

Eindrapport

UFP- en BC-metingen rondom de luchthaven van Zaventem

J. Peters, P. Berghmans, J. Van Laer, E. Frijns

Met medewerking van
BIM, ECN, ISSeP en VMM

Studie uitgevoerd in opdracht van de VMM en van BIM
2016/MRG/R/0493

April 2016



VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)
Bank 375-1117354-90 ING
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

2016/MRG/R/0493

Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

VERSPREIDINGSLIJST

Jeroen Staelens, VMM
Christina Matheussen, VMM
Jelle Hofman, UA (VMM)
Gerard Kos, ECN
Ernie Weijers, ECN
Olivier Brasseur, BIM
Thierry de Vos, BIM
Benjamin Bergmans, ISSEP
Patrick Berghmans, VITO
Evelien Frijns, VITO
Jo Van Laer, VITO
Jan Peters, VITO
Mirka Van der Elst, LNE
Rudi Geens, LNE

SUMMARY

Introduction and objective of the study

Ultrafine particle (UFP) emissions from aircraft engines have been associated with increased UFP concentrations in areas surrounding airports. Measurement campaigns by the US EPA indicated that UFP emissions from aircraft engines are in the range of 10^{15} to 10^{17} particles per kg fuel, with variations depending on the engine type, fuel type, engine load and the environmental conditions. The smaller UFP fraction is the dominant fraction in terms of particle number counts (PNC).

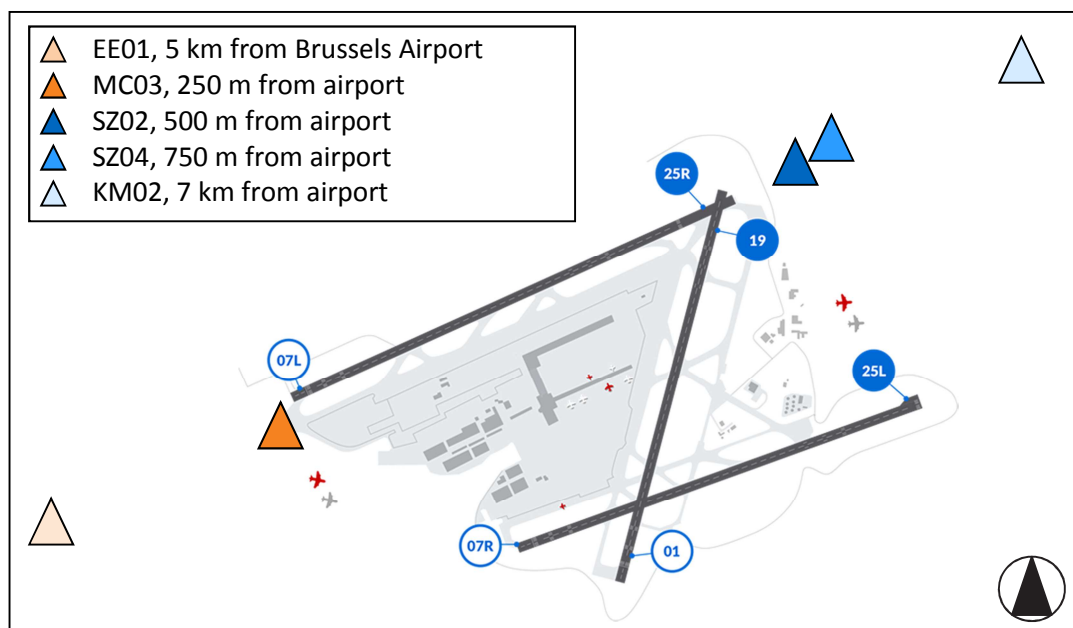
A number of studies investigated the UFP concentration in the vicinity of airports worldwide (mainly in Europe and the US). The UFP number concentration pattern shows a high temporal and spatial variation. The highest UFP concentrations are associated with landing and take-off (LTO) operations. UFP concentrations near the runway decrease drastically after aircraft take-off. The high number of LTO operations at airports results in a highly dynamic UFP concentration pattern through time.

Results from environmental monitoring studies in areas surrounding airports indicate a decreasing trend in UFP concentration with distance to the airport. Wind direction and wind velocity are other important parameters determining the spatial UFP pattern around airports. In particular, elevated UFP concentrations are observed in downwind areas. Effects of aircraft UFP emissions have been observed at a distance of over 15 km from the airport.

A monitoring study was performed in an area around Brussels Airport, Belgium. **The objective of the study was to investigate the potential contribution of operations at Brussels Airport on the local air quality at surrounding residential areas.** Therefore the concentration of UFP, black carbon (BC) and nitrogen oxides (NO_x) were measured at different locations near the airport and measurements were compared to literature results.

Monitoring plan

Five locations were selected as monitoring locations, including one existing air quality monitoring station from the Flanders Environment Agency (VMM). The monitoring stations were located on a transect aligned with a busy runway (25R/07L) at varying distance from the runways. Four of the measurement locations (EE01, MC03, SZ02 and SZ04) are characterized as urban background stations, whereas one location (KM02) is a rural station.



The monitoring was performed for UFP, BC, NO_x and PM₁₀. The UFP number concentration was continuously monitored at locations EE01, KM02, MC03 and SZ04 with a scanning mobility particle sizer (SMPS) within different particle size classes of 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100, 100-200 and 200-294 nm. The UFP measurement resolution was five minutes. The BC and NO_x concentration was measured at EE01, KM02, MC03 en SZ02 at a resolution of 30 minutes. The PM₁₀ concentration was determined on a daily basis. The monitoring was done during a two month period, i.e. October and November 2015. An overview of the instruments that were used at the different monitoring stations is given in this Table:

Location	Parameter	Monitor
Steenokkerzeel SZ04	UFP	TSI SMPS 3936L76
	PM ₁₀	Leckel SEQ47/50
Steenokkerzeel SZ02	BC	MAAP 5012
	NO _x	NO _x TS42i
Diegem MC03	UFP	IfT custom classifier and CPC3772
	BC	Magee AE22
	NO _x	NO _x 42C
	PM ₁₀	Leckel SEQ47/50
Evere EE01	UFP	IfT custom classifier and CPC3772
	BC	Magee AE22
	NO _x	NO _x TS42C
	PM ₁₀	Leckel SEQ47/50
Kampenhout KM02	UFP	TSI SMPS 3936L76
	BC	MAAP 5012
	NO _x	NO _x TS42C
	PM ₁₀	Leckel SEQ47/50

Meteorological data from a nearby meteorological station (Melsbroek) were provided by BIM. Information about LTO operations at Brussels Airport during the two month monitoring period was provided by LNE and is based on flight information and radar measurements of Belgocontrol and Brussels Airport Company.

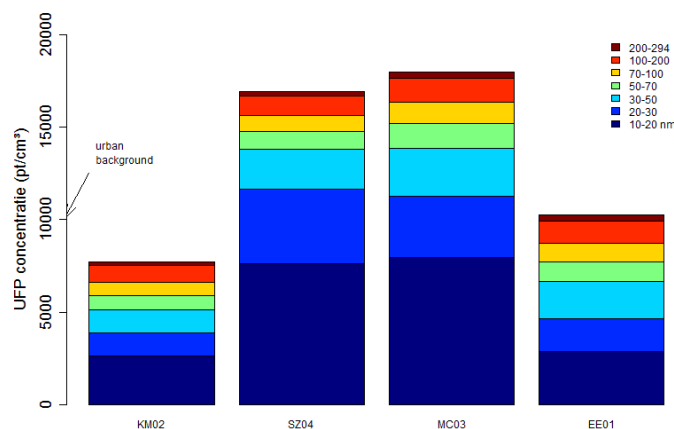
Before the two months monitoring period, a two week period (14-28/09/2015) of simultaneous measurements at one of the sites (SZ04) was performed to compare the instruments. Based on these simultaneous measurements, the UFP monitoring systems were adjusted and rescaling models were parameterized to increase comparability between the measurements from different instruments. The correspondence of the rescaled simultaneous measurements was excellent, with a difference of less than 3% between most instruments for the majority of UFP size classes.

Results

The results presented are mainly focused on the smallest UFP fraction of this study, i.e. 10-20 nm, which is the fraction with the largest contribution to aircraft emissions. Based on the entire measurement period, the average and 99th percentile (P99) number concentrations of UFP of size class 10-20 nm are largely increased at the nearby monitoring stations SZ04 and MC03 compared to KM02 and EE01 stations which are situated further away from the airport.

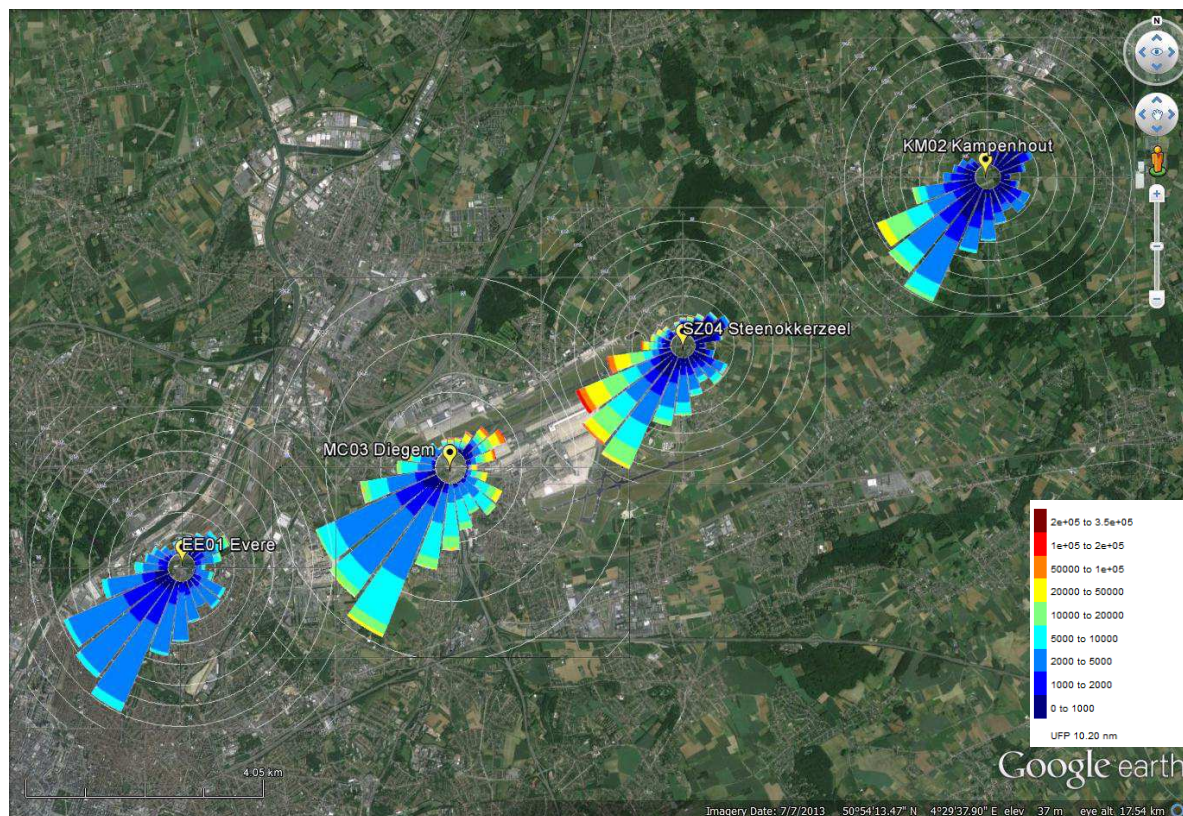
Location	Average 10-20 nm		P99 10-20 nm	
	pt/cm ³	ratio	pt/cm ³	ratio
Evere (EE01)	2 891	1,1	10 063	0,5
Diegem (MC03)	8 119	3,1	68 992	3,5
Steenokkerzeel (SZ04)	7 776	3,0	74 370	3,7
Kampenhout (KM02)	2 615	1	19 660	1
* ratio [location]/[KM02] KM02 is a rural background site				

The share of the 10-20 nm fraction in the total 10-294 nm UFP number concentration is much larger near the airport (SZ04 45% and MCO3 45%) in comparison to the more distant locations (KM02 35% and EE01 28%). The UFP concentrations vary between the hours of the day, with the highest concentrations during the morning rush (6 – 10 am local time) and evening rush (4 – 8 pm local time). The number of LTO operations at Brussels Airport shows a similar bimodal pattern.



The analysis of UFP concentration measurements in relation to wind direction showed increased UFP concentrations of the 10-20 nm size class at all the monitoring locations when they were situated downwind of the airport. At the nearby stations, the UFP number concentrations of the

10-20 nm size class exceed 50 000 pt/cm³ during 6-11% of the time for SZ04 and MC03, respectively. For larger UFP classes (> 70 nm) the UFP pollution roses did not show the directionality toward the airport which was observed for the smaller UFP classes.



An additive model was used to account for the contribution of airport operations to the UFP concentration at nearby downwind locations. An overcompensation by this model was inevitable, so the values reported here are probably rather conservative estimates. Under downwind conditions, for 25% of the time an airport contribution to the 10-20 nm UFP particle numbers of 20 000 to 28 000 pt/cm³ was estimated. For 10% of the time a contribution of more than 44 000 to 58 000 pt/cm³ was found, and for 5% of the time of 66 000 to 82 000 pt/cm³. The maximal contribution ranged between 255 000 and 276 000 pt/cm³.

Flight information was used to further investigate the variability in UFP concentration. A visual inspection of 3D plots of the hourly mean UFP concentration of the 10-20 nm size class, the hourly prevailing wind direction and the hourly number of LTO operations showed a clear gradient of increasing UFP concentration with increasing numbers of LTO operations during downwind conditions, especially at SZ04 which is downwind under the dominant southwesterly wind direction. At MC03 the gradient is less clear due to a much lower number of measurements under downwind conditions.

The variability of the hourly 10-20 nm UFP concentration in function of meteorology and LTO operations was further analysed using a multiple linear regression model. For the two locations NE of the airport the models explained 60% (SZ04) and 51% (KM02) of the measured variation. The model identified the number of LTO operations at the nearest runway 25R during downwind conditions as the most important independent variable in explaining the variation in UFP

concentration at both sites. The analysis revealed a correlation between the UFP concentration in the surrounding area of the airport and aircraft LTO operations.

The contribution of airport activities to the other measured air pollutants, BC, NO_x and PM₁₀, is much less evident. The analysis of BC and NO_x concentration profiles in function of wind direction did not reveal higher contributions from the airport than from other (probably mainly traffic) sources. The daily average PM₁₀ concentration was similar at all measurement sites.

Conclusion

In urban environments, road traffic is generally the dominant source of primary UFP (10-100 nm). In the area surrounding Brussels Airport, a significant contribution of airport activity to the UFP 10-20 nm number concentration is observed. The contribution decreases with increasing distances, but effects are measurable at a distance of 7 km from the airport. There is a clear relationship between LTO operations, wind direction and distance to the airport and the UFP concentration that is observed at a monitoring site in the area around the airport. In contrast, the airport activity does not have a higher contribution to the BC, NO_x and PM₁₀ concentration at the monitoring sites compared to the contributions from traffic at nearby roads and motorways.

INHOUD

Verspreidingslijst	I
Summary	II
Inhoud	VII
Lijst van tabellen	IX
Lijst van figuren	X
Lijst van afkortingen	XIII
HOOFDSTUK 1. Inleiding	1
HOOFDSTUK 2. Literatuur	3
2.1. <i>Ultrafijn stof</i>	3
2.2. <i>Emissies</i>	3
2.3. <i>UFP-concentratie op en in de omgeving van luchthavens</i>	4
2.4. <i>Vergelijking met stedelijke UFP-concentratie</i>	12
2.5. <i>Gezondheidseffecten</i>	15
2.6. <i>Samenvatting</i>	16
HOOFDSTUK 3. Vergelijkende metingen	17
3.1. <i>Meetopstelling voor vergelijkende metingen</i>	17
3.2. <i>Overzicht vergelijkende UFP-metingen</i>	20
3.3. <i>Opstellen van een UFP herschalingsmodel</i>	22
3.4. <i>Overzicht herschaalde UFP-meetreeksen</i>	29
3.5. <i>Vergelijking BC-metingen</i>	30
HOOFDSTUK 4. Meetplan	33
4.1. <i>Meetlocaties</i>	33
4.1.1. <i>Meetlocatie 1: Evere (EE01)</i>	34
4.1.2. <i>Meetlocatie 2: Diegem (MC03)</i>	35
4.1.3. <i>Meetlocatie 3:Steenokkerzeel (SZ04 en SZ02)</i>	36
4.1.4. <i>Meetlocatie 4: Kampenhout (KM02)</i>	38
4.2. <i>Meetperiode</i>	38
4.3. <i>Gemeten parameters</i>	38
4.3.1. <i>UFP</i>	39
4.3.2. <i>NO_x</i>	39
4.3.3. <i>Black carbon</i>	40
4.3.4. <i>Overzichtstabel</i>	41

HOOFDSTUK 5. Overzicht van de metingen	42
5.1. <i>Meteorologie</i>	42
5.2. <i>UFP-metingen</i>	45
5.3. <i>BC-metingen</i>	49
5.4. <i>NO/NO₂/NO_x-metingen</i>	51
HOOFDSTUK 6. Interpretatie van de metingen	53
6.1. <i>Variatie van de UFP-concentratie in de tijd</i>	53
6.2. <i>Variatie van de UFP-concentratie tussen meetlocaties</i>	58
6.3. <i>UFP-concentratie in functie van meteorologische omstandigheden</i>	60
6.3.1. UFP-pollutierozen	60
6.4. <i>UFP-concentratie in functie van luchthavenactiviteit</i>	66
6.4.1. Gebruik van landings- en startbanen	66
6.4.2. Relatie tussen vliegtuigbewegingen en UFP-metingen	71
6.5. <i>Associatie met andere parameters</i>	76
6.5.1. Black Carbon (BC)	76
6.5.2. NO, NO ₂ en NO _x concentratie	78
6.5.3. Correlaties tussen pollutanten	81
6.5.4. PM ₁₀ -concentratie	82
HOOFDSTUK 7. Besluit	84
Literatuurlijst	86
Bijlage A	88
Bijlage B	94
Bijlage C	100
Bijlage D	101

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Scantijd en deeltjesgrootte bereik per instrumenttype. D _{mid} range is het middelpunt van een diameterklasse.	18
Tabel 2: Vergelijking aantalconcentratie (10 – 294 nm) volgens de SMPS van ECN op meetlocatie SZ04 van 18-28/09/2015 en van 1/10 – 30/11/2015.	22
Tabel 3: Overzicht van SMPS herschalingsfactoren (lineaire regressie zonder intercept) t.o.v. ISSEP.1.	22
Tabel 4: Gemiddelde aantalconcentratie voor en na herschaling (lineaire regressie zonder intercept), en % verschil met gemiddelde aantalconcentratie ISSEP.1.	24
Tabel 5: P90 aantalconcentratie voor en na herschaling (lineaire regressie zonder intercept) en % verschil met P90 aantalconcentratie ISSEP.1.	24
Tabel 6: P10 aantalconcentratie voor en na herschaling (lineaire regressie zonder intercept) en % verschil met P10 aantalconcentratie ISSEP.1.	26
Tabel 7: Herschalingsparameters van lineair model met intercept ($Y = a + b \cdot X$) voor deeltjesklassen 10-20 nm en 20-30 nm van ECN en ISSEP.2.	28
Tabel 8: Weerhouden SMPS herschalingsparameters volgens een lineaire regressie zonder intercept ($Y = b \cdot X$) t.o.v. ISSEP.1 die verder in deze studie zijn gebruikt.	28
Tabel 9: Samenvattende statistieken BC-concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) tijdens de vergelijkende metingen te SZ04.	31
Tabel 10: Overzicht herschalingsfactoren BC monitoren.	32
Tabel 11: Beschrijving SMPS-systemen.	39
Tabel 12: Overzicht van het percentage van de tijd dat de wind uit een bepaalde windrichting kwam (windrichting in segmenten van 30°, middelpunten van segmenten zijn gegeven in tabel, bv. 30° omvat wind uit 15° tot 45°, windsnelheden lager dan 0,2 m/s niet opgenomen)	45
Tabel 13: Gemiddelde en P99 deeltjesaantalconcentratie voor de 10-20 nm deeltjesklasse op de vier meetlocaties. De ratio tussen de resultaten per meetlocatie en de locatie met de laagste concentratie (Kampenhout, KM02) is ook gegeven.	46
Tabel 14: Samenvattende statistieken van de 5-minuuts UFP-metingen.	47
Tabel 15: Windafwaartse bijdrage van de luchthaven aan de UFP-concentratie (10-20 nm) in de omgeving van de luchthaven.	66
Tabel 16: Overzicht maandelijkse vertrek- en landingsbewegingen op de verschillende runways (data bron www.batc.be).	68
Tabel 17: BC-concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) op de vier meetlocaties (op basis van halfuursgemiddelde metingen)	76
Tabel 18: NO _x -concentratie (als NO ₂ -equivalent; $\mu\text{g}/\text{m}^3$) op de vier meetlocaties (op basis van halfuursgemiddelde metingen).	80
Tabel 19: Pearson correlatie tussen BC, NO, NO ₂ en NO _x en de verschillende UFP-deeltjesklassen.	82

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Deeltjesaantallen in functie van diameter op verschillende meetlocaties op en rond de luchthaven van Kopenhagen (station B4 op parkeerplatform, station Øst aan de oostrand van de luchthaven, en HCAB op verkeerslocatie in Kopenhagen, Lille Valby is een ruraal achtergrondstation, HCOE een stedelijk achtergrondstation) (boven). Gemiddelde deeltjesaantallen voor drie deeltjesgrootteklassen (onder). Figuur gereproduceerd uit Ellermann et al., 2012.	5
Figuur 2: UFP-concentratie gekarteerd op basis van mobiele persoonsgebonden monitoring (gereproduceerd uit Møller et al., 2014).	6
Figuur 3: Aantalconcentratie in functie van de deeltjesgrootte (SMPS-scan) van een vliegtuigmotor (top) en dieselmotor (onder) (gereproduceerd uit ACI Europe, 2012). Let op de verschillende schaal van de y-assen.	7
Figuur 4: 15-min gemiddelde UFP-concentratie op Arlanda Airport Terminal 5 (gereproduceerd van ACI Europe, 2012).	8
Figuur 5: Deeltjesgrootteverdeling nabij de bron (BF) en op een achtergrondlocatie (AQMD) (gereproduceerd uit Zhu et al., 2011).	9
Figuur 6: Boxplot van de UFP- en BC-concentratie op de verschillende meetlocaties in toenemende afstand tot de luchthaven (gereproduceerd uit Hu et al., 2009). Meetlocaties A, B, C en D zijn respectievelijk 80, 100, 380 en 660 m windafwaarts van de luchthaven gelegen in het verlengde van de start/landingsbaan. Het achtergrondstation is op 830 m van de luchthaven gelegen loodrecht op de overheersende windrichting.	10
Figuur 7: UFP-concentratie gemeten op 100 m van de luchthaven vertoont een sterke associatie met aankomst (A) en vertrek (D) van vliegtuigen (gereproduceerd uit Hu et al., 2009).	11
Figuur 8: Vergelijking van UFP PNC van verkeerslocaties in verschillende steden (gereproduceerd uit Kumar et al., 2004)	13
Figuur 9: UFP-concentratie in functie van afstand tot een drukke weg (Plantin en Moretuslei, Antwerpen) en tijdstip van de dag (geselecteerde resultaten voor weekdays waarop de meetplaatsten windafwaarts van de weg lagen) (gereproduceerd uit Frijns et al., 2013).	14
Figuur 10: Ruimtelijke variabiliteit in gemodelleerde jaargemiddelde UFP-concentratie in Antwerpen, 2013 (gereproduceerd uit Hooyberghs en Lefevbre, 2014).	15
Figuur 11: De vergelijkende metingen werden uitgevoerd op de parking van Kasteel Ter Ham te Steenokkerzeel (meetlocatie SZ04).	17
Figuur 12: Diffusiecorrectiefactor in functie van deeltjesgrootte.	20
Figuur 13: Overzicht van de vergelijkende metingen van de aantalconcentratie (10 – 294 nm) op meetplaats SZ04.	21
Figuur 14: Tijdreeksen van de UFP-concentratie voor 10-20 nm deeltjes op een aantal dagen met hoge concentraties (23/09), sterke pieken (25/09) en lage concentraties (27/09). Op 23/09 VM zijn geen metingen van VITO beschikbaar, op 23/09 NM zijn geen metingen van ECN beschikbaar.	30
Figuur 15: Overzicht vergelijkende BC-metingen.	31
Figuur 16: Scatterplots van de BC-concentratie gemeten door twee verschillende monitoren die op dezelfde locatie opgesteld stonden.	32
Figuur 17: Ligging van de meetlocaties t.o.v. de belangrijkste start en landingsbanen van Luchthaven Zaventem.	33
Figuur 18: Weergave van de startbanen van Luchthaven Zaventem.	34
Figuur 19: Ligging meetlocatie EE01 te Evere.	35
Figuur 20: Ligging van meetlocatie MC03 te Diegem.	36
Figuur 21: Ligging van de meetlocaties SZ04 en SZ02 te Steenokkerzeel.	37
Figuur 22: Ligging van de meetlocatie KM02 te Kampenhout.	38

Figuur 23: Overzicht meteorologische gegevens van meetstation Melsbroek/Zaventem (bron: BIM). De windroos geeft de frequentie (%) weer wanneer de wind uit een bepaalde richting kwam voor de periode 1/10 – 30/11/2015. De segmenten (van 15°) zijn ingekleurd proportioneel met de windsnelheid. _____	44
Figuur 24: Hoogte van de menglaag op basis van KMI-gegevens van Ukkel (Kwaliteitscode 1: goede betrouwbaarheid; 0: minder betrouwbaar; 2: meting komt overeen met de basis van de wolken). _____	45
Figuur 25: Tijdreeksen van de UFP-concentratie (10-20 nm klasse en totaal 10-294 nm) op de vier meetlocaties. _____	49
Figuur 26: Overzicht van het aantal vluchten per dag opgedeeld per weekdag. _____	53
Figuur 27: Boxplots van de UFP-concentratie voor drie deeltjesklassen (10-294 nm, 10-20 nm, 20-30 nm) op de vier meetlocaties. _____	55
Figuur 28: Uurlijkse variatie van de UFP-concentratie voor drie deeltjesgrootteklassen op de vier meetlocaties. _____	57
Figuur 29: Histogram van het aantal vliegbeweging per uur van de dag op de luchthaven van Zaventem. _____	58
Figuur 30: Boxplot van UFP-concentratie op de vier meetlocaties. _____	59
Figuur 31: Gemiddelde UFP-concentratie voor de verschillende deeltjesgrootteklassen. Een inschatting van de stedelijke achtergrondconcentratie (10 000 pt/cm ³) is opgegeven. _____	60
Figuur 32: Pollutierozen van de UFP-concentratie in verschillende deeltjesgrootteklassen en meetlocaties. De schaal verschilt tussen de verschillende rijen (deeltjesgroottes). _____	63
Figuur 33: UFP 10-20 nm pollutierozen langsheen het ZW-NO transect. _____	63
Figuur 34: Polaire percentielplots voor de UFP-concentratie van de 10-20 nm klasse voor de vier meetlocaties geven de percentielconcentratie (P25, P50, P75, P90, P95 en P99) in functie van de windrichting. De gemiddelde UFP-concentratie is als zwarte lijn weergegeven. De UFP-concentratie is weergegeven op de concentrische cirkels. _____	64
Figuur 35: Boxplots van de UFP-concentratie in functie van de afstand tot de luchthaven op momenten dat de meetpost windafwaarts gelegen is van de luchthaven (voor UFP-totaal boven, en voor 10-20 nm klasse onder). _____	65
Figuur 36: Overzicht start/landingsbanen Brussels Airport. _____	67
Figuur 37: Daggemiddelde UFP-concentratie van de 10-20 nm deeltjesklasse in Steenokkerzeel (SZ04) en Diegem (MC03). Daggemiddeldes zijn ingekleurd volgens overheersende windrichting: rood = meetstation windafwaarts van de luchthaven, blauw = meetstation windopwaarts van de luchthaven. _____	69
Figuur 38: Opstijgende vlucht vanop baan 25R (bron www.batc.be) _____	70
Figuur 39: Uurlijks geaggregeerde vluchtgegevens voor alle start/landingsbanen (all), en opgesplitst voor vertrek (all.D) en aankomst (all.A). De uurgemiddelde UFP-concentratie van de 10-20 nm fractie gemeten in Diegem (MC.10.20) en Steenokkerzeel (SZ.10.20) is gegeven in de onderste twee grafieken. _____	71
Figuur 40: Scatterplot van de uurgemiddelde UFP-concentratie (10-20 nm) in Steenokkerzeel (SZ04) en Diegem (MC03) in functie van de windrichting ingekleurd volgens het aantal vliegbewegingen per uur (aankomst + vertrek) op Brussels Airport. _____	72
Figuur 41: Aantal bewegingen op runway 25R (boven) en 07L (onder) voor verschillende windrichtingen. De counts (kleurschaal) geven het aantal uren dat een bepaalde combinatie voorkwam tijdens de meetcampagne. _____	73
Figuur 42: Tijdreeks van de UFP-concentratie (10-20 nm) in MC03 (zwart) en EE01 (grijs) voor de periode 1-2/10/2015. Bovenaan zijn de vliegbewegingen weergegeven op de belangrijkste start- en landingsbanen tijdens de periode 1-2/10/2015. _____	75
Figuur 43: Tijdreeks van de UFP-concentratie (10-20 nm) in SZ04 (zwart) en KM02 (grijs) voor de periode 19-20/11/2015. Bovenaan zijn de vliegbewegingen weergegeven op de belangrijkste start- en landingsbanen tijdens de periode 19-20/11/2015. _____	75

Figuur 44: Daggemiddelde BC-concentratie op de vier meetlocaties (bc.km = Kampenhout, bc.sz = Steenokkerzeel, bc.mc = Diegem, bc.ee = Evere). Let op: de schaal van de y-as is verschillend in de bovenste plot (Kampenhout). Voor Evere zijn gegevens beschikbaar vanaf 16/10/2015. _	76
Figuur 45: Percentielplots van de BC-concentratie in functie van de windrichting op de vier meetlocaties. _____	77
Figuur 46: Overzicht daggemiddelde NO, NO ₂ en NO _x concentratie op de vier meetlocaties in oktober-november 2015. _____	80
Figuur 47: Percentielplots van de NO _x concentratie in functie van de windrichting op de vier meetlocaties. _____	81
Figuur 48: PM ₁₀ -concentratie (daggemiddelde, in µg/m ³) op vier meetlocaties. _____	83

LIJST VAN AFKORTINGEN

BAC	Brussels Airport Company
BIM	Leefmilieu Brussel
CANAC	Computer Assisted National Air Traffic Control Center
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland
ISSeP	Institut Scientifique de Service Public
LNE	Department Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse overheid
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
EE01	meetlocatie Evere
KM02	meetlocatie Kampenhout
MC03	meetlocatie Diegem
SZ04	meetlocatie Steenokkerzeel, Kasteel Ter Ham
SZ02	meetlocatie Steenokkerzeel, VMM-meetstation
ACI	Airports Council International
AE22	dual wavelength aethalometer
AE33	multi-angle aethalometer
BC	zwarte koolstof (black carbon)
CPC	condensatiedeeltjester
DMA	differential mobility analyzer
EEPS	engine exhaust particle sizer
EPA	US Environmental Protection Agency
ICAO	International Civil Aviation Organization
LTO	landing and take-off
MAAP	multi-angle absorption photometer
MLH	hoogte van de atmosferische menglaag (mixing layer height)
NO	stikstofmonoxide
NO ₂	stikstofdioxide
NO _x	verzamelnaam voor mono-stikstofoxiden
PM	fijn stof (particulate matter)
PNC	deeltjesaantal (particle number counts)
SMPS	scanning mobility particle sizer
UFP	ultrafijn stof (ultrafine particles)

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

Recent toonden enkele studies aan dat luchthavens belangrijke bronnen van ultrafijne deeltjes (UFP) kunnen zijn waardoor de UFP-concentratie in de omgeving van de luchthaven verhoogd kan zijn. Onder andere op basis van een meetcampagne uitgevoerd in het kader van het Joaquin-project werd de invloed van Schiphol op de UFP-concentratie in de omgeving van de luchthaven beter in kaart gebracht.

Internationaal heeft UFP meer en meer aandacht gekregen in milieu- en gezondheidsstudies. De metingen van UFP bestaan in 2 vormen;

- het totaal aantal deeltjes die groter zijn dan een bepaalde diameter, bv. 7 nanometer (nm). Een typische jaargemiddelde achtergrondconcentratie in Antwerpen is grofweg 10 000 deeltjes per cm^3 (pt/ cm^3);
- het aantal deeltjes per deeltjesgrootte klasse, bijvoorbeeld van 10-20 nm, tussen 20-30 nm etc. Met deze informatie kan wellicht het type bron herkend worden.

Om een beter beeld te krijgen van de impact van vliegtuigemissies op de luchtkwaliteit in de directe omgeving van de luchthaven van Zaventem (Brussels Airport) werden omgevingsmetingen rondom de luchthaven uitgevoerd. Zowel de UFP-bijdrage van de luchthaven als de windafwaartse gradiënt van de atmosferische UFP-concentratie op toenemende afstand van de luchthaven werd hierbij beoordeeld. Dit gebeurde aan de hand van een meetcampagne uitgevoerd op 4 geselecteerde locaties (2 locaties dichtbij en 2 locaties verder van de luchthaven). Om de bijdrage van wegverkeer op de gemeten UFP-concentraties na te gaan werd ook de atmosferische concentratie aan zwarte koolstof (BC) en stikstofoxides (NO_x) opgemeten.

De objectieven van de studie zijn:

1. Uitvoeren van een literatuurstudie;
2. Opstellen van een plan van aanpak en uitvoeren van vergelijkingsmetingen;
3. Uitvoeren van luchtkwaliteitsmetingen op 4 locaties in de directe omgeving van de luchthaven, waarbij de luchtkwaliteitsparameters UFP, BC en NO_x in kaart gebracht worden volgens state-of-the-art meettechnieken;
4. Verwerking en analyse van de meetresultaten;
5. Rapportering.

De monitoringstudie beoogt de potentiële bijdrage van vliegtuig-gerelateerde emissies op de lokale luchtkwaliteit in de woonzones rondom de luchthaven in kaart brengen. De studie betracht meer inzicht te verwerven in:

- De concentratieniveaus van ultrafijn stof (UFP), zwarte koolstof (BC) en NO_x in de directe omgeving van de luchthaven van Zaventem en hoe deze zich verhouden t.o.v. vergelijkbare metingen rondom andere luchthavens;
- Hoe de concentraties en deeltjesgrootteverdeling van UFP variëren in de tijd (dagprofiel) en plaats (afstand tot de luchthaven) en hoe deze variaties gerelateerd zijn aan meteorologische

condities.

Dit rapport bestaat uit:

- Een literatuurstudie;
- Een overzicht en analyse van de vergelijkende metingen vanop 1 locatie gedurende twee weken (14-28/09/2015);
- Een overzicht van de meetlocaties en meetinstrumenten waarmee de monitoring plaatsvond in oktober-november 2015;
- Een overzicht van de metingen op de meetlocaties;
- Een analyse en interpretatie van de metingen;
- Een besluit.

HOOFDSTUK 2. LITERATUUR

2.1. ULTRAFIJN STOF

Ultrafijne deeltjes (UFP: ultrafine particles) zijn deeltjes met een aerodynamische diameter kleiner dan 100 nm. De UFP aantalconcentratie (PNC: particle number concentration) is het aantal (en dus niet de massa) van deeltjes kleiner dan 100 nm in de atmosfeer. Ultrafijn stof heeft qua massa geen significant aandeel aan de fijnstofconcentratie (PM, particulate matter), maar bepaalt wel het grootste deel van de deeltjesaantallen.

Binnen de fijn stoffractie wordt er onderscheid gemaakt tussen de nucleatiemode, Aitken-mode en accumulatie mode (Seinfeld en Pandis, 2006). De nucleatiemode omvat deeltjes tot 10 nm die uit gassen gevormd worden via condensatie. De Aitken-mode zijn deeltjes tussen 10 en 100 nm die gevormd worden uit verbrandingsprocessen. In sommige gevallen worden de nucleatie- en Aitken-mode beide onder de nucleatiemode ondergebracht omdat er geen duidelijk afzonderlijke pieken zijn in de grootteverdeling. De accumulatie-mode bestaat uit deeltjes van 100 nm tot 2,5 µm en wordt gevormd door coagulatie van primair gevormde deeltjes en door condensatie. Deeltjes in de accumulatie-mode hebben een langere atmosferische levensduur in vergelijking met nucleatie-deeltjes. Merk op dat de hier beschreven indeling van deeltjes in verschillende modes niet in alle studies op dezelfde manier wordt toegepast.

Ultrafijne deeltjes die worden gevormd in vliegtuig- en dieselmotoren door onvolledige verbranding bestaan voor een groot deel uit organische koolstofverbindingen (condensaten). Vliegtuigmotoren worden verondersteld ook een belangrijke bron van anorganische sulfaatdeeltjes te zijn, als gevolg van het hoge zwavelgehalte in vliegtuigbrandstof. Deze deeltjes spelen daarom ook een belangrijke rol bij de vorming van ultrafijn stof (Bezemer et al., 2015).

2.2. EMISSIES

UFP-emissies van vliegtuigmotoren zijn niet opgenomen als parameter in de ICAO Aircraft Engine Emission Databank. Door EPA werd een testprocedure opgesteld voor het meten van emissies van vliegtuigmotoren (Kinsey, 2009) gebruik makend van een SMPS of EEPS (engine exhaust particle sizer) voor de bepaling van de aantalconcentratie. In een aantal experimenten werd het effect van brandstofverbruik, brandstoftype, motortype, motorcyclus, motortemperatuur en plaats van de aanzuigapparatuur voor bemonstering op de deeltjesaantallen en de deeltjesgrootteverdeling bestudeerd. De PM aantalconcentraties in de emissies worden hierbij uitgedrukt als een emissie-index die de PM aantalconcentratie per kg brandstofverbruik uitdrukt. Testmatrixen (EPA en NASA) worden gebruikt om vliegtuigemissies te simuleren. Enkele conclusies uit deze testen zijn:

- De PM emissie-index varieerde tijdens de tests van 10^{15} tot 10^{17} partikels/kg brandstof, afhankelijk van brandstof- en motortype, motorbelasting en omgevingscondities;
- De deeltjesgrootteverdeling was meestal unimodaal tussen 3 en ca. 100 nm. Bij hoge motorlast werd een accumulatiemode geobserveerd van deeltjes met grotere diameter door ofwel homogene nucleatie, groei door condensatie of coagulatie. De geometrische mediaan diameter van de partikeluitstoot ligt tussen 10 en 30 nm.

Voor het volledige overzicht van resultaten wordt verwezen naar het EPA-rapport (Kinsey, 2009).

2.3. UFP-CONCENTRATIE OP EN IN DE OMGEVING VAN LUCHTHAVENS

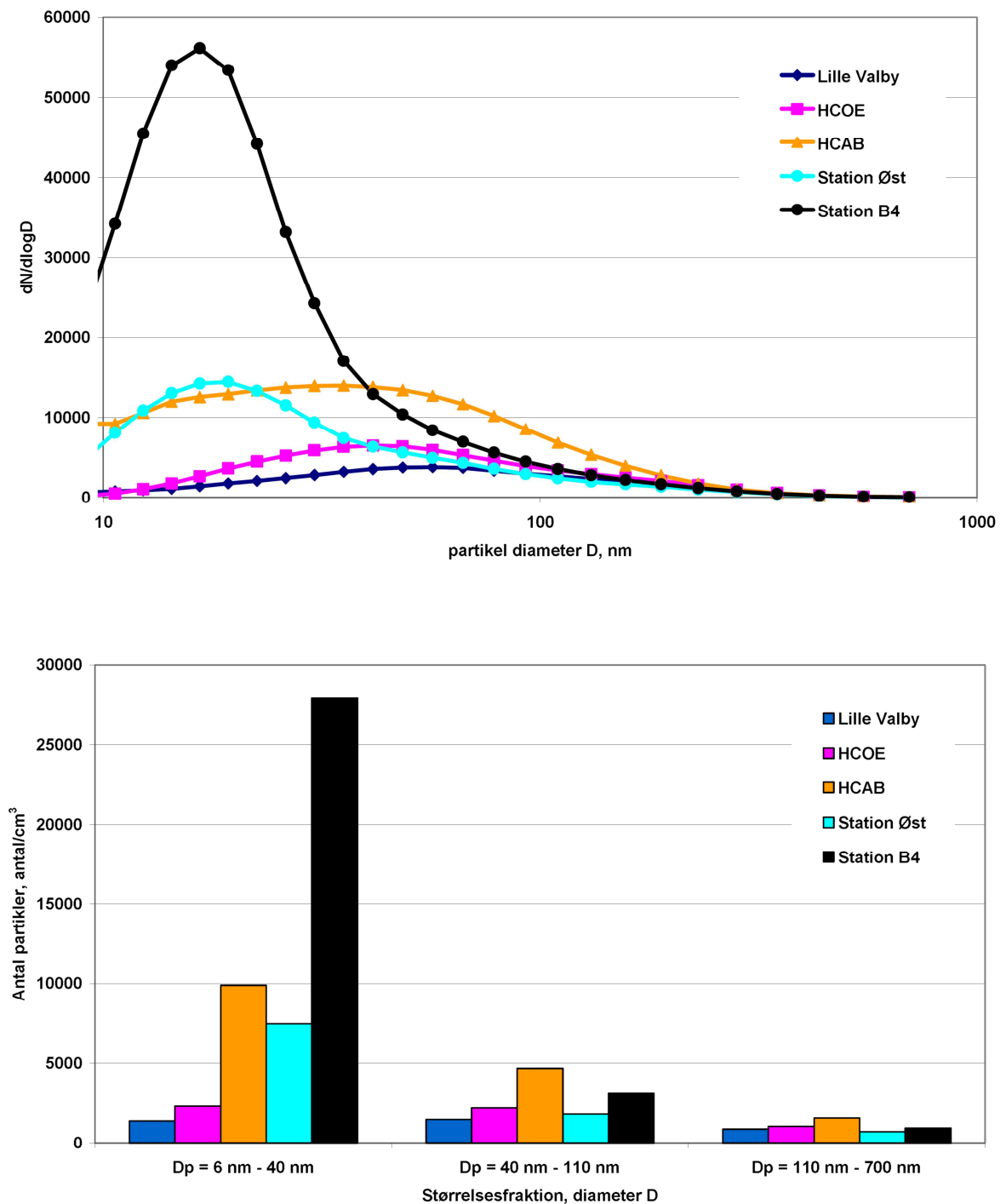
De concentratie van ultrafijn stof op en in de omgeving van luchthavens werd reeds bestudeerd op een (beperkt) aantal luchthavens wereldwijd. Resultaten van een aantal studies werden gegroepeerd in het rapport "Ultrafine Particles at Airports" (Airports Council International (ACI) Europe, 2012). De resultaten en conclusies van een aantal case studies worden hieronder besproken m.b.t. ultrafijn stof.

→ Copenhagen Airport, Denemarken

Er werd een monitoring uitgevoerd van de deeltjesaantallen van deeltjes met een diameter van 6 tot 700 nm op een parkeerplatform (airport apron) op de luchthaven, een aantal plaatsen aan de rand van de luchthaven en een aantal plaatsen in stedelijke omgeving (Ellerman et al., 2012). De gemeten deeltjesaantallen waren 3-4 keer hoger op het parkeerplatform in vergelijking met de metingen op een verkeerslocatie in stedelijke omgeving. De deeltjesaantallen aan de rand van de luchthaven waren 20-40% verhoogd t.o.v. de deeltjesaantallen op de verkeerslocatie. Het gemiddelde aantal deeltjes in de periode augustus-december 2010 bedroeg 31 900 pt/cm³ op het parkeerplatform, 10 000 pt/cm³ op de rand van de luchthaven en 5 500 pt/cm³ op de verkeerslocatie. In de periode januari-juni 2011 werden 38 600 pt/cm³, 11 000 pt/cm³ en 6 500 pt/cm³ gemeten op de respectievelijke meetlocaties parkeerplatform, rand luchthaven en verkeerslocatie.

Het zijn voornamelijk de deeltjes met een grootte van 6-40 nm die in hoge concentratie voorkomen, met name 85-90% van het totaal aantal deeltjes op het parkeerplatform (Figuur 1). Ook op de meetlocaties aan de rand van de luchthaven zijn het voornamelijk de kleinere deeltjes met diameter 6-40 nm die 70% van de totale deeltjesaantalconcentratie uitmaken. Het is de aantalconcentratie van deeltjes uit de kleinere fractie 6-40 nm die verhoogd is in vergelijking met de verkeerslocatie. De concentraties van deeltjes van 40-700 nm liggen in dezelfde grootteorde op beide locaties.

