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

Metingen en berekeningen van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol

Voor onderzoek naar de gezondheid van omwonenden

RIVM Rapport 2019-0074

M. Voogt et al.

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

Metingen en berekeningen van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol

Voor onderzoek naar de gezondheid van omwonenden

RIVM Rapport 2019-0074

Colofon

© RIVM 2019
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-2019-0074

M. Voogt (auteur), RIVM
P. Zandveld (auteur), RIVM
J. Wesseling (auteur), RIVM
N. Janssen (auteur), RIVM

Met medewerking van:
TNO – Danielle van Dinther, Pim van de Bulk, Gerard Kos, Mark Blom
GGD Amsterdam – Dave de Jonge, Harald Helmink, Jaap Visser
Erbrink Stacks Consult - Hans Erbrink
NLR – Jan Middel

Contact:
Marita Voogt
Centrum voor Milieukwaliteit
Marita.Voogt@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van het onderzoeksprogramma ‘Gezondheidsrisico’s ultrafijn stof rond Schiphol’

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

Publiekssamenvatting

Metingen en berekeningen van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol

Het RIVM heeft het rekenmodel verbeterd waarmee de jaargemiddelde concentratie ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol wordt bepaald. Ultrafijn stof is het aantal zeer kleine deeltjes in de lucht (kleiner dan 0,1 micrometer). De nieuwe berekeningen zijn vergeleken met metingen gedurende een half jaar op tien locaties rond Schiphol. Het is voor het eerst dat dit in Nederland op deze schaal is gedaan.

Het rekenmodel is op twee punten aangepast. Taxiënde vliegtuigen zijn als bron toegevoegd. Daarnaast zijn extra gegevens over de uitstoot van ultrafijn stof van vliegverkeer uit de wetenschappelijke literatuur gebruikt. Vervolgens zijn de rekenresultaten afgestemd op de meetwaarden. Het aangepaste rekenmodel blijkt op deze manier goed in staat te zijn om gemiddelde concentraties over een langere tijd te bepalen. Locaties met lagere en hogere concentraties worden goed van elkaar onderscheiden. Daarmee zijn we erin geslaagd om het rekenmodel geschikt te maken voor onderzoek naar effecten op de gezondheid als mensen langdurig aan ultrafijn stof van vliegverkeer van Schiphol blootstaan.

Volgens de berekeningen is de jaargemiddelde blootstelling van omwonenden aan ultrafijn stof van vliegverkeer op Schiphol in 2017 en 2018 het hoogst op woonlocaties vlak bij de luchthaven en neemt deze af naarmate ze verder weg wonen. Wel zijn er van jaar tot jaar kleine verschillen die onder andere veroorzaakt worden door variatie in weersomstandigheden en baangebruik.

Een volgend onderdeel van het onderzoeksprogramma is onderzoek naar de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan ultrafijn stof van vliegverkeer. Hiervoor is informatie nodig over de mate waarin mensen die in de omgeving van Schiphol wonen aan ultrafijn stof worden blootgesteld. Om de blootstelling te kunnen bepalen, is inzicht in de concentratie ultrafijn stof in de lucht nodig. Het rekenmodel maakt het mogelijk om die informatie te verkrijgen. Metingen kennen beperkingen: het is onmogelijk om op alle locaties waar mensen wonen de concentratie van ultrafijn stof te meten. Ook zijn de metingen erg afhankelijk van de weersomstandigheden en het baangebruik. Het rekenmodel vertaalt metingen naar alle overige locaties en andere (langere) perioden.

Kernwoorden: ultrafijn stof, luchtvaart, vliegverkeer, Schiphol, meten, rekenen

Synopsis

Measurements and calculations of ultrafine particles originating from air traffic around Schiphol
For research into the health of local residents

RIVM has improved the model used to calculate the annual average concentration of ultrafine particles originating from air traffic around Schiphol. Ultrafine particles are very small particles in the air (smaller than 0.1 micrometres). The new calculations were compared with measurements taken for a period of six months at ten locations around Schiphol. This is the first time that this has been carried out in The Netherlands on this scale.

The calculation model has been adjusted in two ways. Taxiing aircraft have been added to the list of sources. Furthermore, additional data from the scientific literature has been used concerning the emission of ultrafine particles originating from air traffic. The calculation results were then adjusted to the measured values. It shows that in this way, the adjusted calculation model is well able to determine average concentrations over a longer period. Locations with lower and higher concentrations are well distinguished, making the model suitable for research into the effects on people's health of long-term exposure to ultrafine particles originating from air traffic at Schiphol.

According to the calculations, the annual average exposure of local residents to ultrafine particles from air traffic at Schiphol in 2017 and 2018 is the highest near the airport, and decreases as they live farther away. There are, however, small differences from year to year. They are caused by, among other things, variations in weather conditions and runway use.

The next part of the broader program is research into the effects on people's health of long-term exposure to ultrafine particles originating from air traffic at Schiphol. To this end, information is needed about the degree to which people who live in the vicinity of Schiphol are exposed to ultrafine particles. In order to determine the exposure, insight into the concentration of ultrafine particles in the air is needed. The calculation model makes it possible to obtain that information. Measurements have limitations: the concentration of ultrafine particles can only be determined at a few locations and only under the weather and flight conditions at the times in question. The calculation model translates the measurements to all other locations and other (longer) periods.

Keywords: ultrafine particles, UFP, aviation, air traffic, Schiphol, measurement, calculation

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 23

2 Aanpak — 25
2.1 Metingen — 25
2.1.1 Meetapparatuur — 25
2.1.2 Meetcampagnes — 26
2.1.2.1 Vergelijkingsmetingen — 26
2.1.2.2 Meetcampagne taxiënde vliegtuigen — 26
2.1.2.3 Meetcampagne rondom Schiphol voor toetsing rekenmodel — 27
2.2 Rekenmodel — 31
2.2.1 Verspreidingsmodel — 31
2.2.2 Meteorologische meetgegevens — 32
2.2.3 Vliegtuigbewegingen — 33
2.2.4 Emissies — 34

3 Resultaten meetcampagne taxiënde vliegtuigen — 39

4 Resultaten meetcampagne rondom Schiphol — 43
4.1 Windrozen en schatting ‘achtergrond’-concentratie — 43
4.2 Gemiddelde concentratiebijdrage — 48

5 Resultaten toetsing en kalibratie van het rekenmodel met metingen — 51
5.1 Verkenning modelaanpassingen — 51
5.2 Toetsing van het model voor toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling — 52
5.3 Kalibratie van het rekenmodel — 60
5.4 Vergelijking met het voorgaande verkennende onderzoek — 63
5.5 Vergelijking met ander onderzoek — 63

6 Resultaten in meer detail — 65
6.1 Vergelijking meting – berekening in meer detail — 65
6.1.1 Windrozen voor de verschillende indicatoren — 65
6.1.2 Proefdraaiplaats — 68
6.2 Rekenmodel — 68
6.2.1 Afzonderlijke vluchtfasen — 68
6.2.2 Taxiënde vliegtuigen — 73
6.2.3 Pluimdaling — 76
6.2.4 Lengte van het starttraject — 78
6.2.5 Dicht bij de bron — 79

7 Blootstellingskaarten — 81

8 Conclusies en aanbevelingen — 85

9 Referenties — 90

Bijlage 1 – Rapport over de metingen — 92

Bijlage 2 – Rapport over het rekenmodel — 93

Bijlage 3 – Metingen van NO_X en PM_{10} — 94

Samenvatting

Deze samenvatting beoogt de lezer met uiteenlopende achtergrondkennis te informeren over de resultaten van het onderzoek. Aanleiding en context zijn daarvoor belangrijk. Hier wordt dan ook aandacht aan besteed. De samenvatting richt zich daarnaast op de hoofdlijn van het onderzoek. Voor verdere details wordt verwezen naar de hoofdstukken en bijlagen in het rapport zelf. De samenvatting kan zo ook als leeswijzer worden gebruikt.

Onderzoeksprogramma gezondheidsrisico's ultrafijn stof rond Schiphol
Uit verkennend onderzoek naar de concentraties van ultrafijn stof rondom de luchthaven Schiphol bleek dat deze concentraties verhoogd zijn (Keuken et al., 2015; Bezemer et al., 2015). De betekenis hiervan voor de gezondheid van omwonenden is onduidelijk, omdat weinig bekend is over de gezondheidseffecten van ultrafijn stof, in het bijzonder van vliegverkeer. Aanvullend onderzoek is nodig om preciezer inzicht te krijgen in de mate waarin ultrafijn stof bijdraagt aan gezondheidseffecten (Bezemer et al., 2015; Janssen et al., 2016).
Het RIVM heeft van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat de opdracht gekregen om een integraal onderzoeksprogramma naar de gezondheidsrisico's van ultrafijn stof rond Schiphol uit te voeren.

Het doel van het meerjarig onderzoeksprogramma is inzicht te verkrijgen in de mogelijk nadelige gezondheidseffecten van ultrafijn stof rondom de luchthaven Schiphol.

Het meerjarige onderzoeksprogramma bestaat uit vier modules:
1. Onderzoek naar de langetermijnconcentraties ultrafijn stof van vliegverkeer in de omgeving van Schiphol;
2. Onderzoek naar de effecten van langdurige blootstelling aan ultrafijn stof van vliegverkeer;
3. Onderzoek naar gezondheidseffecten van kortdurende verhogingen van de concentratie van ultrafijn stof;
4. Een module waarbinnen bovenstaande activiteiten worden geïntegreerd.

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de langetermijnconcentraties van ultrafijn stof afkomstig van vliegverkeer in de omgeving van Schiphol (Module I).

Inleiding
De uitkomsten van Module I worden gebruikt in het onderzoek naar gezondheidseffecten van langdurige blootstelling (Module II). Voor dat onderzoek is informatie nodig over de langdurige blootstelling van mensen die in de nabijheid van Schiphol wonen. Een rekenmodel maakt het mogelijk om die informatie te verkrijgen. Metingen kennen beperkingen: het is onmogelijk om op alle locaties waar mensen wonen metingen van de concentratie van ultrafijn stof uit te voeren. Ook zijn de metingen erg afhankelijk van de weersomstandigheden en het baangebruik. Een rekenmodel maakt het mogelijk om op alle locaties en in verschillende situaties, zoals onder andere weersomstandigheden en bij ander baangebruik, de jaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer op

Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof te bepalen. Het rekenmodel wordt zo gebruikt om metingen te vertalen naar alle overige locaties, eventueel ook voor andere (langere) perioden.

In Nederland werd al een rekenmodel gebruikt om inzicht te krijgen in de bijdrage van vliegverkeer aan de concentratie van ultrafijn stof. In het voorgaande verkennende onderzoek (Bezemer et al., 2015) is dat rekenmodel (Stacks+) beperkt getoetst aan de werkelijkheid met behulp van metingen gedurende een à twee maanden met verschillende typen apparaten. Er was toen niet meer tijd beschikbaar voor de kalibratie[1] van het model. Om het model verder te verbeteren heeft het huidige onderzoek invulling gegeven aan aanbevelingen die aan het einde van het verkennende onderzoek zijn gedaan (Janssen et al., 2016). Er zijn meetcampagnes uitgevoerd met als doel het rekenmodel uitgebreid te toetsen over een langere periode en waar mogelijk deze te verbeteren. Op acht verschillende locaties rondom Schiphol is een half jaar gemeten; op twee locaties een heel jaar. Een van de onderzochte verbeteringen is het toevoegen van taxiënde vliegtuigen als aparte bron in het rekenmodel. Dit was een van de aanbevelingen uit de voorgaande verkennende studie. Daarnaast is gekeken naar andere indicatoren voor de emissies van ultrafijn stof.

Het toetsen (en kalibreren) van het rekenmodel is gericht op de vraag in hoeverre het model toepasbaar is voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling. Om deze vraag te beantwoorden, zijn de berekende en gemeten bijdragen van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof, gemiddeld over de meetperiode van een halfjaar, vergeleken. De meetwaarden zijn vervolgens gebruikt om de rekenresultaten te optimaliseren.

Naast het toetsen met behulp van de halfjaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer is ook gekeken naar hoe goed het rekenmodel gemeten verhoogde concentraties bij wind specifiek uit de richting van de vliegbewegingen berekent. Dit geeft meer inzicht in de situaties waarvoor het rekenmodel goed of juist minder goed presteert.

Metingen
Ultrafijn stof is een benaming voor deeltjes in de lucht die kleiner zijn dan 100 nanometer (of 0,1 micrometer, 10.000 keer kleiner dan een millimeter). De eenheid is aantal deeltjes per cm^3. De deeltjes zijn niet met het oog te zien. Ze zijn dan ook moeilijk te meten. De metingen zijn uitgevoerd door GGD Amsterdam en TNO (voorheen ECN). De metingen van ultrafijn stof vonden plaats tussen mei 2017 en augustus 2018 en zijn uitgevoerd met zes identieke hoogwaardige apparaten, deeltjestellers (Environmental Particle Counters) type EPC-3783. Deze apparaten meten het totaal aantal deeltjes in de lucht met een diameter vanaf 7 nanometer (oftewel 0,007 micrometer). Om te toetsen in hoeverre andere bronnen dan vliegverkeer de gemeten concentraties beïnvloeden, is er roulerend ook een SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) ingezet. Met een SMPS kan niet alleen het totale aantal deeltjes

[1] Met kalibratie wordt bedoeld het schalen van berekende waarden naar gemeten waarden. Dat gebeurt door de waarden met elkaar te vergelijken en een factor vast te stellen die de verhouding tussen beide beschrijft. Deze factor wordt in dit rapport de schalingsfactor genoemd.

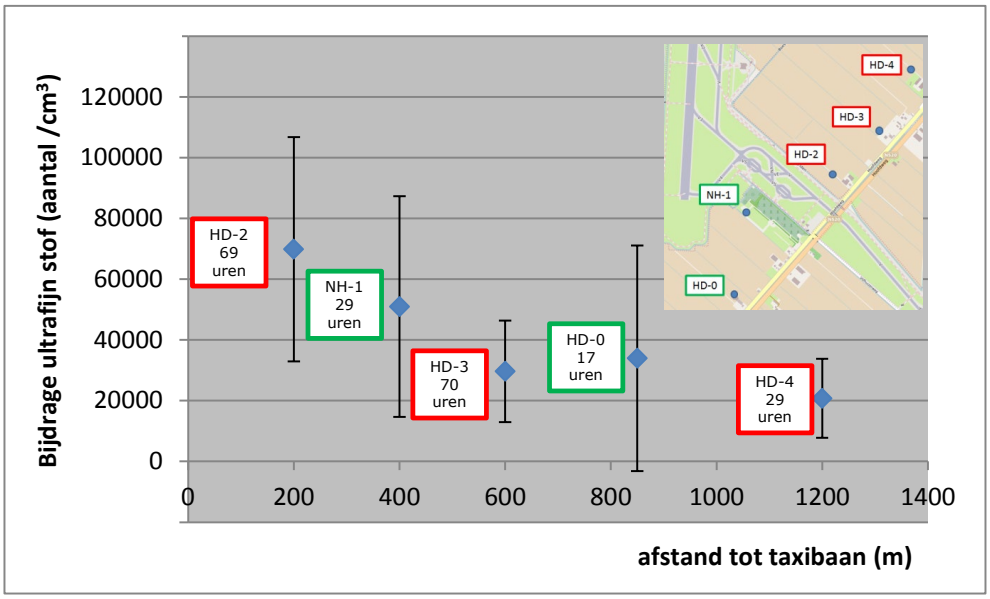
gemeten worden, maar ook onderscheid gemaakt worden naar deeltjes van verschillende grootte. Het is bekend dat de emissies van vliegtuigen een veel groter aantal zeer kleine deeltjes (<30 nm) opleveren dan emissies uit andere bronnen, zoals wegverkeer. Meer informatie over het meten van ultrafijn stof en de apparatuur is te vinden in paragraaf 2.1.1 en Bijlage 1 van het rapport.

Het meetprogramma bestond uit drie onderdelen:

- Vergelijkingsmetingen van de apparatuur;
- Een kortdurende campagne naar de bijdrage van taxiënde vliegtuigen;
- Een langdurende campagne voor toetsing van het model op een aantal vaste locaties.

Metingen voor vergelijking van de apparatuur
De meetgegevens van de verschillende apparaten zijn meerdere keren gedurende het project met elkaar vergeleken. Dat is gedaan door alle apparatuur op de meetlocatie nabij de Polderbaan (zie locatie 6 in Figuur 2) op te stellen. De apparaten verschilden onderling niet veel.
De meetresultaten van afzonderlijke apparaten lagen bij de vergelijkingscampagnes tussen 0 en 14% uit elkaar (bij normaal functioneren). Er zijn relaties afgeleid waarmee apparaten naar hetzelfde niveau zijn vertaald. Daarvoor is een van de apparaten bij het begin van de studie als 'referentie'-apparaat aangemerkt. Gekozen is voor het apparaat waarvan de meetwaarden tussen die van de andere apparaten in lagen. Tijdens het halfjaar meten op locatie lieten de apparaten een verloop in het meetsignaal tot 10% zien waarvoor is gecorrigeerd. Deze verschillen tussen de apparaten zijn niet groot. Door de vergelijkingen zijn de metingen goed op elkaar afgestemd. De vergelijkende metingen en gevonden relaties zijn uitgebreid beschreven door TNO in Bijlage 1 van dit rapport.

Metingen bijdrage van taxiënde vliegtuigen
Als eerste onderdeel van de studie is een kortdurende meetcampagne naar taxiënde vliegtuigen nabij de Polderbaan uitgevoerd. De meetcampagne richtte zich op de vraag of het nodig is om naast startende en landende vliegtuigen ook taxiënde vliegtuigen als aparte bron in het rekenmodel mee te nemen. De metingen zijn op verschillende afstanden aan weerszijden van de taxiroute naar de Polderbaan uitgevoerd. Figuur 1 toont voor elke locatie de gemiddeld gemeten bijdrage van taxiënde vliegtuigen aan de concentratie van ultrafijn stof, alleen op uren overdag en met wind in de richting van de meetlocaties. Op die momenten wordt de concentratie beïnvloed door taxiënde vliegtuigen. Dit zijn dus géén gemiddelde concentraties voor de meetperiode. Uit de metingen blijkt dat taxiënde vliegtuigen de concentratie van ultrafijn stof tot op de in deze campagne verst weg van de taxibaan gelegen meetlocatie (1.200 m) aanzienlijk beïnvloeden wanneer deze benedenwinds ligt. De gemiddelde bijdrage is dan rond 20.000 deeltjes/cm^3, terwijl de achtergrondconcentratie rond 10.000 deeltjes/cm^3 is. Op basis hiervan is besloten om taxiënde vliegtuigen in de verdere analyses als aparte bron in het rekenmodel mee te nemen.



Figuur 1. Gemiddeld gemeten bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof (in aantallen deeltjes/cm^3) van taxiënde vliegtuigen op uren met wind uit de richting van de taxibaan, als functie van de afstand tot de taxibaan (bij benadering, in m).

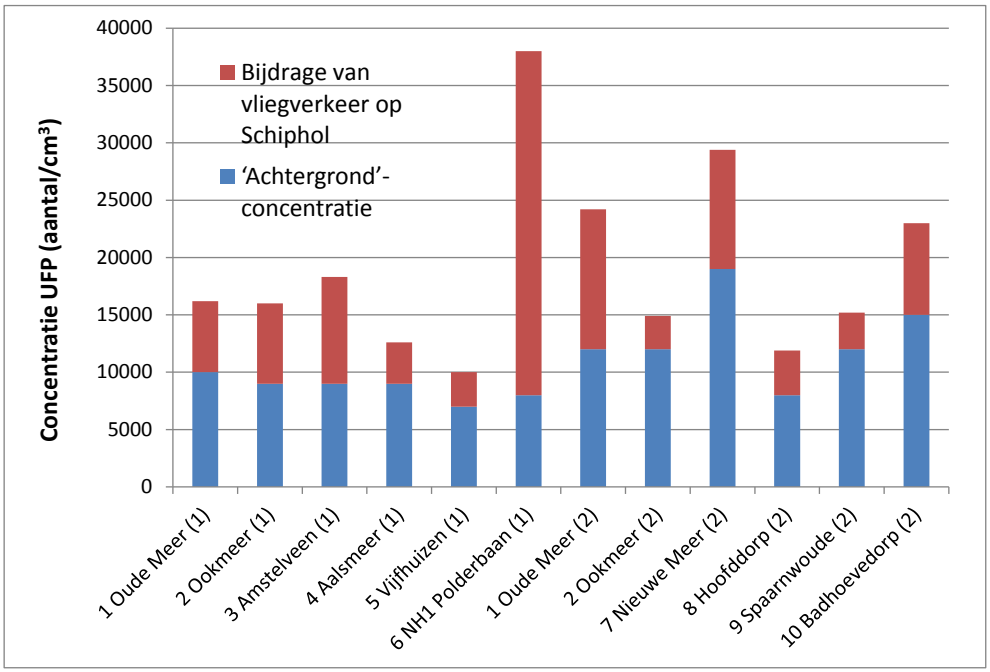
Metingen op aantal locaties voor toetsing model

Na de campagne naar taxiënde vliegtuigen is tweemaal een halfjaar op tien verschillende locaties rondom Schiphol gemeten voor het toetsen van het rekenmodel. De meetlocaties zijn weergegeven in Figuur 2. De keuze van de verschillende meetlocaties wordt toegelicht in paragraaf 2.1.2.3 van het rapport. Op locaties 1 en 2 is gedurende beide perioden van een halfjaar gemeten. Met de gekozen meetlocaties is binnen de praktische mogelijkheden een balans gevonden tussen voldoende meetlocaties en een voldoende lange periode. De metingen zijn bedoeld om het rekenmodel te toetsen en niet om een jaargemiddelde concentratie vast te stellen. Dat gebeurt later met behulp van het rekenmodel.

Figuur 2. Meetlocaties in de campagne voor de toetsing van het rekenmodel. Bron ondergrond: PDOK.

Voor de toetsing van het rekenmodel is het nodig om te weten welk deel van de gemiddeld gemeten concentratie wordt veroorzaakt door emissies van het vliegverkeer. Daarom is er per locatie een schatting gemaakt van de 'achtergrond'-concentratie. Daarmee wordt de concentratie bedoeld die zou zijn gemeten als er geen vliegbewegingen waren. De bijdrage van het vliegverkeer is dan de gemeten concentratie minus de 'achtergrond'-concentratie. Uitleg over hoe de 'achtergrond'-concentratie is bepaald en over de onzekerheid van deze bepaling, staat in paragraaf 4.1 van het rapport. De metingen van de grootteverdeling met de roulerende SMPS hebben ook een rol gespeeld in de bepaling van de 'achtergrond'-concentratie. Uit deze metingen blijkt dat het overgrote deel van de verhoging van het aantal gemeten deeltjes op de locaties rondom Schiphol bij wind uit de richting van Schiphol inderdaad kleiner is dan 30 nm en dus van vliegverkeer afkomstig is.

De over een halfjaar gemiddeld gemeten concentraties en afgeleide bijdragen van vliegverkeer, staan in Figuur 3.



Figuur 3. Gemiddeld gemeten concentratie ultrafijn stof (in aantal deeltjes per cm^3) over een halfjaar, schatting van de 'achtergrond'-concentratie en de afgeleide bijdrage van vliegverkeer op Schiphol per locatie en periode.

De verschillen tussen de locaties kunnen groot zijn. Ook zijn er duidelijke verschillen tussen de perioden (op locaties 1 en 2 is beide perioden van een halfjaar gemeten). Locaties die dicht bij drukke verkeerswegen liggen, zoals Nieuwe Meer en Badhoevedorp, hebben de hoogste 'achtergrond'-concentraties. Locaties die dicht bij Schiphol liggen kennen de hoogste bijdragen van het vliegverkeer, maar dat is ook afhankelijk van de windrichting: hoe vaak een locatie benedenwinds van vliegtuigemissies ligt, is sterk bepalend voor de blootstelling. In het eerste halfjaar kwam de wind overwegend uit zuidwestelijke richting. Het tweede halfjaar was de windrichting gelijkmatiger verdeeld, met een relatief groot aandeel wind uit het noordoosten. Dit is terug te zien in de variatie in Figuur 3.

Rekenmodel

In grote lijnen is de modelleeraanpak van het voorgaande verkennende onderzoek gevolgd. Er is gebruikgemaakt van het rekenmodel Stacks+, in Nederland een veelgebruikt rekenmodel voor vliegtuigen. Het is in het verleden ook toegepast voor luchtkwaliteitsberekeningen ten behoeve van verschillende m.e.r.[2]-studies over zowel de luchthaven Schiphol als over andere luchthavens (onder andere NLR, 2008; NLR, 2016). Details over de modelaanpak heeft Erbrink Stacks Consult (ESC) beschreven in Bijlage 2 van het rapport.

Het rekenmodel Stacks+ is een Gaussisch pluimmodel. Het beschrijft de verspreiding van de emissies van vliegtuigen door de atmosfeer. Dit doet het model voor elk uur in de onderzochte periode. De periodegemiddelde bijdrage aan de concentratie is dan het gemiddelde

[2] m.e.r. = milieueffectrapportage.

van de bijdragen van alle uren in de betreffende periode. Vaak is dat een jaar, maar voor dit onderzoek een halfjaar.

In het onderzoek voor de toetsing van het rekenmodel is gerekend met de werkelijk opgetreden vliegbewegingen en meteorologische waarnemingen. Informatie over de vliegbewegingen komt uit de FANOMOS-database, aangeleverd door het Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR); meteorologische waarnemingen zijn beschikbaar gesteld door het KNMI. Wanneer in dit rapport wordt gesproken over de prestatie van het rekenmodel, wordt de combinatie van het rekenmodel en de modelinvoer (vliegbewegingen, meteorologie en emissies) bedoeld.

Voor luchthavenstudies, waaronder de m.e.r.-studies, levert het NLR gegevens aan over brandstofverbruik en emissiefactoren voor de verschillende vluchtfasen (taxiën, starten, klimmen, naderen, landen). Ook dit onderzoek maakt gebruik van de emissiegegevens van het NLR. Echter, het NLR beschikt niet over emissiefactoren voor ultrafijn stof van vliegtuigen. Om die reden is in het voorgaande verkennende onderzoek gebruikgemaakt van de emissiefactoren van fijn stof (PM_{10}). De berekende waarden van de concentratiebijdrage aan PM_{10} met het rekenmodel Stacks+ zijn gekalibreerd met de metingen van ultrafijn stof. Daartoe is uit de vergelijking tussen de berekende concentratiebijdrage van PM_{10} en de gemeten concentratiebijdrage van ultrafijn stof een gemiddelde schalingsfactor afgeleid.[3] Deze aanpak wordt in het huidige onderzoek ook gevolgd, maar om de berekeningen verder te verbeteren worden naast PM_{10} ook andere indicatorstoffen gebruikt. Dat is gedaan omdat op voorhand niet bekend is welke indicator het meest representatief is voor ultrafijn stof (het beste daarmee schaalt). De verhoudingen tussen de bijdragen van de verschillende vluchtfasen zijn daarbij van belang (zie paragraaf 2.2.4 van het rapport). Het gaat om de volgende aanvullende indicatorstoffen:

- PM_X: dit is ook PM_{10} maar dan door het NLR op een andere manier afgeleid;[4]
- NO_X: stikstofoxiden, door het NLR aangeleverd;
- Brandstof: de brandstofstroom zoals door NLR aangeleverd;
- ‘Indicatief’ ultrafijn stof: uit de literatuur zijn indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof afgeleid, gebaseerd op een meetcampagne in de buitenlucht nabij taxiënde, startende en landende vliegtuigen in Australië (Mazaheri et al., 2009). Dit is aangeduid als ‘indicatief’ vanwege de relatief grote onzekerheden in de schatting.

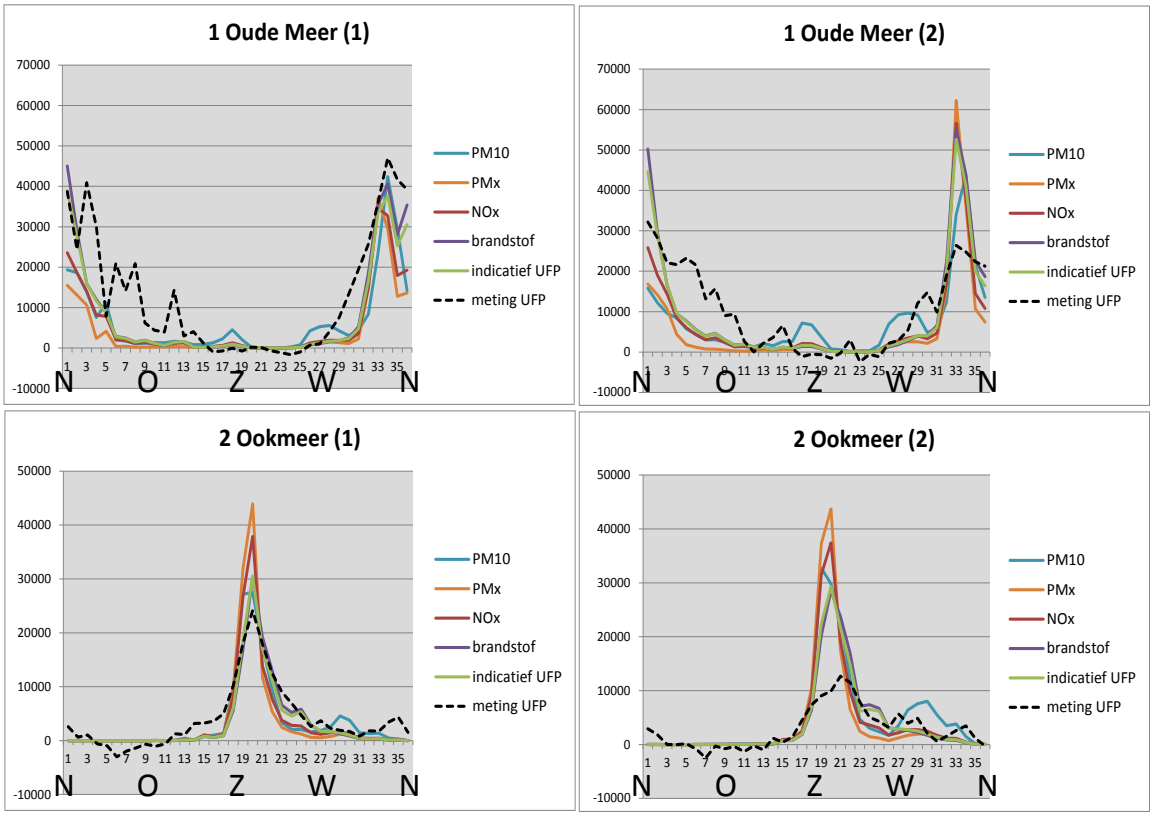
In paragraaf 2.2.4 van het rapport wordt meer uitleg gegeven over de emissiefactoren van de verschillende indicatorstoffen.

[3] De schalingsfactor is een vaste factor die ofwel direct op de emissies die in het rekenmodel worden gebruikt kan worden toegepast ofwel achteraf op de berekende bijdrage.

[4] De emissiefactoren van fijn stof voor de verschillende vluchtfasen kunnen op meerdere manieren worden afgeleid. Van deze manieren is bekend dat ze alle een beperkte nauwkeurigheid hebben. Daardoor kennen ze onderling vrij grote verschillen (zie paragraaf 2.2.4 van het rapport). De bijdrage van vliegtuigen aan de (massa)concentraties van PM_{10} in de omgeving is overigens beperkt.

Bijdrage vliegverkeer per windrichting

Om te weten te komen of het vliegverkeer lokaal voor verhoging van de concentratie ultrafijn stof zorgt en hoe dat afhangt van de windrichting, is per meetlocatie in kaart gebracht wat de gemeten concentraties van ultrafijn stof zijn per windrichting. Dit is vergeleken met de berekening, met als doel meer inzicht te krijgen in de situaties waarvoor het rekenmodel goed of juist minder goed presteert. Een voorbeeld van de vergelijking van de berekeningen met metingen in de vorm van windrozen is gegeven in Figuur 4. In paragraaf 6.1 van het rapport zijn deze figuren voor alle locaties opgenomen. De windrozen in dit rapport worden niet als echte 'rozen' in een radargrafiek gepresenteerd, maar als x,y-grafiek. Dat is gedaan om de vergelijking tussen meting en berekening inzichtelijker te maken. De gemeten bijdragen zijn tot stand gekomen door de gemiddelde 'achtergrond'-concentratie van de gemeten concentratie af te trekken. De berekeningen geven net als de metingen duidelijke verhogingen in de concentratie bij wind uit de richting van de vliegbewegingen. Wel zijn er afhankelijk van de meetlocatie verschillen, bijvoorbeeld in de breedte van de windrichtingen (windsector) met een verhoogde concentratie of in de relatieve hoogte van de pieken. Het valt op dat op sommige locaties bij bepaalde windrichtingen in de metingen wel een verhoging is te zien, maar niet of nauwelijks in de berekening, of omgekeerd. Voor sommige situaties en locaties doet het rekenmodel (inclusief de gebruikte emissies) het dus beter dan voor andere.

