





Vliegtuigbijdrage aan de concentraties ultrafijnstof

Metingen bij Rotterdam The Hague Airport

Vliegtuigbijdrage aan de concentraties ultrafijnstof

Metingen bij Rotterdam The Hague Airport

Kwaliteitstoets	<i>Paraaf</i> 	Autorisatie	<i>Paraaf</i> 
Naam	Bart Wester Senior Luchtspecialist	Naam	S. Davison
		Functie	Team manager

Auteur(s) : E. Özdemir, S. Willers, S. van den Elshout
 Afdeling : Reguleren, Advies en Omgeving
 Team : Team Lucht en Energie (2)
 Documentnummer : 22343374
 Datum : 11-2-2023
 Foto omslag : https://rijkswaterstaat.imgix.net/vliegtuig-met-bord-a13-op-voorgond_tcm26-313944.jpg?crop=entropy

Inhoud

Publiekssamenvatting	4
1 Aanleiding	8
2 Introductie	9
2.1 (Inter-)nationaal onderzoek naar UFP van vliegverkeer	9
2.2 Eerdere UFP-onderzoeken in de Rijnmond	9
2.3 Opzet huidige studie	10
2.3.1 Onderzoekslocatie	10
2.3.2 Bepaling vliegactiviteit- en achtergrondconcentraties	10
2.3.3 Windrichtingen	11
2.4 Onderzoeksvragen	12
3 Resultaten	13
3.1 Weersomstandigheden en vliegbewegingen	13
3.2 Modelresultaten: achtergrond en vliegtuigbijdragen	13
3.2.1 Achtergronden	13
3.2.2 Windroos van gemeten min berekende UFP-concentraties	14
3.2.3 Vliegtuigbijdrage bij verschillende vliegactiviteiten	15
3.3 UFP-meetresultaten en RTHA-bijdrage	17
3.3.1 Meetresultaten	17
3.3.2 UFP-metingen en -berekeningen – alle omstandigheden	17
3.3.3 Windrichtinganalyse	18
3.3.4 Generalisatie naar een jaargemiddelde	20
3.4 Welke vliegactiviteit veroorzaakt grootste UFP-bijdrage?	21
4 Discussie	22
4.1 Vliegtuigbijdrage aan UFP op basis van twee meetcampagnes	22
4.2 DCMR & TNO meting versus ESC berekening	22
4.3 UFP-vorming (nucleatie) in de middag - invloed van zonlicht	23
5 Conclusies	25
6 Literatuur	26
7 Bijlagen	27
7.1 UFP-metingen tijdens en voor de corona lockdown	27
7.2 Materiaal en Methoden	28
7.2.1 Metingen: periode en locatie	28
7.2.2 Data-analyses	28
7.2.3 Bepaling achtergrond – ‘random forest’ model	29
7.2.4 Analyse windhoeken: de vliegtuigbijdrage	30
7.2.5 Overzicht gebruikte data en apparatuur	30
7.3 Nucleatie onder invloed van licht/temperatuur	31

Publiekssamenvatting

Onderzoek in het kort

DCMR heeft op verzoek van gemeente Rotterdam en betrokken burgers een onderzoek gedaan naar de bijdrage van vliegveld RTHA aan de concentraties ultrafijnstof (UFP) in de lucht. Dit onderzoek is een vervolg op een eerder onderzoek door TNO (in 2017) waarbij in het laagseizoen is gemeten. Het verzoek was dit keer expliciet in het hoogseizoen te meten. Na een aantal jaren met corona lockdowns met beperkt vliegverkeer was de luchthaven in de zomer van 2022 weer volop in gebruik. In die periode is een aantal weken gemeten.

DCMR heeft in het TNO onderzoek in 2017 geparticipeerd met metingen aan de Veldkersweg. Dat is een afstand die vrij typisch is voor blootstelling rondom de luchthaven en in het verlengde van de startbaan en daarmee geschikt voor metingen. Ook in 2022 is aan de Veldkersweg gemeten.

Uit dit zomeronderzoek blijkt dat RTHA een duidelijk herkenbare bron van UFP is, maar niet de enige en niet de grootste bron. Op basis van deze metingen in de zomer is de **jaargemiddelde** bijdrage van het vliegveld aan de UFP-concentratie circa 8% van de totale UFP-concentratie. De gemeten vliegtuigbijdrage is daarmee iets lager dan in de eerdere TNO studie. Dat komt niet door een lagere vliegtuigbijdrage maar door een sterkere bijdrage van andere bronnen/oorzaken.

De resultaten bevestigen het TNO onderzoek: TNO moest vanuit een wintersituatie een jaargemiddelde schatten en kwam op 15% vliegveldbijdrage. DCMR schat nu vanuit een zomer situatie de bijdrage en komt op 8%. Zonder dat er een goed gemeten jaargemiddelde beschikbaar is concluderen we daarom dat de bijdrage 8 - 15% is. Totdat er in Nederland structurelere metingen zijn waaruit een jaargemiddelde achtergrond te bepalen is, is deze bandbreedte de beste schatting.

UFP achtergrondinformatie (bron: RIVM).

RIVM heeft in januari 2023 informatie over UFP samengevat¹. Een paar aspecten op rij:

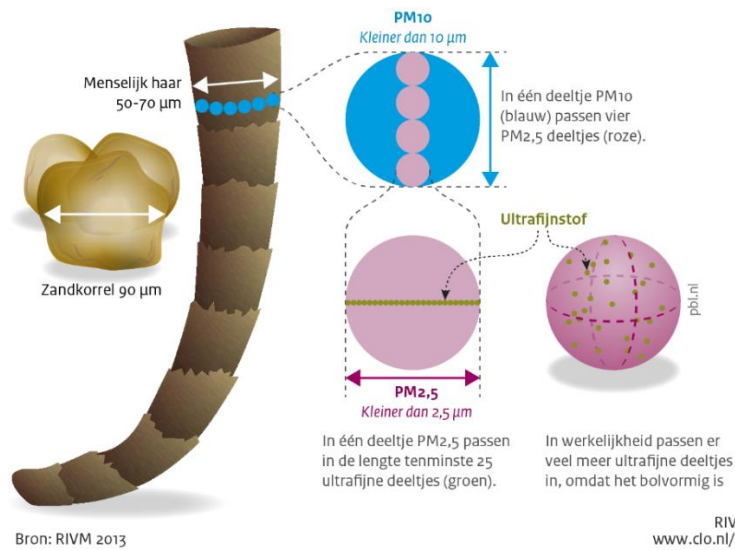
“Ultrafijnstof (UFP) zijn hele kleine deeltjes die in de lucht zweven. Het wordt steeds duidelijker dat deze deeltjes effecten kunnen hebben op de gezondheid. Voor ultrafijnstof bestaan nog geen normen. Hiervoor is eerst meer kennis nodig.

Gezondheid

Blootstelling aan UFP in de lucht kan effect hebben op de gezondheid van zowel kinderen als volwassenen. Kortdurende blootstelling kan leiden tot het optreden van nadelige effecten op het hart- en vaatstelsel en op de luchtwegen. Er zijn aanwijzingen dat langdurige blootstelling het risico op hart- en vaatandoeningen vergroot. Ook zijn er aanwijzingen voor een verhoogde kans op het ontstaan van luchtwegaandoeningen en voor een negatieve invloed op de groei van de foetus. Deze effecten zijn onafhankelijk van de invloed van blootstelling aan andere luchtverontreinigende stoffen en geluid.

¹ Voor meer informatie: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0623-ultrafijn-stof>

Afmeting van ultrafijnstof ten opzichte van PM_{2,5} en PM₁₀



Normen

Er zijn nog geen normen voor UFP en is er geen nationaal beleid om de concentratie UFP of blootstelling aan UFP te verminderen. Veel maatregelen, die al genomen worden om de uitstoot van en blootstelling aan fijnstof en stikstofdioxide te verminderen, dragen ook bij aan een afname van UFP. Daarnaast zijn aanvullende maatregelen mogelijk, zoals het gebruik van kerosine met een lager zwavelgehalte in de luchtvaart, het verdere gebruik van roetfilters bij en de elektrificatie van voertuigen, en het verminderen van de uitstoot bij productieprocessen in de industrie.

Onzekerheid

Let op bij het vergelijken van absolute deeltjesaantallen, de gerapporteerde aantallen deeltjes zijn sterk afhankelijk van de ondergrens van de gebruikte apparatuur. In verschillende studies kan verschillende apparatuur zijn gebruikt."

DCMR Onderzoek RTHA 2022

Gelet op de onzekerheden geeft DCMR er de voorkeur aan zo min mogelijk over absolute aantallen deeltjes te spreken. Die zijn afhankelijk van het soort meetinstrument dat gebruikt wordt en van de definitie van UFP die gehanteerd wordt. In dit rapport en in de eerdere DCMR-studie concentreren we ons daarom op de **bijdrage** die bronnen geven **aan de totale concentratie**. Ook die bijdrage kent onzekerheden, maar die is veel kleiner dan de onzekerheden in absolute aantallen en het geeft wel inzicht in de belangrijkste bronnen die UFP uitstoten.

Metingen Veldkersweg

UFP-concentraties

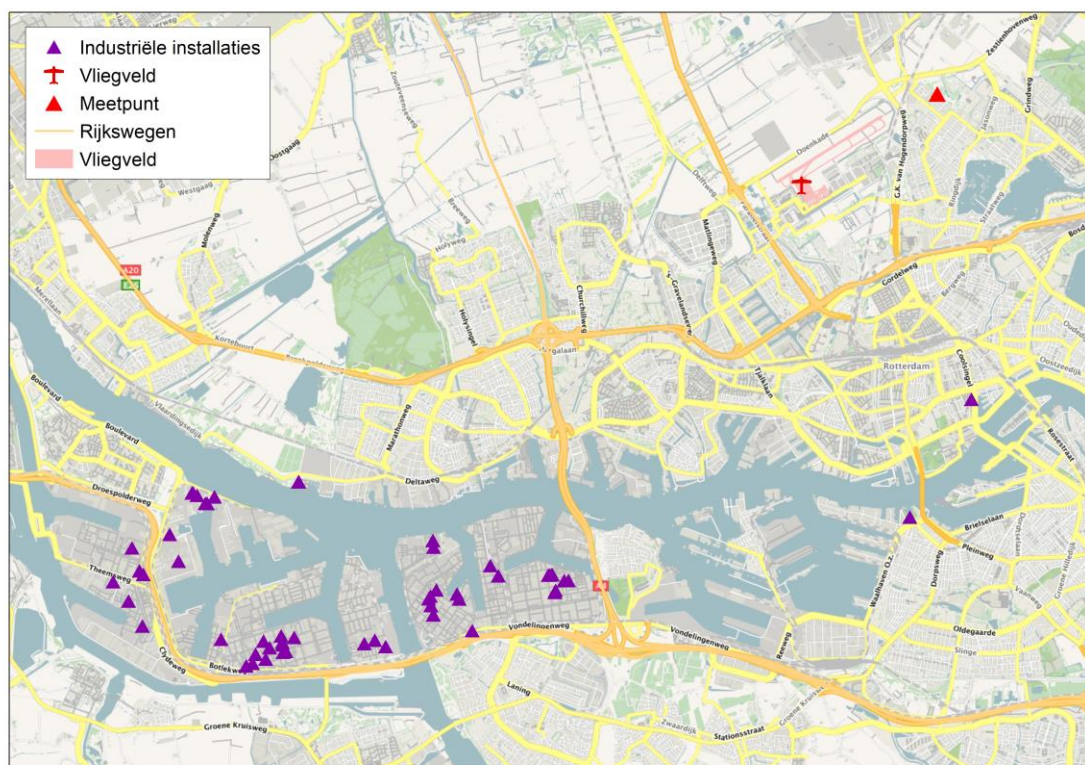
Tijdens de meetperiode 4 juli 2022 tot en met 15 augustus 2022 was de uurgemiddelde UFP-concentratie circa 10000 deeltjes/cm³ met een minimum van 1000 deeltjes/cm³ en een maximum van 83000 deeltjes/cm³.

Effect vliegtuigen

In de zomer van 2022 zijn metingen gedaan bij vliegveld RTHA aan de Veldkersweg, in het verlengde van de startbaan. Zie Figuur 1. De meetcampagne is een vervolg op de wintermetingen die TNO (en DCMR) in 2017 deden. In de zomer is er meer vliegverkeer en de

meetcampagne moest de vraag beantwoorden of de jaargemiddelde schatting van TNO op basis van de wintermetingen geen onderschatting was. **Dat is niet het geval.**

Volgens deze studie is de bijdrage van RTHA aan de lokale UFP-concentraties ter hoogte van de Veldkersweg jaargemiddeld 8%. Het feit dat hier een lager percentage wordt gevonden dan in de TNO-studie komt doordat tijdens deze zomermeetperiode andere bronnen ook sterker waren dan tijdens de wintermetingen van TNO. Als percentage van het totaal komt de vliegtuigbijdrage van RTHA op de totale UFP-concentraties er nu dus iets lager uit.



Figuur 1. Meetpunt Veldkersweg ten opzichte van vliegveld RTHA. In de figuur zijn ook industriële installaties met een SO₂- en mogelijke UFP-emissie weergegeven, en de rijkswegen.

Beide studies hebben last van het feit dat er weinig tot geen structurele UFP-metingen in Nederland zijn. TNO moest vanuit de winter een jaargemiddelde achtergrond schatten, DCMR doet dat nu vanuit de zomer. Beide schattingen hebben dus een afwijking maar bij gebrek aan langdurige metingen is dit het beste wat er momenteel is. **Gebaseerd op beide studies is de gemiddelde UFP-vliegtuigbijdrage aan de UFP-concentraties ter hoogte van de Veldkersweg dus ca 8-15% van het jaargemiddelde.**

Kortdurend kan de bijdrage van vliegverkeer veel hoger zijn. De zeer hoge pieken worden vooral dichtbij de startbaan gezien (in de TNO studie). Op de afstand van de Veldkersweg is er al enige verdunning en afvlakking van de UFP-concentraties opgetreden. **Vlak na een start of landing is de gemiddelde UFP-vliegtuigbijdrage aan de Veldkersweg tot circa 35% van de heersende concentratie dit duurt dan 10 tot 15 minuten en dat gebeurt regelmatig in het drukke seizoen.** De hoogste uurgemiddelde vliegtuigbijdrage werd bij een druk uur om 7 uur 's ochtends gemeten en bedroeg 21000 deeltjes/cm³ (de uurgemiddelde bijdrage tijdens de meetperiode was circa 1200 deeltjes/cm³).

