

City of Things project: sensoren voor luchtkwaliteit Overzicht van een pilootproject Kampenhout

Jelle Hofman, Jan Peters, Martine Van Poppel

Studie uitgevoerd in opdracht van: Gemeente Kampenhout
2021/HEALTH/R/2589

Oktober 2021



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

SAMENVATTING

In dit rapport worden de resultaten van het pilootproject met sensoren voor luchtkwaliteit in Kampenhout besproken. In Kampenhout werd een tijdelijk sensornetwerk opgezet om de impact van verkeer sturende maatregelen (o.a. tijdelijke invoering van een schoolstraat) op de lokale luchtkwaliteit te beoordelen.

INHOUD

Samenvatting	I
Inhoud	II
HOOFDSTUK 1. Locaties	3
HOOFDSTUK 2. Installatie	4
2.1. Sensoren	4
2.2. Montage	4
2.3. Start van de metingen	6
HOOFDSTUK 3. Dashboard	7
3.1. Labels sensoren	7
3.2. Visualisatie Airly	7
3.3. Visualisatie Kunak	7
HOOFDSTUK 4. QA/QC sensorboxen	8
4.1. 4.1 Online opvolging	8
4.2. 4.2 Automatische opvolging Kunak	8
HOOFDSTUK 5. Planning Verkeersscenario's	10
HOOFDSTUK 6. Datakwaliteit	12
6.1. Datakwaliteit voor herschaling	13
6.2. Datakwaliteit na herschaling	19
HOOFDSTUK 7. Analyse van de metingen	23
7.1. Doel metingen	23
7.2. Sensornetwerk en pollutanten	23
7.3. Resultaten	23
7.4. Conclusie Kampenhout	8
HOOFDSTUK 8. Datakwaliteit na de meetcampagne	1
8.1. Tijdreeksen	1
8.2. Sensorperformantie	2
8.3. Herschaling	6
8.4. Conclusie	8
REFERENTIES	1

HOOFDSTUK 1. LOCATIES

Er werden sensoren voorzien op 3 verschillende locaties. De selectie van locaties kwam tot stand in samenspraak met de stuurgroep.

De drie locaties zijn:

- **School:** langs de Aarschotsebaan aan de ingang van de Parkschool (nabij kruispunt met de Terloonstraat) (Aarschotsebaan 130).
- **Omgeving:** langs de Aarschotsebaan, ter hoogte van nummers 94 (omgeving (1)) en 96 (omgeving (2)). Opdeling gemaakt omdat telkens één sensorbox aan een verlichtingspaal werd gemonteerd.
- **Achtergrond:** in de achtertuin van de Parkschool.



HOOFDSTUK 2. INSTALLATIE

2.1. SENSOREN

Er werden sensoren aangekocht van het merk Airly (3 stuks) en het merk Kunak (3 stuks). De sensoren werden paarsgewijs geïnstalleerd op de drie meetlocaties, dus telkens één Airly en één Kunak sensor per locatie.

2.2. MONTAGE

De montage op de verschillende locaties werd als volgt uitgevoerd:

- **School**
 - Montage op paal langs de weg (hoogte 1,5 – 2m):
 - Airly onderaan
 - Kunak bovenaan
 - Windmeter van Kunak helemaal bovenaan
 - Stroomvoorziening: netstroom
 - Foto's:



- **Omgeving**
 - Montage op verlichtingspaal (elke sensor aan afzonderlijke paal), hoogte ca. 2,5 m
 - Stroomvoorziening: zonnepaneel en externe batterij
 - Foto's (Kunak (boven, grotere sensor, kleiner zonnepaneel) en Airly (onder, kleinere sensor, groter zonnepaneel))

Kunak:



Airly:



• **Achtergrond**

- Montage aan hekwerk (zonnepaneel van Airly op pallet op de grond, zonnepaneel Kunak op paal)
- Stroomvoorziening: zonnepaneel en externe batterij
- Foto's:



2.3. START VAN DE METINGEN

De installatie werd uitgevoerd op 10/02/2021. De metingen op locaties omgeving en achtergrond gingen dan van start (onmiddellijk na aansluiting). Op de meetlocatie school was er een probleem met de stroomvoorziening. Dat werd opgelost donderdagavond (metingen Airly beschikbaar). Er was een bijkomend probleem met de Kunak sensor (externe batterij moet aangesloten zijn, ook al is er aansluiting op elektriciteitsnet). Dit werd vrijdag 12/02/2021 in orde gebracht.

Vanaf 12/02/2021 11u waren alle sensoren operationeel. Een overzicht van de looptijd van de installatie en looptijd van de sensoren wordt weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht installatiedatum en looptijd van de metingen in Kampenhout.

Locatie	Sensor	Start metingen	Einde metingen	Start Analyse	Einde Analyse
Omgeving	K-A14 VITO 2	10/02/2021 12u	17/5/2021 (vm)	12/2/2021	17/5/2021
Omgeving	Airly 5788	10/02/2021 13u	17/5/2021 (vm)	12/2/2021	17/5/2021
Achtergrond	K-A14 VITO 1	10/02/2021 16u	17/5/2021 (vm)	12/2/2021	17/5/2021
Achtergrond	Airly 4654	10/02/2021 16u	17/5/2021 (vm)	12/2/2021	17/5/2021
School	K-A14 VITO 3	12/02/2021 10u	17/5/2021 (vm)	12/2/2021	17/5/2021
School	Airly 5842	11/02/2021 17u	17/5/2021 (vm)	12/2/2021	17/5/2021

HOOFDSTUK 3. DASHBOARD

Voor het opvolgen van de metingen kan gebruik gemaakt worden van visualisaties op de platformen van Airly en Kunak (dus voor elk type sensor afzonderlijk). Hieronder vind je labels van sensoren, login gegevens en een korte beschrijving van de visualisaties.

3.1. LABELS SENSOREN

Locatie	Airly		Kunak
	map	dashboard	kunakcloud
School	School	39495 – School, Kampenhout	K-A14 VITO3
Omgeving	Omgeving	39496 – Omgeving, Kampenhout	K-A14 VITO 2
Achtergrond	Achtergrond	39497 – Achtergrond, Kampenhout	K-A14 VITO 1

3.2. VISUALISATIE AIRLY

Onderscheid tussen kaart (publiek) en dashboard (login), te raadplegen op:

- Kaart: <https://airly.org/map/en/>:
- Dashboard: <https://airly.org/panel/reports> (login: vito.air; pwd: vito.air@airly)
 - Downloaden van data
 - Plotten van data

3.3. VISUALISATIE KUNAK

Alle data verzameld op de kunakcloud. Te raadplegen via <https://kunakcloud.com/> (login: vito.air; pwd: vito.air@KUNAK1).

- Kaart: overzicht, doorklikken op sensor
- Dashboard, data download
- Configuratie sensoren
- User-info

HOOFDSTUK 4. QA/QC SENSORBOXEN

4.1. 4.1 ONLINE OPVOLGING

Tijdens de meetcampagne was er een online opvolging van de metingen via de dashboards van Airly en Kunak (zie §3.2 en §3.3). De controle was erop gericht om goed functioneren van sensorbox en sensoren te checken (data beschikbaar en geen uitzonderlijke waarden of plotse veranderingen) en nagaan of er alarmen worden weergegeven. Een overzicht van de checks wordt in Tabel 2 weergegeven.

Tabel 2: QA/QC opvolging tijdens de meetcampagne in Kampenhout.

sensorbox	fabrikant	ID	08/02	10/02	12/02	15/02	17/02	22/02	01/03	02/03	04/03	05/03	08/03	10/03	15/03
school	Airly	Airly_vito_1	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK *	OK	OK	OK	OK	OK	OK
achtergrond	Airly	Airly_vito_3	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
omgeving	Airly	Airly_vito_2	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
achtergrond	Kunak	K-A14 VITO 1	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
omgeving	Kunak	K-A14 VITO 2	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK**
school	Kunak	K-A14 VITO 3	NOK	NOK	OK vanaf 11u	OK	OK	OK	NOK *	OK	OK	OK	OK	OK	OK

sensorbox	fabrikant	ID	18/03	22/03	25/03	29/03	02/04	12/04	16/04	19/04	26/04	05/05	12/05	17/05
school	Airly	Airly_vito_1	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
achtergrond	Airly	Airly_vito_3	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
omgeving	Airly	Airly_vito_2	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
achtergrond	Kunak	K-A14 VITO 1	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
omgeving	Kunak	K-A14 VITO 2	OK	NOK **	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
school	Kunak	K-A14 VITO 3	OK	NOK ***	NOK ***	NOK ***	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

*1/3/2021: Stroomonderbreking bij 2/6 devices sinds 25/2 13u.

** 15/3/2021: Obstructie PM sensor opgelost door reinigen inlet en outlet sensor

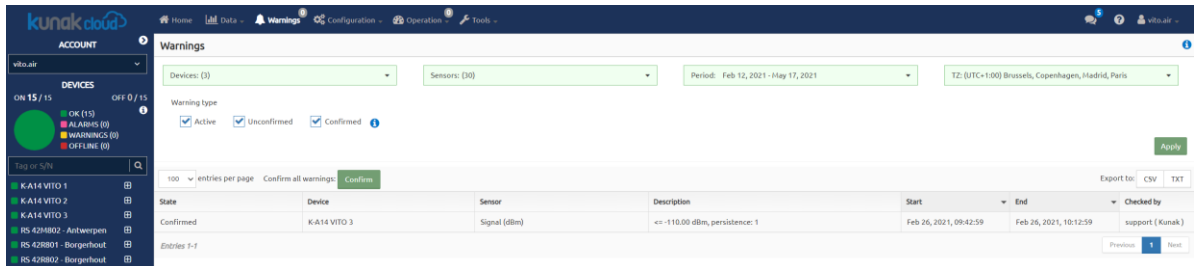
***22/3/2021: Probleem met PM sensor (Alphasense OPC-N3). Er werd door Kunak een nieuwe sensor opgestuurd die op 30/3 werd vervangen.

Zoals aangegeven werd een stroomonderbreking ter hoogte van de schoollocatie en problemen met de PM sensor van Kunak 3 ondervonden, maar deze resulteerden in een beperkt dataverlies (zie verder bij analyse).

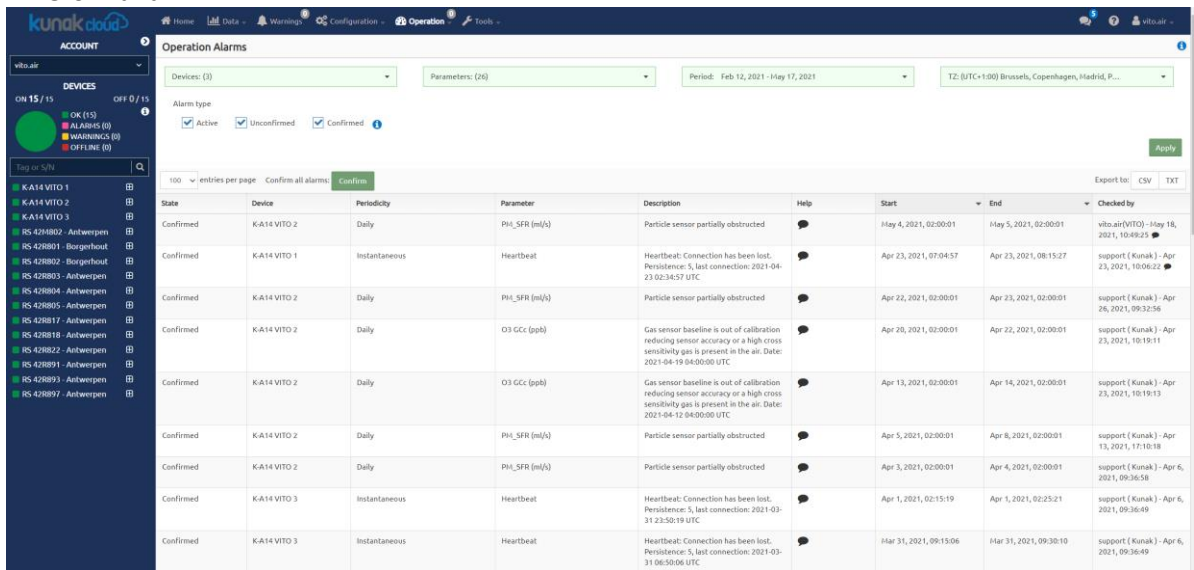
4.2. 4.2 AUTOMATISCHE OPVOLGING KUNAK

Kunak voorziet een geautomatiseerde opvolging van de sensorboxen via het Kunak Cloud webplatform. Hier wordt een onderscheid gemaakt tussen “warnings” en “operation alarms”. Warnings zijn threshold exceedances (limietwaarden, RH, ... (zelf instelbaar)) en alarms zijn effectieve systeem alerts (batterij, flow, connectiviteit,...).

Tijdens de meetcampagne werd er melding gemaakt van 1 “Warning” voor Kunak 3 waarbij er sprake was van een kortstondige communicatieprobleem (beëindigd <1 uur).



Via “Operation Alarms” werd melding gemaakt van kortstondige communicatieproblemen (dekking mobiel netwerk) of problemen met obstructie flow PM sensor (zoals hierboven aangehaald). De dekkingsproblemen waren vaak kortstondig (<1u) en vormen geen probleem aangezien de sensor de data op een later tijdstip doorstuurt. De obstructieproblemen van de PM sensor resulteerden in (1) kortstondige fluctuaties van de flow waarvan ze automatisch recoveren of (2) een obstructie die kan worden tegengegaan door de in en outlet van de sensor te reinigen/checken op obstructies (eenmalig gedurende deze campagne). Alle meldingen werden opgelost en “confirmed” door ofwel VITO of Kunak.

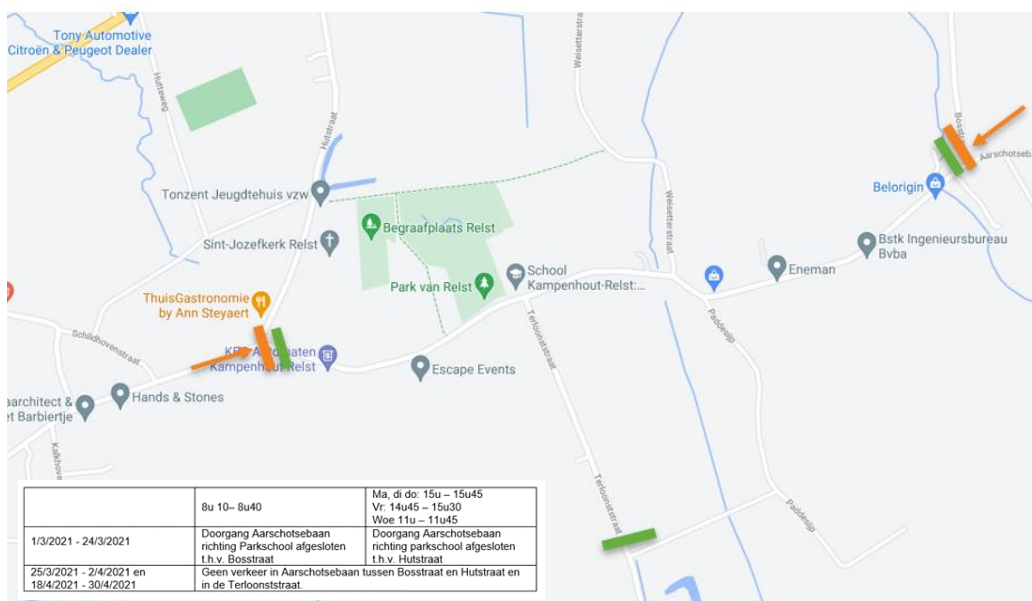


HOOFDSTUK 5. PLANNING VERKEERSSCENARIO'S

De geïmplementeerde verkeersscenario's bestonden uit:

- Verlof: Schoolvakanties waarbij er geen extra verkeersbijdrage (van lokaal schoolgerelateerd verkeer) op de schoollocatie wordt verwacht
- Huidige situatie/baseline: De onveranderde verkeerssituatie tijdens schooldagen
- Knip in 1 rijrichting (oranje):
 - Ochtend: Afsluiten (enkel) richting Parkschool t.h.v. Bosstraat,
 - Middag/Avond: Afsluiten (enkel) richting Parkschool ter hoogte van Hulststraat.
 Bij dit scenario wordt dus telkens 1 rijrichting van de Aarschotsebaan afgesloten.
- Schoolstraat (groen): Afsluiten alle verkeer richting Parkschool t.h.v. Bosstraat, Hulststraat en Terloonstraat. Bij dit scenario wordt dus al het verkeer t.h.v. Parkschool geweerd (zowel lokaal schoolgerelateerd verkeer als doorgaand verkeer).

De locaties van de afsluitingen gedurende de scenario's worden afgebeeld in Figuur 1. De uren waarop de verkeersscenario's (knip en schoolstraat) worden geïmplementeerd zijn 8:10-8:40u 's ochtends en 11-11:45u (woensdag), 15-15:45u (maandag-donderdag) en 14:45-15:30 (vrijdag).



Figuur 1: Visualisatie verkeersscenario's ter hoogte van Aarschotsebaan, Bosstraat, Hulststraat en Terloonstraat. De locaties van de (enkelrichtings)afsluitingen van de knip worden weergegeven in oranje terwijl de afsluiten van de schoolstraat worden aangeduid in groen.

