
80	Nee	8786	N.v.t.

Figuur 13 geeft het effect weer van het toepassen van alle validatie-eisen als functie van afstand tot de luchthaven. Vooral verder weg van de luchthaven blijft een laag tot zeer laag aantal metingen over dat aan de validatie-eisen voldoet. Dit geeft aan dat valideren verder bij de luchthaven vandaan moeilijker zal zijn dan dicht bij de luchthaven. In Figuur 13 wordt ook de spreiding in de gemeten geluidsniveaus per meetpost gevisualiseerd door middel van boxplots die onder andere de mediaanwaarden en het interkwartielbereik van de meetgegevens laten zien. Hoewel er ook na het toepassen van de validatie-eisen een bepaalde spreiding in de meetgegevens overblijft, wordt het met de boxplots nog duidelijker dat de spreiding door toepassing van validatie-eisen aan de meetlocatie en de aanvullende meeteisen significant wordt verlaagd.



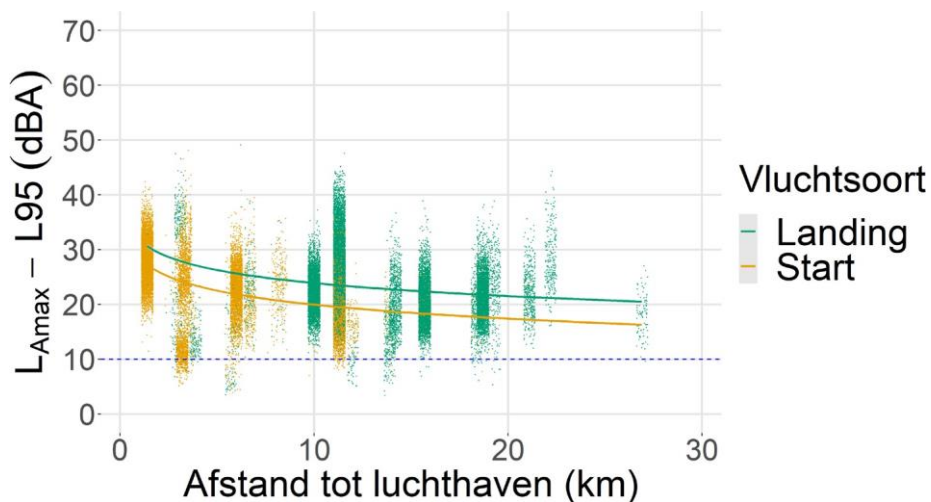
Figuur 13 Effect van het toepassen van alle validatie-eisen op metingen als functie van afstand tot de luchthaven met visuele weergave van de bijbehorende spreiding via boxplots – zonder validatie-eisen toegepast (boven) en met validatie-eisen toegepast (onder).

3.3.2.2 Effect op basis van vluchtsoort

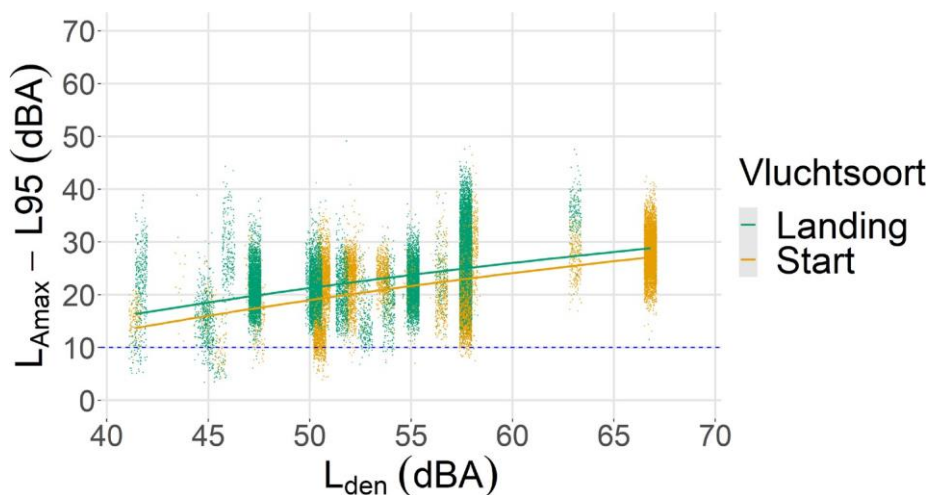
Een belangrijke stap bij het bepalen van het toepassingsbereik van metingen na de analyse voor alle vluchten gezamenlijk is verdieping in de data en opsplitsing op basis van vluchtsoort (start of landing) en type vliegtuig. De leidende eis voor validatie is dat de L_{Amax} -waarden consistent minimaal 10 dB hoger uitvallen dan het achtergrondgeluid (uitgedrukt als L_{95} , het geluidniveau dat voor 95 procent van de tijd van de meting wordt overschreden). Indien de maximale geluidsniveaus van metingen niet hoger uitvallen dan het achtergrondgeluidniveau, zijn de betreffende vliegbewegingen niet goed te onderscheiden van het achtergrondgeluid en kunnen de metingen niet gebruikt worden voor de validatie van het rekenmodel.

Een vrij relevant punt bij het bepalen van het toepassingsbereik van metingen door analyse van de NOMOS-metingen is dat elke NOMOS-

meetpost in 2019 gebruik heeft gemaakt van een drempelwaarde, een ingestelde ondergrens voor L_{Amax} -waarden waaronder vliegbewegingen niet worden geregistreerd. Dit is bijvoorbeeld in Figuur 12 en Figuur 13 (bovenste grafieken) te zien door een horizontale afkap in de gemeten waarden rond de 60 dBA. Vliegtuigen produceren vooral verder weg van de luchthaven en de vliegroutes maximale geluidsniveaus die vaak onder deze drempelwaarden vallen. In de meetdataset die voor dit onderzoek is gebruikt, ontbreekt daarom een aantal metingen, vooral verder weg van de luchthaven en bij lage geluidbelasting, die de gepresenteerde resultaten mogelijk beïnvloeden. Dit aspect wordt in paragraaf 3.3.2.4 geadresseerd.



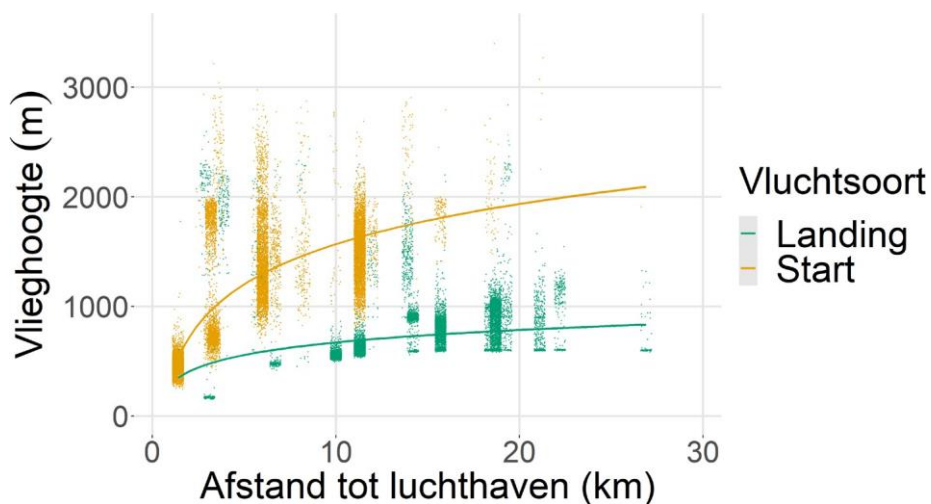
Figuur 14 Het verschil tussen L_{Amax} en $L95$ per meetpost voor Schiphol als functie van afstand tot de luchthaven met opsplitsing op basis van vluchtsoort



Figuur 15 Verschil tussen L_{Amax} en $L95$ per meetpost voor Schiphol als functie van geluidbelasting met opsplitsing op basis van vluchtsoort

In Figuur 14 en Figuur 15 is het verschil tussen L_{Amax} en $L95$ voor de metingen op de validatiemeetposten te zien, als functie van afstand tot

de luchthaven, respectievelijk geluidbelasting. Als functie van afstand ligt het verschil voor zowel starts als landingen tot 27 km boven de 10 dB. Wel kan hierbij worden opgemerkt dat de meerderheid van starts tot een afstand van 15-20 km wordt gemeten. Op grotere afstanden van de luchthaven, vanaf ongeveer 18 km, worden vooral landingen gemeten. Dit is te verklaren door het feit dat startende vliegtuigen op een afstand van 15-20 km meestal een vlieghoogte rond de 2000 m hebben bereikt terwijl landende vliegtuigen op deze afstand veel lager vliegen, tussen de 600 en 1000 m (zie Figuur 16).



Figuur 16 Verloop van vlieghoogte voor zowel starts als landingen op de NOMOS-metposten als functie van afstand tot de luchthaven

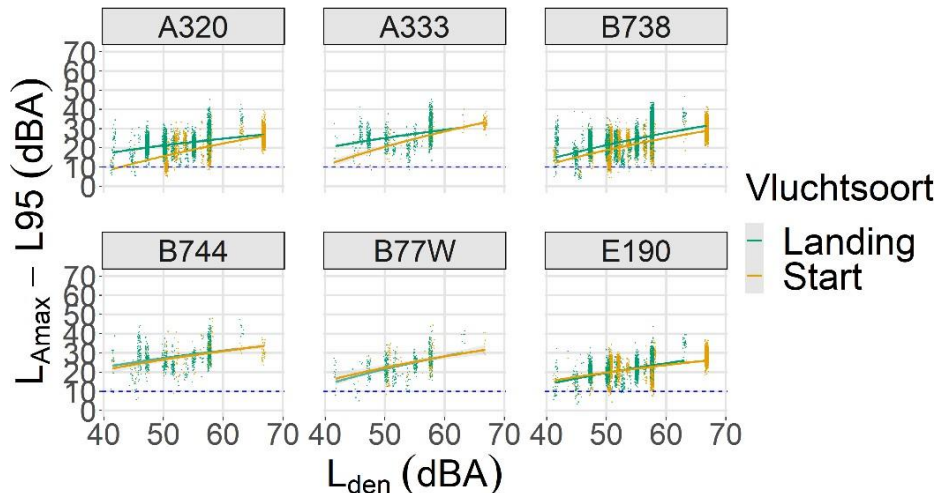
Op basis van de meetdataset die voor deze studie is gebruikt kunnen we concluderen dat tot minimaal 27 km de maximale geluidniveaus 10 dB hoger liggen dan het achtergrondgeluid, wat betekent dat vliegtuiggeluid tot deze afstand te onderscheiden is van het achtergrondgeluid. Deze constatering geldt in ieder geval voor landende vliegtuigen. Voor startende vliegtuigen liggen de geluidniveaus op meer dan circa 18 km van de luchthaven doorgaans lager en worden niet vaak geregistreerd. Het is op basis van de meetdata die voor deze studie zijn gebruikt niet mogelijk om exact te bepalen tot welke afstand boven de 27 km voor landingen en boven de 18 km voor starts vliegtuiggeluid nog van het achtergrondgeluid te onderscheiden is. Daarvoor zouden aanvullende metingen op nog grotere afstanden van de luchthaven vereist zijn. Ook het effect op de metingen van het gebruik van drempelwaarden is niet meteen duidelijk, dat wil zeggen, hoeveel vliegbewegingen op grotere afstand van de luchthaven potentieel onder de drempelwaarde vallen en daardoor niet in de meetdataset geregistreerd zijn. De trends op basis van afstand tot de luchthaven leveren in het algemeen geen eenduidig antwoord op de vraag tot welke afstand van de luchthaven vliegtuiggeluid betrouwbaar te meten is.

Als functie van geluidbelasting (L_{den}) maakt Figuur 15 duidelijk dat het verschil tussen L_{Amax} en L_{95} (gemiddeld genomen) in de buurt van 10 dB begint te komen bij een geluidbelasting van **40-45 dB L_{den}** , zowel voor starts als voor landingen. Dit is te zien op basis van de gemiddelde

trendlijnen in Figuur 15 maar ook door het aantal metingen dat bij deze lage geluidbelastingwaarden onder de 10 dB-lijn begint te vallen. Dit zou mogelijk een indicatie kunnen zijn van het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid voor het meetdoel validatie, uitgedrukt in geluidbelasting. In gebieden met een nog lagere geluidbelasting dan 40 dB zal vliegtuiggeluid moeilijker van het achtergrondgeluid te onderscheiden zijn. De trends op basis van geluidbelasting geven in het algemeen een duidelijker beeld dan de trends die worden waargenomen op basis van afstand tot de luchthaven.

3.3.2.3 Effect op basis van type vliegtuig

In deze paragraaf wordt een verdere opsplitsing van de meetdata gemaakt op basis van het vliegtuigtype. In Figuur 17 wordt het verschil tussen gemeten L_{Amax} en L_{95} als functie van geluidbelasting gepresenteerd voor de zes meest voorkomende vliegtuigtypen op Schiphol uit verschillende gewichtklassen. In Figuur 17 is E190 de ICAO-code voor het Embraer 190 regionaal vliegtuig, A320 de code voor de Airbus A320 en B738 de ICAO-code voor de Boeing 737-8. Met deze drie vliegtuigtypen worden op Schiphol het vaakst gevlogen op bestemmingen binnen Europa. De Airbus A330 (ICAO-code A333), Boeing 747-400 (ICAO-code B744) en 777-300ER (ICAO-code 77W) worden het meest op lange afstanden van en naar Schiphol gevlogen.

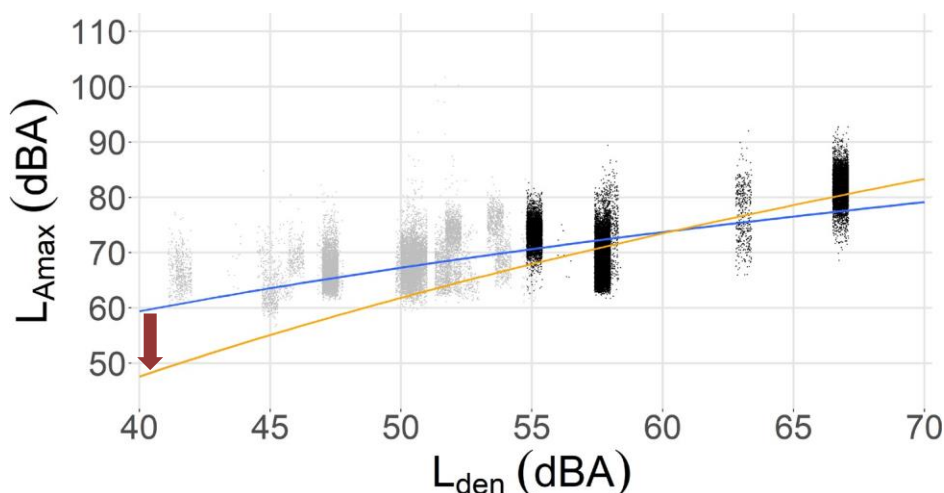


Figuur 17 Versil tussen L_{Amax} en L_{95} per meetpost voor Schiphol als functie van geluidbelasting met opsplitsing op basis van de zes meest voorkomende vliegtuigtypen

Ook na de opsplitsing op basis van vliegtuigtype kan worden opgemerkt dat de gemeten maximale geluidniveaus bij een bereik van 40-45 dB L_{den} in de buurt van het achtergrondgeluid beginnen te komen. Dit is in het bijzonder te zien voor starts met de A320, de B738 en ook de A333 vliegtuigtypen. Vliegtuigen zoals de B744 en B77W vallen in een zwaardere gewichtklasse en produceren doorgaans hogere geluidniveaus tijdens het starten. In Figuur 17 is daarom te zien dat het L_{Amax} - L_{95} -verschil voor deze vliegtuigen hoger uitvalt dan 10 dB, ook in gebieden met een lage geluidbelasting van 40-45 dB. Voor landingen ligt het verschil voor vrijwel alle vliegtuigtypen hoger dan 10 dB.

3.3.2.4 Effect gebruik van drempelwaarde

Zoals eerder genoemd, wordt op de NOMOS-metposten een drempelwaarde toegepast, waardoor metingen die onder een bepaalde ondergrens uitkomen niet in de ANOMS-database worden geregistreerd. Hoewel het niet exact te achterhalen is hoeveel metingen door het gebruik van de drempelwaarde in de meetdataset ontbreken, kan een indicatie hiervan worden verkregen door de trendlijn van gemiddelde L_{Amax} -waarden voor meetposten met een hoge geluidbelasting te extrapoleren. Meetposten met een hoge geluidbelasting ervaren doorgaans hogere (maximale) geluidniveaus. Daardoor vallen de gemeten L_{Amax} -waarden op deze locaties regelmatig hoger uit dan de drempelwaarden. Op meetlocaties met een lage geluidbelasting zijn de maximale geluidniveaus doorgaans lager en is het effect van de drempelwaarde op de metingen groter. Een inschatting van het verloop van de trendlijn van gemiddelde waarden 'zonder drempelwaarde' kan worden gemaakt door de trendlijn voor meetposten met een hoge geluidbelasting (bijvoorbeeld 55 dB L_{den} of hoger) te bepalen en deze voor de resterende meetposten te extrapoleren. In Figuur 18 is de geëxtrapoleerde trendlijn voor 55 dB L_{den} in oranje gevisualiseerd en vergeleken met de oorspronkelijke trendlijn in blauw. Zonder toepassing van drempelwaarden zou het verloop van de trendlijn met afnemende geluidbelasting steiler zijn dan met toepassing van drempelwaarden. Voor de constatering uit de voorafgaande paragrafen betekent het steilere verloop van de gemeten L_{Amax} -waarden dat ook het verschil tussen L_{Amax} en L_{95} steiler omlaag zal gaan dan waargenomen in Figuur 14, Figuur 15 en Figuur 17. Hiermee wordt de kans nog groter geschat dat metingen van vliegtuiggeluid bij een geluidbelasting van 40-45 dB L_{den} in de buurt van het achtergrondgeluid beginnen te komen, zodat het moeilijker wordt om deze metingen van het achtergrondgeluid te onderscheiden.



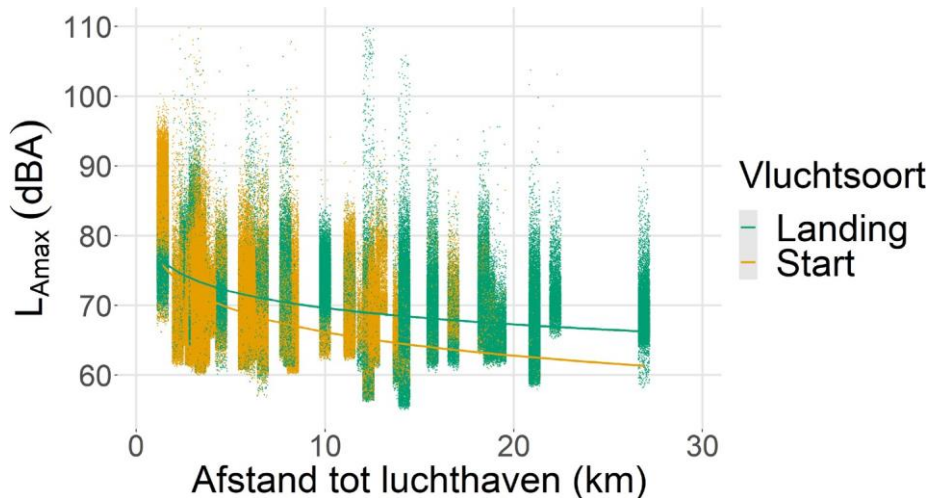
Figuur 18 Verloop van het maximale geluidniveau (L_{Amax}) als functie van geluidbelasting met gebruik van drempelwaarden (blauwe lijn) en zonder effect van drempelwaarden door extrapolatie (oranje lijn)

3.3.3 Analyse toepassingsbereik metingen voor informatievoorziening

In tegenstelling tot voor validatie worden voor informatievoorziening geen filters toegepast voor de meetlocatie, windsnelheid, neerslag en elevatiehoek. Alle plots uit paragraaf 3.3.1 voor het geval 'Geen filter' geven dus de situatie weer voor het meetdoel informatievoorziening. Uit Figuur 13 is te zien dat het meest opvallende verschil tussen de metingen voor informatievoorziening (Geen filter) en validatie ligt in de spreiding in de gemeten waarden. In deze paragraaf wordt nog kort gekeken naar de opsplitsing van de metingen op basis van vluchtsoort en de meest voorkomende vliegtuigtypen. Daarmee worden de overeenkomsten en verschillen voor het meetdoel informatievoorziening verduidelijkt in vergelijking met metingen voor het meetdoel validatie en wat dit betekent voor het toepassingsbereik van metingen voor informatievoorziening.

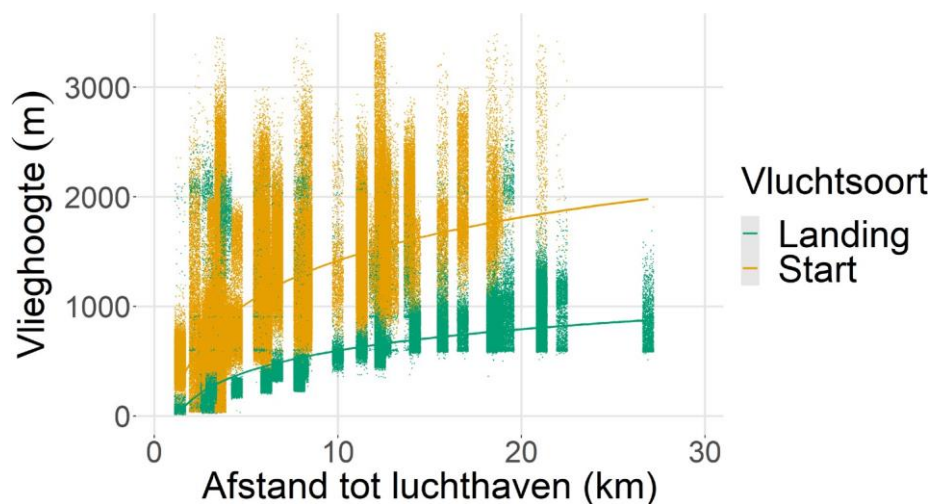
3.3.3.1 Effect op basis van vluchtsoort

In Figuur 19 is het verloop van het maximale geluidniveau per vluchtsoort (start of landing) gepresenteerd als functie van afstand tot de luchthaven, voor het meetdoel informatievoorziening. De opsplitsing laat zien dat zowel starts als landingen een grote spreiding in de gemeten geluidniveaus kennen en er geen waarneembare trend in de spreiding is te zien als functie van afstand tot de luchthaven.