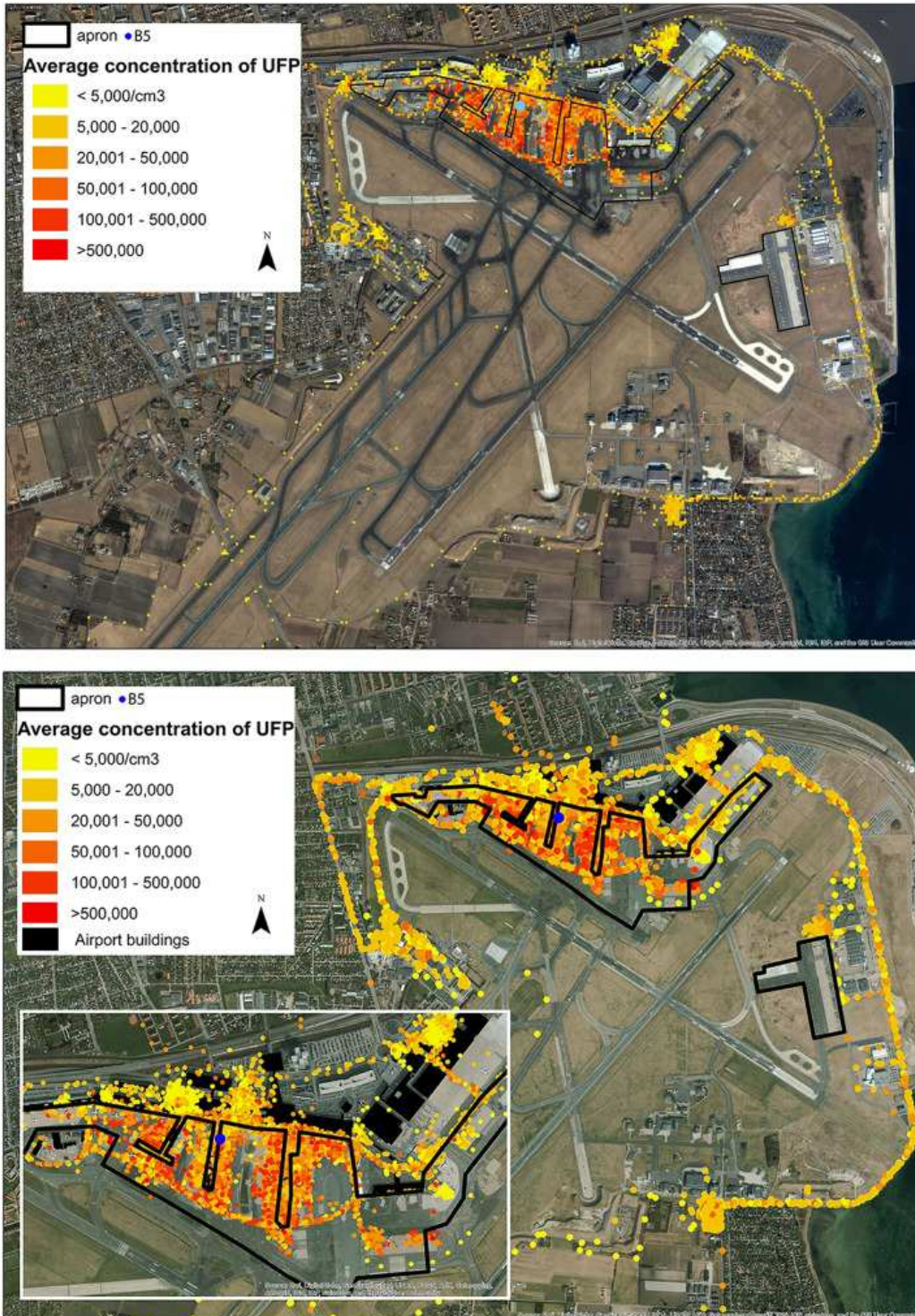
De variatie in aantalconcentratie op het parkeerplatform is gerelateerd aan de variatie in vertrek/aankomst van vliegtuigen.



Figuur 1: Deeltjesaantallen in functie van diameter op verschillende meetlocaties op en rond de luchthaven van Kopenhagen (station B4 op parkeerplatform, station Øst aan de oostkant van de luchthaven, en HCAB op verkeerslocatie in Kopenhagen, Lille Valby is een ruraal achtergrondstation, HCOE een stedelijk achtergrondstation) (boven). Gemiddelde deeltjesaantallen voor drie deeltjesgrootteklassen (onder). Figuur gereproduceerd uit Ellermann et al., 2012.

In een studie van Møller et al. (2014) werd de blootstelling van luchthavenpersoneel in kaart gebracht met mobiele nanotracer (Phillips, 10 – 300 nm) metingen gekoppeld aan GPS-data. Er werden grote verschillen tussen verschillende beroeps categorieën vastgesteld. Op basis van

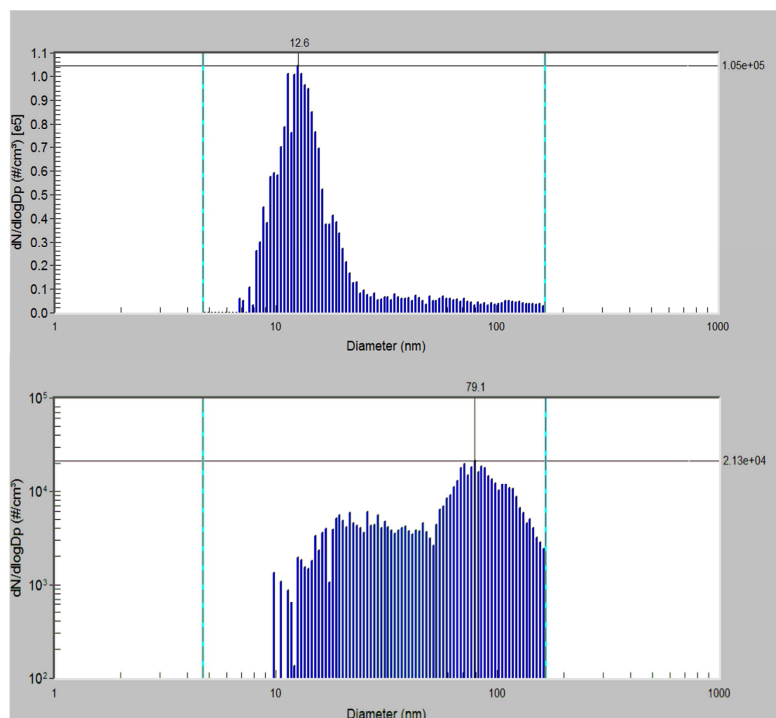
persoonlijke metingen werd de UFP-concentratie rond de luchthaveninfrastructuur in kaart gebracht (Figuur 2). Personen die de bagagebehandeling uitvoeren werden blootgesteld aan de hoogste UFP-concentraties.



Figuur 2: UFP-concentratie gekarteerd op basis van mobiele persoonsgebonden monitoring (gereproduceerd uit Møller et al., 2014).

→ Zurich Airport, Zwitserland

Screeningsmetingen met o.a. SMPS werden uitgevoerd tijdens vliegtuigrotaties (aankomst – behandeling – vertrek). Op basis van deze metingen werd besloten dat de deeltjesconcentratie hoger is wanneer de behandeling plaatsgrijpt aan een pier dan op een meer open stationeringsplaats (80 000 – 160 000 pt/cm³ (piekdiameter 18-21 nm) en 60 000 – 90 000 pt/cm³ (26-27 nm) ter hoogte van de pier, t.o.v. 30 000 – 60 000 pt/cm³ (35-36 nm) op open locatie). Dit wordt toegeschreven aan de nabijheid van meerdere activiteiten ter hoogte van de pier, en windeffekten. De uitlaatgassen van vliegtuigmotoren bevatten een groter aandeel zeer kleine partikels in vergelijking met de uitlaat van dieselmotoren van voertuigen die op de luchthaven gebruikt worden (Figuur 3).



Figuur 3: Aantalconcentratie in functie van de deeltjesgrootte (SMPS-scan) van een vliegtuigmotor (top) en dieselmotor (onder) (gereproduceerd uit ACI Europe, 2012). Let op de verschillende schaal van de y-assen.

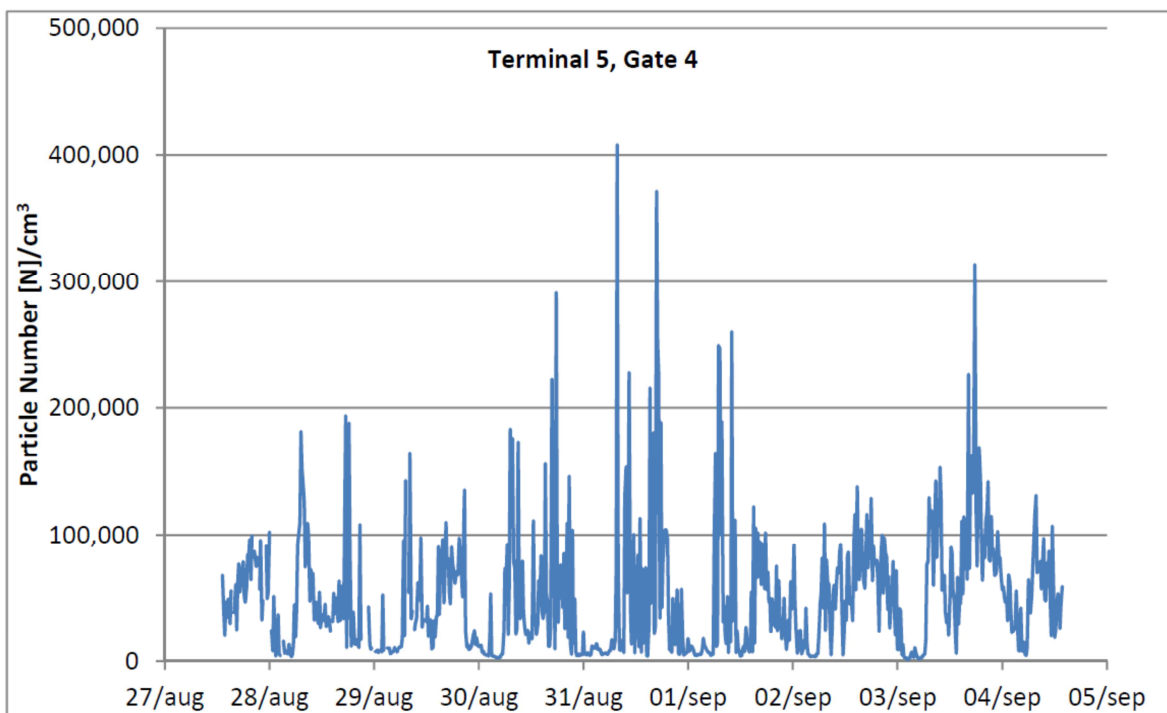
→ Heathrow Airport, Londen, VK

In mei 2012 werden gedurende één dag screeningsmetingen uitgevoerd op en in de omgeving van Heathrow Airport, Londen. De UFP-metingen werden uitgevoerd m.b.v. een TSI condensation particle counter (bereik 0,007 – 3 µm) ter hoogte van twee terminals 3 en 5. De meetreeksen vertoonden een heel aantal kortlevende piekconcentraties tot 100 000 pt/cm³ die snel terug daalden tot achtergrondconcentraties van 10 000 pt/cm³ en 20 000 pt/cm³. De piekconcentraties werden toegeschreven aan activiteiten aan de terminals van taxiënde vliegtuigen en gebruik van grondapparatuur. De piekconcentraties daalden terug naar achtergrondconcentraties van zodra deze activiteiten stopten. De gemiddelde concentraties gedurende de ganse meetperiode bedroegen ca. 31 000 pt/cm³ en 42 000 pt/cm³, met de hoogste waarde gemeten aan de meer ingesloten terminal 5.

Er werden ook mobiele UFP-metingen uitgevoerd in de omgeving van de luchthaven. Er werden verhoogde concentraties gemeten windafwaarts van de luchthaven. Deze verhoging werd deels toegeschreven aan wegverkeer en deels aan luchthavenactiviteit. Er werden eveneens verhoogde UFP-concentraties gemeten op enkele snelwegen die buiten de invloedsfeer van de luchthaven zouden liggen. Hier zou de bijdrage van zwaar verkeer de belangrijkste zijn.

→ **Stockholm Arlanda Airport, Zweden**

Gedurende 3 weken werden in de periode augustus-september 2012 UFP-metingen uitgevoerd op twee plaatsen op Arlanda Airport met een CPC (TSI 3775) vanaf een deeltjesgrootte van 4 nm. De gemiddelde UFP-concentratie bedroeg 50 700 pt/cm³ en 35 600 pt/cm³, met de hoogste gemiddelde concentratie op de meetlocatie met frequentere passage van vliegtuigen en minder gunstige meteorologische omstandigheden. De 15-min gemiddelde concentraties tonen een verhoging overdag (06:00 tot 22:00) met de hoogste concentraties van 07:00 tot 09:00 (Figuur 4). De UFP-concentratie 's nachts was lager dan 5 000 pt/cm³. De pieken werden gerelateerd aan vertrek en aankomst van vliegtuigen.

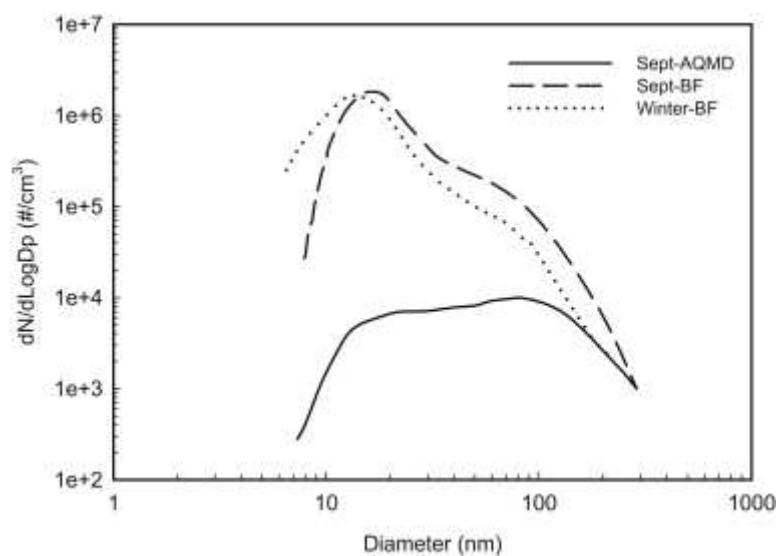


Figuur 4: 15-min gemiddelde UFP-concentratie op Arlanda Airport Terminal 5 (gereproduceerd van ACI Europe, 2012).

→ **Los Angeles World Airport, Californië, VS**

Westerdahl et al. (2008) en Zhu et al. (2011) onderzochten de UFP-concentratie en deeltjesgrootteverdeling (en andere parameters) op de luchthaven van Los Angeles en op een achtergrondlocatie. Op de luchthaven werden metingen uitgevoerd op 140 m van de take-off positie van de vliegtuigen (blast fence, BF) en op 5 windafwaarts gelegen meetplaatsen op 220, 250, 310, 410 en 610 m van de take-off positie.

De hoogste concentraties (piekwaardes tot $> 10^7$ pt/cm³) werden gemeten ter hoogte van de take-off positie en werden geassocieerd met het opstijgen van vliegtuigen. De dominante deeltjesgrootte was rond de 14 nm in de winter- en 16,3 nm in de zomercampagne (Figuur 5). Gemiddelde deeltjesconcentraties van partikels van deze deeltjesgrootte bedroegen respectievelijk 1 400 000 pt/cm³ en 1 300 000 pt/cm³ in beide campagnes op het meetpunt het dichtst bij take-off. Op de achtergrondlocatie is de distributie van deeltjesaantallen meer gelijk verspreid over de deeltjesgroottes. Tijdprofielen van UFP-concentraties op verschillende locaties tonen een sterk gelijklopend patroon, met sterke piekwaardes bij take-off. Wanneer er geen take-off was gedurende langere periode vielen de concentraties terug tot 60 – 150 pt/cm³ (voor 15 nm deeltjes). Bij take-off werden op 140 m van de take-off positie piekconcentraties tot 28 000 pt/cm³ gemeten (totale UFP-concentratie $> 10^7$ werd in sommige gevallen waargenomen), een toename met een factor >100 .



Figuur 5: Deeltjesgrootteverdeling nabij de bron (BF) en op een achtergrondlocatie (AQMD) (gereproduceerd uit Zhu et al., 2011).

Een samenvattende tabel van de studies rond Los Angeles International Airport is gegeven in Fanning et al. (2007). AQMD is een windopwaarts gelegen achtergrondstation in een residentiële zone. De community sites zijn windafwaarts gelegen van de luchthaven.

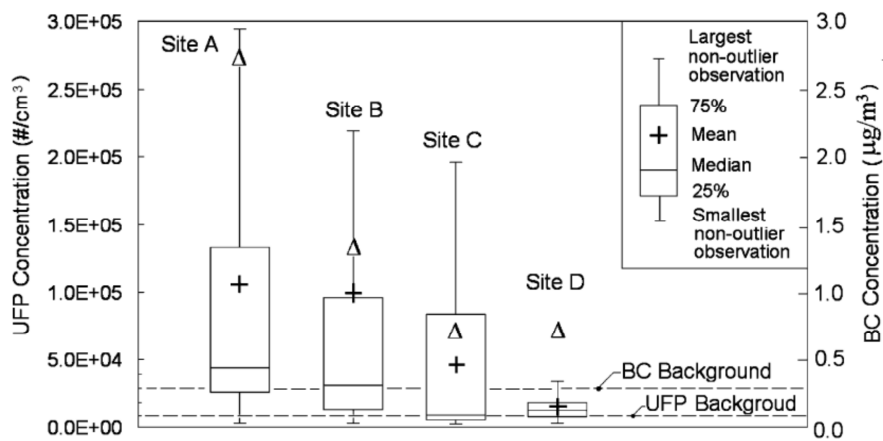
Locatie	15 nm UFP (pt/cm ³)			PNC ₁₀₋₁₀₀ (x1000 pt/cm ³)	BC (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)
	mediaan	P75	P90			
AQMD	-	-	-	7 ± 10	0,9 ± 1,2	14,3 ± 10,4
Blast fence	247	2 655	6 936	532 ± 292	13,9 ± 13,9	23,7 ± 18,5
Windafwaarts -25R	56-115	152-390	442-1 640	-	4,6 ± 8,6	-
Windafwaarts -25L	61-169	128-281	229-419	-	1,0 ± 0,5	-
Community sites	83-164	179-276	229-402	38 ± 25	1,3 ± 1,2	15,6 ± 12,0

Hudda et al. (2014) maakten gebruik van mobiele metingen om het ruimtelijke patroon van UFP-concentraties in kaart te brengen in de omgeving van Los Angeles International Airport. De auteurs

constateerden dat de emissies van Los Angeles International Airport de luchtkwaliteit tot op grotere afstand beïnvloeden dan tot dan toe werd aangenomen. Er werd een verdubbeling van de PNC vastgesteld t.o.v. achtergrondwaardes voor het grootste deel van de dag, en dit in een gebied van ca. 60 km² tot op een afstand van 16 km van de luchthaven. De PNC was 4 tot 5 maal hoger tot op een afstand van 8-10 km windafwaarts van de luchthaven in vergelijking met achtergrondwaardes. De maximale PNC werd waargenomen windafwaarts en in het verlengde van de start/landingsbaan. PNC van 75 000 pt/cm³ werden waargenomen tot op 8 km van de luchthaven.

→ **Santa Monica Airport, Californië, VS**

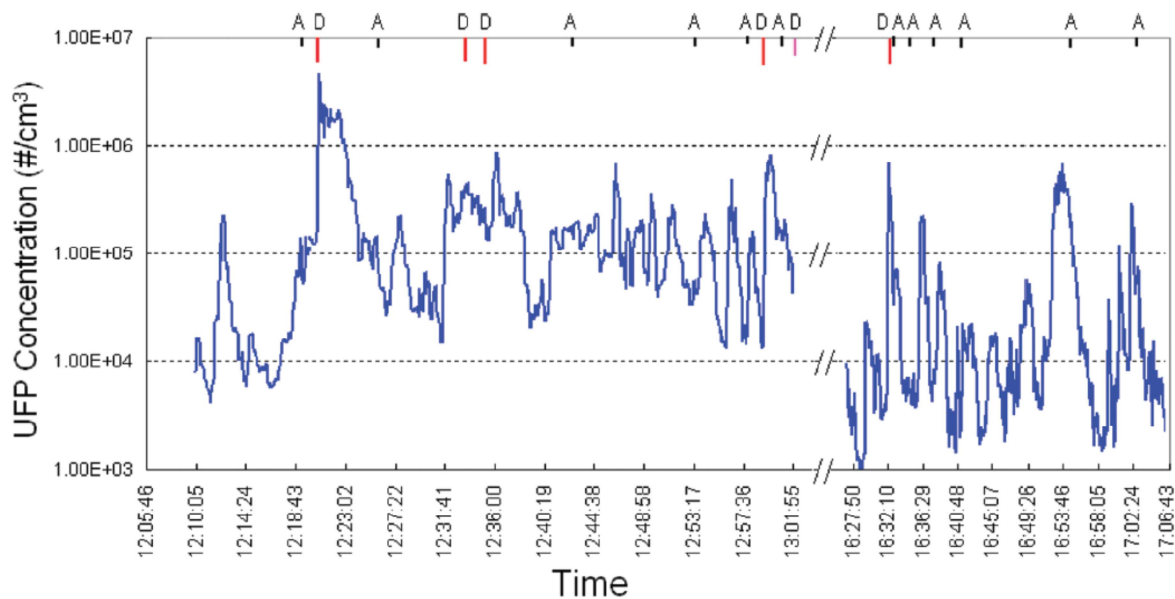
Hu et al. (2009) voerden mobiele real-time metingen uit windafwaarts van Santa Monica Airport. In een gebied van meer dan 250 m x 660 m windafwaarts van de luchthaven werden verhoogde UFP-concentraties gemeten. Vliegtuigactiviteit resulteerde in een verhoging met een factor 10 en 2,5 op respectievelijk 100 m en 660 m van de luchthaven in vergelijking met achtergrondmetingen (Figuur 6). De grote afstand met verhoogde concentraties wordt toegeschreven aan de zeer hoge initiële concentraties (in vergelijking met verkeersemissies). De BC-concentratie was niet verhoogd, al vertoonde de BC-tijdreeks wel pieken veroorzaakt door take-off van vliegtuigen. Er werden piekconcentraties van 2 200 000 pt/cm³ UFP en 30 µg/m³ BC gemeten in een 60-sec tijdsinterval na take-off op 100 m windafwaarts van de take-off positie. Piekconcentraties waren een factor 440 en 100 hoger op 100 m windafwaarts van de luchthaven dan de achtergrondconcentraties voor UFP en BC. De verhoogde UFP-concentraties hielden langere periodes aan door een combinatie van take-off, taxiën en activiteit van propeller-vliegtuigen. De hoogste concentraties werden gemeten voor deeltjes met een diameter van 11 nm, wat ongeveer de helft kleiner is dan de dominante deeltjesfractie die geassocieerd wordt met zwaar dieselveerkeer op de weg (22 nm).



Figuur 6: Boxplot van de UFP- en BC-concentratie op de verschillende meetlocaties in toenemende afstand tot de luchthaven (gereproduceerd uit Hu et al., 2009). Meetlocaties A, B, C en D zijn respectievelijk 80, 100, 380 en 660 m windafwaarts van de luchthaven gelegen in het verlengde van de start/landingsbaan. Het achtergrondstation is op 830 m van de luchthaven gelegen loodrecht op de overheersende windrichting.

De variabiliteit van de UFP-concentratie is sterk geassocieerd met vliegtuigactiviteit (Figuur 7). Afwijkende overeenkomst wordt toegeschreven aan andere activiteiten met hoge UFP-emissies dan landen of opstijgen (zoals taxiën), en mogelijks ook door een verschil in tijdsresolutie tussen de

activiteitslogging en de metingen en de tijdsvertraging tussen emissie en verhoging op het receptor punt.



Figuur 7: UFP-concentratie gemeten op 100 m van de luchthaven vertoont een sterke associatie met aankomst (A) en vertrek (D) van vliegtuigen (gereproduceerd uit Hu et al., 2009).

Hsu et al. (2013) modelleerden het effect van vertrek en aankomst van vliegtuigen op de UFP-concentratie in de nabije omgeving van Santa Monica Airport. Deze activiteiten leveren een bijdrage van 150 000 pt/cm³ op een meetlocatie aan het einde van de startbaan, en van 19 000 pt/cm³ en 15 000 pt/cm³ op meetlocaties 250 m en 500 m meer windafwaarts van de startbaan.

→ T.F. Green International Airport, Warwick, Rhode Island, VS

Bij T.F. Green International Airport werd de UFP-concentratie op 4 plaatsen gemeten met zeer hoge tijdsresolutie (1 UFP meting per minuut). De hoogste gemiddelde concentratie van 12 500 pt/cm³ werd gemeten op een locatie 800 m in het verlengde van de startbaan (Hsu et al., 2012). Er werd een dagelijkse dynamiek in UFP-concentratie waargenomen. Hsu et al. (2012) stelden een regressie-model op om de variabiliteit in de UFP concentratie te modelleren aan de hand van wind en LTO variabelen. Er werd een positieve associatie gevonden tussen LTO activiteiten en de UFP concentratie in de omgeving van de luchthaven. Voornamelijk opstijgende vliegtuigen in de buurt van de meetlocaties zorgen voor een toename in de UFP concentratie. De hoogste piek wordt waargenomen op meetlocaties nabij de startbaan 1 minuut voor vertrek. De mediaan bijdrage op dat moment is 7 400 pt/cm³ (1 100 pt/cm³ tot 70 000 pt/cm³). Over alle observaties heen werd een inschatting gemaakt van de mediaan (95^{ste} en 99^{ste} percentiel) bijdrage van LTO activiteiten aan de UFP concentratie. Deze bedraagt 9.8% (54%, 72%) en 6.6% (39%, 55%) voor de twee meetlocaties nabij de belangrijkste startbaan (0,16 en 0,3 km), en 4.7% (24%, 36%) en 1.8% (22%, 31%) voor de andere twee meetlocaties (op 0,8 en 0,4 km). Dodson et al. (2009) vonden een bijdrage van de luchthaven van Warwick van 24-28% van de totale BC-concentratie op vijf locaties die zich tussen 160 m en 3,7 km van de luchthaven bevonden.

→ **Schiphol, Amsterdam**

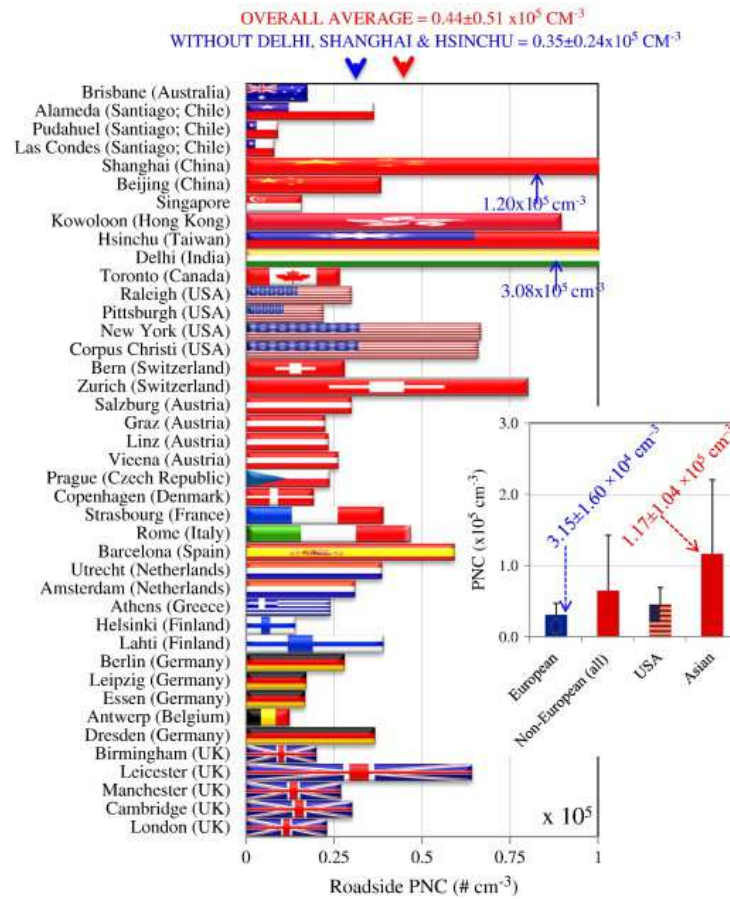
In de omgeving van Schiphol werd door Bezemer et al. (2015) een onderzoek rond UFP-concentraties uitgevoerd. De ruimtelijke verdeling van UFP rondom Schiphol werd in een eerste fase vastgesteld met mobiele apparatuur op verschillende locaties rond Schiphol. Er werden verhoogde UFP-concentraties gemeten in de omgeving van de luchthaven. De hoogste concentraties zijn te zien naast de start- en landingsbanen. Gemeten piekwaarden (gemiddeld over 10 seconden) bedragen 200 000 tot 300 000 pt/cm³. Bij toenemende afstand neemt de deeltjesconcentratie sterk af. De metingen laten zien dat het vooral om deeltjes kleiner dan 30 nm gaat.

In de tweede fase werd op een aantal vaste locaties gemeten in woongebieden rond Schiphol om ook daar een indicatie te krijgen van optredende UFP-concentraties. Er werd door een kalibratie voor gezorgd dat de uitkomsten van de verschillende apparaten onderling vergelijkbaar zijn. De resultaten van de metingen in de tweede fase bevestigen het beeld van de eerste fase: een duidelijke verhoging ten gevolge van het vliegverkeer die afneemt met toenemende afstand. De meetresultaten laten eveneens zien dat waar sprake is van een verhoogde bijdrage, de toename vooral wordt veroorzaakt door deeltjes met een grootte van 10-20 nm.

Een bijdrage aan de UFP-concentraties van circa 3 000 pt/cm³ tot op een afstand van 15 km van Schiphol werd berekend. Bij woonlocaties die het dichtst bij Schiphol zijn gelegen kan de jaargemiddelde bijdrage oplopen tot circa 15 000 pt/cm³. Dit is vergelijkbaar met de bijdrage van wegverkeer in verkeer belaste straten in binnenstedelijk gebied. Over een geheel jaar genomen is in 5% van de tijd een bijdrage van meer dan 50 000 pt/cm³ mogelijk.

2.4. VERGELIJKING MET STEDELIJKE UFP-CONCENTRATIE

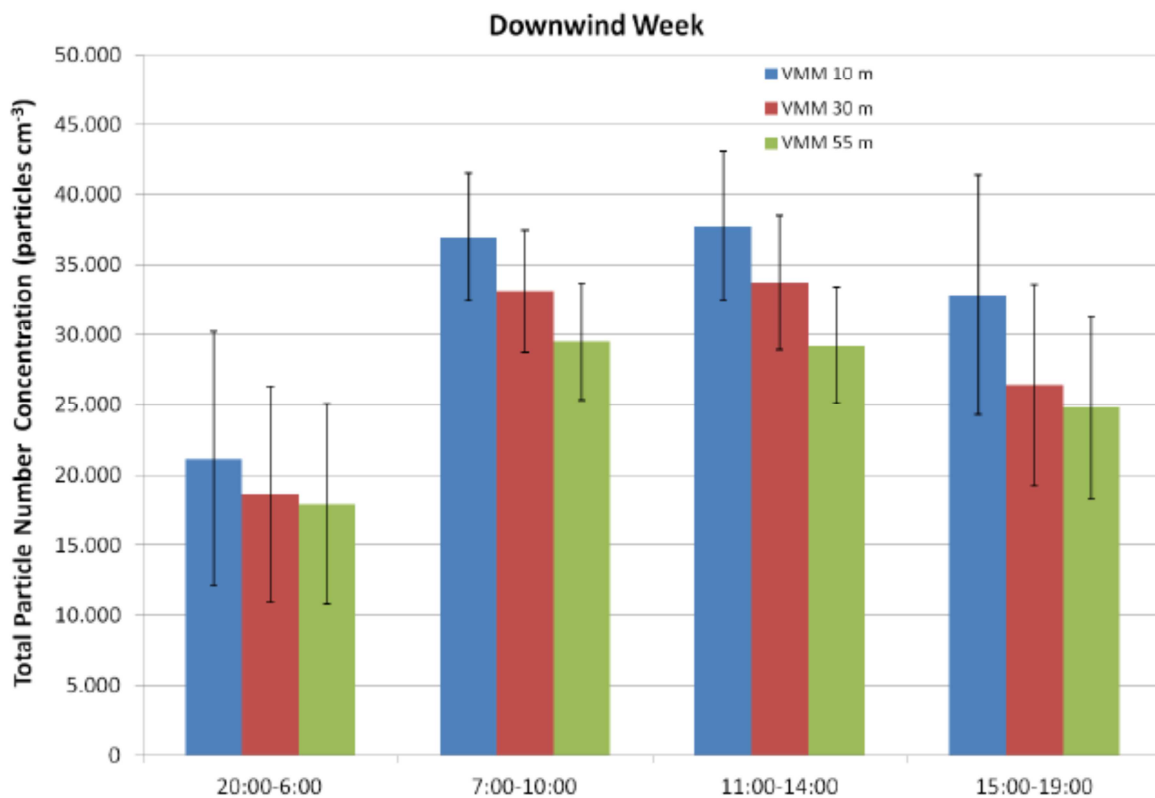
In een meta-studie van Kumar et al. (2014) worden UFP-concentraties van verkeerslocaties in verschillende steden met elkaar vergeleken (Figuur 8). Er worden zeer grote verschillen waargenomen tussen steden. Voor Antwerpen wordt een concentratie van ongeveer $1,2 \times 10^4$ pt/cm³ opgegeven.



Figuur 8: Vergelijking van UFP PNC van verkeerslocaties in verschillende steden (gereproduceerd uit Kumar et al., 2004)

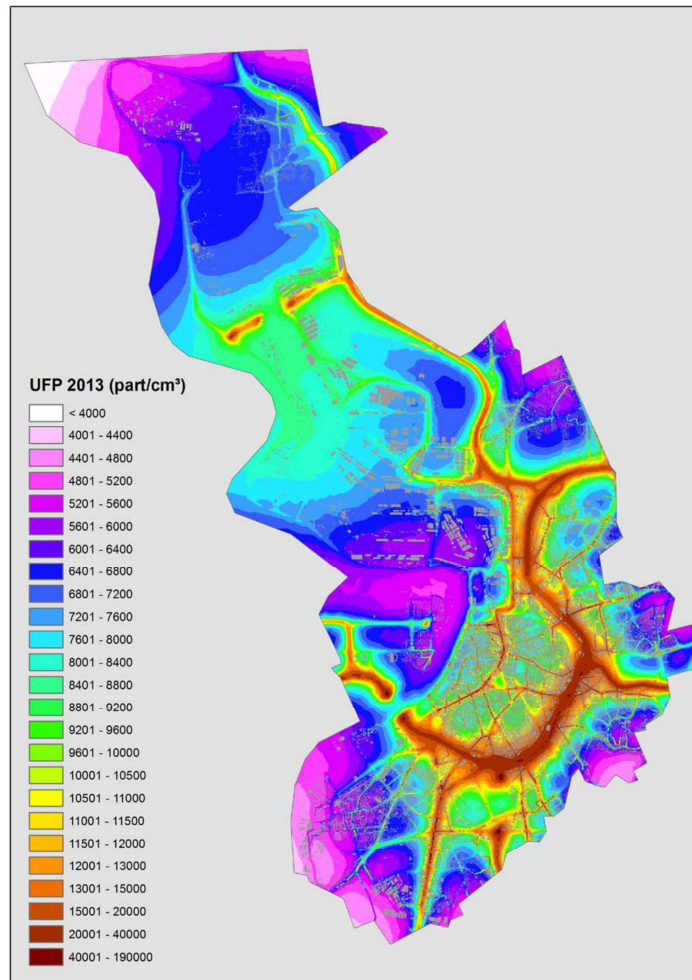
De resultaten van de meetcampagnes en modelleerstudies in het kader van het Joaquin-project tonen een grote interstedelijke variabiliteit in de UFP-concentratie. Gradiëntmetingen op verschillende afstand van een drukke weg in bv. Antwerpen tonen grote verschillen in functie van de tijd van de dag en de afstand tot de weg (Figuur 9, Frijns et al., 2013), met de hoogste UFP-concentratie van $35\,000 - 40\,000 \text{ pt/cm}^3$ op weekdagen in de voormiddag dicht bij de straat (10 m).

In de periode april 2013 - maart 2015 werden in Borgerhout gemiddeld ongeveer $10\,000 \text{ partikels/cm}^3$ gemeten (10-200 nm). De meeste deeltjes hadden een grootte van 10-20 nm (25%) of 30-50 nm (22%). De grootteklasse 20-30 nm bevatte 17% van het deeltjesaantal.



Figuur 9: UFP-concentratie in functie van afstand tot een drukke weg (Plantin en Moretuslei, Antwerpen) en tijdstip van de dag (geselecteerde resultaten voor weekdagen waarop de meetplaatsten windafwaarts van de weg lagen) (gereproduceerd uit Frijns et al., 2013).

De ruimtelijke variabiliteit komt sterk naar voor in de modelresultaten voor Antwerpen (gemiddelde UFP-concentratie in 2013, Hooyberghs en Lefevbre, 2014, zie Figuur 10). Drukke verkeersassen komen duidelijk naar voor als plaatsen met sterk verhoogde UFP-concentraties.



Figuur 10: Ruimtelijke variabiliteit in gemodelleerde jaargemiddelde UFP-concentratie in Antwerpen, 2013 (gereproduceerd uit Hooyberghs en Lefevbre, 2014).

2.5. GEZONDHEIDSEFFECTEN

In het artikel Keuken et al. (2014) in tijdschrift Lucht is sprake van een inschatting door een panel van experts dat een "toename van de langetermijngemiddelde concentratie van 10.000 deeltjes per cm³ gemiddeld tot een toename in mortaliteit van 3% kan leiden". Op basis van deze claim stelt men dat de geschatte jaargemiddelde toename van 10 000-20 000 deeltjes per cm³ ten gevolge van Schipholmissies voor ongeveer 20.000 adressen tot een toename van 3-6% in sterfte zou kunnen leiden als de uitgestoten deeltjes even toxisch zouden zijn als de in eerdere epidemiologische studies onderzochte deeltjes.

In het wetenschappelijk artikel over deze studie (Keuken et al., 2015) wordt deze claim niet vermeld. Over de potentiële gezondheidseffecten van de blootstelling aan de UFP-emissies van Schiphol wordt gezegd dat deze onbekend zijn omdat er geen betrouwbare responsfunctie voor deeltjesaantallen beschikbaar is.

Naar aanleiding van de studie door Keuken et al. werd in opdracht van de Tweede Kamer een studie uitgevoerd (Bezemer et al., 2015). De studie ging vooral over metingen maar omvatte ook een (korte) literatuurstudie over gezondheidseffecten. De bovenstaande claim van het panel van

experts (workshop op RIVM in 2009) wordt sterk in vraag gesteld. De samenvatting van het gezondheidsdeel is: "In het algemeen wordt aangenomen dat ultrafijnstof schadelijk is. De wetenschappelijke kennis hierover is nog beperkt. Of, en zo ja in welke mate, in de omgeving van Schiphol sprake is van extra gezondheidseffecten als gevolg van de blootstelling aan ultrafijnstof kan op basis van de huidige inzichten niet worden bepaald."

Toxicologische en klinische resultaten over gezondheidseffecten zijn gebaseerd op kortdurende blootstelling aan meestal veel hogere UFP-concentraties dan in de buitenlucht en literatuur over de mogelijke nadelige effecten door langdurige blootstelling aan UFP is nagenoeg afwezig. Epidemiologisch onderzoek is moeilijk door problemen bij het betrouwbaar schatten van de blootstelling aan UFP en de mogelijke sterke correlatie van UFP met andere verbrandingsproducten.

2.6. SAMENVATTING

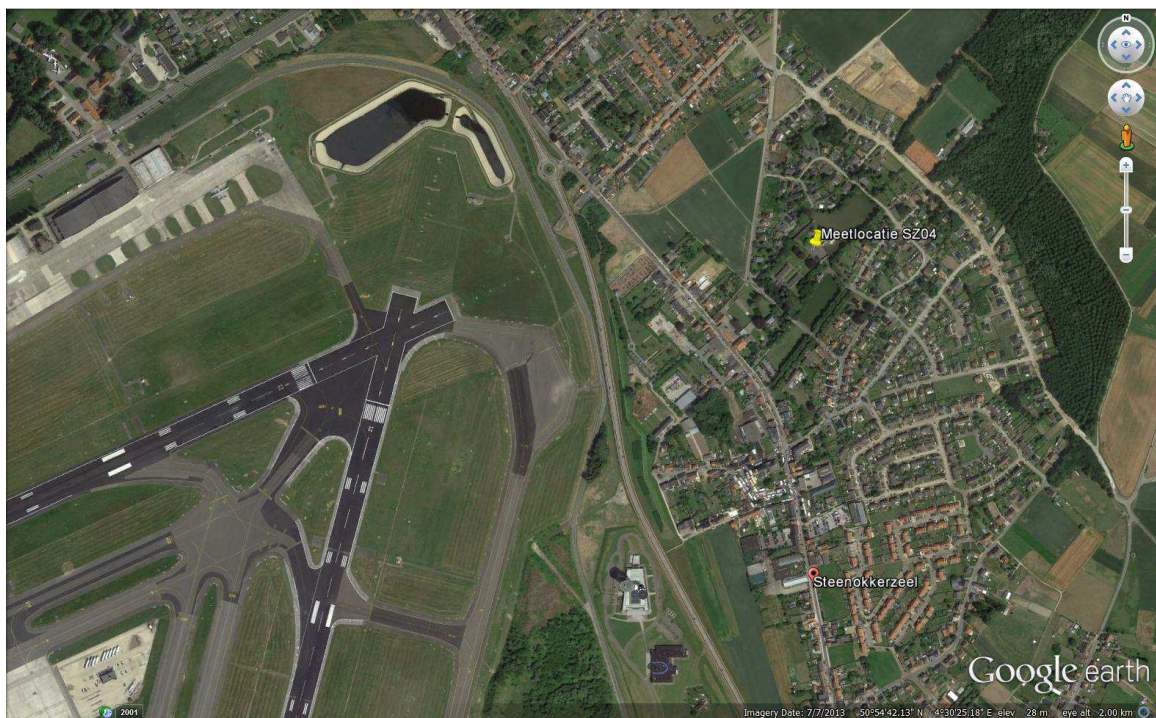
De belangrijkste conclusies uit het literatuuronderzoek naar de bijdrage van UFP-emissies van luchthavenactiviteiten aan de UFP-concentratie in de omgeving van luchthavens zijn:

- Er zijn maar een beperkt aantal studies gepubliceerd over UFP-metingen in de omgevingslucht rondom luchthavens;
- UFP-emissies uit vliegtuigmotoren lopen op tot 10^{15} tot 10^{17} partikels/kg brandstof, afhankelijk van brandstof- en motortype, motor belasting en omgevingscondities;
- Kleine UFP-fracties (< 30 nm) worden geassocieerd met vliegtuigemissies;
- Het UFP-patroon in de omgeving van de luchthaven vertoont een sterke temporele en ruimtelijke variabiliteit. De hoogste concentraties worden geassocieerd met LTO (landing and take-off operations). Concentraties nabij de startbaan nemen sterk af na take-off. De concentratie neemt af met de afstand tot de luchthaven. Naast afstand spelen ook windcondities en situering t.o.v. de landing/startbaan een belangrijke rol. Het gebied waarin de UFP-concentratie verhoogd is door emissies van de luchthaven is situatie-afhankelijk. Nabij de luchthaven van bv. Los Angeles zou de invloed tot 16 km ver reiken.

HOOFDSTUK 3. VERGELIJKENDE METINGEN

3.1. MEETOPSTELLING VOOR VERGELIJKENDE METINGEN

Op 14/09/2015 werd een meetopstelling geplaatst nabij Kasteel Ter Ham in Steenokkerzeel voor het uitvoeren van vergelijkende metingen gedurende 2 weken (periode 14-28/09/2015). De meetlocatie bevindt zich op ongeveer 500 m ten NO-O van de grens van de luchthaven (meetlocatie SZ04, zie Hoofdstuk 4).



Figuur 11: De vergelijkende metingen werden uitgevoerd op de parking van Kasteel Ter Ham te Steenokkerzeel (meetlocatie SZ04).

De meetopstelling bestond uit een trailer van ECN, twee trailers van ISSEP en een meetwagen van VITO, die naast elkaar geplaatst werden. De trailers/meetwagens waren uitgerust met volgende UFP meetapparatuur:

- Meetwagen VITO:
 - TSI SMPS
- Trailer ECN
 - GRIMM SMPS (tot 18/09/2015), daarna TSI SMPS
- Trailers ISSEP (2, identiek):
 - IfT SMPS

De monitoren voor bepaling van de grootteverdeling werden ingesteld op een tijdsinterval van 5 minuten en deeltjesgroottes die zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Scantijd en deeltjesgrootte bereik per instrumenttype. D_mid range is het middelpunt van een diameterklasse.