De gevolgde timing van de verschillende scenario's wordt dan weer weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Timing van de geïmplementeerde verkeersscenario's gedurende de meetcampagne in Kampenhout.

ma	di	wo	do	vr	za	zo	Scenario
01/02/2021	02/02/2021	03/02/2021	04/02/2021	05/02/2021	06/02/2021	07/02/2021	Co-locatie VMM
08/02/2021	09/02/2021	10/02/2021	11/02/2021	12/02/2021	13/02/2021	14/02/2021	huidige situatie
15/02/2021	16/02/2021	17/02/2021	18/02/2021	19/02/2021	20/02/2021	21/02/2021	Verlof
22/02/2021	23/02/2021	24/02/2021	25/02/2021	26/02/2021	27/02/2021	28/02/2021	huidige situatie
01/03/2021	02/03/2021	03/03/2021	04/03/2021	05/03/2021	06/03/2021	07/03/2021	Knip
08/03/2021	09/03/2021	10/03/2021	11/03/2021	12/03/2021	13/03/2021	14/03/2021	Knip
15/03/2021	16/03/2021	17/03/2021	18/03/2021	19/03/2021	20/03/2021	21/03/2021	Knip
22/03/2021	23/03/2021	24/03/2021	25/03/2021	26/03/2021	27/03/2021	28/03/2021	Knip /Schoolstraat
29/03/2021	30/03/2021	31/03/2021	01/04/2021	02/04/2021	03/04/2021	04/04/2021	SchoolstraatVerlof
05/04/2021	06/04/2021	07/04/2021	08/04/2021	09/04/2021	10/04/2021	11/04/2021	Verlof
12/04/2021	13/04/2021	14/04/2021	15/04/2021	16/04/2021	17/04/2021	18/04/2021	Verlof
19/04/2021	20/04/2021	21/04/2021	22/04/2021	23/04/2021	24/04/2021	25/04/2021	Schoolstraat
26/04/2021	27/04/2021	28/04/2021	29/04/2021	30/04/2021	01/05/2021	02/05/2021	Schoolstraat
03/05/2021	04/05/2021	05/05/2021	06/05/2021	07/05/2021	08/05/2021	09/05/2021	huidige situatie
10/05/2021	11/05/2021	12/05/2021	13/05/2021	14/05/2021	15/05/2021	16/05/2021	huidige situatie

De vooropgestelde planning wijzigde licht door:

- Een bijkomende week schoolverlof naar aanleiding van de COVID-19 pandemie (29/3 – 4/4), waardoor 5 geplande schoolstraat-dagen overgingen naar verlof
- Op 19/4 werd de schoolstraat niet afgesloten in de ochtend (beschouwd als baseline), maar wel in de namiddag

De meetcampagne is verder zoals gepland verlopen.

HOOFDSTUK 6. DATAKWALITEIT

Aangezien “goedkopere” sensordata niet kan beschouwd worden als referentiemeting, is het van belang om de datakwaliteit en gevoeligheden (ten opzichte van vb. temperatuur, relatieve vochtigheid en andere pollutanten) van de gekozen sensorsystemen na te gaan. Om de datakwaliteit tijdens de meetcampagne in Kampenhout te kunnen beoordelen en eventueel te kunnen verbeteren, werd er voorafgaand gedurende ongeveer twee weken (van 22/01/2021 tot 5/2/2021) een co-locatie meting uitgevoerd waarbij de sensorboxen opgesteld stonden op een meetstation van VMM (station 42R801, Borgerhout, stedelijke achtergrond).

Bijkomende data-processing: herschaling

Op basis van deze vergelijking konden we nagaan of een bijkomende herschaling nodig was. Op basis van deze data werden herschalingsmodellen opgesteld en toegepast op de sensordata, om de sensor- en referentiemetingen zo goed mogelijk te laten overeenkomen.

Datakwaliteitsparameters

Volgende parameters werden zowel op uurlijks als dagelijkse meetresolutie berekend om inzicht te krijgen in de datakwaliteit:





- R^2 : waarde die tussen 0 en 1 ligt en waarbij 1 de best mogelijke waarde is. Wanneer de R^2 gelijk is aan 1 liggen de meetpunten op een perfecte lijn en dit betekent dat alle variantie in de sensormetingen door de gemeten concentraties van de referentieapparatuur kunnen worden verklaard.
- Correlatie (COR): waarde tussen 0 en 1 die de mate van correlatie tussen sensor en referentie weergeeft
- Root Mean Squared Error (RMSE): vierkantswortel van het gemiddelde van het kwadraat van alle fouten tussen sensor en referentiemeting. Een vaak gebruikte foutstatistiek die erg afhankelijk is van uitschieters (outliers). Deze is best zo klein mogelijk.
- Mean Absolute Error (MAE): de gemiddelde absolute fout tussen sensor en referentiemeting, en deze ligt best zo dicht mogelijk bij nul. De MAE is te interpreteren als de gemiddelde afwijking tussen sensor en referentiemeting.
- Mean Bias Error (MBE): de gemiddelde fout tussen sensor en referentiemeting. Deze is niet absoluut en kan dus zowel positief (overschatting sensor) als negatief (onderschatting sensor) zijn.
- Expanded Uncertainty:
 - Niet-parametrisch/experimenteel (U_{exp}): zoals voorgesteld door VMM (95 percentiel MAE rond limietwaarde) en relatief uitgedrukt tov die limietwaarde (%)
 - Parametrisch (W_{cm}): zoals voorgesteld door JRC ([Demonstration Equivalence](#)) en berekend via de [Equivalence Tool v3.1 spreadsheet](#).





Onderlinge sensorovereenkomst/precisie: berekend als minimum en maximum correlatie (COR) en Mean Absolute Error (MAE) tussen de sensoren onderling.

Beoordeling van de datakwaliteit

Momenteel liggen nog geen datakwaliteitsvereisten vast (deze worden wel ontwikkeld binnen de Europese werkgroep CEN/WG42). Om de berekende parameters te beoordelen maken we gebruik van voorlopige vereisten (voor veldtesten) zoals opgesteld door huidige CEN/WG42 en van de classificatie die door VMM werd opgesteld in het kader van DENCITY project (Tabel 3).

Tabel 3: Datakwaliteitsklassen voor precisie (boven) en niet-parametrische expanded uncertainty (onder) zoals opgesteld door VMM in het Dencity project (<https://www.imeccityofthings.be/nl/projecten/dencity>).

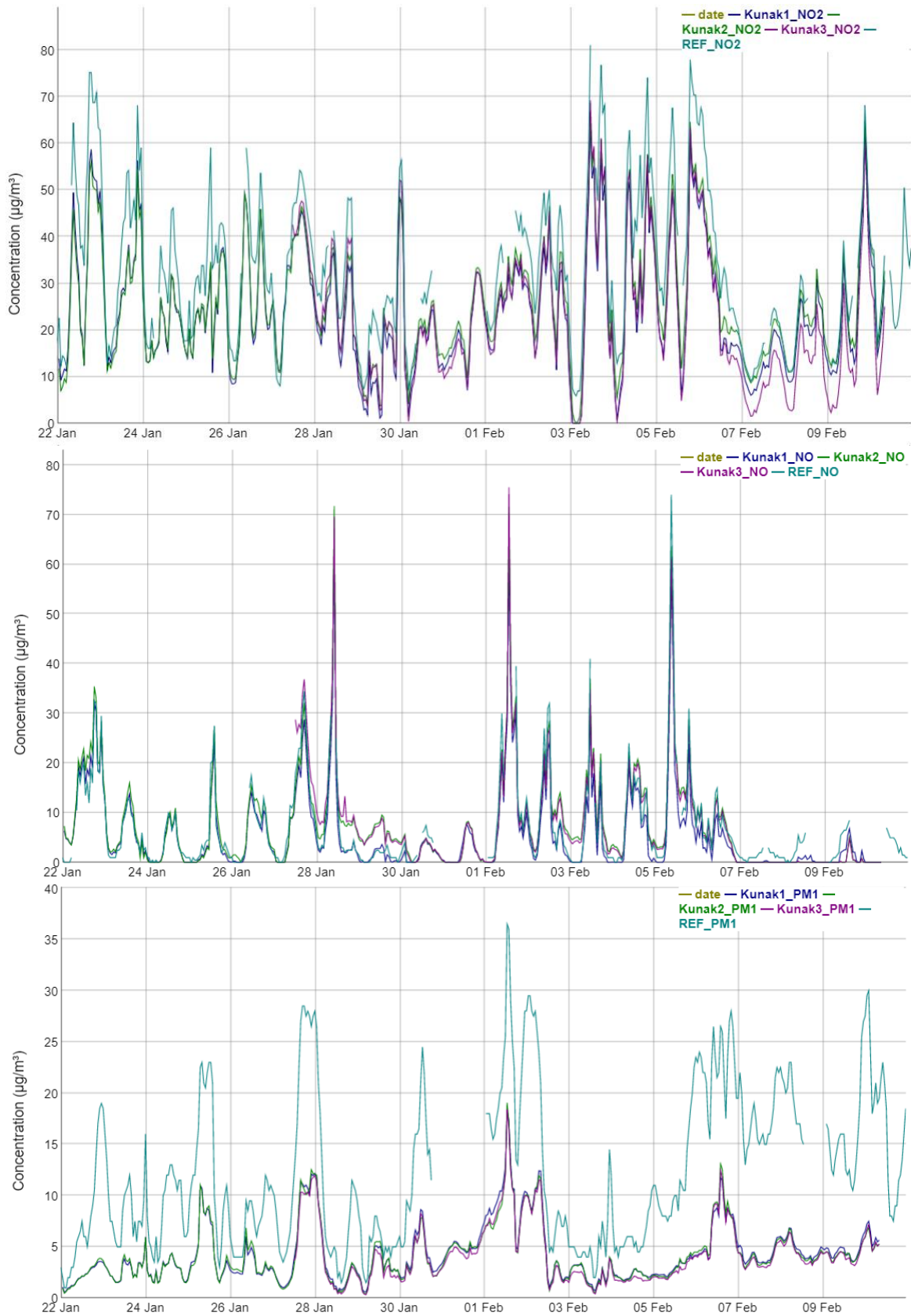
Class title	% difference between sensors
Qualitative	<10
Supplementary	10-25 
Sensitizing	25-50 
Inadequate	50-100 
Out of category	>100 

Class title	PM: % difference from equivalent method	Gasses: % difference from reference method
Qualitative	<15	<15
Supplementary 	15-50	15-25
Sensitizing 	50-100	25-75
Inadequate 	100-150	75-200
Out of category 	>150	>200

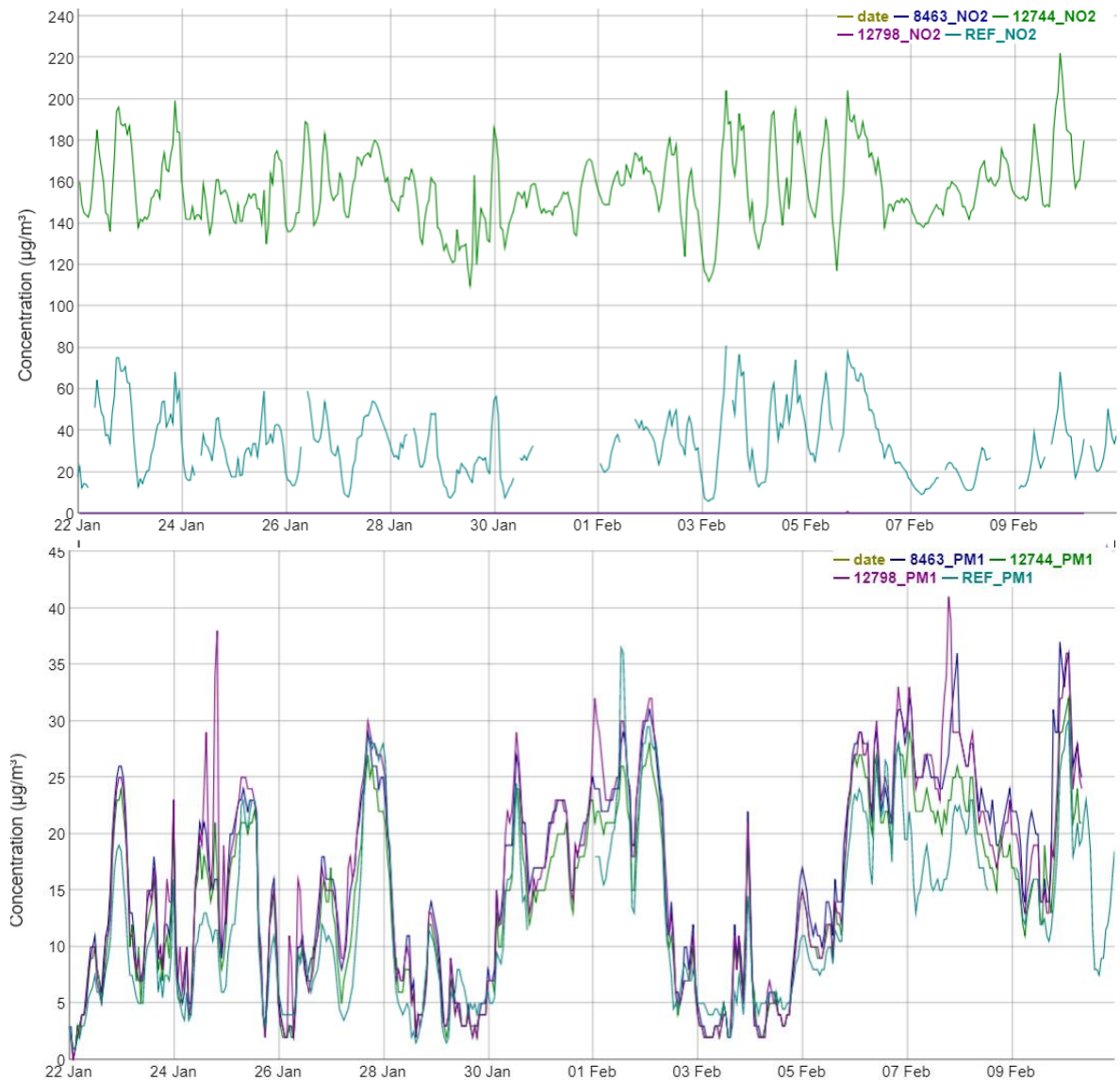
Verder beoordelen we of de datakwaliteitsparameters verbeteren wanneer een bijkomende data-processing (herschaling) wordt toegepast

6.1. DATAKWALITEIT VOOR HERSCHALING

Een overzicht van de vergelijkbaarheid tussen de sensormetingen en referentiemetingen (voor herschaling) gedurende de co-locatiecampagne wordt hieronder weergegeven in enkele tijdreeksen voor de belangrijkste verkeersgerelateerde pollutanten NO₂, NO en PM₁ afkomstig van Kunak (Figuur 2) en Airly (Figuur 3). Uit deze tijdreeksen wordt duidelijk dat de sensormetingen de referentiemetingen goed volgen, maar dat er soms aanzienlijke onder/overschatting wordt waargenomen (vb. Kunak PM₁). Daarnaast zien we bovendien een goede precisie (onderlinge sensorafwijking) tussen de sensoren wat erg belangrijk is voor het beoogde meetopzet, aangezien we verschillende sensorlocaties tov elkaar willen vergelijken.



Figuur 2: Tijdreeksen van NO_2 , NO en PM_1 sensor- (Kunak) en referentiemetingen (42R801) gedurende de eerste co-locatiecampagne (22/1/2021-10/2/2021).



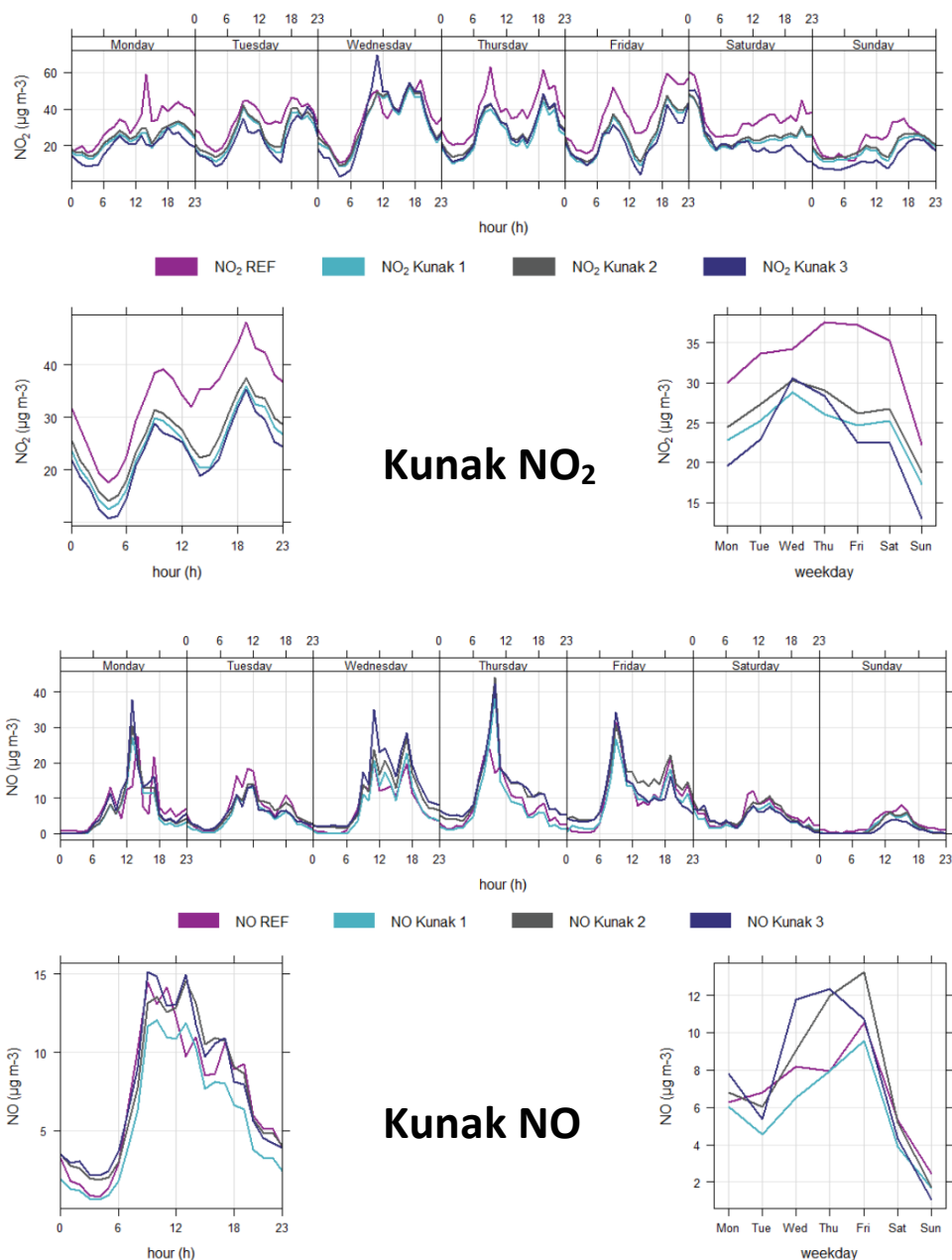
Figuur 3: Tijdreeksen van NO₂ en PM₁ sensor- (Airly) en referentiemetingen (42R801) gedurende de eerste co-locatiecampagne (22/1/2021-10/2/2021). Tijdens de co-locatie is enkel Airly NO₂ data van 12744 beschikbaar.