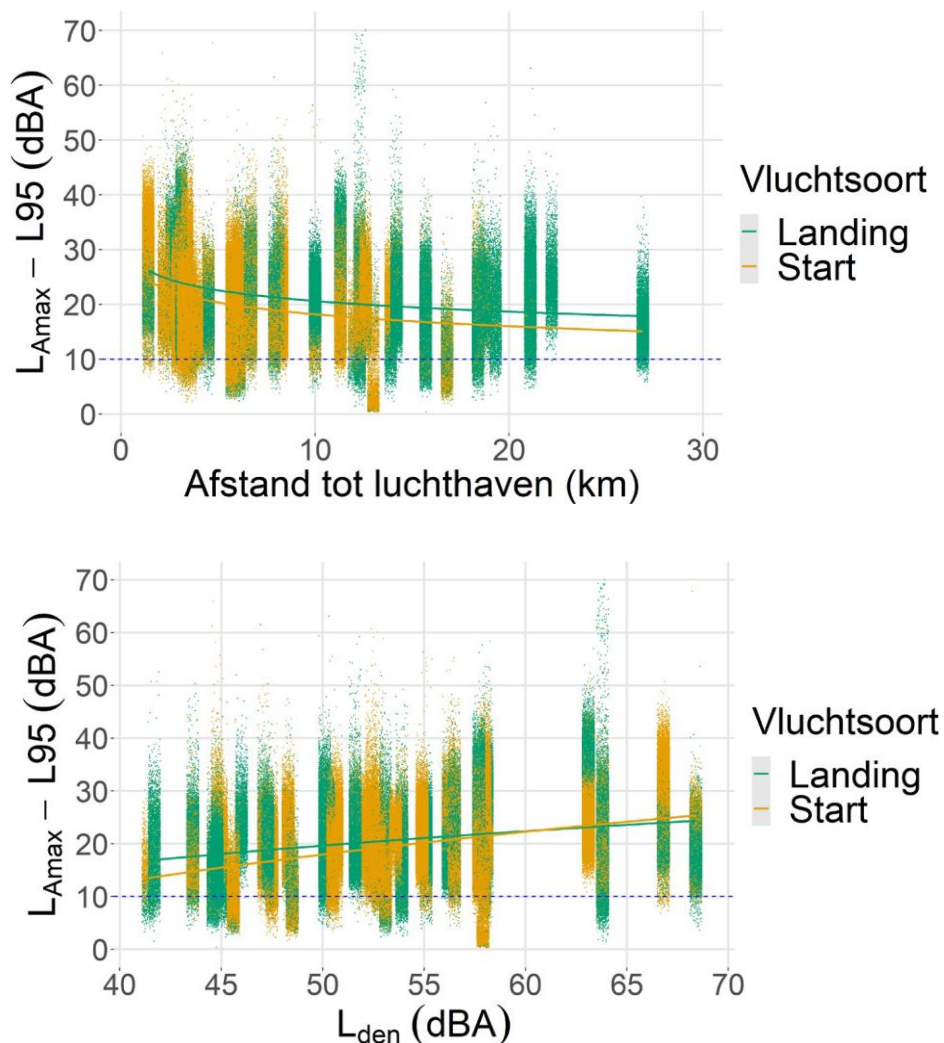
Figuur 19 Verloop van gemeten L_{Amax} -waarden voor starts en landingen als functie van afstand tot de luchthaven voor informatievoorziening

Figuur 20 laat het verloop van de gemeten vlieghoogte zien per meetpost, zonder toepassing van enige filters. Vergeleken met Figuur 16 wat betreft het verloop van vlieghoogte na toepassing van de validatiefilters is de spreiding in vlieghoogte duidelijk hoger voor starts dan voor landingen.



Figuur 20 Verloop van gemeten vlieghoogte voor starts en landingen als functie van afstand tot de luchthaven voor informatievoorziening

In Figuur 21 is het verschil tussen L_{Amax} en L_{95} te zien voor het meetdoel informatievoorziening, zowel als functie van afstand tot de luchthaven als van geluidbelasting. Ook is te zien dat er vanaf circa 18 km duidelijk minder starts worden gemeten dan landingen (zie ook Figuur 20 voor het verloop van de vlieghoogte). De gemeten maximale geluidniveaus blijven gemiddeld genomen wel boven 10 dB verschil met het achtergrondgeluidniveau, net als voor validatie. Hierbij speelt het gebruik van de drempelwaarden weer een rol aangezien veel vluchten verder weg van de luchthaven onder de drempelwaarde vallen en daardoor niet zijn gemeten. Op basis van de afstand tot de luchthaven is ook voor informatievoorziening geen duidelijke bovengrens te bepalen vanaf waar metingen duidelijk minder betrouwbaar worden.

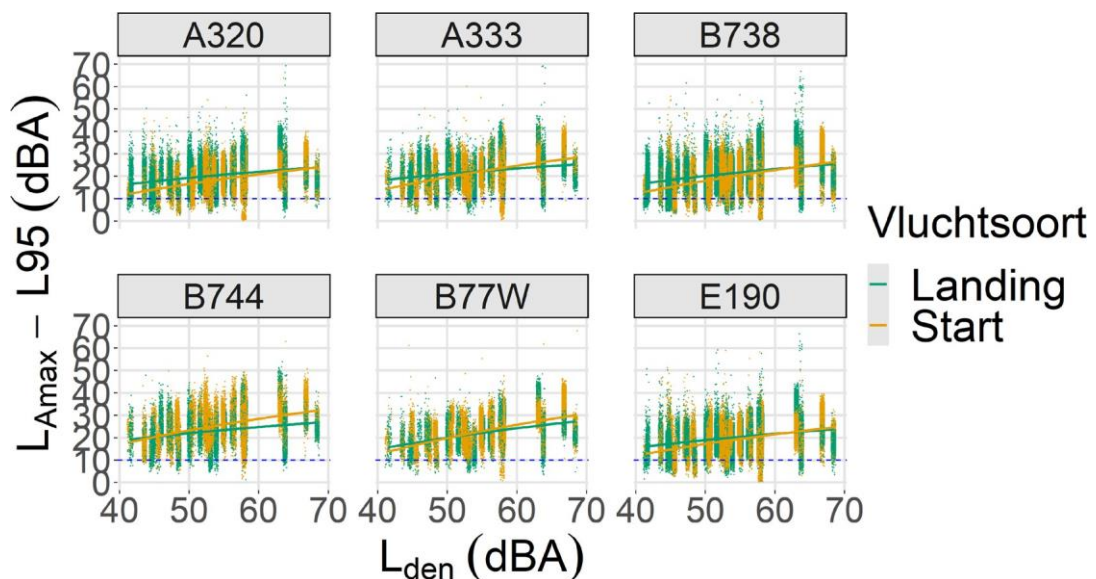


Figuur 21 Het verschil tussen L_{Amax} en L_{95} per meetpost voor Schiphol met opsplitsing op basis van type vlucht – als functie van afstand tot de luchthaven (boven) en als functie van geluidbelasting (onder)

Als functie van geluidbelasting zijn weer vergelijkbare conclusies te trekken voor zowel het meetdoel informatievoorziening als voor het meetdoel validatie. Zowel starts als landingen beginnen in gebieden met een lage geluidbelasting (40-45 dB L_{den}) in de buurt van 10 dB verschil met het achtergrondgeluid te komen. Zonder toepassing van de drempelwaarden zal het gemiddelde verloop nog steiler zijn, wat aangeeft dat het lastig is om vliegtuiggeluid in deze gebieden consistent van het achtergrondgeluid te onderscheiden. Hoewel een minimaal verschil van 10 dB tussen L_{Amax} en L_{95} geen harde eis is voor het meetdoel informatievoorziening, is het wel wenselijk om een vergelijkbare marge ten opzichte van het achtergrondgeluidniveau te krijgen, zodat omwonenden betrouwbaar over de geluidssituatie in hun omgeving kunnen worden geïnformeerd. Indien de gemeten geluidniveaus dicht bij het achtergrondgeluidniveau liggen, zal óf een groot deel van de vliegbewegingen niet meetbaar zijn óf geluid uit andere bronnen foutief als vliegtuiggeluid worden gemarkeerd.

3.3.3.2 Effect op basis van type vliegtuig

Als laatste kan voor informatievoorziening ook de opsplitsing op basis van vliegtuigtype worden gemaakt, net als is gedaan voor validatie in paragraaf 3.3.2.3. Het verschil tussen L_{Amax} en L_{95} per meetpost wordt in Figuur 22 als functie van geluidbelasting getoond voor het meetdoel informatievoorziening. Door de grotere spreiding in gemeten geluidniveaus lopen de trendlijnen voor informatievoorziening steiler dan voor validatie. Zonder toepassing van de aanvullende meeteisen aan de meetdata lijken de metingen in gebieden met een lage geluidbelasting eerder en vaker in de buurt van het achtergrondgeluid te komen. Dit is te zien voor alle vliegtuigtypen behalve de B744 die ook in gebieden met een lage geluidbelasting doorgaans hogere geluidniveaus produceert.



Figuur 22 Versil tussen L_{Amax} en L_{95} per meetpost voor Schiphol als functie van geluidbelasting met opsplitsing op basis van de zes meest voorkomende vliegtuigtypen voor informatievoorziening

3.4 Analyse metingen Eindhoven Airport

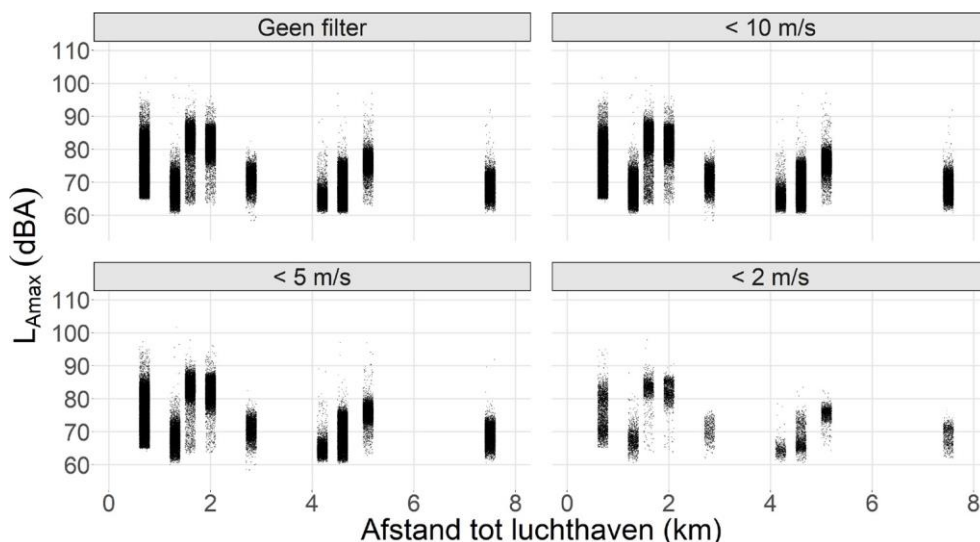
In deze paragraaf wordt een beknopte analyse van de meetdata voor Eindhoven Airport gepresenteerd. De focus in deze paragraaf wordt op de verschillen met de analyse voor Schiphol gelegd. De analyse naar het toepassingsbereik van metingen voor Eindhoven Airport is uitsluitend uitgevoerd voor metingen van civiel vliegverkeer van en naar de luchthaven en niet voor militair vliegverkeer op deze luchthaven. De analyse is uitgevoerd voor meetdata voor het kalenderjaar 2019 die zijn ontvangen voor tien meetposten rondom de luchthaven.

3.4.1 Effect onzekerheidsfactoren op metingen

Net als op de meetposten rondom Schiphol kunnen weersomstandigheden zoals wind en neerslag ook een verstorend effect hebben op de metingen die zijn uitgevoerd rondom luchthaven Eindhoven.

3.4.1.1 Weersomstandigheden

Het effect van hogere windsnelheden in de omgeving van Eindhoven Airport is minder dan op de meetposten rondom Schiphol. De meetposten rondom Schiphol liggen dicht bij de kust waar het doorgaans harder waait. Dit is visueel te zien door Figuur 23 te vergelijken met Figuur 5, en het is bevestigd door naar het aantal overblijvende metingen te kijken. Indien metingen bij een windsnelheid van hoger dan 10 m/s worden uitgesloten, blijft bij Eindhoven Airport gemiddeld genomen 98 procent van de metingen over, en bij een maximale windsnelheid van 5 m/s blijft 62 procent van de metingen over (voor Schiphol bedroegen deze getallen respectievelijk 84 procent en 37 procent). In tegenstelling tot de metingen voor Schiphol is er voor de meetposten rondom Eindhoven Airport geen trend als functie van afstand tot de luchthaven te zien, dat wil zeggen dat metingen die op grotere afstand van de luchthaven worden gedaan niet in een grotere mate door hoge windsnelheden worden beïnvloed. Een mogelijke verklaring hiervoor kan ook het feit zijn dat de meetposten in de omgeving van Eindhoven Airport slechts tot een afstand van 8 km van de luchthaven zijn geplaatst terwijl voor Schiphol de meest ver liggende meetpost op een afstand van 27 km van de luchthaven ligt.



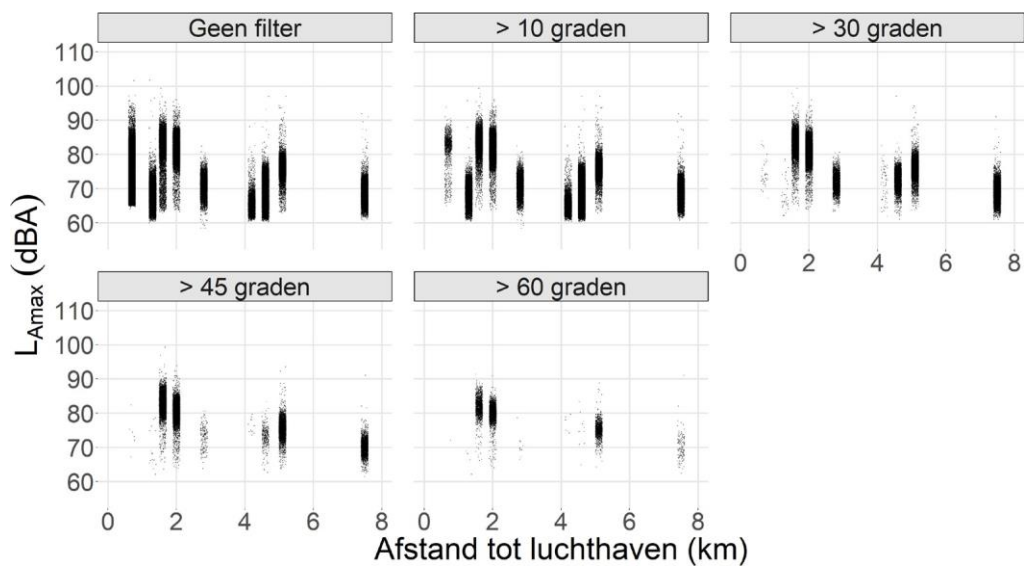
Figuur 23 Effect van windsnelheid op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van afstand tot de luchthaven voor Eindhoven Airport

Het effect van neerslag op de metingen in de omgeving van Eindhoven Airport is vergelijkbaar met het effect dat is waargenomen rond Schiphol. Ongeveer 8 procent van de metingen op de Eindhovense meetposten is mogelijk beïnvloed door neerslag met een hoeveelheid hoger dan 0,1 mm/uur.

3.4.1.2 Effect elevatiehoek

Het effect van het toepassen van een eis aan de elevatiehoek op metingen rond Eindhoven Airport is groter dan het effect op de metingen rond Schiphol. Dit is te zien in Figuur 24, waarbij zelfs vanaf een eis van een minimale elevatiehoek van 30 graden een groot deel van de metingen dicht bij de luchthaven wordt uitgesloten. Bij een eis

van minimaal 45 of 60 graden blijft een zeer klein aantal van de metingen over. Met deze constatering kan al verwacht worden dat er voor het meetdoel validatie op Eindhoven Airport een gering aantal metingen beschikbaar zal zijn, indien de huidige aanvullende meeteisen voor validatie worden gehanteerd.



Figuur 24 Effect van elevatiehoek op gemeten L_{Amax} -waarden als functie van afstand tot de luchthaven Eindhoven Airport

Voor Eindhoven Airport voldoet slechts 3 procent van de metingen aan de eis van 60 graden elevatiehoek. Bij Schiphol was dat 7,5 procent voor meetposten binnen 10 km afstand van de luchthaven. De primaire reden voor het lage aantal metingen dat aan de hoge elevatiehoek-eis voldoet is de ligging van de huidige meetposten ten opzichte van de vliegroutes. De meetposten liggen grotendeels te ver bij de primaire vliegroutes vandaan, waardoor de meerderheid van de metingen op deze meetposten buiten een elevatiehoek van 60 graden (en zelfs van 45 en 30 graden) valt. Indien ook op Eindhoven Airport op termijn een validatie dient te worden uitgevoerd, moet óf de eis aan de elevatiehoek significant worden verlaagd óf dienen de meetposten dichterbij de primaire vliegroutes te worden verplaatst. Een verlaging van de eis aan de elevatiehoek kan verder gepaard gaan met het meenemen van mogelijk verstoorde metingen voor de validatie.

3.4.2

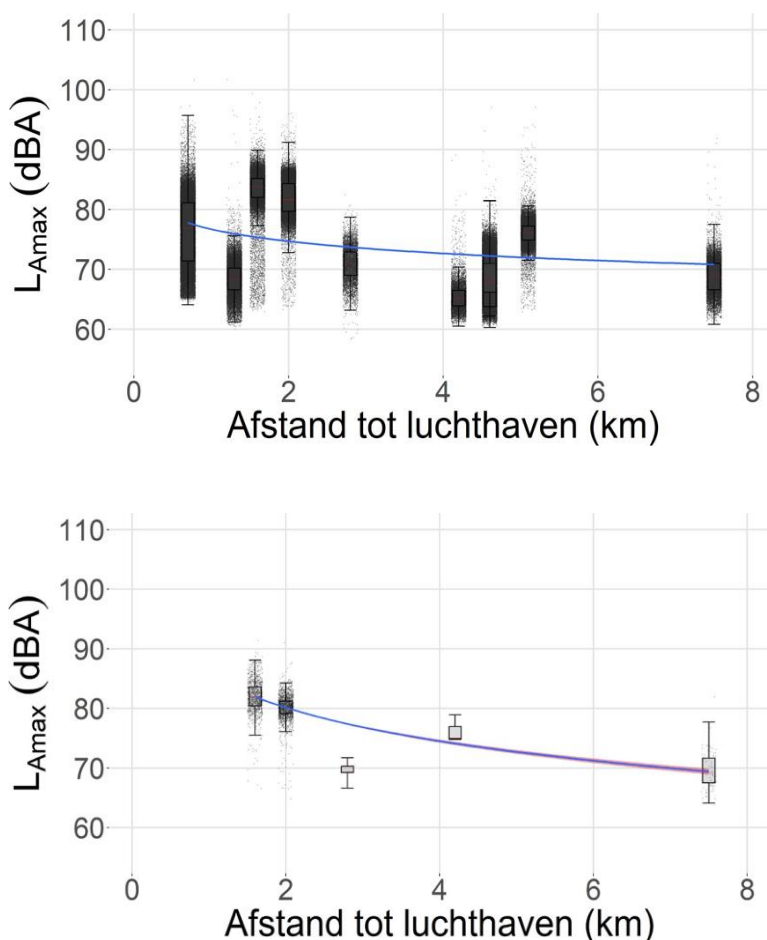
Analyse toepassingsbereik metingen voor validatie

Figuur 25 laat het effect zien van het toepassen van validatie-eisen op de metingen die zijn uitgevoerd op meetposten rondom Eindhoven Airport en geschikt zijn voor validatie. Volgens de regionale uitwerking van de nationale meetstrategie voor Eindhoven Airport zijn vijf van de tien huidige meetposten geschikt voor validatie (Sahai 2022).

Het gecombineerde effect van het toepassen van alle validatie-eisen op de metingen voor Eindhoven Airport is zodanig hoog dat er op de meeste validatiemeetposten zeer weinig metingen overblijven die voor validatie geschikt zijn. Dit is primair het gevolg van het toepassen van de eis aan de elevatiehoek van minimaal 60 graden. Omdat de

meetposten in de omgeving van Eindhoven naast de vliegroutes liggen, in plaats van direct onder de vliegroutes, valt een groot deel van de metingen buiten de 60 graden elevatiehoek. Indien op Eindhoven airport met bestaande metingen gevalideerd dient te worden, zal deze eis tot rond de 30 graden afgezwakt moeten worden, rekening houdend met het feit dat hiermee ook verstoorde metingen voor de vergelijking worden gebruikt.

Omdat het overblijvende aantal metingen voor validatie zo laag is, wordt het niet zinvol geacht om een uitvoerige analyse voor het toepassingsbereik voor validatie voor Eindhoven Airport te presenteren. Indien in een volgende fase van PAMV wordt besloten om ook op Eindhoven Airport te valideren dan zal met de in deze paragraaf genoemde overwegingen rekening moeten worden gehouden.



