



ERBRINK
STACKS
CONSULT

Ultra fine particles (UFP) rond Schiphol: methodiek beschrijving

Rapport 2019R001

13 februari 2019

ErbrinkStacks Consult

Graaf van Rechterenweg 15
6961BN Oosterbeek

M. 06 5131 3650

info@erbrinkstacks.nl
www.erbrinkstacks.nl

Inhoud

1. Doelstelling	2
2. Werkwijze in het kort	3
3. Meteorologie	5
4. Ruwheid en receptorlocaties	7
5. Baangebruik	9
6. Constructie van taxi- en vliegtrajecten	10
7. Modellerings vluchtfasen	13
8. Referenties	18

1. Doelstelling

Voor onderzoek naar gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan aantallen ultrafijne deeltjes als gevolg van luchtvaart op Schiphol is informatie nodig over de blootstelling van mensen die in de nabijheid van Schiphol wonen. Met metingen kan maar op enkele locaties de concentratie UFP bepaald worden. Een rekenmodel maakt het mogelijk om op alle locaties in de directe omgeving waar mensen wonen de jaargemiddelde bijdrage van de luchtvaart op Schiphol aan de concentratie van UFP te bepalen.

In 2015 zijn rond Schiphol verkennende metingen aan ultra fijne stof concentraties (ultra fine particles: UFP) uitgevoerd. Deze metingen zijn in 2015/2016 nader geanalyseerd met het verspreidingsmodel STACKS+. Uit de meetcijfers kon worden afgeleid dat de bijdrage van vliegtuigen aan de UFP concentraties varieert van plaats tot plaats van ongeveer 10% tot 40% op jaarbasis. Uit lange termijn berekeningen (over meerdere jaren) kon worden afgeleid dat een bijdrage aan UFP concentraties van 3000/cm³ tot op afstanden van 10 km mogelijk is (een 'schone' achtergrond – dat wil zeggen niet beïnvloed door nabij gelegen bronnen – bevat 5000 a 10000 deeltjes per cm³).

De eerste vraag: in hoeverre zijn UFP concentraties ten gevolge van taxiënde vliegtuigen van belang?

Deze analyse was uitgevoerd zonder de bijdrage van vliegtuigen die taxiën, hierbij als aparte bron te betrekken. De voor de hand liggende vraag is dan of het concentratieplaatje zal veranderen als deze taxiënde vliegtuigen wél in de berekeningen worden betrokken. Daarom is in de zomer van 2017 een meetcampagne uitgevoerd om taxiënde vliegtuigen nader onder de loep te nemen. Hierbij is onderzocht wat de reikwijdte is van de beïnvloeding van emissies van taxiënde vliegtuigen. Hiertoe is een gerichte, kortdurende meetcampagne nabij de Polderbaan uitgevoerd. Het doel ervan is de UFP concentraties van taxiënde toestellen te bepalen en waar mogelijk te schalen met de (beter bekende) emissies van ander stoffen zoals fijn stof en NO_x.

De tweede vraag beschrijft het rekenmodel de werkelijkheid goed genoeg, met oog op toepassing in het gezondheidsonderzoek naar langdurende blootstelling?

In een tweede fase worden de UFP emissies van de overige vluchtfasen nader bepaald met modelberekeningen en totale bijdrage van de vluchtfasen getoetst door vergelijking van metingen. Deze fase beslaat een veel langere periode: om een goede inschatting te krijgen van de UFP concentraties is over alle seizoenen gemeten. Ook voor deze perioden zijn de vliegtuigbewegingen vertaald naar emissies en daarna met het rekenmodel uitgewerkt naar concentraties op alle meetlocaties. Daaruit kan afgeleid worden hoe goed het model in staat is de (relatieve) verschillen in UFP concentraties als gevolg van vliegverkeer tussen locaties te beschrijven. Daarnaast worden schaalfactoren afgeleid waarmee een inschatting gemaakt kan worden van de absolute bijdragen van vliegtuigemissies aan de concentratie van UFP in de omgeving van Schiphol.

De vraag is daarbij of NO_x of PM₁₀ werkelijk goede schatters voor UFP zijn. Omdat dit niet bekend is, is ook gerekend met de verbruikte brandstof als schatter voor UFP, met andere woorden: de UFP emissies van vliegtuigen schalen bij deze aanname direct met het brandstofverbruik. Uit een grondige vergelijking

van UFP metingen en berekenende concentraties kan afgeleid worden welke “schatter” het beste de gemeten UFP concentraties kan beschrijven. Uiteraard is UFP niet alleen van vliegtuigen afkomstig maar ook van andere bronnen. In de analyse wordt daarom een scheiding gemaakt tussen deze ‘achtergrond’ en de bijdrage van vliegtuigen. Hieruit is dan een schaalfactor af te leiden. Lopende het onderzoek zijn indicatieve UFP emissies per vliegfase vanuit de literatuur bij dit onderzoek betrokken. Deze waarden (Mazaheri, 2009) zijn eveneens in het model verwerkt en met meetwaarden vergeleken.

2. Werkwijze in het kort

Er is weinig bekend over de emissiefactoren voor UFP van vliegtuigen; meer voor PM10 en NOx (en andere stoffen, die in dit verband niet relevant zijn). Bovendien is het brandstofverbruik in alle vluchtfasen bekend. Daarom wordt een relatie gezocht tussen deze parameters (als “schatters”) enerzijds en gemeten UFP anderzijds.

In de campagne naar taxiënde vliegtuigen worden UFP concentraties in de buitenlucht gemeten en wel zodanig dat deze UFP zoveel mogelijk afkomstig is van (alleen) taxiënde toestellen. In de meetcampagne voor de taxibijdrage is op 5 locaties bij de Polderbaan intensief gemeten aan UFP concentraties in de buitenlucht. De Polderbaan is gekozen omdat hier redelijk goed aan weerszijden van de taxibaan meetposities zijn in te richten. Bovendien is de taxibaan die naar de Polderbaan voert redelijk ‘vrij liggend’, dat wil zeggen, dat (bij bepaalde windrichtingen) de emissie van uitsluitend de taxiënde toestellen kunnen worden bemeaten. De UFP metingen worden gemiddeld naar uurwaarden en er worden weersgegevens bij verzameld (waaronder de windrichting). De vliegtuigbewegingen op de Polderbaan zijn per uur verzameld. Door de vliegtuigsnelheid te modelleren en deze te koppelen aan het aantal vliegtuigen op het betreffende traject plus de emissie-per-vliegtuig, wordt een emissie voor dat taxitraject en voor elk uur bepaald. Met het rekenmodel worden de aldus bepaalde PM10 (of NOx, brandstof of indicatief UFP) emissies van (alleen) taxiënde vliegtuigen doorgerekend, zodat er op dezelfde plaatsen als de meetlocaties PM10 (of NOx, brandstof of indicatief UFP) concentraties berekend zijn. Door de berekende en gemeten concentraties te vergelijken, kan ingeschat worden wat de bijdrage van deze taxiënde vliegtuigen geweest moet zijn. Deze waarden en de schaalfactoren worden gebruikt in de volgende fase van het onderzoek: de validatiefase. Hier wordt de interpretatie gedaan van de metingen op meer meetlocaties rond Schiphol waar – na de taxicampagne – tweemaal een half jaar is gemeten. Deze metingen worden ook weer vergeleken met modelberekeningen. Hierbij worden nu alle startbanen en taxiroutes betrokken. Niet alleen de vliegtuigen op de grond worden beschouwd, maar ook de vliegtrajecten in de lucht tot 12 km afstand van en tot de startbanen. De uit de eerdere studie (2015) verkregen schaalfactor voor PM10 wordt zo nodig geüpdatet en de schaalfactoren voor andere stoffen worden eveneens getest.