De metingen zijn gedaan aan de Veldkersweg. Dat is een gunstige locatie voor de metingen (in het verlengde van de startbaan) en ongeveer op een afstand waarop ook de bebouwing begint.

De metingen zijn dus een goede indicatie voor de blootstelling aan UFP van vliegverkeer. Voor de bebouwing ingeklemd tussen rijksweg A13 en RTHA is de blootstelling waarschijnlijk 2x hoger dan die aan de Veldkersweg. Aan de andere kant heeft de A13 daar ook meer invloed.

Om een indruk te krijgen hoe de gemeten bijdrage aan de Veldkersweg zich verhoudt tot andere locaties kan gekeken worden naar de kaart in Figuur 14.

Deze studie richt zich op de (grotere) straalvliegtuigen. Dat was ook het geval in de TNO studie. Uit het milieueffectrapportage (MER) uit 2015 blijkt dat met name de helikopters een flinke bijdrage leveren aan de uitstoot van fijnstof door de luchthaven. Of helikopters in vergelijkbare mate UFP uitstoten is niet bekend en in de Rotterdamse studies ook niet onderzocht.

Overige bronnen

Bekende andere bronnen zijn het verkeer en in de Rijnmond, de industrie en de zeevaart. Verkeer is ook rondom de luchthaven belangrijk, er is een komen en gaan van passagiers en goederen, en bij de luchthaven is een bedrijventerrein. UFP-deeltjes worden deels direct uitgestoten en deels gevormd in de lucht. Zwaveldioxide (SO₂) speelt hierbij een rol. Vliegvelden zijn een bron van UFP omdat de vliegtuigbrandstof verhoudingsgewijs veel zwavel bevat. In de Rijnmond zijn meer en grotere zwavelbronnen dan enkel het vliegveld. Die dragen ook bij aan de UFP-concentraties. De vorming van UFP onder invloed van zonlicht (dus vanaf de late ochtend tot het eind van de middag) was in deze DCMR-metingen goed zichtbaar. De bron die in de huidige metingen duidelijk opviel was het Botlekgebied. De industrie en raffinage leveren dus (zeker op zonnige dagen) een grote bijdrage aan de UFP-concentraties. **Het effect van de industrie is aan de Veldkersweg (en elders in de regio) tijdens de meetperiode groter dan dat van RTHA.**

Omdat er 's winters minder van deze deeltjesvorming door zonlicht is, kwam de schatting van de vliegtuigbijdrage in de TNO-studie mogelijk hoger uit dan in deze studie: het resultaat is daarom een iets lagere procentuele bijdrage.

Conclusie

Jaargemiddeld is de bijdrage van RTHA aan de UFP-concentraties duidelijk herkenbaar. Tegelijkertijd is ook duidelijk dat andere bronnen een grote bijdrage aan de UFP-concentraties leveren. Wat betreft RTHA bevestigt deze studie de eerdere studie van TNO: luchtvaart is een duidelijk herkenbare maar niet de belangrijkste bron. Bij TNO was sprake van 'verder weg gelegen bronnen die met name 's nachts duidelijk zichtbaar waren' (als er niet gevlogen werd). In deze studie is duidelijk geworden wat die bronnen zoal zijn: de Botlek, en dat ze ook overdag herkenbaar zijn.

Deze metingen zijn qua grootteorde ook in lijn met de emissie-inventarisatie die DCMR heeft laten maken in 2022: circa 6% van de UFP-uitstoot in de gehele Rijnmond is afkomstig van vliegverkeer.

Aanbeveling

Het feit dat vrijwel nergens structureel langdurig UFP wordt gemeten maakt het interpreteren van korte meetcampagnes zoals die van TNO en van DCMR ingewikkeld. Deze en andere studies laten zien dat het seizoen een flinke invloed kan hebben. Het Rijk, via het RIVM, overweegt om in overleg met de Nederlandse meetnetten de opzet van landelijke metingen, om meer inzicht te krijgen in het voorkomen van UFP. Dat was ook een advies van de Gezondheidsraad en dat gaat in de toekomst meer inzicht geven.

Afhankelijk van de nationale meetsamenwerking kan DCMR een meetreeks starten op meetpunt Schiedam die alle seizoenen beslaat om tot een achtergrondmeting in de Rijnmond te komen.

De kennis over de UFP-uitstoot van de niet-straalvliegtuigen is zeer beperkt. Op RTHA is verhoudingsgewijs veel van die activiteit; meer kennis hierover is wenselijk.

1 Aanleiding

Inwoners rondom het vliegveld Rotterdam The Hague Airport (hierna RTHA) zijn bezorgd over de mogelijke gezondheidseffecten door blootstelling aan ultrafijnstof (hierna: UFP) van vliegverkeer.

TNO heeft eerder onderzoek gedaan naar de bijdrage van vliegverkeer aan de heersende UFP-concentraties in de Rijnmond. Dit was een onderzoek in opdracht van RTHA in het laagseizoen. DCMR heeft hiervoor een meetinstrument beschikbaar gesteld [1]. In dat onderzoek in 2018 werd aan de Veldkersweg een jaargemiddelde bijdrage van het vliegverkeer gevonden van circa 15% van de UFP-concentratie. Dat wil zeggen dat het merendeel van het UFP afkomstig was van andere bronnen. In de betrokken omgeving bleef er een wens om ook metingen te doen in een periode waarin veel gevlogen wordt. Die toezegging is in 2019 door de gemeente Rotterdam gedaan.

In het zomerseizoen daarna was Nederland in de greep van de corona lockdown: met eerst geen en vervolgens sterk verminderd vliegverkeer. Het heeft tot 2022 geduurd eer de meettoezegging in een periode met veel vliegverkeer kon worden uitgevoerd.

In de coronaperiode kwam van verschillende partijen het verzoek om een zogenoemde '0-meting'. De gedachte was dat daarmee een 'vliegtuigloze' achtergrondwaarde kon worden vastgesteld die op een later moment met een belaste waarde kon worden vergeleken. Hoewel de gedachtegang begrijpelijk is, is het methodologisch geen goede aanpak. Er zijn veel factoren die de luchtkwaliteit bepalen en die allemaal in de tijd variëren. Bovendien was er door de lockdowns ook minder wegverkeer: een andere bekende bron van UFP. Zie ook bijlage 7.1.

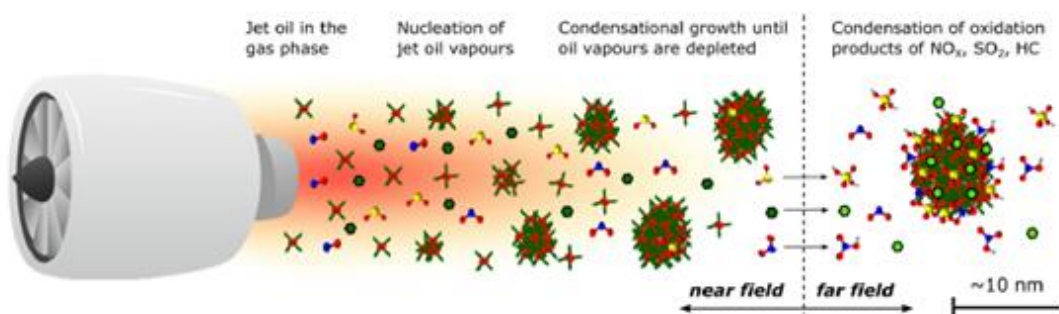
In deze studie wordt de totale concentratie UFP als gevolg van uitstoot van alle bronnen gemeten. Met statistische technieken wordt een onderscheid gemaakt tussen achtergrond UFP (alle bronnen behalve vliegverkeer) en de vliegtuigbijdrage aan UFP. Die zogenoemde achtergrond is berekend met een model dat gemaakt is door alle meetminuten tijdens het onderzoek te gebruiken waarbij er geen vliegtuigactiviteit was. Het verschil van de meting van de totale UFP-concentratie en de berekende achtergrond concentratie is een indicatie voor de vliegtuigbijdrage.

2 Introductie

2.1 (Inter-)nationaal onderzoek naar UFP van vliegverkeer

RIVM heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar de UFP-concentraties rondom Schiphol [2]. Ook internationaal is bekend dat UFP, in tegenstelling tot veel andere vormen van luchtvervuiling, in de omgeving van luchthavens verhoogd is. In 2022 is het onderzoeksprogramma van het RIVM naar de gezondheidseffecten door blootstelling aan UFP van vliegverkeer afgerond [3]. Uit dat onderzoek blijkt dat, gecorrigeerd voor de effecten van andere luchtvervuiling en geluid, “er *indicatief* bewijs is voor een effect van blootstelling aan UFP [...] en hart- en vaataandoeningen”.² Het relatieve belang van de blootstelling aan UFP ten opzichte van de bekendere blootstelling aan fijnstof en stikstofdioxide is niet door het RIVM onderzocht.

Uit de literatuur is bekend dat UFP-deeltjes afkomstig van vliegverkeer voornamelijk bestaan uit deeltjes met een diameter kleiner dan 30 nanometer [3, 4, 5]. Deze deeltjes worden vermoedelijk gevormd uit zwaveldruppeltjes in vliegtuigbrandstof [3]. Mogelijk speelt ook de hoeveelheid smeerolie in de straalmotoren een rol bij de vorming van UFP [6]. De UFP-deeltjes en druppeltjes ontstaan uit heet uitlaatgas dat eenmaal buiten de motor condenseert, aan elkaar plakt en zo deeltjes vormt. Zie Figuur 2.



Figuur 2. Illustratie van UFP-vorming uit de straalmotoren direct na verbranding van kerosine en smeerolie. Overgenomen uit [6]

Het feit dat juist die allerkleinste deeltjes niet stabiel zijn, maakt metingen en het vergelijken van metingen lastig. Zeer dichtbij de bron zullen er immers zeer veel, zeer kleine deeltjes zijn. Op enige afstand zijn die in aantal afgenomen en in omvang iets gegroeid (maar nog steeds UFP) zijn. Verder verschilt UFP-metapparatuur onderling (bijvoorbeeld de mate waarin de kleinste deeltjes gedetecteerd kunnen worden) waardoor resultaten slecht vergelijkbaar zijn.

2.2 Eerdere UFP-onderzoeken in de Rijnmond

Dit vliegveldonderzoek is een vervolg op eerdere onderzoeken naar UFP in de Rijnmond.

- Met name ervaring uit het vliegveldonderzoek van TNO [1] in het najaar van 2017 is gebruikt en de resultaten van de twee studies zullen worden vergeleken.
- Ook in UFP-metingen in 2019 door DCMR zijn verhoogde UFP-concentraties in de richting van het RTHA waargenomen [7]. De verhoging was te zien aan de allerkleinste deeltjes die karakteristiek zijn voor vliegverkeer.
- In 2022 is een overzichtsstudie naar UFP-metingen door DCMR gepubliceerd [7]. Bij die studie hoorde een UFP-emissie-inventarisatie van TNO (in opdracht van DCMR) [8]. Uit de emissie-inventarisatie blijkt dat vliegveld RTHA circa 6% van de totale UFP-uitstoot in de

² Zie pagina 59 in [3]. Voor enkele gezondheidsaspecten vond RIVM indicatief bewijs, voor andere effecten onvoldoende of geen. Zie hoofdstuk 5 (pagina 57 en verder in [3]).

Rijnmond vertegenwoordigt. Uit modelberekeningen met die emissies blijkt inderdaad dat in de directe omgeving van RTHA verhoogde UFP-concentraties zijn [7].

- Naar aanleiding van de eerste studie rondom Schiphol heeft het Rijk aan ESC [9] een opdracht gegeven om, gebruikmakend van de bij Schiphol opgedane kennis, een berekening te maken van de UFP-bijdrage van de regionale vliegvelden. Uit de eerder genoemde TNO-studie [1] bleek dat de resultaten van de metingen weliswaar dezelfde grootteorde hadden, maar lager uitkwamen dan die van de ESC-berekeningen. Zie de discussie in 4.2.

In de eerste overzichtsstudie van DCMR naar UFP in de Rijnmond [7] is gekozen om niet over absolute aantallen UFP te spreken maar om de bijdrage van verschillende bronnen aan het totaal te bepalen. In deze studie ligt de focus ook op het bepalen van de vliegtuigbijdrage. **Als in dit rapport toch deeltjesaantallen genoemd worden, gaat het om indicatieve meetcijfers.**

2.3 Opzet huidige studie

2.3.1 Onderzoekslocatie

Er is in dit onderzoek gekozen voor metingen aan de Veldkersweg ten noordoosten van het vliegveld. Hiervoor is gekozen omdat:

- die meetlocatie ook in het TNO onderzoek gebruikt werd;
- het op enige afstand van het vliegveld ligt waardoor het meest dynamische (instabiele) deel van de deeltjesvorming en -verwijdering al heeft plaatsgevonden;
- het typisch een afstand is waarop in Rotterdam de bewoning rondom het vliegveld begint en dus **kenmerkend is voor de blootstelling van mensen** aan UFP afkomstig van RTHA.