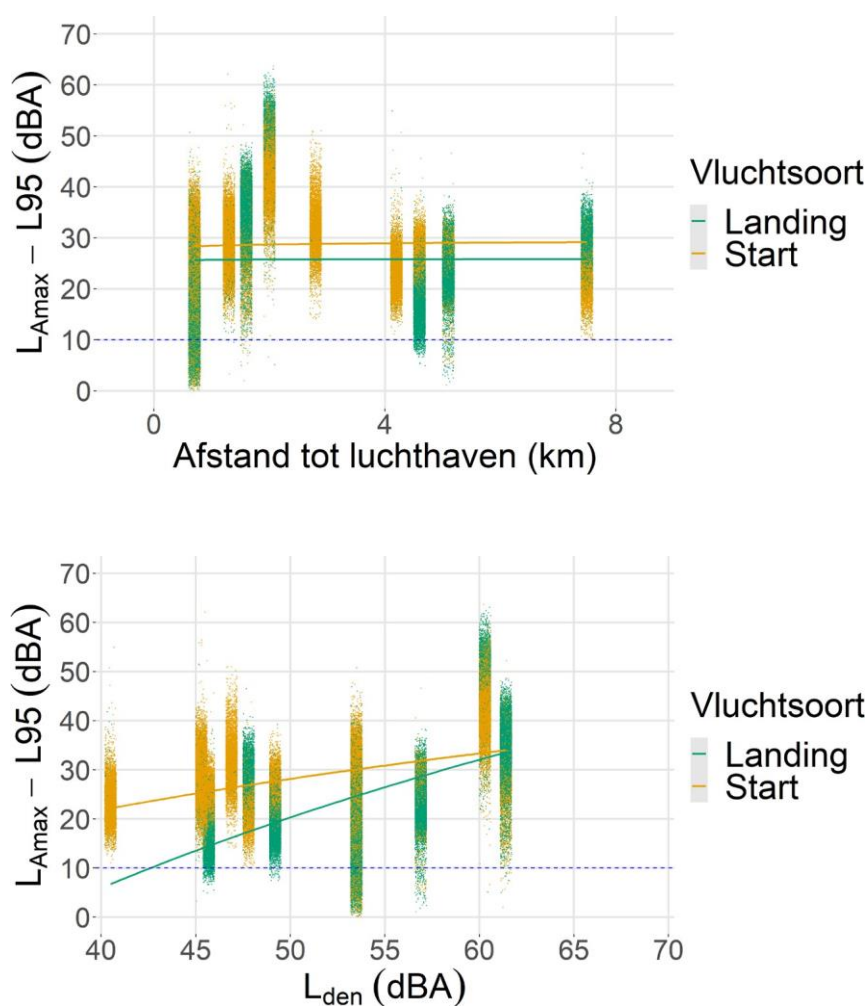
Figuur 25 Effect van het toepassen van validatie-eisen op de metingen voor Eindhoven Airport – alle meetposten zonder validatie-eisen toegepast (boven) en met alle validatie-eisen toegepast op meetposten geschikt voor validatie (onder). De blauwe lijn is de gemiddelde trendlijn voor LAmax-waarden over alle meetposten.

3.4.3 Analyse toepassingsbereik metingen voor informatievoorziening

De analyse voor het bepalen van het toepassingsbereik van metingen voor informatievoorziening voor Eindhoven wordt op een vergelijkbare wijze gepresenteerd als voor Schiphol. Eerst wordt de analyse gepresenteerd op basis van vluchtsoort gevolgd door een analyse voor de meest voorkomende (civiele) vliegtuigtypen op de luchthaven.

3.4.3.1 Effect op basis van vluchtsoort

Figuur 26 laat het verloop zien van het verschil tussen L_{Amax} en L_{95} als functie van afstand tot de luchthaven (boven) en geluidbelasting in L_{den} (onder) voor de meetposten rondom Eindhoven Airport.



Figuur 26 Verskil tussen L_{Amax} en L_{95} per meetpost voor Eindhoven Airport met opsplitsing op basis van vluchtsoort – als functie van afstand tot de luchthaven (boven) en als functie van geluidbelasting (onder)

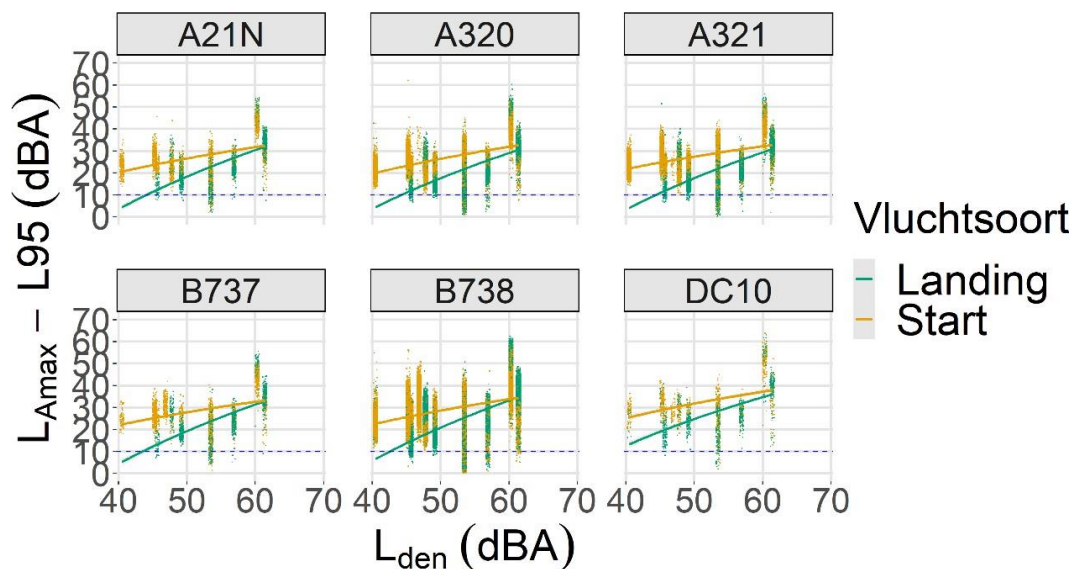
Als functie van afstand tot de luchthaven (bovenste grafiek) is op te merken dat er tot een afstand van 8 km van de luchthaven geen trend te zien is in het verschil tussen L_{Amax} en het achtergrondgeluidniveau. Het verschil blijft voor vrijwel alle meetposten gemiddeld genomen ruim boven de 10 dB. Door een vergelijking te maken van de bovenste

grafiek van Figuur 26 met Figuur 14 voor Schiphol is te zien dat de trend voor Eindhoven tot een afstand van 8 km vergelijkbaar is met de trend voor Schiphol. Deze constatering wijst erop aan dat de analyse voor Schiphol leidend is voor het toepassingsbereik van metingen als functie van afstand tot de luchthaven, omdat de metingen daar tot op een grotere afstand zijn uitgevoerd (namelijk tot 27 km van de luchthaven). Zowel startende als landende vliegtuigen van en naar Eindhoven Airport zullen tot vergelijkbare afstanden meetbaar zijn als bij Schiphol.

Als functie van geluidbelasting blijkt uit Figuur 26 (onderste grafiek) dat startende vliegtuigen op de meeste meetposten rond Eindhoven Airport gemiddeld genomen een hogere geluidbelasting veroorzaken dan landende vliegtuigen. Ook in gebieden met een lage geluidbelasting komen de maximale geluidsniveaus voor starts doorgaans ruim boven het achtergrondgeluid uit. Dit kan liggen aan het feit dat startende vliegtuigen tot een afstand van circa 8 km van de luchthaven nog op een lage vlieghoogte vliegen en hoge geluidsniveaus produceren. De geluidsniveaus voor landende vliegtuigen vallen op de meeste meetposten lager uit en komen sneller in de buurt van het achtergrondgeluid. Reden hiervoor kan de ligging van de meetposten zijn ten opzichte van de landingsroutes, in de zin dat de meetposten (lateraal) verder bij de landingsroutes vandaan liggen en daardoor lagere geluidsniveaus meten van landende vliegtuigen.

3.4.3.2 Effect op basis van type vliegtuig

Aangezien Eindhoven Airport een regionale luchthaven is, vliegen er geen langeafstandsvluchten van en naar Eindhoven. Dit blijkt uit Figuur 27, waarbij de Airbus A320, A321 en A321XLR (ICAO code A21N), de Boeing B737 en B737-800 en de McDonnell Douglas DC-10 de meest voorkomende vliegtuigtypen op Eindhoven zijn. Al deze vliegtuigtypen zijn vergelijkbaar en produceren vergelijkbare geluidsniveaus op de meetposten rondom Eindhoven. Wel is een grotere spreiding in de gemeten geluidsniveaus gezien voor de B738 voor starts, wat kan liggen aan een grotere spreiding in de gevlogen vlieghoogte voor dit vliegtuigtype. De trends op vliegtuigtypeniveau zijn vergelijkbaar met de overall trends gezien voor alle metingen in paragraaf 3.4.3.1.



Figuur 27 Verschil tussen L_{Amax} en L_{95} per meetpost voor Eindhoven Airport als functie van geluidbelasting voor informatievoorziening, met opsplitsing op basis van de zes meest voorkomende vliegtuigtypen

In tegenstelling tot Schiphol, is het lastiger om vast te stellen wat precies het effect is van het gebruik van de drempelwaarde per meetpost bij Eindhoven Airport. Het is duidelijk dat ook voor Eindhoven een deel van de metingen onder de drempelwaarde valt en daardoor niet in het meetsysteem wordt geregistreerd, maar omdat de geluidniveaus tot een afstand van 8 km doorgaans hoger zijn dan tot 27 km (of verder), wordt het effect van de drempelwaarde op het aantal geregistreerde metingen lager ingeschat dan op Schiphol. Op basis van Figuur 26 en Figuur 27 zal het effect van de drempelwaarde sterker zijn voor landingen op Eindhoven Airport dan voor starts.

3.5 Samenvatting bevindingen toepassingsbereik van metingen

De analyse in dit hoofdstuk heeft zich gericht op het bepalen van het toepassingsbereik van metingen van vliegtuiggeluid als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting. Dit is gedaan voor twee meetdoelen – het primaire doel van validatie van rekenmodellen en het secundaire doel van informatievoorziening aan omwonenden. De analyse voor de twee luchthavens Schiphol en Eindhoven heeft tot een aantal bevindingen geleid. Op basis van deze bevindingen wordt de onderzoeksvraag 'tot waar kunnen metingen van vliegtuiggeluid betrouwbaar worden uitgevoerd voor validatie en informatievoorziening?' in deze paragraaf beantwoord.

1. Doel validatie:

Metingen die aan alle validatie-eisen voldoen, kunnen als de meest betrouwbare metingen worden beschouwd die op dit moment beschikbaar zijn. De analyse in dit hoofdstuk heeft laten zien dat, naast validatie-eisen aan de meetlocatie, aanvullende meeteisen aan windsnelheid, neerslag en elevatiehoek de spreiding in de metingen (en dus de onzekerheid) kunnen verkleinen. Hierbij is ook opgemerkt dat het aantal metingen dat

aan alle validatie-eisen voldoet met toenemende afstand tot de luchthaven en afnemende geluidbelasting steeds lager wordt. Verder weg van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting wordt het gemiddeld genomen lastiger om consistent betrouwbare metingen uit te voeren die aan de validatie-eisen voldoen. Op basis van de uitgevoerde analyse kan het toepassingsbereik voor *validatie* als volgt worden bepaald:

A. *Als functie van afstand tot de luchthaven:*

De trends op basis van afstand tot de luchthaven leveren in het algemeen geen eenduidig antwoord op de vraag tot welke afstand van de luchthaven vliegtuiggeluid betrouwbaar te meten is. Wel wordt gezien dat het toepassingsbereik van metingen als functie van afstand tot de luchthaven verschilt voor starts en voor landingen. Starts zijn gemiddeld genomen tot een afstand van circa 15-20 km van de luchthaven van het achtergrondgeluid te onderscheiden, landingen tot minstens 27 km van de luchthaven. Het aantal metingen dat op deze grote afstanden aan alle validatie-eisen voldoet is vrij laag. Het is op basis van de meetdata die voor deze studie zijn gebruikt niet mogelijk om te bepalen tot welke afstand voorbij 27 km voor landingen en 20 km voor starts vliegtuiggeluid nog van het achtergrondgeluid te onderscheiden zal zijn. Daarvoor zouden aanvullende metingen op nog grotere afstanden van de luchthaven vereist zijn. Ook het effect op de metingen van het gebruik van drempelwaarden is niet meteen duidelijk, dat wil zeggen, hoeveel vliegbewegingen verder weg van de luchthaven potentieel onder de drempelwaarde vallen en daardoor niet in de meetdataset geregistreerd zijn.

De conclusies zijn grotendeels bepaald door de analyse voor Schiphol, omdat de meetdata voor Eindhoven Airport slechts tot een afstand van 8 km van de luchthaven beschikbaar zijn. De analyse voor Schiphol als functie van afstand tot de luchthaven wordt daarom als leidend gezien.

B. *Als functie van geluidbelasting:*

Het toepassingsbereik als functie van geluidbelasting kan per luchthaven verschillen. Dit komt door verschillen in de vlootsamenstelling en aantallen vliegbewegingen per luchthaven, maar ook door de ligging van de vliegroutes, waardoor de geluidcontour van bijvoorbeeld 45 dB voor Schiphol een veel grotere oppervlakte beslaat dan voor Eindhoven Airport.

- Voor Schiphol wordt geconcludeerd dat metingen gemiddeld genomen bij een geluidbelasting tussen de **40-45 dB** in de buurt van het achtergrondgeluid beginnen te komen. Bij dit bereik wordt het consistent betrouwbaar meten van vliegtuiggeluid lastiger. Het aantal metingen dat aan de strenge validatie-eisen voldoet, neemt bij afnemende geluidbelasting sterk af. Het genoemde toepassingsbereik is daarom vooral gebaseerd op de trends die worden gezien over alle meetposten rondom Schiphol, waarbij bij hoge geluidbelasting veel meer metingen beschikbaar zijn dan bij lage geluidbelasting. Bij lage geluidbelasting speelt de drempelwaarde een

belangrijke rol, waardoor metingen onder de drempelwaarde niet worden geregistreerd. Indien geen drempelwaarde op de meetposten zou worden toegepast, zou de conclusie van het genoemde toepassingsbereik van 40-45 dB L_{den} als ondergrens nog concreter worden.

- Voor Eindhoven Airport is het toepassingsbereik voor validatie voorlopig niet te bepalen omdat zeer weinig metingen aan de validatie-eisen (in hun huidige vorm) voldoen.

Het toepassingsbereik kan verder gedeeltelijk verschillen per vliegtuigtype, waarbij langeafstandsvliegtuigtypen (zoals bijvoorbeeld de B747, 777, 787 of A330, 350 of 380) door hun hogere geluidsniveaus ook bij grotere afstanden en lagere geluidbelasting meetbaar zijn dan vliegtuigtypen bedoeld voor korte afstandsvluchten.

2. Doel informatievoorziening:

In tegenstelling tot validatie worden conform de PAMV-nationale meetstrategie geen strenge eisen aan metingen voor informatievoorziening voorgesteld. Metingen voor informatievoorziening kennen daardoor een veel grotere spreiding en daarmee een grotere onzekerheid in hun betrouwbaarheid.

A. *Als functie van afstand tot de luchthaven:*

Met het besef dat een deel van de metingen voor informatievoorziening potentieel door versturende factoren is betroffen, worden voor informatievoorziening vergelijkbare gemiddelde trends gezien als voor validatie. Starts kunnen gemiddeld genomen tot een afstand van 15-20 km van de luchthaven worden gemeten, landingen minstens tot 27 km van de luchthaven. Sommige grotere vliegtuigtypen zullen nog tot op grotere afstanden van de luchthaven meetbaar zijn. Het effect van ontbrekende metingen bij lage geluidsniveaus is ook voor informatievoorziening zeer bepalend.

B. *Als functie van geluidbelasting:*

- Voor Schiphol kunnen als functie van geluidbelasting vergelijkbare conclusies worden getrokken als bij validatie. Metingen voor informatievoorziening zijn gemiddeld genomen tot een bereik van 40-45 dB L_{den} meetbaar, maar met een grote spreiding in de gemeten waarden. Indien geen drempelwaarde wordt toegepast, zou deze conclusie nog definitiever zijn. Door de grotere spreiding in gemeten waarden is de kans groot dat het consistent betrouwbaar meten van metingen voor informatievoorziening ook binnen dit bereik lastig zal zijn.
- Voor Eindhoven Airport beginnen metingen voor informatievoorziening net als voor Schiphol tussen 40-45 dB L_{den} in de buurt van het achtergrondgeluid te komen. Dit geldt in Eindhoven vooral voor landingen, omdat de gemeten geluidsniveaus op de huidige meetlocaties lager zijn voor landingen dan voor starts. Starts bij Eindhoven Airport zijn tot nog lagere

geluidbelastingwaarden meetbaar, doordat de meetposten dichterbij de luchthaven liggen waar startende vliegtuigen zich nog op lage vlieghoogtes bevinden.

Het toepassingsbereik voor informatievoorziening kan ook per vliegtuigtype (licht) verschillen, grotere vliegtuigen zijn doorgaans tot een grotere afstand tot de luchthaven en lagere geluidbelastingwaarden meetbaar.

Kanttekeningen bij de analyse:

- De analyse voor het toepassingsbereik is beïnvloed door de toepassing van drempelwaarden per meetpost.
- De analyse is afhankelijk van de meetapparatuur en algoritmen van Envirosuite. De conclusies zijn daarom vooral van toepassing op metingen van deze aard. Voor metingen die met andere meetapparatuur zijn uitgevoerd, zouden de conclusies gedeeltelijk kunnen verschillen.
- De meetposten hebben oorspronkelijk informatievoorziening als doel gehad, niet validatie.

4 Toepassingsbereik combinatie van metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid

In dit hoofdstuk wordt een eerste vergelijking gemaakt van de geluidbelasting berekend met het Doc.29-rekenmodel en 'gemeten' geluidbelasting² op de NOMOS-meetposten rondom Schiphol. Het doel hierbij is ten eerste om het effect van de validatie-eisen op het verschil tussen meten en rekenen en de spreiding daarin te duiden en vervolgens te bepalen of er een ondergrens te bepalen is vanaf waar de berekeningen wezenlijk van de metingen beginnen af te wijken. De analyse geeft dan ook aan tot waar een zinvolle vergelijking tussen berekeningen en metingen mogelijk is en vanaf waar de onzekerheid in de vergelijking te hoog wordt om een concrete uitspraak te doen over de betrouwbaarheid van het model. Net als in hoofdstuk 3, over het toepassingsbereik van metingen, zal het toepassingsbereik van het Doc.29-model, door middel van de vergelijking zowel als functie van afstand tot de luchthaven als geluidbelasting worden geanalyseerd.

Voor de analyse die we in dit hoofdstuk presenteren dient met de volgende punten rekening te worden gehouden:

- De vergelijking tussen berekeningen en metingen in dit onderzoek is uitgevoerd op basis van de huidige Doc.29-implementatie voor Schiphol. Zoals genoemd in hoofdstuk 1, paragraaf 1.1.2, valt het bepalen van het toepassingsbereik formeel onder de aanbeveling modelontwikkeling. In een later traject, na deze fase van de PAMV, is ook een modelverbetering beoogd met een focus op punten waarop de vergelijking alsnog kan worden verbeterd. De eventuele modelverbetering zal in dat geval afzonderlijk worden gerapporteerd. Hierbij is op te merken dat de uitkomsten van modelverbetering het toepassingsbereik van het Doc.29-model potentieel kunnen vergroten.
- Aangezien de vergelijking in dit onderzoek alleen voor de luchthaven Schiphol wordt gemaakt, is het toepassingsbereik zoals we die in dit onderzoek rapporteren dan ook vooral van toepassing voor Schiphol. Voor de andere (regionale) luchthavens zou het toepassingsbereik gedeeltelijk kunnen verschillen.
- De vergelijking in dit hoofdstuk wordt gemaakt voor een gebruiksjaar (1 november-31 oktober) in tegenstelling tot een kalenderjaar zoals gemaakt in hoofdstuk 3. De reden hiervoor is dat de berekeningen voor de meeste formele doelen doorgaans voor een gebruiksjaar worden uitgevoerd.
- Daarnaast is de analyse in dit hoofdstuk alleen gepresenteerd voor vliegbewegingen, waarvoor zowel een gemeten als een berekende SEL-waarde beschikbaar was. Door het gebruik van de drempelwaarde ontbreekt een aantal vluchten in de gemeten dataset waardoor er geen koppeling met de betreffende berekende vlucht mogelijk was. Het effect van het gebruik van de drempelwaarde op de vergelijking wordt in het PAMV-validatierapport nader toegelicht (Sahai 2024). Er zijn in ieder

² Met gemeten geluidbelasting wordt hier bedoeld de geluidbelasting bepaald met SEL-waarden die in het ANOMS-systeem zijn geregistreerd en op basis van de gemeten tijdreeks per vliegbeweging/event zijn bepaald.

geval ook voor de gekoppelde dataset voldoende data om een statistisch oordeel te geven van de vergelijking. Wel is een ondergrens toegepast op een minimaal aantal gekoppelde vluchten per meetpost. Indien het aantal vluchten lager is dan vijftig, wordt de betreffende meetpost niet in de analyse meegenomen. Voor de huidige analyse in dit onderzoek betrof dit twee meetposten. Deze ondergrens is voorgesteld door onderzoekers in het Verenigd Koninkrijk (VK) om een minimaal niveau van statistische zekerheid na te streven (Rhodes D. P. 2018), (Trow 2018).