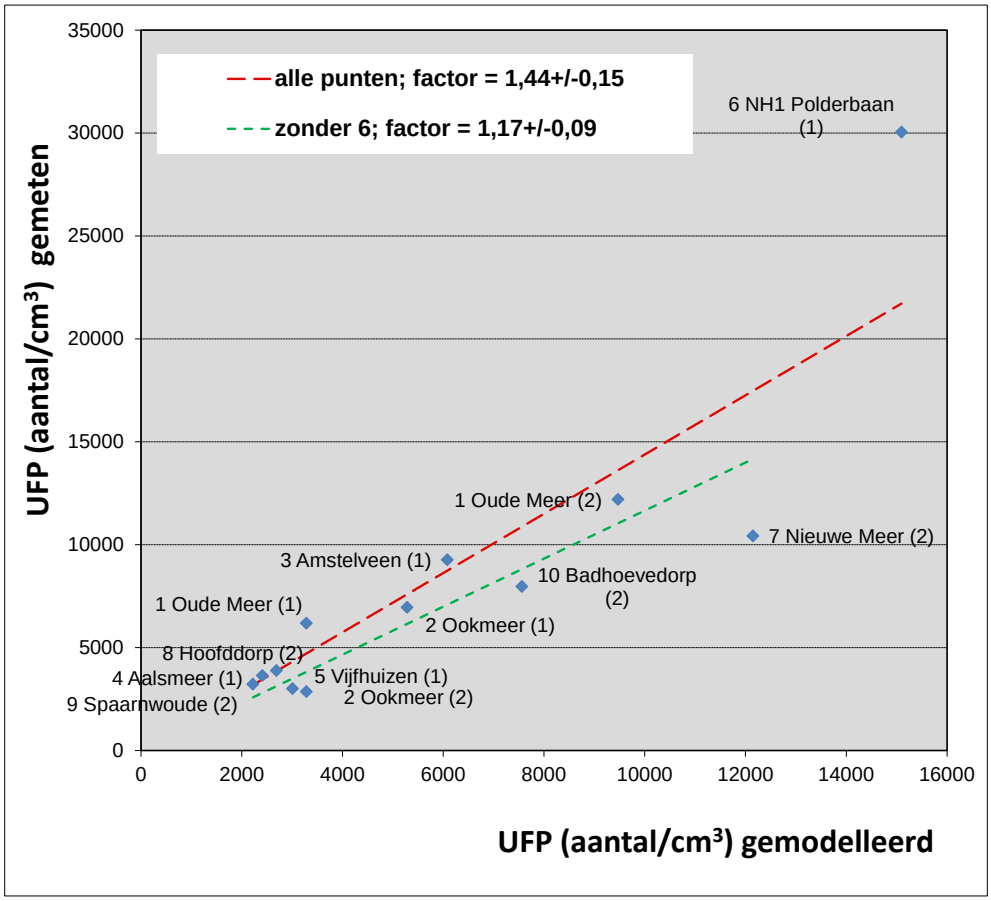


Figuur 4. Windrozen van de gemiddeld per windsector van 10 graden gemeten en met verschillende indicatoren berekende bijdrage van vliegverkeer aan de concentratie van ultrafijn stof (na toepassing van de gemiddelde schalingsfactor, in aantal deeltjes per cm^3). Voorbeelden voor locaties 1 en 2 in beide halve

jaren. Op de x-as is de windrichting met N, O, Z, en W weergegeven (N betekent wind uit het noorden, etc.).

Verkenning van extra aanpassingen in het rekenmodel
Om te onderzoeken of de overeenkomst kon worden verbeterd voor de situaties waarin het rekenmodel het meest afwijkt van de metingen, zijn verschillende experimenten met extra modelaanpassingen gedaan. Het gaat hier om *extra* aanpassingen, *naast* het toevoegen van taxiënde vliegtuigen en het rekenen met andere indicatoren voor de emissies. Ook zijn mogelijke oorzaken van afwijkingen onderzocht. Zo is er gekeken naar het (kunnen) toepassen van specifieke schalingsfactoren voor de afzonderlijke vluchtfasen (waaronder taxiën), het toepassen van pluimdaling, de lengte van het starttraject en het gedrag van het model voor bronnen op korte afstand. Paragraaf 6.2 van het rapport gaat hier in detail op in. Door verschillende oorzaken blijkt het lastig om extra generieke aanpassingen in het model door te voeren die de overeenkomst tussen berekeningen en metingen verbeteren. Er is daarom besloten het rekenmodel niet verder aan te passen. Op die manier is het rekenmodel ook zo veel mogelijk vergelijkbaar met rekenmodellen die voor andere toepassingen worden gebruikt, zoals de m.e.r.-studies.

Toetsing rekenmodel op basis van halfjaargemiddelden
De basis voor de toetsing van het rekenmodel is de vergelijking van de gemeten en berekende halfjaargemiddelde bijdragen op de meetlocaties. Voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling zijn de contrasten (verschillen) in de gemiddelde concentraties over langere perioden tussen de locaties relevant (zie ook paragraaf 5.2 van het rapport). De concentratiebijdragen op de verschillende locaties ten opzichte van elkaar worden weergegeven in grafieken zoals Figuur 5 (zie hieronder).



Figuur 5. Vergelijking berekende halfjaargemiddelde bijdragen van het vliegverkeer aan de concentratie van ultrafijn stof (op basis van indicatieve emissiefactoren (Mazaheri et al., 2009)) met de gemeten bijdragen. De helling van de orthogonale regressielijnen (rode en groene lijn), gefit door de oorsprong, geeft de schalingsfactor en de onzekerheid erin (1σ). Labels bij de datapunten: naam locatie (periode).

Op de x-as staat de berekende halfjaargemiddelde bijdrage aan de concentratie en op de y-as de halfjaargemiddelde gemeten bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof. Bij de bepaling van de halfjaargemiddelde waarde worden zowel de uren meegenomen waarop de locatie was belast, als de uren waarop de locatie niet was belast door vliegtuigemissies. De resultaten bij gebruik van de indicator 'indicatief ultrafijn stof' zijn gegeven in Figuur 5. Voor de figuren voor de indicatoren NO_X, PM_{10}, PM_X en brandstof wordt verwezen naar paragraaf 5.2 van het rapport. In de figuur worden ook resultaten van twee verschillende analyses, 'fits' aan de data, getoond (rode en groene lijn). Deze zijn relevant voor het bepalen van de schalingsfactoren (zie de volgende paragraaf van de samenvatting). Voor de fits wordt ervan uitgegaan dat zowel de metingen als de berekeningen aanzienlijke onzekerheden hebben. Een dergelijke fit aan de data heet een 'orthogonale' fit (of orthogonale regressie).
Uit de grafieken blijkt een duidelijk verband tussen de gemeten en berekende bijdragen. In de grafieken van de meeste indicatoren valt de afwijkende ligging van locatie 6 (NH1 Polderbaan) op. Deze locatie ligt op slechts 400 m van de Polderbaan, en bij noordwestenwind direct in

de pluim van startende vliegtuigen. In paragraaf 6.2.5 van het rapport wordt besproken dat het model de concentratie op deze locatie zo dicht bij de bron minder goed beschrijft. Bij het bepalen van de schalingsfactoren wordt deze locatie niet meegenomen (zie de volgende paragraaf van de samenvatting).

De gevonden correlatiecoëfficiënten (indicaties voor de overeenkomst) voor de halfjaargemiddelde berekende en gemeten bijdragen van vliegverkeer zijn hoog. Voor de indicatoren brandstof en ultrafijn stof is de Pearson correlatiecoëfficiënt 0,9, ongeacht of het datapunt van locatie 6 (NH1 Polderbaan) wordt meegenomen of niet. Voor NO_X, PM_{10} en PM_X maakt het wel uit of datapunt 6 wordt meegenomen. De Pearson correlatiecoëfficiënten liggen tussen 0,76 (PM_{10} met locatie 6, PM_X zonder locatie 6) en 0,9 (PM_X en NO_X met locatie 6) (zie paragraaf 5.2 van het rapport; Tabel 5 en Tabel 6). De verschillen tussen de indicatoren zijn niet groot. Wel zijn er betere indicatoren dan PM_{10} als basis voor de emissieberekening. De indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof zoals afgeleid uit de studie van Mazaheri et al. (2009) voldoen daarvoor goed. De berekeningen op basis van de indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof zijn sterk gecorreleerd met de metingen. Dit betekent dat het rekenmodel goed onderscheid maakt tussen locaties met lagere en locaties met hogere concentraties, ondanks de onzekerheid in de berekende waarden voor individuele locaties. Geconcludeerd wordt dat het rekenmodel geschikt is voor de beoogde toepassing in het gezondheidsonderzoek. Daarbij zullen de indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof worden toegepast.

Schalingsfactoren
Met schalingsfactoren kunnen de berekende concentratiebijdragen naar de gemeten waarden voor ultrafijn stof worden vertaald. De schalingsfactor kan worden toegepast op de emissiefactoren die gebruikt worden als invoer voor het rekenmodel, of achteraf op de berekende bijdragen. Dat maakt geen verschil.

In paragraaf 5.3 van het rapport worden de schalingsfactoren voor elke indicator afgeleid en wordt de schatting van de onzekerheid erin (15 tot 25% (1σ)) onderbouwd. De gevonden schalingsfactor voor ‘indicatief’ ultrafijn stof afgeleid uit de metingen van Mazaheri et al. (2009) is 1,17. Dat wil zeggen dat de metingen gemiddeld een 17% hogere bijdrage aangeven dan berekend met behulp van de emissiefactoren van indicatief ultrafijn stof. Dit is een klein verschil.

De keuze is gemaakt om locatie 6 (NH1 Polderbaan) niet mee te nemen bij de bepaling van de schalingsfactor. De locatie ligt dicht op de bron en is daarmee minder representatief voor blootstellingniveaus van omwonenden voor het gezondheidsonderzoek. Als locatie 6 namelijk wel was meegenomen in de bepaling van de schalingsfactor, zouden de concentratieniveaus op wat grotere afstand (in de omliggende woonkernen) vermoedelijk worden overschat. Het is waarschijnlijk dat de blootstelling op korte afstand (enkele honderden meters) van vliegtuigen hoger is dan nu berekend. Dat kan wel tot een factor 2 schelen.

In het verkennende onderzoek van 2015 is alleen gerekend met de indicator PM_{10}. Op de meeste meetlocaties lag de schalingsfactor toen rond 400.000 (met een variatie van 100.000-700.000). De nu afgeleide factor is gemiddeld ongeveer 480.000. Dat is 20% hoger dan de 400.000 uit het voorgaande verkennende onderzoek.[5] Dit is een beperkt verschil, in aanmerking nemende dat er meerdere verschillen in aanpak zijn.[6]

Conclusies
Het rekenmodel is ten opzichte van de versie toegepast in het voorgaande verkennende onderzoek in 2015 op twee gebieden verbeterd:

- De metingen duiden erop dat taxiënde vliegtuigen in belangrijke mate kunnen bijdragen aan de concentraties van ultrafijn stof. Taxiënde vliegtuigen zijn daarom als bron aan het rekenmodel toegevoegd.
- De indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof, zoals afgeleid uit de wetenschappelijke literatuur, zijn gebruikt in plaats van die van PM_{10} en voldoen goed.[7]

Het verbeterde rekenmodel is uitgebreid vergeleken met metingen op tien locaties rond Schiphol. De rekenresultaten zijn gekalibreerd op de meetwaarden. Geconcludeerd wordt dat het rekenmodel zo geschikt is voor de beoogde toepassing in het gezondheidsonderzoek.

Aanbevelingen voor het rekenmodel
Wanneer er voor eventuele toekomstige studies (voor andere doelen) meer kwantitatief inzicht is gewenst in de bijdrage van de afzonderlijke vluchtfasen (zoals taxiën) aan de concentratie van ultrafijn stof, is een uitgebreider meetprogramma nodig. In hoofdstuk 7 van het rapport wordt daar een aanbeveling toe gedaan.

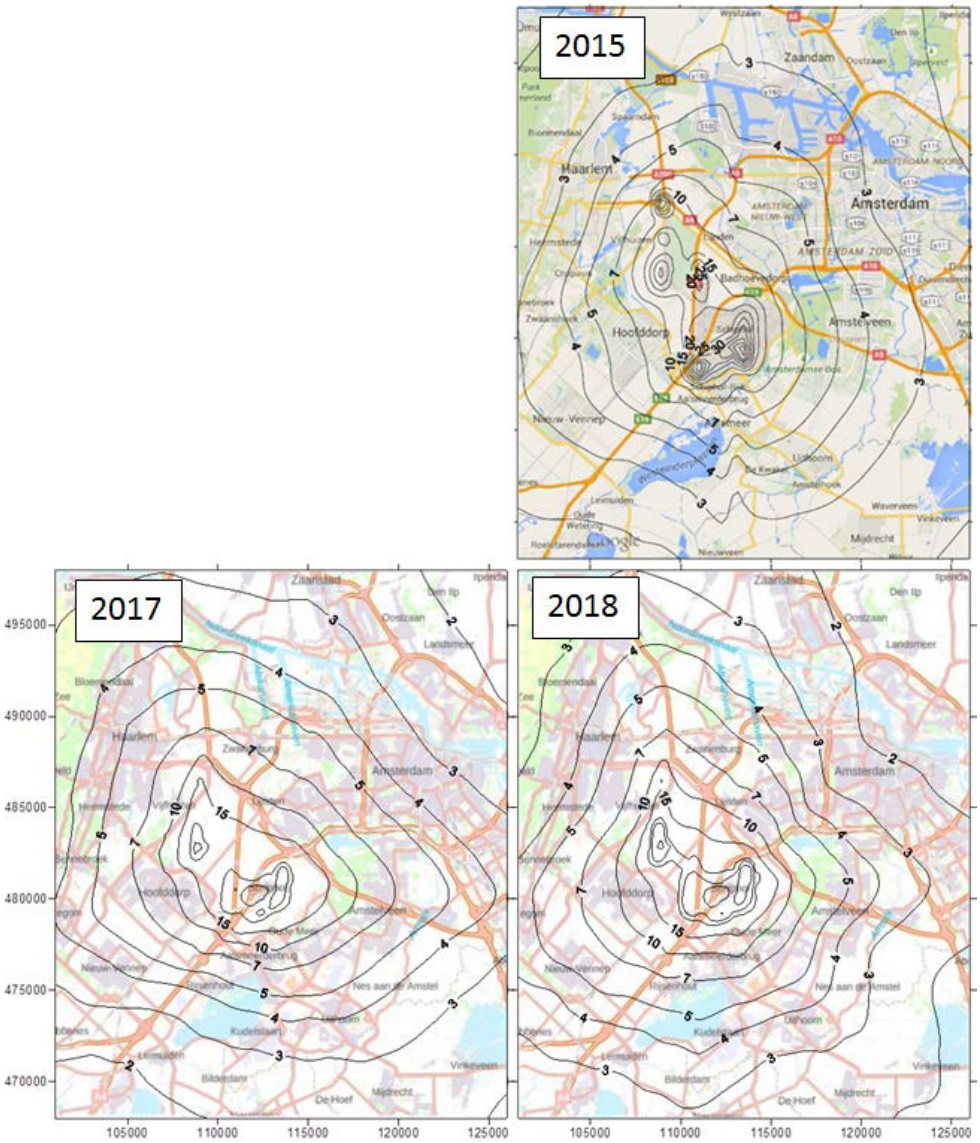
Op een aantal locaties gaven de metingen aanleiding te veronderstellen dat bij bepaalde windrichtingen klimmende en dalende vliegtuigen dicht bij Schiphol meer bijdragen aan de concentratie aan de grond dan het huidige rekenmodel aangeeft. Ook heeft het huidige rekenmodel vermoedelijk moeite de werkelijkheid dicht bij de bron goed te beschrijven. Hierbij spelen processen als pluimstijging, pluimdaling en de impuls bij startende vliegtuigen een rol. Als er voor eventuele toekomstige studies (voor andere doelen) behoefte is om deze processen beter te kunnen modelleren, is uitgebreid nader onderzoek nodig. Mogelijk is hiervoor een ander type rekenmodel nodig, of een combinatie daarmee.

[5] De gevonden schalingsfactoren in beide studies horen bij het rekenmodel zoals toegepast in de betreffende studies. Ze schalen beide naar metingen. Het is niet zinvol om resultaten van het vorige rekenmodel met de in deze studie gevonden factor te schalen.
[6] Omdat er ook aanpassingen zijn gedaan aan het rekenmodel, betekent een hogere schalingsfactor niet per se een hoger absoluut niveau van de berekende bijdrage van vliegverkeer aan ultrafijn stof.

[7] Bij toepassing van de indicatieve emissiefactoren van ultrafijn stof dragen taxiënde vliegtuigen op de meeste locaties vergelijkbaar bij als startende vliegtuigen. Taxiënde vliegtuigen bewegen zich met (aanzienlijk) minder vermogen voort, waardoor het brandstofverbruik en de emissie per tijdseenheid voor taxiën lager zijn dan voor startende vliegtuigen. Maar omdat taxiën langer duurt dan starten, kan de bijdrage van taxiënde vliegtuigen aan de concentratie van ultrafijn stof toch vergelijkbaar zijn.

Vervolg binnen het onderzoeksprogramma
Voor de toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling is het rekenmodel in deze vorm geschikt bevonden. Het is voor dat doel niet noodzakelijk nu verdere inspanningen te verrichten om het model te verbeteren. In hoofdstuk 7 van het rapport worden de berekende jaargemiddelde blootstellingkaarten van 2017 en 2018 getoond als voorbeeld van de blootstellingskaarten die in het gezondheidsonderzoek gaan worden gebruikt (zie ook Figuur 6). De kaarten maken duidelijk dat het patroon en de hoogte van de contouren van jaar tot jaar kunnen variëren. Dit is onder meer het gevolg van verschillen in weersomstandigheden en het baangebruik. De kaarten bevestigen het beeld uit de voorgaande verkennende studie (Bezemer et al., 2015), waarin een blootstellingskaart voor 2015 is gemaakt. Deze kaart was gebaseerd op langjarig gemiddelde meteorologie en een representatieve aanname van de verdeling van 440.000 vliegbewegingen over de banen. Bij woonlocaties die het dichtst bij Schiphol zijn gelegen kan de jaargemiddelde bijdrage oplopen tot circa 15.000 (+/- 4.000) deeltjes per cm^3. Een bijdrage van 3.000 (+/- 750) deeltjes per cm^3 is mogelijk tot op een afstand van 15 km van Schiphol.[8]

[8] De genoemde absolute waarden zijn onzeker. Naast de gevonden onzekerheid in de schalingsfactor en daarmee in het berekende niveau van 15-25% (1σ), speelt ook mee dat de absolute niveaus worden bepaald door de meetgegevens van de ingezette meetapparaten waarmee de berekeningen worden gekalibreerd. Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang worden bezien met het toegepaste type meetapparaat.



Figuur 6. De jaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof (in 1.000-tallen), berekend voor 2015 (Bezemer et al., 2015 - rechtsboven), 2017 (linksonder) en 2018 (rechtsonder). NB: de berekende absolute niveaus hebben een onzekerheid van 15-25% (1σ). Naast deze onzekerheid speelt ook mee dat de absolute niveaus bepaald worden door de meetgegevens van de ingezette meetapparaten waarmee de berekeningen worden gekalibreerd (in dit geval type EPC-3783). Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang met het toegepaste type meetapparaat worden bezien.

1 Inleiding

Uit verkennend onderzoek naar de concentraties van ultrafijn stof rondom de luchthaven Schiphol bleek dat deze concentraties verhoogd zijn (Keuken et al., 2015; Bezemer et al., 2015). De betekenis hiervan voor de gezondheid van omwonenden is onduidelijk omdat weinig bekend is over de gezondheidseffecten van ultrafijn stof, in het bijzonder ultrafijn stof dat afkomstig is van vliegverkeer. Aanvullend onderzoek is nodig om preciezer inzicht te krijgen in de mate waarin ultrafijn stof bijdraagt aan gezondheidseffecten (Bezemer et al., 2015; Janssen et al., 2016).
Het RIVM heeft van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat de opdracht gekregen om een integraal onderzoeksprogramma naar de gezondheidsrisico's van ultrafijn stof rond Schiphol op te zetten. Het doel van het meerjarig onderzoeksprogramma is inzicht te verkrijgen in de mogelijk nadelige gezondheidseffecten van ultrafijn stof rondom de luchthaven Schiphol.

Een onderdeel van het onderzoeksprogramma is onderzoek naar de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan ultrafijn stof als gevolg van vliegverkeer op Schiphol. Daarvoor is informatie nodig over de blootstelling van mensen die in de nabijheid van Schiphol wonen. Een rekenmodel maakt het mogelijk om die informatie te verkrijgen. Metingen kennen beperkingen: het is onmogelijk om op alle locaties waar mensen wonen metingen van de concentratie van ultrafijn stof uit te voeren En de metingen zijn erg afhankelijk van de weersomstandigheden en het baangebruik Een rekenmodel maakt het mogelijk om op alle locaties en in verschillende situaties, zoals onder andere weersomstandigheden en bij ander baangebruik, de jaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof te bepalen. Daarom wordt een rekenmodel ingezet.

In 2015 is volgend op onderzoek van TNO (Keuken et al., 2015) door het RIVM een nader verkennend onderzoek naar concentraties van ultrafijn stof in de omgeving van Schiphol uitgevoerd (Bezemer et al., 2015). In het betreffende verkennende onderzoek is ook een rekenmodel toegepast. Het model is toen beperkt getoetst aan de werkelijkheid met behulp van metingen gedurende een à twee maanden met verschillende typen apparaten. Aan het eind van dat onderzoek zijn aanbevelingen gedaan voor mogelijke verbeteringen en verdere toetsing van het model (Janssen et al., 2016). De belangrijkste aanbevelingen waren:

- Voeg taxiënde vliegtuigen als bron naast startende en landende vliegtuigen toe aan het model;
- Voer aanvullende metingen uit om het model beter te kunnen toetsen en waar mogelijk te verbeteren en maak daarbij gebruik van bestaande meetstations in de omgeving.

Het huidige onderzoek geeft invulling aan deze aanbevelingen. Er zijn meetcampagnes uitgevoerd met als doel het rekenmodel te toetsen op verschillende locaties rondom Schiphol en waar mogelijk te verbeteren.

Met toetsen wordt hier bedoeld: nagaan of het model de werkelijkheid goed genoeg beschrijft, met het oog op de toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling. Het gezondheidsonderzoek wordt gebaseerd op de verschillen in blootstelling tussen adreslocaties (ruimtelijke contrasten). De toets zal dan ook zijn gericht op de vraag hoe goed het model de ruimtelijke contrasten in langdurige blootstelling beschrijft.

In de twee meetcampagnes zijn twee aspecten nader onderzocht:

- Het rekenmodel van het voorgaande verkennende onderzoek nam taxiënde vliegtuigen niet als aparte bron mee. De aanname daarbij was dat de bijdrage van startende en landende vliegtuigen op enige afstand van Schiphol (daar waar de mensen wonen) veel groter is dan die van andere bronnen van ultrafijn stof op Schiphol, waaronder taxiënde vliegtuigen. Onderzocht is of het nodig is om naast stijgende en landende vliegtuigen ook taxiënde vliegtuigen als aparte bron mee te nemen. Hiertoe is een gerichte, kortdurende meetcampagne nabij de Polderbaan uitgevoerd.
- Het rekenmodel is door middel van metingen met hoogwaardige meetapparatuur van hetzelfde type gedurende langere tijd op een aantal locaties dicht bij en verder van Schiphol nader getoetst. Hiertoe is een meetcampagne van tweemaal een halfjaar uitgevoerd.

Dit rapport beschrijft de resultaten van de meetcampagnes, de toetsing en kalibratie van het rekenmodel en, waar nodig, aanpassingen van het rekenmodel. In aansluiting op dit onderzoek zal het rekenmodel worden ingezet om jaargemiddelde kaarten van de bijdrage van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof te berekenen. Deze zullen worden gebruikt voor het onderzoek naar gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan ultrafijn stof als gevolg van vliegverkeer op Schiphol. In het hoofdstuk 7 van dit rapport worden enkele van deze blootstellingkaarten als voorbeeld getoond en kort besproken.

2 Aanpak

2.1 Metingen

2.1.1 Meetapparatuur

De metingen van ultrafijn stof vonden plaats tussen mei 2017 en augustus 2018 en zijn uitgevoerd met zes Environmental Particle Counters (EPC-3783, merk TSI). Met deze apparaten kan de totale hoeveelheid deeltjes ultrafijn stof worden gemeten.
In 2016 is door de Europese normalisatiecommissie CEN een technische specificatie voor het meten van absolute aantallen ultrafijne deeltjes gepubliceerd (CEN/TS 16976:2016).[9] De in deze studie toegepaste EPC voldoet aan een belangrijke eis van de technische specificatie: de ondergrens van de diameter van detecteerbare deeltjes is 7 nm. Daarnaast wordt met de keuze voor de EPC-3783 aangesloten bij het voorgaande verkennende onderzoek waarin dit apparaat als referentie was gekozen. Voor de doelstelling van het huidige onderzoek is het geen eis om aan alle specificaties te voldoen. Er wordt immers niet getoetst aan absolute grenswaarden; de metingen worden gebruikt voor de toetsing van het rekenmodel waarmee de variatie tussen adreslocaties in de omgeving in kaart wordt gebracht. Voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling is de variatie tussen adreslocaties belangrijker dan de absolute niveaus zelf.

De metingen zijn uitgevoerd door GGD Amsterdam en TNO (voorheen ECN). Op sommige locaties kon de meetapparatuur in bestaande meetcabines van GGD Amsterdam met een aanzuigleiding naar buiten worden geplaatst. Op andere locaties is op particulier terrein door TNO een tijdelijke meetlocatie ingericht. Daar is de meetapparatuur in veldwerk-bekistingen neergezet, met een soortgelijke aanzuigleiding als in de cabine van GGD Amsterdam wordt gebruikt. De apparatuur is voor, tijdens en na de campagnes op een locatie met elkaar vergeleken. Die vergelijkingsmetingen zijn in dezelfde configuratie uitgevoerd.

Daarnaast is gebruikgemaakt van een Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), waarmee ook de grootteverdeling gemeten kan worden. De SMPS is roulerend ingezet om een karakterisering te maken van de deeltjesgrootteverdeling. Dat helpt bij het kunnen onderscheiden van bronnen van ultrafijn stof. Er is namelijk een duidelijk verschil in de grootte van deeltjes in de atmosfeer die afkomstig zijn van wegverkeer en die van vliegverkeer. De deeltjesgrootte gemeten op korte afstand van wegverkeer piekt rond de 30-50 nanometer en op korte afstand van vliegverkeer rond 10-20 nanometer (zie onder anderen Stacey, 2019).

Meer informatie over de apparatuur staat in Bijlage 1.

[9] Het aantal ultrafijne deeltjes kan met verschillende soorten apparaten worden gemeten, met elk eigen specificaties. Die specificaties, waaronder bijvoorbeeld de ondergrens van de diameter van detecteerbare deeltjes, hebben invloed op het absolute niveau van gemeten aantallen deeltjes. Dit maakt het lastig om metingen met verschillende apparaten met elkaar te vergelijken, laat staan om eenduidige absolute niveaus te meten. De technische specificatie van CEN geeft aan welke keuzes moeten worden gemaakt, zodat onderling vergelijkbare metingen ontstaan.

Op de locaties met bestaande meetcabines van de GGD Amsterdam, zijn afhankelijk van de locatie ook meetgegevens van NO_X en PM_{10} beschikbaar. In Bijlage 3 worden vergelijkingen gemaakt met de metingen van ultrafijn stof. Daaruit blijkt dat de bijdrage van vliegtuigemissies aan de concentratie van NO_X en PM_{10} uit de beschikbare metingen niet is af te leiden. Dat zorgt ervoor dat de metingen van NO_X en PM_{10} niet kunnen worden gebruikt voor toetsing van het rekenmodel voor die stoffen.

2.1.2 Meetcampagnes

Het meetprogramma bestond uit drie onderdelen:

- Vergelijkingsmetingen apparatuur (voor, tijdens en na de meetcampagnes);
- Kortdurende campagne naar de bijdrage van taxiënde vliegtuigen;
- Langdurige campagne voor toetsing van het model op een aantal vaste locaties.

2.1.2.1 Vergelijkingsmetingen

Als onderdeel van de kwaliteitsborging zijn met enige regelmaat vergelijkingsmetingen uitgevoerd: direct na de campagne naar taxiënde vliegtuigen, en direct voor, halverwege en direct na de campagne voor de toetsing van het rekenmodel. Alle meetapparaten zijn daarvoor op de meetlocatie nabij de Polderbaan(NH1) gedurende enkele dagen tot weken bij elkaar geplaatst. Dit wordt gedaan om de vergelijkbaarheid en het eventuele verloop van de gebruikte instrumenten vast te stellen. Er zijn relaties afgeleid waarmee apparaten naar hetzelfde niveau worden vertaald. Daartoe is een van de apparaten bij het begin van de studie als ‘referentie’-apparaat aangemerkt. Gekozen is voor het apparaat waarvan de meetwaarden tussen die van de andere apparaten in lagen.

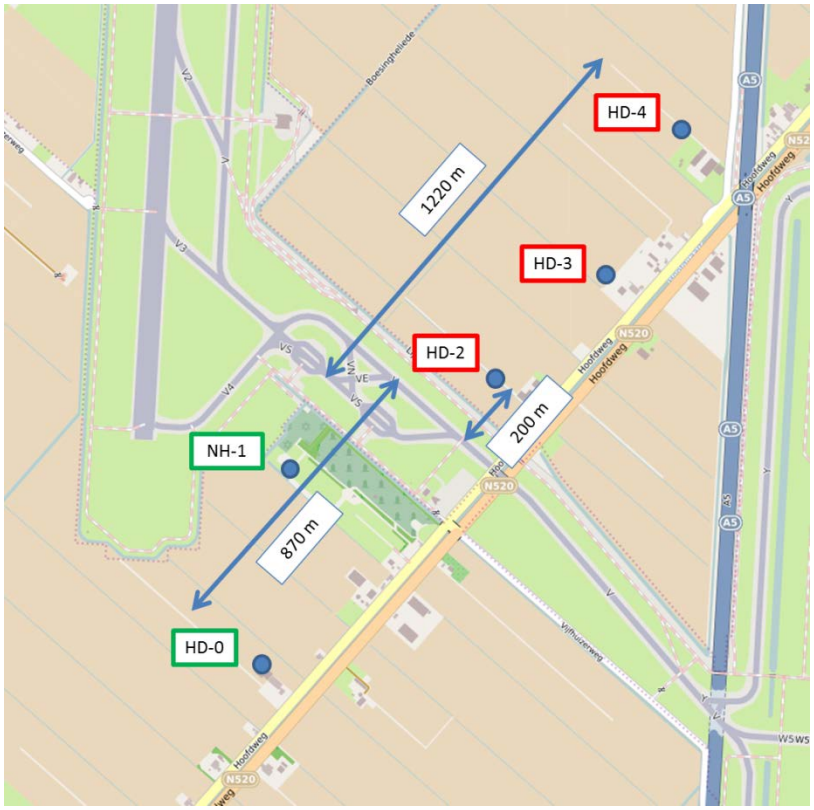
De resultaten van deze metingen staan in Bijlage 1. De apparaten verschilden onderling niet veel. De meetresultaten van afzonderlijke apparaten lagen bij de vergelijkingscampagnes tussen 0 en 14% uit elkaar (bij normaal functioneren). Tijdens het halfjaar meten op locatie lieten de apparaten een verloop in het meetsignaal tot 10% zien. Hiervoor is gecorrigeerd door middel van lineaire interpolatie.

2.1.2.2 Meetcampagne taxiënde vliegtuigen

Het rekenmodel van het voorgaande verkennende onderzoek nam taxiënde vliegtuigen niet mee als aparte bron. In de huidige studie is onderzocht of het nodig is om naast stijgende en landende vliegtuigen ook taxiënde vliegtuigen als aparte bron mee te nemen.

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van metingen op verschillende afstanden aan weerszijden van de taxiroute naar de Polderbaan ten noorden van de N-weg (‘Hoofdweg’). De bijdrage van het taxiën is bepaald door zowel boven- als benedenwinds te meten. Uit het verschil kan worden bepaald hoeveel de bijdrage is van het taxiën, afhankelijk van de afstand tot de taxibaan.
De metingen vonden plaats gedurende 28 dagen in mei/juni 2017. Tijdens deze periode kwam de wind zowel uit zuidwestelijke als noordoostelijke richting, zodat beide kanten van de taxiroute afwisselend beneden- en bovenwinds lagen.

De meetlocaties staan in Figuur 7. Meetpunt NH1 is een in opdracht van de provincie Noord-Holland door de GGD Amsterdam beheerd regulier meetstation. Alle andere locaties bevonden zich op particulier terrein. Aan het begin van de metingen waren nog geen zes maar vier apparaten beschikbaar. Op locaties NH1, HD2 en HD3 is permanent gemeten. Het vierde apparaat heeft eerst twee weken (bij overwegend zuidwestenwind) op locatie HD4 gestaan en de laatste twee weken (bij meer noordoostenwind) op locatie HD0.



Figuur 7. Meetlocaties in de campagne naar taxiënde vliegtuigen. Links het begin van de Polderbaan. Bron ondergrond: openstreetmap, 2018.

2.1.2.3 Meetcampagne rondom Schiphol voor toetsing rekenmodel

In het voorgaande verkennende onderzoek zijn op een groot aantal locaties bij en rondom Schiphol gedurende een à twee maanden metingen van ultrafijn stof uitgevoerd ter toetsing van het rekenmodel. Er is destijds met verschillende soorten apparaten gemeten, van geavanceerde tot goedkopere handzame apparaten. De absolute waarden zijn naar elkaar vertaald op basis van vergelijkende metingen gedurende een dag. De bijdragen van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof op de betreffende locaties zijn uit metingen afgeleid en zijn vergeleken met de berekende bijdragen in die periode. De schalingsfactor (de factor tussen berekende PM_{10} en gemeten ultrafijn stof, waarmee de modelberekeningen zijn gekalibreerd) vertoonde aanzienlijke verschillen tussen locaties en gebruikte meetapparatuur. Op de meeste locaties waar met

geavanceerde apparatuur is gemeten lag de factor rond 400.000.[10] Maar er waren ook locaties en/of meetapparaten waar de factor rond 100.000 of 700.000 lag.[11]

In het huidige onderzoek is ter verdere toetsing van het rekenmodel de concentratie met hoogwaardige meetapparatuur van hetzelfde type gedurende langere tijd op een aantal locaties dicht bij en verder van Schiphol gemeten. Er is een meetcampagne van tweemaal een halfjaar uitgevoerd in de periode tussen augustus 2017 en augustus 2018. Op twee locaties is een jaar lang gemeten, op een locatie dicht bij Schiphol en een op grotere afstand waar (meer) mensen wonen. De andere vier beschikbare apparaten zijn na een halfjaar verplaatst naar andere locaties. Dit maakte het mogelijk om op tien locaties gedurende een halfjaar data te verzamelen waarmee het model kan worden getoetst. Door twee locaties gedurende de gehele meetperiode aan te houden, kan worden onderzocht in hoeverre de omstandigheden tijdens de meetperiode invloed hebben op de vergelijking. In totaal levert dit twaalf halfjaargemiddelde datapunten op voor de toetsing van het model.