2.3.2 Bepaling vliegactiviteit- en achtergrondconcentraties

De huidige studie is uitgevoerd met één meetinstrument geplaatst aan de Veldkersweg bij de geluidmeetpost. Uit de TNO-studie [1] kon een aantal ervaringen worden gebruikt:

- Bij een start of landing was de vliegtuigbijdrage bij de Veldkersweg tot circa 20 minuten daarna zichtbaar als de wind van de startbaan naar het meetpunt stond.
- De drukte was zodanig laag dat tussen twee vliegactiviteiten de UFP-vliegtuigpiek weer afnam zodat op die momenten het achtergrondniveau kon worden bepaald.
- Door naar de windrichtingen te kijken en naar de tijden dat de luchthaven operationeel was kon een selectie van de waarnemingen worden toegeschreven aan vliegactiviteit.
- Vliegtuigen stoten over het algemeen kleine UFP-deeltjes uit (10-30 nm) en wegverkeer gemiddeld wat grotere: TNO heeft die kleine deeltjes als vliegtuigbijdrage geclassificeerd.
- TNO heeft zich beperkt tot de bijdrage van de straalvliegtuigen en de helikopters en kleine propellervluchten buiten beschouwing gelaten. Dat is in deze studie ook gedaan.

In deze studie is een aantal zaken anders gedaan:

- Uit [6] en [7] blijkt dat de kleinste deeltjes weliswaar typisch zijn voor vliegtuigen maar niet uniek. Bijvoorbeeld in vrijwel dezelfde richting van de startbaan ligt op enige afstand Pernis/Botlek met industrie die eveneens zeer kleine UFP-deeltjes uitstoot. In deze studie wordt steeds naar alle UFP-deeltjes gekeken.
- Er wordt preciezer naar de windhoek gekeken waarin de industrie zich bevindt en waar vliegactiviteit zichtbaar is om beide bronsoorten te kunnen scheiden. Daarnaast worden de tijdstippen van vliegactiviteiten gekoppeld aan de meetcijfers (hier tot 15 minuten na een gebeurtenis). Zie secties 7.2.4 en 3.3.3.
- De meetperiode voor deze studie is van 4 juli 2022 tot en met 15 augustus 2022. De eerdere TNO-metingen waren in het laagseizoen. In de zomerperiode is de vliegactiviteit zodanig hoog dat vliegactiviteiten elkaar snel opvolgen en dat de bijbehorende UFP-pieken in elkaar overlopen. Ook in de 15-minutenperiode na een vliegactiviteit zijn er regelmatig twee, en soms meer vliegactiviteiten (start, landing). De achtergrondbijdrage-UFP is in deze studie dan ook niet tussen twee vliegactiviteiten bepaald, maar met een modelberekening. Zie sectie 7.2.2.

2.3.3 Windrichtingen

Zuidwestenwind is de meest voorkomende windrichting in Nederland en dat is daarom ook de oriëntatie van de startbaan van RTHA. Vliegtuigen starten en landen zoveel als mogelijk tegen de heersende windrichting in. Dat was ook het geval in de studie periode. In mindere mate wordt er naar het noordoosten gestart en geland. Of een vliegactiviteit een verhoging van de UFP-concentraties veroorzaakt op het meetpunt wordt dus bepaald **door de combinatie van de vliegactiviteit en windrichting op het moment van de activiteit**.

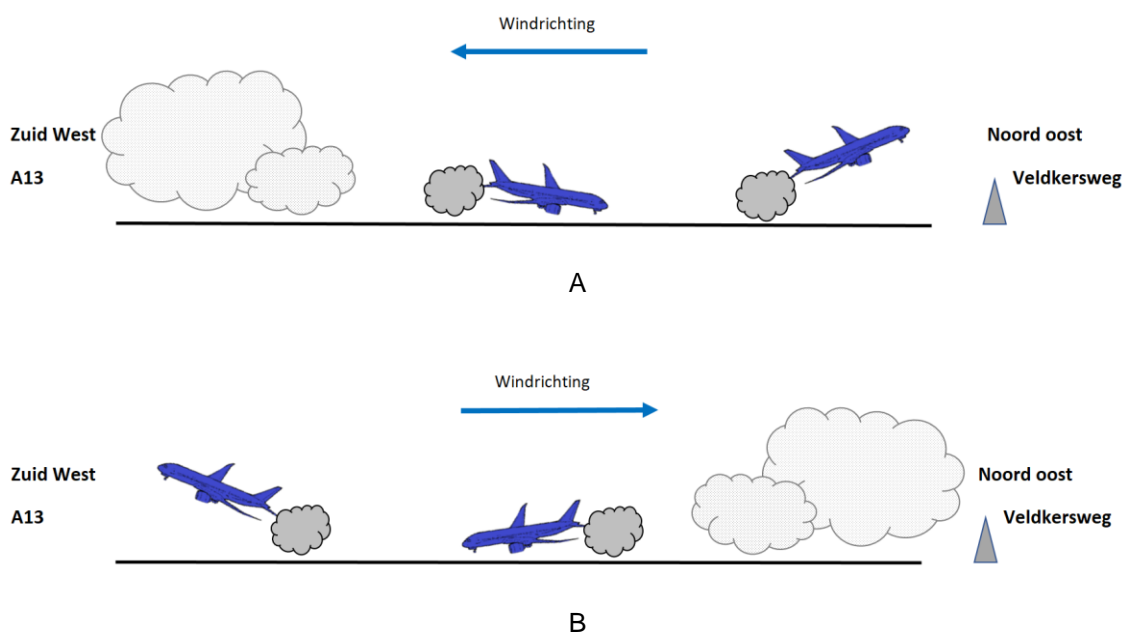
Intuïtief kan verwacht worden dat het meetpunt belast wordt als de vliegtuigen over het meetpunt heen vliegen maar dat is een misvatting. De vliegtuigen bevinden zich dan op een hoogte van 100 tot 300 meter en die uitstoot is op grondniveau amper merkbaar. De vliegtuigbijdrage aan de totale UFP-concentraties wordt vooral bepaald door de horizontale verspreiding van de UFP-uitstoot vlak boven de startbaan naar het meetpunt.

De situaties die in de praktijk voorkomen worden weergegeven onderstaande figuren.

- Bovenste figuur (3A): bij wind uit het noordoosten zullen vliegtuigen overwegend starten en landen in de richting van het noordoosten (richting meetpunt Veldkersweg). De uitstoot bij starten en landen (boven de startbaan, op geringe hoogte) zal door de wind verplaatst en verdund worden en richting het zuidwesten worden gestuurd (richting rijksweg A13). Die uitstoot bereikt het meetpunt dus niet. Alleen op het moment dat de vliegtuigen ten noordoosten van het meetpunt zijn (rechts van het meetpunt - niet in de figuur weergegeven) is er beïnvloeding van het meetpunt mogelijk, maar de invloed hiervan op de totale UFP-concentraties zal klein zijn (de uitstoot is immers op grote hoogte).
- In de onderste figuur (3B) is er zuidwestenwind. Er wordt dan gestart en geland richting zuidwesten (richting rijksweg A13) en de uitstoot die daarbij vrijkomt boven de landingsbaan wordt door de wind uit het zuidwesten verplaatst en verdund en richting het meetpunt aan de Veldkersweg gestuurd. Die uitstoot wordt wel gemeten.

Zie

Figuren 3a en b.



Figuren 3A en 3B. Schematische weergave van start en landingsrichtingen en de momenten waarop het meetpunt wordt belast (alleen bij wind vanuit de richting zuidwest).

In werkelijkheid is de situatie iets complexer, er zijn natuurlijk meer windrichtingen dan enkel de twee genoemden en een enkele keer wordt er ook bij noordoosten wind toch in zuidwestelijke richting gestart of geland. Bij de beoordeling of een UFP-bijdrage veroorzaakt kan zijn door vliegverkeer wordt steeds ook beoordeeld of de plaats van de uitstoot, in combinatie met de windrichting tot een belasting van het meetpunt kan leiden.

2.4 Onderzoeksvragen

Om meer inzicht te krijgen in de vliegtuigbijdrage op de totale UFP-concentraties rondom het vliegveld RTHA zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Is de vliegtuigbijdrage op de totale UFP-concentraties waarneembaar in de woonomgeving en hoe verhoudt die zich tot eerder onderzoek?
2. Zijn er verschillen in UFP-concentraties waarneembaar bij bepaalde vliegtuigbewegingen (starten, landen)?
3. Zijn er ook andere UFP-bronnen waarneembaar op het meetpunt behalve van vliegverkeer?

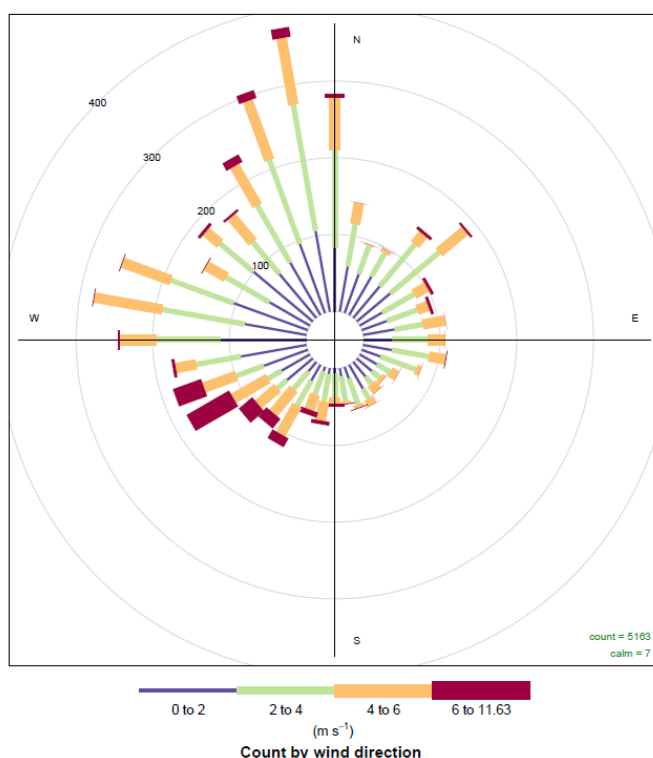
Er zijn nog meer methodologische vragen zoals: heeft vliegverkeer inderdaad geen grote invloed op de concentraties stikstofoxiden; leidt het gebruik van hoogzwavelige brandstof tot meetbare SO₂-bijdragen; enz. Deze vragen zullen mogelijk in een vervolgonderzoek aan de orde komen.

3 Resultaten

3.1 Weersomstandigheden en vliegbewegingen

De wind kwam gedurende de meetperiode (42 dagen) het vaakst uit het noord/noordwesten en waaide gemiddeld het hardst uit het zuidwesten. In de richting zuidwest is ook de start- en landingsbaan van het vliegveld. Zie Figuur 4. Tijdens de metingen zijn er in totaal 3706 vliegtuig-activiteiten (start of landing) geweest. Vrijwel allemaal tussen 07:00-23:00. Zie de Bijlage Figuur 20.

Frequentie windrichting- en snelheid op KNMI-weerstation Rotterdam (344) tijdens de meetperiode



Figuur 4. Frequentie 10-minuutgemiddelde windrichting- en snelheid op KNMI-weerstation Rotterdam.

3.2 Modelresultaten: achtergrond en vliegtuigbijdragen

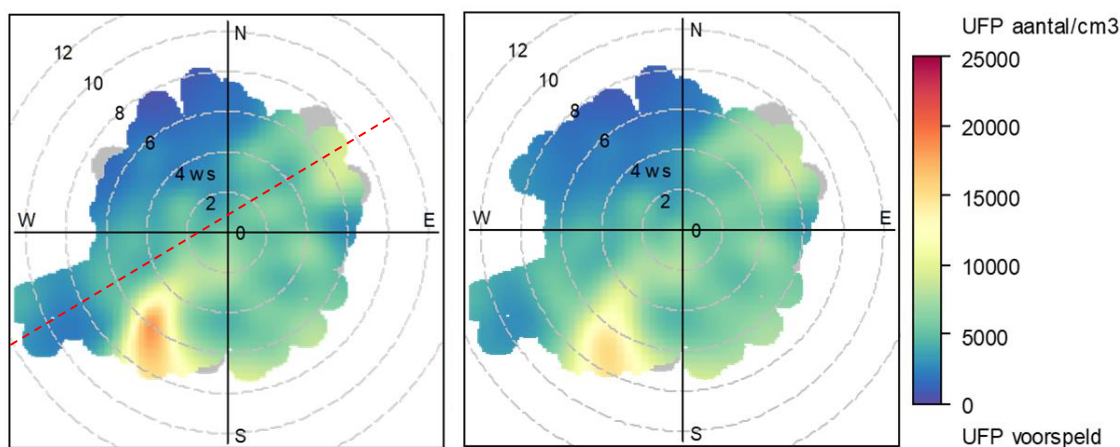
Zoals in Bijlage 7.2.2 en 7.2.3 wordt uitgelegd, is er met een statistisch model een schatting gemaakt van de achtergrondconcentratie van UFP. Uit het verschil van de feitelijke UFP-meting en deze berekende UFP-achtergrondwaarde kan de UFP-vliegtuigbijdrage berekend worden. De resultaten van de metingen, de modelberekeningen en een schatting van de vliegtuigbijdrage worden hier als windrozen met concentratiebijdragen gepresenteerd.

De figuren laten zien hoe de concentraties UFP variëren afhankelijk van de richting vanuit het meetpunt aan de Veldkersweg en afhankelijk van de windsnelheid. Het meetpunt is steeds het centrum van de figuren. Ook is de invloed van de verschillende windsnelheden te zien: de kleuren dichtbij het centrum geven de situatie bij nagenoeg windstil weer.

3.2.1 Achtergronden

Figuur 5 laat de gemeten en de met het model berekende concentraties voor de achtergrond zien op momenten dat er geen vliegactiviteit is. Het achtergrondmodel is gemaakt met deze

data zonder vliegactiviteit. De gemeten en berekende figuren komen, zoals verwacht, goed overeen als er niet gevlogen wordt: het model geeft een goede schatting van de achtergrond.