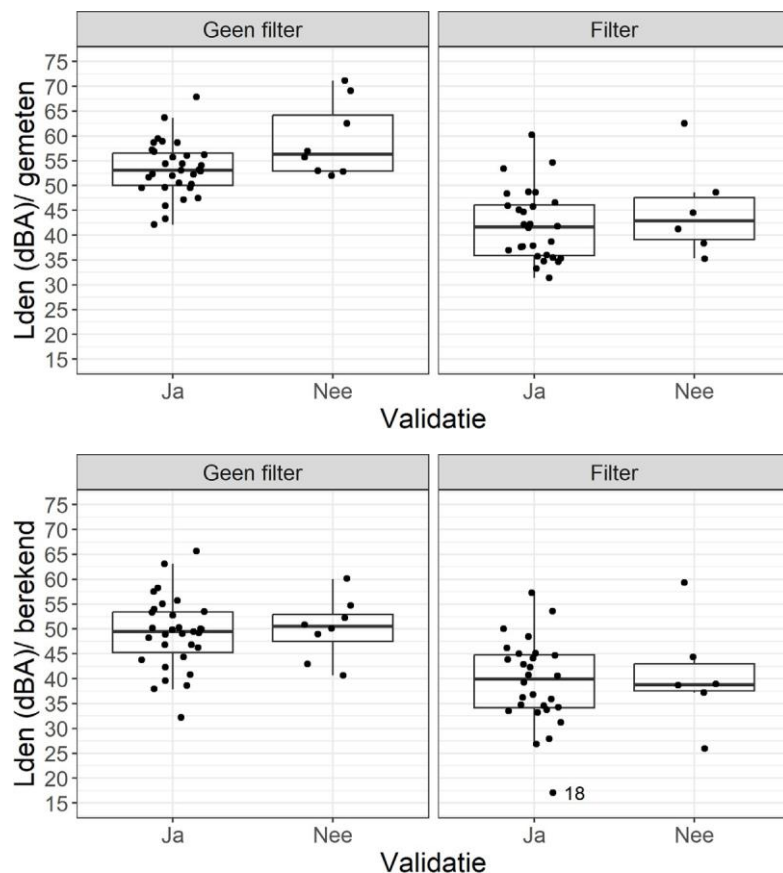
- De analyse van de vergelijking wordt in dit hoofdstuk (en in dit rapport) in een beknopte vorm gepresenteerd. Een meer uitgebreide statistische analyse van de vergelijking wordt in het PAMV-validatierapport gepresenteerd (Sahai 2024).
- Conform de PAMV-validatieaanpak (Sahai 2022) wordt een verschil van 2 dB L_{den} per meetpost tussen de gemeten en berekende geluidbelasting als de bovengrens van een aanvaardbaar verschil beschouwd. Een verschil boven deze waarde dient nader onderzocht te worden. Voor meer toelichting naar de keuze van deze waarde als validatie-criterium wordt verwezen naar het validatierapport (Sahai 2024).

4.1 Analyse vergelijking berekeningen met metingen

De analyse begint met een vergelijking van de berekende en gemeten geluidbelasting per meetpost en het effect van het toepassen van de aanvullende meeteisen (gezamenlijk hieronder aangeduid als 'filters') op het verschil tussen meten en rekenen. De toegepaste filters zijn: 1) elevatiehoek van minimaal 60 graden; 2) windsnelheid van maximaal 5 m/s; en 3) geen neerslag. Vervolgens worden trends gepresenteerd voor het verschil tussen de gemeten en berekende geluidbelasting als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting per meetpost.

4.1.1 Effect validatiefilters op de vergelijking

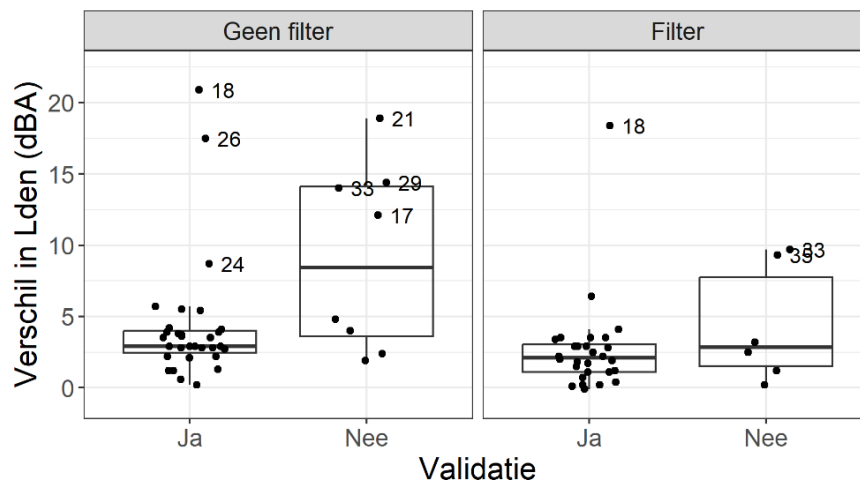
In hoofdstuk 3 is het effect van de validatiefilters aangetoond op individuele metingen op L_{Amax} -niveau. Het Doc.29-model is echter bedoeld om de gemiddelde jaarbelasting te bepalen in de geluidmaat L_{den} (Level day-evening-night) waarbij meerdere metingen of berekeningen over het hele gebruiksjaar worden meegenomen. In Figuur 28 wordt het effect van de validatiefilters aangetoond op de gemeten geluidbelasting (bovenste grafiek) en de berekende geluidbelasting (onderste grafiek) voor het gebruiksjaar 2019. Dit wordt gedaan in de vorm van een box-plot. Een verdere opsplitsing is gemaakt op basis van meetposten die volgens de kaders van de nationale meetstrategie geschikt zijn voor validatie (Sahai 2021) en meetposten die niet geschikt zijn voor validatie (in de figuur – validatie ja/nee). Het doel van Figuur 28 is om een visuele weergave te laten zien van welke L_{den} -waarden voor het gebruiksjaar 2019 zijn gemeten en hoe deze zich verhouden tot de berekende L_{den} -waarden. De box-plots maken ook rechtstreeks de spreiding in beide waarden (gemeten en berekend) duidelijk en laten zien waar de mediaan en de eerste en derde kwartielen van de waarden liggen.



Figuur 28 Effect van het toepassen van de validatiefilters (filters) op de geluidbelasting – gemeten (boven) en berekend (onder)

In Figuur 28 is te zien dat de gemeten geluidbelasting doorgaans hoger ligt dan de berekende geluidbelasting, zeker als er geen validatiefilters worden toegepast en het meetposten betreft die niet voor validatie geschikt zijn. Zowel de mediaanwaarde als de minimaal en maximaal gemeten L_{den} 's liggen doorgaans hoger dan de berekende L_{den} 's. Het gemiddelde verschil wordt wel steeds kleiner, door het toepassen van validatiefilters en het gebruik van validatiemeetposten. Tevens wordt de spreiding in de gemeten data hierdoor kleiner.

In Figuur 28 is te zien dat de geluidbelasting zonder toepassing van de validatiefilters hoger is dan na toepassing van de filters. Dit komt door het feit dat na filteren een lager aantal metingen beschikbaar blijft om de betreffende L_{den} -waarde te bepalen.



Figuur 29 Effect van het toepassen van de validatiefilters op het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting

In Figuur 29 tonen de betreffende box-plots het verschil tussen de gemeten en berekende geluidbelasting. Bij een verschil groter dan nul is de gemeten waarde hoger dan de berekende waarde. Hierbij wordt de informatie uit Figuur 28 op een andere manier gepresenteerd en is te zien dat toepassing van validatiefilters het verschil tussen meten en rekenen kan verkleinen. Niet alleen de absolute waarde van het verschil wordt door het toepassen van validatiefilters verkleind maar ook de spreiding in het verschil tussen metingen en berekeningen. Door het toepassen van de filters komen beide waarden dicht bij elkaar.

Dit geldt voor de meeste validatie-meetposten, met uitzondering van meetposten 18 en 26 die duidelijke uitliggers blijken te zijn. Deze twee meetposten lieten afwijkende metingen zien waardoor ze buiten de analyse zijn gelaten. Voor meetpost 18 bleek dat tijdens de inventarisatie in 2020 een onjuist adres voor deze meetpost is overgenomen, waardoor de berekeningen zijn uitgevoerd voor de verkeerde locatie. Voor meetpost 26 blijkt dat er op deze meetlocatie veel vliegtuigbewegingen zijn gemeten en berekend met zeer lage elevatiehoeken op relatief grote afstand (3 km). Mogelijk zijn hierbij stoorgeluiden opgepikt en gekoppeld aan vliegtuigen die worden overstemd door het stoorgeluid. Nader onderzoek zou dit verder moeten uitwijzen.

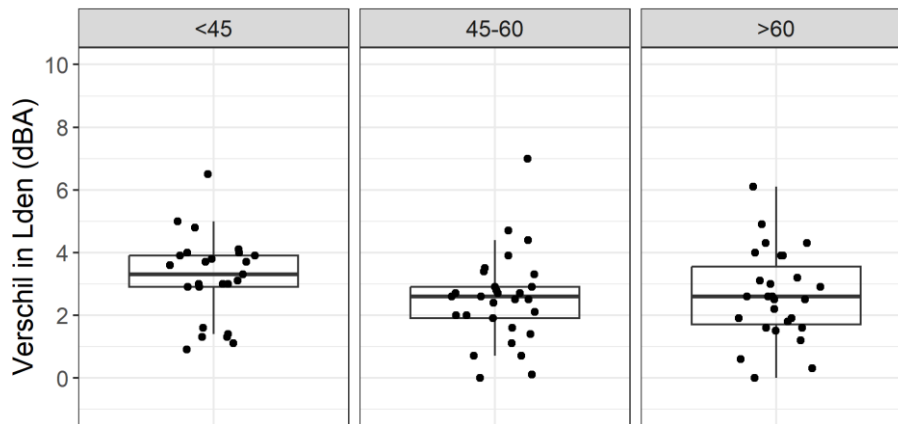
In de volgende paragrafen wordt het afzonderlijke effect gepresenteerd van de versturende factoren elevatiehoek, wind en neerslag op de vergelijking tussen de gemeten en berekende geluidbelasting.

4.1.1.1 Effect elevatiehoek

Figuur 30 laat het effect zien op het verschil tussen meten en rekenen van het toepassen van diverse filters voor de elevatiehoek. Een opsplitsing is gemaakt in drie categorieën: een elevatiehoek kleiner dan 45 graden, tussen 45 en 60 graden en groter dan 60 graden. Het kan in Figuur 30 worden opgemerkt dat het toepassen van een validatie-eis van minimaal 60 graden of hoger de grootste bijdrage levert aan het verkleinen van het verschil tussen meten en rekenen (wat ook in Figuur 29 terugkomt). Een interessante constatering is ook dat het verschil al

vanaf een minimale elevatiehoek van 45 graden significant wordt verkleind en er een vrij klein verschil zit tussen de categorieën 45-60 graden en groter dan 60 graden. Op basis van deze constatering kan het voor validatie zinvol zijn om deze twee categorieën te combineren en de eis van een minimale elevatiehoek op 45 graden te zetten. Hiermee zal ook het aantal bruikbare metingen voor validatie toenemen. Deze minimale waarde van 45 graden voor de elevatiehoek wordt tevens het Verenigde Koninkrijk aanbevolen (Trow 2018).

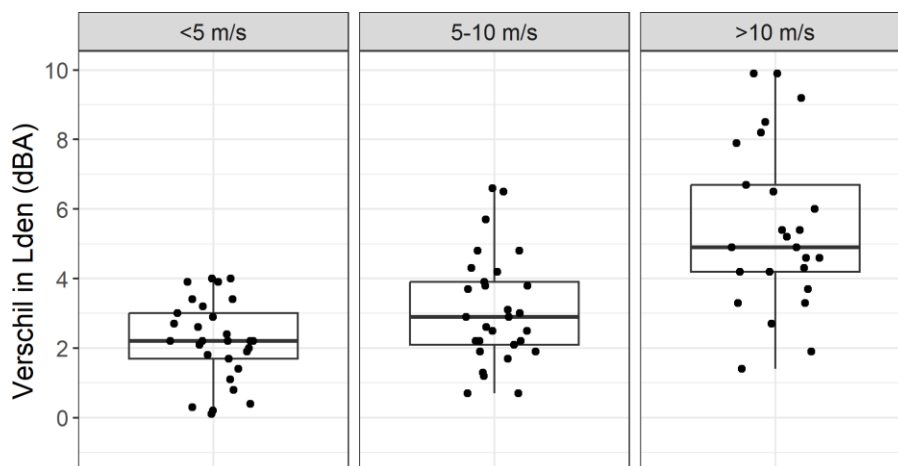
Effect van elevatiehoek



Figuur 30 Effect van elevatiehoek op het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting

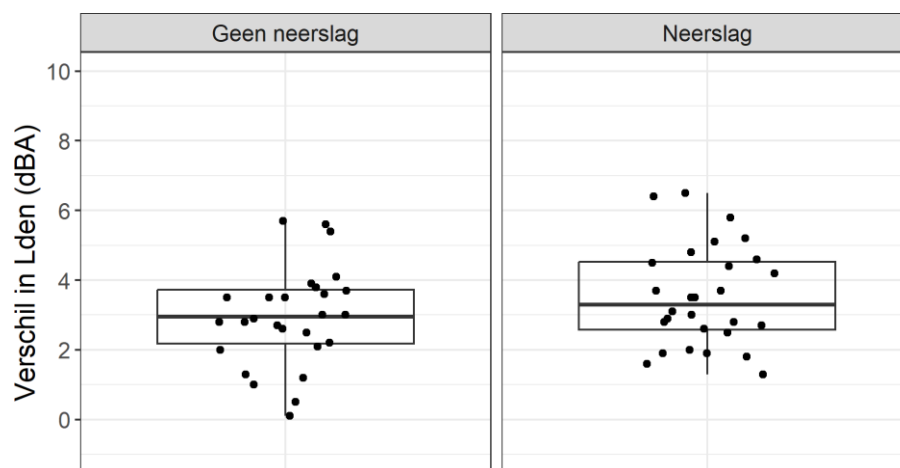
4.1.1.2 Effect wind en neerslag

In Figuur 31 is het effect van de windsnelheid te zien op het verschil tussen de gemeten en berekende geluidbelasting. Net als voor de elevatiehoek is ook hier een opsplitsing gemaakt in drie categorieën: windsnelheid lager dan 5 m/s, tussen 5 en 10 m/s en hoger dan 10 m/s.



Figuur 31 Effect van windsnelheid op het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting

In Figuur 31 is te zien dat het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting bij hogere windsnelheden groter wordt. Het uitsluiten van metingen bij hogere windsnelheden lijkt daarom verstandig, conform de aanbeveling uit de norm ISO-20906 (ISO-20906/TC 2009). De stijging in het verschil voor windsnelheden tussen 5 en 10 m/s is wel minder dan de stijging voor windsnelheden hoger dan 10 m/s. Het zou op basis hiervan overwogen kunnen worden om per meetpost te beoordelen of een bovengrens van 10 m/s gehanteerd dient te worden in plaats van de 5 m/s, zoals voorgesteld in de PAMV-validatieaanpak (Sahai 2022). Een hogere eis dan 5 m/s zal tevens leiden tot meer beschikbare meetdata voor de vergelijking.



Figuur 32 Effect van neerslag op het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting

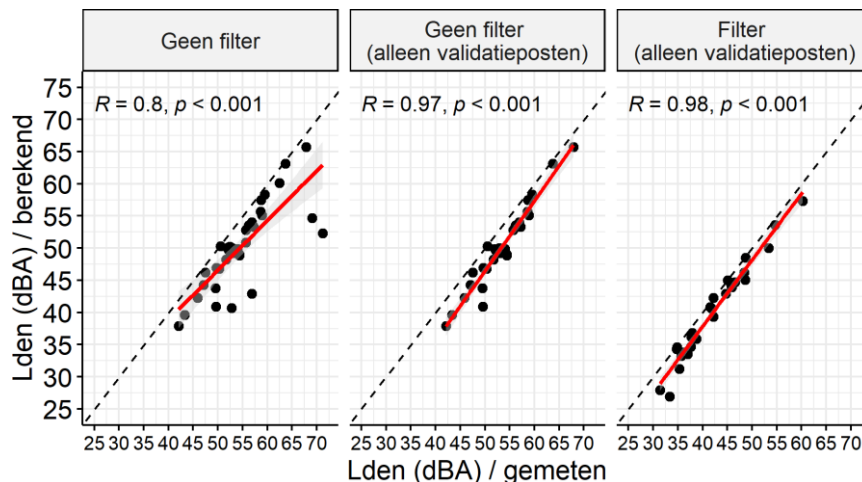
Figuur 32 laat het effect van neerslag zien op het verschil tussen de gemeten en berekende geluidbelasting. Voor metingen die bij aanwezigheid van neerslag zijn uitgevoerd, is een lichte stijging in het verschil merkbaar, van circa 0,5 dB L_{den} . Hoewel de stijging door neerslag niet bijzonder hoog is, zullen metingen die bij aanwezigheid van neerslag zijn uitgevoerd voor de validatie worden uitgefilterd, omdat deze als niet of minder betrouwbaar worden beschouwd. Daarnaast wordt het effect van neerslag op de geluidbelasting niet gemodelleerd en zal het uitfilteren van metingen tijdens neerslag leiden tot een eerlijkere vergelijking tussen meten en rekenen, conform het voorstel in de PAMV-validatieaanpak (Sahai 2022).

4.1.2 *Vergelijking meten-rekenen*

In deze paragraaf wordt de vergelijking gepresenteerd tussen de gemeten en berekende geluidbelasting. Dit wordt eerst gedaan door middel van de correlatie tussen beide, gevolgd door een analyse van het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting per meetpost. Hiermee wordt een poging gedaan om het toepassingsbereik van het Doc.29-model te bepalen door te kijken naar de waarde van de geluidbelasting of de afstand tot de luchthaven vanaf waar het verschil significant begint toe te nemen.

In Figuur 33 wordt de correlatie tussen de gemeten en berekende geluidbelasting gepresenteerd. Het effect van het toepassen van de validatie-eisen op de correlatie tussen meten en rekenen is in deze figuur duidelijk zichtbaar. Het uitsluiten van meetposten die volgens de kaders van de nationale meetstrategie ongeschikt zijn voor validatie verhoogt de correlatie tussen beide, en het toepassen van aanvullende meeteisen door middel van de validatiefilters op deze meetposten verhoogt de correlatie nog verder. De R-waarde³ wordt hierbij verhoogd van 0,8 tot 0,98 en de p-waarde⁴ blijft voor alle drie gevallen ruim onder het significantieniveau. De rode lijn in deze figuur is de lijn van beste fit en de zwarte, gestreepte lijn is de ideale lineaire vergelijking tussen meten en rekenen, waarbij een berekende waarde precies overeen komt met een gemeten waarde.

Hoewel het toepassen van de filters de correlatie tussen berekende en gemeten geluidbelasting verhoogt, blijven de berekende waarden lager dan de gemeten waarden. Dit kan voor een deel liggen aan het feit dat bij een geluidmeting ook omgevingsgeluid en geluid van andere bronnen wordt gemeten, waardoor de metingen hoger uitvallen. Ook kan hier het effect voor een deel liggen aan het alleen meenemen van de vliegbewegingen waarvoor zowel een gemeten als een berekende SEL-waarde beschikbaar was. Het is op dit moment niet duidelijk of in en hoeverre het model systematisch de geluidbelasting onderschat, omdat de oorzaken van het verschil in dit traject van de PAMV niet zijn onderzocht. Dit onderwerp wordt voor vervolgonderzoek beoogd.



Figuur 33 Correlatie tussen gemeten en berekende geluidbelasting – zonder toepassing van validatiefilters op alle meetposten (links), alleen voor validatie meetposten (midden) en na het toepassen van validatiefilters op validatie meetposten (rechts)

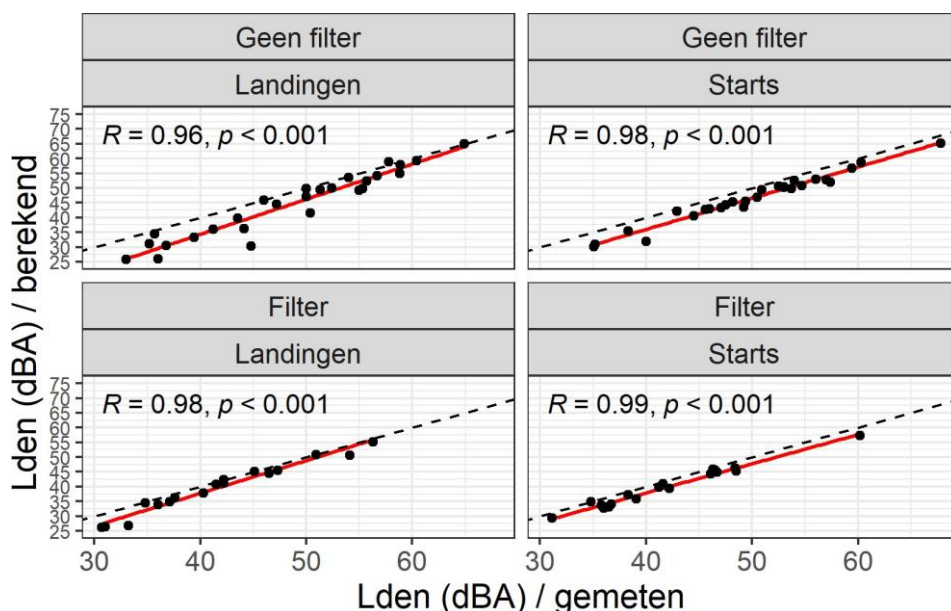
In de rechter plot in Figuur 33 is ook te zien dat het verschil tussen de gemeten en berekende geluidbelasting kleiner is voor hoge geluidbelastingwaarden en toeneemt naarmate de geluidbelasting lager wordt. Dit beeld is ook te zien in Figuur 34, waarin een opsplitsing is

³ De R-waarde geeft de correlatie weer. Een waarde van 0 geeft aan dat er geen correlatie is; een waarde dicht bij 1 geeft aan dat er een sterke correlatie is.

⁴ De p-waarde geeft aan of de vergelijking statistisch significant is en heeft ook een waarde tussen 0 en 1. Als de p-waarde kleiner is dan het significantieniveau van 0,05, is de vergelijking statistisch relevant.

gemaakt tussen starts en landingen en de correlatie afzonderlijk is bepaald voor beide vluchtsoorten.

Deze vergelijking is voor de gekoppelde dataset gemaakt waarbij iedere meting aan een berekening is gekoppeld. In het validatieonderzoek wordt ook de correlatie gepresenteerd indien voor alle berekende vluchten de vergelijking wordt gemaakt met alle gemeten vluchten (zonder een koppeling van beiden). Deze vergelijking heeft dan het voordeel dat alle vluchten die in het gebruiksjaar hebben plaatsgevonden berekend worden, maar tegelijkertijd heeft deze aanpak het nadeel dat, zeker bij meetposten met een lage geluidbelasting, relatief weinig metingen vergeleken worden met een groot aantal berekeningen. Daarnaast blijft onduidelijk wat de bijdrage is van de ontbrekende vluchten op de *gemeten* geluidbelasting indien er geen drempelwaarde zou worden toegepast. Bij de vergelijking van alleen vliegbewegingen die gekoppeld konden worden, is de dataset wel kleiner, waardoor op sommige meetposten vrij weinig vliegbewegingen met elkaar worden vergeleken.