De laatste fase van het onderzoek is het maken blootstellingskaarten voor gezondheidkundigen die de UFP concentraties koppelen aan gezondheidsparameters. De blootstellingskaarten betreffen een groot

gebied (30 x 30 km) en kunnen een lange termijn van bijvoorbeeld 5 of 10 jaar betreffen of een kortere periode beslaan. De berekende blootstellingsconcentraties worden gebruikt om te zoeken naar relaties met gezondheidsindicatoren.

Het rekenmodel

Voor deze studie wordt het geavanceerde rekenmodel STACKS+ ingezet, dat in 2015 ook is toegepast op UFP metingen die toen op een tiental meetstations rond Schiphol zijn uitgevoerd. Dit model is daarvoor al meerdere keren gebruikt om de luchtkwaliteit (vooral NO₂ en PM₁₀ in het kader van m.e.r. procedures) rond de luchthaven in beeld te brengen. Het rekenmodel wordt in deze studie op dezelfde wijze toegepast, echter nu met de emissies van taxiënde vliegtuigen toegevoegd. Uiteraard zijn er de nodige (detail-)aanpassingen gedaan om te rekenen voor deze specifieke periode en deze specifieke doelstelling:

- De emissies per vluchtfase zijn verkregen uit een relatie met de gashendelstand gewogen gemiddeld over de zeven meest voorkomende vliegtuigtypen op Schiphol. In andere studies werd gebruik gemaakt van de LeasIT bestanden.
- De keuze van de baankop voor taxiënde vliegtuigen wordt bepaald op basis van de gegevens uit de FANOMOS database. Van alle startende en landende vliegtuigen is de baan en baankop bekend. In andere studies werd dat bepaald door de keuze die in de LeasIT file was gemaakt. De LeasIT files kunnen nu niet gebruikt worden, omdat deze een geprognosticeerd vluchtschema geeft en niet de gerealiseerde vluchten (zie voorts hoofdstuk 7).
- De (stijgende of dalende) vliegtuigen bewegen zich in een verticaal vlak in voorts rechte banen: afbuigen naar links of rechts wordt niet voorzien. De stapgrootte in de beweging is 250 m.
- De snelheid van het vliegtuig is een functie van de afstand tot de baankop.
- De start van het vliegtuig wordt verondersteld plaats te vinden op (100 m van) deze baankop; na 2000 m begint het stijgtraject.
- Een landing vindt eveneens plaats op (100 m van) een baankop, waarna het vliegtuig afremt en na 2 km in taximodus overgaat.
- Taxiënde vliegtuigen zijn nu uiteraard wel in de berekeningen meegenomen.
- De berekende PM₁₀, NO_x en van brandstof afgeleide concentraties worden per uur en per meetlocatie gegeven, echter alleen voor de uren dat er ufp metingen beschikbaar zijn
- Uren met een erg lage windsnelheid (tot 1,5 m/s op 10m hoogte) worden in de analyse niet meegewogen: de kans dat de windrichting dan niet goed gedefinieerd is, is te groot en daarmee zouden de windrozen onbetrouwbaar worden.
- Door tegelijk de gemeten ufp concentraties in elk uur en voor elke meetlocatie te bepalen, wordt een bestand verkregen met alle meteo, ufp en rekendata. Dit bestand wordt verder geanalyseerd.

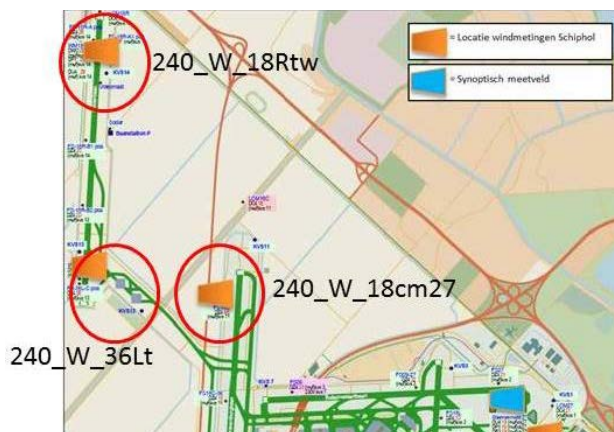
3. Meteorologie

De meteorologie wordt vanaf het jaar 2008 normaliter via de zogenaamde PreSRM tool verkregen en niet via de (tot 2008 gangbare) eigen meteo-preprocessors. De PreSRM bestaat uit een hulpprogramma (computer software) en een bijbehorende database met gegevens over het opgetreden weer over lange termijn en opgetreden concentraties luchtverontreiniging. De PreSRM voorziet in de bepaling van de benodigde weergegevens uit de standaard database die op een voorgeschreven wijze wordt bewerkt. Voor de berekeningen over de meetperiode kan dat niet omdat de weersdata (nog) niet zijn opgenomen in de database. De actuele meteorologie van Schiphol is in deze studie gebruikt en vervolgens bewerkt volgens dezelfde schema's als in de PreSRM en die zijn beschreven in het Paarse boekje (InfoMil, 1998). Het gaat daarbij om windsnelheid op andere hoogten van de meethoogte (tot 2 km hoogte) en data voor de mate van turbulentie en grenslaaghoogte. Op deze wijze wordt een meer accurate beschrijving van onder meer de wind (snelheid en – richting) verkregen, dan wanneer de (de meer generieke) PreSRM wordt gebruikt.

Over de meetperiode van zowel de taxicampagne als de halfjaarlijkse meetcampagnes zijn de meetdata van de windmeters nabij de Polderbaan gebruikt voor de windrichting en de windsnelheid. De meetlocaties van de volgende 3 windmeters zijn gecombineerd:

kruis_wr.240_W_18Cm27	kruis_wr.240_W_18Rtw	kruis_wr.240_W_36Lt
-----------------------	----------------------	---------------------

Het KNMI heeft 10-minutengemiddelde waarden ter beschikking gesteld, die vectorieel zijn gemiddeld naar uurwaarden. De windrichting en de windsnelheid worden over deze 3 windmeet locaties gemiddeld (zie figuur 1). Voor de windrichting wordt daarbij rekening gehouden met de sprong rond de noord (van 0 naar 360 graden).



Figuur 1. Locaties van de drie windmeetmasten, gebruikt voor de analyses tijdens alle metingen.