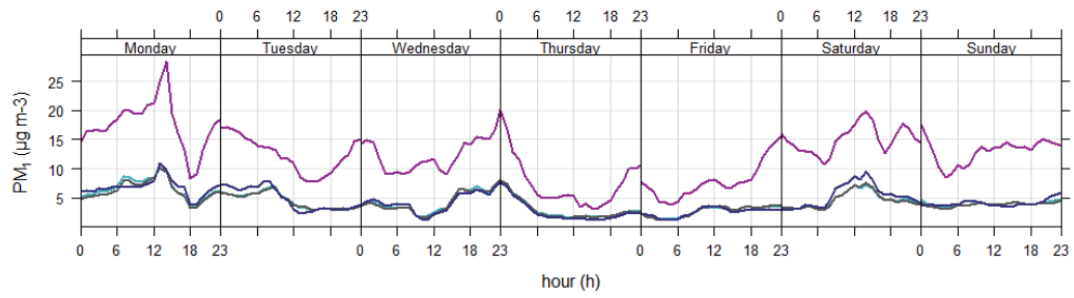
Een overzicht van geassocieerde datakwaliteitsparameters (R^2 , COR, RMSE, MAE, MBE, Uexp) wordt weergegeven voor NO₂, NO, PM₁, PM_{2.5} en PM₁₀ in Tabel 4. Dezelfde statistieken werden ook berekend op dagelijks-geaggregeerde data en kunnen worden teruggevonden in Appendix 1.

Tabel 4: Datakwaliteit (R^2 , COR, RMSE, MAE, MBE, U_{exp}) van de vergelijking tussen de ruwe en herschaalde ($_{cal}$) data van elke sensorbox (3 x Kunak en 3 x Airly) en de co-locatie referentiemetingen voor NO_2 , NO, PM_{10} , $PM_{2.5}$ en PM_{10} berekend op een uurlijkse meetresolutie. Alle herschaling zijn gebeurd op basis van een slope kalibratie ($sensor=a*REF$), behalve voor NO_2 van Airly (*) waar een multilinear model werd toegepast ($sensor=a*REF+b*Temp+c$).

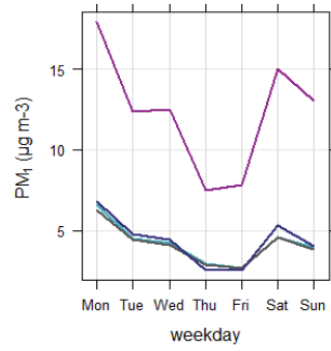
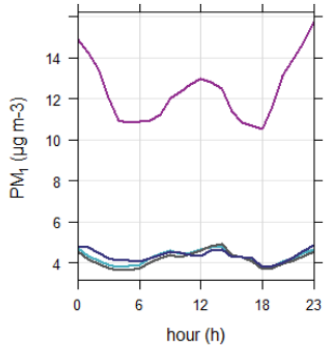
	NO_2			NO_2_{cal}			NO_2			$NO_2_{cal}^*$		
	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798
R^2	0.92	0.94	0.95	0.92	0.94	0.95	0.00	0.69	0.02			0.84
COR	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.97	NA	0.83	0.14			0.92
RMSE	10.30	7.81	10.26	5.42	4.37	5.89	37.17	123.73	37.16			7.08
MAE	9.04	6.42	9.50	4.01	3.38	4.67	33.44	123.30	33.44			5.29
MBE	-9.04	-6.38	-9.50	-0.74	1.04	-1.61	-33.44	123.30	-33.44			0.00
U_{exp}	42.95	33.00	39.66	26.20	25.11	26.77	110.07	364.54	110.07			36.82
	NO			NO_{cal}								
	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3						
R^2	0.98	0.90	0.88	0.98	0.90	0.88						
COR	0.99	0.95	0.94	0.99	0.95	0.94						
RMSE	3.14	3.13	3.39	1.53	3.15	3.52						
MAE	2.21	2.52	2.66	1.20	2.54	2.77						
MBE	-2.16	0.58	0.64	-0.91	0.88	1.12						
U_{exp}	27.76	15.71	15.71	8.87	12.27	12.27						
	PM_{10}			$PM_{10_{cal}}$			PM_{10}			$PM_{10_{cal}}$		
	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798
R^2	0.73	0.73	0.75	0.73	0.73	0.75	0.85	0.87	0.82	0.85	0.87	0.82
COR	0.86	0.85	0.87	0.86	0.85	0.87	0.92	0.94	0.91	0.92	0.94	0.91
RMSE	10.67	10.83	11.01	4.75	4.87	4.83	4.85	3.14	5.31	3.01	2.75	3.35
MAE	9.05	9.23	9.47	3.59	3.71	3.65	3.91	2.50	3.95	2.33	2.16	2.30
MBE	-9.05	-9.23	-9.47	0.24	0.03	-0.17	3.30	1.39	3.35	0.49	0.44	0.40
U_{exp}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	$PM_{2.5}$			$PM_{2.5_{cal}}$			$PM_{2.5}$			$PM_{2.5_{cal}}$		
	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798
R^2	0.28	0.22	0.25	0.28	0.22	0.25	0.81	0.84	0.79	0.81	0.92	0.79
COR	0.53	0.47	0.50	0.53	0.47	0.50	0.90	0.92	0.89	0.90	0.96	0.89
RMSE	9.17	9.62	9.42	9.94	10.84	10.14	16.37	11.72	16.45	3.69	1.58	3.93
MAE	7.51	8.04	7.79	7.73	8.24	7.91	13.58	9.63	13.45	3.00	1.11	3.10
MBE	-5.65	-5.61	-5.84	1.14	1.23	1.06	13.06	8.63	12.92	-0.01	0.43	-0.02
U_{exp}	68.31	70.53	69.85	91.33	93.94	84.63	97.75	71.08	96.67	18.67	NA	16.54
	PM_{10}			$PM_{10_{cal}}$			PM_{10}			$PM_{10_{cal}}$		
	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Kunak_1	Kunak_2	Kunak_3	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798	Airly_8463	Airly_12744	Airly_12798
R^2	0.28	0.22	0.25	0.15	0.11	0.12	0.55	0.56	0.52	0.55	0.56	0.52
COR	0.53	0.47	0.50	0.38	0.33	0.34	0.74	0.75	0.72	0.74	0.75	0.72
RMSE	9.17	9.62	9.42	13.02	14.11	13.63	20.37	13.71	19.99	8.26	8.94	8.71
MAE	7.51	8.04	7.79	11.47	12.52	12.10	16.28	11.28	15.85	6.83	7.36	7.20
MBE	-5.65	-5.61	-5.84	-6.11	-7.10	-6.65	13.55	5.81	12.70	-0.31	-0.62	-0.31
U_{exp}	68.31	70.53	69.85	39.91	47.14	43.75	47.00	47.00	47.00	24.24	24.24	24.24

Algemeen kan gesteld worden dat een goede correlatie tussen sensor en referentiemetingen wordt waargenomen voor NO₂, NO en PM₁, maar dat er soms sprake is van een aanzienlijke onder/overschatting bij hogere concentraties (vb Kunak PM₁). Voor PM_{2.5} en PM₁₀ zijn de correlaties veel slechter, vooral voor de sensoren van Kunak. Deze worden dan ook niet verder meegenomen in de analyse. Airly vertoont dan weer non-valid NO₂ data voor 2 sensoren en erg onnauwkeurige data voor de 3^e met een gemiddelde fout van 123.30 µg m⁻³). De beste ruwe datakwaliteit voor NO₂ (R² = 0.92 - 0.95, MAE = 6.42 - 9.5) en NO (R² = 0.88 - 0.98, MAE = 2.21 - 2.66) wordt waargenomen bij de Kunak sensoren, terwijl Airly het beste lijkt te presteren voor PM₁ (R² = 0.82 - 0.87, MAE = 2.5 - 3.95), PM_{2.5} (R² = 0.79 - 0.84, MAE = 9.63 - 13.58) en PM₁₀ (R² = 0.52 - 0.56, MAE = 11.28 - 16.28) (Tabel 4). Bovendien is de vergelijkbaarheid tussen de sensoren (precisie) goed wat erg belangrijk is in meetcampagnes waarbij we verschillende sensorlocaties vergelijken (vb Kampenhout en Sint-Niklaas). Voorgaande observaties worden ook bevestigd wanneer we de uurlijks en daggemiddelde temporele dynamiek evalueren voor NO₂, NO en PM₁ van zowel Kunak als Airly (Figuur 4).

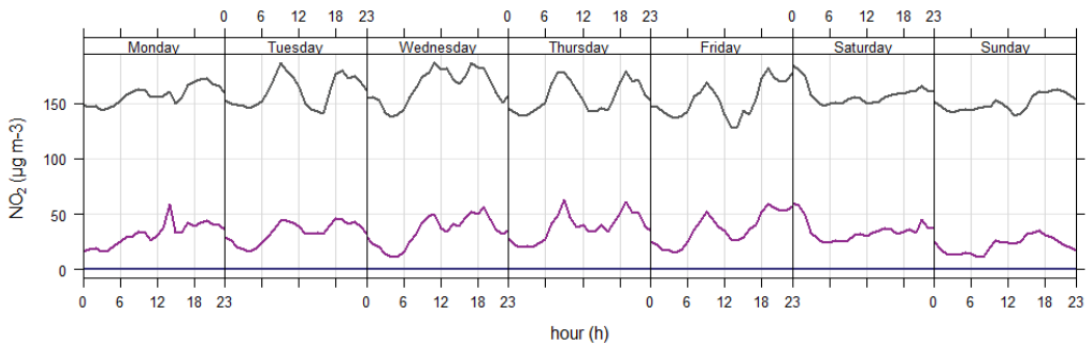




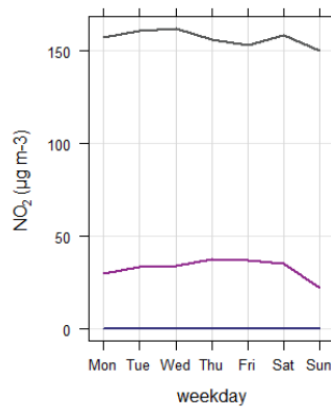
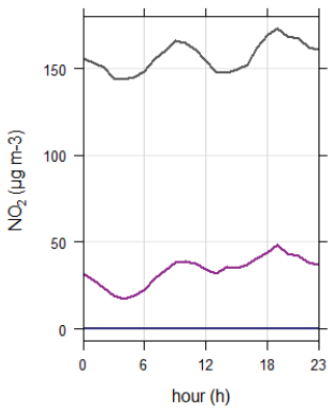
■ PM₁ REF
 ■ PM₁ Kunak 1
 ■ PM₁ Kunak 2
 ■ PM₁ Kunak 3



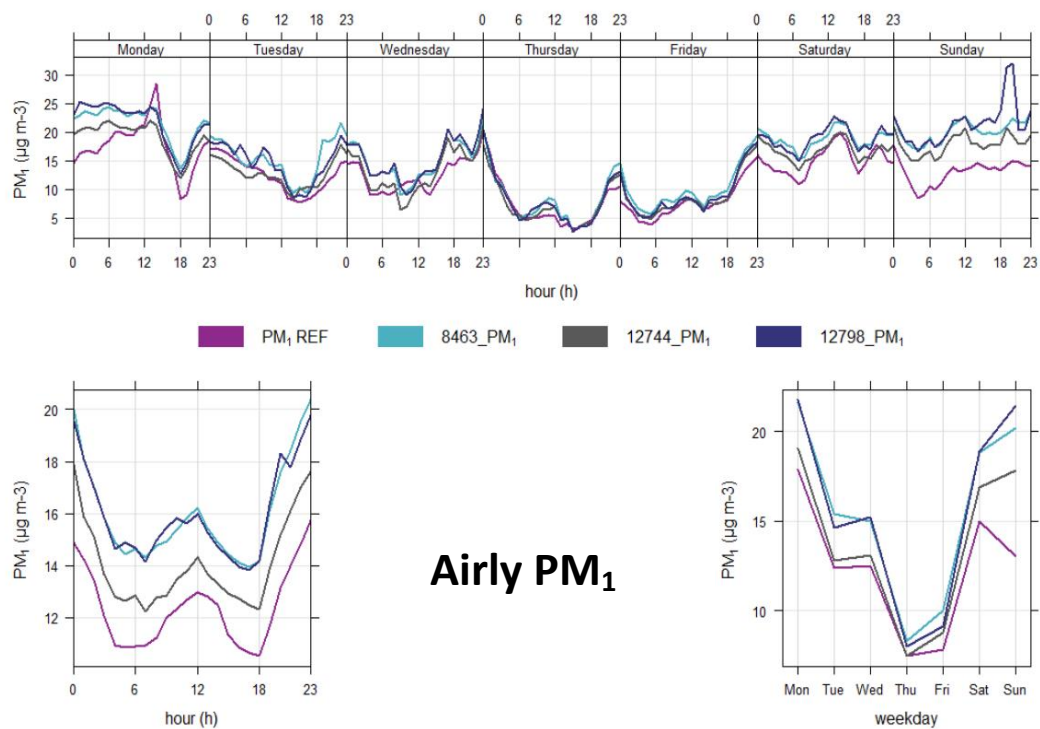
Kunak PM₁



■ NO₂ REF
 ■ 8463_NO₂
 ■ 12744_NO₂
 ■ 12798_NO₂



Airly NO₂



Figuur 4: Temporele variatie van referentie en sensormetingen (zonder herschaling) van Kunak (NO₂, NO en PM₁) en Airly (NO₂ en PM₁) gedurende de co-locatiecampagne

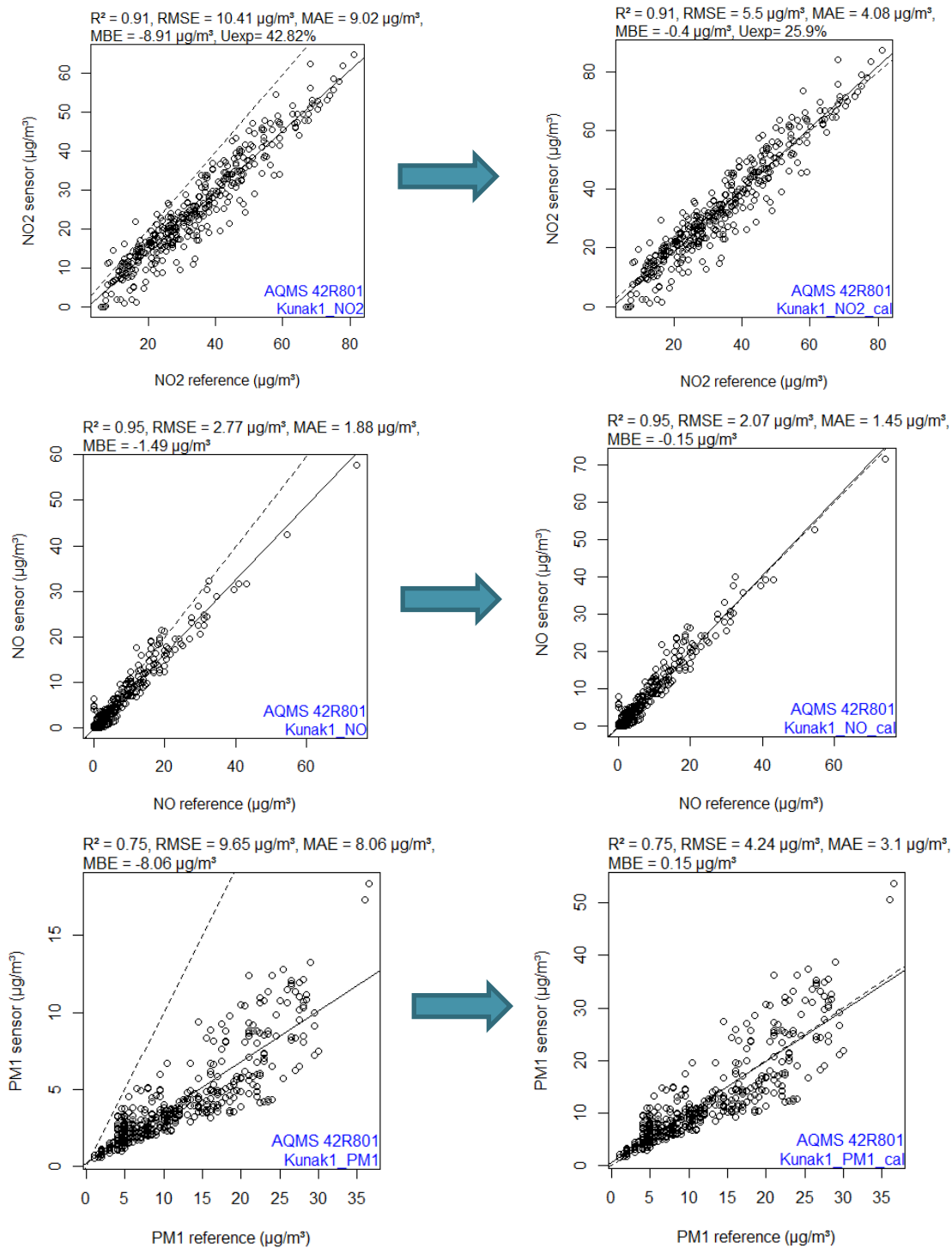
6.2. DATAKWALITEIT NA HERSCHALING

Wanneer we de sensordata (goede correlatie, maar vaak aanzienlijke afwijking) tegen de referentiemetingen uitzetten in regressieplots valt op te merken dat de sensordata kan geoptimaliseerd worden door middel van een slope correctie. Op basis van de uurlijkse co-locatiedata werden dan ook herschalingfactoren gefit voor elke sensorbox en pollutant volgens:

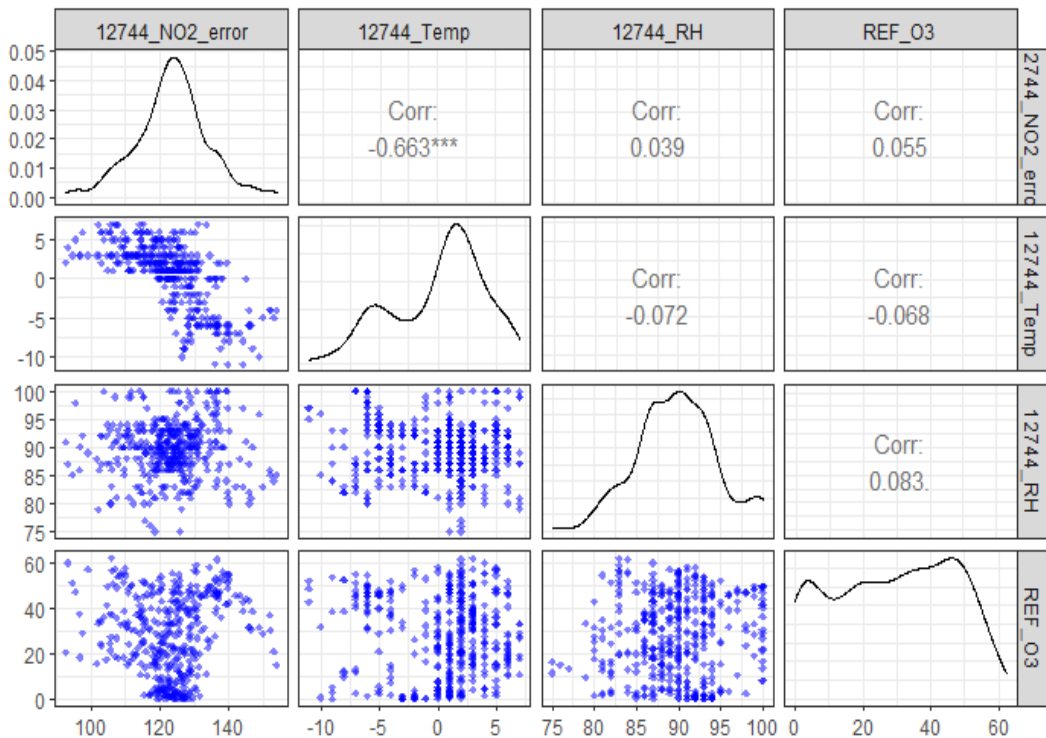
$$Conc_{sensor} = a * Conc_{REF}$$

Vervolgens werd de ruwe sensordata herschaald door de sensordata te delen door de herschalingsfactor a . Deze benadering werkte goed voor alle pollutanten van Kunak en Airly (Figuur 5), behalve voor de NO₂ data van Airly die na de herschaling nog steeds een sterk afwijkende lineariteit vertoonde. Aangezien electrochemische sensoren (NO en NO₂) typisch gevoelig zijn voor omgevingsvariabelen zoals temperatuur en relatieve vochtigheid, maar ook ander pollutanten (vb. O₃) werd de gevoeligheid onderzocht door de residuele variatie (=sensor-REF) uit te zetten tegen de externe temperatuur (°C), relatieve vochtigheid (%) en ozonconcentratie (µg/m³, afkomstig van het referentiestation aangezien de ozondata van de Airly niet beschikbaar was). Hieruit blijkt dat de residuele variatie significant gecorreleerd is met de omgevingstemperatuur (Figuur 6). Daarom werd voor de Airly NO₂ een multilineair model gefit volgens:

$$Conc_{sensor} = a * Conc_{REF} + b * Temp_{sensor} + c$$

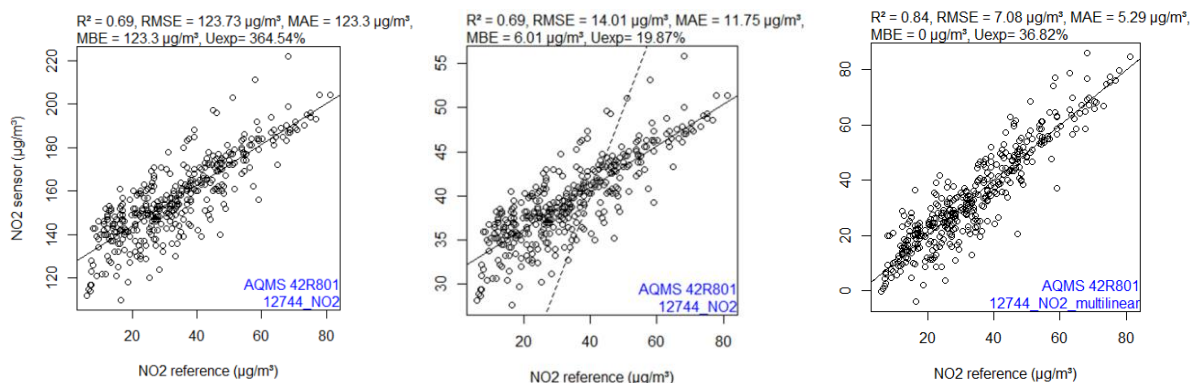


Figuur 5: Effect van de slope herschaling op de sensordata voor Kunak (NO₂: boven, NO: midden en PM₁: onder). De ruwe sensordata wordt telkens op de linkergrafiek weergegeven en de herschaalde data op de rechtergrafiek. Bijhorende datakwaliteitsparameters (R², RMSE, MAE, MBE en Uexp) worden bovenaan elke grafiek weergegeven.



Figuur 6: Gevoeligheid van de residuele uurlijkse variatie (Airly NO₂-REF NO₂) ten opzichte van omgevingstemperatuur (°C), relatieve vochtigheid (%) en ozonconcentratie (REF_O3). Scatterplots worden weergegeven met bijhorende histogrammen en Pearson correlatie test.

De ruwe NO₂ sensordata van Airly werd dan ook volgens bovenstaand multilineair model herschaald met herschalingsfactoren a, b en c, wat resulteerde in een goede overeenkomst met de referentiedata ($R^2 = 84$, MAE = 5.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), met nu een goede lineariteit (de punten liggen dichtbij en mooi verdeeld rondom de regressielijn) en de regressielijn valt mooi samen met 1:1 lijn, zoals kan afgeleid worden uit Figuur 7.



Figuur 7: Regressieplots van uurlijkse referentie NO₂ concentraties versus ruwe (links), slope- (midden) en multilineair herschaalde (rechts) Airly NO₂ data. Bijhorende datakwaliteitsstatistieken worden weergegeven boven elke grafiek.

In appendix 2 worden de regressieplots weergegeven van de herschaalde sensordata van zowel Kunak en Airly voor NO₂, NO, PM₁, PM_{2.5} en PM₁₀. Een overzicht van de datakwaliteit van de herschaalde sensordata kan teruggevonden worden in Tabel 3, waar we zien dat de slope herschaling in alle gevallen resulteert in een betere accuraatheid (RMSE, MAE, MBE en Uexp), terwijl de correlatie onveranderd blijft (behalve voor de multilineaire schaling van Airly NO₂ waar ook een

verbetering na herschaling wordt waargenomen). Als we de onzekerheid tussen de sensoren onderling evalueren op basis van de minimum en maximum waargenomen correlatie en mean absolute error (MAE), zien we (Tabel 5) dat de overeenkomst tussen de sensoren onderling groter is dan de overeenkomst tussen sensoren en referentiemetingen (Tabel 4). Bovendien zien we dat de herschaling (slope correctie) resulteert in dezelfde correlatie en kleinere fout (MAE) tussen de sensoren. Dit wordt ook duidelijk wanneer we de tijdreeksen van de herschaalde data bekijken (Appendix 3) en vergelijken met Figuur 3.

Tabel 5: Minimum (MIN) en maximum (MAX) correlatie en Mean Absolute Error (MAE) tussen de 3 Kunak/Airly sensoren onderling, berekend op basis van de uurlijkse ruwe (RAW) en herschaalde (CAL) sensordata.

		COR		MAE	
		MIN	MAX	MIN	MAX
NO ₂ Kunak	RAW	0.978	0.997	2.597	3.631
	CAL	0.978	0.997	2.067	4.244
NO Kunak	RAW	0.963	0.983	0.795	2.953
	CAL	0.963	0.983	0.758	2.491
PM ₁ Airly	RAW	0.964	0.984	1.336	2.121
	CAL	0.964	0.984	0.85	1.126

Als conclusie kan gesteld worden dat de sensoren over het algemeen vrij goed presteren en de dynamiek van de referentiemetingen goed opvolgen. Een lokale kalibratie (herschaling) lijkt wel aangewezen om de accuraatheid en onderlinge sensoronzekerheid te verbeteren. Terwijl Airly het best presteert voor PM, geeft Kunak de beste resultaten voor NO₂ en NO. Rekening houdend met de geobserveerde datakwaliteit en de beoogde verkeersmaatregel (schoolstraat/knip) in Kampenhout zal de verdere analyse focussen op de best presterende verkeerderelateerde pollutanten NO (Kunak), NO₂ (Kunak) en PM₁ (Airly).

HOOFDSTUK 7. ANALYSE VAN DE METINGEN

7.1. DOEL METINGEN

Het doel van de meetcampagne in Kampenhout is om na te gaan of verkeersmaatregelen bij een school een effect kunnen hebben op de lokale luchtkwaliteit. Twee verschillende verkeersscenario's worden hierbij getest, met name een gedeeltelijke afsluiting van het autoverkeer (knip in enkele richting) en volledige afsluiting van het autoverkeer (schoolstraat). Deze scenario's worden telkens geïmplementeerd in de ochtend (30 min: 8:10-8:40u) en namiddag (45 minuten: 11-11:45u (woensdag), 15-15:45u (maandag-donderdag) en 14:45-15:30 (vrijdag)) (zie §5).

7.2. SENSORNETWERK EN POLLUENTEN

Er werd een sensornetwerk opgezet op drie locaties (zie boven). Om de impact van de verkeerssituatie te beoordelen wordt gefocust op polluenten die goed presteerden tijdens de co-locatie (§6), en waarvoor verkeer een belangrijke bron is, met name:

- NO en NO₂
- PM: belangrijkere bijdrage in fijnste fracties (PM₁), minder in grovere (PM_{2,5}, PM₁₀).

Op basis van vergelijkbaarheid met de referentie en vergelijkbaarheid van sensoren onderling werden de Kunak sensoren voor NO en NO₂ en de Airly sensoren voor PM weerhouden voor deze analyse.

7.3. RESULTATEN

7.3.1 AFBAKENING DATA

Voor de vergelijkbaarheid werd de sensordata geaggregeerd naar een uurlijkse resolutie en enkel beschouwd tussen 12/2/2021 (11u) en 17/5/2021 (8u), ppb concentraties werden omgezet in µg m⁻³ volgens EU conversiefactoren (https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat06/0502160851_Conversion_Factors_Between_ppb_and.pdf 20°C en 1013 mb) en vervolgens herschaald zoals aangegeven in §6.2 met behulp van de herschalingsparameters (a, b en c) opgelijst in Tabel 6.

Tabel 6: Toegepaste herschalingsparameters (a uit §6.2 en a, b en c voor Airly NO₂) op de sensordata van Kampenhout.

Sensor	Locatie	NO ₂	NO	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₁₀
Kunak1	Achtergrond	0.7424	0.8073	0.3419	0.6062	0.6617
Kunak2	Omgeving	0.7817	0.9636	0.3344	0.605	0.6628
Kunak3	School	0.7483	0.9436	0.3216	0.5979	0.6522
Airly 8463	Achtergrond	-	-	1.219	1.907	1.66
Airly 12744	Omgeving	a: 1.08 b: -1.83 c: 121.55	-	1.074	1.626	1.311

Airly 12798	School	-	-	1.231	1.899	1.62
-------------	--------	---	---	-------	-------	------

7.3.2 METEOROLOGIE

Op basis van de meteorologische sensoren van Airly werden volgende weerscondities opgemeten gedurende de meetcampagne in Kampenhout op basis van uurlijkse waarden (tussen 12/2/2021 (11u) en 17/5/2021 (8u); n= 2252):

Tabel 7: Meteorologische condities (Temp, RH en luchtdruk) op de 3 meetlocaties (school, omgeving en achtergrond) gedurende de meetcampagne in Kampenhout

	School			Omgeving			Achtergrond		
	Temp (°C)	RH (%)	Luchtdruk (hPa)	Temp (°C)	RH (%)	Luchtdruk (hPa)	Temp (°C)	RH (%)	Luchtdruk (hPa)
Min	-8	39	995	-8	33	994	-10	31	995
25%	6	70	1013	5	67	1013	4	65	1013
Median	9	81	1020	9	80	1021	7	78	1021
Mean	8.85	78.44	1020	8.76	76.96	1020	6.993	75.37	1021
75%	12	88	1028	12	89	1028	10	88	1028
Max	26	100	1040	26	100	1043	24	100	1043

Zoals kan opgemerkt worden uit Tabel 7 zijn de meteorologische omstandigheden gedurende de meetcampagne in Kampenhout erg vergelijkbaar tussen de 3 meetlocaties. Dit hoeft niet te verbazen aangezien alle locaties zich binnen een radius van 400m van elkaar bevinden.

7.3.3 OVERZICHT EN TIJDREEKSEN

Beschrijvende statistieken van de opgemeten sensordata tussen 12/2/2021 (12u) en 17/5/2021 (8u) voor alle pollutanten van de Kunak en Airly sensoren op de beschouwde sensorlocaties kan worden teruggevonden in Tabel 8. De uurlijkse datadekking (Tabel 9) varieert van 95-99% voor Airly en 93-99% voor Kunak (93% enkel voor PM sensor, 96% voor de NO₂, NO, CO, O₃ van dezelfde unit) wat betekent dat ze op het vlak van data coverage (>95%), voldoen aan de vereisten voor high-class sensorsysteem volgens de data quality objectives van Dencity. Tijdreeksen van de belangrijkste verkeersgerelateerde pollutanten (NO₂, NO en PM₁) per locatie worden weergegeven in Appendix 4. In de detailfiguren in Figuur 8 zien we een typische diurnale variatie voor alle pollutanten met hogere concentraties tijdens de spitsuren en laagste concentraties gedurende de nacht.

Voor wat betreft de 3 meetlocaties kunnen we stellen dat de gemeten concentraties (Tabel 9) lager zijn dan tijdens de co-locatiecampagnes en onder de geldende EU limietwaarden voor PM_{2.5}, PM₁₀ en NO₂ vallen. De maximale uurgemiddelde NO₂ concentratie (Kunak) is namelijk 182 µg/m³ (<200 µg/m³), terwijl de gemiddelde NO₂ (Kunak: 16-19 µg/m³), PM_{2.5} (Airly: 5-6 µg/m³) en PM₁₀ (Airly: 9-10µg/m³) concentraties op de 3 locaties ver onder de jaargemiddelde EU limietwaarden (respectievelijk 40, 20 en 10 µg/m³) liggen. In vergelijking met het stedelijk co-locatiestation in Antwerpen lijkt hier dus minder verkeersgerelateerde luchtverontreiniging te zijn en voldoen de 3 locaties aan de geldende normen. Toch zijn de gemeten concentraties nog steeds problematisch wanneer vergeleken met de nieuwe WGO advieswaarden (WHO, 2021). Daarnaast valt op dat locatie omgeving vaak hogere concentraties vertoont dan de locaties school en achtergrond. Dit is het meest uitgesproken voor NO, gevolgd door NO₂ en PM₁ waar de verschillen nog erg summier lijken. Locaties achtergrond en school hebben meestal vergelijkbare concentraties voor NO₂ en PM₁, met sporadisch uitschieters op de schoollocatie rond de spitsuren. Dit hoeft niet te verbazen aangezien de

schoollocatie als een straatstation kan beschouwd worden terwijl de achtergrond op grotere afstand van de weg ligt en dus minder verkeersbijdrage zal vertonen (zie NO). Het zijn net deze pieken waar de beleidsmaatregel effect op zal hebben. Meest uitgesproken verschillen zijn waarneembaar bij NO, waar de achtergrond duidelijk lagere concentraties vertoont terwijl de gemeten concentraties ter hoogte op de locatie school en omgeving dichter bij elkaar liggen. Op basis van de tijdreeksgrafieken lijkt NO dan ook de duidelijkste verkeersindicator.

Tabel 8: Huidige EU limietwaarden (EU, 2008) en WGO advieswaarden (WHO, 2021) voor PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ en NO₂.

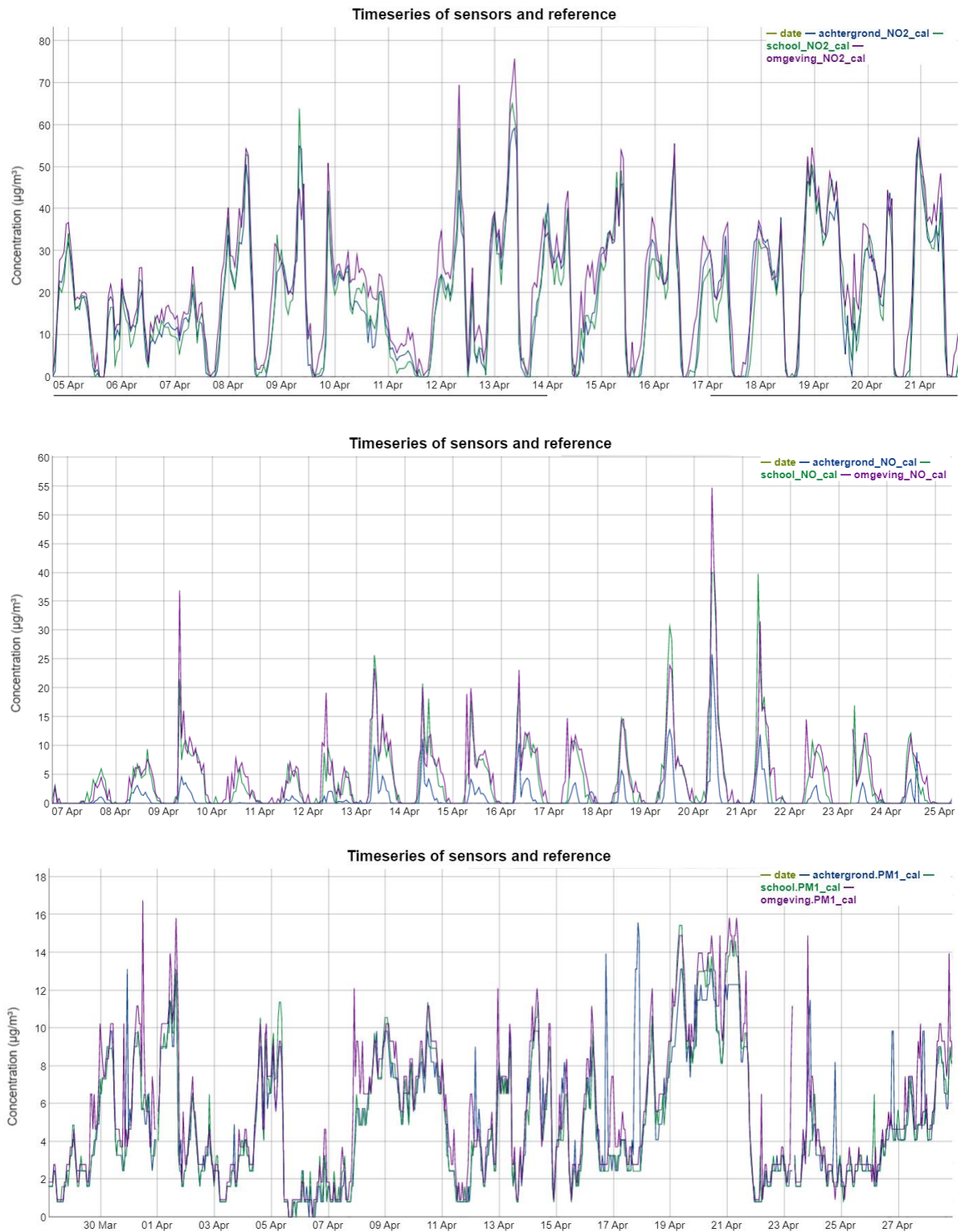
Polluent	Middelingstijd	EU limietwaarde µg m ⁻³	WHO advieswaarden µg m ⁻³
PM _{2.5}	Dag	25	15
	Jaar	10	5
PM ₁₀	Dag	50 (<35 dagen/jaar)	45
	Jaar	20	15
O ₃	Max 8-uur gemiddelde	100 (<25 dagen/jaar)	100
NO ₂	Uurlijks	200 (<18 dagen/jaar)	25
	Jaar	40	10

Tabel 9: Beschrijvende statistieken van de opgemeten sensordata tussen 12/2/2021 (12u) en 17/5/2021 (8u) voor alle pollutanten van de Kunak en Airly sensoren op de beschouwde sensorlocaties (School, Omgeving, Achtergrond). *herschaalde sensordata zoals omschreven in §6.