Instrument	Scantijd (min)	D_mid range (nm)
TSI SMPS (VITO)	5	9,47 – 429,4 (tot 23/09) 7,37 – 299,6 (vanaf 23/09)
IfT custom. SMPS (ISSEP)	5	8,748 – 848,119
TSI SMPS (ECN)	5	7,77 – 299,6

De QA/QC-procedure voorzag in een 2-wekelijkse controle voor instrumentele checks en onderhoud. De operationaliteit van de toestellen werd op afstand dagelijks gecontroleerd.

Alle data werden gecheckt voor onregelmatigheden en de data welke werden gecollecteerd bij instrumentele uitval werden verwijderd.

Er zijn vijf mechanismen die kunnen leiden tot deeltjesverliezen in het bemonsteringsysteem, nl. sedimentatie (gravimetrisch), thermoforese, elektrostatische mechanismen, inertiaële impactie en diffusie (Friedlander, 2000; Hinds, 1999). Van alle deze potentiële verliezen, zijn die door diffusie en impactie de belangrijkste voor omgevingsmetingen (Hinds, 1999). Gormley en Kennedy (1949) ontwikkelden een vergelijking voor diffusieverliezen in een volledig laminaire stroming door een buis met cirkelvormige dwarsdoorsnede, die in deze studie werd gebruikt voor de twee IfT SMPS'en van ISSEP. Hinds (1999) ontwikkelde een vereenvoudigde vergelijking (nauwkeurigheid van 1 %) voor het berekenen van de diffusieverliezen die in deze studie werd gebruikt voor de SMPS van VITO en ECN. De penetratie-efficiëntie (P) voor een bemonsteringsleiding is de fractie van de uitgaande deeltjes ten opzichte van de inkomende deeltjes. De diffusiecorrectiefactor is de inverse van de penetratie-efficiëntie. Deeltjesaantallen worden vermenigvuldigd met een diffusiecorrectiefactor om verliezen in het bemonsteringssysteem te compenseren (diffusiecorrectiefactoren zijn gegeven in Bijlage A).

De vergelijking (Hinds, 1999) die wordt toegepast :

$P = 1 - 5.5\mu^{2/3} + 3.77\mu$	voor $\mu < 0.009$
$P = 0.819 \exp(-11.5\mu) + 0.0975 \exp(-70.1\mu)$	voor $\mu > 0.009$
$\mu = DL/Q$	
D = diffusiecoëfficiënt	
L = lengte van de leiding	
Q = volumedebiet in de leiding	

De IfT SMPS van ISSEP (ISSEP.1 en ISSEP.2) werd gecorrigeerd met de formule van Gormley en Kennedy (1949):

$P = 1 - 5.5\mu^{2/3} + 3.77\mu$	voor $\mu < 0.007$
$P = 0.819 \exp(-11.5\mu) + 0.0975 \exp(-70.1\mu) + 0.0325 \exp(-179\mu)$	voor $\mu > 0.007$

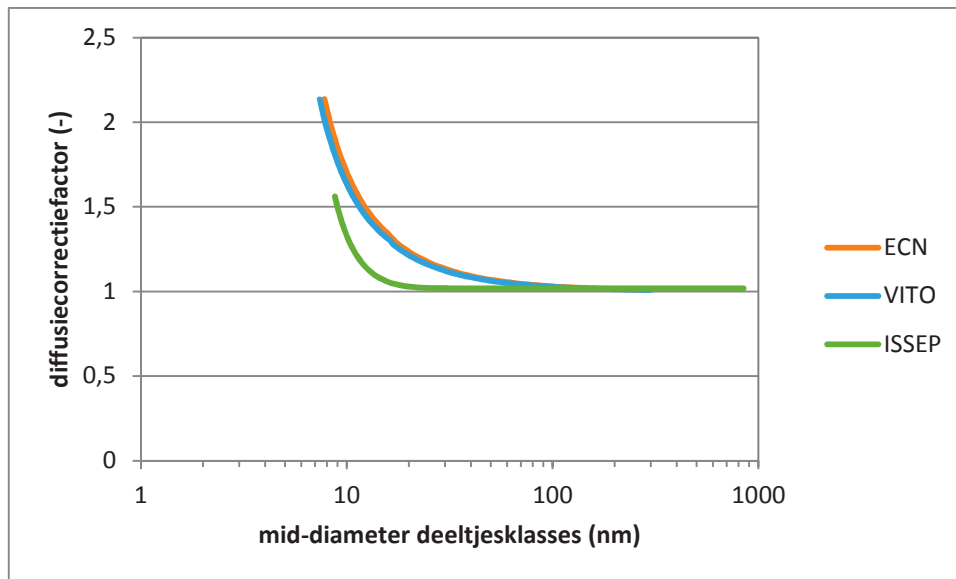
→ TSI SMPS

VITO maakt gebruik van de automatische interne diffusieverliescorrectie in de TSI SMPS software. Enkel diffusieverliezen in de leidingen en de droger werden berekend. ECN past een eigen correctie toe voor de interne verliezen. Voor het systeem van ECN werd daardoor een correctie berekend voor de interne verliezen en de verliezen in de leiding en droger.

→ IfT customized SMPS

Voor elke deeltjesgrootte (size bin) van de IfT customized SMPS werden drie penetratiefactoren berekend: één voor interne diffusieverliezen voor de CPC (D_{50}), één om de interne diffusieverliezen te bepalen in de SMPS en één om de verliezen in de leidingen te bepalen. De combinatie van deze drie factoren werd gebruikt om de totale verliezen van de SMPS te bepalen.

De meetapparatuur werd gesynchroniseerd. UFP-metingen werden uitgevoerd met een scantijd van vijf minuten, de tijdsregistratie gebeurde in GMT. Er werd een diffusie correctie uitgevoerd om verliezen te compenseren. Een overzicht van de diffusiecorrectiefactoren in functie van de deeltjesgrootte is gegeven in Figuur 12 (numerieke waardes zijn gegeven in Bijlage A). De diffusiecorrectiefactoren van ECN voor kleine deeltjes zijn hoger omdat er “manueel” gecorrigeerd wordt voor diffusieverliezen in het meettoestel. Bij VITO en ISSEP gebeurt deze correctie via de software van de meetapparatuur.



Figuur 12: Diffusiecorrectiefactor in functie van deeltjesgrootte.

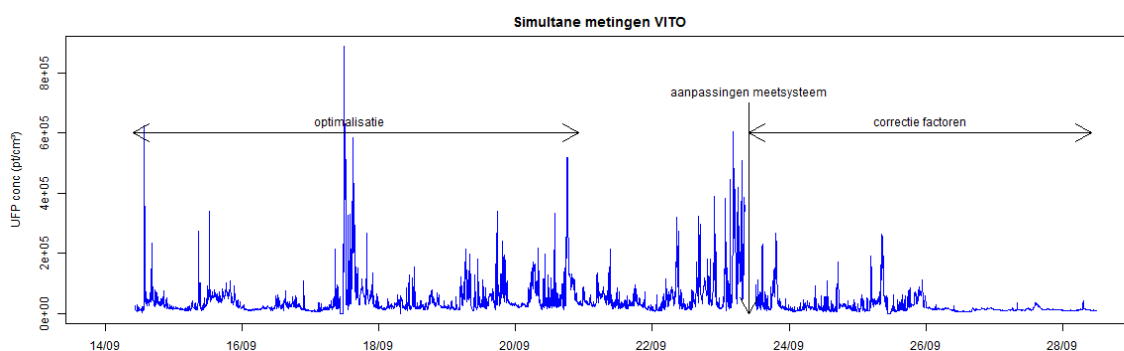
Er werden 7 UFP-klassen afgebakend op basis van deeltjesgrootte:

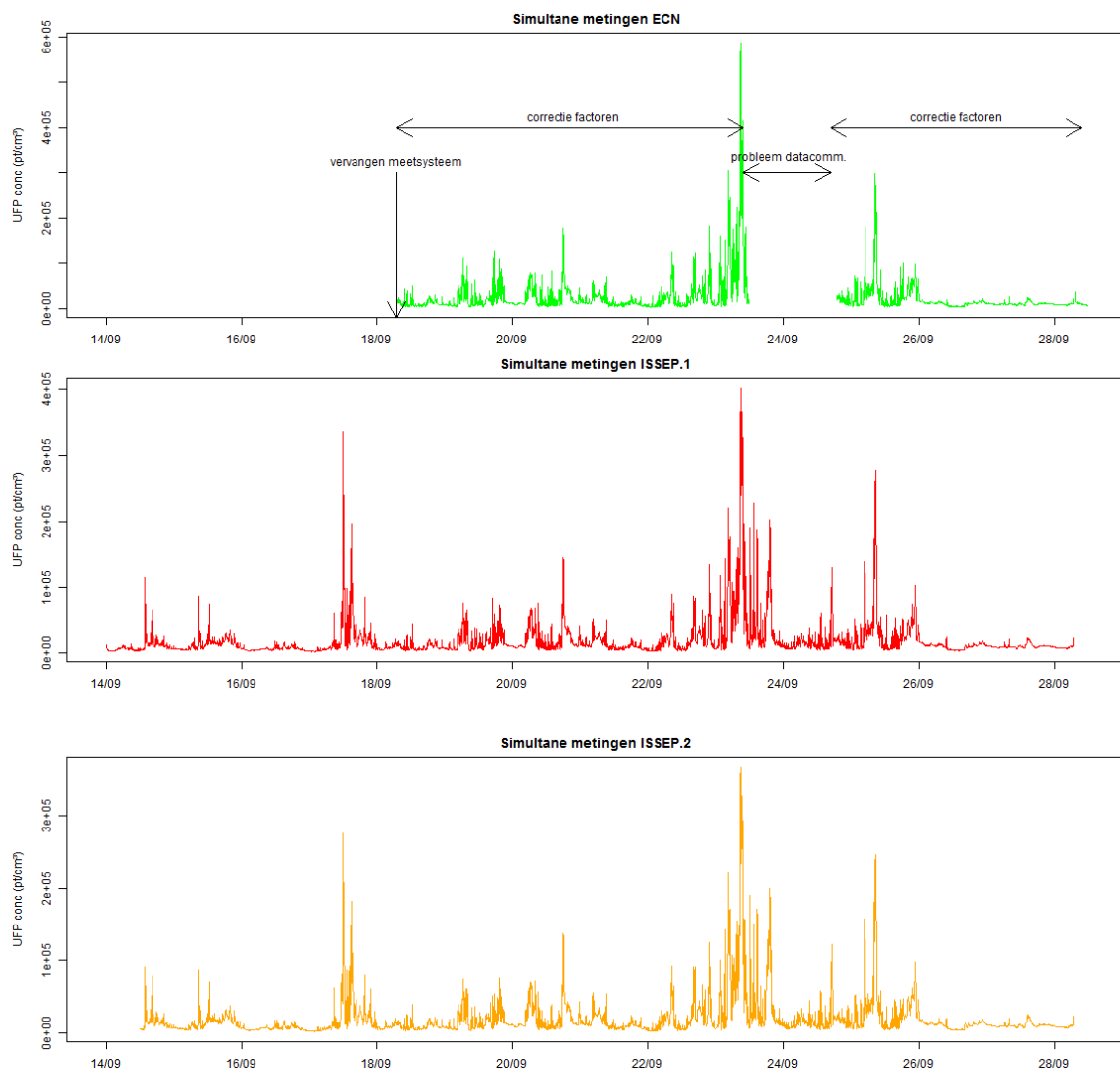
- 10 – 20 nm
- 20 – 30 nm
- 30 – 50 nm
- 50 – 70 nm
- 70 – 100 nm
- 100 – 200 nm
- 200 – 294 nm.

Het doel van de vergelijkende metingen was tweeledig: (i) opvolging en correctie UFP-meetapparatuur (opstartfase), en (ii) verzamelen en vergelijken van simultane UFP-metingen en opstellen van correctiefactoren (instrumentele correctie).

3.2. OVERZICHT VERGELIJKENDE UFP-METINGEN

Een overzicht van de simultane metingen (totale deeltjesconcentraties 10 – 294 nm, $\mu\text{t}/\text{cm}^3$) is gegeven in Figuur 13.





Figuur 13: Overzicht van de vergelijkende metingen van de aantalconcentratie (10 – 294 nm) op meetplaats SZ04.

Tijdens de vergelijkende metingen werden er een aantal aanpassingen gedaan aan de meetopzet en zijn bepaalde meetperiodes niet beschikbaar:

- Op 23/09 werd de meetopstelling van VITO aangepast zodanig dat deze identiek is aan de meetopstelling van ECN. Er werd een EPC bijgeplaatst in de monitoringsketen om door een hoger aanzuigdebiet de verliezen te beperken;
- De metingen van ECN tussen 14/09 en 18/09 zijn niet bruikbaar door falen van de SMPS. Op 18/09 in de voormiddag werd een nieuwe SMPS in gebruik genomen;
- De metingen van ECN van de periode 23/09 11:45 tot 24/09 18:40 zijn niet beschikbaar wegens een probleem met de datacommunicatie.

De periode van vergelijkende metingen wordt gekarakteriseerd door periodes met sterke piekconcentraties (bv. 23/09) en periodes met lage (achtergrond) concentraties (bv. 26-27/09). Op basis van een vergelijking van de (niet gecorrigeerde) metingen van ECN tijdens de periode van simultane metingen (18-28/09) en de eigenlijke meetperiode van 1/10 tot 30/11/2015 wordt

besloten dat het concentratiebereik tijdens de simultane metingen representatief was. De achtergrondconcentratie tijdens beide meetperiodes was vergelijkbaar, evenals de maximale piekconcentraties (Tabel 2). De verschillen in waarde van de andere statistieken (1^{ste} kwartiel, gemiddelde, mediaan en 3^{de} kwartiel) zijn hier minder relevant omdat die sterk beïnvloed worden door de grootte van de meetreeks en de (meteorologische) omstandigheden waarin de metingen werden uitgevoerd.

Tabel 2: Vergelijking aantalconcentratie (10 – 294 nm) volgens de SMPS van ECN op meetlocatie SZ04 van 18-28/09/2015 en van 1/10 – 30/11/2015.

	18-28/09/2015 Vergelijkende metingen	1/10 – 30/11/2015 Metingen ECN te SZ04
Minimum	2 663	2 468
1 ^{ste} kwartiel	8 243	13 722
Mediaan	11 684	18 607
Gemiddelde	23 506	27 770
3 ^{de} kwartiel	23 063	29 400
Maximum	586 417	534 710

3.3. OPSTELLEN VAN EEN UFP HERSCHALINGSMODEL

Na overleg werd op basis van tussentijdse resultaten van de vergelijkende metingen besloten om een herschaling van de metingen toe te passen naar de metingen van ISSEP.1. Het aantal simultane metingen waarop de herschalingsfactoren bepaald werden, bedroeg 1369 voor VITO, 2045 voor ECN en 3459 voor ISSEP.2. Als herschalingsmodel werd een lineair regressiemodel gebruikt zonder intercept, van de vorm $Y = b \cdot X$, waarbij Y de herschaalde concentratie is, X de observaties, en b de richtingscoëfficiënt. Voor het opstellen van het model werd geen dataselectie uitgevoerd, i.e. zowel baselineconcentraties als piekconcentraties bleven behouden. Er werd een apart model opgesteld voor elke van de 7 beschouwde deeltjesklassen (cf. 3.1). Een overzicht van de herschalingsmodellen is gegeven in Bijlage B. Tabel 3 geeft een overzicht van de herschalingsfactoren en een performantie criterium van het herschalingsmodel (RMSE van herschaalde waardes t.o.v. metingen ISSEP.1).

Tabel 3: Overzicht van SMPS herschalingsfactoren (lineaire regressie zonder intercept) t.o.v. ISSEP.1.

	Deeltjes klasse	Correctiefactor (b)	RMSE (in pt/cm ³)
VITO	10 – 20 nm	0,86	7115
	20 – 30 nm	0,85	2450
	30 – 50 nm	0,79	522
	50 – 70 nm	0,83	146
	70 – 100 nm	0,84	118
	100 – 200 nm	0,78	100
	200 – 294 nm	0,75	23

ECN	10 – 20 nm	0,76	7457
	20 – 30 nm	0,87	2752
	30 – 50 nm	0,88	479
	50 – 70 nm	0,87	170
	70 – 100 nm	0,89	118
	100 – 200 nm	0,91	91
	200 – 294 nm	0,89	25
ISSEP.2	10 – 20 nm	1,01	2948
	20 – 30 nm	1,09	1004
	30 – 50 nm	0,96	220
	50 – 70 nm	0,91	53
	70 – 100 nm	0,92	39
	100 – 200 nm	0,92	33
	200 – 294 nm	0,93	10

Het effect van de herschaling op de gemiddelde concentratie wordt gegeven in Tabel 4. Meestal resulteert de herschaling in een betere vergelijkbaarheid van het gemiddelde. Voor de 20-30 nm klassen is er voor de ECN-metingen na herschaling een grotere afwijking op het gemiddelde. Voor ISSEP.2 is er eveneens een grotere afwijking op het gemiddelde na herschaling voor klasse 20-30 nm en in mindere mate voor klasse 10-20 nm. Vergelijkbare resultaten worden gevonden voor de P90 (90^{ste} percentiel) (piek)concentraties (Tabel 5), en ook voor de P10 concentraties (

Tabel 6). Voor de 10 – 20 nm klasse is de afwijking na herschaling van de ECN-metingen groter dan voor de herschaling.

Tabel 4: Gemiddelde aantalconcentratie voor en na herschaling (lineaire regressie zonder intercept), en % verschil met gemiddelde aantalconcentratie ISSEP.1.

	Deeltjes klasse	Gemiddelde ISSEP.1	Gemiddelde voor herschaling (pt/cm ³)	% verschil met ISSEP.1 voor herschaling	Gemiddelde na herschaling (pt/cm ³)	% verschil met ISSEP.1 na herschaling
VITO	10 – 20 nm	9745	11377	17	9784	0
	20 – 30 nm	3908	4518	16	3841	-2
	30 – 50 nm	2549	3120	22	2465	-3
	50 – 70 nm	1244	1521	22	1262	1
	70 – 100 nm	987	1193	21	1002	2
	100 – 200 nm	1010	1296	28	1011	0
	200 – 294 nm	170	225	32	168	-1
ECN	10 – 20 nm	11482	13922	21	10581	-8
	20 – 30 nm	3869	4080	5	3550	-8
	30 – 50 nm	2283	2485	9	2187	-4
	50 – 70 nm	1083	1212	12	1054	-3
	70 – 100 nm	856	946	10	832	-2
	100 – 200 nm	883	962	9	876	-1
	200 – 294 nm	168	186	11	165	-2
ISSEP.2	10 – 20 nm	10943	11429	4	11543	5
	20 – 30 nm	3774	3733	-1	4069	8
	30 – 50 nm	2125	2268	7	2178	2
	50 – 70 nm	931	1017	9	926	-1
	70 – 100 nm	708	775	10	705	0
	100 – 200 nm	732	807	10	734	0
	200 – 294 nm	139	150	8	139	0

Tabel 5: P90 aantalconcentratie voor en na herschaling (lineaire regressie zonder intercept) en % verschil met P90 aantalconcentratie ISSEP.1.

	Deeltjes klasse	P90 ISSEP.1	P90 voor herschaling (pt/cm ³)	% verschil met ISSEP.1 voor herschaling	P90 na herschaling (pt/cm ³)	% verschil met ISSEP.1 na herschaling
VITO	10 – 20 nm	25760	30377	18	26124	1
	20 – 30 nm	7042	8998	28	7648	9
	30 – 50 nm	3795	4703	24	3716	-2
	50 – 70 nm	2062	2422	17	2010	-2
	70 – 100 nm	1801	2164	20	1818	1
	100 – 200 nm	1811	2366	31	1845	2
	200 – 294 nm	305	405	33	304	-1

ECN	10 – 20 nm	27138	33315	23	25319	-7
	20 – 30 nm	7814	8181	5	7117	-9
	30 – 50 nm	3747	4112	10	3619	-3
	50 – 70 nm	1917	2145	12	1866	-3
	70 – 100 nm	1695	1869	10	1664	-2
	100 – 200 nm	1673	1836	10	1671	0
	200 – 294 nm	298	326	9	290	-3
ISSEP.2	10 – 20 nm	24507	25139	3	25391	4
	20 – 30 nm	7093	7266	2	7920	12
	30 – 50 nm	3666	3912	7	3755	2
	50 – 70 nm	1784	1923	8	1749	-2
	70 – 100 nm	1518	1666	10	1516	0
	100 – 200 nm	1487	1610	8	1465	-1
	200 – 294 nm	280	296	6	275	-2

Tabel 6: P10 aantalconcentratie voor en na herschaling (lineaire regressie zonder intercept) en % verschil met P10 aantalconcentratie ISSEP.1.

	Deeltjes klasse	P10 ISSEP.1	P10 voor herschaling (pt/cm ³)	% verschil met ISSEP.1 voor herschaling	P10 na herschaling (pt/cm ³)	% verschil met ISSEP.1 na herschaling
VITO	10 – 20 nm	483	521	8	448	-7
	20 – 30 nm	793	901	14	766	-3
	30 – 50 nm	1242	1560	26	1233	-1
	50 – 70 nm	538	691	28	573	6
	70 – 100 nm	373	456	22	383	3
	100 – 200 nm	432	553	28	431	0
	200 – 294 nm	72	94	31	70	-2
ECN	10 – 20 nm	649	640	-1	486	-25
	20 – 30 nm	754	757	0	658	-13
	30 – 50 nm	819	898	10	790	-3
	50 – 70 nm	389	435	12	378	-3
	70 – 100 nm	308	323	5	288	-7
	100 – 200 nm	362	384	6	350	-3
	200 – 294 nm	69	70	2	63	-10
ISSEP.2	10 – 20 nm	751	952	27	962	28
	20 – 30 nm	728	804	11	877	21
	30 – 50 nm	791	858	8	824	4
	50 – 70 nm	296	320	8	291	-1
	70 – 100 nm	200	223	11	203	1
	100 – 200 nm	243	270	11	246	1
	200 – 294 nm	40	43	8	40	1

De lineaire herschaling zonder intercept is geen goed herschalingsmodel voor de deeltjesklassen 20-30 nm van ECN en voor deeltjesklassen 10-20 nm en 20-30 nm van ISSEP.2. Een lineair model met intercept ($Y = a + b \cdot X$) (in Bijlage C worden scatterplots getoond) leidt voor de 20-30 nm metingen van ECN tot een (beperkte) verbetering van vergelijkbaarheid van het gemiddelde (0% verschil na herschaling t.o.v. 5% zonder herschaling) en de P90 (-4% verschil na herschaling t.o.v. 5% zonder herschaling). Voor andere percentielwaarden is er geen verbeterde vergelijkbaarheid van de aantalconcentraties (

Tabel 7). Er werd uiteindelijk geen herschaling van de ECN-metingen van deeltjesklasse 20-30 nm uitgevoerd.

Voor de vergelijkbaarheid van de metingen van ISSEP is de lineaire herschaling met intercept geen verbetering. Er wordt besloten om geen correctie door te voeren voor deeltjesklassen 10-20 nm en 20-30 nm.

Tabel 7: Herschalingsparameters van lineair model met intercept ($Y = a + b \cdot X$) voor deeltjesklassen 10-20 nm en 20-30 nm van ECN en ISSEP.2.

		10-20 nm	20-30 nm
ECN	a	-	408
	b	-	0.85
	RMSE	-	2727
	% verschil op gemiddelde na herschaling	-	0%
	% verschil op P10 na herschaling	-	+39%
ISSEP.2	% verschil op P25 na herschaling	-	+28%
	% verschil op P50 na herschaling	-	+13%
	% verschil op P90 na herschaling	-	-4%
	a	-736	-393
	b	1.02	1.12
	RMSE	2863	894
	% verschil op gemiddelde na herschaling	0%	0%
% verschil op P90 na herschaling	+4%	+22%	
% verschil op P10 na herschaling	-69%	-30%	

Samengevat (Tabel 8):

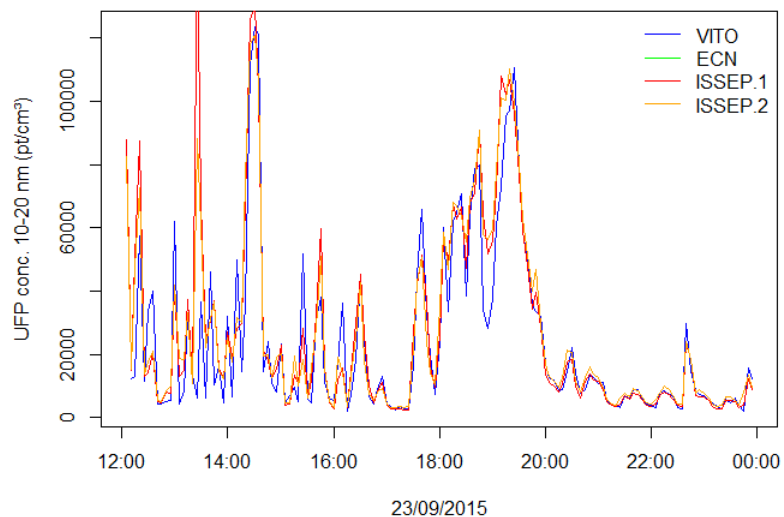
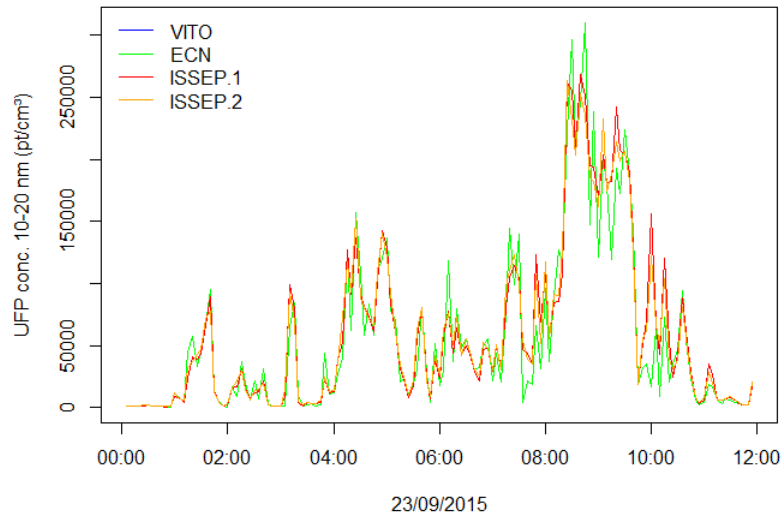
- De metingen van VITO worden herschaald met een herschalingsfactor, zie Tabel 3;
- De metingen van ECN met uitzondering van de deeltjesklassen 20-30 nm worden herschaald met herschalingsfactoren, opgegeven in Tabel 3;
- De metingen van ECN voor de deeltjesklasse 20-30 nm worden niet herschaald;
- De metingen van ISSEP.2, behalve deeltjesklassen 10-20 nm en 20-30 nm, worden herschaald met herschalingsfactoren (zie Tabel 3);
- Voor deeltjesklassen 10-20 nm en 20-30 nm worden de ISSEP.2 metingen niet gecorrigeerd.

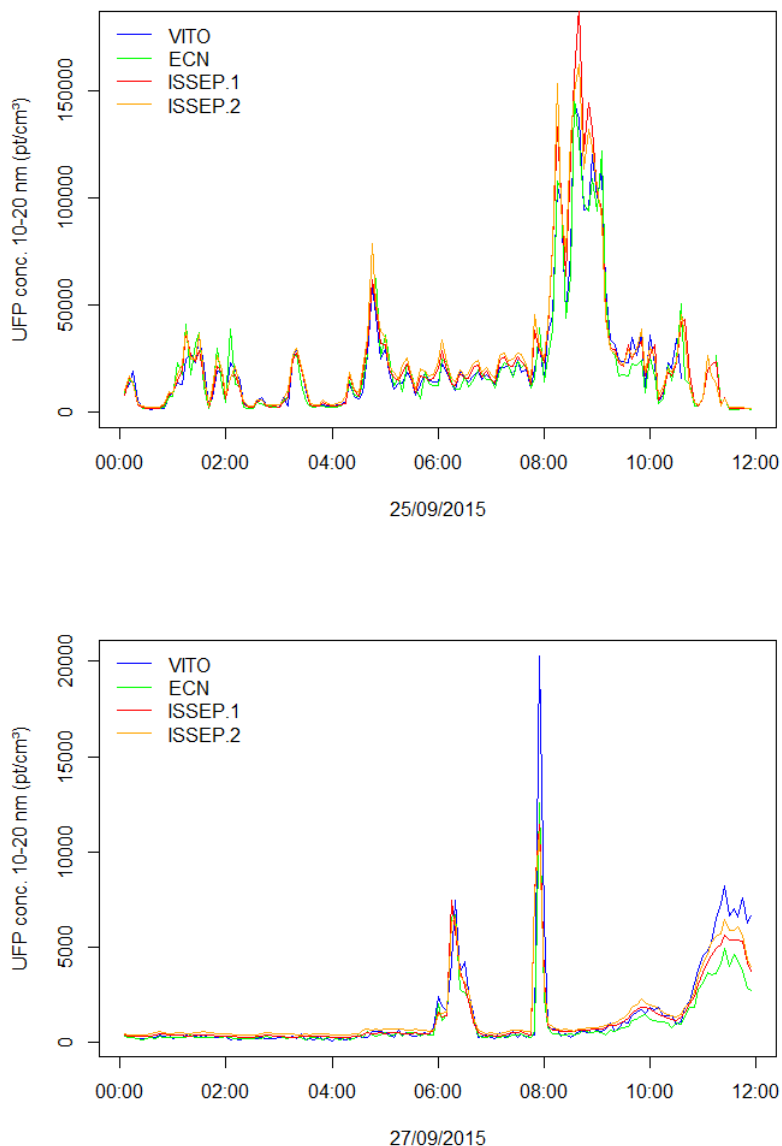
Tabel 8: Weerhouden SMPS herschalingsparameters volgens een lineaire regressie zonder intercept ($Y = b \cdot X$) t.o.v. ISSEP.1 die verder in deze studie zijn gebruikt.

Deeltjesklasse	Correctiefactor (b)		
	VITO	ECN	ISSEP.2
10 – 20 nm	0,86	0,76	1,00
20 – 30 nm	0,85	1,00	1,00
30 – 50 nm	0,79	0,91	0,96
50 – 70 nm	0,83	0,89	0,91
70 – 100 nm	0,84	0,90	0,92
100 – 200 nm	0,78	0,92	0,92
200 – 294 nm	0,75	0,89	0,93

3.4. OVERZICHT HERSCHAALDE UFP-MEETREEKSEN

In Figuur 14 worden de herschaalde UFP-concentraties van deeltjesklasse 10-20 nm weergegeven voor een aantal periodes. Er is een goede vergelijkbaarheid, zowel op piekmomenten als op momenten met lage UFP-concentratie, met uitzondering van de overcorrectie van de ECN-metingen bij lage concentratie.





Figuur 14: Tijdreeksen van de UFP-concentratie voor 10-20 nm deeltjes op een aantal dagen met hoge concentraties (23/09), sterke pieken (25/09) en lage concentraties (27/09). Op 23/09 VM zijn geen metingen van VITO beschikbaar, op 23/09 NM zijn geen metingen van ECN beschikbaar.

3.5. VERGELIJKING BC-METINGEN

Tijdens de vergelijkende metingen werden simultane metingen uitgevoerd op meetlocatie SZ04 met:

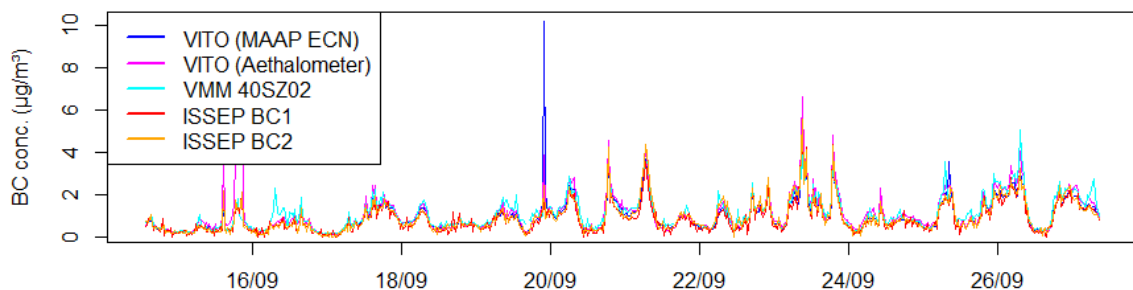
- Multi-angle absorption photometer (ECN) (MAAP, Thermo Scientific MAAP 5012)
- Multi-angle aethalometer (VITO) (Magee Scientific AE33)
- 2x Dual wavelength aethalometer (ISSEP BC 1 en ISSEP BC 2) (Magee Scientific AE22)

Bovendien meet de VMM de BC-concentratie op meetstation SZ02 met een MAAP. Tijdens de eigenlijke meetcampagne werden de verschillende BC-monitoren op verschillende locaties gepositioneerd. De voorafgaande simultane metingen geven inzicht in hun onderlinge vergelijkbaarheid en laten toe om correctievergelijkingen op te stellen om de vergelijkbaarheid te verbeteren.

Een overzicht van de metingen aan de hand van enkele samenvattende statistieken is gegeven in Tabel 9. De metingen met de AE22 liggen iets lager dan de overige metingen op locatie SZ04. De maxima gemeten met de MAAP en AE33 liggen ver boven deze van de dual wavelength AE. De tijdreeksen van de verschillende instrumenten wordt getoond in Figuur 15. De hoge afwijkende maxima zijn te wijten aan één (MAAP) of enkel (AE33) uitschieters.

Tabel 9: Samenvattende statistieken BC-concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) tijdens de vergelijkende metingen te SZ04.

	SZ04				SZ02
	MAAP	AE33	AE22.1	AE22.2	MAAP
Minimum	0,19	0,13	0,03	0,01	0,16
1 ^{ste} kwartiel	0,51	0,53	0,41	0,46	0,56
Mediaan	0,84	0,86	0,68	0,72	0,90
Gemiddelde	1,05	1,13	0,87	0,95	1,12
3 ^{de} kwartiel	1,37	1,48	1,18	1,25	1,15
Maximum	10,18	8,01	5,13	5,56	5,08



Figuur 15: Overzicht vergelijkende BC-metingen.

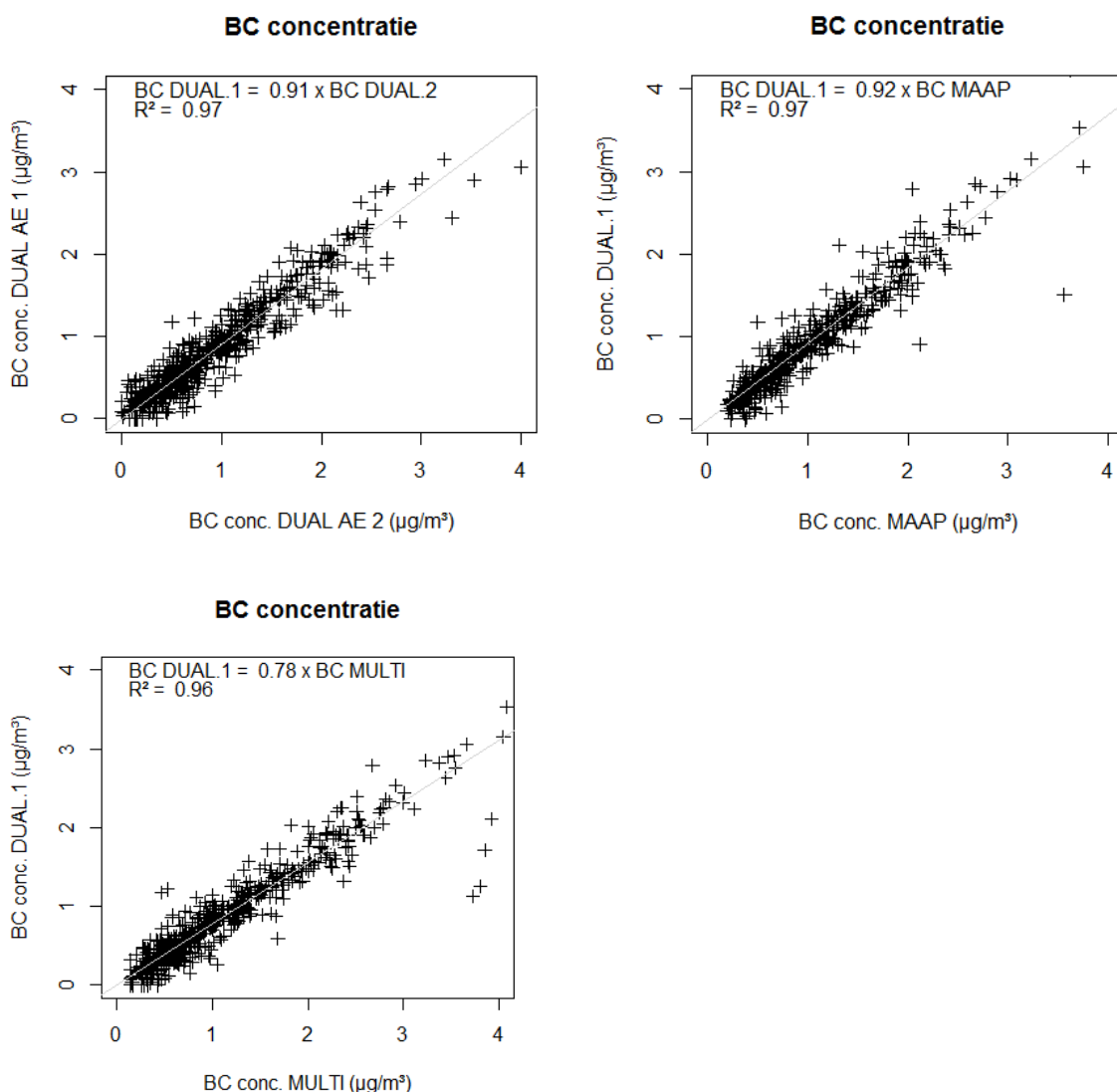
De simultane BC-metingen werden a.d.h.v. scatterplots met elkaar vergeleken (Figuur 16). Er werden herschalingsfactoren bepaald (lineaire regressie zonder intercept), waarbij één van de Dual-wavelength AE22s als referentietoestel werd geselecteerd. De reden hiervoor was het feit dat er 2 van deze monitoren in de eigenlijke meetcampagne zullen opgesteld worden, één in Diegem en één in Evere. Metingen met de MAAP die opgesteld staat in SZ02 worden niet herschaald omdat dit toestel dicht bij de weg staat opgesteld.

De herschalingsfactoren en de afwijking op het gemiddelde, P10 en P90 BC-concentraties tussen toestellen zijn gegeven in Tabel 10. De herschaling resulteert in een verbeterde vergelijkbaarheid. De grootste afwijking na herschaling zit op de lage concentraties tussen MAAP en dual-wavelength AE22 (23,3%). De afwijkingen tussen andere monitoren en concentraties zijn lager. Op basis van

deze vergelijking wordt besloten dat de BC-monitoren goed vergelijkbare resultaten opleveren na herschaling. De metingen van de multi-AE33 werden niet gebruikt in de verdere studie.

Tabel 10: Overzicht herschalingsfactoren BC monitoren.

	Herschalingfactor	Afwijking op gemiddelde		Afwijking op P10		Afwijking op P90	
		Zonder	Met	Zonder	Met	Zonder	Met
ECN MAAP	0,92	+11,5%	+2,6%	34,1%	+23,3%	+5,4%	-3,0%
VITO multi-AE33	0,78	+29,1%	+0,7%	44,9%	+13,0%	+27,2%	-0,7%
ISSEP Dual-AE22.1	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%
ISSEP Dual-AE22.2	0,91	+8,7%	+1,3%	+11,3%	+1,3%	+11,3%	-2,3%
VMM MAAP	/	+28,3%	/	+51,4%	/	+21,2%	/



Figuur 16: Scatterplots van de BC-concentratie gemeten door twee verschillende monitoren die op dezelfde locatie opgesteld stonden.

HOOFDSTUK 4. MEETPLAN

4.1. MEETLOCATIES

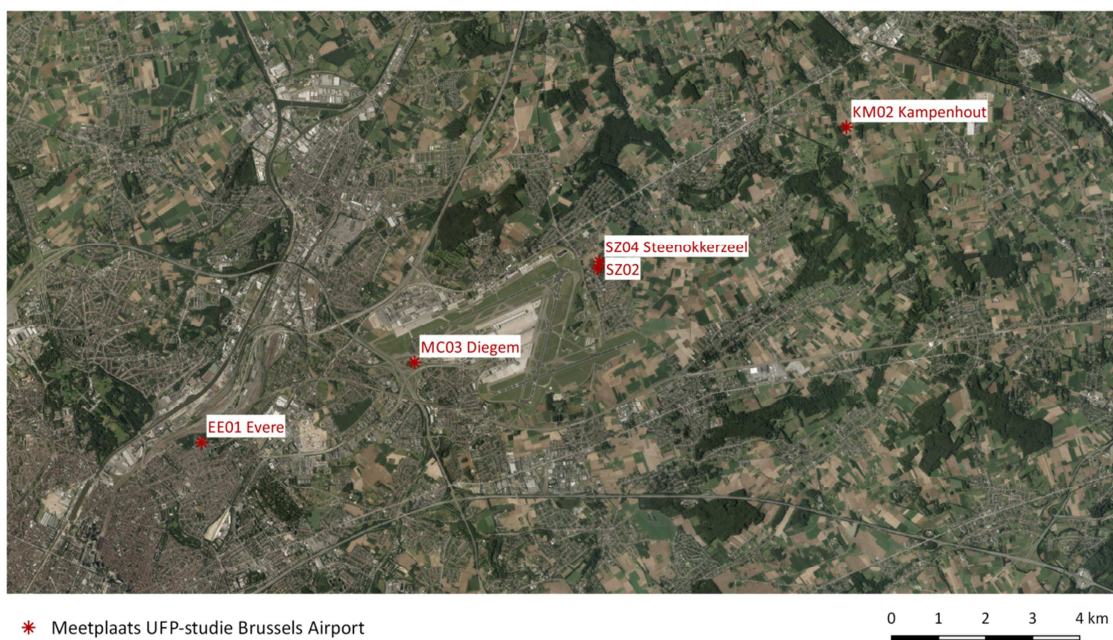
De omgevingsmetingen hebben tot doel een beeld te krijgen van de spreiding op lokale schaal van UFP en andere pollutanten (BC en NO_x in de omgeving van de luchthaven van Brussels Airport. Hiervoor werden gedurende 2 maanden op 4 locaties (windop- en windafwaarts) simultane immissiemetingen uitgevoerd rondom de luchthaven.

Na de vergelijkingsmetingen (Hoofdstuk 3) werden de meetopstellingen geplaatst op 4 locaties, welke een lijn vormen met de drukst bezette startbaan (25R/07L, Figuur 18). De locaties zijn gekozen in functie van de overheersende zuidwestelijke (ZW) windrichting. De keuze van de meetopzet is verder ingegeven door de locatie van startbaan 25R/07L, de aanwezigheid van een bestaand VMM-meetstation en literatuurgegevens die duiden op de impact van luchthavens op UFP-concentraties op grotere afstand.

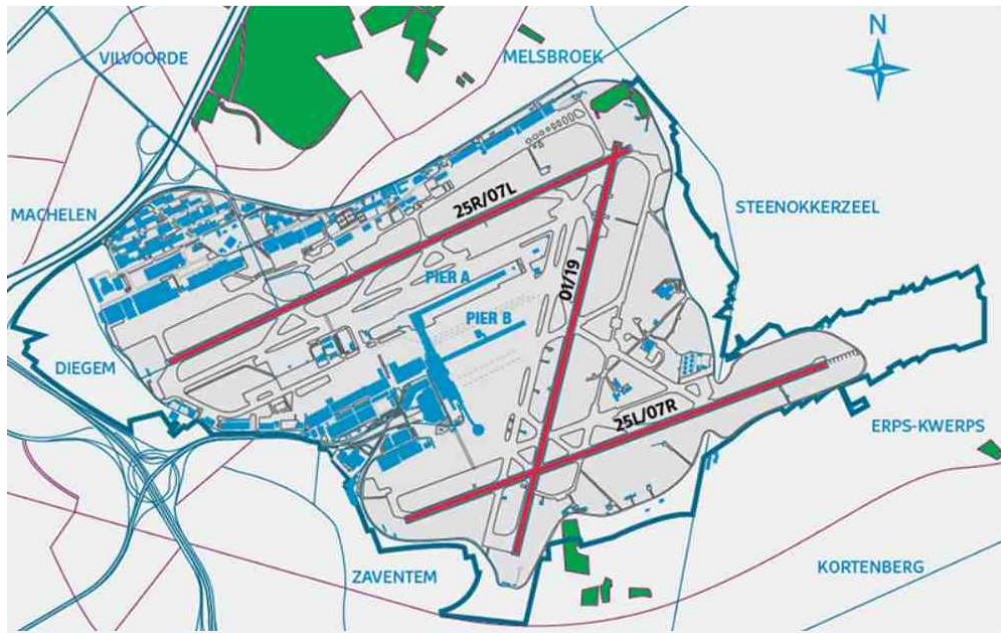
Bij ZW-wind liggen de meetlocaties in Evere (EE01) en Diegem (MC03) windopwaarts van startbaan 25R/07L, terwijl het vast VMM-meetstation te Steenokkerzeel (SZ02), de tweede meetlocatie in Steenokkerzeel (SZ04) en de meetlocatie in Kampenhout (KM02) windafwaarts van de luchthaven liggen bij ZW wind. De 4 meetlocaties kunnen worden gekenmerkt als:

- EE01, MC03 en SZ02/SZ04: stedelijke achtergrond;
- KM02: landelijke meetlocatie.