De taxicampagne vond plaats met startdatum/tijd 11- 5-2017 14 h en einddatum/tijd: 8- 6-2017 8h. De meetcampagne voor het eerste halfjaar vond plaats van start datum/tijd: 1- 8-2017 1 h en einddatum/tijd: 31- 1-2018 23h. De meetcampagne voor het tweede halfjaar vond plaats van start datum/tijd: 8- 3-2018 2h en einddatum/tijd: 31- 8-2018 23h.

In tabel 1 is gegeven wat de opgetreden frequenties van de windrichtingen is geweest, tezamen met de gemiddelde windsnelheden (m/s). Wat daarin opvalt, is dat de windrichtingen in de meetperiodes sterk afwijken van wat er gemiddeld over een lange periode optreedt. Vooral de meetperiode van het tweede halfjaar wordt gekenmerkt door veel meer noordelijke windrichtingen en daarbij veel minder zuiden en westelijke winden.

De andere meteogegevens zoals bewolgingsgraad, zoninstraling, temperatuur en neerslag zijn verkregen vanuit de standaard uurlijkse data die op de site van het KNMI beschikbaar zijn.

Het rekenmodel heeft naast deze gegevens nog een invoerparameter nodig: de langzame windrichtingsveranderingen (σ_{vl}), die niet aan de atmosferische turbulentie (door zonopwarming en wrijving aan het aardoppervlak) kunnen worden toegeschreven. Deze zijn voor de meetperiodes niet zo maar beschikbaar en worden daarom per uur afgeleid uit het verschil tussen de windrichting in dat uur en de windrichting in het vorige uur (ΔWR).

Tabel 1. Windrozen tijdens de taxicampagne en de twee meetperiodes.

windrichting (graden)	Taxi campagne			1e halfjaar			2e halfjaar		
	uren	%	wind snelheid	uren	%	wind snelheid	uren	%	wind snelheid
(-15- 15) noord	18	2.7	2.2	125	2.8	3.5	422	9.6	3.8
(15- 45)	22	3.3	2.3	91	2.1	3.5	419	9.5	4.3
(45- 75)	59	8.8	3.6	125	2.8	4.7	356	8.1	5.2
(75-105) Oost	55	8.2	3.4	104	2.4	3.9	277	6.3	5.6
(105-135)	28	4.2	3.9	119	2.7	3.2	274	6.2	3.9
(135-165)	64	9.6	4.1	283	6.4	3.7	207	4.7	3.7
(165-195) zuid	74	11.1	3.8	527	11.9	5	319	7.2	4.3
(195-225)	63	9.4	5.2	672	15.2	5.4	320	7.2	4.4
(225-255)	127	19	6.7	739	16.7	6.4	415	9.4	5.5
(255-285) west	64	9.6	4.7	761	17.2	5.8	312	7.1	4.6
(285-315)	58	8.7	4.5	331	7.5	5.2	268	6.1	4.8
(315-345)	23	3.4	4.5	201	4.6	4.6	500	11.3	4.1

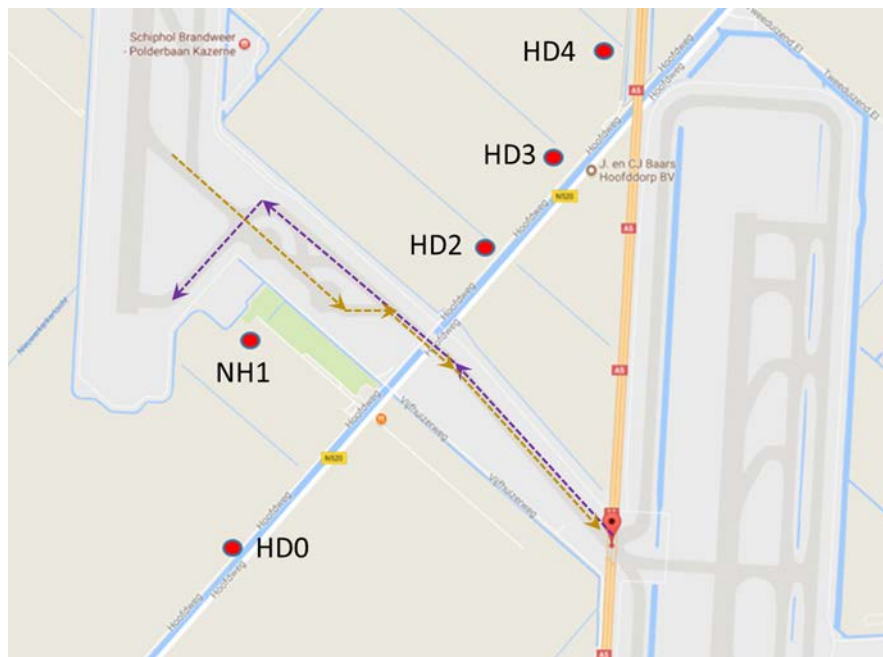
Om er voor te zorgen dat de statistiek hiervan (σ_{vl}) overeen komt met wat er normaal in Nederland optreedt (en wat ook in de PreSRM is opgenomen), worden de waarden geschaald via onderstaande formule:

$$\sigma_{vl} = 0.3 + \frac{2 * (\Delta WR - 0.3)}{(2 + \Delta WR)}$$

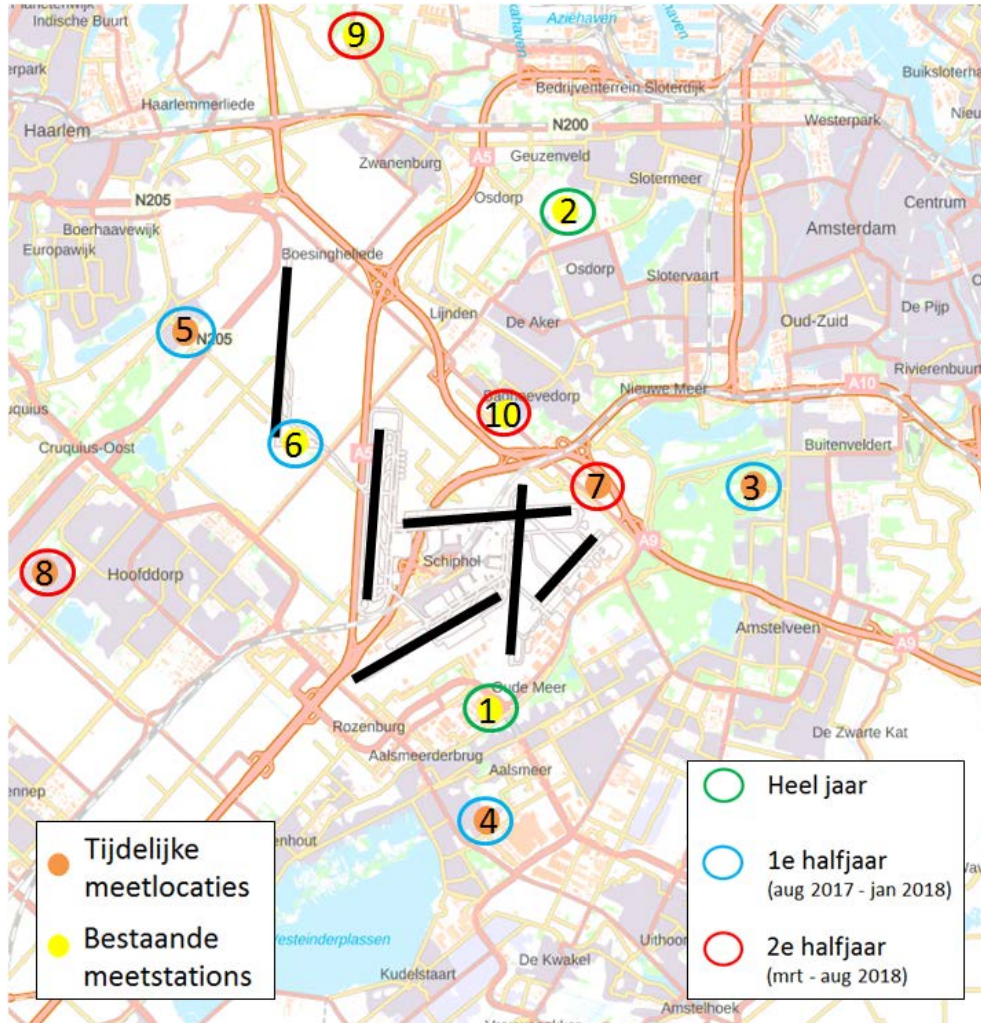
Hiermee wordt gewaarborgd dat de statistiek van de langzame windfluctuaties goed wordt weergegeven; een voordeel is nu dat de waarden die in elk uur optreden ook samenhangen met wat er aan winddraaiing is waargenomen.