Figuur 34 Correlatie tussen gemeten en berekende geluidbelasting opgesplitst in starts en landingen – zonder toepassing van validatiefilters op validatiemeetposten (boven) en na het toepassen van validatiefilters op validatiemeetposten (onder)

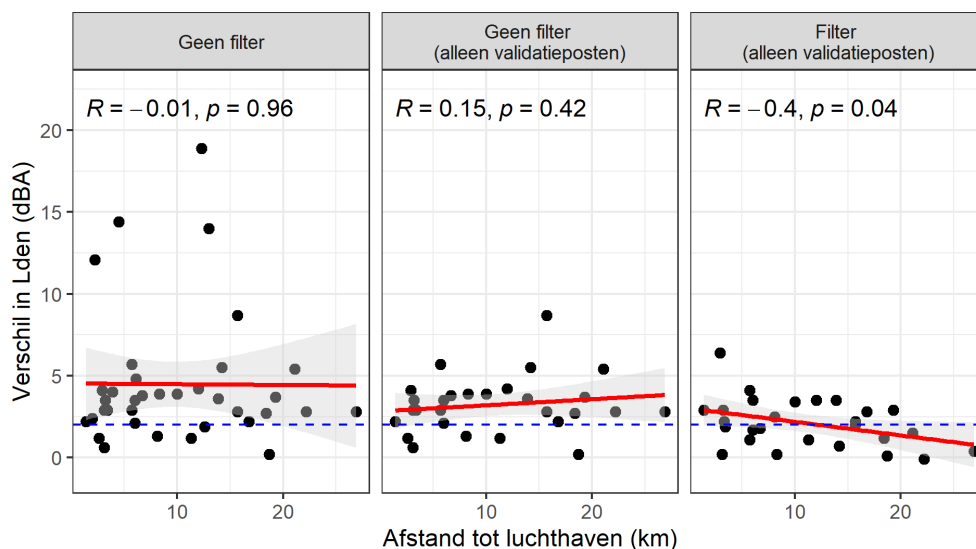
Figuur 34 laat de opsplitsing van Figuur 33 zien in starts en landingen en hoe de correlatie tussen berekende en gemeten geluidbelasting op basis van vluchtsoort eruitziet. Met de opsplitsing wordt duidelijk dat de correlatie voor zowel starts als landingen hoog is (hoge R-waarden in beide gevallen, met p-waarden ruim onder het significantieniveau). Voor starts is het verschil zowel bij hoge als lage geluidbelasting kleiner en volgt de ideale, gestreepte zwarte lijn over het hele bereik van geluidbelasting. Vooral voor landingen schijnt het verschil met afnemende geluidbelasting toe te nemen. Deze figuur levert waardevolle inzichten op voor een eventuele modelverbetering op basis van

vluchtsoort. In het validatieonderzoek is de opsplitsing nog een niveau dieper gemaakt en gepresenteerd op basis van vliegtuigtype (Sahai 2024). Door de correlatie te analyseren op vliegtuigtypeniveau, zal verder duidelijk worden welke vliegtuigtypen het meest aan het geobserveerde verschil bijdragen en waar ten aanzien van modelverbetering de grootste winst te behalen is.

4.1.2.1

Vergelijking als functie van afstand tot de luchthaven

In Figuur 35 is het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting te zien als functie van afstand tot de luchthaven. In deze figuur is de lichte trend waarneembaar dat het verschil tussen meten en rekenen als functie van afstand tot de luchthaven toeneemt indien er geen validatiefilters worden toegepast. Hierbij moet worden opgemerkt dat de resultaten voor alle meetposten sterk beïnvloed worden door een beperkt aantal meetposten met (zeer) grote verschillen tussen meten en rekenen. Na het toepassen van de filters verdwijnt deze trend echter, en voor de gereduceerde dataset neemt het verschil met toenemende afstand af.



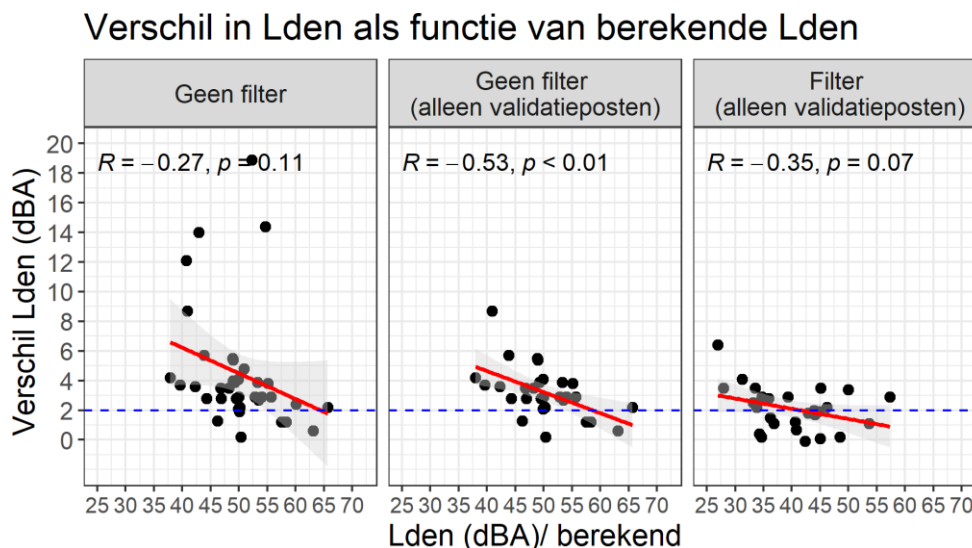
Figuur 35 Verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting als functie van afstand tot de luchthaven – voor alle meetposten zonder validatie-filters toegepast (links), voor alleen validatie meetposten zonder filters toegepast (midden) en voor alleen validatie meetposten met filters toegepast (rechts)

Door het ontbreken van een goede correlatie met de afstand laat Figuur 35 ook zien dat afstand tot de luchthaven wellicht niet de meest geschikte parameter is voor het uitdrukken van het toepassingsbereik van het rekenmodel. Deze constatering is vergelijkbaar met de minder duidelijke trends die we hebben gezien voor het toepassingsbereik van metingen als functie van afstand tot de luchthaven, waarbij geluidbelasting een betere, meer concrete maat voor dat doel bleek te zijn. Een meetpost kan verder weg van de luchthaven liggen maar als deze onder het vliegpad ligt, kunnen er ook verder weg relatief hoge geluidniveaus worden gemeten. Omgekeerd kan een meetpost zich dicht bij de luchthaven bevinden, maar als deze verder bij de vliegroute vandaan ligt, zullen de geluidniveaus op die locatie lager uitvallen (net als voor delen van Hoofddorp en Amsterdam). Ook wordt het effect van

aantallen vliegbewegingen of events niet goed in termen van afstand uitgedrukt terwijl deze factor in de geluidbelasting wel wordt meegenomen.

4.1.2.2 Vergelijking als functie van geluidbelasting

Figuur 36 laat het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting zien als functie van *berekende* geluidbelasting. Hoewel er nog steeds een vrij grote spreiding optreedt in het verschil als functie van geluidbelasting, zijn de trends iets sterker dan als functie van afstand tot de luchthaven. Voor alle gevallen (met en zonder validatiefilters toegepast) neemt het verschil met afnemende geluidbelasting toe. Ook in dit geval worden de resultaten voor alle meetposten zonder filters sterk beïnvloed door een aantal meetposten met grote verschillen tussen meten en rekenen. Indien alle validatiefilters worden toegepast en indien alleen validatie meetposten worden beschouwd, ligt het verschil tot circa 40 dB voor de gereduceerde (dat wil zeggen, gefilterde) dataset onder de 2 dB L_{den} , wat volgens de PAMV-validatieaanpak (Sahai 2022) als de bovengrens kan worden beschouwd van een aanvaardbaar verschil.



Figuur 36 Vershil tussen gemeten en berekende geluidbelasting als functie van berekende geluidbelasting – voor alle meetposten zonder validatie-filters toegepast (links), voor alleen validatie meetposten zonder filters toegepast (midden) en voor alleen validatie meetposten met filters toegepast (rechts)

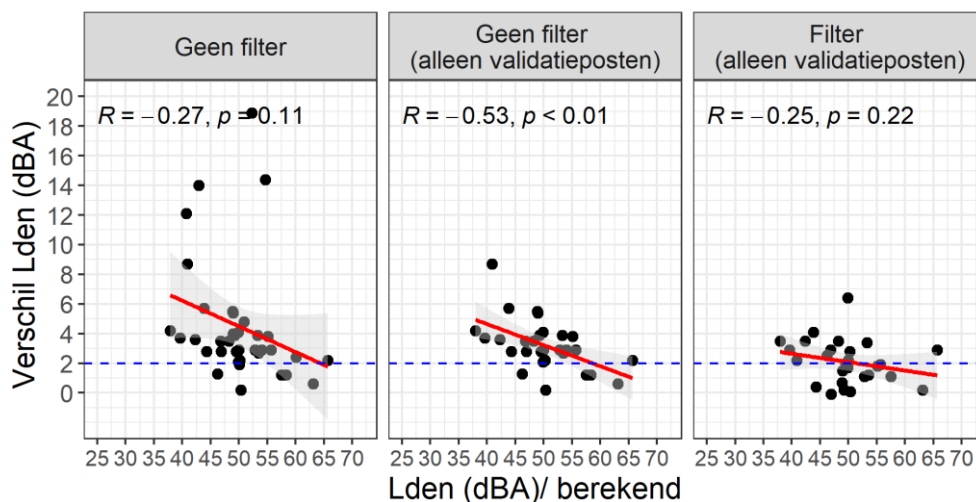
De gefilterde waarde van 40 dB is echter niet representatief voor de geluidbelasting die op de betreffende locatie daadwerkelijk optreedt. Voor het bepalen van het toepassingsbereik van het model is het van belang dat het toepassingsbereik wordt uitgedrukt in een representatieve waarde voor de geluidbelasting. De geluidbelasting voor de ongefilterde situatie is representatiever voor de daadwerkelijke geluidbelasting op de betreffende locatie en is ook wat voor omwonenden en beleidsmatig gezien het meest herkenbaar. Daarom dient het toepassingsbereik van het model in termen van de ongefilterde geluidbelasting te worden uitgedrukt. In Figuur 37 is het verschil in L_{den} afgezet tegen de ongefilterde waarden van de geluidbelasting voor de meest rechtse plot. Hieruit volgt dat bij waarden van de geluidbelasting

hoger dan circa 50 dB L_{den} het verschil doorgaans kleiner is dan 2 dB. Bij waarden lager dan 50 dB L_{den} neemt het verschil tussen metingen en berekeningen geleidelijk toe.

Bij deze constatering kunnen een aantal belangrijke opmerkingen worden gemaakt.

- De vergelijking bij lagere geluidbelastingwaarden kent een hoge onzekerheid waardoor het bepalen van het toepassingsbereik tot nog lagere waarden van de geluidbelasting op dit moment niet mogelijk is. Een significant deel van de relevante vluchten bij lage geluidbelasting wordt in het NOMOS-meetsysteem niet geregistreerd. Daardoor is het lastiger om een goede vergelijking te maken tussen gemeten en berekende geluidbelasting indien de gemeten geluidniveaus relatief laag zijn en dicht bij de drempelwaarde liggen. Door de hogere onzekerheid in de vergelijking bij lagere geluidbelastingwaarden kan op dit moment geen uitspraak worden gedaan over de betrouwbaarheid van de berekeningen bij lagere geluidbelastingwaarden dan circa 50 dB L_{den} .
- De bepaalde waarde van circa 50 dB L_{den} voor het toepassingsbereik is voor alle validatiemeetposten gebaseerd op de trendlijn van het verschil. Voor sommige meetposten waren de beschikbare meetdata na het toepassen van de validatiefilters vrij beperkt. Zoals te zien in Figuur 37 zijn de trends zeker waarneembaar, maar het genoemde toepassingsbereik dient hierdoor met een zeker voorbehoud te worden beschouwd.

Verskil in L_{den} als functie van berekende L_{den}



Figuur 37 Verskil tussen gemeten en berekende geluidbelasting als functie van berekende geluidbelasting – voor alle meetposten zonder validatiefilters toegepast (links), voor alleen validatiemeetposten zonder validatiefilters toegepast (midden) en voor alleen validatiemeetposten met validatiefilters toegepast en x-coördinaten net als voor de ongefilterde situatie (rechts)

4.2 **Samenvatting bevindingen en conclusie toepassingsbereik – combinatie van metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid**

De in dit hoofdstuk uitgevoerde analyse heeft inzichten opgeleverd in het toepassingsbereik van de combinatie van metingen en berekeningen van vliegtuiggeluid door de jaargemiddelde berekende geluidbelasting voor Schiphol te vergelijken met de jaargemiddelde gemeten geluidbelasting. De analyse laat zien dat het model voor hoge geluidbelastingwaarden betrouwbare resultaten kan geven, indien berekeningen worden vergeleken met metingen die voldoen aan de validatie-eisen die zijn bepaald voor de nationale meetstrategie en voor de PAMV-validatieaanpak. Figuur 37 laat zien dat het verschil tussen berekende en gemeten geluidbelasting tot circa 50 dB L_{den} beperkt is en onder 2 dB blijft. Als de berekende geluidbelasting onder deze waarde ligt, ligt het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting doorgaans hoger.

Op meetposten met een lage geluidbelasting vindt de vergelijking soms voor een vrij beperkt aantal gekoppelde vliegbewegingen plaats (maar wel altijd hoger dan vijftig). Daarnaast worden op deze meetposten alleen de relatief luide passages gemeten doordat de stillere passages onder de meetdrempel vallen. Dit zorgt ervoor dat de metingen een overschatting geven van de gemiddelde geluidniveaus van alle vliegtuigpassages. De bijdrage van de ontbrekende vluchten aan de gemeten geluidbelasting is onbekend omdat het NOMOS-meetsysteem deze vluchten niet registreert. Bij meetposten met een hoge geluidbelasting treedt dit effect slechts in beperkte vorm op en worden de meeste relevante vliegbewegingen wel geregistreerd. Dit aspect is in het PAMV-validatieonderzoek nader onderzocht en toegelicht (Sahai 2024). Op basis van de analyse in dit rapport kan geconcludeerd worden dat het minder goed mogelijk is om een goede vergelijking te maken tussen gemeten en berekende gegevens indien de gemeten geluidniveaus relatief laag zijn en dicht bij de drempelwaarde liggen. Door de hogere onzekerheid in de vergelijking bij lagere geluidbelastingwaarden kan op dit moment daarom geen concrete uitspraak worden gedaan over de betrouwbaarheid van de berekeningen bij geluidbelastingwaarden lager dan 50 dB L_{den} . Ook deze waarde van het toepassingsbereik is op basis van trends bepaald die wel zichtbaar maar minder sterk zijn door vrij beperkte meetdata op sommige meetposten.

Daarnaast zijn de volgende bevindingen gedaan op basis van de vergelijking tussen de gemeten en berekende geluidbelasting:

- Het toepassen van de validatiefilters verkleint het verschil tussen meten en rekenen aanzienlijk en elimineert grotendeels de spreiding in het verschil.
- De validatie-eis aan de elevatiehoek van minimaal 60 graden kan verzwakt worden tot minimaal 45 graden, aangezien de eis van 60 graden niet tot een wezenlijk kleiner verschil leidt dan een eis van 45 graden.
- Afstand tot de luchthaven lijkt geen geschikte maat te zijn voor het uitdrukken van het toepassingsbereik van het model. Afstand tot de vliegroute is voor de meeste meetposten bepalend wat betreft de geluidniveaus die op een gegeven locatie optreden.

Geluidbelasting lijkt voor dit doel beter geschikt en neemt naast de geluidniveaus (SEL-waarden) ook het aantal vliegbewegingen op een gegeven locatie mee.

- Het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting is iets groter voor landingen dan voor starts, vooral bij lage geluidbelasting.

5 Conclusies en aanbevelingen

In de PAMV-verkenningsfase werd voor modelontwikkeling aanbevolen om voor één of een aantal luchthavens een analyse uit te voeren van de grens waarbinnen geluidberekeningen en geluidmetingen betrouwbaar kunnen worden uitgevoerd. Bij deze analyse zouden de parameters die de betrouwbaarheid van beide methoden beïnvloeden in kaart worden gebracht. Op basis daarvan wordt voor de betreffende luchthavens vastgesteld tot welke afstand of waarde van de geluidbelasting betrouwbaar kan worden berekend en gemeten, rekening houdend met verschillende toepassingen (validatie of informatievoorziening).

Dit onderzoek heeft het doel gehad om het toepassingsbereik van berekeningen en metingen van vliegtuiggeluid te bepalen door de volgende twee vragen te beantwoorden:

1. Tot waar kunnen berekeningen van vliegtuiggeluid betrouwbaar worden uitgevoerd als functie van afstand en geluidbelasting?
2. Tot waar kunnen metingen van vliegtuiggeluid voor verschillende doelen betrouwbaar worden uitgevoerd als functie van afstand en geluidbelasting?

Om deze twee vragen te beantwoorden heeft het consortium van RIVM-NLR-To70 onderzoek uitgevoerd.

Ad 1.

De focus in dit onderzoek wat ligt betreft *berekeningen* op het ECAC-Doc.29-model, specifiek op de implementatie van dit model voor Schiphol. De situatie voor andere (regionale) luchthavens is in dit onderzoek niet meegenomen. Om het toepassingsbereik van berekeningen te bepalen is het onderzoek in twee stappen uitgevoerd.

- A. *Gevoeligheidsanalyse*: Eerst is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd door een aantal invoerparameters te variëren die een afhankelijkheid aantonen van de afstand tot de luchthaven en daarmee de geluidbelasting. Voor zowel starts als landingen is er op basis van deze gevoeligheidsanalyse geen aanleiding gevonden om het toepassingsbereik van berekeningen te limiteren. De onderzochte variaties in de invoergegevens leiden niet vanaf een bepaalde afstand of geluidbelasting tot een grote afwijking in de berekende geluidbelasting.

De analyse laat zien dat er voor starts beperkte onzekerheden optreden tussen 2 en 10 km en vanaf 30 km na het startpunt, met name recht onder het vliegp pad. Voor landingen treden ver van de luchthaven recht onder het vliegp pad de grootste onzekerheden op, die tot een beperkte variatie in de berekende geluidbelasting leiden. Vanaf ongeveer 20 km van de baan blijven de effecten vrijwel gelijk.

- B. *Vergelijking berekende en gemeten geluidbelasting*: Vervolgens is er voor Schiphol een vergelijking uitgevoerd van de jaargemiddelde berekende geluidbelasting met de jaargemiddelde gemeten geluidbelasting. De vergelijking laat zien dat het model voor hoge geluidbelastingwaarden

betrouwbare resultaten geeft indien berekeningen worden vergeleken met metingen die voldoen aan de validatie-eisen die zijn bepaald in de nationale meetstrategie en de aanvullende meeteisen die zijn bepaald voor de PAMV-validatieaanpak. Het verschil tussen berekende en gemeten geluidbelasting blijft tot circa 50 dB L_{den} onder de 2 dB, wat volgens de PAMV-validatieaanpak als de bovengrens van een aanvaardbaar verschil wordt beschouwd. Als lagere geluidbelastingwaarden worden berekend, ligt het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting doorgaans hoger, maar de vergelijking bij lage geluidbelastingwaarden kent een hogere onzekerheid. Door de hogere onzekerheid bij lagere geluidbelastingwaarden kan op dit moment geen concrete uitspraak worden gedaan over de betrouwbaarheid van de berekeningen bij geluidbelastingwaarden lager dan circa 50 dB L_{den} .

De bovenstaande conclusie geldt voor een dataset waarin iedere gemeten vliegbeweging aan een berekende vliegbeweging is gekoppeld. Bij meetposten met een lage geluidbelasting ontbreekt een groot deel van de vliegbewegingen door het gebruik van de drempelwaarde per meetpost – metingen onder de drempelwaarde worden niet in het NOMOS-meetsysteem van Schiphol geregistreerd. De bijdrage van de ontbrekende vluchten aan de gemeten geluidbelasting is hierdoor onbekend. Bij meetposten met een hoge geluidbelasting treedt het effect van ontbrekende vluchten slechts in beperkte mate op en worden de meeste relevante vliegbewegingen wel geregistreerd. Op meetposten met een lage geluidbelasting is zodoende op dit moment geen goede vergelijking tussen meten en rekenen mogelijk.

Er zijn daarnaast de volgende bevindingen gedaan:

- Het toepassen van de validatie-eisen verkleint het verschil tussen meten en rekenen aanzienlijk en elimineert grotendeels de spreiding in het verschil.
- Afstand tot de luchthaven lijkt geen geschikte maat voor het uitdrukken van het toepassingsbereik van het model. Geluidbelasting lijkt voor het uitdrukken van een toepassingsbereik beter geschikt en neemt naast de geluidniveaus (SEL-waarden) ook het aantal vliegbewegingen op een gegeven locatie mee.
- Er is een sterke correlatie tussen gemeten en berekende geluidbelasting en beide volgen dezelfde trends.
- Het verschil tussen gemeten en berekende geluidbelasting is iets groter voor landingen dan voor starts, vooral bij lage geluidbelastingwaarden.

Deze conclusies gelden voor de analyse die is uitgevoerd voor Schiphol. Of vergelijkbare conclusies ook voor de regionale luchthavens gelden, is op dit moment niet bekend.

Ad 2.

De analyse voor het bepalen van het toepassingsbereik van *metingen* van vliegtuiggeluid is voor het kalenderjaar 2019 uitgevoerd voor de luchthavens Schiphol en Eindhoven Airport. Het toepassingsbereik van metingen is geanalyseerd als functie van afstand tot de luchthaven en geluidbelasting voor twee meetdoelen – validatie van rekenmodellen als het primaire doel en informatievoorziening aan omwonenden als het secundaire doel. Voor beide meetdoelen is een aantal bevindingen gedaan.