	Airly														
	School					Omgeving					Achtergrond				
	PM1*	PM2.5*	PM10*	NO2	O3	PM1*	PM2.5*	PM10*	NO2	O3	PM1*	PM2.5*	PM10*	NO2	O3
µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppb	ppb	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppb	ppb	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppb	ppb	
Min	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00
25%	1.63	2.11	3.70	0.00	31.00	2.10	2.46	3.81	13.00	20.00	1.64	2.10	3.61	15.00	12.00
Median	4.06	4.21	7.10	11.00	42.00	4.66	4.92	7.63	22.00	36.00	4.10	4.20	6.63	22.00	27.00
Mean	5.07	5.59	9.32	13.75	45.03	5.64	5.93	9.96	25.51	33.12	5.18	5.50	8.97	21.69	39.71
75%	7.31	8.43	12.96	22.00	51.75	8.38	9.23	14.49	31.00	47.00	7.38	8.39	12.65	28.00	39.00
Max	24.37	26.33	45.06	96.00	217.00	20.48	25.83	45.77	202.00	83.00	29.53	27.79	39.16	77.00	374.00
NA's	117	117	117	117	117	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Datadekking (%)	95	95	95	95	95	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99

	Kunak																				
	School							Omgeving							Achtergrond						
	CO	NO2*	NO*	O3	PM1*	PM2.5*	PM10*	CO	NO2*	NO*	O3	PM1*	PM2.5*	PM10*	CO	NO2*	NO*	O3	PM1*	PM2.5*	PM10*
µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
Min	41.76	0.00	0.00	0.00	0.15	0.08	0.20	71.46	0.00	0.00	0.00	1.47	2.05	3.32	47.19	0.00	0.00	0.00	1.09	1.74	3.58
25%	150.57	2.37	0.02	22.33	6.14	7.41	14.61	144.34	7.54	0.01	15.47	7.45	10.12	19.11	140.58	2.72	0.00	15.57	5.94	8.36	16.6
Median	182.33	13.14	1.84	44.20	10.27	11.30	22.09	171.57	17.76	1.93	38.76	11.39	15.62	28.61	168.29	13.66	0.00	34.10	9.30	13.60	26.3
Mean	202.98	16.03	4.66	40.92	15.07	16.00	30.30	179.30	19.21	4.64	38.03	16.02	20.27	37.82	178.21	15.45	0.90	32.91	14.35	18.16	32.8
75%	226.91	24.65	6.49	58.85	18.28	18.50	36.90	200.12	28.01	6.56	56.39	18.24	25.27	47.87	202.49	24.37	0.38	48.28	16.26	21.79	41.5
Max	879.80	107.58	190.02	100.92	129.63	223.87	748.52	485.34	181.59	374.26	107.75	139.06	160.99	519.22	641.56	81.48	42.17	103.28	122.14	159.64	335.4
NA's	106	106	106	106	171	171	171	17	17	17	17	38	38	42	15	15	15	15	28	28	28
Datadekking (%)	96	96	96	96	93	93	93	99	99	99	99	98	98	98	99	99	99	99	99	99	99

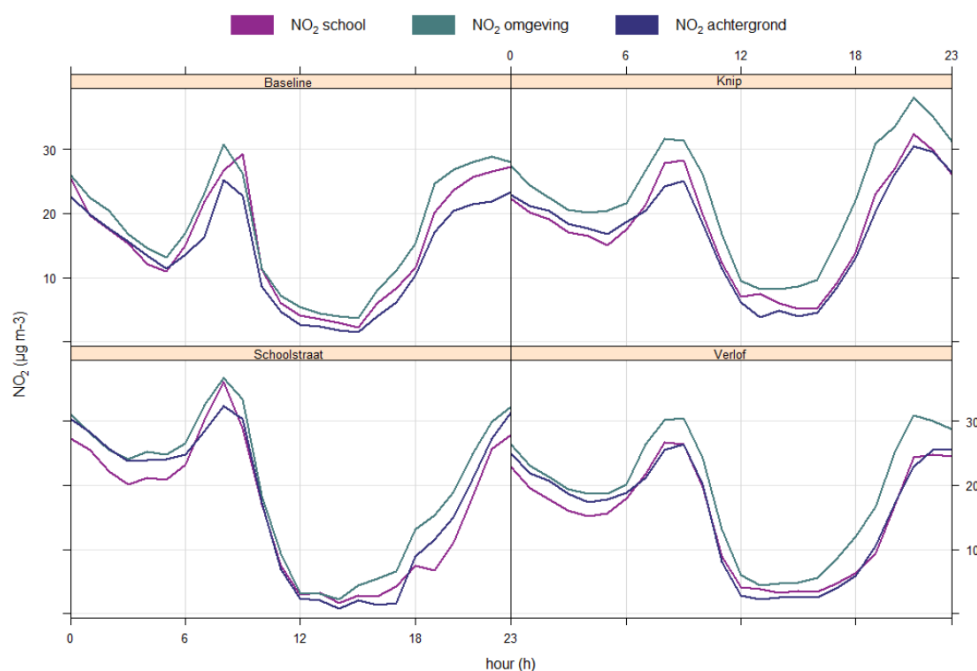
*herschaalde sensordata (zie §6)



Figur 8: Detailweergave van de tijdreeksen voor NO₂ (boven), NO (midden) en PM₁ (onder) tijdens de meetcampagne in Kampenhout. Volledige tijdreeksen worden weergegeven in Appendix 4.

7.3.4 TEMPORELE VARIATIE MEETLOCATIES

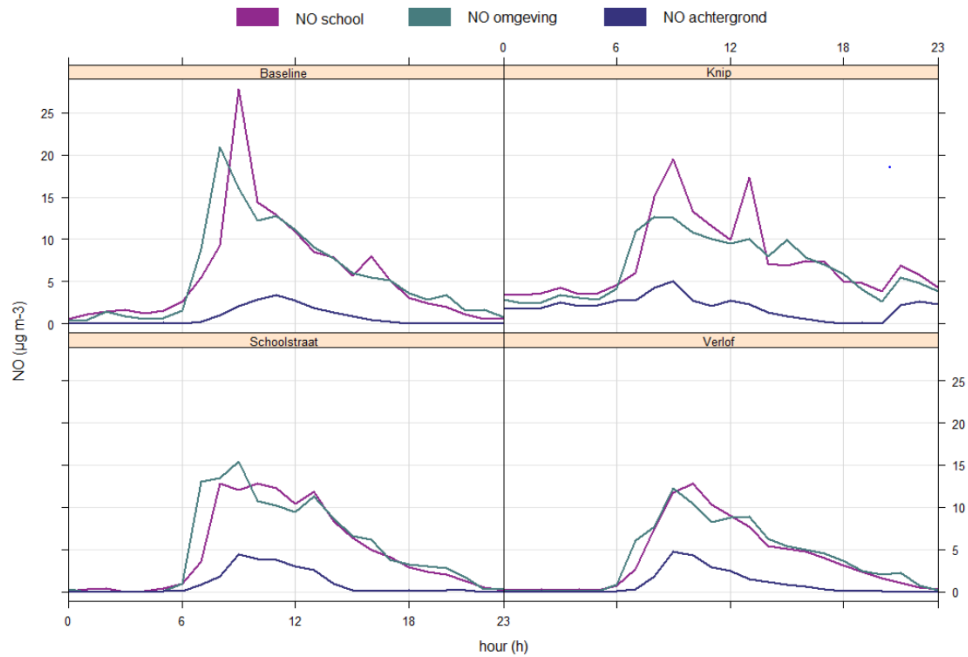
Om de pollutieconcentraties op de gedefinieerde locaties te evalueren werd de uurgemiddelde pollutiedata van de verkeersgerelateerde pollutie (NO₂, NO en PM₁) tijdens werkdagen (ma tem vrij) voor alle meetlocaties en scenario's uitgezet (Figuur 9-11). Voor NO₂ lijkt de concentratie het hoogst voor de omgeving locatie en laagst voor de achtergrond locatie (Figuur 9). Dit verschil lijkt bovendien meer uitgesproken rond de spitsuren wat een verkeersbijdrage lijkt te insinueren. Afhankelijk van het geïmplementeerde scenario, lijkt de NO₂ concentratie aan de schoollocatie nauwer aan te sluiten bij de achtergrond, dan wel omgeving locatie. Tijdens verlofdagen valt de NO₂ concentratie aan de schoollocatie gelijk met de achtergrond, terwijl we een continu hogere bijdrage waarnemen op de omgeving locatie. Dit kan erop wijzen dat de lokale bijdrage op de schoollocatie veroorzaakt wordt door school-gerelateerd verkeer (hetzij van de plaatselijke school, hetzij passerend verkeer van andere scholen). Hoewel een extra bijdrage van werkgerelateerd (sluip)verkeer verwacht werd op de schoollocatie (ook tijdens schoolvakanties) is deze dus niet zichtbaar. Dit kan te maken met de coronamaatregelen (extra week schoolvakantie was niet voorzien waardoor misschien meer mensen van thuis uit werkten).



Figuur 9: Uurgemiddelde NO₂ data (Kunak) voor alle meetlocaties (school, omgeving, achtergrond) en geïmplementeerde scenario's (Baseline, Knip, Schoolstraat, Verlof).

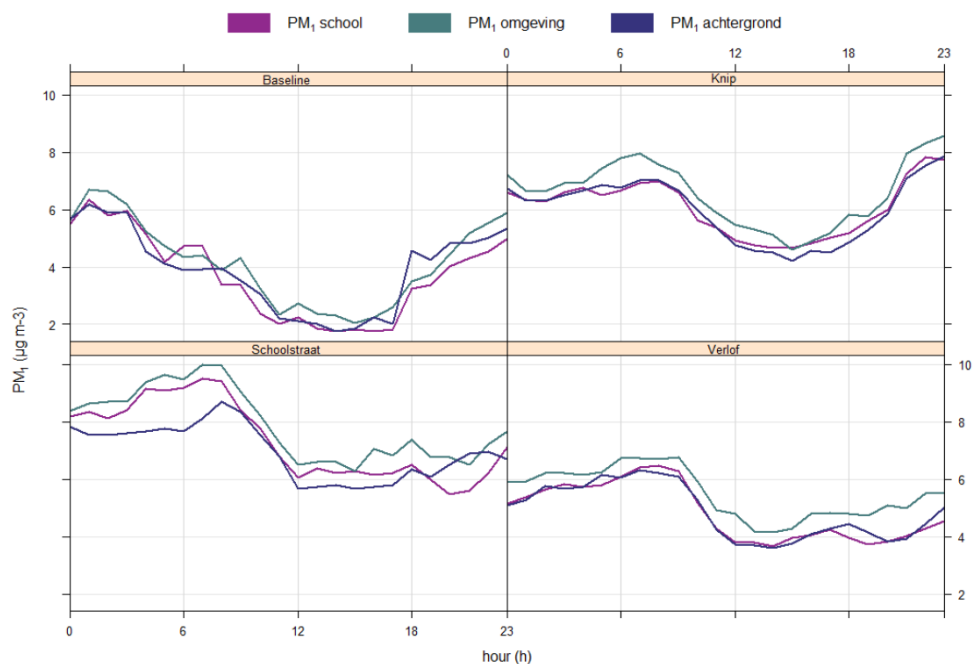
NO wordt primair uitgestoten door autoverkeer en oxideert vervolgens snel verder naar NO₂ (Onder invloed van zonlicht en warmte wordt NO₂ ook omgezet naar NO en ozon en beide reacties resulteren in een evenwicht tussen NO en NO₂. De concentraties worden bepaald door de heersende ozonconcentraties, de aanwezigheid van zonlicht en heersende NO-concentratie), waardoor de pollutie vrij kortlevend is en er dus vaak sterke gradiënten worden waargenomen naast verkeerswegen. Ook voor Kampenhout zien we een uitgesproken verschil tussen de achtergrond locatie en beide straatlocaties voor NO (Figuur 10). Tijdens de ochtendspits is dit verschil het meest uitgesproken. Voor het baseline scenario, tijdens 8-9u en 15-16u zien we bovendien een verhoogde bijdrage op de schoollocatie in vergelijking met de omgeving locatie. Dit wijst allicht op de verhoogde verkeersbijdrage tijdens het afzetten/ophalen van de schoolkinderen. Deze pieken zien we niet terug tijdens het schoolverlof, maar ook niet tijdens het schoolstraat scenario, terwijl we nog wel hogere

bijdragen zien tijdens de knip. Bovendien valt op te merken dat er hogere NO concentraties gesuggereerd worden op de omgevingslocatie tijdens het schoolstraat scenario wat lijkt te duiden op een verschuiving van het verkeer verderop de Aarschotsebaan.



Figuur 10: Uurgemiddelde NO data (Kunak) voor alle meetlocaties (school, omgeving, achtergrond) en geïmplementeerde scenario's (Baseline, Knip, Schoolstraat, Verlof).

Voor PM_{10} zien we beperkte verschillen tussen de meetlocaties in de grootteorde van $1-2 \mu g m^{-3}$ (Figuur 11). Desalniettemin lijkt de omgeving locatie over het algemeen wel vaak de hoogste concentratie te vertonen, en de achtergrond locatie de laagste. Verschillen tussen de scenario's zijn echter onduidelijk op basis van PM_{10} . Rekening houdend met de gemiddelde meetonzekerheid tijdens de co-locatiecampagne ($MAE = 2.16-2.33 \mu g m^{-3}$) kunnen we hieruit weinig besluiten.



Figuur 11: Uurgemiddelde PM_1 data voor alle meetlocaties (school, omgeving, achtergrond) en scenario's (Baseline, Knip, Schoolstraat, Verlof).

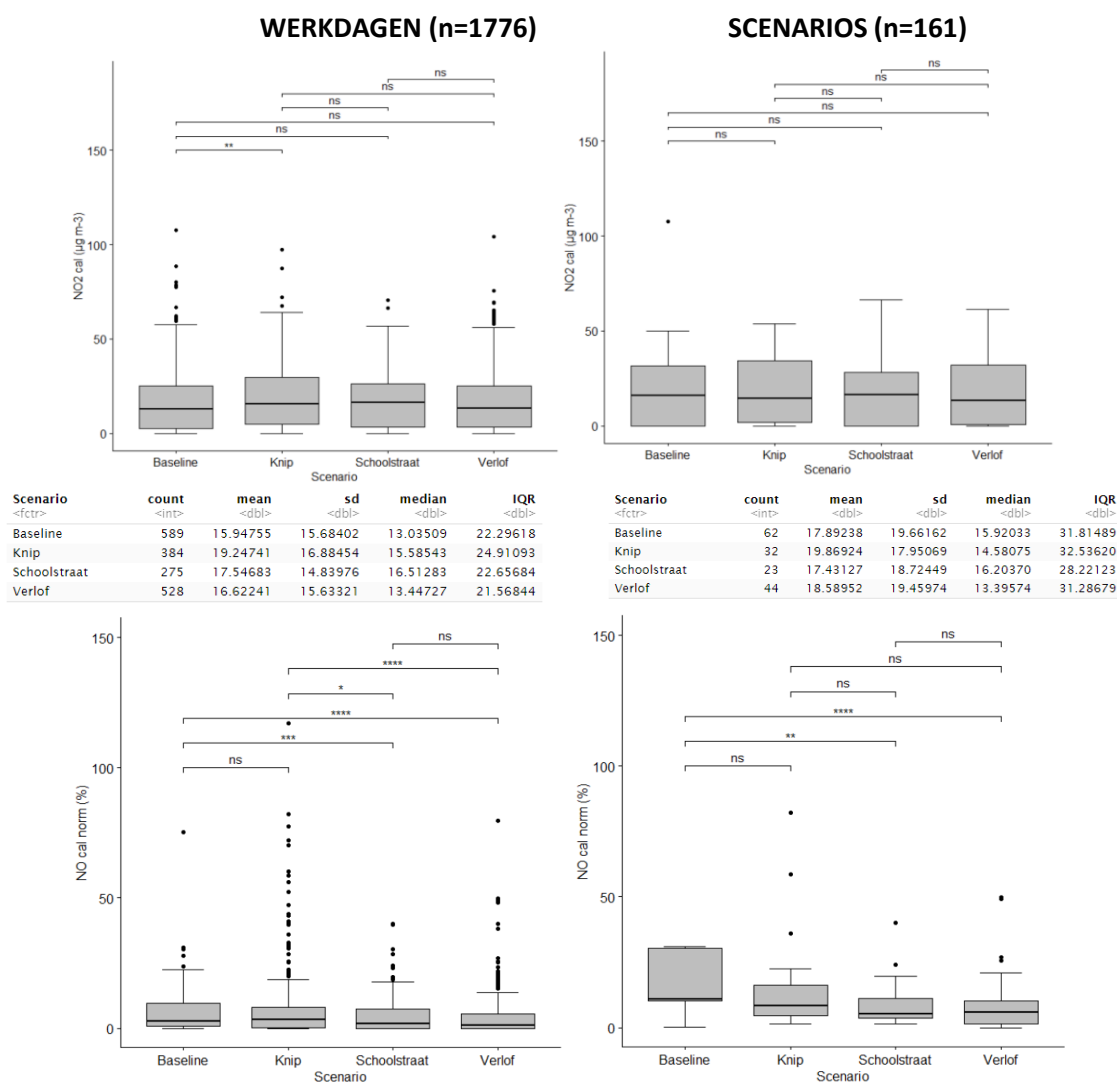
Een overzicht van de uurgemiddelde data voor elke dag van de week wordt tenslotte weergegeven in Appendix 5, waar kan waargenomen worden dat globaal dezelfde trend wordt waargenomen op alle meetlocaties voor de verschillende weekdays, met sporadische lokale uitschieters op zowel achtergrond (PM_1), schoolstraat (NO_2 , NO , PM_1) als omgeving locatie (NO_2 , NO , PM_1). Hierbij dient opgemerkt te worden dat de weergegeven gemiddelde tijdsprofielen per dag van de week, telkens het resultaat zijn van 2 tot 4 meetpunten omdat elk scenario 3 tot 4 weken gemeten werd.