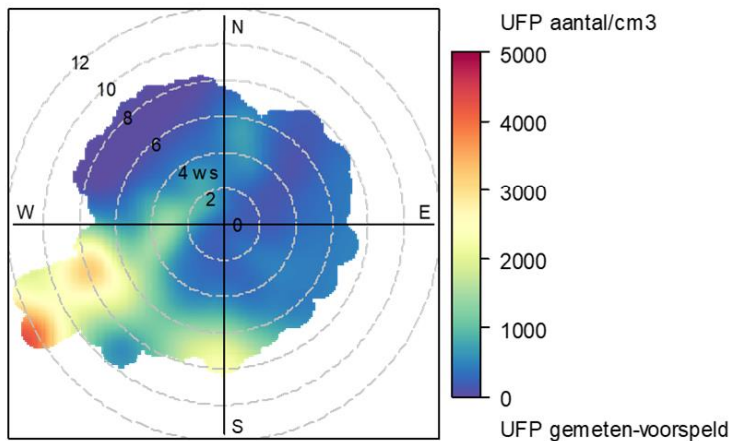
Figuur 5. Windroos van alle gemeten data (links) en alle berekende data (rechts), beiden zonder vliegactiviteit. Rode stippellijn: indicatieve richting van de start- en landingsbaan en de vliegroutes.

Figuur 5 lijkt op een kaartje maar is het niet. De windrichtingen komen overeen met die op een echte kaart. Op de assen staat de windsnelheid en lage windsnelheden komen overeen met gebeurtenissen dichtbij de oorsprong en hogere windsnelheden met grotere afstanden. De startbaan en de vluchtrichting komt ongeveer overeen met de rode stippellijn. Ten zuidwesten van het meetpunt zijn zowel in de metingen als in de modelberekeningen de verhoogde UFP-concentraties te zien die samenhangen met de industrie in de Botlek. In de modelberekeningen valt de Botlek-bijdrage wel iets lager uit dan de gemeten Botlek-bijdrage. Het model kan, in deze situatie, de bijdrage van de industrie en dus de achtergrond kennelijk niet exact te voorspellen.

3.2.2 Windroos van gemeten min berekende UFP-concentraties

Figuur 6 laat voor de hele meetperiode het verschil zien tussen de gemeten en de berekende gemiddelde UFP-concentraties. Dit geeft een eerste schatting van de mogelijke vliegtuigbijdrage.³ De verhoogde UFP-concentraties uit de richting van de start- en landingsbaan zijn duidelijk zichtbaar (gelige en rode kleuren). Pal ten zuiden van het meetpunt zijn ook verhoogde UFP-concentraties te zien. Verhoogde concentraties in deze richting kunnen niet afkomstig zijn van vliegtuigen, die zijn er immers niet op die locatie ten opzichte van het meetpunt. Ook zijn de verschilconcentraties (licht) verhoogd in de richting van de Botlek-bronnen die, zoals gezegd, niet helemaal in de achtergrondwaarde opgenomen werden.

³ Dit is een ruimtelijke weergave van Figuur 10 rechts.

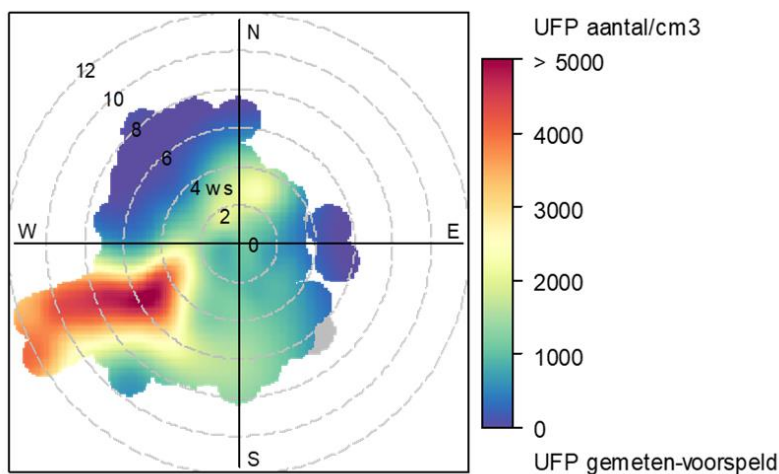


Figuur 6. Windroos van alle data met en zonder vliegactiviteit: verschil gemeten – berekend

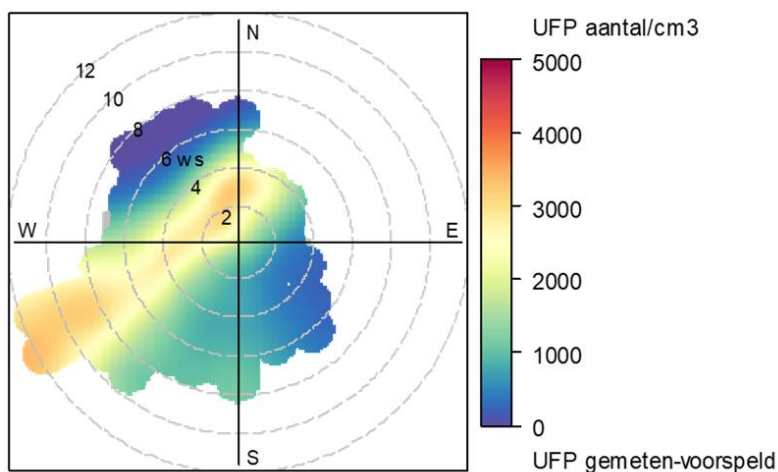
3.2.3 Vliegtuigbijdrage bij verschillende vliegactiviteiten

Figuur 7 geeft de UFP-concentraties bij vertrekkende vliegtuigen in richting zuidwesten. In die richting blijkt er, zoals verwacht, duidelijk een flinke vliegtuigbijdrage te zijn op de totale UFP-concentraties. De geringe bijdrage die zichtbaar is naar het zuiden en richting Botlek worden niet veroorzaakt door vliegtuigen.

De bijdragen richting noord en noordoost zijn waarschijnlijk wel vliegtuigbijdragen: niet van startende, maar van landende vliegtuigen. Zoals eerder opgemerkt vinden er soms meerdere vliegbewegingen plaats kort na een landende of vertrekkende vlucht. In die gevallen worden landingsactiviteiten mede toegeschreven aan de start die er vlak voor gebeurde (als de landing binnen 15 minuten na een eerdere start gebeurt).



Figuur 7. Windroos bij vertrekkende vluchten richting zuidwest: verschil gemeten - berekend

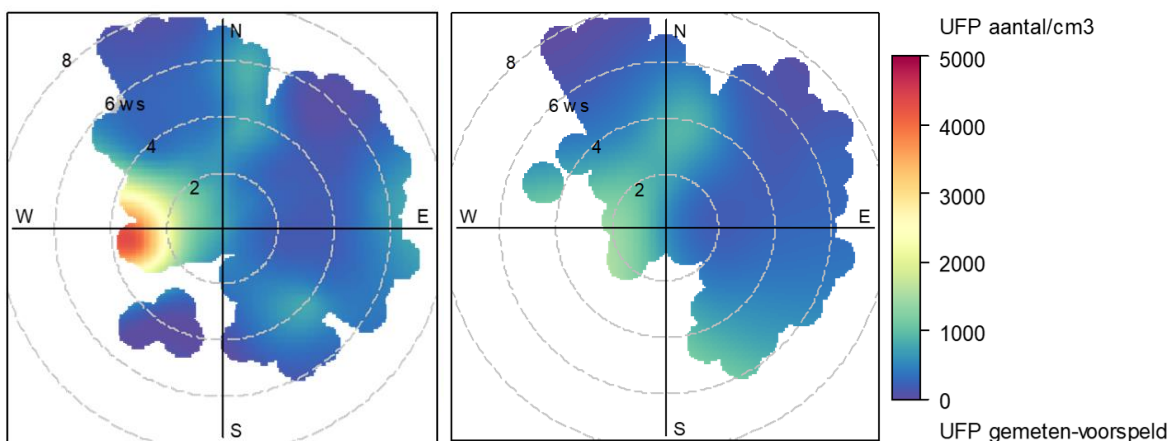


Figuur 8. Windroos bij landende vluchten richting zuidwest: verschil gemeten - berekend

Figuur 8 toont de UFP-bijdrage van de landende vliegtuigen in zuidwestelijke richting. Ook hier geldt dat er enige overlap in de tijd is tussen landende en vertrekkende vluchten. De lijn van de UFP-bijdrage volgt exact het verlengde pad van de startbaan (zie de rode stippellijn in Figuur 19). Dus ook ten noorden en noordoosten kan bij lage windsnelheden een bijdrage van de vliegtuigen worden gezien (ook al zullen de vliegtuigen dan vaak op een hoogte van circa 100 meter of hoger passeren).

De hoogte van de bijdragen van de landende vliegtuigen is zoals verwacht iets lager dan die van de opstijgende. Desondanks zijn deze bijdragen als totaal groot, omdat een langer deel van het vluchtpad, in elk geval bij lage windsnelheden, het meetpunt beïnvloedt.

Figuur 9 toont de bijdrage van vertrekkende vluchten in de richting noordoost (dat is de richting van het meetpunt) links en van landende vluchten richting noordoost (rechts). Er is zoals verwacht amper bijdrage bij vliegactiviteit in noordoostelijke richting. Er is wel enige bijdrage uit de richting pal west. Soms vertrekken vluchten ook bij westelijke windrichting (als het zacht waait) naar het noordoosten.



Figuur 9. Windroos bij vertrekkende (links) en landende vluchten (rechts) richting noordoost: verschil gemeten - berekend

3.3 UFP-meetresultaten en RTHA-bijdrage

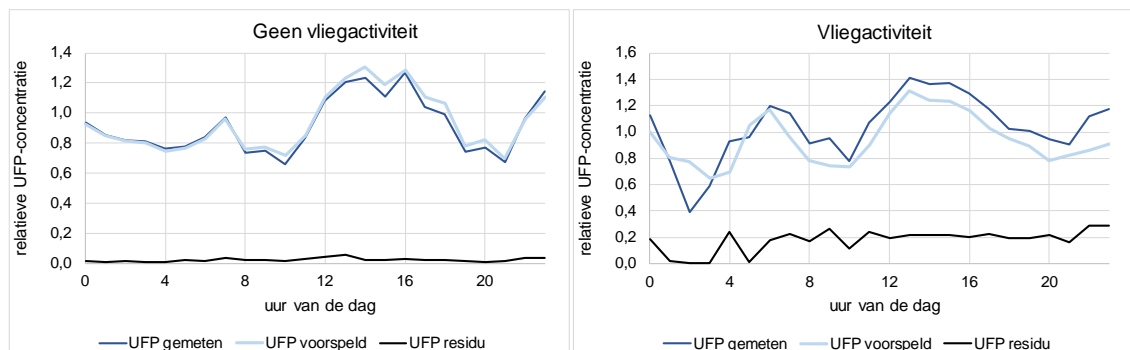
3.3.1 Meetresultaten

Tijdens de meetperiode 4 juli 2022 tot en met 15 augustus 2022 was de uurgemiddelde UFP-concentratie circa 10000 deeltjes per cm^3 ($\#/\text{cm}^3$) met een minimum van 1000 $\#/\text{cm}^3$ en een maximum van 83000 $\#/\text{cm}^3$. Verder in deze studie gebruiken we vooral 'relatieve concentraties': de mate waarin UFP varieert ten opzichte van het gemiddelde, of de bijdrage van vliegactiviteit ten opzichte van het gemiddelde.

3.3.2 UFP-metingen en -berekeningen – alle omstandigheden

De relatieve UFP-concentraties op elk uur van de dag op momenten met en zonder vliegactiviteit staan weergegeven in Figuur 10. De linker figuur (zonder vliegbewegingen) is gebruikt om het model voor de achtergrondberekening te bepalen. De gemodelleerde achtergrond is in de figuur weergegeven. Te zien valt dat het statistische model met name in de avond/nacht en vroege ochtend zeer goed voorspelt. Overdag leidt het model tot een kleine overschatting van de achtergrondconcentratie. Dat het model 's nachts iets beter functioneert valt te verklaren uit het feit dat er meer nachtelijke minuten zonder vliegbewegingen zijn en het model voor die momenten dus meer 'getraind' is.

Het verschil tussen de gemeten UFP-concentratie en de met het achtergrondmodel berekende concentratie is weergegeven als het 'residu' (de zwarte lijn). Links (zonder vliegactiviteit) is het residu de ruis in het model, rechts (op momenten dat er gevlogen wordt) is het een indicatie van de vliegtuigbijdrage. *Hierbij moet worden opgemerkt dat residuen, met name bij afwezigheid van vliegactiviteit, zowel positief als negatief kunnen zijn (een voorspelling is immers nooit perfect). Voor deze analyse zijn alle negatieve waarden op 0 gezet om eventuele onderschatting van de vliegtuigbijdrage te voorkomen. De zwarte lijn in de grafiek is dus 0 of groter dan 0.*



Figuur 10. Gemeten en voorspelde relatieve concentraties UFP tijdens de dag (zomertijd) op momenten met en zonder vliegverkeer en de geschatte bijdrage. Het verschil tussen gemeten en voorspelde UFP-concentraties is hier weergegeven als 'UFP residu' (relatief t.o.v. het gemiddelde tijdens de meetperiode).

In de figuur is een toename te zien van de gemeten UFP in de loop van de middag, zowel op momenten met als zonder vliegtuigactiviteit. Dit wijst op de vorming van UFP in de atmosfeer onder de invloed van zonlicht. Tevens is hier al te zien dat dit effect (de UFP-toename tussen 10 en 20 uur) groter is dan de berekende vliegtuigbijdrage (zwarte lijn). Zie ook de discussie, sectie 4.3.