4. Ruwheid en receptorlocaties

De meetlocaties zijn weergegeven in figuur 2 voor de taxicampagne en in figuur 3 voor de metingen in de navolgende twee half jaren.



Figuur 2. Locaties van de meetpunten. Ingetekend zijn tevens de taxiroutes bij starten en landen zoals bij de modellering is aangenomen (3 lijnstukken bij starten; 4 lijnstukken bij landen).



Figuur 3. Locaties van de meetpunten tijdens de twee halfjaarlijkse meetperioden.

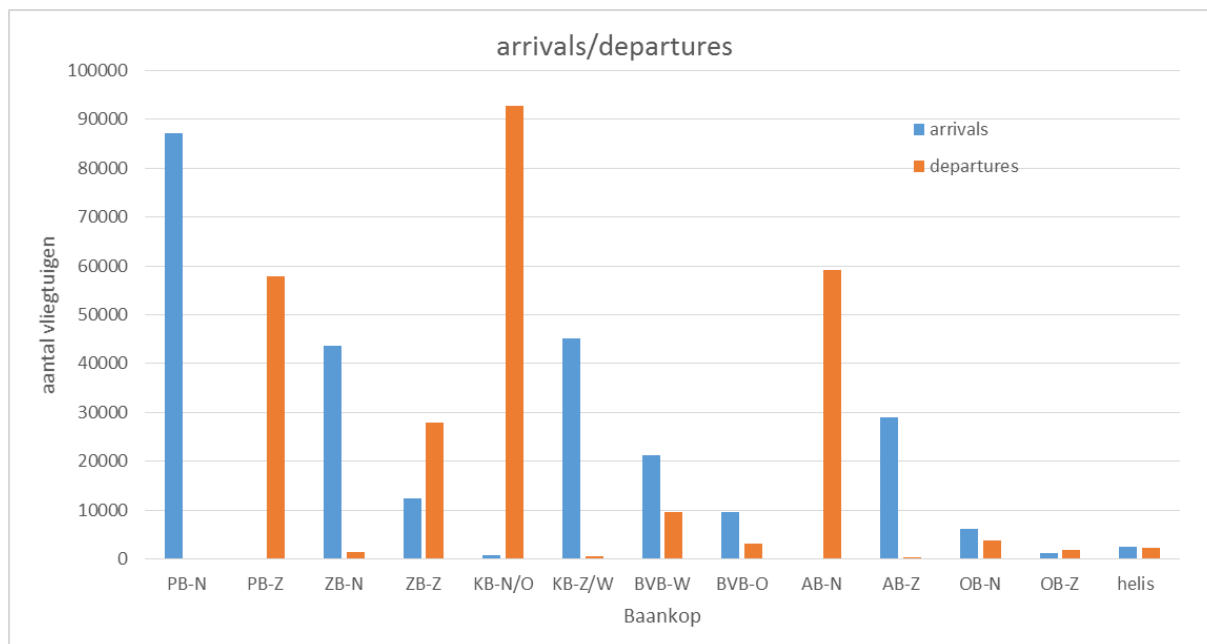
Tabel 2. Coördinaten van de meetlocaties tijdens de validatiefase

x	y	locatie
112937	477081	Oude Meer
114553	486713	Amsterdam-Ookmeer
118212	481630	Amstelveen
112853	475229	Aalsmeer
106969	484839	Vijfhuizen
109181	482380	NH1 Polderbaan
114949	481652	Nieuwe Meer
104334	480082	Hoofddorp
110174	490270	Spaarnwoude
113205	483074	Badhoevedorp

Voor de verspreidingsberekeningen is een waarde van de ruwheidslengte nodig. Voor het uitvoeren van verspreidingsberekeningen wordt normaliter een vaste waarde voor het hele rekengebied genomen, die wordt afgeleid uit de PreSRM data. Een vaste waarde van 0,15 m wordt gebruikt, de lange termijn (half jaar) berekende concentraties hangen hier niet erg van af.

5. Baangebruik

Het berekenen van UFP emissies heeft een gedetailleerde inventarisatie van de vliegtuigbewegingen. Daarom is via NLR een FANOMOS-bestand verkregen met alle vertrekkende en aankomende vliegtuigen per uur en per baankop voor alle meetperioden. Deze worden door het rekenmodel ingelezen en vertaald naar emissies, afhankelijk van de soort uitstoot die gevraagd wordt. In figuur 3 is een overzicht gegeven van de aantallen starts en landingen per baankop als totalen over de beide meetperioden van een half jaar. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de Polderbaan vooral gebruikt wordt de landingen en de Kaagbaan voor de starts. Maar ook andere startbanen leveren een bijdrage aan het totaal aantal; alleen de Oostbaan kent slechts een gering aantal starten en landingen.



Figuur 3. aantal starten en landingen (boven) per baankop.