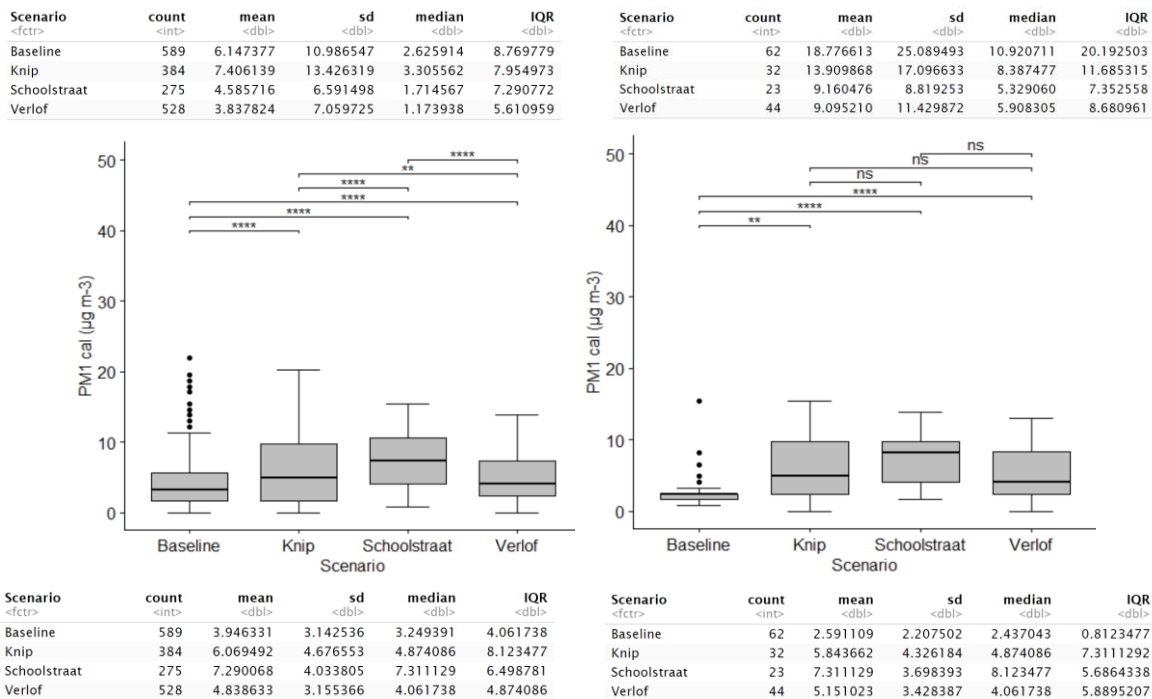
7.3.5 EFFECT SCENARIO'S

Aangezien de schoolstraat en knip enkel geïmplementeerd werden op schooldagen tussen 8-9u en 15-16u/11-12u (woensdag) werd deze periode uit de uurlijkse sensordata geselecteerd ($n=161$) en de concentratieverdelingen van NO_2 , NO en PM_1 voor de verschillende scenario's aan de schoollocatie weergegeven in boxplots en voor de significantie van de verschillen getest via de non-parametrische Wilcoxon Rank test. Daarnaast werden dezelfde scenarioverschillen getest voor alle werkdagen ($n=1776$). Om te evalueren of de geobserveerde verschillen te wijten waren aan de geïmplementeerde verkeersscenario's aan de schoolpoort, werden bovendien dezelfde boxplots uitgezet voor de achtergrondlocatie (Appendix 6). Voor NO_2 zijn geen duidelijke scenarioverschillen waar te nemen met gemiddelde NO_2 concentraties 17.89 (baseline), 19.87 (knip), 17.43 (schoolstraat) en 18.59 (verlof) $\mu g m^{-3}$ en niet-significante Wilcoxon test (ns). Op de achtergrondlocatie zien we echter dat significant verhoogde NO_2 concentraties werden waargenomen gedurende de scenario's (knip en schoolstraat) en de verlofdagen in vergelijking met het baseline scenario. Om de effecten van de maatregelen correct in te schatten moeten we dus "corrigeren" (normaliseren) voor deze veranderende achtergrondconcentraties.

Voor NO zien we meer uitgesproken verschillen tussen de scenario's op de schoollocatie, met lagere gemiddelde concentraties voor de scenario's (knip: 13.91 $\mu\text{g m}^{-3}$ en schoolstraat: 9.16 $\mu\text{g m}^{-3}$) en verlofdagen (9.10 $\mu\text{g m}^{-3}$) in vergelijking met het baseline scenario (18.78 $\mu\text{g m}^{-3}$). Significante verschillen worden waargenomen tussen baseline - schoolstraat en baseline - verlof (Figuur 9). Op de achtergrondlocatie liggen de gemiddelde NO-concentraties voor de verschillende scenario's aanzienlijk lager (1.83 - 3 $\mu\text{g m}^{-3}$) en worden geen significante verschillen tussen de scenario's waargenomen (Appendix 6). Dit toont dan ook aan dat de geobserveerde concentratieverschillen gedurende de scenario's op de schoollocatie te wijten zijn aan de geïmplementeerde maatregelen. Hierbij lijkt het effect van de schoolstraat (51% reductie t.o.v. baseline) groter dan het effect van de knip (26% t.o.v. baseline) en zijn de concentraties ter hoogte van de schoolpoort gedurende het schoolstraat scenario vergelijkbaar met de concentraties tijdens het verlof.

Voor PM₁, tenslotte, zien we significant verhoogde concentraties tijdens de scenario's en verlofdagen met gemiddelde concentraties van 2.59 (baseline), 5.84 (knip), 7.31 (schoolstraat) en 5.15 (verlof) $\mu\text{g m}^{-3}$. Vergelijkbare verschillen worden waargenomen gedurende werkdagen en zijn ook waarneembaar op de achtergrondlocatie (Appendix 6). Om de effecten van de maatregelen correct in te schatten moeten we dus ook hier "corrigeren" (normaliseren) voor deze veranderende achtergrondconcentraties.





Figuur 9: Boxplots met bijhorende Wilcoxon significantiescores voor de scenarioverschillen in NO₂ (boven), NO (midden) en PM₁ (onder) op de schoollocatie tijdens werkdagen (maandag-vrijdag; links) en gedurende de scenario's (8-9u en 15-16u/11-12u (woensdag); rechts). Bijhorende beschrijvende statistieken (n, gemiddelde, sd, mediaan en IQR) worden weergegeven in de respectievelijke tabellen onder de boxplots.

7.3.6 GENORMALISEERD EFFECT SCENARIO'S

Aangezien de scenarioverschillen in §7.3.4 invloeden van de veranderende achtergrondconcentratie vertoonden, werd de uurlijkse sensordata genormaliseerd voor de heersende achtergrondconcentratie. Dit zowel absoluut (µg/m³) als procentueel (%) volgens de berekening hieronder:

$$\begin{aligned} \text{School normalised } (\mu\text{g}/\text{m}^3) &= \text{conc}_{\text{school}} - \text{conc}_{\text{achtergrond}} \\ \text{Omgeving normalised } (\mu\text{g}/\text{m}^3) &= \text{conc}_{\text{omgeving}} - \text{conc}_{\text{achtergrond}} \\ \text{School normalised } (\%) &= ((\text{conc}_{\text{school}} - \text{conc}_{\text{achtergrond}}) / \text{conc}_{\text{achtergrond}}) \times 100 \\ \text{Omgeving normalised } (\%) &= ((\text{conc}_{\text{omgeving}} - \text{conc}_{\text{achtergrond}}) / \text{conc}_{\text{achtergrond}}) \times 100 \end{aligned}$$

Het resultaat van deze normalisatie kan gezien worden als de absolute (µg/m³) en procentuele (%) lokale bijdrage van de schoollocatie ten opzichte van de achtergrondlocatie. De absolute NO₂, NO en PM₁ concentratiebijdragen op de schoollocatie gedurende de geïmplementeerde scenario's worden weergegeven in Tabel 10 en de boxplots in Figuur 10. De procentuele bijdragen worden weergegeven in Appendix 6.

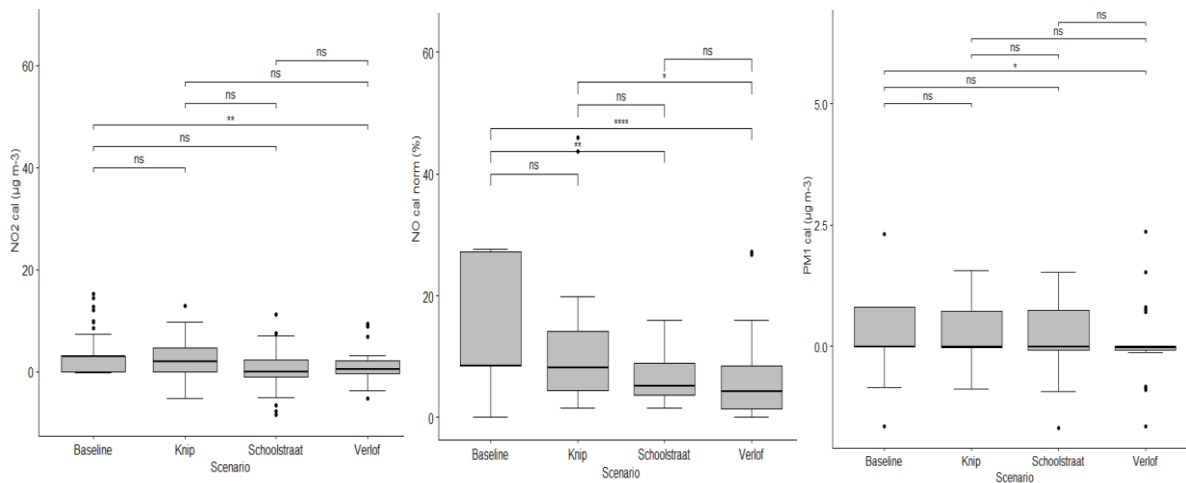
Op basis van Tabel 10 kunnen we stellen dat de gemiddelde lokale NO₂ bijdrage (tijdens de scenario's) afneemt van 4.33 µg m⁻³ (baseline) naar 2.9 µg m⁻³ (=33%) voor de knip en ~0.5 µg m⁻³ (=89%) voor de schoolstraat. Voor NO is de absolute afname nog aanzienlijker, van 16.83 µg m⁻³ (baseline) naar 10.91 µg m⁻³ (=35%) voor de knip en 6.72 µg m⁻³ (=60%) voor de schoolstraat. Voor PM₁ tenslotte zien we geen effecten van de scenario's met een zeer beperkte lokale PM₁ bijdrage op de schoollocatie (0.06-0.31 µg m⁻³). De significanties van deze verschillen worden weergegeven op de boxplots in Figuur 10.

Tabel 10: Genormaliseerde NO₂, NO en PM₁ bijdrage (µg m⁻³) op de schoollocatie gedurende de geïmplementeerde scenario's

Scenario <chr>	count <int>	mean <dbl>	sd <dbl>	median <dbl>	IQR <dbl>
Baseline	62	4.3356582	10.255017	2.9855440	3.063992
Knip	32	2.9037252	4.055856	1.9210448	4.694438
Schoolstraat	23	0.4808026	4.893028	0.0000000	3.373308
Verlof	44	0.9748791	3.118538	0.5001285	2.565378

Scenario <chr>	count <int>	mean <dbl>	sd <dbl>	median <dbl>	IQR <dbl>
Baseline	62	16.826818	24.777409	8.493835	18.739865
Knip	32	10.906613	10.355405	8.122534	9.700369
Schoolstraat	23	6.722542	4.109748	5.214285	5.188172
Verlof	44	6.087868	6.401220	4.296453	7.029699

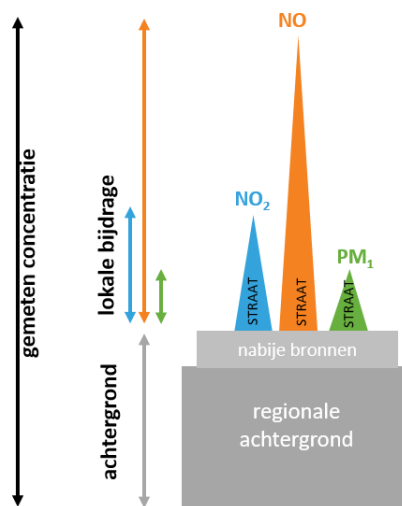
Scenario <chr>	count <int>	mean <dbl>	sd <dbl>	median <dbl>	IQR <dbl>
Baseline	62	0.20079470	0.6597432	-0.02399058	0.82834138
Knip	32	0.31295238	0.6371182	-0.00799686	0.75636967
Schoolstraat	23	0.24903263	0.7563758	-0.01599372	0.82434298
Verlof	44	0.06115778	0.6691708	-0.03198744	0.07597017



Figuur 10: Boxplots met bijhorende Wilcoxon significantiescores voor de genormaliseerde NO₂ (links), NO (midden) en PM₁ (rechts) bijdragen op de schoollocatie tijdens de geïmplementeerde scenario's

7.4. CONCLUSIE KAMPENHOUT

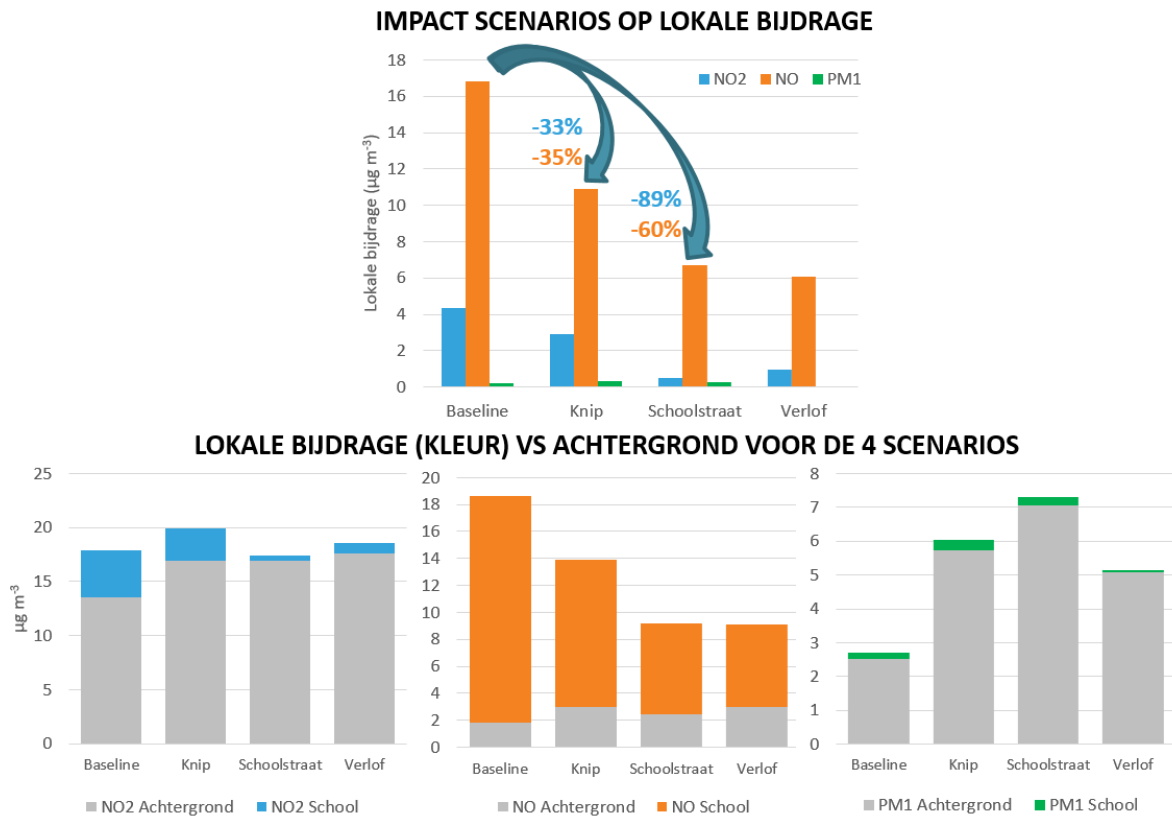
Het doel van deze use case was om de impact van verkeersmaatregelen op de lokale luchtkwaliteit nabij een school te evalueren. Hierbij is het van belang om te beseffen dat een gemeten concentratie steeds bestaat uit zowel een achtergrondbijdrage (regionale, stedelijke en nabije bronnen (N21, N26 in dit geval)) en lokale bijdrage (lokale bronnen: schoolverkeer). De geïmplementeerde verkeersmaatregelen (knip en schoolstraat) hebben enkel impact op de lokale bijdrage en hebben geen impact op de achtergrondconcentraties. Verschillen die te wijten zijn aan veranderingen in achtergrondconcentraties, zijn identiek op achtergrond locatie als op school locatie. De verhouding achtergrond/lokale bijdrage verschilt van pollutant tot pollutant (grote lokale piek NO_2 , NO , PM_{10} op Figuur 11).