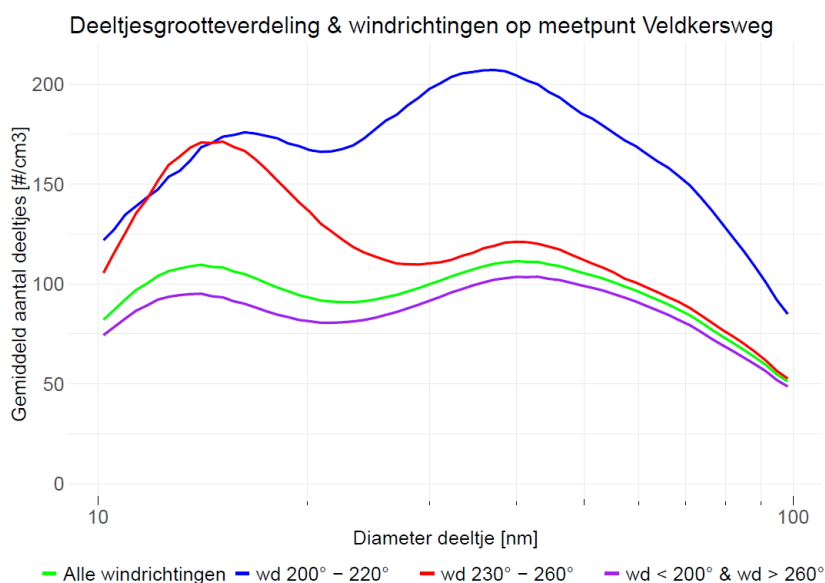
Een eerste indicatieve schatting van de vliegtuigbijdrage in de meetperiode kan bepaald worden uit deze grafieken. Hierbij zijn de windrichtingselecties *buiten beschouwing* gebleven. De resultaten staan in Tabel 1. De bijdrage van vliegverkeer aan de totale UFP-concentratie is 12% tijdens de studieperiode. Specifiek kijkend naar de momenten dat er vliegactiviteit is, is de bijdrage gemiddeld 19%.

Tabel 1. Gemeten UFP-concentraties en berekende residuen/vliegtuigbijdragen (onderzoekperiode)

Vliegactiviteit	Aantal waarnemingen (minuten)	Minuut gemiddelde UFP (#/cm ³)			Bijdrage %
		Gemiddelde ruwe concentratie	Gemiddeld Residu (>=0)	Indicatieve vliegtuig bijdrage	
Zonder	28491	9000	200		
Met	31278	12000	2200	2200	19%
Totaal	59769 (42 dagen)	10000	1200	1200	12%

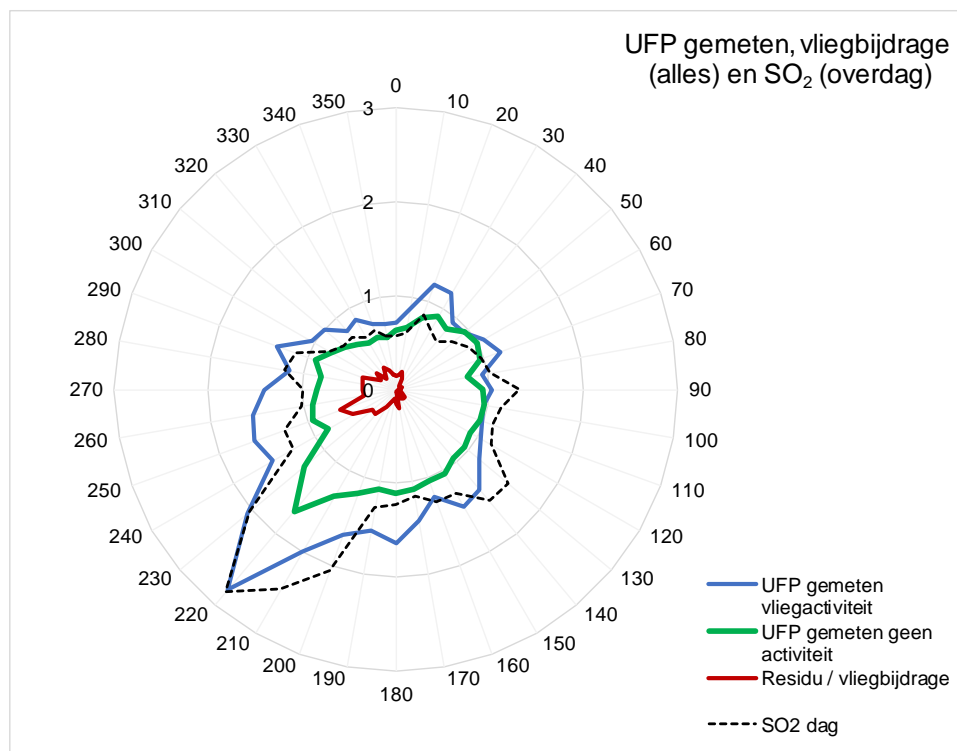
3.3.3 Windrichtinganalyse

Aan de Veldkersweg zijn verhoogde concentraties UFP gemeten in de richting van de start- en landingsbaan. Ook zijn in deze richting meer kleinere UFP-deeltjes (< 30 nm) gemeten vergeleken met de meeste andere windrichtingen. Zie Figuur 11. Dit wijst op UFP-bijdragen van vliegtuigen. In de richting van de Botlek zijn die kleinste UFP-deeltjes echter ook gemeten. Ook daar zijn bronnen die SO₂ en UFP uitstoten zoals bleek in eerder DCMR onderzoek [7]. Uit de figuur blijkt dat aan de Veldkersweg de gemiddelde bijdrage van de Botlek groter is dan die van de vliegtuigen.



Figuur 11. Deeltjesgrootteverdeling van de UFP-metingen aan de Veldkersweg. Gemiddelde UFP-concentratie per deeltjesgrootteklasse op meetlocatie Veldkersweg met alle windrichtingen (groen); gemiddelde UFP-concentratie in de windrichting van het vliegveld (rood); gemiddelde UFP-concentratie uit richting Botlek (blauw) en overige windrichtingen (paars).

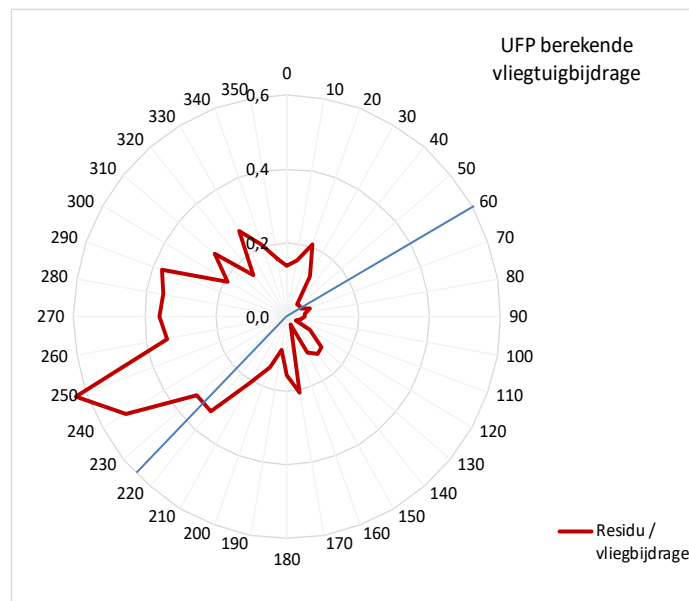
Om de UFP-bijdrage van vliegverkeer en de andere bronnen preciezer te analyseren worden de gemeten en berekende data weergegeven in windrozen. Hiermee is duidelijk te zien uit welke windrichtingen (en dus bronrichtingen) de grootste concentratiebijdragen komen. De grootste UFP-piek, zowel op momenten zonder als met vliegverkeer wijst richting 220 graden, dat is de richting van de Botlek. Zie Figuur 12.



Figuur 12. Windroos van de gemeten relatieve UFP-concentraties op momenten met (blauw) en zonder (groen) vliegactiviteit; van de indicatieve vliegtuigbijdrage (rood) - allen ten opzichte van meetpunt Veldkiersweg; en van de SO₂-concentraties (zwarte stippellijn) gemeten op meetpunt Schiedam (relatief t.o.v. het gemiddelde).

Het feit dat de groene lijn (zonder vliegactiviteit) en de blauwe lijn (met vliegactiviteit) in omvang verschillen wordt niet veroorzaakt door de vliegtuigactiviteit, maar doordat de data *zonder* vliegactiviteit overwegend 's nachts voorkomen. Het totaal van activiteiten overdag (uit vele bronnen en *niet alleen* het vliegveld) leiden tot een flinke deeltjesuitstoot en -vorming (zie ook figuur 10). De richting waar relatief gezien de meeste deeltjes gemeten zijn (met/zonder vliegactiviteit), is ook anders dan de richting van de vliegtuigbijdrage (de rode lijn). Ook dit wijst op andere bronnen. De grootste verschillen tussen de concentraties met en zonder vliegactiviteit (dus min of meer de verschillen tussen dag en nacht) treden op in de richting waar ook de SO₂ vandaan komt: de Botlek.

De berekende vliegtuigbijdrage is de rode lijn die in detail in Figuur 13 wordt weergegeven. Te zien valt dat het verschil tussen de groene en blauwe contouren veel groter is dan die van de vliegtuigbijdrage; de vliegtuigbijdrage is kleiner dan de andere effecten.



Figuur 13. Berekende relatieve UFP-vliegtuigbijdrage in detail (relatief t.o.v. het gemiddelde tijdens de meetperiode), en voor vliegverkeer relevante hoeken (vanaf 225 tot ca 60 graden)

Figuur 13 laat zien dat de berekende vliegtuigbijdrage vrijwel geheel uit windrichtingen komt waarbij die bijdrage ook verwacht mag worden. De bijdrage uit de richting 220 graden is te verklaren doordat de industriebijdrage niet helemaal werd opgenomen in de achtergrond zoals besproken in 3.2.1. Ook de kleine wat zuidelijker pieken kunnen niet veroorzaakt worden door vliegtuigactiviteit. Tot circa 60 graden is invloed van landende of vertrekkende vliegtuigen mogelijk en enige vliegactiviteitsbijdrage is ook zichtbaar in de figuur. De grootste vliegtuigbijdrage zit in de hoek 240-250 graden (de hoek van de startbaan).

Door een extra windrichtingselectie op de data toe te passen wordt het aantal deeltjes dat gemiddeld toegerekend kan worden aan vliegactiviteit iets hoger, maar het wordt wel een iets kleiner deel van de totale bijdrage. Die daalt van 12 naar 10%. Zie Tabel 2.

Tabel 2. Gemeten UFP-concentraties en berekende vliegtuigbijdragen (onderzoekperiode); strenge selectie op windhoeken

Vliegactiviteit	Aantal waarnemingen (minuten)	Minuut gemiddelde UFP (#/cm ³)		Bijdrage	
		Gemiddelde ruwe concentratie	Indicatieve vliegtuig bijdrage	Tijdens activiteit	Van totaal
Correcte hoek	24462	12000	2500	21%	10%
Totaal	59769 (42 dagen)	10000	1200	12%	12%

3.3.4 Generalisatie naar een jaargemiddelde

De berekende bijdrage van 10% tot maximaal 12% van UFP afkomstig van de luchtvaart in de meetperiode **vertaalt zich in een jaargemiddelde bijdrage van ca 8 %**. De meetperiode viel samen met piekdrukke op de luchthaven en gemiddeld over het gehele jaar is de vliegintensiteit minder. In de meetperiode waren er gemiddeld 3,7 vluchten per uur, jaargemiddeld is dat 2,4. Ook de verdeling over de vliegrichtingen is jaargemiddeld (december 2021 t/m nov 2022) net iets anders.

Een probleem bij deze analyse is dat er geen jaargemiddelde UFP-achtergrondconcentratie is. Dat was ook een manco in de TNO-studie. Daarvoor zou een jaar lang, liefst in de Rijnmond, gemeten moeten worden. We gebruiken hier de zomerachtergrond uit deze periode en corrigeren voor wat betreft de vliegtuigbijdrage voor de windrichtingen en vliegtuigaantallen die in andere seizoenen voorkomen. Voor de achtergrondconcentraties kennen we die seizoensinvloeden niet.

3.4 Welke vliegactiviteit veroorzaakt grootste UFP-bijdrage?

Zoals opgemerkt bij de figuren in sectie 3.2 is er enige overlap tussen vliegactiviteiten. Het is niet mogelijk deze activiteiten geheel te scheiden omdat het vliegverkeer simpelweg te druk was: voordat het effect op de uitstoot van een start geheel was weggeëbd kwam er soms alweer een landend vliegtuig binnen. Door de momenten te selecteren met exact één vliegactiviteit (m.a.w. niet altijd worden alle 15 minuten na de activiteit meegenomen) kan het relatieve belang van de verschillende activiteiten wel zo goed mogelijk geschat worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de data die gefilterd zijn op windrichting (zoals in Tabel 2). Zie Tabel 3.

Tabel 3. Gemeten minuutgemiddelde UFP-bijdragen en berekende vliegtuigbijdragen tijdens minuten met maximaal één vliegactiviteit direct na een start of landing

Vliegactiviteit in de richting	Aantal (minuten)	% van totale tijd	Bijdrage aan UFP-concentratie	
			Tijdens vliegactiviteit	Gehele meetperiode
Vertrek zuidwest	1584	3%	35%	1,1%
Aankomst zuidwest	5001	8%	32%	3,7%
Vertrek noordoost	3203	5%	7%	0,3%
Aankomst noordoost	28 *)	0%	10%	0,0%
Totaal unieke activiteit	9816	16%		5%
Meer dan één activiteit	14646	25%		5%
Totaal vliegactiviteit	24462	41%		10%

* Ten opzichte van de andere situaties zijn dit zeer weinig waarnemingen. In de meetperiode kwam dit dus vrijwel niet voor.

Tabel 3 laat zien wat in de schematische tekening van Figuur 19 al werd aangegeven: het zijn de activiteiten richting zuidwest, weg van de Veldkersweg, die de grootste invloed op het meetpunt hebben. In tegenstelling tot geluid dat zich verticaal verplaatst en dat piekt als een vliegtuig boven het meetpunt is, gaat het bij luchtvervuiling (en ook UFP) vooral om de horizontale verplaatsing van de uitstoot die op en vlak boven de startbaan gebeurt. Wat verder opvalt is dat landen richting zuidwest vrijwel evenveel bijdraagt als starten (qua belasting aan de Veldkersweg).