6. Constructie van taxi- en vliegtrajecten

In het model worden de taxiroutes, start- en landings- en de vliegtrajecten gemodelleerd, zoveel mogelijk overeenkomend met de werkelijkheid. Immers, hoe de vliegtuigen precies zijn verplaatst, is niet exact bekend en wordt daarom geconstrueerd met de volgende aannamen:

- Het start- en landingstraject op de start/landingsbaan gaat over een afstand van 2 km.
- De helling tijdens stijgen is 9% (9 meter per 100 m lineaire afstand)
- Starten vindt altijd plaats 100 m vanaf de baankop.
- De landing vindt eveneens plaats vanaf 100 m van de baankop.
- De helling tijdens de landing is 4%
- Starten en landen worden gevolgd tot/vanaf 12,5 km afstand van de startbaan. Dat komt bij een helling van 9% neerkomt op ruim 1100 meter hoogte en bij 4% op 500 meter hoogte.
- De stapgrootte tijdens starten en landen is 250 m, met deze stapgrootte wordt de plaats (x- en y-coördinaten) en snelheid van het vliegtuig bepaald.
- De snelheid van een vliegtuig op de startbaan wordt berekend door aan te nemen dat de versnelling ongeveer 2.0 m/s² is; dit maakt dat een vliegtuig na ongeveer 2000 m met een snelheid van 320 km/uur loskomt van de startbaan en dan het stijgtraject begint.
- De rijsnelheid van het vliegtuig bij taxiën is 14 m/s (50 km/uur). Om de metingen op de Polderbaan zo goed mogelijk te beschrijven, is alleen voor de taxitrajecten naar de polderbaan (de nummers 2,3 en 4 op figuur 2) een snelheid gekozen die afhangt van het aantal vliegtuigen per uur dat vertrekt: $v = v(\text{opgegeven}) / (\text{aantal_vliegtuigen} / 8)$. Op deze wijze wordt rekening gehouden met mogelijke filevorming tijdens drukke uren. Dit wordt alleen voor de Polderbaan toegepast.
- Vliegtuigen tijdens de start staan overigens niet in een wachtrij.
- Vliegtuigen die net zijn geland, rijden onmiddellijk naar de gate.

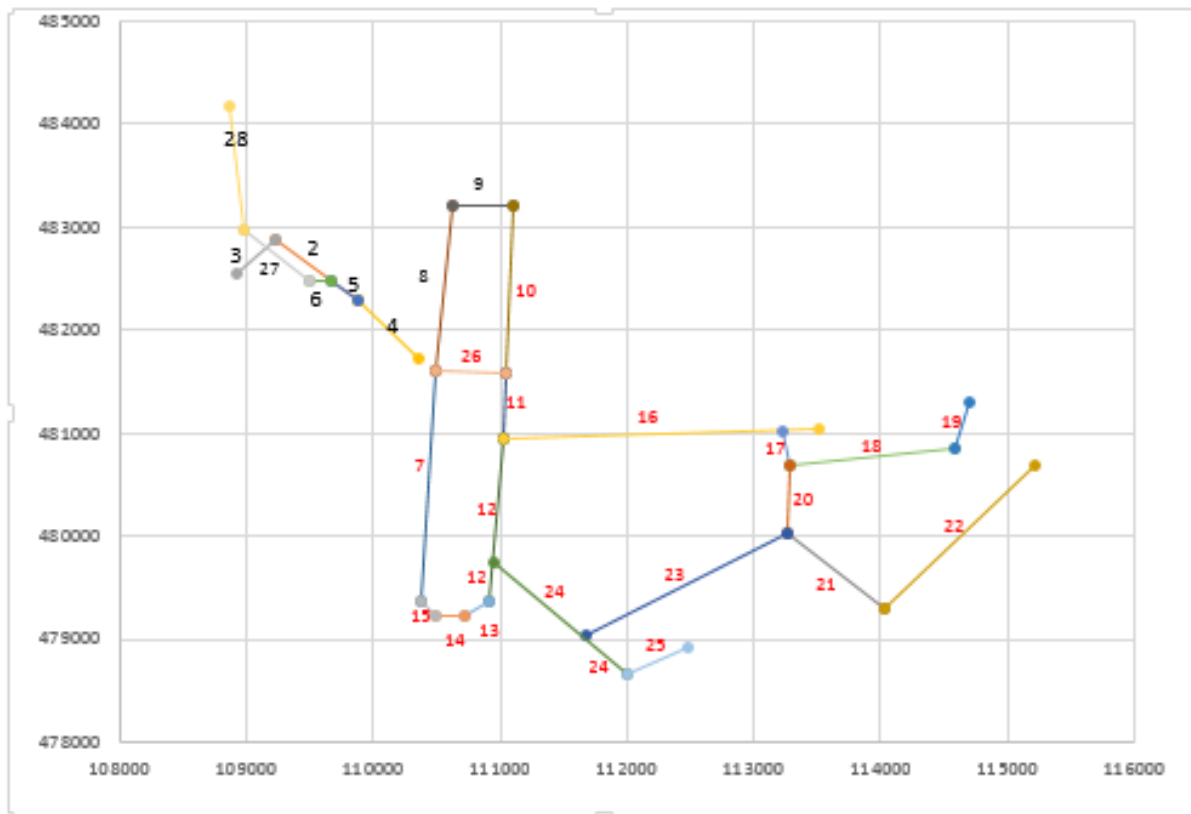
De trajecten op de startbanen liggen uiteraard vast; wanneer geen informatie over de baankop voorhanden is, zoals bij de mer studies, dan is de keuze van de baankop afhankelijk van de windrichting. Daarbij wordt aangenomen dat de component van de windrichting die in de lengte van de startbaan valt, bepalend is voor de keuze van de baankop, met andere woorden, starten en landen met een tailwind (hetgeen in praktijk soms kan voorkomen) wordt niet gemodelleerd. Bij de voorliggende studie echter is al bekend welke baankop voor starten en landen er gebruikt is. Deze wordt dan ook gebruikt voor het start- en landingstraject. Voor de keuze van de bijbehorende taxitrajecten is gekeken naar een logische route van de vliegtuigen. Rekening houdend met de baankop waar geland of gestart wordt, is een vaste taxi-route tussen baan en Schiphol Plaza gekozen, ervanuit gaand dat de precieze route niet erg uitmaakt voor de resultaten. Voor de startbanen, zie figuur 4.



Figuur 4. Locaties en benaming van de 6 startbanen op Schiphol.

De taxiroutes worden geconstrueerd zoals in figuur 5 aangegeven. Vliegtuigen kunnen zich niet zomaar van en naar de gate verplaatsen, dat behoort ordelijk te gebeuren, zodanig dat er geen botsingen zijn. Daarom wordt aan hand van de windrichting bepaald of de vliegtuigen linksom of rechtsom om Schiphol Plaza heen taxiën. Welke taxiroutes er worden gevolgd in het rekenmodel is aangegeven in tabel 3.

Voor de Polderbaan geldt dat er alleen vanaf de zuidkop gestart kan worden en dat er alleen vanuit het noorden op geland kan worden. Voor de Kaagbaan geldt dat er vrijwel alleen starten zijn vanaf (noord)oostzijde en dat er geland wordt vanuit de (zuid) west kant. En voor de Aalsmeerbaan geldt dat er vrijwel alleen gestart wordt vanuit de noordzijde (dus naar het zuiden toe) en geland in dezelfde richting op de zuidkop. Op de Zwanenburgbaan, de Buitenveldertbaan en de oostzijde kan in beide richtingen geland of gestart worden. Het baankopgebruik zoals opgegeven door NLR wordt als zonder meer overgenomen.