Er is voor een deel gebruikgemaakt van bestaande luchtmeetstations die in opdracht van gemeente Amsterdam, provincie Noord-Holland en Havenbedrijf Amsterdam door GGD Amsterdam worden beheerd. Daarnaast zijn door TNO tijdelijke meetlocaties ingericht op particulier terrein in of nabij woonkernen. Het is relevant om het model daar te toetsen waar mensen wonen. Het model wordt immers voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling ingezet. Hoe verder van Schiphol af, hoe moeilijker het is om de bijdrage uit de metingen af te leiden. De bijdrage is op grotere afstanden van de bron namelijk lager en de kans op bijdragen vanuit andere bronnen uit dezelfde windrichting is groter. Daarom is ervoor gekozen om op locaties tot maximaal ongeveer 5 km afstand te meten. De locaties zijn bovendien zo gekozen dat ze deels in het verlengde en deels loodrecht op startbanen zijn gelegen. Op deze manier is er naar verwachting voldoende variatie tussen de meetpunten.

De locaties staan weergegeven in Figuur 8 en worden beschreven in Tabel 1.

Locatie Ookmeer is toegevoegd als representatieve locatie voor bewoners op enige afstand ten noordoosten van Schiphol.
Het meetpunt NH1 Polderbaan ligt bij wind uit het noordnoordwesten zeer dicht op en in lijn met startende vliegtuigen op de Polderbaan. Deze locatie is mede daardoor slechts beperkt representatief voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling.

[10] Het grote getal wordt veroorzaakt doordat het model heeft gerekend met emissiegegevens van de *massa* van fijn stof in µg/m^3 (omdat die van het *aantal* deeltjes niet bekend zijn) en de metingen worden uitgedrukt in het *aantal* deeltjes per cm^3.

[11] De factor in de vorige studie is geschat uit verhoudingen tussen gemeten en berekende bijdrage per locatie. Nadeel van individuele verhoudingen is dat de onzekerheid in de verhouding op locaties met lage bijdragen veel groter is dan die op locaties met hogere bijdragen. Het is op basis daarvan niet goed mogelijk om een uitspraak te doen over de prestatie van het rekenmodel voor toepassing in gezondheidsonderzoek. In de huidige studie wordt de schalingsfactor op een andere manier afgeleid en wordt het model getoetst met behulp van correlatieanalyse (zie hoofdstuk 5).

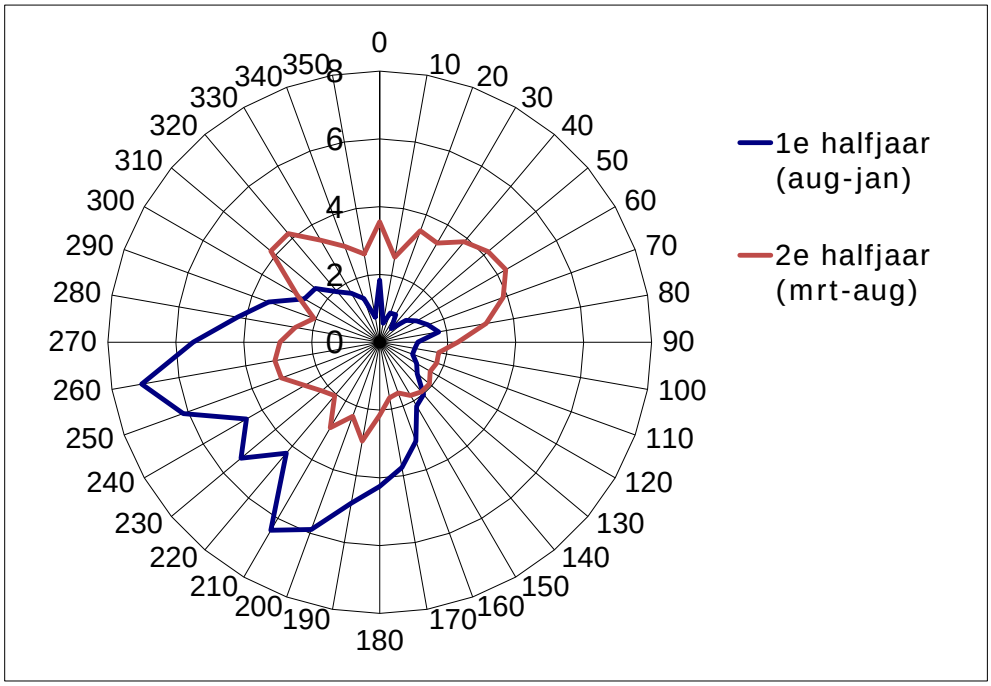
Op locatie Badhoevedorp is in het voorgaande onderzoek ook gemeten. In de tussentijd is rijksweg A9 verlegd naar een traject tussen Schiphol en het GGD-station in (op circa 600 m afstand van het GGD-station). Uit metingen van de deeltjesgrootteverdeling blijkt dat het verkeer op de A9 nauwelijks als verstorende bron optreedt (zie hoofdstuk 4). Omdat dit op voorhand niet zeker was, is ook op locatie Nieuwe Meer gemeten.

Figuur 8. Meetlocaties in de campagne voor de toetsing van het rekenmodel. Bron ondergrond: PDOK.

Tabel 1. Meetlocaties in de campagne voor de toetsing van het rekenmodel.

Locatie	*Omschrijving*	*Voorgaande onderzoek ook gemeten*	*Afstand (bij benadering) tot dichtstbijzijnde baan (m)*
1 Oude Meer	Provinciaal GGD-station Oude Meer-Aalsmeerderdijk	ja	1.300
2 Ookmeer	Gemeentelijk GGD-station Amsterdam-Ookmeer	nee	5.100
3 Amstelveen	Tijdelijke locatie in woonkern Amstelveen	ja	3.500
4 Aalsmeer	Tijdelijke locatie in woonkern Aalsmeer	in de buurt	3.200
5 Vijfhuizen	Tijdelijke locatie in woonkern Vijfhuizen	in de buurt	1.900
6 NH1 Polderbaan	Provinciaal GGD-station Hoofddorp-Hoofdweg	ja	400
7 Nieuwe Meer	Tijdelijke locatie dicht bij Schiphol (geen woonkern)	ja	500
8 Hoofddorp	Tijdelijke locatie in woonkern Hoofddorp	in de buurt, op kortere afstand	5.000
9 Spaarnwoude	Havenbedrijf GGD-station Spaarnwoude-Machineweg	ja	4.200
10 Badhoevedorp	Provinciaal GGD-station Badhoevedorp-Sloterweg	ja	1.500

De keuze voor welke locaties het eerste en welke locaties het tweede halfjaar zijn bemeten is dusdanig gemaakt dat er zo veel mogelijk spreiding is. Er is niet afgegaan op langjarige meteorologische omstandigheden. Achteraf blijkt dat beide halve jaren een heel ander windrichtingspatroon hadden, zoals is te zien in Figuur 9. Het eerste halfjaar kende weinig uren met wind uit noordelijke en oostelijke richting. Gedurende het tweede halfjaar was de windrichting gelijkmatiger verdeeld.



Figuur 9. De verdeling van opgetreden windrichting per windsector van 10 graden (in procenten); (0 = wind uit het noorden, 180 = wind uit het zuiden).

2.2 Rekenmodel

In grote lijnen is voor de toetsing van het rekenmodel de modelleeraanpak van het voorgaande verkennende onderzoek (Bezemer et al., 2015) gevolgd. Het rekenmodel Stacks+ is in Nederland een veelgebruikt rekenmodel voor vliegtuigen. Het is in het verleden ook toegepast voor luchtkwaliteitsberekeningen ten behoeve van verschillende m.e.r.-studies over zowel de luchthaven Schiphol als aan ander luchthavens (onder andere NLR, 2008; NLR, 2016). In Bijlage 2 wordt het rekenmodel in detail beschreven. In dit rapport belichten we enkel de hoofdlijnen, met uitzondering van het stuk over de emissies. Wegens de complexiteit van de benodigde keuzes voor de modellering wordt dit voor het begrip uitgebreider beschreven.

2.2.1 Verspreidingsmodel

Het rekenmodel Stacks+ is een Gaussisch pluimmodel en beschrijft de verspreiding van de emissies van vliegtuigen door de atmosfeer. Dit doet het model voor elk uur in de onderzochte periode. De periodegemiddelde bijdrage aan de concentratie is dan het gemiddelde van de bijdragen van alle uren in de betreffende periode. Vaak is dat een jaar, maar voor dit onderzoek tweemaal een halfjaar. De onzekerheden in de uurgemiddelde gemodelleerde bijdragen zijn gemakkelijk een factor 2 tot 3 groter dan de onzekerheden in de gemiddelde waarden over langere perioden.

Het model wordt toegepast onder de aanname dat ultrafijn stof zich binnen het studiegebied verspreidt als een inerte stof. Dat wil zeggen dat de stof zelf geen veranderingsprocessen ondergaat maar uitsluitend wordt verspreid door de atmosfeer. Het is echter bekend dat ook andere processen een rol spelen, waardoor deeltjes groter of kleiner worden, ontstaan of verdwijnen. Deze processen spelen zich vooral af direct na

de emissie. Het is de verwachting dat deze processen op wat grotere afstand van de emissiepunten nog maar een beperkte rol spelen en dat verdunning de dominante factor is voor de concentraties van ultrafijn stof.

Het model gebruikt als invoer:

- Feitelijke meteorologische gegevens afkomstig van de metingen van het KNMI op Schiphol (zie paragraaf 2.2.2);
- Feitelijke locatiegegevens van startende en landende vliegtuigen afkomstig van de FANOMOS-database van de Nederlandse Luchtverkeersleiding (LVNL), aangeleverd door het NLR (zie paragraaf 2.2.3). De gegevens over taxiënde vliegtuigen zijn afgeleid uit bovenstaande gegevens;
- Generieke emissiekentallen (zie paragraaf 2.2.4).

Het model rekent met een gemiddelde lengte van het starttraject van 2.000 m, bij starten een stijgingspercentage van 9% en bij landen een dalingspercentage van 4%. De vliegtuigen worden over een afstand van 12,5 km in een rechte lijn (zonder bochten) door de lucht gevolgd, wat bij een helling van 9% neerkomt op ruim 1.100 m hoogte en bij 4% op 500 m hoogte. In het toegepaste rekenmodel bereiken deeltjes of gassen die rond 500 m of hoger worden uitgestoten niet tot nauwelijks de grond. De stoffen worden namelijk sterk verdund door verspreiding in de atmosfeer. Bovendien vinden de emissies in het rekenmodel meer dan de helft van de tijd boven de zogenaamde menglaag[12] van de atmosfeer plaats, waardoor ze niet terechtkomen in de onderste luchtlaag. Er zijn redenen om te veronderstellen dat er bij klimmende en naderende vliegtuigen sprake kan zijn van een dalende beweging van de uitgestoten stoffen (zie uitleg in paragraaf 6.2.3). Deze processen zijn niet als fysische processen ingebouwd in het rekenmodel. Door de modelresultaten voor de langdurige blootstelling te kalibreren met metingen, zullen de effecten ervan wel (deels) effectief worden meegenomen.

2.2.2 Meteorologische meetgegevens

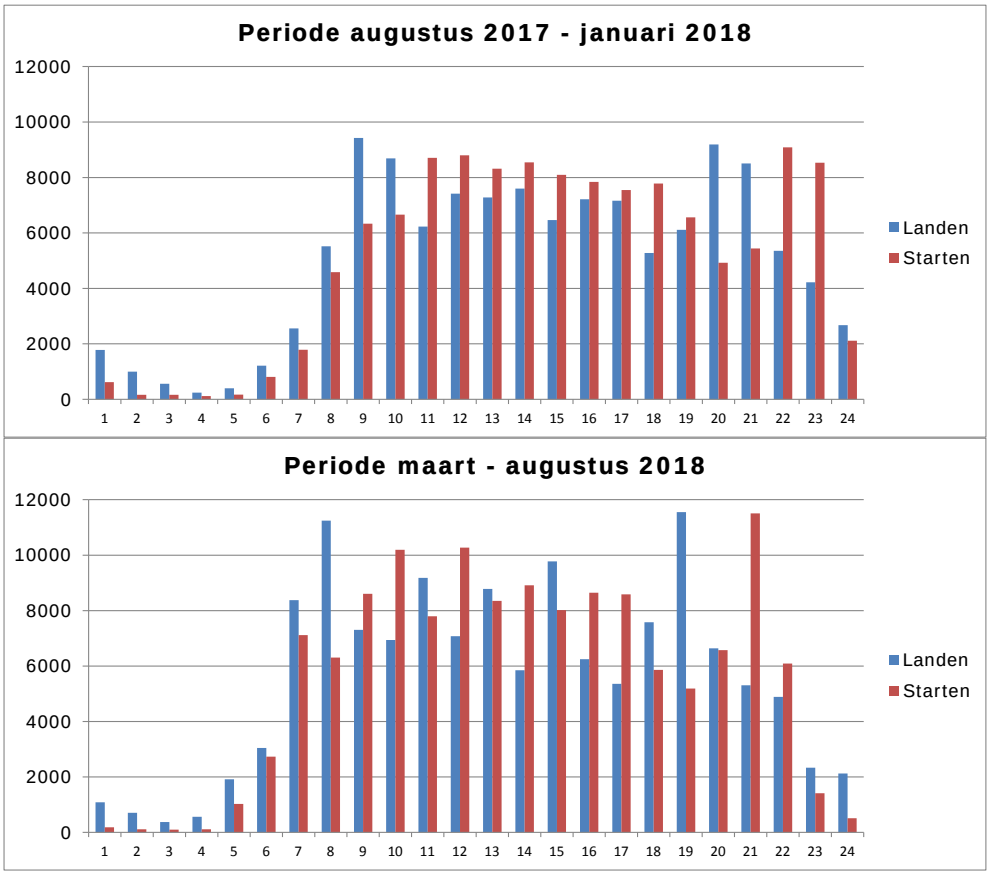
Het rekenmodel is niet goed toepasbaar voor situaties met lage windsnelheden. Voor uren met een windsnelheid lager dan 1,5 m/s zijn daarom geen berekeningen uitgevoerd. Bij de bepaling van de halfjaargemiddelde bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof zijn deze uren in zowel de berekening als de meting weggelaten.

De verdeling van de windrichting is voor beide halve jaren waarin is gemeten weergegeven in Figuur 9. Het eerste halfjaar kende zeer weinig uren met wind uit het noorden en oosten. In het tweede halfjaar was de windrichting gelijkmatiger verdeeld.
Het tweede halfjaar was in vergelijking met het eerste halfjaar warmer en droger. In de periode mei t/m juli is er nauwelijks neerslag gevallen.

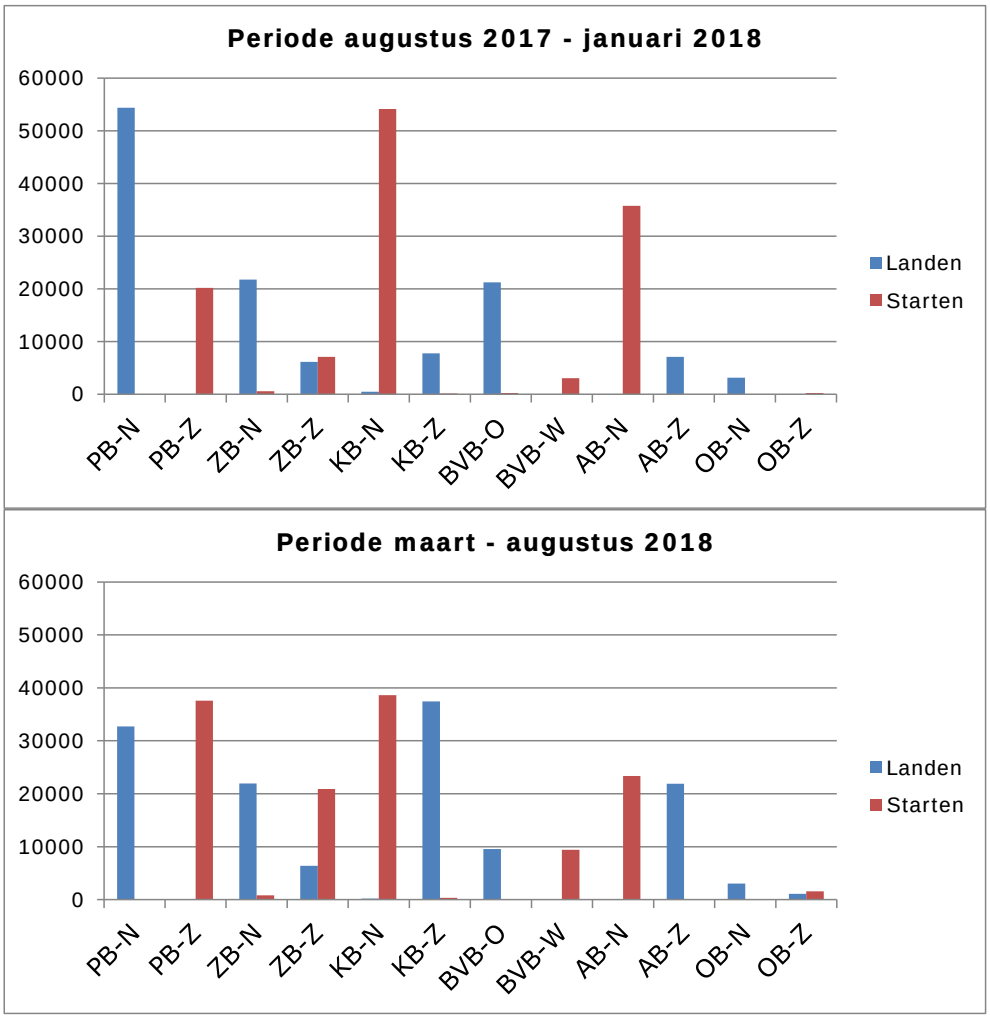
[12] De menglaag is de onderste laag van de atmosfeer. Tussen de menglaag en de vrije atmosfeer erboven vindt weinig uitwisseling plaats. De hoogte van de menglaag hangt af van onder meer het seizoen, tijd van de dag en de weersomstandigheden (50-2000 m). Stoffen die in de menglaag worden uitgestoten, verspreiden zich in binnen deze laag. Stoffen die op grotere hoogte worden uitgestoten blijven boven de menglaag.

2.2.3 *Vliegtuigbewegingen*

Voor de toetsing van het model zijn voor elk uur in de meetreeks feitelijke aantallen vliegtuigen en het feitelijke gebruik van banen beschikbaar uit de FANOMOS-database. De gemiddelde verdeling van startende en landende vliegtuigen over de dag is voor beide halve jaren waarin is gemeten weergegeven in Figuur 10. Het totaal aantal startende en landende vliegtuigen per baan in beide perioden staat in Figuur 11.



Figuur 10. Gemiddelde verdeling van aantal starts en landingen over de dag. Boven: 1e halfjaar, onder: 2e halfjaar.



Figuur 11. Aantallen starts en landingen verdeeld over de banen. Boven: 1e halfjaar, onder: 2e halfjaar.
PB: Polderbaan, ZB: Zwanenburgbaan, KB: Kaagbaan, BVB: Buitenveldertbaan, AB: Aalsmeerbaan, OB: Oostbaan. De baankop is gegeven door N-Z-O-W.

Een duidelijk verschil tussen beide perioden is het relatief grote aantal landende vliegtuigen op de Kaagbaan en Aalsmeerbaan en startende vliegtuigen op de Polderbaan en Zwanenburgbaan in het 2e halfjaar. In die periode kwam de wind veel vaker uit noordelijke/oostelijke richting, zie Figuur 9.

2.2.4 *Emissies*

De emissies worden in het rekenmodel bepaald uit verschillende invoergegevens, grotendeels beschikbaar gesteld door het NLR. In formulevorm is de emissie van een bepaald vliegtuig in een bepaald gebied:

$$Emissie\ (in\ kg) = Emissiefactor\ (in\ kg\ per\ kg\ brandstof) * brandstofverbruik\ (in\ kg\ brandstof\ per\ tijdseenheid) * tijdsduur\ (in\ tijdseenheid)$$

Bovenstaande formule is voor emissies van stoffen die in massa (kg) worden uitgedrukt, zoals NO_X of fijn stof. Voor ultrafijn stof zou er 'aantallen deeltjes' in plaats van kg staan.

Voor luchthavenstudies, waaronder de m.e.r.-studies, levert het NLR gegevens aan over brandstofverbruik en emissiefactoren voor de verschillende vluchtfasen (taxiën, starten, klimmen, naderen, landen). Deze gegevens zijn gebaseerd op metingen aan vliegtuigmotoren (in het kader van het certificatieproces). Ook dit onderzoek maakt gebruik van de emissiegegevens van het NLR. Echter, het NLR beschikt niet over emissiefactoren voor ultrafijn stof. Net als in 2015 is het daarom niet mogelijk om direct te rekenen met emissiefactoren van ultrafijn stof voor de verschillende vluchtfasen van de vliegtuigen.[13] Als oplossing zijn de emissiefactoren voor andere indicatorstoffen gebruikt. In het voorgaande verkennende onderzoek is fijn stof (massa PM_{10}) als indicatorstof gebruikt. Maar het is goed mogelijk dat voor andere indicatorstoffen dan PM_{10} de verhoudingen in emissiefactoren tussen de verschillende vluchtfasen meer representatief zijn voor ultrafijn stof. Ultrafijn stof is in gewicht namelijk maar een heel kleine fractie van PM_{10}. Daarom is in het huidige onderzoek ook naar andere indicatoren gekeken. De indicatoren zijn:

- PM_{10}: door NLR bepaald uit metingen van zwarte rook. Zwarte rook (of 'smoke numbers') wordt voor elke motor in het ICAO certificatieproces gemeten. Op basis van experimenten is er een correlatie gemaakt tussen gemeten PM_{10}-concentraties in de uitlaatgassen, de brandstof- luchtverhouding (tijdens de verschillende vluchtfasen) en gemeten zwarte rook (Wayson, 2005).
  Op basis van deze correlaties heeft Eurocontrol een methodiek gemaakt met daarin correcties voor totale temperaturen en drukken in de verbrandingskamer als gevolg van vliegsnelheid- en hoogte (Kugele et al., 2005);
- PM_X: dit is ook massa PM_{10} maar dan door het NLR op een andere manier bepaald. Op basis van experimenten is er een correlatie gelegd tussen de temperaturen en drukken in de motor en PM_{10}, waarbij wordt gebruikgemaakt van enkele ontwerpgegevens van de motor (Stettler et al., 2013);
- NO_X: de emissiefactoren zijn gebaseerd op directe metingen van emissies van NO_X gedurende het ICAO-certificatieproces van vliegtuigmotoren;
- Brandstof: daarbij hebben alle vluchtfasen dezelfde eenheidsemissiefactor, namelijk 1 kg emissie per gebruikte kg brandstof. Dit is aangeduid als indicator 'brandstof' omdat het lineair is met het brandstofverbruik.

De emissiefactoren van fijn stof voor de verschillende vluchtfasen kunnen op meerdere manieren worden afgeleid. Van deze manieren is bekend dat ze alle een beperkte nauwkeurigheid hebben. Daardoor

[13] Het kan zijn dat in andere studies toch wordt gebruikgemaakt van emissiefactoren voor ultrafijn stof afgeleid uit metingen aan de uitlaat van vliegtuigmotoren. Opgemerkt wordt dat de metingen in de uitlaat niet representatief zijn voor de aantallen deeltjes na emissie in de buitenlucht. Direct na emissie ontstaat namelijk een groot aantal zeer kleine deeltjes door afkoeling van vluchtige bestanddelen en condensatie.

kennen ze onderling ook vrij grote verschillen.[14] Omdat de bijdrage van vliegtuigen aan de concentratie van PM_{10} zeer klein is, hebben deze verschillen weinig invloed op de concentratie van PM_{10} zelf. In het huidige onderzoek gaat het echter om het toepassen als schatter voor ultrafijn stof. Dan maken de verschillen wel uit.

De emissiefactoren en het brandstofverbruik voor de zeven meest voorkomende vliegtuigtypen zijn gewogen gemiddeld om te dienen als representatieve emissies voor de vloot op Schiphol (zie Bijlage 2). Deze emissies vormen vervolgens invoer voor het rekenmodel Stacks+. De met Stacks+ berekende bijdragen van vliegverkeer aan de concentratie van deze stoffen worden met een schalingsfactor gekalibreerd en zo vertaald naar berekende bijdragen aan de concentratie van ultrafijn stof.

Er wordt gekeken voor welke indicator de schalingsfactor met de minste onzekerheid kan worden afgeleid. Het lastige daaraan is dat de schalingsfactor waarschijnlijk afhangt van de vluchtfase. In feite wordt niet naar één schalingsfactor gezocht, maar naar vijf verschillende: a t/m e in onderstaande vergelijkingen voor de emissiefactor (EF) met NO_x als voorbeeldindicator. UFP staat voor ultrafijn stof (in het Engels: Ultra Fine Particles, UFP).

$$EF_{UFP}(taxiën) = a * EF_{NOx}(taxiën)$$
$$EF_{UFP}(starten) = b * EF_{NOx}(starten)$$
$$EF_{UFP}(klimmen) = c * EF_{NOx}(klimmen)$$
$$EF_{UFP}(naderen) = d * EF_{NOx}(naderen)$$
$$EF_{UFP}(landen) = e * EF_{NOx}(landen)$$

Het afleiden van deze afzonderlijke schalingsfactoren gaat de doelstelling van het huidige onderzoek te boven. Wel is onderzocht of het mogelijk is om uit de meetcampagne naar taxiënde vliegtuigen een aparte schalingsfactor af te leiden en om uit de andere metingen vluchtfasen apart te beschouwen. Op basis van de resultaten van deze analyses (zie hoofdstuk 6) is besloten om net als bij de verkennende studie uit 2015 één schalingsfactor over de totale bijdrage van alle vluchtfasen te hanteren. In formulevorm voor gebruik van NO_X als indicator voor de emissies is dat:

$$EF_{UFP}(luchtvaart) = f * EF_{NOx}(gewogen\ over\ alle\ vluchtfasen)$$

Ten slotte is er ook gerekend met indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof afgeleid uit een meetcampagne op/nabij een vliegveld in Australië, ongeveer tien jaar geleden (Mazaheri et al., 2009). In deze campagne zijn op enige afstand van vliegtuigen onder praktijkomstandigheden metingen uitgevoerd met een apparaat met dezelfde ondergrens als de apparatuur uit het huidige onderzoek. In de meetcampagne zijn ook metingen van CO_2 uitgevoerd, op basis waarvan de emissiefactoren zijn afgeleid (Johnson et al., 2008).

[14] In de nabije toekomst komt er een meer robuust model beschikbaar voor de schatting van PM_{10} op basis van ICAO-motorcertificatiegegevens. Zo ver was het ten tijde van dit onderzoek nog niet.

Bij het afleiden van de indicatieve emissiefactoren voor dit onderzoek zijn enkele aannamen gedaan:

- De studie levert geen aparte emissiefactoren voor naderende en klimmende vliegtuigen. Voor naderende vliegtuigen zijn die van landende vliegtuigen aangenomen, voor klimmende die voor startende.
- Het uitgangspunt is dat de in 2008 in Australië bemeten vliegtuigen representatief zijn voor de vloot op Schiphol. Het is echter bekend dat nog maar een beperkt aantal type vliegtuigen dat tegenwoordig op Schiphol vliegt is bemeten. Daarmee is het onzeker in hoeverre de bemeten vliegtuigen als representatief zijn te beschouwen.

Mede hierom zijn de geschatte emissiecijfers afgerond op slechts één significant getal (geen cijfers achter de komma) om niet de schijn van grote nauwkeurigheid te wekken. De op deze manier uit Mazaheri et al. (2009) afgeleide emissiefactoren staan in Tabel 2. De verhoudingen tussen de emissies (in aantal deeltjes per kg brandstof) van respectievelijk taxiën, landen en starten zijn 3:4:5. Voor de indicatoren NO_X en fijn stof zijn de verschillen tussen deze vluchtfasen veel groter. De indicatieve emissies van ultrafijn stof correleren dus meer lineair met het brandstofverbruik dan de emissies van NO_X of fijn stof.

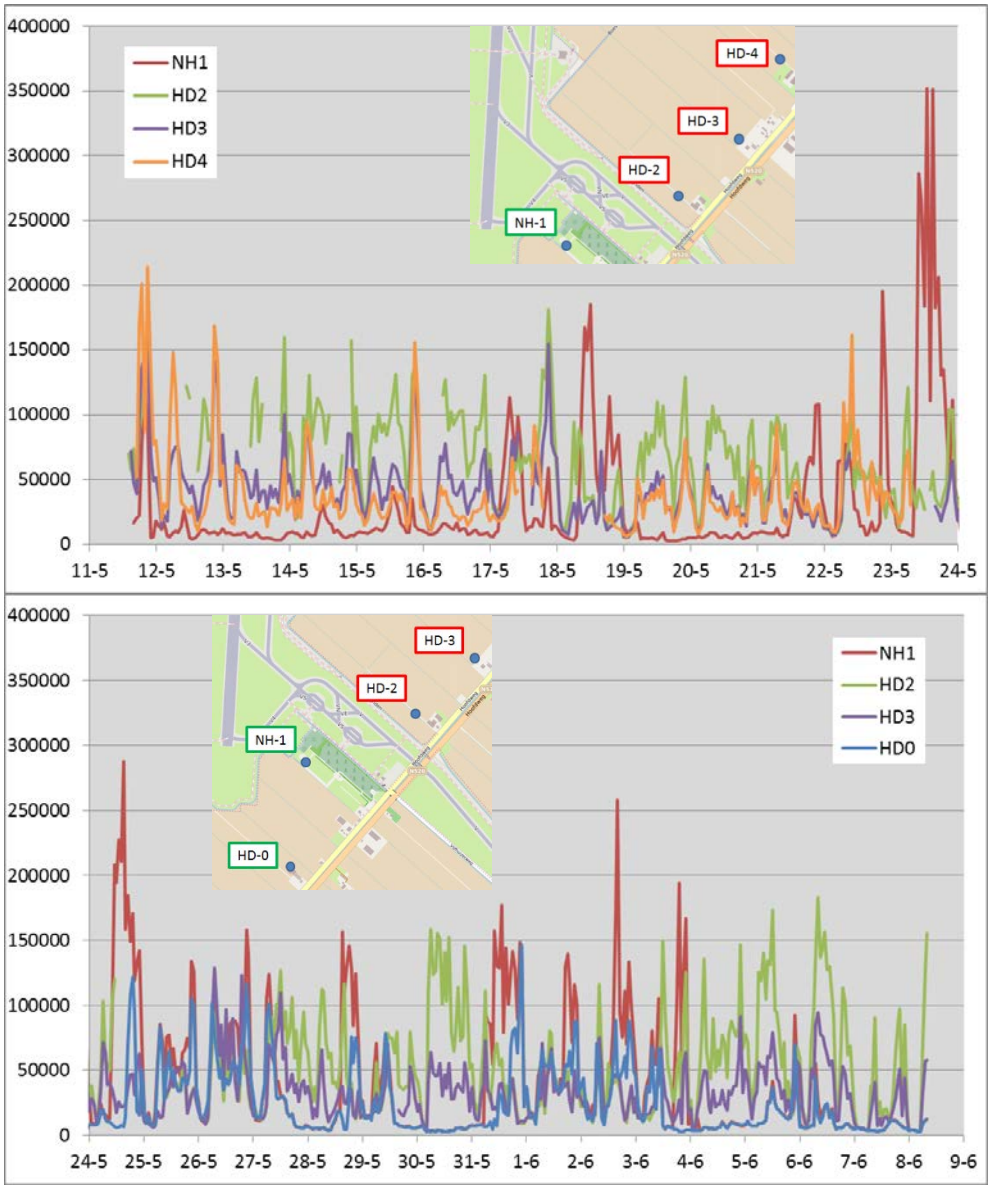
Tabel 2. Indicatieve emissiefactor van ultrafijn stof afgeleid uit Mazaheri et al. (2009).

Vluchtfase	*Emissiefactor in aantal deeltjes per kg brandstof*	*Met brandstofverbruik afgeleide emissiefactor in aantal deeltjes per seconde (zie Bijlage 2)*
Taxiën	$3*10^{16}$	$7*10^{15}$
Starten	$5*10^{16}$	$1*10^{17}$
Klimmen	$5*10^{16}$	$1*10^{17}$
Naderen	$4*10^{16}$	$3*10^{15}$
Landen	$4*10^{16}$	$1*10^{16}$

De toegepaste emissiefactoren liggen in de buurt van emissiefactoren zoals gebruikt in berekeningen in de studie van Winther et al. (2015). In deze studie zijn gemiddelde waarden geschat uit een inventarisatie van emissiefactoren zoals bepaald in studies als die van Mazaheri et al. (2009).

3 Resultaten meetcampagne taxiënde vliegtuigen

De tijdseries van de metingen van ultrafijn stof op de vijf locaties van de campagne naar taxiënde vliegtuigen, staan in Figuur 12. Na twee weken is het meetapparaat van locatie HD4 naar HD0 verplaatst. De eerste twee weken kwam de wind veel uit zuidwestelijke richting, de laatste twee weken (al beginnend op 21 mei) was de wind op meer dagen noordelijk.