4 Discussie

4.1 Vliegtuigbijdrage aan UFP op basis van twee meetcampagnes

In deze studie is onderzoek gedaan naar de vliegtuigbijdrage op de totale UFP-concentraties in de buurt van het vliegveld RTHA. De meetperiode was tussen 4 juli en 15 augustus van 2022 in een periode met veel vliegactiviteit. De vliegtuigbijdrage in de meetperiode is geëxtrapoleerd naar een jaargemiddelde vliegtuigbijdrage aan de heersende UFP-concentraties. TNO heeft eerder ook onderzoek gedaan naar de invloed van vliegverkeer op de UFP-concentraties in de winter van 2017 [1]. Uit het onderzoek van TNO kwam procentueel gezien een iets andere vliegtuigbijdrage naar voren, maar qua grootteorde komen de resultaten van dit onderzoek goed overeen met die van TNO. Jaargemiddeld is 15 (TNO) respectievelijk 8% (DCMR) van alle UFP aan de Veldkersweg afkomstig van vliegverkeer. Vliegverkeer is daarmee een significante bron, maar niet de enige of de grootste bron.

Dit onderzoek en de eerdere studie van TNO gebruikten op onderdelen een andere aanpak:

- de kleinste deeltjes toeschrijven aan vliegverkeer (studie TNO) of alle deeltjesmits ze voldoen aan criteria van windrichting en ze een verhoging ten opzichte van de berekende achtergrond laten zien bij vliegactiviteit (studie DCMR).
- achtergrond bepalen tussen twee gemeten pieken (studie TNO) of de achtergrond bepalen op basis van een voorspellend model gebaseerd op data zonder vliegactiviteit (studie DCMR).

Hoewel beide studies een deels andere opzet kennen en de meetperiodes verschillen (TNO in de winterperiode en DCMR in de zomerperiode), zijn de resultaten vergelijkbaar. Beide studies ondersteunen de conclusie van een beperkte vliegtuigbijdrage op de UFP-concentraties.

In deze studie, maar ook al in de TNO-studie, wordt gewezen op bijdragen van de chemische industrie. Die is weliswaar gelegen op afstand, maar de invloed in de vorm van verhoogde UFP-concentraties is duidelijk zichtbaar. Zeer kleine UFP-deeltjes worden gevormd onder andere uit zwaveldruppeltjes en dat is typisch voor luchtvaart, maar dus ook voor raffinage en bepaalde chemische industrie.

UFP in het algemeen is sterk gerelateerd aan NO_x en roet van verbrandingsprocessen zoals bijvoorbeeld van verkeer [7]. In stedelijke omgeving is dat een zeer belangrijke bron en het vliegveld is gelegen in zo'n typisch stedelijke setting en trekt daarbij ook zelf het nodige verkeer aan. De typisch stedelijke UFP-bronnen leveren samen met de industrie een grotere bijdrage aan de UFP-concentratie dan het vliegverkeer.

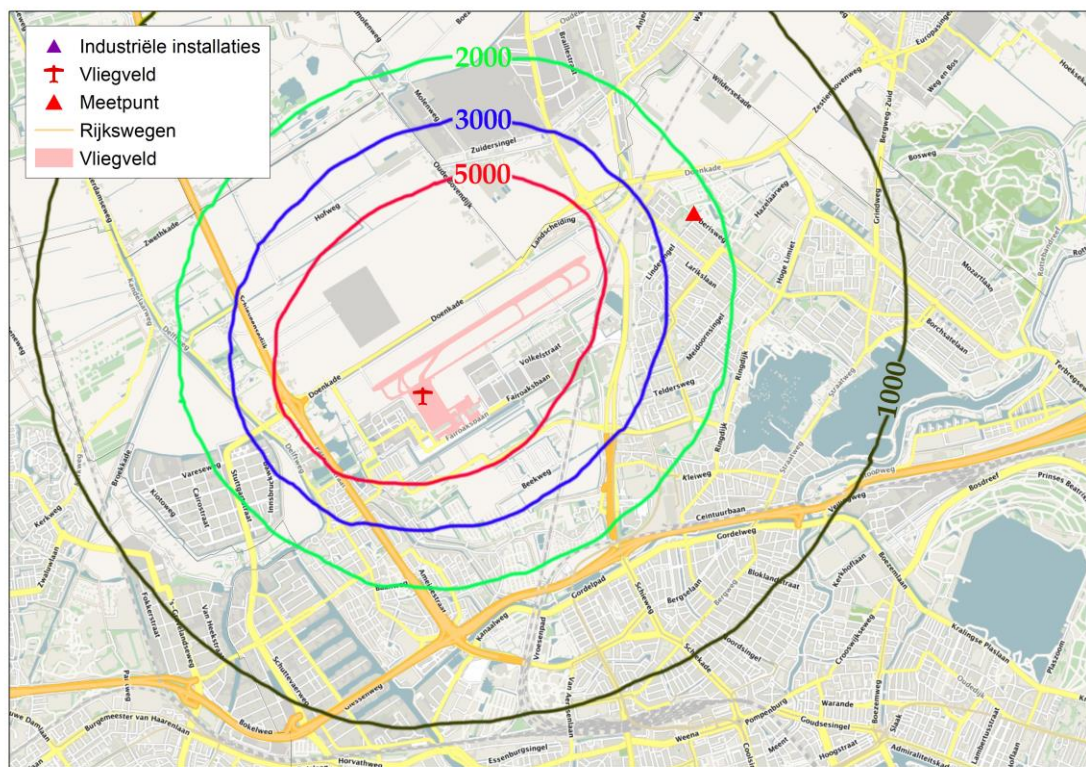
4.2 DCMR & TNO meting versus ESC berekening

In de TNO studie [1] worden absolute hoeveelheden deeltjes genoemd. DCMR is daar terughoudend mee omdat elk apparaat andere hoeveelheden deeltjes meet.⁴ In de eerdere Rijnmond studie en ook hier ligt de nadruk op relatieve bijdrage van verschillende bronnen.

In de TNO-studie wordt een vergelijking gemaakt tussen de in [9] door ESC berekende en de door TNO gemeten concentraties en dan wordt geconcludeerd dat de metingen lager uitpakken dan de berekeningen (ze zijn ongeveer de helft). De huidige metingen bevestigen de lagere TNO aantallen. De kaart uit [9] is gebaseerd op de eerste analyses van RIVM rondom Schiphol.

⁴ In het TNO rapport worden drie instrumenten met elkaar vergeleken die onderling tot 30% afwijken. In een eerder ECN onderzoek [13] werden nog grotere verschillen gevonden in absolute UFP-concentraties tussen verschillende type UFP-meetinstrumenten.

Op grond van beide meetcampagnes zouden de getallen op de contourkaart dus mogelijk door twee gedeeld moeten worden. De kaart geeft wel een goede indruk van de ruimtelijke verdeling van UFP van vliegverkeer. Zie Figuur 14.

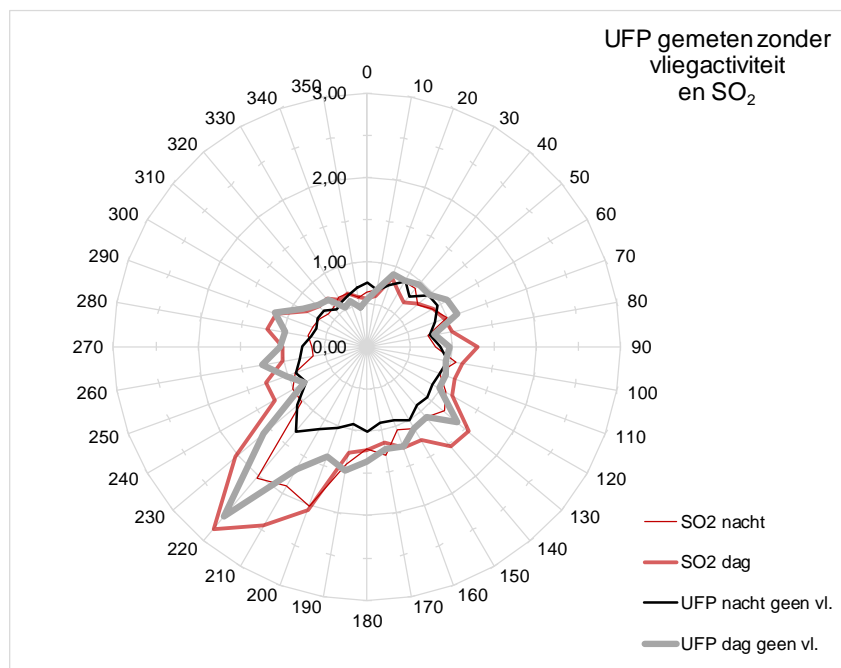


Figuur 14. Berekende vliegtuig-UFP-contouren uit [9]. Metingen aan de Veldkersweg (rode driehoek) zijn dus indicatief voor het gebied tussen de groene en blauwe curve. Buiten de groene lijn is de invloed van RTHA kleiner, binnen de blauwe lijn groter, behalve dichtbij rijksweg A13 want daar zal UFP van verkeer ook groter zijn.

Een nuancering is hierbij misschien op zijn plaats. Zowel in de TNO-studie als in deze studie wordt gekeken naar de rol van straalvliegtuigen. Op RTHA is ook veel 'klein verkeer' en er zijn helikoptervluchten. Met name die laatste categorie heeft volgens het MER [11] (en aanvullende informatie van ADECS, de auteur van het MER) een substantiële bijdrage heeft aan de fijnstofemissies. In de hierboven berekende kaart is UFP-concentratiebijdrage afgeleid uit de fijnstofconcentratiebijdrage in het MER, en daarin is het kleine vliegverkeer en de helikopters dus wel meegenomen. In hoeverre beide UFP uitstoten en hoeveel dat is ten opzichte van de uitstoot van de straalvliegtuigen is ons onbekend.

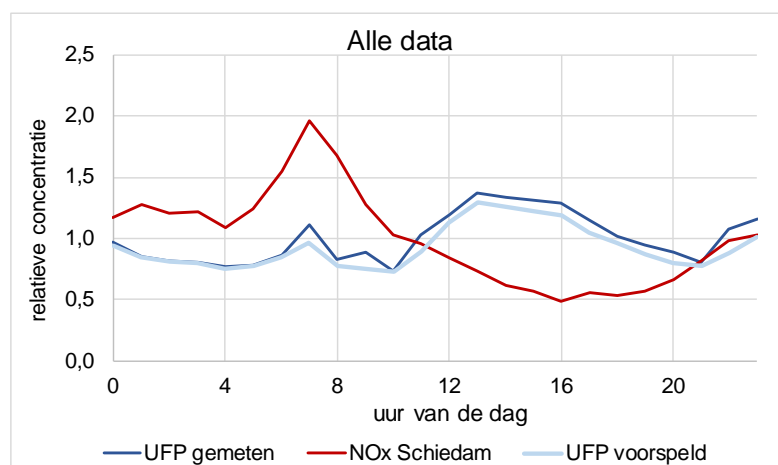
4.3 UFP-vorming (nucleatie) in de middag - invloed van zonlicht

Deeltjes worden deels direct uitgestoten en deels ook gevormd in de lucht. SO_2 staat vaak aan het begin van de vorming van deeltjes. Vliegvelden zijn, mede vanwege het zwavelgehalte van kerosine, bronnen van UFP-deeltjes. In de Rijnmond zijn er echter meer grote zwavelbronnen (o.a. de raffinage en de zeescheepvaart). Bij metingen aan de Veldkersweg lijkt naast de rol van het vliegveld ook de zwavel van verder weg gelegen bronnen een rol te spelen. Aanwijzingen daarvoor zijn Figuur 12 waarin een groot verschil te zien is tussen de hoeveelheid deeltjes in de hoek waar ook de SO_2 -piek van de industrie zich bevindt. Als specifiek dag en nacht worden vergeleken bij de UFP-windrozen, zonder vliegtuiginvloed, dan is duidelijk een flinke toename te zien overdag, in de richting waar ook de SO_2 -piek ligt: de Botlek. Zie Figuur 15.



Figuur 15 Windrozen van UFP (momenten zonder vliegverkeer) overdag en 's nachts en de SO₂-windrozen.

Zonlicht speelt een rol, nucleatie verschijnselen komen vooral in de zomer en in de middag voor. Een aanwijzing was al te vinden in Figuur 10 met de stijging van de UFP-concentraties in de middag. De meeste luchtvervuiling (die niet met zonlicht gevormd wordt) zoals NO_x daalt juist in de middag omdat de verdunning dan beter is (in jargon: de menglaag is dan groter) zie Figuur 16.



Figuur 16. Gemeten en voorspelde relatieve concentraties UFP tijdens de dag (zomertijd) op momenten met en zonder vliegverkeer en de relatieve concentraties NO_x (gemeten op Schiedam).

Ook Figuur 11 en Figuur 12 wijzen op de hoek van de industrie als een belangrijke bron van deeltjes en dit verschijnsel is ook elders wel gedocumenteerd zie bijlage 7.3. De invloed op de UFP-concentraties van de industriële SO₂-uitstoot is aan de Veldkersweg, althans in de zomer, groter dan die van de SO₂ gerelateerd aan zwavel in kerosine.

5 Conclusies

Er is interesse in UFP omdat algemeen wordt aangenomen dat UFP gezondheidsschade veroorzaakt, of een deel van de gezondheidsschade die aan andere stoffen (fijnstof, stikstofdioxide) wordt toegeschreven verklaart. Dit is recent beschreven door de Gezondheidsraad [10] en ook het onderzoek van RIVM bij Schiphol gaf indicatief bewijs voor gezondheidseffecten van UFP afkomstig van vliegtuigen [3].