Figuur 5. Taxitrajecten zoals deze in het rekenmodel zijn vastgesteld, nummers verwijzen naar tabel 3.

Tabel 3. Keuze van taxitrajecten afhankelijk van de windrichting.

	zuiden/oost/ NO		west/noorden/ZW	
	depart	arrival	depart	arrival
Polderbaan	16,12,13,14,15,7,4,2,3	NVT	NVT	28,27,6,5,4,7,15,14,13,12, 24,23,20
Zwanenburgbaan	17,20,23,24,12,13,	20,16,11,10,	20,16,11,10,	17,20,23,24,12,13,
Buitenveldertbaan	12,24,23,20,18,19	20,23,24,12,11	20,23,24,12,11	12,24,23,20,18,19
Kaagbaan (ZW/NO)	16,17,20	NVT	NVT	16,17,20
Aalsmeerbaan	16,17	NVT	NVT	16,17,20
Oostbaan	20,21,22,23	20,21,22,23	20,21,22,23	20,21,22,23

Voor elk deeltraject (op de startbanen en op de taxibanen) wordt bepaald wat de snelheid is en welke emissie erbij hoort. Door de lengte van het deeltraject te delen door de snelheid van het vliegtuig en te vermenigvuldigen met het aantal vliegtuigen per uur dat zich over dit deeltraject beweegt wordt een emissie berekend in g/s. Het aantal vliegtuigen op een start(landings)baan kan niet meer dan zijn ongeveer 35 stuks: er moet een minimale tijd zitten tussen het vertrekken/aankomen van twee toestellen. Bij de taxi-deeltrajecten is dit anders: deze kunnen worden gebruikt voor vliegtuigen die naar/van meer dan één startbaan gaan. Hiermee wordt rekening gehouden, zodat het aantal vliegtuigen op een taxi-deeltraject (zoals aangegeven in figuur 5) wel meer dan 35 stuks kan bedragen. Emissies van vliegtuigen aan de gate worden niet meegeteld bij de modellering.

7. Modelling vluchtfasen

De standaardversie van STACKS voorziet niet in de berekening van immissies ten gevolge van vliegtuigen. Het model is daarom specifiek gemaakt voor luchtvaart door de volgende aspecten als uitbreiding op te nemen:

- vliegtuigemissies op de start- en landingsbanen worden doorgerekend, rekening houdend met de (flinke) warmte emissies die plaatsvinden: bij de berekening van de pluimhoogtes is hiermee rekening gehouden.
- vliegtuigemissies die in de lucht plaatsvinden, worden op de hoogte verspreid waarop deze worden geëmitteerd, rekening houdend met de warmte emissies. Dit geldt zowel voor het stijgen als voor het dalen van vliegtuigen
- De pluimstijging kan niet als één vaste waarde op de startbaan berekend kan worden, deze hangt namelijk af van de snelheid van het vliegtuig: des te lager de snelheid van het vliegtuig, des te groter de pluimstijging. De pluimstijging neemt dus af naar mate de snelheid van het vliegtuig toeneemt. In STACKS+ is daarom gekozen voor een pluimstijgformule met de vectoriële snelheid (een combinatie van windsnelheid en vliegsnelheid) in plaats van de windsnelheid (in de noemer dus).
- De pluimstijging van een vliegtuig wordt berekend als de pluimstijging van één motor
- Op de start- respectievelijk de landingsbaan wordt rekening gehouden met de toenemende respectievelijk de afnemende snelheid van het vliegtuig. Aangenomen is dat dit geschiedt met een versnelling (of vertraging) van ongeveer 2 m/s^2 . Op deze wijze is de snelheid ongeveer 300 km/uur na 2 km op de startbaan te hebben afgelegd.
- In tegenstelling tot de procedure voor pluimstijging in het NNM, wordt hier de pluimstijging berekend in één stap, gebruikmakend van de formules voor neutrale condities. Er wordt dus geen rekening gehouden met variërende temperatuurgradiënten in de atmosfeer. Dit is gedaan uit oogpunt van eenvoud.
- De pluimstijging bij vliegtuigpluimen wordt berekend door toepassing van de pluimstijgformule voor neutrale atmosferen; eventuele (gedeeltelijke) inversiepenetratie in en door de inversie geschiedt door een zogenaamde top-hat benadering: de verticale uitgestrektheid van de pluim wordt gesteld op 2 maal σ_z ; het deel van de pluim dat onder de menglaaghoogte blijft, wordt in de menglaag verspreid; het andere deel wordt verondersteld de grond niet meer te bereiken in het modeldomein.
- In STACKS+ wordt de initiële dispersie (in het horizontale - σ_{y0} en verticale vlak - σ_{z0}) berekend uit de pluimstijging conform NNM en bereikt dan typische waarden tussen 10 en 20 m.

Normaliter wordt in een gaussisch rekenmodel eerst de pluimstijging bepaald en daarna de dispersie. Dat maakt dat het stijgtraject dicht bij de bron niet realistisch beschreven wordt. Dat is meestal geen probleem bij schoorstenen (die voldoende hoog zijn), maar omdat de emissies van vliegtuigen aan de grond plaatsvinden en de meetlocaties (zeker bij de taxicampagne) relatief dicht bij de vliegtuigroutes liggen, is

het nodig de pluimstijging meer realistisch te berekenen. Dat kan door middel van de zogenaamde 1/3 – 2/3 macht wet, ooit door Briggs (1984) opgesteld. Deze stelt dat het stijgtraject van een warme pluim te beschrijven is met een formule waarin de afstand voorkomt, verheven tot de macht 0.666:

$$\Delta H = H_s + 1.6 \frac{(8.8 * MW)^{0.33} * X^{0.666}}{u_p}$$

Waarin H_s de emissiehoogte is (ongeveer 4 m), MW de warmte uitstoot in MW en X de afstand tot het ontvangerpunt. U_p is de vectoriële snelheid (de combinatie van windsnelheid en vliegsnelheid). Deze u_p neemt significant met de hoogte toe en omdat de pluimstijging fors kan zijn, wordt de berekening van de pluimstijging iteratief gedaan, met steeds een voor de pluimhoogte representatieve windsnelheid, totdat de windsnelheid bij de volgende iteratie minder dan 0,5 m/s verschilt. Deze formule geldt voor instabiele en neutrale condities, maar concentraties bij lage bronnen (<10 m) worden juist door stabiele condities (zeg 's nachts met niet veel wind) bepaald, daarom wordt voor duidelijk stabiele situaties (gekenmerkt door Obukhov lengte schaal $L < 100$ m) een correctie toegepast: $\Delta H(\text{cor}) = \Delta H(0.5 + 0.5 * L/100)$. Deze benaderende correctie is getuned op de pluimstijging voor stabiele situaties, waarbij een $dT/dz = 0.02$ K/m is verondersteld.