De concrete positie van de meetlocaties is weergegeven in Figuur 17. Een beschrijving van de meetplaatsen afzonderlijk wordt hieronder gegeven.



Figuur 17: Ligging van de meetlocaties t.o.v. de belangrijkste start en landingsbanen van Luchthaven Zaventem.

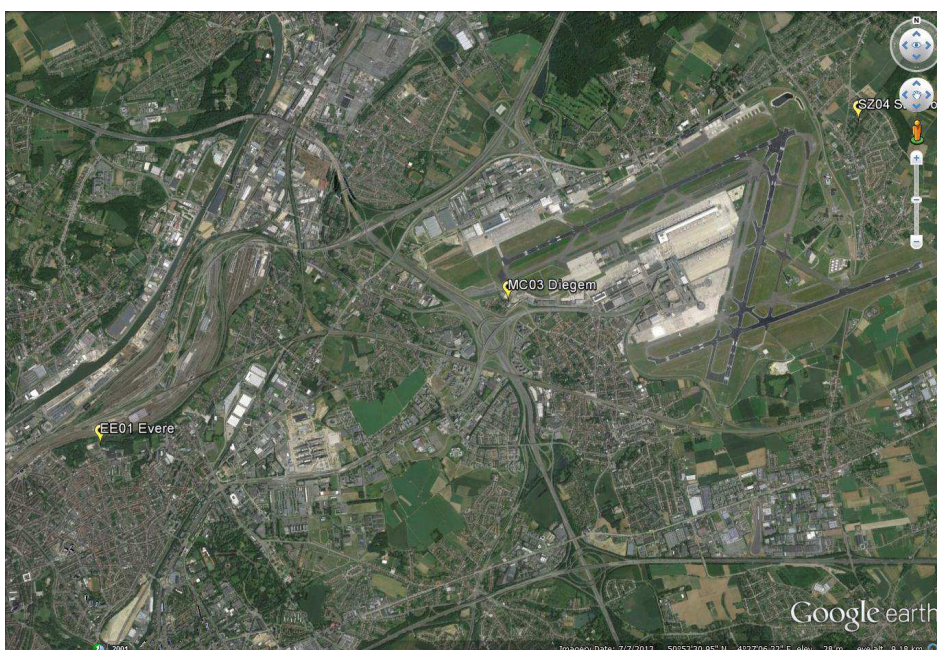


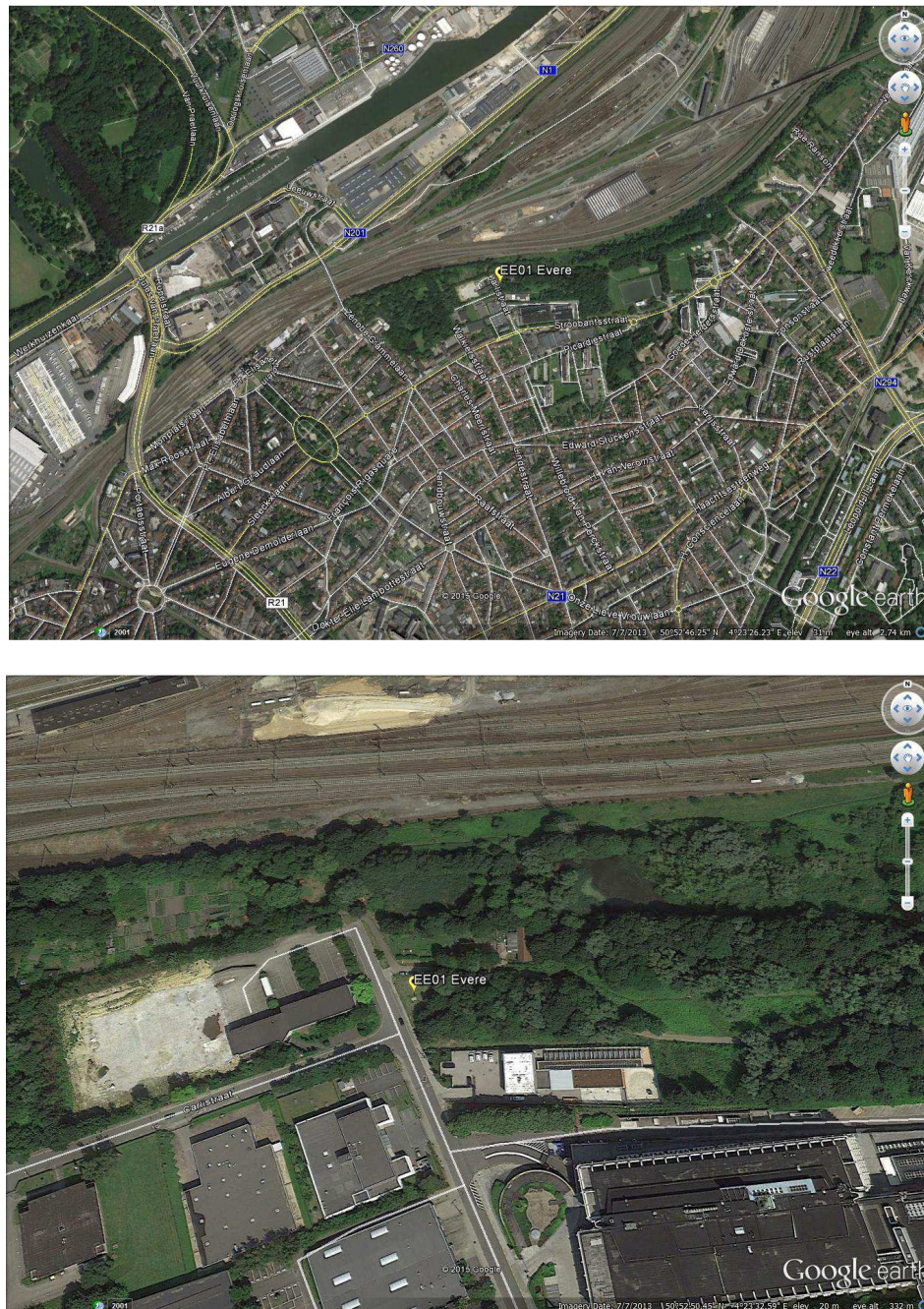
Figuur 18: Weergave van de startbanen van Luchthaven Zaventem.

4.1.1. MEETLOCATIE 1: EVERE (EE01)

De meetlocatie EE01 ($50^{\circ}52'47,6''$ N, $4^{\circ}23'32,8''$ O) gelegen te Carlistraat nr. 10 in Evere ligt op 200m ten zuiden van het treinspoor en op 400 m ten oosten van het station Schaarbeek. De locatie ligt op ongeveer 4 km ten westen van de luchthaven. De belangrijkste wegen zijn de N1 op 500 m noordelijk en de N21 op 800 m zuidelijk van de locatie.

De meettrailer was opgesteld op ongeveer 5 m van de Carlistraat op een open veldje dat aan de oostzijde is omgeven door een kleine groene zone met bomen.





Figuur 19: Ligging meetlocatie EE01 te Evere.

4.1.2. MEETLOCATIE 2: DIEGEM (MC03)

Meetlocatie MC03 (50°53'42,33" N, 4°27'24,47" O) is gelegen aan de Nieuwe Zaventemsesteenweg in Diegem, op ongeveer 500 m ten Z van het einde van start/landingsbaan 25R/07L. Op 200 m ten zuiden van de meetlocatie bevinden zich de R0 en de A201 toegangsweg tot de luchthaven. Het knooppunt van de R0 met de E19 bevindt zich op 1,8 km ten NW van de meetlocatie. Tussen de meetlocatie en de luchthaven bevindt zich de Ringlaan.



Figuur 20: Ligging van meetlocatie MC03 te Diegem.

4.1.3. MEETLOCATIE 3: STEENOKKERZEEL (SZ04 EN SZ02)

De meetlocatie SZ04 ($50^{\circ} 54' 51,56'' N$, $4^{\circ} 30' 45,77'' O$) bij de De Maillé de la Tour de Landrylaan in Steenokkerzeel bevindt zich 125 m ten NO van het permanent VMM-meetstation SZ02 langs de Keizerinlaan. Beide meetlocaties liggen schuin in het verlengde van start/landingsbaan 25R/07L, op ongeveer 650-750 m. Beide stations kunnen omschreven worden als stedelijke achtergrondstations, met locatie SZ04 verder van de straat verwijderd.



Figuur 21: Ligging van de meetlocaties SZ04 en SZ02 te Steenokkerzeel.

4.1.4. MEETLOCATIE 4: KAMPENHOUT (KM02)

Meetlocatie KM02 (50°56'24,24" N, 4°35'14,92" O) is gelegen aan de Streekweg in Kampenhout, op ongeveer 7 km ten NO en in het verlengde van start/landingsbaan 25R/07L. De meetplaats is landelijk met weinig bebouwing en verkeer in de onmiddellijke omgeving. Voor de selectie van deze locatie werd een afstand van 7 km gehanteerd om vergelijkbaarheid met de studie in Schiphol (Keuken et al., 2015) te kunnen garanderen.



Figuur 22: Ligging van de meetlocatie KM02 te Kampenhout.

4.2. MEETPERIODE

De metingen vonden plaats in het najaar van 2015 gedurende 8 weken (1 oktober – 30 november 2015).

4.3. GEMETEN PARAMETERS

In de monitoring werden de parameters UFP, black carbon (BC) en NO_x opgemeten. Bijkomend werden er PM₁₀ gemeten door de VMM.

- UFP: op de locaties EE01, KM02, MC03 en SZ04 werd continu de deeltjesconcentratie (pt/cm³) opgemeten met een SMPS in verschillende deeltjesgrootteklassen met een meetbereik van tenminste 10-294 nm. UFP-metingen werden uitgevoerd met een meetfrequentie van 1 meting per 5 minuten.
- BC en NO_x: op de meetlocaties EE01, KM02, MC03 en SZ02 werd continu de BC- en NO_x-

concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) opgemeten met een tijdsresolutie van 30 minuten.

- PM: de massaconcentratie van PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) werd gemeten met een tijdsresolutie van 24 u. Dit gebeurde volgens de Europese referentiemethode (bemonstering van kwartsvezelfilters met Leckel SEQ47/50 en gravimetrische massabepaling).

4.3.1. UFP

De SMPS-toestellen werden opgesteld in twee trailers van ISSEP, een trailer van ECN en een meetwagen van VITO. De trailers en meetwagens zijn alle voorzien van air conditioning. Een overzicht van de SMPS-configuratie van de verschillende onderzoekspartners en de respectievelijke locaties waar deze ingezet worden, is gegeven in Tabel 11.

Tabel 11: Beschrijving SMPS-systemen.

Locatie		SMPS	Omschrijving	Aanzuigleiding en debiet
Diegem MC03 Evere EE01	ISSEP	lft customized SMPS	Ni-63 100MBq, Long DMA <10-850 nm, TSI CPC 3772, butanol, 1 L/min debiet	PM_{10} inlaat, lange aanzuigleiding met hoog debiet (2,4 m^3/h), isokinetische splitsing (5 punten), roestvrij stalen leidingen, nafion droger
Steenokkerzeel SZ04	ECN	TSI SMPS	Kr-85 185 MBq, L-DMA 3081 <10-1000 nm, TSI CPC 3776, butanol, 1 L/min debiet	TSI Environmental Sampling Systeem PM_{10} inlaat (16,7 L/min) + PM_1 cycloon + nafion droger
Kampenhout KM02	VITO	TSI SMPS	Kr-85 370MBq, L-DMA 3081 <10-1000 nm, TSI CPC 3776, butanol, 1 L/min debiet	TSI Environmental Sampling Systeem PM_{10} inlaat (16,7 L/min debiet) + PM_1 cycloon + nafion droger

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de monitoring en bemonstering systemen wordt verwezen naar het rapport "UFP instrument comparison at an urban background location in Antwerp" (VITO, 2013/MRG/R/172).

4.3.2. NO_x

Op de locatie SZ02 werd de NO_x -concentratie (halfuursgemiddelde) online gemeten met een Thermo Scientific Chemiluminescence $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ Analyzer model 42i. Op de locaties Diegem (MC03), Evere (EE01) en Kampenhout (KM02) werd de NO_x -concentratie (halfuursgemiddelde) online gemeten met een Thermo Scientific Chemiluminescence $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ Analyzer model 42C.

Afkorting	Firma	Model	Omschrijving	Meetlocatie
NO_x -monitor	Thermo Scientific	42i	Chemiluminescent $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ analyzer	SZ02
NO_x monitor	Thermo Scientific	42C	Chemiluminescent $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ analyzer	EE01, MC03, KM02

De NO_x monitoren werden om de twee weken gekalibreerd (zero en span kalibratie).

4.3.3. BLACK CARBON

Halfsuursgemiddelde BC-concentraties werden gemeten op de 4 locaties d.m.v. verschillende BC-monitoren.

Afkorting	Firma	Model	Omschrijving	Meetlocatie
MAAP	Thermo Scientific	5012	Multiangle Absorption Photometer (MAAP)	KM02, SZ02
AE33	Magee Scientific	AE33	Multi-wavelength aethalometer	KM02
AE22	Magee Scientific	AE22	Dual-wavelength aethalometer	EE01, MC03

AE33

De multi-wavelength Aethalometer (AE33, Magee Scientific) collecteert deeltjes op een filterband door continu omgevingslucht aan te zuigen over de filter. Het totaal debiet is 5L/min. De transmissie wordt continu (tijdsresolutie 1 min) gemeten en vergeleken met een onbeladen referentiespot. Hieruit wordt de attenuatie (vermindering van licht door de filter) berekend. De BC-concentratie wordt dan bepaald op basis van de verandering in attenuatie in functie van de tijd en een specifieke absorptiecoëfficiënt bij de respectievelijke golflengte.

De AE33 voert zelf een correctie uit voor belading op basis van de metingen op 2 spots (dual spot) bij een verschillend debiet. Het algoritme gebruikt voor ladingcorrectie is beschreven in Drinovec et al. (2014). BC wordt gemeten bij verschillende golflengtes (respectievelijk 370, 470, 520, 590, 660, 880 en 950 nm). De filterband schuift automatisch door wanneer een attenuatie van 120 is bereikt.

De multi-wavelength AE33 werd voor vergelijkingsdoeleinden ingezet. Tijdens de eigenlijke monitoring werd de AE33 gedurende een deel van de totale monitoringsperiode ingezet op de meetlocatie in Kampenhout (KM02). De BC-metingen van de AE33 zullen niet verder gebruikt worden in deze studie, de metingen met de MAAP op deze locatie zullen gebruikt worden.

AE22

Op de locaties EE01 en MC03 werd BC gemeten met een AE22 (Magee Scientific). Dit is een dual-wavelength aethalometer die meet bij 370 en 880 nm. Het toestel collecteert deeltjes op een filterband door continu (tijdsresolutie 5 min) omgevingslucht aan te zuigen. Het aangezogen debiet is 4 L/min. Zoals bij de AE33 wordt de transmissie gemeten en daaruit de attenuatie berekend en vervolgens de BC-concentratie bepaald op basis van het signaal bij 880 nm. Een beladingscorrectie wordt toegepast volgens de procedure van Virkulla et al. (2007).

MAAP

Op de locaties SZ02 en KM02 werd BC gemonitord met Thermo Scientific Model 5012 Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP). Het model 5012 MAAP meet BC aan de hand van multihoeck absorptie fotometrie. Dit type toestel is voorzien van een TSP-kop en wordt ingezet in het meetnet van VMM voor het meten van BC.

4.3.4. OVERZICHTSTABEL

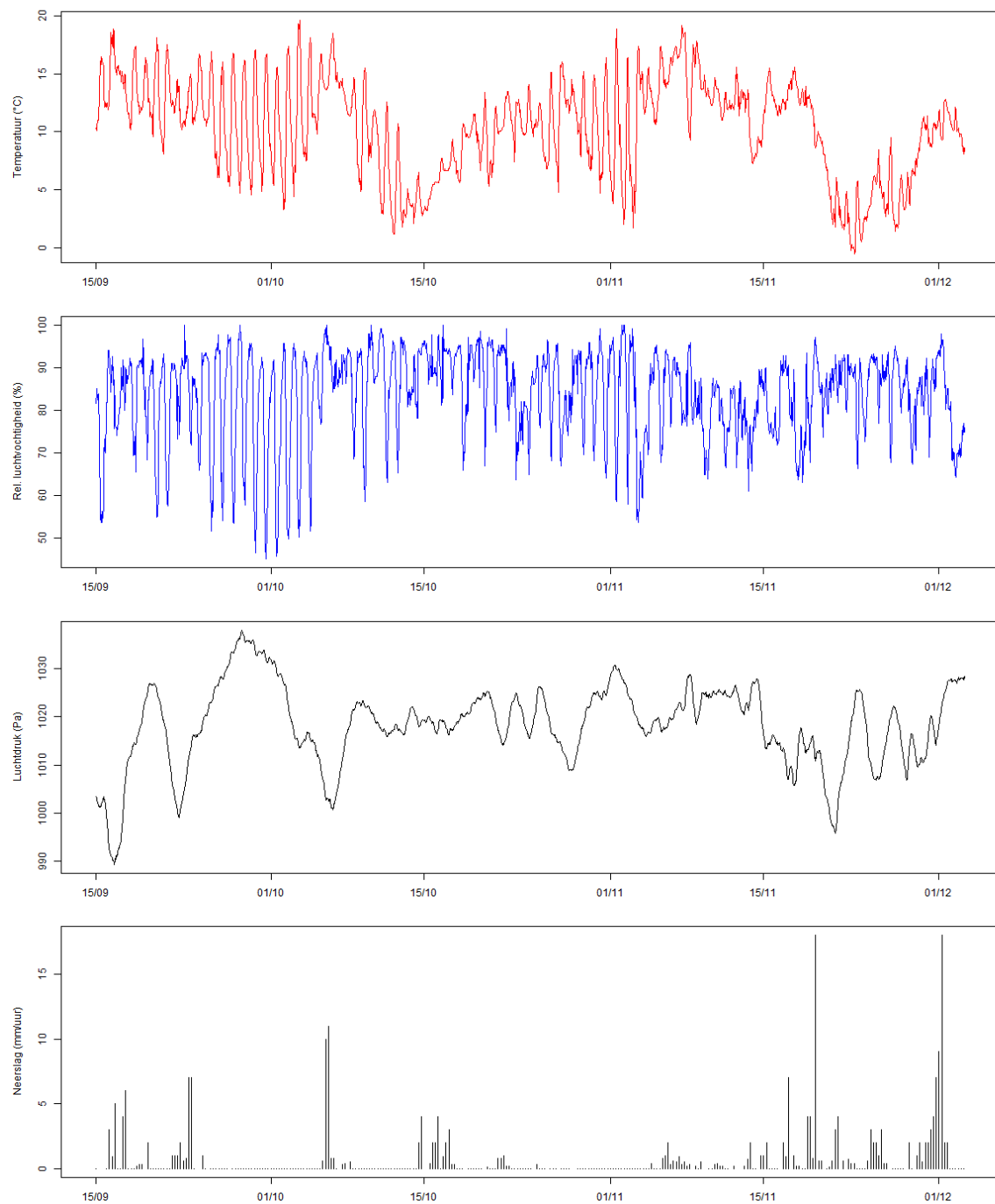
Locatie	Behuizing	Parameter	Aanzuigleiding	Monitor
Steenokkerzeel SZ04	Trailer ECN	UFP	TSI Environmental Sampling Systeem PM ₁₀ -inlaat +PM ₁ cycloon + nafion droger	TSI SMPS 3936L76
	Weersbestendig	PM ₁₀	PM ₁₀ inlaat	Leckel SEQ47/50
Steenokkerzeel SZ02	Meetstation VMM	BC	TSP-kop, roestvrijstalen leiding (16,7 L/min)	MAAP 5012
		NO _x	Teflon manifold en aanzuigleiding	NO _x TS42i
Diegem MC03	Trailer ISSEP	UFP	PM ₁₀ inlaat, lange aanzuigleiding met hoog debiet (2.4 m ³ /h), isokinetische splitsing (5 punten), roestvrij stalen leidingen	IfT custom classif. en CPC3772
		BC	Aangesloten op splitter met geleidende leiding van 50 cm	Magee AE22
		NO _x	Aangesloten op splitter met Teflon leiding	NO _x 42C
	Weersbestendig	PM ₁₀	PM ₁₀ inlaat	Leckel SEQ47/50
Evere EE01	Trailer ISSEP	UFP	PM ₁₀ inlaat, lange aanzuigleiding met hoog debiet (2,4 m ³ /h), isokinetische splitsing (5 punten), roestvrij stalen leidingen	IfT cust. classif. en CPC3772
		BC	Aangesloten op splitter met geleidende leiding van 50 cm	Magee AE22
		NO _x	Aangesloten op splitter met Teflon leiding	NO _x TS42C
	Weersbestendig	PM ₁₀	PM ₁₀ inlaat	Leckel SEQ47/50
Kamphenhout KM02	Meetwagen VITO (Aeromax)	UFP	TSI Environmental Sampling Systeem PM ₁₀ -inlaat +PM ₁ cycloon + nafion droger	TSI SMPS 3936L76
		BC	Geleidende silicone leiding, geen voorafscheider	MAAP 5012
		NO _x	Teflon aanzuigleiding, geen voorafscheider	NO _x TS42C
	Weersbestendig	PM ₁₀	PM ₁₀ inlaat	Leckel SEQ47/50

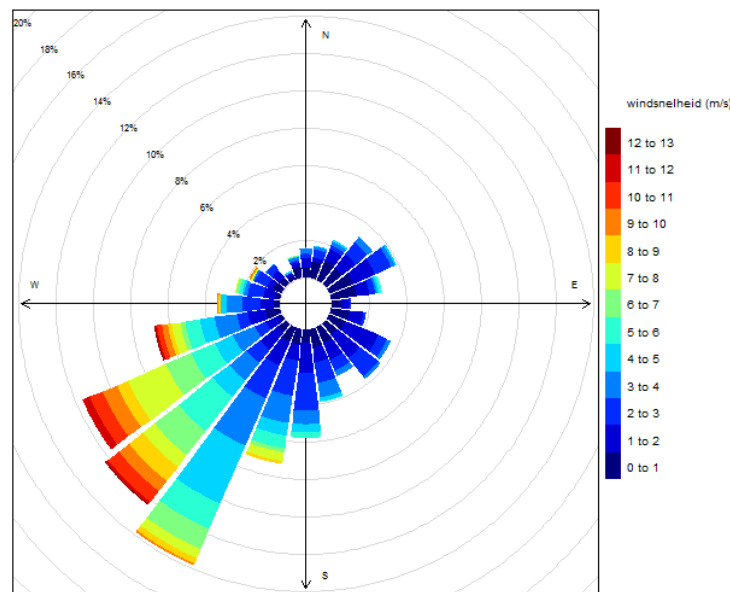
HOOFDSTUK 5. OVERZICHT VAN DE METINGEN

5.1. METEOROLOGIE

Meteorologische data werden ter beschikking gesteld door BIM. Er zijn metingen van de windsnelheid en windrichting (10 m boven maaiveld), temperatuur en luchtvochtigheid (1,5 m boven maaiveld), neerslag en druk beschikbaar voor Zaventem (Melsbroek). De meteorologische gegevens zijn uurlijkse waardes behalve de neerslaghoeveelheid die werd gemeten per 6 uur. Overzichtsgrafieken van meteorologische gegevens tijdens de vergelijkende metingen en de eigenlijke meetcampagne zijn gegeven in Figuur 23. De overheersende windrichting tijdens de meetcampagne is ZW (zie ook De hoogte van de atmosferische menglaag (mixing-layer height, MLH) is een belangrijke parameter voor de interpretatie van luchtkwaliteitsgegevens. De hoogte van de menglaag bepaalt het volume waarin turbulentie optreedt en waarin polluenten die op/nabij het aardoppervlak geëmitteerd worden zich verspreiden en verticaal mengen. Het BIM stelt menglaaggegevens ter beschikking (KMI-gegevens van Ukkel). De metingen werden uitgevoerd met een LIDAR (ceilometer data) gevolgd door modelberekening. Datakwaliteitscontrole is een belangrijk aspect bij de MLH-metingen met LIDAR omdat atmosferische condities de metingen kunnen beïnvloeden. Het KMI gebruikt verschillende kwaliteitsklassen: -999: niet betrouwbaar; 1: goede betrouwbaarheid; 0: iets minder betrouwbaar; 2: meting komt overeen met basis van de wolken (Laffineur et al., 2013).

Tabel 12). De hoogste windsnelheden werden ook waargenomen bij wind uit zuidwestelijke richting.



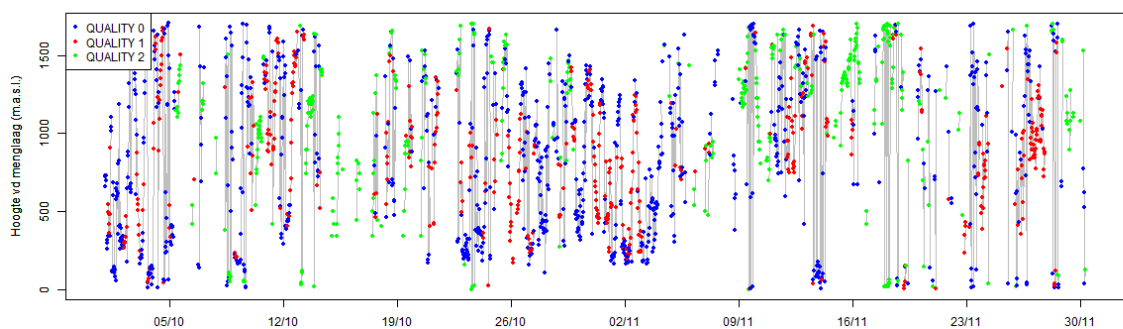


Figuur 23: Overzicht meteorologische gegevens van meetstation Melsbroek/Zaventem (bron: BIM). De windroos geeft de frequentie (%) weer wanneer de wind uit een bepaalde richting kwam voor de periode 1/10 – 30/11/2015. De segmenten (van 15°) zijn ingekleurd proportioneel met de windsnelheid.

De hoogte van de atmosferische menglaag (mixing-layer height, MLH) is een belangrijke parameter voor de interpretatie van luchtkwaliteitsgegevens. De hoogte van de menglaag bepaalt het volume waarin turbulentie optreedt en waarin pollutanten die op/nabij het aardoppervlak geëmitteerd worden zich verspreiden en verticaal mengen. Het BIM stelt menglaaggegevens ter beschikking (KMI-gegevens van Ukkel). De metingen werden uitgevoerd met een LIDAR (ceilometer data) gevolgd door modelberekening. Datakwaliteitscontrole is een belangrijk aspect bij de MLH-metingen met LIDAR omdat atmosferische condities de metingen kunnen beïnvloeden. Het KMI gebruikt verschillende kwaliteitsklassen: -999: niet betrouwbaar; 1: goede betrouwbaarheid; 0: iets minder betrouwbaar; 2: meting komt overeen met basis van de wolken (Laffineur et al., 2013).

Tabel 12: Overzicht van het percentage van de tijd dat de wind uit een bepaalde windrichting kwam (windrichting in segmenten van 30°, middelpunten van segmenten zijn gegeven in tabel, bv. 30° omvat wind uit 15° tot 45°, windsnelheden lager dan 0,2 m/s niet opgenomen)

windrichting	frequentie
30°	4,4%
60°	7,9%
90°	2,7%
120°	6,1%
150°	6,8%
180°	11,7%
210°	21,6%
240°	22,3%
270°	7,9%
300°	3,5%
330°	2,2%
360°	3,0%



Figuur 24: Hoogte van de menglaag op basis van KMI-gegevens van Ukkel (Kwaliteitscode 1: goede betrouwbaarheid; 0: minder betrouwbaar; 2: meting komt overeen met de basis van de wolken).

5.2. UFP-METINGEN

In

Tabel 14 worden samenvattende statistieken gegeven van de herschaalde (zie sectie 3.3) UFP-metingen op de vier locaties over de hele meetperiode. In deze tabel gaat het om UFP-concentraties voor een tijdsresolutie van 5 min. Enkel metingen die simultaan voor elk van de vier locaties beschikbaar zijn werden in rekening gebracht (17 278 metingen).

De metingen kunnen geïnterpreteerd worden t.o.v. metingen in stedelijke omgeving. Bv. op een stedelijke achtergrondmeetplaats in Borgerhout (Antwerpen, 30 m van de drukke Plantin-Moretuslei) werden in de periode april 2013 - maart 2015 gemiddeld ongeveer 10 000 pt/cm³ gemeten van 10 tot 200 nm (VMM, 2015). Vlakbij de ring van Antwerpen werden in 2013 tijdens twee campagnes 2-3x hogere deeltjesaantallen gemeten dan op de stedelijke achtergrond (VMM, 2014). In Borgerhout hadden de meeste deeltjes in het 10-200 nm bereik een grootte van 10-20 nm (2 468 pt/cm³ of 25%) of 30-50 nm (2 195 pt/cm³ of 22%). De grootteklasse 20-30 nm bevatte gemiddeld 1 709 pt/cm³ of 17% van het deeltjesaantal (VMM, 2015).

De gemiddelde UFP-concentratie gesommeerd over alle deeltjesklassen (UFP totaal, 10-294 nm) is het laagst in Kampenhout (7 685 pt/cm³). De totale UFP-concentratie is (veel) hoger op de meetlocaties Steenokkerzeel (x 2,2), Diegem (x 2,4) en Evere (x 1,3). De piekconcentraties UFP totaal (uitgedrukt als P99) liggen ongeveer 4,2 en 3,7 keer hoger in respectievelijk Steenokkerzeel en Diegem en 0,7 keer lager in Evere in vergelijking met Kampenhout (30 848 pt/cm³).

De verhouding van de gemiddelde en P99 concentratie van de kleinste gemeten UFP-deeltjesklasse (10-20 nm), die in de literatuur duidelijk geassocieerd wordt met vliegtuigemissies, tussen meetlocatie en de locatie met de laagste gemiddelde deeltjesconcentratie (Kampenhout) is gegeven in Tabel 13.

Tabel 13: Gemiddelde en P99 deeltjesaantalconcentratie voor de 10-20 nm deeltjesklasse op de vier meetlocaties. De ratio tussen de resultaten per meetlocatie en de locatie met de laagste concentratie (Kampenhout, KM02) is ook gegeven.

Locatie	Gemiddelde 10-20 nm		P99 10-20 nm	
	pt/cm ³	ratio	pt/cm ³	ratio
Evere	2891	1,1	10063	0,5
Diegem	8119	3,1	68992	3,5
Steenokkerzeel	7776	3,0	74370	3,7
Kampenhout	2615	1	19660	1

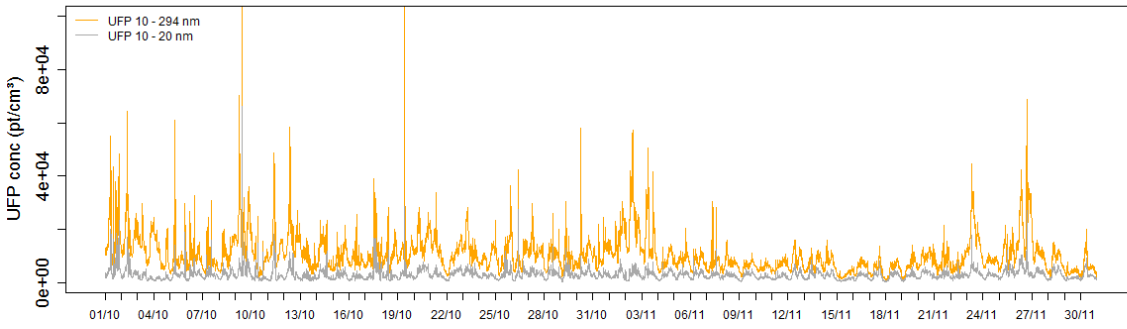
In vergelijking met Kampenhout en Evere is het aantal deeltjes van 10-20 nm sterk verhoogd in Steenokkerzeel en in Diegem. De piekconcentratie (P99) van de 10-20 nm deeltjesklasse is ongeveer 2 keer hoger in Kampenhout dan in Evere.

Tabel 14: Samenvattende statistieken van de 5-minuuts UFP-metingen.

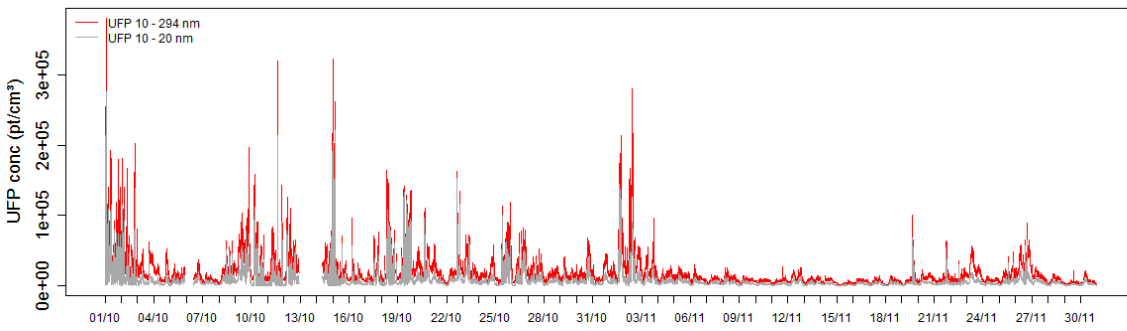
	Deeltjesgrootte (nm)							Totaal
	10-20	20-30	30-50	50-70	70-100	100-200	200-294	
Evere								
Minimum	275	207	230	53	40	74	10	1 058
1ste kwartiel	1 676	961	1 065	535	442	538	154	6 034
Mediaan	2 572	1 411	1 553	837	731	889	239	8 686
Gemiddelde	2 891	1 750	1 995	1 098	989	1 208	293	10 224
3de kwartiel	3 616	2 010	2 332	1 342	1 260	1 522	383	12 282
p99	10 063	7 722	9 000	4 570	4 100	5 180	1 019	35 841
Maximum	66 406	83 782	114 706	45 663	17 148	7 780	1 548	309 868
Diegem								
Minimum	259	204	225	65	51	71	9	995
1ste kwartiel	2 485	1 186	1 170	604	491	570	153	7 518
Mediaan	4 532	1 878	1 782	990	859	987	243	11 805
Gemiddelde	8 119	3 300	2 588	1 309	1 146	1 337	298	18 096
3de kwartiel	8 232	3 242	2 895	1 641	1 476	1 730	396	19 964
p99	68 993	28 270	13 035	5 432	5 052	5 771	1 019	112 796
Maximum	276 247	106 169	103 098	31 204	8 423	9 288	1 653	379 578
Steenokkerzeel								
Minimum	27	109	198	49	31	52	4	740
1ste kwartiel	908	803	904	482	373	438	112	5 648
Mediaan	2 628	1 391	1 406	743	640	752	197	9 223
Gemiddelde	7 776	4 152	2 147	983	854	1 028	242	17 182
3de kwartiel	8 071	3 118	2 249	1 266	1 138	1 334	333	17 860
p99	74 370	46 057	14 209	4 160	3 473	4 139	789	131 586
Maximum	258 835	233 482	78 515	21 808	10 875	8 891	1 617	453 609
Kampenhout								
Minimum	10	64	139	42	22	31	0	844
1ste kwartiel	693	591	696	402	312	361	107	4 542
Mediaan	1 510	902	1 036	636	565	661	189	6 677
Gemiddelde	2 616	1 239	1 232	777	720	877	225	7 685
3de kwartiel	2 913	1 434	1 562	1 053	1 013	1 197	312	9 140
p99	19 660	7 365	3 994	2 259	2 286	3 189	647	30 849
Maximum	42 341	19 411	67 659	14 047	8 011	5 595	1 270	76 800

In onderstaande Figuur 25 worden de tijdreeksen van de UFP-metingen op de vier locaties gegeven (UFP totaal, i.e. deeltjesaantallen van 10 – 294 nm, in pt/cm³). Het gemiddeld aandeel van de 10-20 nm klasse aan de totale UFP-concentratie (10 – 294 nm) is groter in Steenokkerzeel (45%) en Diegem (45%) in vergelijking met Kampenhout (35%) en Evere (28%).

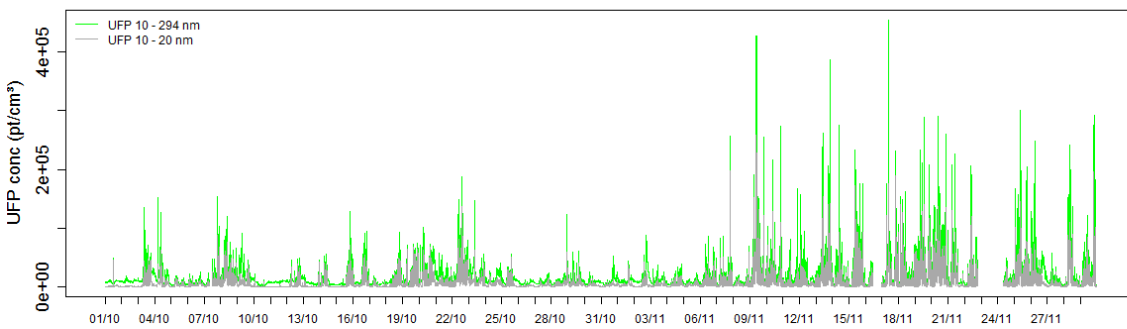
→ **Evere EE01**

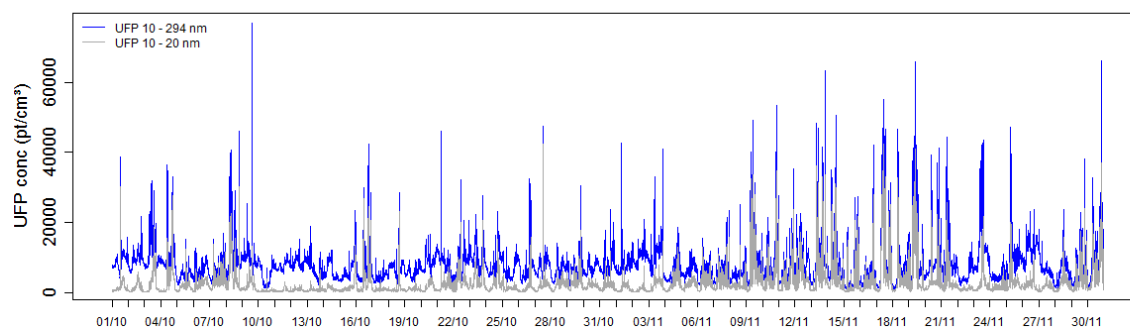


→ **Diegem MC03**

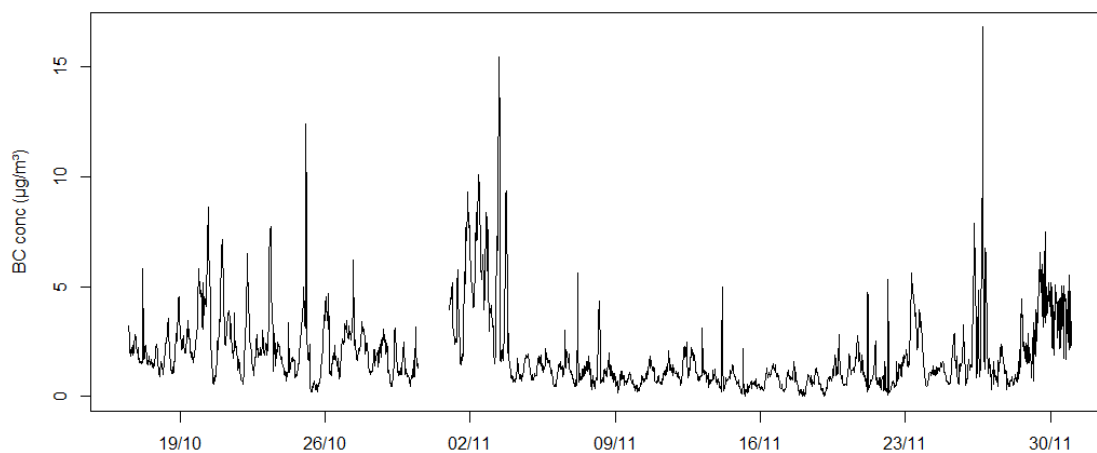


→ **Steenokkerzeel SZ04**



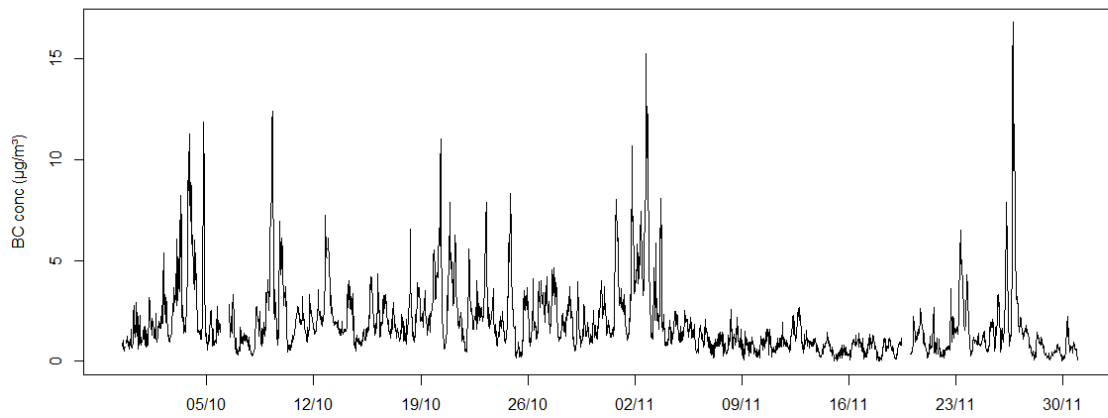
→ **Kampenhout KM02**

Figuur 25: Tijdreeksen van de UFP-concentratie (10-20 nm klasse en totaal 10-294 nm) op de vier meetlocaties.

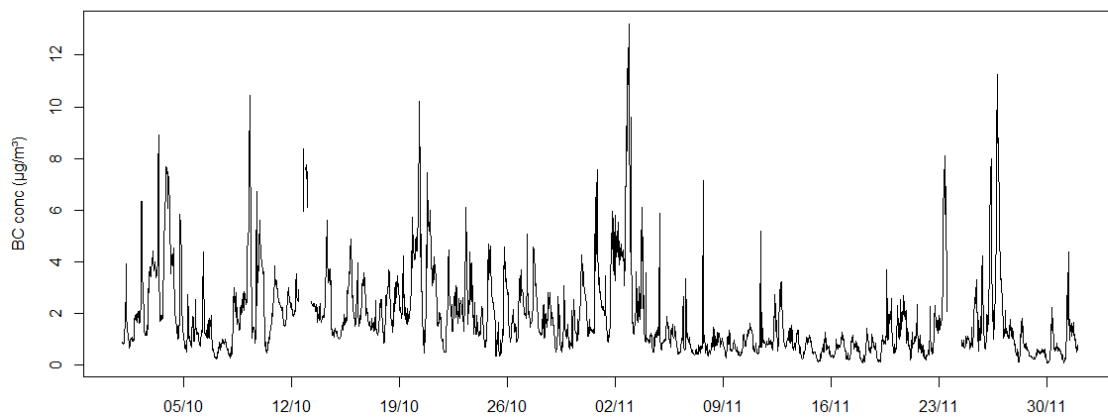
5.3. BC-METINGEN→ **Evere EE01**

De BC-metingen in Evere zijn beschikbaar vanaf 16/10/2015.