DCMR heeft in de zomer van 2022 een meetcampagne uitgevoerd benedenwinds van vliegveld RTHA (meetpunt Veldkersweg). De meetcampagne is een vervolg op de wintermetingen die TNO (en DCMR) in 2017 deden. In de zomer is er meer vliegverkeer en de meetcampagne moest de vraag beantwoorden of de jaargemiddelde schatting van TNO op basis van de wintermetingen geen onderschatting was. Dat is niet het geval. **De bijdrage van RTHA aan de lokale UFP-concentraties ter hoogte van de Veldkersweg is 10-12% van de totale concentratie in de studieperiode, en wordt jaargemiddeld op 8% geschat. Dat is een duidelijk herkenbare bronbijdrage, maar dus ook in de directe omgeving van RTHA slechts een beperkt deel van de totale UFP-concentratie.**

Uit de metingen blijkt verder dat de Botlek, zeker 's zomers, een grote bron van UFP is. UFP-deeltjes worden deels direct uitgestoten en deels gevormd in de lucht. Zwaveldioxide (SO₂) speelt hierbij een rol. Vliegvelden zijn een bron van UFP omdat de vliegtuigbrandstof verhoudingsgewijs veel zwavel bevat. In de Rijnmond zijn echter meer en grotere zwavelbronnen dan enkel het vliegveld: de petrochemie en de zeevaart. Die dragen ook bij aan de UFP-concentraties.

De vorming van UFP onder invloed van zonlicht (dus vanaf de late ochtend tot het eind van de middag) was in de DCMR-metingen goed zichtbaar. Omdat er 's winters minder van deze zogenoemde fotonucleatie is komt de schatting van de vliegtuigbijdrage in de TNO-studie mogelijk iets hoger uit dan in deze studie (15 ten opzichte van 8%).

Beide studies hebben last van het feit dat er weinig tot geen structurele UFP-metingen in Nederland zijn. TNO moest vanuit de winter een jaargemiddelde achtergrond schatten, DCMR vanuit de zomer. Beide methoden zijn niet optimaal, maar bij gebrek aan die metingen het beste wat er momenteel is. **Gebaseerd op beide studies is de vliegtuigbijdrage dus ca 8-15%.**

Voor inwoners van de Veldkersweg en omgeving wordt de grootste vliegtuigbijdrage gevonden als vliegtuigen vertrokken of aankwamen in zuidwestelijke richting (richting A13). Op die momenten geeft landend of opstijgend vliegverkeer kortdurend circa een derde van de dan heersende UFP-concentraties. Opstijgend en landend verkeer in de richting van het noordoosten draagt amper bij aan de concentraties op de Veldkersweg.

Om een **indruk** te krijgen hoe de UFP-concentraties van vliegverkeer aan de Veldkersweg zich verhouden tot andere locaties kan gekeken worden naar de kaart in Figuur 14.

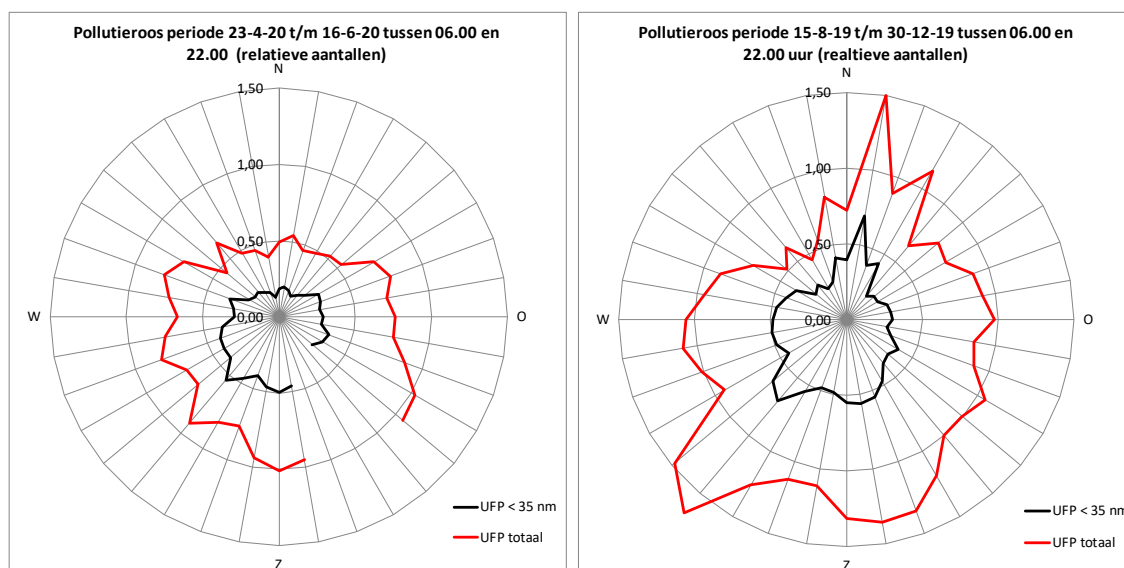
6 Literatuur

- [1] J. Duyzer, M. Moerman. Ultrafijn stof rond Rotterdam The Hague Airport. TNO-rapport 2018 R10714. <https://www.cro-rotterdam.nl/uploads/Vergaderstukken/2018%2009%2013/10.a.2%20rapport%20R10714%20RTHA%20final%20Ultrafijnstof%20rond%20Rotterdam%20The%20Hague%20Airport.pdf>
- [2] M. Voogt, P. Zandveld, J. Wesseling en N. Janssen. 2019. Metingen en berekeningen van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol. DOI 10.21945/RIVM-2019-0074.
- [3] N. Janssen, D. Houthuijs, A. Dusseldorp. 2022. Gezondheidseffecten van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol. RIVM-rapport 2022-0069. www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0069.pdf
- [4] B. Stacey. Measurement of ultrafine particles at airports: A review. Atmospheric Environment 198 (2019):463-477.
- [5] M.P. Keuken, J.S. Henzing, P. Zandveld, S. van den Elshout, M. Karl. Dispersion of particle numbers and elemental carbon from road traffic, a harbour and an airstrip in the Netherlands. Atmospheric Environment 54(2012):320-327.
- [6] Ungeheuer, F., Caudillo, L., et al. Nucleation of jet engine oil vapours is a large source of aviation-related ultrafine particles. Communications Earth & Environment, (2022)3:319.
- [7] S. van den Elshout, E. Özdemir, B. Wester. 2022. Ultrafijnstof in de Rijnmond: Emissies en metingen – samenhang met andere luchtvervuiling. www.dcmr.nl/sites/default/files/2022-11/UFP_Emissies_model-len_en_metingen%20NW.pdf
- [8] A. Visschedijk, H. Denier van der Gon. 2022. UFP emissies in de Rijnmond. TNO-rapport 2022 R10616. www.dcmr.nl/sites/default/files/2022-11/Ultrafijnstof%20in%20de%20Rijnmond%20Bijlage%20TNO.pdf
- [9] Erbrink Stacks Consult. 2016. UFP-concentraties RTHA. Voor Min IenM, opdracht 5200000705-5.
- [10] Gezondheidsraad Risico's van ultrafijnstof in de buitenlucht: <https://open.overheid.nl/repository/ronl-04e01fa8-ff46-49ac-b4a8-38731725c085/1/pdf/bijlage-2-kernadvies-risico-s-van-ultrafijnstof-in-de-buitenlucht.pdf>
- [11] MER RTHA. www.cro-rotterdam.nl/uploads/dossiers/luchthavenbesluit/MER-2.-Deelrapport_Lucht-kwaliteit.pdf.
- [12] Guus J.M. Velders, Saskia M. Willers, Joost Wesseling, Sef van den Elshout, Eric van der Swaluw, Dennis Mooibroek, Sjoerd van Ratingen. 2021. Improvements in air quality in the Netherlands during the corona lockdown based on observations and model simulations. Atmospheric Environment 247 (2021) 118158.
- [13] Metingen aan ultrafijn stof rondom Schiphol. ECN/TNO. <https://publications.tno.nl/publication/34629331/uXP378/e15038.pdf>
- [14] <https://www.cro-rotterdam.nl/uploads/Vergaderstukken/2020%2010%2008/10.e%202020-09-03%20Lid-GSbrief%20De%20Zoete%20Aanbieding%20Rapport%20Milieumetingen.pdf>

7 Bijlagen

7.1 UFP-metingen tijdens en voor de corona lockdown

In opdracht van provincie Zuid-Holland is gekeken naar metingen tijdens de corona lockdown op meetpunt Overschie en die zijn vergeleken met metingen tijdens een periode voor corona. Zie DCMR notitie 'Milieumonitoring lockdown corona periode' [14]. Figuur 7 uit die notitie wordt hier herhaald (uitgedrukt in relatieve concentraties UFP (t.o.v. het gemiddelde van beide periodes)). Voor een volledige beschrijving zie de notitie.



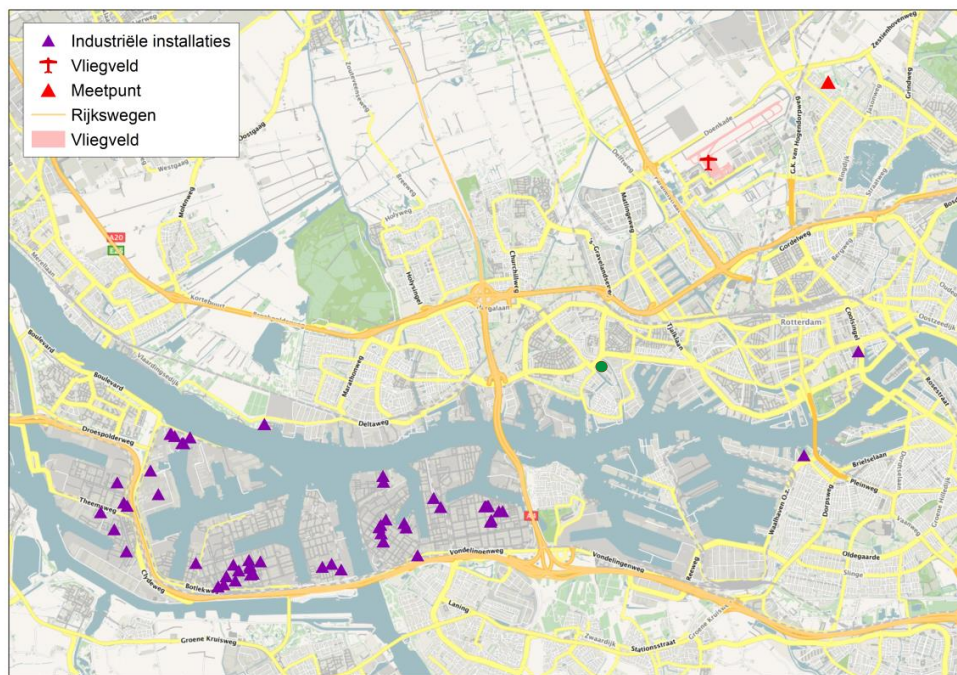
Figuur 17 Windroos meetpunt Overschie: UFP april - juni 2020 (links); en aug. - dec. 2019 (rechts); relatieve deeltjes aantallen t.o.v. het gemiddelde van beide periodes.

De figuur laat zien dat de 'lockdown-windroos' geen piek naar het noorden heeft (richting RTHA) zoals verwacht, maar de windroos is ook in alle andere richtingen sterk gekrompen ten opzichte van de metingen voor de lockdown. Daarmee is het onmogelijk de linker periode als 'niet-vliegen referentie' te gebruiken voor de rechter (alles in vol bedrijf). Immers ook de verkeerspiek in de richting zuidwest (rechts) is tijdens de lockdown (links) amper zichtbaar. De periodes verschillen in vele opzichten.

7.2 Materiaal en Methoden

7.2.1 Metingen: periode en locatie

De meetperiode voor deze studie is tussen 4 juli 2022 tot en met 15 augustus 2022. Met een tijdelijk meetpunt is UFP gemeten. De Veldkersweg ligt in noordoostelijke richting van het vliegveld en in het verlengde van de start- en landingsbaan (Figuur 18). Tegelijkertijd met UFP zijn ook stikstofoxiden (NO_x) en zwaveldioxide (SO_2) gemeten. Naast de metingen aan de Veldkersweg zijn de SO_2 - en NO_x -metingen van regulier meetpunt Schiedam gebruikt als controle en om het achtergrondmodel voor UFP te bepalen (zie hieronder).



Figuur 18. Locatie meetpunt aan de Veldkersweg (licht groen) ten opzichte van het vliegveld Rotterdam The Hague Airport (RTHA). In de figuur zijn ook de industriële installaties met een hoge SO_2 -emissie weergegeven en de rijkswegen en het achtergrond meetpunt Schiedam (donker groen).

7.2.2 Data-analyses

Minuutgemiddelde UFP-concentraties zijn bepaald door de metingen van deeltjes met een diameter tussen de 10 en 100 nanometer te sommeren. Windrichting en -snelheid zijn beschikbaar per 10 minuten. Tussentijdse minuten hebben steeds dezelfde 10-minuut waarneming gekregen. Ook de uurgemiddelde temperatuur, neerslag, luchtvochtigheid en luchtdruk zijn steeds gedupliceerd voor alle minuten in het uurvak. Actuele vertrek- en aankomsttijden van vliegverkeer zijn naar de eerstvolgende minuut afgerond.

Voor de identificatie van een vliegtuigactiviteit zijn de 15 minuten na de start of landing gecodeerd op basis van eerdere ervaringen en dit onderzoek. Tijdens de training van het Random Forest model is de aanname dat er na 15 minuten amper invloed merkbaar was geverifieerd en gevalideerd. Doordat de invloedstijd iets korter kon (15 in plaats van 20 minuten) waren er meer waarnemingen overdag zonder vliegtuiginvloed waardoor het achtergrond model beter werd. De minuten na een activiteit kregen een nummer van 1 t/m 15. Als activiteiten elkaar snel opvolgden is doorgenummerd: bijv. 1 t/m 5 en vervolgens 1 t/m 15 op grond van een tweede activiteit. Elke minuut die binnen 15 minuten van een vliegtuigactiviteit (start/landing) lag is op die manier gecodeerd.

Met de niet-vliegmomenten is een achtergrondmodel bepaald met de Random Forest methode. Het verschil tussen de metingen en de berekende achtergrond is een residu: een niet

gemodelleerde bijdrage die in potentie door vliegverkeer wordt veroorzaakt. Om zeker te zijn dat het om vliegverkeer gaat worden bovendien de windrichtingen bekeken.