In het rekenmodel is een mogelijkheid ingebouwd om rekening te houden met pluimdaling. Uit visuele waarnemingen is af te leiden, dat de rookgassen van een vliegtuig wellicht niet stijgen tijdens de vluchtfase, maar juist dalen. Dit wordt veroorzaakt door een dubbele vortex die zich achter het vliegtuig vormt en die een neerwaartse beweging kent. Dit effect van deze vortex op de pluimdaling is niet te kwantificeren, zodat dit in de standaardversie van het rekenmodel niet wordt meegewogen.

De vliegtuigbewegingen en -emissies

Ten behoeve van dit project is door NLR een gedetailleerd bestand geleverd met alle vliegtuigbewegingen in de betreffende periode, die per uur aangeeft hoeveel vliegtuigen zijn geland en gestart per startbaan. Deze aantallen worden gecombineerd met generieke kentallen ten aanzien van warmte-emissie, NOx- en PM10-emissie, per vluchtfase: landingen of starten (er wordt dus geen onderscheid gemaakt in vliegtuigtype). Dit bestand wordt gekoppeld aan STACKS+ en hiermee worden de NOx- of PM10 concentraties per uur berekend voor alle UFP (vaste) meet locaties.

De vliegtuigemissies (NOx en PM10) kunnen op twee manieren worden berekend:

1. NLR maakt zogenaamde LeasiT files. Dit zijn bestanden waarin voor een specifieke luchthaven (in dit geval Schiphol) belangrijke parameters van vliegtuigen per uur gegeven worden in een groot ruimtelijk gebied. Een LeasiT bestand bevat zo voor alle uren voor een representatieve week de waarden voor brandstofverbruik, de snelheid, de warmte uitstoot, PM10, NOx emissies, de hoogte, snelheid en dergelijke in een gebied van 20x20 km tot 1000 m hoogte. Dit gebied is opgedeeld in blokken van 500x500x250 m (lengte x breedte x hoogte: de celafmetingen). Doordat tevens bekend is, hoeveel seconden een vliegtuig zich in een bepaalde cel bevindt, kunnen specifieke emissies (in kg/s) worden afgeleid voor de verschillende vluchtfasen.
2. Van de meest voorkomende vliegtuigen is bekend wat de emissies zijn bij een bepaalde gashendelstand. Als de gashendelstand wordt vertaald naar de toestand van het vliegtuig (voluit

starten, stijgen, dalen, landen of taxiën) dan kunnen voor de verschillende stadia van de vlucht inclusief het taxiën de emissies vastgesteld worden. Door de emissies te middelen met als weegfactor de mate van voorkomen van een vliegtuigtype, wordt een emissiegetal verkregen.

Aanvankelijk is de eerste werkwijze gevolgd, maar deze leidt tot getallen die een grote spreiding laten zien, met andere woorden, die een grote mate van onzekerheid vertonen. Daarom is bij NLR gevraagd om een berekening te maken van de emissies van PM en NO_x van de meest voorkomende vliegtuigtypen en hun aandeel in het vliegtuigpark dat Schiphol aandoet. Bovendien zijn indicatieve emissiekentallen voor UFP afgeleid uit metingen in de buitenlucht op een vliegveld in Australië [Mazaheri, 2009]. In onderstaande tabel 4 en figuur 6 zijn de kentallen voor de vluchtfasen gegeven. De kentallen zijn gekoppeld aan de gashendelstand (GHS, % van vol vermogen). De aanduiding PM_x staat voor fijnstofemissie, maar dan op een alternatieve wijze berekend. Het brandstofverbruik is ook opgenomen in deze tabel; het is mogelijk dat niet de PM emissies (uitgedrukt in massa/kg brandstof), maar het brandstofverbruik zelf meer maatgevend is voor de UFP uitstoot. De kentallen zijn berekend uit de emissiegegevens van een zevental vliegtuigtypen, die met elkaar 78% van de vluchten op Schiphol vertegenwoordigen. Ook de warmte emissie is in de tabel 4 en in figuur 6 aangeven. Deze warmte emissie is per motor gegeven, en daarbij is dus rekening gehouden met het aantal motoren per vliegtuig. De vluchtfase “kruisen” is ook opgenomen in de tabel, maar is in de praktijk niet gebruikt (de vliegtuigen bevinden zich dan buiten het modelgebied).

Tabel 4. Emissie kentallen voor de verspreidingsberekeningen, per vluchtfase (GHS is de gashendelstand)

		kg/s	kg/s	kg/s	kg/s		(deeltjes/s)
	GHS	brandstof	NO _x	PM10	PM _x	MW	Mazaheri
taxien	5	0.239	9.590E-04	2.273E-06	4.946E-07	3.896E+00	7.158E+15
landen	7	0.317	1.469E-03	6.293E-06	6.714E-07	5.202E+00	1.269E+16
naderen	30	0.779	8.396E-03	4.782E-05	1.283E-05	1.269E+01	3.115E+16
kruisen	40	1.001	1.342E-02	3.725E-04	2.853E-05	1.631E+01	3.497E+16
klimmen	85	2.217	5.309E-02	1.284E-03	4.379E-04	3.610E+01	1.108E+17
starten	100	2.800	8.471E-02	2.639E-04	1.039E-03	4.558E+01	1.400E+17

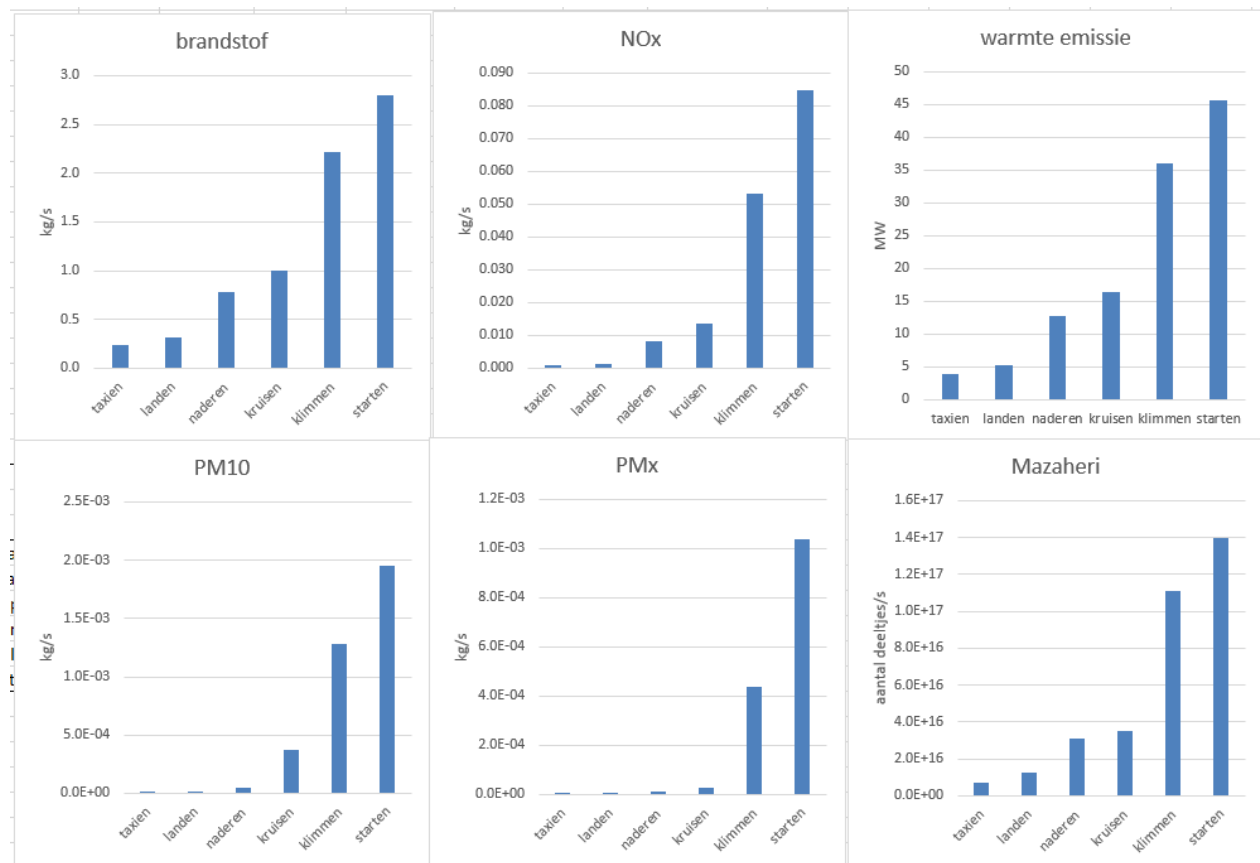
De trajecten op de startbanen en landingsbanen worden opgedeeld in stukjes van 250 m. Voor elk stukje wordt berekend wat de snelheid van het vliegtuig is, gegeven de formule (voor landen):