A. *Validatie*:

De analyse laat zien dat naast validatie-eisen aan de meetlocatie aanvullende meeteisen aan windsnelheid, neerslag en elevatiehoek de spreiding in de metingen (en dus de onzekerheid) kunnen verkleinen. Verder weg van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting wordt het gemiddeld genomen lastiger om metingen uit te voeren die aan de validatie-eisen voldoen en die consistent meer dan 10 dB boven het achtergrondgeluid uitkomen.

Op basis van de uitgevoerde analyse kan het toepassingsbereik voor validatie als volgt worden bepaald:

- *Als functie van afstand tot de luchthaven*: De trends op basis van afstand tot de luchthaven leveren in het algemeen geen eenduidig antwoord op de vraag tot welke afstand van de luchthaven vliegtuiggeluid betrouwbaar kan worden gemeten. Wel wordt gezien dat het toepassingsbereik van metingen als functie van afstand tot de luchthaven tussen starts en landingen verschilt. Starts zijn gemiddeld genomen tot een afstand van circa 15-20 km van de luchthaven van het achtergrondgeluid te onderscheiden, landingen tot minstens 27 km van de luchthaven. Het aantal metingen dat op deze grote afstanden aan alle validatie-eisen voldoet, is vrij laag. Het is op basis van de meetdata die voor deze studie zijn gebruikt niet mogelijk om te bepalen tot welke afstand voorbij 27 km voor landingen en 20 km voor starts vliegtuiggeluid nog van het achtergrondgeluid te onderscheiden zal zijn.
- *Als functie van geluidbelasting*: Het toepassingsbereik van metingen als functie van geluidbelasting kan per luchthaven gedeeltelijk verschillen. Dit komt door verschillen in de vlootsamenstelling en aantallen vliegbewegingen per luchthaven maar ook door de ligging van de vliegroutes.
 - o Voor Schiphol wordt geconcludeerd dat metingen bij een geluidbelasting tussen de 40-45 dB L_{den} gemiddeld genomen in de buurt van het achtergrondgeluid beginnen te komen. Het aantal beschikbare metingen dat aan de strenge validatie-eisen voldoet neemt bij afnemende geluidbelasting sterk af. Bij lage geluidbelasting speelt de drempelwaarde hierbij ook een belangrijke rol. Deze conclusie is daarom vooral gebaseerd op de trend die is waargenomen over alle meetposten, waarbij bij hoge geluidbelasting meer metingen beschikbaar zijn dan bij lage geluidbelasting.

- Voor Eindhoven Airport is het toepassingsbereik voor validatie voorlopig niet te bepalen omdat zeer weinig metingen aan de validatie-eisen (in hun huidige vorm) voldoen.
- De trends als functie van geluidbelasting laten een duidelijker beeld zien van het toepassingsbereik van metingen dan afstand tot de luchthaven. De trends als functie van afstand leiden niet tot een concrete conclusie wat betreft een bovengrens.

Het toepassingsbereik van metingen kan verder gedeeltelijk verschillen per vliegtuigtype, waarbij vliegtuigtypen voor langeafstandsvluchten door hun hogere geluidniveaus ook op grotere afstanden en bij lagere geluidbelasting meetbaar zijn dan vliegtuigtypen bedoeld voor korteafstandsvluchten.

B. Informatievoorziening:

In tegenstelling tot validatie worden conform de nationale meetstrategie geen strenge eisen aan metingen voor informatievoorziening voorgesteld. Metingen voor informatievoorziening laten daardoor een veel grotere spreiding zien dan metingen voor validatie. Met het besef dat een deel van de metingen voor informatievoorziening potentieel door versturende factoren is getroffen, worden vergelijkbare gemiddelde trends gezien voor informatievoorziening als voor validatie.

Aanbevelingen

De invloed van de drempelwaarde op de metingen dient nader onderzocht te worden. Het toepassen van de drempelwaarde voor metingen bemoeilijkt een afdoende formulering van het toepassingsbereik van metingen en berekeningen bij lage geluidbelasting. Ook kan worden aanbevolen om de validatie verder weg van de luchthaven en in gebieden met een lage geluidbelasting te baseren op vliegpassages die over het hele meetbereik betrouwbaar kunnen worden gemeten. Hierbij kan worden aanbevolen om een aantal meetposten verder weg van de luchthaven of in gebieden met een lage geluidbelasting onder of dicht bij de vliegpaden te (ver)plaatsen, zodat er meer metingen voor de vergelijking beschikbaar komen.

Indien in een vervolgtraject modelverbetering wordt uitgevoerd en de rekenwijze wordt aangepast, is het aan te bevelen om de vergelijking tussen meten en rekenen als functie van afstand en geluidbelasting opnieuw uit te voeren. De vergelijking van metingen met berekeningen die met het verbeterde model zijn uitgevoerd, zal aangeven of en in hoeverre het toepassingsbereik door modelverbetering is aangepast.

Het kan verder waardevol zijn om een soortgelijke vergelijking tussen meten en rekenen ook voor regionale luchthavens uit te voeren om een indruk te krijgen van de verschillen bij regionale luchthavens in vergelijking met Schiphol en om de robuustheid van het Doc.29-model te toetsen.

Referenties

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

Breugelmans, O., et al. (2004). Gezondheid en beleving van de omgevingskwaliteit in de regio Schiphol: 2002. Tussenrapportage Monitoring Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol. Bilthoven, RIVM.

ECAC.CEAC (2016a). Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, ECAC.CEAC Doc 29. Neuilly-sur-Seine, European Civil Aviation Conference. **Volume I: Applications Guide.**

ISO-20906/TC (2009). Acoustics — Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports. Geneva, International Organization for Standardization.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, I. (2018). Kamerstuk - Over de rol die metingen van vliegtuiggeluid kunnen spelen in relatie tot berekeningen ervan. Den Haag, Tweede Kamer der Staten Generaal 2018-2019, 31936, nr. 518.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, I. (2019). Kamerstuk — Rapport verkenningfase 'programmatische aanpak meten vliegtuiggeluid' en monitoring- en evaluatieprogramma Lelystad d.d. 18 december 2019. I. e. Waterstaat. Den Haag, Tweede Kamer der Staten Generaal 31936-711.

Noise, I. T. S. (1978). Acoustics — Procedure for describing aircraft noise heard on the ground, ISO.

Rhodes D. P., e. a. (2018). Guidance on comparing calculated aircraft noise levels with measurements, UK Civil Aviation Authority.

Sahai, A., Hogenhuis, R., Heblj S.J., Vinkx K. (2022). PAMV — Regionale uitwerking Eindhoven Airport.
<https://www.samenopdehoogte.nl/documenten/default.aspx#folder=2281700>, Samen op de hoogte Luchthaven Eindhoven.

Sahai, A., Hogenhuis, R., Heblj S.J., Vinkx K. (2022). Validatieopstartfase — Voorstel voor een validatiemethodiek Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV), RIVM, NLR, To70.

Sahai, A., Hogenhuis, R.H., Heblj S.J., Smetsers R., Assink, J. (2021). Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid: Nationale meetstrategie. Kaders en inventarisatie meetsystemen, RIVM.

Sahai, A., Wartenberg, T., Mabaia, N., Hogenhuis, R., Heblj S.J., Vinkx, K. (2024). Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid (PAMV): Validatie Doc.29 model voor Schiphol, RIVM.

Smetsters, R., et al. (2019). Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven - Een verkenning van wensen en ontwikkelopties. Bilthoven, RIVM: 164.

Trow, J., Allmark, C. (2018). The benefits of validating your aircraft noise model. Euronoise 2018. Crete, EAA.

van Poll, R., Reedijk, M., Hoekstra, J., Swart, W., van de Kastele, J., Houthuijs, D. (2023). Relaties vliegtuiggeluid – hinder en slaapverstoring 2020. Civiele en militaire vliegvelden in Nederland, RIVM.

WHO (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.

Bijlage 1 Resultaten indicatieve geluidberekeningen

In deze bijlage staat informatie over de diverse indicatieve berekeningen die zijn uitgevoerd ten behoeve van het onderzoek naar het toepassingsbereik van geluidberekeningen. Per onderwerp volgt een korte toelichting van de uitgevoerde analyse en de resultaten. Een overzicht van het totale effect op basis van de diverse analyses staat in paragraaf 2.3.

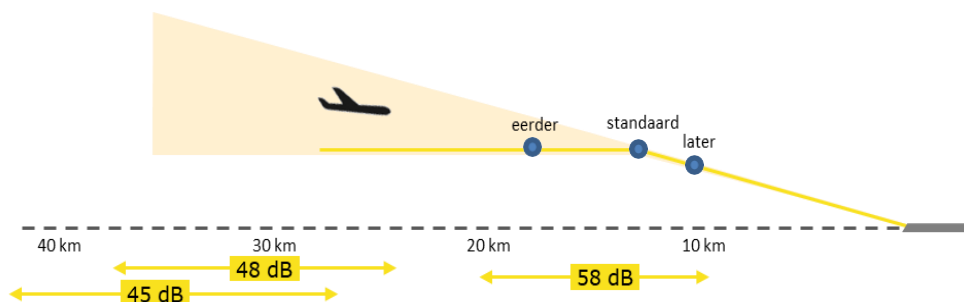
A .Uitklappen landingsgestel

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt het verloop van de vliegtuigconfiguratie (vleugelkleppen en onderstel) gemodelleerd. Hierbij wordt aangenomen dat alle toestellen van een bepaald vliegtuigtype op een bepaalde naderingsprocedure hetzelfde verloop kennen van de configuratie. In de praktijk mag verwacht worden dat enige variatie zal plaatsvinden.

Analyse

Om de gevoeligheid voor de aanname van een uniform verloop in kaart te brengen, is een analyse uitgevoerd, waarbij het configuratieverloop is gevarieerd. Dit is gedaan voor een 2000-voetnadering van een veelgebruikt, tweemotorig verkeersvliegtuig voor korte en middellange afstand. Voor de analyse is het moment van het uitklappen van het landingsgestel aangepast. Ten opzichte van de standaardaanname is zowel het effect van het eerder, als van het later uitklappen gemodelleerd. De aanpassing is in Figuur 0-1 weergegeven, samen met het hoogteverloop van de gemodelleerde naderingsprocedure.

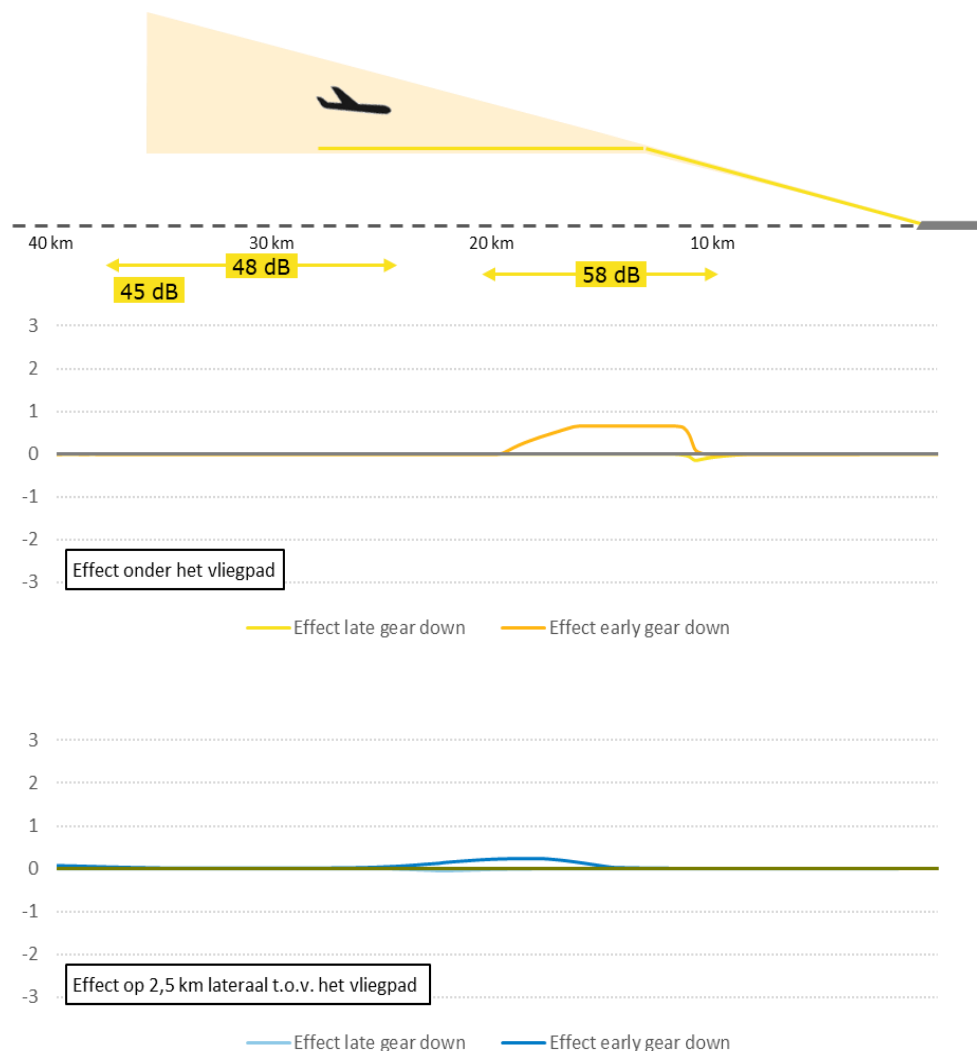


Figuur 0-1 Posities waarvoor het uitklappen van het landingsgestel is gesimuleerd

Het uitklappen van het landingsgestel heeft in de modellering invloed op de weerstand van het vliegtuig, wat vervolgens leidt tot een ander verloop in stuwkracht. Dit leidt op zijn beurt tot meer of minder geluid van de motoren. Daarnaast zal het uitklappen van het landingsgestel in de praktijk leiden tot meer aerodynamisch geluid. Hier wordt in de modellering echter geen rekening mee gehouden. Voor naderingen geldt namelijk dat de brongegevens die Doc29 gebruikt, zijn gemeten in landingsconfiguratie, waarbij het landingsgestel reeds is uitgeklappt. In die zin rekent Doc29 tijdens de gehele nadering dus al met het geluid van het uitgeklapte landingsgestel.

Resultaten

De resultaten zijn opgenomen in Figuur 0-2. Hier blijkt dat het eerder uitklappen van het landingsgestel vooral plaatselijk een effect heeft en leidt tot een toename van het geluidniveau. Direct onder het vliegpad loopt het verschil op tot ruim een halve decibel. Het later uitklappen geeft ten opzichte van de standaardprofiel tijdelijk een iets lager geluidniveau. Deze afname is beperkt tot enkele tienden van een dB.



Figuur 0-2 Geluideffecten van het eerder en later uitklappen van het landingsgestel, relatief ten opzichte van een standaardprofiel

Behalve naar het effect recht onder het vliegpad is ook op 2,5 km lateraal naar het effect gekeken. Deze resultaten zijn onder in Figuur 0-2 opgenomen. Hier zijn de effecten duidelijk kleiner dan onder het vliegpad en in alle gevallen beperkt zijn tot een paar tienden van een dB.

Ten slotte wordt nog opgemerkt dat in de praktijk het verschil wat groter kan uitvallen, omdat het model geen rekening houdt met de toename in aerodynamisch geluid als gevolg het uitklappen van het

onderstel. Daardoor zou het effect op de gemeten geluidniveaus groter kunnen zijn.

B. Effect temperatuur en luchtvochtigheid op demping

Achtergrond

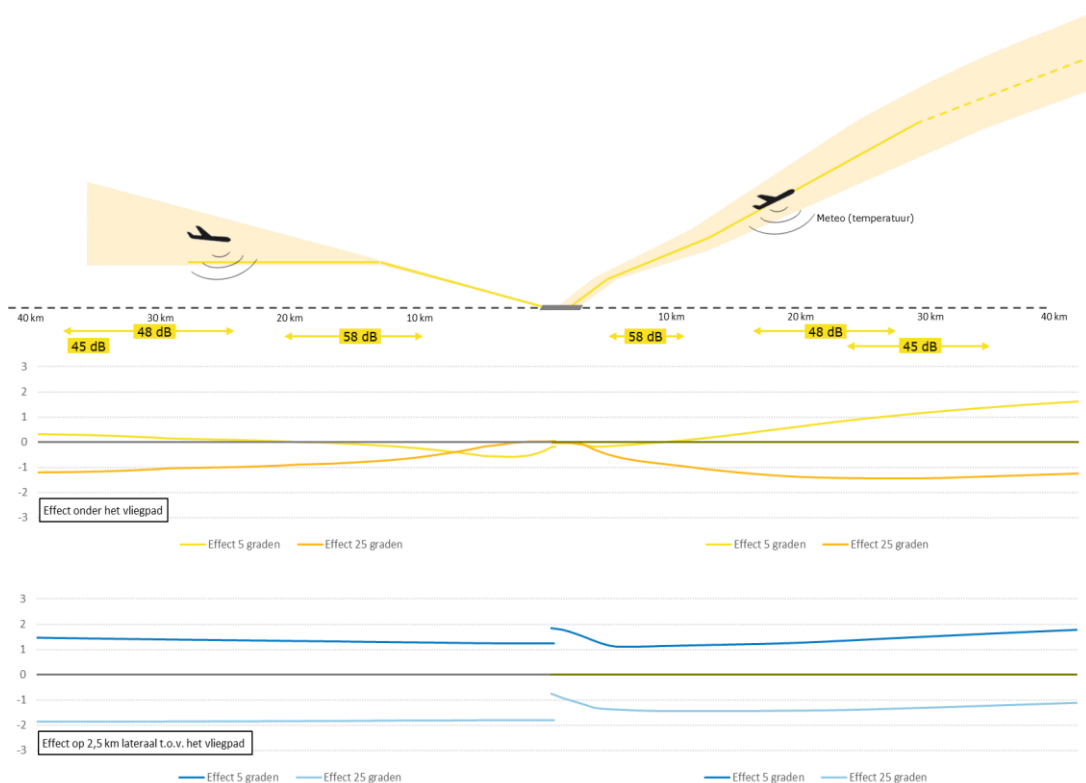
Bij de geluidberekening worden bepaalde standaard weerscondities verondersteld: 15 graden Celsius en 70 procent relatieve vochtigheid. De demping van het geluid door de atmosfeer is echter afhankelijk van deze condities. Als gevolg van variaties in het weer zal de demping in de praktijk enigszins variëren. Daardoor kan, afhankelijk van de actuele condities en afstand tot het vliegtuig, het geluidniveau iets hoger of lager uitvallen dan onder de standaard aangenomen condities.

Analyse

Om de gevoeligheid voor het gebruik van standaardcondities in kaart te brengen is een aantal analyses uitgevoerd, waarbij de weerscondities zijn gevarieerd. In eerste instantie is hierbij alleen de temperatuur aangepast. Vervolgens zijn zowel de temperatuur als de luchtvochtigheid aangepast. De berekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer en een primaire baan, en zijn apart uitgevoerd voor startend en landend verkeer. Hierbij is aangenomen dat de hoge of lage temperatuur voor het hele jaar van toepassing zou zijn. Daarmee worden de extremen bepaald en zullen de jaarlijkse effecten in de praktijk lager uitvallen dan in deze analyse.

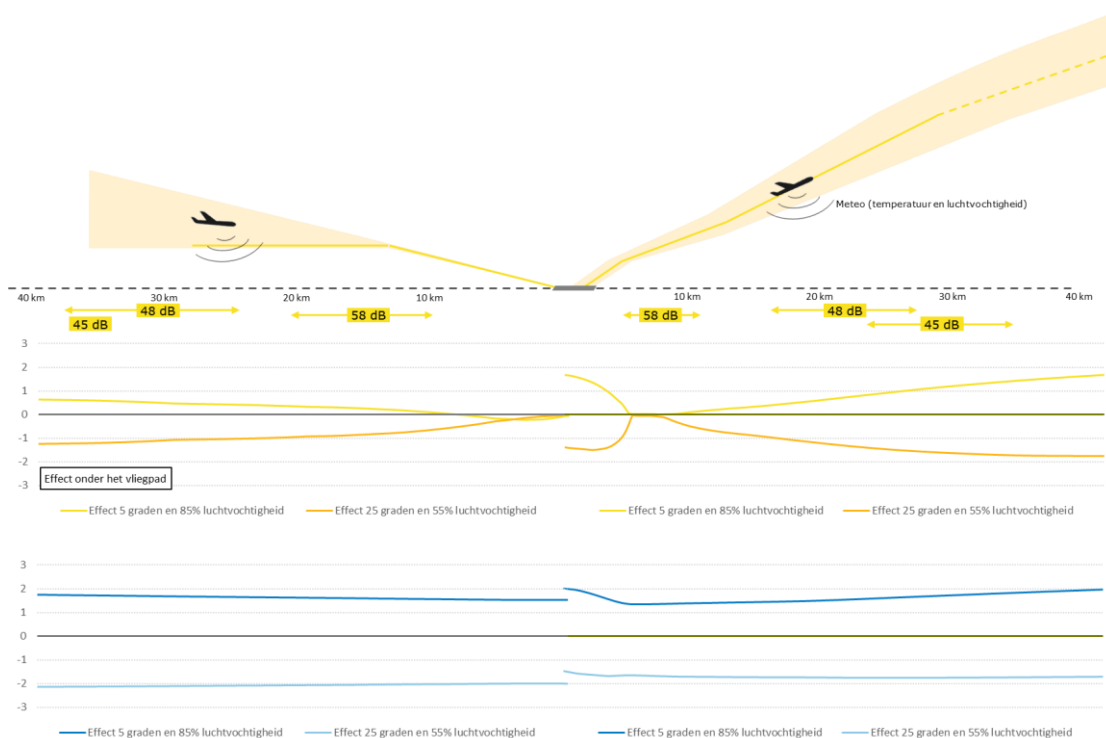
Resultaten

De resultaten voor het effect van alleen een gewijzigde temperatuur (5 graden en 25 graden) zijn weergegeven in Figuur 0-3. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-3 Geluideffecten als gevolg van een hogere en lagere temperatuur, ten opzichte van de standaardtemperatuur van 15 graden.