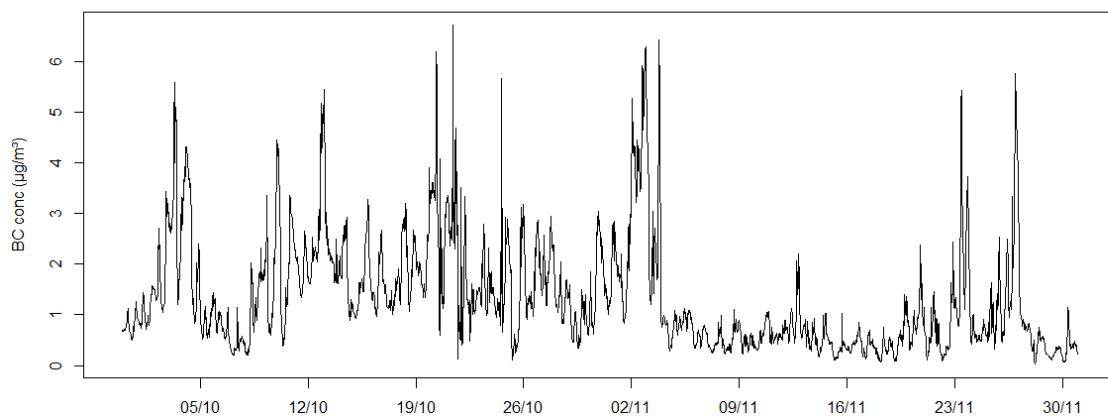
→ **Diegem MC03**



→ **Steenokkerzeel SZ02**

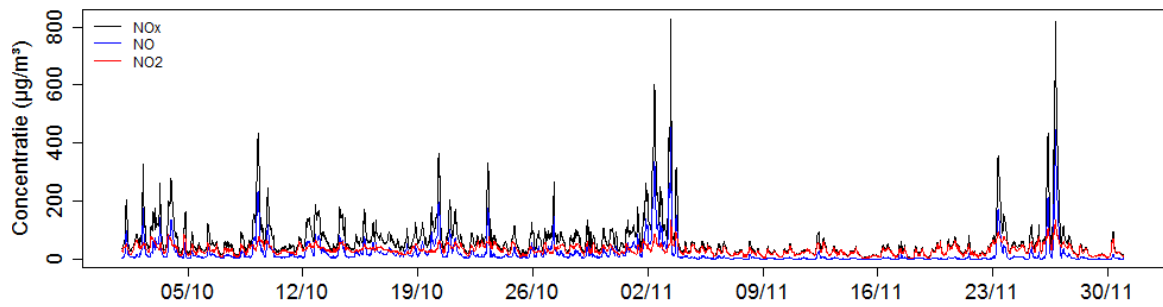


→ **Kamphenhout KM02**

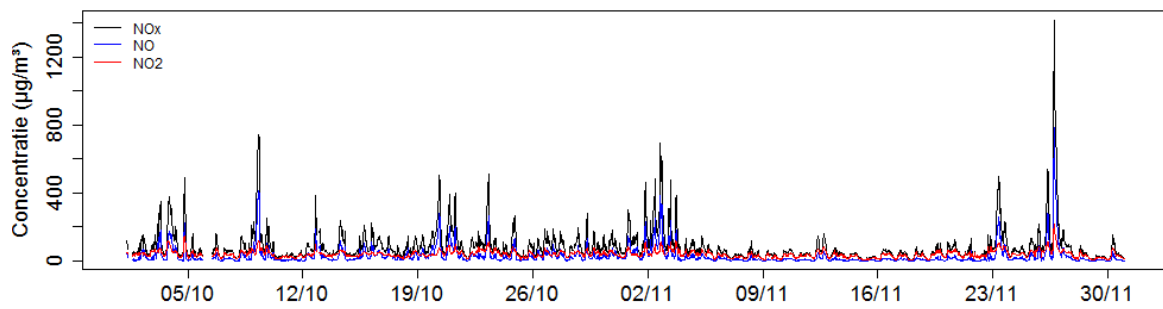


5.4. NO/NO₂/NO_x-METINGEN

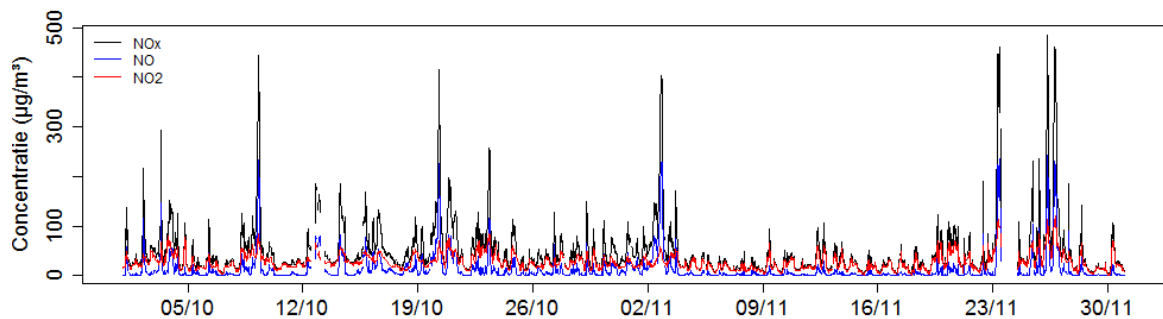
→ **Evere EE01**



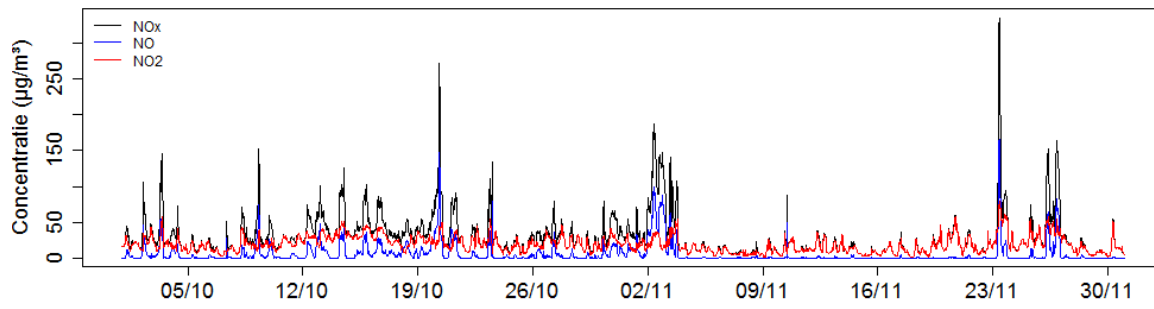
→ **Diegem MC03**



→ **Steenokkerzeel SZ02**



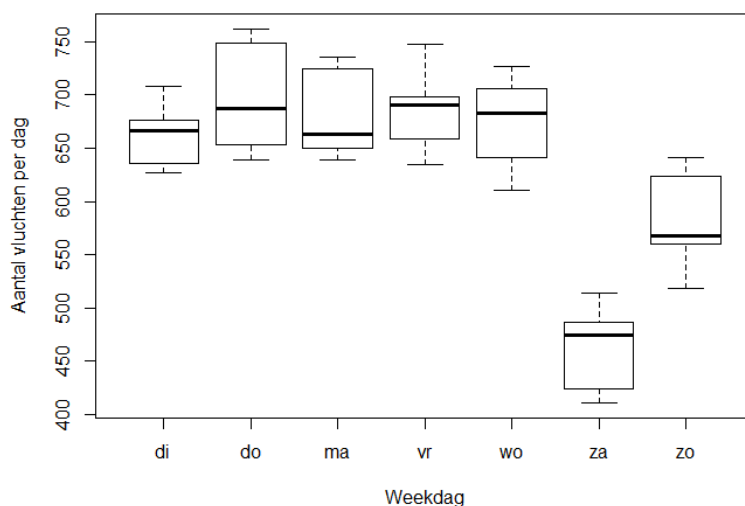
→ Kampenhout KM02



HOOFDSTUK 6. INTERPRETATIE VAN DE METINGEN

6.1. VARIATIE VAN DE UFP-CONCENTRATIE IN DE TIJD

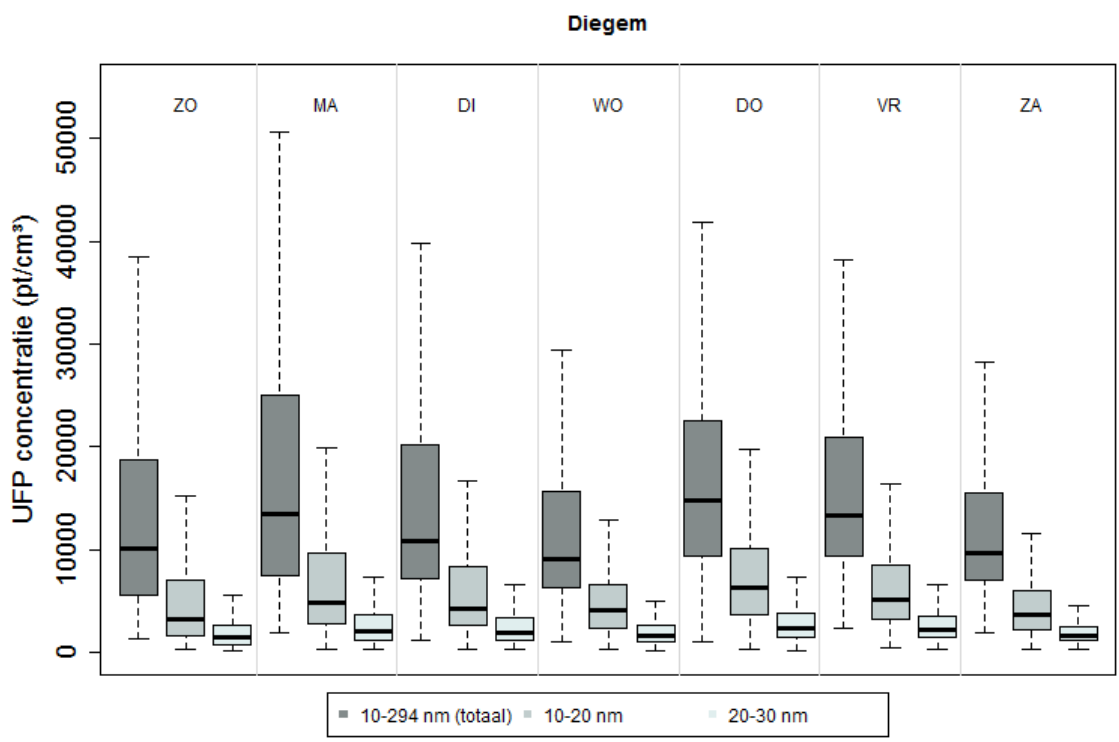
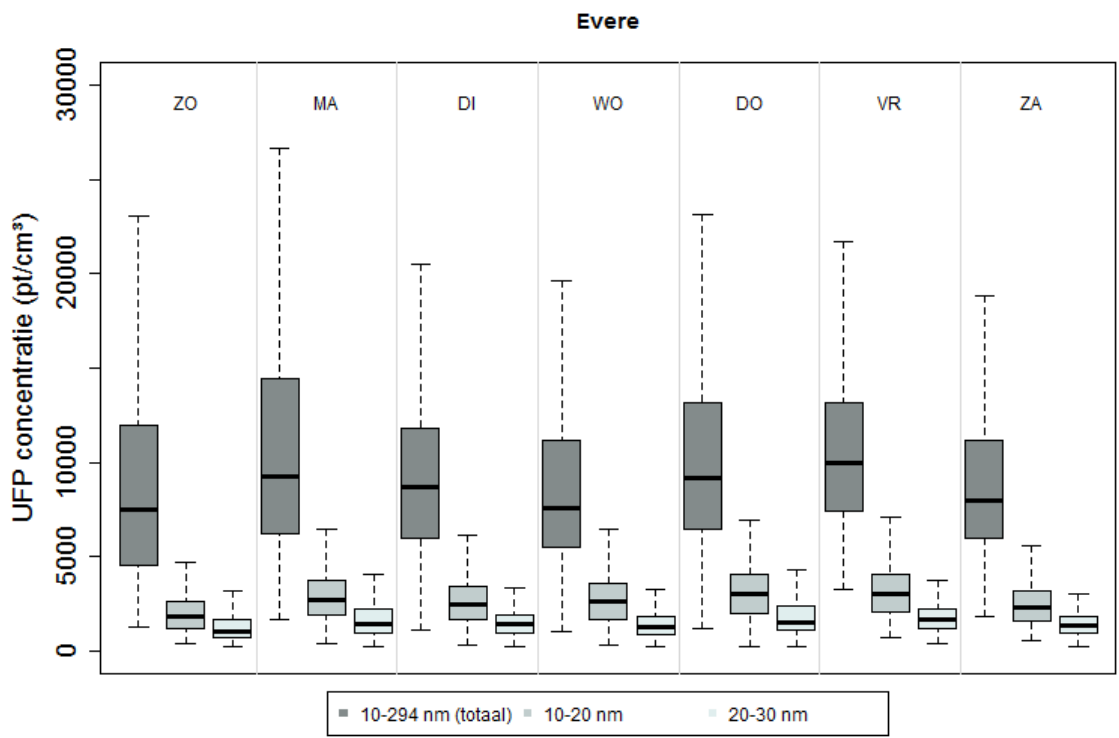
De fluctuaties van UFP-concentraties in de tijd worden bepaald door de dynamiek van de UFP-bronnen, de meteorologische omstandigheden en atmosferische condities. In de volgende paragrafen wordt de temporele dynamiek gevisualiseerd zonder verder in te gaan op de onderliggende oorzaak. Een samenvattende grafiek van het dagelijks aantal vluchten per weekdag tijdens de meetperiode is gegeven in Figuur 26.

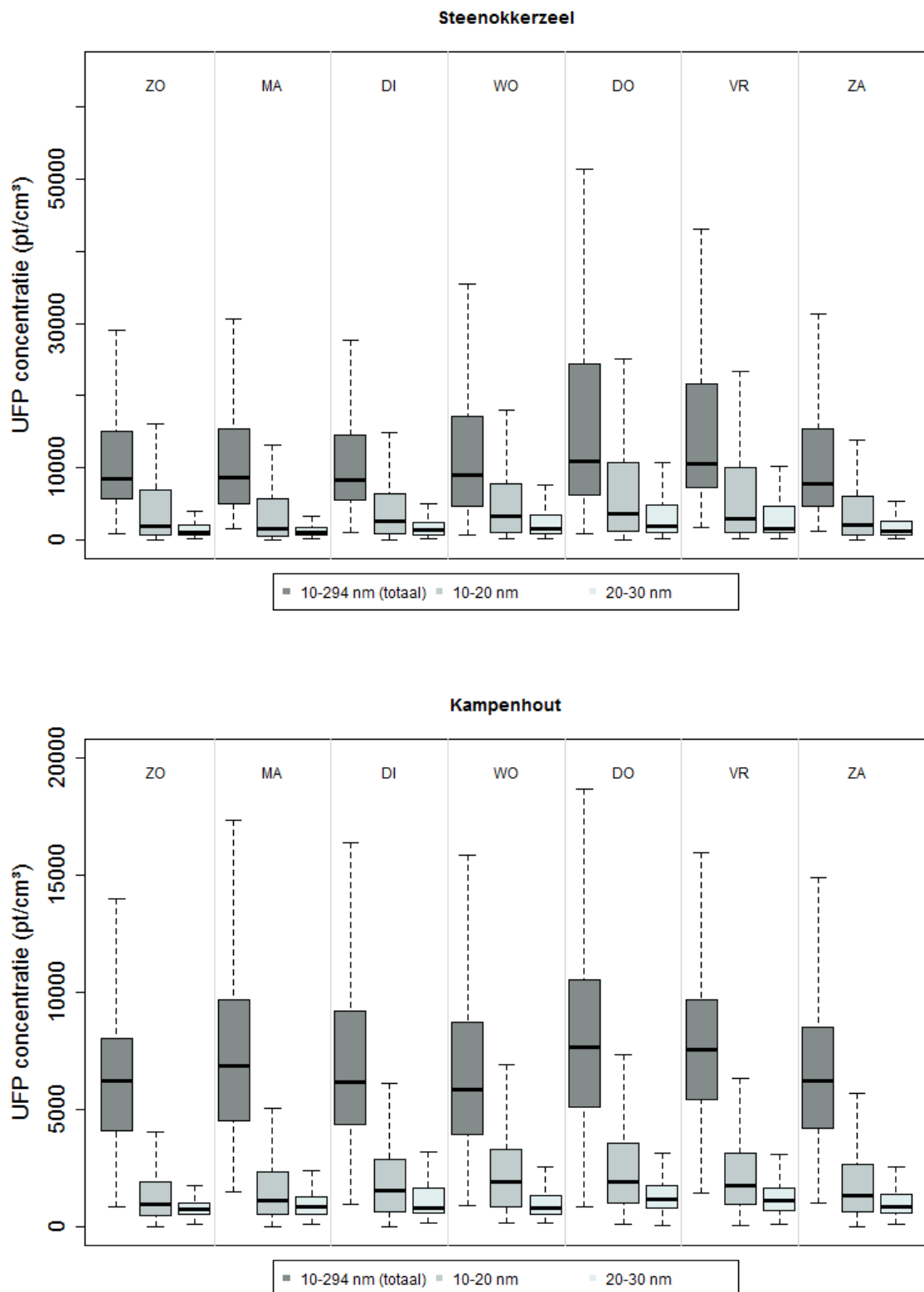


Figuur 26: Overzicht van het aantal vluchten per dag opgedeeld per weekdag.

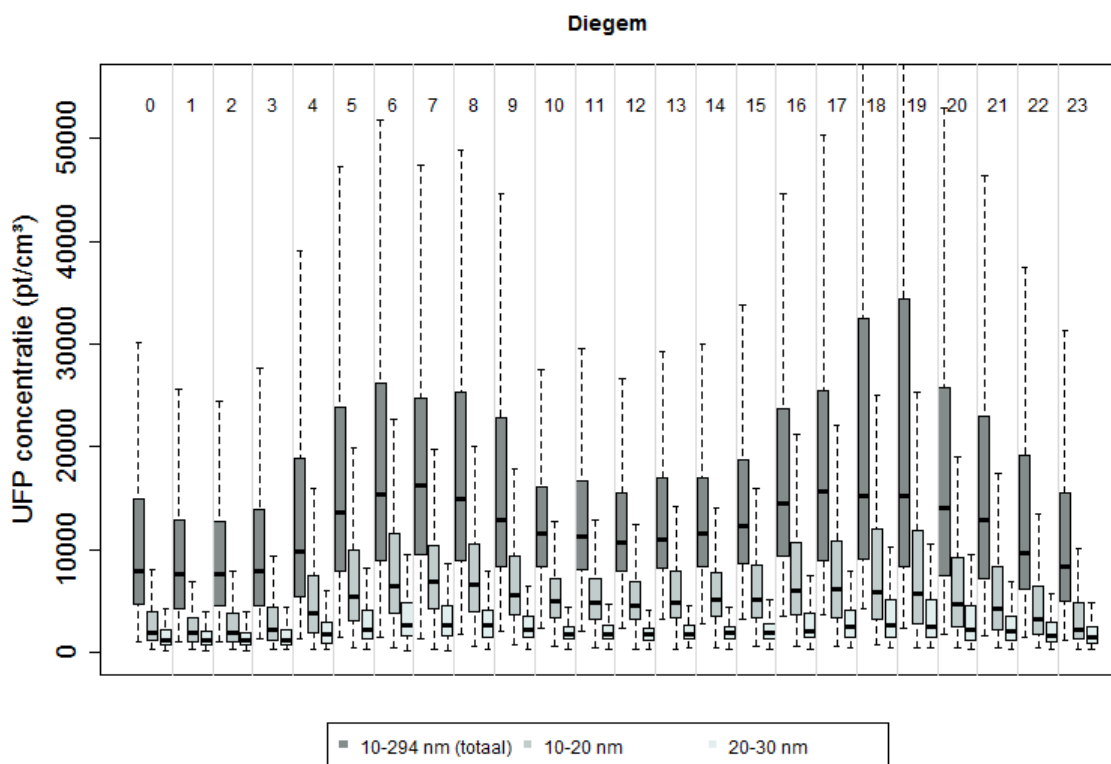
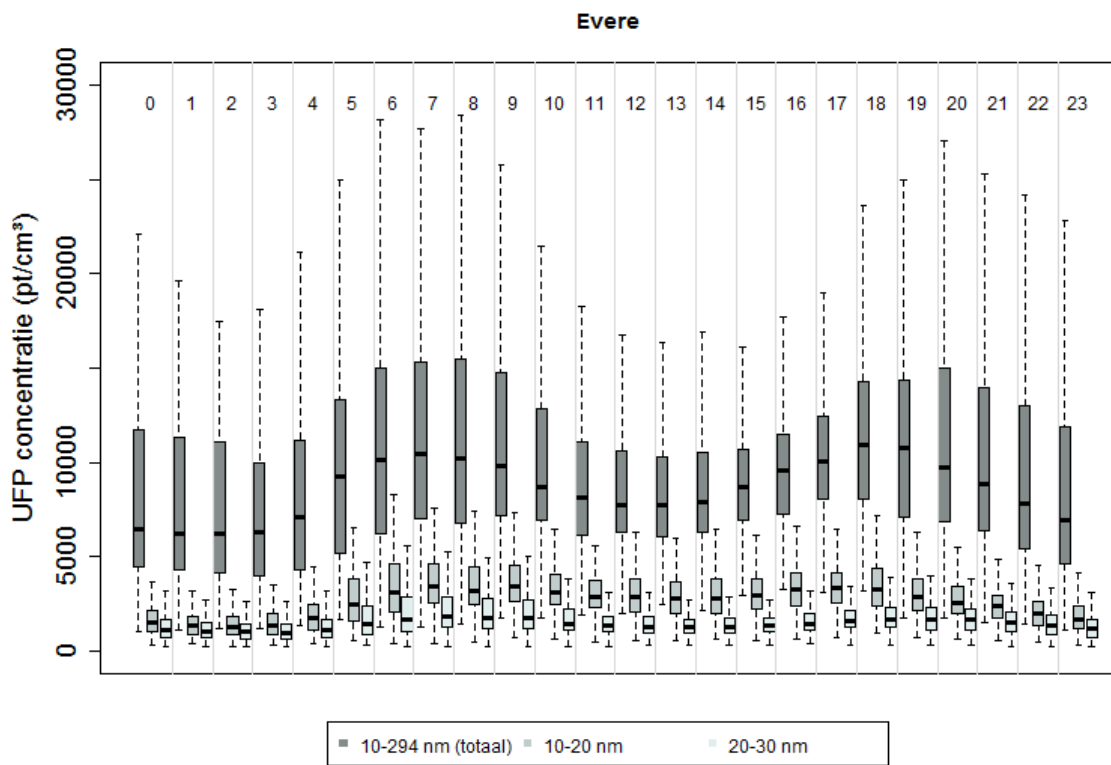
De UFP-concentratie vertoont geen significante verschillen tussen de dagen van de week voor de verschillende deeltjesklassen en locaties (Figuur 27). De hoogste concentraties worden gemeten op maandag, donderdag en vrijdag. De UFP-concentratie tijdens het weekend en op woensdag zijn vergelijkbaar. Er is geen duidelijk onderscheid tussen weekdag en weekend. Een deel van de variatie wordt veroorzaakt door verschillen in windcondities (zie Bijlage D).

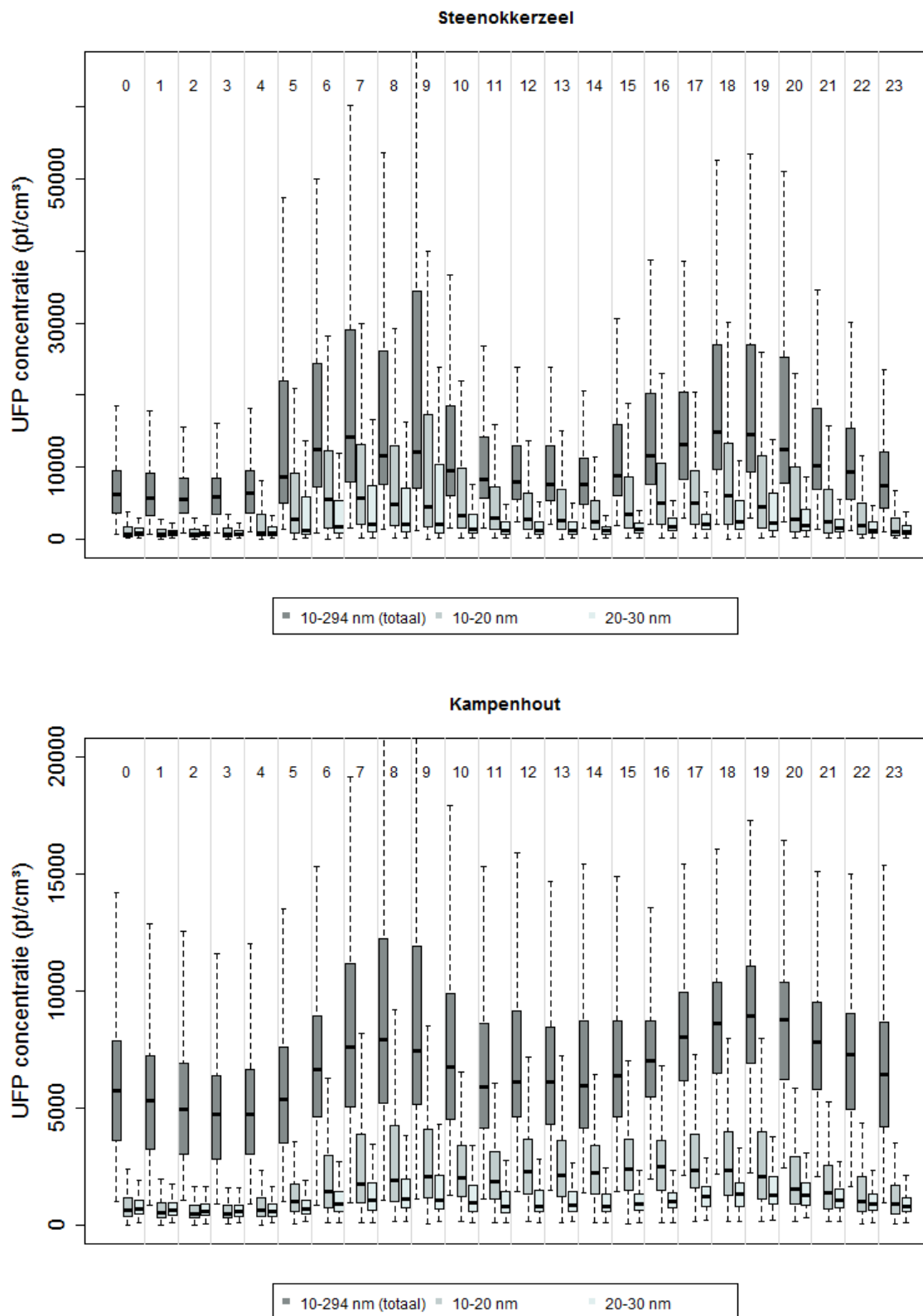
De totale UFP-concentratie (10 – 294 nm) in functie van het uur van de dag vertoont een bimodaal patroon (Figuur 28) met een eerste piek tussen 6 en 10 u en een tweede piek tussen 16 en 20 u. Ook voor de kleinste deeltjesklasse 10-20 nm die geassocieerd wordt met vliegtuigemissies wordt een bimodaal concentratiepatroon waargenomen. Een vergelijkbaar patroon wordt teruggevonden in hoge-resolutie PM-meetreeksen op verkeerslocaties door ochtend- en avondspits. Ook de vluchtgegevens van de luchthaven van Zaventem vertonen een bimodaal patroon (Figuur 29). Op basis van deze analyse kan niet tussen bronnen (wegverkeer of luchtvaart) gediscrimineerd worden.



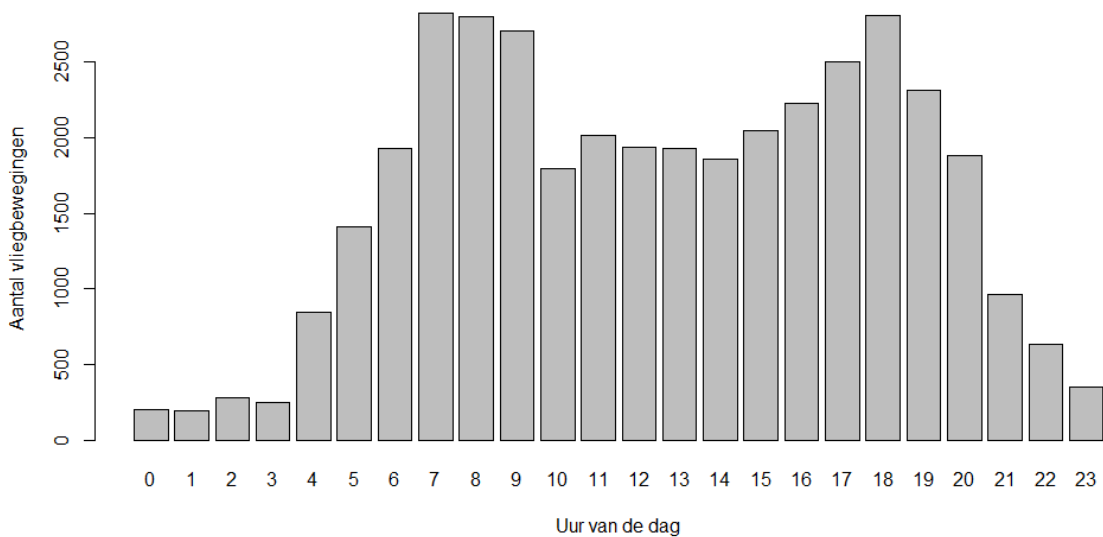


Figuur 27: Boxplots van de UFP-concentratie voor drie deeltjesklassen (10-294 nm, 10-20 nm, 20-30 nm) op de vier meetlocaties.





Figuur 28: Uurlijkse variatie van de UFP-concentratie voor drie deeltjesgrootteklassen op de vier meetlocaties.

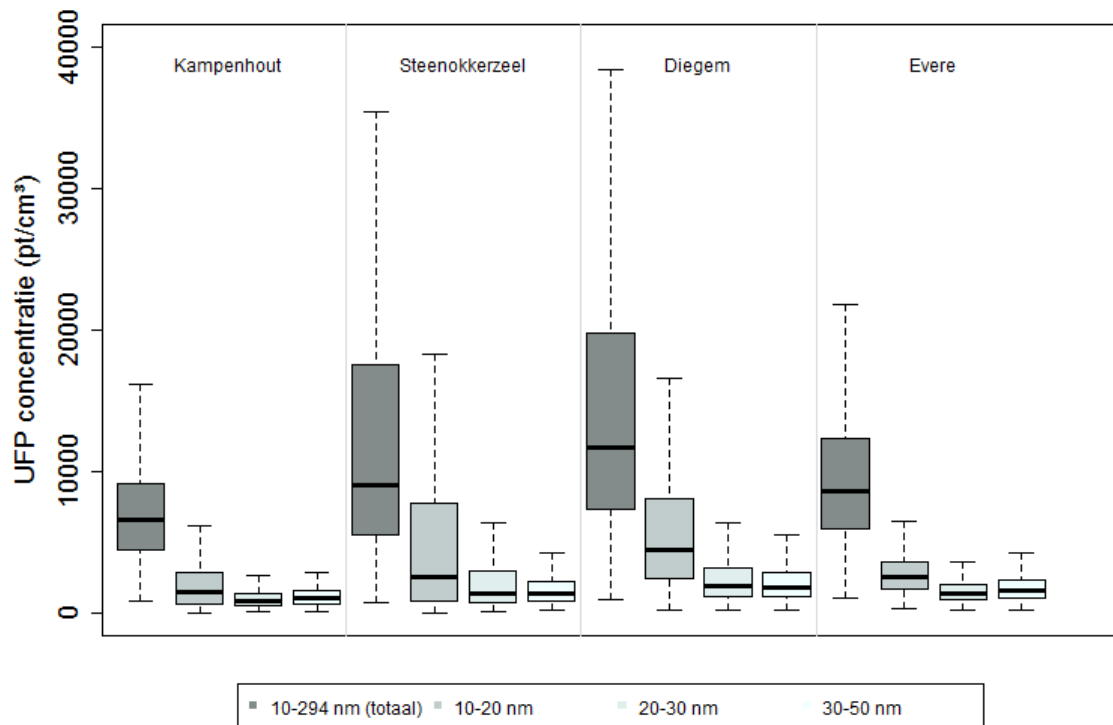


Figuur 29: Histogram van het aantal vliegbeweging per uur van de dag op de luchthaven van Zaventem.

6.2. VARIATIE VAN DE UFP-CONCENTRATIE TUSSEN MEETLOCATIES

De situering van een meetlocatie t.o.v. belangrijke bronnen (afstand windafwaarts) is bepalend voor de waargenomen concentraties. De meetlocaties bevinden zich langs een ZW-NO transect – volgens overheersende windrichting – op verschillende afstand van verkeer en luchthaven. Meetlocatie KM02 is een landelijke meetlocatie, meetlocaties EE01, MC03 en SZ04 stedelijke stations. MC03 (Diegem) bevindt zich op korte afstand (200 m) van enkele zeer drukke verkeersassen.

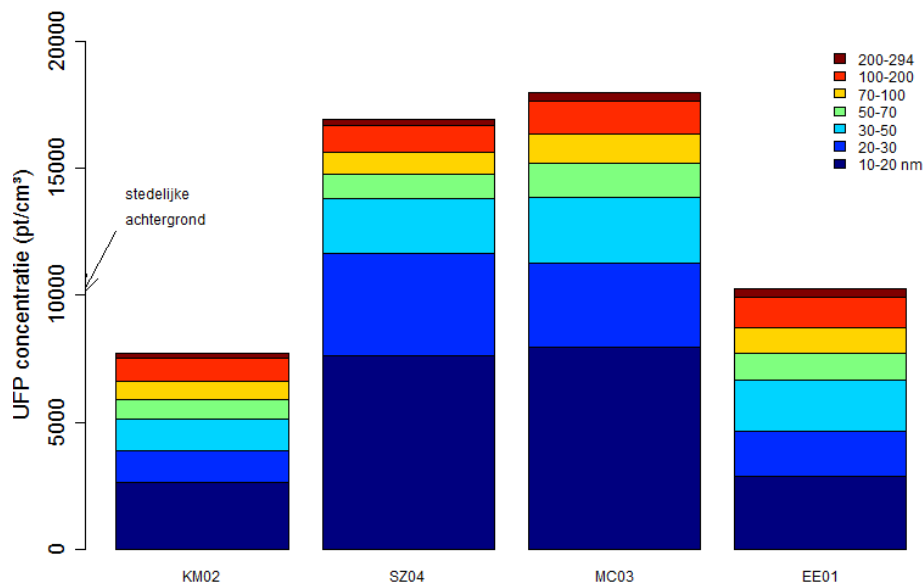
Er zijn grote verschillen in UFP-concentratie tussen de meetlocaties (Figuur 30). De hoogste totale UFP-concentratie (10-294 nm) wordt waargenomen in Diegem en Steenokkerzeel, gevolgd door Evere en Kampenhout. Het concentratieberiek van de boxplots is veel groter in Steenokkerzeel en Diegem in vergelijking met Evere en Kampenhout. Dit wijst op een sterke variabiliteit in de UFP-concentratie. Ook voor de kleinste deeltjesfractie van 10-20 nm wordt dit waargenomen. In Diegem is de achtergrondconcentratie (bv. P25, ondergrens van de boxplot) hoger dan op de andere locaties. De hoge piekconcentraties (bv. P75, bovenkant van boxplots) liggen in Diegem en Steenokkerzeel in dezelfde grootte-orde. In Evere is de achtergrondconcentratie iets hoger dan in Steenokkerzeel, maar zijn piekconcentraties veel minder hoog/frequent. Voor UFP 20-30 nm en 30-50 nm is de concentratie in Diegem en Evere wat hoger dan in Steenokkerzeel.



Figuur 30: Boxplot van UFP-concentratie op de vier meetlocaties.

Het aandeel (absoluut) van de verschillende deeltjesgroottes in de totale UFP-concentratie (gemiddelde over heel de meetperiode) op de vier meetlocaties is significant verschillend (Figuur 31 en

Tabel 14). De kleinste deeltjesfractie is de overheersende UFP-fractie in Steenokkerzeel (45%) en in Diegem (45%) in vergelijking met de meetlocaties verder van de luchthaven, Kampenhout (35%) en Evere (28%). De concentratie van de grotere UFP-classes is gelijkaardig of hoger in Diegem dan in Steenokkerzeel, en ook in Evere is de concentratie van de deeltjes > 30 nm vergelijkbaar. In Kampenhout is de concentratie voor elke deeltjesklasse het laagst.



Figuur 31: Gemiddelde UFP-concentratie voor de verschillende deeltjesgrootteklassen. Een inschatting van de stedelijke achtergrondconcentratie (10 000 pt/cm³) is opgegeven.

6.3. UFP-CONCENTRATIE IN FUNCTIE VAN METEOROLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN

6.3.1. UFP-POLLUTIEROZEN

Voor de opmaak van de UFP-pollutierozen werden meteorologische gegevens van Zaventem gekoppeld aan de UFP-metingen. De meetfrequentie van de meteorologische gegevens is uurlijks, de UFP-concentratie werd elke 5 minuten gemeten. Er werd voor geopteerd om alle UFP-metingen te behouden en aan de verschillende (12) UFP-metingen per uur de uurgemiddelde meteorologische gegevens te koppelen (de gebruikte meteodata variëren dus van uur tot uur, hoewel deze in werkelijkheid ook binnen een periode van een uur kunnen veranderen).

Er worden twee types van pollutierozen opgemaakt:

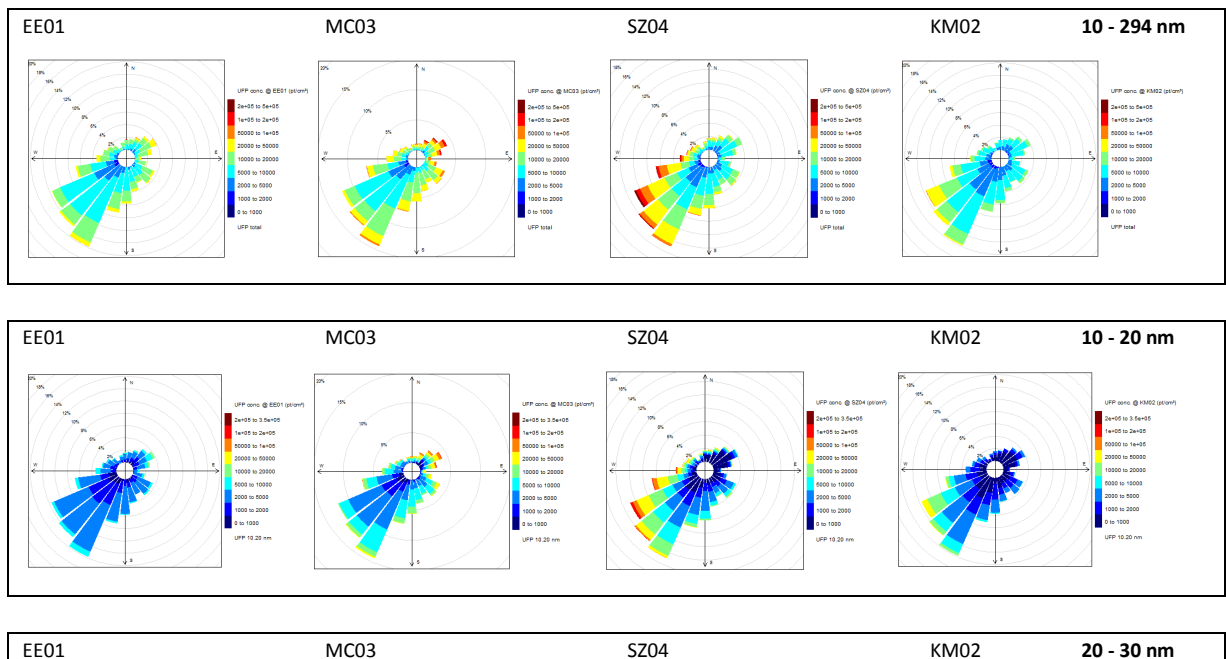
- (1) Pollutierozen waar de verschillende windrichtingklasse (15°) ingekleurd zijn proportioneel met de UFP-concentratie;
- (2) Polair percentielplot van de gemiddelde en verschillende percentielwaardes van de UFP-concentratie per deeltjesklasse.

De hoogste totale UFP-concentraties (10 – 294 nm) (Figuur 32) worden gemeten wanneer de meetlocatie zich windafwaarts van de luchthaven bevindt, d.i. voor Steenokkerzeel (SZ04) bij ZW-wind en voor Diegem (MC02) bij NO-wind. Ook op de meetlocaties verder van de luchthaven is de totale UFP-concentratie verhoogd in de richting van de luchthaven (NO op meetlocatie Evere, ZW op meetlocatie Kampenhout), maar de absolute waarden zijn hier veel minder hoog dan deze op de meetposten nabij de luchthaven.

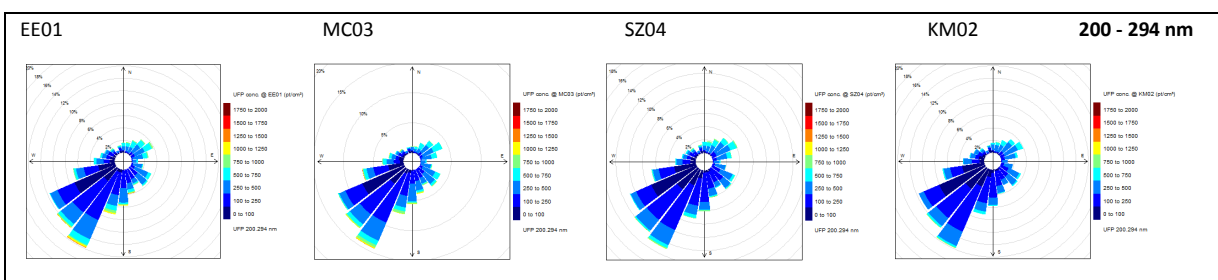
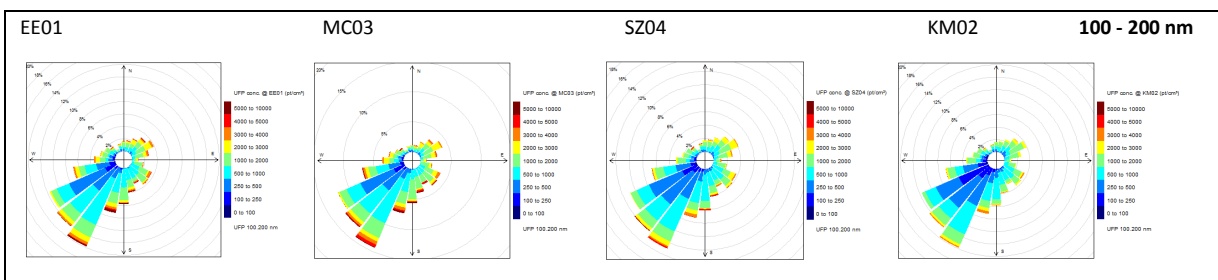
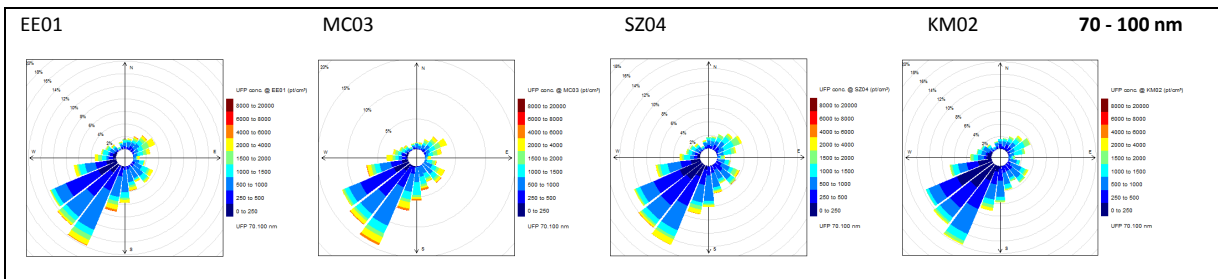
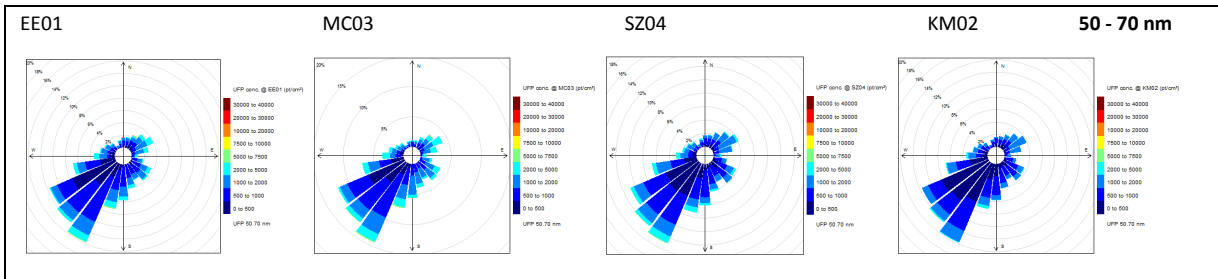
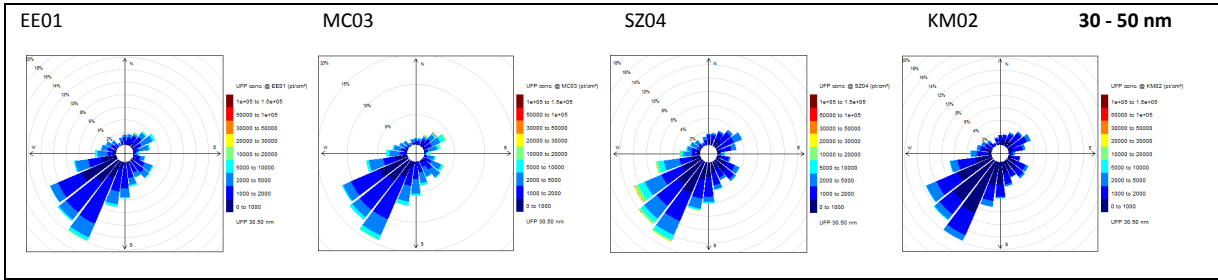
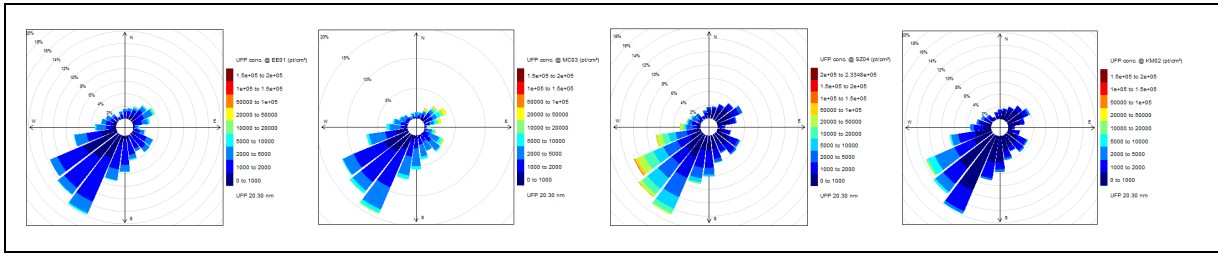
Voor de 10-20 nm deeltjesgrootte worden verhoogde concentraties gemeten in de richting van de luchthaven op alle meetlocaties. Zowel in Steenokkerzeel als in Diegem kan de concentratie hoog oplopen wanneer de meetlocatie zich windafwaarts van de luchthaven bevindt. Het aandeel van piekconcentraties > 50 000 pt/cm³ op momenten wanneer de meetlocatie windafwaarts gelegen is van de luchthaven bedraagt rond de 11% in Diegem en rond de 6% in Steenokkerzeel. In Steenokkerzeel worden dus op 6% van de tijd wanneer zich ZW-wind voordoet concentraties hoger dan 50 000 pt/cm³ gemeten, in Diegem worden op 11% van de tijd dat NO-wind voorkwam concentraties van > 50 000 pt/cm³ gemeten in de kleinste deeltjesklasse. NO-wind was minder frequent tijdens de meetperiode (zie Figuur 23). In Evere noch in Kampenhout worden concentraties boven de 50 000 pt/cm³ waargenomen bij windafwaartse condities. In Kampenhout, op ongeveer 7 km van de luchthaven, worden wel nog verhoogde UFP-concentraties gemeten vanuit de richting van de luchthaven (> 20 000 pt/cm³).