Figuur 12. Tijdserie van de uurgemiddelde gemeten concentratie ultrafijn stof (in aantallen/cm^3). Boven: de eerste twee weken van de meetcampagne; onder: de laatste twee weken.

Uit de tijdseries kan het volgende worden afgeleid:

- De absolute concentratie van ultrafijn stof varieert op alle locaties sterk in de tijd. Dit hangt vaak samen met het moment op de dag en de windrichting;
- De laagste concentraties zijn gemeten op HD0 en NH1 bij zuidwestelijke wind. De locaties zijn dan niet door vliegverkeer of andere lokale bronnen belast;
- De hoogste concentraties zijn gemeten op NH1 bij noordwestelijke wind. Dit komt met name door emissies van vliegtuigen die starten op de Polderbaan;
- Aan de noordkant van de taxibaan is de gemeten piekconcentratie het hoogst op HD2. Dat is bij wind uit de richting van de taxibaan. Deze locatie ligt het dichtst bij de taxibaan en Polderbaan;
- Door de grotere afstand is de concentratie op HD3 en HD4 bij wind uit de richting van de taxibaan en Polderbaan lager dan op HD2. Voor beide locaties geldt overigens dat de hoogste concentraties gemeten zijn bij zuidoostenwind. Er is dan invloed te verwachten van de rijksweg A5 en van andere banen van Schiphol;
- Aan de zuidkant van de taxibaan is de gemeten concentratie op HD0 lager dan op NH1. HD0 ligt op grotere afstand van de taxibaan en Polderbaan.

Bovenstaande geeft enkele algemene indrukken. Voor het onderzoek naar taxiënde vliegtuigen wordt nu ingezoomd op de meetgegevens op uren waarop de wind specifiek afkomstig is uit de richting van de taxibaan en er daadwerkelijk taxibewegingen plaatsvonden. Er wordt een kleine windsector van 30 graden gehanteerd om beïnvloeding door andere bronnen (zoals startende vliegtuigen) te voorkomen. Bij 30-60 graden (noordoostelijke wind) zijn HD0 en NH1 belast door taxiënde vliegtuigen en doet HD2 dienst als 'onbelaste' locatie. Bij 210-240 graden (zuidwestelijke wind) zijn HD2, 3 en 4 belast door taxiënde vliegtuigen en doet NH1 dienst als 'onbelaste' locatie. De gemiddelde bijdrage van taxiënde vliegtuigen in de meetperiode wordt bepaald door de gemiddelde concentratie van ultrafijn stof op de onbelaste locaties af te trekken van de gemiddelde concentratie op de belaste locatie.
De gemiddelde gemeten bijdrage wordt in Figuur 13 als functie van de afstand tot de taxibaan getoond. De afstand is een benadering van de afstand tussen de meetlocatie en de taxibaan volgens de loodrechte lijn op de taxibaan. Wegens het beperkte aantal bruikbare uren gedurende de meetcampagne zijn de onzekerheden in de gemeten bijdragen van de vliegtuigen aanzienlijk.

Uit deze figuur wordt het volgende afgeleid:

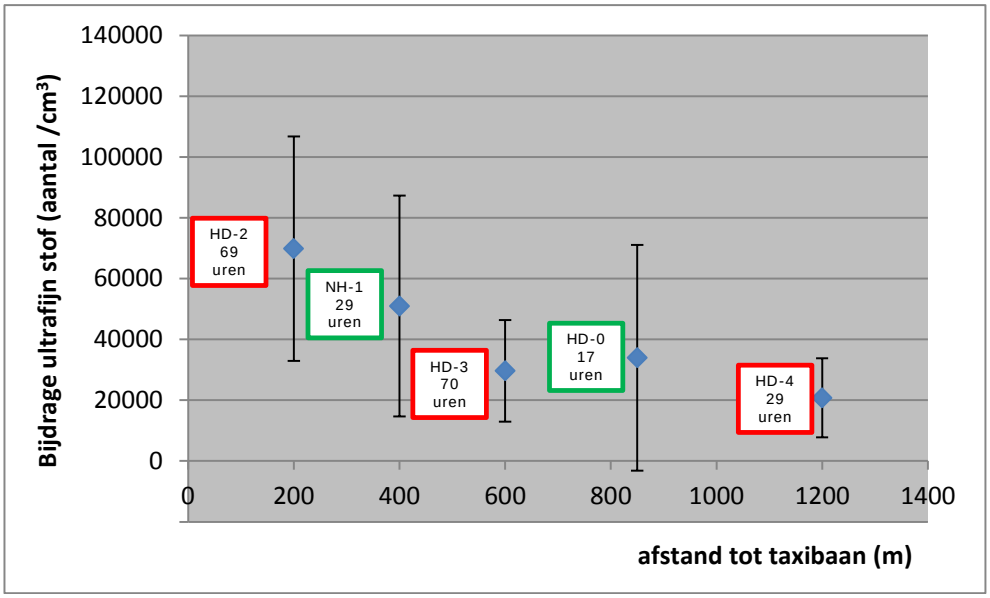
- De bijdrage van taxiënde vliegtuigen aan de concentratie van ultrafijn stof neemt snel met de afstand af;[15]
- De gemiddelde bijdrage aan de concentratie op het verst gelegen meetpunt op 1.200 m op momenten dat de locatie is belast, bedraagt ongeveer 20.000 deeltjes/cm^3. Dat is aanzienlijk groter

[15] De bijdrage van lokale bronnen neemt af met de afstand door verdunning van de emissies in de atmosfeer.

dan de gemiddelde achtergrondconcentratie op diezelfde momenten (10.000 deeltjes/cm^3).

Geconcludeerd wordt dat beïnvloeding van de concentratie van ultrafijn stof op woonlocaties nabij Schiphol door taxiënde vliegtuigen op basis van de metingen waarschijnlijk is.

Op basis van de meetresultaten gedurende de campagne is besloten om taxiënde vliegtuigen als aparte bron in het rekenmodel mee te nemen. Dit besluit wordt nader onderbouwd door studies die duidelijk maken dat de emissiefactoren en berekende bijdragen voor taxiënde vliegtuigen in vergelijking met andere vluchtfasen aanzienlijk zijn (Mazaheri et al., 2009; Winther et al., 2015). Meer informatie over de berekende bijdrage van taxiënde vliegtuigen is te vinden in paragrafen 6.2.1 en 6.2.2.



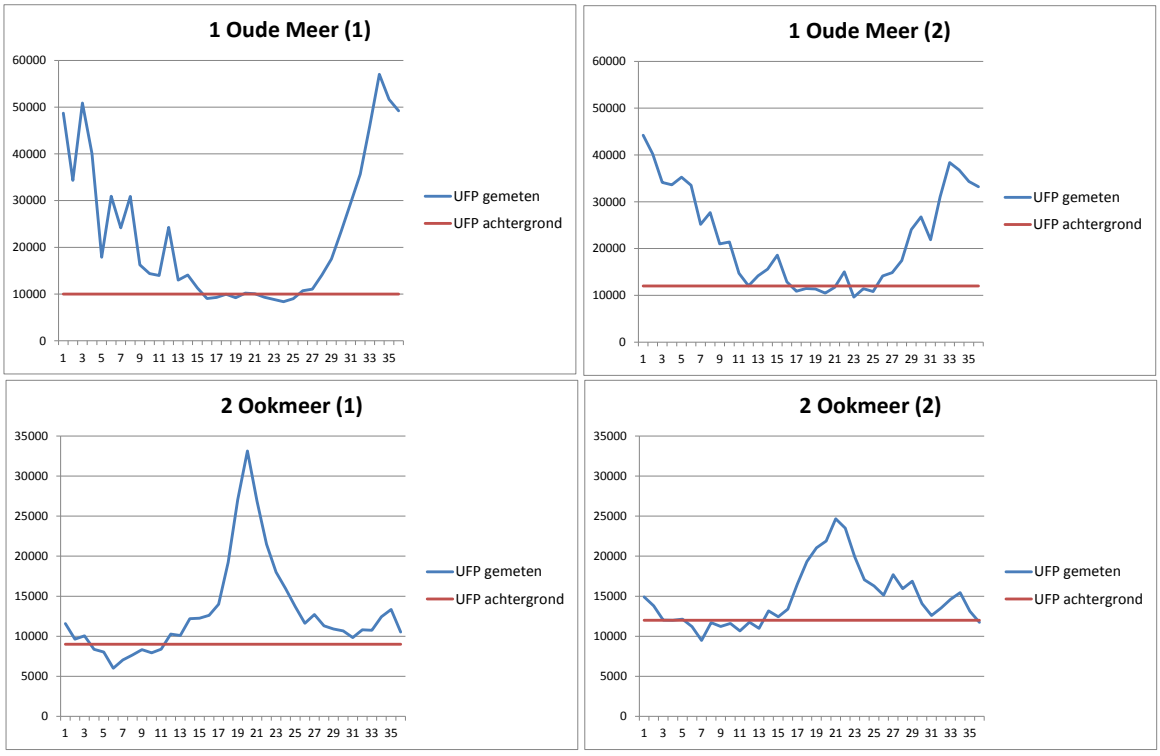
Figuur 13. Gemiddeld gemeten bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof (in aantallen/cm^3) van taxiënde vliegtuigen op uren met wind uit de richting van de taxibaan, als functie van de afstand tot de taxibaan (bij benadering, in m). De zogenoemde 'foutenbalk' geeft de standaarddeviatie weer, een maat voor de spreiding van uurlijkse waarden rondom het gemiddelde.

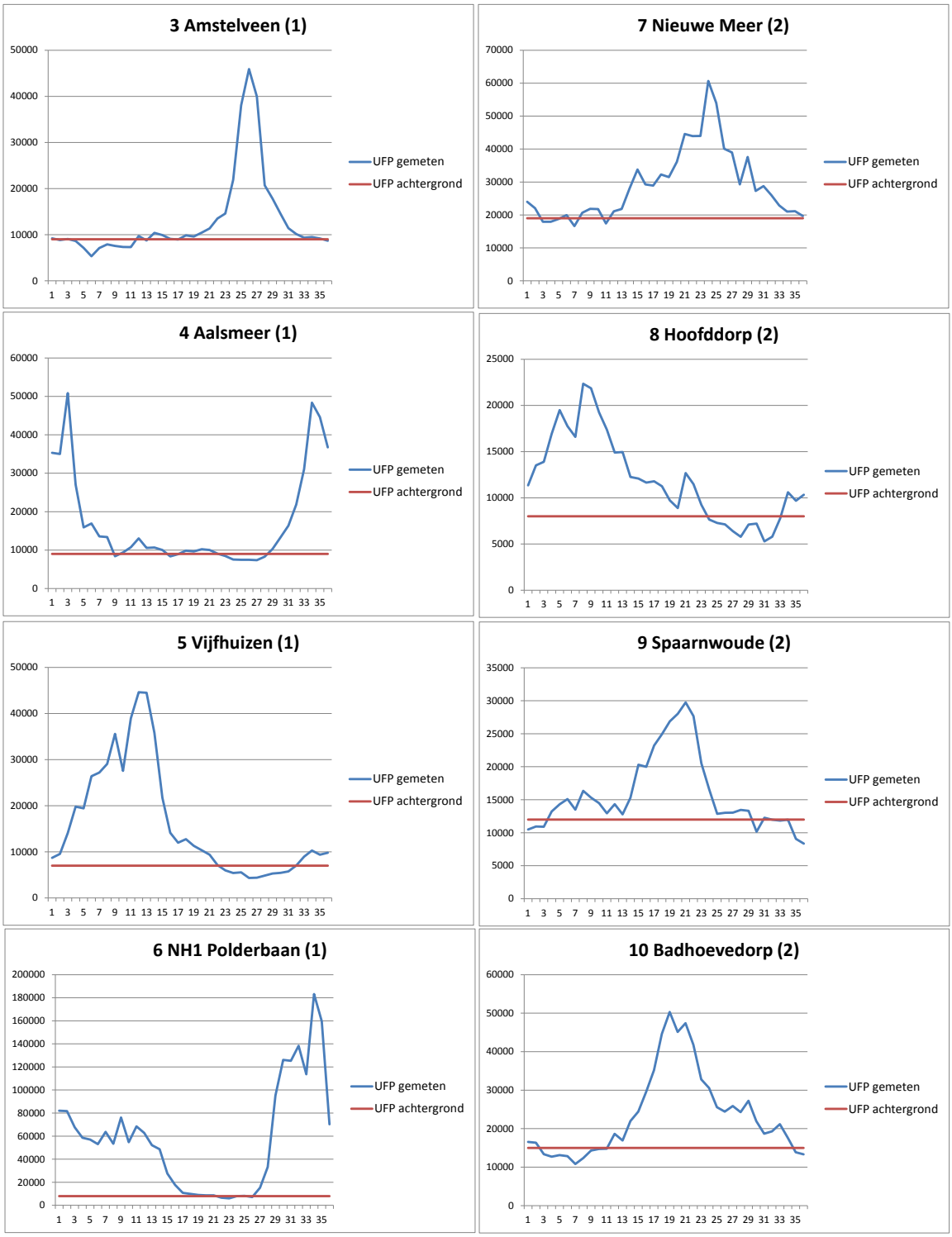
4 Resultaten meetcampagne rondom Schiphol

4.1 Windrozen en schatting ‘achtergrond’-concentratie

De windrichtingsafhankelijkheid van de rondom Schiphol gemeten concentraties is weergegeven in Figuur 14. In deze figuren zijn voor elke windsector van 10 graden de gemeten concentraties tijdens uren met een windrichting in de bewuste sector gemiddeld. In dit rapport worden deze figuren ook wel ‘windrozen’ genoemd. Ze worden niet als echte ‘rozen’ in een radargrafiek gepresenteerd, maar als x,y-grafiek. Dat is gedaan om de vergelijking tussen meting en berekening inzichtelijker te maken. De rode lijn geeft de schatting van de ‘achtergrond’-concentratie van alle locaties (zie uitleg hierna). De schalen van de y-as zijn voor elke locatie aangepast aan de gemeten niveaus. Op die manier kan het best de schatting van de ‘achtergrond’-concentratie worden uitgevoerd.

Op alle locaties zijn één of meer duidelijke verhogingen zichtbaar bij wind uit de richting van Schiphol en de vliegroutes. De patronen in de windrozen komen overeen met de patronen uit het voorgaande verkennende onderzoek. De huidige meetresultaten bevestigen het beeld dat de metingen uit het voorgaande verkennende onderzoek gaven, namelijk dat het vliegverkeer voor lokale verhogingen in de concentratie van ultrafijn stof zorgt.





Figuur 14. Windrozen van de gemiddeld per windsector van 10 graden gemeten concentratie van ultrafijn stof (in aantal deeltjes per cm^3) en de schatting van de 'achtergrond'-concentratie. Op de x-as de windsectoren (1 = 0-10 graden, 2 = 10-20 graden etc; 0 graden = noordenwind, 90 = oostenwind, 180 = zuidenwind, 270 = westenwind, 360 = noordenwind).
Titel: nr en naam van de meetlocatie (periode).
NB: de schalen op de y-as verschillen per locatie.

De gemeten concentraties van ultrafijn stof op de tien locaties rondom Schiphol zijn opgebouwd uit de volgende bijdragen:

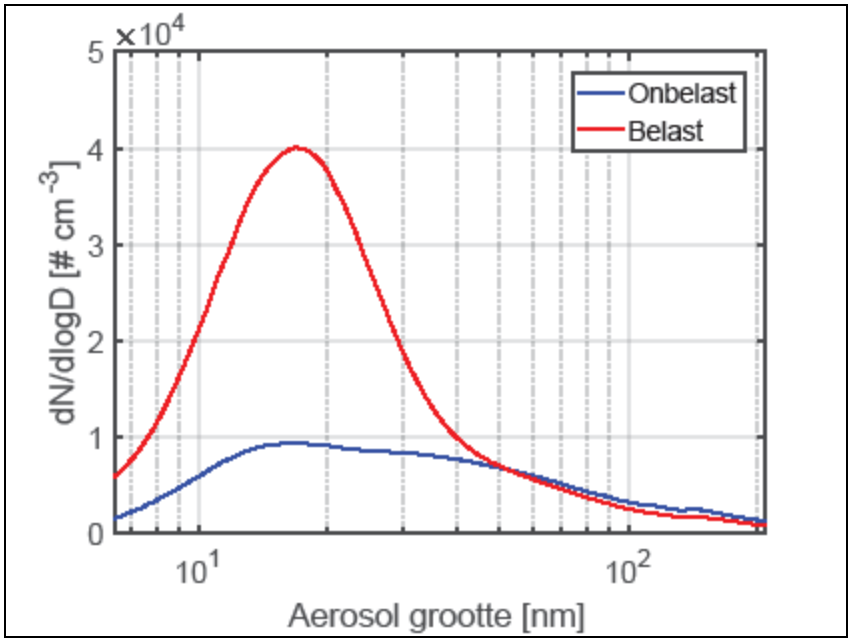
- Regionale achtergrondconcentratie (geldig voor een groter gebied als gevolg van bronnen op grotere afstand);
- Bijdrage van vliegverkeer op Schiphol;
- Bijdrage van andere lokale bronnen, zoals wegverkeer.

Voor de toetsing van het rekenmodel is het nodig om de bijdrage van het vliegverkeer op Schiphol uit de metingen af te leiden: welk deel van de gemeten concentratie wordt veroorzaakt door emissies van vliegtuigen? Het is gebruikelijk om de bijdrage door de vliegtuigen af te leiden uit de concentratie gemeten op een belaste locatie en de concentratie gemeten op een onbelaste locatie (de achtergrondconcentratie). Voor individuele uren waarbij de meetlocatie is belast uit de richting van Schiphol, zou de achtergrondconcentratie kunnen worden beschouwd als de concentratie gemeten op een locatie aan de overzijde en direct grenzend aan het brongebied. Dan is de bijdrage het verschil tussen de gemeten concentraties op de beneden- en bovenwindse locatie. Echter, dat werkt alleen als de niet door Schiphol belaste locatie ook niet wordt belast door andere lokale bronnen en ook de afstanden tussen de locaties niet al te groot zijn. Dat gaat in het gebied rond Schiphol en voor de meetlocaties in dit onderzoek niet op.

Daarom is gebruikgemaakt van expert judgement, gebaseerd op de windroosfiguren. Per locatie is een schatting gemaakt van de gemiddelde ‘achtergrond’-concentratie geldig voor de *gehele* meetperiode. Dat is op zicht gedaan, met behulp van de windrozen (zie Figuur 14.) Een belangrijke aanname is dat de gemeten verhogingen van de concentratie van ultrafijn stof bij wind uit de richtingen van Schiphol grotendeels het gevolg zijn van de vliegtuigemissies. Dit wordt onderbouwd door de resultaten van de metingen van de deeltjesgrootteverdelingen. Deze zijn roulerend voor kortere perioden op de meeste locaties uitgevoerd. Op sommige locaties waren metingen uit het voorgaande verkennende onderzoek (Bezemer et al., 2015) beschikbaar. De meetresultaten van de deeltjesgrootteverdelingen worden besproken in Bijlage 1. Als voorbeeld staat de gemeten deeltjesgrootteverdeling bij wind uit de richting van Schiphol en uit andere richtingen op locatie 10 (Badhoevedorp) in Figuur 15.

Uit de metingen van de deeltjesgrootteverdeling met behulp van het roulerende SMPS-apparaat blijkt dat 1) op alle locaties en onder alle omstandigheden deeltjes met een kleine grootte (10 tot 20 nm, soms kleiner dan 10 nm) het meest talrijk zijn en 2) op alle locaties het overgrote deel van de *verhoging* in de concentratie van ultrafijn stof wordt veroorzaakt door deeltjes van 10-30 nm grootte. Het is bekend dat deeltjes met deze afmeting in de nabijheid van luchthavens grotendeels afkomstig zijn van vliegtuigemissies (Stacey, 2019). Deeltjes uit wegverkeer zijn lokaal vaak het talrijkst bij een grootte van 30-50 nm. Ook deeltjes als gevolg van vliegtuigemissies dragen in de grootteklasse 30-50 nm bij. Er is in die grootteklasse dus sprake van deeltjes van beide bronnen. Bij 10-30 nm is deze overlap veel minder: in deze grootteklasse is – in nabijheid van vliegtuigen – het overgrote deel van de deeltjes afkomstig uit vliegtuigemissies. Bij meetpunt 10

Badhoevedorp ligt de (verlegde) rijksweg A9 in dezelfde richting als Schiphol op ongeveer 550 m afstand. Uit Figuur 15, dat de verdeling van de deeltjesgroottes toont, valt af te leiden dat er geen duidelijke bijdrage van de A9 is gemeten. Als de A9 namelijk significant had bijgedragen aan de concentratie, had er ten opzichte van de meting uit andere windrichtingen een verhoging in het gebied rond 50 nm zichtbaar moeten zijn. Dat is niet het geval. Het kan ook zo zijn dat de provinciale weg die op zeer korte afstand (<30 m) aan de andere kant van de meetlocatie ligt, ongeveer in gelijke mate bijdraagt als de rijksweg. In dat geval compenseren de bijdragen elkaar.



Figuur 15. Deeltjesgrootteverdeling gemeten op locatie 10 Badhoevedorp. Op de y-as staat het aantal deeltjes per grootte-bin, op de x-as de grootte van het deeltje op een logschaal (van 7 tot 200 nm). Belast: bij wind uit de richting van Schiphol, onbelast: bij wind uit andere richtingen.

De op deze manier geschatte ‘achtergrond’-concentratie is onzeker. De onzekerheid is dat de ‘achtergrond’-concentratie bij wind uit de richting van Schiphol anders kan zijn dan de concentratie gemeten bij andere windrichtingen. Dit komt bijvoorbeeld door lokale bronnen (wegverkeer, bebouwd gebied) of door verder weg gelegen bronnen. Zo geeft wind over land over het algemeen hogere achtergrondconcentraties dan wind over zee. Er is hier in enige mate rekening mee gehouden door de concentraties eerder iets naar boven of naar beneden bij te stellen. Maar dat neemt de onzekerheid niet weg.
Gepoogd is om de ‘achtergrond’-concentratie (de concentratie zonder de bijdrage van vliegverkeer, maar met bijdragen van andere bronnen) per locatie ook af te leiden met behulp van orthogonale regressie van de individuele uurgemiddelde gemeten concentraties en de berekende bijdragen van vliegverkeer aan de concentraties. Het idee daarbij is dat het intercept op de as van de metingen een schatting geeft van de gemiddelde ‘achtergrond’-concentratie over de meetperiode. De

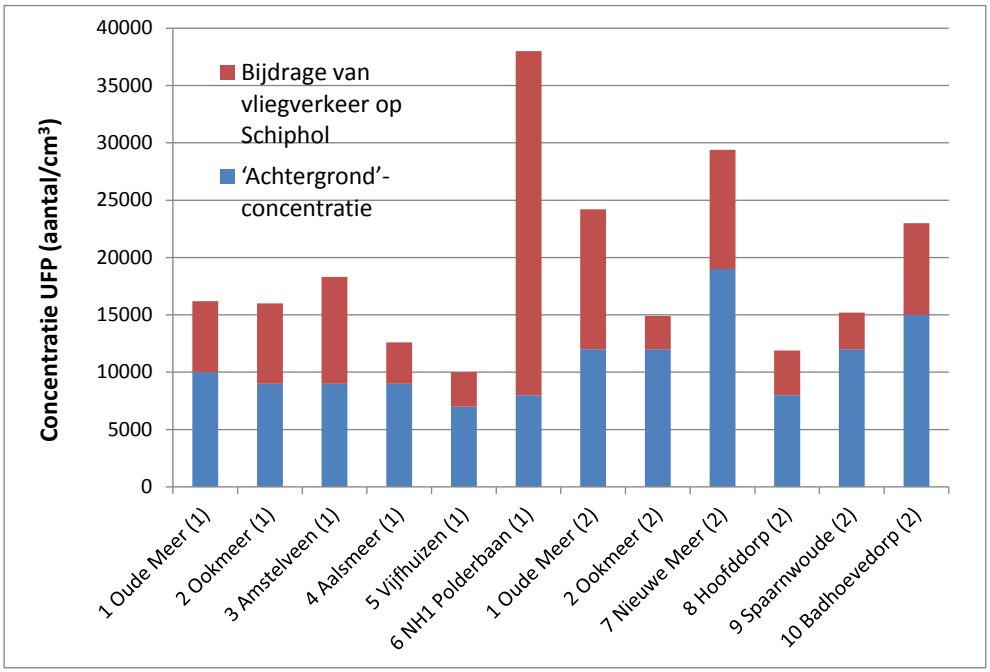
berekende uurwaarden hebben een relatief grote onzekerheid.[16] Ook de uurgemiddelde meetwaarden zijn – in mindere mate – onzeker. De resultaten van deze analyse bleken niet bruikbaar. De intercepten lagen ver uiteen en soms onrealistisch ver af van de eerder geschatte waarden. Ook kwam een waarde kleiner dan nul voor.
Om toch gevoel te krijgen voor de onzekerheid, wordt in paragraaf 5.3 bij de regressieanalyse voor het bepalen van de schalingsfactor het effect van aanvullende onzekerheid onderzocht door middel van een Bootstrap en Monte Carlo-simulatie.

De schattingen van de 'achtergrond'-concentratie per locatie staan in de derde kolom van Tabel 3, na de gemiddeld gemeten concentratie. Een visuele weergave staat in Figuur 16.

Tabel 3. Gemiddeld gemeten concentratie (aantal deeltjes per cm^3), schatting van de 'achtergrond'-concentratie en de afgeleide bijdrage van vliegverkeer op Schiphol per locatie en periode. Concentraties zijn afgerond op honderdtallen, de 'achtergrond'-concentraties op duizendtallen.

Locatie (periode)	*Concentratie*	*'Achtergrond'-concentratie*	*Bijdrage van vliegverkeer op Schiphol*
1 Oude Meer (1)	16.200	10.000	6.200
2 Ookmeer (1)	16.000	9.000	7.000
3 Amstelveen (1)	18.300	9.000	9.300
4 Aalsmeer (1)	12.600	9.000	3.600
5 Vijfhuizen (1)	10.000	7.000	3.000
6 NH1 Polderbaan (1)	38.000	8.000	30.000
1 Oude Meer (2)	24.200	12.000	12.200
2 Ookmeer (2)	14.900	12.000	2.900
7 Nieuwe Meer (2)	29.400	19.000	10.400
8 Hoofddorp (2)	11.900	8.000	3.900
9 Spaarnwoude (2)	15.200	12.000	3.200
10 Badhoevedorp (2)	23.000	15.000	8.000

[16] Het rekenmodel berekent voor elk uur een bijdrage. Onzekerheden in de uurlijkse gemodelleerde bijdragen zijn gemakkelijk een factor 2 tot 3 groter dan de onzekerheden in de gemiddelde waarden over langere perioden.



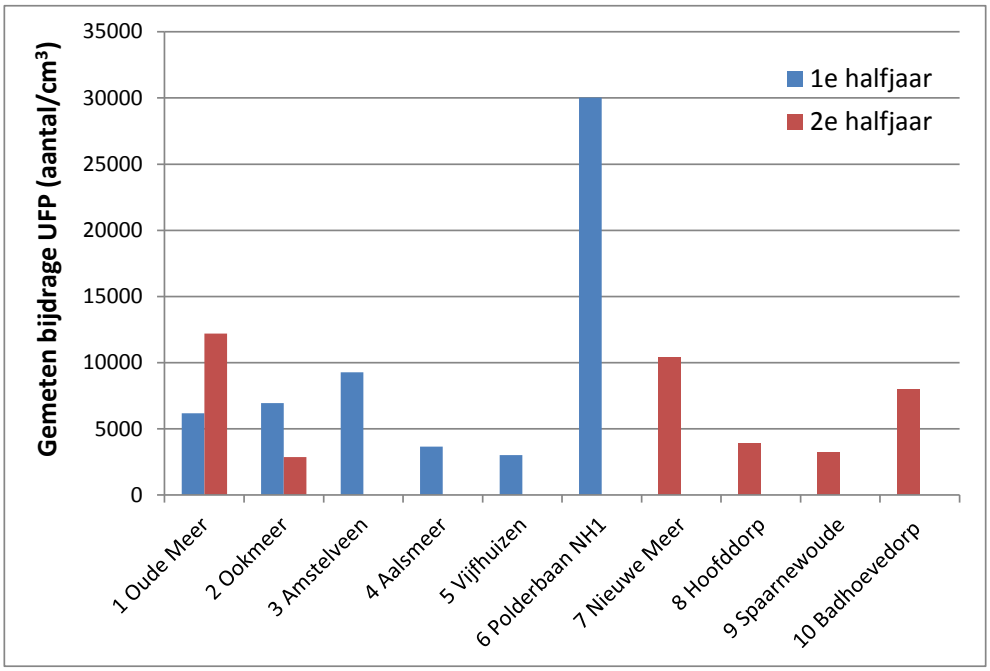
Figuur 16. Als Tabel 3, maar dan in figuurvorm.

De 'achtergrond'-concentratie verschilt per locatie, maar ook per periode. In het tweede halfjaar zijn over het algemeen hogere 'achtergrond'-concentraties gemeten. De laagste 'achtergrond'-concentraties zijn gemeten op Vijfhuizen, NH1 Polderbaan en Hoofddorp. De hoogste 'achtergrond'-concentraties waarden zijn gemeten op Nieuwe Meer, dat ligt ingeklemd tussen drukke rijks- en provinciale wegen, gevolgd door Badhoevedorp met ook aan weerszijden drukke wegen.

4.2 Gemiddelde concentratiebijdrage

Nu de 'achtergrond'-concentratie is geschat, kan de bijdrage van vliegverkeer op Schiphol worden afgeleid uit het verschil tussen de gemiddeld gemeten concentratie en de 'achtergrond'-concentratie. De bijdrage staat in de laatste kolom van Tabel 3. Ook is de bijdrage gevisualiseerd in Figuur 17. Daarin valt het volgende op:

- Verreweg de grootste bijdrage is gemeten op locatie 6 (NH1 Polderbaan). Deze locatie ligt op slechts 400 m van de Polderbaan en ligt bij noordwestenwind pal in de emissies van startende vliegtuigen;
- Daarna volgen de locaties die vervolgens het dichtst op Schiphol liggen (1 Oude Meer, 7 Nieuwe Meer, 10 Badhoevedorp), of die juist een groot deel van de tijd benedenwinds hebben gelegen (3 Amstelveen);
- De bijdrage op locaties 1 Oude Meer en 2 Ookmeer verschillen sterk tussen de beide meetperioden. In het eerste halfjaar lag locatie 1 Oude Meer veel minder vaak benedenwinds van Schiphol dan in het tweede halfjaar. Voor Ookmeer is dat precies omgekeerd.



Figuur 17. Halfjaargemiddelde gemeten bijdrage van vliegverkeer aan de concentratie van ultrafijn stof.

De gemeten concentratieniveaus hangen sterk af van de weersomstandigheden, met name de windrichting en windsnelheid. Figuur 17 laat zien dat de gemeten bijdragen in Oude Meer en Ookmeer met een factor 2 verschillen tussen de beide meetperioden van een halfjaar. Daaruit blijkt dat een halfjaar meten op een enkele locatie niet voldoende is om alleen op basis van metingen een representatief beeld van de langdurige blootstelling af te leiden. Daarom is het voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling van belang om een rekenmodel in te zetten. Een rekenmodel maakt het mogelijk om op alle locaties en in verschillende situaties, zoals onder andere weersomstandigheden, de jaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof te bepalen. De meetresultaten worden in het volgende hoofdstuk gebruikt voor de toetsing en kalibratie van het rekenmodel.

5 Resultaten toetsing en kalibratie van het rekenmodel met metingen

5.1 Verkenning modelaanpassingen

Voor de toetsing van het rekenmodel met de metingen op tien locaties rondom Schiphol zijn op meerdere manieren vergelijkingen gemaakt. Vooral analyses met windroosfiguren geven inzicht. Het wordt daarmee duidelijk hoe de overeenkomst is tussen berekeningen en metingen bij verschillende windrichtingen en hoe de berekende bijdragen van de verschillende vluchtfasen zich ten opzichte van elkaar verhouden. In hoofdstuk 6 worden deze resultaten in detail gepresenteerd.
De berekeningen geven net als de metingen duidelijke verhogingen in de concentratie bij wind uit de richting van de vliegbewegingen. Wel zijn er afhankelijk van de meetlocatie verschillen, bijvoorbeeld in de breedte van de windrichtingen (windsector) met een verhoogde concentratie of in de relatieve hoogte van de pieken. Ook valt op dat op sommige locaties bij bepaalde windrichtingen in de metingen wel een verhoging is te zien, maar niet of nauwelijks in de berekening – of omgekeerd. Voor sommige situaties en locaties doet het rekenmodel het dus beter dan voor andere. Om te onderzoeken of de overeenkomst in die gevallen kon worden verbeterd, zijn verschillende experimenten met extra modelaanpassingen gedaan. Paragraaf 6.2 geeft inzicht in de verkende modelaanpassingen.