Vrijwel in het verlengde van het vliegveld ligt de Botlek met meerdere hoogzwavelige (UFP-) bronnen. Op basis van windrichting is onderscheid in de data aangebracht tussen vliegtuigbijdrage en UFP-bijdrage afkomstig van de industriële bronnen in de Botlek en overige bronnen in de nabijheid van het meetpunt. Dat was nodig omdat het achtergrondmodel wel veel, maar niet alle industriële UFP-variatie kon verklaren.

7.2.3 Bepaling achtergrond – ‘random forest’ model

In de inventarisatie van UFP-metingen van de afgelopen jaren op alle DCMR-meetpunten is gebleken dat er in stedelijk gebied een sterke samenhang is tussen de uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) en roet enerzijds en UFP anderzijds [7]. Ook uit de literatuurstudie die de Gezondheidsraad deed blijkt een dergelijke samenhang [10]. NO_x wordt vooral door verkeer en andere bronnen uitgestoten en de bijdrage van de luchtvaart aan de NO_x -concentratie is zeer beperkt ($< \text{ca } 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$); zie bijvoorbeeld het MER luchtrapport uit 2015 [11].

Door op minuten dat er *geen vliegactiviteit* was een relatie te bepalen tussen allerlei variabelen (windrichting, windsnelheid, uur van de dag, temperatuur, concentratie NO_x en de gemeten concentratie UFP) was het mogelijk een schatting te maken van de UFP-bijdrage van alle andere bronnen behalve het vliegverkeer: de achtergrondconcentratie UFP.

- Door alles op basis van minuutmetingen te doen kan de schaarse tijd overdag zonder vliegtuiginvloed in de achtergrondschatting betrokken worden. Dit is belangrijk omdat 's nachts de toestand van de atmosfeer als geheel ook anders is.
- Door NO_x als verklarende variabele mee te nemen wordt de invloed van bronnen zoals wegverkeer, die overdag actief zijn, ook gebruikt bij de bepaling van de achtergrond.

De statistische techniek die hiervoor gebruikt is, is het zogenoemde Random Forest, een zelflerende niet-parametrische techniek, die door DCMR en RIVM ook in het onderzoek naar de effecten van de corona-lockdowns op de luchtkwaliteit is gebruikt [10]. De Random Forest techniek bleek goede achtergronden te schatten, met minimale ruis. Dat wil zeggen waar geen vliegtuigbijdragen werden verwacht werden die ook niet/ampere gevonden. Zie Figuur 5 en verder in de hoofdstuktekst. Ook de industriebijdrage werd vrij goed geschat waardoor die de interpretatie van vliegtuig UFP amper beïnvloedde.

De R^2 waarden voor het achtergrondmodel gefit met de achtergrond- NO_x gemeten op Schiedam was 0.93. Ter controle werd, gebruikmakend van de vliegactiviteitsdata inclusief de 15 minuten lagtime na de activiteit een model voor de totale periode gefit (met en zonder vliegverkeer). De R^2 was 0.76. Het achtergrondmodel heeft een zeer goede voorspellende waarde en ook het model met vliegtuigactiviteit (niet gebruikt, maar ter controle gemaakt) voldoet goed. De resultaten zijn zodanig dat dit vertrouwen geeft in een goede schatting van de achtergrond zonder vliegverkeer op alle momenten tijdens de onderzoeksperiode.

Het achtergrondmodel selecteert eerst temperatuur dan NO_x en vervolgens andere meteorologische variabelen als verklarende factor. Temperatuur kennelijk om de UFP-vorming in de middag goed in te schatten en NO_x zoals verwacht als proxy voor de overige bronnen (zoals verkeer). In het model voor alle metingen daalt NO_x naar de 5^e plaats en stijgt het belang van de windrichting (van de 6^e naar 4^e plek) als indicator voor de vliegtuigbijdragen. Ook komen de vliegmomenten dan als verklarende variabele in beeld.

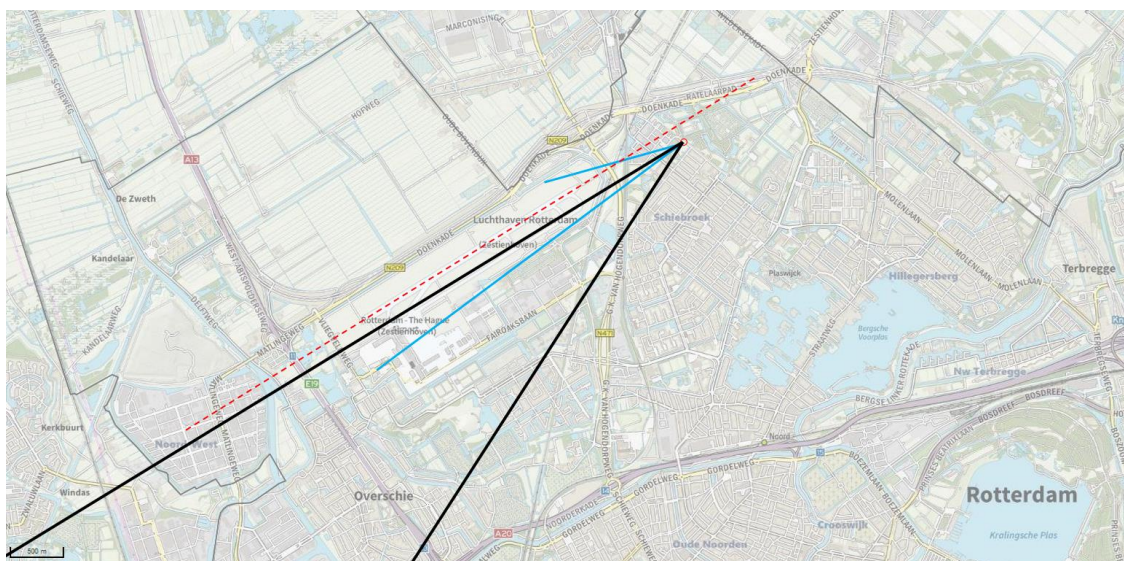
De random forest methode en software is o.a. beschreven in:

- Grange SK, Carslaw D. 2019. *Using meteorological normalisation to detect interventions in air quality time series*. *Sci. Tot. Environ.* 653, 578-88. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.344>.

- Grange SK. 2018. *rmweather: Tools to conduct meteorological normalisation on air quality data*. R package version 0.1.2. <https://CRAN.R-project.org/package=rmweather>.

7.2.4 Analyse windhoeken: de vliegtuigbijdrage

In Figuur 19 is in detail weergegeven welke windhoeken een vliegtuigbijdrage kunnen hebben, en waar potentieel invloed is van de industriële bronnen in de Botlek. In de hoek tussen de zwarte lijnen bevinden zich de industriebronnen die dag en nacht een UFP-bijdrage hebben. UFP uit een hoek kleiner dan 225 graden is vooral toe te schrijven aan de industrie. Tussen de blauwe lijnen (225 – 260 graden) bevindt zich het merendeel van de vliegtuigbijdragen: dit is het vliegveld/startbaan terrein gezien vanuit meetpunt Veldkersweg. De rode stippellijn is het verlengde van de startbaan. Te zien valt dat uit meer noordelijke richtingen (van 270 tot ca 50 graden) enige bijdrage verwacht mag worden van aanvliegende of vertrekkende vliegtuigen die weliswaar al op hoogte zijn maar mogelijk nog wel invloed hebben bij lage windsnelheden.



Figuur 19. Situatieschets meetpunt (rode cirkel), (verlengde) startbaan (stippellijn) vliegtuighoek (blauw) en verder weg gelegen UFP-bronnen (zwarte windhoek).

7.2.5 Overzicht gebruikte data en apparatuur

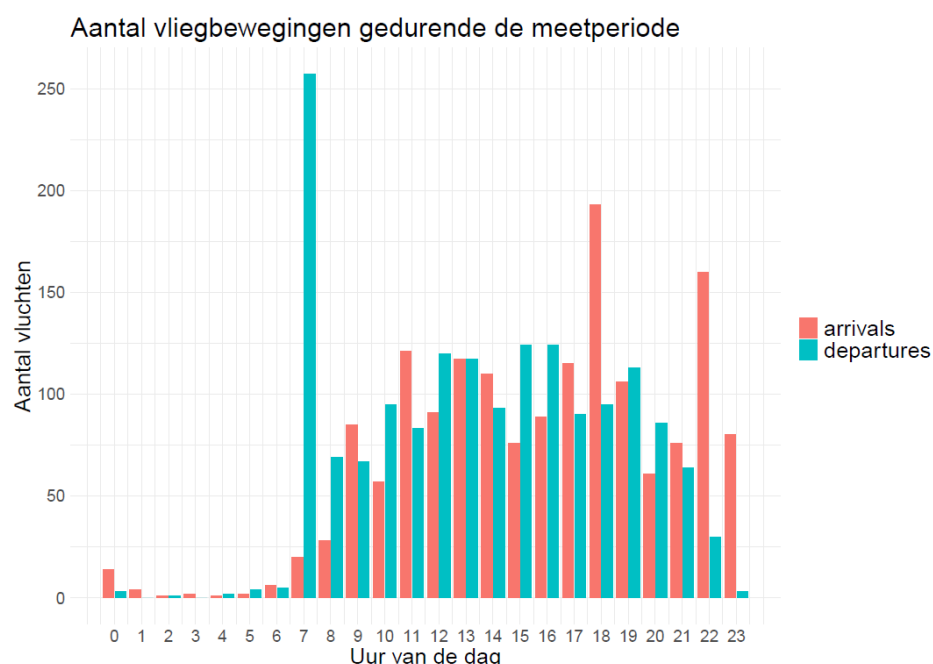
10-minuutgemiddelde gegevens over de windrichting en -snelheid gemeten op het KNMI-meetpunt in Rotterdam zijn verkregen van het KNMI (<https://dataplatform.knmi.nl/dataset/windgegevens-1-0>). Van de KNMI-weerstation zijn ook uurgemiddelde gegevens over temperatuur, hoeveelheid neerslag, relatieve luchtvochtigheid en luchtdruk ontsloten.

De UFP metingen zijn gedaan met een Scanning Mobility Particle Size spectrometer (SMPS; TSI, model 3938) met een meetduur van één minuut. In dit onderzoek zijn alleen deeltjes met een diameter tussen de 10 en 100 nanometer meegenomen. Deeltjes onder de 10 nanometer hebben meestal geen lading en kunnen daardoor niet goed gemeten worden. Deeltjes boven de 100 nanometer maken geen deel uit van de UFP-fractie.

Concentraties NO_x zijn gemeten met een chemiluminescentie monitor (AC32M). Een UV-fluorescentie monitor (AF22e) is gebruikt voor het meten van concentraties SO₂. Beide stoffen zijn gemeten met een samplingstijd van 10 seconden en een detectielimiet van 1 µg/m³. Deze data zijn wel gecontroleerd maar niet conform het kwaliteitsysteem gevalideerd omdat dat alleen op uurgemiddelde waarden gebeurt.

Vliegverkeergegevens zijn ontsloten uit het Rotterdam The Hague Airport Noise Monitoring System (RANOMOS). Alleen vliegverkeer met een straalmotor is meegenomen in deze studie. Op het vliegveld zijn er twee virtuele start- en landingsbanen die de richting van de activiteit

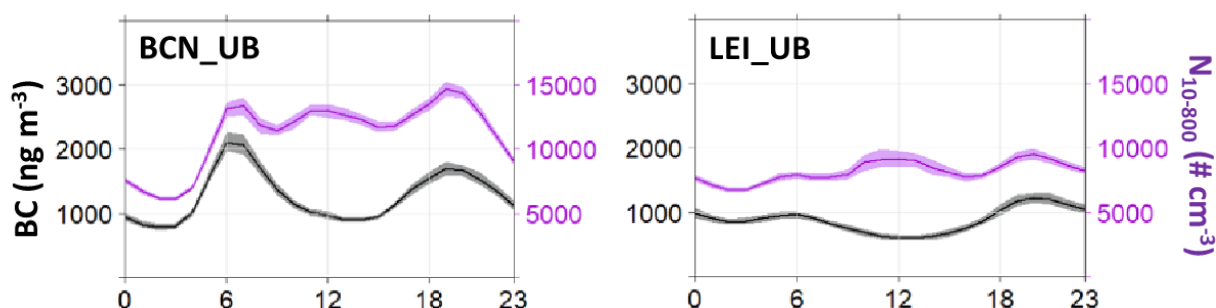
aangeven: 'Runway 24' (vertrekkend vliegverkeer richting het zuidwesten) en 'Runway 6' (vertrekkend vliegverkeer richting het noordoosten). Voor beide startbanen is onderscheid gemaakt in het landend en vertrekkend vliegverkeer.



Figuur 20. Aantal vluchten naar en van het vliegveld RTHA gedurende de meetperiode. Landende vluchten ('arrivals') zijn weergegeven in het rood en vertrekkende vluchten ('departures') in het blauw.

7.3 Nucleatie onder invloed van licht/temperatuur

Uit een recente (2023) Europese inventarisatie blijkt op een aantal locaties dat UFP middagpieken produceert terwijl van de meeste andere uitstoot de concentraties in de middag dalen door de groter wordende menglaag. Temperatuur en licht maken dat deze nucleatie gebeurtenissen vooral 's zomers voorkomen en minder in voorjaar en herfst (en niet in de winter?). In de literatuur wordt soms verwezen naar steden met een 'mediterraan klimaat' maar het komt 's zomers dus ook elders voor. Hieronder twee dagprofielen, een van Barcelona (Spanje) en een uit het meer noordelijke Leicester (Engeland) waarbij de daling in de middag van de roetconcentraties (ook kleine deeltjes) als directe uitstoot zichtbaar is, maar de deeltjes vorming in de atmosfeer rond de middag voor gestegen UFP-concentraties zorgt.



Deze UFP-middagpieken zijn door meer auteurs en ook voor andere steden beschreven.

P. Trechera et al. 2023. Phenomenology of ultrafine particle concentrations and size distribution across urban Europe. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107744>