Ook voor de 20-30 nm deeltjesklasse worden de hoogste waarden waargenomen in Steenokkerzeel bij ZW-wind en Diegem bij NO-wind. De concentratie 20-30 nm is significant lager dan de 10-20 nm concentratie.

Voor de grotere diameterklassen (vanaf 70 nm) worden verschillende patronen waargenomen dan bij de kleine diameterklassen. De concentraties in Evere zijn voor deze grotere klassen vergelijkbaar met deze in Diegem en Steenokkerzeel. De pollutierozen zijn ook minder directioneel, i.e. piekconcentraties komen voor bij wind uit verschillende richtingen.

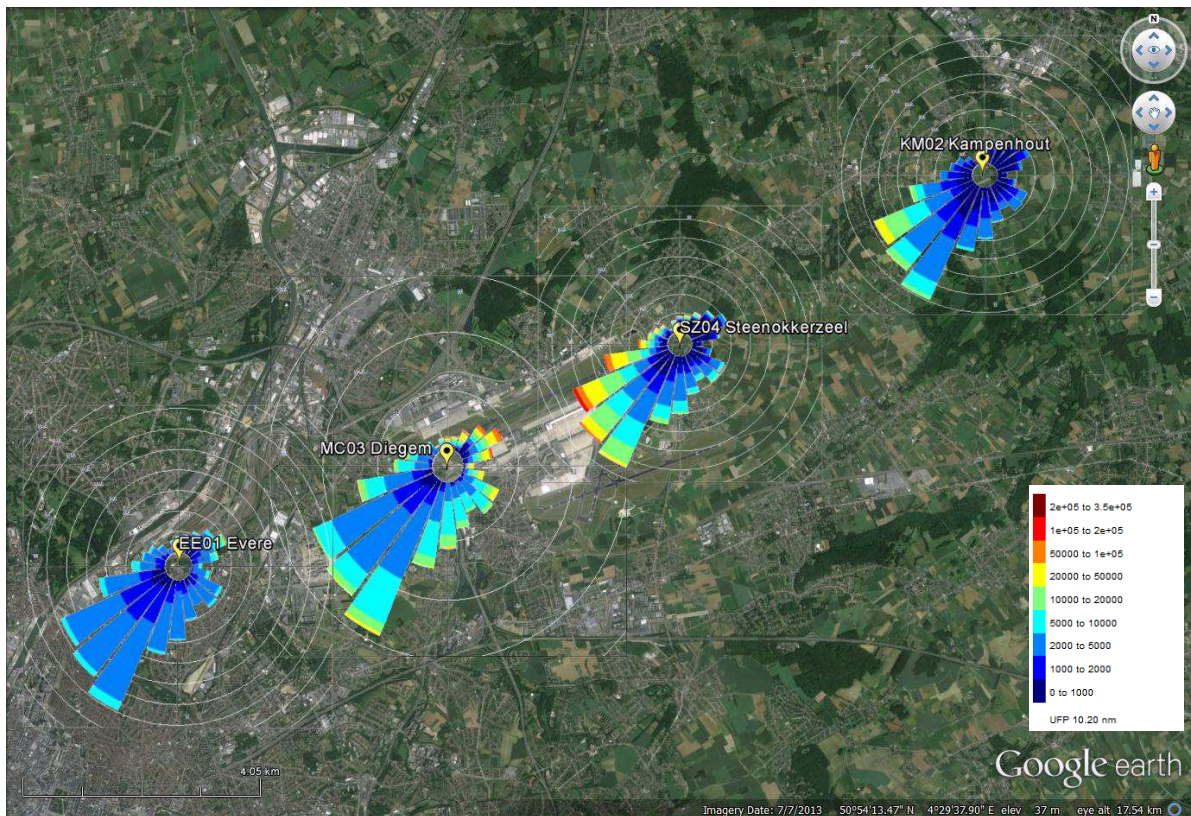


HOOFDSTUK 6 Interpretatie van de metingen



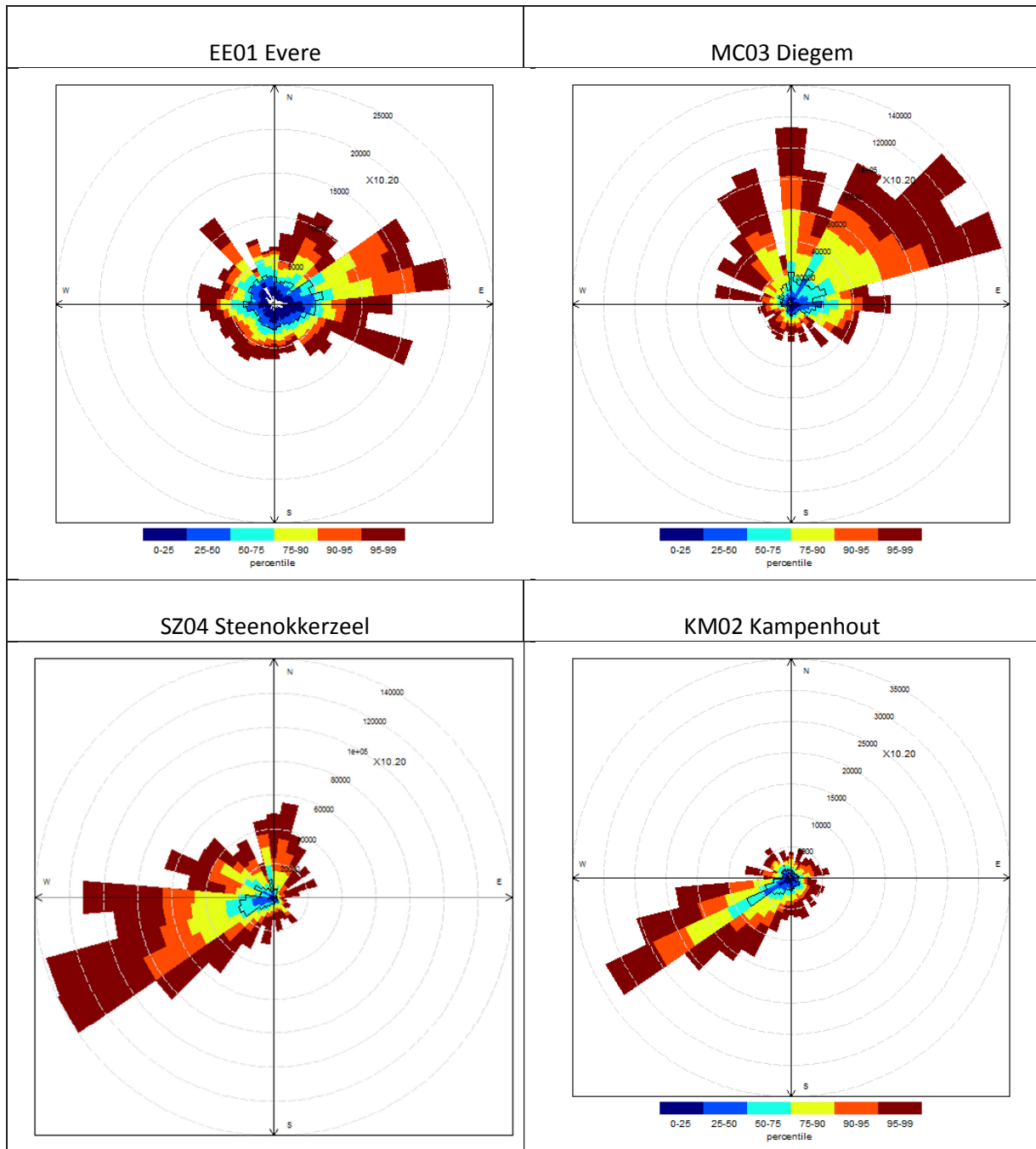
Figuur 32: Pollutierozen van de UFP-concentratie in verschillende deeltjesgrootteklassen en meetlocaties. De schaal verschilt tussen de verschillende rijen (deeltjesgroottes).

De pollutierozen van de kleinste deeltjesklasse (10-20 nm) langsheen het ZW-NO transect (Figuur 33) geven de verhoogde concentraties weer wanneer de meetlocaties windafwaarts van de luchthaven gelegen zijn. In Diegem is er eveneens een (beperkte) bijdrage vanuit Z-ZW.



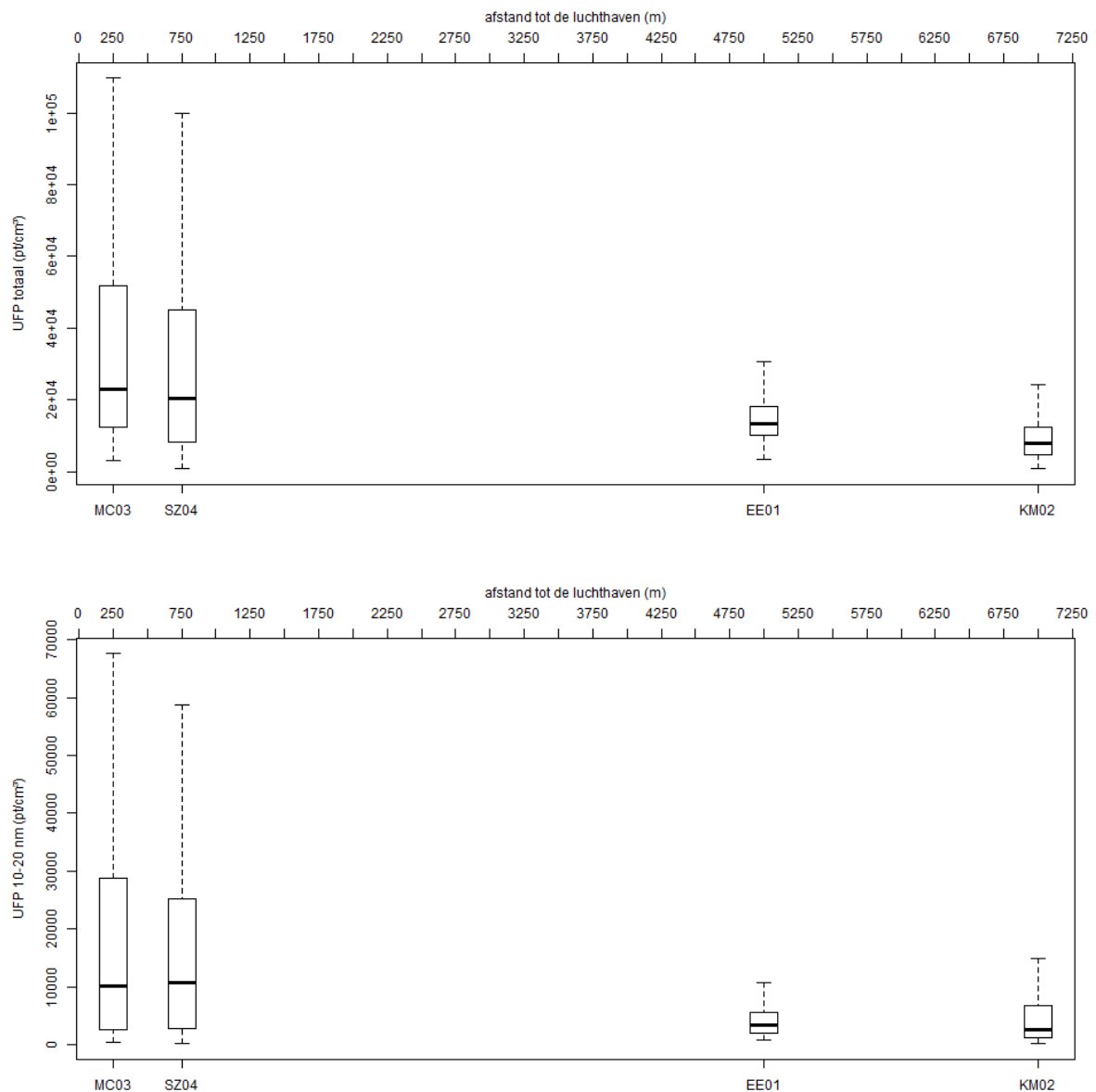
Figuur 33: UFP 10-20 nm pollutierozen langsheen het ZW-NO transect.

De percentielplots (Figuur 34) geven de hoogste piekconcentraties weer in de richting van de luchthaven, ook voor de meetlocaties Evere en Kampenhout op grotere afstand van de luchthaven. De hoogste concentraties worden waargenomen wanneer de meetlocatie windafwaarts van de luchthaven gelegen is (windsegment 235-275° voor SZ04 en KM02, en windsegment 55-75° voor MC03 en EE01).



Figuur 34: Polaire percentielplots voor de UFP-concentratie van de 10-20 nm klasse voor de vier meetlocaties geven de percentielconcentratie (P25, P50, P75, P90, P95 en P99) in functie van de windrichting. De gemiddelde UFP-concentratie is als zwarte lijn weergegeven. De UFP-concentratie is weergegeven op de concentrische cirkels.

De afname in UFP-concentratie (totaal en 10-20 nm) in functie van de afstand tot de luchthaven op momenten dat de meetpost windafwaards gelegen is, is gegeven in Figuur 35.



Figuur 35: Boxplots van de UFP-concentratie in functie van de afstand tot de luchthaven op momenten dat de meetpost windafwaarts gelegen is van de luchthaven (voor UFP-totaal boven, en voor 10-20 nm klasse onder).

Om de nettobijdrage van de luchthaven aan de UFP-concentratie (10-20 nm) te kwantificeren is een additief model gebruikt dat veronderstelt dat de UFP-concentratie op een windafwaartse meetlocatie de resultante is van de bijdrage van de luchthaven en een bijdrage van andere windopwaartse bronnen. De bijdrage uit andere windopwaartse bronnen wordt gemeten op een windopwaartse meetlocatie nabij de luchthaven. Dit model is een vereenvoudiging van de werkelijkheid aangezien dit veronderstelt dat deeltjes die we windopwaarts meten allemaal getransporteerd worden tot aan de windafwaartse meetlocatie. In werkelijkheid kunnen deeltjes echter groeien, impacteren, sedimenteren, etc. waardoor ze de windafwaartse meetlocatie niet of niet in dezelfde vorm bereiken. De grootste fout die toepassing van dit model

impliceert is dat er geen bijdrage wordt verondersteld van de luchthavenactiviteit wanneer een meetlocatie windopwaarts gelegen is. Bij vertrek is er echter wel een bijdrage te verwachten op de windopwaartse meetlocatie omdat opstijgende vliegtuigen op geringe hoogte nabij het windopwaartse meetstation passeren. Dit is zeker het geval in Diegem waar de meetopstelling zich op 250 m van de landings/vertrekbaan bevindt. Hierdoor is er een overcompensatie van de windafwaartse meetgegevens, zeker in Steenokkerzeel.

Voor de verder afgelegen meetlocaties (EE01 en KM02) wordt dezelfde methodologie toegepast om de bijdrage van de luchthaven in te schatten. Hier is zeker sprake van overcompensatie omdat de windopwaardse meetplaats zich veel dichterbij de luchthaven bevindt. Daarom wordt enkel naar de hoogste percentielwaardes gekeken (P90 en P95). Voor de lagere percentielen wordt verondersteld dat er geen significante bijdrage is van de luchthaven.

Tabel 15: Windafwaartse bijdrage van de luchthaven aan de UFP-concentratie (10-20 nm) in de omgeving van de luchthaven.

windrichting	ZW (235-275°) (n = 3252)	NO (55-75°) (n = 912)	ZW (235-275°) (n = 3252)	NO (55-75°) (n = 912)
	SZ04 UFP-bijdrage luchthaven (10-20 nm, pt/cm ³)	MC03 UFP-bijdrage luchthaven (10- 20 nm, pt/cm ³)	KM02 UFP-bijdrage luchthaven (10- 20 nm, pt/cm ³)	EE01 UFP-bijdrage luchthaven (10- 20 nm, pt/cm ³)
1 ^{ste} kwartiel	-207*	2 014	-	-
Mediaan	6 465	8 999	-	-
Gemiddelde	15 440	20 560	-	-
3 ^{de} kwartiel	20 380	27 960	-	-
P90	44 626	58 345	5 240	1 548
P95	66 206	81 776	9 353	4 306
Maximum	255 200	275 900	36 670	19 380

* Negatieve waarde: zie boven voor verklaring

Op piekmomenten (3^{de} kwartiel bij windafwaartse condities, dit is de ondergrens van de 25% hoogste metingen bij windafwaartse condities) wordt de bijdrage van de luchthaven geschat op 20 000 tot 28 000 pt/cm³ (Tabel 15) op nabijgelegen meetlocaties. Gedurende 10% van de tijd is de bijdrage van de luchthaven hoger dan 44 000 – 58 000 pt/cm³, en gedurende 5% van de tijd is de bijdrage 66 000 tot 82 000 pt/cm³. De maximale bijdrage schommelt tussen de 255 000 en 275 000 pt/cm³.

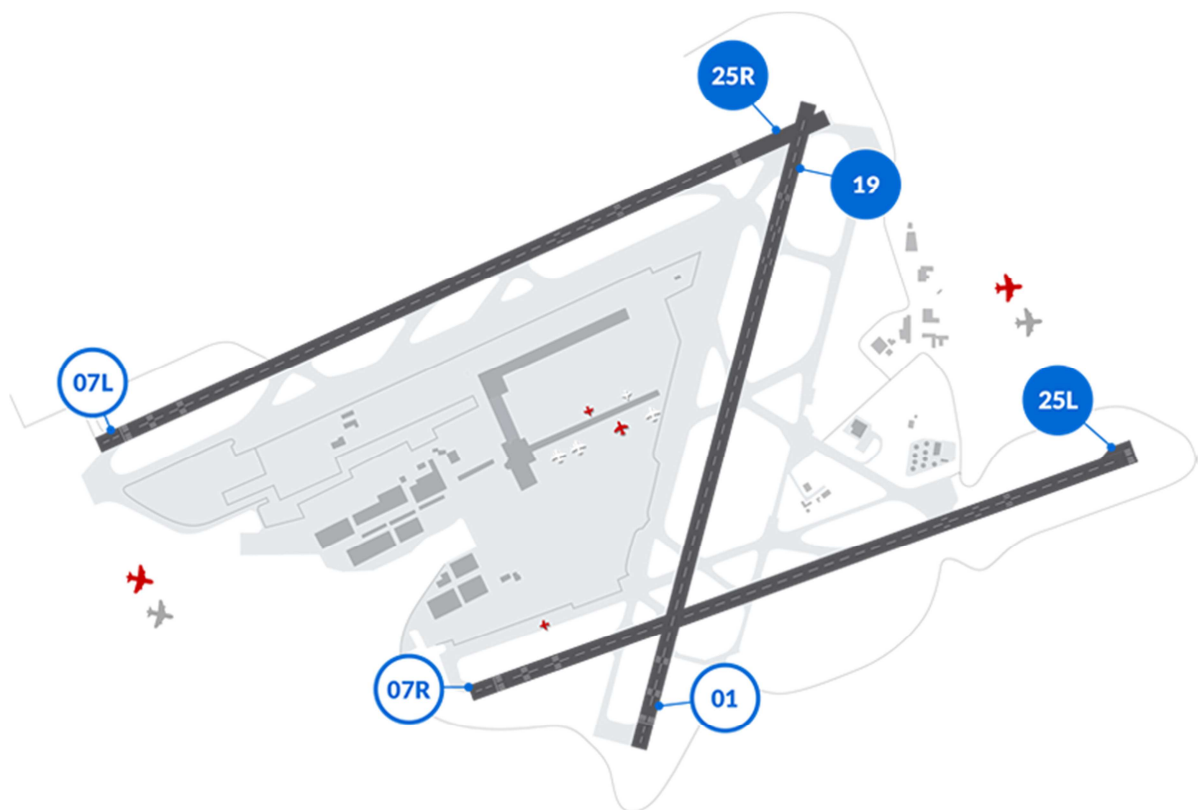
6.4. UFP-CONCENTRATIE IN FUNCTIE VAN LUCHTHAVENACTIVITEIT

6.4.1. GEBRUIK VAN LANDINGS- EN STARTBANEN

Brussels Airport beschikt over drie banen die in beide richtingen gebruikt kunnen worden (Figuur 36, bron <http://www.batc.be>). Hun benaming is afgeleid van de richting waarin een piloot de luchthaven benadert (bv. 250°), zonder de laatste 0 (25). R(echts) of L(inks) wordt ook bepaald vanuit het standpunt van het aankomend vliegtuig. De start/landingsbaan 01/19 kruist de parallelle start/landingsbanen 25R/07L en 25L/07R. De meetlocaties EE01, MC03, SZ04 en KM02 bevinden

zich in het verlengde van start/landingsbaan 25R/07L. Landende vliegtuigen op 25R passeren boven KM02 en SZ04, opstijgende vliegtuigen op 25R passeren in de buurt van MC03 en EE01. Voor 07L is dat net omgekeerd: landende vliegtuigen gaan over EE01 en MC03, opstijgende vliegtuigen over SZ04 en KM02.

Het gebruik van vertrek- en landingsbanen is gebaseerd op verschillende parameters, o.a. windrichting. Het gebruik van een bepaalde combinatie heeft ook implicaties op de capaciteit. De hoogste capaciteit wordt gehaald wanneer de banen 25R en 25L parallel gebruikt worden (voorkeursscenario). De combinatie met de tweede hoogste capaciteit is het parallel gebruik van 07 en 01. Deze combinatie wordt gebruikt bij wind uit NO. Bij sterke oostenwind wordt overdag baan 07R gebruikt voor vertrek en 07L voor aankomst, 's nachts wordt 07L gebruikt voor vertrek en 07R voor aankomst. Bij sterke zuidenwind wordt baan 19 gebruikt voor aankomst en vertrek.



Figuur 36: Overzicht start/landingsbanen Brussels Airport.

De maandelijkse vliegbewegingen zijn gegeven voor dag (6 am – 11 pm) en nacht (11 pm – 6 am) afzonderlijk (

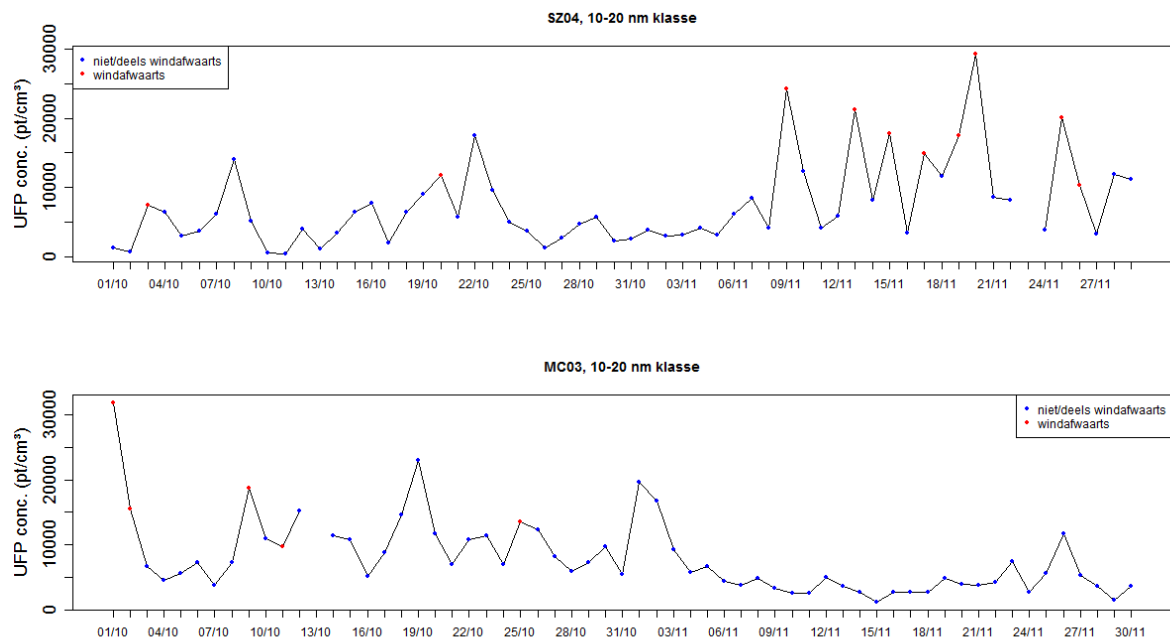
Tabel 16). Het aantal landingen op 25R in oktober en november 2015 (meetperiode) lag in dezelfde grootteorde als voor de andere maanden in 2015 uitgezonderd de zomermaanden juni, juli en augustus wanneer er meer vliegtuigen landen op 25R. Het aantal opstijgende vliegtuigen vanop 25R was vergelijkbaar tijdens de maanden van de meetcampagne met de andere maanden, met uitzondering van juni en juli 2015 wanneer er minder vliegtuigen opstegen via 25R. Het aantal bewegingen op 07L is beduidend lager dan op 25R voornamelijk door de meteorologische omstandigheden (windrichting).

Tabel 16: Overzicht maandelijkse vertrek- en landingsbewegingen op de verschillende runways (data bron www.batc.be).

DAG	25R		07L		25L		07R		19		01	
	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen
jan/15	7347	2382	17	112	1	4739	432	0	326	246	3	316
feb/15	6760	2013	101	25	1	4539	1036	9	83	71	1	1041
mrt/15	7586	2214	138	195	7	5047	1276	2	122	72	26	1229
apr/15	6615	1896	134	113	6	4384	2944	1	87	1	1	2790
mei/15	8691	2729	69	120	1	4936	962	0	487	865	0	828
jun/15	2947	6952	397	400	0	2	0	0	4810	201	2522	2451
jul/15	3643	8497	259	547	0	0	0	0	6071	7	767	805
aug/15	8635	4657	605	961	0	3331	474	1	330	184	19	130
sep/15	7825	2215	108	144	4	5169	2421	5	217	133	4	2223
okt/15	7688	2276	207	103	4	5063	2103	116	99	17	3	1985
nov/15	8726	2814	1	0	0	5703	0	0	165	25	38	56
dec/15	8166	2619	0	0	3	5357	0	0	166	79	0	0

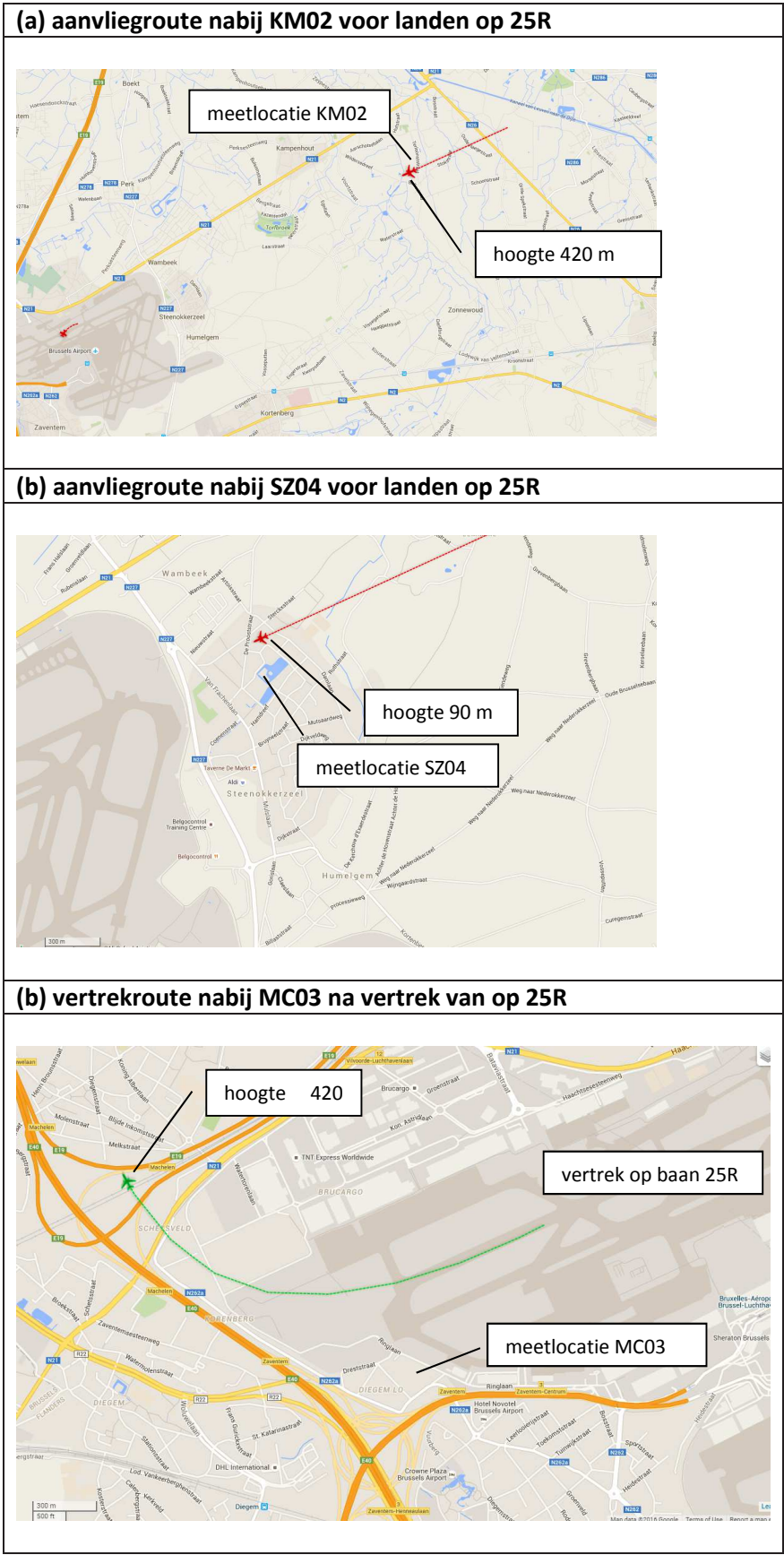
NACHT	25R		07L		25L		07R		19		01	
	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen	opstijgen	landen
jan/15	249	431	0	0	12	183	0	0	99	73	0	1
feb/15	200	316	36	0	5	172	5	0	98	75	0	73
mrt/15	237	451	8	0	6	178	6	0	97	29	0	76
apr/15	197	462	82	0	6	258	0	249	85	10	19	29
mei/15	270	628	15	0	9	321	6	24	137	143	0	40
jun/15	231	775	88	0	0	0	0	0	143	110	27	285
jul/15	234	1077	27	50	0	0	0	0	226	183	9	49
aug/15	353	978	24	41	3	98	2	31	53	52	9	70
sep/15	218	487	64	0	5	310	24	2	159	141	0	209
okt/15	219	459	59	3	10	250	14	0	119	65	1	200
nov/15	257	458	0	0	9	218	0	0	114	34	0	0
dec/15	234	407	0	0	11	199	0	0	151	77	0	0

Het geleverde vermogen van de vliegtuigmotor is verschillend bij take-off (ca. 100% vermogen), klimmen (climb-out, 85%), landen (approach, ca. 30% vermogen), vliegen op kruishoogte (idle, 7%) of manoeuvreren op de luchthaven. Het hoogste vermogen wordt geleverd bij vertrek (horizontale acceleratie op de startbaan) en het opstijgen. In de databank van vliegtuigmotoren van het ICAO wordt onderscheid gemaakt tussen take-off, climb-out, approach en idle condities, en ook in het EPA rapport (Kinsey., 2009) wordt deze opsplitsing gemaakt. De brandstofconsumptie en emissies zijn het hoogst bij take-off en climb-out. Bij take-off vanop baan 25R worden de emissies uitgestoten in de richting van de meetlocatie Steenokkerzeel gelegen in het verlengde van de startpositie van het vliegtuig. Bij take-off vanop baan 07L ligt de meetlocatie Diegem schuin in het verlengde van de startpositie voor opstijgen vanop baan 07L.



Figuur 37: Daggemiddelde UFP-concentratie van de 10-20 nm deeltjesklasse in Steenokkerzeel (SZ04) en Diegem (MC03). Daggemiddeldes zijn ingekleurd volgens overheersende windrichting: rood = meetstation windafwaarts van de luchthaven, blauw = meetstation windopwaarts van de luchthaven.

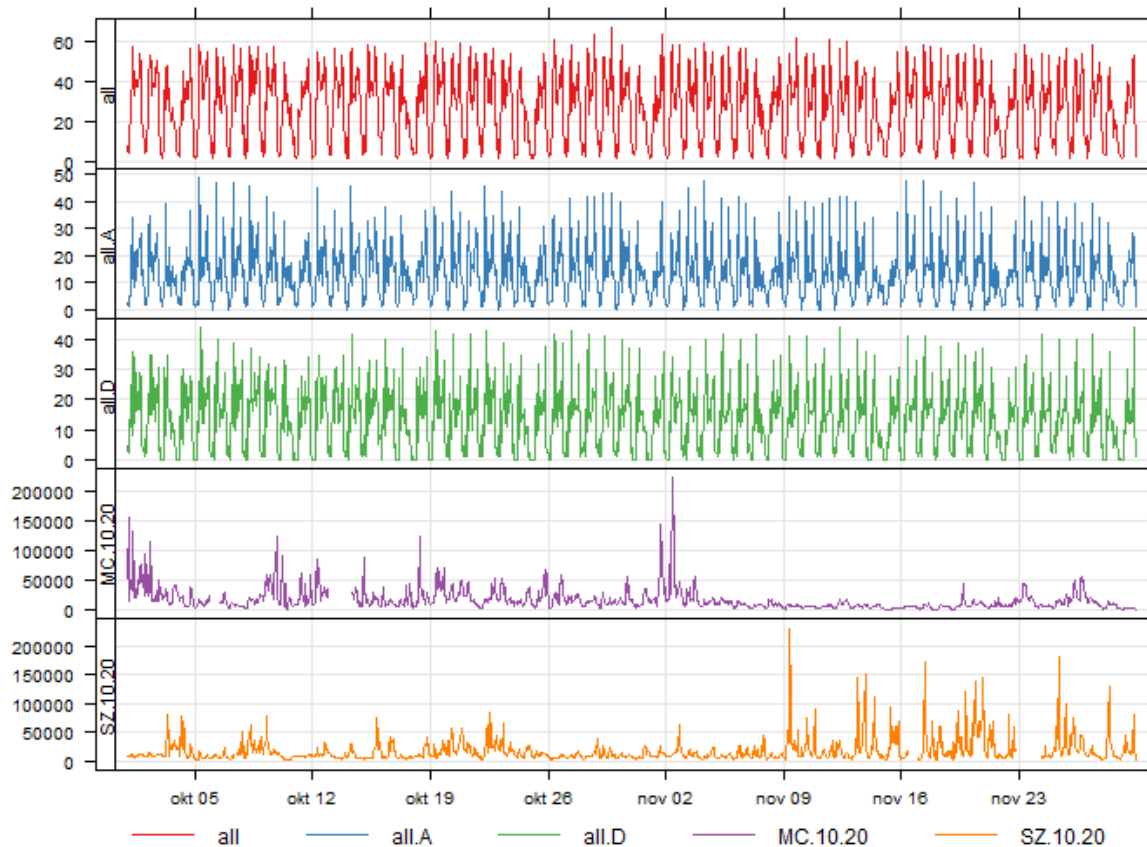
De hoogte waarop een vliegtuig zich bevindt bij landen of vertrek wanneer het (schuin) over een meetlocatie passeert is afhankelijk van het type vliegtuig. Volgende gegevens zijn approximatief op basis van real-time vluchtinformatie (www.batc.be). Wanneer een vliegtuig de luchthaven nadert voor landing op 25R dan passeert het op ongeveer 400 m hoogte (zijdelings) boven de meetlocatie Kampenhout (KM02) en op ongeveer 100 m hoogte boven de meetlocatie Steenokkerzeel (SZ04). Bij vertrek vanop 25R bevindt de startpositie van het vliegtuig zich op ongeveer 750 m horizontale afstand in vogelvlucht van de meetlocatie Steenokkerzeel (SZ04). Nabij het einde van de startbaan 25R bevindt zich meetlocatie Diegem. Opstijgende vliegtuigen passeren op ongeveer 200 m hoogte (schuin) boven de meetlocatie Diegem. Veel vliegtuigen hebben al een bocht ingezet vlak na take-off en passeren op grotere afstand van de meetlocatie Diegem (zie bv. Figuur 38). Bij aankomst op baan 07L bevindt het vliegtuig zich op geringere hoogte nabij de meetlocatie MC03. Bij opstijgen vanop 07L bevindt het vliegtuig zich op 650 m boven de meetlocatie SZ04 en 1 200 - 1 700 m boven de meetlocatie KM02. Veel vluchten zijn al afgebogen tussen meetlocaties SZ04 en KM02.



Figuur 38: Opstijgende vlucht vanop baan 25R (bron www.batc.be)

Data over vliegbewegingen werden aangeleverd door LNE (Luchthaven Brussel-Nationaal: vluchten en radargegevens (Belgocontrol / BAC), verwerkt door LNE). De vluchtgegevens zijn gebaseerd op de *.RWY bestanden die dagelijks aangeleverd worden door Belgocontrol (CANAC). Hierin zijn geen helikoptervluchten en niet-commerciële bewegingen (bv. militaire vluchten,...) opgenomen.

De vluchtgegevens werden geaggregeerd tot op uurlijks niveau (aantal bewegingen totaal en per runway) (Figuur 39). Het dag-nachtpatroon is duidelijk zichtbaar in de vluchtgegevens. Het aantal vluchten is ook lager op zaterdag en - in mindere mate - op zondag in vergelijking met weekdays.

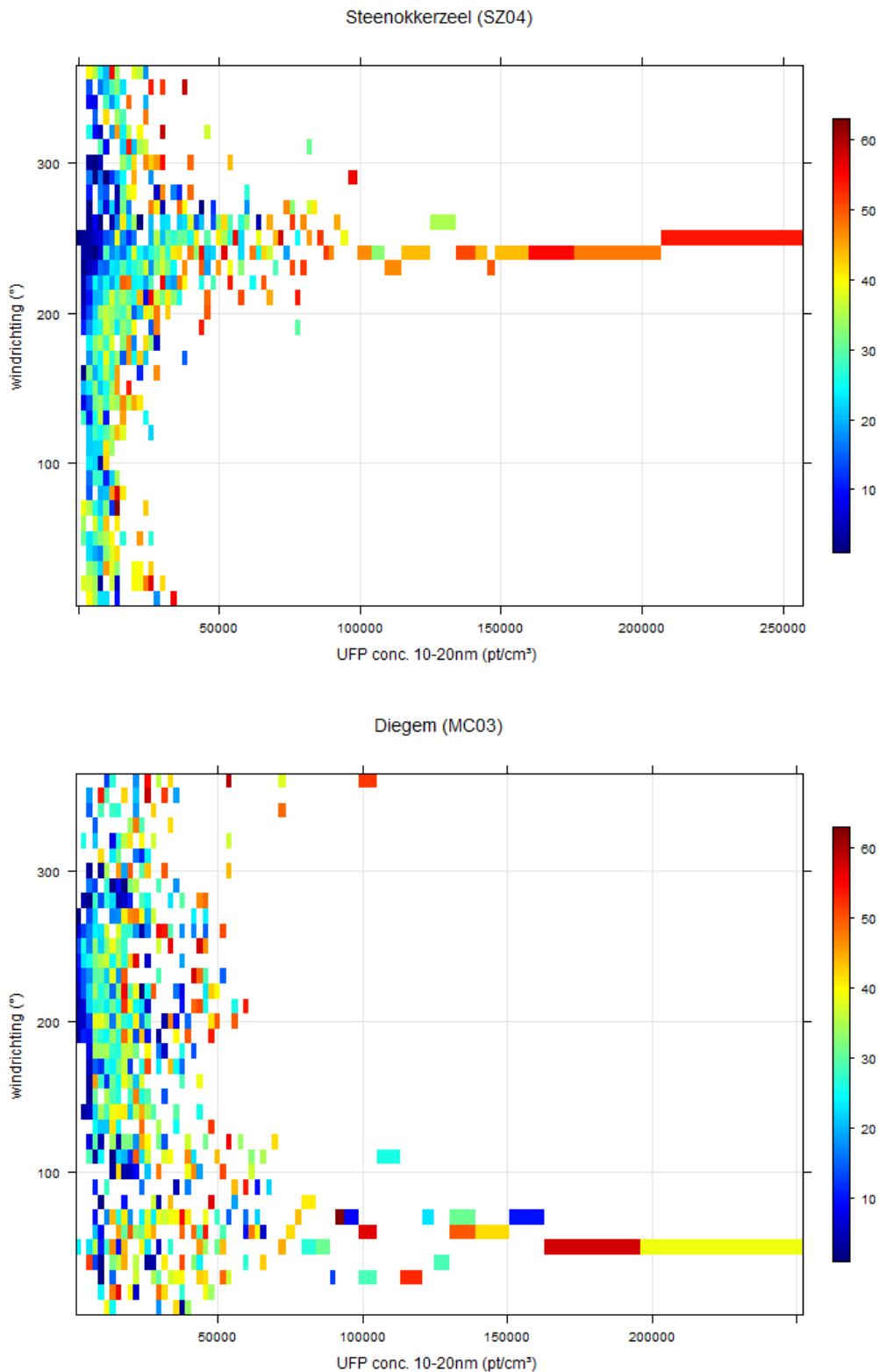


Figuur 39: Uurlijks geaggregeerde vluchtgegevens voor alle start/landingsbanen (all), en opgesplitst voor vertrek (all.D) en aankomst (all.A). De uurgemiddelde UFP-concentratie van de 10-20 nm fractie gemeten in Diegem (MC.10.20) en Steenokkerzeel (SZ.10.20) is gegeven in de onderste twee grafieken.