Samengevat blijkt het lastig om – naast het toevoegen van taxiënde vliegtuigen als bron en het rekenen met andere indicatoren voor de emissie – generieke aanpassingen in het model door te voeren om de overeenkomst tussen berekeningen en metingen te verbeteren.
Dit heeft verschillende redenen:

- De meetlocaties worden bij nagenoeg geen enkele windrichtingsector door maar één enkele vluchtfase beïnvloed. Het is daarom niet mogelijk om per vluchtfase een aparte schalingsfactor voor de emissies af te leiden (zie paragraaf 6.2.1). Een poging om dit via meervoudige regressie te doen, gaf geen bruikbare resultaten.
- In de meetcampagne naar taxiënde vliegtuigen kon wel een aparte schalingsfactor voor taxiënde vliegtuigen[17] worden afgeleid. Deze bleek hoger te zijn dan de factor afgeleid over de totale bijdrage van alle vluchtfasen. Echter het toepassen ervan in het rekenmodel leidde niet tot een verbetering – eerder een verslechtering – van de overeenkomst met de metingen bij windrichtingen waarbij taxiënde vliegtuigen op een grotere afstand van de meetlocatie bijdragen aan de concentratie van ultrafijn stof. Paragraaf 6.2.2 geeft meer details. De aparte schalingsfactor voor taxiënde vliegtuigen is daarom niet doorgevoerd.
- Sommige aanpassingen zorgen voor verbetering in de overeenkomst van de gemiddelde bijdrage per windsector op

[17] Factor *a* uit paragraaf 2.2.4.

bepaalde locaties, maar juist voor verslechtering op andere. Zie bijvoorbeeld de paragrafen 6.2.2 en 6.2.3.
- De invloed van de modelaanpassingen op de halfjaargemiddelde bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof op de tien locaties is zeer beperkt. De overeenkomst tussen de berekende en gemeten halfjaargemiddelde concentratiebijdragen verbetert niet. Juist deze overeenkomst is de basis voor de toetsing van het model voor toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling.

Op basis van deze resultaten is besloten om het rekenmodel niet verder aan te passen. Op die manier is het rekenmodel ook zo veel mogelijk vergelijkbaar met rekenmodellen die voor andere toepassingen worden gebruikt, zoals de m.e.r.-studies.

5.2 Toetsing van het model voor toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling

Het rekenmodel levert de blootstellingskaarten die zullen worden gebruikt in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling. In het gezondheidsonderzoek zullen relaties worden onderzocht enerzijds tussen verschillende gezondheidseindpunten (bijvoorbeeld vroegtijdige sterfte of het risico van het krijgen van longaandoeningen) en anderzijds tussen de concentraties waaraan mensen zijn blootgesteld. Er wordt onderzocht in hoeverre toenames in deze eindpunten gepaard gaan met toenames in de blootstelling. Bijvoorbeeld: in welke mate neemt het risico van het krijgen van longaandoeningen toe bij een bepaald verschil in concentratieniveau?
Ultrafijn stof wordt uitgedrukt in aantallen deeltjes per volume-eenheid. Zoals eerder gemeld hangen de gemeten absolute niveaus van het aantal deeltjes af van het apparaat waarmee de deeltjes zijn gemeten. Voor de vraagstelling in het huidige onderzoeksprogramma rondom Schiphol kan ook naar de relatieve verschillen worden gekeken. Dan wordt de vraag bijvoorbeeld: in welke mate neemt het risico van het krijgen van longaandoeningen toe bij een verdubbeling van de bijdrage van vliegverkeer aan de concentratie? Daarvoor zijn de absolute waarden minder van belang. Het gaat dan veel meer om verschillen tussen locaties met een hoge en lage blootstelling als gevolg van emissies van vliegverkeer.

Om onderzoeksresultaten te kunnen vergelijken met die uit andere studies naar ultrafijn stof, zullen de resultaten van het gezondheidsonderzoek in absolute concentratieverschillen worden uitgedrukt. Om eerlijk te kunnen vergelijken is het van belang om te weten waarop de absolute getallen zijn gebaseerd. Kortom, de absolute waarden van de concentraties van ultrafijn stof zijn minder van belang voor de vraag van het huidige onderzoeksprogramma rondom Schiphol, maar van groter belang bij vergelijkingen met andere gezondheidsstudies naar ultrafijn stof.

Voor de toetsing van de inzet van het model in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling, is het dus vooral van belang om te kijken in hoeverre het model relatieve verschillen in concentraties tussen locaties goed beschrijft. Dat wordt in het vervolg

van deze paragraaf verder besproken. Het afleiden van de schalingsfactoren waarmee de absolute niveaus van de bijdrage van vliegtuigen aan de concentratie van ultrafijn stof worden gekalibreerd, wordt in de volgende paragraaf besproken.

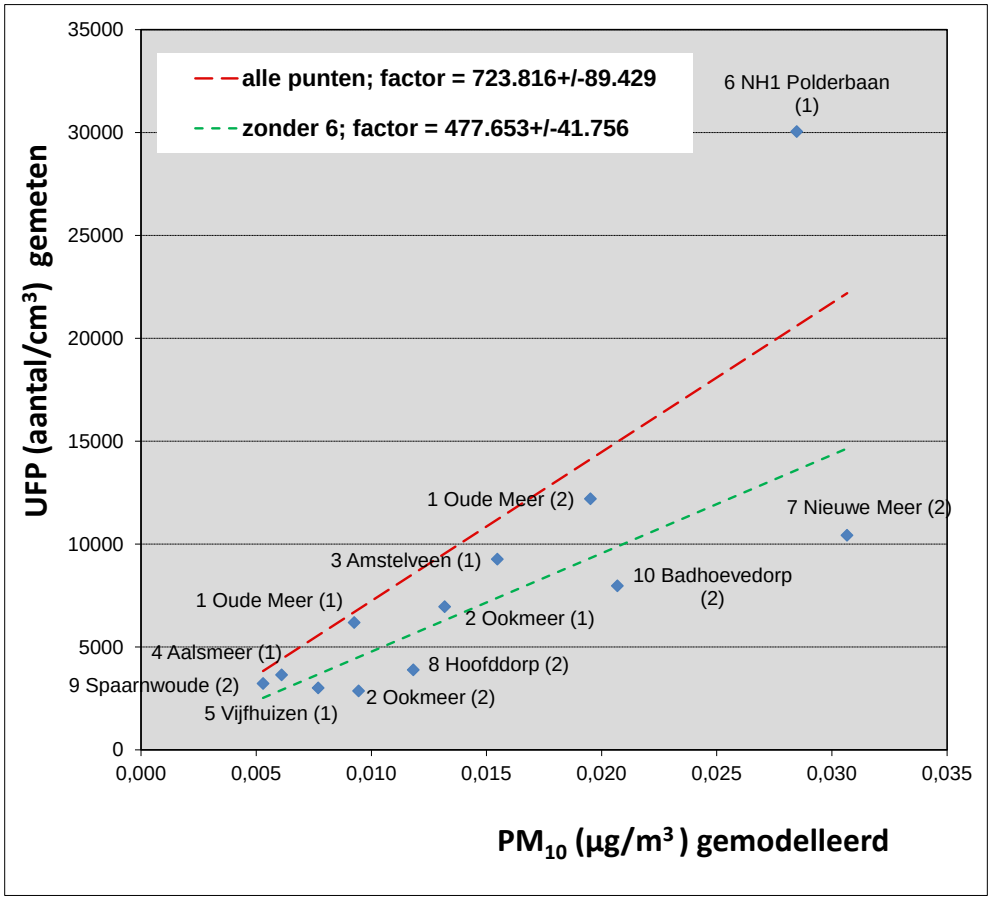
Voor de toetsing van het rekenmodel zijn de periodegemiddelde gemeten en berekende bijdragen (van de verschillende indicatoren) aan de concentratie van ultrafijn stof met elkaar vergeleken. Voor elke meetlocatie is de halfjaargemiddelde bijdrage bepaald. Het rekenmodel berekent enkel de bijdrage van de vliegtuigen. Het model berekent voor uren waarop de meetlocatie niet is belast door wind uit de richting van Schiphol geen bijdrage, ofwel een nul-waarde. Deze nul-waarden tellen mee bij de bepaling van de gemiddelde bijdrage over de periode van een halfjaar. Uit de metingen is de bijdrage van de vliegtuigen bepaald door de gemiddelde concentratie van ultrafijn stof te verminderen met de geschatte bijdrage van andere bronnen (zie hoofdstuk 4). Voor meetlocaties 1 (Oude Meer) en 2 (Ookmeer) zijn twee halfjaargemiddelde waarden beschikbaar omdat op deze locaties een heel jaar is gemeten. Dat geeft in totaal twaalf waarden. Uren waarop door uitval of slecht functioneren van apparatuur geen meetgegevens beschikbaar zijn, zijn niet meegenomen in de bepaling van de gemiddelde waarden (niet in de metingen en ook niet in de berekeningen). Datzelfde geldt voor uren met een windsnelheid lager dan 1,5 m/s (zie paragraaf 2.2.2). Het aantal uren waarop de gemiddelde waarden zijn bepaald, staan in Tabel 4. Locatie 7 (Spaarnwoude) heeft als gevolg van wat langere uitval van meetapparatuur het laagste aantal uren. Dit meetpunt lag echter een aanzienlijk deel van deze uren benedenwinds van Schiphol, zodat ook op deze locatie voldoende gegevens beschikbaar zijn.

Tabel 4. Aantal uren waarop de gemiddelde waarden zijn bepaald per locatie.

Locatie (periode)	*Aantal uren*
1 Oude Meer (1)	3.726
2 Ookmeer (1)	3.985
3 Amstelveen (1)	4.054
4 Aalsmeer (1)	3.343
5 Vijfhuizen (1)	3.530
6 NH1 Polderbaan (1)	3.248
1 Oude Meer (2)	3.663
2 Ookmeer (2)	3.885
7 Nieuwe Meer (2)	2.426
8 Hoofddorp (2)	3.120
9 Spaarnwoude (2)	3.912
10 Badhoevedorp (2)	3.772

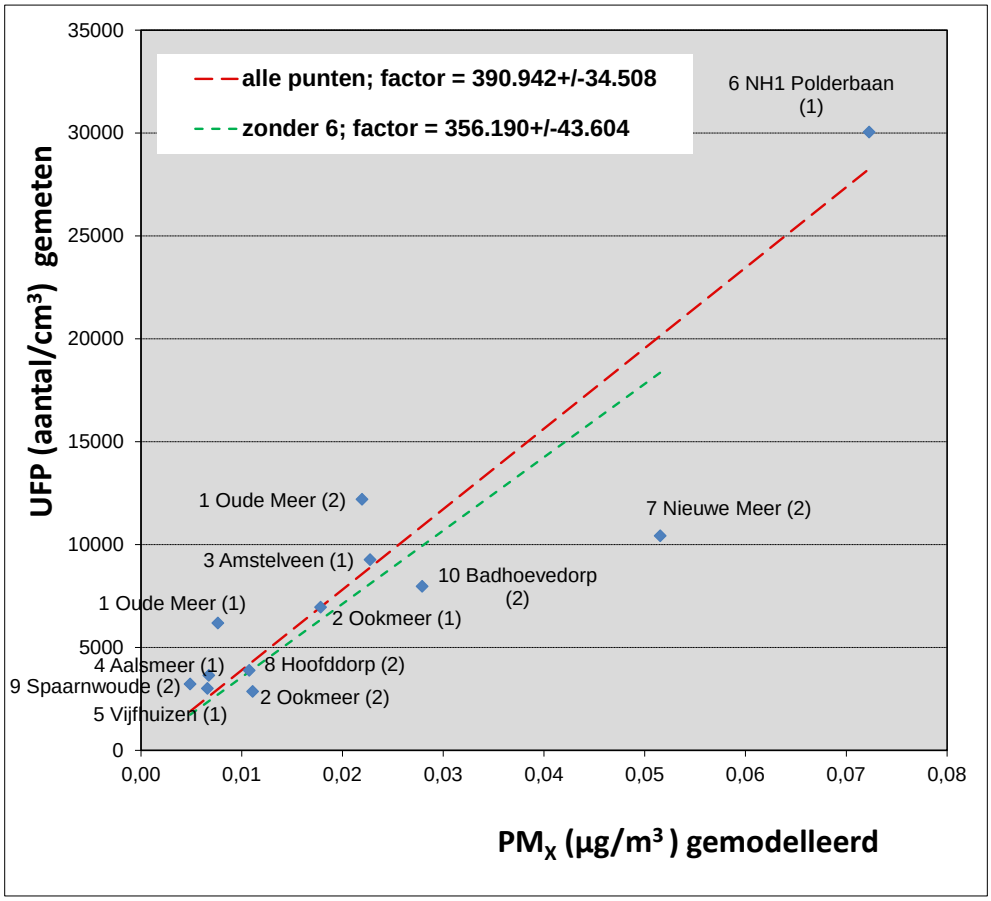
Allereerst zijn de datapunten uitgezet in grafieken met op de x-as de berekende bijdrage aan de concentratie en op de y-as de gemeten bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof. De figuren voor de vijf indicatoren PM_{10}, PM_X, NO_x, brandstof en ultrafijn stof op basis van indicatieve emissiefactoren staan in Figuur 18 t/m Figuur 22. De voor de volgende paragraaf (5.3) afgeleide regressielijnen en -coëfficiënten zijn

ook in deze figuren vermeld.[18] Het zijn dus steeds *dezelfde* meetwaarden die worden vergeleken met berekeningen op basis van *verschillende* aannames voor de emissies van de vliegtuigen (zie paragraaf 2.2.4). Voor nu is de relatieve ligging van de datapunten ten opzichte van elkaar van belang.

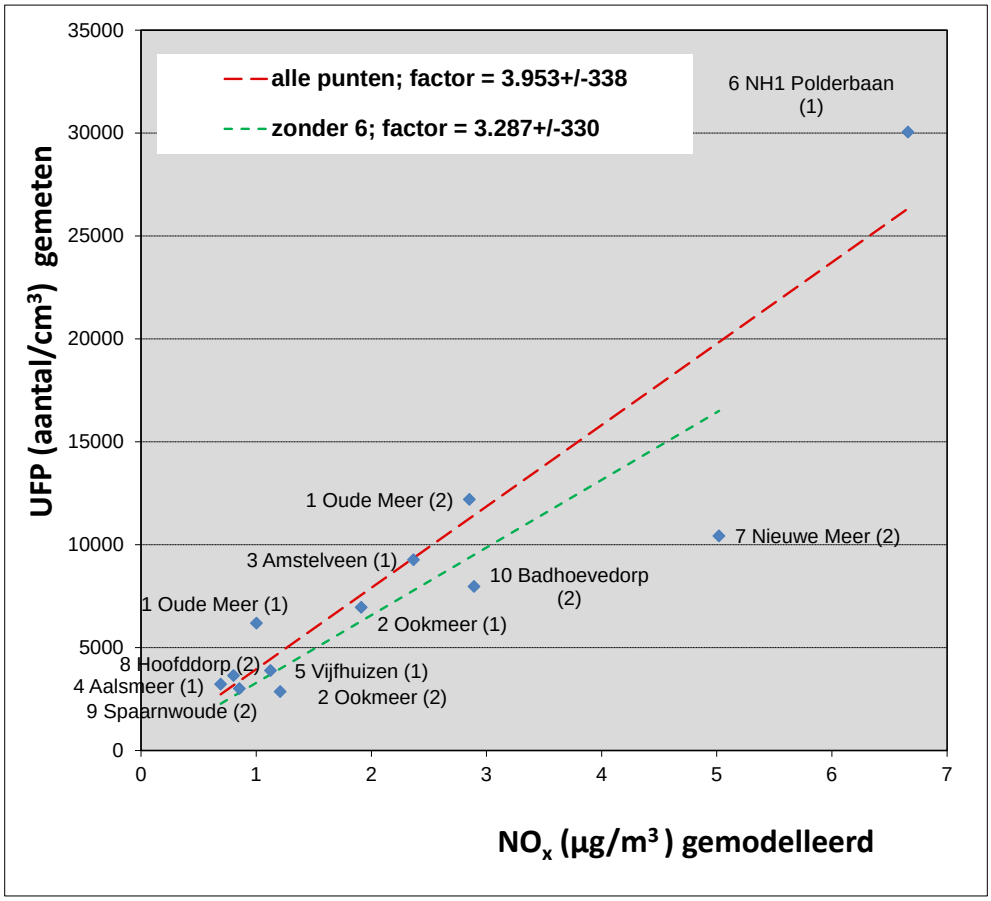


Figuur 18. Vergelijking berekende halfjaargemiddelde bijdragen PM_{10} met gemeten bijdragen ultrafijn stof. De helling van de orthogonale regressie, gefit door de oorsprong, geeft de schalingsfactor en de onzekerheid erin (1σ). Labels bij de datapunten: nr naam (periode).
NB: de punt (.) in de regressiefactor boven in de grafiek staat voor een duizendtal.

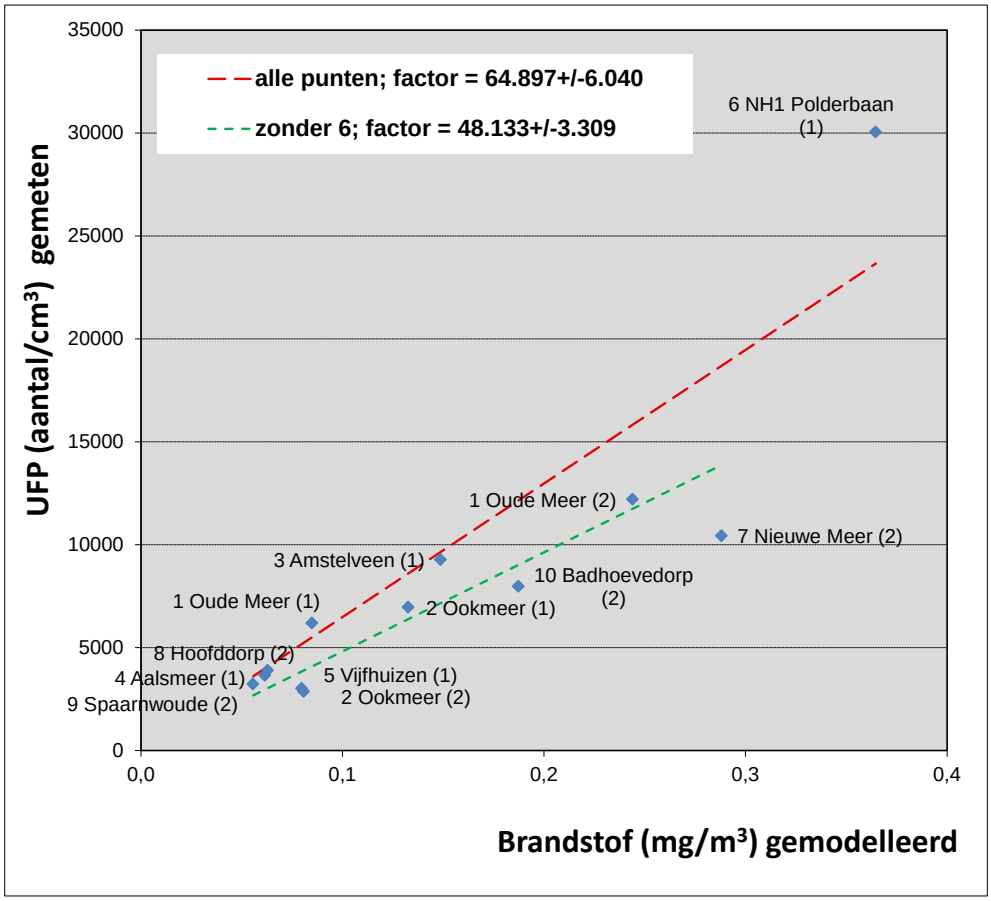
[18] De lijn wordt om pragmatische redenen geforceerd door de oorsprong. Het zou namelijk onlogisch zijn om bij/van een modelberekening van een bijdrage altijd een waarde op te tellen/af te trekken. De bijdrage kan niet kleiner dan 0 zijn.



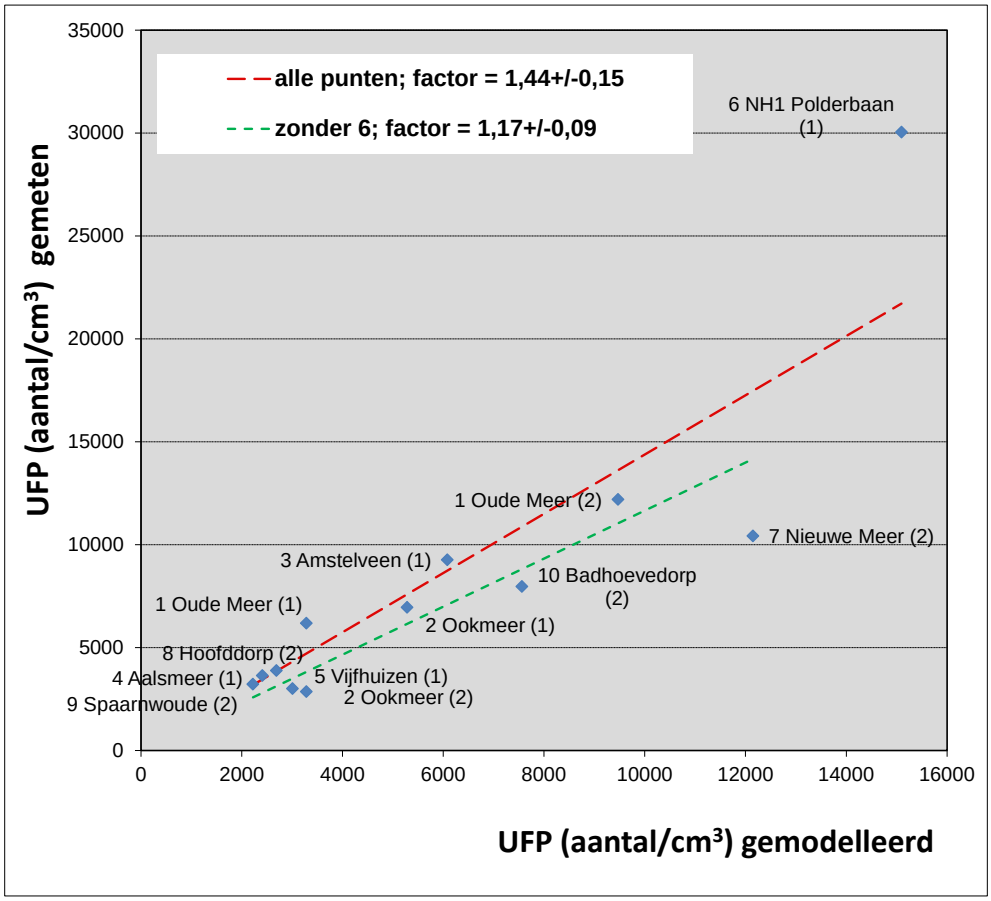
Figuur 19. Vergelijking berekende halfjaargemiddelde bijdragen PM_X met gemeten bijdragen ultrafijn stof. De helling van de orthogonale regressie, gefit door de oorsprong, geeft de schalingsfactor en de onzekerheid erin (1σ). Labels bij de datapunten: nr naam (periode).
NB: de punt (.) in de regressiefactor boven in de grafiek staat voor een duizendtal.



Figuur 20. Vergelijking berekende halfjaargemiddelde bijdragen NO_x met gemeten bijdragen ultrafijn stof. De helling van de orthogonale regressie, gefit door de oorsprong, geeft de schalingsfactor en de onzekerheid erin (1σ). Labels bij de datapunten: nr naam (periode).
NB: de punt (.) in de regressiefactor boven in de grafiek staat voor een duizendtal.



Figuur 21. Vergelijking berekende halfjaargemiddelde bijdragen 'brandstof' met gemeten bijdragen ultrafijn stof. De helling van de orthogonale regressie, gefit door de oorsprong, geeft de schalingsfactor en de onzekerheid erin (1σ). Labels bij de datapunten: nr naam (periode).
NB: de punt (.) in de regressiefactor boven in de grafiek staat voor een duizendtal.



Figuur 22. Vergelijking berekende halfjaargemiddelde bijdragen ultrafijn stof (op basis van indicatieve emissiefactoren Mazaheri et al., 2009) met gemeten bijdragen ultrafijn stof. De helling van de orthogonale regressie, gefit door de oorsprong, geeft de schalingsfactor en de onzekerheid erin (1σ). Labels bij de datapunten: nr naam (periode).

Het volgende valt op in de figuren:

- De figuren voor de verschillende indicatoren lijken op elkaar. Het blijkt dat de keuze voor de indicator voor de emissies geen grote invloed heeft op de berekening van de halfjaargemiddelde bijdrage aan de concentratie. De weersomstandigheden en afstand tot Schiphol zijn veel bepalender.
- Er is een duidelijk verband tussen de gemeten en berekende bijdragen. Locaties met een hogere gemeten bijdrage hebben in het algemeen ook een hogere berekende waarde. Tussen locaties onderling gaat het echter niet altijd op (vergelijk bijvoorbeeld locaties 8 en 5 in de figuren). Daar speelt de onzekerheid in het model en in de meting (onder andere de splitsing tussen ‘achtergrond’-concentratie en bijdrage van vliegtuigen) een rol.
- De datapunten van locaties 1 (Oude Meer) en 2 (Ookmeer) liggen voor periode 2 anders in de grafiek dan voor periode 1, maar wel op een consistente manier. In periode 1 geeft zowel de meting als het model voor Oude Meer een lagere bijdrage dan in periode 2. Voor Ookmeer is dat precies andersom.

De mate waarin het model de gemeten verschillen tussen de locaties beschrijft, is kwantitatief onderzocht met behulp van Pearson[19] correlatieanalyse. Daarin zijn de meting en de berekening voor de vijf indicatoren meegenomen. De analyse is gemaakt voor alle twaalf datapunten (zie Tabel 5) en voor de set zonder meetpunt NH1 Polderbaan (zie Tabel 6). Deze locatie is vanwege de ligging zeer dicht bij de bron minder representatief voor blootstellingsniveaus voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling. Het sterke vermoeden bestaat dat het rekenmodel de verspreiding van emissies van de vliegtuigen op korte afstanden minder goed beschrijft. In paragraaf 6.2.5 wordt hier nader op ingegaan.

Tabel 5. Pearson correlatiecoëfficiënten tussen meting en berekeningen met de vijf indicatoren. n=12.

	Meting	PM_{10}	PM_x	NO_x	brandstof	UFP-indicatief
Meting	1	0,76	0,90	0,90	0,89	0,89
PM_{10}		1	0,93	0,95	0,95	0,96
PM_x			1	0,99	0,95	0,96
NO_x				1	0,98	0,98
brandstof					1	1,00
UFP-indicatief						1

Tabel 6. Pearson correlatiecoëfficiënten tussen meting en berekeningen met de vijf indicatoren. n=11, zonder NH1 Polderbaan.

	Meting	PM_{10}	PM_x	NO_x	brandstof	UFP-indicatief
Meting	1	0,82	0,76	0,82	0,91	0,90
PM_{10}		1	0,98	0,99	0,95	0,97
PM_x			1	0,99	0,92	0,94
NO_x				1	0,96	0,98
brandstof					1	1,00
UFP-indicatief						1

Uit de correlatieanalyse blijkt het volgende:

- Er is sprake van een goede correlatie tussen meting en berekeningen (afhankelijk van de indicator 0,76-0,90) en tussen de berekeningen met verschillende indicatoren onderling (0,92-1,00);
- De laagste correlatie voor een combinatie met de meting wordt gevonden voor PM_{10} bij n=12 en PM_X bij n=11 (zonder NH1 Polderbaan);
- Voor de combinatie met de meting geven PM_X, NO_X, brandstof en indicatief ultrafijn stof bij n=12 en brandstof en indicatief ultrafijn stof bij n=11 (zonder NH1 Polderbaan) hoge correlatiecoëfficiënten.

[19] Met Pearson-correlatie wordt de lineaire relatie tussen twee continue variabelen onderzocht. Een relatie is lineair wanneer een verandering in een variabele wordt geassocieerd met een proportionele verandering in de andere variabele.

Het is duidelijk dat het aantal datapunten noodgedwongen beperkt is. Het was praktisch gezien niet mogelijk om meer meetlocaties in te richten zonder in te boeten op een zo robuust mogelijk gemiddelde waarde. Op meer locaties meten zou betekenen dat er minder lang per locatie kon worden gemeten, met een grotere onzekerheid als gevolg.

De correlatiecoëfficiënten zoals hier gevonden zijn relatief hoog in vergelijking met pure modelvalidatiestudies. In dergelijke studies worden gemeten en berekende concentraties met elkaar vergeleken voor *alleen* die uren waarbij de bronnen de meetpunten direct belasten. Er worden in dat geval vaak per locatie correlaties onderzocht tussen berekende en gemeten waarden voor individuele uren. Het zijn vaak relatief weinig uren waarin die vergelijking mogelijk is.
Voor toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling gaat het echter om de daadwerkelijke totale blootstellingen en de spreiding daarin, ongeacht waar deze door is veroorzaakt. In de periodegemiddelde waarden zijn naast de uren met belasting door het vliegverkeer ook uren meegenomen waarin geen bijdragen van vliegverkeer worden gemeten en ook niet worden berekend. Het gaat hier dus om de correlatie tussen over langere periode gemiddelde concentraties op verschillende locaties en niet om de correlatie tussen berekende en gemeten waarden voor individuele uren. Als gevolg hiervan zijn de gevonden correlatiecoëfficiënten relatief hoog.

De conclusies voor de toetsing van het model voor toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling luiden:

- Het rekenmodel kan voldoende onderscheid maken tussen locaties met lagere en locaties met hogere langdurige blootstelling. Deze verschillen zijn belangrijk voor het gezondheidsonderzoek.
- Hoewel de verschillen tussen de indicatoren niet groot zijn, lijken er betere indicatoren dan PM_{10} te zijn als basis voor de emissieberekening. De indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof zoals afgeleid uit de studie van Mazaheri et al. (2009) voldoen daarvoor goed[20]. De berekeningen op basis van deze indicator zijn sterk gecorreleerd met de metingen.

5.3 Kalibratie van het rekenmodel

Met schalingsfactoren kunnen de berekende concentratiebijdragen van de verschillende indicatoren naar een waarde voor ultrafijn stof worden vertaald. De berekeningen worden op deze manier gekalibreerd met behulp van de metingen. Elke indicatorstof heeft een eigen schalingsfactor.[21]

De schalingsfactoren zijn afgeleid met behulp van lineaire orthogonale regressie. Door de datapunten in Figuur 18 t/m Figuur 22 is een regressielijn gefit. Deze lijn geeft de relatie tussen beide variabelen met de minste onzekerheid gewogen over de datapunten. De helling van de lijn levert de schalingsfactor op: de factor waarmee de berekende

[20] Ook de indicator brandstof is een goede basis voor de berekeningen, omdat de indicatieve emissiefactoren van ultrafijnstof er sterk lineair mee schalen. Voor de blootstellingsberekeningen maakt het weinig verschil en is
[21] Het is uiteraard ook nodig om de resultaten van de indicatoren anders dan ultrafijn stof in de juiste eenheid (aantallen deeltjes/cm^3) uit te drukken. Ook dat gebeurt met behulp van de schalingsfactor.

bijdrage moet worden vermenigvuldigd om een zo goed mogelijke schatting te krijgen van de bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof. De onzekerheid in de helling is een maat voor de onzekerheid in de schalingsfactor als gevolg van variatie tussen de locaties.
De lijn wordt om pragmatische redenen geforceerd door de oorsprong. Het zou namelijk onlogisch zijn om bij/van een modelberekening van een bijdrage altijd een waarde op te tellen/af te trekken.
Zowel de berekende als gemeten waarden kennen onzekerheid. De onzekerheid in de meting wordt bijvoorbeeld zowel veroorzaakt door de schatting van de 'achtergrond'-concentratie (die van de totale concentratie wordt afgetrokken om de bijdrage van vliegverkeer te krijgen) als door het verloop van meetapparatuur (zie paragraaf 2.1.1). Daarom is in plaats van standaard lineaire regressie, orthogonale lineaire regressie toegepast. Orthogonale regressie minimaliseert de combinatie van beide onzekerheden. Standaard lineaire regressie minimaliseert alleen de onzekerheid in de variabele op de y-as.

De regressiefiguren voor de vijf indicatoren PM_{10}, PM_X, NO_x, brandstof en ultrafijn stof op basis van indicatieve emissiefactoren, staan in Figuur 18 t/m Figuur 22. In de figuren zijn twee regressielijnen getekend. De rode langgestreepte lijn geeft de regressielijn op basis van alle twaalf datapunten. Bij de groene kortgestreepte lijn is het datapunt van locatie 6 (NH1 Polderbaan) weggelaten. Het sterke vermoeden bestaat dat het rekenmodel de verspreiding van emissies van de vliegtuigen op korte afstanden minder goed beschrijft. In paragraaf 6.2.5 wordt hier nader op ingegaan.

In elke figuur linksboven staat de met orthogonale regressie gevonden schalingsfactor horend bij de betreffende keuze voor de datapunten. De schalingsfactor is gevoelig voor de keuze van de datapunten, bij de ene indicator wat meer dan bij de andere. Ze verschillen tot wel 40% (bij PM_{10}). Dit geeft een gevoel voor de onzekerheid in de schalingsfactor. Om het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling dat volgt op deze studie later te kunnen vergelijken met andere gezondheidsonderzoeken naar ultrafijn stof, moeten de berekende waarden naar absolute waarden voor ultrafijn stof worden vertaald met behulp van de schalingsfactor. Besloten is om de schalingsfactor te baseren op de datapunten zonder locatie 6 (NH1 Polderbaan). Zoals hierboven aangegeven, bestaat het sterke vermoeden dat het model de concentratie op deze locatie minder goed beschrijft. De locatie ligt erg dicht op de bron en is daarmee niet representatief voor blootstellingniveaus voor het gezondheidsonderzoek. Het is door deze keuze waarschijnlijk dat de blootstelling op korte afstand van vliegtuigen hoger is dan nu berekend. Als locatie 6 wel was meegenomen in de bepaling van de schalingsfactor, zouden de concentratieniveaus op wat grotere afstand (in de omliggende woonkernen) vermoedelijk worden overschat.

De schalingsfactoren voor alle indicatoren, inclusief onzekerheid zoals bepaald met orthogonale regressie, staan in de eerste kolom van Tabel 7.

Tabel 7. Schalingsfactoren afgeleid met orthogonale regressie en met middeling van de individuele verhoudingen (+/- 1σ analytische onzekerheid). Op basis van de datapunten zonder locatie 6 (NH1 Polderbaan).