$$v_{vliegtuig} = v_0 - \sqrt{2.25x}$$

Waarbij x de afstand tot het touch-down punt is (100 vanaf de baankop), v_0 de landingssnelheid (100 m/s). Deze snelheidsafname gaat net zo lang door totdat de snelheid op de landingsbaan de snelheid van een taxiënd toestel is (14 m/s). Voor een startend toestel geldt een vergelijkbare formule ($v = \sqrt{2.25x}$), maar dan

is de startsnelheid 0 en gaat de versnelling net zo lang door het lift-off is bereikt; dit is de opgegeven lengte van het starttraject (2 km).

De emissiehoogte bij starten, landen en taxiën is arbitrair op 4 m gesteld.



Figuur 6. Emissie kentallen voor de verspreidingsberekeningen, per vluchtfase.

De berekeningen

De berekeningen worden uitgevoerd voor alle uren waarvoor een geldige waarde van de gemeten UFP concentraties bestaat. De mogelijkheid bestaat om bij de berekening een keus te maken voor alleen de taxiënde toestellen, dan wel alleen starten/landen, klimmen en naderen.

Alle trajecten op de grond (dus zowel starten, landen en taxiën) worden als lijnbronnen behandeld in het model. De overige vluchtfasen worden opgedeeld in puntbronnen. De benodigde waarden voor σ_y en σ_z worden berekend op de wijze zoals in het NNM wordt voorgeschreven, dus inclusief de iteratieve bepaling van de hoogte van het massazwaartepunt van de pluim, die afhangt van de waarden van σ_y en σ_z . De berekening van de concentratie geschiedt dan door de invulling van de gaussformule voor puntbronnen, maar dan met een gecorrigeerde waarde voor de bronterm, waardoor de lengte van de lijnbron wordt verdisconteerd. Ook wordt nog de emissie berekend per rekenpunt, omdat deze afhangt van de afstand tot de weg.

De gaussformule (waarin de constante = Q_1/u):

$$c(x, y, z) = \text{constant} \frac{1}{\sqrt{(2\pi) \sigma_y}} e^{-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}} \frac{1}{\sqrt{(2\pi) \sigma_z}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(h_e - z)^2}{\sigma_z^2}}$$

En Q_2 :

$$Q_2 = Q_1 \frac{\sigma_y \sqrt{2\pi} \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{b-y}{\sigma_y \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{b+y}{\sigma_y \sqrt{2}} \right) \right)}{4b \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}}$$

Waarin Q_1 de werkelijke emissie van dit traject is en Q_2 de gecorrigeerde waarde om de lijnbronbreedte te verrekenen. Verder is y de afstand tot de pluim-as en b de halve trajectlengte en wordt de horizontale dispersieparameter σ_y voor een puntbron in deze formule gebruikt. Erf is de errorfunctie waarvoor een benadering wordt gebruikt. Als benadering van deze error-functie is gekozen voor de formulering, gebaseerd op de Chebyshev fit, vermeld in Press et al. (1992); deze is voldoende nauwkeurig om over een redelijk breed scala van y/σ_y waarden de functiewaarden uit te rekenen (fractionele fout steeds $< 10^{-7}$), met z als argument:

$$t = 1.0 / (1.0 + 0.5 * z);$$

$$\text{erff} = t * \exp(-z * z - 1.26551223 + t * (1.00002368 + t * (0.37409196 + t * (0.09678418 + t * (-0.18628806 + t * (0.27886807 + t * (-1.13520398 + t * (1.48851587 + t * (-0.82215223 + t * 0.17087277))))))))));$$

De emissie is het product van specifieke emissie (kg/s of aantal/s voor UFP), de lengte van het traject, het aantal vliegtuigen op dit traject en de snelheid:

$$Q_1 = \frac{E(vf) * n_{vliegtuig} * L_{traject}}{3600 * v_{vliegtuig}}$$

Waarin $E(vf)$ de specifieke emissie per vluchtfase is (zie tabel 4). Met depositie wordt geen rekening gehouden; dat er een significante afname van het aantal deeltjes zal plaatsvinden door depositie is onwaarschijnlijk geacht.

Per uur worden de emissies van alle op dat moment actieve vliegtuigen (startbanen, taxiënde toestellen, naderende en stijgende toestellen) individueel doorgerekend op vooraf gedefinieerde receptorpunten en dan allen opgeteld, zodat een totale uurgemiddelde concentratie in aantallen/cm³ worden verkregen. Bij deze berekening wordt tevens bijgehouden wat de bijdragen zijn van de afzonderlijke vliegfase in dit uur, zodat achteraf per locatie kan worden nagegaan welke vluchtfase in welke mate bijdraagt aan het totaal.

8. Referenties.

Briggs, G.A., 1984. Plume rise and buoyancy effects, In: Atmospheric Science and power production, (ed.: D. Randerson) DOE/TIC 27601, Dep of Commerce, Springfield, USA.

Mazaheri, M., G.R. Johnsons, 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.

Paarse boekje: InfoMil, 1998. “Het Paarse Boekje”: Nieuw Nationaal Model. Verslag van het onderzoek van de Projectgroep. Revisie nationaal Model. InfoMil, 1998, Den Haag

Press, W.H., et al. 1992. Numerical Recipes in C, Second Edition, Cambridge, MA: Cambridge University Press