6.4.2. RELATIE TUSSEN VLIEGTUIGBEWEGINGEN EN UFP-METINGEN

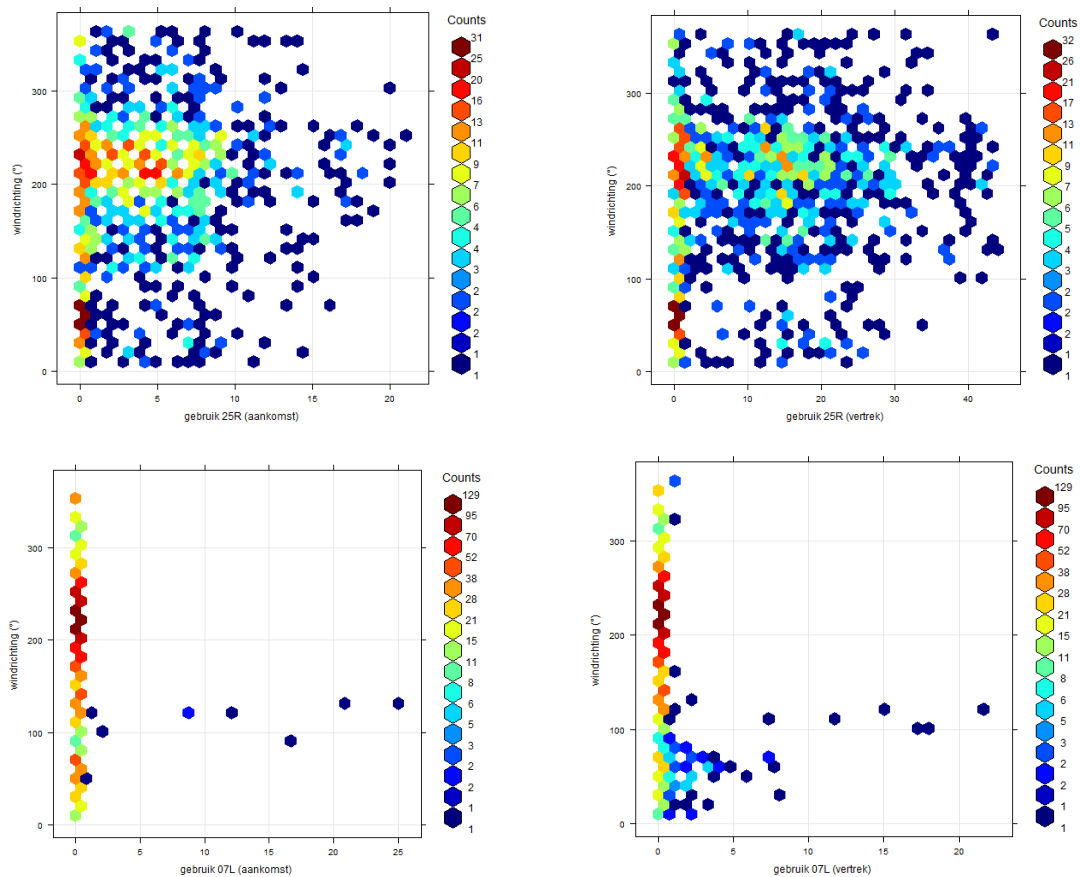
→ Uurlijks geaggregeerde vluchtgegevens

Om de relatie te onderzoeken tussen vluchtgegevens en UFP-concentraties is het noodzakelijk om ook de windrichting in rekening te brengen (zie Sectie 6.3). Op basis van scatterplots kan de variatie in UFP-concentratie in functie van windrichting en vluchtgegevens gevisualiseerd worden (Figuur 40). In Steenokkerzeel worden de hoogste UFP-concentraties (10-20 nm) gemeten bij ZW-W-wind wanneer de meetlocatie windafwaarts gelegen is van de luchthaven.



Figuur 40: Scatterplot van de uurgemiddelde UFP-concentratie (10-20 nm) in Steenokkerzeel (SZ04) en Diegem (MC03) in functie van de windrichting ingekleurd volgens het aantal vliegbewegingen per uur (aankomst + vertrek) op Brussels Airport.

Er wordt een duidelijke gradiënt waargenomen van hogere UFP-concentratie bij een hoger aantal vliegbewegingen. De meetpost in Diegem was gedurende een veel minder lange periode windafwaarts gelegen van de luchthaven. De hoogste concentraties worden gemeten wanneer de meetpost windafwaarts ligt van de luchthaven, maar de UFP-gradiënt bij deze windrichting in functie van het aantal vliegbewegingen is minder duidelijk dan in Steenokkerzeel. De landings/startbaan 07L wordt ook veel minder intensief gebruikt dan landings/startbaan 25R (Figuur 41).



Figuur 41: Aantal bewegingen op runway 25R (boven) en 07L (onder) voor verschillende windrichtingen. De counts (kleurschaal) geven het aantal uren dat een bepaalde combinatie voorkwam tijdens de meetcampagne.

Er werd een lineair regressiemodel opgesteld (op basis van uurlijkse gegevens) met als afhankelijke variabele de UFP-concentratie op meetlocatie SZ04, en als onafhankelijke variabelen interactietermen van vertrek en aankomstaantallen op 25R met de windrichting (factor variabele), de windsnelheid en de hoogte van de atmosferische menglaag. Er wordt gewerkt met interactietermen omdat het effect van het gebruik van 25R op de UFP-concentratie op het meetpunt varieert met verschillende windrichting. De modelvergelijking wordt hieronder gegeven:

$$Y = b_0 + b_1(DW) + b_2(AW) + b_3S + b_4H$$

waarbij Y de UFP-concentratie voorstelt, D de vertrekaantallen op 25R, A de aankomstaantallen op 25R, W de windrichting, S de windsnelheid, H de hoogte van de menglaag en b_0 tot b_4 de modelcoëfficiënten.

Het model verklaart 60% van de variantie (adjusted¹ R² van 0,60) in het gemeten aantal 10-20 nm deeltjes in SZ04. De windsnelheid en de interactietermen tussen het aantal vertrekbewegingen op 25R en de windrichting 210°-260°, en het aantal landingen bij wind uit windrichting 260-270° zijn de meest significante variabelen. De hoogte van de menglaag en combinaties van het aantal vliegtuigbewegingen in combinatie met andere windrichtingen zijn niet significant. Er is een duidelijke correlatie tussen het gebruik van 25R in combinatie met windrichting en de UFP-concentratie die op meetlocatie SZ04 waargenomen werd. Voor andere deeltjesklassen is het model minder goed (adjusted R² van 0,55; 0,32; 0,28; 0,31; 0,33 en 0,40 voor deeltjesklassen 20-30, 30-50, 50-70, 70-100, 100-200 en 200-294 nm). Deze resultaten geven aan dat er een correlatie is tussen luchthavenactiviteiten op de baan 25R en de UFP-concentratie van de kleinste deeltjesklassen in de windafwaartse omgeving van de luchthaven.

Eenzelfde model werd opgesteld voor de het gemeten aantal 10-20 nm deeltjes in KM02, gelegen op ongeveer 7 km van de luchthaven. Het model verklaart 51% van de variantie en is significant. De meest significante variabelen zijn het aantal vertrekken op 25R bij windrichting tussen 210 en 260° en het aantal aankomsten op 25R bij windrichting tussen 210-260°. Deze resultaten geven aan dat er een correlatie is tussen luchthavenactiviteiten op de baan 25R in combinatie met windrichting en de UFP-concentratie van de kleinste deeltjesklassen op een afstand van ongeveer 7 km windafwaarts van de luchthaven.

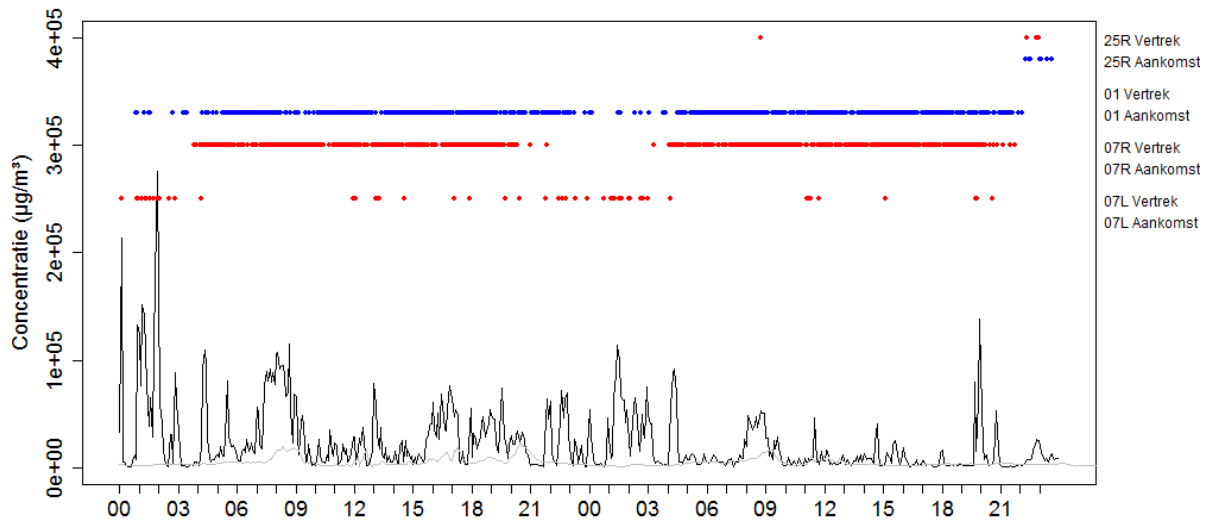
Tenslotte werd dit model ook toegepast voor de 10-20 nm UFP-metingen op de meetlocaties ten ZW van de luchthaven (MC03 en EE01). In MC03, gelegen schuin in het verlengde van baan 25R passeren vliegtuigen op kleine hoogte en afstand tijdens het opstijgen. Het model verklaart 32% van de variantie. De meest significante variabelen zijn het aantal vertrekken en landingen op 25R bij windrichting tussen 50-70°, d.i. wanneer de meetlocatie zich windafwaarts bevindt van 25R. Ook de windsnelheid en de hoogte van de menglaag zijn significante variabelen in dit model. Voor meetlocatie EE01 verklaart het model slechts 9% van de variabiliteit. De belangrijkste verklarende variabele is het opstijgen van vliegtuigen vanop 25R bij ZW wind en bij wind uit NO. Het beperkte verklarende vermogen van dit model is toe te schrijven aan de grotere afstand van EE01 t.o.v. de luchthaven. Een deel van de vliegtuigen die opstijgen via 25R buigt kort na opstijgen af, windopwaarts van EE01 bij ZW-wind waardoor er geen (of beperkte) bijdrage is aan de UFP-concentratie op EE01.

→ 5-minuutgemiddelde UFP-metingen en individuele vliegbewegingen

De overheersende windrichting op 1-2/10/2015 en 19-20/11/2015 was respectievelijk NO en ZW volgens de aanvliegroete en opstijgroete van banen 25R/07L. Op 1-2/10/2015 kwam de wind gedurende 30 van de 48 u uit de richting 50-70°. Op 19-20/11/2015 kwam de wind gedurende 33 van de 48 u uit de richting 230-250°. Op 1-2/10/2015 lagen de meetlocaties MC03 en EE01 windafwaarts van de luchthaven, op 19-20/11/2015 lagen de meetlocaties SZ04 en KM02 windafwaarts van de luchthaven. Op 1-2/10 waren er 1498 vliegbewegingen, op 19-20/11 waren er 1362 vliegbewegingen.

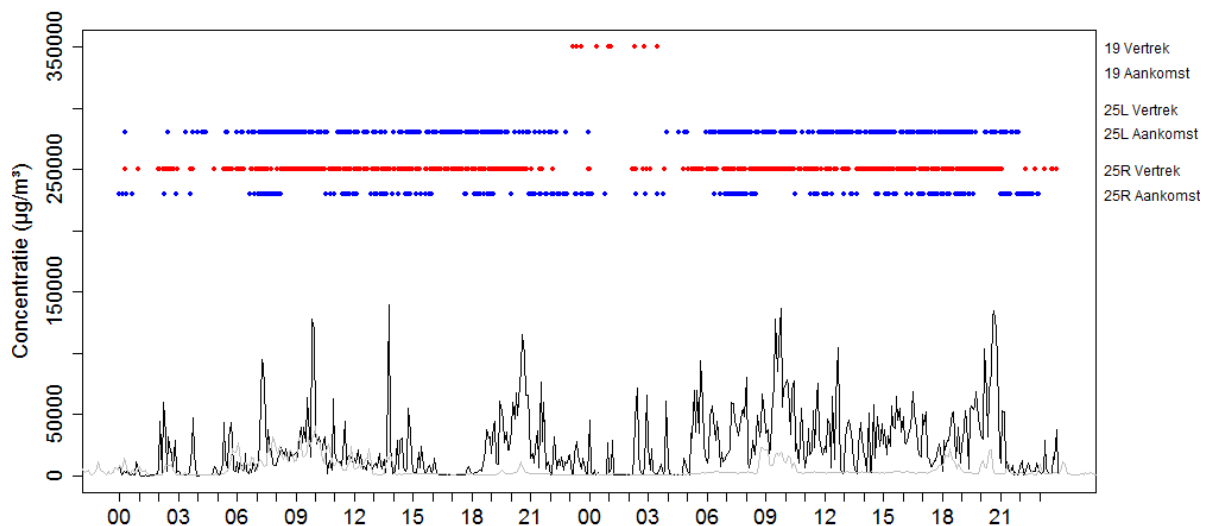
Een aantal UFP-concentratiepieken (10-20 nm) op MC03 komen voor op momenten van vertrek op 07L, maar niet alle pieken kunnen zo verklaard worden (bv. 1/10 7-9u, 15-20u en 2/10 8-9u) (Figuur 42).

¹ De *adjusted* R² houdt rekening met het aantal onafhankelijke variabelen. De *adjusted* R² is kleiner dan of gelijk aan de R².



Figuur 42: Tijdreeks van de UFP-concentratie (10-20 nm) in MC03 (zwart) en EE01 (grijs) voor de periode 1-2/10/2015. Bovenaan zijn de vliegbewegingen weergegeven op de belangrijkste start- en landingsbanen tijdens de periode 1-2/10/2015.

Op 19-20/11 werden een groot aantal UFP-pieken gemeten. Het aantal vertrekkende vliegtuigen vanop baan 25R was hoog overdag. Het dag-nacht patroon is ook te zien in de UFP-metingen, met uitzondering van de lage UFP-concentratie op 19/11 tussen 16-18u. Die wordt veroorzaakt door een verandering van windrichting en windsnelheid met wind uit het N-NO (350-60°) met lage snelheid (1 m/s, t.o.v. 3-9 m/s in de rest van de periode). Tussen 12 en 18u viel er ook veel neerslag (18 mm). De invloed van de luchthavenactiviteiten is merkbaar tot op het meetstation KM02.

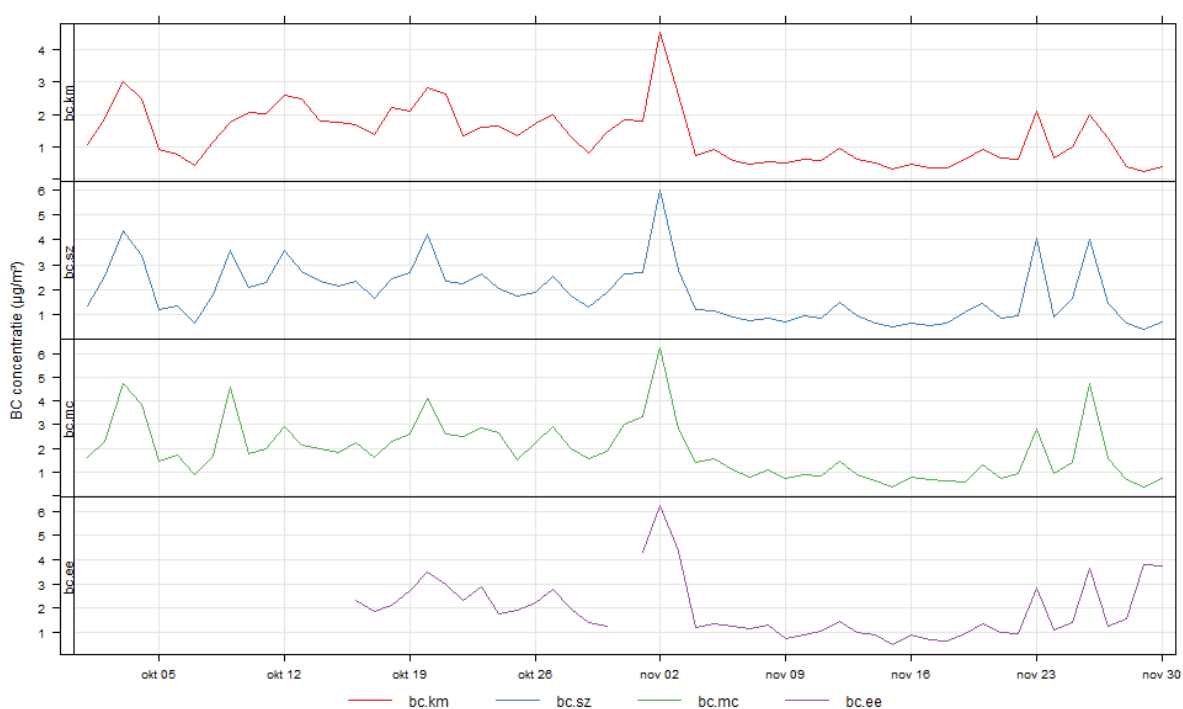


Figuur 43: Tijdreeks van de UFP-concentratie (10-20 nm) in SZ04 (zwart) en KM02 (grijs) voor de periode 19-20/11/2015. Bovenaan zijn de vliegbewegingen weergegeven op de belangrijkste start- en landingsbanen tijdens de periode 19-20/11/2015.

6.5. ASSOCIATIE MET ANDERE PARAMETERS

6.5.1. BLACK CARBON (BC)

In tegenstelling tot de UFP-aantalconcentraties zijn de BC-concentraties sterk gelijkend op drie van de vier meetlocaties (Figuur 44 en Tabel 17). In Kampenhout is de concentratie lager dan op de overige drie meetlocaties. De dag-tot-dag variatie is wel gelijkend in Kampenhout en op de overige meetlocaties. Op 2/11/2015 werden verhoogde BC concentraties waargenomen in Vlaanderen en Brussel (zie <http://www.irceline.be/en/air-quality/measurements/particulate-matter/last-14-days>).

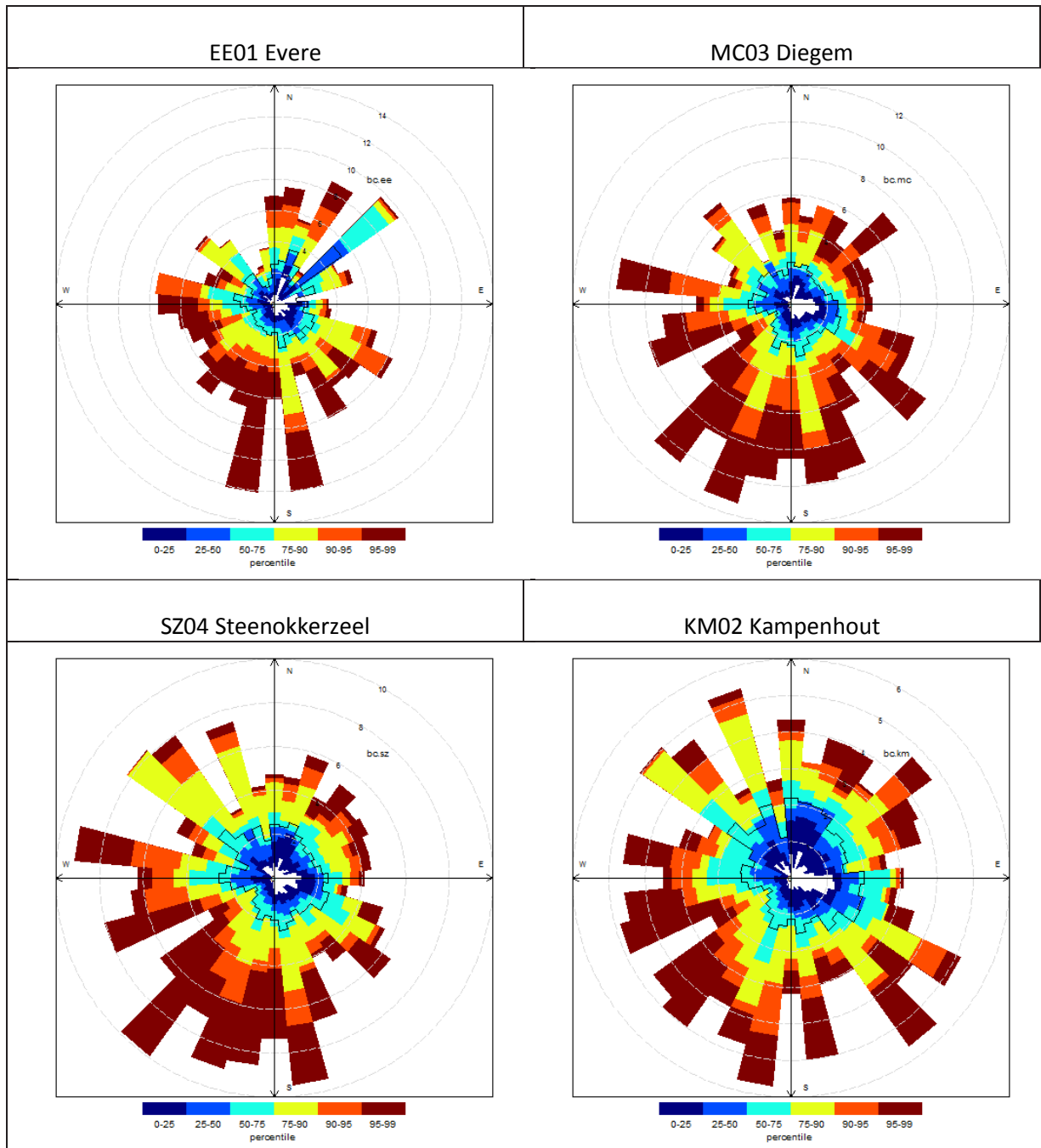


Figuur 44: Daggemiddelde BC-concentratie op de vier meetlocaties (bc.km = Kampenhout, bc.sz = Steenokkerzeel, bc.mc = Diegem, bc.ee = Evere). Let op: de schaal van de y-as is verschillend in de bovenste plot (Kampenhout). Voor Evere zijn gegevens beschikbaar vanaf 16/10/2015.

Tabel 17: BC-concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) op de vier meetlocaties (op basis van halfuursgemiddelde metingen)

	BC KM02	BC SZ04	BC MC03	BC EE01
1 ^{ste} kwartiel	0,5	0,8	0,9	0,9
Mediaan	1,0	1,3	1,4	1,4
Gemiddelde	1,3	1,8	1,9	1,9
3 ^{de} kwartiel	1,8	2,3	2,4	2,4
Maximum	6,7	13,1	16,8	16,8

BC is een maat voor de roetconcentratie in de omgevingslucht en is een gekende indicator voor verkeersemisies. De pollutierozen voor BC hebben een veel minder uitgesproken directioneel karakter in vergelijking met de resultaten voor UFP (10-20 nm) (Figuur 45 en Figuur 34). In Diegem is er wel een grote bijdrage van verkeer vanop de R0 en A201, gelegen ten ZO tot W van de meetlocatie. In Steenokkerzeel worden de hoogste BC-concentraties gemeten bij wind uit ZO tot W richting. Dit is een veel ruimer segment dan het segment waarin verhoogde UFP-concentraties gemeten worden (zie Figuur 34). Er wordt besloten dat vliegtuigemissies een zeer beperkte invloed hebben op de BC-concentratie in de omgeving van de luchthaven.

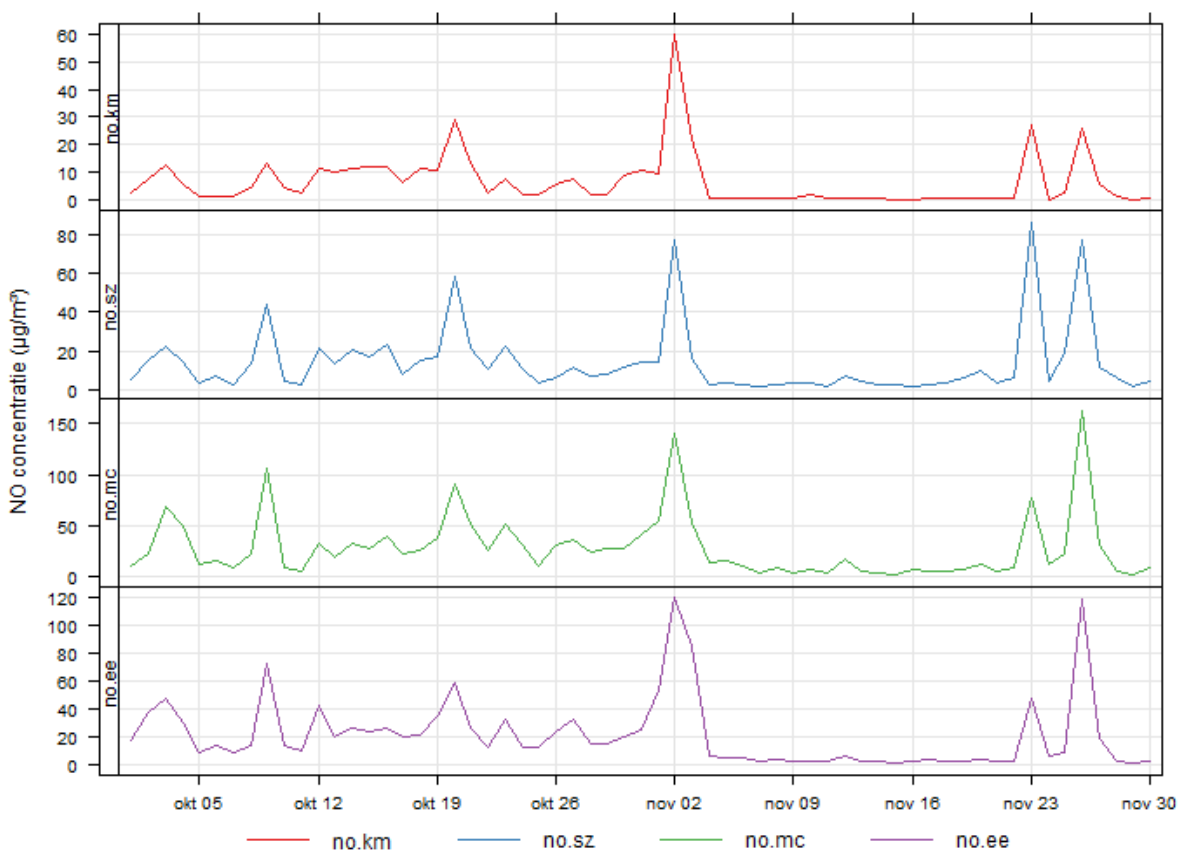


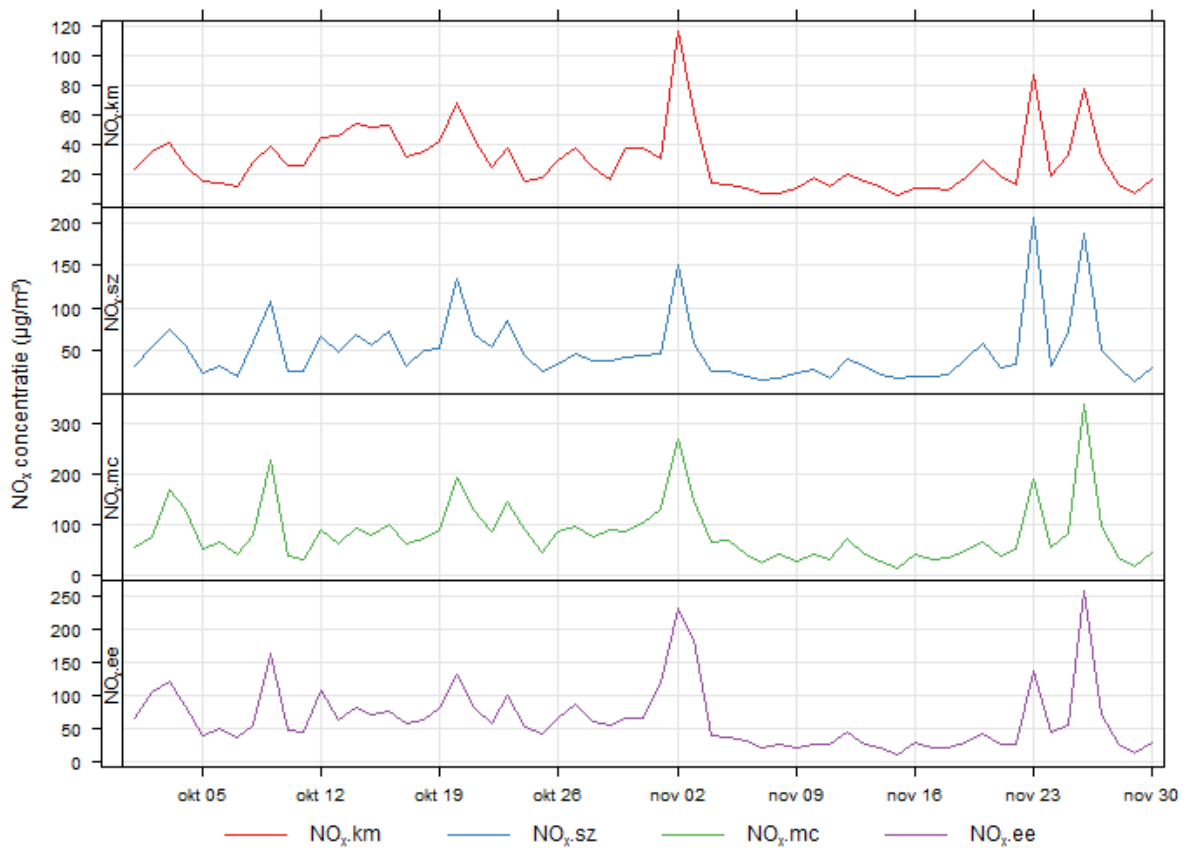
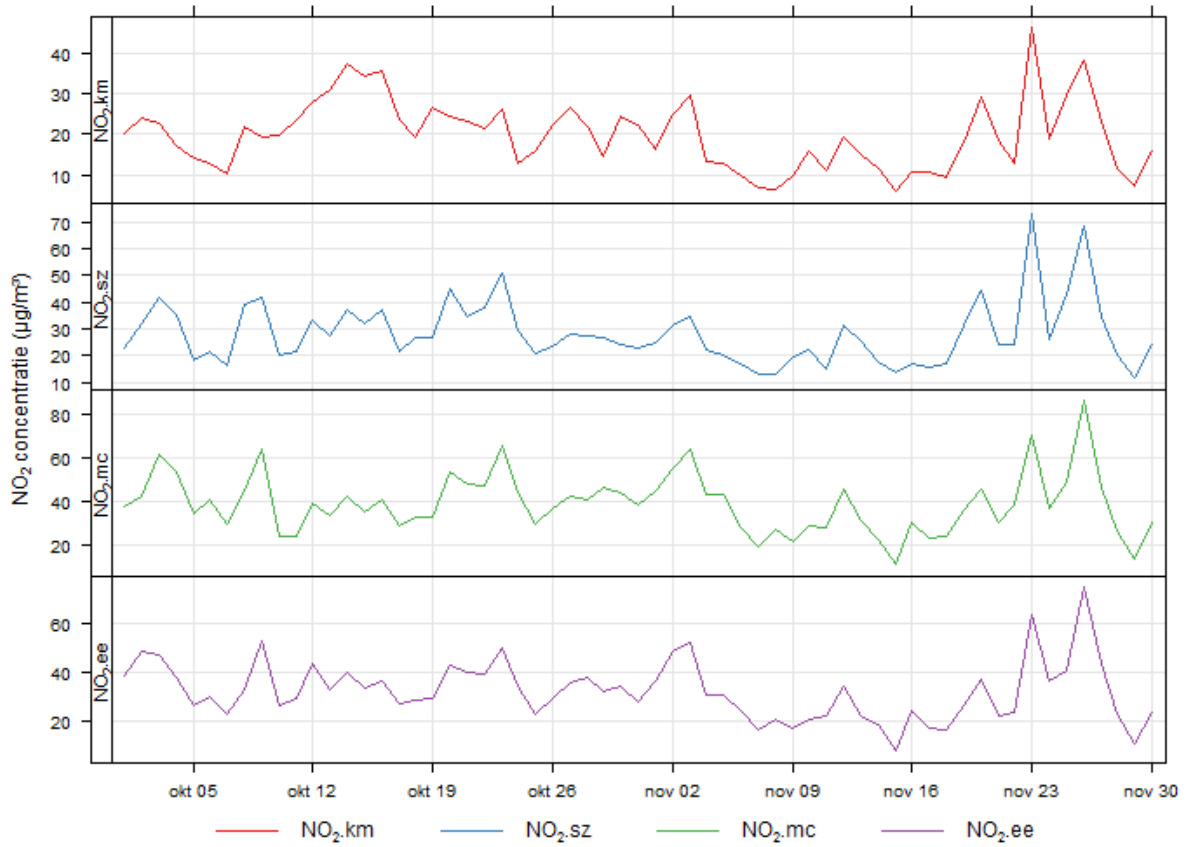
Figuur 45: Percentielplots van de BC-concentratie in functie van de windrichting op de vier meetlocaties.

Er bestaan modellen om op basis van het smoke number van een vliegtuigmotor bij take-off, climb-out, approach of idle conditie de BC-emissie (mg/m^3) te berekenen (bv. Stettler et al., 2013). De ICAO code was nog niet beschikbaar voor de vluchtgegevens. De ICAO code is nodig om op basis van de ICAO emission database het smoke number te linken aan de vluchtgegevens.

6.5.2. NO, NO₂ EN NO_x CONCENTRATIE

De dag-tot-dag fluctuaties van de concentratie van NO, NO₂ en NO_x (als NO₂-equivalent) op de vier meetlocaties is gegeven in Figuur 46. De dagelijkse dynamiek is vergelijkbaar tussen de vier meetlocaties (Figuur 46). De hoogste NO_x-concentraties worden waargenomen in Diegem, gevolgd door Evere. In Steenokkerzeel is de NO_x-concentratie lager dan in Diegem en Evere (Tabel 18).



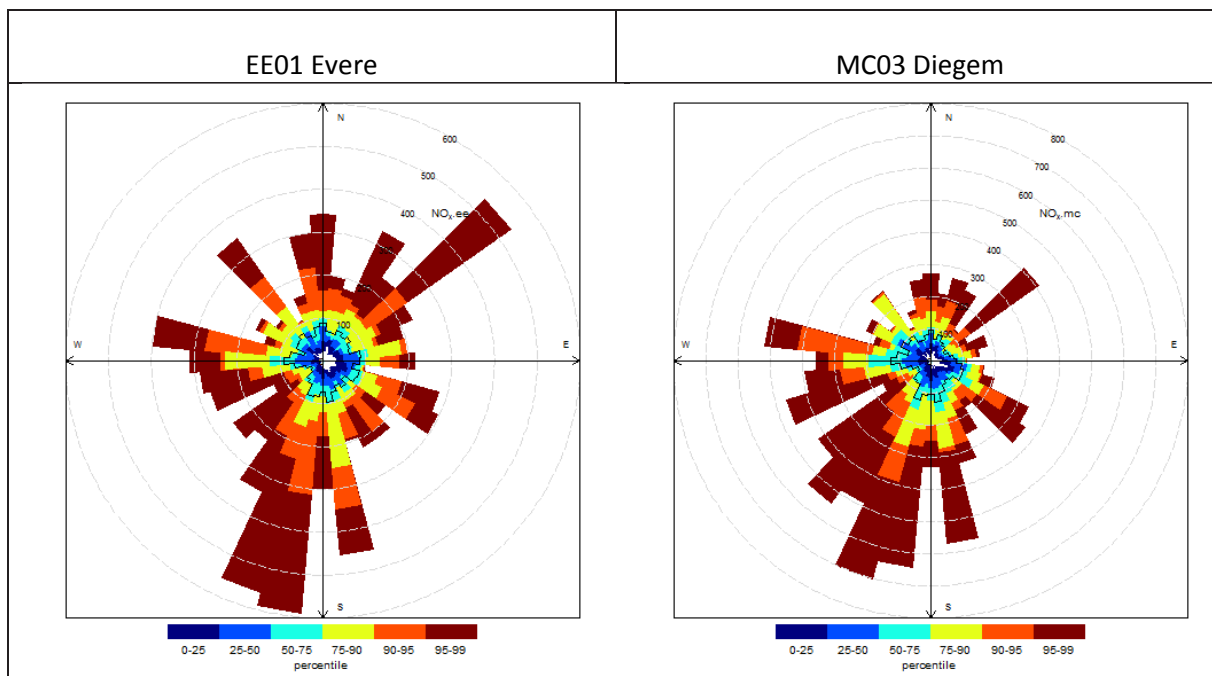


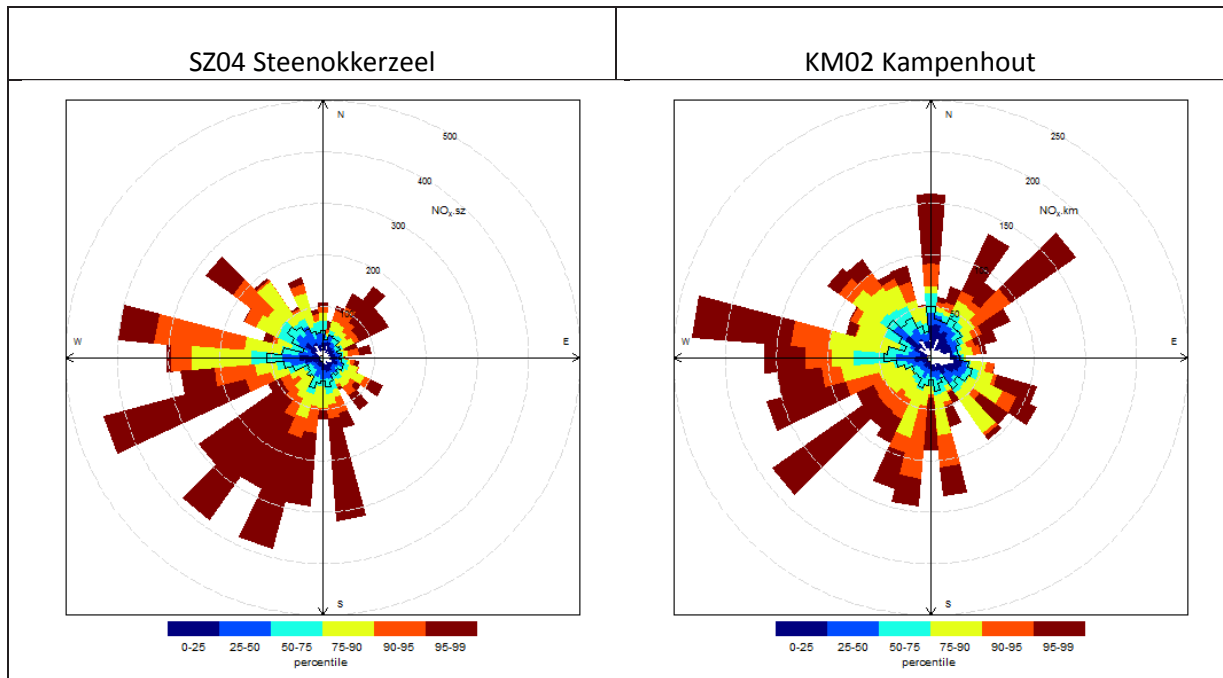
Figuur 46: Overzicht daggemiddelde NO, NO₂ en NO_x concentratie op de vier meetlocaties in oktober-november 2015.

Tabel 18: NO_x-concentratie (als NO₂-equivalent; µg/m³) op de vier meetlocaties (op basis van halfuursgemiddelde metingen).

	NO _x KM02	NO _x SZ04	NO _x MC03	NO _x EE01
1 ^{ste} kwartiel	11,8	19,1	32,7	26,6
Mediaan	21,5	32,2	55,7	45,3
Gemiddelde	29,6	48,3	83,1	65,1
3 ^{de} kwartiel	35,3	55,8	97,5	76,1
Maximum	335,1	485,6	1417,7	828,6

De NO_x-pollutierozen zijn sterk gelijkend op de BC-pollutierozen en wijzen niet in de richting van de luchthaven als belangrijkste bron van NO_x. Verkeersemmissies hebben een belangrijker aandeel in de NO_x-concentratie – zie bv. de verhoogde concentraties in de richting van het snelwegencomplex in Diegem. Emissies van voertuigen die ingezet worden op de luchthaven zullen een bijdrage hebben aan de gemeten NO_x-concentratie op de meetpunten nabij de luchthaven. De metingen in Diegem, waar op basis van windrichting goed gedifferentieerd kan worden tussen de luchthaven en wegverkeer, geven aan dat de bijdrage van de luchthaven beperkt is in vergelijking met de bijdrage van verkeer. Er wordt besloten dat vliegtuigemissies een zeer beperkte invloed hebben op de NO_x-concentratie in de omgeving van de luchthaven.





Figuur 47: Percentieplots van de NO_x concentratie in functie van de windrichting op de vier meetlocaties.

Op basis van de NO_x -emissie-index en het brandstofverbruik van een vliegtuigmotor bij take-off, climb-out, approach of idle conditie kan de NO_x -emissievracht (g/sec) berekend worden. De ICAO code was nog niet beschikbaar voor de vluchtgegevens. De ICAO code is nodig om de ICAO emission database te linken aan de vluchtgegevens.

6.5.3. CORRELATIES TUSSEN POLLUENTEN

De Pearson correlatie werd berekend tussen de halfuurlijks gemiddelde UFP, BC en NO_x gegevens (Tabel 19). In het algemeen neemt de correlatie toe voor toenemende deeltjesgrootte. In Evere (EE01) en Diegem (MC03) is de correlatie voor de kleinste deeltjesklasse van 10-20 nm hoger dan in Steenokkerzeel (SZ04) en Kampenhout (KM02), dit is waarschijnlijk te verklaren door de grotere bijdrage van verkeer aan de kleinste UFP deeltjesklasse op locaties EE01 en MC03 in vergelijking met de andere locaties.

Voor de meetplaatsen die meestal (bij ZW-wind) windopwaarts van de luchthaven liggen (Evere en Diegem) is er een positieve correlatie tussen 10-20 nm deeltjes en BC (Pearson $r = 0,22$ en $0,27$). Het positief verband tussen 10-20 nm deeltjes en BC op deze plaatsen suggereert dat de emissies van wegverkeer bijdragen aan beide polluenten. Voor de plaatsen die veelal windafwaarts liggen (Steenokkerzeel en Kampenhout) is de correlatie tussen 10-20 nm deeltjes en BC negatief of afwezig (Pearson $r = -0,03$ en $-0,21$), wat aangeeft dat er een betekenisvolle bijdrage is van 10-20 nm deeltjes die niet veroorzaakt wordt door wegverkeer (maar dus door vliegverkeer). Een gelijkaardige vaststelling kan gemaakt worden bij over NO, die net zoals BC wordt uitgestoten door wegverkeer: de correlatie tussen 10-20 nm deeltjes en NO is positief is voor Evere en Diegem, maar veel lager of negatief voor Steenokkerzeel en Kampenhout.

In het verleden werd een gelijkaardige analyse uitgevoerd in een stedelijke omgeving in Antwerpen (VMM, 2014). De correlaties voor de grotere deeltjesklassen is vergelijkbaar. Voor de kleinste deeltjesklassen is de correlatie tussen BC en UFP voor Steenokkerzeel en Kampenhout lager omdat de bijdrage uit wegverkeer kleiner is. Voor de andere twee meetlocaties, Diegem en Evere, zijn de correlaties voor de kleinere deeltjesklassen vergelijkbaar met de correlaties die in stedelijke omgeving (park, voorstedelijk) werden waargenomen. De correlaties die bepaald werden langs de ring van Antwerpen zijn wel hoger dan in Diegem en Evere.

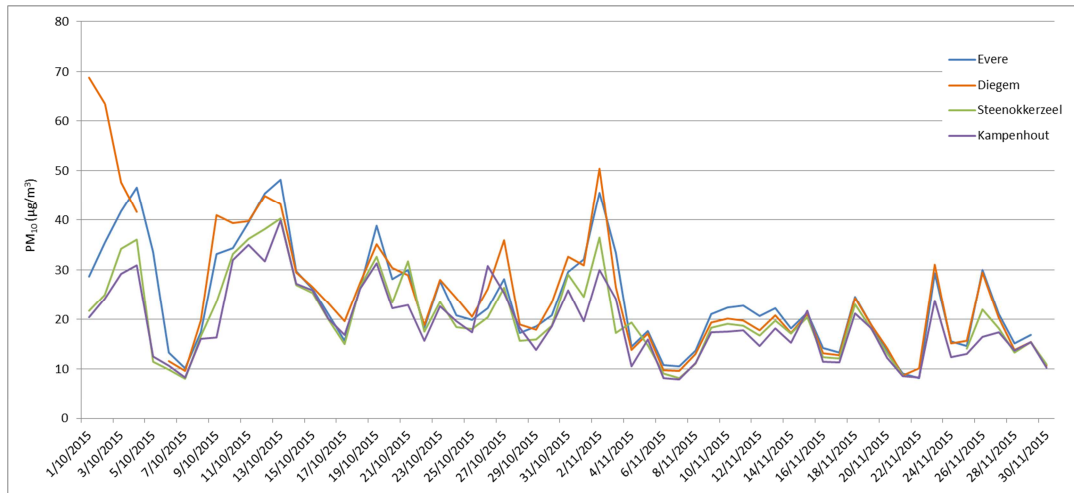
Tabel 19: Pearson correlatie tussen BC, NO, NO₂ en NO_x en de verschillende UFP-deeltjesklassen.