Indicator	*Schalingsfactor orthogonale regressie*	*Schalingsfactor middeling individuele verhoudingen*
PM_{10}	478.000 (+/- 9%)	488.000 (+/- 28%)
PM_X	356.000 (+/- 12%)	448.000 (+/- 41%)
NO_X	3.290 (+/- 10%)	3.760 (+/- 31%)
Brandstof	48.100 (+/- 7%)	51.700 (+/- 24%)
Indicatief ultrafijn stof	1,17 (+/- 7%)	1,29 (+/-25%)

Een alternatieve benadering is om per individuele meetlocatie de schalingsfactor uit de verhouding tussen de gemiddeld gemeten en gemiddeld berekende bijdrage af te leiden, en deze vervolgens te middelen. Nadeel van deze methode is dat de onzekerheid in de verhouding op locaties met lage bijdragen veel groter is dan die op locaties met hogere bijdragen. Toch kan het behulpzaam zijn in de bepaling hoe robuust de met regressie gevonden schalingsfactoren zijn. Ook maakt het een vergelijking met de vorige verkennende studie mogelijk waarin in grote lijnen naar deze individuele verhoudingen is gekeken. Deze factoren staan in de derde kolom van Tabel 7. De analytische onzekerheid is aanzienlijk groter dan die voor orthogonale regressie. De verschillen tussen de twee methoden vallen binnen de onzekerheidsbanden.

Voor de indicator 'indicatief ultrafijn stof' is later een nadere gevoeligheidsstudie gedaan. Met behulp van een Bootstrap en Monte Carlo-simulatie is 33% extra onzekerheid toegevoegd op de waarden van de datapunten op afzonderlijk de x- en y-as. Dit is gedaan om bijvoorbeeld de onzekerheid in de bepaling van de gemeten achtergrondconcentratie in rekening te brengen. De onzekerheid is met 13% (1σ) bijna een factor 2 hoger dan de 7% gevonden in de orthogonale regressieanalyse. De onzekerheid voor alle indicatoren zal naar verwachting dan ook tot een factor 2 hoger zijn dan de analytische onzekerheid. De onzekerheden (1σ) liggen dan in de orde van 15-25%. Voor individuele locaties kan de onzekerheid groter zijn dan 25%, zoals te zien aan de ligging van de datapunten in de figuren.

Deze getallen zeggen iets over de onzekerheid in absolute niveaus van ultrafijn stof wanneer het rekenmodel wordt gekalibreerd met behulp van metingen uitgevoerd met apparatuur van het type EPC-3783. Wanneer een meetapparaat met andere specificaties wordt toegepast, kan het gemeten niveau van ultrafijn stof daarvan (aanzienlijk) afwijken. De hier gepresenteerde onzekerheden zeggen niets over de verschillen tussen meetapparaten met verschillende specificaties. Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang met het toegepaste meetapparaat worden bezien.

Ten slotte verdient de gevonden schalingsfactor voor de indicatieve berekening van ultrafijn stof een korte bespreking. De met orthogonale regressie gevonden factor is 1,17. Dit geeft aan dat de berekende en gemeten bijdragen qua niveau vrij aardig overeenkomen. De metingen

geven een absoluut niveau van de bijdrage van vliegverkeer aan deeltjesaantallen dat gemiddeld 17% hoger ligt dan berekend.

5.4 Vergelijking met het voorgaande verkennende onderzoek

In het voorgaande verkennende onderzoek (Bezemer et al., 2015) is alleen gerekend met de indicator PM_{10}. Op de meeste meetlocaties lag de schalingsfactor toen rond 400.000. Maar er waren ook locaties waar de factor rond 100.000 of 700.000 lag. De individuele verhoudingen op de meetlocaties voor PM_{10} liggen in het huidige onderzoek tussen 303.000 en 668.000 (zonder locatie 6[22]). De verschillen zijn nu dus iets kleiner. Hierbij wordt opgemerkt dat de individuele verhoudingen eigenlijk geen goede maat zijn om de prestatie van het model mee te beoordelen. Nadeel van individuele verhoudingen is dat de onzekerheid in de verhouding op locaties met lage bijdragen veel groter is dan die op locaties met hogere bijdragen. Uit het voorgaande verkennende onderzoek zijn echter alleen gegevens over individuele verhoudingen bekend.

In het huidige onderzoek is met behulp van orthogonale regressie een factor van 478.000 afgeleid (of met individuele verhoudingen van 488.000). Dat is ongeveer 20% hoger dan de factor uit het voorgaande verkennende onderzoek.[23] Dit is een beperkt verschil, in aanmerking nemend dat er meerdere verschillen in aanpak zijn, waaronder:

- Er is gedurende een langere periode gemeten, met andere en meer variërende weersomstandigheden;
- Er is deels op andere locaties gemeten;
- Er is deels met andere meetapparatuur gemeten, hoewel de apparatuur in de vorige studie is genormaliseerd op het type instrument dat we in deze studie gebruiken;
- Taxiënde vliegtuigen zijn opgenomen in het rekenmodel;
- Emissiefactoren zijn voor het rekenmodel op een iets andere manier geaggregeerd (zie Bijlage 2).

Omdat er ook aanpassingen zijn gedaan aan het rekenmodel, betekent een hogere schalingsfactor niet per se een hoger absoluut niveau van de berekende bijdrage van vliegverkeer aan ultrafijn stof. In hoofdstuk 7 worden blootstellingskaarten voor de jaren 2017 en 2018 gepresenteerd. De niveaus zijn vergelijkbaar met een eerdere berekening voor het jaar 2015 (Bezemer et al., 2015).

5.5 Vergelijking met ander onderzoek

In een recente studie van TNO[24] (Duyzer en Moerman, 2018) zijn rondom Rotterdam The Hague Airport metingen van ultrafijn stof uitgevoerd en in verband gebracht met eerder door Erbrink Stacks

[22] Op locatie 6 (NH1 Polderbaan) is de verhouding 1.055.000. In het voorgaande verkennende onderzoek lag de factor op locatie 6 rond 400.000. Het is een opvallend verschil, dat vermoedelijk te maken heeft met de mate waarin de locatie belast is geweest door emissies van (op de Polderbaan startende) vliegtuigen in de meetperiode.

[23] De gevonden schalingsfactoren in beide studies horen bij het rekenmodel zoals toegepast in de betreffende studies. Ze schalen beide naar metingen. Het is niet zinvol om resultaten van het vorige rekenmodel met de in deze studie gevonden factor te schalen.

[24] Een andere unit van TNO dan de unit die bij het huidige onderzoek is betrokken. De laatste is tijdens de looptijd van het project van ECN overgegaan naar TNO.

Consult (ESC) berekende concentratiebijdragen. ESC heeft daarvoor de factor 400.000 uit het voorgaande verkennende onderzoek toegepast. Uit het onderzoek van TNO kwam de aanwijzing dat er eerder sprake is van een overschatting door het model van ESC in vergelijking met de meting van TNO dan onderschatting. Met andere woorden: de schalingsfactor van 400.000 zou eerder te hoog zijn dan te laag. TNO geeft daarbij aan dat er vele onzekerheden spelen in het bepalen van de absolute concentratiebijdrage. Een belangrijk verschil dat niet benoemd is in het rapport, is het bereik van de meetinstrumenten. TNO heeft een apparaat ingezet dat deeltjes meet met een grootte van 10 nanometer en groter. In het huidige onderzoek rond Schiphol is gemeten met een apparaat dat deeltjes meet met een grootte van 7 nanometer en groter. Ook in de voorgaande verkennende studie, waarin de factor 400.000 is bepaald, is daarop genormaliseerd. Het verschil tussen 7 en 10 nm lijkt klein, maar kan voor niveaus van ultrafijn stof veel uitmaken. TNO schat dat het tot 30% kan uitmaken (persoonlijke communicatie TNO). Een vergelijking van absolute niveaus is dan ook altijd zeer lastig. Het resultaat uit de studie van TNO kan om die reden niet direct in verband worden gebracht met de resultaten van het huidige onderzoek.

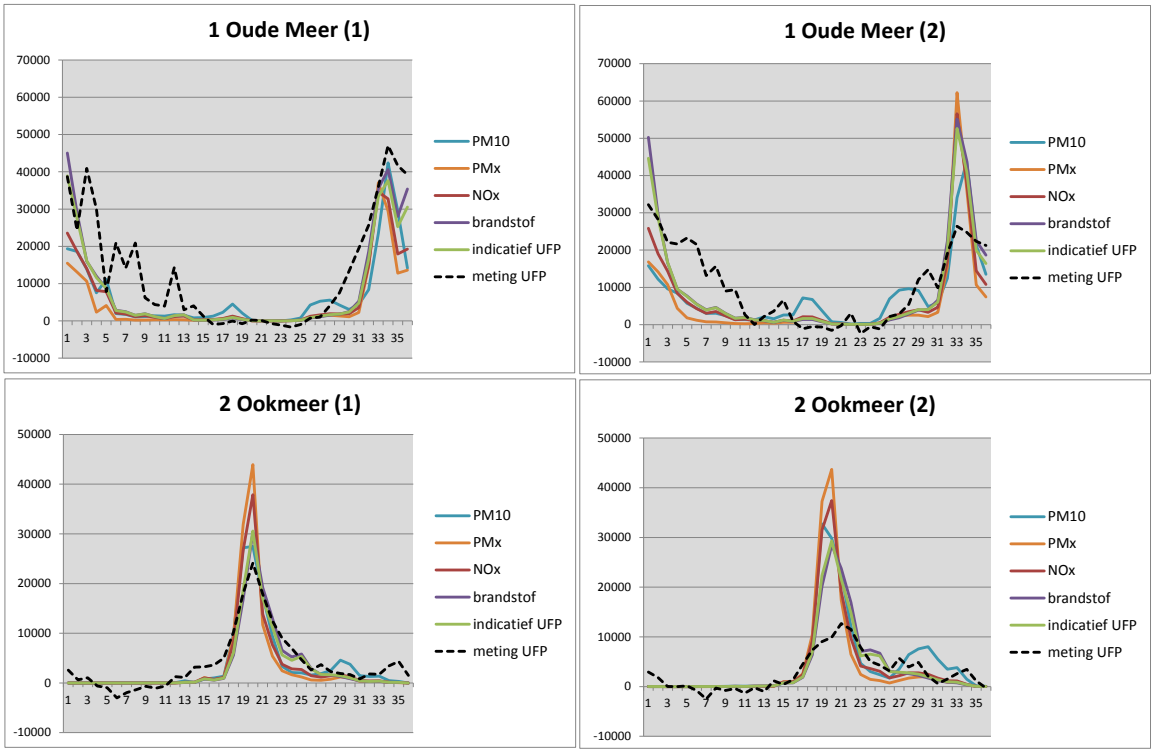
6 Resultaten in meer detail

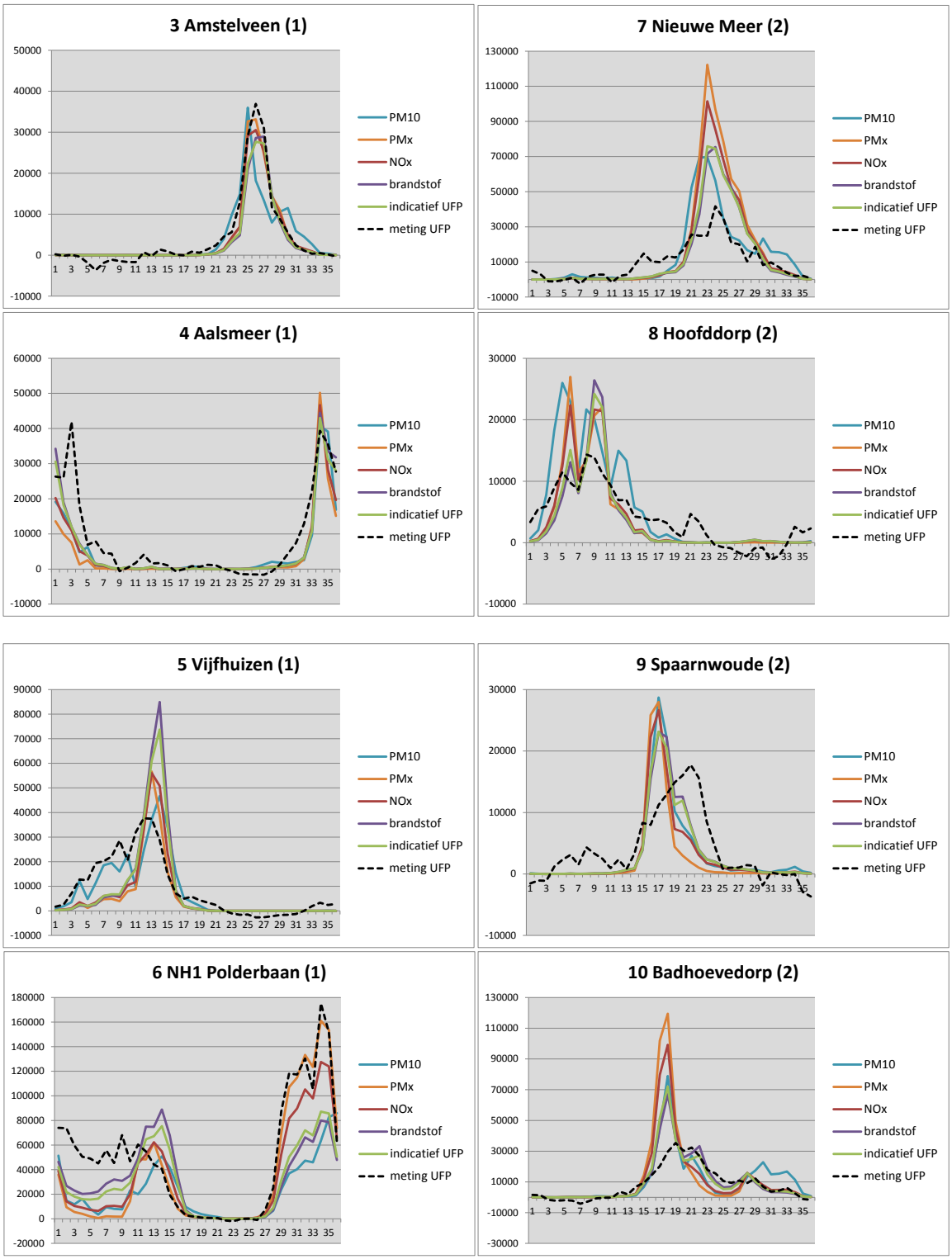
Voor de toetsing van het rekenmodel met de metingen op tien locaties rondom Schiphol zijn op meerdere manieren vergelijkingen gemaakt. Er zijn verschillende experimenten met modelaanpassingen gedaan. In dit hoofdstuk worden deze experimenten en vergelijkingen besproken. Hoewel uiteindelijk is besloten om het rekenmodel zo standaard mogelijk te houden en de aanpassingen – buiten het toevoegen van taxiënde vliegtuigen en het toepassen van een andere indicator dan PM_{10} – niet door te voeren, is het nuttig voor ander/nader onderzoek om de inzichten te verschaffen.

6.1 Vergelijking meting – berekening in meer detail

6.1.1 Windrozen voor de verschillende indicatoren

Figuur 23 laat de windrichtingsafhankelijkheid zien van de gemeten en met verschillende indicatoren berekende bijdrage van vliegverkeer aan de concentratie van ultrafijn stof. De gemeten bijdragen zijn tot stand gekomen door de gemiddelde 'achtergrond'-concentratie van de gemeten concentratie af te trekken. Dat resulteert voor sommige windsectoren in een getal dicht bij maar kleiner dan nul. De berekeningen zijn gemaakt met behulp van de hierboven afgeleide schalingsfactoren (zie paragraaf 5.3). De windrozen geven de gemiddelde waarde per windsector van 10 graden. Het aantal uren in de windsectoren varieert. Windsectoren met weinig uren kennen een grotere onzekerheid. Dit is met name het geval in periode 1 voor windrichtingen tussen 320-140 graden (noordwest-zuidoost).





Figuur 23. Windrozen van de gemiddeld per windsector van 10 graden gemeten en met verschillende indicatoren berekende bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof (in aantal deeltjes per cm^3). Op de x-as de windsectoren (1 = 0-10 graden, 2 = 10-20 graden etc; 0 graden = noordenwind, 90 = oostenwind, 180 = zuidenwind, 270 = westenwind, 360 = noordenwind).
Titel: nr en naam van de meetlocatie (periode).
NB: de schalen op de y-as verschillen per locatie.

Uit de windrozen komt een beeld naar voren dat niet veel afwijkt van de windrozen uit het voorgaande verkennende onderzoek (Bezemer et al., 2015). De windsectoren die belast zijn door emissies van vliegtuigen komen in de metingen duidelijk naar voren. De bijdragen van vliegtuigen komen in die sectoren over het algemeen ook tot uiting in de berekeningen. Wel zijn er afhankelijk van de meetlocatie verschillen, bijvoorbeeld in de breedte van de windrichtingen (windsector) of in de relatieve hoogte van de pieken. Op veel locaties lijkt het model de breedte van de belaste sectoren te onderschatten en de hoogte van de piekbelasting te overschatten. Maar dat geldt niet op alle locaties, wat het lastig maakt om hier een generieke verbetering in aan te brengen. Ook valt op dat op sommige locaties bij bepaalde windrichtingen in de metingen wel een verhoging is te zien, maar niet of nauwelijks in de berekening. Dit kan een gevolg zijn van vliegverkeer, maar ook van andere bronnen. In paragraaf 6.2.1 worden windrozen van de berekeningen van NO_X (zie Figuur 26) en indicatief ultrafijn stof (zie Figuur 27) uitgesplitst per vluchtfase getoond. Dit maakt het mogelijk om een indruk te krijgen van welke vluchtfasen de berekende bijdrage in die windsectoren mogelijk te hoog of te laag is in vergelijking met metingen. Bijvoorbeeld:

- Oude Meer: tussen 50 en 100 graden (naderende vliegtuigen, zie ook paragraaf 6.2.3);
- Vijfhuizen: tussen 30 en 90 graden (naderende of klimmende vliegtuigen op Polderbaan, zie ook paragraaf 6.2.3 en paragraaf 6.2.4);[25]
- NH1 Polderbaan: tussen 30 en 80 graden (taxiënde vliegtuigen naar/van Polderbaan, zie ook paragraaf 6.2.2), tussen 280 en 360 graden voor indicatoren PM_{10}, brandstof en indicatief ultrafijn stof (startende vliegtuigen, zie ook paragraaf 6.2.5);
- Spaarnwoude: tussen 190 en 230 graden (naderende of landende vliegtuigen op de Polderbaan).

In de windrozen komen de verschillen tussen de indicatoren duidelijker naar voren dan in de periodegemiddelde concentraties. Te zien is dat op de meeste plaatsen de hoogste pieken worden berekend voor de indicatoren PM_X en NO_X. Deze indicatoren geven relatief de hoogste bijdragen voor startende vliegtuigen (zie paragraaf 6.2.1). Wanneer de hoogste waarden worden berekend voor brandstof of indicatief ultrafijn stof, duidt dat op een relatief hoge bijdrage van taxiënde vliegtuigen uit die windrichting (zie paragraaf 6.2.1). In paragraaf 5.2 is op basis van correlatieanalyse van de periodegemiddelde concentraties geconcludeerd dat brandstof of indicatief ultrafijn stof een goede basis vormt voor de emissieberekening. De verschillen waren echter niet groot. Op basis daarvan alleen kan nog niet worden geconcludeerd dat taxiënde vliegtuigen relatief veel bijdragen. Er zijn echter meer aanwijzingen dat ze aanzienlijk bijdragen (zie paragraaf 6.2.2).

[25] Hier valt op dat PM_{10} de meting wel benadert. Dit komt doordat PM_{10} een relatief hoge emissie kent voor klimmende vliegtuigen.

6.1.2 *Proefdraaiplaats*

Op het terrein van Schiphol bevindt zich tussen de Buitenveldert- en Oostbaan een proefdraaiplaats waar met enige regelmaat vliegtuigmotoren worden getest. De locatie is gegeven in Figuur 24.

Figuur 24. Locatie van de proefdraaiplaats op Schiphol (blauwe stip tussen Buitenveldert- en Oostbaan).

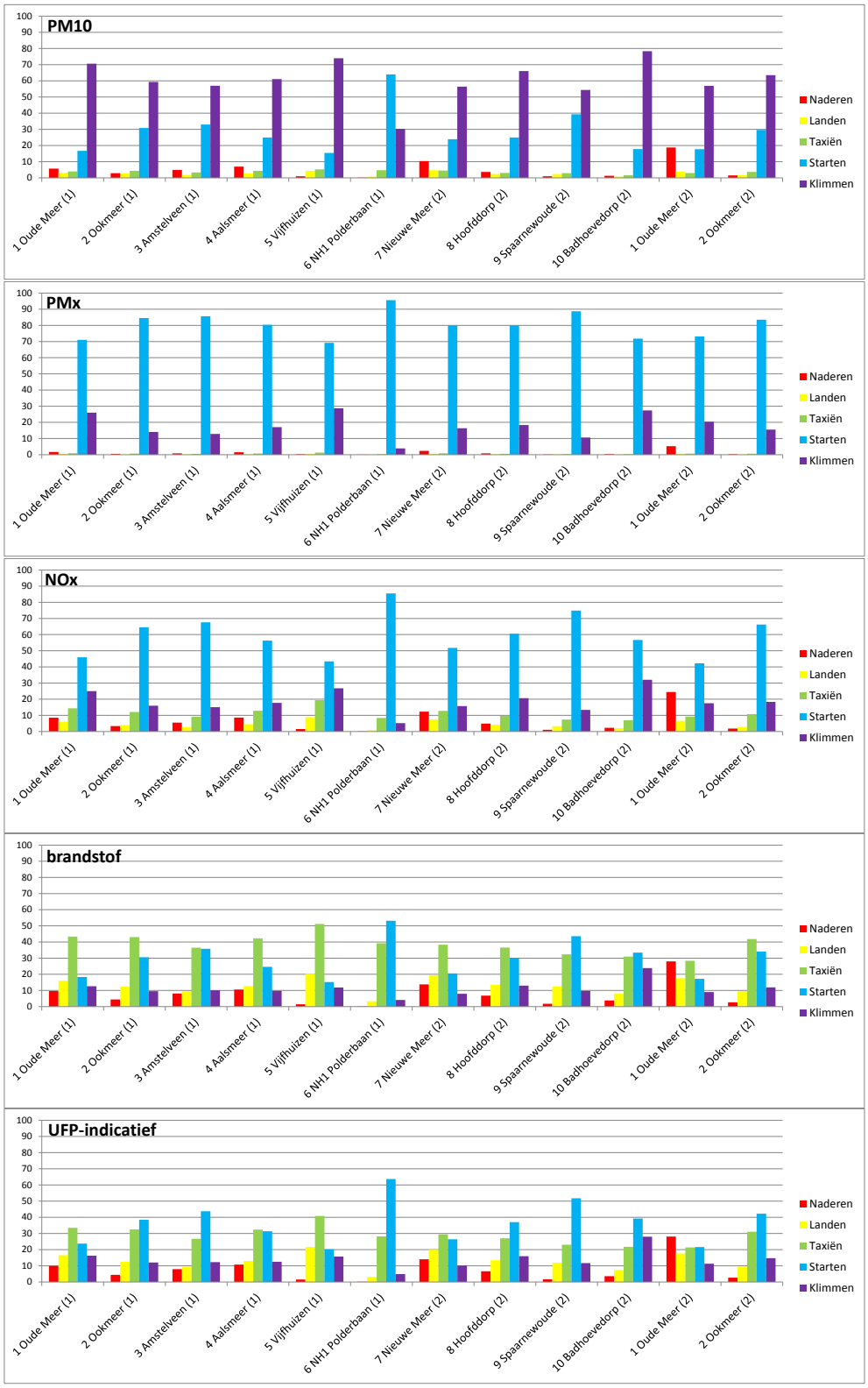
Deze proefdraaiactiviteiten zijn niet meegenomen in de modellering. Ook in de windrozen van locaties 7 en 10 is geen verhoging te zien in de gemiddelde concentratie uit die specifieke richting. Het aantal activiteiten op de proefdraaiplaats is in vergelijking met de gewone vliegbewegingen waarschijnlijk zeer klein en draagt maar beperkt bij aan de gemiddelde concentratie van ultrafijn stof.

6.2 Rekenmodel

6.2.1 *Afzonderlijke vluchtfasen*

Om de mate waarin de verschillende vluchtfasen volgens het rekenmodel bijdragen aan de totale concentratiebijdrage inzichtelijk te maken, zijn voor alle indicatoren figuren gemaakt met de procentuele berekende bijdrage van de verschillende vluchtfasen voor elke locatie (zie Figuur 25). Het is duidelijk dat er grote verschillen zijn tussen de indicatoren. PM_{10} geeft klimmende vliegtuigen de grootste bijdragen op de meeste locaties, behalve locatie 6 (NH1 Polderbaan, daar geven startende vliegtuigen de grootste bijdrage). Voor PM_X en NO_X dragen startende vliegtuigen op alle locaties het meeste bij. Het interessante is dat bij brandstof en indicatief ultrafijn stof de bijdrage van taxiënde vliegtuigen fors hoger is, tot op sommige locaties zelfs de grootste bijdrage.

De verschillen tussen PM_{10} en PM_X (PM_{10} op een andere manier afgeleid, zie paragraaf 2.2.4) vallen op. De emissiefactoren van fijn stof voor de verschillende vluchtfasen kunnen op meerdere manieren worden afgeleid. Van deze manieren is bekend dat ze alle een beperkte nauwkeurigheid hebben. Daardoor kennen ze onderling ook vrij grote verschillen (zie paragraaf 2.2.4).

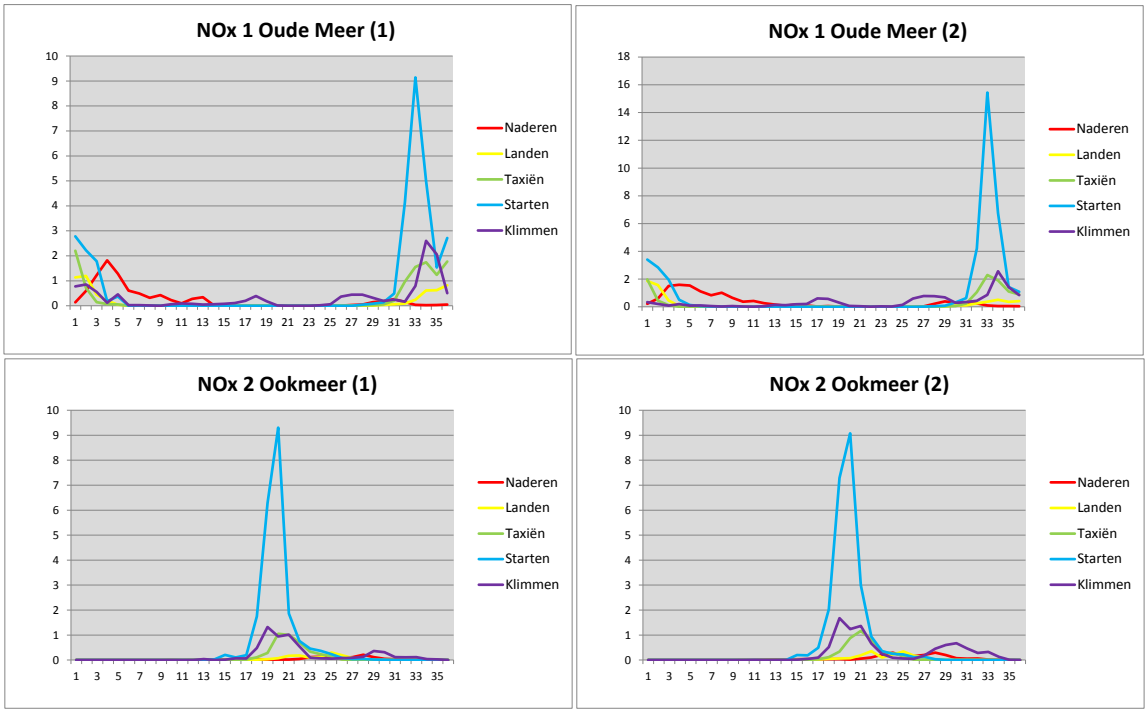


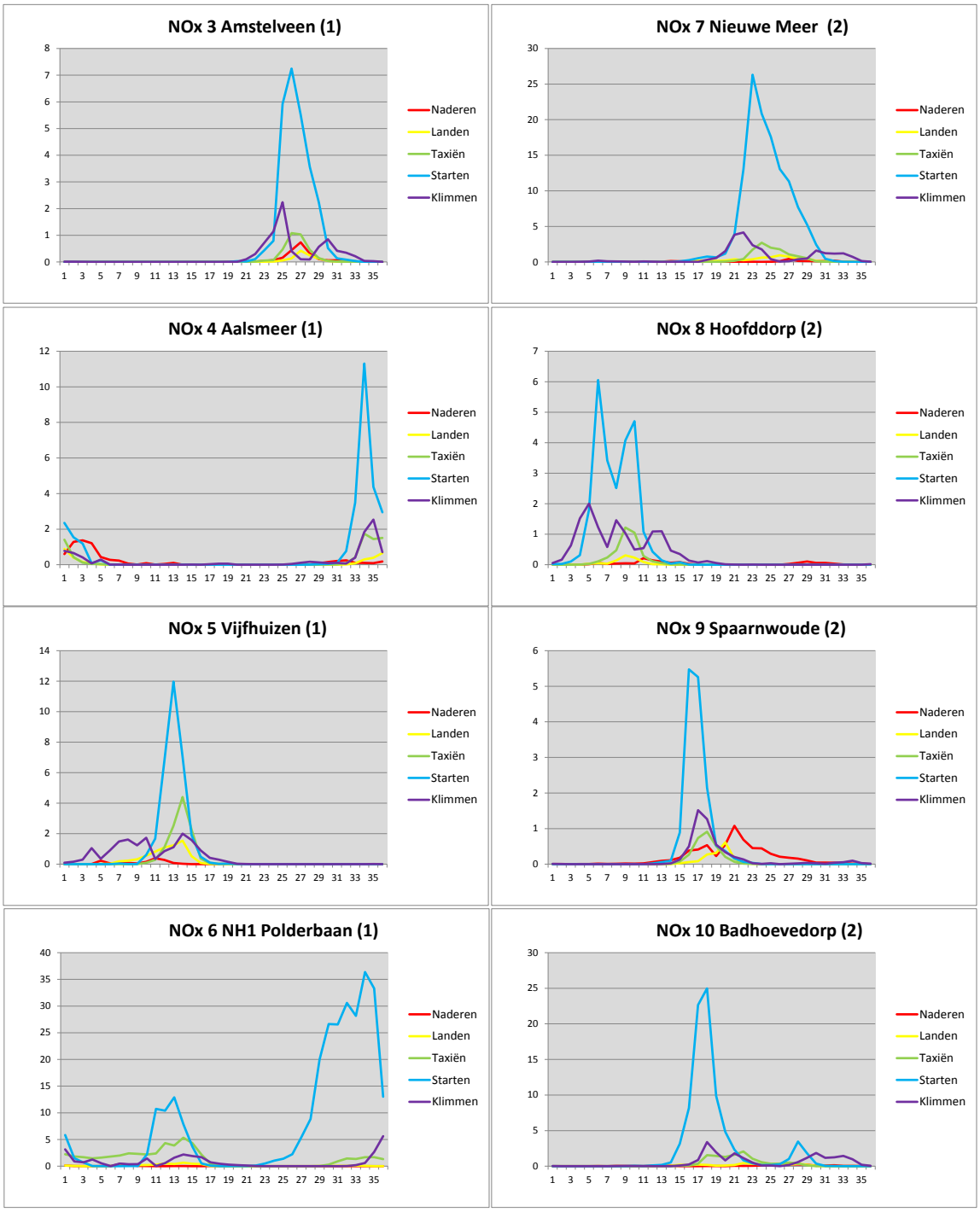
Figuur 25. Procentuele berekende bijdrage van de verschillende vluchtfasen per locatie (in %).

Windrozen van de bijdragen uitgesplitst per vluchtfase geven daarnaast inzicht in bij welke windrichtingen de verschillende vluchtfasen bijdragen. De windrozen zijn ter illustratie gemaakt voor NO_X (zie Figuur 26) en indicatief ultrafijn stof (zie Figuur 27).

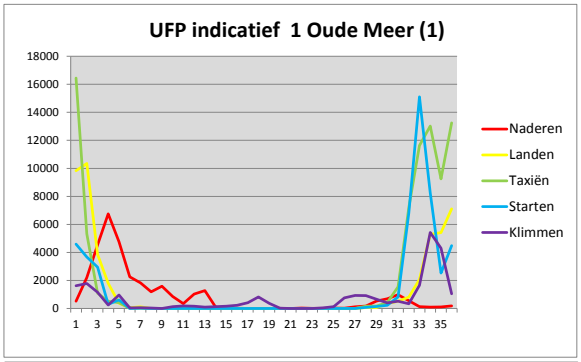
Al in paragraaf 6.1.1 is in samenhang met onderstaande figuren gekeken naar waar de meting en berekening uiteenlopen. Dit kan in sommige gevallen worden gerelateerd aan een van de vluchtfasen. Zo lijkt het model de bijdrage van naderende vliegtuigen op locatie 1 (Oude Meer) te onderschatten. Dat geldt ook voor die van klimmende of naderende vliegtuigen op locatie 5 (Vijfhuizen) en taxiënde en startende vliegtuigen op locatie 6 (NH1 Polderbaan). Wat echter ook in de figuren naar voren komt is dat de meetlocaties bij nagenoeg geen enkele windrichtingsector door maar één vluchtfase worden beïnvloed. Het is daarom niet mogelijk om voor elke vluchtfase een afzonderlijke schalingsfactor af te leiden. Een poging om dit via meervoudige regressie te doen, gaf geen bruikbare resultaten. Wel is gekeken naar een aantal modelaanpassingen die van invloed zijn op bepaalde vluchtfasen. Deze worden in de volgende paragrafen beschreven.