Figuur 11: Schematische voorstelling bronbijdrage van de straat in de totale concentratie

Voor deze use case selecteerden we verkeersgerelateerde pollutanten waarvoor de sensoren ook goed presteerden (correlatie/accuraatheid) in de co-locatiecampagne, met name NO_2 , NO en PM_{10} . Wanneer we de verschillende sensorlocaties (school, achtergrond, omgeving) vergelijken, zien we een vergelijkbare dynamiek (tijdreeksen) op de beschouwde sensorlocaties (achtergrond, school, omgeving) door de invloed van regionale/stedelijke/nabije bronnen in de gemeten concentratie (Figuur 11). Grootste locatieverschillen worden opgemeten voor NO , gevolgd door NO_2 en PM_{10} . Vooral voor NO lijken er grote concentratiegradiënten te bestaan in functie van de afstand tot de weg (kortlevende pollutant). We ondervonden een duidelijke impact van de fluctuaties in de achtergrondconcentratie op de scenarioverschillen (grijze balkjes in Figuur 12) met hogere achtergrondconcentraties tijdens de scenario's en verlofdagen.

Na correctie voor de achtergrondconcentraties zien we **gedurende de scenario's** (8-9u/11-12u (woensdag)/15-16u) duidelijke concentratieafnames in de lokale bijdrage voor NO (tot 60%) en NO_2 (tot 89%) ten gevolge van de knip en schoolstraat. De schoolstraat lijkt hierbij de meest efficiënte verkeersmaatregel met resulterende lokale pollutantbijdragen vergelijkbaar met verlofdagen. Voor PM_{10} zien we geen extra bijdrage op de schoollocatie ($\sim 0.2 \mu\text{g m}^{-3}$) waardoor ook geen effecten van de verkeersscenario's kunnen worden waargenomen. Rekening houdend met het landelijk karakter (\sim verkeersdrukke, \sim gemeten concentraties) van de beschouwde monitoringlocaties en de beperkte implementatietijd van de scenario's (30min tijdens ochtend, 45min tijdens namiddag) kunnen we stellen dat de verkeersmaatregelen een duidelijke impact lijken te hebben op de lokale luchtkwaliteit.



Figuur 12: Samenvatting van NO₂, NO en PM₁ meetresultaten: bijdrage van lokaal verkeer vs achtergrondconcentratie gedurende de scenario's (onder) en impact van de geïmplementeerde scenario's op de lokale NO₂, NO en PM₁ bijdrage tijdens de geïmplementeerde scenario's (boven).

Naast de focus van deze use case op luchtkwaliteit, kunnen bijkomende positieve effecten van de schoolstraat verwacht worden op mobiliteit, geluid, gezondheid en welbevinden:



Mobiliteit

Gaan kinderen (en ouders) op een andere manier naar school?



Luchtkwaliteit

Verbeterd de luchtkwaliteit in en rond de school?



Geluid

Verbeterd de geluidsoverlast in de buurt van de school?



Gezondheid

Verbeterd de gezondheid van de kinderen?



Welbevinden

Voelen ouders, kinderen en schoolteam zich meer tevreden?

Zo toonde een uitgebreidere interventiestudie op basis van 3 weken testopstelling bij 6 Vlaamse scholen (Den Hond et al. 2020) volgende effecten aan:

- **Actieve verplaatsing** naar school: toename met 4% (na 3 weken), navraag scholen na enkele maanden: toename met 30%
- Geluid: geluidsniveaus blijven hoog aan de schoolpoort, maar **perceptie van geluid nam af** bij ouders en kinderen (perceptie bepaald in grote mate hinder die je ervaart)
- **Luchtwegen bij kinderen**: ontstekingsparameter daalt met 14%, elasticiteit luchtwegen neemt toe met 10%, dit zijn gemiddelde waarden (effecten niet in alle scholen even groot);
- GEEN statistisch significant effect op cardiovasculaire parameters kinderen

- GEEN statistisch significant effect op hoeveelheid beweging met matige, krachtige, zeer krachtige intensiteit bij kinderen
- Welbevinden:
 - o **Toename veiligheidsgevoel** in straat: 77% algemeen maar grotere toename voor ouders van stappers (betere doorgang op voetpad) en trappers (minder drukte in de straat)
 - o **Verbeterde bereikbaarheid**: 56% algemeen maar grotere toename voor ouders van stappers en trappers
 - o Tijdsdruk: 62% geen toename, 13% verhoogde tijdsdruk, 25% verlaagde tijdsdruk
 - o **Toename sfeer en kindvriendelijkheid** van de schoolstraat

Wat betreft het opzet en gebruik van sensormetingen voor de evaluatie van de schoolstraat kunnen we het volgende besluiten:

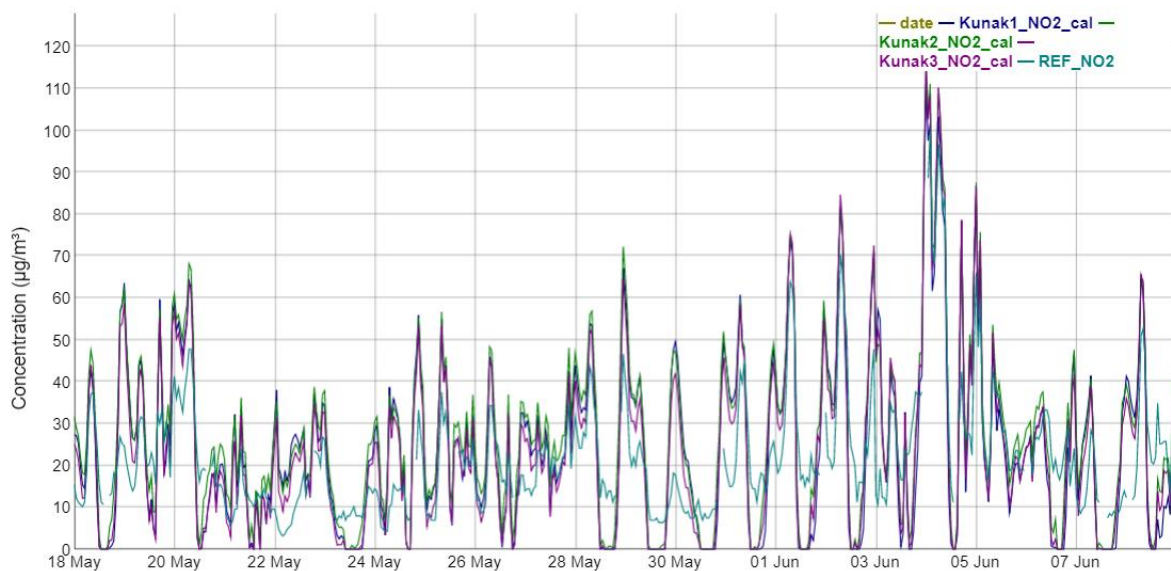
- We stelden vast dat er over het algemeen een goede overeenkomst is tussen de sensoren onderling
- De impact van de schoolstraat is meetbaar voor NO en NO₂ (voor NO duidelijker dan voor NO₂) maar niet voor PM₁ (en andere PM fracties)
- De waargenomen verschillen voor NO en NO₂ (bij invoering schoolstraat) zijn groter dan de onderlinge verschillen tussen de sensoren
- Het is goed om een achtergrond te hebben als referentie omdat de achtergrondconcentraties ook kunnen variëren en hierdoor het effect van de maatregel niet duidelijk is wanneer we enkel naar de totale concentratie kijken. Bovendien moeten de data op een juiste manier vergeleken worden en rekening gehouden met deze wijzigingen in achtergrondconcentraties

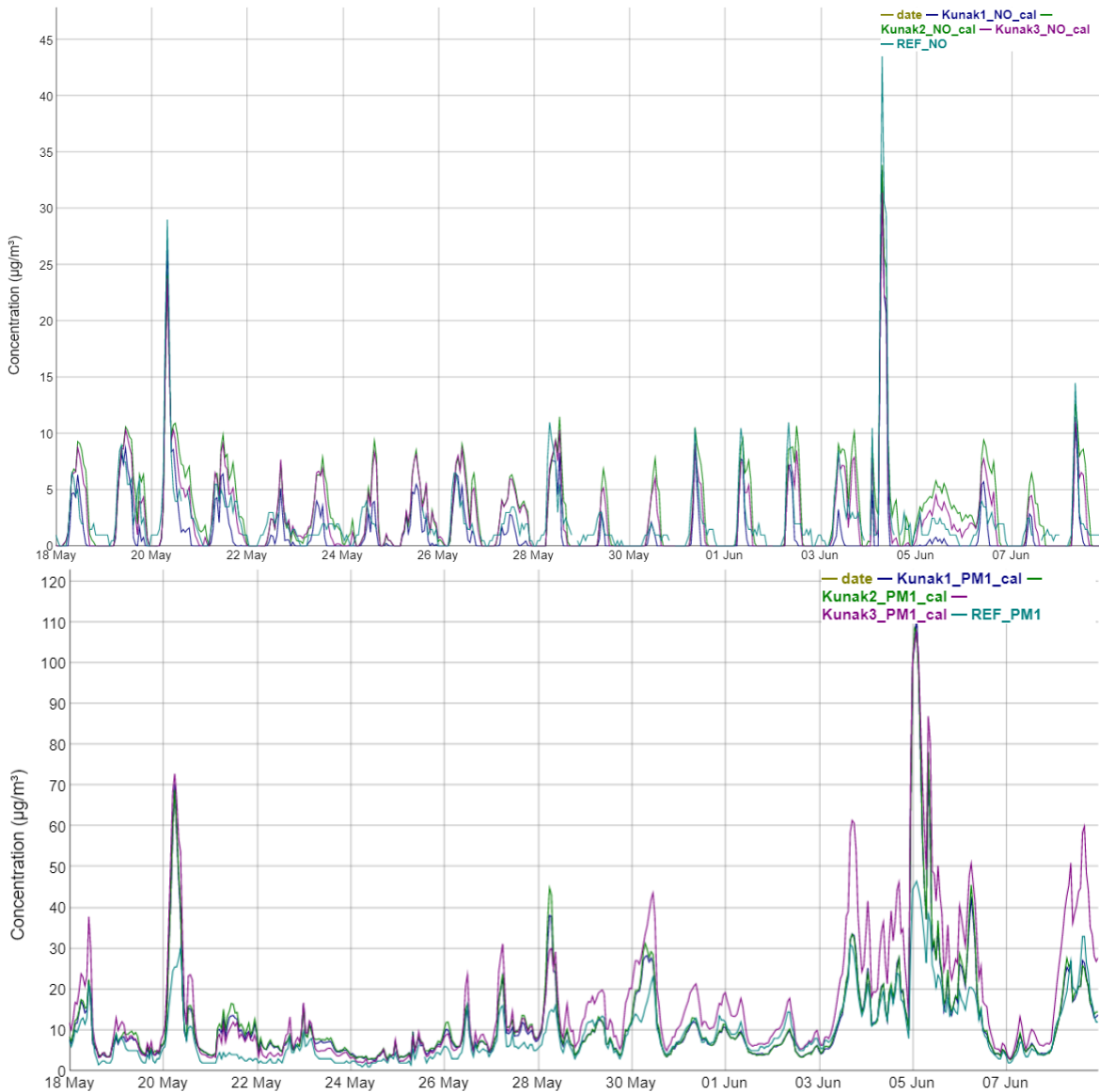
HOOFDSTUK 8. DATAKWALITEIT NA DE MEETCAMPAGNE

Na de meetcampagne in Kampenhout werden alle sensoren opnieuw naast een referentiemeetstation (42R802) van de VMM geplaatst gedurende een periode van 3 weken (18/5/2021 - 8/6/2021) om de datakwaliteit na ~5 maanden looptijd opnieuw te evalueren en de potentiële impact van sensordift na te gaan. Zowel de performantie van de ruwe als de herschaalde (op basis van co-locatie 1) data werd bekeken.

8.1. TIJDREEKSEN

Op basis van de tijdreeksen van de ruwe (Appendix 8) en herschaalde data (Figuur 13) kunnen we stellen dat er verschillende afwijkingen worden geobserveerd in de sensormetingen in vergelijking met de eerste co-locatiecampagne (vb PM₁ Kunak). Dit heeft allicht te maken met de verschillende meteorologische omstandigheden (vb Temp, RH) tijdens co-locatie 2 (zomer) in vergelijking met co-locatie 1 (winter).

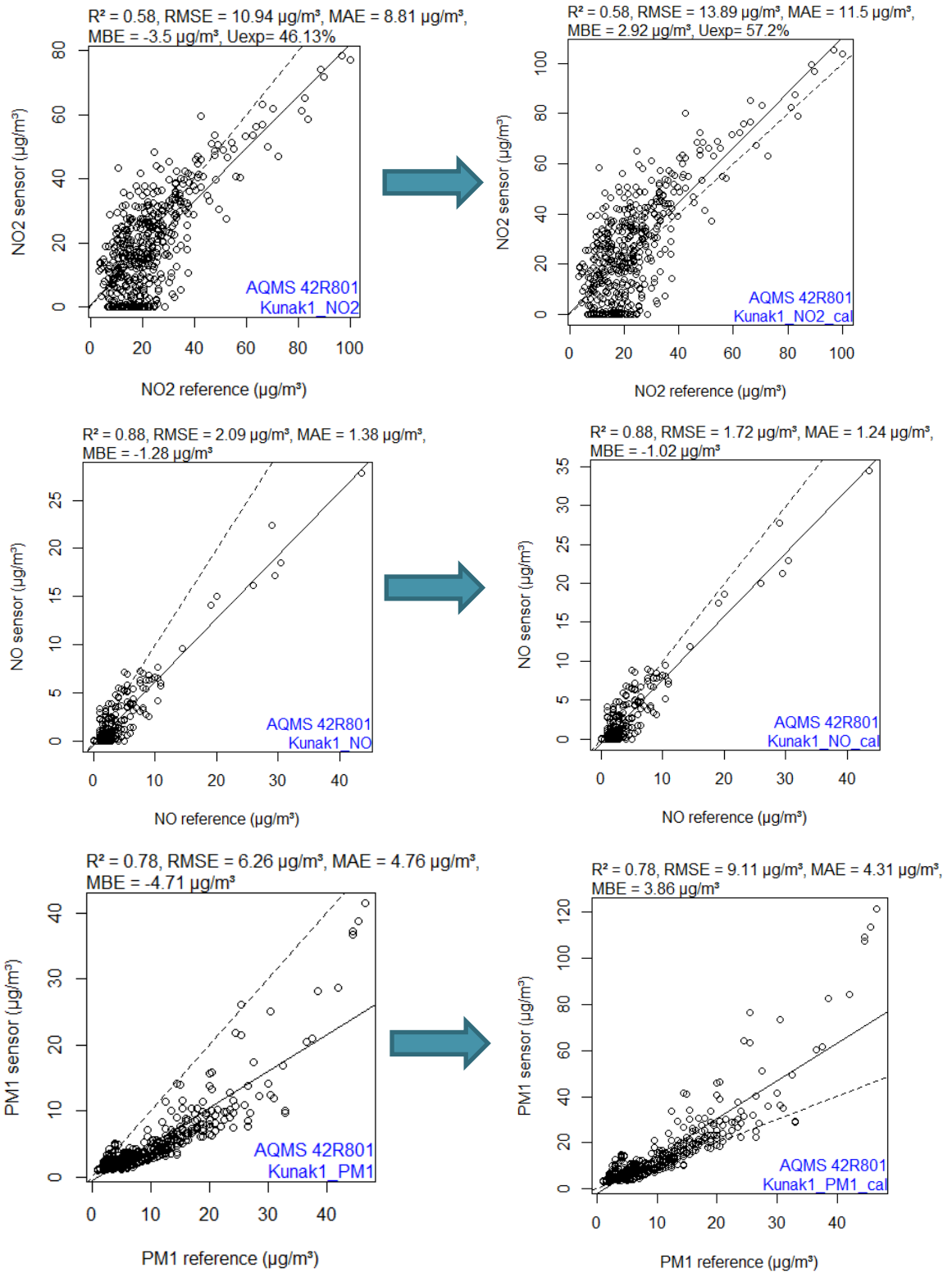


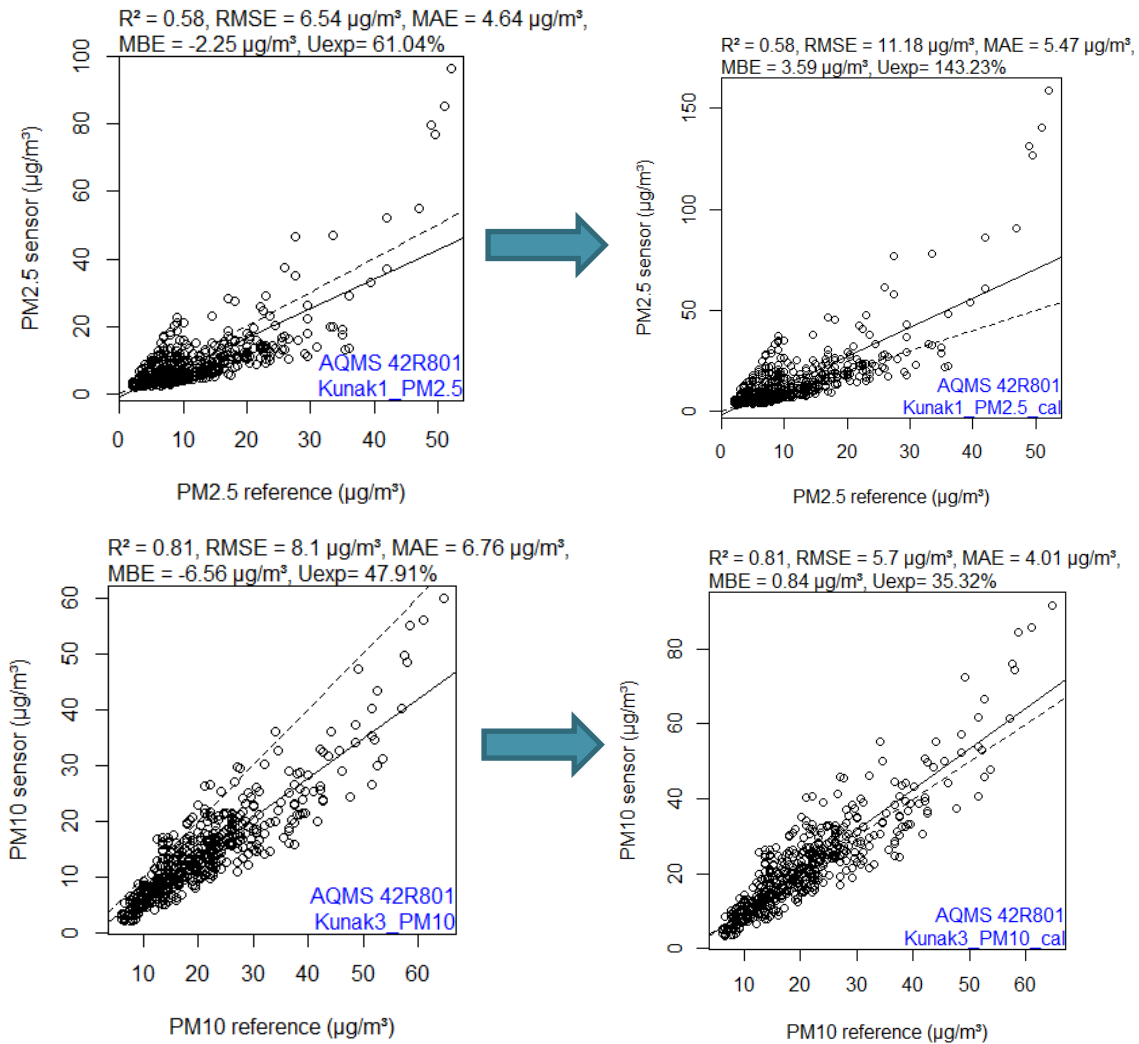


Figuur 13 Tijdreeksen van de herschaalde (co-locatie 1) Kunak NO₂ (boven), NO (midden) en PM₁ (onder) sensordata, vergeleken met de referentiemetingen (42R802) tijdens co-locatie 2.