Voor het landende verkeer zijn de effecten van een lage temperatuur beperkt tot toe- en afnames van enkele tienden. Bij hoge temperaturen neemt de afname op grotere afstand van het vliegveld toe tot ruim 1 dB. Voor startend verkeer zijn de effecten met name bij lage temperaturen wat groter. Op afstand zijn de toenames in dat geval ruim 1,5 dB. Voor locaties zijwaarts van het vliegveld zijn de effecten iets groter, wat te verklaren is doordat de propagatieafstanden in dat geval groter zijn en (verschillen in) luchtdemping dan meer effect hebben. Vervolgens is naast de temperatuur ook de luchtvochtigheid aangepast. Voor de winterconditie van 5 graden is een bijpassende hogere relatieve vochtigheid van 85 procent aangenomen. Voor de zomerconditie van 25 graden is de relatieve luchtvochtigheid verlaagd naar 55 procent. De resultaten zijn opgenomen in Figuur 0-4.



Figuur 0-4 Geluideffecten als gevolg van een hogere en lagere temperatuur inclusief een aanpassing in relatieve vochtigheid, ten opzichte van de standaardtemperatuur van 15 graden en 70 procent relatieve vochtigheid.

Uit de resultaten blijkt dat de effecten van het meenemen van een aangepaste relatieve vochtigheid relatief klein zijn. De resultaten zijn lokaal op enkele tienden na vergelijkbaar met die van Figuur 0-3.

C. Windsnelheid

Achtergrond

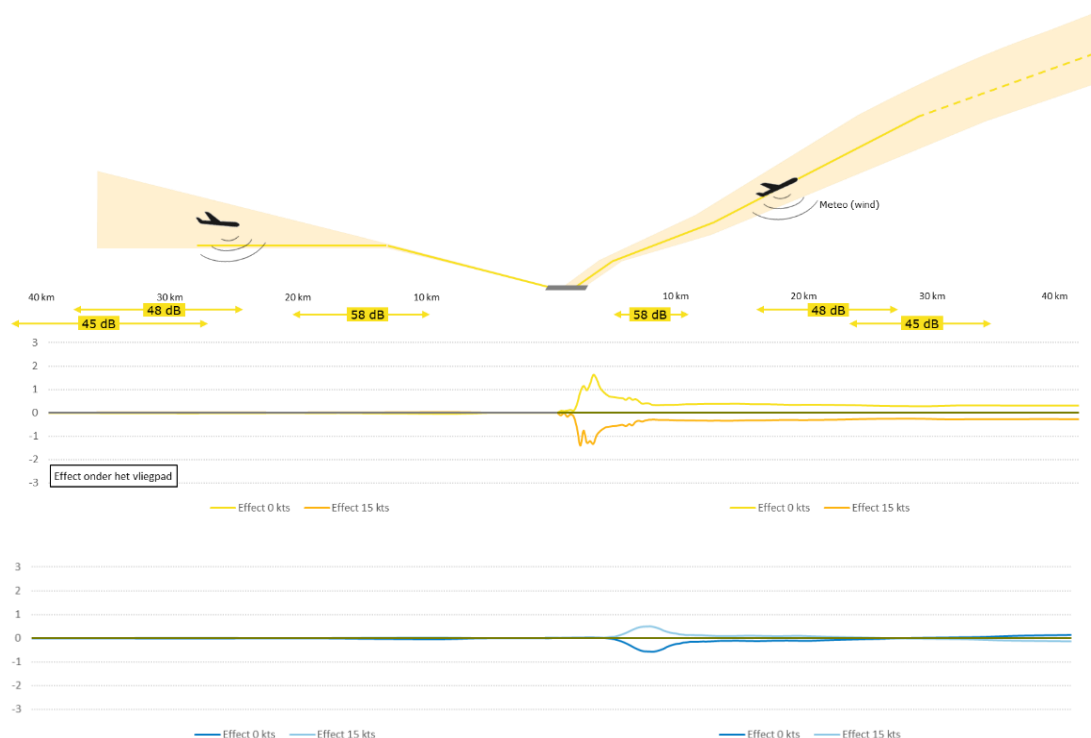
Bij de geluidberekening worden een standaard tegenwindcomponent van 8 knopen verondersteld. Bij andere windsnelheden kunnen de vliegprestaties veranderen. Dit geldt sterk bij starts: bij meer tegenwind kan het vliegtuig (relatief ten opzichte van het aardoppervlak) steiler uitklimmen en dus meer hoogte maken.

Analyse

Om de gevoeligheid voor het gebruik van standaard windcondities in kaart te brengen, is een aantal analyses uitgevoerd, waarbij de windcondities zijn gevarieerd. Hierbij is de tegenwind zowel verlaagd naar 0 knopen (geen wind) als verhoogd naar 15 knopen. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer en een primaire baan, en zijn apart uitgevoerd voor startend en landend verkeer. Hierbij is aangenomen dat de hoge of lage windsnelheid voor het hele jaar van toepassing zou zijn. Daarmee worden de extremen bepaald en zullen de jaarlijkse effecten in de praktijk lager uitvallen dan in deze analyse.

Resultaten

De resultaten voor het effect van een gewijzigde windsnelheid (0 en 15 knopen) zijn weergegeven in Figuur 0-5. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-5 Geluidseffecten als gevolg van een lagere en hogere tegenwind, ten opzichte van de standaardtegenwind van 8 knopen.

Voor het landend verkeer zijn de effecten zoals verwacht erg klein. Dit komt doordat naderende vliegtuigen op vooraf gedefinieerde hoogtes vliegen ten opzichte van de afstand tot de baan. Wind heeft hier geen invloed op. Wel kan de benodigde stuwkracht of de blootstellingsduur aan het geluid licht veranderen, maar de effecten op de geluidbelasting zijn klein.

Voor startend verkeer zijn de effecten duidelijk groter. Bij meer tegenwind zal een vliegtuig sneller hoogte maken en leidt dit recht onder het vliegp pad tot lagere niveaus. Andersom zal een vliegtuig bij minder tegenwind minder snel hoogte maken en leidt dit tot hogere niveaus op de grond. Dit effect is het sterkst net na het einde van de startbaan ($\pm 1,5$ dB) en wordt daarna kleiner tot enkele tienden.

Voor locaties zijwaarts van het vliegp pad zijn de effecten in eerste instantie omgekeerd en minder uitgesproken. Voor deze laterale posities is lager vliegen namelijk juist gunstig. Op grotere afstand keert het effect weer om. Over de gehele linie zijn de effecten ($\pm 0,5$ dB) op de zijwaartse posities echter kleiner dan recht onder het vliegp pad.

Ten slotte is het van belang om te beseffen dat wind naast het effect op de vliegprestaties ook effect kan hebben op de geluidpropagatie zelf.

Dat effect kan bij de huidige generatie geluidmodellen niet gemodelleerd worden en is hier dus niet in kaart gebracht.

D. Startprocedure

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt voor het startende verkeer een bepaalde startprocedure aangenomen. De toegewezen procedure is hierbij afhankelijk van de maatschappij die de vlucht uitvoert. De toegewezen procedure hoeft niet altijd overeen te komen met de praktijk. Het is denkbaar dat de toewijzingslijst niet meer actueel is (als de maatschappij recent is overgestapt op een andere startprocedure en dit nog niet bij de luchthaven bekend is) of dat op een specifieke vlucht door de vliegers een afwijkende startprocedure wordt toegepast.

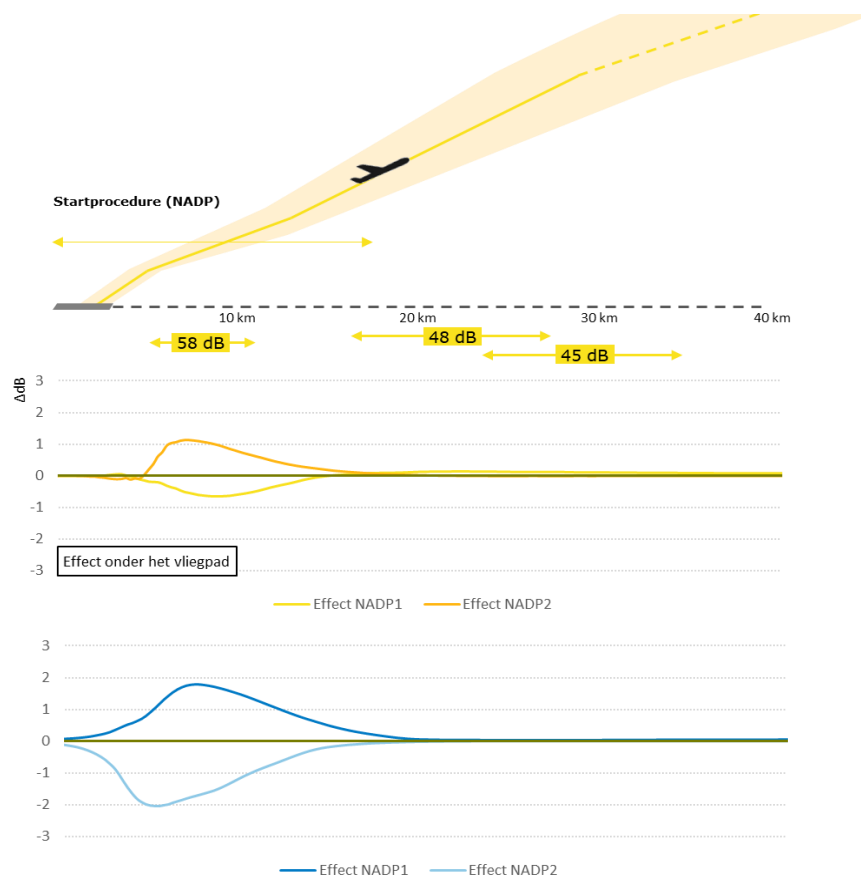
Analyse

Om de gevoeligheid voor het toewijzen van startprocedures in kaart te brengen is een aantal analyses uitgevoerd, waarbij de startprocedure is gevarieerd. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer een primaire baan en zijn uiteraard alleen uitgevoerd voor startend verkeer.

Ten opzichte van de huidige referentiesituatie (een mix aan verschillende startprocedures) zijn twee extremen opgezocht. In één geval is hierbij al het verkeer aan een NADP-1-procedure toegewezen en in het andere geval is al het verkeer aan een 800-voet-NADP-1-procedure toegewezen. Omdat dit extremen zijn zullen de mogelijke jaarlijkse effecten in de praktijk lager uitvallen dan in deze analyse.

Resultaten

De resultaten voor het effect van een gewijzigde startprocedure zijn weergegeven in Figuur 0-6. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-6 Geluideffecten als gevolg van een lagere en hogere tegenwind, ten opzichte van de standaard tegenwind van 8 knopen.

Recht onder het vliegveld zijn de effecten enkele kilometers na het begin van de start het sterkst. Het verhogen van het aandeel NADP-2 starts (ten opzichte van de huidige mix) zal daar lokaal de geluidniveaus met ongeveer 1 dB doen toenemen. Het verhogen van het aantal NADP-1 zou daar juist het geluidniveau doen afnemen, met ruim een halve dB. Na ongeveer 15 kilometer na het begin van de startrol maakt het verschil in startprocedures niet meer uit. Voor locaties zijwaarts van het vliegveld zijn de effecten omgekeerd. Daar zou het exclusief gebruik van NADP-2 starts lokaal leiden tot een afname van 2 dB. Het volledig overstappen op NADP-1 zou daar juist leiden tot een toename in de geluidbelasting van bijna 2 dB.

E. Extrapolatie geluidproductie

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt gebruik gemaakt van geluidtabellen. Deze bevatten informatie over het geluidniveau als functie van het motorvermogen. De geluidtabellen hebben een bepaald bereik: een laagste en een hoogste motorvermogen waarvoor geluidniveaus zijn opgenomen. In bepaalde gevallen is dit bereik niet voldoende en wordt door het geluidmodel geëxtrapoleerd. Met name bij lage stuwkracht zou hierbij de situatie kunnen ontstaan dat door extrapolatie een lager geluidniveau wordt verondersteld dan in de praktijk mogelijk is.

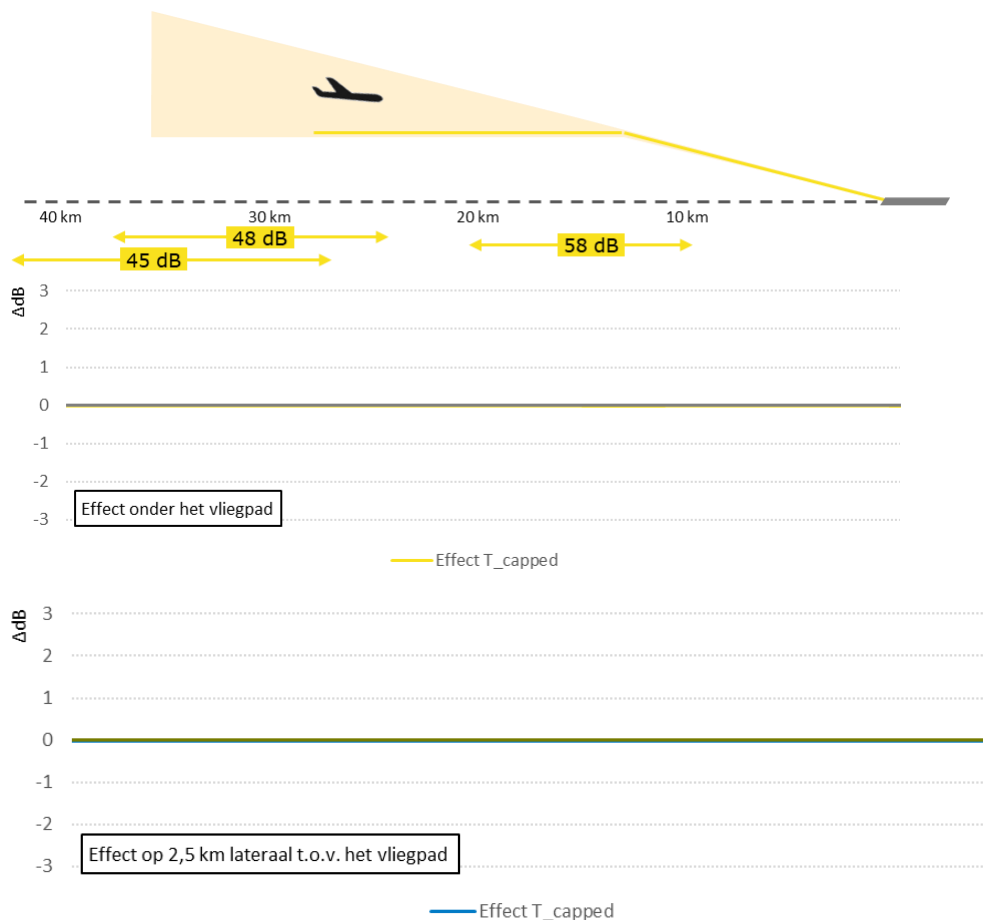
Analyse

Om de gevoeligheid voor het effect van (mogelijk te ver) extrapoleren bij lage geluidniveaus in kaart te brengen is een geluidberekening uitgevoerd waarbij de standaard toegepaste extrapolatie wordt beperkt. Deze extrapolatie is hierbij beperkt tot maximaal 5 dB onder het laagste geluidniveau dat nog wel in de tabel is opgenomen. Een dergelijke beperking van extrapolatie wordt standaard gebruikt in vergelijkbare modellen (INM en AEDT), maar is geen onderdeel van Doc.29.

De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer voor een primaire baan en zijn alleen uitgevoerd voor naderend verkeer. Voor startend verkeer zijn de motorvermogens veel hoger en speelt een dergelijke extrapolatie naar dergelijke lage motorstanden niet.

Resultaten

De resultaten voor het effect van een extrapolatielimiet zijn weergegeven in Figuur 0-7. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegpad (geel) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe).



Figuur 0-7 Geluideffecten als gevolg van een extrapolatielimiet, ten opzichte van de standaard situatie waarbij geen limiet wordt toegepast.

De verschillen als gevolg van het toepassen van een extrapolatielimiet zijn erg klein en niet zichtbaar in de figuren. Een verdere analyse laat zien dat de verschillen maximaal 0,02 dB bedragen en op veel locaties nog kleiner zijn.

F. Effect temperatuur op vliegtuigprestaties

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt voor de vliegprestaties uitgegaan van standaardcondities, waaronder een temperatuur van 15°C. De temperatuur heeft echter invloed op de prestaties van het vliegtuig. Dit geldt met name voor de maximale stuwkracht die een motor kan leveren: deze wordt lager bij een hogere omgevingstemperatuur. In principe leidt een lage temperatuur ook tot een hogere maximale stuwkracht, maar door toepassing van regeltechniek (zogenaamde 'flat rating') is dit effect meestal beperkter.

Een hogere beschikbare stuwkracht kan bij starts leiden tot een hoger bronniveau, maar ook tot een steiler klimpad. Bij hoge temperaturen gelden de omgekeerde effecten. Het effect is alleen te verwachten bij de starts, omdat hier de hoeveelheid beschikbare stuwkracht van belang is. Voor naderingen liggen de benodigde stuwkrachtniveaus veel lager en zijn de op dat moment maximaal beschikbare stuwkrachtniveaus niet van belang.

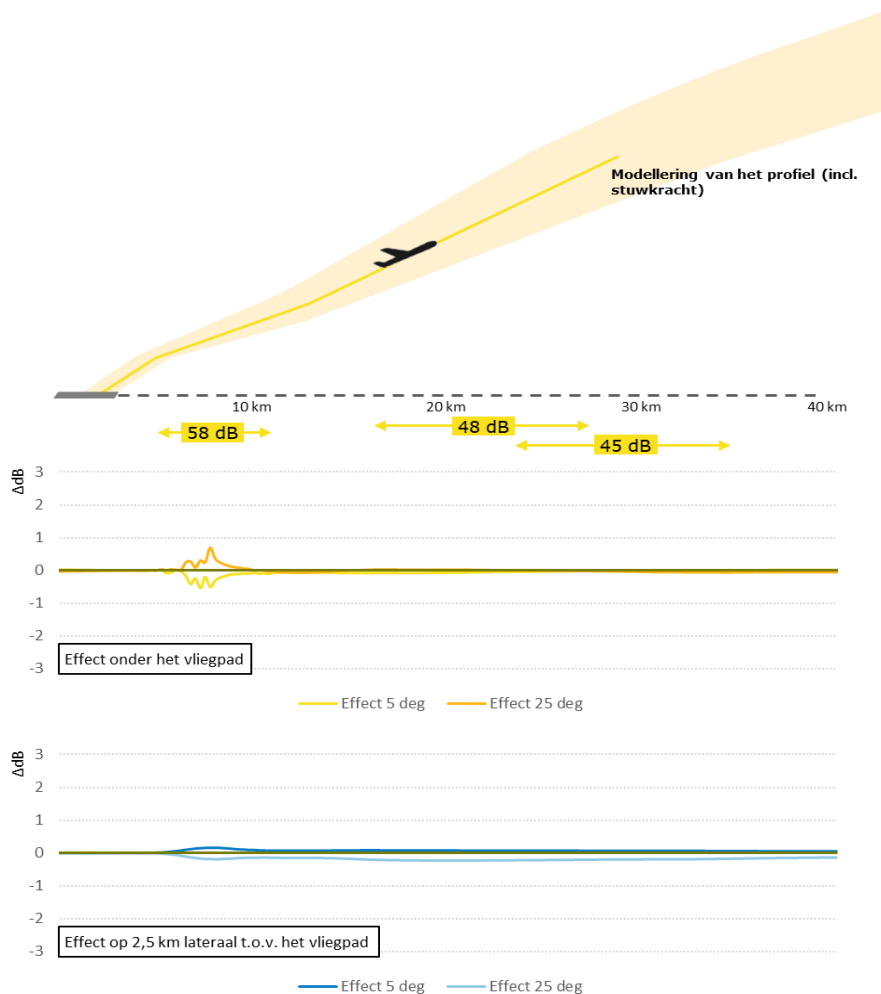
Analyse

Om de gevoeligheid voor omgevingstemperatuur in kaart te brengen is een aantal analyses uitgevoerd, waarbij de temperatuur is gevarieerd. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer en een primaire baan, en zijn alleen uitgevoerd voor startend verkeer.

Ten opzichte van de huidige referentiesituatie (een mix aan verschillende startprocedures) zijn twee extremen opgezocht. In één geval is hierbij al het jaarlijkse verkeer doorgerekend bij een temperatuur van 5°C en in het andere geval is al het verkeer doorgerekend met temperatuur van 25°C. Hoewel deze condities representatief kunnen zijn voor een specifieke periode van het jaar, zijn dergelijke temperaturen niet realistisch voor het gehele jaar. In die zin zijn de gekozen temperaturen extremen en zullen de eventuele effecten op jaarbasis in de praktijk lager uitvallen dan in deze analyse.

Resultaten

De resultaten voor het effect van een temperatuur zijn weergegeven in Figuur 0-8. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-8: Geluidseffekten als gevolg van de invloed van een lagere en hogere temperatuur op de vliegprestaties, ten opzichte van de standaardtemperatuur van 15 graden.

Recht onder het vliegpad zijn de effecten enkele kilometers na het begin van de start het sterkst. Bij de hogere temperatuur leidt een lagere vlieghoogte, ondanks een lager bronniveau, daar lokaal tot hogere geluidsniveaus van ruim een halve dB. Bij lage temperaturen zijn de effecten in absolute zin iets kleiner en tevens omgekeerd. Op grotere afstanden van de baan zijn de effecten erg beperkt.

Voor locaties zijwaarts van het vliegpad zijn de effecten juist omgekeerd. Daar leidt de lagere temperatuur tot hogere niveaus en de hogere temperatuur tot lagere niveaus. In absolute zin zijn de effecten beperkt tot maximaal enkele tienden van een dB.

G. Gekozen gewichtsklasse

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt voor het startende verkeer een bepaald startgewicht aangenomen. Het startgewicht wordt gekozen op basis van de vliegafstand naar de bestemming, om zo rekening te houden met de benodigde brandstof. Deze afstanden worden hierbij ingedeeld naar

negen verschillen klassen. Elk toestel heeft voor elke afstandsklasse (binnen het bereik van het toestel) een bijbehorend startgewicht, dat is gedefinieerd in de ANP database. Achter deze gewichten zitten bepaalde aannamen omtrent beladingsgraad en benodigde hoeveelheden brandstof. In de praktijk kan de beladingsgraad hoger of lager uitvallen en kan eventueel ook extra brandstof mee worden genomen, om zo op de bestemming niet of minder te hoeven tanken. Dit maakt dat het gewicht van een specifieke vlucht hoger of lager kan uitvallen dan wordt aangenomen en dit heeft vooral invloed op de klimprestaties van vertrekkende vluchten.