		UFP						
		10-20 nm	20-30 nm	30-50 nm	50-70 nm	70-100 nm	100-200 nm	200-294 nm
EE01	BC	0,22	0,52	0,62	0,66	0,68	0,68	0,64
	NO	0,24	0,55	0,73	0,81	0,81	0,77	0,65
	NO ₂	0,46	0,56	0,65	0,73	0,73	0,66	0,55
	NO _x	0,33	0,6	0,77	0,86	0,86	0,81	0,68
MC03	BC	0,27	0,39	0,52	0,81	0,90	0,90	0,81
	NO	0,23	0,34	0,49	0,74	0,78	0,74	0,62
	NO ₂	0,28	0,35	0,45	0,70	0,73	0,67	0,53
	NO _x	0,26	0,36	0,51	0,77	0,81	0,76	0,63
SZ04	BC	-0,03	0,05	0,39	0,75	0,84	0,87	0,76
	NO	0,06	0,15	0,48	0,68	0,64	0,59	0,45
	NO ₂	0,3	0,34	0,57	0,71	0,63	0,51	0,36
	NO _x	0,17	0,25	0,57	0,76	0,71	0,62	0,46
KM02	BC	-0,21	0,05	0,45	0,72	0,84	0,88	0,81
	NO	-0,11	0,15	0,51	0,62	0,62	0,61	0,48
	NO ₂	0,09	0,37	0,6	0,62	0,55	0,47	0,48
	NO _x	-0,02	0,29	0,64	0,73	0,69	0,64	0,56
Antwerpen*		< 20	20-30	30-50	50-70	70-100	100-200	> 200
Stedelijke achtergrond	BC	0,69	0,77	0,82	0,89	0,92	0,93	0,81
Park	BC	0,28	0,51	0,68	0,79	0,85	0,84	0,77
Voorstedelijk	BC	0,27	0,43	0,55	0,65	0,69	0,76	0,74
Ring	BC	0,72	0,68	0,70	0,81	0,84	0,86	0,79

* Metingen VMM (2014)

6.5.4. PM₁₀-CONCENTRATIE

De PM₁₀-concentratie (daggemiddelde concentraties) varieert regionaal met een vergelijkbare dynamiek en concentratieniveaus op de vier meetlocaties. De laagste concentraties worden waargenomen in Kampenhout en Steenokkerzeel. De luchthavenactiviteiten nabij Steenokkerzeel resulteren niet in een verhoogde PM₁₀-concentratie op die locatie.



Figuur 48: PM₁₀-concentratie (daggemiddelde, in µg/m³) op vier meetlocaties.

HOOFDSTUK 7. BESLUIT

Aan de hand van een meetopstelling op verschillende locaties in het verlengde van een druk bezette start/landingsbaan werd de invloed van de luchthaven van Zaventem (Brussels Airport) op de luchtkwaliteit in de omgeving van de luchthaven onderzocht. Twee meetplaatsen (MC03 in Diegem en SZ02/SZ04 in Steenokkerzeel) lagen dicht bij de luchthaven (< 750 m), twee meetplaatsen lagen verder van de luchthaven (EE01 in Evere op 5 km en KM02 in Kampenhout op 7 km). De metingen in Steenokkerzeel gebeurden op twee locaties (SZ02 en SZ04) met een tussenafstand van 150 m. Meetplaats KM02 is een landelijke meetlocatie, EE01, MC03 en SZ04 zijn stedelijke meetplaatsen. Meetplaats MC03 bevindt zich nabij (200 m) enkele zeer drukke verkeersassen. De pollutanten die met een hoge tijdsresolutie werden gemeten zijn ultrafijne deeltjes (UFP) in 7 deeltjesgrootteklassen (10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100, 100-200 en 200-294 nm, op locaties EE01, MC03, SZ04 en KM02) en zwarte koolstof (BC) en stikstofdioxiden (NO_x) (op locaties EE01, MC03, SZ02 en KM02). Aangezien vliegtuigemissies voornamelijk veel UFP uit de kleinste gemeten diameterklasse van 10-20 nm bevatten, kreeg deze fractie het meeste aandacht in deze studie. Op de vier meetplaatsen (EE01, MC03, SZ04 en KM02) werd ook de daggemiddelde concentratie van fijn stof (PM_{10}) bepaald. Naast luchtkwaliteitsdata werden ook meteorologische gegevens van Zaventem en vluchtgegevens gebruikt voor de interpretatie van de luchtkwaliteitsmetingen.

De UFP-concentraties vertonen sterke fluctuaties in de tijd als gevolg van de dynamiek van de UFP-bronnen en de meteorologische omstandigheden. De UFP-concentratie in functie van het uur van de dag vertoont een bimodaal patroon met de hoogste concentraties 's morgens tussen 6 en 8 u en 's avonds tussen 16 en 18 u. Zowel het wegverkeer als de vluchtgegevens van Brussels Airport vertonen een bimodaal patroon doorheen de dag, zodat op basis van deze analyse niet tussen beide bronnen kan gediscrimineerd worden.

De situering van een meetlocatie ten opzichte van belangrijke bronnen (afstand windafwaarts) is bepalend voor de waargenomen concentraties. De meetlocaties bevinden zich langs een ZW-NO transect op verschillende afstand van wegverkeer en luchthaven. De overheersende windrichting tijdens de campagne was ZW en de hoogste windsnelheden werden ook waargenomen bij ZW-wind. Er zijn grote verschillen in UFP-concentratie tussen de meetlocaties. De hoogste gemiddelde deeltjesconcentratie (10-294 nm) wordt waargenomen in Diegem (MC03; 18 000 partikels/ cm^3) en Steenokkerzeel (SZ04; 17 000 pt/ cm^3), gevolgd door Evere (EE01; 10 000 pt/ cm^3) en Kampenhout (KM02; 8 000 pt/ cm^3). Voor de kleinste gemeten UFP-fractie van 10-20 nm is de gemiddelde concentratie ook het hoogst in MC03 en SZ04 (beide ongeveer 8 000 pt/cm) en veel lager in EE01 en KM02 (beide ongeveer 3 000 pt/ cm^3). De kleinste deeltjesfractie 10-20 nm is de overheersende UFP-fractie in Steenokkerzeel (45%) en Diegem (45%) in vergelijking met de meetlocaties verder van de luchthaven, Kampenhout (35%) en Evere (28%).

Een pollutieroos koppelt de luchtconcentraties van een bepaalde stof aan de dan heersende windrichting en kan dus aanwijzingen geven over de bron van de luchtverontreiniging. Uit de analyse van de pollutierozen bleek dat verhoogde concentraties voorkomen wanneer de meetplaats zich windafwaarts van de luchthaven bevindt. Dit effect is zeer duidelijk in SZ04 en MC03, maar ook in mindere mate in KM02 en EE01. Zowel in SZ04 als in MC03 kunnen de 10-20 nm concentraties sterk verhogen wanneer de meetlocatie zich windafwaarts van de luchthaven

bevindt. Ook voor de 20-30 nm deeltjesklasse worden de hoogste waarden waargenomen in SZ04 bij ZW-wind en in MC03 bij NO-wind.

Om de nettobijdrage van de luchthaven aan de UFP-concentratie te bepalen werd de bovenwindse concentratie afgetrokken van de benedenwindse concentratie. Dit komt overeen met een eenvoudig model dat veronderstelt dat de UFP-concentratie op een windafwaartse meetlocatie het resultaat is van een bijdrage van de luchthaven en een bijdrage van andere windopwaartse bronnen. Gedurende 25% van de tijd waarop de meetposten nabij de luchthaven (SZ04 en MC03) windafwaarts gelegen zijn van de luchthaven, wordt de bijdrage van de luchthaven aan de 10-20 nm deeltjes geschat op 20 000 tot 28 000 pt/cm³. Gedurende 10% van de tijd is de bijdrage van de luchthaven hoger dan 44 000 tot 58 000 pt/cm³ en gedurende 5% van de tijd is de bijdrage 66 000 tot 82 000 pt/cm³. De maximale bijdrage schommelt tussen de 255 000 en 275 000 pt/cm³.

Er is een duidelijke relatie tussen vluchtgegevens, windrichting en de UFP-concentratie van de 10-20 nm deeltjesklasse in de omgeving van Brussels Airport. Bij windafwaartse condities wordt een duidelijke gradiënt waargenomen van hogere UFP-concentratie bij een hoger aantal vliegbewegingen in SZ04. De meetpost MC03 was gedurende een veel minder lange periode windafwaarts gelegen van de luchthaven en hier is de UFP-gradiënt in functie van het aantal vliegbewegingen minder duidelijk. De variaties in UFP-concentratie van de 10-20 nm klasse op de meetlocatie op 7 km van de luchthaven worden voor een significant deel verklaard door de combinatie van vluchtgegevens en meteorologische omstandigheden.

Naast UFP werd ook continu de BC- en NO_x-concentratie gemeten. De concentraties van beide polluenten verschillen weinig tussen de vier meetplaatsen en de windrichting heeft veel minder invloed op de gemeten concentraties. De bijdrage van de luchthaven aan de BC- en NO_x-concentratie wordt niet hoger ingeschat dan deze uit andere bronnen (wegverkeer) in de omgeving van de meetplaatsen. Ook de daggemiddelde fijnstofconcentraties (PM₁₀) verschillen weinig tussen de vier meetplaatsen. Dit wijst op een regionale bijdrage. De invloed van de luchthaven is dus veel minder bepalend voor de gemeten concentraties van BC, NO_x en PM₁₀.

In deze studie is geen onderzoek uitgevoerd naar de betekenis van de gemeten UFP-concentraties voor de menselijke gezondheid. Het is moeilijk om gezondheidseffecten van UFP in te schatten met de huidige beschikbare kennis. Algemeen wordt aangenomen dat UFP schadelijk is, maar de Wereldgezondheidsorganisatie definieerde nog geen advieswaarde voor de UFP-concentratie in de omgevingslucht. Bezemer et al. (2015) concluderen in hun studie in de omgeving van Schiphol dat de wetenschappelijke kennis om gezondheidseffecten in te schatten nog te beperkt is. Of, en zo ja in welke mate, in de omgeving van Schiphol sprake is van extra gezondheidseffecten als gevolg van de blootstelling aan ultrafijnstof kan op basis van de huidige inzichten niet worden bepaald. Ook voor Brussels Airport kunnen we geen uitspraak doen over de gezondheidseffecten van UFP.

Samengevat

In een stedelijke omgeving is het wegverkeer algemeen de voornaamste bron van ultrafijn stof (10-100 nm). In de omgeving van Brussels Airport is er ook een significante bijdrage van luchthavenactiviteiten aan de UFP-concentratie. De bijdrage neemt af met de afstand tot de luchthaven, maar de effecten zijn meetbaar tot op minstens 7 km van de luchthaven. Er is een duidelijk verband tussen het aantal vliegbewegingen, de windrichting en de UFP-concentratie die op een bepaald punt in de omgeving van de luchthaven wordt waargenomen. De bijdrage van luchthavenactiviteiten aan de luchtconcentraties van BC, NO_x en PM₁₀ in de omgeving van de luchthaven wordt niet hoger ingeschat dan de bijdrage uit andere bronnen in de omgeving, zoals wegverkeer.

LITERATUURLIJST

ACI Europe, 2012. Ultrafine Particles at Airports. 54 p.

Bezemer, A., Wesseling, J., Cassee, F., Fischer, P., Fokkens, P., Houthuys, D., Jimmink, B., de Leeuw, F., Kos, G., Weijers, E., Keuken, M., Erbrink, H., 2015. Nader verkennend onderzoek ultrafijnstof rond Schiphol. RIVM Rapport 2015-0110.

Dodson, R.E., Houseman, E.A., Morin, B., Levy, J.I., 2009. An analysis of continuous black carbon concentrations in proximity to an airport and major roadways. *Atmospheric Environment*, 43(24), 3764-3773.

Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A.S.H., Ruckstuhl, C., Coz, C., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., Hansen, A.D.A., 2015. The “dual-spot” aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 1965-1979.

Ellermann, T., Massling, A., Løfstrøm, P., Winther, M., Nøjgaard, J. K. & Ketzel, M. 2012. Assessment of the air quality at the apron of Copenhagen Airport Kastrup in relation to the occupational environment. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 51pp. - Technical report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 15. <http://www2.dmu.dk/Pub/TR15.pdf>

Fanning, E., Yu, R.C., Lu, R., Froines, J., 2007. Monitoring and modeling of ultrafine particles and black carbon at the Los Angeles International Airport. Prepared for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency. 79p.

Friedlander, S.K., 2000. *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*, Oxford University Press, New York.

Frijns, E., Van Laer, J., Berghmans, P., 2013. Short-term intra-urban variability of UFP number concentration and size distribution. Joaquin report, 2013/MRG/R/173.

Gormley, P.G., en Kennedy, M., 1949. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube. *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences*, 52, 163-169.

Hinds, W.C., 1999. *Aerosol Technology. Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles*. Second Edition. 259 p.

Hsu, H-H., Adamkiewicz, G., Houseman, E.A., Vallarino, J., Melly, S.J., Wayson, R.L., Spengler, J.D., Levy, J.I., 2012. The relationship between aviation activities and ultrafine particulate matter concentrations near a mid-sized airport. *Atmospheric Environment*, 50, 328 -337.

Hsu, H-H., Adamkiewicz, G., Houseman, E.A., Zarubiak, D., Spengler, J.D., Levy, J.I., 2013. Contributions of aircraft arrivals and departures to ultrafine particle counts near Los Angeles Airport. *Science of the Total Environment*, 444, 347-355.

Hooyberghs, H., Lefebvre, W., 2014. Luchtkwaliteitskaart ultrafijn stof stad Antwerpen. Project 2014/RMA/R/180.

- Hu, S., Fruin, S., Kazowa, K., Mara, S., Winer, A.M., Paulson, S.E., 2009. Aircraft emission impact in a neighborhood adjacent to a general aviation airport in Southern California. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 8039-8045.
- Hudda, N., Gould, T., Hartin, K., Larson, T.V., Fruin, S.A., 2014. Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind.
- Keuken, M.P., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, B., Brunekreef B., Hoek G., 2014. Ultrafijn stof rondom Schiphol. *Tijdschrift lucht* 6, 8-11.
- Keuken, M.P., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing J.S., Hoek G. (2015). Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment* 104, 132-142.
- Kinsey, J.S., 2009. Characterization of emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions experiment (APEX) 1 to 3. EPA-600/R-09/130.
- Laffineur, Q., De Backer, H., Delcloo, A., Hamdi, R., Nemeghaire, J., Debal, F., 2013. Quality control on the mixing layer height retrieved from LIDAR-ceilometer measurements. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-8013-1.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2nd edition. 1232p.
- Stettler, M.E.J., Swanson, J.J., Barrett, S.R.H., Boies, A.M., 2013. Updated Correlation Between Aircraft Smoke Number and Black Carbon Concentration. *Aerosol Science and Technology*, 47(11), 1205-1214.
- Virkkula, A., Mäkelä, T., Hillamo, R., Yli-Tuomi, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., and Koponen, I. K., 2007. A simple procedure for correcting loading effects of aethalometer data, *J. Air Waste Manage.*, 57, 1214–1222, doi:10.3155/1047-3289.57.10.1214.
- VMM, 2014. Intrastedelijke variabiliteit van ultrafijne deeltjes in Antwerpen (februari en oktober 2013). Vlaamse Milieumaatschappij, <http://www.vmm.be>.
- VMM, 2015. Luchtkwaliteit in het Vlaamse Gewest. Jaarverslag Immissiemeetnetten - 2014. Vlaamse Milieumaatschappij, <http://www.vmm.be>.
- Westerdahl, D., Fruin, S.A., Phillip, L.F., Sioutas, C., 2008. The Los Angeles International Airport as a source of ultrafine particles and other pollutants to nearby communities. *Atmospheric Environment*, 42, 3143-3155.
- Zhu, Y., Fanning, E., Yu, R.C., Zhang, Q., Froines, J.R., 2011. Aircraft emissions and local air quality impacts from the take-off activities at a large International Airport, *Atmospheric Environment*, doi. 10.1016/j.atmosenv.2011.08.062

BIJLAGE A

Diffusiecorrectiefactoren gebruikt door VITO:

Diameter midsize (nm)	Diffusie correctiefactor
7,37	2,14
7,64	2,05
7,91	1,98
8,20	1,91
8,51	1,85
8,82	1,79
9,14	1,74
9,47	1,70
9,82	1,65
10,2	1,61
10,6	1,57
10,9	1,55
11,3	1,51
11,8	1,48
12,2	1,45
12,6	1,43
13,1	1,41
13,6	1,38
14,1	1,37
14,6	1,35
15,1	1,33
15,7	1,31
16,3	1,30
16,8	1,28
17,5	1,26
18,1	1,25
18,8	1,23
19,5	1,22
20,2	1,21
20,9	1,20
21,7	1,19
22,5	1,18
23,3	1,17
24,1	1,16
25,0	1,16
25,9	1,15
26,9	1,14
27,9	1,13
28,9	1,13
30,0	1,12
31,1	1,12
32,2	1,11
33,4	1,11

34,6	1,10
35,9	1,10
37,2	1,09
38,5	1,09
40,0	1,08
41,4	1,08
42,9	1,08
44,5	1,07
46,1	1,07
47,8	1,07
49,6	1,06
51,4	1,06
53,3	1,06
55,2	1,06
57,3	1,05
59,4	1,05
61,5	1,05
63,8	1,05
66,1	1,04
68,5	1,04
71,0	1,04
73,7	1,04
76,4	1,04
79,1	1,04
82,0	1,03
85,1	1,03
88,2	1,03
91,4	1,03
94,7	1,03
98,2	1,03
101,8	1,03
105,5	1,03
109,4	1,02
113,4	1,02
117,6	1,02
121,9	1,02
126,3	1,02
131,0	1,02
135,8	1,02
140,7	1,02
145,9	1,02
151,2	1,02
156,8	1,02
162,5	1,02
168,5	1,02
174,7	1,01
181,1	1,01
187,7	1,01
194,6	1,01

201,7	1,01
209,1	1,01
216,7	1,01
224,7	1,01
232,9	1,01
241,4	1,01
250,3	1,01
259,5	1,01
269,0	1,01
278,8	1,01
289,0	1,01
299,6	1,01

Diffusiecorrectiefactoren gebruikt door ECN:

Diameter midsize (nm)	Diffusie correctiefactor
7,77	2,136
8,35	1,982
8,98	1,853
9,65	1,747
10,4	1,654
11,1	1,585
12,0	1,515
12,9	1,459
13,8	1,415
14,9	1,371
16,0	1,336
17,2	1,294
18,4	1,265
19,8	1,238
21,3	1,215
22,9	1,194
24,6	1,175
26,4	1,159
28,4	1,144
30,5	1,130
32,8	1,118
35,2	1,108
37,9	1,098
40,7	1,089
43,7	1,081
47,0	1,074
50,5	1,068
54,2	1,062

58,3	1,056
62,6	1,052
67,3	1,047
72,3	1,043
77,7	1,040
83,5	1,037
89,8	1,034
96,5	1,031
103,7	1,028
111,4	1,026
119,7	1,024
128,6	1,022
138,2	1,021
148,6	1,019
159,6	1,018
171,5	1,016
184,3	1,015
198,1	1,014
212,9	1,013
228,8	1,012
245,8	1,011
264,2	1,011
283,9	1,010

Diffusiecorrectiefactoren gebruikt door ISSEP (voor beide meetsystemen ISSEP.1 en ISSEP.2):

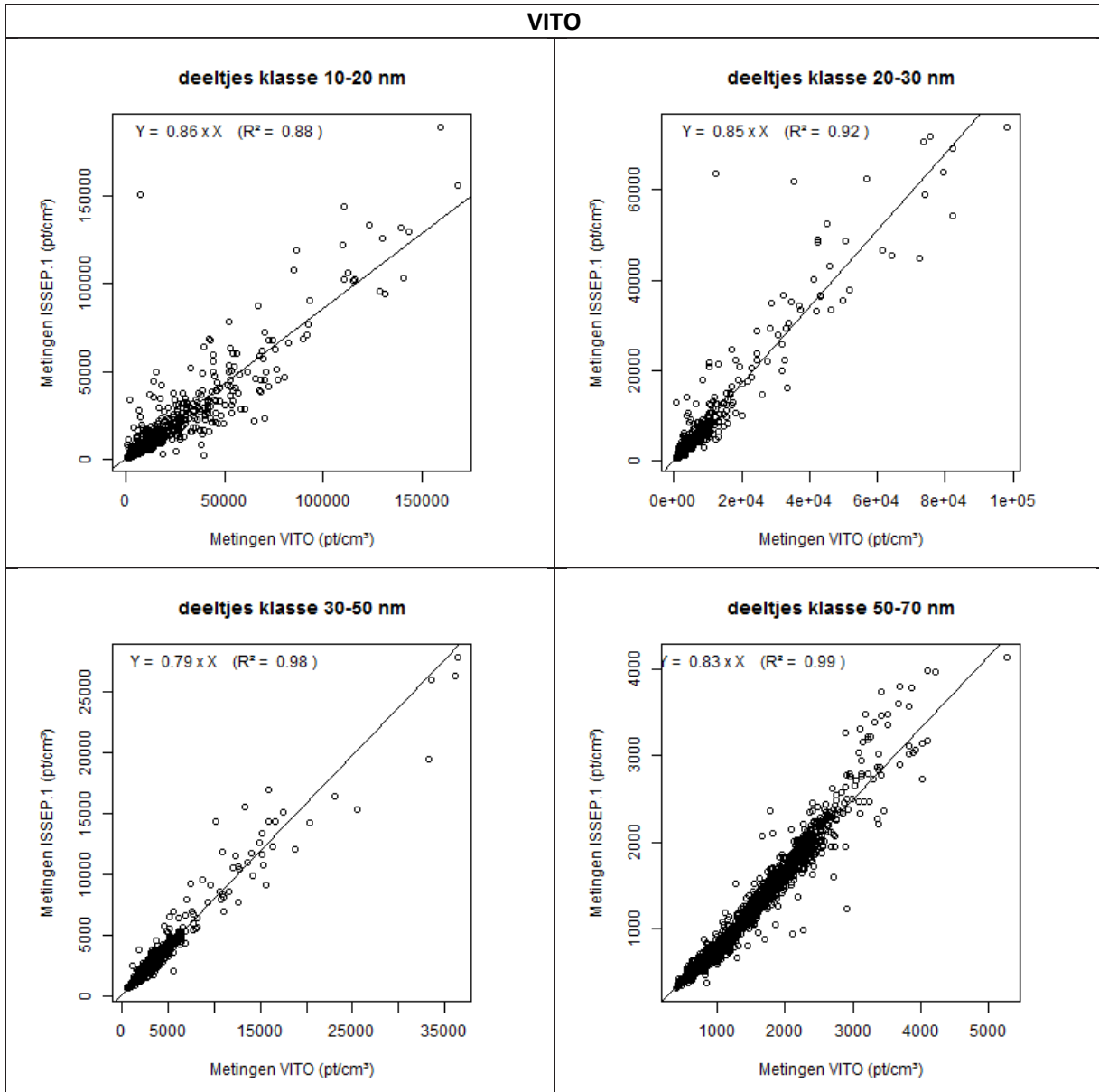
Diameter midsize (nm)	Diffusie correctiefactor
8,748	1,56
9,026	1,49
9,607	1,38
10,227	1,30
10,887	1,23
11,591	1,18
12,340	1,14
13,139	1,11
13,991	1,09
14,899	1,07
15,868	1,06
16,900	1,05
18,002	1,04
19,178	1,03
20,433	1,03

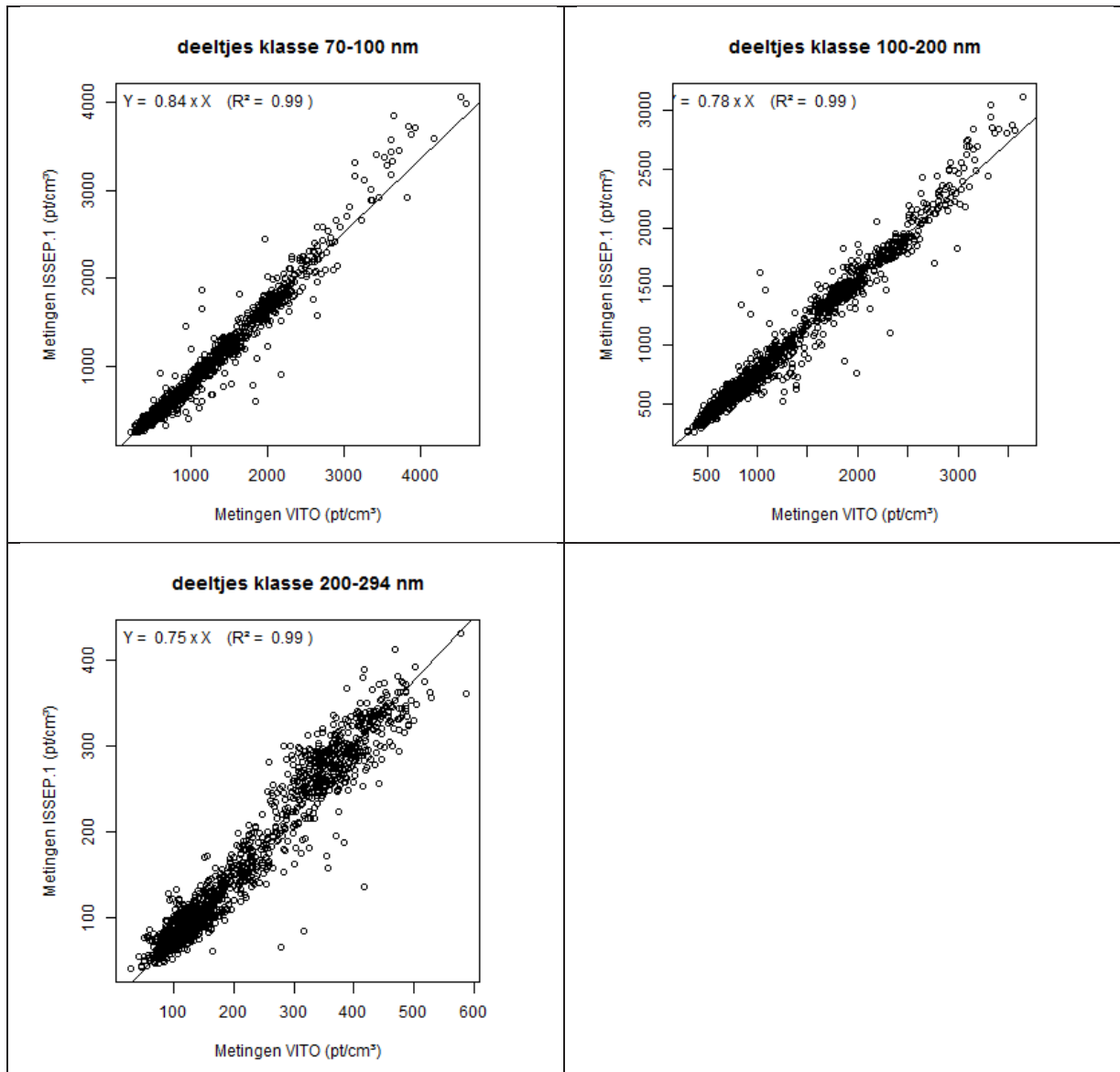
21,772	1,02
23,202	1,02
24,729	1,02
26,361	1,02
28,105	1,02
29,969	1,02
31,963	1,02
34,097	1,02
36,381	1,02
38,826	1,02
41,447	1,02
44,256	1,02
47,27	1,02
50,505	1,02
53,98	1,02
57,773	1,02
61,734	1,02
66,061	1,02
70,725	1,02
75,757	1,02
81,192	1,02
87,069	1,02
93,432	1,02
100,33	1,02
107,819	1,02
115,962	1,02
124,831	1,02
134,506	1,02
145,079	1,02
156,654	1,02
169,352	1,02
183,309	1,02
198,679	1,02
215,641	1,02
234,397	1,02
255,177	1,02
278,245	1,02
303,898	1,02
332,476	1,02
364,363	1,02
399,993	1,02
439,856	1,02
484,505	1,02
534,566	1,02

590,746	1,02
653,843	1,02
724,763	1,02
804,534	1,02
848,119	1,02

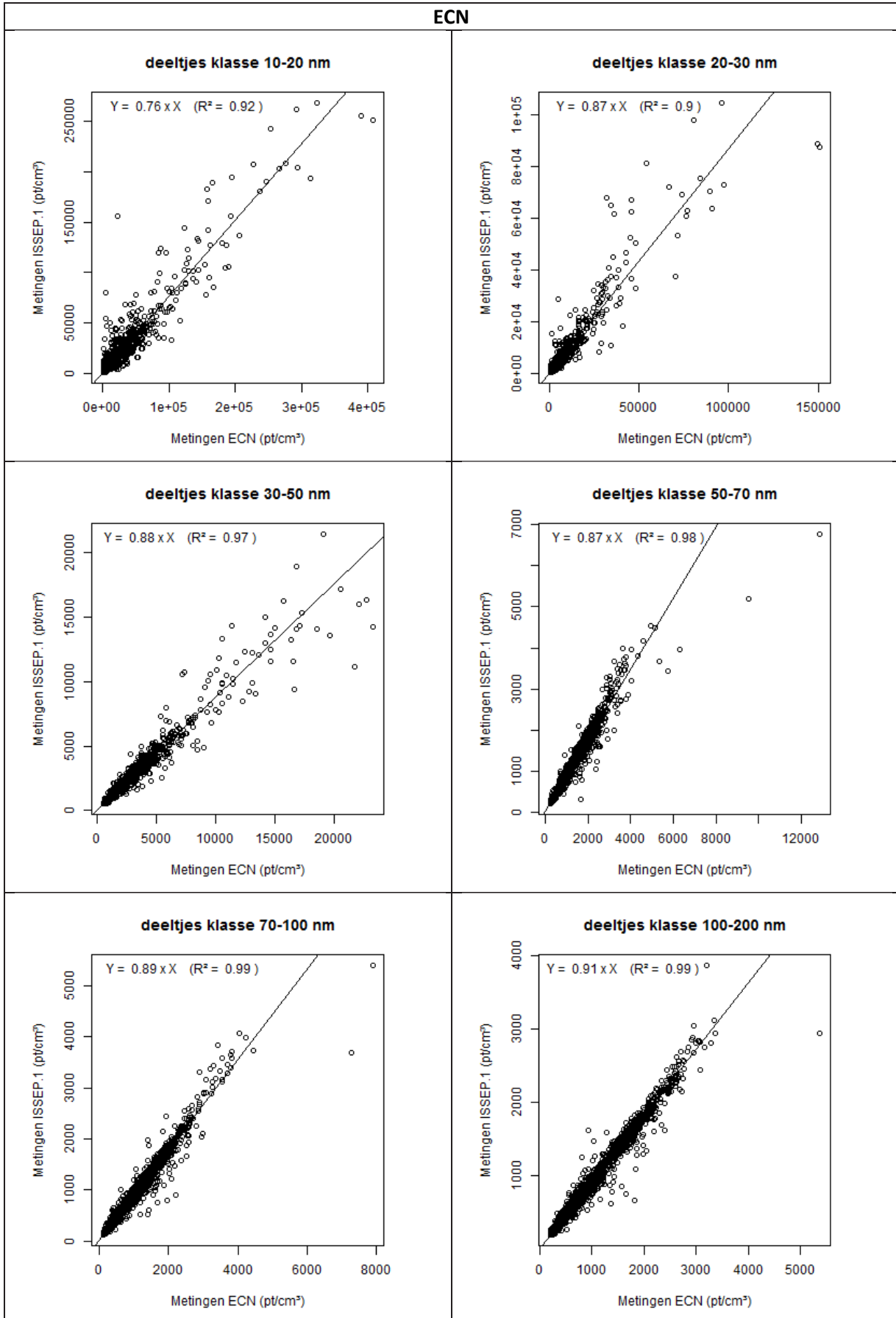
BIJLAGE B

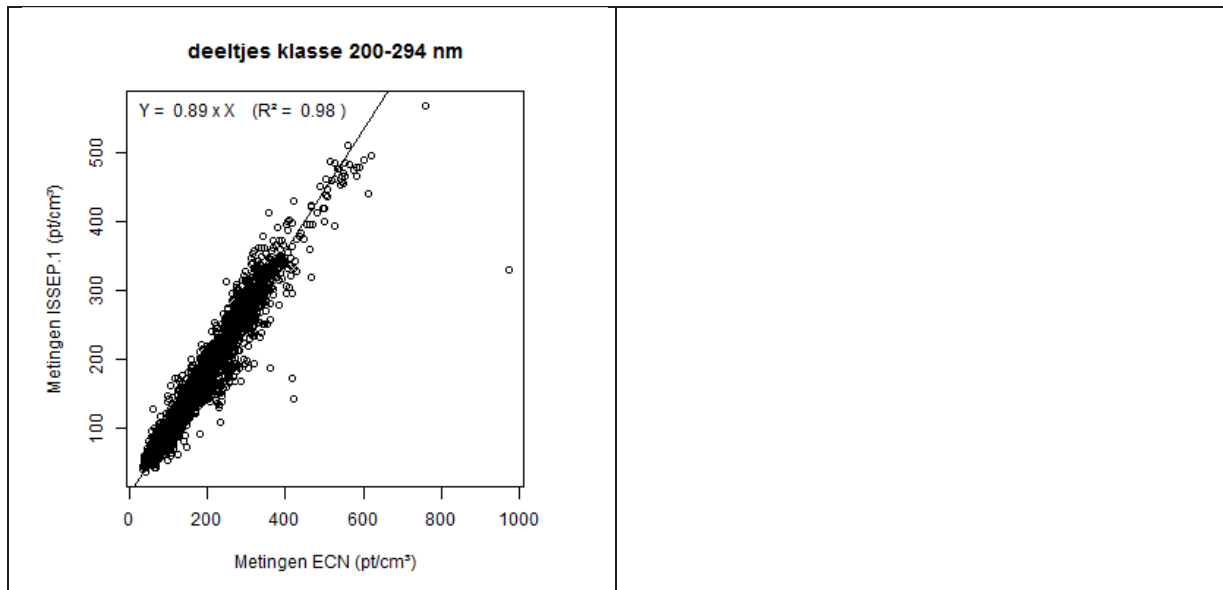
Scatterplots van simultane metingen t.o.v. ISSEP.1 metingen per deeltjesklasse. Lineaire herschalingsmodellen zonder intercept zijn weergegeven in de grafieken.



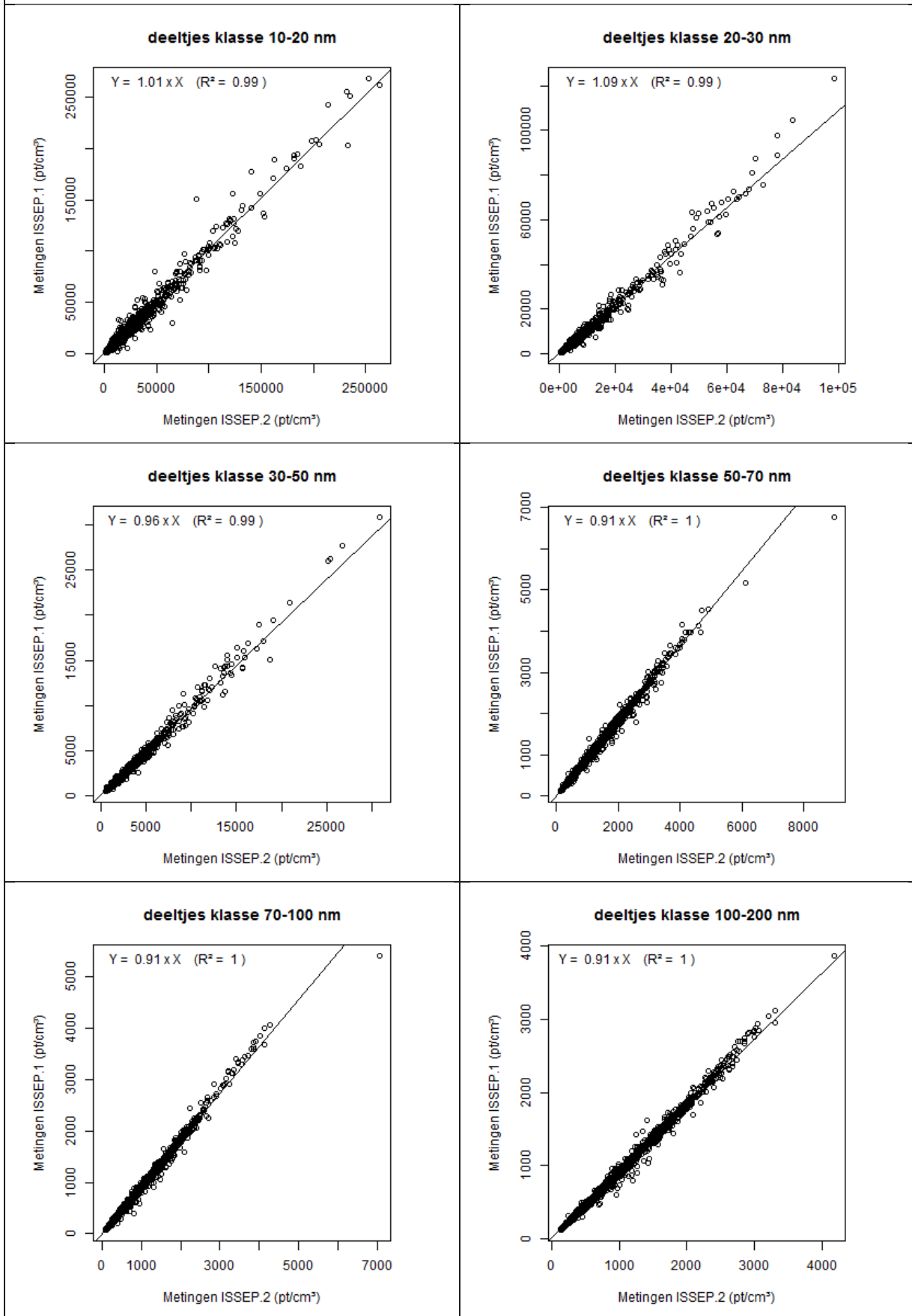


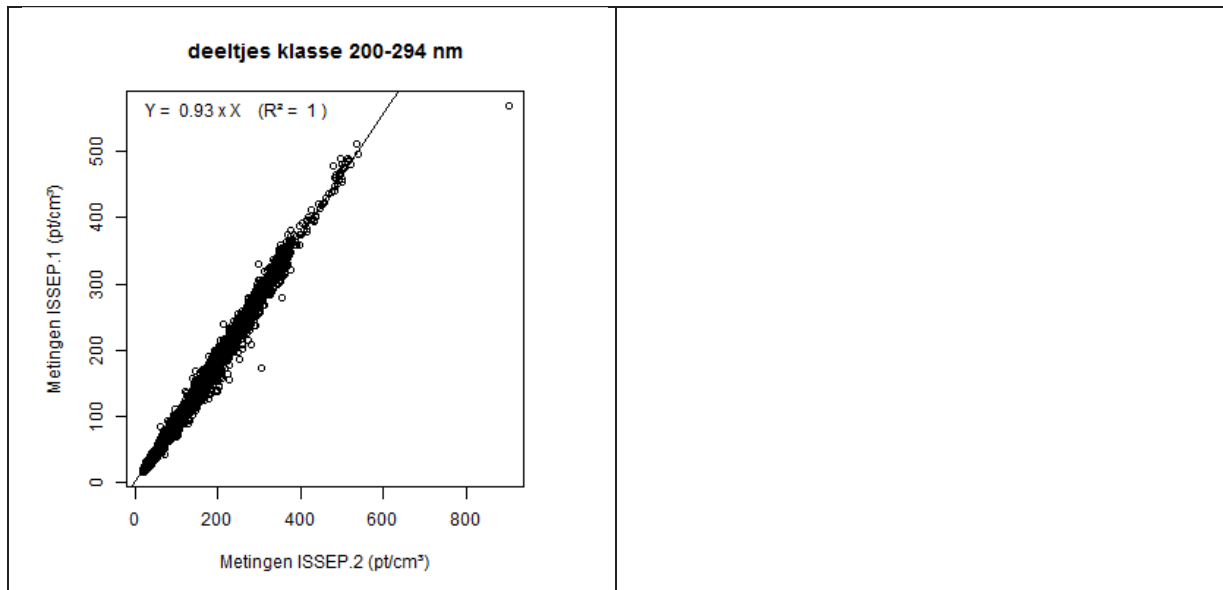
ECN





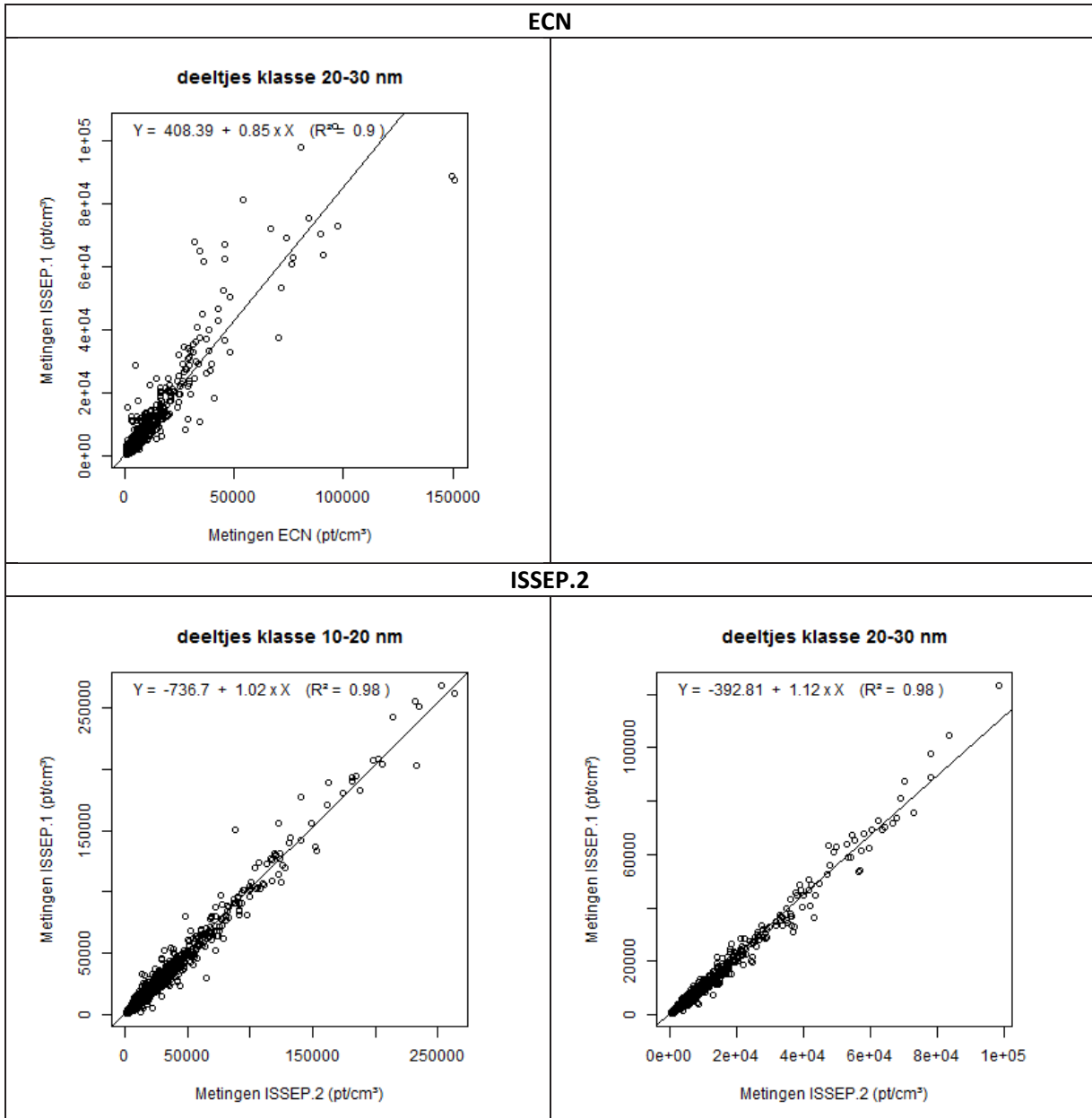
ISSEP.2





BIJLAGE C

Scatterplots van simultane metingen ECN en ISSEP.2 t.o.v. ISSEP.1 metingen voor deeltjesklasse 20-30 nm, en 10-20 nm en 20-30 nm voor vergelijking met ECn en ISSEP.2 respectievelijk. Het lineaire herschalingsmodel met intercept is weergegeven in de grafiek.



BIJLAGE D

Windrozen (10 m boven maaiveld; Melsbroek) voor de meetperiode per dag van de week.