8.2. SENSORPERFORMANTIE

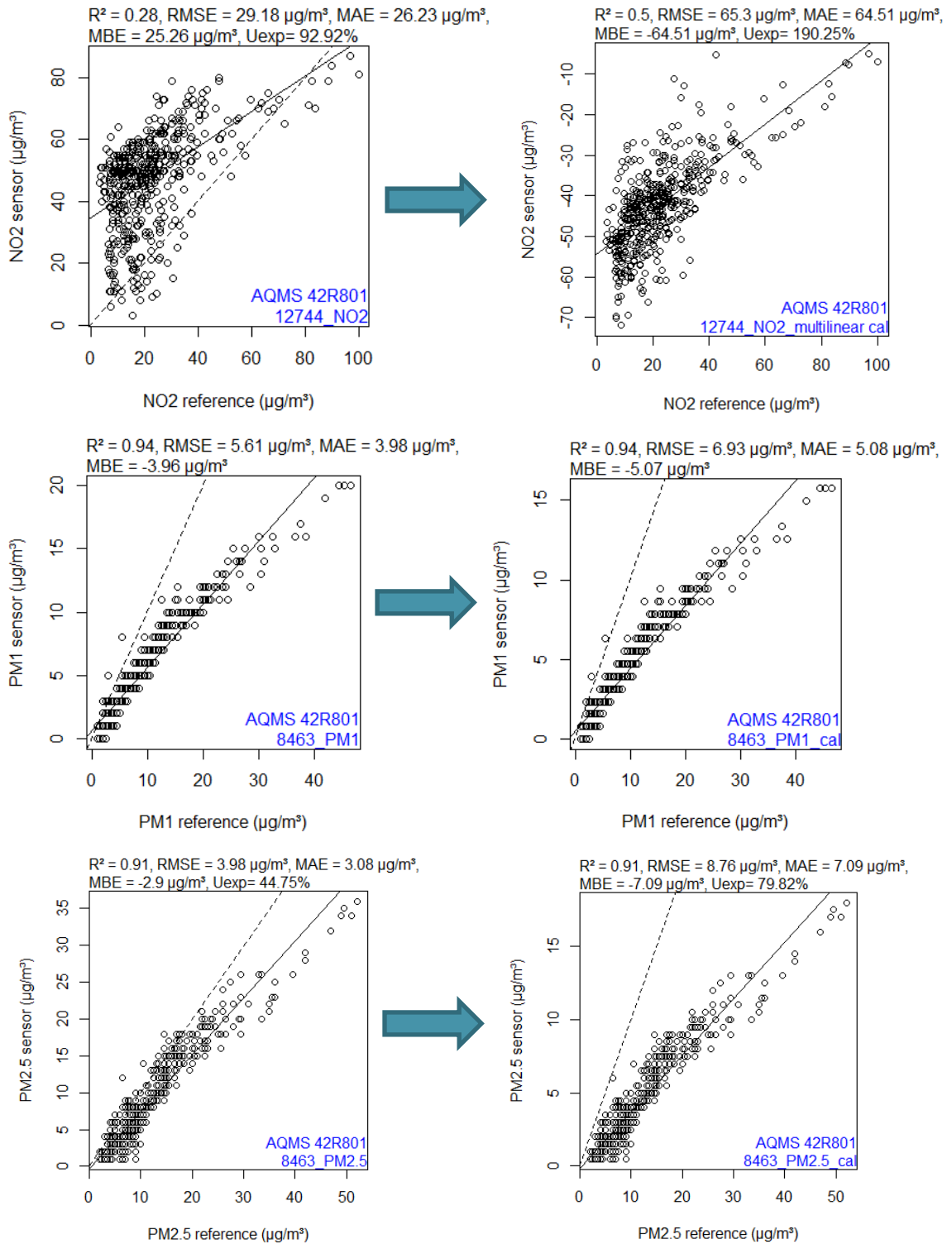
Er valt op te merken dat de correlatie slechter presteert voor Kunak NO₂ en NO (terwijl accuraatheid vergelijkbaar is). Dit resulteert dan ook in een lagere performantie van de herschaalde data. Daarentegen lijkt Kunak nu wel beter te presteren voor PM₁, PM_{2.5} en PM₁₀ (lagere RH ivm co-locatie 1) met zichtbaar betere lineariteit tussen sensor en referentie (Figuur 14).

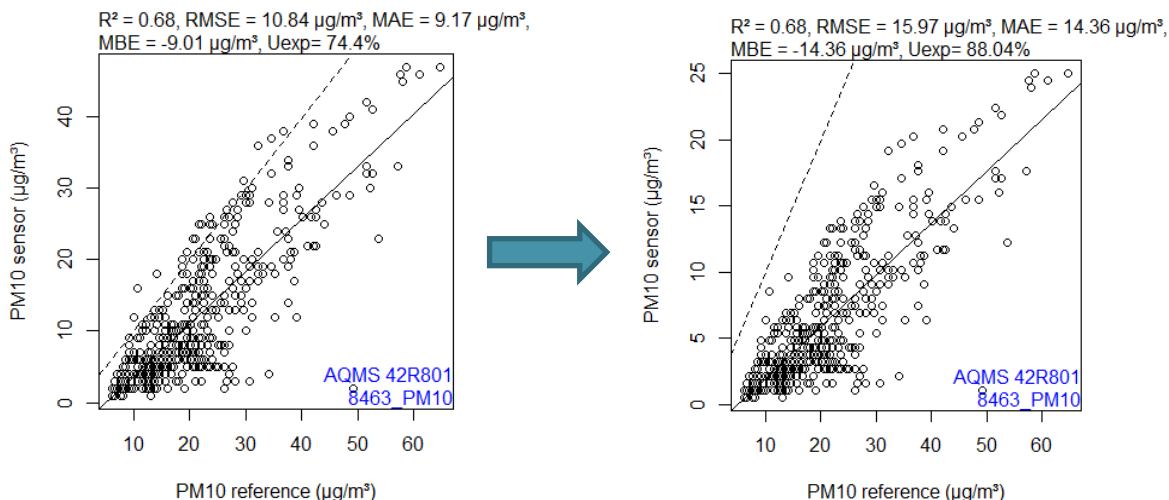




Figuur 14: Effect van de slope herschaling op de sensordata van co-locatie 2 voor Kunak (NO_2 , NO , PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10}). De ruwe sensordata wordt telkens op de linkergrafiek weergegeven en de herschaalde data op de rechtergrafiek. Bijhorende datakwaliteitsparameters (R^2 , RMSE, MAE, MBE en U_{exp}) worden bovenaan elke grafiek weergegeven.

Airly presteert iets beter voor NO_2 (maar nog steeds veel slechter dan Kunak), maar de multilineaire herschaling lijkt niet meer op te gaan (andere meteorologische omstandigheden ~ effect temperatuur). Voor PM zagen we vorige co-locatie een lichte overschatting, terwijl PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} tijdens de 2^e co-locatie onderschattingen vertonen. Dit maakt dat de oorspronkelijke herschalingsfactoren leiden tot grotere afwijkingen na herschaling (RMSE, MAE, MBE). De geïmplementeerde herschalingsparameters verbeteren de Kunak data nog steeds, maar verslechteren de performantie van de Airly data. Het is duidelijk dat de multilineaire kalibratie op basis van temperatuur niet stand houdt buiten de omgevingscondities waarop het getraind werd (winter vs zomer).





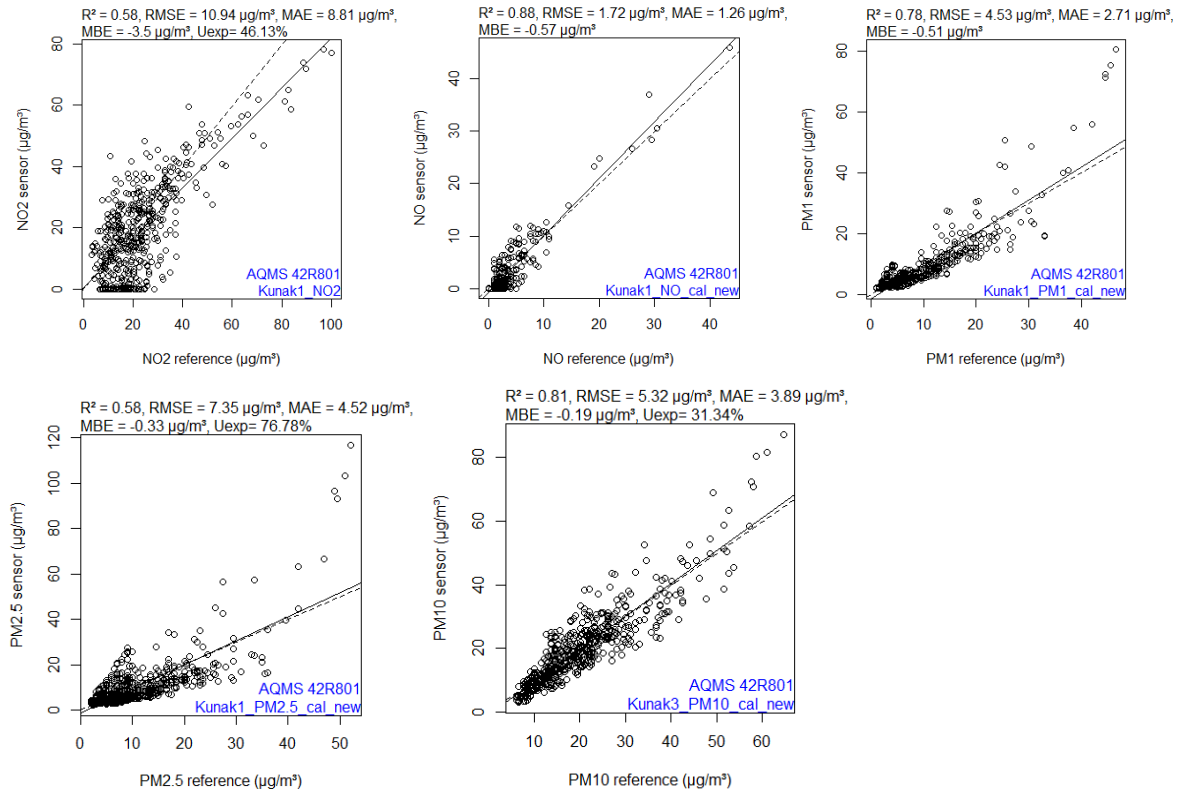
Figuur 15: Effect van de slope en multilineaire (NO_2) herschaling op de sensordata van co-locatie 2 voor Airly (NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ en PM_{10}). De ruwe sensordata wordt telkens op de linkergrafiek weergegeven en de herschaalde data op de rechtergrafiek. Bijhorende datakwaliteitsparameters (R^2 , RMSE, MAE, MBE en U_{exp}) worden bovenaan elke grafiek weergegeven.

8.3. HERSCHALING

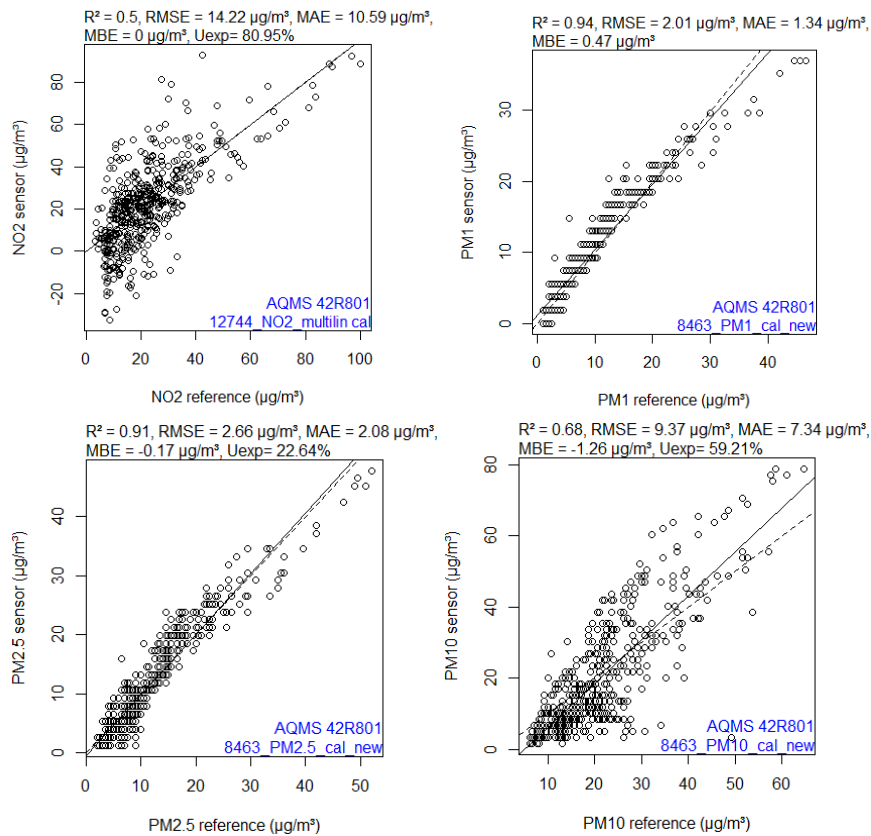
Wanneer we de herschalingsparameters herberekenen zoals omschreven in §6.2, maar dan op basis van co-locatie 2 zien we dat deze soms aanzienlijk verschillen van deze berekend op basis van co-locatie 1 (Tabel 11). De resulterende sensorperformantie na de nieuwe herschaling is opnieuw vrij goed en vergelijkbaar met de performantie verkregen in co-locatie 1, zoals te zien in Figuur 14 en 15.

Tabel 11: Herschalingsparameters (slope + multilineair voor Airly NO_2) voor NO_2 , NO , PM_{10} , $PM_{2.5}$ en PM_{10} berekend op basis van de data uit co-locatie 1 (boven) en co-locatie 2 (onder).

Co-locatie 1 (winter)						
	NO2	NO	PM1	PM2.5	PM10	NO2 Multilin
Kunak1	0.7424	0.8073	0.3419	0.6062	0.6617	
Kunak2	0.7817	0.9636	0.3344	0.605	0.6628	
Kunak3	0.7483	0.9436	0.3216	0.5979	0.6522	
Airly8463	-	-	1.219	1.907	1.66	
Airly12744	3.973	-	1.074	1.626	1.311	(sensor_NO2+1.83*sensor_Temp-121.55)/1.08
Airly12798	-	-	1.231	1.899	1.62	
Co-locatie 2 (zomer)						
	NO2	NO	PM1	PM2.5	PM10	NO2 Multilin
Kunak1	0.833	0.606	0.510	0.824	0.826	
Kunak2	0.962	1.014	0.518	0.821	0.827	
Kunak3	0.846	0.887	0.677	0.736	0.685	
Airly8463	1.828	-	0.540	0.754	0.596	(sensor_NO2-1.96168*sensor_Temp-9.87919)/0.54435
Airly12744	1.679	-	0.519	0.696	0.538	(sensor_NO2+1.91556*sensor_Temp-64.26694)/0.57749
Airly12798	1.602	-	0.535	0.729	0.581	(sensor_NO2+0.38925*sensor_Temp-35.79665)/0.62856



Figuur 16: Performantie van de Kunak NO₂, NO, PM₁, PM_{2.5} en PM₁₀ data na nieuwe slope herschaling op basis van co-locatie 2



Figuur 17: Performantie van de Airly NO₂, PM₁, PM_{2.5} en PM₁₀ data na nieuwe slope herschaling op basis van co-locatie 2

8.4. CONCLUSIE

We zien dat de kalibratie (herschaling) op basis van co-locatiemetingen niet robuust presteert onder andere omgevingscondities (vb. winter-zomer). Dit kan verklaard worden door de gevoeligheid van sensoren voor wisselende omgevingscondities (vb temperatuur, relatieve vochtigheid, andere pollutanten) en/of sensorveroudering ("drift/aging") doorheen de tijd.

Deze waarnemingen hebben belangrijke implicaties voor toekomstige toepassingen van luchtkwaliteitssensoren in smart city/beleidsinitiatieven. We toonden aan dat een eenvoudige lokale herschaling op basis van co-locatiemetingen belangrijk is om accurate en zinvolle sensordata te verkrijgen, maar zien nu dat deze herschaling niet continu opgaat in de tijd, maar varieert onder invloed van meteorologische omstandigheden (zomer vs winter) en/of sensordrift. In toekomstige toepassingen moet daarom uitgegaan worden van wederkerende co-locatiecampagnes en/of zogenaamde netwerkkalibraties waar 1 of enkele sensor(en) naast een referentiestation geplaatst worden en er continu herschalingsparameters worden opgeschaald naar het gehele sensornetwerk. Aangezien de precisie van de sensoren vaak goed is, zijn de herschalingsfactoren vaak vergelijkbaar voor dezelfde type sensoren (Tabel 10). Dit pleit voor dergelijke netwerkkalibraties en/of installatie van een sensor naast een referentiestation om de datakwaliteit continu op te volgen.

REFERENTIES

Elly Den Hond, Annelies De Decker, Karen Van de Vel, Greet De Ridder, Gudrun Koppen, Jan Peters, Martine Van Poppel (2020), Interventiestudie schoolomgeving: impact van schoolstraat, samenvatting, <https://www.zorg-en-gezondheid.be/sites/default/files/atoms/files/Studie%20impact%20schoolstraat%20-%20Samenvatting%20algemene%20publiek.pdf>

EU, 2008. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe.

WHO, 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.