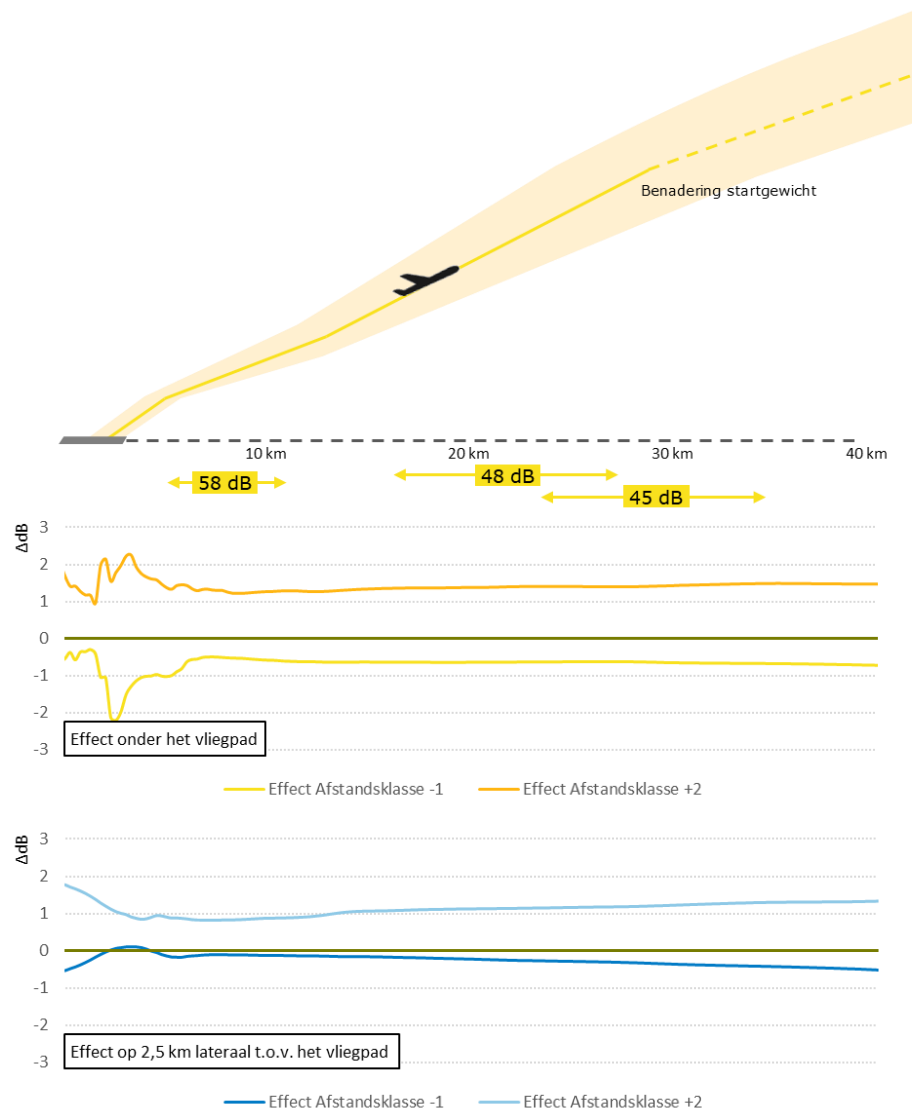
Analyse

Om de gevoeligheid voor het toewijzen van een startgewicht in kaart te brengen is een aantal analyses uitgevoerd, waarbij het startgewicht is gevarieerd. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer en een primaire baan, en zijn uiteraard alleen uitgevoerd voor startend verkeer.

Ten opzichte van de huidige referentiesituatie (een startgewicht op basis van de afstand tot de bestemming in lijn met de gewichten uit de ANP-database) is het startgewicht zowel verhoogd als verlaagd. In het geval van de verlaagde startgewichten is daarbij (waar mogelijk) gekozen voor het gewicht behorend bij één afstandsklasse lager. Voor de verhoogde startgewichten is (waar mogelijk) gekozen voor het gewicht behorend bij twee afstandsklassen hoger. De gewichten zijn dus vaker verhoogd dan verlaagd, omdat het niet mogelijk is om minder brandstof mee te nemen dan benodigd.

Resultaten

De resultaten voor het effect van een gewijzigd startgewicht zijn weergegeven in Figuur 0-9. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-9 Geluideffecten als gevolg van een lager en hoger startgewicht, relatief ten opzichte van het standaard (ANP gebaseerde) startgewicht.

Recht onder het vliegp pad zijn de effecten direct na het loskomen van de baan het sterkst en zijn daarna redelijk constant. Bij het gebruik van twee afstandsklassen hoger nemen de geluidniveaus buiten de luchthaven toe met ruim 1 dB, oplopend naar 1,5 dB. Bij een lager startgewicht nemen de niveaus af met iets minder dan 1 dB.

Voor locaties zijwaarts van het vliegp pad zijn de effecten enigszins vergelijkbaar, maar wel minder sterk. Een hoger startgewicht leidt daar tot een toename van ruim 1 dB, terwijl een lager startgewicht een lager niveau geeft, oplopend tot een afname van ongeveer een halve dB.

H. Versnelling boven 10.000 voet

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt voor het startende verkeer het klimprofiel gemodelleerd tot 10.000 voet en daarna met behulp van lineaire extrapolatie verder verlengd. Deze beperking van de modellering volgt uit Doc.29 en de bijbehorende gegevens in de ANP-database. In de praktijk vervalt voor het vliegverkeer de snelheidslimiet van 250 knopen bij het bereiken van een hoogte van 10.000 voet. Dit betekent dat veel toestellen bij het bereiken van deze hoogte verder gaan versnellen, waardoor ze tijdelijk wat minder steil uitklimmen. Beide effecten kunnen invloed hebben op de geluidniveaus.

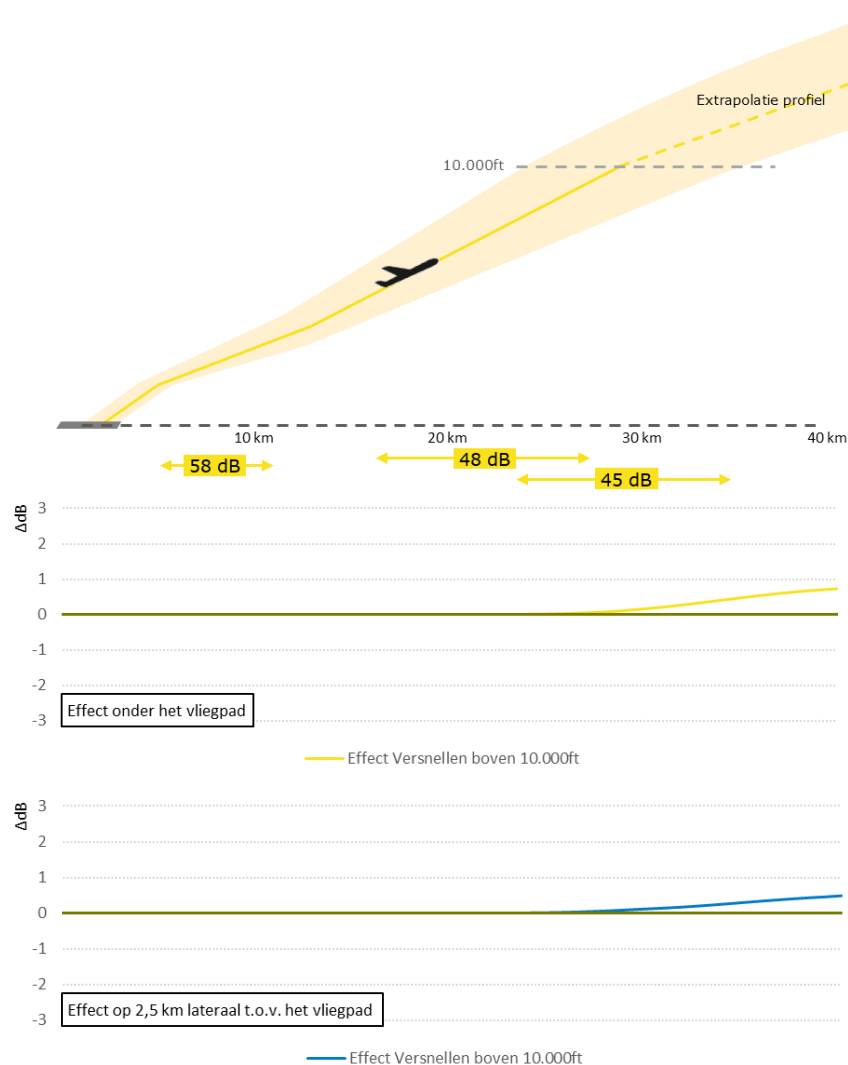
Analyse

Om de gevoeligheid voor het lineair extrapoleren in kaart te brengen, is een analyse uitgevoerd, waarbij het profiel op een alternatieve manier is verlengd, na het bereiken van 10.000 voet. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer en een primaire baan, en zijn uiteraard alleen uitgevoerd voor startend verkeer.

Bij de alternatieve verlenging is aangenomen dat in het gedeelte tussen 10.000 en 12.000 voet tijdelijk half zo snel wordt geklommen als normaal, waarbij tevens 30 knopen meer snelheid wordt gemaakt. Na het bereiken van de hoogte van 12.000 voet wordt de originele verlenging weer voortgezet. De inschatting is dat deze aannamen redelijk conservatief zijn in relatie tot de geluidberekening: er wordt relatief veel van de klim ingeleverd ten bate van een relatief kleine snelheidstoename. De effecten uit deze analyse zijn in deze zin een bovengrens van de effecten die te verwachten zijn.

Resultaten

De resultaten voor het effect van de alternatieve verlenging zijn weergegeven in Figuur 0-10. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-10 Geluideffecten als gevolg van de alternatieve verlenging voor het simuleren van het effect van een versnelling boven een hoogte van 10.000 voet.

Recht onder het vliegpad zijn de effecten pas zichtbaar vanaf ongeveer 30 km na het begin van de start. Vanaf dat punt loopt het effect op tot net iets minder dan 1 dB. Voor locaties zijwaarts van het vliegpad zijn de effecten vergelijkbaar, maar iets minder sterk.

Het effect van het versnelling boven de 10.000 voet is bij het huidige toepassingsbereik dat loopt tot 48 dBA Lden nihil. Bij een toepassing inclusief lagere waarden, zoals 45 dBA, kan het effect wel relevant worden.

I. Bochten

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt voor de vliegprestaties het effect van bochten verwaarloosd. Het rekenmodel houdt wel rekening met een andere uitstraling van het geluid als gevolg van de rolhoek van het vliegtuig, maar de extra weerstand die wordt veroorzaakt door het

draaien van bochten wordt uit praktische overwegingen niet in rekening gebracht. Deze extra weerstand kan bij vertrekkende vluchten leiden tot slechtere klimprestaties, terwijl het bij naderingen zou kunnen leiden tot een hogere benodigde stuwkracht. Beide effecten kunnen leiden tot hogere geluidsniveaus.

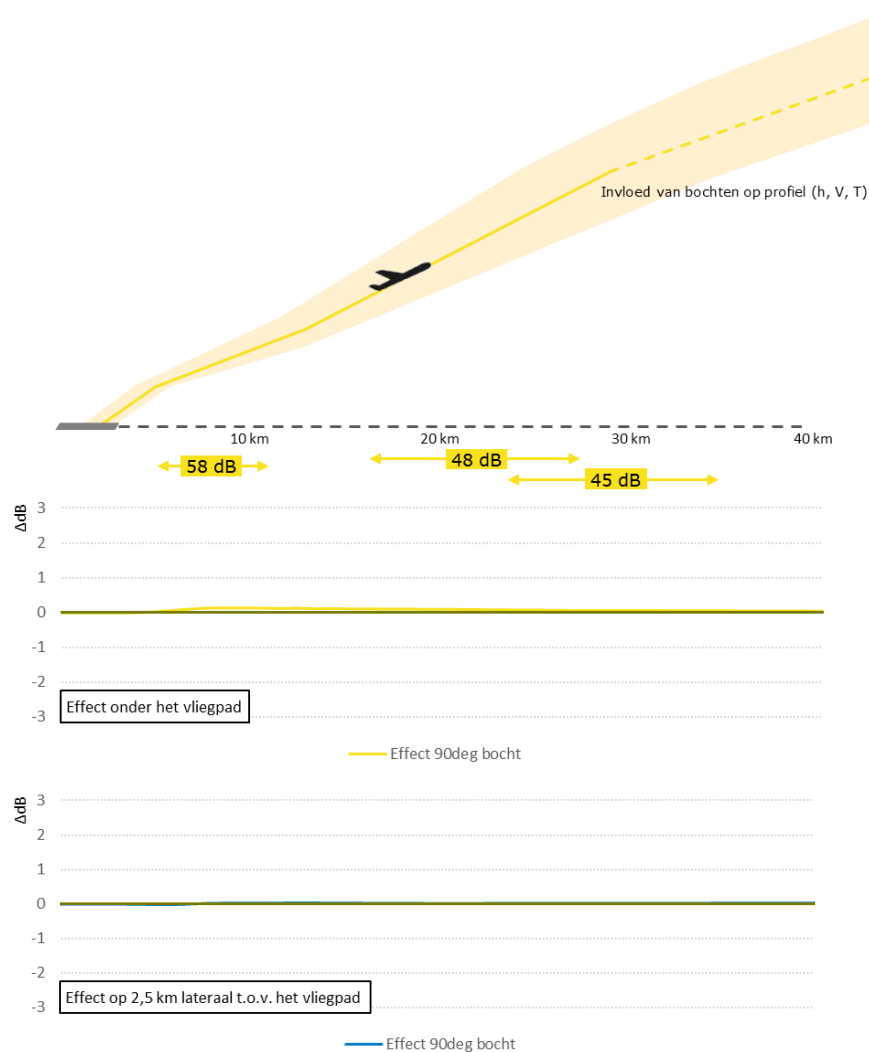
Analyse

Om de gevoeligheid voor de effecten van bochten in kaart te brengen is een analyse uitgevoerd. Daarbij is het effect dat een bocht heeft op de klimprestaties toegevoegd aan het model. Hierbij is aangenomen dat elk vlucht een bocht maakt. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer een primaire baan en zijn alleen uitgevoerd voor startend verkeer.

Ten opzichte van de huidige referentiesituatie waarbij voor de vliegprestaties (maar niet voor de locatie) wordt aangenomen dat een vlucht altijd rechtdoor gaat, is aangenomen dat elke vlucht bij het bereiken van een hoogte van 1500 voet een bocht maakt. Hierbij is gekozen voor een bocht van 90 graden, als representatieve waarde. Een deel van de vluchten zal immers min of meer rechtdoor gaan terwijl een ander deel bochten maakt. Een bocht van meer dan 180 graden zal daarbij echter een uitzondering zijn, omdat in dat geval het logischer zou zijn dat de route andere kant op zou draaien.

Resultaten

De resultaten voor het effect van een bocht zijn weergegeven in Figuur 0-11. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-11 Geluideffecten als gevolg van de invloed van een bocht, ten opzichte van de standaard aanname dat bochten geen invloed hebben op de vliegprestaties.

Recht onder het vliegp pad zijn er in eerste instantie geen effecten, omdat de bocht pas is gemodelleerd bij het bereiken van een hoogte van 1500 voet. Op dat punt is er een kleine toename van het geluidniveau zichtbaar, maar de effecten zijn nauwelijks zichtbaar in het figuur. Naarmate de afgelegde afstand toeneemt, nemen de verschillen nog verder af.

Voor locaties zijwaarts van het vliegp pad zijn de effecten initieel omgekeerd: er ontstaat een kleine afname. Enkele kilometers verder slaat dit effect om in een kleine toename. De verschillen ten opzichte van de standaard situatie zijn echter zo klein, dat ze praktisch niet zichtbaar zijn in het figuur.

J. Derating-startprocedures

Achtergrond

Bij de geluidberekening wordt voor startende vliegtuigen een bepaald motorvermogen aangenomen. Voor starts die bij het maximale startgewicht van het desbetreffende vliegtuigtype worden uitgevoerd wordt in principe altijd gestart met het maximaal beschikbare motorvermogen. Vaak wordt echter vertrokken met minder gewicht en is het mogelijk, mits de startbaan lang genoeg is, om daarbij ook minder motorvermogen te gebruiken (*derating*). Zo kan bijvoorbeeld worden vertrokken met 80 of 90 procent van het beschikbare vermogen. In het model worden daarbij bepaalde aannamen gedaan die, zeker voor een specifieke vlucht, kunnen afwijken van de werkelijke situatie. Bij een start met een hoger motorvermogen komt een vliegtuig eerder los van de startbaan, klimt deze steiler uit en is het geluidniveau (bronniveau) hoger. Dit hogere geluidniveau bij de bron wordt echter gedeeltelijk weer gecompenseerd door het steilere uitklimmen, waardoor de afstand tot aan de grond op een specifiek punt groter is. Andersom kan een vliegtuig ook met minder motorvermogen vertrekken dan aangenomen en zijn de effecten omgekeerd.

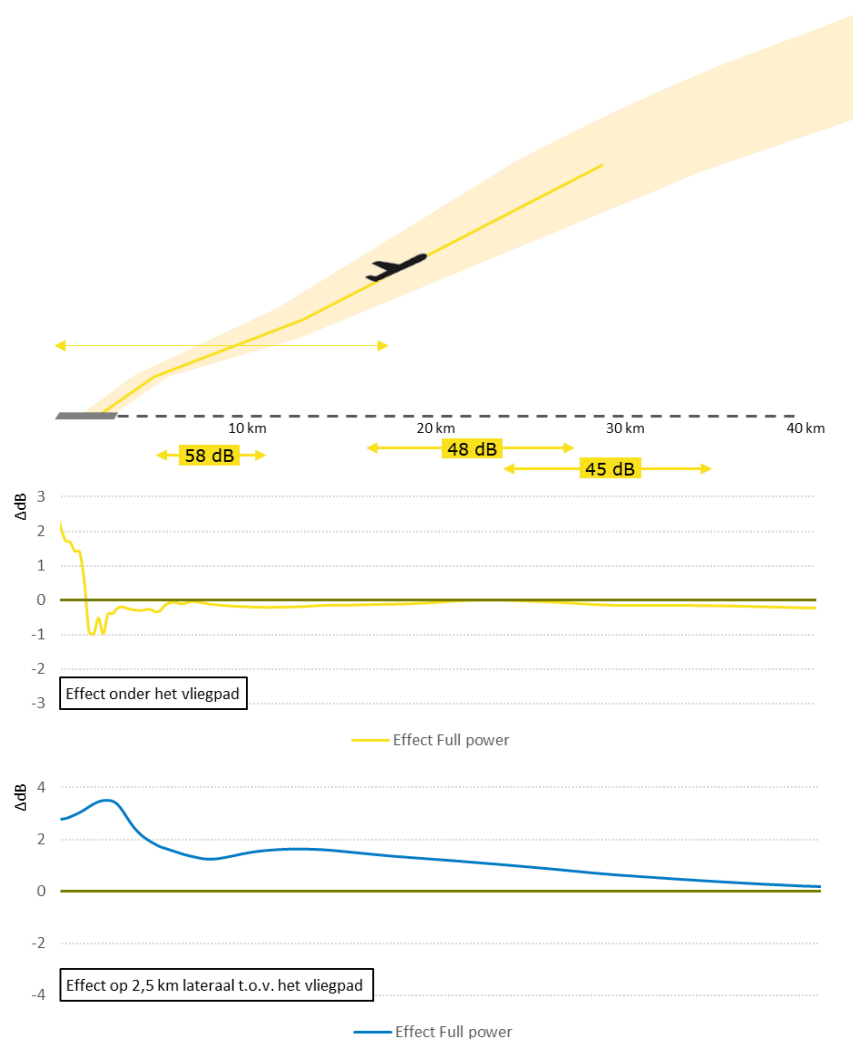
Analyse

Om de gevoeligheid voor de aannamen rondom derating in kaart te brengen, is een analyse gedaan waarbij de toegepaste derating is aangepast. De geluidberekeningen zijn gebaseerd op een representatieve hoeveelheid verkeer en een primaire baan, en zijn alleen uitgevoerd voor startend verkeer.

Ten opzichte van de huidige referentiesituatie (derating afhankelijk van vliegtuigtype en startgewicht) is een berekening uitgevoerd waarbij helemaal geen derating is toegepast. Alle vliegtuigen vertrekken dus met een volledige beschikbare motorvermogen. Het andere uiterste, waarbij (veel) meer derating is toegepast dan nu in de geluidberekeningen wordt aangenomen is om praktische redenen niet onderzocht. Bij het interpreteren van de resultaten moet dus worden bedacht dat de gepresenteerde variaties in zekere mate ook andersom kunnen optreden.

Resultaten

De resultaten voor het effect van derating zijn weergegeven in Figuur 0-12. Deze resultaten zijn zowel weergegeven voor locaties recht onder het vliegp pad (gele tinten) als op 2,5 km zijwaarts daarvan (blauwe tinten).



Figuur 0-12 Geluideffecten als gevolg van het niet toepassen van derating, ten opzichte van de standaard situatie (derating op basis van vliegtuigtype en startgewicht).

Recht onder het vliegpad zijn er aanzienlijke effecten rondom de startbaan, maar daarna zijn de effecten klein en redelijk constant, met maximaal enkele tienden van een dB. Blijkbaar heffen de tegengestelde effecten van een hoger bronniveau en een hogere vlieghoogte elkaar hier nagenoeg op.

Voor locaties zijwaarts van het vliegpad zijn er wel aanzienlijke effecten, waarbij het gebruik van maximaal motorvermogen leidt tot hogere geluidsniveaus. Dicht bij de luchthaven lopen deze effecten op tot meer dan 3 dB. Op grotere afstand nemen de effecten af tot enkele tienden van een dB op 40 kilometer afstand.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

maart 2024

**De zorg voor morgen
begint vandaag**