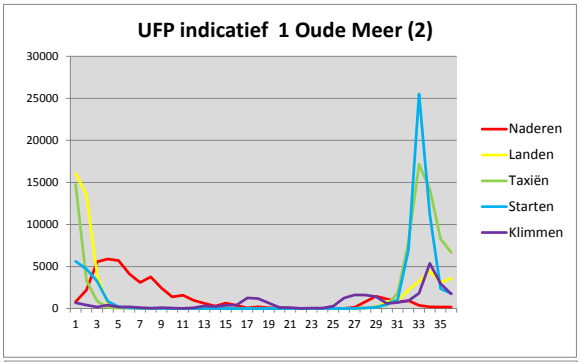
Om echt goed de afzonderlijke bijdragen van de verschillende vluchtfasen uit elkaar te halen zou nader, meer uitgebreid, onderzoek nodig zijn. Dat voert voor deze studie te ver. Voor de toepassing van het rekenmodel in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling volstaat het op basis van de huidige gegevens om te rekenen met een generieke schalingsfactor over alle vluchtfasen.

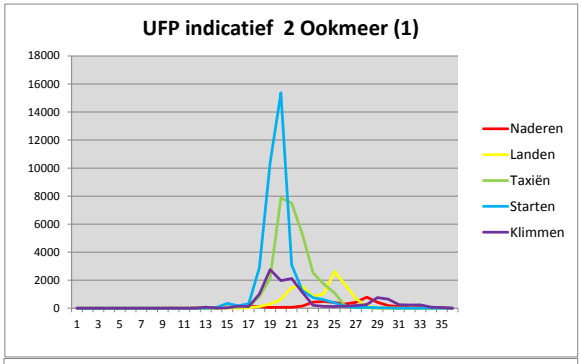


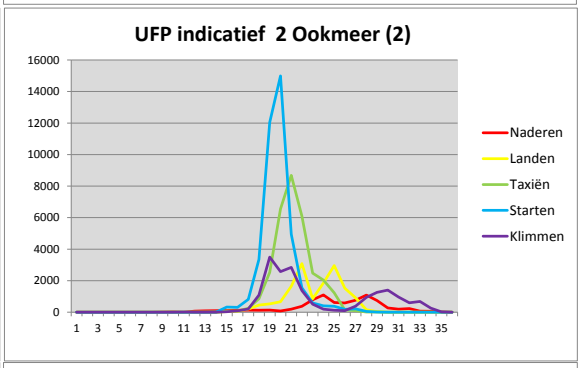


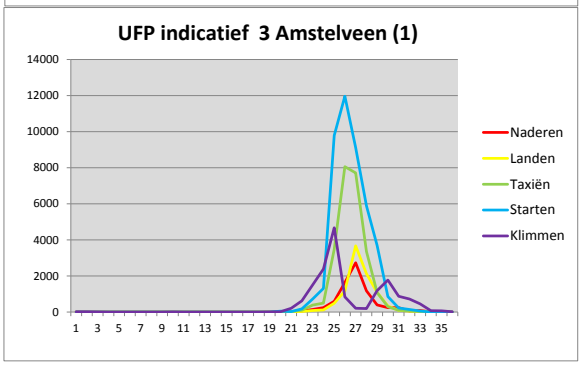
Figuur 26. Windrozen van berekende bijdragen aan de concentratie van NO_X ($\mu g/m^3$) per vluchtfase. Op de x-as de windsectoren (1 = 0-10 graden, 2 = 10-20 graden etc; 0 graden = noordenwind, 90 = oostenwind, 180 = zuidenwind, 270 = westenwind, 360 = noordenwind).
Titel: indicatorstof nr en naam van de meetlocatie (periode).
NB: de schalen op de y-as verschillen per locatie.
NB: op de berekende waarden is de schalingsfactor NIET toegepast.

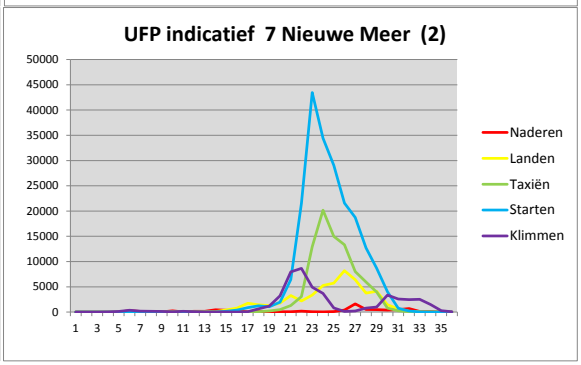

UFP indicatief 1 Oude Meer (1)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen

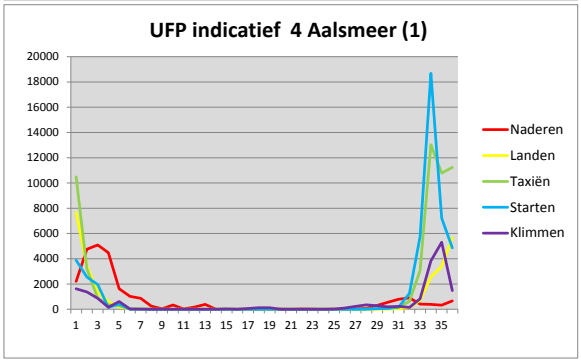

UFP indicatief 1 Oude Meer (2)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen

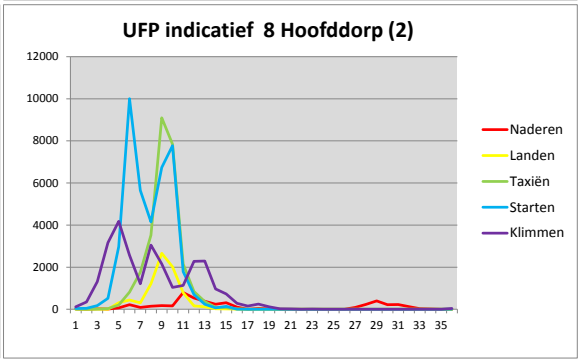

UFP indicatief 2 Ookmeer (1)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen

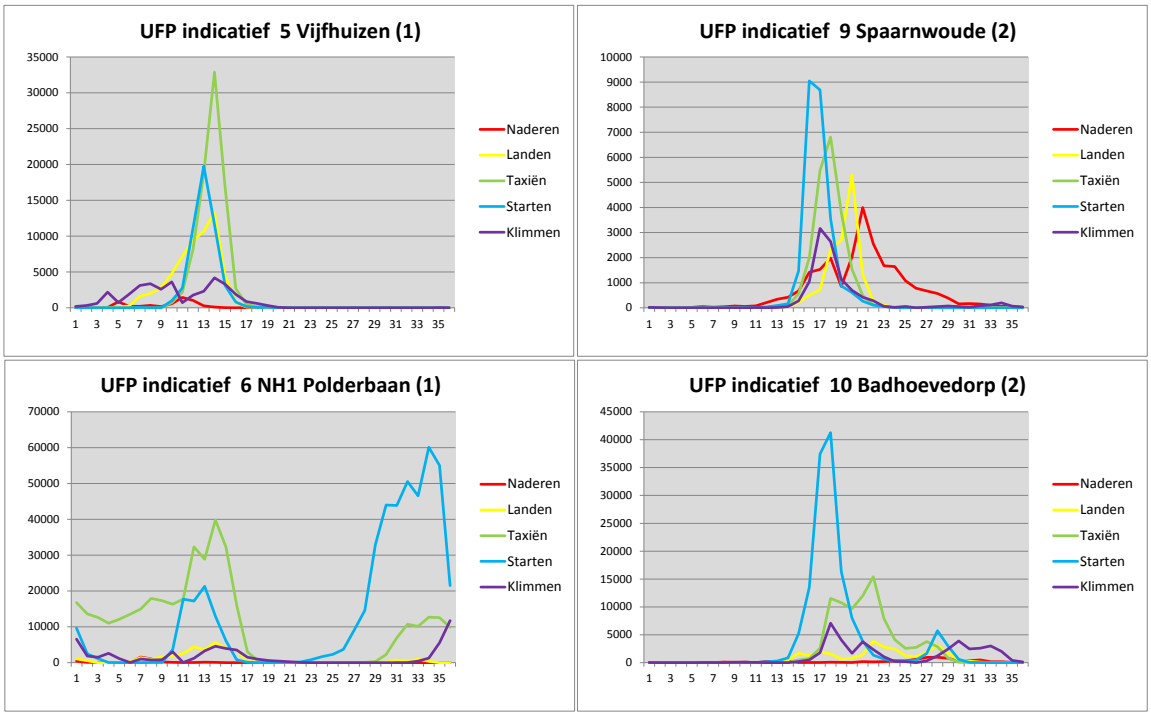

UFP indicatief 2 Ookmeer (2)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen


UFP indicatief 3 Amstelveen (1)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen


UFP indicatief 7 Nieuwe Meer (2)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen


UFP indicatief 4 Aalsmeer (1)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen

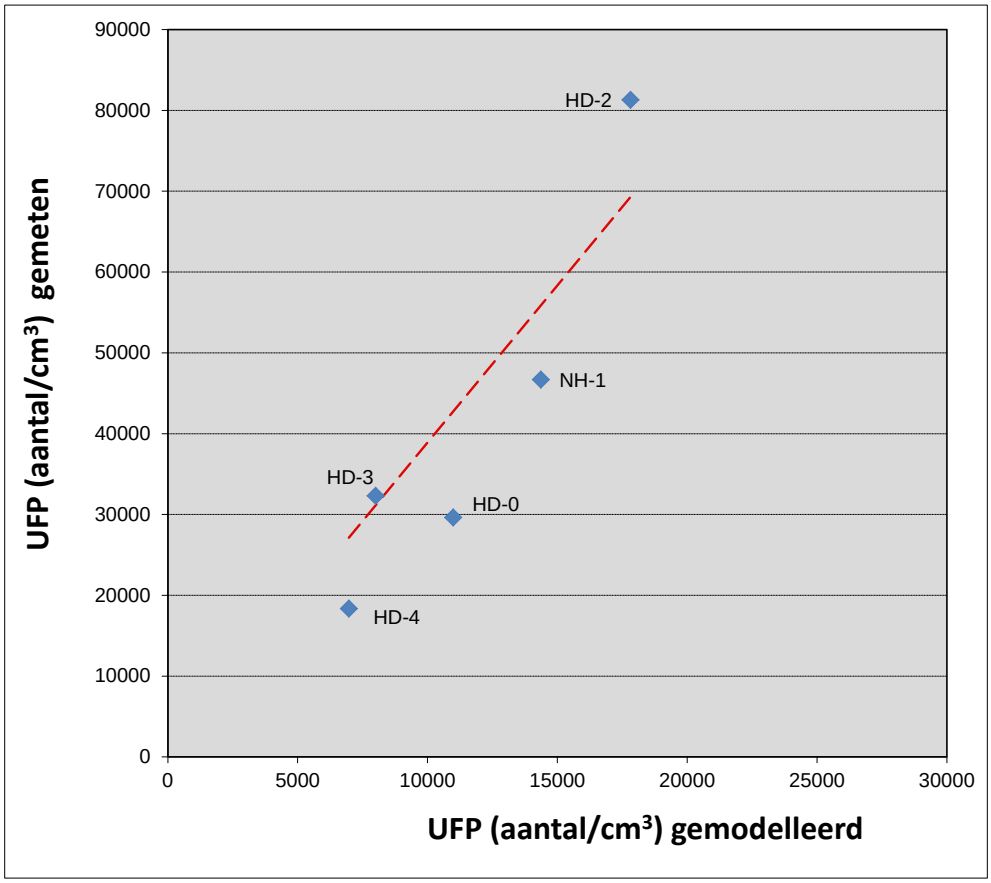

UFP indicatief 8 Hoofddorp (2)
Naderen
Landen
Taxiën
Starten
Klimmen



Figuur 27. Windrozen van berekende bijdragen aan de concentratie van indicatief ultrafijn stof (aantal/cm^3) per vluchtfase. Op de x-as de windsectoren (1 = 0-10 graden, 2 = 10-20 graden etc; 0 graden = noordenwind, 90 = oostenwind, 180 = zuidenwind, 270 = westenwind, 360 = noordenwind).
Titel: indicatorstof nr en naam van de meetlocatie (periode).
NB: de schalen op de y-as verschillen per locatie.
NB: op de berekende waarden is de schalingsfactor NIET toegepast.

6.2.2 *Taxiënde vliegtuigen*

Uit de opbouw van de berekende concentratie, zoals besproken in de vorige paragraaf, blijkt dat taxiënde vliegtuigen bij de indicatoren brandstof en indicatief ultrafijn stof een aanzienlijke bijdrage leveren aan de concentratie van ultrafijn stof. Bij de indicatoren voor fijn stof en NO_X is de relatieve bijdrage van taxiënde vliegtuigen veel kleiner. Om te onderzoeken of taxiënde vliegtuigen inderdaad aanzienlijk bijdragen, is gebruikgemaakt van de meetcampagne naar taxiënde vliegtuigen nabij de Polderbaan in mei/juni 2017. Het rekenmodel is voor die periode toegepast op de taxiënde vliegtuigen, gebruikmakend van de emissiefactoren voor taxiën. De resultaten zijn vergeleken met de gemeten bijdragen op de 5 meetlocaties. Figuur 28 toont de vergelijking voor indicatief ultrafijn stof als indicator in de berekening. De figuren voor de andere indicatoren zien er vergelijkbaar uit. Tabel 8 toont de met behulp van orthogonale regressie afgeleide schalingsfactor voor taxiën, in vergelijking met de over alle vluchtfasen gemiddeld afgeleide schalingsfactor.



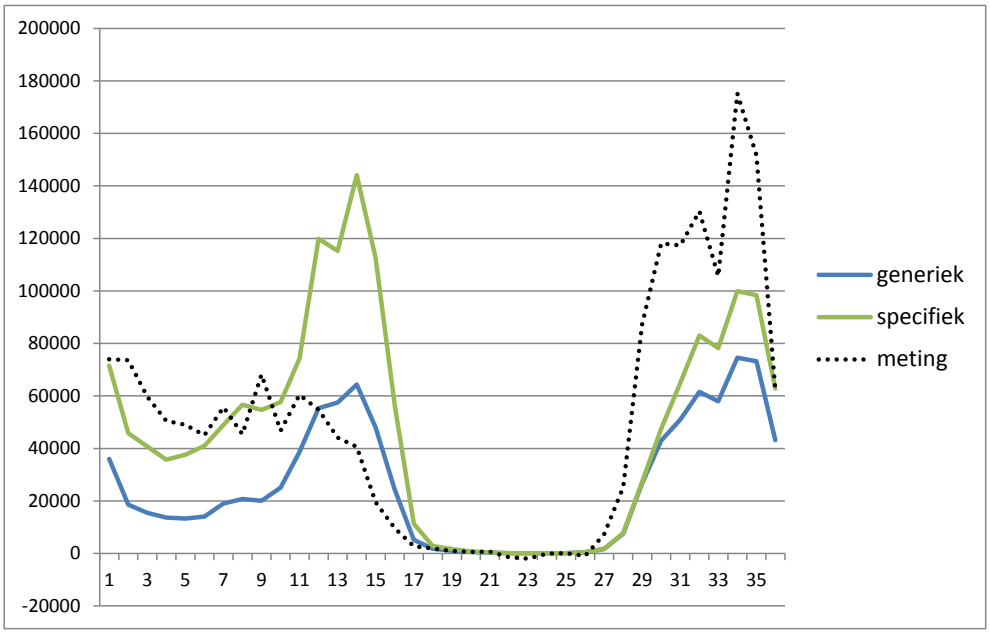
Figuur 28. Vergelijking gemiddeld berekende en gemeten bijdrage van taxiënde vliegtuigen op uren met wind uit de richting van de taxibaan aan ultrafijn stof. De berekening is gemaakt met de afgeleide schalingsfactor over alle vluchtfasen, voor de indicator indicatief ultrafijn stof.

Tabel 8. Schalingsfactor specifiek voor taxiën afgeleid uit de meetcampagne naar taxiënde vliegtuigen, in vergelijking met de generieke schalingsfactor over de totale bijdrage van alle vluchtfasen afgeleid uit de meetcampagne rondom Schiphol.

	Schalingsfactor specifiek voor taxiën afgeleid uit campagne	*Schalingsfactor generiek*	*Ratio (factor)*
PM_{10}	12.284.000	478.000	26
PM_x	56.454.000	356.000	159
NO_x	28.140	3.290	8,6
Brandstof	113.100	48.100	2,4
UFP-indicatief	3,89	1,17	3,3

De vergelijking suggereert dat er een hogere schalingsfactor voor taxiënde vliegtuigen zou moeten worden toegepast. Voor brandstof en indicatief ultrafijn stof zou de factor 2 tot 3 maal zo hoog moeten zijn; voor NO_x rond de 8 keer en voor fijn stof zelfs 26-159 keer (afhankelijk van de rekenmethodiek voor fijnstofemissies). Dit zou betekenen dat de emissies van taxiënde vliegtuigen een nog grotere bijdrage leveren aan de concentratie van ultrafijn stof dan bepaald met het huidige rekenmodel met indicator brandstof of indicatief ultrafijn stof.

Op basis van deze resultaten is geprobeerd om taxiënde vliegtuigen met de gevonden specifieke factor door te rekenen om de prestatie van het model voor toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling te verbeteren. Die verbetering is echter niet gevonden. Dit heeft ermee te maken dat taxiënde vliegtuigen vaak bij dezelfde windrichtingen als startende en landende vliegtuigen zorgen voor belasting op de meetlocaties. Verhoging van de schalingsfactor voor de ene vluchtfase leidt dan tot verlaging voor de andere, maar het totaal verandert er niet mee. Waar dat niet het geval is, bijvoorbeeld op locatie NH1 Polderbaan, bleek dat taxiënde vliegtuigen door toepassing van de specifieke schalingsfactor bij bepaalde windrichtingen (met taxiënde vliegtuigen op grotere afstand) soms juist voor te hoge concentratiebijdragen zorgden. Dit is te zien in Figuur 29.



Figuur 29. Windroos van de gemiddeld per windsector van 10 graden gemeten en berekende bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof (in aantal deeltjes per cm^3). De berekening is gedaan voor indicatief ultrafijn stof als indicator, met de generieke schalingsfactor in blauw en met de specifieke schalingsfactor voor taxiënde vliegtuigen in groen. Op de x-as de windsectoren (1 = 0-10 graden, 2 = 10-20 graden etc; 0 graden = noordenwind, 90 = oostenwind, 180 = zuidenwind, 270 = westenwind, 360 = noordenwind).

De overeenkomst verbetert voor de windrichtingen 0-110 graden (onder andere op het traject naar de Polderbaan waar ook de meetcampagne naar taxiënde vliegtuigen is uitgevoerd), maar verslechtert voor de windrichtingen 110-160 graden. Dat is meer in de richting van de andere start- en landingsbanen en Schiphol Plaza. De vliegtuigen taxiën dan op grotere afstand van de meetlocatie.
Het zou kunnen zijn dat de uit de meetcampagne afgeleide specifieke schalingsfactoren niet representatief zijn doordat het rekenmodel moeite heeft de processen die op korte afstand van de bron plaatsvinden te beschrijven. Het is ook de vraag wat de onzekerheden in de afgeleide factoren zijn. Ze zijn namelijk gebaseerd op een beperkt aantal uurlijkse waarnemingen. Voor het beter afleiden van emissiefactoren van afzonderlijke vluchtfasen met behulp van metingen nabij de bron wordt

aanbevolen om een aanpak zoals Johnson et al. (2008) te volgen, waarbij ook metingen van CO_2 op korte afstand boven- en benedenwinds van vliegtuigen worden uitgevoerd. De emissiefactoren van CO_2 kunnen direct uit het brandstofverbruik worden berekend. Het onderzoek van Mazaheri et al. (2009), op basis waarvan voor het huidige onderzoek indicatieve emissiefactoren zijn geschat, is op deze methode gebaseerd. Een dergelijke meetopzet voor verschillende vluchtfasen vergt echter een grote inspanning.

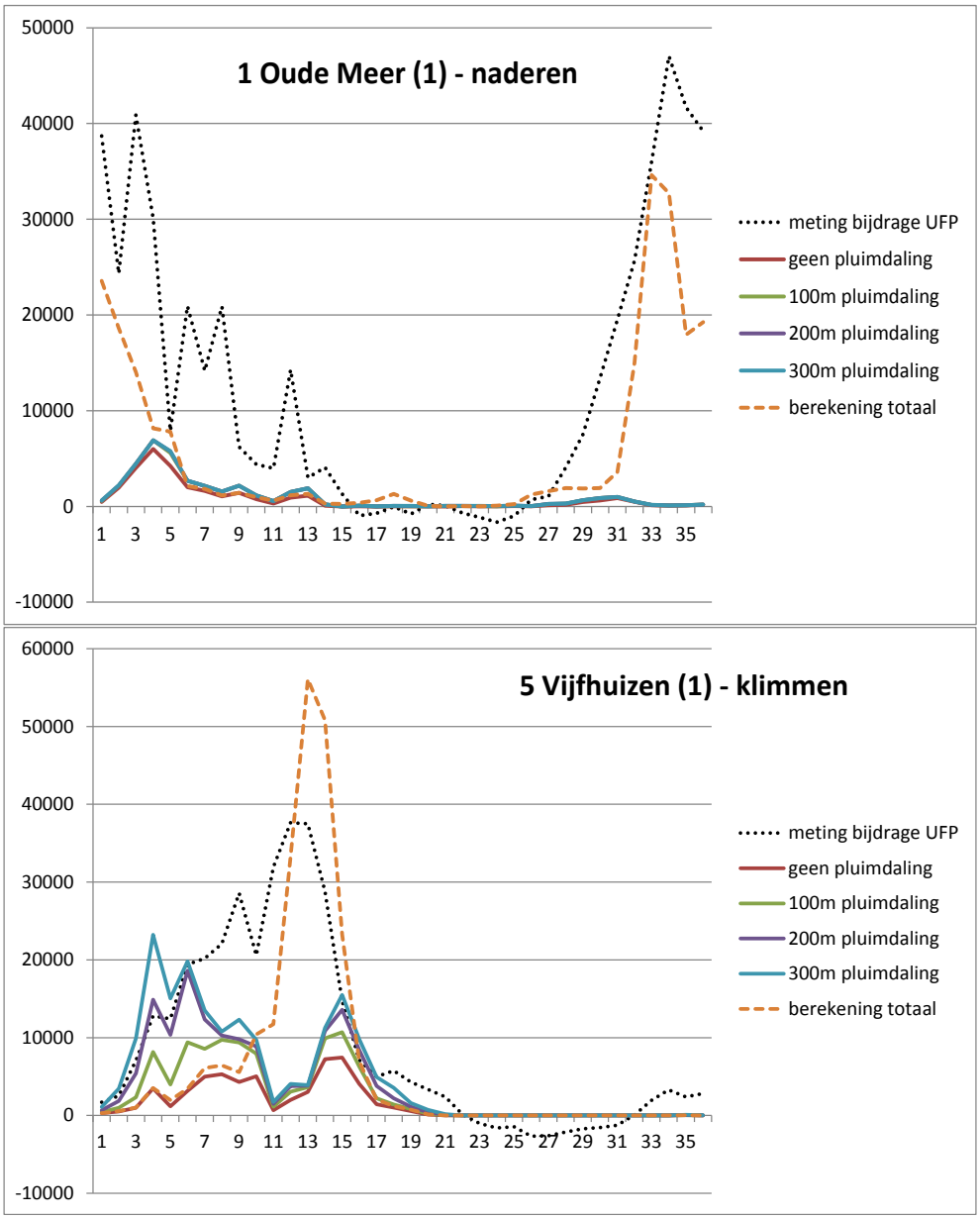
Uit de metingen is duidelijk geworden dat taxiënde vliegtuigen significant kunnen bijdragen aan de concentraties van ultrafijn stof op leefniveau. Taxiënde vliegtuigen bewegen zich met (aanzienlijk) minder vermogen voort, waardoor het brandstofverbruik en de emissie per tijdseenheid voor taxiën lager zijn dan voor startende, klimmende en naderende vliegtuigen. Maar de tijdsduur is veel groter. De totale emissie is de emissie gedurende een tijdseenheid maal de totale tijdsduur. Taxiënde vliegtuigen leggen in vergelijking met startende vliegtuigen een grote afstand af met een lage snelheid waardoor de tijdsduur groot is. Ook vinden de emissies plaats met minder toegevoegde turbulentie en dus minder geforceerde menging/verdunning. Dit kan verklaren waarom de emissies van taxiënde vliegtuigen significant kunnen bijdragen aan de concentratie van ultrafijn stof, ook al is de emissie per seconde veel lager dan die van startende vliegtuigen (zie Tabel 2).

6.2.3 Pluimdaling

Zoals in paragraaf 6.2.1 beschreven, lijkt het model de bijdrage van naderende vliegtuigen op locatie 1 (Oude Meer) te onderschatten. Dat geldt ook voor die van klimmende of naderende vliegtuigen op locatie 5 (Vijfhuizen). Dit kan te maken hebben met de manier waarop het model omgaat met pluimstijging dan wel -daling.
Standaard wordt gerekend met pluimstijging om het effect van de hoge temperatuur van de uitlaatgassen in rekening te brengen (zie Bijlage 2). Pluimstijging komt erop neer dat het emissiepunt in het model op een effectief grotere hoogte komt te liggen als gevolg van het stijgen van de lucht door de warmte die vrijkomt bij de emissie. De pluimstijging hangt in het rekenmodel af van de windsnelheid en de snelheid van het vliegtuig. Voor klimmende en naderende vliegtuigen is de effectieve pluimstijging in het rekenmodel niet groot.
Bij klimmende en naderende vliegtuigen kan er sprake zijn van een dalende beweging van de uitgestoten stoffen. Dit komt door de naar beneden gerichte uitstoot met hoge snelheid bij klimmende vliegtuigen of door luchtwervels met een neerwaartse beweging die achter klimmende en naderende vliegtuigen kunnen ontstaan. De turbulentie die deze processen veroorzaken zit als zodanig niet als fysisch proces in het rekenmodel.
In het model is het wel mogelijk om (als benadering) pluimdaling te veronderstellen. Dat wil zeggen dat op alle vluchten standaard een bepaalde hoogte wordt opgegeven waarmee de hoogte het emissiepunt wordt verlaagd (tot maximaal het aardoppervlak). De emissies worden in het model dan dichter bij de grond losgelaten, wat leidt tot hogere concentratiebijdragen. Met de mogelijkheden van effectieve pluimdaling is een gevoeligheidsanalyse gedaan.

In Figuur 30 is een illustratie gegeven van het effect van het toepassen van pluimdaling met verschillende hoogtes (100, 200 en 300 m). Dit is gedaan voor naderende vliegtuigen op locatie 1 (Oude Meer) en voor klimmende vliegtuigen op locatie 5 (Vijfhuizen). Het effect op de berekende bijdrage van naderende vliegtuigen is op locatie 1 zeer beperkt. Dat geldt ook voor andere locaties (niet getoond). Op de berekende bijdrage van klimmende vliegtuigen op locatie 5 is het effect aanzienlijk. Op de andere locaties (niet getoond) was het effect vaak iets kleiner, maar wel aanwezig.

Er is ook gekeken naar het effect op de periodegemiddelde concentratie. Op sommige locaties verbeterde de vergelijking tussen meting en berekening iets, op andere was sprake van een kleine verslechtering. De verschillen waren echter niet groot. De uitgeprobeerde hoogtes voor effectieve pluimdaling zijn betrekkelijk arbitrair. Er is geen informatie beschikbaar om de effectieve pluimdaling op basis van actuele vluchtgegevens te schatten. Om de processen ten aanzien van de pluimfysica echt goed te begrijpen en vervolgens ook goed te kunnen modelleren, is uitgebreid nader onderzoek nodig. Voor de huidige toepassing van het model is pluimdaling niet geïmplementeerd.

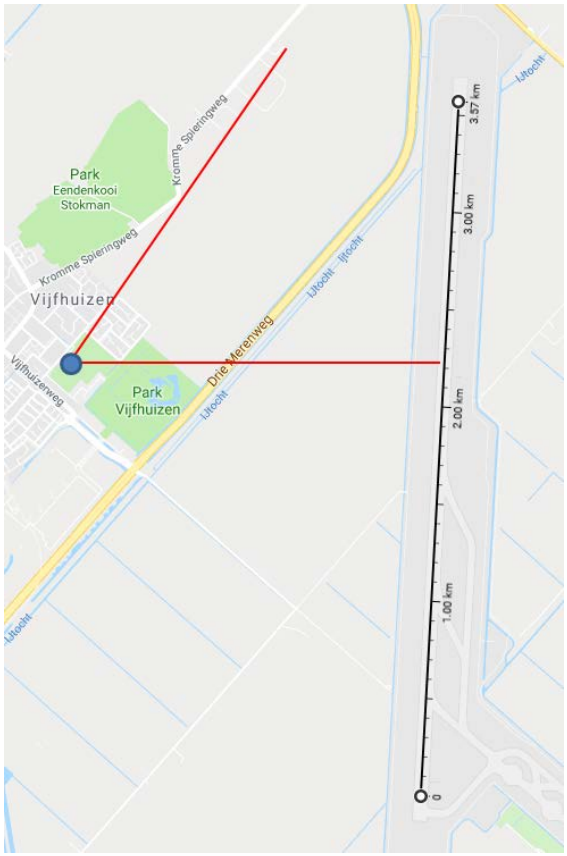


Figuur 30. Effect van pluimdaling op de berekende bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof (in aantal deeltjes per cm^3) van naderende vliegtuigen op locatie 1 Oude Meer (boven) en van klimmende vliegtuigen op locatie 5 Vijfhuizen (onder). De oranje gestreepte lijn geeft de totaal berekende bijdrage over alle vluchtfasen zonder toepassing van pluimdaling.

6.2.4 *Lengte van het starttraject*

Op locatie Vijfhuizen is bij wind uit richtingen tussen 30 en 90 graden sprake van een aanzienlijke onderschatting in de berekende bijdragen. Uit de windrozen van de berekende bijdrage in Figuur 26 of Figuur 27 uitgesplitst per vluchtfase, blijken bij deze windrichting zowel naderende, landende als klimmende vliegtuigen bij te dragen. Figuur 31 geeft de ligging van de meetlocatie ten opzichte van de Polderbaan aan. De 30-90 graden windsector wijst in de richting van het meest noordelijke deel van de startbaan. Het sterke vermoeden bestaat dat de onderschatting in de berekening deels te maken heeft met onzekerheid

in de aanname in het rekenmodel dat de vliegtuigen bij het starten na 2.000 m los komen van de grond en gaan klimmen. De precieze lengte van het starttraject zal voor elk (type) vliegtuig anders zijn en er zijn zeker verschillen te verwachten tussen lichte en zware exemplaren. Dat betekent dat er vliegtuigen zijn die in de praktijk langer op de startbaan verblijven. De grens van 2.000 m ligt ongeveer pal ten oosten van Vijfhuizen (bij 90 graden). Deze vliegtuigen dragen dan in de praktijk meer bij aan de concentratie van ultrafijn stof op de meetlocatie in Vijfhuizen bij wind uit richtingen 30-90 graden. Doordat het model geen rekening houdt met verschillen in vliegtuigtypen, kan het hier niet goed mee omgaan.

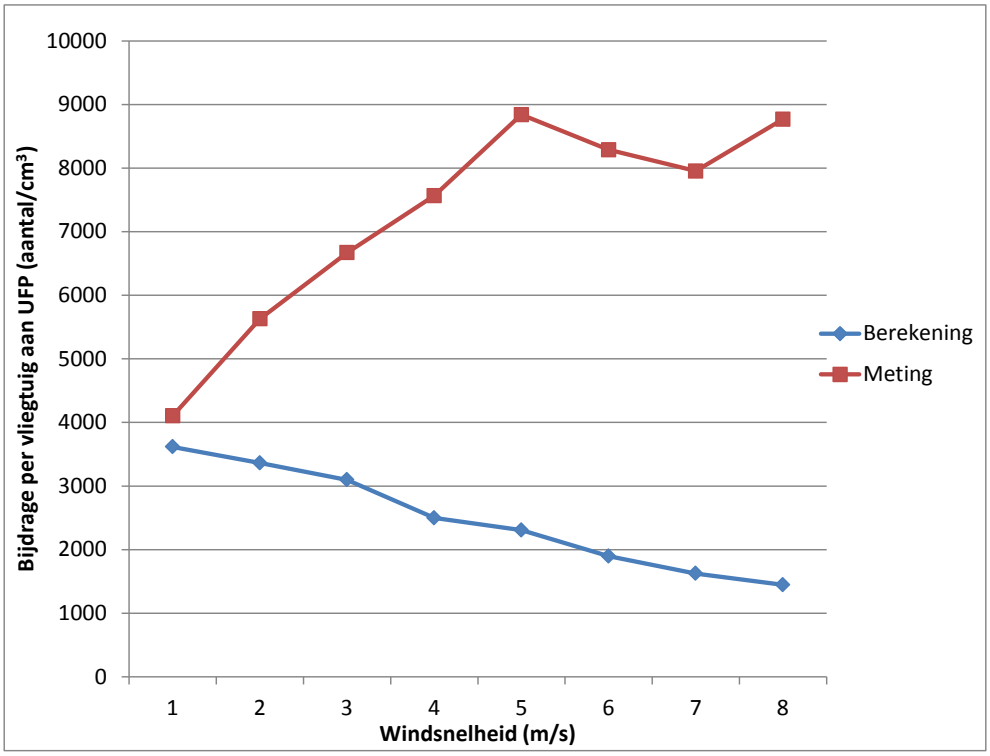


Figuur 31. Ligging meetlocatie 5 (Vijfhuizen), ten opzichte van de Polderbaan (met aangegeven lengte). De rode lijnen geven de windsector weer waarin de metingen op een veel hogere bijdrage van vliegtuigen duiden dan berekend.

6.2.5 *Dicht bij de bron*

Meetlocatie 6 (NH1 Polderbaan) ligt op slechts 400 m afstand van de plek waar vliegtuigen hun start beginnen op de Polderbaan. Bij wind uit noordnoordwestelijke richting ligt de locatie pal in de pluim van startende vliegtuigen. Zoals te zien in Figuur 23 in paragraaf 6.1.1, geeft het model voor de meeste indicatoren een (aanzienlijke) onderschatting van de bijdrage in deze windrichting. Wat hier een rol kan spelen is dat het uitlaatgas een hoge snelheid heeft waardoor het emissiepunt effectief naar achteren wordt verplaatst. Dit effect wordt niet in het model meegenomen.

Nader onderzoek naar de resultaten op deze locatie toont ook aan dat de hoogste bijdragen aan de concentratie van ultrafijn stof in de metingen voorkwamen bij hoge windsnelheid, terwijl het rekenmodel de hoogste bijdragen geeft bij lagere windsnelheid (zie Figuur 32). Dat laatste is kenmerkend voor verspreidingsmodellen: hoe hoger de windsnelheid, hoe groter de verdunning en hoe lager de berekende bijdrage.



Figuur 32. De gemiddelde uurgemiddelde bijdrage aan de concentratie van ultrafijn stof van startende vliegtuigen op uren met noordenwind (300-60 graden) genormaliseerd op het aantal vliegtuigen in dat uur, als functie van de windsnelheid.

Het vermoeden bestaat dat de hoge windsnelheid de invloed van pluimstijging bij de start onderdrukt (de pluim als het ware efficiënt afkoelt) waardoor de concentratie dicht bij de bron toeneemt. Toenemende concentraties bij toenemende windsnelheid dicht bij de bron zijn ook gevonden in studies bij het vliegveld van Los Angeles en andere vliegvelden (Hsu et al., 2013). Een vergelijkbaar effect kan overigens optreden bij klimmende en dalende vliegtuigen (Carslaw et al., 2006). Bij hoge windsnelheden worden de emissies in turbulente stromen meer naar beneden gebracht, waardoor de concentraties op leefniveau toenemen (zie paragraaf 6.2.3).

Met bovenstaande processen kan het rekenmodel in zijn huidige vorm niet omgaan. Voor toepassingen op korte afstand van de bron wordt aanbevolen nader onderzoek te doen naar aanpassingen aan het model of zelfs een ander type model. Dit vergt vermoedelijk een grote inspanning en voert voor het huidige onderzoek te ver.

7 Blootstellingskaarten

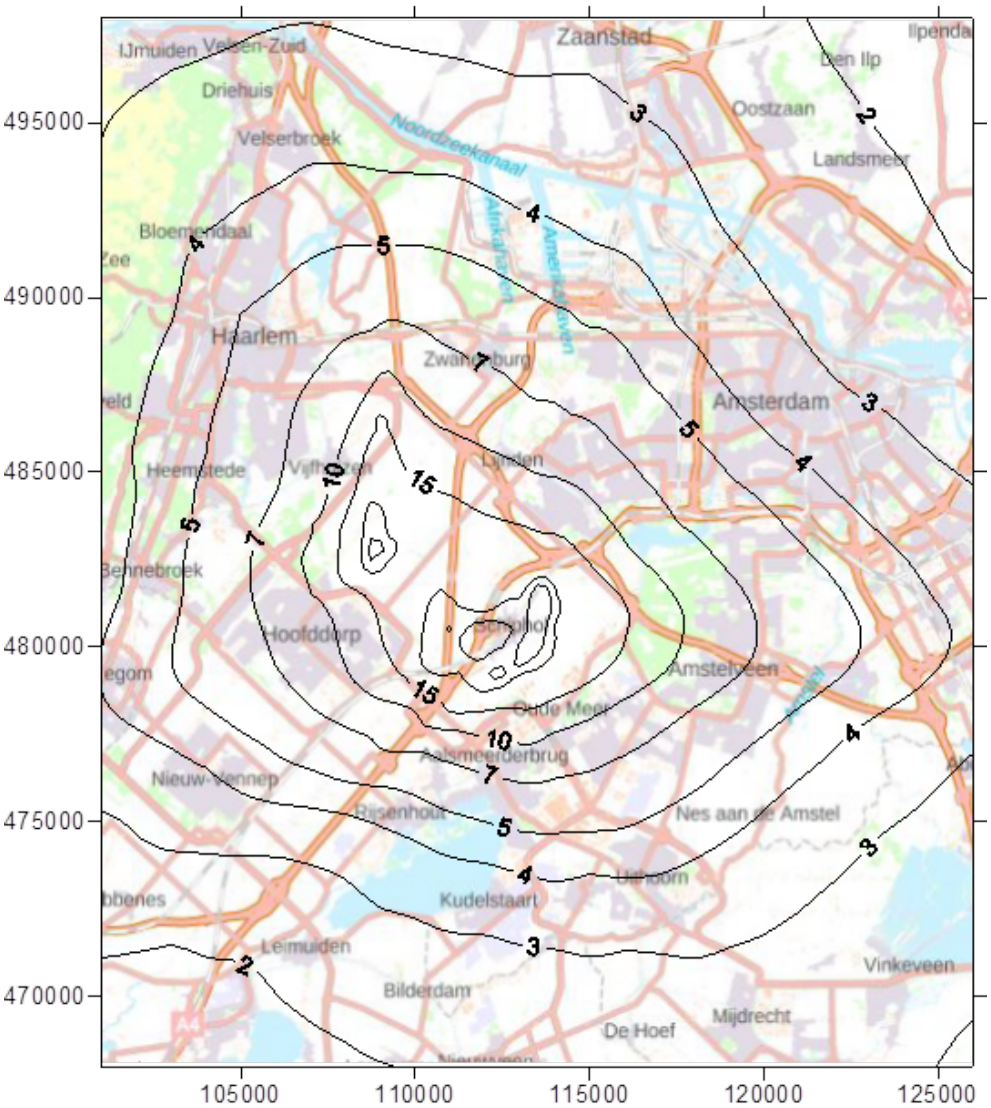
Voor het onderzoek naar gezondheidseffecten van langdurige blootstelling in Module II van het onderzoeksprogramma worden blootstellingskaarten gemaakt met behulp van het getoetste rekenmodel. Het rekenmodel gebruikt de indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof zoals weergegeven in Tabel 2 in paragraaf 2.2.4. Deze zijn afgeleid uit de studie van Mazaheri et al. (2009). De berekende resultaten worden vermenigvuldigd met een factor 1,17 om ze op de metingen te kalibreren. Het model maakt verder gebruik van werkelijke meteorologische waarnemingen en het werkelijke baangebruik.

Voor het gezondheidsonderzoek worden langdurige blootstellingskaarten gemaakt voor verschillende perioden. In dit rapport worden ter illustratie de jaargemiddelde blootstellingskaarten voor de jaren 2017 (zie Figuur 33) en 2018 (zie Figuur 34) gepresenteerd.

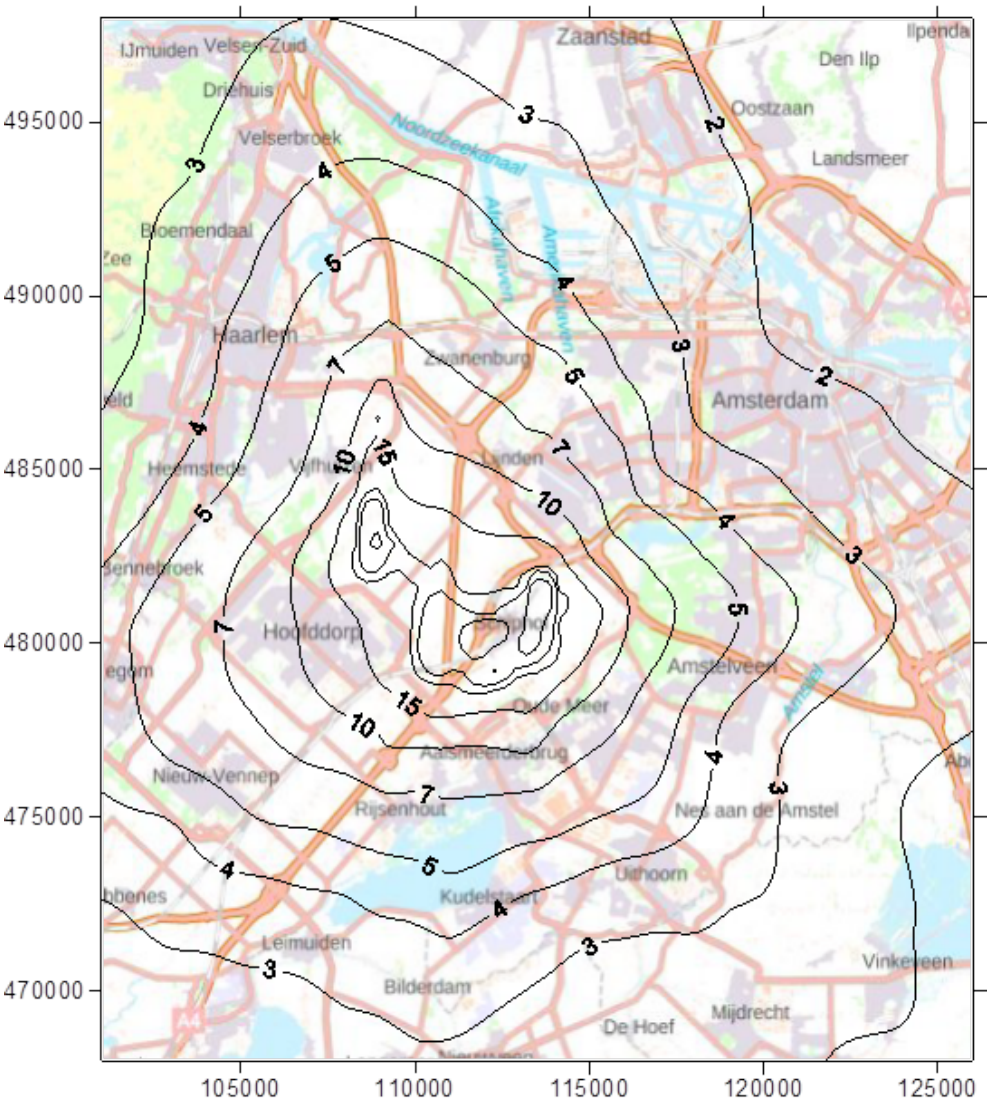
In het algemeen geldt dat de jaargemiddelde blootstelling als gevolg van vliegtuigemissies afneemt met de afstand tot Schiphol. Zoals in de figuren is te zien, verschillen het patroon en de hoogte van de contouren van jaar tot jaar. Dit is onder andere het gevolg van verschillen in weersomstandigheden en het baangebruik. In 2018 was er in vergelijking met 2017 veel meer wind uit het noorden en oosten. Het gevolg is dat de blootstelling ten zuidwesten van Schiphol in 2018 hoger was dan in 2017, en ten noordwesten wat lager.

De kaarten bevestigen het beeld uit de voorgaande verkennende studie (Bezemer et al., 2015), waarin een blootstellingskaart voor 2015 is gemaakt. Ook in die studie zijn de berekeningen geschaald naar metingen (die gedurende 1 tot 2 maanden zijn uitgevoerd). Een bijdrage van 3.000 (+/- 750)[26] deeltjes per cm^3 is mogelijk tot op een afstand van 15 km, en bij woonlocaties die het dichtst bij Schiphol zijn gelegen kan de jaargemiddelde bijdrage oplopen tot circa 15.000 (+/-4.000) deeltjes per cm^3.

[26] +/- is de gevonden onzekerheid van 25% (1σ). Naast deze onzekerheid speelt ook mee dat de absolute niveaus bepaald worden door de meetgegevens van de ingezette meetapparaten waarmee de berekeningen worden gekalibreerd (in dit geval type EPC-3783). Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang met het toegepaste type meetapparaat worden bezien.



Figuur 33. De jaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof in 2017 (in 1.000-tallen). NB: de berekende absolute niveaus hebben een onzekerheid van 15-25% (1σ). Naast deze onzekerheid speelt ook mee dat de absolute niveaus bepaald worden door de meetgegevens van de ingezette meetapparaten waarmee de berekeningen worden gekalibreerd (in dit geval type EPC-3783). Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang met het toegepaste type meetapparaat worden bezien.



Figuur 34. De jaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer op Schiphol aan de concentratie van ultrafijn stof in 2018 (in 1.000-tallen). NB: de berekende absolute niveaus hebben een onzekerheid van 15-25% (1σ). Naast deze onzekerheid speelt ook mee dat de absolute niveaus bepaald worden door de meetgegevens van de ingezette meetapparaten waarmee de berekeningen worden gekalibreerd (in dit geval type EPC-3783). Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang met het toegepaste type meetapparaat worden bezien.

8 Conclusies en aanbevelingen

Voor het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling aan ultrafijnstofconcentraties als gevolg van vliegtuigemissies in de omgeving van Schiphol, is een rekenmodel nodig om de blootstelling van omwonenden te bepalen. In dit onderzoek zijn meetcampagnes en modelberekeningen uitgevoerd om het rekenmodel Stacks+ te toetsen en te kalibreren op verschillende locaties rondom Schiphol, en waar mogelijk te verbeteren.

Voor luchthavenstudies, waaronder de m.e.r.-studies, levert het NLR gegevens aan over brandstofverbruik en emissiefactoren voor de verschillende vluchtfasen (taxiën, starten, klimmen, naderen, landen). Ook dit onderzoek maakt gebruik van de emissiegegevens van het NLR. Echter, het NLR beschikt niet over emissiefactoren voor ultrafijn stof. Om die reden is in het voorgaande verkennende onderzoek gebruikgemaakt van de emissiefactoren van fijn stof (PM_{10}) en zijn de berekende waarden van PM_{10} gekalibreerd met behulp van de metingen van ultrafijn stof. Daartoe is uit de vergelijking tussen de berekende concentratie van PM_{10} en de gemeten concentratie van ultrafijn stof een gemiddelde schalingsfactor afgeleid. Deze aanpak wordt in het huidige onderzoek ook gevolgd, maar naast PM_{10} worden ook andere indicatorstoffen gebruikt. Dat is gedaan omdat op voorhand niet bekend is welke indicator het meest representatief is voor ultrafijn stof. De andere indicatoren zijn NO_X, PM_X (een alternatieve methode van het NLR om emissies van fijn stof af te leiden), het brandstofverbruik en ‘indicatief’ ultrafijn stof. De laatste is gebaseerd op een meetcampagne in de buitenlucht nabij taxiënde, startende en landende vliegtuigen in Australië (Mazaheri et al., 2009). De andere gegevens zijn afkomstig van het NLR.

De conclusies over het rekenmodel luiden in het kort:

- De metingen duiden erop dat taxiënde vliegtuigen in belangrijke mate kunnen bijdragen aan de concentraties van ultrafijn stof op leefniveau. Er is besloten om taxiënde vliegtuigen als aparte bron in het rekenmodel mee te nemen.
- De metingen en berekeningen geven in grote lijnen bij dezelfde windrichtingen verhogingen in de concentratie van ultrafijn stof als gevolg van vliegtuigemissies. Het rekenmodel berekent echter voor bepaalde combinaties van locaties en windsectoren (en daarmee vluchtfasen) lagere of hogere bijdragen dan gemeten.
- Op korte afstand tot de bron beschrijft het rekenmodel de situatie minder goed.
- Het blijkt lastig om – naast het toevoegen van taxiënde vliegtuigen als bron en het toepassen van een andere indicator voor emissies dan PM_{10} – generieke aanpassingen in het model door te voeren om de overeenkomst tussen berekeningen en metingen wezenlijk te verbeteren. In alle gevallen zijn er zowel verbeteringen als verslechteringen te constateren in de overeenkomst tussen de gemeten en berekende concentratie

ultrafijn stof. Er is dan ook besloten om het rekenmodel niet verder aan te passen.

- De gevonden correlatiecoëfficiënten tussen berekening en meting zijn hoog. Voor de indicatoren brandstof en indicatief ultrafijn stof is de Pearson correlatiecoëfficiënt 0,9, ongeacht of het datapunt van locatie 6 (NH1 Polderbaan) wordt meegenomen of niet. Voor NO_X, PM_{10} en PM_X maakt het wel uit of datapunt 6 wordt meegenomen. De Pearson correlatiecoëfficiënten zijn tussen 0,76 (PM_{10} met locatie 6, PM_X zonder locatie 6) en 0,9 (PM_X en NO_X met locatie 6).
- Op basis van de gevonden goede overeenkomst tussen gemeten en berekende concentraties, met bijbehorende hoge correlatiecoëfficiënten, wordt geconcludeerd dat het rekenmodel geschikt is voor de toepassing in het gezondheidsonderzoek. Ondanks de onzekerheid in de berekende waarden voor individuele locaties, kan het rekenmodel voldoende onderscheid maken tussen locaties met lagere en locaties met hogere langdurige blootstelling. Dat is voor het gezondheidsonderzoek van belang.

Ten aanzien van de indicatorstoffen waarmee is gerekend wordt het volgende geconcludeerd:

- De keuze voor de indicatorstof is slechts beperkt bepalend voor de berekende halfjaargemiddelde bijdrage van vliegverkeer aan de concentratie van ultrafijn stof. Toch zijn er wel betere indicatoren dan PM_{10} als basis voor de emissieberekening. De indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof zoals afgeleid uit de studie van Mazaheri et al. (2009) voldoen daarvoor goed. De berekeningen op basis van deze indicator zijn sterk gecorreleerd met de metingen.
- Voor het berekende procentuele aandeel van de verschillende vluchtfasen aan de totale concentratiebijdrage is de keuze voor de indicatorstof wel degelijk bepalend. Zo geven brandstof en indicatief ultrafijn stof voor taxiënde vliegtuigen een aandeel dat vergelijkbaar is met het aandeel van startende vliegtuigen. Bij NO_X en PM_X hebben startende vliegtuigen verreweg het grootste aandeel. Bij PM_{10} hebben klimmende vliegtuigen een groter aandeel dan startende vliegtuigen.
- Voor alle indicatorstoffen zijn schalingsfactoren afgeleid. Het was niet mogelijk om per vluchtfase een schalingsfactor af te leiden. Daarom is er per indicator één schalingsfactor voor de som van de bijdragen van alle vluchtfasen bepaald:

Indicator	*Schalingsfactor*
PM_{10}	478.000
PM_X	356.000
NO_x	3.290
Brandstof	48.100
Indicatief ultrafijn stof	1,17

- De keuze is gemaakt om de uitbijtende locatie 6 (NH1 Polderbaan) niet mee te nemen bij de bepaling van de

schalingsfactor. Op korte afstand tot de bron beschrijft het rekenmodel de situatie minder goed. Locatie 6 ligt dicht op de bron en is daarmee niet representatief voor blootstellingniveaus voor het gezondheidsonderzoek. Als locatie 6 wel was meegenomen in de bepaling van de schalingsfactor, zouden de concentratieniveaus op wat grotere afstand (in de omliggende woonkernen) vermoedelijk worden overschat. Het is daardoor waarschijnlijk dat de blootstelling op korte afstand (enkele honderden meters) van vliegtuigen hoger is dan nu berekend. Dat kan wel tot een factor 2 schelen.

- De onzekerheden in de schalingsfactor liggen rond de 15-25%. Voor individuele locaties kan de onzekerheid echter groter zijn dan 25%.
- De gevonden schalingsfactor voor de indicatieve berekening van ultrafijn stof is 1,17. Dat wil zeggen dat de metingen gemiddeld een 17% hogere bijdrage aangeven dan berekend met behulp van de emissiefactoren van indicatief ultrafijn stof.
- De afgeleide schalingsfactor voor PM_{10} is ongeveer 20% hoger dan de factor afgeleid in het voorgaande verkennende onderzoek. Dit is een beperkt verschil, in aanmerking nemend dat er meerdere verschillen in aanpak zijn.[27]

Concluderend:
Het rekenmodel is ten opzichte van de versie toegepast in het voorgaande verkennende onderzoek in 2015 op twee gebieden verbeterd:

- De metingen duiden erop dat taxiënde vliegtuigen in belangrijke mate kunnen bijdragen aan de concentraties van ultrafijn stof. Taxiënde vliegtuigen zijn daarom als bron aan het model toegevoegd.
- De vergelijking van berekeningen met verschillende indicatorstoffen met metingen laten zien dat voor de blootstelling in deze studie beter kan worden gerekend met andere emissiefactoren dan die van PM_{10}. De indicatieve emissiefactoren voor ultrafijn stof voldoen daarvoor goed. Deze zijn voor dit onderzoek afgeleid uit een meetcampagne in de buitenlucht nabij taxiënde,[28] startende en landende vliegtuigen in Australië (Mazaheri et al., 2009). Er wordt op de afgeleide emissiefactoren (of achteraf op de berekende bijdragen) een schalingsfactor van 1,17 toegepast om de berekende waarden te kalibreren.

Voor de toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurige blootstelling is het rekenmodel in de huidige vorm geschikt. Het is voor dat doel niet noodzakelijk nu verdere inspanningen te verrichten om het model te verbeteren.

[27] Omdat er ook aanpassingen zijn gedaan aan het rekenmodel, betekent een hogere schalingsfactor niet per se een hoger absoluut niveau van de berekende bijdrage van vliegverkeer aan ultrafijn stof.

[28] Bij toepassing van de indicatieve emissiefactoren van ultrafijn stof dragen taxiënde vliegtuigen op de meeste locaties vergelijkbaar bij als startende vliegtuigen. Taxiënde vliegtuigen bewegen zich met (aanzienlijk) minder vermogen voort, waardoor het brandstofverbruik en de emissie per tijdseenheid voor taxiën lager is dan voor startende vliegtuigen. Maar omdat taxiën langer duurt dan starten, kan de bijdrage van taxiënde vliegtuigen aan de concentratie van ultrafijn stof toch vergelijkbaar zijn.

Als voorbeeld van de blootstellingskaarten die in het gezondheidsonderzoek gebruikt gaan worden zijn de jaargemiddelde blootstellingskaarten voor de jaren 2017 en 2018 gemaakt. Deze maken duidelijk dat het patroon en de hoogte van de contouren van jaar tot jaar variëren. Dit is onder andere het gevolg van verschillen in weersomstandigheden en het baangebruik. De kaarten bevestigen het beeld uit de voorgaande verkennende studie (Bezemer et al., 2015), waarin een blootstellingskaart voor 2015 is gemaakt. Een bijdrage van 3.000 (+/-750) deeltjes per cm^3 is mogelijk tot op een afstand van 15 km, en bij woonlocaties die het dichtst bij Schiphol zijn gelegen kan de jaargemiddelde bijdrage oplopen tot circa 15.000 (+/- 4.000) deeltjes per cm^3.[29]

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Het huidige onderzoek laat zien dat de bijdrage van taxiënde vliegtuigen aanzienlijk kan zijn. Wanneer er voor eventuele toekomstige studies (voor andere doelen) meer kwantitatief inzicht is gewenst in de bijdrage van de verschillende vluchtfasen aan de concentratie van ultrafijn stof, is een uitgebreider meetprogramma nodig. Om per vluchtfase emissiefactoren af te leiden wordt aanbevolen een aanpak zoals Johnson et al. (2008) te volgen, waarbij ook metingen van CO_2 worden uitgevoerd. De emissiefactoren van CO_2 kunnen direct uit het brandstofverbruik worden berekend. Het onderzoek van Mazaheri et al. (2009), op basis waarvan voor het huidige onderzoek indicatieve emissiefactoren zijn geschat, is op deze methode gebaseerd. Daarbij wordt opgemerkt dat het niet eenvoudig is om een dergelijk meetprogramma voor alle vluchtfasen succesvol uit te voeren. Om individuele vliegtuigen te kunnen bemonsteren is een locatie nodig waar vliegtuigen passeren met voldoende tussentijd en zonder andere storende bronnen. Tegelijkertijd moet het een vliegveld zijn met een representatieve vloot aan vliegtuigtypen. Het is daarnaast zeer lastig om met behulp van metingen in het veld de vluchtfasen klimmen en naderen beter in beeld te brengen. Wel zou door middel van metingen dicht bij de bron meer inzicht kunnen ontstaan in de bijdragen van startende, landende en taxiënde vliegtuigen.
- Op een aantal locaties gaven de metingen aanleiding te veronderstellen dat klimmende en dalende vliegtuigen dicht bij Schiphol meer bijdragen aan de concentratie aan de grond dan het huidige rekenmodel aangeeft. Ook heeft het huidige rekenmodel vermoedelijk moeite de werkelijkheid dicht bij de bron goed te beschrijven. Hierbij spelen processen als pluimstijging, pluimdaling en de impuls bij startende vliegtuigen een rol. Wanneer er voor eventuele toekomstige studies (voor andere doelen) behoefte is om deze processen beter te kunnen modelleren, is uitgebreid

[29] De genoemde absolute waarden zijn onzeker. Naast de gevonden onzekerheid in de schalingsfactor en daarmee in het berekende niveau van 15-25% (1σ), speelt ook mee dat de absolute niveaus bepaald worden door de meetgegevens van de ingezette meetapparaten waarmee de berekeningen worden gekalibreerd. Daarom moeten de absolute niveaus altijd in samenhang met het toegepaste type meetapparaat worden bezien.

nader onderzoek nodig. Mogelijk is hiervoor een ander type rekenmodel, of combinatie daarmee, nodig.

9 Referenties

Bezemer et al., 2015. Nader verkennend onderzoek ultrafijnstof rond Schiphol. RIVM Rapport 2015-0110.

Carslaw, D.C, S.D. Beevers, K. Ropkins, M.C. Bell, 2006. Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. Atm. Env. Vol. 40, No. 28, 09.2006, p. 5424-5434.

Duyzer, J. en M. Moerman, 2018. Ultrafijn stof rond Rotterdam The Hague Airport. TNO rapport 2018 R10714.

Hsu, Hsiao-Hsien et al., 2013. Contributions of aircraft arrivals and departures to ultrafine particle counts near Los Angeles International Airport. Science of the Total Environment 444 (2013) 347-355.

Janssen et al., 2016. Verkenning gezondheidsrisico's ultrafijnstof luchtvaart rond Schiphol en voorstel vervolgonderzoek. RIVM Briefrapport 2016-0050.

Johnson G.R., M. Mazaheri, Z.D. Ristovski, L. Morawska, 2008. A Plume Capture Technique for the Remote Characterization of Aircraft Engine Emissions. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 4850-4856.

Keuken M.P., M. Moerman, P. Zandveld, J.S. Henzing, G. Hoek, 2015. Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). Atm. Env. Vol. 104, p 132-142.

Kugele, A., F. Jelinek, R. Gaffal, 2005. Aircraft particulate matter estimation through all phases of flight. Eurocontrol EEC/SEE/2005/0014.

Mazaheri, M., G.R. Johnson, L. Morawska, 2009. Particle and Gaseous Emissions from Commercial Aircraft at Each Stage of the Landing and Takeoff Cycle. Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 441-446.

NLR, 2008. Luchtkwaliteit, klimaatgassen en luchtverontreinigende emissies luchthaven Schiphol. Voor MER 'Verder werken aan de toekomst van Schiphol en de regio voor de middellange termijn'. Rapport NLR-CR-2008-242.

NLR, 2016. Luchtkwaliteit en stikstofdepositie rond luchthaven Schiphol. Voor MER NNHS. Rapport NLR-CR-2016-110.

Stacey, B. 2019. Measurement of ultrafine particles at airports: A review. Atmospheric Environment 198, 463-477.

Stettler M. E. J., A. M. Boies, A. Petzold, S. R. H. Barrett, 2013. Global Civil Aviation Black Carbon Emissions. Environ. Sci. Technol., 2013, 47 (18), p 10397-10404.

Wayson, R.L, 2005. A First Order Approximation (FOA) for Particulate Matter, Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP), Working Group 2 (WG2)-Operations, Task Group 4 (TG4)-Airport Air Quality, 4th meeting, Athens, 8-10 June 2005.

Winther, M., U. Kousgaard, T. Ellermann, A. Massling, J. Klenø Nøjgaard, M. Ketzel, 2015. Emissions of NOx, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport. Atm. Env. Vol. 100, p 218-229.

Bijlage 1 – Rapport over de metingen

Het rapport ‘Ultrafijnstofmetingen rond Schiphol – ruim één jaar aan metingen’ is opgesteld door TNO en beschrijft de metingen uitgevoerd in het kader van dit onderzoek.

Het rapport is als apart document bij het rapport beschikbaar.

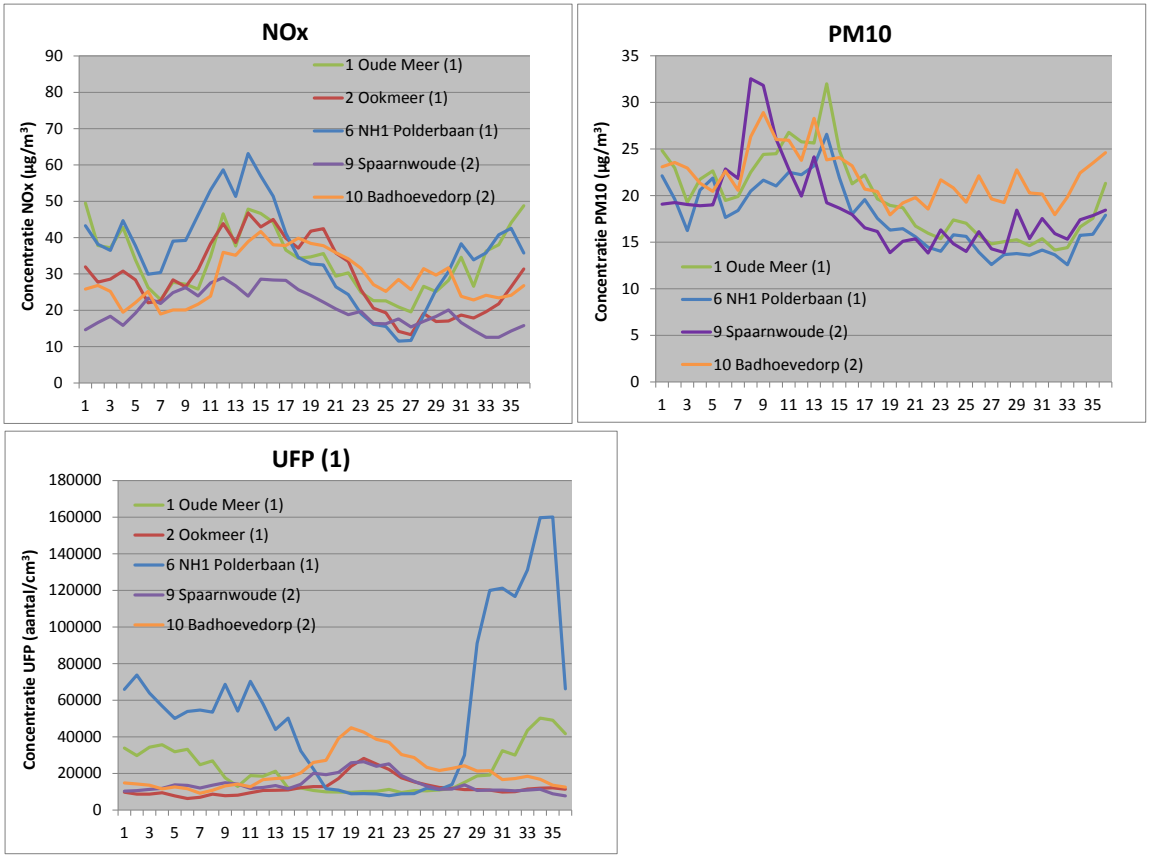
Bijlage 2 – Rapport over het rekenmodel

Het rapport ‘Ultra fine particles (UFP) rond Schiphol: methodiek beschrijving’ (Rapport 2019R001) is opgesteld door Erbrink Stacks Consult en beschrijft het rekenmodel toegepast in het kader van dit onderzoek.

Het rapport is als apart document bij het rapport beschikbaar.

Bijlage 3 – Metingen van NO_X en PM_{10}

Op een aantal meetlocaties in beheer van GGD Amsterdam zijn gelijktijdig ook metingen van NO_X en PM_{10} uitgevoerd (in het kader van andere programma's). De gemeten concentraties van NO_X, PM_{10} en ultrafijn stof op deze locaties zijn in windrozen met elkaar vergeleken. In Figuur 35 zijn de windrozen weergegeven.



Figuur 35. Windrozen van de gemiddeld per windsector van 10 graden gemeten concentratie van NO_X, PM_{10} en ultrafijn stof op locaties 6, 1, 2, 9 en 10 (in periodes 1 of 2).
Op de x-as de windsectoren (1 = 0-10 graden, 2 = 10-20 graden etc; 0 graden = noordenwind, 90 = oostenwind, 180 = zuidenwind, 270 = westenwind, 360 = noordenwind).

De patronen voor ultrafijn stof variëren sterk tussen de locaties, in elk geval tussen de locaties die aan weerszijden van Schiphol liggen. Ze zijn duidelijk gerelateerd aan de vliegtuigemissies.
Het valt op dat dat voor NO_X en PM_{10} anders is. Deze variëren veel minder sterk tot nauwelijks per locatie. Ook zijn geen tot weinig verhogingen zichtbaar bij windsectoren waar dat voor ultrafijn stof wel het geval is. De concentraties van PM_{10} en in iets mindere mate van NO_X hangen voor een groot deel af van grootschalige processen. De hoogste concentraties komen voor bij windrichtingen uit het oosten en zuiden wanneer lucht over het continent wordt aangevoerd. De bijdrage van

vliegtuigemissies aan de concentraties van NO_X en PM_{10} is op het totaal slechts beperkt en daardoor niet tot nauwelijks uit de metingen af te leiden.

Opgemerkt wordt dat wanneer NO_X-metingen direct boven- en benedenwinds van de bron (bijvoorbeeld startende vliegtuigen) zouden worden uitgevoerd, de bijdrage van vliegtuigen waarschijnlijk wel te meten is. Voor PM_{10} is de bijdrage dusdanig klein, dat dit waarschijnlijk ook in een dergelijke opzet niet kan worden gemeten.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag